

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

**Bodenstabilität und Auswirkungen dynamischer Lasteinträge auf  
physikalische Eigenschaften von Ackerböden unter  
konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung**

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät  
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von  
Dipl.-Geogr. Alexander Daniel Zink  
aus Alfeld

Kiel 2009

Dekan: Prof. Dr. Uwe Latacz-Lohmann

Gutachter: 1. Prof. Dr. Rainer Horn  
2. Prof. Dr. Rainer Duttmann

eingereicht: 26.02.2009

Datum der Promotion: 30.04.2009



# Inhaltsverzeichnis

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>IV</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>X</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>XI</b>
<b>VERWENDETE SYMBOLE</b>	<b>XII</b>
<b>1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG</b>	<b>1</b>
<b>2 MATERIAL UND METHODEN</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Lage, Geologie und Klima der Versuchsstandorte</b>	<b>10</b>
2.1.1 Versuchsgut Merklingsen (NRW)	10
2.1.2 Versuchsgüter Hohenschulen und Lindhof (SH)	11
<b>2.2 Böden und landwirtschaftliche Nutzung</b>	<b>12</b>
2.2.1 Versuchsregion Nordrhein-Westfalen	12
2.2.2 Versuchregion Schleswig-Holstein	13
<b>2.3 Versuchskonzept</b>	<b>15</b>
<b>2.4 Probenahme, Profilsprache und Laboranalytik</b>	<b>17</b>
2.4.1 Probenahme und Profilsprache	17
2.4.2 Laboranalytik	17
2.4.2.1 Grundanalytik	17
2.4.2.2 Dynamischer Drucksetzungsversuch mit kurzfristigen Spannungseinträgen	19
<b>2.5 Feldversuche</b>	<b>21</b>
2.5.1 Spannungs- und Deformationserfassung	22
2.5.2 Infiltrationsmessungen	24
<b>2.6 Einordnung der Bodenfunktion nach Indikatorsystem</b>	<b>27</b>
<b>2.7 Statistik</b>	<b>27</b>
<b>3 ERGEBNISSE</b>	<b>28</b>
<b>3.1 Böden und bodenphysikalische Ausgangsbedingungen der Versuchstandorte</b>	<b>28</b>
3.1.1 Versuchsgut Merklingsen, NRW, konservierend bewirtschafteter Schlag Reinecke	28
3.1.2 Versuchsgut Merklingsen, NRW, konventionell bewirtschafteter Schlag Ruhmlifholz	29
3.1.3 Versuchsgut Hohenschulen, SH, konservierend bewirtschafteter Schlag SFB 192	30
3.1.4 Versuchsgut Lindhof, SH, konventionell bewirtschafteter Schlag Große Hofkoppel	31
<b>3.2 Bodenstabilität unter statisch und dynamisch impulsartiger Belastung</b>	<b>32</b>
3.2.1 Stabilitätsuntersuchungen am Beispiel der Lössstandorte (NRW)	32
<b>3.3 Mechanische Belastungen im Feldversuch</b>	<b>35</b>
3.3.1 Kontaktflächen und mittlere Kontaktflächendrücke	35
3.3.2 Spannungs- und Deformationsmessungen unter variierenden Randbedingungen	37

3.3.2.1	Bodenausgangssubstrat	37
3.3.2.2	Bodenbearbeitung	38
3.3.2.3	Auflast	39
3.3.2.4	Reifeninnendruck	40
3.3.2.5	Überrollhäufigkeit	41
3.3.3	Bodendeformation unter einfacher und mehrfacher Befahrung	42
<b>3.4</b>	<b>Bodenstabilität gegenüber dynamischer Belastung</b>	<b>46</b>
3.4.1	Belastungspotential der Böden in Nordrhein-Westfalen	46
3.4.1.1	Bodenstabilitätsparameter Vorbelastung gegenüber externen Hauptspannungseinträgen	46
3.4.1.2	Scherparameter gegenüber externen Hauptspannungskombinationen	50
3.4.2	Belastungspotential der Böden in Schleswig-Holstein	54
3.4.2.1	Bodenstabilitätsparameter Vorbelastung gegenüber externen Hauptspannungseinträgen	54
3.4.2.2	Scherparameter gegenüber externen Hauptspannungskombinationen	56
<b>3.5</b>	<b>Auswirkung der mechanischen Belastung auf ausgewählte Bodenfunktionskennwerte</b>	<b>62</b>
3.5.1	Auflastabhängige Veränderung der Vorbelastung	62
3.5.2	Auflastabhängige Veränderung der Luftkapazität	64
3.5.3	Auflastabhängige Veränderung der Luftleitfähigkeit	66
3.5.4	Auflastabhängige Veränderung der hydraulischen Leitfähigkeit unter Berücksichtigung mehrerer Labor- und Feldmessverfahren	69
3.5.4.1	Labormessungen mit dem Haubenpermeameter	69
3.5.4.2	Infiltrationsmessungen	72
3.5.5	Auflastabhängige Einordnung der Gefügeveränderung nach Indikatorsystem (einmalige Befahrung)	75
3.5.5.1	Geschiebemergelstandorte, SH	75
3.5.5.2	Lössstandorte, NRW	77
3.5.6	Auflastabhängige Veränderung der Bodenstabilität und -leitfähigkeit unter mehrfacher Befahrung	80
3.5.7	Auflastabhängige Einordnung der Gefügeveränderung nach Indikatorsystem unter Berücksichtigung mehrfacher Befahrung	83
<b>4</b>	<b>DISKUSSION</b>	<b>85</b>
<b>4.1</b>	<b>Einfluss des Bodenausgangssubstrates auf die Druckfortpflanzung</b>	<b>85</b>
<b>4.2</b>	<b>Einfluss landtechnischer und pflanzenbaulicher Maßnahmen auf den mechanischen Spannungseintrag</b>	<b>86</b>
4.2.1	Bodenbearbeitung	86
4.2.2	Auflast	88
4.2.3	Reifeninnendruck	91
4.2.4	Überrollhäufigkeit	92
<b>4.3</b>	<b>Belastungspotenzial gegenüber dynamischem Lasteintrag</b>	<b>94</b>

4.4	Auswirkung der mechanischen Belastung auf Bodenkenngrößen	101
4.5	Bewertung der auflastabhängigen Bodenfunktionsänderung nach Indikatorsystem UBA (2004a)	108
5	FAZIT	111
6	ZUSAMMENFASSUNG	115
7	ABSTRACT	118
8	LITERATURVERZEICHNIS	120
9	ANHANG	133

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Geographische Lage der Versuchstandorte .....	10
Abbildung 2:	Beispiel des Feldversuchsaufbaus einer Untersuchungsfläche .....	16
Abbildung 3:	Der Lastrahmen MOVIS mit Betonregistergewichten im Trägerrahmen ....	17
Abbildung 4:	Dynamischer Drucksetzungsversuch; links: vier impulsartige Einzelbelastungen über den Wechsel der Auflaststufen 70 zu 100kPa (oben) in zeitlicher Gegenüberstellung zu einem im Feldversuch ermittelten Belastungspfad (unten); rechts: dynamischer Belastungsverlauf mit zehn Auflastwiederholungen und 8 Druckstufen bis 400kPa (oben) in Gegenüberstellung zum vertikalen Sofortsetzungsverhalten der Bodenprobe (unten).....	20
Abbildung 5:	Graphisches Auswertungsverfahren der Vorbelastung nach Casagrande am Beispiel mittlerer Setzungsverläufe der dynamischen und statischen Drucksetzungsversuche eines Unterbodenhorizontes (40cm) der konventionell bewirtschafteten Fläche in NRW (n=6) .....	21
Abbildung 6:	Feldversuchsaufbau einer Spannungsmessung (SST) mit kombinierter Deformationsmessung (DTS); links: Verlauf der gemessenen Spannungseinträge der sechs Dehnmessstreifen in drei Installationstiefen am Beispiel einer Einzelüberfahung eines zweiachsigen Ackerschleppers .....	23
Abbildung 7:	Zweidimensionaler Bewegungspfad einer DTS- Messung mit der Differenzierung einzelner Verformungsanteile am Beispiel eines zweiachsigen Ackerschleppers .....	24
Abbildung 8:	Aufbau des Guelph-Permeameters, links für geringe Tiefen, rechts für hohe Bohrloch-tiefen; Quelle: (Durner, 2008) .....	25
Abbildung 9:	Schematische Abbildung des Versuchsaufbaus bei einer Feldinfiltrationsmessung mit dem Haubeninfiltrometer; Quelle: (Schwärzel & Punzel, 2007).....	26
Abbildung 10:	Mittlere Setzungsdifferenzen (1. zu 10. Belastung) im Wiederverdichtungs- ( $\Delta_1$ ) und Erstverdichtungsbereich ( $\Delta_2$ ) (n=120; SD).....	33
Abbildung 11:	Vergleich des Bodenstabilitätsparameters Vorbelastung unter statischer und dynamischer Belastung, NRW konservierende Bodenbearbeitung (n=6; SD) .....	34
Abbildung 12:	Vergleich des Bodenstabilitätsparameters Vorbelastung unter statischer und dynamischer Belastung, NRW konventionelle Bodenbearbeitung; (n=6; SD).....	34
Abbildung 13:	Mittlere Kontaktflächen und Kontaktflächendrücke der drei Radlastvarianten unter Berücksichtigung des Versuchsfaktors Reifeninnendruck (n=16, alle Versuchstandorte).....	36

- Abbildung 14: Unterschiede der Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) bezüglich des Versuchsfaktors Ausgangsmaterial (Mg= Geschiebemergel; Lo= Löss) dargestellt als Box-Whisker-Plots für alle Messtiefen (Abb. a, n=315) zusammengefasst sowie jede Einzelmessstiefe (Abb. b, n=105); Wilcoxon p=0,05..... 38
- Abbildung 15: Unterschiede der Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) bezüglich des Versuchsfaktors Bodenbearbeitungssystem (kons= konservierend; konv= konventionell) dargestellt als Box-Whisker-Plots für alle Messtiefen zusammengefasst (Abb a, n=297) sowie jede Einzelmessstiefe (Abb. b, n=99); Wilcoxon p=0,05..... 39
- Abbildung 16: Unterschiede der Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) bezüglich des Versuchsfaktors Radlast dargestellt als Box-Whisker-Plots für alle Messtiefen zusammengefasst (Abb. a) sowie jede Einzelmessstiefe (Abb. b) (n siehe Abb.); Wilcoxon p=0,05..... 40
- Abbildung 17: Unterschiede der Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) bezüglich des Versuchsfaktors Reifeninnendruck dargestellt als Box-Whisker-Plots für jede Einzelmessstiefe unter Berücksichtigung der Radlastvarianten (n= siehe Abb.); Wilcoxon p=0,05..... 41
- Abbildung 18: Entwicklung der gemittelten Spannungseinträge (arith. Mittelwerte der 1.Hauptspannung) aller Auflastvarianten in drei Messtiefen (20, 40, 60cm) mit 10facher Überfahung (n=16)..... 42
- Abbildung 19: Vertikales Deformationsverhalten der Löss- und Geschiebemergelböden in den Messtiefen 20cm und 40cm unter Berücksichtigung des Bodenwassergehaltes in Abhängigkeit der Versuchsfaktoren Auflast, Bodenbearbeitung und Reifeninnendruck44
- Abbildung 20: Änderung des Deformationsverhaltens aller Versuchsstandorte in der Messtiefe 20cm mit 10facher Befahrung (oben: Versuchsvariante 3,3Mg; unten: 7,5Mg Radlast) ..... 45
- Abbildung 21: Gegenüberstellung der mechanischen Bodenstabilitätskennwerte ( $P_{V_{stat}}$ ;  $P_{V_1}$ ;  $P_{V_{10}}$ ) der konservierend bearbeiteten Versuchsfläche in NRW (n=6 pro Horizont, arith. Mittel) unter Berücksichtigung der im Freiland gemessenen Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) der 1. und 10. Überfahrt..... 47
- Abbildung 22: Gegenüberstellung der vertikalen mechanischen Bodenstabilitätskennwerte ( $P_{V_{stat}}$ ;  $P_{V_1}$ ;  $P_{V_{10}}$ ) der konventionell bearbeiteten Versuchsfläche in NRW (n=6 pro Horizont, arith. Mittel) unter Berücksichtigung der im Freiland gemessenen Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) der 1. und 10. Überfahrt..... 47
- Abbildung 23: Gegenüberstellung der vertikalen mechanischen Bodenstabilitätskennwerte (statischer und dynamischer  $P_v$ ) der konservierend bearbeiteten Versuchsflächen in NRW (n=6 pro Horizont, arith. Mittel) und der im Freiland gemessenen Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) zwei unterschiedlicher Radlastvarianten (3,3 und 7,5Mg) unter Berücksichtigung des Versuchsfaktors Reifeninnendruck..... 49

- Abbildung 24: Gegenüberstellung der vertikalen mechanischen Bodenstabilitätskennwerte (statischer und dynamischer  $P_v$ ) der konventionell bearbeiteten Versuchsflächen in NRW ( $n=6$  pro Horizont, arith. Mittel) und der im Freiland gemessenen Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) zwei unterschiedlicher Radlastvarianten (3,3 und 7,5Mg) unter Berücksichtigung des Versuchsfaktors Reifeninnendruck ..... 50
- Abbildung 25: Gegenüberstellung der im Labor gemessenen Stabilitätsparameter Köhasion und Winkel der inneren Reibung ( $n=3$ ) zu den im Feld ermittelten größten und kleinsten Hauptspannungseinträgen der Überfahrungsversuche mit unterschiedlichen Radlasten für die konservierend bearbeitete Versuchsfläche in NRW (mittlere Hauptspannungskombinationen ( $n=3$ ))..... 51
- Abbildung 26: Gegenüberstellung der im Labor gemessenen Stabilitätsparameter Köhasion und Winkel der inneren Reibung ( $n=3$ ) zu den im Feld ermittelten größten und kleinsten Hauptspannungseinträgen der Überfahrungsversuche mit unterschiedlichen Radlasten für die konventionell bearbeitete Versuchsfläche in NRW (mittlere Hauptspannungskombinationen ( $n=3$ ))..... 52
- Abbildung 27: Gegenüberstellung der im Labor gemessenen Stabilitätsparameter Köhasion und Winkel der inneren Reibung ( $n=3$ ) zu den im Feld ermittelten größten und kleinsten Hauptspannungseinträgen der Überfahrungsversuche mit 7,5Mg Radlast und unterschiedlichen Reifeninnendrücken für die konservierend bearbeitete Versuchsfläche in NRW (mittlere Hauptspannungskombinationen ( $n=3$ ))..... 53
- Abbildung 28: Gegenüberstellung der im Labor gemessenen Stabilitätsparameter Köhasion und Winkel der inneren Reibung ( $n=3$ ) zu den im Feld ermittelten größten und kleinsten Hauptspannungseinträgen der Überfahrungsversuche mit 7,5Mg Radlast und unterschiedlichen Reifeninnendrücken für die konventionell bearbeitete Versuchsfläche in NRW (mittlere Hauptspannungskombinationen ( $n=3$ ))..... 54
- Abbildung 29: Gegenüberstellung der statischen Bodenstabilitätskennwerte ( $P_{v,stat}$  pF1,8; pF 2,5) der zwei Versuchsflächen in SH ( $n=6$  pro Horizont, arith. Mittel) und der im Freiland gemessenen Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) der verschiedenen Radlastvarianten . 55
- Abbildung 30: Gegenüberstellung der statischen Bodenstabilitätskennwerte ( $P_{v,stat}$  pF1,8; pF 2,5) der zwei Versuchsflächen in SH ( $n=6$  pro Horizont, arith. Mittel) und der im Freiland gemessenen Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) zwei unterschiedlicher Radlastvarianten (3,3 und 7,5Mg) unter Berücksichtigung des Versuchsfaktors Reifeninnendruck ..... 56
- Abbildung 31: Gegenüberstellung der im Labor gemessenen horizontspezifischen Stabilitätsparameter Köhasion und Winkel der inneren Reibung zu den im Feld ermittelten größten und kleinsten Hauptspannungseinträgen der Überfahrungsversuche mit unterschiedlichen Radlasten für die konservierend bearbeitete Versuchsfläche in SH (mittlere Hauptspannungskombinationen ( $n=3$ )) .... 57



- Abbildung 32: Gegenüberstellung der im Labor gemessenen horizontspezifischen Stabilitätsparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung zu den im Feld ermittelten größten und kleinsten Hauptspannungseinträgen der Überfahrungsversuche mit unterschiedlichen Radlasten für die konventionell bearbeitete Versuchsfläche in SH (mittlere Hauptspannungskombinationen (n=3)) .... 58
- Abbildung 33: Gegenüberstellung der im Labor gemessenen horizontspezifischen Stabilitätsparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung zu den im Feld ermittelten größten und kleinsten Hauptspannungseinträgen der Überfahrungsversuche mit 7,5Mg Radlast und unterschiedlichen Reifeninnendrücken für die konservierend bearbeitete Versuchsfläche in SH (mittlere Hauptspannungskombinationen (n=3)) ..... 60
- Abbildung 34: Gegenüberstellung der im Labor gemessenen horizontspezifischen Stabilitätsparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung zu den im Feld ermittelten größten und kleinsten Hauptspannungseinträgen der Überfahrungsversuche mit 7,5Mg Radlast und unterschiedlichen Reifeninnendrücken für die konventionell bearbeitete Versuchsfläche in SH (mittlere Hauptspannungskombinationen (n=3)) ..... 61
- Abbildung 35: Mittlere Veränderung der Vorbelastung (pF1,8) durch einmalige mechanische Belastung unter zusammenfassender Betrachtung der verschiedenen Ausgangssubstrate und Bodenbearbeitungssysteme (n= siehe Abb.; PV nach DVWK (1995))..... 62
- Abbildung 36: Horizontspezifische mittlere Veränderung der Vorbelastung (pF1,8) des Ausgangssubstrates Geschiebemergel durch einmalige mechanische Belastung (n= siehe Abb.; PV nach DVWK (1995))..... 63
- Abbildung 37: Horizontspezifische mittlere Veränderung der Vorbelastung des Ausgangssubstrates Löss durch einmalige mechanische Belastung (n= siehe Abb.; PV nach DVWK (1995)) ..... 64
- Abbildung 38: Horizontspezifische mittlere Veränderung der Luftkapazitäten des Ausgangssubstrates Geschiebemergel durch einmalige mechanische Belastung bis 7,5Mg Radlast unter zusammenfassender Betrachtung der verschiedenen Bodenbearbeitungssysteme und der im Geschiebemergel vorhandenen räumlichen Substratheterogenität (n= siehe Abb.; LK nach DVWK (1997)) ..... 65
- Abbildung 39: Horizontspezifische mittlere Veränderung der Luftkapazitäten des Ausgangssubstrates Löss durch einmalige mechanische Belastung bis 7,5Mg Radlast unter zusammenfassender Betrachtung der verschiedenen Bodenbearbeitungssysteme (n= siehe Abb.; LK nach DVWK (1997)) ..... 66
- Abbildung 40: Mittlere Veränderung der Luftleitfähigkeit (pF1,8) durch einmalige mechanische Belastung bis 7,5Mg Radlast unter Berücksichtigung der verschiedenen Ausgangssubstrate (Mediane, n= siehe Abb.; KI nach DVWK (1997))..... 67

## VIII

Abbildung 41: Horizontspezifische mittlere Veränderung der Luftleitfähigkeit des Ausgangssubstrates Geschiebemergel durch einmalige mechanische Belastung bis 7,5Mg Radlast (Mediane, n= siehe Abb.; kl nach DVWK (1997)).....	67
Abbildung 42: Horizontspezifische mittlere Veränderung der Luftleitfähigkeit des Ausgangssubstrates Löss durch einmalige mechanische Belastung bis 7,5Mg Radlast (Mediane, n= siehe Abb.; kl nach DVWK (1997)).....	69
Abbildung 43: Mittlere Veränderung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (cm/d) durch einmalige mechanische Belastung unter Berücksichtigung der verschiedenen Ausgangssubstrate (n= siehe Abb.; kf nach AD-hoc-AGBoden (2005)).....	70
Abbildung 44: Horizontspezifische mittlere Veränderung der vertikalen gesättigten Wasserleitfähigkeit (cm/d) des Ausgangssubstrates Geschiebemergel durch einmalige mechanische Belastung (n= siehe Abb.; kf nach AD-hoc-AGBoden (2005), Schadschwellenwert kf nach UBA (2004a)).....	71
Abbildung 45: Horizontspezifische mittlere Veränderung der vertikalen gesättigten Wasserleitfähigkeit (cm/d) des Ausgangssubstrates Löss durch einmalige mechanische Belastung (n= siehe Abb.; kf nach AD-hoc-AGBoden (2005); Schadschwellenwert kf nach UBA (2004a)).....	72
Abbildung 46: Veränderung der hydraulischen Eigenschaften der konservierend bewirtschafteten Fläche in NRW durch mechanische Belastung im Vergleich verschiedener Labor- und Feldmessverfahren (n(Haubenpermeameter)=7; n(Haubeninfiltrometer und Guelphinfiltrrometer)=2; Schadschwellenwert kfs (kf) nach UBA (2004a)).....	73
Abbildung 47: Veränderung der hydraulischen Eigenschaften der konventionell bewirtschafteten Fläche in NRW durch mechanische Belastung im Vergleich verschiedener Labor- und Feldmessverfahren (n(Haubenpermeameter)=7; n(Haubeninfiltrometer und Guelphinfiltrrometer)=2; Schadschwellenwert kfs (kf) nach UBA (2004a)).....	75
Abbildung 48: Veränderung der Luftkapazität und gesättigten Wasserleitfähigkeit des Standortes SH in Bezug auf kritische Schadschwellenwerte nach UBA (2004a) unter Berücksichtigung unterschiedlicher mechanischer Auflasten, (n=285).....	76
Abbildung 49: Veränderung der Luftkapazität und gesättigten Wasserleitfähigkeit des Standortes NRW in Bezug auf kritische Schadschwellenwerte nach UBA (2004a) unter Berücksichtigung unterschiedlicher mechanischer Auflasten, (n=279).....	78
Abbildung 50: Horizontspezifische Veränderung der Luftkapazität und gesättigten Wasserleitfähigkeit des Standortes NRW in Bezug auf kritische Schadschwellenwerte nach UBA (2004a) unter Berücksichtigung unterschiedlicher mechanischer Auflasten, (n=93).....	79

Abbildung 51: Veränderung der vertikalen gesättigten Wasserleitfähigkeit (cm/d) (Geometrisches Mittel; n=7) und des Bodenstabilitätsparameters $P_v$ (kPa) (arith. Mittel, SD, n=6) durch einfache und mehrfache mechanische Belastung mit 7,5Mg Radlast und 3,5 bar Reifendruck.....	81
Abbildung 52: Horizontspezifische mittlere Veränderung der Vorbelastung (kPa) und der gesättigten Wasserleitfähigkeit (cm/d) des Ausgangssubstrates Geschiebemergel durch mehrfache mechanische Belastung bis 7,5Mg (n= siehe Abb.; Schadschwellenwert $k_f$ nach UBA (2004a)) .....	82
Abbildung 53: Horizontspezifische mittlere Veränderung der Vorbelastung (kPa) und der gesättigten Wasserleitfähigkeit (cm/d) des Ausgangssubstrates Löss durch mehrfache mechanische Belastung bis 7,5Mg (n= siehe Abb.; Schadschwellenwert $k_f$ nach UBA (2004a)) .....	83
Abbildung 54: Veränderung der Luftkapazität und gesättigten Wasserleitfähigkeit des Standort NRW in Bezug auf kritische Schadschwellenwerte nach UBA, 2004 unter Berücksichtigung mehrfacher mechanischer Belastung mit unterschiedlichen Radlasten, (n=40).....	84
Abbildung 55: Gegenüberstellung der nach DVWK (1995) berechneten Spannungsverläufe ( $\sigma_z$ ) (homogener Konzentrationsfaktor $\nu_k=6$ ; gemittelte Kontaktflächen (n=16) nach Denker (2008)) mit den bei den Überfahrungsexperimenten gemessenen und berechneten mittleren Hauptspannungseinträgen ( $\sigma_1$ ) aller Versuchstandorte mit niedrigem Reifeninnendruck (n=12).....	90

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Reifeninnendruck / Radlastkombination.....	16
Tabelle 2: Einstufung bodenphysikalischer Kennwerte.....	19
Tabelle 3: Bodeneigenschaften der konservierend bewirtschafteten Fläche Reinecke auf dem Versuchsgut Merklingsen NRW.....	29
Tabelle 4: Bodeneigenschaften der konventionell bewirtschafteten Fläche Ruhmlifsholz auf dem Versuchsgut Merklingsen NRW.....	30
Tabelle 5: Bodeneigenschaften der konservierend bewirtschafteten Versuchsfläche SFB 192 auf dem Versuchsgut Hohenschulen SH.....	30
Tabelle 6: Bodeneigenschaften der konventionell bewirtschafteten Fläche Kleine Hofkoppel auf dem Versuchsgut Lindhof SH.....	31
Tabelle 7: Setzungsverhalten und Deformation unter statischer und dynamischer Belastung im Ödometerversuch (n=6).....	32
Tabelle 8: Übersicht der mittleren Kontaktflächen, cm <sup>2</sup> (n=4); Quelle: (Denker, 2008).....	35
Tabelle 9: Übersicht der errechneten mittleren Kontaktflächendrücke, kPa (n=4); Quelle: (Denker, 2008).....	36
Tabelle 10: Plastisches Deformationsverhalten des Bodens unter den verschiedenen Radlasten im Feldversuch; Versuchstandort NRW.....	52
Tabelle 11: Plastisches Deformationsverhalten des Bodens unter den verschiedenen Reifeninnendrücken mit der Radlast 7,5Mg im Feldversuch; Versuchstandort NRW.....	54
Tabelle 12: Plastisches Deformationsverhalten des Bodens unter den verschiedenen Radlasten im Feldversuch; Versuchstandort SH.....	59
Tabelle 13: Plastisches Deformationsverhalten des Bodens unter den verschiedenen Reifeninnendrücken mit der Radlast 7,5Mg im Feldversuch; Versuchstandort SH.....	61

## Abkürzungsverzeichnis

A	Kontaktfläche
a	Radius der Infiltrationsfläche
c	Kohäsion
C	dimensionsloser Formfaktor (=f(H/r))
CaCl <sub>2</sub>	Kalziumchlorid
C <sub>org</sub>	Gehalt an organischer Substanz
DTS	Displacement Transducer System (Bodendeformationsmessschlitten)
eGP	enge Grobporen
FK	Feldkapazität
FP	Feinporen
FPv	Feldstabilitätsparameter
GI	Guelphinfiltrometer
GL	Körnerleguminosen
GPV	Gesamtporenvolumen
h	hydraulische Druckhöhe an der Infiltrationsoberfläche
H	Überstauungsdruck im Bohrloch
HI	Haubeninfiltrometer
HP	Haubenpermeameter
KA	Kartoffeln
kf	gesättigte Wasserleitfähigkeit
K <sub>fs</sub>	feldgesättigte Leitfähigkeit
KG	Kleegras
kl	Luftleitfähigkeit
KM	Körnermais
kons	konservierende Bodenbearbeitung
konv	konventionelle Bodenbearbeitung
LK	Luftkapazität
MNS	mittlere Normalspannung
MOVIS	Motion Vehicle Information System (Lastrahmen)
MP	Mittelporen
n	Stichprobenanzahl
NN	Normalnull
NRW	Nordrhein-Westfalen
OCTSS	oktaedrische Scherspannung
p	Irrtumswahrscheinlichkeit / Kontaktflächendruck
pF	Logarithmus der Wasserspannung
Pv	statischer Vorbelastungswert (konsolidiert dräniertes Ödometerversuch)
Pv <sub>10</sub>	dynamischer Vorbelastungswert unter 10facher kurzfristiger Belastung
Pv <sub>stat</sub>	statischer Vorbelastungswert (DIN 18135)

XII

Pv <sub>1</sub>	dynamischer Vorbelastungswert unter 1facher kurzfristiger Belastung
Q	Infiltrationsrate
r	Radius des Bohrlochs
RA	Raps
SD	Standardabweichung
SFB	Sonderforschungsbereich
SH	Schleswig-Holstein
SHa	Sommerhafer
SST	Stress State Transducer (Bodendrucksensor)
WG	Wassergehalt
WGe	Wintergerste
wGP	weite Grobporen
WH	Winterhafer
WR	Winterroggen
WW	Winterweizen
ZR	Zuckerrübe

## Verwendete Symbole

$\Delta$	Setzungsdifferenz
$\alpha$	van Genuchten-Parameter; Lufteintrittspunkt
$\varepsilon$	vertikale Gesamtdeformation
$\vec{G}$	Gewichtskraft
$\phi_m$	Matrix-Fluss-Potential
$\varphi$	phi = Winkel der inneren Reibung
$\rho_t$	Trockenrohdichte
$\sigma_n$	Normalspannung
$\sigma_{oct}$	oktaedrische Normalspannung bzw. mittlere Normalspannung
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Hauptspannungskomponenten
$\sigma_z$	Vertikalspannung der Tiefe z in der Lastachse
$\tau$	Scherwiderstand
$\tau_{oct}$	oktaedrische Scherspannung
$v_k$	Konzentrationsfaktor

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Die Globalisierung des Agrarmarktes in Verbindung mit der neoliberalen Entwicklung der Marktwirtschaft und der damit einhergehende Zwang nach stetigem Wachstum und immer produktiverem Wirtschaften haben die ökonomischen Rahmenbedingungen der Landwirtschaft in den letzten Jahrzehnten deutlich verändert. Fortschritte in der Pflanzenzüchtung, die Verbesserung der Nährstoffversorgung, das Ausschöpfen der Potenziale von Sorte und Pflanzenschutz und die Rationalisierung der pflanzenbaulichen Produktionstechnik mit Kombinationen von Bearbeitungsgeräten und größeren Arbeitsbreiten konnten den wirtschaftlich erforderlichen Effizienzsteigerungen bisher gerecht werden (LfL, 2006). Mit veränderten Anforderungen an die Bodenbearbeitungs-, Ernte- und Bestelltechnik kam es durch diese Entwicklung gleichzeitig zu einem erhöhten Zugkraftbedarf, der wiederum erhöhte Maschinengewichte erforderlich machte, um die Leistung auf den Boden übertragen zu können. Sommer et al. (2003) untersuchten in diesem Zusammenhang die Veränderung der Flächenleistungen und Radlasten unterschiedlicher Arbeitsgänge zwischen 1970 und 2000 und stellen für die Grundbodenbearbeitung mit dem Pflug mit einer Zunahme der Schlagkraft von 1ha/h auf 3ha/h eine Erhöhung der Schlepperradlasten von einst 1Mg auf heute 3Mg fest. Weitaus größere Zunahmen der Maschinengewichte wurden für die Rübenernte festgestellt. Hier beträgt das Gesamtgewicht eines einreihigen Rübenernters 1970 noch 1-3Mg, wogegen heute 6-reihige Rübenvollernter mit Bunkerkapazitäten bis 24m<sup>3</sup> bis zu 10Mg Radlast in den Boden eintragen (Fazekas & Horn, 2005; Schulze Lammers et al., 2001). Die drastische Gewichtserhöhung dieser leistungsfähigen Landmaschinen, gerade in jüngster Zeit, und die damit einhergehenden hohen Kontaktflächendrücke haben hinsichtlich der Bewirtschaftung zu einem Nutzungskonflikt mit zunehmender technogener Belastung der Böden geführt.

Im Zuge überbetrieblicher Maschineneinsätze sind diese schweren Maschinen nicht mehr allein auf Großbetriebe beschränkt, allein in Westdeutschland wurde bereits 1990 42% der landwirtschaftlich genutzten Fläche von Mitgliedern in Maschinenringen bewirtschaftet (Cramer, 2006).

Trotz zunehmender Arbeitsbreiten und der damit einhergehenden Verringerung des Spurflächenanteils wird immer noch ca. 50% der Produktionsfläche im Getreideanbau durch die Arbeitsgangfolge jährlich überfahren (Schäfer-Landefeld et al., 2004). Allein für den Arbeitsgang Pflügen ermittelte Zapf (1997) mit einer angenommenen Arbeitsbreite von 1,4m 35% direkt befahrenen Unterboden. Stahl et al. (2001) berechnen für den Winterweizenanbau im Mittel einen Spurflächenanteil von 69% der jährlich bis zu vierfach überrollt wird (summierte Spurfläche 368%). Im Allgemeinen werden die jährlichen Überrollhäufigkeiten einer ackerbaulich genutzten Fläche mit drei bis sechs Überrollungen angegeben, können sich aber in einigen Feldarealen (Vorgewende, Feldauffahrten) bis auf 24 Überfahrten aufsummieren und damit die Verdichtungsgefahr verstärken (Frielinghaus et al., 2002). Gerade mehrfach kurzfristig wiederholte Lasteinträge mit ihren kumulativen Verdichtungsprozessen und zunehmenden Scherbeanspruchungen sind besonders schädigend für das Bodengefüge (Peth & Horn, 2006; Horn et al., 1995). Jorajuria (2000)

zitiert in Hamza & Anderson (2005) beziffern die kritische Grenze der kurzfristigen Überrollhäufigkeit mit 10 Überfahrten. Ab dieser Wiederholungsanzahl an Lasteinträgen geht ihrer Meinung nach der Vorteil einer leichteren Maschine hinsichtlich der Verdichtungsgefährdung verloren. Über den kumulativen Effekt der Belastungsdauer und zunehmender Primärsetzung mit gleichzeitiger Veränderung des volumetrischen Wassergehalts und damit der Änderung des Druckkompensationsvermögens nimmt die Tiefenwirkung der Spannungseinträge zu (Peth & Horn, 2007; Becher, 2004; Grecenko, 2003; Hernanz & Sánchez-Girón, 2000; Döll, 1999). Im Oberboden können kurzfristig wiederholte Überfahrten mit scheren und knetenden Verformungen zu einer vollständigen Zerstörung und Homogenisierung des Bodengefüges führen (Botta et al., 2006; Horn, 2004; Horn, 2002). Arvidsson (1998) berichtet im Zuge von Schwerlastüberfahrungsexperimenten von kumulativen plastischen Deformationsprozessen, die bis in den Unterboden reichen.

Mit hohen Spannungseinträgen bis in den Unterboden erscheinen in Begleitung des Maschineneinsatzes vermehrt irreparable Bodengefügeschädigungen unterhalb des jährlich gelockerten Bearbeitungshorizontes, auf die von Seiten der Wissenschaft schon seit langem hingewiesen wird (Horn, 1980; Söhne, 1951). Die Verdichtungsgefahr für die Unterböden ist besonders groß, da sich schädliche Veränderungen dort dauerhaft akkumulieren können und die Intensität von Regenerationsprozessen mit zunehmender Tiefe abnimmt (Wiermann, 1998). Horn (2004) geht davon aus, dass regenerative Gefügebildung des Unterbodens hauptsächlich durch Austrocknungsvorgänge bestimmt ist und nur über lange Zeiträume mit bodenschonenden Bodenbearbeitungssystemen und der damit verbundenen zunehmenden Durchwurzelungstiefe erreicht werden kann.

Die weltweite geschätzte Fläche physikalisch degradierter Ackerböden beläuft sich auf 68 Mio. ha (Hamza & Anderson, 2005). Allein in Europa gelten 33 Mio. ha als mechanisch verdichtet (Van den Akker, J.J.H. & Canarache, 2001). Etwa 53% der Gesamtfläche Deutschlands sind landwirtschaftliche Produktionsflächen (Brandt-Sassen, 2004), die im Rheinland mit 20-40% als bereits „schadverdichtet“ im Bereich der Krumenbasis bewertet werden (Weyer & Buchner, 2001). TLL (2008) untersuchten Schadverdichtung in Thüringen und geben die bewirtschaftungsbedingt stark verdichtete Fläche eines Ackerschlagens in der Region mit 15% an. Brunotte et al. (2008) knüpfen an Untersuchungen zur Bodenverdichtung in Niedersachsen von Ruhm (1983) an und stellen ca. 17% „schadverdichtete“ Ackerstandorte in der niedersächsischen Lössbörde fest.

Wenngleich Bodenverdichtung als eins der wichtigsten ökologischen Probleme der konventionellen Landwirtschaft angesehen wird, ist diese Art der Bodendegradierung schwer zu erfassen, da sie nicht wie andere Degradationsprozesse wie Versalzung oder Erosion offensichtliche Veränderungen des Landschaftsbildes mit sich bringt (Hamza & Anderson, 2005). Ob und in welchem Ausmaß Gefügeschäden oder schädliche Bodenverdichtung entstehen hängt von endogenen (bodeninternen Kräften) und exogenen (von außen wirkenden Kräften) Faktoren ab. Die bodenendogenen Faktoren werden durch die physikalischen Eigenschaften des Bodens bestimmt. Im Zusammenwirken der



Korngrößenverteilung, der Bodenfeuchte, der Art und dem Gehalt an Tonmineralen, dem Anteil austauschbarer Kationen, dem Gehalt an organischer Substanz, der Bodenstruktur, der Porengrößenverteilung und vor allem der mechanischen und hydraulischen Belastungshistorie entwickelt sich die Eigenstabilität bzw. Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens (Horn & Lebert, 1994; Horn, 1993). Die Maschinenparameter Gesamtlast und Aufstandsfläche sowie Überfahrgeschwindigkeit und Schlupf stellen in Form äußerer Kräfte, die als Druck auf den Boden einwirken, die bodenexogenen Faktoren dar. Über die Kontaktflächen der Reifen werden die Drücke auf den Boden übertragen und verändern dort den Spannungszustand. Diese Änderung der Spannungszustände ist als technogene Bodenbeanspruchung zu verstehen, die ein Gefährdungspotenzial für den Boden darstellt.

Wird die interne Stabilität durch die exogenen Spannungseinträge überschritten, kann die Tragfähigkeit des Bodens der mechanischen Belastung nicht mehr standhalten und es kommt zur Bodenverdichtung. Der Prozess der Bodenverdichtung ist immer mit der Umlagerung und Neuordnung von Bodenpartikeln und einer Abnahme des Porenvolumens verbunden und tritt erst dann ein, wenn die Eigenstabilität eines Horizonts überschritten wird (Arvidsson, 2001; Hartge & Horn, 1999; Sommer, 1998; Horn, 1981; Casagrande, 1936). Bewirtschaftungsbedingte Bodenverdichtung oder mechanische Bodendegradation kann als unsachgemäßer Technikeinsatz verstanden werden. Das Überschreiten der wasserspannungsabhängigen Bodentragfähigkeit führt dabei zu irreversiblen Umlagerungsprozessen im Drei-Phasen-System Boden (Horn et al., 1995). Mit der Umlagerung der Bodenpartikel kommt es zur volumetrischen Abnahme der Gasphase (luftgefülltes Porensystem) mit gleichzeitiger Zunahme der flüssigen und festen Phase. Dieser Vorgang hat eine Veränderung der für das Pflanzenwachstum wesentlichen ökologischen Kenngrößen des Gas-, Wasser- und Wärmetransportes sowie der Redoxreaktionen zur Folge (Hartge & Horn, 1999).

Eine bedeutende Rolle in diesem Wirkungsgefüge spielt das vernetzte Sekundärporensystem und dessen Kontinuität. Der Zustand dieser physikalischen Eigenschaften bestimmt die Leitfunktionen des Bodens. Komprimierende und schernde Deformationen unter mechanischen Belastungen, welche die Bodenstabilität überfordern, zerstören zuerst das Sekundärporensystem (Yavuzcan et al., 2005). Mit dem Überschreiten der Bodenstabilität und der damit verbundenen plastischen Verformung im Erstverdichtungsbereich kommt es im Zuge der Sofortsetzung zuerst zur Abnahme des Interaggregatporenvolumens und zur Verringerung des Anteils an weiten Grobporen (Kooistra & Tovey, 1994). Diese hauptsächlich durch einfache Überfahrungen verursachten Verdichtungsvorgänge führen dazu, dass Struktureinheiten näher zusammengerückt werden (Dexter, 1988). Wenn auch die Eigenschaften der Aggregate durch diesen Vorgang noch nicht verändert sind (Hamza & Anderson, 2005; Soane et al., 1980b), so ist trotzdem mit einer Beeinträchtigung der Porenfunktion zu rechnen. Mit zunehmender Überrollhäufigkeit oder sehr hohem Überschreiten der Eigenstabilität erfolgt eine Zerschering der Aggregate die sich als Bruchstücke in Interaggregatporen schieben können und zu deutlicher Verminderung der Leitfähigkeit führen. Zuletzt resultiert eine vollständige Homogenisierung

der Bodenstruktur mit rein texturbestimmter Leitfähigkeit der Primärporen und vollständigem Verlust der Leitfähigkeit des Sekundärporensystems (Horn et al., 1995).

Die Beziehung dieser Bodeneigenschaft und ihrer funktionalen Kenngröße ist allerdings hinsichtlich der mechanischen Degradation nicht immer eindeutig (Kirby, 2007). So muss trotz Abnahme der Porenziffer und erhöhter Lagerungsdichte nicht immer die hydraulische Leitfähigkeit des Porensystems beeinträchtigt sein. Die Beurteilung schädlicher Bodenveränderungen stützt sich daher häufig auf mehrere physikalische Parameter gleichzeitig. Die Erhebung dieser Parameter erfolgt entweder über Freilanduntersuchungen wie z.B. die Gefügeansprache (Diez & Weigelt, 1997), die Infiltration, die Packungsdichte bzw. die effektive Lagerungsdichte oder über Laboruntersuchungen mit der Bestimmung der Porengrößenverteilung, der gesättigten Wasserleitfähigkeit, der Luftleitfähigkeit und der Trockenrohddichte anhand ungestörter Stechzylinderproben. Horn & Fleige (2008) sowie Lebert et al. (2004) unterstellen den Indikatoren unterschiedliche Qualität für die Charakterisierung von Gefügeschäden. Horn & Fleige (2008) sprechen in diesem Zusammenhang von hoher und geringer Indikation der Kennwerte hinsichtlich der Verifizierung einer Unterbodenverdichtung. Der Luftkapazität, Luft- und gesättigten Wasserleitfähigkeit sowie Infiltration sprechen sie eine hohe Eignung zu, der Vorbelastung, dem Eindring- und Scherwiderstand sowie der Lagerungsdichte dagegen wird geringe Tauglichkeit zugewiesen. Für jeden Parameter werden sogenannte Schadschwellenwerte angegeben, ab deren Unterschreitung mit einer Beeinträchtigung der ökologischen Funktionalität gerechnet werden muss. Ist nur ein Parameter mit hoher Indikation oder sind zwei Parameter mit niedriger Indikation unterschritten ist eine negative Schädigung des Porensystems definiert und der Boden wird als gefährdet eingestuft. In diesem Zusammenhang wird auch häufig der Begriff der "Bodenschadverdichtung" verwendet (BMVEL, 2002). Auch Lebert et al. (2004) sprechen den Parametern unterschiedliche Indikatorqualität zu und stellen in ihrem Indikatorsystem zu Erkennung schädlicher Bodenverdichtung mindestens drei Indikatoren zur Bedingung.

Bodenverdichtung mit ihren negativen Auswirkungen auf die Bodenfunktionen ist ein standortspezifisches, bodenfeuchteabhängiges und bearbeitungstechnisches Problem in der Pflanzenproduktion (Petelkau et al., 1998). Im Hinblick auf die ökologischen Lebensraum- und Regelungsfunktionen sowie die Produktionsfunktion kommt es mit einer Verdichtung des Bodens zu Einschränkungen der Wasserleitfähigkeit und Infiltrationsleistung sowie zu verringerter Speicherkapazität für Wasser (da Silva et al., 2008). Staunässeeffekte und verminderte Erwärmung können zum einen Einfluss auf das Bodenleben nehmen, womit Selbstreinigungs-, Filter-, und Regenerationsfunktionen eingeschränkt werden (Hartge & Horn, 1999), zum anderen geht eine Beeinträchtigung der Bodenbelüftung einher, was wiederum über anaerobe Verhältnisse und das Redoxpotential Auswirkungen auf das Wurzellängenwachstum, das Austauschpotential und damit letztendlich auf den Ertrag mit sich bringt (Stepniewski & Stepniewska, 2008; Hakansson, 2005; Glinski & Stepniewski, 1985). Ehlers et al. (2000) stellen in diesem Zusammenhang vermindertes Wurzellängenwachstum durch Anaerobie und zu hohe Eindringwiderstände fest.

Als Schwellenwert für ungehindertes Wurzelwachstum wird von ihm für Lössparabraunerden ein Eindringwiderstand von  $<3,6\text{MPa}$  angegeben, Materechera et al. (1992) sprechen schon Eindringwiderständen  $>3\text{MPa}$  Wachstumshindernisse zu. Mit zunehmender mechanischer Wachstumsbehinderung kommt es mit einer Abnahme der Wurzellänge und Verzweigungsneigung zu Veränderungen der Wurzelmorphologie und zu eingeschränkter Wasser- und Nährstoffaufnahme der Pflanzen (Bengough & Mullins, 1990). Verminderte Wasserhaltekapazität durch fehlendes Porenvolumen kombiniert mit verkürzten Wurzellängen kann dazu führen, dass die Pflanzen in Trockenphasen nicht mehr mit genügend Wasser versorgt werden können. Zusätzlich bietet eine komprimierte Bodenmatrix mit geringerer spezifischer Oberfläche und niedrigem Redoxpotential eine eingeschränkte Nährstoffversorgung (Reintam et al., 2006; Alakukku, 2000; Hammel, 1994).

Mit der Degradierung der Bodenstruktur und der Modifikation der physikalischen, chemischen und biologischen Bodeneigenschaften wird die Produktionsfunktion des Bodens beeinträchtigt. Mit einer Gefährdung der Leistungsfähigkeit geht gleichzeitig der Verlust an Ertragssicherheit einher (Wiermann, 1998). Die Auswirkungen mechanischer Belastung auf den Ertrag sind schon vielfach untersucht worden, in der Literatur werden meist kurzfristige und dauerhafte Effekte unterschieden. Für kurzfristige Zeiträume nach der Belastung und in Folge direkter Beschädigung der Pflanzen werden größerer Schwankungsbreiten bei den Ertragseinbußen von 15-25% angegeben (Hakansson, 2005; Alakukku, 2000; Sommer, 1985). Aufgrund der nur kurzzeitigen Betrachtung und der starken Beeinflussung durch aktuelle Witterung während des Versuchsjahres kommt es häufig zu einer Referenzproblematik mit nicht vergleichbaren Versuchsbedingungen. Langfristige Effekte durch Gefügeschäden wurden in einem internationalen Gemeinschaftsprojekt mit 7 beteiligten Ländern über einen Zeitraum von 12 Jahren untersucht (Lal, 1996; Hakansson & Reeder, 1994; Lindstrom & Voorhees, 1994). Hierbei wurde im Mittel von 24 Feldversuchen ca. 3% persistente Ertragsabnahme durch nur viermalige Belastung mit 10Mg Achslast gemessen. Anhaltende Ertragseinbußen werden von den Autoren hauptsächlich auf den Prozess der Unterbodenverdichtung zurückgeführt. Hinsichtlich unterschiedlicher bodenschonender Maßnahmen stellen Hamza & Anderson (2005) unter zunehmender mechanischer Belastung Ertragsabnahmen in verschiedenen Bodenbearbeitungssystemen fest. In ihren Ergebnissen zeigt sich, dass trotz konservierender Bodenbearbeitung die Erträge unter hohen Radlasten abnehmen. Bodenschonende Befahrung mit minimiertem Kontaktflächendruck stellt sich als positive Maßnahme heraus und weist in Folge des Gefügeschutzes insgesamt geringere Ertragsabnahmen gegenüber konventioneller Bereifung auf.

Beeinträchtigt Infiltrationsvermögen und geringere Speicherfähigkeit des Bodens und der Pflanzen haben einen größeren Oberflächenabfluss zu Folge und beeinflussen in starkem Maße die Hochwassergefahr (van der Ploeg et al., 2001; Fleige & Horn, 2000). Das oberflächlich abfließende Wasser bewirkt eine höhere Erosionsgefahr mit vermehrtem Stofftransport. Umfang und Auswirkungen der durch Wassererosion transportierten Bodenmengen sind je nach Klima, Naturraum und Landnutzung differenziert zu beurteilen

(Richter, 1998). Gerade in hängigem Gelände mit häufigen Starkniederschlägen führt der oberflächliche Stofftransport zu einem Austrag von Pflanzenschutzmitteln und Nährstoffen, die zur Gewässerverunreinigung und -eutrophierung beitragen (Frielinghaus et al., 2002; Frede & Dabbert, 1998). Die mit zunehmend anaeroben Verhältnissen einsetzende Denitrifikation mit verminderter Mineralisation und Nährstoffaufnahme der Pflanzen und einhergehende zunehmende Düngegaben belassen vermehrt Nährstoffe im Boden, die über das Sickerwasser ausgewaschen werden können und so ins Grundwasser gelangen (Hakansson & Reeder, 1994). In Verbindung horizontaler Gefügeausrichtung, wie im Fall des Plattengefüges der verdichteten Pflugsohlen verstärkt zunehmender lateraler Interflow diese Auswaschungsprozesse (BMVEL, 2002; Fleige & Horn, 2000).

Von Seiten der Gesetzgebung ist die Gefahr der Bodenverdichtung erkannt. Mit dem Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG, 1998) wurden rechtliche Regelungen zur Vorsorge gegen das Entstehen „schädlicher Bodenveränderungen“ geschaffen. Gegenüber der Bodenschutzkonzeption von 1985, in der zunächst die stoffliche Belastung des Bodens im Vordergrund stand, wird nun auch das Gefüge stärker berücksichtigt. Dabei ist nach § 17 Abs. 1 mit der Begrifflichkeit *„gute fachliche Praxis“* die Vermeidung bewirtschaftungsbedingter schädlicher Bodenveränderung unter Berücksichtigung der Bodenart, der Bodenfeuchtigkeit und des zur landwirtschaftlichen Bodennutzung eingesetzten Gerätes rechtlich geregelt, ohne dass Grenzwerte genannt werden.

In diesem Zuge wurden Maßnahmen der guten fachlichen Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtung aufgestellt. Sommer (1998) stellt ein Konzept aus vier Bausteinen vor, neben der Verbesserung der mechanischen Belastbarkeit und Nutzung technischer Möglichkeiten sieht er die Anpassung von Arbeitsverfahren (Grundbodenbearbeitung) (KTBL, 1998) sowie die Begrenzung der mechanischen Belastung als Lösungsansatz. In dem später vom BMVEL herausgegeben Heft (BMVEL, 2002) *„Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion“* unterstreichen die Autoren ebenso wie die Arbeitsgruppe der Bodenspezialisten aus Bund und Ländern in ihren Ausführungen die Notwendigkeit die Bodenstabilität zum Zeitpunkt der mechanischen Belastung als Grundlage für die Gefahrenabwehr zu erheben.

Im Sinne des vorsorgenden Bodenschutzes in der Landbewirtschaftung sind daraufhin in den letzten Jahren von der Wissenschaft mehrere Prognosekonzepte entwickelt worden, um die Bodenstabilität und Verdichtungsneigung der Böden sowie die Verdichtungsgefährdung landtechnischer Maschinen abzuschätzen zu können (Horn & Fleige, 2003; MLUV, 2000; Werner & Paul, 1999; DVWK, 1995).

Das in der Arbeit berücksichtigte Vorbelastungskonzept nach Horn & Fleige (2003) basiert auf der horizontspezifischen Betrachtung der Eigenstabilität. Die Stabilität jedes Horizontes wird über den bodenphysikalischen Stabilitätskennwert *„Vorbelastung“* wiedergegeben, der sich aus dem wasserspannungsabhängigen Druck-Zeit-Setzungsverhalten des Bodens ergibt (Horn, 1981). Für die Bestimmung ist das elasto-plastische Setzungsverhalten des Bodens ausschlaggebend. So charakterisiert der Wert der Vorbelastung wasserspannungsabhängig die mechanische Belastung bis zu der ein Boden mit elastischer

Verformung reagiert. Wird dieser Spannungszustand überschritten, tritt plastisch irreversible Verformung mit Partikelumlagerung und Verringerung des Porenraumes an die Stelle, um das Kräftegleichgewicht wieder herzustellen.

Zur Ermittlung der Vorbelastung im Laborversuch wird in der Bodenphysik häufig der in der Baugrundmechanik entwickelte Ödometer- oder eindimensionale Kompressionsversuch mit verhinderter Seitenausdehnung (DIN 18135) verwendet, bei dem eine ungestörte, definiert entwässerte Bodenprobe uniaxial statisch belastet wird. Die Auswertung des Drucksetzungsverhalten geschieht über graphische oder mathematische Verfahren mit der semilogarithmischen Gegenüberstellung der abgeschlossenen vertikalen Sekundärsetzung als Funktion der Auflast (Normalspannung) (Arvidsson & Keller, 2004; Baumgartl & Koeck, 2004; Keller et al., 2004; Dias Junior & Pierce, 1995; Casagrande, 1936). Mit dieser Art der Gegenüberstellung zeigt sich ein typischer Kurvenverlauf des Setzungsverhaltens mit flacher Wiederverdichtungsgerade und steiler Erstverdichtungsgerade. Die flachere Gerade beschreibt den elastischen und stabilen Wiederverdichtungsbereich, in dem die Eigenstabilität des Bodens nicht überschritten wird. Mit höherer vertikaler Last reagiert der Boden mit plastischer Setzung im Erstverdichtungsbereich (Kezdi, 1969). Im Bereich des Überganges der beiden Geraden befindet sich nach den verschiedenen Auswertungsverfahren der Stabilitätskennwert der Vorbelastung.

Parallel zur Bestimmung der Bodenstabilität wurden in Verbindung mit der Abschätzung der Verdichtungsgefährdung verschiedene praktische und theoretische Verfahren entwickelt, um die Druckausbreitung im Boden zu messen und diese der Bodenstabilität vergleichend gegenüberzustellen. Für die praktische Erfassung der räumlichen Druckausbreitung kommen seit Jahrzehnten unterschiedliche hydraulische, pneumatische und elektronische Messsensoren zum Einsatz. Häufig handelt es sich um flüssigkeitsgefüllte zylinderförmige Gummi- oder Silikonkörper (sog. Bollingsonden), die über die Änderung des hydrostatischen Drucks in der Sonde einen mittleren Wert der Normalspannung an ihrer Oberfläche repräsentieren, der häufig unter dem Begriff „Bodendruck“ verwendet wird (Bolling, 1984). Ein weiteres Sensorsystem basiert auf Halbleitertechnik mit Dehnmessstreifen (DMS), welche es ermöglichen über die Deformation einer Metallmembran Normalspannungen in Form elektrischer Widerstandsmessungen zu bestimmen. Erste Sensoren mit dieser Technik erlaubten mit Einzelmesszellen die Bestimmung einer gerichteten Normalspannung im Boden (Horn, 1980; Cooper et al., 1975). Prange (1960), zitiert in Horn & Lebert (1994) stellte einen Sensortyp mit drei parallel messenden Einzelmessdosen in Richtung der Normalspannungen vor. Unter Nichols et al. (1987) und Gräsle (1999) sowie Horn et al. (1992) entwickelte sich ein Sensorssystem mit sechs gerichteten zeitgleichen Spannungsmessungen, das die vollständige Erfassung des Spannungszustandes im Boden ermöglicht und neben den Hauptspannungen auch Aussagen über auftretende Scherkräfte zulässt. Spätere Modifikationen ermöglichten neben der Spannungsausbreitung zeitgleich die Deformation des Bodens bei dynamischen Lasteinträgen zu bestimmen (Kühner, 1997). Theoretische Überlegungen zu diesen Zusammenhängen und zur Berechnung des Spannungseintrags und der -fortpflanzung unter begrenzten Lastflächen sind bereits seit

längerer Zeit unter dem Begriff der bodenfeuchtabhängigen Druckbelastbarkeit veröffentlicht (Hartge & Horn, 1999; DVWK, 1995; Koolen & Kuipers, 1983; Söhne, 1951). Die Verfahren gehen auf die theoretische Überlegung der isotropen Druckverteilung unter einer Punktlast zurück (Boussinesq, 1885). Mit der Berücksichtigung der textur- und wasserspannungsabhängigen elastisch-anisotropen Spannungsverteilung im Boden durch Einführung des Konzentrationsfaktors  $\nu$  (Fröhlich, 1934) wird es möglich differenziert für verschiedene Bodenarten und Bodenfeuchten die räumliche Druckausbreitung zu berechnen. Die Belastung in Folge eines mechanischen Spannungseintrages über einen Reifen ist allerdings keine Punktlast sondern immer eine Flächenlast. Über Integration eines gleichmäßigen Flächendruckes aus Radlast und kreisförmiger Reifenaufstandfläche lässt sich in der Lastachse mit dem Äquivalentradius der idealisierten Kontaktfläche die erste Hauptspannung  $\sigma_1$ , auch  $\sigma_z$  für verschiedene Tiefen errechnen. Söhne (1953) berücksichtigt unter der Annahme einer parabelförmigen Druckverteilung in der Reifenberührebene die inhomogene Spannungsverteilung und elliptische Form des Reifenabdrucks. Über das Verfahren nach Newmark (1942) können umgekehrt mit gemessenen Spannungseinträgen die horizontspezifischen Fähigkeiten der Druckkompensation und die Konzentrationsfaktoren ermittelt werden.

Als Ergebnis der Feldmessungen oder theoretischen Bestimmungen der Spannungszustände entstehen mit dem Verlauf der Linien gleichen Bodendrucks (Isobaren) sogenannte Druckzwiebeln, welche die dreidimensionale Spannungsausbreitung im Boden verdeutlichen (Söhne, 1953). Über Zusammenhänge zwischen Aufstandfläche, Radlast und Spannungsausbreitung stellte sich heraus, dass steigende Radlasten hauptverantwortlich für zunehmende Unterbodenverdichtung sind und breitere Aufstandsflächen zu einer zunehmenden Tiefenwirkung des Drucks führen (Danfors, 1994; Horn et al., 1986; Sommer, 1985; Söhne, 1951).

Die horizontspezifischen Gegenüberstellung der modellierten oder gemessenen Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) zu den ermittelten Eigenstabilitäten der Bodenhorizonte ( $P_v$ ) erlaubt die Verdichtungsgefährdung einer technogenen Belastung abzuschätzen. Aus Multiregressionsanalysen entwickelte Pedotransferfunktionen ermöglichen die flächenhafte Abschätzung der wasserspannungsabhängigen Druckbelastbarkeit des Bodens anhand weniger bodenphysikalischer Parameter (Horn et al., 2005; Lebert & Schäfer, 2005; Lebert & Schäfer, 2005; DVWK, 1995; Lebert, 1989). Tiefenabhängig Differenzierungen der Eingangsparameter führen zu verbesserten Prognoseergebnissen (Fleige et al., 2002). Der flächenhafte Vergleich berechneter Spannungseinträge von unterschiedlichen Fläche/Lastkombinationen zur ermittelten Druckbelastbarkeit der Böden gestattet großräumige Verdichtungsprognosen, die über Bodenkarten der potentiellen wasserspannungsabhängigen Verdichtungsgefährdung übersichtlich darzustellen sind (Horn et al., 2005; Jones et al., 2003; Richter, F.H. et al., 2003). Im Sinne der Vorsorge ist mit großmaßstäbigen Karten (1:5000) bspw. auf Hofkartenniveau die Gefahr der Verdichtung überschaubar zu erfassen. Ebenso lassen sich anhand regressionsanalytischer Zusammenhänge die auflastabhängigen Beeinträchtigungen der physikalischen

Bodenfunktionen im Erstverdichtungsbereich bestimmen und die Auswirkung auf das Porenvolumen (Kompressionsbeiwert) abschätzen (Horn & Rostek, 2000; Gräse, 1999; DVWK, 1997).

Der Wissenschaftliche Beirat Bodenschutz (WBB) weist schon im BMVEL Bund-Länder-Papier zur guten fachlichen Praxis (BMVEL, 2002) darauf hin, dass vorhandene Verfahren verbessert und fortentwickelt werden müssen, um wissenschaftliche Grundlagen und Methoden zur Ableitung von Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerten auf der Grundlage des Bundesbodenschutzgesetzes zu schaffen.

Im Rahmen eines vom BMELV geförderten gemeinschaftlichen Forschungsprojektes des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde und des Instituts für Geowissenschaften der CAU Kiel sowie der landtechnischen Abteilung der Fachhochschule Südwestfalen mit dem Thema „Anwendbarkeit geophysikalischer, bodenphysikalischer und landtechnischer Methoden zur Bestimmung von flächenhaften Bodenverdichtungen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen“ konzentrierten sich die bodenkundlichen Ermittlungen dieser Arbeit auf folgende Fragestellungen:

- 1) Welche effektive Bodenstabilität kann unter impulsartig kurzfristigen Spannungseinträgen erwartet werden und ab welcher Auflast wird diese überschritten und das Bodengefüge negativ beeinflusst?
- 2) Welche Auswirkungen haben wiederholte Kurzzeitbelastungen und die Aufsummierung der Belastungsdauer auf die Spannungszustände im Boden und die Veränderungen der Bodeneigenschaften?
- 3) Mit welchen Reifen/Radlastkombinationen führt die Verminderung des Reifeninnendruckes als landtechnische Schutzmaßnahme zur Bodenschonung?
- 4) Inwiefern und bis zu welchen Gesamtlasten hat die Bodenbearbeitung als langfristige pflanzenbauliche Maßnahme noch bodenschonende Effekte gegenüber technogenen Belastungen?
- 5) Welche Auswirkungen haben unterschiedliche Gesamtlasten auf ausgewählte physikalische Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen und in bis welche Tiefe reicht die Beeinflussung?
- 6) Inwiefern eignen sich Bodenfunktionskennwerte für die Bestimmung des Verdichtungszustandes und lassen sich über die bisher proklamierten Schadschwellen dieser Indikatoren Gefügeschäden ausweisen?

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Lage, Geologie und Klima der Versuchsstandorte

Als Versuchsstandorte standen auf insgesamt drei Versuchsgütern der projektbeteiligten Hochschulen (Merklingsen, Lindhof und Hohenschulen) Untersuchungsflächen in den Bodenregionen der nordrhein-westfälischen Löss- und Sandlösslandschaft und der schleswig-holsteinischen Jungmoränenlandschaft zur Verfügung (BGL 3.1 und 6.1) (AD-hoc-AGBoden, 2005), die entsprechend dem genutzten Bodenbearbeitungssystem in konventionelle, wendende und konservierende, nichtwendende Bodenbearbeitung unterschieden wurden. Die Versuchsflächen werden im Folgenden zur Unterscheidung mit den Abkürzungen SH kons, SH konv, NRW kons und NRW konv (Abbildung 1) bezeichnet.

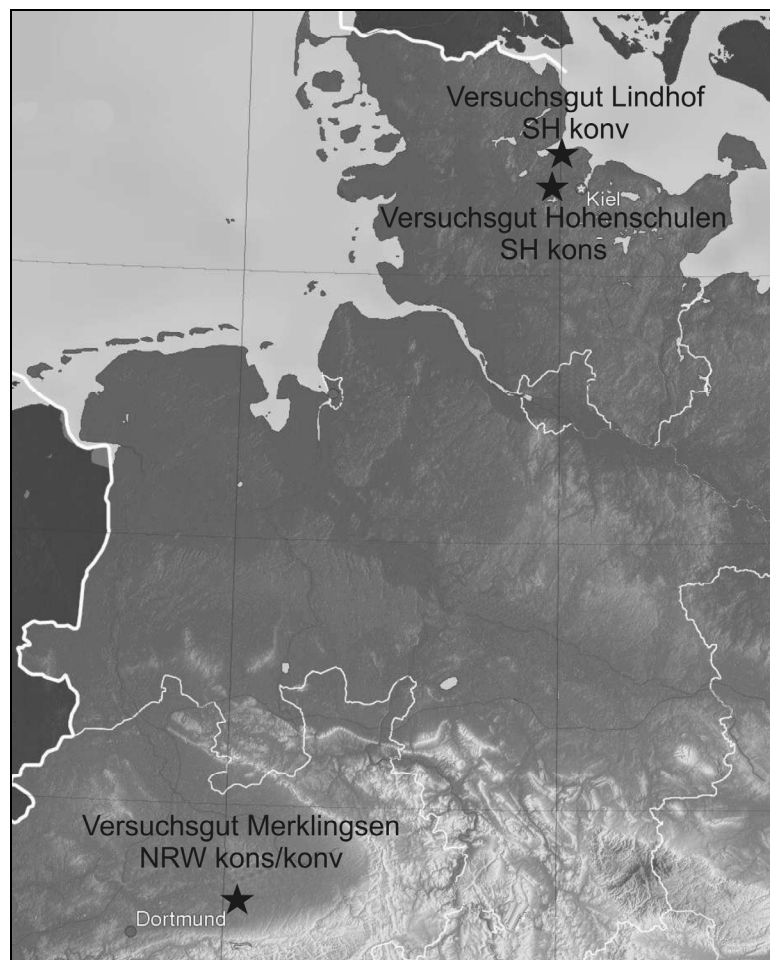


Abbildung 1: Geographische Lage der Versuchstandorte

#### 2.1.1 Versuchsgut Merklingsen (NRW)

Die nordrhein-westfälischen Versuchsflächen liegen auf dem Versuchsgut der Fachhochschule Südwestfalen in Merklingsen, etwa 10 km westlich von Soest im Bereich der Hellwegbörde, die sich am Südrand der Westfälischen Tieflandsbucht am Übergang zum südlich gelegenen Haarstrang und dem sich daran anschließenden Sauerland befindet. Das Landschaftsbild ist durch Prozesse im Pleistozän gestaltet worden. So erfolgte die Formung des Haarstrangs und Hellwegtals durch Gletscher des Drenthestadiums der Saaleeiszeit.



Das Schmelzwasser bildete einen großen, nach Westen strömenden Fluss, der das meiste Lockergestein fortführte, so dass keine deutlichen Endmoränen entstehen konnten. Im periglazialen Klima der Weichselkaltzeit entstand ein Großteil des vorhandenen Decksandes und des Lösses. Der Decksand wurde aus benachbarten Flusstälern ausgeweht und hat sich an deren Rändern angehäuft. Der Löss ist vom Wind abgesetztes Material, das aus vegetationslosen Flussbetten und dem Frostschutt der ehemaligen Tundrangebiete ausgeweht wurde. Infolge der starken Lössverbreitung auf dem Haarstrang und im Hellwegtal wird das Gebiet auch als Soester Lössbörde bezeichnet. Der Untergrund der Hellwegniederung besteht aus Emschermergel. Darüber liegen die schon beschriebenen bis ca. 20 m mächtigen quartären Lockergesteine, zuunterst Grundmoräne, Sand- und Kieslagen und darüber weit verbreitet geschichtete Schwemmlösse, im Bereich der Höhenrücken auch ungeschichtete äolische Lössse der Weichselkaltzeit auf. Das Versuchsgut Merklingsen liegt 80m über NN im flachwelligen niederen Hellwegtal ("Niederbörde"). Dieses Gebiet besteht aus tiefliegenden Verebnungsflächen und langgestreckten niedrigen Höhenrücken die sich bis zur Lippe erstrecken (Lütke Entrup, 1999; Hohnvehlmann, 1963). Klimatisch weist das Untersuchungsgebiet kleinräumig beachtliche Unterschiede auf. Durch vorrangig herrschende Südwest- und Westwinde befindet sich Merklingsen in Lee des Haarstranges. Bei einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 9 °C fällt hier, im Regenschatten des Haarstranges im langjährigen Mittel ca. 700 mm Niederschlag (MURL, 1989). Dieser ist gleichmäßig verteilt mit einem Maximum in den Sommermonaten.

### 2.1.2 Versuchsgüter Hohenschulen und Lindhof (SH)

Die beiden Versuchsgüter der CAU liegen im Bereich des ostholsteinischen Hügellandes, einer abwechslungsreichen Jungmoränenlandschaft mit charakteristischer Glazialmorphologie. Das Relief zeigt ein kleinräumiges Wechselspiel von Kuppen und (abflusslosen) Senken. Im Jungmoränengebiet werden die größten absoluten Höhen und steilsten Hänge der Schleswig-Holsteinischen Moränenlandschaft erreicht. Das Landschaftsbild wurde vornehmlich durch geologische Prozesse im Pleistozän geprägt, als glazialgeologisch bestimmender Prozess haben hier der Wechsel von Vorstößen und Abschmelzen der weichselzeitlichen Gletscher das heutige Relief erschaffen. Die Gletscher der Weichselvereisung brachten zum Teil Material aus dem skandinavischen Raum mit, arbeiteten aber auch viel bereits in vorherigen Eiszeiten (Elster- Saaleeiszeit) herantransportiertes Material auf. Das aus diesem Prozess entstandene oberflächlich anstehende Ausgangsgestein ist der Geschiebemergel, der mit der heutigen Entkalkungstiefe bis auf 2m als Geschiebelehm das Ausgangssubstrat der rezenten Bodenbildung darstellt (LANU, 2006).

Die konservierend bewirtschaftete Versuchsfläche der CAU liegt auf dem Versuchsgut Hohenschulen in der Gemeinde Achterwehr, etwa 15 km westlich von Kiel, zwischen dem Zungenbecken des Westensees im Süden und dem Eidertal im Norden. Das Relief dieses Endmoränengebietes ist von eiszeitlichen Rinnen bzw. Tunneltälern durchzogen und naturgemäß hügelig. Mit Höhenunterschieden zwischen 10-20m, Hangneigungen von 5-15%

und Hanglängen von 50-200m ist das Relief insgesamt heterogener und deutlich steiler als auf den nordrhein-westfälischen Versuchsflächen. Die Entstehung des Untersuchungsgebietes geht auf das pommersche Stadium der Weichselvereisung zurück. Der letzte Hauptvorstoßes der Eisrandlagen überfuhr partiell vorliegende Binnensander früherer Vorstöße im Bereich des Rehmsberg und formte mit einer Seitenmoräne der einst im Westenseebecken gelegenen Gletscherzunge die Höhenlage des heutigen Versuchsgutes Hohenschulen (Horn et al., 1993). Die Untersuchungsflächen weisen eine hohe räumliche, geogen und pedogen bedingte Variabilität der Bodenarten und Bodentypen auf.

Die konventionell bewirtschaftete Versuchsfläche der CAU liegt auf dem Versuchsgut Lindhof in der Gemeinde Noer etwa 25 km nördlich von Kiel direkt am südlichen Ufer der Eckernförder Bucht. Das Landschaftsbild dieser kuppigen Grundmoränenlandschaft weist neben den Grundmoränen, Drumlins und Kames Reliefformen wie abflusslose Senken und erosive Schmelzwasserformen auf. Die Geländehöhen der Hofflächen variieren zwischen 3-38m über NN. Die Hangneigungen der Ackerschläge liegen, mit Ausnahme des nördlichen steilen Strandwallkomplexes, zwischen 2-27%. Die Entstehung des Untersuchungsgebietes geht auf einen von Norden her kommenden Gletschervorstoß des pommerschen Stadium bzw. Fehmarn-Vorstößes der Weichselvereisung zurück. Die Grundmoränenablagerungen weisen einen ca. 4% Geschiebe- und 96% Feinbodenanteil auf. Das Ausgangssubstrat der Bodenbildung wechselt kleinräumig zwischen Geschiebemergel, bzw. -lehm, Schmelzwassersand und Erosionsmaterial (Ziogas, 1995).

Schleswig-Holstein liegt in der temperierten, humiden Klimazone Nordeuropas, die wegen der östlich und westlich angrenzenden Meere als ozeanisch bezeichnet werden kann. Das Klima ist gekennzeichnet durch zögernden Temperaturanstieg im Frühjahr und wenig Hitzetage im Sommer. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 8,5°C mit einer mittleren Mindesttemperatur von 0°C im Januar und mittlerer Höchsttemperatur von 13°C im Juli. Die Jahresniederschläge fallen gegenüber dem nordrhein-westfälischen Versuchsstandort etwas höher aus (Jahresniederschlag 750 - 830mm) und sind über das Jahr gleichmäßiger verteilt. Die jährliche potentielle Verdunstung nach Haude beträgt im Mittel 550-600mm (DWD, 2008).

## **2.2 Böden und landwirtschaftliche Nutzung**

### **2.2.1 Versuchsregion Nordrhein-Westfalen**

Die Bodengesellschaften der nordrhein-westfälischen Löss- und Sandlösslandschaften sind aus äolischen Lössablagerungen und Schwemmlössen entstanden. Die Böden der Soester Börde lassen sich nach ihrer Hydromorphie räumlich deutlich zweiteilen. Die Grenze verläuft entlang der B1, des ehemaligen Hellweges, entlang eines Quellhorizontes. Südlich dieser Grenze weisen die Böden nur selten Hydromorphie Merkmale auf, nördlich, im Bereich des Untersuchungsgebietes, tritt über dem Emschermergel zunehmend Grund- und Stauwassereinfluss auf. Ursache des hohen Grundwasserstandes ist von Süden zugeleitetes Karstwasser der Haarrhöhe und des Oberhellweggebietes, das im Grundwasserstockwerk

über dem Emschermergel gen Norden hin abfließt. Die Flächen nördlich dieses Quellgebietes, wie auch die Versuchsflächen, sind weitgehend dräniert. Vorherrschende Substrate im gesamten Niederhellweggebiet ist Lösslehm meist über weichselzeitigem Löss, stellenweise aber auch direkt über Geschiebelehm oder Emschermergel. Die Entkalkungs- und Verlehmungstiefe liegt zwischen 0,8 bis 2m Tiefe, tiefer reichende Entkalkung ist durch das relativ hoch anstehende basenhaltige Grundwasser verhindert. Die Lössmächtigkeiten im Niederhellwegsgebiet schwankt zwischen 5 bis 8m, auf den Versuchsflächen um Merklingsen stehen unter der ca. 5m mächtigen Lössauflage Grundmoränenreste des Drenthestadium der Saaleeiszeit mit Geschiebemergel an. Vorherrschende Bodentypen sind pseudovergleyte Parabraunerden, z.T. auch Gley-Parabraunerden, die ab ca. 0,8m Tiefe vom Grundwasser beeinflusst sind Hohnvehlmann (1963) und Erkwow (1986) zitiert in Stemann et al. (2005) und Lütke Entrup (1999). Die pseudovergleyten Parabraunerden weisen tonangereicherte Sd-Bt Horizonte mit darunter liegendem stauendem Go-Horizont auf, wobei aber die Parabraunerdemerkmale in den Profilen überwiegen.

Die Versuchsflächen weisen insgesamt eine geringe Hangneigung auf. Bei der Versuchsfläche "NRW kons" („Reinecke“) handelt es sich um eine seit 1993 nichtwendend bearbeitete Fläche im Versuchsgutbetrieb. Die langjährig wendend bearbeitete Fläche "NRW konv" („Ruhmlifs Holz“) wurde für die Versuchsdurchführung zugepachtet. Die Bodenzahlen der Flächen liegen bei 70-75 Punkten mit der Zustandstufe L4 LÖ.

NRW / Lössstandort:	Versuchsgut Merklingsen der FH Südwestfalen <i>NRW kons/konv</i>
Bodenausgangssubstrat:	Lößlehm über Geschiebemergel schluffige Bodenarten (Ut3,Ut4 über sL, Ls)
Bodenbearbeitung:	konservierend (Mulchsaatverfahren seit 1993) und konventionell wendend 28cm Pflugtiefe
Fruchtfolge:	konservierend:      WW-GL-KM-WW-WH-WGe konventionell:      WGe-WR-ZR-WW-WW

Eine genaue Beschreibung der Fruchtfolge und der einzelnen Bodenbearbeitungsmaßnahmen über den Projektzeitraum der Versuchsflächen sowie deren Koordinaten finden sich im Anhang (vgl. Tabelle A 1).

### 2.2.2 Versuchregion Schleswig-Holstein

Die Bodengesellschaften der Jungmoränenlandschaften sind aus Geschiebemergel und – sanden, also vorwiegend basenreichen Substraten entstanden. Das glazial aufgeschobene kleinräumig stark variierende Ausgangssubstrat mit größeren Tongehaltsunterschieden und teilweise sandig-kiesigen Inseln hat die Bodengenese ausschlaggebend beeinflusst. Zum Teil ist es zu einer Überlagerung des Geschiebemergels und Geschiebedecksand gekommen (Janetzko & Schmidt, 1996). In höher gelegenen Geländeteilen entstanden, je nach Tongehalt und Vorverdichtung durch das Eis, Parabraunerden bis Pseudogleye. Mit abfallendem Relief sind, je nach Stau- und Grundwassereinfluss, pseudovergleyte Parabraunerden, Pseudogleye und Gleye zu finden. In Senken treten zumeist Gleye bis Niedermoore sowie entsprechende Übergangssubtypen auf. Im Bereich sandiger

Endmoränen sind häufiger Braunerden und Podsol-Braunerden zu finden. Im Zuge der Entwaldung und des Ackerbaus kam es zu verschiedenen Erosionsformen, die in den Kuppenbereichen zu erodierten gekappten Profilen und im Unterhangbereich und den Senken zur Kolluvienbildung geführt haben (Richter, F.-H., 2005).

SH / Jungmoränenstandorte: Versuchsgut Hohenschulen und Versuchsgut Lindhof der CAU zu Kiel

Bodenausgangssubstrat: Geschiebelehm über Geschiebemergel sandig lehmige Bodenarten (Ls3, Ls4, SI4, SI3, SI2)

Bodenbearbeitung: konservierende Bodenbearbeitung (Horsch Verfahren)  
Versuchsgut Hohenschulen (SFB 192) *SH kons*  
konventionell wendend 30cm Pflugtiefe  
Versuchsgut Lindhof *SH konv*

Fruchtfolgen: Hohenschulen: RA- WW- WGe  
Lindhof: KG-SHa-KA-GL-SW

Die konservierend bewirtschafteten Versuchsflächen „SH kons“ liegen im Norden des Versuchsgutes Hohenschulen zwischen der Bahnlinie und der Autobahn Kiel-Rendsburg und fallen von Süden her von ca. 22m über NN gen Nordosten und Nordwesten mit etwa 5% Gefälle ab. Die Flächen gehörten zum Sonderforschungsbereich 192 („SFB 192“) der 1991 an der Universität Kiel eingerichtet wurde. Dieses über sein Ende hinaus bewirtschaftete Modellbeispiel einer in Schleswig-Holstein weit verbreiteten Fruchtfolge untersucht die Rückwirkungen verschiedener Intensitätsfaktoren (z.B. Düngung, Pflanzenschutz, Bodenbearbeitung) auf Leistung, interne Regelungskreisläufe sowie ökologische Effekte (z. B. Nitratauswaschung, Bodenverdichtung) in ackerbaulich genutzten Böden. Die dem Projekt zur Verfügung gestellten Ackerschläge werden seit 1991 mit dem konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren der Frässohlensaat (Horsch System) bis in ca. 8cm Tiefe bearbeitet.

Die konventionell bewirtschaftete Versuchsfläche „Kleine Hofkoppel“ auf dem Lindhof „SH konv“ liegt direkt östlich an die Hofgebäude anschließend in 25m über NN auf einer langgestreckten NO-SW verlaufenden Moränenkuppe mit schwacher Hangneigung (1%). Das Ausgangssubstrat der Versuchsfläche besteht aus einer ca. 2m mächtigen Geschiebemergelaufgabe die z.T. mit Schmelzwassersanden unterlagert ist (Ziogas, 1995). Die Fläche wird seit 1997 nach Richtlinien des ökologischen Landbaus mit einem 50%igen Leguminosenanteil und konventionell wendendem Bodenbearbeitungsverfahren bis in 30cm Tiefe bearbeitet.

Die Bodenzahlen der beiden Versuchsstandorte schwanken zwischen ca. 45 Punkten (Lindhof) und ca. 55 Bodenpunkten auf dem Versuchsgut Hohenschulen.

Eine genaue Beschreibung der Fruchtfolge und der einzelnen Bodenbearbeitungsmaßnahmen über den Projektzeitraum der Versuchsflächen sowie deren Koordinaten finden sich im Anhang (vgl. Tabelle A 2).

### 2.3 Versuchskonzept

Als Grundlage für die Untersuchungen dienten Befahrungsversuche die an zwei Terminen pro Jahr auf allen Versuchsflächen durchgeführt wurden. Die Wahl der Versuchsparameter der Befahrungen erfolgte mit der Zielsetzung, den Boden mechanisch zu belasten und mit verschiedenen Belastungssituationen unterschiedliche Lastkombinationen zu simulieren, um deren Auswirkungen auf den Boden zu untersuchen. Insgesamt nahmen mit den Instituten der Bodenkunde und Geophysik der CAU Kiel sowie der Abteilung Landtechnik an der Fachhochschule Südwestfalen drei wissenschaftliche Fachbereiche an den Untersuchungen teil, weshalb die Überfahrungsversuche auf einer großflächigen Parzellenversuchsanlagen mit randomisiertem Blockdesign und drei Wiederholungsmessungen für jede Variante durchgeführt wurden (siehe auch Abbildung 2). Neben den festen Versuchparzellen wurden zusätzlich Sonderbefahrungsbereiche ausgewiesen, die speziellen Untersuchungen dienten (großflächiger Verdichtung, Mehrfachbefahrungen). Das Bodenausgangssubstrat und die Bodenbearbeitung wurden als Hauptversuchsfaktoren definiert, drei unterschiedliche Radlasten (3,3/6,3/7,5Mg) mit jeweils zwei Reifeninnendrücken als sekundäre Versuchsfaktoren. Mit den Messungen in den unterschiedlichen Ausgangssubstraten sollten die mechanischen Stabilitätseigenschaften hinsichtlich der geogenen Belastungshistorie des Bodens untersucht werden. Die Berücksichtigung des Bodenbearbeitungssystems sollte eventuell bodenschonende Merkmale der konservierenden Bodenbearbeitung aufzeigen. Die Wahl der Lastvarianten und der Bereifung 650/75 R32 (zugkraftoptimiert) und 650/75 R38 (Tragfähigkeitsoptimiert) orientierte sich an der fachlichen Praxis und entspricht aktuellen Belastungen die bei leistungsfähigeren Schleppern während der Bodenbearbeitung bzw. Pflegemaßnahmen und bei Erntefahrzeugen auftreten. Die Kombinationen zwischen Radlast und Reifeninnendruck ergaben sich aus der Limitierung des Reifenherstellers für den geringsten Reifeninnendruck und einem komfortablen Reifeninnendruck der gängigen Praxis, welcher einheitlich für Ackerfahrten und Straßennutzung Anwendung findet (vgl. Tabelle 1).

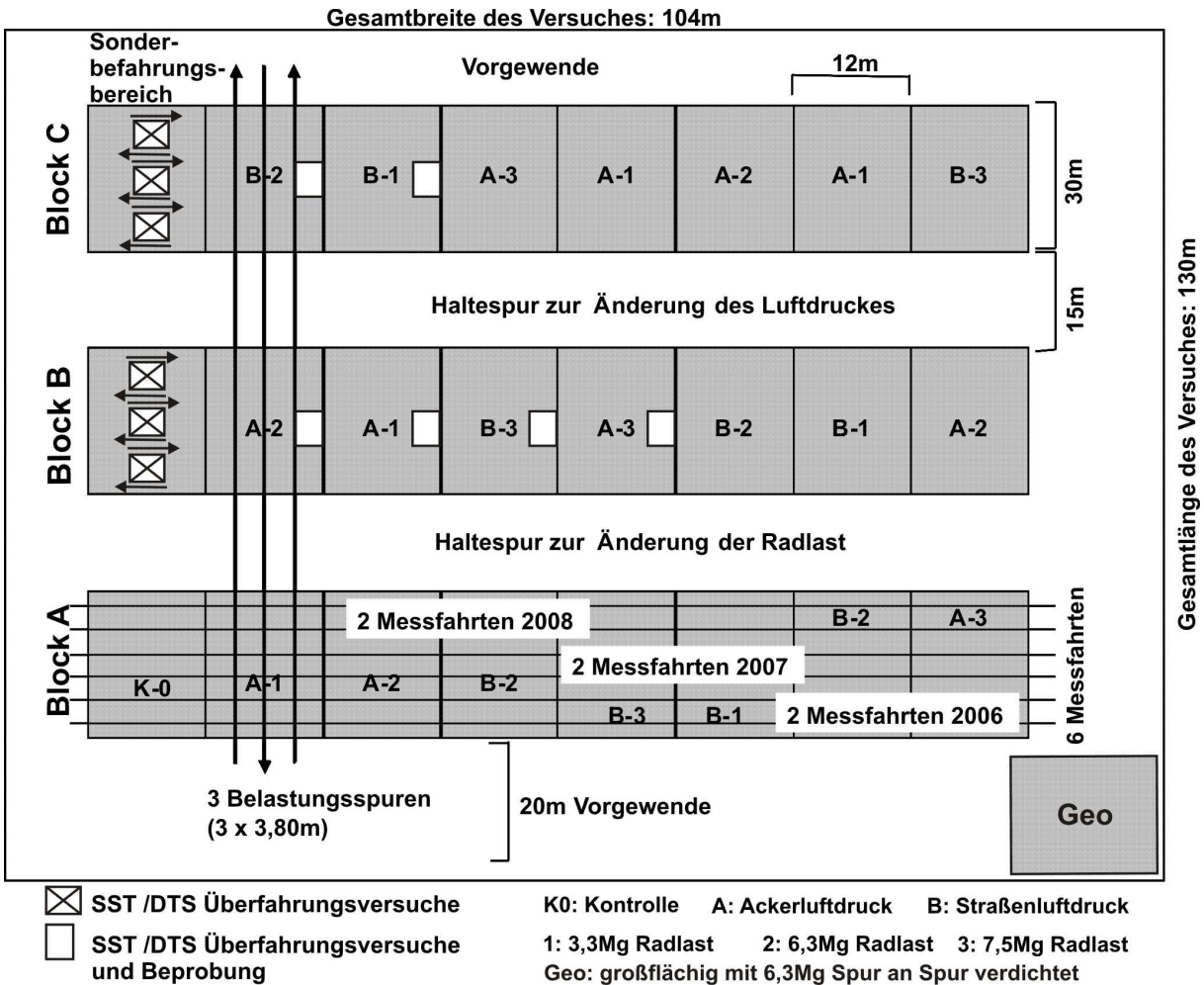


Abbildung 2: Beispiel des Feldversuchsaufbaus einer Untersuchungsfläche

Tabelle 1: Übersicht der Reifeninnendruck / Radlastkombination

Bezeichnung	Radlast	Reifeninnendruck
A1	3,3Mg	50kPa
B1	3,3Mg	160kPa
A2	6,3Mg	160kPa
B2	6,3Mg	250kPa
A3	7,5Mg	250kPa
B3	7,5Mg	350kPa
Geo	15*15m flächenhaft Spur an Spur verdichtet 6,3Mg	250kPa

Alle Versuche wurden im zeitigen Frühjahr bzw. späten Herbst zu Zeitpunkten mit Bodenwassergehalten durchgeführt, welche bis in den Oberboden nahe der Feldkapazität (-60hPa) lagen. Die für die Versuche gewählten Bodenfeuchtezustände sollten repräsentativen Bodenwassergehalten der untersuchten Böden während üblicher Befahrungszeiten im jahreszeitlichen Betriebsablauf entsprechen.



Abbildung 3: Der Lastrahmen MOVIS mit Betonregistergewichten im Trägerrahmen

Um die verschiedenen Auflasten in den Boden einzubringen wurde der Lastrahmen (MOVIS) der FH Südwestfalen genutzt (Abbildung 3), welcher erlaubte die Geschwindigkeit, die Radlast und den Reifeninnendruck für die einzelnen Versuchparzellen anzupassen. Der Rahmen wurde von einem Schlepper gezogen, wodurch alle Befahrungen ohne Schlupfeffekte durchgeführt wurden. Die gewählte Überfahrgeschwindigkeit von 1,4m/s (5km/h) wurde an praxisnahe Befahrgeschwindigkeiten während Bodenbearbeitungs- und Pflegemaßnahmen angepasst. Beginn der Untersuchungen war im Frühjahr 2006, die letztmalige Befahrung fand im Frühjahr 2008 statt.

## 2.4 Probenahme, Profilansprache und Laboranalytik

### 2.4.1 Probenahme und Profilansprache

Auf allen Versuchsflächen wurden unter Zuhilfenahme detaillierter Bodenkarten und vorangehender Bohrstockkartierung repräsentative Leitprofile angelegt (AD-hoc-AGBoden, 2005). Anhand von Schürfgruben wurden horizontspezifisch Misch- und Stechzylinderproben in vertikaler und z.T. horizontaler Entnahmerichtung entnommen um den Ausgangszustand der bodenphysikalischen Eigenschaften zu definieren. Die Stechzylinderproben wurden je nach vorgesehenem Laborversuch mit fünf bis sieben Wiederholungen pro Horizont entnommen. Die Fahrspuren der Belastungsvarianten wurden nach einmaliger Überfahrung in drei Horizonten tiefenrepräsentativ, in Anlehnung an die Messtiefen der Bodendruckmessungen, in 20-25cm, 40-45cm und 60-65cm ebenfalls über Schürfgruben beprobt, die Leitprofile zusätzlich noch im Bereich des Bearbeitungshorizontes (10-15cm) und in der Krumbasis bzw. Pflugsohle (30-35cm).

### 2.4.2 Laboranalytik

#### 2.4.2.1 Grundanalytik

Die Grundanalytik erfolgte horizontspezifisch anhand der gestörten Mischproben der einzelnen Bodenprofile und umfasste die Bestimmung der *Korngrößenverteilung* mit der Sieb- und Pipettanalyse (DIN ISO 11277) nach Hartge & Horn (1992), das Bestimmen des Gehaltes an *organischer Substanz* (Corg) mittels coulometrischer Titration und Veraschung im Ströhlein Coulomat 702 (DIN ISO 10694), pyknometrische Bestimmung der *Festsubstanzdichte* nach Blake & Hartge (1986) sowie Messungen der *pH-Werte* in einer

0,01M CaCl<sub>2</sub> Lösung (DIN ISO 10390, bzw. Schlichting et al. (1995)). Für die Berechnung des *Gesamtporenvolumens* (GPV), der *Trockenrohddichte* ( $\rho_t$ ), der *Porengrößenverteilung*, der mechanischen Stabilitätseigenschaften *Vorbelastung*, *Kohäsion* und *Winkel der inneren Reibung* ( $P_v, C, \varphi$ ) sowie der hydraulischen und pneumatischen Eigenschaften ( $k_f, k_l$ ) dienten ungestörte Stechzylinderproben mit definiertem Probenvolumen von 100cm<sup>3</sup> bzw. 263cm<sup>3</sup>. Trockenrohddichte, Porenvolumen und *Wassergehalt* der Bodenproben wurden gravimetrisch über Wägung und Trocknung (24 Std.) bei 105°C berechnet (DIN ISO 11465). Die Porengrößenverteilung lies sich über Wasserspannungs- Wassergehaltsbeziehungen oder sog. Wasserspannungskurven (pF-Kurven) mit einer kombinierten keramischen Über- und Unterdruckapparatur (DIN ISO 11274) bestimmen. Die Proben wurden erst aufgesättigt und dann schrittweise entwässert und gewogen um über die Wassergehalte der verschiedenen Entwässerungsstufen die Anteile der verschiedenen Porengrößenklassen zu ermitteln (Schlichting et al., 1995). Die Wassergehaltsunterschiede zwischen 0- -60hPa Matrixpotential sind nach KA5 AD-hoc-AGBoden (2005) als Anteil an weiten Grobporen (>50 $\mu$ m) und als *Luftkapazität* (LK) definiert, zwischen -60- -300hPa als Anteil an engen Grobporen (>10 $\mu$ m), zwischen -300- -15000hPa als Anteil an Mittelporen (>0,2 $\mu$ m) und über -15000hpa als Anteil an Feinporen (<0,2 $\mu$ m) (AD-hoc-AGBoden, 2005; Hartge & Horn, 1999). Die einzelnen Porenklassen und damit die Unterteilung des Porensystems werden als arithmetische Mittelwerte von fünf Wiederholungsproben je Bodenhorizont angegeben. Die hydraulischen Eigenschaften, d.h. die *gesättigte hydraulische Leitfähigkeit*  $k_f$ , der Böden wurden ebenfalls horizontbezogen nach dem instationären Verfahren von De Boodt (1967), zitiert in Hartge & Horn (1992) mit einem Haubenpermeameter bestimmt. Dabei erfolgten drei Wiederholungsmessungen an jeweils sieben vertikal und horizontal entnommenen Stechzylinderproben je Horizont. Die *Luftleitfähigkeit*  $k_l$  wurde mit definiert vorentwässerten (pF<sub>1,8</sub>) ungestörten Stechzylinderproben mittels eines Acryldurchflussmessgerätes mit Schwebekörpern bei konstantem Luftdruckgradienten von 1hPa gemessen (Peth, 2004). Die gleichen Proben wurden ebenfalls verwendet um die mechanische Stabilität der einzelnen Bodenhorizonte mittels eindimensionalen Kompressionsversuches mit verhinderter Seitenausdehnung (DIN 18135) und des direkten Kastenscherversuches unter konsolidiert dränierten Bedingungen (DIN 18137-3) zu bestimmen. Diese Bodenproben wurden zunächst aufgesättigt und dann vor dem Versuch auf keramischen Platten definiert auf -60 bzw. -300hPa entwässert, um die mechanische Stabilität unter Berücksichtigung effektiver Spannungszustände bestimmen zu können (DVWK, 1995). Die für den Versuch gewählten Wasserspannungen entsprechen repräsentativen Bodenwassergehalten der untersuchten Böden während des Jahresverlaufes bzw. während üblicher Befahrungszeiten im jahreszeitlichen Betriebsablauf. Das Drucksetzungsverhalten der vorentwässerten Bodenproben wurde mit einer Multistepdrucksetzungsanlage über schrittweise zunehmende pneumatische Belastung bestimmt. Insgesamt wurden 11 Auflastschritte von 20 bis 400kPa über jeweils 10 Minuten mit gleichzeitiger Beobachtung des Porenwasserdrucks aufgetragen



Tabelle 2: Einstufung bodenphysikalischer Kennwerte

Bezeichnung	Stufe	Pv kPa	$\rho_t$ g/cm <sup>3</sup>	GPV Vol.-%	LK Vol.-%	kf cm/d	kl cm/s*10 <sup>-4</sup>
sehr gering	1	<30	<1,2	<30	<2	<1	<5,5
gering	2	30-60	1,2-1,4	30-38	2-5	1-10	5,5-12
mittel	3	60-90	1,4-1,6	38-46	5-13	10-40	12-25
hoch	4	90-120	1,6-1,8	46-54	13-26	40-100	25-55
sehr hoch	5	120-150	>1,8	>54	>26	100-300	>55
extrem hoch	6	>150	-	-	-	>300	-

Pv: Vorbelastung, kPa

 $\rho_t$ : Trockenrohdichte, g/cm<sup>3</sup>

GPV: Gesamtporenvolumen, Vol%

LK: Luftkapazität, Vol%

kl: Luftleitfähigkeit, cm/s\*10<sup>-4</sup>

kf: gesättigte Wasserleitfähigkeit, cm/d

und mit dem graphischen Verfahren nach Casagrande (1936) der Stabilitätsparameter „Vorbelastung“ (precompression stress  $P_c$ ) bestimmt. Für die Bestimmung der Scherparameter wurden zuvor komprimierte Bodenproben (5 Std. dränierte Auflast im Ödometervon 30/50/100/200/400kPa) im direkten Scherversuch (dräniertes Kastenscherversuch mit behinderter Seitenausdehnung) mit konstantem Vorschub von 0,2mm/min und definierten Auflasten seitlich abgesichert und dabei der Scherwiderstand gemessen. Über das Auswertungsverfahren der Mohr-Coulomb'schen Bruchgeraden wurden die Materialeigenschaften Kohäsion und Winkel der inneren Reibung definiert.

Die Einordnung der bodensystematischen Einheit und die Bewertung ihrer bodenphysikalischen Eigenschaften erfolgte nach (AD-hoc-AGBoden, 2005; Scheffer & Schachtschabel, 2002; DVWK, 1997; 1995) (Tabelle 2).

#### 2.4.2.2 Dynamischer Drucksetzungsversuch mit kurzfristigen Spannungseinträgen

Um das Drucksetzungsverhalten des Bodens bei kurzfristigen Spannungseinträgen wie sie durch Befahrung ackerbaulich genutzter Böden mit landwirtschaftlichen Fahrzeugen auftreten zu untersuchen, wurden bei Feldkapazität entnommene Stechzylinderproben in einem dynamischen Kompressionsversuch schrittweise zunehmend mehrfach kurzfristig belastet. Der Versuchsaufbau orientierte sich dabei an der allgemein angewandten Untersuchungsmethode des dränierten eindimensionalen Kompressionsversuches mit verhinderter Seitenausdehnung (Ödometerversuch) (DIN 18135) und wurde mit einem spindeltriebgesteuerten Prüfrahmen "INSTRON" mit 8 Druckstufen (20/ 30/ 50/ 70/ 100/ 200/ 300/ 400kPa) durchgeführt. Während des Versuches wurde der zeitliche Verlauf der Setzung der Probe bei jeder Lastaufbringung über Wegaufnehmer aufgezeichnet. Die Belastungszeit der einzelnen Lastaufträge orientierte sich mit <2s an gemessenen Spannungseintragungslängen die bei den Bodendruckmessungen der Überfahrungsversuche mit 1,4m/s Befahrungsgeschwindigkeit während der Feldversuchen ermittelt wurden. Mit der Anpassung der Belastungszeit des Laborversuches an die im Feld gemessenen Spannungseintragungslängen und der dabei ermittelten Bodenstabilität sollte eine direkte

Vergleichbarkeit der im Feld gemessenen Spannungseinträge und der im Labor ermittelten Bodenstabilität erreicht werden. Um höhere Überfahungshäufigkeiten in stark befahrenen Feldarealen und mehrachsige Fahrzeuge und die daraus resultierenden wiederholten kurzfristigen Spannungseinträge zu berücksichtigen, wurden 10 kurzfristige Belastungen in jeder Auflaststufe auf die Probe aufgebracht bevor sich die Auflast erhöhte (vgl. Abbildung 4). Die Gesamtbelastungszeit eines Versuches betrug damit ca. 160s. Aufgrund des ähnlichen Setzungsverhaltens unter dynamisch kurzfristiger Belastung wurde der Stabilitätsparameter „Vorbelastung“ wie auch bei der Auswertung des statisch dräniert konsolidierten Ödometerversuchs ausgewertet. Bei den dynamischen Versuchen wurde dann mit halblogarithmischer Gegenüberstellung der Porenzifferänderung und der Auflast ( $\log-\sigma_n$ ) nach dem graphischen Verfahren von Casagrande (1936) die Vorbelastung für den Setzungsverlauf nach einer kurzfristigen sowie nach 10 kurzfristigen Belastungen bestimmt (Abbildung 5).

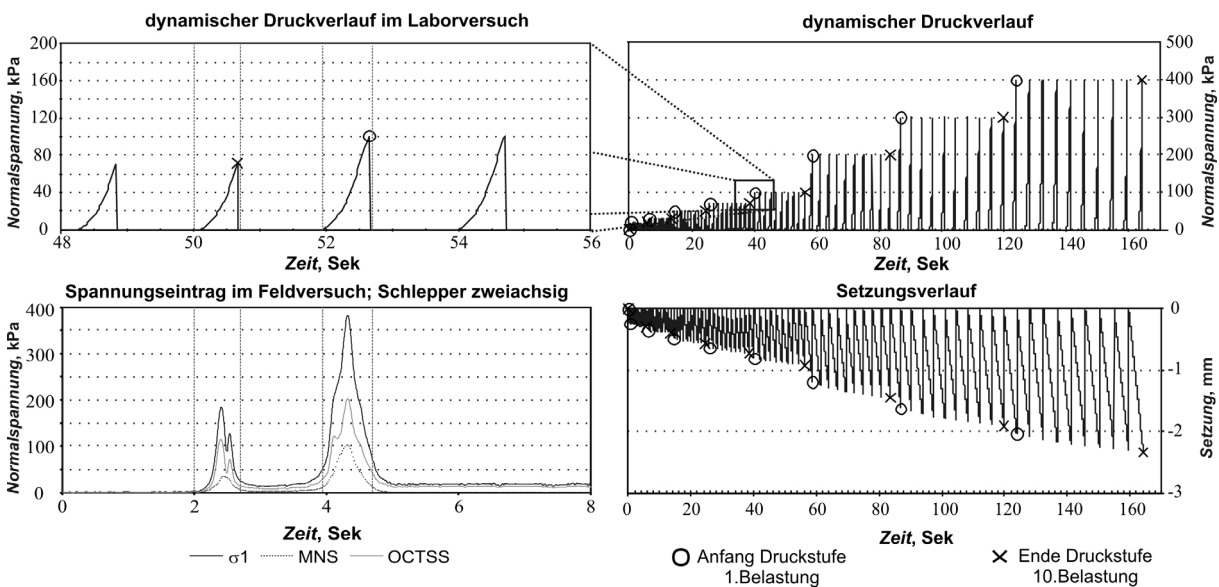


Abbildung 4: Dynamischer Drucksetzungsversuch; links: vier impulsartige Einzelbelastungen über den Wechsel der Auflaststufen 70 zu 100kPa (oben) in zeitlicher Gegenüberstellung zu einem im Feldversuch ermittelten Belastungspfad (unten); rechts: dynamischer Belastungsverlauf mit zehn Auflastwiederholungen und 8 Druckstufen bis 400kPa (oben) in Gegenüberstellung zum vertikalen Sofortsetzungsverhalten der Bodenprobe (unten)

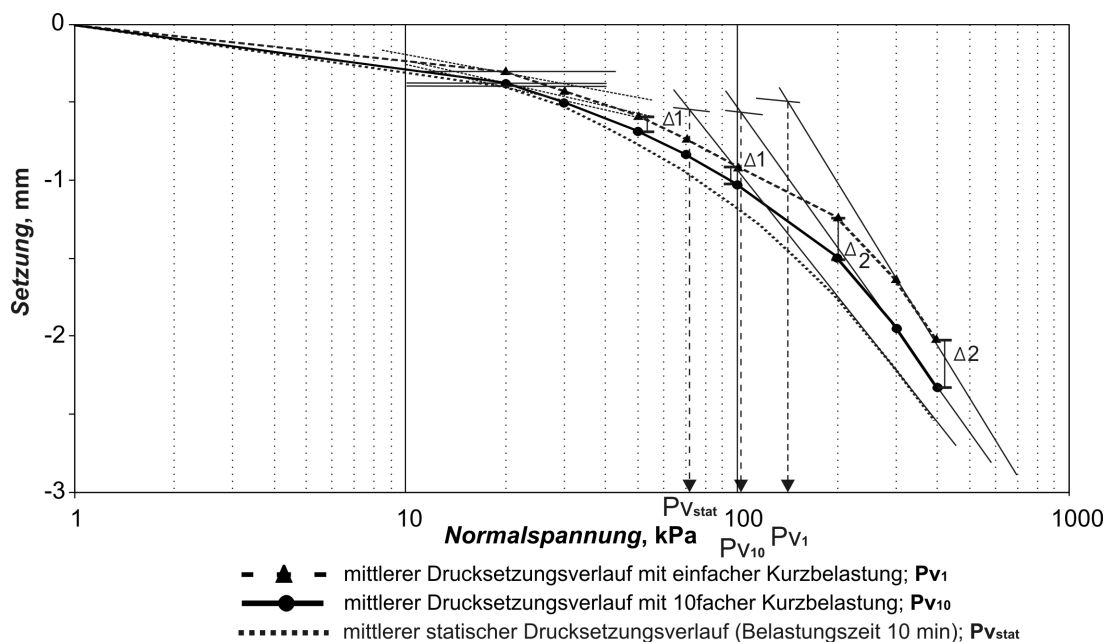


Abbildung 5: Graphisches Auswertungsverfahren der Vorbelastung nach Casagrande am Beispiel mittlerer Setzungsverläufe der dynamischen und statischen Drucksetzungsversuche eines Unterbodenhorizontes (40cm) der konventionell bewirtschafteten Fläche in NRW ( $n=6$ )

## 2.5 Feldversuche

Die Überfahrungsversuche fanden zum Einen innerhalb der Parzellenversuchsanlage und zum Anderen in benachbarten Sonderbefahrungsbereichen statt. Für jede Auflastvariante wurden drei Wiederholungen von Einzelüberfahrten sowie Zehnfachüberfahrten mit Bodendruck- und Deformationsmessungen begleitet. Die Reifenaufstandsflächen jeder Versuchsvariante wurden an repräsentativen unbefahrenen Feldbereichen in der Nähe der Versuchsparzelle durch Umstäuben des stehenden Belastungsrades mit Mehl erfasst. Das Rad wurde vorsichtig aus dem Mehlabdruck ausgehoben und aus senkrechter Perspektive mit Maßstab fotografiert. Anschließend erfolgte eine fotoanalytische Auswertung mithilfe der Software Corel PHOTO-PAINT 12. Der Abdruck wurde aus dem Foto ausgeschnitten, anhand des fotografierten Maßstabes wurde über Auszählen der Pixel der Maßstab des Fotos bestimmt. Mit dem Programm scion image 4.0.3. wurde dann die Gesamtpixelanzahl der Abdruckfläche ermittelt und die Berührfläche berechnet. Voraussetzung für dieses Verfahren ist eine Digital-Kamera mit gleichmäßiger Pixelverteilung im Bild die keine Auto-Korrektur-Programme anwendet. Die mittleren Kontaktflächendrücke der Reifen/Bodenberührebene wurden dann aus den ermittelten Kontaktflächen und den gewogenen Radlasten errechnet. Heterogene Spannungsverteilungen in der Berührebene wie Spannungskonzentrationen im Bereich der Stollenaufstandsflächen konnten mit dem Verfahren nicht berücksichtigt werden.

### 2.5.1 Spannungs- und Deformationserfassung

Die Druckfortpflanzung und Deformation der Böden während der Befahrungsexperimente wurde mit einem kombinierten Stress State Transducer (SST) und Displacement Transducer System (DTS) gemessen (Kühner, 1997). Die verwendeten SST Bodendrucksensoren basieren auf der von Harris (1960) zitiert in Nichols et al. (1987) vorgestellten Technik der gerichteten Spannungsmessung und bestehen aus einem 65mm großen Aluminiumkörper mit sechs Einzeldehnmessstreifen. Die Anordnung der Dehnmessstreifen orientiert sich an den Gesetzen der Statik im Kontinuum und ermöglicht mit der zeitgleichen Messung von sechs gerichteten Normalspannungen die Berechnung des Spannungstensors und damit die Bestimmung des Spannungszustandes für einen theoretisch unendlich kleinen Punkt im Boden (Koolen & Kuipers, 1983; Kezdi, 1969). Um die Installation des Messsystems und den Kontakt des Sensors zum ungestörten Boden zu verbessern und Messfehler durch einbaubedingte Störungen zu vermeiden, wurde die Anordnung der Dehnmessstreifen gesamt um  $50,7^\circ$  auf die vordere Kugelhälfte des Sensorkopfes verlagert (Gräsle, 1999), der Einbaukanal vor dem Setzen des Sensors mit einem speziellen Einbauwerkzeug an die Form des vorderen Kugelausschnittes angepasst und danach mit einem Negativstempel des Sensorkopfes präpariert. Über die lotrechte Präparierung und Installation konnte damit erreicht werden, dass Zonen mit gelockertem bzw. stärker verdichtetem Bodenmaterial um das Messgerät herum vermieden wurden und die gesamte Oberfläche jedes Dehnmessstreifen in Kontakt mit dem ungestörten Boden ist. Tendenzen der Spannungsüberschätzung oder Spannungsunterschätzung durch den Einbauvorgang konnten damit minimiert werden. Während eines dynamischen Lasteintrages kommt es zum Rotieren der Hauptspannungsrichtungen, wodurch die vollständige Beschreibung des Belastungsereignisses schwierig ist. Daher wurden aus den eingetragenen Spannungen, unter Berücksichtigung ihrer Richtungskosini ( $l, n, m$ ), die drei Hauptspannungen  $\sigma_1, \sigma_2$  und  $\sigma_3$  sowie die beiden richtungsunabhängigen Parameter MNS (mittlere Normalspannung) oder auch  $\sigma_{\text{oct}}$  (oktaedrische Normalspannung) und OCTSS (oktaedrische Scherspannung) zu einem Zeitpunkt des maximalen Spannungseintrages bestimmt (siehe Abbildung 6  $\sigma_1 \text{ max}$ ). In diesem Moment ist die Belastung direkt senkrecht über dem Sensor, so dass die Invarianten MNS als Normalspannungskomponente und OCTSS als tangentielle Spannungskomponente den vollständigen Spannungszustand im Boden beschreiben. (weitere Details in (Gräsle, 1999; Horn et al., 1998; Kühner, 1997; Wiermann et al., 1997; Nichols et al., 1987; Koolen & Kuipers, 1983))

$$\sigma_n = (l^2)\sigma_x + (m^2)\sigma_y + (n^2)\sigma_z + 2(l)(m)\tau_{xy} + 2(m)(n)\tau_{xz} + 2(n)(l)\tau_{yz} \quad \text{Gl. 1}$$

mit:

$$\begin{aligned} \sigma_{x, y, z} &= \text{orthogonale Normalspannungen der Ebenen x, y, z} \\ \tau_{xy, xz, yz} &= \text{oktaedrische Scherspannungen} \\ \sigma_n &= \text{Normalspannungen der Berechnungsebene } (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \\ l &= \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \\ n &= \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{Kosini der Winkel zwischen den Senkrechten der} \\ m &= \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{Berechnungsebenen und den Richtungen x, y, z} \end{aligned}$$

$$\sigma_{oct}(OCTNS, MNS) = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad \text{Gl. II}$$

$$\tau_{oct}(OCTSS) = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad \text{Gl. III}$$

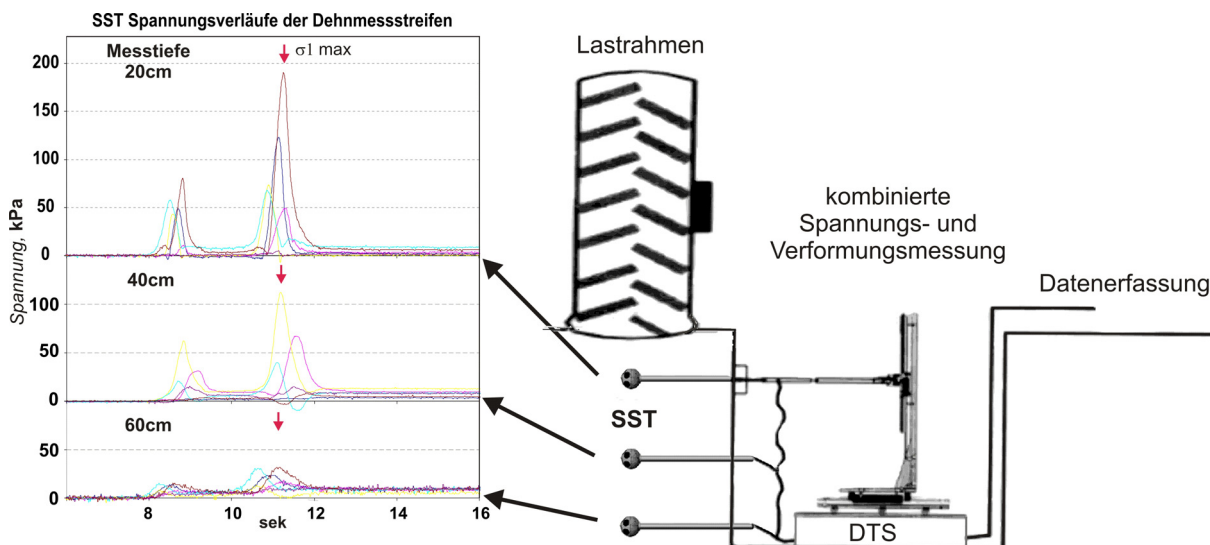


Abbildung 6: Feldversuchsaufbau einer Spannungsmessung (SST) mit kombinierter Deformationsmessung (DTS); links: Verlauf der gemessenen Spannungseinträge der sechs Dehnmessstreifen in drei Installationstiefen am Beispiel einer Einzelüberfahung eines zweiachsigen Ackerschleppers

Die Bodendrucksensoren wurden von einer 1x1m großen, ca. 80cm tiefen Grube in drei Messtiefen (20, 40, 60cm) seitlich und quer zur Belastungsrichtung in den ungestörten Boden eingebaut und ermöglichen die Spannungsmessung und die Bestimmung der Druckfortpflanzung unter der Fahrspur mit Berücksichtigung der vorhandenen Bodenstruktur (siehe Abbildung 6).

Im Ganzen wurden mit sechs Belastungsvarianten 72 *Einzelbefahrungen* und 16 *Mehrfachbefahrungen* auf den vier Versuchsflächen durchgeführt. Für die Bestimmung der aus den mechanischen Belastungen resultierenden Bodendeformation wurde einer der Drucksensoren über ein kugelgelagertes Gelenksystem an das von Kühner (1997) entwickelte Displacement Transducer System (DTS) angeschlossen. Dieses mechanische Schlittensystem wird nivelliert in der Messgrube installiert und zeichnet die dreidimensionale (vertikalen und horizontalen) Sensorbewegung während der Überfahrt auf. In Kombination mit den Spannungsmessungen ermöglicht dieser Versuchsaufbau das Drucksetzungsverhalten des Bodens im direkten Feldversuch mit dynamisch kurzfristigem Spannungseintrag aufzuzeichnen. Durch die Erfassung der Spurtiefe und DTS-Messungen in zwei Messtiefen kann zudem eine Differenzierung der elastischen und plastischen Verformungsanteile bzw. der Proportionen an reversibler und irreversibler Setzung sowie die Scherung im Boden (siehe Abbildung 7) abgeleitet werden. Die Deformationsmessungen erfolgten zeitgleich zu den Druckmessungen in den Messtiefen 20 und 40cm. (weitere Details in (Voßbrink, 2005; Wiermann, 1998; Kühner, 1997))

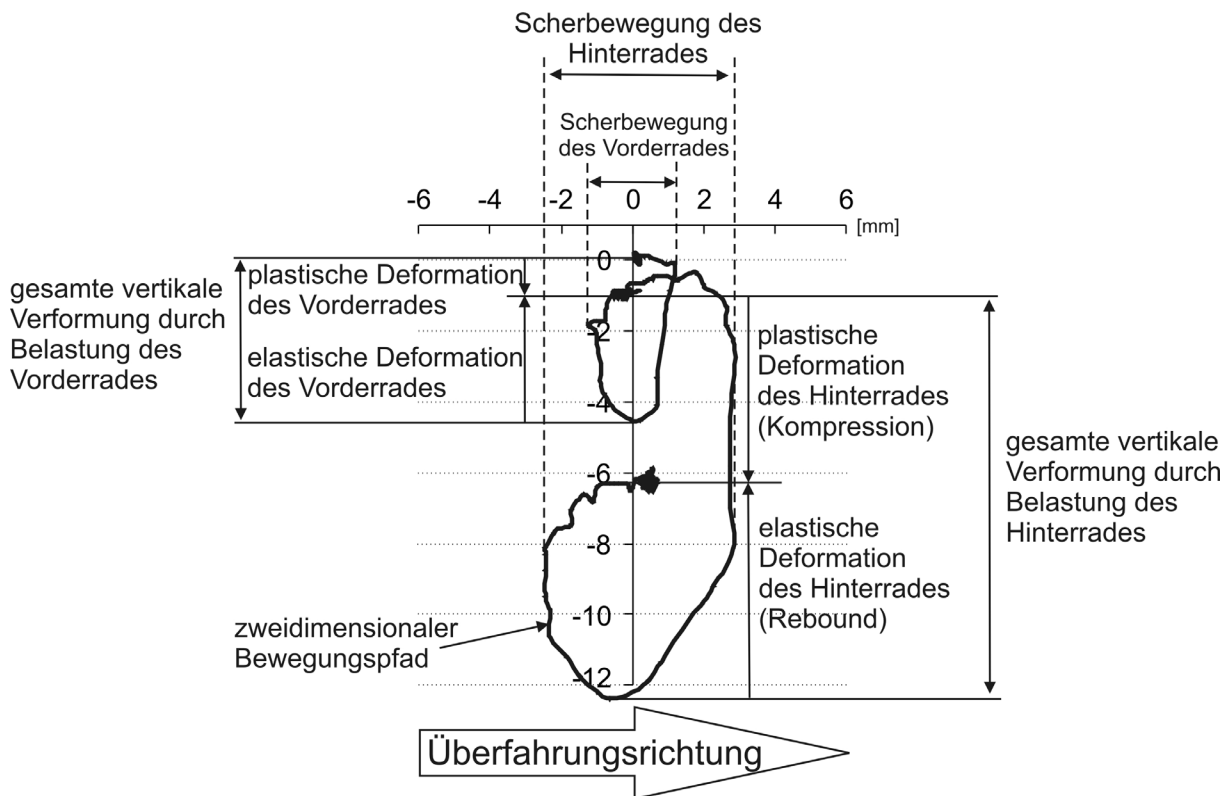


Abbildung 7: Zweidimensionaler Bewegungspfad einer DTS- Messung mit der Differenzierung einzelner Verformungsanteile am Beispiel eines zweiachsigen Ackerschleppers

## 2.5.2 Infiltrationsmessungen

### Guelph- Permeameter

Eine Methode zur Bestimmung der feldgesättigten Leitfähigkeit stellt die Bohrlochinfiltromessung mit dem Guelph-Permeameter dar. Es handelt sich bei dieser Methode um ein „constant head well“-Permeameter, also ein Meßgerät, das in einem „Brunnen“ (Bohrloch) einen konstanten Überstau einstellt und die dazugehörige zeitabhängige Infiltration des Wassers misst. Die definierte Wasserstandshöhe im Bohrloch dient als Quellfläche für stationäre Infiltrationsbedingungen und wird über eine Mariotte'sche Flasche über den gesamten Versuch erhalten. Bei der Guelph-Infiltration ist die kumulative Wasseraufnahme des Bodens Grundlage der Auswertung. Diese basiert auf dem Verfahren von Elrick & Reynolds (1992), in dem sowohl gesättigte als auch ungesättigte Flüsse berücksichtigt werden:

$$Q = \left[ \left( \frac{2\pi H^2}{C} \right) + \pi r^2 \right] \cdot k_{fs} + \left( \frac{2\pi H}{C} \right) \cdot \Phi_m \quad \text{Gl. IV}$$

mit:

$K_{fs}$	= feldges. Leitfähigkeit, cm/d
$H$	= Höhe des Wasserspiegels im Bohrloch, cm
$r$	= Radius des Bohrlochs, cm
$C$	= dimensionsloser Formfaktor (= f (H/r))
$Q$	= Wasseraufnahme des Bodens, cm <sup>3</sup> /d
$\Phi_m$	= Matrix-Fluss-Potential, cm <sup>2</sup> /d
$\alpha$	= Lufteintrittspunkt, 1/cm

Zur Eliminierung der Unbekannten  $\phi_m$  („single head analysis“) wurde der Anteil zwischen kapillar verursachter und gravitationsbedingter Infiltration nach dem Verhältnis in Gl. V angenommen. Für  $\alpha$  wurden unter Berücksichtigung der Bodenstruktur und Textur Literaturwerte aus Elrick & Reynolds (1992) übernommen.

$$\frac{k_{fs}}{\Phi_m} = \alpha \quad \text{Gl. V}$$

Für jede Belastungsvariante (Fahrspur) wurden mit einem speziellen Flügelbohrer Bohrlöcher bis in die gewünschte Infiltrationsmesstiefe in den Boden eingetrieben und anschließend mit einer Bürste aufgeraut. Die Messtiefen orientierten sich für die spätere Vergleichbarkeit an den beprobten Bodenhorizonten. Pro Belastungsvariante wurden zwei Wiederholungsmessungen je Messtiefe durchgeführt. Die Infiltrationsversuche in verschiedenen Tiefen ermöglichten eine tiefendifferenzierte in situ Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit für die Ausgangsbedingungen und die schwerste Verdichtungsvariante mit 7,5Mg.

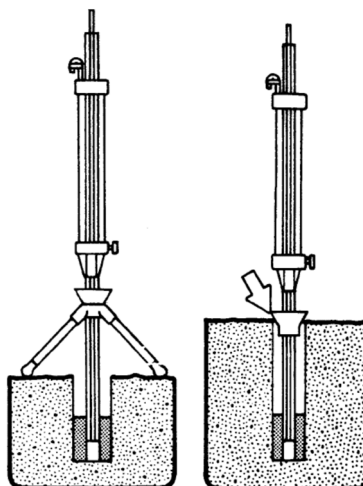


Abbildung 8: Aufbau des Guelph-Permeameters, links für geringe Tiefen, rechts für hohe Bohrlöchtiefen; Quelle: (Durner, 2008)

## Haubeninfiltrrometer

Das Haubeninfiltrrometer (siehe Abbildung 9) misst nahe dem gesättigten Bereich die hydraulische Leitfähigkeit von Böden im Feldversuch. Die Infiltration erfolgt aus einer auf den Boden gesetzten geschlossenen, mit Wasser gefüllten Haube. Die vom Wasser bedeckte kreisförmige Bodenoberfläche unter der Haube bildet die Quellfläche für den Infiltrationsfluss. Für die Infiltrationsversuche standen, je nach Leitfähigkeit des Bodens, zwei Hauben mit einem Verhältnis der Infiltrationsflächen von etwa 1:2 zur Verfügung. Für die Messung musste das Wasser der Quellfläche unter leichtem Unterdruck stehen. Die hydraulische Druckhöhe unter der Haube wurde über eine Mariotte'sche Wasserzuführung gesteuert. Die wirksame Druckhöhe an der Bodenoberfläche konnte über ein U-Rohrmanometer zwischen Null und einem Unterdruck bis zum Lufteintrittspunkt des Bodens frei gewählt werden (vgl. Abbildung 9).

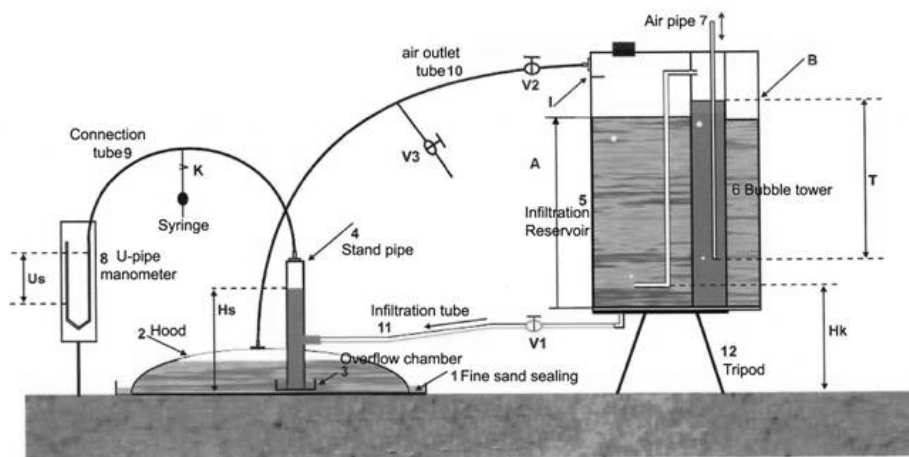


Abbildung 9: Schematische Abbildung des Versuchsaufbaus bei einer Feldinfiltrationsmessung mit dem Haubeninfiltrrometer; Quelle: (Schwärzel & Punzel, 2007)

Die Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit, d.h. der feldgesättigten Wasserleitfähigkeit erfolgte nach Wooding (1968) aus den im Versuchsverlauf ermittelten stationären Fließraten mit unterschiedlichen Druckhöhen.

$$Q = \pi * a^2 * k_u * \left(1 + \frac{4}{\pi * \alpha * a}\right) \quad \text{Gl. VI}$$

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)}{(h_1 - h_2)} (h_1, h_2 < 0) \quad \text{Gl. VII}$$

mit:

- a = Radius der Infiltrationsfläche, cm
- Q = Infiltrationsrate, cm<sup>3</sup>
- h = hydraulische Druckhöhe an der Infiltrationsoberfläche, cm
- α = Lufteintrittspunkt, 1/cm; Texturabhängig  
nach Reynolds & Elrick (1991)



Die Infiltrationsmessungen erfolgten in Anlehnung an die Beprobungshorizonte in den Messtiefen 25, 45, und 65cm auf beiden Flächen der unterschiedlichen Bodenbearbeitungsvarianten im jeweils unverdichteten und maximal verdichteten (B3) Parzellenbereich.

## 2.6 Einordnung der Bodenfunktion nach Indikatorsystem

Als Grundlage für die Bewertung der Bodenstruktur und zur Ermittlung schädlicher Gefügeveränderung durch mechanische Belastung wurde Schadschwellenwerte des Indikatorsystems nach UBA (2004a) bzw. des Vorsorgekonzeptes nach Horn & Fleige (2003) verwendet. Nach dem Indikatorsystem sind Luftkapazitäten unter 5Vol%, gesättigte Wasserleitfähigkeit unter 10cm/d und die Einstufung der Feldgefügekennwerte (Spatendiagnose, effektive Lagerungsdichte oder Packungsdichte) in die Klassen 4 und 5 Kennzeichen schadverdichteter Böden. Die Eindeutige Identifikation einer Bodenschadverdichtung erfolgt über die Kombination der drei einzelnen Parameter und kann nur ausgewiesen werden wenn alle drei Indikatoren den Gefügeschaden anzeigen. Für die übersichtliche Bewertung der Einzelmesswerte wurden die beiden Indikatoren gesättigte Wasserleitfähigkeit und Luftkapazität semilogarithmisch graphisch gegenübergestellt und parallel zu den Koordinatenachsen Schadschwellenwerte ( $k_f=10\text{cm/d}$  und  $L_k=5\text{Vol\%}$ ) in die Grafik eingetragen. Die sich daraus ergeben vier Teilbereiche im Diagramm charakterisieren die Beeinträchtigung des Bodengefüges. Bereich IV klassifiziert dabei Werte die beide Funktionsschadschwellenwerte unterschreiten, Werte im Bereich II zeigen hinsichtlich keiner der beiden Bodenfunktionen Beeinträchtigung auf. In den Bereiche I und III ist jeweils einer der Schadschwellenwerte unterschritten. Über prozentuale Angaben lassen sich auflastabhängige Veränderungen der Klassenanteile ablesen.

## 2.7 Statistik

Die statistische Auswertung wurde mit der frei verfügbaren Software R Version 2.6.2 durchgeführt. Alle Stichprobenumfänge wurden mit dem SHAPIRO-WILK-Test auf Normalverteilung überprüft. Außer den Datensätzen der Befahrungsmessungen und der  $k_f$  Messungen (log-normal verteilt; bimodal verteilt) waren alle Daten normal verteilt und wurden anhand ihrer arithmetischen Mittelwerte und der Standardabweichung mit 95% Konfidenzintervall auf signifikante Unterschiede getestet. Die ermittelten Einzelmesswerte der  $k_f$  Messungen zeigten aufgrund des ausgeprägten Sekundärporensystems im Boden eine bimodale Häufigkeitsverteilung und eine sehr starke Schwankungsbreite um den Mittelwert die zum Teil auf einige wenige Extremwerte zurückgeführt werden konnte. Diese wenigen Extremwerte der Stichprobenumfänge wurden über den Q-Test oder DIXON Ausreißertest mit 90% Konfidenzintervall aus der Mittelwertbildung ausgeschlossen.

Die statistische Analyse der Versuchsfaktoren der Überfahrungsexperimente erfolgte unter Berücksichtigung der Datensätze der 10fach- Überfahrten. Die unterschiedlichen Stichprobenumfänge der einzelnen Versuchsvarianten wurden zusammengefasst und

beinhalten die Messergebnisse aller Lastvarianten. Bei einflussnehmenden Faktoren (z.B. Radlast) wurde Rücksicht auf eine gleiche Gewichtung der Anzahl der Datensätze genommen. Um signifikante Aussagen über einzelne Versuchsfaktoren hinsichtlich der Spannungseinträge zu bekommen und gleichzeitig Ausreißerwerte zu eliminieren wurde die Gegenüberstellung durch notched Box-Whisker-Plots gewählt. Die Einschnürung (notch) gibt dabei nahezu ein 95% Konfidenzintervall der Verteilung um den Median an und kann, wenn sie sich nicht überschneidet, als starkes Maß für einen signifikanten Unterschied gewertet werden. Signifikante Unterschiede wurden über den WILCOXON-Rangsummentest mit 5% Alphaniveau und Holm Adjustierung ausgewiesen. Die signifikanten Unterschiede der verschiedenen Versuchvarianten sind mit Kleinbuchstaben gekennzeichnet, bei Regressionen und Korrelationen wurden Regressions- und Korrelationskoeffizienten als Grad der Abhängigkeit zwischen den beiden Variablen angegeben.

### **3 Ergebnisse**

#### **3.1 Böden und bodenphysikalische Ausgangsbedingungen der Versuchstandorte**

Die Laboruntersuchungen der ausgewählten Leitprofile der einzelnen Versuchsschläge ergaben für beide untersuchten Bodenregionen die typischen Bodentypen mit teilweise variierenden Texturen. Unterschiede in den Merkmalsausprägungen einzelner Horizonte wurden bei der späteren Klassifizierung der bodensystematischen Einheit durch Ansprache bis auf Subtypenniveau berücksichtigt. Den Standorten wurden die Bodentypen Braunerden, Parabraunerden und Pseudogleyen zugeordnet. Je nach Ausprägungsgrad der Lessivierung wurden Bodensubtypen von der Parabraunerde-Braunerde (LL-BB) auf dem Versuchsgut Lindhof über Pseudogley-Parabraunerden (SS-LL) auf den Flächen des Versuchsgutes Hohenschulen und des konventionell bewirtschafteten Schlags in Merklingsen bis hin zu einem Parabraunerde-Pseudogley (LL-SS) auf dem konservierend bewirtschafteten Schlag in Merklingsen ausgewiesen. Kleinräumige Texturheterogenitäten traten vor allem auf den Versuchsflächen in Schleswig-Holstein auf, wobei sich die Bodenarten im Bereich der Bodenartenhauptgruppen Sande und Lehme bewegten. Die größten Tongehaltsunterschiede im nahen Unterboden traten zwischen den beiden Versuchsgütern in Schleswig-Holstein auf, mit Ls3 in Hohenschulen zu Su3 auf dem Lindhof. Die beiden Lössstandorte zeigten homogene Bodenarten mit leichten horizontbezogenen Tongehaltsunterschieden im Bereich zwischen Ut3 und Ut4.

##### **3.1.1 Versuchsgut Merklingsen, NRW, konservierend bewirtschafteter Schlag Reinecke**

Das untersuchte Leitprofil der konservierend bewirtschaftete Fläche des Versuchsgutes Merklingsen wurde als Parabraunerde-Pseudogley (LL-SS) aus Lösslehm angesprochen (Tabelle 3). Die Bodenarten liegen zwischen mittel bis stark tonigem Schluff. Die Tongehalte variieren zwischen 16 und 21%, wobei das Maximum entsprechend der Pedogenese in den BtSd-Horizonten und das Minimum im Ap- und AISw-Horizont liegen. Die Trockenrohdichten und das Gesamtporenvolumen aller Horizonte sind als mittel zu klassifizieren.

**Tabelle 3: Bodeneigenschaften der konservierend bewirtschafteten Fläche Reinecke auf dem Versuchsgut Merklingsen NRW**

LL-SS/ Parabraunerde-Pseudogley aus Lößlehm																	
Tiefe cm	Horizont	C org. %	pH Wert CaCl <sub>2</sub>	Sand	Schluff Gew%	Ton	Boden- art	ρ <sub>t</sub> g/cm <sup>3</sup>	GPV Vol%	Porengrößenverteilung Vol%				kf cm/d		Vorbelastung vertikal Pv, kPa	
										>50µm	10-50µm	0,2-10µm	< 0,2 µm	FP	vertikal	horizontal	(pF 1,8)
0-15	Ap	2,3	6,6	3	81	16	Ut3	1,48	44	1	2	29	12	63	-	55	61
15-28	rAp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28-45	AlSw	0,8	6,5	2	81	17	Ut3	1,56	40	4	2	20	14	154	4	55	98
45-65	BtSd1	0,5	6,6	2	77	21	Ut4	1,50	43	6	2	19	16	253	25	60	74
65-135	BtSd2	0,3	6,7	2	77	21	Ut4	1,57	41	3	1	18	19	64	-	53	67

Die Porenvolumen der einzelnen Horizonte bewegen sich zwischen 44Vol% im Bearbeitungshorizont und 40Vol% im Unterboden und sind als mittel zu bewerten, der Anteil der Luftkapazität lässt mit geringen bis mittleren Werten auf eine bereits kompakte Lagerung des Oberbodens schließen. Die mechanische Stabilität (pF1,8) der Fläche ist für Ober- und Unterboden als gering zu bewerten. Mit der Wasserspannung pF2,5 kommt es, der effektiven Spannungsgleichung gemäß, zu einer mittleren Zunahme der Stabilität um ca. 20kPa und die horizontspezifischen Stabilitäten verschieben sich in den mittleren bis hohen Bereich. Die hydraulischen Eigenschaften des Bodens lassen sich mit vertikalen gesättigten Wasserleitfähigkeiten zwischen 63 und 252cm/d als hoch bis sehr hoch bewerten. Die horizontalen Leitfähigkeiten der Unterbodenhorizonte zeigen mit deutlich geringeren Werten die natürliche Anisotropie des Porensystems.

### 3.1.2 Versuchsgut Merklingsen, NRW, konventionell bewirtschafteter Schlag Ruhmlifholz

Die Fläche mit konventioneller Bodenbearbeitung des Versuchsgutes Merklingsen wurde bis 2003 jährlich wendend bis in 28cm Tiefe bearbeitet. Das untersuchte Leitprofil ist eine Pseudogley- (Para) Braunerde (SS-BB) aus Lösslehm (Tabelle 4). Die Bodenart ist mittel toniger Schluff. Die Tongehalte variieren innerhalb der Bodenart zwischen 13 und 16%, wobei das Maximum entsprechend der (schwachen) Tonverlagerung im SdBtv-Horizont liegt. Das Gesamtporenvolumen lässt sich im mittleren Bereich einordnen. Die Trockenrohdichten der oberen Horizonte sind als mittel zu klassifizieren, die des Unterbodens als hoch. Gegenüber dem bearbeiteten Pflughorizont ist im SwAlBv- und SdBtv-Horizont eine Zunahme der Trockenrohdichte mit gleichzeitiger Abnahme der weiten Grobporen zu verzeichnen. Die mechanische Stabilität (pF1,8) des Bearbeitungshorizontes ist als gering einzustufen, die Pflugsohle und der Unterboden zeigen mittlere Werte. Mit der höheren Wasserspannung (pF2,5) kommt es im Oberboden zu einer geringen Zunahme der Stabilität um ca. 10kPa. Die hydraulischen Eigenschaften des Bodens lassen sich mit vertikalen gesättigten Wasserleitfähigkeiten zwischen 70 und 488cm/d als hoch bis extrem hoch bewerten. Die hohe Schwankungsbreite ist ein deutliches Kennzeichen für das ausgeprägte Sekundärbioporensystem der Böden. Die horizontalen Leitfähigkeiten mit deutlich geringeren Werten zeigen auch hier die vertikal dominierende Porengeometrie.



### 3.1.4 Versuchsgut Lindhof, SH, konventionell bewirtschafteter Schlag Große Hofkoppel

Das untersuchte Leitprofil der konventionell wendend bearbeiteten Versuchsfläche auf dem Versuchsgut Lindhof wurde als Parabraunerde (LL) aus Geschiebelehm (vgl. Tabelle 6) angesprochen. Die Bodenarten variieren mit Tongehalten von 6 bis 18% zwischen mittel schluffigem bis stark lehmigem Sand im Ober- und nahen Unterboden und mittel sandigem Lehm im tieferen Unterboden. Die größere Differenz des Tongehaltes sowie dessen Maximum erst im tieferen Unterboden lassen zusätzlich auf eine geogene Schichtung des Geschiebelehms schließen. Die Trockenrohdichte des Bearbeitungshorizontes ist als mittel zu klassifizieren, die der Unterbodenhorizonte als hoch. Das Gesamtporenvolumen des Bearbeitungshorizontes sowie dessen Anteil an weiten Grobporen ist im mittleren Bereich einzuordnen, wobei Gesamtporenvolumen und Luftkapazität der Unterbodenhorizonte als gering zu bewerten sind. Mit zunehmenden Tongehalten in den unteren Bt-Horizonten ist gegenüber dem bearbeiteten Pflughorizont eine Zunahme der Dichte mit gleichzeitiger Abnahme der weiten Grobporen zu verzeichnen. Die mechanische Stabilität (pF1,8) des Bearbeitungshorizontes ist als mittel einzustufen, die der restlichen Horizonte als gering. Mit zunehmender Wasserspannung (pF2,5) kommt es zu einer mittleren Zunahme der Stabilität um ca. 10kPa. Die horizontspezifischen Stabilitäten verbleiben dabei im geringen bis mittleren Bereich. Die hydraulischen Eigenschaften des Bodens lassen sich mit vertikalen gesättigten Wasserleitfähigkeiten zwischen 20 und 126cm/d als mittel bis sehr hoch bewerten. Die horizontalen Leitfähigkeiten der Unterbodenhorizonte zeigen auch hier mit deutlich geringeren Werten die natürliche Anisotropie des Porensystems. Im nahen Unterboden, im Bereich der ehemaligen Pflugsohle ist auch in diesem Profil eine leicht erhöhte horizontale Leitfähigkeit erkennbar.

*Tabelle 6: Bodeneigenschaften der konventionell bewirtschafteten Fläche Kleine Hofkoppel auf dem Versuchsgut Lindhof SH*

LL/ Parabraunerde aus Geschiebelehm																	
Tiefe cm	Horizont	C		Sand	Schluff Gew%	Ton	Boden- art	ρ <sub>t</sub> g/cm <sup>3</sup>	GPV Vol%	Porengrößenverteilung Vol%				k <sub>f</sub> cm/d	Vorbelastung		
		org. %	pH Wert CaCl <sub>2</sub>							>50μm	eGP 10-50μm	MP 0,2-10μm	FP <0,2 μm		vertikal (pF 1,8)	horizontal (pF 2,5)	
10-28cm	Ap	2,3	6,9	65	29	6	Su3	1,58	40	13	5	9	13	57	-	62	68
28-32cm	App	2,1	6,5	63	28	9	Sl3	1,66	37	12	5	5	15	73	36	48	51
32-50cm	Bt1	0,7	6,1	53	33	14	Sl4	1,75	34	6	4	3	21	126	10	57	68
>50cm	Bt2	0,3	5,9	51	31	18	Ls3	1,71	35	5	3	7	20	20	12	45	61

### 3.2 Bodenstabilität unter statisch und dynamisch impulsartiger Belastung

#### 3.2.1 Stabilitätsuntersuchungen am Beispiel der Lössstandorte (NRW)

Mit dem Vergleich des Setzungsverhaltens des Bodens im *statischen* und *dynamischen* Belastungsversuch, wurde für die statische Belastung mit insgesamt 6600s Belastungszeit eine größere vertikale Setzung bzw. Gesamtdeformation ( $\varepsilon$ ) des Bodens festgestellt als für die nur kurzfristig aufgebrachten dynamischen Lasten mit abschließender Belastungszeit von 160s (Tabelle 7 und Abbildung 5 Kap.2.4.2.2). Der gemittelte Unterschied der Setzung beträgt für die verwendeten 3cm hohen Stechzylinder 0,6mm und ergibt damit einen mittleren Unterschied der statischen zur dynamischen Deformation von ca. 2%. Der Stabilitätsunterschied der beiden Bodenbearbeitungssysteme zeigte sich in den statischen wie dynamischen Drucksetzungsversuchen an deutlich höheren Setzungsraten auf Seiten des gepflügten Bearbeitungshorizontes. Im Unterboden gleichen sich die Setzungsraten der beiden Bewirtschaftungsarten an.

Für jede Laststufe der dynamischen Versuche wurde die Setzungsdifferenz zwischen der ersten und zehnten Belastung errechnet. Die Betrachtung dieser Differenzen offenbart eine Aufsummierung der Belastungsimpulse die sich in der Zunahme der Deformationsraten widerspiegelt. Gegenüber den einfach belasteten Proben ergeben sich signifikant höhere mittlere vertikale Setzungsraten für die 10fach belasteten Proben. Der Setzungsverlauf dieser aufsummierten 10fachen Belastungen lässt sich zwischen dem der einmalig belasteten und dem der statisch belasteten Proben einordnen. Mit weiterer Zunahme der Belastungsimpulse wäre eine kumulative Annäherung an den statischen Setzungsverlauf zu erwarten.

*Tabelle 7: Setzungsverhalten und Deformation unter statischer und dynamischer Belastung im Ödometerversuch (n=6)*

Standort	Bodenbearbeitung	Beprobungstiefe	mvdS, mm (160s)	d $\varepsilon$ %	mvsS, mm (6600s)	s $\varepsilon$ %
NRW	kons	10cm	-3,01	10	-2,17	7
		30cm	-2,50	8	-2,92	10
		45cm	-2,98	10	-3,48	12
		70cm	-3,05	10	-2,64	9
NRW	konv	10cm	-4,09	14	-4,49	15
		30cm	-4,39	15	-2,82	9
		45cm	-2,31	8	-2,53	8
		70cm	-2,97	10	-2,07	7

mvdS: mittlere vertikale Setzung, mm bei dynamischer Belastung mit 400kPa (**Gesamtbelastungszeit**)

d  $\varepsilon$ : mittlere dynamische Gesamtverformung  $\varepsilon$  Laststufe 400kPa

mvsS: mittlere vertikale Setzung, mm bei statischer Belastung mit 400kPa (**Gesamtbelastungszeit**)

s  $\varepsilon$ : mittlere statische Gesamtverformung  $\varepsilon$  Laststufe 400kPa

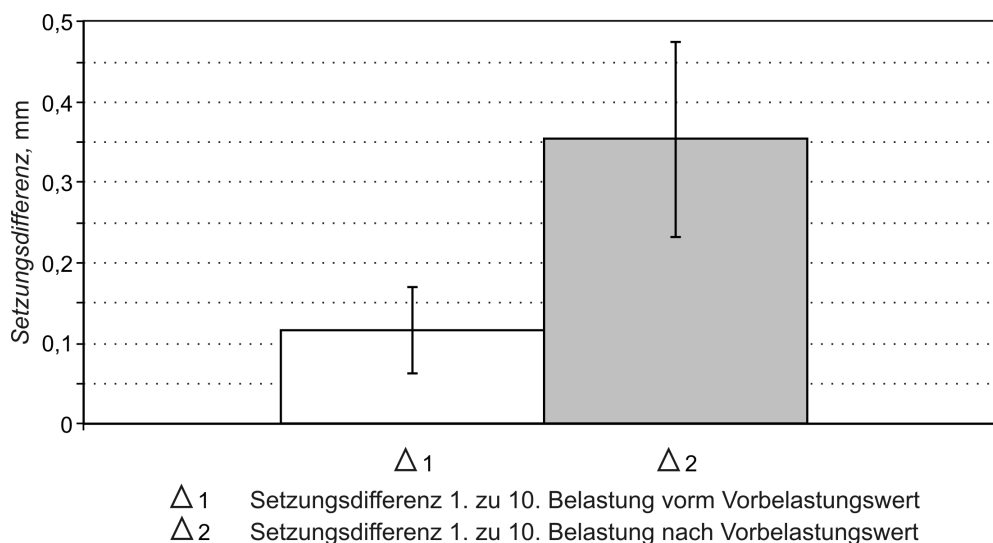


Abbildung 10: Mittlere Setzungsdifferenzen (1. zu 10. Belastung) im Wiederverdichtungs- ( $\Delta_1$ ) und Erstverdichtungsbereich ( $\Delta_2$ ) ( $n=120$ ; SD)

Die Setzungsdifferenzen der dynamischen Belastungsversuche ( $\Delta_1$  zu  $\Delta_2$ ) (Abbildung 5 Kap.2.4.2.2 und Abbildung 10) für die Auflastbereiche vor und nach dem graphisch ermittelten Vorbelastungswert der Probe (elastischer und plastischer Bereich), verdeutlichen die Setzungszunahme, die sich auch im Vergleich der 10fach belasteten Proben zu den mittleren statisch ermittelten Setzungswerten zeigt. Es ergibt sich eine Eingrenzung des Stabilitätsparameters anhand einer signifikanten Zunahme der Setzungsdifferenz. Die ermittelten statischen und dynamischen Stabilitätsparameter, die im Übergangsbereich der Veränderung des Deformationsverhaltens liegen, bestätigen damit die Anwendbarkeit des genutzten graphischen Auswertungsverfahrens.

Die Ergebnisse der statisch und dynamisch ermittelten Drucksetzungsverläufe (pF1,8) der beiden unbelasteten Leitprofile auf den nordrhein-westfälischen Versuchsflächen sind in den Abbildungen Abbildung 11 und Abbildung 12 zusammengefasst.

Die im Labor ermittelten *statischen* Vorbelastungswerte (Gesamtbelastungszeit 6600 s) liegen mit Werten zwischen 30 und 87kPa im geringen bis mittleren Stabilitätsbereich. Vergleicht man die Stabilitäten des Ausgangszustandes hinsichtlich des Versuchsfaktors Bodenbearbeitung zeigt der konservierend bearbeitete Bereich des ehemaligen Bearbeitungshorizontes mit 54kPa zu 31kPa im Oberboden etwas höhere Vorbelastungswerte gegenüber dem konventionell bearbeiteten Pflughorizont. Im Unterboden kehren sich die Stabilitäten um, hier sind auf dem konventionell bearbeiteten Schlag bewirtschaftungsbedingt höhere Vorbelastungswerte zu finden.

Die *dynamischen* Stabilitätskennwerte des Kurzzeitbelastungsversuches, welche das Gefährdungspotential des Bodens gegenüber einzelnen kurzfristigen Lasteinträgen und kurzfristigen Belastungswiederholungen darstellen, zeigen für die Lössböden bei Feldkapazität signifikant höhere Stabilitäten. Der horizontspezifische Verlauf der dynamischen Stabilität folgt weitgehend den statisch ermittelten Vorbelastungswerten. Mit einmalig kurzfristigem Belastungspfad von 2 Sekunden pro Laststufe (bzw. 16s Gesamtbelastungszeit) liegt eine gemittelte Zunahme der Stabilitätskennwerte um ca. 55kPa

vor. Die horizontspezifischen Kurzbelastungsstabilitäten lassen sich im Bereich sehr hoch bis extrem hoch einordnen. Mit zunehmenden Belastungswiederholungen und damit auch längerer Belastungsdauer (10 Wdhl.; 160s Gesamtbelastungszeit) sind größere Primärsetzungsraten im Boden festzustellen, die einen Versatz der Erstverdichtungsgeraden bewirken und nach dem Auswertungsverfahren von Casagrande zu geringeren Vorbelastungswerten führen. Die Tragfähigkeiten der einzelnen Bodenhorizonte bei mehrfach wiederholten kurzfristigen Spannungseinträgen befinden sich, je nach aufsummierter Belastungszeit der einzelnen Lasteinträge, mit mittleren bis sehr hohen Vorbelastungswerten zwischen den statisch und den mit einmalig kurzfristiger Belastung ermittelten Stabilitäten. Mit 10 Überfahrungen nimmt die Stabilität im Mittel um ca. 30kPa ab und nähert sich der ermittelten statischen Stabilität.

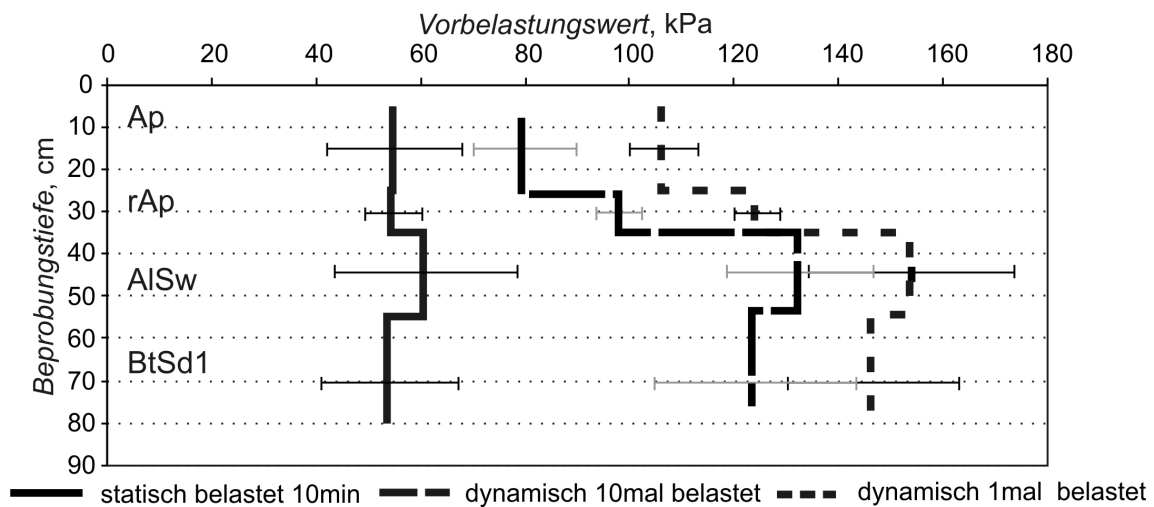


Abbildung 11: Vergleich des Bodenstabilitätsparameters Vorbelastung unter statischer und dynamischer Belastung, NRW konservierende Bodenbearbeitung (n=6; SD)

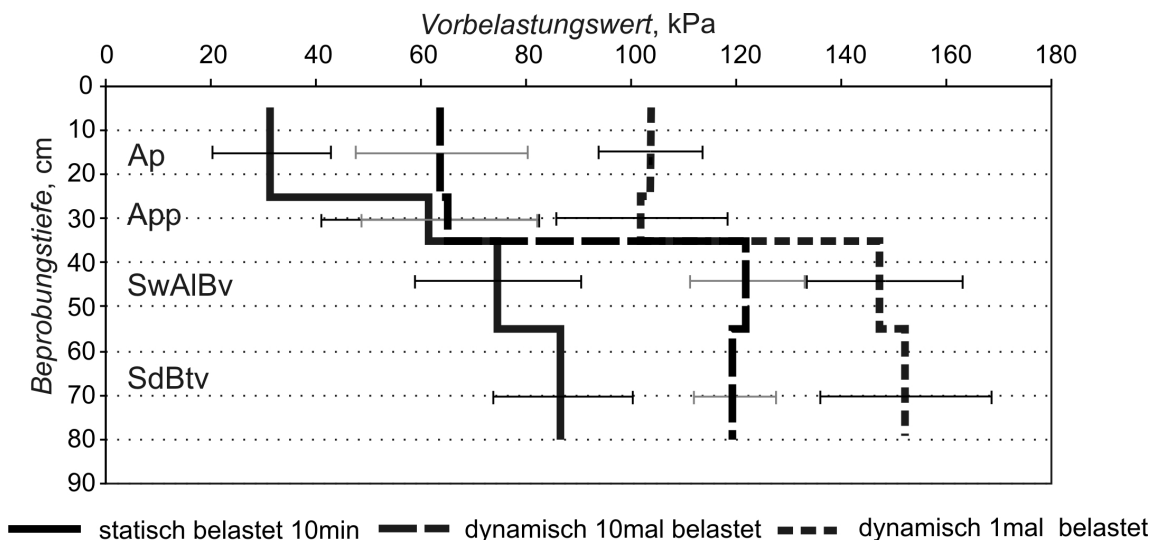


Abbildung 12: Vergleich des Bodenstabilitätsparameters Vorbelastung unter statischer und dynamischer Belastung, NRW konventionelle Bodenbearbeitung; (n=6; SD)



### 3.3 Mechanische Belastungen im Feldversuch

#### 3.3.1 Kontaktflächen und mittlere Kontaktflächendrücke

Die gemessenen Kontaktflächen und die daraus errechneten mittleren Kontaktflächendrücke weisen eine breite Streuung der Ergebnisse auf. Variierende Oberbodenverhältnisse, insbesondere durch z.T. unmittelbar vor den Messkampagnen durchgeführte Bodenbearbeitungsmaßnahmen, verschiedenartiger Pflanzenbewuchs aber auch unterschiedliche Bodenwassergehalte führten zu kaum vergleichbaren Stabilitätsverhältnissen in der Kontaktfläche Reifen/Boden. Mit gesetztem durchwurzeltem Oberboden wurden bei Messungen auf dem Versuchsgut Lindhof Kontaktflächen nahe der Reifenaufstandsfläche auf Asphalt ermittelt. Diese Kontaktflächen aus reiner Aufstandsfläche der Reifenstollen lassen sich bspw. nur schlecht mit jenen in frisch gepflügten Ap-Horizonten ermittelten Kontaktflächen vergleichen, bei denen der Stollenzwischenraum mit dazu beiträgt die Radlast abzustützen. Diese Unterschiede in den Versuchsbedingungen lassen daher keinen Vergleich der einzelnen Versuchsstandorte untereinander, beispielsweise ein Vergleich der Versuchsfaktoren Bodenart und Bodenbearbeitungssystem zu. Die Möglichkeit des Vergleiches der Aufstandsflächen hinsichtlich der unterschiedlichen Radlasten und Reifeninnendrücke ist allerdings durch Messen aller Varianten zu jeder Messkampagne gegeben. Die Ergebnisse dieser sekundären Versuchsvarianten sind in Tabelle 8 und Tabelle 9 sowie in Abbildung 13 zusammengefasst. Die Gegenüberstellung weist für die Versuchsfaktoren Radlast und Reifeninnendruck einen charakteristischen Einfluss auf die Größe der Kontaktflächen und die damit verbundenen Kontaktflächendrücke auf (Tabelle 8). So steigt bei Zunahme der Radlast von 3,3 Mg auf 6,3 Mg mit niedrigem Reifeninnendruck die durchschnittliche Kontaktfläche des getesteten Reifens Michelin MachXBib 650/75 R38 um 66% an. Mit höherem Reifeninnendruck beträgt diese Zunahme nur noch 17%. Die Absenkung des Reifeninnendrucks führte unabhängig von den Oberbodenverhältnissen stets zu einer Zunahme der Kontaktflächen. Bei der Radlast von 3,3 Mg und einer Absenkung des Luftdruckes von 160kPa auf 50kPa beträgt die Zunahme der Kontaktfläche durchschnittlich 45%, mit 6,3 Mg Radlast sind es noch 26% und für die Variante mit 7,5 Mg nur noch 13%.

*Tabelle 8: Übersicht der mittleren Kontaktflächen, cm<sup>2</sup> (n=4); Quelle: (Denker, 2008)*

Variante		Standort				
Radlast, Mg	Reifendruck, kPa	SH kons	SH konv	NRW kons	NRW konv	Gesamt
3,3	50	4026 ± 1958	2245 ± 1129	3907 ± 1661	3181 ± 1292	3373 ± 1576
3,3	160	2392 ± 1135	1840 ± 1146	3005 ± 1278	1939 ± 978	2314 ± 1142
6,3	160	3795 ± 1820	3610 ± 1570	4264 ± 1413	3651 ± 1217	3844 ± 1383
6,3	250	3078 ± 1354	2851 ± 1042	3288 ± 1557	2954 ± 1075	3052 ± 1178
7,5	250	3573 ± 1595	3670 ± 1902	3801 ± 919	3205 ± 1099	3562 ± 1302
7,5	350	3128 ± 1345	2682 ± 1253	3682 ± 972	3170 ± 1104	3131 ± 1115

Tabelle 9: Übersicht der errechneten mittleren Kontaktflächendrücke, kPa ( $n=4$ ); Quelle: (Denker, 2008)

Variante			Standort			
Radlast, Mg	Reifendruck, kPa	SH kons	SH konv	NRW kons	NRW konv	Gesamt
3,3	50	113 ± 94	178 ± 89	102 ± 63	121 ± 69	127 ± 90
3,3	160	195 ± 170	247 ± 153	133 ± 80	209 ± 110	193 ± 139
6,3	160	235 ± 204	223 ± 162	157 ± 42	198 ± 106	200 ± 127
6,3	250	267 ± 202	255 ± 142	245 ± 163	245 ± 123	252 ± 144
7,5	250	276 ± 211	264 ± 178	203 ± 52	261 ± 124	251 ± 184
7,5	350	309 ± 230	387 ± 324	211 ± 66	269 ± 141	299 ± 258

Hinsichtlich der aus den Kontaktflächen berechneten mittleren Kontaktflächendrücke ergibt sich durch den direkten Zusammenhang ein ähnliches Bild (Tabelle 9). Insgesamt konnte bei allen Auflastvarianten über den verminderten Reifeninnendruck und die damit verbundene Vergrößerung der Kontaktfläche eine mittlere Abnahme des Kontaktflächendrucks um ca. 50kPa oder 23% erreicht werden. Die durch die Verminderung des Reifeninnendrucks erreichte Abnahme des Kontaktflächendrucks liegt bei der 3,3Mg Radlastvariante bei ca. 66% und der Radlastvariante mit 7,5Mg bei ca. 16%.

Abbildung 13a verdeutlicht mit zunehmender Radlast einen abnehmenden Gewinn an Reifenaufstandsflächenvergrößerung durch verminderten Reifeninnendruck. Im Verlauf der Geraden in der Abbildung 13b zeichnet sich anhand der zunehmenden Steigung zwischen 6,3 und 7,5Mg ab, d.h. dass mit zunehmendem Gesamtgewicht das Verhältnis der Kontaktflächenzunahme zur steigenden Radlast für diese Reifen/Radlastkombination enger wird und somit hinsichtlich der Druckminderung in der Kontaktfläche weniger ins Gewicht fällt.

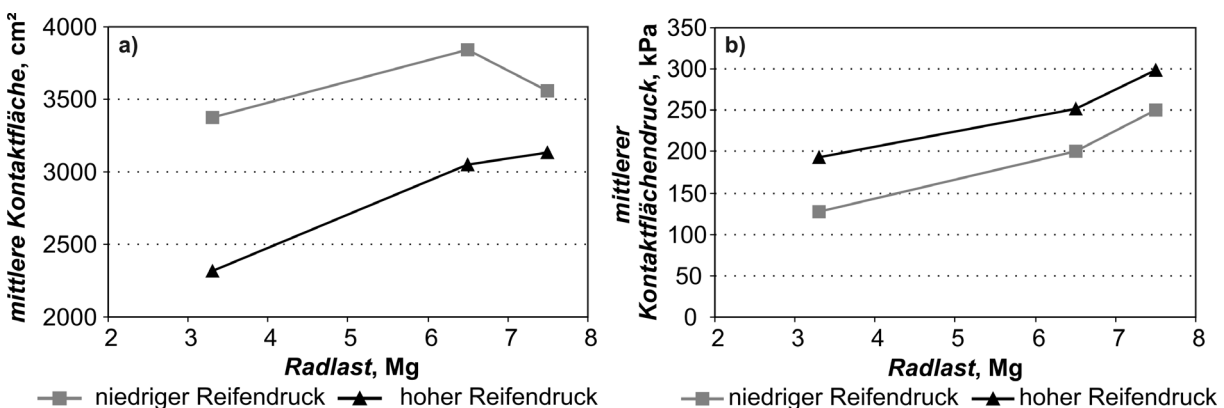


Abbildung 13: Mittlere Kontaktflächen und Kontaktflächendrücke der drei Radlastvarianten unter Berücksichtigung des Versuchsfaktors Reifeninnendruck ( $n=16$ , alle Versuchsstandorte)

### 3.3.2 Spannungs- und Deformationsmessungen unter variierenden Randbedingungen

Die Bodendruck- und Deformationsmessungen der landtechnischen Verdichtungsversuche erfolgten unter Berücksichtigung folgender natürlicher, pflanzenbaulicher und technischer Versuchsfaktoren:

1. Bodenausgangssubstrat
2. Bodenbearbeitung
3. Gesamtlast
4. Reifeninnendruck
5. Überrollhäufigkeit

Die Abbildungen des Kapitels zeigen Mediane und Box-Whisker-Plots der berechneten 1. Hauptspannungen zum Zeitpunkt des höchsten Spannungseintrages der dynamischen Befahrungsversuche. Die Grundgesamtheiten der einzelnen Versuchvarianten sind je nach Anzahl der Wiederholungsmessungen und durchgeführten Mehrfachbefahrungen unterschiedlich und umfassen zum Teil, unter Berücksichtigung gleicher Gewichtung, alle drei Messtiefen.

#### 3.3.2.1 Bodenausgangssubstrat

Der Vergleich der Messergebnisse bezüglich des primären natürlichen Versuchsfaktors der unterschiedlichen Ausgangssubstrate Löss und Geschiebemergel zeigt, dass die messbaren mittleren Einträge der 1. Hauptspannung (Abbildung 14a) sowie auch die Spannungsfortpflanzung in die Tiefe (Abbildung 14b) keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Der Datensatz verdeutlicht allerdings unverkennbar signifikant abnehmende mittlere Spannungseinträge mit zunehmender Messtiefe. Die Abnahme des Spannungseintrages beträgt in beiden Ausgangssubstraten ca. 40% zwischen den Messtiefen 20 zu 40cm bzw. ca. 75% zwischen den Messtiefen 20 und 60cm. Insgesamt lässt sich über einen Vergleich der Varianzen der einzelnen Messtiefen eine höhere Schwankung der Messwerte im Geschiebemergel erkennen, welche auf die Substratheterogenitäten bzw. kleinräumige Texturunterschiede der Versuchsflächen zurückzuführen ist.

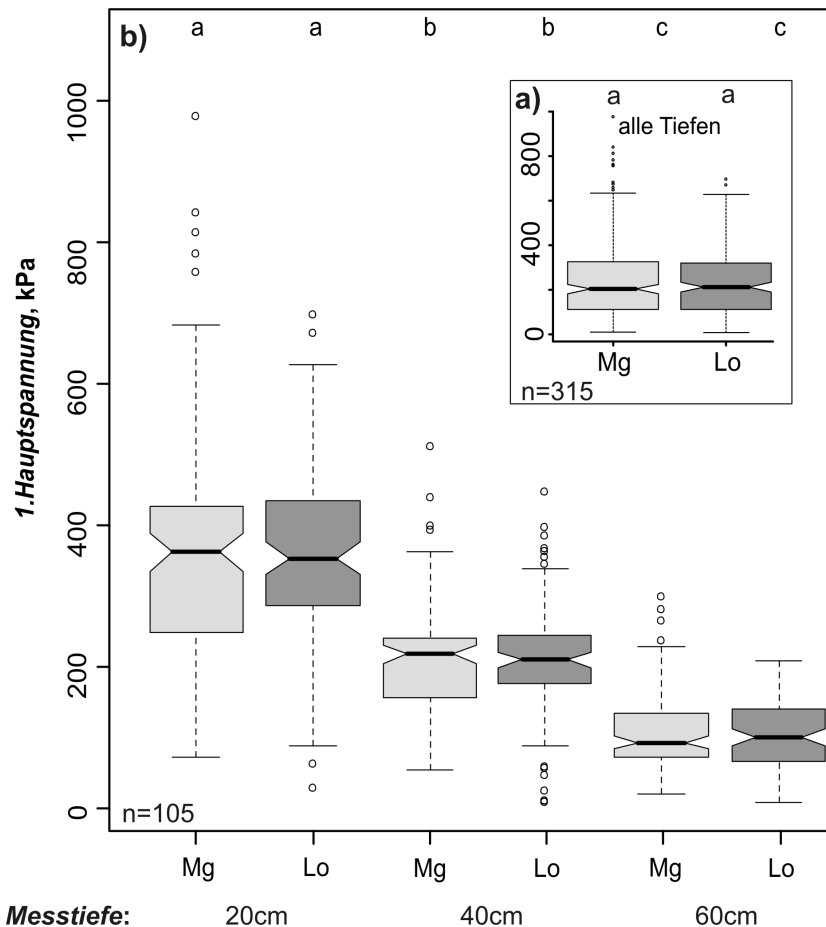


Abbildung 14: Unterschiede der Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) bezüglich des Versuchsfaktors Ausgangsmaterial (Mg= Geschiebemergel; Lo= Löss) dargestellt als Box-Whisker-Plots für alle Messtiefen (Abb. a,  $n=315$ ) zusammengefasst sowie jede Einzelmessstiefe (Abb. b,  $n=105$ ); Wilcoxon  $p=0,05$

### 3.3.2.2 Bodenbearbeitung

Abbildung 15 zeigt, dass der primäre pflanzenbauliche Versuchsfaktor der unterschiedlichen Bodenbearbeitungssysteme konventionelle zu konservierender Bodenbearbeitung bezüglich der messbaren mittleren Einträge der 1. Hauptspannung (Abbildung 15a) sowie auch der Spannungsfortpflanzung in die Tiefe (Abbildung 15b) tendenzielle bzw. z.T. auch signifikante Unterschiede aufweist. Die Mediane aller Messtiefen (Abbildung 15a) zeigen tendenziell 17% geringere Spannungseinträge unter konservierender Bodenbearbeitung. Hinsichtlich der einzelnen Messtiefen (Abbildung 15b) ergeben sich unter konservierender Bodenbearbeitung in 20cm Messtiefe 21% geringere, in 40cm 8% geringere und in 60cm Tiefe 19% geringerer Spannungseinträge, wobei diese Unterschiede für die Messtiefen 20cm und 60cm als signifikant unterschiedlich ausgewiesen werden können. Bezüglich der Druckkompensation weisen die beiden Bodenbearbeitungssysteme mit Abnahmen des Spannungseintrages von 20 zu 60cm Tiefe (kons -74%; konv -75%) keine Unterschiede auf.

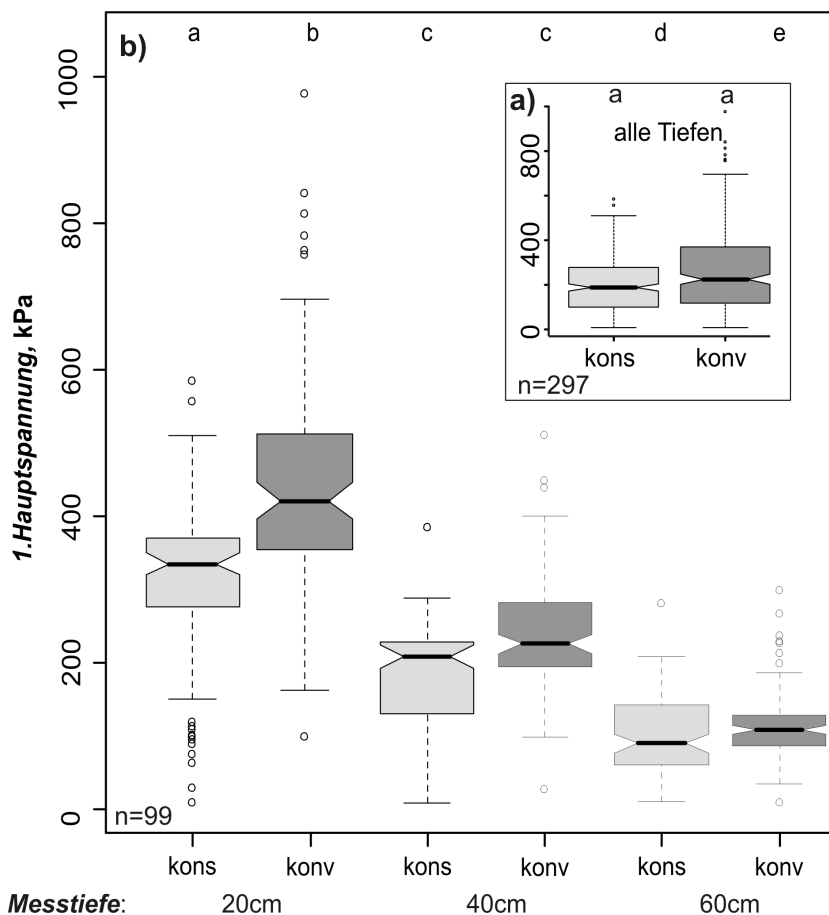


Abbildung 15: Unterschiede der Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) bezüglich des Versuchsfaktors Bodenbearbeitungssystem (kons= konservierend; konv= konventionell) dargestellt als Box-Whisker-Plots für alle Messtiefen zusammengefasst (Abb. a, n=297) sowie jede Einzelmessstiefe (Abb. b, n=99); Wilcoxon  $p=0,05$

### 3.3.2.3 Auflast

Mit der Gegenüberstellung in Abbildung 16 ergeben sich bezüglich des Versuchsfaktors Auflast signifikant höhere Spannungseinträge (1. Hauptspannung) mit zunehmenden Radlasten. Für die beiden Radlasten 3,3Mg und 6,3Mg wurde eine signifikante Zunahme des Spannungseintrages von 57% festgestellt, von 3,3Mg zu 7,5Mg ergab sich eine Zunahme von 69%. Die Erhöhung von 6,3Mg auf 7,5Mg weist eine weitere geringe Bodendruckzunahme von 8% auf, die allerdings nicht signifikant ist (Abbildung 16a). Hinsichtlich der einzelnen Messtiefen zeichnet sich erst eine signifikante dann tendenzielle Zunahme des Bodendrucks bezüglich der drei Lastvarianten ab (Abbildung 16b). Insgesamt lassen sich zwischen den Radlasten 3,3Mg und 7,5Mg Zunahmen der Spannungseinträge von 220kPa zu 405kPa im Oberboden (20cm) und 55kPa zu 118kPa im Unterboden (40cm) ableiten. Der Vergleich der Varianzen der einzelnen Messtiefen zeigt für die obere Messtiefe 20cm eine bis zu vierfach größere Schwankung der Messwerte unter allen Auflastvarianten.

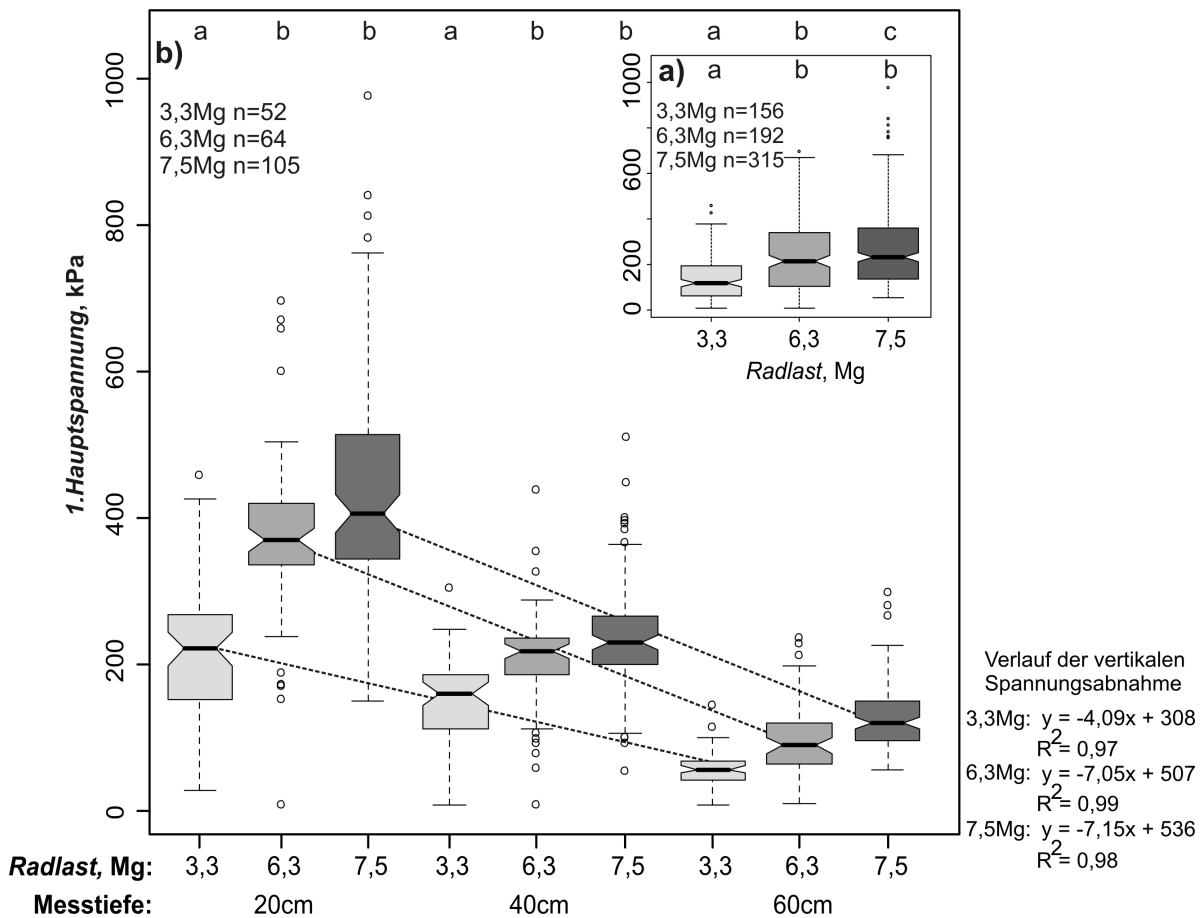


Abbildung 16: Unterschiede der Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) bezüglich des Versuchsfaktors Radlast dargestellt als Box-Whisker-Plots für alle Messtiefen zusammengefasst (Abb. a) sowie jede Einzelmessstiefe (Abb. b) ( $n$  siehe Abb.); Wilcoxon  $p=0,05$

Dieser Effekt sowie die hohen mittleren Spannungseinträge im Oberboden, die mit 220 (3,3Mg) - 405kPa (7,5Mg) z.T. über den ermittelten mittleren Kontaktflächendrücken der Lastvarianten liegen, weisen auf die bei der Kontaktflächenberechnung nicht berücksichtigte inhomogene Druckverteilung an der Reifenoberfläche hin. Im Vergleich der Druckfortpflanzung zeigt sich für die beiden Schwerlastvarianten eine größere Druckkompensation mit verstärkter Abnahme der Spannungseinträge in die Tiefe.

### 3.3.2.4 Reifeninnendruck

Aufgrund teilweise gegenläufiger auflast- und tiefenabhängiger Entwicklung der Spannungseinträge bezüglich des Versuchsfaktors Reifeninnendruck werden die Ergebnisse der gemittelten Spannungseinträge differenzierter auf der Versuchsebene der einzelnen Radlastvarianten betrachtet (Abbildung 17). Die Differenzierung auf Einzelmessstiefen jeder Radlastvarianten zeigt die Beeinflussung der Spannungseinträge durch die unterschiedlichen Reifeninnendrucke. In dieser Gegenüberstellung ergeben sich für die Radlasten 3,3Mg und 6,3Mg tendenzielle bis signifikante Abnahmen der Bodendrücke in allen Messtiefen.

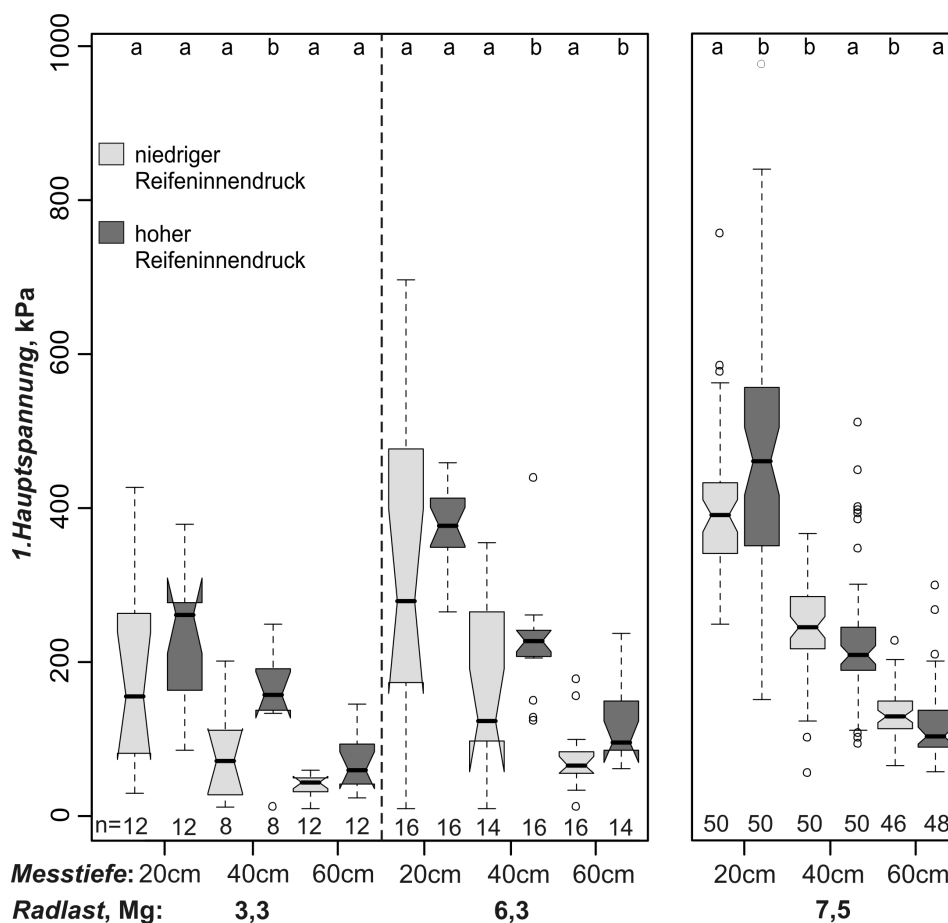


Abbildung 17: Unterschiede der Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) bezüglich des Versuchsfaktors Reifennendruck dargestellt als Box-Whisker-Plots für jede Einzelmessstiefe unter Berücksichtigung der Radlastvarianten ( $n$ = siehe Abb.); Wilcoxon  $p=0,05$ .

Im Oberboden (20cm) und im nahen Unterbodenhorizont (40cm) kommt es bei diesen beiden Radlasten durch den verringerten Reifennendruck zu einer Verminderung des Spannungseintrages um ca. 100kPa, das entspricht Abnahmen zwischen 35-180%. Betragsmäßig lässt sich diese Reduzierung des Bodendrucks mit den Abnahmen der ermittelten Kontaktflächendrücke vergleichen (vgl. Kap.3.3.1). Im tieferen Unterboden (60cm) liegt die Abnahme mit 17-23kPa bei ca. 40%. Eine Ausnahme stellt die Radlastvariante mit 7,5Mg dar. Unter dieser Auflast kommt es im Oberbodenhorizont (20cm) zur erwarteten signifikanten Verminderung des Spannungseintrages (-122kPa; -17%), die beiden Unterbodenhorizonte zeigen allerdings mit vermindertem Reifennendruck signifikante Zunahmen der Spannungseinträge um 15-20%.

### 3.3.2.5 Überrollhäufigkeit

Neben den Bodendruckmessungen einmaliger Überfahrten in Versuchspartellen wurden in Sonderforschungsbereichen auf allen Versuchsgütern Mehrfachüberfahrten durchgeführt.

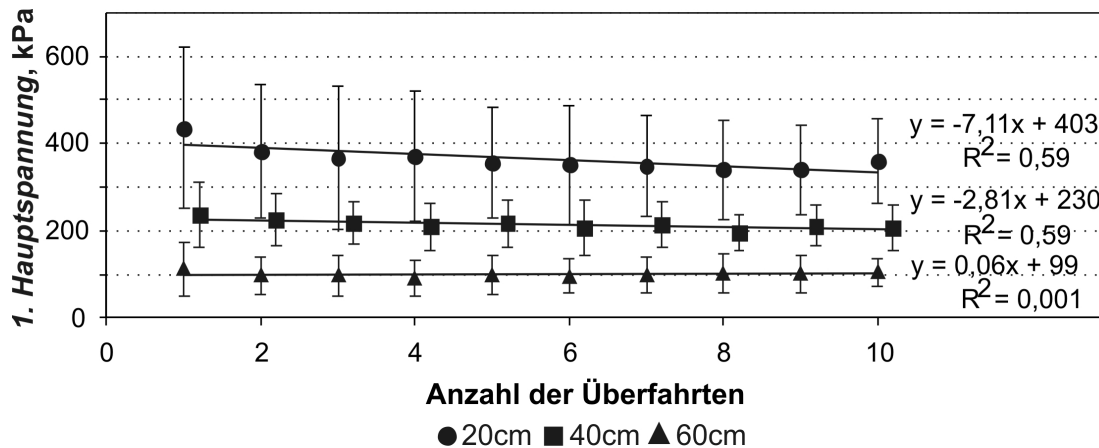


Abbildung 18: Entwicklung der gemittelten Spannungseinträge (arith. Mittelwerte der 1.Hauptspannung) aller Auflastvarianten in drei Messtiefen (20, 40, 60cm) mit 10facher Überfahung ( $n=16$ )

Damit konnte die Entwicklung der Spannungsausbreitung und Bodendeformation für häufiger befahrene Feldbereiche bzw. mehrachsige Fahrzeuge untersucht werden. Die Abbildung 18 zeigt in Form linearer Regressionsgeraden die Entwicklung der gemittelten vertikalen Spannungseinträge der drei Messtiefen unter Berücksichtigung aller Auflastvarianten mit zunehmender Überfahungshäufigkeit. Die Zusammenfassung der unterschiedlichen Radlastvarianten resultiert in den relativ hohen Standardabweichungen, ermöglicht aber eine größerer Stichprobenanzahl und damit eine übersichtliche Darstellung der Veränderungen unter Berücksichtigung aller Versuchsvarianten. Von der 1. zur 10. Überfahrt ist im Mittel eine Abnahme des messbaren Spannungseintrages in den ersten beiden Messtiefen erkennbar (20cm -17%; 40cm -12%). Die Spannungsabnahme ist im Oberboden am deutlichsten und nimmt zum Unterboden hin ab. In Form realer Messwerte liegt die mittlere Abnahme durch 10 Überfahrten im Bearbeitungshorizont bei 75kPa und im nahen Unterboden bei 30kPa.

### 3.3.3 Bodendeformation unter einfacher und mehrfacher Befahrung

In der Abbildung 19 sind die vertikalen Deformationen der Löss- und Geschiebemergelböden in den Messtiefen 20 und 40cm den Spurtiefen und mittleren Kontaktflächendrücken der einzelnen Belastungsvarianten gegenübergestellt. Mit zunehmender Radlast sind zunehmende Kontaktflächendrücke und größere Spurtiefen zu erkennen. Ein wesentlicher überprägender Faktor auf die Deformation ist allerdings der aktuelle Oberbodenwassergehalt zum Zeitpunkt der Überfahung, der z.T. bei trockeneren Verhältnissen auch mit hohen Radlasten zu sehr geringe Spurtiefen führte. Die Zunahme des Kontaktflächendrucks wird tendenziell (Ausnahme Standort Lindhof) durch höheren Reifeninnendruck verstärkt. Die Ergebnisse der vertikalen Deformationsmessung zeigen in der Messtiefe 20cm mit höherer Radlast unter beiden Bodenbewirtschaftungssystemen eine zunehmende Gesamtverformung wie auch zunehmende irreversible plastische Setzung des Bodens. Auf den konservierend bewirtschafteten Flächen reicht die Gesamtverformung des Bodens von 2mm (Radlast 3,3Mg) bis zu 13mm (Radlast 7,5Mg). Die Lastzunahme vervierfacht die



Bodendeformation in diesem Messhorizont. Auf den konventionell bewirtschafteten Flächen reicht die Verformung von 4mm (3,3Mg) bis zu 23mm (7,5Mg). Hier versechsfacht die Lastzunahme die Bodendeformation. Die Zunahme der vertikalen plastischen Verformung oder irreversiblen Setzung zwischen diesen beiden Radlasten liegt bei 8mm auf der konservierend bewirtschafteten Fläche und bei 11mm auf der konventionell bewirtschafteten. In der Messtiefe 40cm ist mit höherer Radlast ebenfalls unter beiden Bodenbewirtschaftungssystemen eine zunehmende Gesamtverformung erkennbar. Eine Zunahme der irreversiblen plastischen Setzung des Bodens ist in dieser Bodentiefe erst für die Radlasten ab 6,3Mg festzustellen. Für die konservierend bearbeitete Fläche kann mit steigender Auflast ein proportional steigender Anteil an plastischer Verformung zur Gesamtverformung festgestellt werden. Mittelt man die Setzung aller Lastkombinationen für das jeweilige Bodenbearbeitungssystem, lassen sich mit 5,2 zu 7,9mm (Mittelwerte 20cm) und 0,3 zu 1,3mm (Mittelwerte 40cm) größere irreversible vertikale Setzungen unter der konventionellen Bodenbearbeitung ausweisen. Der Vergleich der Abnahmen der Bodenbewegung in die Tiefe zeichnet auf konservierend bearbeiteter Seite eine bessere Reduktion der Deformation in den Unterboden ab (konservierend -94%; konventionell -83%), die sich besonders für die Schwerlastvariante mit 6,3Mg Radlast abbildet. Die Radlastvariante mit 7,5Mg überfordert das scheinbar höhere Druckkompensationsvermögen der konservierenden Bodenbearbeitung und zeigt in 40cm Messtiefe unter beiden Bodenbearbeitungsvarianten wieder ähnliche Setzungsanteile auf.

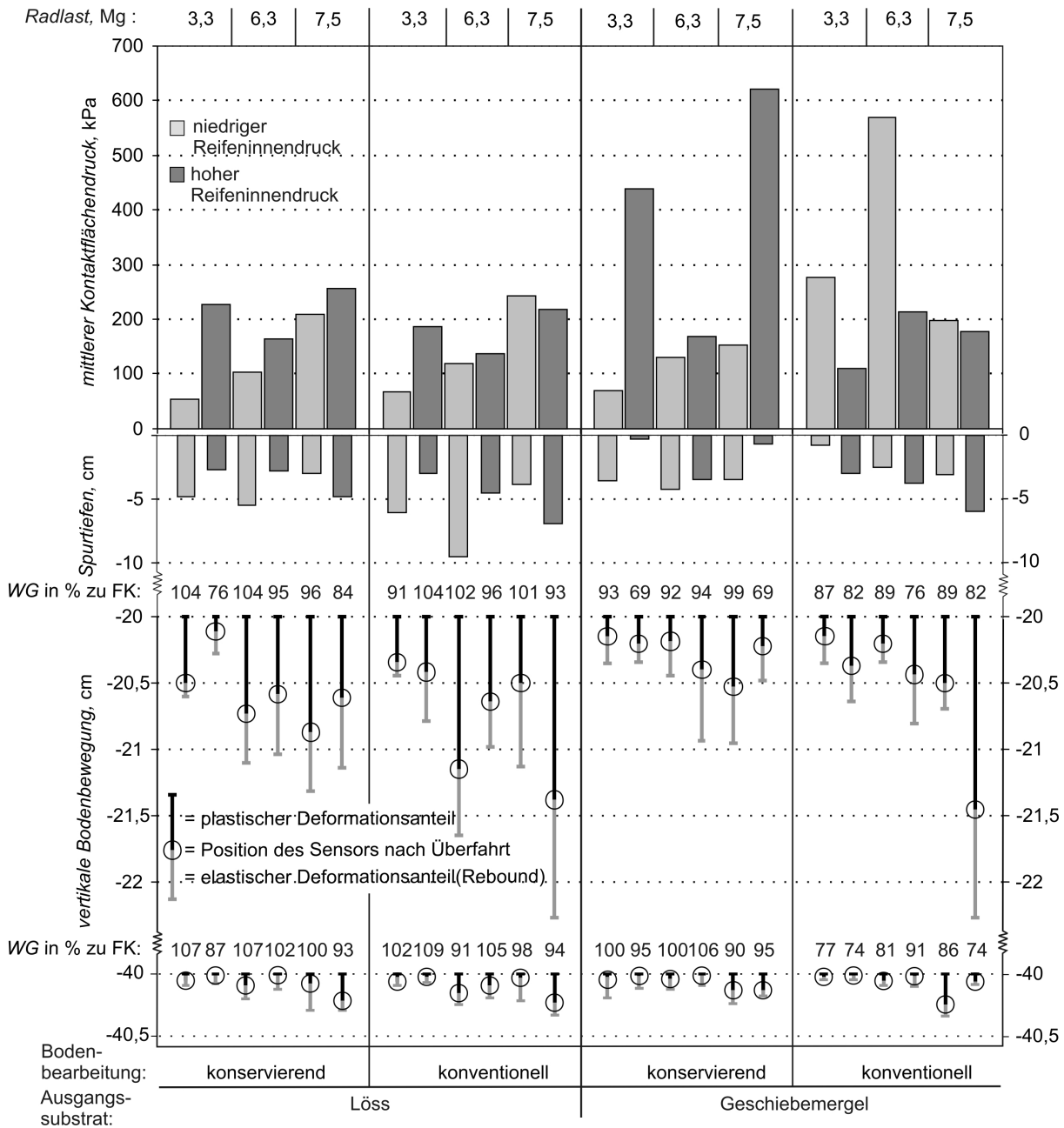


Abbildung 19: Vertikales Deformationsverhalten der Löss- und Geschiebemergelböden in den Messtiefen 20cm und 40cm unter Berücksichtigung des Bodenwassergehaltes in Abhängigkeit der Versuchsfaktoren Auflast, Bodenbearbeitung und Reifeninnendruck

Neben den Bodendruckmessungen der Mehrfachüberfahrten wurde ebenfalls die Veränderung des Bodendeformationsverhaltens unter mehrfacher Belastung untersucht. Abbildung 20 zeigt, unter Berücksichtigung der proportionalen Veränderung von plastischen und elastischen Deformationsanteilen, mit zunehmender Überrollhäufigkeit eine ähnlich abnehmende Entwicklung der vertikalen Verformung wie sie auch in den Ergebnissen der Bodendruckmessungen festgestellt wurde. Die Abnahmen sind in den locker gelagerten Bearbeitungshorizonten der konventionell bearbeiteten Flächen deutlicher ausgeprägt als in den bereits wieder verfestigten und strukturierten ehemaligen Pflughorizonten der

konservierend bearbeiteten Flächen. Der Vergleich der Bodenausgangssubstrate zeigt auf Seiten der Lössböden unabhängig von der Bodenbearbeitung ein etwas höheres Setzungsverhalten auf. Hinsichtlich der Bodenbearbeitung ist in den konventionell gepflügten Horizonten das Verhältnis der Abnahme von der 1. zur 2. Befahrung zur Gesamtabnahme bis zur 10. Überfahrt größer. Alle Messverläufe lassen zudem mit zunehmender Überrollung eine Reduzierung des Anteils an plastischer Verformung hin zur elastischen Verformung oder vielmehr eine Verfestigung und Stabilisierung des Oberbodens erkennen. Auch hier ist anzumerken dass der Oberbodenwassergehalt berücksichtigt werden muss, da er in hohem Maße Einfluss auf das Deformationsverhalten hat.

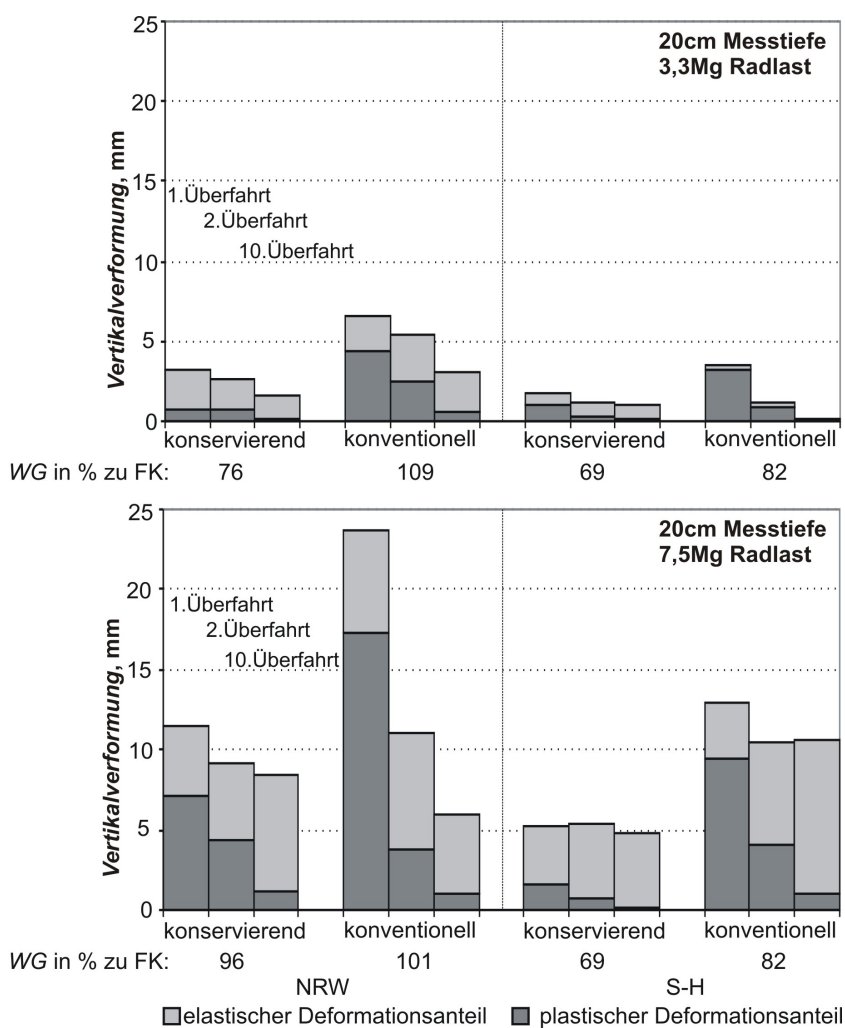


Abbildung 20: Änderung des Deformationsverhaltens aller Versuchsstandorte in der Messtiefe 20cm mit 10facher Befahrung (oben: Versuchsvariante 3,3Mg; unten: 7,5Mg Radlast)

### 3.4 Bodenstabilität gegenüber dynamischer Belastung

#### 3.4.1 Belastungspotential der Böden in Nordrhein-Westfalen

##### 3.4.1.1 Bodenstabilitätsparameter Vorbelastung gegenüber externen Hauptspannungseinträgen

Die Mehrfachexperimente der Belastungsvarianten sind ohne Messwiederholungen durchgeführt worden, die Ergebnisabbildungen stellen Einzelmessungen dar.

Vergleicht man die horizontspezifische Bodenstabilität ( $pF_{1,8}$ ) der Ausgangszustände der konservierend und konventionell bearbeiteten Versuchsflächen in NRW mit den gemessenen mittleren 1. Hauptspannungseinträgen ( $n=3$ ) der Belastungsversuche (Abbildung 21 und Abbildung 22), so zeigt sich für die drei Auflastvarianten ein Überschreiten der *statisch* ermittelten Bodenstabilität ( $P_{V_{stat}}$ ) im Bearbeitungshorizont. In diesem Bereich ist mit der Gefahr der Bodenverdichtung inklusive irreversibler plastischer Setzung zu rechnen. Die Stabilität der Unterbodenhorizonte wird nur noch durch die höheren Radlasten bis in verschiedene Tiefenbereiche überschritten.

Auf Seiten der konservierend bearbeiteten Fläche können stabile Bodenverhältnisse gegenüber den mechanischen Belastungen lediglich für den Unterboden mit der Radlast 3,3Mg ausgewiesen werden (Abbildung 21). Die beiden Schwerlastvarianten mit 6,3 bzw. 7,5Mg überschreiten den kritischen Wert der Vorbelastung deutlich bis in 60cm Tiefe und verursachen damit Unterbodenverdichtung.

Für die konventionell bearbeitete Fläche können stabile Bodenverhältnisse gegenüber den mechanischen Belastungen für den Unterboden nur mit der Radlast 3,3Mg ausgewiesen werden. Die beiden Schwerlastvarianten mit 6,3 bzw. 7,5Mg überschreiten den kritischen Wert der Vorbelastung deutlich bis in 40cm Tiefe. Der Spannungseintrag der Radlast mit 6,3Mg liegt in 60cm Tiefe noch unterhalb des Vorbelastungswertes. Die 7,5Mg Radlastvariante weist auch unter diesem Bodenbearbeitungssystem ein deutliches Überschreiten der Strukturstabilität bis in 60cm Tiefe auf.

Im Vergleich zu der konventionell bewirtschafteten Fläche ist bei einmaliger Belastung unter konservierender Bearbeitung eine höhere Druckkompensation mit geringeren Spannungseinträgen in 20cm Messtiefe erkennbar. Dieser Effekt geht mit zunehmender Überrollhäufigkeit verloren.

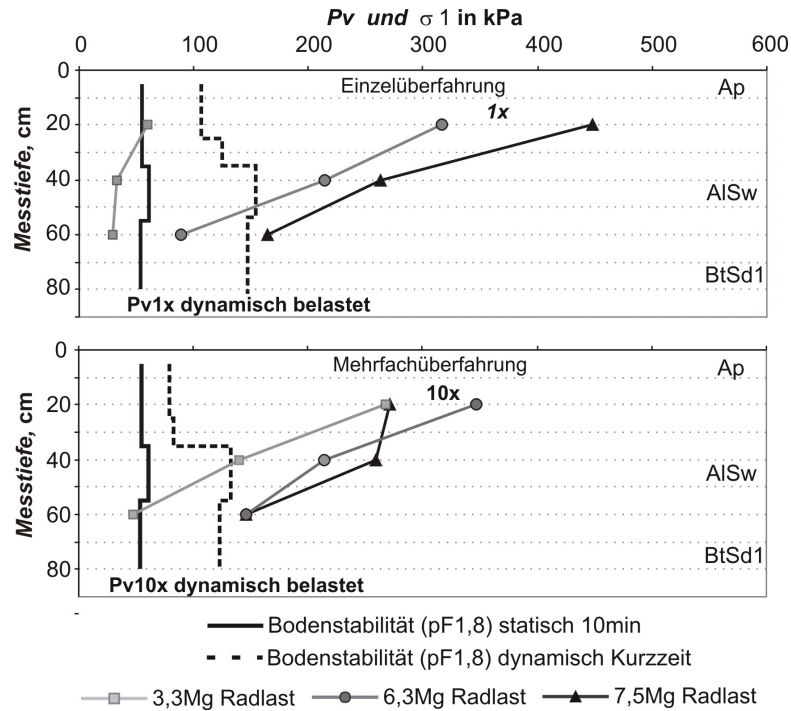


Abbildung 21: Gegenüberstellung der mechanischen Bodenstabilitätskennwerte ( $P_{V_{stat}}$ ;  $P_{V_1}$ ;  $P_{V_{10}}$ ) der konservierend bearbeiteten Versuchsfläche in NRW ( $n=6$  pro Horizont, arith. Mittel) unter Berücksichtigung der im Freiland gemessenen Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) der 1. und 10. Überfahrt

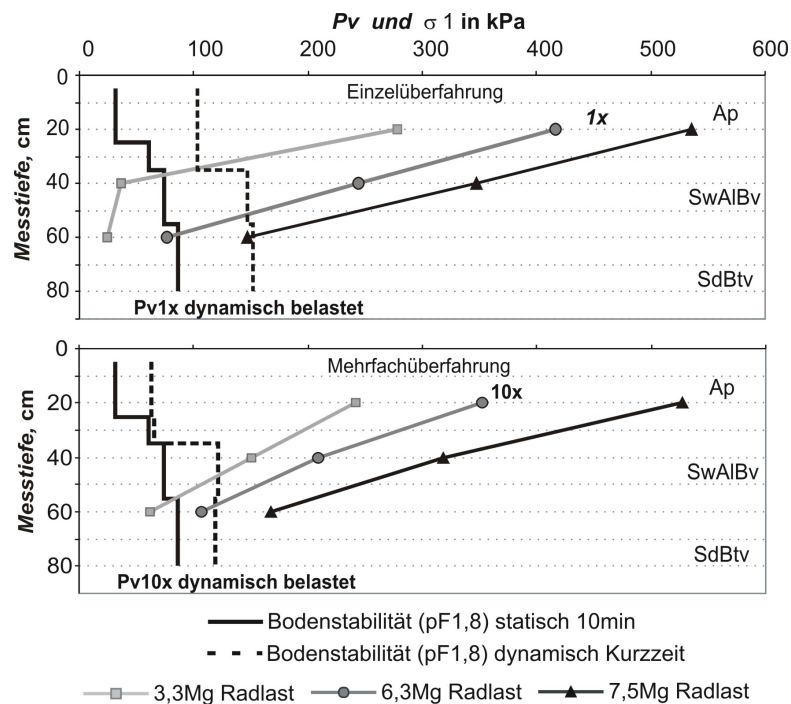


Abbildung 22: Gegenüberstellung der vertikalen mechanischen Bodenstabilitätskennwerte ( $P_{V_{stat}}$ ;  $P_{V_1}$ ;  $P_{V_{10}}$ ) der konventionell bearbeiteten Versuchsfläche in NRW ( $n=6$  pro Horizont, arith. Mittel) unter Berücksichtigung der im Freiland gemessenen Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) der 1. und 10. Überfahrt

Die ermittelte höhere Bodentragfähigkeit unter *dynamischer* Belastung ( $P_{V_1}$ ;  $P_{V_{10}}$ ) zeigt gerade bei einmalig kurzfristiger Belastung ( $P_{V_1}$ ) einen Stabilisierungseffekt der Lössböden der z. T. im Unterboden, auch für höhere Radlasten, zu stabilen Bodenverhältnissen führt. Die Gegenüberstellung der dynamischen Stabilitätskennwerte beider Bodenbearbeitungssysteme zu den Spannungseinträgen der 6,3Mg Radlastvariante verdeutlicht, dass mit einmalig kurzfristigem Spannungseintrag die Stabilität in 60cm Tiefe nicht überschritten wird. Plastische Sofortsetzung mit einer Beeinträchtigung des Porensystems hat in Form dieses Belastungspfades und der kurzen Belastungszeit noch nicht stattgefunden.

Mit zunehmender Überfahungshäufigkeit und Gesamtbelastungszeit nimmt allerdings der Spannungseintrag dieser Radlast in der Tiefe zu, wogegen gleichzeitig eine Abnahme der Bodenstabilität verzeichnet werden kann (vgl. auch Kap. 3.2).

Die Abbildungen Abbildung 23 und Abbildung 24 verdeutlichen den Einfluss des Versuchsfaktors *Reifeninnendruck* hinsichtlich der Veränderung der Druckfortpflanzung und vergleichen diese mit den ermittelten statischen und dynamischen Bodenstabilitäten. Diese Art der Gegenüberstellung lässt bewertende Aussagen darüber zu, inwiefern mit der Absenkung des Reifeninnendrucks eine Verminderung des Bodendrucks und damit eine Stabilisierung des Systems Boden-Maschine für die verschiedenen Gesamtlasten realisiert werden kann. Beispielhaft aufgeführt sind die Spannungseinträge beider Reifeninnendrucke für die geringste Radlastvariante mit 3,3Mg und die schwerste Radlast mit 7,5Mg. Die Ergebnisse verdeutlichen, wie auch in der Darstellungsart der Box-Plot-Diagramme (vgl. Kap.3.3.2.4), dass mit der Verminderung des Reifeninnendrucks und der damit einhergehenden Vergrößerung der Aufstandsfläche, vornehmlich für die geringen Radlastvarianten, eine Reduzierung des Spannungseintrages erreicht werden kann.

Bei den Einzelüberfahrten mit der Radlast 3,3Mg war es möglich die gemessenen Spannungseinträge mit niedrigem Reifeninnendruck im Unterboden unter den Wert der statischen Vorbelastung zu reduzieren und damit einen nachhaltigen bodenschonenden Effekt zu erreichen.

Die Radlastvariante mit 7,5Mg weist ebenfalls eine Beeinflussung durch den Reifeninnendruck auf, liegt aber selbst mit vermindertem Reifendruck in allen Messhorizonten weit über der *statisch* ermittelten Bodentragfähigkeit. Für diese Radlast lassen sich durch verminderten Reifeninnendruck und die damit einhergehenden geringeren Kontaktflächendrücke vornehmlich positive Effekte des Spannungseintrages im Oberboden wiederfinden. Berücksichtigt man den Stabilisierungseffekt durch den dynamisch kurzfristigen Belastungspfad bei der einmaligen Überfahung, wird z.T. auch im tieferen Unterboden (60cm) der Spannungseintrag unter den Stabilitätsgrenzwert vermindert und die Bodentragfähigkeit durch Reduzierung des Reifeninnendrucks nicht überschritten. Die Spannungseinträge der 10. Überfahrt, bei der das Reifenprofil durch Deformation des Oberbodens die maximalen Kontaktflächen in der Ebene Reifen/Boden erreicht hat, zeigen gerade für die Schwerlastvariante mit vermindertem Reifeninnendruck eine Zunahme des Spannungseintrages im Unterboden, der in dieser Gegenüberstellung selbst die erhöhten

dynamischen Stabilitäten des Bodens bis in die Messtiefe 60cm deutlich überschreitet (vgl. Kap. 3.3.2.4).

Im Vergleich der beiden Bodenbearbeitungssysteme lässt sich eine unterschiedliche Beeinflussung des Bodendrucks im Bearbeitungshorizont (20cm) erkennen. Der verminderte Reifeninnendruck hat hier vornehmlich auf den konservierend bearbeiteten Flächen Einfluss auf den Spannungseintrag, unter konventioneller Bodenbearbeitung zeigt sich im Pflughorizont dagegen durch diesen Versuchsfaktor wenig Veränderung des Spannungseintrages.

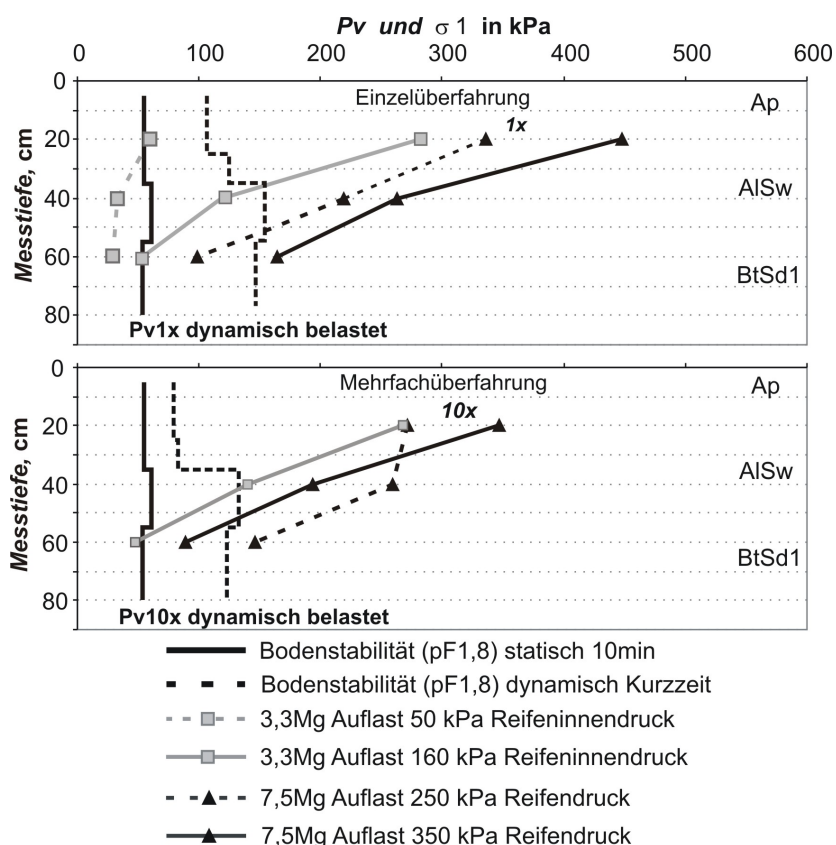


Abbildung 23: Gegenüberstellung der vertikalen mechanischen Bodenstabilitätskennwerte (statischer und dynamischer  $P_v$ ) der konservierend bearbeiteten Versuchsflächen in NRW ( $n=6$  pro Horizont, arith. Mittel) und der im Freiland gemessenen Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) zwei unterschiedlicher Radlastvarianten (3,3 und 7,5Mg) unter Berücksichtigung des Versuchsfaktors Reifeninnendruck

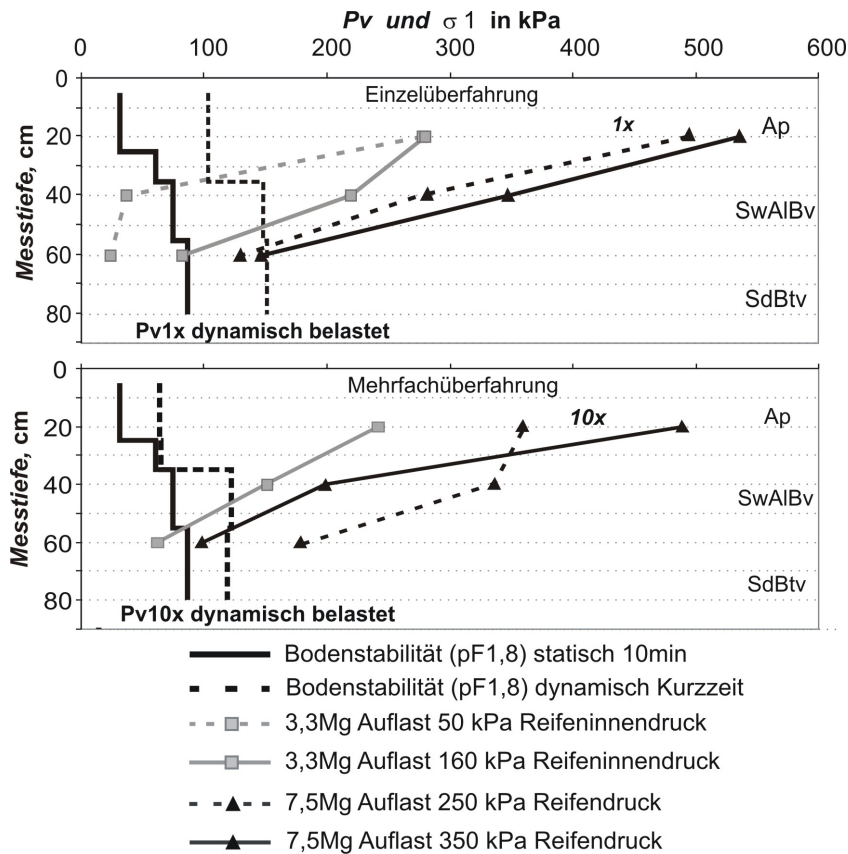


Abbildung 24: Gegenüberstellung der vertikalen mechanischen Bodenstabilitätskennwerte (statischer und dynamischer  $P_v$ ) der konventionell bearbeiteten Versuchsflächen in NRW ( $n=6$  pro Horizont, arith. Mittel) und der im Freiland gemessenen Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) zwei unterschiedlicher Radlastvarianten (3,3 und 7,5Mg) unter Berücksichtigung des Versuchsfaktors Reifeninnendruck

### 3.4.1.2 Scherparameter gegenüber externen Hauptspannungskombinationen

Beide Versuchsflächen der unterschiedlichen Bodenbearbeitungssysteme in NRW zeigen mit 19-22kPa Kohäsion und 35-36° als Winkel der inneren Reibung ähnliche und für Lössparabraunerden typische Stabilitätsparameter (Abbildung 25 und Abbildung 26). Da zwischen den einzelnen Beprobungshorizonten nur marginale Unterschiede ( $\varphi < 1^\circ$  und  $c < 5\text{kPa}$ ) ermittelt wurden, werden für die beiden Versuchsflächen jeweils aus den drei Beprobungshorizonten gemittelte Stabilitätsparameter mit denen im Feld gemessenen Hauptspannungskombinationen der drei Radlastvarianten mit 3,3, 6,3 und 7,5Mg verglichen. Betrachtet man die Hauptspannungskombinationen der Überfahrungsexperimente in Gegenüberstellung zu den Scherparametern, zeigen sich z. T., besonders im Oberboden (20cm Messtiefe), Hauptspannungskreise, welche die Mohr-Coulomb'sche Grenzbedingung überschreiten.



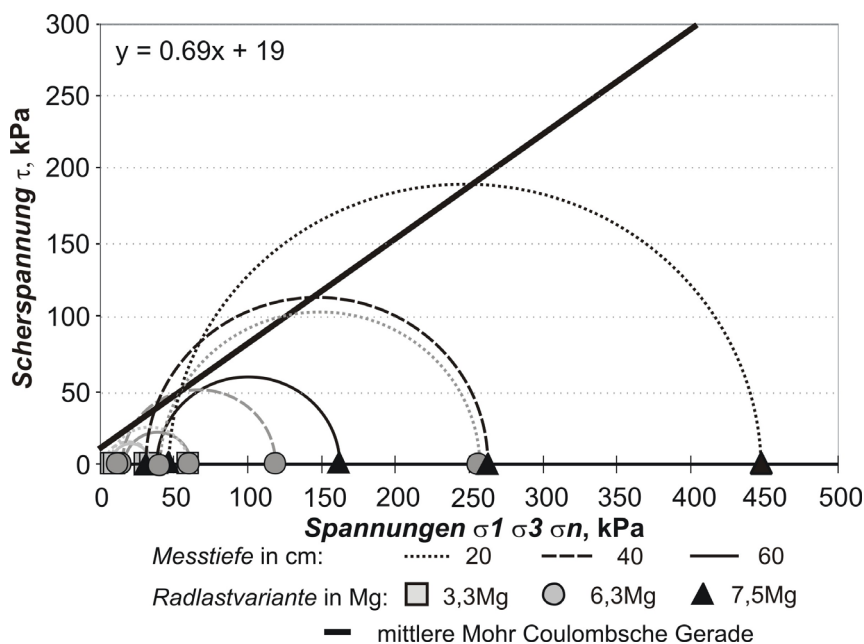


Abbildung 25: Gegenüberstellung der im Labor gemessenen Stabilitätsparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung ( $n=3$ ) zu den im Feld ermittelten größten und kleinsten Hauptspannungseinträgen der Überfahrungsversuche mit unterschiedlichen Radlasten für die konservierend bearbeitete Versuchsfläche in NRW (mittlere Hauptspannungskombinationen ( $n=3$ ))

Auf der konservierend bewirtschafteten Fläche (Abbildung 25) führen beide Schwerlastvarianten (6,3 und 7,5Mg) im Ober- und nahen Unterboden zu dieser Überschreitung des Bruchkriteriums und zu deutlichen vertikalen plastischen Setzungsraten (Tabelle 10). Stabile Hauptspannungskombinationen für diese beiden Radlasten werden erst in 60cm Tiefe wieder gemessen. Die Hauptspannungskreise der Radlastvariante mit 3,3Mg liegen auf dieser Fläche in allen Messhorizonten unterhalb der Grenzbedingung und spiegeln mit diesen Verhältnissen der Hauptspannungen rein elastische Verformung und damit stabile Bodenverhältnisse wieder. Dies zeigt sich auch in den ermittelten Vertikalsetzungsraten für diese Radlast.

Im gepflügten Ap-Horizont der konventionell bearbeiteten Versuchsfläche (Abbildung 26) ist die Intensität der Überschreitung und das plastische Deformationsverhalten weit deutlicher ausgeprägt als im Oberboden der konservierend bewirtschafteten Fläche. Hier werden im Oberboden auch für die Radlastvariante mit 3,3Mg Hauptspannungskombinationen ermittelt die das Bruchkriterium überschreiten und deutliche Setzungen hervorrufen. Im nahen Unterboden weist hier allerdings nur noch die Schwerlastvariante mit 7,5Mg Hauptspannungskreise oberhalb der Grenzbedingung auf.

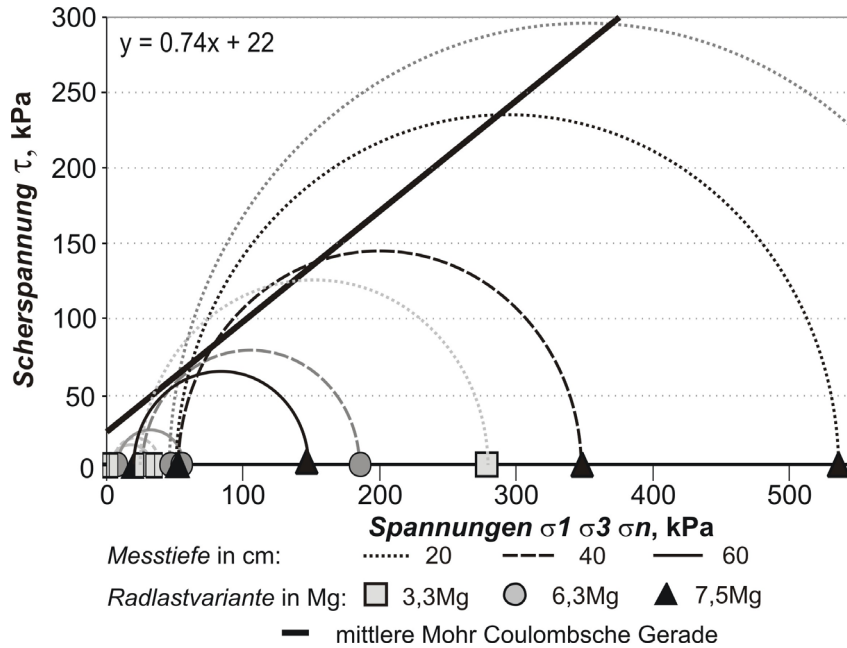


Abbildung 26: Gegenüberstellung der im Labor gemessenen Stabilitätsparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung ( $n=3$ ) zu den im Feld ermittelten größten und kleinsten Hauptspannungseinträgen der Überfahrungsversuche mit unterschiedlichen Radlasten für die konventionell bearbeitete Versuchsfläche in NRW (mittlere Hauptspannungskombinationen ( $n=3$ ))

Tabelle 10: Plastisches Deformationsverhalten des Bodens unter den verschiedenen Radlasten im Feldversuch; Versuchstandort NRW

		plastische Deformation NRW, mm							
Bodenbearbeitung:	Messtiefe:	konservierend				konventionell			
		20cm		40cm		20cm		40cm	
Radlast, Mg		vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal
3,3		1,1	0,2	0,6	0,4	4,2	0,2	0,7	0,2
6,3		7,3	0,7	1,0	0,6	11,5	3,5	1,6	0,5
7,5		8,7	1,4	2,1	0,8	13,8	9,1	2,4	0,6

Betrachtet man die Veränderung der Hauptspannungsverhältnisse bezüglich der unterschiedlichen Reifeninnendrucke sind hier, wie auch bei der Gegenüberstellung der ermittelten 1. Hauptspannung zu den Vorbelastungswerten in Kap.3.4.1.1, Abnahmen der Belastungssituation erkennbar.

Auf der konservierend bewirtschafteten Fläche (Abbildung 27) zeigt die Radlastvariante mit 7,5Mg und 350kPa Reifeninnendruck Hauptspannungskombinationen, welche die Mohr-Coulomb'sche Grenzbedingung bis in den nahen Unterboden überschreiten. Die Reduzierung des Reifeninnendruckes führt auf dieser Fläche mit der Radlast 7,5Mg zu einer Verengung der Hauptspannungsverhältnisse und damit zu stabileren Bodenverhältnissen und elastischer Verformung.

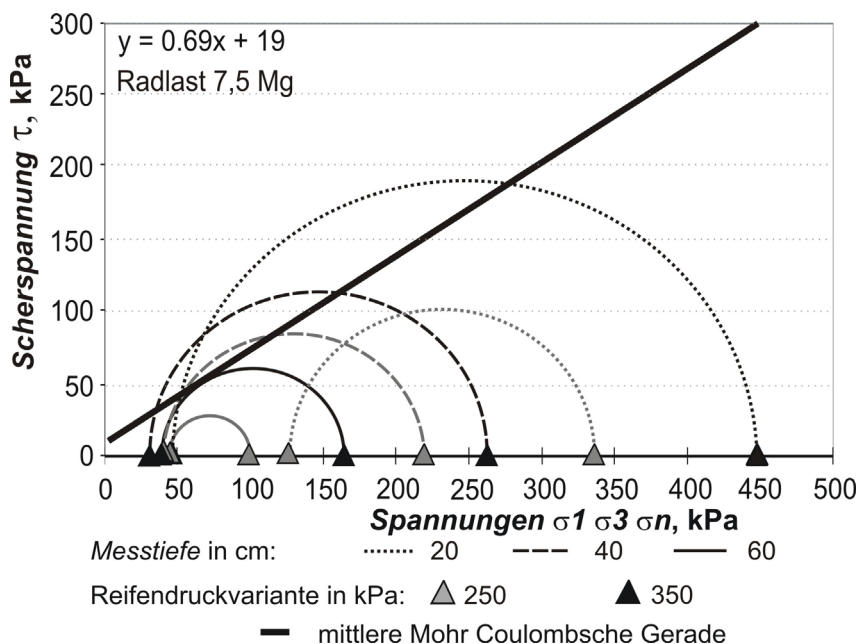


Abbildung 27: Gegenüberstellung der im Labor gemessenen Stabilitätsparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung ( $n=3$ ) zu den im Feld ermittelten größten und kleinsten Hauptspannungseinträgen der Überfahrungsversuche mit 7,5Mg Radlast und unterschiedlichen Reifennendrücken für die konservierend bearbeitete Versuchsfläche in NRW (mittlere Hauptspannungskombinationen ( $n=3$ ))

Die Ergebnisse der vertikalen Deformationsmessungen (vgl. Tabelle 11) spiegeln diesen bodenschonenden Effekt im Oberboden allerdings nicht wieder. Die Messergebnisse der vertikalen Deformation des nahen Unterbodens (40cm) zeigen dagegen den erwarteten Effekt auf.

Im gepflügten Ap-Horizont der konventionell bearbeiteten Versuchsfläche (Abbildung 28) ist die Veränderung der Hauptspannungskreise nicht so deutlich ausgeprägt. Durch die Reifendruckminderung wird zwar ebenfalls eine Verengung der Hauptspannungen erreicht, die Grenzbedingung wird allerdings mit gleicher Radlast und niedrigerem Reifendruck immer noch deutlich überschritten. Ein bodenschonender Effekt wird in der Messtiefe 40cm erreicht, hier kann durch die technische Maßnahme das Hauptspannungsverhältnis soweit verengt werden, dass das Bruchkriterium nicht mehr überschritten wird. Dieser Effekt ist auch anhand der Deformationsraten der Messtiefe 40cm konventionell in der Tabelle 11 abzulesen.

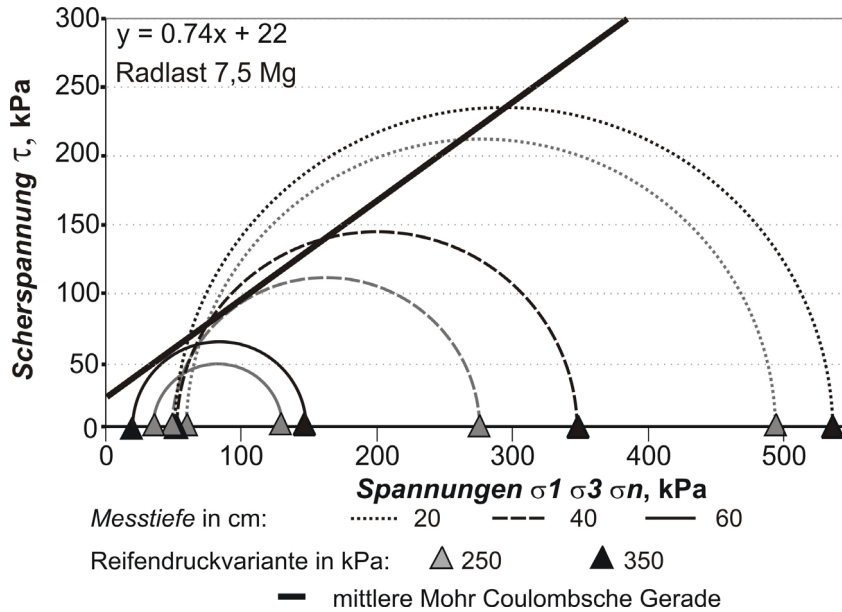


Abbildung 28: Gegenüberstellung der im Labor gemessenen Stabilitätsparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung ( $n=3$ ) zu den im Feld ermittelten größten und kleinsten Hauptspannungseinträgen der Überfahrungsversuche mit 7,5Mg Radlast und unterschiedlichen Reifeninnendrücken für die konventionell bearbeitete Versuchsfläche in NRW (mittlere Hauptspannungskombinationen ( $n=3$ ))

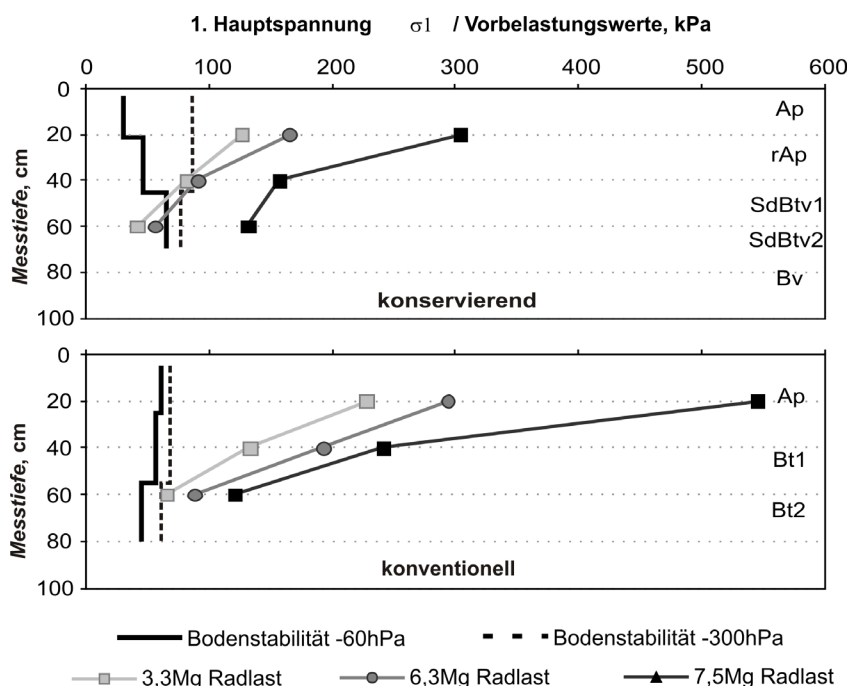
Tabelle 11: Plastisches Deformationsverhalten des Bodens unter den verschiedenen Reifeninnendrücken mit der Radlast 7,5Mg im Feldversuch; Versuchstandort NRW

plastische Deformation, mm NRW; 7,5Mg Radlast								
Bodenbearbeitung: Messtiefe:	konservierend				konventionell			
	20cm		40cm		20cm		40cm	
Reifeninnendruck	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal
niedrig	8,75	1,42	0,82	0,82	4,97	2,57	0,31	0,58
hoch	6,09	1,03	2,14	1,58	13,83	4,06	2,37	0,25

### 3.4.2 Belastungspotential der Böden in Schleswig-Holstein

#### 3.4.2.1 Bodenstabilitätsparameter Vorbelastung gegenüber externen Hauptspannungseinträgen

Vergleicht man die Stabilität des Ausgangszustandes der Versuchsflächen mit Bodenwassergehalten nahe der Feldkapazität ( $pF_{1,8}$ ) mit den gemessenen Spannungseinträgen ( $\sigma_1$ ; 1.Hauptspannung) der Belastungsversuche mit den Radlasten 3,3, 6,3 und 7,5Mg (Abbildung 29), so zeigen beide Standorte für die drei Auflastvarianten, unabhängig vom Bodenbearbeitungssystem, ein Überschreiten der statisch ermittelten Bodenstabilität in den Bereichen Bearbeitungshorizont und naher Unterboden. Auf der konservierend bearbeiteten Fläche reichen die Überschreitungen der Bodenstabilität und die damit verbundene Gefahr der Bodenverdichtung mit den Radlasten 3,3 und 6,3 Mg bis in ca. 50cm Tiefe, die konventionell bearbeitete Fläche zeigt die Gefahr der Bodenverdichtung sogar mit geringer Radlast von 3,3Mg bis in die letzte Messtiefe von 60cm.



**Abbildung 29:** Gegenüberstellung der statischen Bodenstabilitätskennwerte ( $P_{V,stat}$  pF1,8; pF 2,5) der zwei Versuchsflächen in SH ( $n=6$  pro Horizont, arith. Mittel) und der im Freiland gemessenen Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) der verschiedenen Radlastvarianten

Stabile Bodenverhältnisse gegenüber den mechanischen Belastungen können für die Unterbodenhorizonte der konservierend bearbeiteten Versuchsfläche für die Radlasten 3,3 und 6,3Mg ausgewiesen werden bei denen die Spannungseinträge im Unterboden unter den ermittelten Strukturstabilitäten liegen. Die Schwerlastvariante mit 7,5Mg zeigt deutlich höhere Spannungseinträge und überschreitet auf beiden Bodenbearbeitungssystemen den kritischen Wert der Vorbelastung bis in 60cm Tiefe.

Mit geringeren Bodenwassergehalten oder steigendem Matrixpotential (negativer) zeigen die Geschiebemergelstandorte einen texturabhängigen Stabilisierungseffekt der zu einer Zunahme der Bodentragfähigkeit führt und belastungsresistentere Bodenverhältnisse schafft. Die Wasserspannung pF2,5 zeigt auf der konservierend bearbeiteten Fläche eine Zunahme der Vorbelastung im nahen Unterboden mit der in dieser Messtiefe (40cm) eine Stabilisierung gegenüber der Radlast mit 3,3Mg erreicht wird. Auf der konventionell bearbeiteten Fläche reicht die Zunahme des effektiven Spannungsanteils nicht aus um den Boden gegenüber den gemessenen Spannungseinträgen zu stabilisieren.

Mit der Reduzierung des Reifeninnendrucks wird in einem Großteil der Horizonte eine Abnahme der in den Boden eingetragenen Spannungen gemessen (Abbildung 30) (vgl. auch Kap.3.3.2.4). Betrachtet man diese Abnahme der Spannungseinträge gegenüber den ermittelten horizontspezifischen Bodenstabilitäten, zeigt sich allerdings häufig, auch mit niedrigerem Reifeninnendruck, immer noch ein Realwert des Spannungseintrages, welcher die Bodenstabilität überschreitet. Allein für die trockeneren Bedingungen (pF2,5) auf der

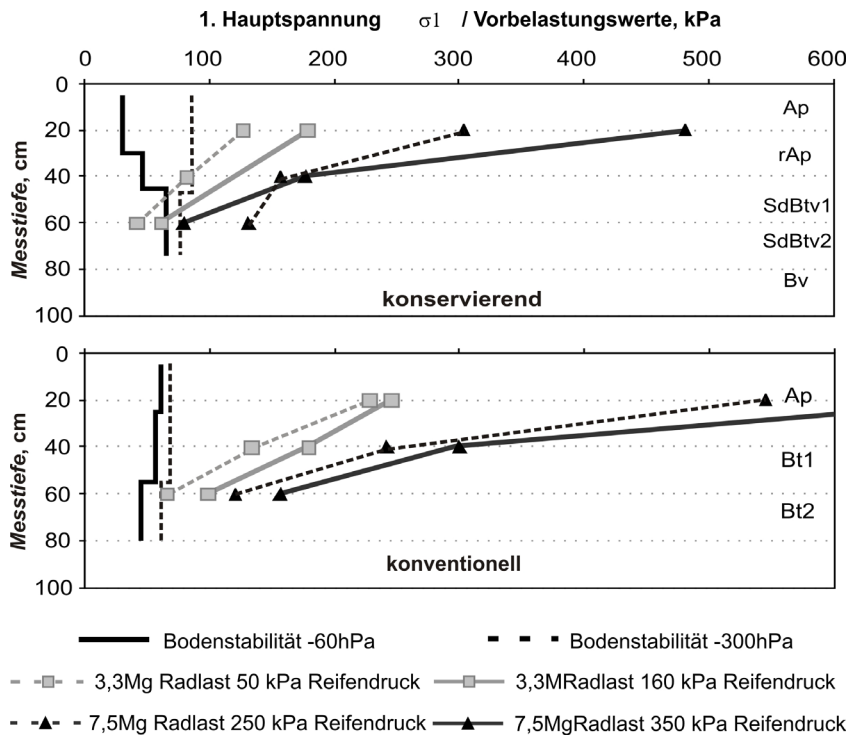


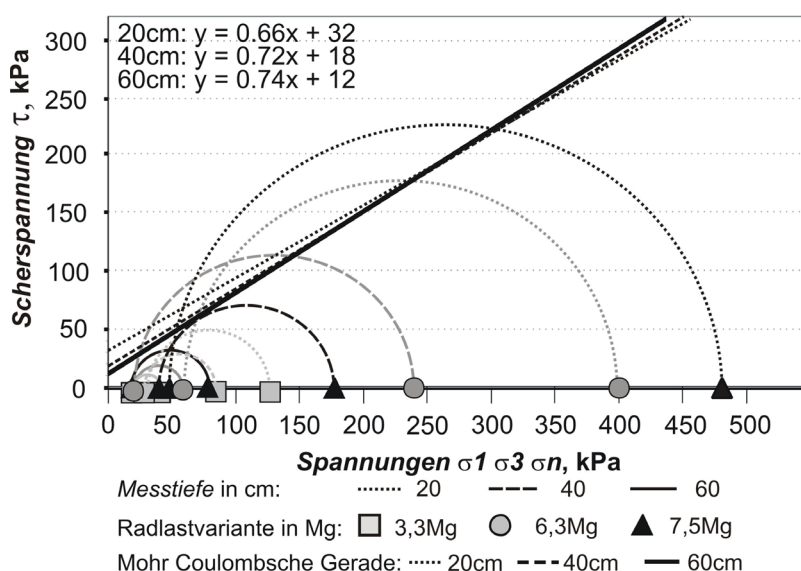
Abbildung 30: Gegenüberstellung der statischen Bodenstabilitätskennwerte ( $P_{v,stat}$  pF1,8; pF 2,5) der zwei Versuchsflächen in SH ( $n=6$  pro Horizont, arith. Mittel) und der im Freiland gemessenen Spannungseinträge ( $\sigma_1$ ) zwei unterschiedlicher Radlastvarianten (3,3 und 7,5Mg) unter Berücksichtigung des Versuchsfaktors Reifeninnendruck

konservierend bearbeiteten Fläche konnte für die Radlastvariante 3,3Mg in der Messtiefe 40cm ein bodenschonender Effekt durch die Reduzierung des Reifeninnendrucks erreicht werden. Unter konventioneller Bearbeitung werden die Spannungseinträge der beiden Radlasten durch die Verminderung des Reifeninnendrucks in keinem Horizont unter den Wert der Vorbelastung reduziert. Die Versuche mit der Radlast 7,5Mg zeigen für beide Bodenbearbeitungssysteme, auch mit reduziertem Reifeninnendruck, Spannungseinträge weit über den ermittelten horizontspezifischen Bodenstabilitäten. Mit dem Verhältnis der Spannungsabnahme zum realen Spannungseintrag und der Gegenüberstellung zum Vorbelastungswert, unterstreichen die Schwerlastversuche mit 7,5Mg die deutliche Bodenverdichtungsgefahr derartiger Belastungen und den schwindenden bodenschonenden Effekt der technischen Maßnahme Reifendruckverminderung.

### 3.4.2.2 Scherparameter gegenüber externen Hauptspannungskombinationen

Die im Labor ermittelten Scherparameter zeigen für den Ausgangszustand der konservierend bearbeiteten Fläche in SH im Bereich des ehemaligen Bearbeitungshorizontes, mit 32kPa die höchste Kohäsion auf. Mit zunehmender Beprobungstiefe nimmt die Kohäsion auf 12kPa ab. Die ermittelten Winkel der inneren Reibung liegen im Oberboden bei 33° in den Unterbodenhorizonten bei ca. 36°.

Betrachtet man die Hauptspannungskombinationen ( $\sigma_1$  zu  $\sigma_3$ ) der drei Radlastvarianten mit 3,3, 6,3 und 7,5Mg in Gegenüberstellung zu den Grenzspannungszustände der Scherversuche (Abbildung 31), zeigen sich z. T., besonders im Oberboden (20cm Messtiefe), Hauptspannungskreise welche die Mohr-Coulomb'sche Gerade überschreiten. Beide Schwerlastvarianten mit 6,3 und 7,5Mg führen mit ihren Hauptspannungsverhältnissen im Ober- und nahen Unterboden zur Überschreitung des Bruchkriteriums und, im Vergleich zu der Radlastvariante mit 3,3Mg, zu deutlich höheren vertikalen plastischen Setzungsraten (vgl. Tabelle 12). Im nahen Unterboden zeigen die gemittelten Hauptspannungskombinationen der Radlastvariante mit 7,5Mg schon stabile Verhältnisse gegenüber den Grenzbedingungen. Die Radlastvariante mit 6,3Mg weist dagegen immer noch Hauptspannungsdifferenzen oberhalb des Bruchkriteriums auf. Stabile Hauptspannungskombinationen für diese Radlast (6,3Mg) werden erst in 60cm Tiefe wieder gemessen. Die unerwartet engen mittleren Hauptspannungsverhältnisse der Belastungsvarianten 7,5 im nahen Unterboden, lassen sich anhand der Deformationsmessungen nicht wiedererkennen. Hier zeigen sich in der Messtiefe 40cm für Radlastvariante mit 6,3Mg geringere plastische Setzungen gegenüber der Belastung mit 7,5Mg. Die Hauptspannungskreise der Radlastvariante mit 3,3Mg liegen auf dieser Fläche in allen Messhorizonten unterhalb der Grenzbedingung und spiegeln mit diesen Verhältnissen der Hauptspannungen rein elastische Verformung und damit stabile Bodenverhältnisse wieder. Dies zeigt sich auch in der verhältnismäßig geringeren Vertikalsetzung unter dieser Radlast.



**Abbildung 31:** Gegenüberstellung der im Labor gemessenen horizontspezifischen Stabilitätsparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung zu den im Feld ermittelten größten und kleinsten Hauptspannungseinträgen der Überfahrungsversuche mit unterschiedlichen Radlasten für die konservierend bearbeitete Versuchsfläche in SH (mittlere Hauptspannungskombinationen ( $n=3$ ))

Die Versuchsfläche mit konventioneller Bodenbearbeitung zeigt für den Ausgangszustand im Oberboden mit 30kPa die höchste Kohäsion auf (Abbildung 32). Mit zunehmender Beprobungstiefe nimmt die Kohäsion auf 17kPa ab. Die ermittelten Winkel der inneren Reibung unterscheiden sich wenig und liegen im Oberboden bei 32° in den Unterbodenhorizonten bei 34°. Betrachtet man die Hauptspannungskombinationen der Überfahrungsversuche auf dieser Versuchsfläche, zeigt sich besonders im gepflügten Ap-Horizont, dass die Intensität der Überschreitung und das plastische Deformationsverhalten gerade bei der Schwerlastvariante mit 7,5Mg weit deutlicher ausgeprägt ist als im Oberboden der konservierend bewirtschafteten Fläche. Wogegen durch relativ trockene und stabile Oberbodenverhältnisse während der Überfahrungsversuche mit der Radlastvariante 6,3Mg auch im Oberboden Hauptspannungskreise unterhalb des Bruchkriteriums ermittelt wurden, zeigt die Schwerlastvariante mit 7,5Mg die erwarteten großen Spannungsdifferenzen (auch in 40cm Messtiefe). Die mit dem DTS ermittelten Vertikalsetzungsraten unter dieser Radlast unterstreichen die Ergebnisse der Bodendruckmessungen (Tabelle 12). Die Radlastvariante mit 3,3Mg weist keine Hauptspannungskombinationen auf die mit ihren Spannungsumhüllenden über die Grenzbedingung reichen. Im Geschiebemergel wurden in der Messtiefe 60cm auf keiner Fläche mit keiner Belastungsvariante Hauptspannungskombinationen ermittelt, welche die Grenzspannungszustände überschritten.

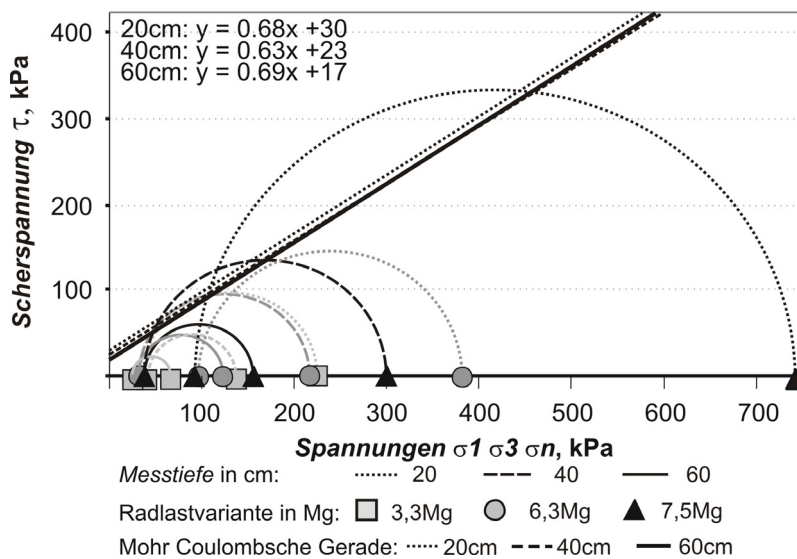


Abbildung 32: Gegenüberstellung der im Labor gemessenen horizontspezifischen Stabilitätsparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung zu den im Feld ermittelten größten und kleinsten Hauptspannungseinträgen der Überfahrungsversuche mit unterschiedlichen Radlasten für die konventionell bearbeitete Versuchsfläche in SH (mittlere Hauptspannungskombinationen (n=3))

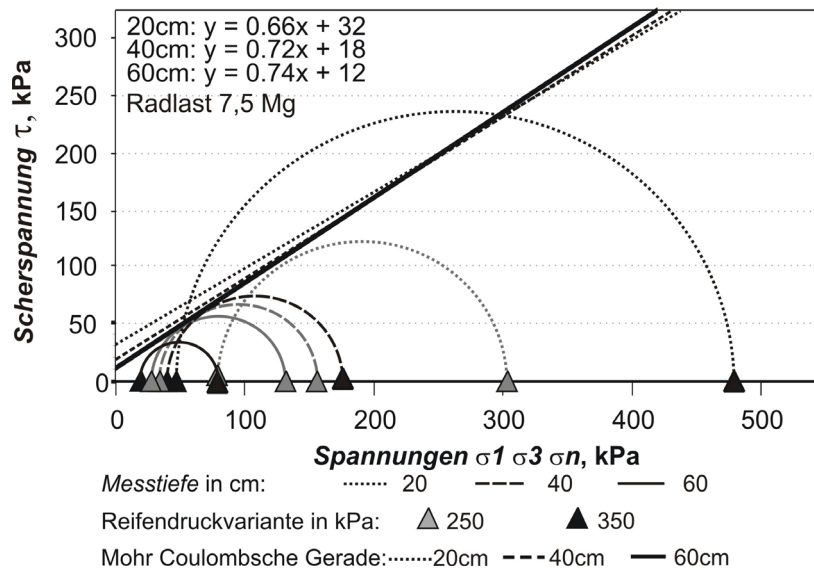


*Tabelle 12: Plastisches Deformationsverhalten des Bodens unter den verschiedenen Radlasten im Feldversuch; Versuchstandort SH*

plastische Deformation SH, mm									
Bodenbearbeitung: Messtiefe: Radlast, Mg	konservierend				konventionell				
	20cm		40cm		20cm		40cm		
	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	
3,3	1,5	0,3	0,5	1,2	3,7	1,5	0,3	0,1	
6,3	4,0	0,4	0,0	0,4	4,4	0,8	0,5	0,3	
7,5	5,3	1,8	1,3	0,3	14,5	8,8	2,5	0,5	

Betrachtet man die Veränderung der Hauptspannungsverhältnisse der Geschiebemergelstandorte bezüglich der unterschiedlichen Reifeninnendrucke für die Radlast 7,5Mg sind hier, wie auch bei der Gegenüberstellung der ermittelten 1. Hauptspannung zu den Vorbelastungswerten in Kap.3.4.2.1, Abnahmen der Belastungssituation vorrangig im Oberboden erkennbar.

Auf der konservierend bewirtschafteten Fläche (Abbildung 33) zeigt die Radlastvariante mit 7,5Mg und hohem Reifeninnendruck Hauptspannungskombinationen, welche die Mohr-Coulomb'schen Grenzbedingungen im Oberboden überschreiten. Die Reduzierung des Reifeninnendruckes führt auf dieser Fläche, mit der gegebenen Radlast, zu einer Verengung der Hauptspannungsverhältnisse und erzeugt damit, in Gegenüberstellung zu den Scherparametern, stabile Bodenverhältnisse. Die Ergebnisse der vertikalen Deformationsmessungen (Tabelle 13) spiegeln diesen bodenschonenden Effekt im Oberboden allerdings nicht wieder. Hier beeinflussen die bereits angedeuteten unterschiedlichen Oberbodenbeschaffenheiten (bzw. WG) der einzelnen Messtermine eine direkte Vergleichbarkeit der beiden Reifeninnendruckvarianten. Die homogeneren Bodenverhältnisse im nahen Unterboden zeigen dagegen annähernd gleiche Spannungskombinationen der beiden Varianten mit etwas geringeren Werten auf Seiten des niedrigeren Reifeninnendruckes. Die ähnlichen Hauptspannungskombinationen reichen fast an die Grenzstabilität und rufen nahezu gleiche vertikale Deformationsraten im nahen Unterboden hervor. Im Unterboden in 60cm Tiefe reichen die Hauptspannungsumhüllenden beider Reifeninnendruckvarianten nicht mehr an das Grenzkriterium heran. Auffällig in dieser Messtiefe ist die größere Hauptspannungsdifferenz und damit Bodenbeanspruchung der Radlast (7,5Mg) mit niedrigen Reifeninnendruck, die sich auch schon in den Ergebnissen des Kap. 3.3.2.4 zeigte.



**Abbildung 33:** Gegenüberstellung der im Labor gemessenen horizontspezifischen Stabilitätsparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung zu den im Feld ermittelten größten und kleinsten Hauptspannungseinträgen der Überfahrungsversuche mit 7,5Mg Radlast und unterschiedlichen Reifeninnendrücken für die konservierend bearbeitete Versuchsfläche in SH (mittlere Hauptspannungskombinationen ( $n=3$ ))

Die konventionell bearbeitete Versuchsfläche (Abbildung 34) zeigt deutlich höhere Überschreitung der Stabilitätskriterien im Oberboden. Die Veränderung der Hauptspannungskreise hinsichtlich der beiden Reifeninnendrücke ist nicht so deutlich ausgeprägt wie auf der konservierend bewirtschafteten Fläche. Für den niedrigeren Reifeninnendruck lässt sich eine geringe Abnahme der eingetragenen Spannungen erkennen, die Hauptspannungsdifferenzen und damit die Überschreitung der Grenzbedingungen bleiben allerdings beinahe gleich. Ein bodenschonender Effekt wird in der Messtiefe 40cm erreicht, hier kann durch die technische Maßnahme das Hauptspannungsverhältnis soweit verengt werden, dass das Bruchkriterium mit niedrigem Reifeninnendruck nicht mehr überschritten wird. Dieser Effekt lässt sich allerdings nicht mit Ergebnissen der Deformationsmessungen in 40cm Tiefe (Tabelle 13) bestätigen. Die Messtiefe 60cm zeigte bei keinem Freilandversuch dieser Radlast Hauptspannungskombinationen welche die Grenzbedingungen überschritten.

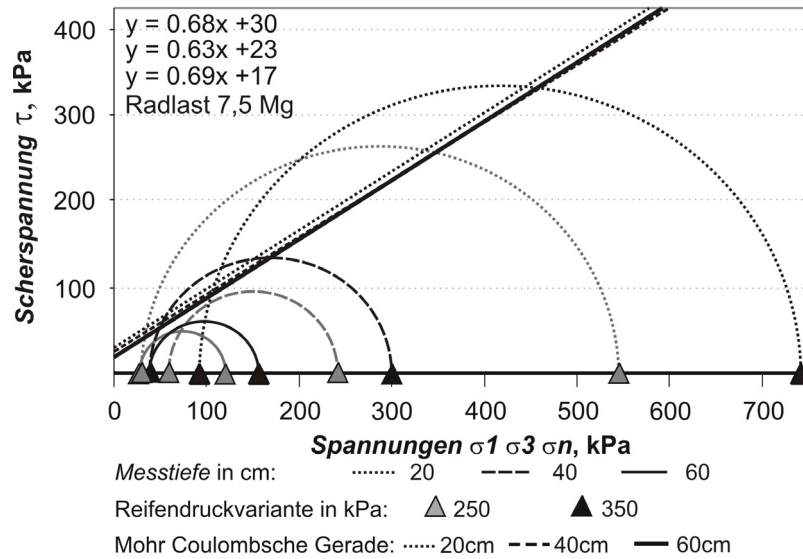


Abbildung 34: Gegenüberstellung der im Labor gemessenen horizontalspezifischen Stabilitätsparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung zu den im Feld ermittelten größten und kleinsten Hauptspannungseinträgen der Überfahrungsversuche mit 7,5Mg Radlast und unterschiedlichen Reifeninnendrücken für die konventionell bearbeitete Versuchsfläche in SH (mittlere Hauptspannungskombinationen (n=3))

Tabelle 13: Plastisches Deformationsverhalten des Bodens unter den verschiedenen Reifeninnendrücken mit der Radlast 7,5Mg im Feldversuch; Versuchstandort SH

Radlast 7,5Mg	plastische Deformation SH, mm							
	konservierend				konventionell			
	20cm		40cm		20cm		40cm	
Messtiefe:	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal	vertikal	horizontal
niedrig	5,28	2,53	1,32	0,27	1,91	0,21	2,52	0,33
hoch	2,23	0,63	1,31	0,27	8,16	8,75	0,65	0,45

### 3.5 Auswirkung der mechanischen Belastung auf ausgewählte Bodenfunktionskennwerte

Die Spannungs- und Deformationsmessungen der Überfahrungsversuche zeigen, dass die Stabilität der untersuchten Böden zum Teil von den mechanischen Belastungen überschritten wurde. Abhängig von der Gesamtlast konnte bis in den nahen Unterboden vertikale Setzung mit plastischer Verformung festgestellt werden. Diese irreversiblen komprimierenden und scherenden Bodenbewegungen nehmen Einfluss auf die Bodenstruktur und über deren Veränderung ebenfalls auf die Bodenfunktionen. Das folgende Kapitel stellt die Beeinflussung der Bodenfunktionen anhand folgender Kennwerte vor:

1. Vorbelastung,  $P_v$
2. Luftkapazität,  $LK$
3. gesättigte Wasserleitfähigkeit,  $k_f$
4. Luftleitfähigkeit,  $k_l$

Die auflastabhängige Einstufung der Veränderung ermöglicht die Auswirkungen der einzelnen Reifen/Radlastkombinationen auf die vorgestellten Bodeneigenschaften zu quantifizieren und damit hinsichtlich der definierten Belastungssituationen zu bewerten.

#### 3.5.1 Auflastabhängige Veränderung der Vorbelastung

Zusammenfassend für die vier Versuchsstandorte ist in der Abbildung 35 die Veränderung des Stabilitätsparameters Vorbelastung ( $P_v$ ;  $pF_{1,8}$ ) durch die mechanischen Belastungen mit 3,3, 6,3 und 7,5 Mg Radlast dargestellt. Die auflastabhängige Beeinflussung zeigt sich in den Ergebnissen als signifikante Zunahme des mittleren Vorbelastungswertes.

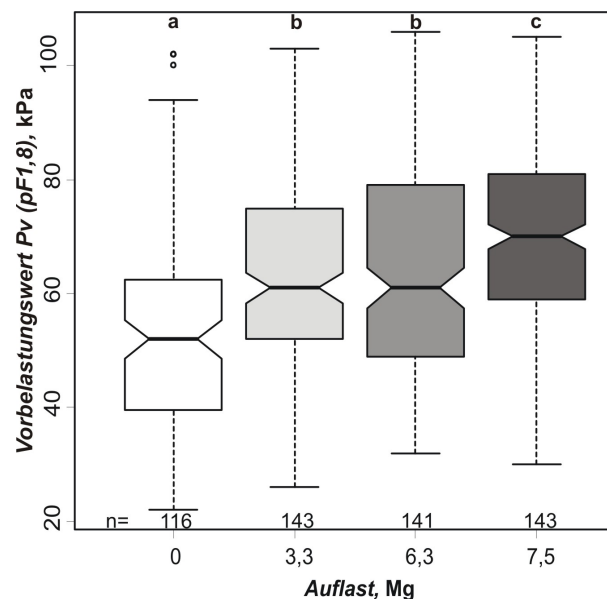


Abbildung 35: Mittlere Veränderung der Vorbelastung ( $pF_{1,8}$ ) durch einmalige mechanische Belastung unter zusammenfassender Betrachtung der verschiedenen Ausgangssubstrate und Bodenbearbeitungssysteme ( $n$ = siehe Abb.;  $P_v$  nach DVWK (1995))

Für die beiden Radlastvarianten mit 3,3 und 6,3Mg lässt sich eine signifikante mittlere Zunahme der Vorbelastung um 17% verzeichnen. Mit 7,5Mg Radlast kommt es zu einer weiteren signifikanten Zunahme und damit zu einer Gesamterhöhung der mittleren Stabilität um 34% gegenüber dem Ausgangszustand.

Die Abbildungen Abbildung 36 und Abbildung 37 mit horizontspezifischer Aufgliederung der Vorbelastungswerte zeigen, wie auch die zusammenfassende Darstellung der Abbildung 35, tendenzielle bzw. z.T. signifikante Zunahmen der Vorbelastung ( $pF_{1,8}$ ) mit zunehmender mechanischer Auflast. Wogegen im Oberboden schon bei kleineren Radlasten mit 3,3Mg signifikante Erhöhungen um ca. 25kPa erkennbar sind, zeichnet sich die signifikante Zunahme der Vorbelastung im Unterboden erst bei der Schwerlastvariante mit 7,5Mg ab (Geschiebemergel +17kPa; Löss +14kPa). Diese Beeinflussung ist in beiden Ausgangssubstraten zu beobachten, wobei die Gesamtzunahmen im Oberboden mit 30kPa (78%) deutlicher auf den Geschiebemergelstandorten ausgeprägt sind und die Lössstandorte mit bis zu 24kPa (38%) deutlichere Zunahmen im Unterboden aufweisen.

Die weitere Aufgliederung der Beeinflussung der Vorbelastungswerte unter Berücksichtigung der Bodenbearbeitungssysteme ist der Abbildung A 1im Anhang zu entnehmen.

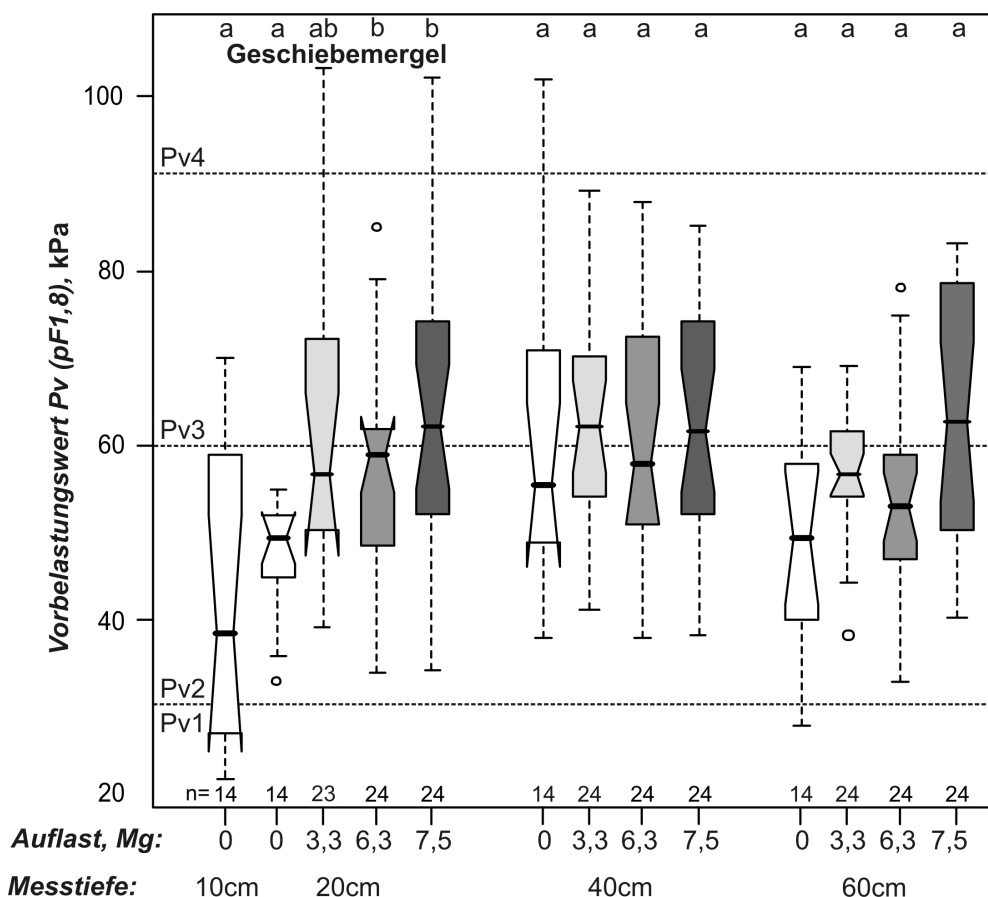


Abbildung 36: Horizontspezifische mittlere Veränderung der Vorbelastung ( $pF_{1,8}$ ) des Ausgangssubstrates Geschiebemergel durch einmalige mechanische Belastung ( $n=$  siehe Abb.; PV nach DVWK (1995))

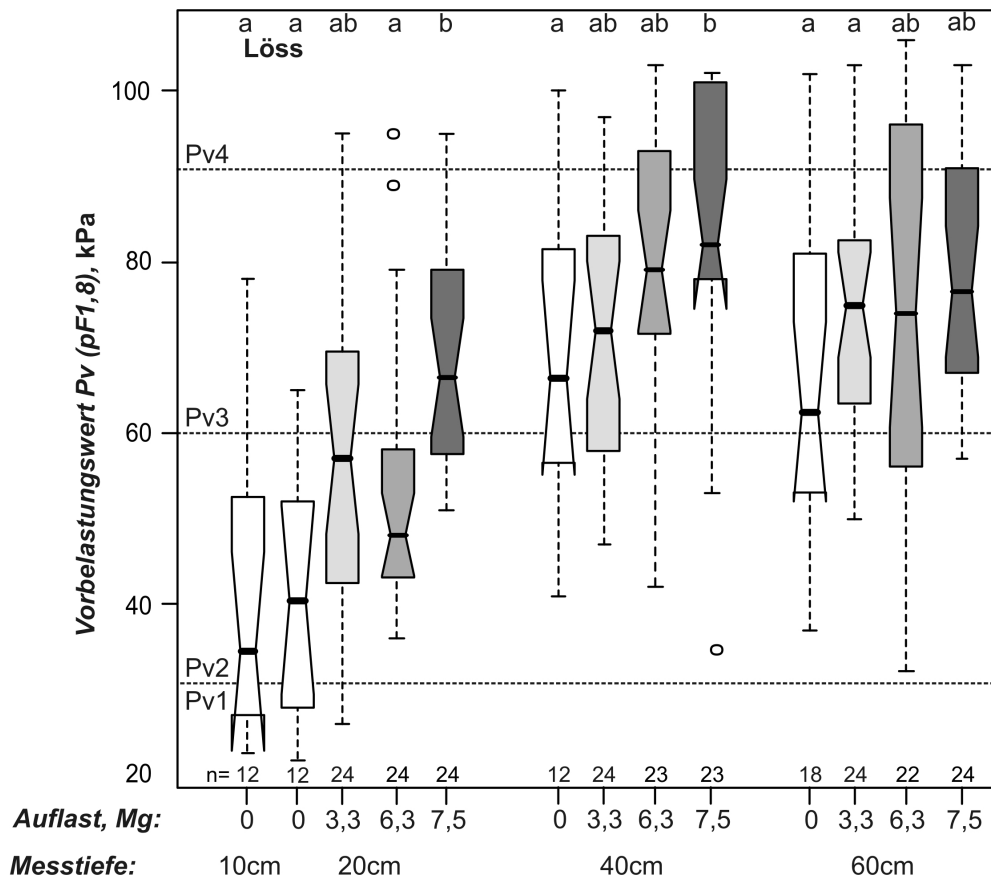
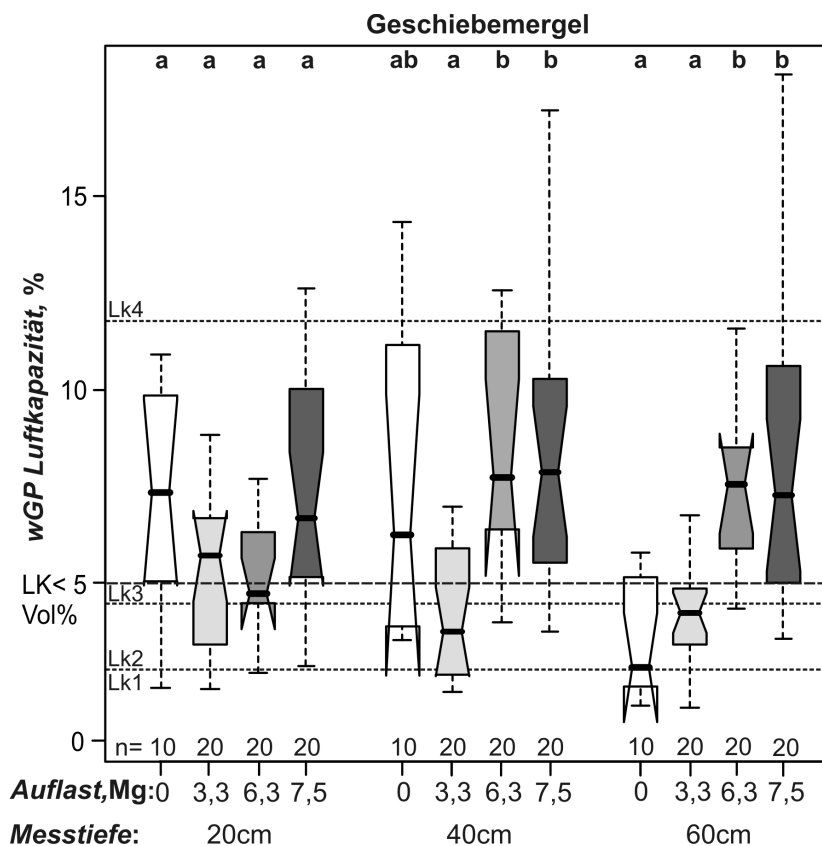


Abbildung 37: Horizontspezifische mittlere Veränderung der Vorbelastung des Ausgangssubstrates Löss durch einmalige mechanische Belastung (n= siehe Abb.; PV nach DVWK (1995))

### 3.5.2 Auflastabhängige Veränderung der Luftkapazität

Im Vorfeld wurden Unterschiede der Luftkapazitäten hinsichtlich der primären Versuchsfaktoren Bodenart und Bodenbearbeitung untersucht um Wechselwirkungen dieser Versuchsfaktoren beim Vergleich der Auflastvarianten ausschließen zu können. Insgesamt zeigen diese Untersuchungen für alle Versuchsstandorte geringe Luftkapazitäten nahe dem Schadschwellenwert von 5Vol%. Der Vergleich der beiden Ausgangssubstrate offenbart tendenziell höhere Luftkapazitäten aller beprobten Horizonte für die Geschiebemergelstandorte. Im Mittel liegt der Anteil an weiten Grobporen im Geschiebemergel bei 6Vol% im Oberboden mit der Tiefe abnehmend zu 5Vol% im Unterboden. Der Löss weist gegenüber dem Geschiebemergel eine etwas geringere Luftkapazität mit 5Vol% im Oberboden zu ca. 4Vol% in 60cm Tiefe auf. Signifikante Unterschiede der beiden Ausgangssubstrate konnten nicht ausgewiesen werden.

Der Versuchsfaktor Bodenbearbeitungssystem zeigt mit Ausnahme des konventionell gepflügten Ap-Horizontes gegenüber dem ehemals bearbeiteten Unterkrumenbereich der konservierend bearbeiteten Fläche ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Bearbeitungsarten auf (vgl. dazu Abbildung A 2 im Anhang).



**Abbildung 38:** Horizontspezifische mittlere Veränderung der Luftkapazitäten des Ausgangssubstrates Geschiebemergel durch einmalige mechanische Belastung bis 7,5Mg Radlast unter zusammenfassender Betrachtung der verschiedenen Bodenbearbeitungssysteme und der im Geschiebemergel vorhandenen räumlichen Substratheterogenität (n= siehe Abb.; LK nach DVWK (1997))

Der Vergleich der mittleren horizontspezifischen Luftkapazitäten des Ausgangssubstrates Geschiebemergel hinsichtlich des Versuchsfaktors Radlast (Abbildung 38) offenbart keine Beeinflussung der weiten Grobporen durch die einmaligen mechanischen Belastungen. Zum Teil lassen sich durch Texturheterogenität sogar tendenziell gegenläufige Veränderungen mit zunehmender Radlast feststellen.

Für die Versuchsflächen in NRW (Abbildung 39) wurde mit zunehmender Radlast eine Abnahme der Luftkapazität festgestellt, die für die Schwerlastvariante mit 7,5Mg im Unterboden als signifikant ausgewiesen werden konnte. Durch die mechanischen Belastungen mit 7,5Mg wurde der volumetrische Anteil der weiten Grobporen bis in den Unterboden unter den Schadschwellenwert von 5Vol% reduziert. Belastungen mit den Radlastvarianten 3,3 und 6,3Mg zeigten in keinem Horizont signifikante Verminderungen der Luftkapazität auf.

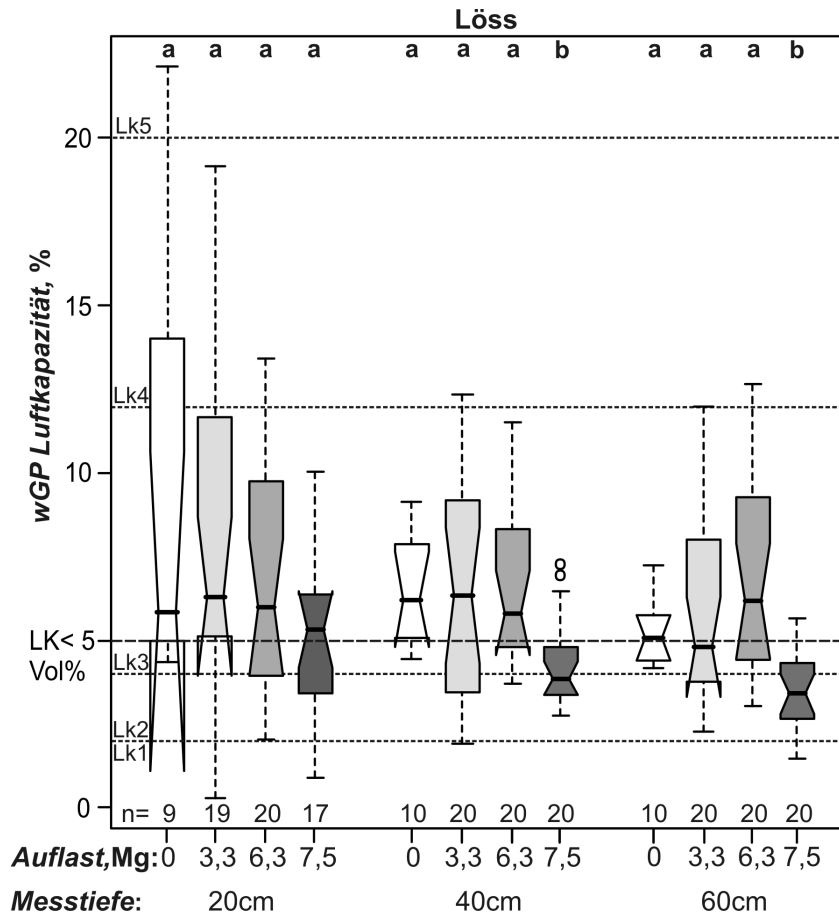


Abbildung 39: Horizontspezifische mittlere Veränderung der Luftkapazitäten des Ausgangssubstrates Löss durch einmalige mechanische Belastung bis 7,5Mg Radlast unter zusammenfassender Betrachtung der verschiedenen Bodenbearbeitungssysteme (n= siehe Abb.; LK nach DVWK (1997))

### 3.5.3 Auflastabhängige Veränderung der Luftleitfähigkeit

Die mittleren Luftleitfähigkeiten (KI, pF1,8) der ursprünglichen unbelasteten Flächen, aber auch die der belasteten Fahrspuren, weisen leichte Unterschiede zwischen den verschiedenen Bodenausgangssubstraten auf (Abbildung 40). Die Lössstandorte bewegen sich insgesamt im Bereich mittlerer Luftleitfähigkeiten. Der Geschiebemergel weist demgegenüber, je nach Textur des Profils, etwas höhere Luftleitfähigkeit im Bereich mittlerer bis hoher Werte auf, wobei die beprobten Leitprofile signifikant geringere Leitfähigkeiten gegenüber den Fahrspuren zeigen. Hinsichtlich auflastabhängiger Beeinflussung der Luftleitfähigkeit sind keine signifikanten noch tendenziellen Veränderungen erkennbar.



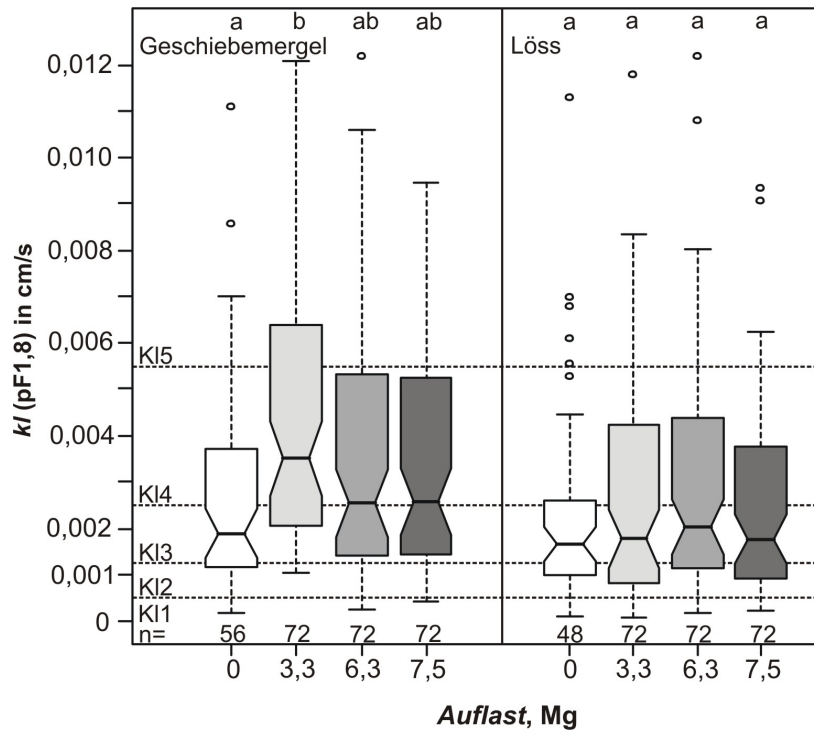


Abbildung 40: Mittlere Veränderung der Luftleitfähigkeit (pF1,8) durch einmalige mechanische Belastung bis 7,5Mg Radlast unter Berücksichtigung der verschiedenen Ausgangssubstrate (n= siehe Abb.;  $k_l$  nach DVWK (1997))

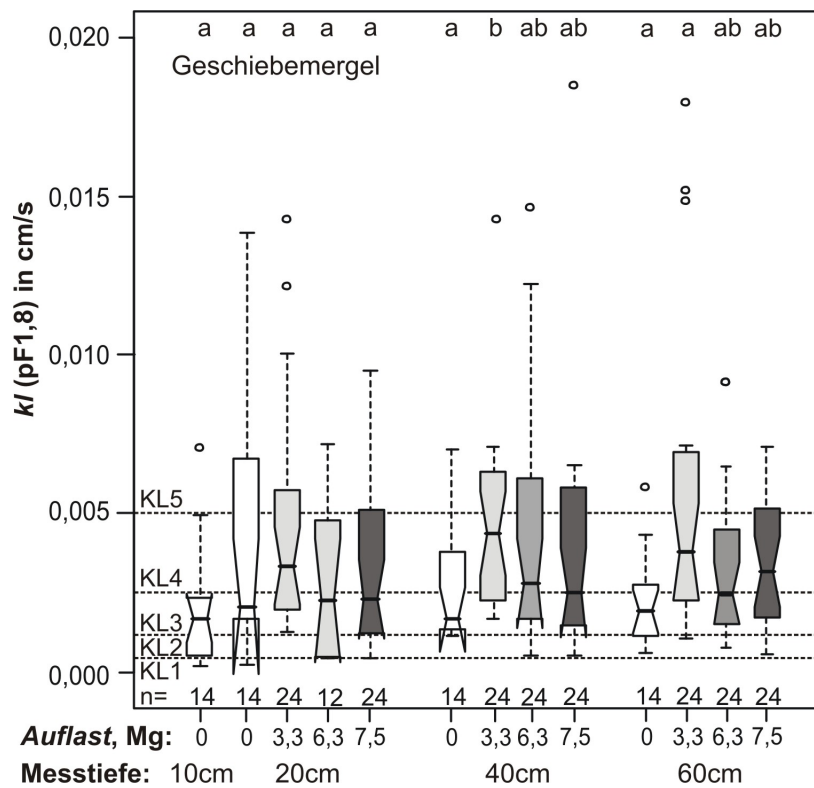


Abbildung 41: Horizontspezifische mittlere Veränderung der Luftleitfähigkeit des Ausgangssubstrates Geschiebemergel durch einmalige mechanische Belastung bis 7,5Mg Radlast (n= siehe Abb.;  $k_l$  nach DVWK (1997))

Die starke Variabilität der Luftleitfähigkeit, wie sie in Form der gemittelten Leitfähigkeiten in der Abbildung 40 bei den Geschiebemergelstandorten zum Ausdruck kommt, zeigt sich ebenfalls in der differenzierten Betrachtung der einzelnen Beprobungshorizonte (Abbildung 41). Hinsichtlich der Belastungsintensität lassen sich die Leitfähigkeiten mit zunehmender Radlast nicht unterscheiden, es tritt vielmehr der Texturunterschied der unterschiedlichen Fahrspurprofile in den Vordergrund.

Die Lössstandorte (Abbildung 42) weisen in den beiden ersten Beprobungstiefen in 20 und 40cm tendenzielle Abnahmen der Luftleitfähigkeiten auf und zeigen im Oberbodenhorizont Beeinträchtigungen die unter gemittelter Betrachtung (Abbildung 40) nicht festzustellen waren. Der Oberboden zeigt in den mit 7,5Mg belasteten Fahrspuren eine ca. 40%ige Abnahme der Leitfähigkeit gegenüber dem Ausgangszustand. Die Radlast 7,5Mg reduziert die Leitfähigkeit mit  $9 \cdot 10^{-4} \text{cm/s}$  vom mittleren in den geringen Leitfähigkeitsbereich. Die Messtiefe 40cm zeigt ebenfalls tendenzielle Abnahmen der Leitfähigkeit von hohen zu mittleren Werten. In dieser Messtiefe kommt es mit der Abnahme von  $40 \cdot 10^{-4} \text{cm/s}$  zu  $19 \cdot 10^{-4} \text{cm/s}$  nahezu zu einer Halbierung der Luftleitfähigkeit. Die Unterbodenhorizonte in 60cm Tiefe lassen dagegen, unabhängig vom Ausgangssubstrat, mit geringen Radlasten erst eine Erhöhung der Leitfähigkeit gegenüber dem Ausgangszustand erkennen die dann mit zunehmender Radlast wieder abnimmt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die hohe Variabilität dieses Funktionsparameters (kl pF1,8) unabhängig vom Ausgangssubstrat keine statistische Aussage zu einer auflastabhängigen Beeinträchtigung durch einmalige Belastungen bis 7,5Mg zulässt.

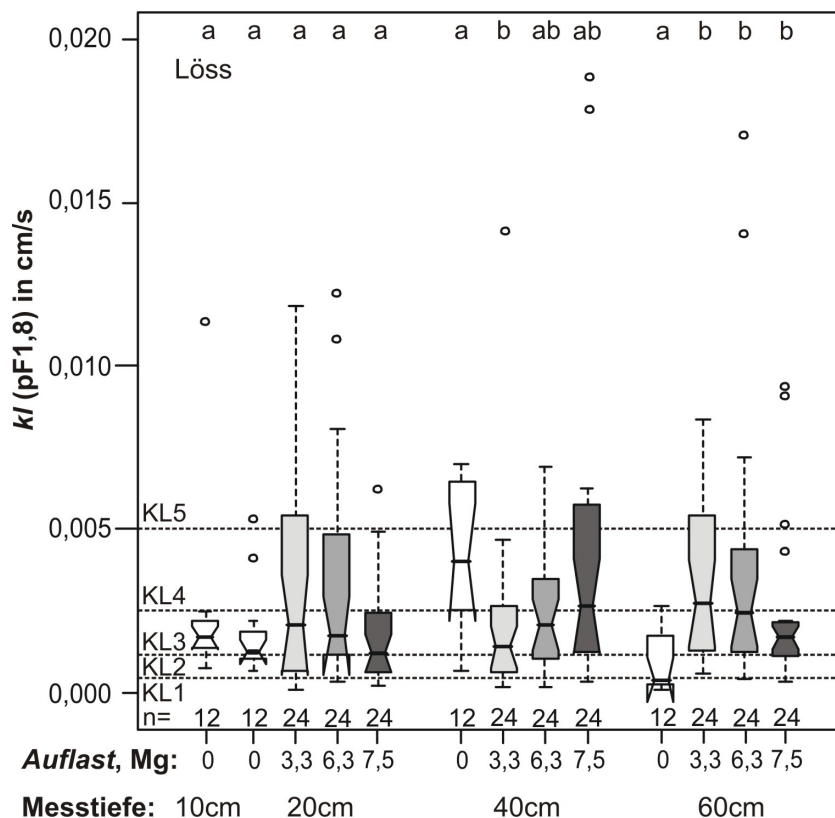


Abbildung 42: Horizontspezifische mittlere Veränderung der Luftleitfähigkeit des Ausgangssubstrates Löss durch einmalige mechanische Belastung bis 7,5Mg Radlast ( $n$ = siehe Abb.;  $k_l$  nach DVWK (1997))

### 3.5.4 Auflastabhängige Veränderung der hydraulischen Leitfähigkeit unter Berücksichtigung mehrerer Labor- und Feldmessverfahren

#### 3.5.4.1 Labormessungen mit dem Haubenpermeameter

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $k_f$ ) der unbelasteten Flächen aller Versuchsstandorte, aber auch die der belasteten Fahrspuren, weist unterschiedliche Ausgangsbedingungen aufgrund der verschiedenen Bodenausgangssubstrate auf (Abbildung 43). Die Lössstandorte lassen sich in ihrem Ausgangszustand durch ein ausgeprägtes Sekundärporensystem überwiegend im Bereich hoher bis sehr hoher Leitfähigkeiten einordnen, wogegen die Geschiebemergelstandorte mittlere bis hohe Leitfähigkeiten aufweisen. Unabhängig vom Ausgangssubstrat ist mit zunehmender mechanischer Belastung eine tendenzielle Abnahme der vertikalen gesättigten Wasserleitfähigkeit festzustellen. Durch die Belastung mit 3,3Mg kommt es zu Abnahmen von ca. 8%, die Belastungen der Schwerlastvarianten mit 6,3 und 7,5Mg führen auf den Geschiebemergelstandorten zu Abnahmen um ca. 9% auf den Lössstandorten zu ca. 12%. Die stärkere Abnahme der mittleren Leitfähigkeit auf Seiten der Lössstandorte zeigt eine größere Verdichtungsempfindlichkeit dieses Ausgangssubstrates gegenüber mechanischer Belastung auf.

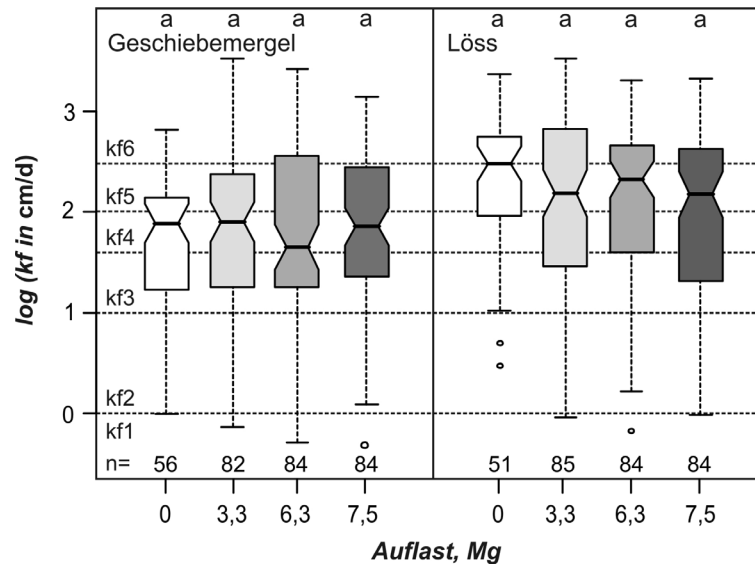


Abbildung 43: Mittlere Veränderung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (cm/d) durch einmalige mechanische Belastung unter Berücksichtigung der verschiedenen Ausgangssubstrate (n= siehe Abb.; kf nach AD-hoc-AGBoden (2005))

Auf Seiten der Geschiebemergelstandorte ist mit differenzierter horizontspezifischer Betrachtung (Abbildung 44) eine signifikante Abnahme der kf-Werte mit zunehmender Radlast lediglich in der Beprobungstiefe 40cm wiederzufinden. Die hydraulische Leitfähigkeit dieses Horizontes wird durch die externe Belastung mit 7,5Mg bis zu ca. 20% reduziert. Ober- und Unterbodenhorizonte des Geschiebemergels zeigen keine eindeutige Beeinflussung der Leitfähigkeit durch den Versuchsfaktor Radlast. Die Möglichkeit, dass die Belastungseffekte im Geschiebemergel von der räumlichen Substratheterogenität überlagert sind, ist auch bei diesen Untersuchungen gegeben.

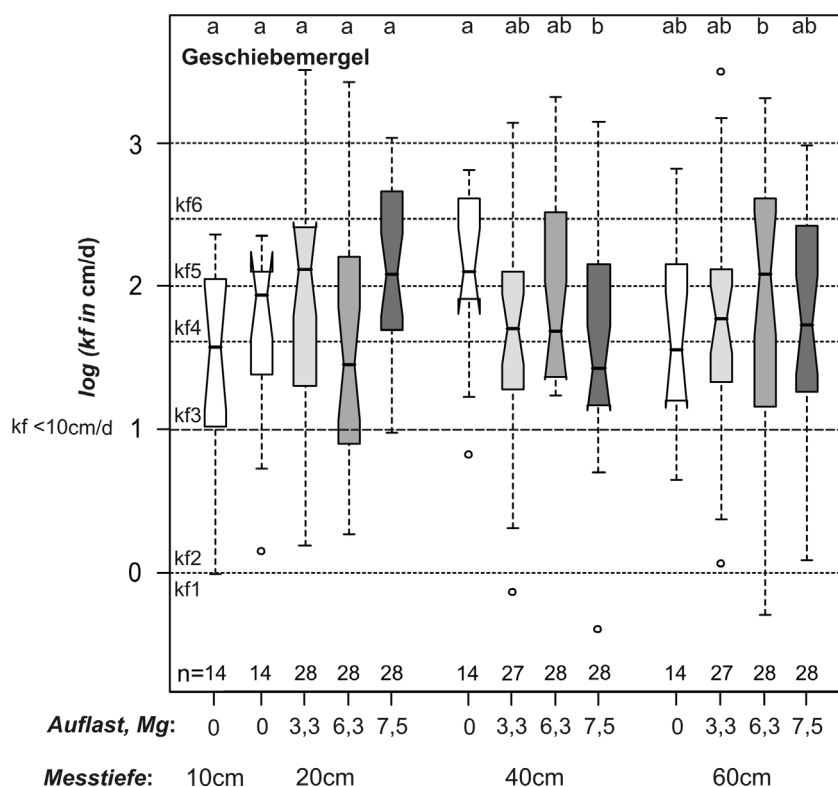


Abbildung 44: Horizontspezifische mittlere Veränderung der vertikalen gesättigten Wasserleitfähigkeit (cm/d) des Ausgangssubstrates Geschiebemergel durch einmalige mechanische Belastung (n= siehe Abb.; kf nach AD-hoc-AGBoden (2005), Schadschwellenwert kf nach UBA (2004a))

Die Lössstandorte (Abbildung 45) weisen in den beiden ersten Beprobungstiefen in 20cm und 40cm ebenfalls Abnahmen der Leitfähigkeiten auf und zeigen gerade im Oberbodenhorizont noch weitaus deutlichere Beeinträchtigungen als sie unter gemittelter Betrachtung (Abbildung 43) festgestellt wurden. Der Oberboden zeigt in den mit 7,5Mg belasteten Fahrspuren nahezu eine Halbierung der Leitfähigkeit gegenüber dem Ausgangszustand. Beide Schwerlastvarianten reduzieren die kf-Werte in diesem Horizont signifikant nahe, bzw. unter den Schadschwellenwert von 10cm/d was einer schädlichen Bodenverdichtung entspräche. Der erste Unterbodenhorizont in 40cm Tiefe wird ebenso beeinträchtigt und weist tendenzielle Abnahmen auf. Hier wird die Leitfähigkeit durch die Belastungen auf bis zu 11% gegenüber dem Ausgangszustand reduziert. Der Unterbodenhorizont in 60cm Tiefe zeigt, unabhängig vom Ausgangssubstrat und der mechanischen Belastung, keine tendenziellen oder signifikant messbaren Beeinträchtigungen der hydraulischen Leitfähigkeit auf.

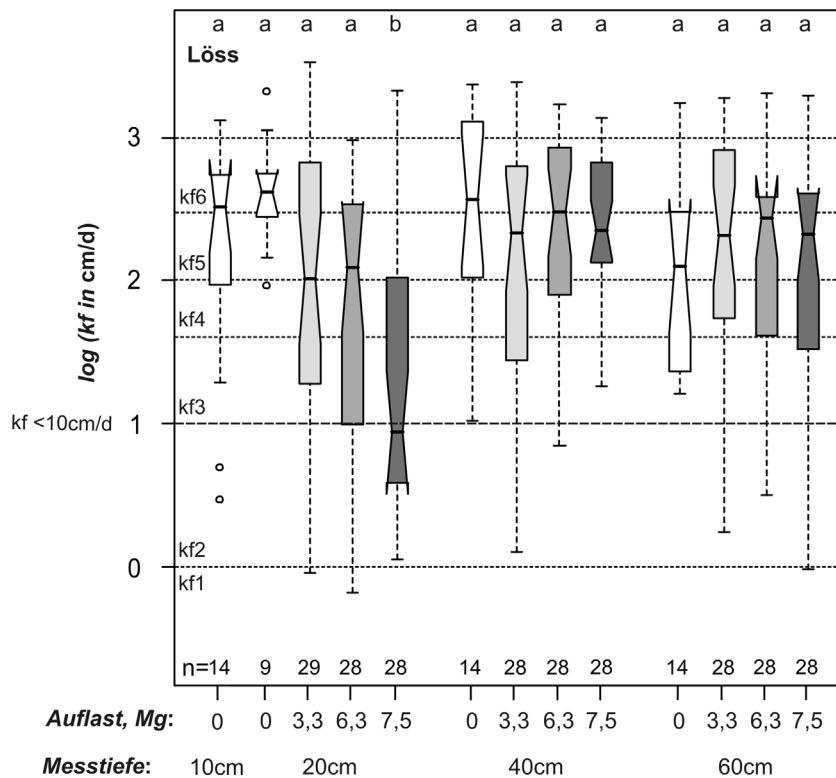


Abbildung 45: Horizontspezifische mittlere Veränderung der vertikalen gesättigten Wasserleitfähigkeit (cm/d) des Ausgangssubstrates Löss durch einmalige mechanische Belastung (n= siehe Abb.; kf nach AD-hoc-AGBoden (2005); Schadschwellenwert kf nach UBA (2004a))

### 3.5.4.2 Infiltrationsmessungen

Der Vergleich der horizontspezifischen hydraulischen Eigenschaften mit unterschiedlichen Labor- (Haubenpermeameter) und Feldmessverfahren (Guelphinfiltrrometer und Haubeninfiltrrometer) zeigt auf beiden Versuchsf lächen, unter belasteten wie unbelasteten Bedingungen, die höchsten Leitfähigkeiten für das Labormessverfahren mit dem Haubenpermeameter auf (Abbildung 46 und Abbildung 47). Während die mit dem Haubeninfiltrrometer und Haubenpermeameter ermittelten horizontspezifischen kf-Werte (gesättigte Wasserleitfähigkeit) unter belasteten wie unbelasteten Bedingungen relativ nahe beisammen liegen, zeigen die Infiltrationsmessungen mit dem Guelphinfiltrrometer in allen Gegenüberstellungen deutlich geringere feldgesättigte Leitfähigkeiten auf (bis zu 3 Zehnerpotenzen).

Die Beeinträchtigungen der externen Belastung auf die hydraulischen Eigenschaften des konservierend bewirtschafteten Schlages in NRW (Abbildung 46), lassen sich durch Abnahmen der Leitfähigkeit mit allen drei Messverfahren im Bereich der belasteten Fahrspuren ausweisen. Skaleninvariant betragen die mit dem Guelphinfiltrrometer ermittelten Abnahmen durch Belastung im Oberboden (20cm) 76%, der Haubeninfiltrationsversuch zeigt 79% Abnahme und das Labormessverfahren sogar 95%ige Reduzierung der Ausgangsbedingungen. Im nahen Unterboden in 40cm Tiefe werden mit dem Guelphinfiltrrometer Abnahmen um 78% und mittels Haubeninfiltrrometer 85% festgestellt. Im

Laborversuch wurde in dieser Tiefe für die Belastung mit 6,3Mg eine 70%ige Reduzierung festgestellt, wogegen für die Schwerlastvariante mit 7,5Mg keine Beeinträchtigung der Leitfähigkeit ausgewiesen werden konnte.

Für die im Labor ermittelte vertikale gesättigte Wasserleitfähigkeit entspricht die Abnahme im Oberboden einer Reduzierung von sehr hohen zu geringen Leitfähigkeiten. Die beiden Unterbodenhorizonte bleiben bei der Einstufung der Leitfähigkeit trotz der registrierten Abnahme im nahen Unterboden bei der Belastung mit 6,3Mg im sehr hohen Bereich. Die Untersuchungen mit dem Haubeninfiltrrometer zeigen im Oberboden eine Beeinflussung und Reduzierung der ehemals als hoch zu bewertenden Leitfähigkeit zu mittlerer Leitfähigkeit. Messungen im nahen Unterboden weisen eine Abnahme von ehemals sehr hoher zu mittlerer Leitfähigkeit auf. Das Guelphinfiltrrometer misst von vorn herein geringe feldgesättigte Leitfähigkeiten unterhalb bzw. knapp über dem Schadschwellenwert von 10cm/d, die durch die Belastungsversuche z. T. im nahen Unterboden in den sehr geringen Bereich reduziert werden. Die Unterbodenhorizonte in 60cm Tiefe scheinen unbeeinflusst und zeigen mit keinem Messverfahren einheitliche Tendenzen auf.

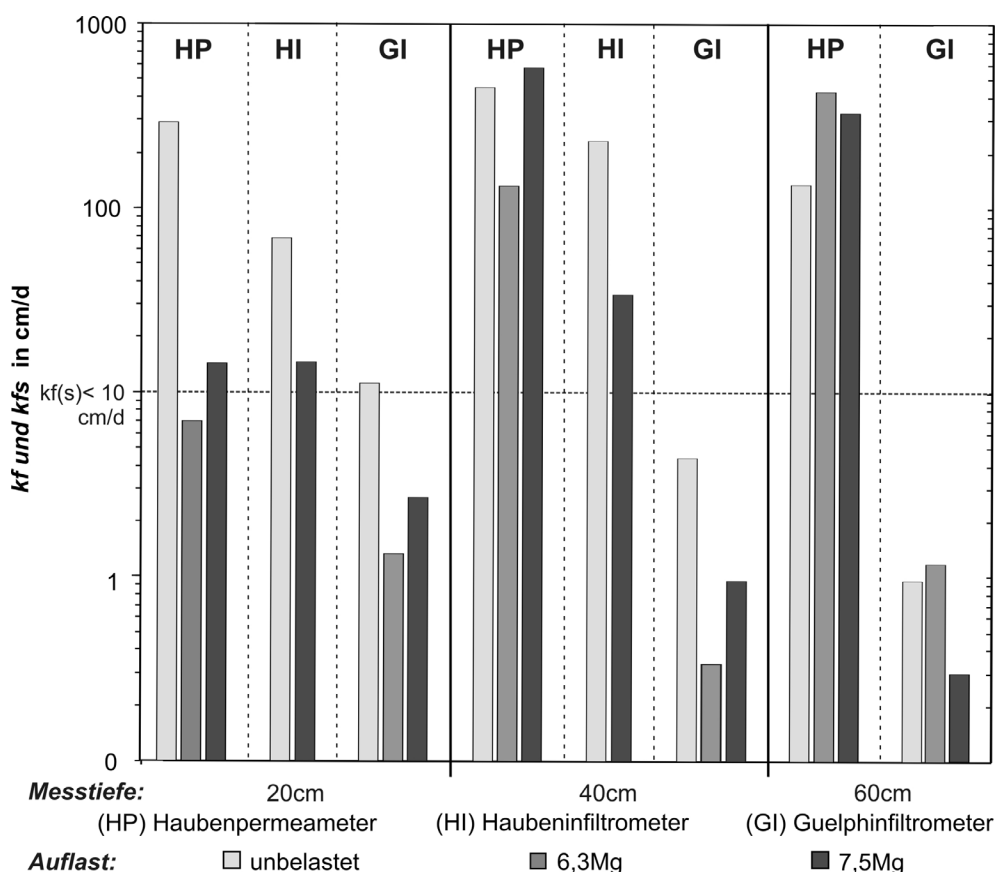


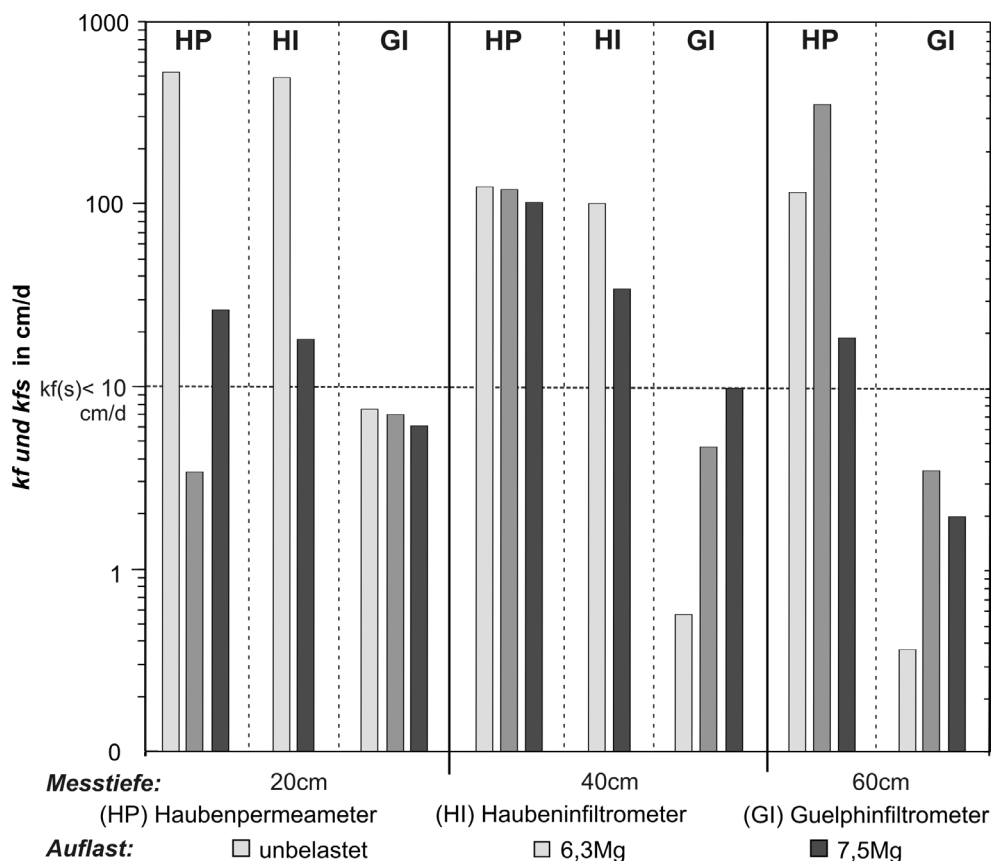
Abbildung 46: Veränderung der hydraulischen Eigenschaften der konservierend bewirtschafteten Fläche in NRW durch mechanische Belastung im Vergleich verschiedener Labor- und Feldmessverfahren ( $n(\text{Haubenpermeameter})=7$ ;  $n(\text{Haubeninfiltrrometer und Guelphinfiltrrometer})=2$ ; Schadschwellenwert  $k_{fs}$  ( $k_f$ ) nach UBA (2004a))

Die hydraulischen Eigenschaften des konventionell bewirtschafteten Schlages in NRW (Abbildung 47) zeigen ebenfalls Beeinträchtigungen durch die externen Belastungen auf. Mit allen drei Messverfahren lassen sich auf dieser Fläche Abnahmen der Leitfähigkeit im Oberbodenbereich der belasteten Fahrspuren ausweisen. Skaleninvariant betragen die mit dem Guelphinfiltrimeter ermittelten Abnahmen durch Belastung im gepflügten Oberboden 7-19%, der Haubeninfiltrationsversuch zeigt demgegenüber eine 96% und das Labormessverfahren sogar 99%ige Reduzierung der Ausgangsbedingungen. Im nahen Unterboden in 40cm Tiefe werden mit dem Guelphinfiltrimeter Zunahmen der Leitfähigkeit ermittelt, wogegen Haubeninfiltrimeter und Laborversuch Abnahmen um 85% bzw. 4-19% feststellen.

Im Laborversuch entspricht die Abnahme im Oberboden einer Reduzierung vom extrem hohen geringen Leitfähigkeiten. Der nahe Unterboden bleibt trotz der registrierten Abnahme durch die Belastung im sehr hohen Bereich. Im tieferen Unterboden konnte durch die Belastung mit 7,5Mg eine Abnahme aus dem hohen in den mittleren Bereich festgestellt werden. Die Untersuchungen mit dem Haubeninfiltrimeter zeigen im Oberboden eine Beeinflussung und Reduzierung der ehemals als extrem hoch zu bewertenden Leitfähigkeit zu mittlerer Leitfähigkeit. Messungen im nahen Unterboden weisen eine Abnahme von ehemals sehr hoher zu mittlerer Leitfähigkeit auf. Im nahen Unterboden lassen sich mit den Haubeninfiltrimetermessungen Abnahmen von ehemals hoher zu mittlerer feldgesättigter Leitfähigkeit feststellen.

Das Guelphinfiltrimeter misst auch unter konventionelle Bodenbearbeitung ausschließlich geringe Leitfähigkeiten unterhalb des Schadschwellenwertes von 10cm/d, die durch die Belastungsversuche z. T. im Oberboden geringfügig vermindert werden. Die Untersuchungen der Unterbodenhorizonte mit diesem Messsystem, gerade des nahen Unterbodens, zeigen mit zunehmender Belastung zunehmende Leitfähigkeiten und damit widersprüchliche Ergebnisse zu einem Großteil aller anderen Messungen auf.





**Abbildung 47:** Veränderung der hydraulischen Eigenschaften der konventionell bewirtschafteten Fläche in NRW durch mechanische Belastung im Vergleich verschiedener Labor- und Feldmessverfahren ( $n(\text{Haubenpermeameter})=7$ ;  $n(\text{Haubeninfiltrometer und Guelphinfiltrometer})=2$ ; Schadschwellenwert  $k_{fs}$  ( $k_f$ ) nach UBA (2004a))

### 3.5.5 Auflastabhängige Einordnung der Gefügeveränderung nach Indikatorsystem (einmalige Befahrung)

#### 3.5.5.1 Geschiebemergelstandorte, SH

Die Abbildung 48 zeigt für den Ausgangszustand der Geschiebemergelstandorte, in halblogarithmischer Gegenüberstellung, eine deutliche Heterogenität der beiden untersuchten Parameter gesättigte Wasserleitfähigkeit (cm/d) und Luftkapazität (Vol%).

Für die unbelasteten Leitprofile wurden Einzelmesswerte der Luftkapazität zwischen 1 bis 19Vol% ermittelt die, wie die schluffigen Ausgangssubstrate in NRW, im mittel bis gering zu klassifizierenden Bereich einzuordnen sind. Die ermittelten gesättigten Wasserleitfähigkeiten in den Leitprofilen erreichen Werte von 0,2 bis 3380cm/d, die sich über die gesamte Bandbreite der  $k_f$ -Klassen ausdehnen. Ist die naturgegebene Schwankung der Messwerte im Löss hauptsächlich auf die  $k_f$ -Werte beschränkt und weist dabei eine homogene Verteilung und Beeinträchtigung der Luftkapazitäten durch die Belastung auf (Abbildung 49), zeigt die kleinräumige Substratheterogenität im Geschiebemergel diese Schwankung der Messwerte auch im Bereich der Luftkapazitäten.

Hinsichtlich des von Lebert et al. (2004) vorgestellten Indikatorsystems mit Schadschwellenwerten, die als gestrichelte Linien in das Diagramm eingezeichnet sind, lässt sich anhand der beprobten Horizonte nur schwer eine auflastabhängige Beeinflussung bzw. Schadverdichtung der beiden untersuchten Bodenkennwerte ableiten. Die schon angesprochene kleinräumig variierende Heterogenität des Bodenausgangssubstrates und die damit stark variierenden Ausgangsbedingungen und Materialeigenschaften der einzelnen Beprobungshorizonte in den Fahrspurprofilen, lässt eine bewertende Betrachtung der Beeinträchtigung des Porensystems und der Bodenfunktion gegenüber den einzelnen mechanischen Belastungen anhand dieser beiden Indikatoren nicht zu.

Beachtet man allein den Gefügestand der Fahrspuren zeigt sich auch im Geschiebemergel ein größerer Anteil bereits vorhandener bzw. durch die Belastung beeinträchtigter Bodenfunktionskennwerte. Über alle beprobten Fahrspuren zeigen ca. 30% der Messungen Werte unterhalb des Schadschwellenwertes  $k_f < 10 \text{ cm/d}$  und damit eine Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit. Hinsichtlich der Luftkapazität sind ca. 50% der Messwerte aller Beprobungshorizonte in den Fahrspuren unterhalb des Grenzwertes von 5 Vol%. Ein Unterschreiten beider Schadschwellenwerte wurde bei 9% aller Messungen in den Fahrspuren festgestellt.

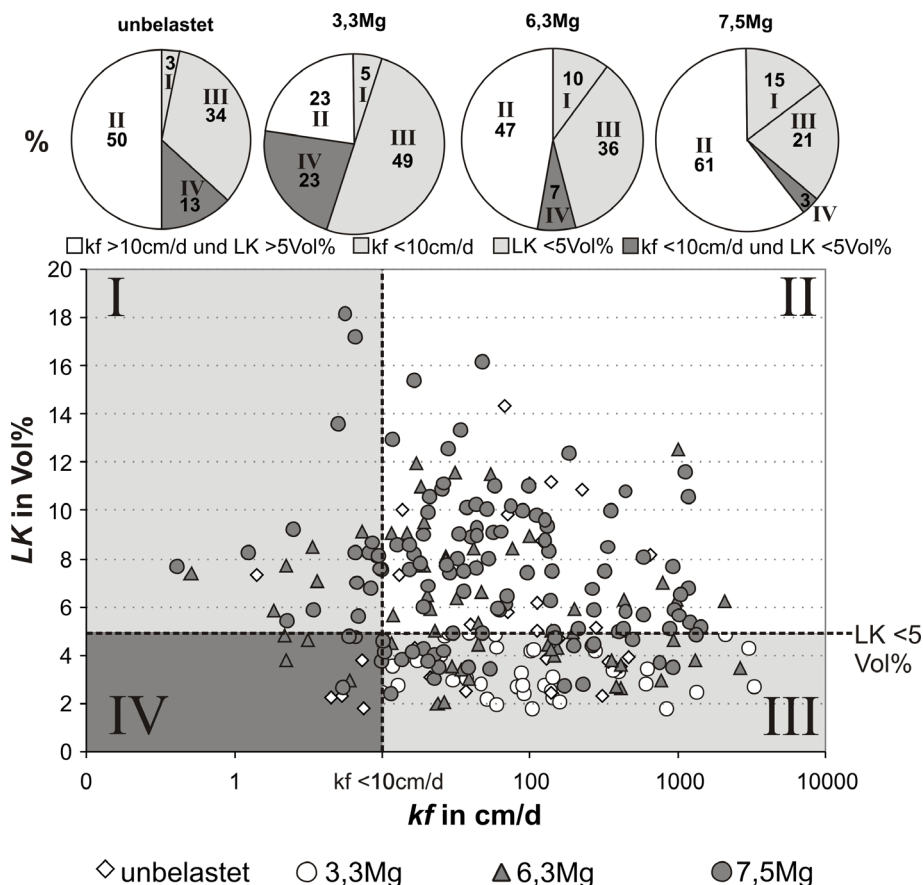


Abbildung 48: Veränderung der Luftkapazität und gesättigten Wasserleitfähigkeit des Standortes SH in Bezug auf kritische Schadschwellenwerte nach UBA (2004a) unter Berücksichtigung unterschiedlicher mechanischer Auflasten, (n=285)

### 3.5.5.2 Lössstandorte, NRW

Die Darstellung der Einzelmesswerte der beiden untersuchten Parameter gesättigte Wasserleitfähigkeit (cm/d) und Luftkapazität (Vol%) auf den Lössstandorten in NRW (Abbildung 49) verdeutlicht, trotz gleicher Bodenartenhauptgruppe, starke Schwankungen dieser Bodenfunktionskennwerte. Im Ausgangszustand treten in den beprobten Horizonten, je nach Bodenbearbeitungssystem, Luftkapazitäten zwischen 4 und 24Vol% auf, die kf-Werte reichen von 3 bis 3370cm/d. 65% aller Messwerte liegen in unbefahrenem Zustand der Flächen oberhalb der beiden Schadschwellenwerte im Bereich der Klasse II. Ca. 35% der Messwerte sind auch in unbefahrenem Zustand unterhalb der Grenzwerte (Klasse III u. I) einzuordnen. Allgemein konzentrieren sich die ermittelten Luftkapazitäten auch im Ausgangszustand im Bereich nahe über dem Schadschwellenwert und lassen sich als mittel bis gering klassifizieren.

Mit zunehmender Belastung kommt es zu Veränderungen der einzelnen Klassenanteile. Der Anteil unbeeinträchtigter Proben oberhalb beider Schadschwellenwerte (Klasse II) nimmt von 65% im Ausgangszustand mit zunehmender Auflast auf 12% in der Fahrspur der 7,5Mg Radlastvariante ab. Im gleichen Zug nehmen die Anteile der Klassen I, III und IV zu, wobei Messwerte die beide Schwellenwerte unterschreiten überhaupt erst in den belasteten Fahrspuren auftreten. Der Anteil der Untersuchungen in dieser Klasse IV nimmt von 7% mit der Radlast 3,3Mg auf 18% mit der Radlast 7,5Mg zu. Vergleicht man die Veränderungen der Luftkapazität und der gesättigten Wasserleitfähigkeit (Klassen I und III) hinsichtlich der zunehmenden mechanischen Belastung, zeigt sich in der Zunahme des Anteils der Klasse III (+35%) eine deutlichere Beeinflussung des Bodenfunktionskennwertes Luftkapazität. Der Indikatorwert der gesättigten Wasserleitfähigkeit reagiert dagegen mit einer Zunahme von 5% (3,3Mg) auf 7% (7,5Mg) weniger sensibel auf die kurzfristige mechanische Belastung.

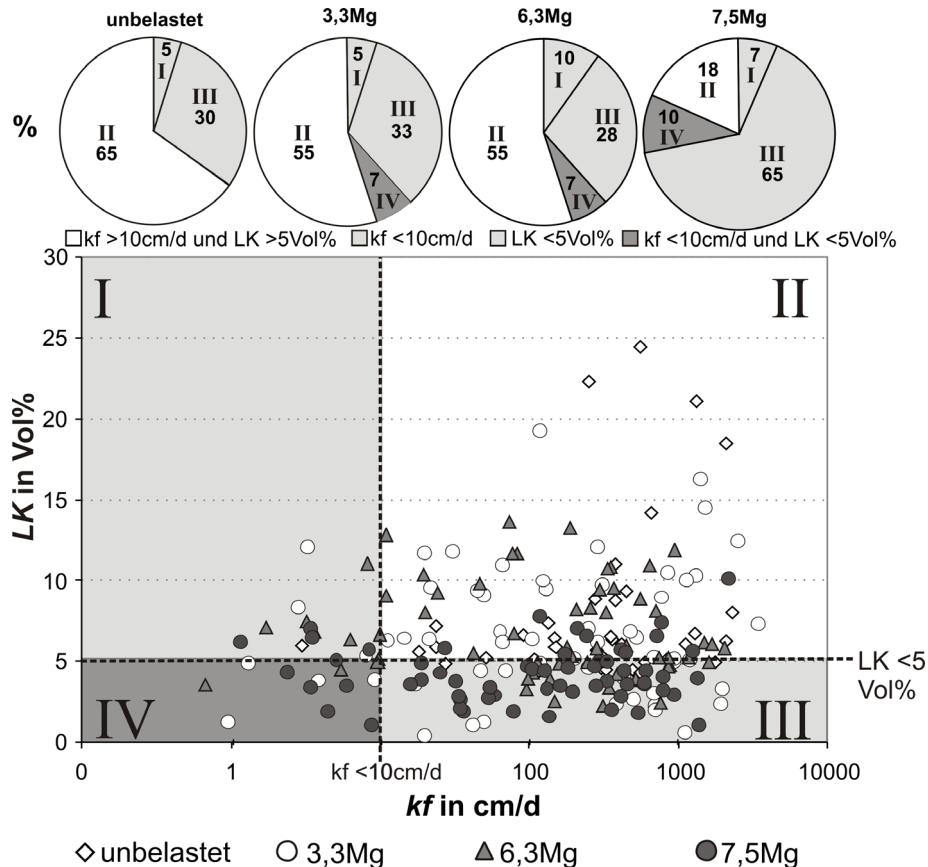


Abbildung 49: Veränderung der Luftkapazität und gesättigten Wasserleitfähigkeit des Standortes NRW in Bezug auf kritische Schadschwellenwerte nach UBA (2004a) unter Berücksichtigung unterschiedlicher mechanischer Auflasten, (n=279)

Auch bei der Betrachtung der einzelnen Beprobungshorizonte der beiden Versuchsflächen in NRW (Abbildung 50) zeigt sich die Abnahme der Klassenanteile II mit gleichzeitiger Zunahme der Anteile der Klassen I, III und IV. Im Oberboden ist eine deutliche Beeinflussung der kf-Werte erkennbar, die Unterbodenhorizonte zeigen dagegen ausschließlich Veränderungen der schon natürlichen geringeren Luftkapazität an. In dieser Bodentiefe (60cm) der natürlich verdichteten Bt- Horizonte, liegen schon für den unbelasteten Fall 50% der Werte unterhalb der Schadschwelle. Dieses sensible Gleichgewicht wird, gerade durch die Schwerlastversuche, mit einer Abnahme der Klasse II von 50 auf 8%, massiv beeinträchtigt. Die horizontspezifische Betrachtung ermöglicht zudem, für die untersuchte Bodenartenhauptgruppe der Schluffe, Unterschiede der Sensibilität der einzelnen Indikatorwerte festzustellen. Für eine Bewertung mechanischer Belastungen im Hinblick auf Gefügeschädigung im Oberboden zeigt sich eher die gesättigte Wasserleitfähigkeit als geeigneter Indikatorwert. Die Schadverdichtungsgefahr des Unterbodens gegenüber dynamisch mechanischer Kurzzeitbelastung lässt sich für dieses Bodenausgangssubstrat eher am Indikatorwert der Luftkapazität ableiten, hier scheinen kf-Werte oder die Porenkontinuität weniger beeinflusst zu sein, bzw. die Schädigung des Gefüges nicht anzuzeigen.

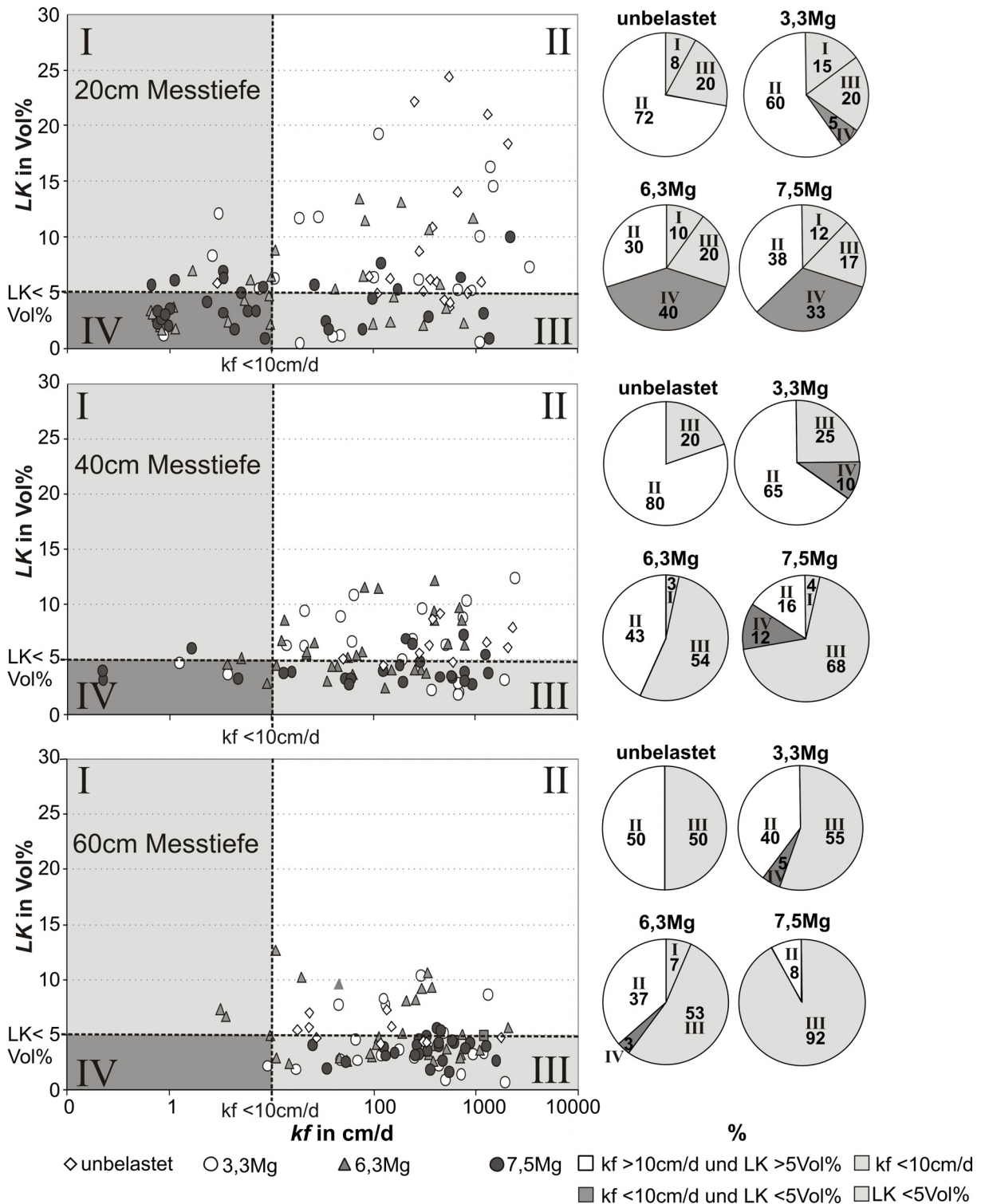


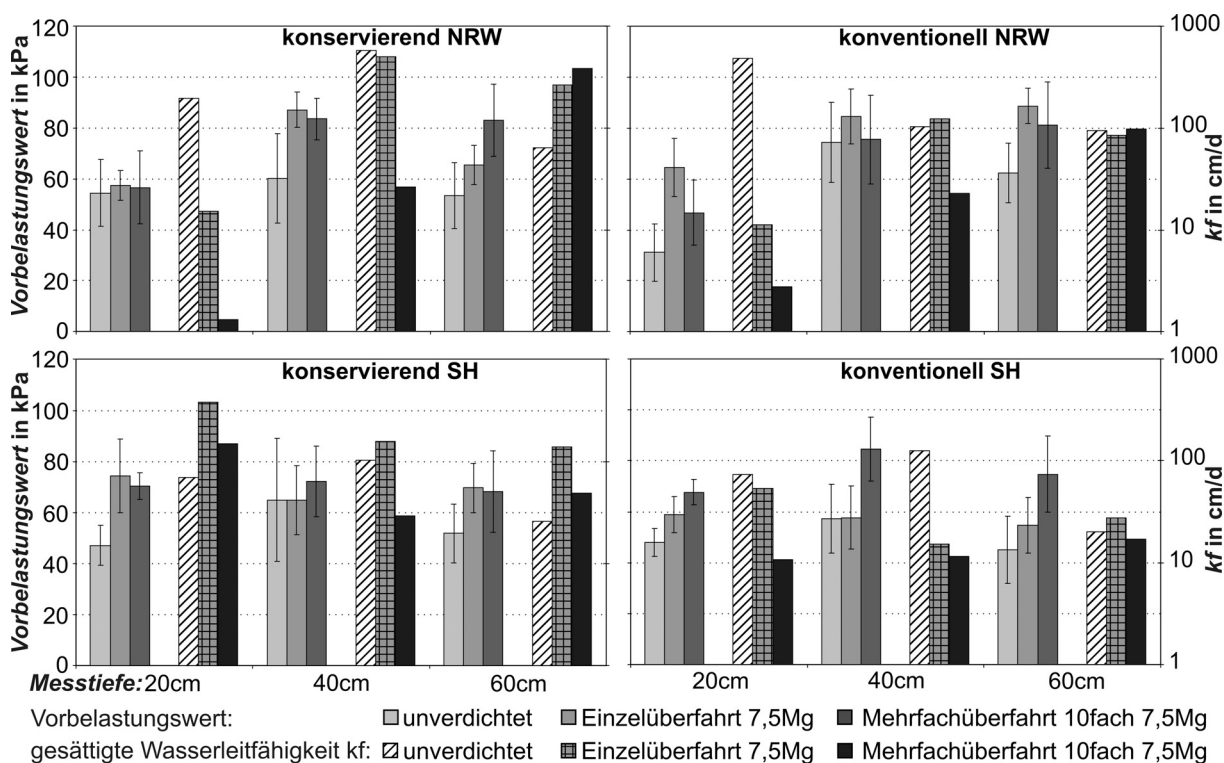
Abbildung 50: Horzontspezifische Veränderung der Luftkapazität und gesättigten Wasserleitfähigkeit des Standortes NRW in Bezug auf kritische Schadschwellenwerte nach UBA (2004a) unter Berücksichtigung unterschiedlicher mechanischer Auflasten, (n=93)

### 3.5.6 Auflastabhängige Veränderung der Bodenstabilität und -leitfähigkeit unter mehrfacher Befahrung

Um die Auswirkungen sehr hoher Radlasten im Bereich häufig befahrener Feldareale wie z.B. dem Vorgewende und Feldauffahrten zu untersuchen, wurden auf allen Versuchstandorten 10fach Überfahrungsversuche durchgeführt.

Die Ergebnisse der Vorbelastungsmessungen unter einfacher und 10facher Überrollung zeigen in den belasteten Fahrspuren einen Anstieg der horizontspezifischen Vorbelastung gegenüber dem Ausgangszustand des Bodens (Abbildung 51) (vgl. auch Kap. 3.5.1). Die mehrfachen Belastungen zeigen horizontspezifisch betrachtet unterschiedliche Entwicklungen der Vorbelastung auf. Im Oberboden treten mit zunehmender Überfahrungshäufigkeit und wiederholter Knetung des Bodens Tendenzen leichter Abnahmen des Vorbelastungswertes im Vergleich zur vorherigen Zunahme durch einfache Befahrung auf. Auf den Lössstandorten ist dieses Phänomen auch in den nahen Unterbodenhorizonten wiederzufinden. Der nahe Unterboden der Geschiebemergelstandorte zeigt dagegen weitere Zunahmen der Vorbelastung nach 10maliger Überrollung. In 60cm Tiefe ist durch die Belastung mit 7,5Mg ebenfalls eine Zunahme des Vorbelastungswertes erkennbar, d.h. abnehmende Stabilität mit zunehmender Überrollung tritt unabhängig vom Ausgangsmaterial auch in diesem Messhorizont wieder auf. Der Vergleich der beiden Bodenbearbeitungssysteme zeigt in keinem der beiden Bodenausgangssubstrate einheitliche Veränderungen des Bodenstabilitätsparameters auf. Die maximale Gesamtzunahme zum Ausgangszustand des Bodens wird durch die wiederholten Kompressionen mit 30kPa im Unterbodenhorizont der konventionell bearbeiteten Fläche in SH erreicht. Speziell durch die Belastungsgeschichte verdichtete, bereits verfestigte Horizonte, wie der konservierend bewirtschaftete Oberboden (Unterkrume) in NRW oder der ehem. Pflugsohlenbereich der Geschiebemergelflächen, zeigen selbst wenig Veränderung bzw. erst bei 10facher Belastung eine Zunahme ihres Vorbelastungswertes. Jedoch scheinen diese Horizonte trotz eigener Steifigkeit durchaus die eingetragenen Spannungen über translatorische Bewegung an unterliegende Horizonte weiterzureichen.

Die Untersuchungen der vertikalen gesättigten Leitfähigkeit zeigen homogenere und deutlichere Ergebnisse hinsichtlich der Beeinflussung der Porenkontinuität gegenüber mehrfachen Befahrung auf. Wie schon in Kap.3.5.4.1 für die Einzelbelastungen vorgestellt, kommt es durch die externe Belastung des Bodens zu einer Abnahme der Leitfähigkeiten in den beiden oberen Beprobungstiefen. Der Einfluss der mechanischen Belastung mit ansteigender Überfahrungshäufigkeit nimmt hierbei additiv zu und zeigt sich als weitere Abnahme der Leitfähigkeit. Drei der vier Versuchstandorte (Ausnahme Hohenschulen, SH konservierend) weisen schon durch die einmalige Befahrung mit 7,5Mg im Bearbeitungshorizont Abnahmen der vertikalen Wasserleitfähigkeit zwischen 27-97% auf. Die 10fache Überfahrung des Bodens macht sich auf diesen Versuchstandorten mit weiteren eindeutigen Abnahmen der Leitfähigkeiten bemerkbar. Die Lössstandorte zeigen im Bearbeitungshorizont mit 10facher Befahrung signifikante Abnahmen um 99% zum Ausgangszustand.



**Abbildung 51:** Veränderung der vertikalen gesättigten Wasserleitfähigkeit (cm/d) (geometrisches Mittel;  $n=7$ ) und des Bodenstabilitätsparameters  $P_v$  (kPa) (arith. Mittel, SD,  $n=6$ ) durch einfache und mehrfache mechanische Belastung mit 7,5Mg Radlast und 3,5 bar Reifendruck

Die konventionell bearbeitete Fläche in SH reagiert auf die mehrfachen Belastungen mit Abnahmen um 85%. Im darauf folgenden nahen Unterbodenhorizont bewegt sich die Reduzierung des  $k_f$ - Wertes durch die zehnmahlige Belastung zwischen 71-95%. Die Beeinträchtigung der Leitfähigkeiten scheint unabhängig vom Bewirtschaftungssystem zu sein. Bezüglich der Bodenausgangssubstrate scheint das Porensystem der Lössböden, gerade im Oberboden, empfindlicher gegenüber mechanischer Komprimierung zu reagieren. Im Unterboden (60cm) konnten auch durch 10malige Belastung mit 7,5Mg auf keiner Versuchsfläche eindeutige Beeinflussungen des  $k_f$ - Wertes verzeichnet werden.

Abbildung 52 zeigt die Veränderungen der Vorbelastung und der gesättigten Wasserleitfähigkeit für die Geschiebemergelstandorte mit 10facher Belastung im Vergleich der Radlasten 3,3 und 7,5Mg. Die 10fachen Überrollhäufigkeiten zeigen auch unter leichten Radlasten (3,3Mg) additive Belastungseffekte mit teilweise signifikanten Zunahmen des Vorbelastungswertes bis in 60cm Tiefe. Die auflastabhängige Beeinflussung der gesättigten Wasserleitfähigkeit ist durch die gegebene Texturheterogenität in den mehrfach belasteten Fahrspuren beider Radlastvarianten nicht eindeutig zuzuordnen.

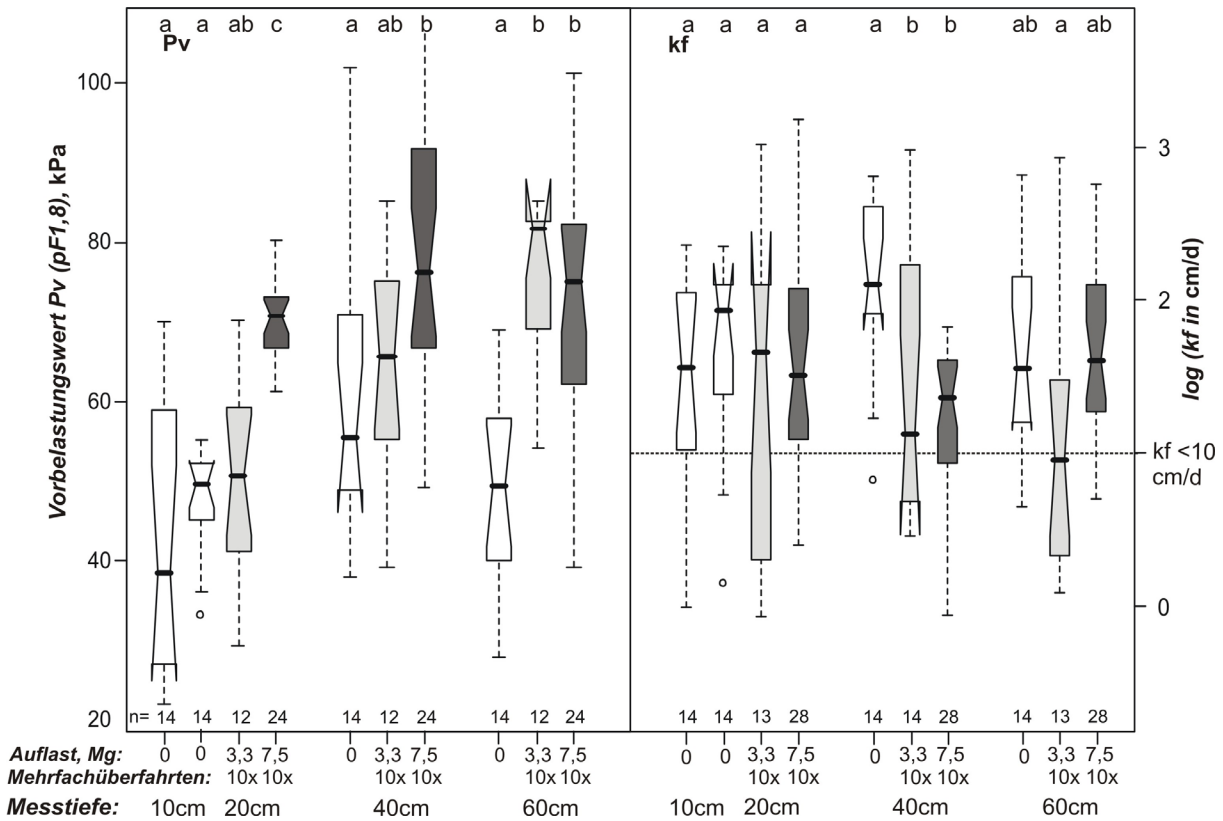


Abbildung 52: Horizontspezifische mittlere Veränderung der Vorbelastung (kPa) und der gesättigten Wasserleitfähigkeit (cm/d) des Ausgangssubstrates Geschiebemergel durch mehrfache mechanische Belastung bis 7,5Mg ( $n =$  siehe Abb.; Schadschwellenwert  $k_f$  nach UBA (2004a))

Die Lössstandorte (Abbildung 53) zeigen bezüglich 10facher Überrollhäufigkeiten auch für die Radlast mit 6,3Mg additive Verdichtungseffekte mit teilweise signifikanten Zunahmen des Vorbelastungswertes bis in 60cm Tiefe. Die auflastabhängige Beeinflussung der gesättigten Wasserleitfähigkeit durch mehrfache mechanische Belastung ist in diesem Ausgangssubstrat mit signifikanten Abnahmen bis unter den Schadschwellenwert  $k_f < 10$  cm/d deutlich bis in den nahen Unterboden (40cm) ausgeprägt. Mit zunehmender Radlast ist auch bei den kumulativen Verdichtungseffekten eine zunehmende Tiefenwirkung erkennbar.



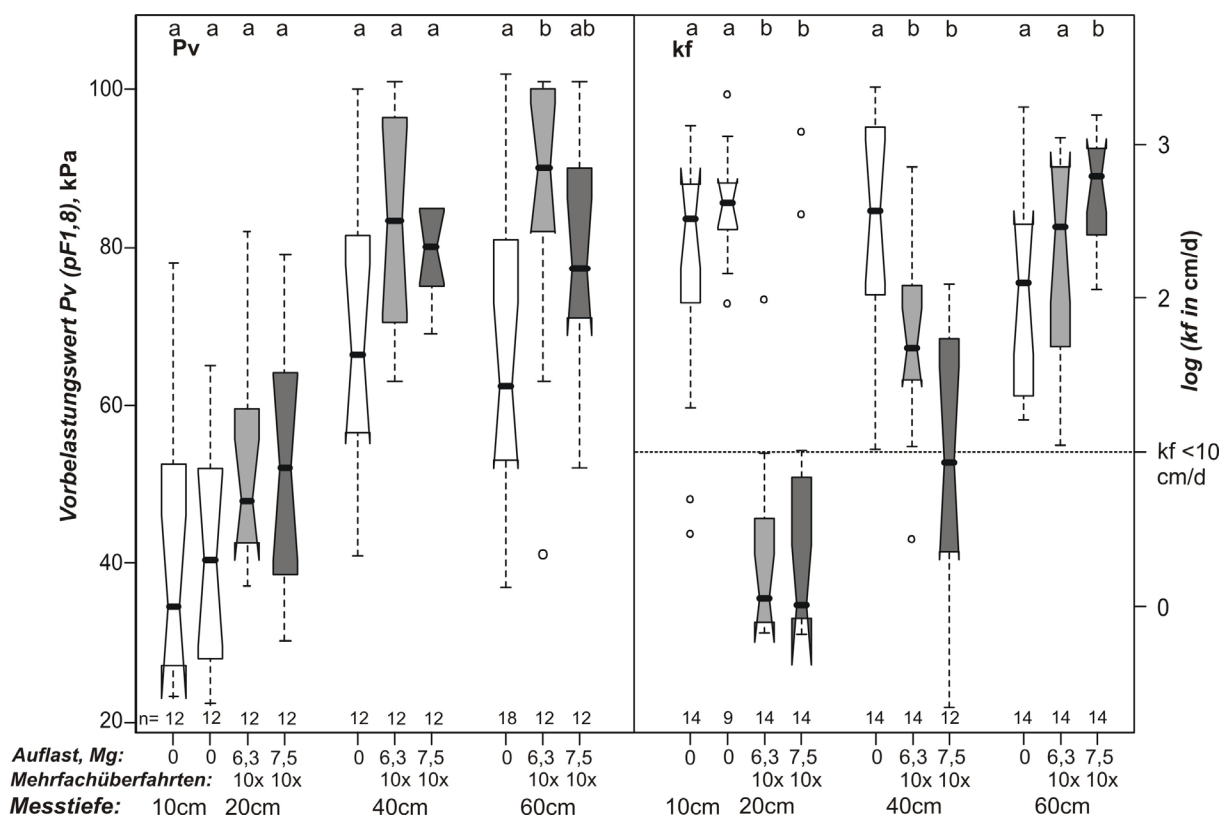


Abbildung 53: Horizontspezifische mittlere Veränderung der Vorbelastung (kPa) und der gesättigten Wasserleitfähigkeit (cm/d) des Ausgangssubstrates Löss durch mehrfache mechanische Belastung bis 7,5Mg ( $n =$  siehe Abb.; Schadschwellenwert  $k_f$  nach UBA (2004a))

### 3.5.7 Auflastabhängige Einordnung der Gefügeveränderung nach Indikatorsystem unter Berücksichtigung mehrfacher Befahrung

In Gegenüberstellung zu den Schadschwellenwerte des Indikatorsystems zeigen die Untersuchungen der Bodenfunktionskennwerte  $k_f$  und LK unter mehrfachen Belastungswiederholungen mit den Radlasten 6,3 und 7,5Mg für das Ausgangssubstrat Löss eine eindeutige Degradationsgefahr bis in den tieferen Unterboden (60cm) (Abbildung 54). Mit 10fachem Lasteintrag treten bis in 60cm Tiefe unter beiden Radlasten keine unbeeinträchtigten Messwerte oberhalb der Schadschwellenwerte (Klasse II) mehr auf. Der Indikatorwert der Luftkapazität scheint mit beinahe vollständiger Unterschreitung des Grenzwertes in Bezug auf alle Messungen insgesamt sensibler auf die mechanische Beanspruchung zu reagieren, wogegen die Beeinträchtigung der Porenkontinuität in Form des  $k_f$ -Wertes erst bei 10facher Belastung mit 7,5Mg stattfindet.

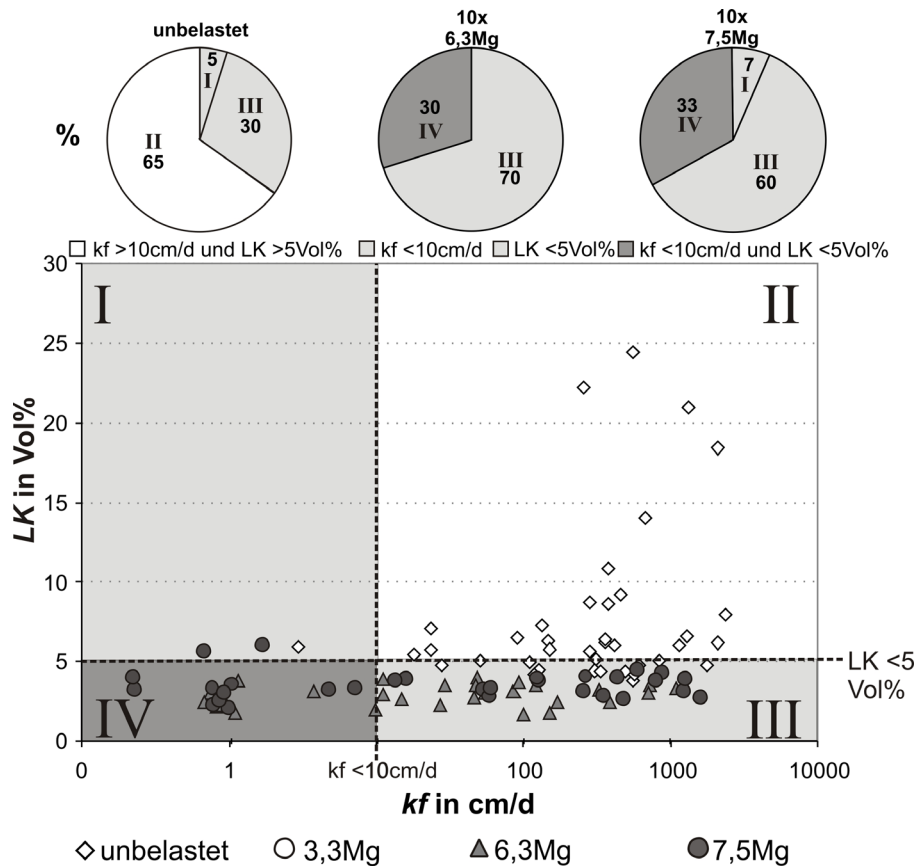


Abbildung 54: Veränderung der Luftkapazität und gesättigten Wasserleitfähigkeit des Standort NRW in Bezug auf kritische Schadschwellenwerte nach UBA (2004) unter Berücksichtigung mehrfacher mechanischer Belastung mit unterschiedlichen Radlasten, (n=40)

## 4 Diskussion

Ein Teilaspekt dieser Arbeit war der Vergleich unterschiedlicher technischer (externer) und pflanzenbaulicher (interner) bodenschonender Maßnahmen sowie der Effekt von Substratunterschieden bezüglich ihrer Auswirkung auf die Druckfortpflanzung technogener mechanischer Belastungen in der modernen landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion. Im Hinblick auf die Begrenzung der mechanischen Bodenbelastung, im Speziellen der Belastung des Unterbodens, wurden die Gesamtlast und der Reifeninnendruck als technische Maßnahmen, konventionell verwendete und konservierende Bodenbearbeitung als pflanzenbauliche Verfahren und die natürlichen Unterschiede des Bodenausgangssubstrates in zwei norddeutschen Bodenregionen (Jungmoränenlandschaft und Löss-Sandlösslandschaft) untersucht.

Die Quantifizierung der Auswirkungen der einzelnen Versuchsfaktoren auf die mechanische Bodenbeanspruchung bzw. bodenschonende Effekte erfolgte über Untersuchungen des Druck-Zeitsetzungsverhalten der Böden mit kombinierten Spannungs- und Deformationsmessungen in Feldversuchen.

### 4.1 Einfluss des Bodenausgangssubstrates auf die Druckfortpflanzung

Die vergleichende Betrachtung der unterschiedlichen Ausgangssubstrate (vgl. Kap.3.3.2.1) zeigt hinsichtlich gemittelter Spannungseinträge und der Druckfortpflanzung im Boden keine signifikanten Unterschiede auf. Auch in der horizontspezifischen Gegenüberstellung der drei Messtiefen treten keine signifikanten Unterschiede der gemittelten Spannungseinträge auf und die Spannungsreduktion in die Tiefe verläuft parallel. Aufgrund ähnlicher Stabilitätsparameter ( $P_v$ ,  $C$ ,  $\varphi$ ) und trotz höherer Lagerungsdichten auf Seiten der Geschiebemergelstandorte, scheint sich die Spannungsverteilung und Druckfortpflanzung der Ausgangsmaterialien nicht zu unterscheiden. Die Annahme, dass der bereits glazigen verdichtete Geschiebemergel gegenüber externer mechanischer Auflast belastbarer wäre, lässt sich anhand der ermittelten Bodenstabilitätskennwerte (vgl. Kap.3.1) und gemessenen Spannungseinträge nicht bestätigen. Auch Kühner (1997) misst die Druckfortpflanzung und Spannungseinträge in verschiedenen Ausgangssubstraten. Er vergleicht Spannungseinträge in Bodenmonolithen eines schwach lehmigen Sandes (SI4, Pseudogley-Kolluvisol) gegenüber denen einer Parabraunerde aus Löss (Ut2, Rollaggregate) in einer Bodenversuchsrinne und stellt ebenfalls keine texturbedingten Unterschiede der Spannungsfortpflanzung fest. Pytka (2005) misst Spannungseinträge von Mehrfachbefahrungen in sandigen und schluffigen Bodenarten und zeigt unter beiden Texturen vergleichbare Spannungsentwicklung und Gesamtspannungseinträge auf. Bodendruckmessungen von Horn et al. (1986), die auf unterschiedlich texturierten und strukturierten Standorten Süddeutschlands mit vergleichbaren bodenexternen Faktoren in verschiedenen Messtiefen durchgeführt wurden, zeigen bei vergleichbarem Kontaktflächendruck ebenfalls keine Differenzen der Spannungseinträge hinsichtlich variierender Bodentextur. Bei diesen Untersuchungen führt letztendlich ein deutlich erhöhter

Skelettanteil (>35%) zu Unterschieden in der Spannungsfortpflanzung in den tieferen Unterboden.

Der Vergleich der einzelnen Messtiefen zeigt höhere Varianzen der gemessenen Spannungseinträge im Ober- und nahen Unterboden der Geschiebemergelstandorte. Dieses größere Schwanken der Messwerte um den Median lässt sich insbesondere durch die Bodenartenheterogenität erklären. Nicht nur die Oberflächenbeschaffenheit und die Stabilitätseigenschaften des Oberbodens (effektive Stabilität unterschiedlicher Bodenfeuchtegehalte) haben entscheidenden Einfluss auf die Spannungsfortpflanzung im Boden (Horn et al., 1989; Horn et al., 1986; Fröhlich, 1934), auch die über diese Eigenschaften bestimmte Ausprägung der Kontaktfläche zwischen Reifen und Boden beeinflusst entscheidend den Spannungseintrag in den Boden (Lamandé et al., 2007; Raper, 2005; Horn, 2003; Way et al., 2000; Horn et al., 1986; Soane et al., 1980b).

## **4.2 Einfluss landtechnischer und pflanzenbaulicher Maßnahmen auf den mechanischen Spannungseintrag**

### **4.2.1 Bodenbearbeitung**

In Verbindung mit der Zielsetzung einer nachhaltigen, leistungsfähigen und zugleich umweltschonenden Landbewirtschaftung wird unter anderem auch der Bodenbearbeitung eine besondere Bedeutung zugesprochen. Aufgabe dieses Arbeitsverfahrens im Spannungsfeld zwischen Ökonomie und Ökologie ist nicht nur die Schaffung eines physikalisch günstigen Bodengefüges welches den Ansprüchen der Pflanzen gerecht wird, gleichzeitig sollte mit der richtigen Bearbeitung auch die Strukturstabilität des Oberbodens gegenüber mechanischen Belastungen erhöht, die Befahrbarkeit verbessert und somit die Verdichtungsempfindlichkeit der Böden reduziert werden. Ein günstiges Gefüge von Ackerböden ist nach Horn et al. (1995) durch eine stabile Ackerkrume, einen festen und leitfähigen Übergang von der Krume zum Unterboden und einen gut durchlüfteten Unterboden gekennzeichnet.

Der Vergleich der Bodenbearbeitungssysteme zeigt für die konservierende Bodenbearbeitung 17% geringeren mittleren Spannungseintrag für den Ober- und Unterboden trotz identischer Auflast. Die verminderten vertikalen Spannungseinträge, die auch bei in situ Spannungsmessungen von (Wiermann et al., 2000; Horn & Wiermann, 1999; Semmel, 1993) (ca.-20%) wiederzufinden sind, lassen vermuten, dass die Bodentragfähigkeit und das Druckkompensationsvermögen des Bodens unter konservierender Mulchsaat verbessert ist. Bodendruckmessungen der mittleren Normalspannung eines 6-reihigen Zuckerrübenrodgers von Brunotte et al. (2001) unter Berücksichtigung konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung in einer Löss-Schwarzerde in Südniedersachsen bestätigen diese z.T. signifikanten Unterschiede auch unter abweichenden Lastkombinationen und Anwendung eines anderen Messsystem (Bollingsonde) (Bolling, 1984). Gegensätzliches wird von SMUL (2005) berichtet, es stellt bei in situ Messungen der 1.Hauptspannung mit einem Rübenroder in Sachsen geringere Spannungseinträge in konventionell bearbeiteten Ober- und Unterböden fest, macht in

diesem Zusammenhang allerdings keine Angaben zum Spurbild und Unterschieden der Kontaktflächen bzw. Oberbodeneigenschaften (wie z.B. Wassergehaltsunterschiede).

Bodenschonende Effekte der konservierenden Bodenbearbeitung hinsichtlich der externen Spannungseinträge werden unter anderem von Sommer (1998) beschrieben. Er argumentiert allein mit dem Ansatz der höher liegenden Reifenkontaktfläche (Lastfläche des Spannungseintrages in den Boden), die gegenüber der konventionell wendenden Bearbeitung nicht mehr in der Tiefe der Krumbasis ansetzt und damit entscheidende Auswirkungen auf die Tiefenwirksamkeit des Spannungseintrages hat. Da bei den eigenen Befahrungsversuchen die Kontaktflächen zwischen Reifen und Boden unter beiden Bodenbearbeitungssystemen an der Bodenoberfläche und nicht wie bei der konventionellen Bodenbearbeitung üblich in der Pflugspur bzw. der Krumbasis lagen, lassen sich für die Grundbodenbearbeitung, hauptsächlich für den Unterboden, noch höhere Spannungseinträge für den Arbeitsgang der konventionellen Pflugarbeit und deutlichere Unterschiede zur konservierenden Bearbeitung annehmen als sie bereits gemessen wurden. Horn (1986) spricht dem konservierend bearbeiteten Oberboden, gerade im Wiederverdichtungsbereich, geringere lastabhängige Konzentrationsfaktoren und damit verminderte Druckfortpflanzung zu. Eine wichtige Bedeutung für die Eigenstabilität und Druckkompensation haben die Porengeometrie und der erhöhte Anteil vertikal ausgerichteter Bioporen unter konservierender Bodenbearbeitung. Ausschlaggebend hierfür ist der ungestörte Aggregierungsprozess der über wiederholtes Quellen und Schrumpfen zu einer Dichtlagerung der Partikel führt und über einen höheren wassersättigungsgradabhängigen  $\chi$  Faktor die effektive Spannung des Oberbodens erhöht.

Die Ergebnisse der eigenen Stabilitätsuntersuchungen (vgl. Kap. 3.1) zeigen, dass aus primärer Kompaktierung durch direktes Befahren und die unterlassene Störung der Strukturentwicklung sowie die damit einhergehende Regeneration des Bodengefüges im Unterkrumbereich, ein standfester humusreicher Befahrungshorizont mit erhöhter Lagerungsdichte und höheren Korn zu Korn Kontakten entstanden ist, der eine höhere interne Bodenstabilität aufweist. Dieser strukturierte, leitfähige sowie sehr stabile Oberbodenbereich mit geringen Konzentrationsfaktoren, der in der Spannungsverteilung mit größerem Ruhedruckbeiwert ( $k_0$ ) zu eher horizontaler Abstützung der vertikalen Last beiträgt, ist in der Lage mit erhöhten Scherwiderständen im Grenzbereich zwischen belastetem (Fahrspur) und unbelastetem Oberboden als Spannungsbarriere die Fortpflanzung der vertikalen Spannung in Richtung  $\sigma_z$  zu vermindern. Die ermittelte erhöhte Tragfähigkeit durch reduzierte Bodenbearbeitung wird in Veröffentlichungen von Brunotte (2007), Horn & Rostek (2000), Hartge & Horn (1999) und Petelkau et al. (1998) bestätigt. Diese Autoren fügen der Gefügestabilisierung und der damit verbesserten Befahrbarkeit des Weiteren noch positive schonende Effekte der Bodenfauna sowie eine erhöhte Leitfähigkeit durch den fehlenden schroffen Wechsel der Leitfähigkeitsparameter im Bereich der gepflügten Krume zur Krumbasis hinzu.

### 4.2.2 Auflast

Mit der anhaltenden Optimierung der Maschinenleistungsparameter durch zunehmende Arbeitsbreiten und Kombination von Arbeitsgängen und der Einführung dieser schlagkräftigen Maschinen in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion kam es, trotz der grundsätzlichen Tendenz eines engeren Masse-Leistungsverhältnisses, besonders im Bereich der Hackfruchterntemaschinen und Transportfahrzeuge in den letzten Jahrzehnten zu einem starken Anstieg der Achs- und Radlasten (Schulze Lammers et al., 2001). Die Verwendung dieser leistungsstärkeren und schwereren Maschinen ist durch die betriebswirtschaftliche Ausgliederung einzelner Arbeitsverfahren an spezialisierte Lohnunternehmen nicht mehr alleine auf Großbetriebe beschränkt. Mit dieser Entwicklung erlangt die Radlast einen vorrangigen Stellenwert im Bodenschutz, da durch zunehmende mechanische Belastung die Gefahr nachhaltiger Gefügeschädigung durch Unterbodenverdichtung hervorgerufen wird. Die definierten Reifen/Radlastkombinationen sollten dabei die aus wissenschaftlicher Sicht begründete Limitierung mechanischer Belastung zum Schutz des Bodens quantifizieren.

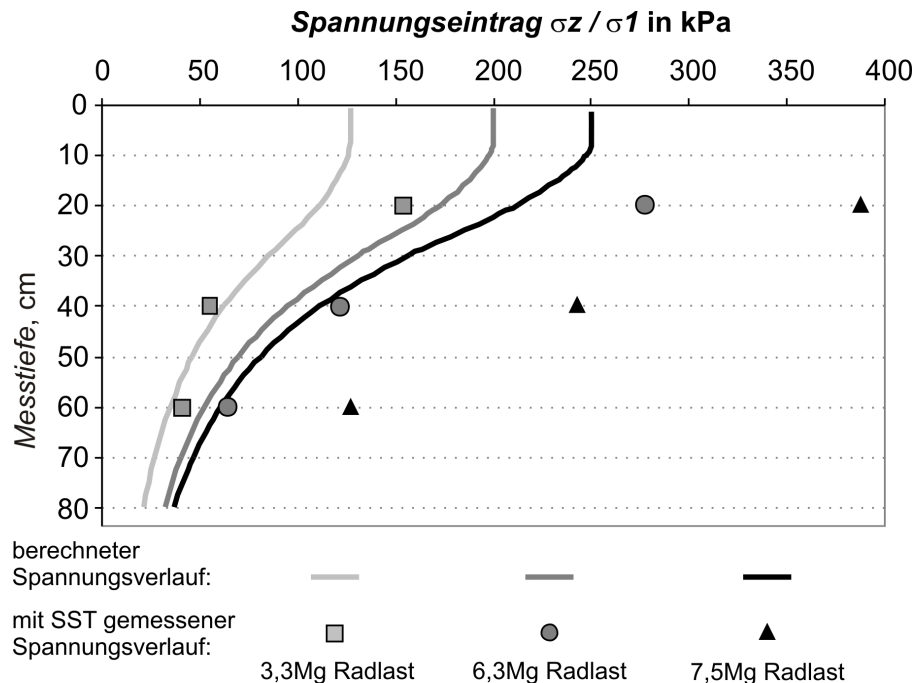
Hinsichtlich der gemessenen Spannungseinträge der simulierten Gesamtlasten zeichneten sich bei den durchgeführten Experimenten mit steigender Radlast und gleichbleibender Bereifung deutliche Zunahmen der eingetragenen Spannungen und eine größere Tiefenwirkung der Spannungsäquipotentiallinien ab. Durch Zunahme der vertikalen Gewichtskraft ( $\vec{G}$ ) und sich durch die Reifenverformung nur geringfügig ändernde Lastflächen (A) kommt es zu einer Zunahme des Kontaktflächendrucks (p) in der Berührebene zwischen Reifen und Boden. Diese auflastabhängige Zunahme des Kontaktflächendrucks ist bereits bekannt (Fazekas, 2005; Raper, 2005; Brunotte et al., 2001; Wood et al., 1991; Burt et al., 1989).

Die ermittelten Kontaktflächen und Kontaktflächendrucke der untersuchten Reifen/Radlastkombination lassen sich mit Ergebnissen von (Geischer & Demmel, 2006; Döll, 1999; Wiermann, 1998; Kühner, 1997; Raper et al., 1995; Tijink et al., 1995) vergleichen. Die mit dem SST-System gemessenen Hauptspannungseinträge und die Druckkompensation der gegebenen Randbedingungen korrelieren größenordnungsmäßig mit Ergebnissen anderer Messverfahren wie der Bollingsonde (Brunotte, 2007; Geischer & Demmel, 2006; Brümmer, 2001; Brunotte et al., 2001; Gysi et al., 1999; Bolling, 1984)), als auch mit Spannungseinträgen des gleichen Systems (Pytka, 2005; Vossbrink & Horn, 2004; Wiermann, 1998; Kühner, 1997; Bailey et al., 1995; Semmel, 1993). Stahl und Gierke (2001) zitiert in UBA (2004a) berichten von vergleichbaren Spannungseinträgen mit Radlasten um 3,5Mg, ihre gemessenen Spannungseinträge unter einem Mähdreschervorderrad mit 8,3Mg Radlast liegen mit ca. 280kPa in 20cm Messtiefe allerdings deutlich unter den eigenen Messwerten der 7,5Mg Variante. Auch das TLL (2008), Alakukku et al. (2003), Arvidsson et al. (2002) geben bei Messungen mit Einzelmessdosen unter vergleichbaren Lastsituationen Größenordnungen der 1.Hauptspannung an die mit den eigenen Ergebnissen vergleichbar sind.

Neben der Zunahme des Kontaktflächendrucks mit steigender Radlast ist gleichzeitig bekannt, dass mit zunehmender Lastfläche und gleichbleibendem Kontaktflächendruck die Tiefenwirkung der Verdichtungsimpulse ansteigt (Lamandé et al., 2007; Hakansson, 2005; Trautner & Arvidsson, 2003; Hartge & Horn, 1999). Eigene Untersuchungen zeigen dieses Phänomen in den Ergebnissen der Spannungsmessungen bei der Flächenvergrößerung mit abgesenktem Reifeninnendruck für die Radlastvariante 7,5Mg. Diese Zusammenhänge bestärken die Auffassung vom KTBL (1998), dass für die Bewertung der Belastung nicht der Kontaktflächendruck sondern vielmehr Rad- bzw. Achslasten im Vordergrund stehen sollten. Theoretische Überlegungen zu diesen Zusammenhängen und zur Berechnung des Spannungseintrags und -fortpflanzung unter begrenzten Lastflächen sind bereits längerfristig unter dem Begriff der bodenfeuchtabhängigen Druckbelastbarkeit veröffentlicht (Hartge & Horn, 1999; DVWK, 1995; Koolen & Kuipers, 1983; Söhne, 1951). Becher (2004) wählte zur Veranschaulichung der auflastabhängigen Tiefenwirkung von Drücken den Ansatz der Punktlast (Söhne, 1953) und stellt die Bedeutung der räumlichen und zeitlichen Änderung des von Fröhlich (1934) eingeführten Konzentrationsfaktors in den Vordergrund, der das elastisch-anisotrope Verhalten der Druckausbreitung im Halbraum als Maß für die Form der Druckfortpflanzung im Boden beschreibt.

Vergleicht man die berechneten Spannungsverläufe nach DVWK (1995) ( $\nu_k=6$ ) mit denen über das Sensorsystem gemessenen, kommt es besonders in den Oberbodenhorizonten zu einer Unterschätzung der eingetragenen Spannung (Abbildung 55). Dieser Zusammenhang lässt sich anhand der idealisierten Annahmen einer konstanten runden Kontaktfläche und dem damit konstanten Kontaktflächendruck während der dynamischen Belastung durch Befahrung ableiten. Diese Annahme ist aufgrund der natürlichen räumlichen Heterogenität der Oberbodeneigenschaften und der unterschiedlichen Spannungsverteilung auf der profilierten landwirtschaftlichen Bereifung mit vorhandener Karkassensteifigkeit in der Kontaktfläche Reifen/Boden allerdings nie gegeben (Lamandé & Schjonning, 2008; Schjonning et al., 2006; Keller & Arvidsson, 2004; Trautner & Arvidsson, 2003; Defossez & Richard, 2002; Söhne, 1953). Zahlreiche Autoren berichten von Spannungskonzentrationen im Bereich der Reifenstollen und unterschiedlicher Tiefenwirksamkeit dieser Effekte (Alakukku et al., 2003; Way et al., 2000; Gysi et al., 1999; Raper et al., 1995; Tijink et al., 1995; Wood et al., 1991; Burt et al., 1989; Horn et al., 1986; Söhne, 1953), wobei Horn (2003) im Oberboden von Spannungsdifferenzen von bis zu 300% zwischen den Stollen und den Stollenzwischenräumen ausgeht. Döll (1999), Febo (1999) und Burt et al. (1989) untersuchten die Spannungsverteilung auf den Stollenaufstandsflächen und stellten bis zu 12fach höhere Spannungseinträge vom Stollenrand hin zur Reifenmitte fest.

Fakt ist, dass in der Kontaktebene zwischen Reifen und Boden deutliche Spannungskonzentrationen auftreten, die sich zudem während des dynamischen Lasteintrages zeitlich ständig verändern. Der häufig verwendete mittlere Kontaktflächendruck, der die begrenzte Flächenlast definiert und eine wichtige Eingangsgröße bei der Kalkulation von Spannungsverläufen darstellt, berücksichtigt diese



*Abbildung 55: Gegenüberstellung der nach DVWK (1995) berechneten Spannungsverläufe ( $\sigma_z$ ) (homogener Konzentrationsfaktor  $\nu k=6$ ; gemittelte Kontaktflächen ( $n=16$ ) nach Denker (2008)) mit den bei den Überfahrexperimenten gemessenen und berechneten mittleren Hauptspannungseinträgen ( $\sigma_1$ ) aller Versuchstandorte mit niedrigem Reifeninnendruck ( $n=12$ )*

Heterogenität des Spannungseintrages allerdings nicht, wodurch die realen Spannungseinträge besonders im Oberboden anhand der Kalkulation häufig unterschätzt werden.

Bei dem Vergleich der kalkulierten Spannungsverläufe zu den Messwerten ist zu beachten, dass die mit dem Sensorsystem gemessenen Spannungseinträge ebenfalls nicht den exakten Spannungszustand im Boden wiedergeben. Hohe Deformationsraten, wie sie mit den DTS-Messungen gerade mit höheren Radlasten im Oberboden festgestellt werden konnten (vgl. Kap.3.3.3) und größere Unterschiede der Schubsteifigkeit zwischen dem Sensorkopf und dem umgebenden Boden, besonders im lockeren krümeligen Ap-Horizont, führen zu Spannungskonzentrationen auf dem Messsystem und zu einer Überschätzung der tatsächlichen Spannungen (Gräsele, 1999; Kirby, 1999). Der Sensorkopf stellt in diesen Fällen einen Fremdkörper im Boden dar, welcher die natürlichen Verformungseigenschaften und die Spannungsverteilung verändert.

Die gemessenen und kalkulierten Spannungseinträge, vor allem bei den leichten Radlastvarianten, liegen durch geringere Deformationsraten und damit geringerem Einfluss der Steifigkeitsunterschiede und der begrenzten Tiefenwirkung der oberflächennahen Spannungsheterogenitäten im Unterboden dagegen wieder enger bei einander. Für größere Gesamtlasten scheint der berechnete Spannungsverlauf, trotz des Konzentrationsfaktors 6, die Spannungszunahme und Tiefenwirkung schwerer Maschinen sowie deren Gefährdung für den Unterboden allerdings zu unterschätzen.



### 4.2.3 Reifeninnendruck

Vor dem Hintergrund einer Entwicklung zu immer schlagkräftigeren und schwereren Maschinen werden vermehrt Anforderungen an die Optimierung der Kontaktfläche und die Minimierung des Kontaktflächendrucks gestellt.

Ein häufig diskutierter Ansatz zur Begrenzung der mechanischen Bodenbelastung ist die Beschränkung des oberflächlichen Kontaktflächendrucks. Eine technische Maßnahme neben der Regulierung der Gesamtlast und der Reifenwahl (Terrabereifung, Zwillingsreifen) stellt dabei die Minimierung des Reifeninnendrucks dar. Über das Einstellen des niedrigsten möglichen Reifeninnendrucks und der damit einhergehenden Aufstandsflächenvergrößerung des Reifens, wird versucht die in den Boden eingetragenen Spannungen zu begrenzen. In diesem Zusammenhang interessieren mittlerweile nicht mehr alleine die ökologischen Effekte des Gefügeschutzes, sondern über verbesserte Zugkraft (Traktion) und geringere Spurtiefen (Bulldozing-Effekt), die verminderten Kraftstoffverbrauch mit sich bringen, treten auch ökonomische Interessen mehr und mehr in den Vordergrund (Volk & Denker, 2008).

In der vorliegenden Arbeit ist das Augenmerk auf die bodenschonende Wirkung dieses technischen Steuerungselementes hinsichtlich der mechanischen Bodenbelastung gelegt. Über den horizontspezifischen Vergleich der mittleren Spannungseinträge konnten Wirkungsgrenzen bezüglich der Tiefenwirkung und des Unterbodenschutzes sowie gegenüber der Auflast bei gegebener Reifen/Radlastkombination aufgezeigt werden. Die bodenschonende Wirkung des verminderten Reifeninnendrucks im Bereich des Oberbodens ist mehrfach beschrieben worden (Brandt et al., 2007; Alakukku et al., 2003; Frielinghaus et al., 2002; Stahl et al., 2001; Danfors, 1994). Gleichzeitig ist aber auch bewiesen, dass die Begrenzung des Kontaktflächendrucks allein, ohne Berücksichtigung der Lastfläche, für einen nachhaltigen Gefügeschutz im Unterboden nicht ausreicht, da mit zunehmender Lastfläche und gleichem Druck die Spannungen tiefer in den Boden eingetragener werden (Hakansson, 2005; Hamza & Anderson, 2005; Ehlers et al., 2000; Hartge & Horn, 1999; Söhne, 1951).

Die eigenen Untersuchungsergebnisse lassen im zusammenfassenden Vergleich aller Versuchsvarianten zuerst keine Unterschiede erkennen, was dazu führte die gemittelten Spannungseinträge auf differenzierterer Ebene der einzelnen Radlasten mit ihren lastabhängigen Reifendruckunterschieden zu vergleichen. Mit der differenzierten Betrachtung der auflastabhängigen Wirkung verminderten Reifeninnendrucks auf den Spannungseintrag und die Spannungsfortpflanzung einzelner Belastungssituationen zeigte sich eine Spannungsabnahme mit tiefenwirksamem Unterbodenschutz für die Reifen/Radlastkombinationen mit 3,3 und 6,3Mg. Die Vergrößerung der Aufstandsfläche mit einhergehender Abnahme des Kontaktflächendrucks reichte in diesen Fällen aus den Spannungseintrag bis in den Unterboden (60cm) zu verringern. Der horizontspezifische Vergleich zeigt aber gleichzeitig auch mit zunehmender Messtiefe abnehmende Spannungsdifferenzen und deutet damit auf die von anderen Autoren beschriebene begrenzte Tiefenwirkung und den hauptsächlich oberbodenschonenden Effekt hin (Keller & Arvidsson, 2004; Danfors, 1994; van den Akker, H., 1994). Dieser Oberbodeneffekt macht

sich bei der Betrachtung der Ergebnisse mit der Radlast 7,5Mg am deutlichsten bemerkbar. Hier ist in der ersten Messtiefe noch die Wirkung der Abnahme des Kontaktflächendrucks durch die geringe Zunahme der Aufstandsfläche messbar, in den beiden Unterbodenhorizonten 40 und 60cm zeigen sich dagegen Druckzunahmen durch den bereits erwähnten dominierenden Einfluss der Radlast und damit eine Umkehrung der Auswirkung und eine erhöhte Gefahr der Unterbodenverdichtung.

Es konnte gezeigt werden, dass mit zunehmendem Gesamtgewicht das Verhältnis der Kontaktflächenzunahme zur steigenden Radlast enger wird und somit hinsichtlich der Druckminderung in der Kontaktfläche weniger ins Gewicht fällt (vgl. Abbildung 13b; Kap.3.3.1). Die Reifenkontaktfläche müsste also mit steigender Radlast überproportional zunehmen um weiterhin bodenschonende Effekte zu bewirken. Ähnliche Aussagen werden im Zusammenhang von Überführungsexperimenten mit unterschiedlichen Reifen/Radlastkombinationen von Raper (2005) geäußert. Stahl et al. (2001) empfehlen diese überproportionale Kontaktflächenvergrößerung ab Radlasten >8Mg. Bei den eigenen Untersuchungen zu vermindertem Reifeninnendruck mit der Radlast 7,5Mg erscheint der getestete Reifen, trotz erkennbarer Spannungsabnahme in der Reifenkontaktfläche, mit Kontaktflächendrücken um 250kPa und Druckzunahmen im Unterboden hinsichtlich seiner Aufstandsflächenvergrößerung überfordert zu sein. Ein bodenschonender Effekt kann unter dieser Reifen/Radlastkombination mit der Verminderung des Reifeninnendrucks nicht mehr erreicht werden.

#### 4.2.4 Überrollhäufigkeit

Die verdichtende Wirkung der Überrollhäufigkeit oder Belastungswiederholung durch landwirtschaftliche Maschinen wird in der Literatur häufig unter dem Aspekt des Druck-Zeit-Setzungsverhalten des Bodens und der additiven Belastungszeit diskutiert (Botta et al., 2006; Peth & Horn, 2006; Horn, 2004; Horn et al., 1986). Gerade in Feldauffahrten und im Bereich der Vorgewende kommt es über den jahreszeitlichen Betriebsablauf zu einer erhöhten Anzahl von Überfahrten, aber auch der Rest der Fläche wird über das Jahr durch die verschiedenen Bodenbearbeitungs-, Pflege- und Erntemaßnahmen mit unterschiedlichen Bearbeitungsbreiten mehrfach überfahren. Stahl et al. (2001) berichten für den Winterweizenanbau im Mittel einen Spurflächenanteil von 69%, der jährlich bis zu vierfach überrollt wird (summierte Spurfläche 368%). In Teilbereichen kann die Anzahl der Überfahrten bis zu 25 betragen (KTBL, 1998).

Frielinghaus et al. (2002) geben für den Zuckerrübenanbau ebenfalls vierfache Überrollhäufigkeiten mit einem mittleren Spurflächenanteil von sogar 89% an. Hakansson (2005) unterscheidet zwischen inneren Saatbeetbereichen und dem Vorgewende und gibt für eine Soja-Maisfruchtfolge Überrollhäufigkeiten von 2-4 an, der additive Verdichtungseffekt in Fahrspuren wird bei ihm als kumulativer Kontaktflächendruck aufsummiert.

Vor diesem Hintergrund wurden die Spannungsfortpflanzung und das Deformationsverhalten der Böden auch unter Mehrfachbelastungen analysiert. Die Ergebnisse der Spannungsmessungen zeigen eine Abnahme der eingetragenen 1.Hauptspannung mit

zunehmender Überrollhäufigkeit in den Messtiefen 20 und 40cm. Ähnliche Ergebnisse werden von Becher (2004), Wiermann (1998) und Semmel (1993) berichtet. Diese Abnahme lässt sich über eine fortschreitende Kompaktierung der Oberbodenhorizonte erklären, die über die additive Belastungszeit und Setzung mehr Korn zu Korn Kontakte und eine Zunahme des effektiven Spannungsanteils erfahren. Diese Prozesse sind bei Pagliai et al. (2003) bildlich über Gefügedünnschliffe eines konventionell bearbeiteten Horizonts unter mechanischer Belastung dargestellt.

Die Veränderung der plastischen hin zu überwiegend elastischen Deformationsanteilen des Oberbodens verdeutlichen diesen Stabilisierungseffekt, der unter anderem auch bei Pytka (2005) beschrieben wird (vgl. Abbildung 20 Kap.3.3.3). Freilandspannungsmessungen dieses Autors zeigen dagegen bei Mehrfachüberfahrten zunehmende Spannungseinträge mit zunehmender Belastungswiederholung.

Mit gleichzeitiger Änderung der Anteile anisotropischer Spannungsverteilung, d.h. zunehmendem Ruhedruckbeiwert ( $k_0$ ) und höherer Gesamtspannung, kommt es zu geringeren Konzentrationsfaktoren und einer verminderten Spannungsfortpflanzung in vertikaler Richtung. Der Aspekt höherer volumetrischer Wassergehalte kann bei vollständiger Aufsättigung des Bodens und gleichzeitig geringen Leitfähigkeiten diesen Effekt mit dann isotroper Spannungsverteilung unterstützen. Diesem Zusammenhang wird allerdings unter anderem durch Becher (2004) darauf verwiesen, dass durch größere Sättigungsanteile in der Bodenmatrix und damit abnehmende kohäsive Bindungskräfte auch ein gegenteiliger Effekt mit der Erhöhung des Konzentrationsfaktors eintreten kann. Durch wiederholte komprimierende Belastungen erfolgt der Übergang des Bodens in ein zwei Phasen System mit isotroper Spannungsverteilung und einem Anstieg scherender und knetender Verdichtungsgefahr, da in diesem Fall die Scherkräfte bis auf den Betrag der Kohäsion der Feststoffpartikel vermindert werden. Weitere Belastungswiederholungen führen dann zu plastischer volumenkonstanter Verformung mit aggregatzerstörender Wirkung (Horn, 2002; 2001; Bailey et al., 1995).

Eine additive Zunahme der Trockenrohdichte mit zunehmender Überrollhäufigkeit in der Ackerkrume und die weitere Verdichtung durch längere Belastungszeit werden von Peth & Horn (2007), Grecenko (2003), Hernanz & Sánchez-Girón (2000) und Döll (1999) berichtet. Arvidsson (1998) misst diese kumulative plastische Deformation unter mehrfacher Belastung eines 35Mg Zuckerrübenroder sogar bis in 70cm Tiefe.

Eigene Ergebnisse zu Bodenstabilitätsuntersuchungen bestätigen die Annahme, dass es zu einer Zunahme der Vorbelastungswerte kommt. Dieser Stabilitätskennwert reagiert allerdings bei zunehmender Überrollung und Knetung und der damit einhergehenden Homogenisierung der Bodenstruktur, gerade im Oberboden, wieder mit Abnahmen der Stabilität, die wiederum zu einer Zunahme der Tiefenwirkung der eingetragenen Spannungen beitragen. Dem Stabilitätsgewinn durch mechanische Belastung im Oberboden sind demnach über die Bodenstruktur Grenzen gesetzt. Hamza & Anderson (2005), Soane et al. (1980b) beschreiben das Phänomen indem sie die größte Verdichtungsgefahr des Oberbodens der 1. Überfahrt zuschreiben, die Belastung des Unterbodens allerdings erst über mehrfache

Belastungswiederholungen entsteht. Es ist zudem zu beachten, dass mit dem Stabilitätsgewinn im Oberboden die Druckfortpflanzung translatorisch an den Unterboden weitergegeben werden kann, sobald die Steifigkeit des Oberbodens die der darauf folgenden Horizonte überschreitet (Lamandé et al., 2007; Horn et al., 1986; Guerif, 1984). Trautner & Arvidsson (2003) machen diese Erfahrung bei Belastungsexperimenten (7Mg Radlast) mit trockenen Oberbodenverhältnissen bei denen sie kaum Fahrspuren ermitteln aber deutliche vertikale Setzung bis in 70cm Tiefe feststellen.

### **4.3 Belastungspotenzial gegenüber dynamischem Lasteintrag**

Das Druckbelastbarkeitskonzept "Vorbelastung" ermöglicht mit der Gegenüberstellung des wasserspannungsabhängigen Stabilitätsparameters Vorbelastung ( $P_v$ ) und der im Feld gemessenen vertikalen 1. Hauptspannungseinträge der in situ Spannungsmessungen die direkte Beurteilung, ob und bis in welche Tiefe eine bestimmte Radlast/Reifenkombinationen die Bodentragfähigkeit überschreitet und ob von der Gefahr der Bodengefügeveränderung auszugehen ist (Horn & Fleige, 2003).

Die Kritik an diesem Vorsorgekonzept, welches nach Keller et al. (2004) Stabilitäten unterschiedlicher Belastungspfade vergleicht, kann in Zusammenhang mit dem zeitabhängigen Drucksetzungsverhalten des Bodens durch den Aspekt der additiven Belastungsdauer und des kumulativen Setzungsverhaltens unter wiederholter Belastung entgegnet werden. Diese Stabilitätseigenschaften, die neben den eigenen Untersuchungen auch unter anderem von Krümmelbein et al. (2008), Horn & Hartge (1990) und Lebert et al. (1987) festgestellt wurden, legitimieren den Stabilitätsparameter Vorbelastung als Basisstabilität für die Risikoabschätzung der Bodenbelastung (vgl. auch Kap.3.2.1 und Kap.3.4).

Mechanische Belastung auf landwirtschaftlich genutzten Böden treten vor allem durch das Befahren mit Radfahrzeugen während der Grundbodenbearbeitung oder bei Pflege- und Erntearbeiten auf. Die dynamischen Belastungen die über die Reifen der landwirtschaftlichen Maschinen und Transportfahrzeuge in den Boden eingetragen werden, sind gegenüber den statischen Laborbelastungszeiten des Drucksetzungsversuches jedoch deutlich geringer, der Boden wird eher impulsartig belastet (Lamandé et al., 2007; Cramer, 2006; Keller & Arvidsson, 2004). Die Dauer der Spannungseinträge liegt je nach Überfahrgeschwindigkeit des Arbeitsganges zwischen 0,5 und 3s (Keller & Arvidsson, 2004; Keller et al., 2004; Wiermann, 1998; Kühner, 1997; Horn et al., 1992; Horn & Hartge, 1990; Soane et al., 1980b).

Um im Labor Belastungszustände zu simulieren, die dem Spannungspfad eines landwirtschaftlichen Radfahrzeuges entsprechen, wurde für die aktuellen Untersuchungen der statische Ödometerversuch in einen dynamisch impulsartigen Belastungsversuch mit kurzfristiger Belastungsdauer (2s) angepasst (vgl. Kap. 2.4.2.2). Über diese Anpassung der Belastungszeit im Drucksetzungsversuch konnten für die konventionell und konservierend bearbeiteten Lössversuchsflächen in NRW dynamische Bodenstabilitätskennwerte für einzelne kurzfristige Lasteinträge (einfach befahrenen Feldareale) und zehnfach kurzfristige

Belastungswiederholungen (stark befahrene Feldareale, Vorgewende bzw. mehrachsige Gespanne) bestimmt werden, die den real gemessenen Spannungseinträgen der Überfahrungsexperimente vergleichend gegenübergestellt wurden (vgl. Kap. 3.4.1.1). Die Gegenüberstellung dieser *dynamischen* Stabilität mit den einmaligen oder 10fach kurzfristigen Spannungseinträgen ermöglicht damit die Bewertung hinsichtlich einer sofortigen Beeinträchtigung des Bodengefüges durch Einzelüberfahrten bzw. begrenzte Belastungswiederholungen. Höhere Überfahrungshäufigkeiten durch bspw. längerfristigen Einsatz der gleichen Maschine müssen dagegen für eine nachhaltige Bewertung der Verdichtungsgefährdung immer dem *statischen* Vorbelastungswert als Basisstabilität des Standortes gegenübergestellt sein.

Die Ergebnisse der *dynamischen* und *statischen* Bodenstabilitätsuntersuchungen (Kap.3.2) zeigen, abhängig von der Belastungszeit, deutliche Differenzen im Setzungsverhalten des untersuchten Lösses auf. Die Bodendeformation ist dabei zeitabhängig und tritt als gekoppelter hydraulischer und mechanischer Prozess auf (Peth & Horn, 2006). Mit zunehmender Belastungszeit werden größere Sofortsetzungsraten bzw. ein zunehmender Anteil an Primärsetzung festgestellt, der mit dem Auswertungsverfahren nach Casagrande zu einem Versatz der Erstverdichtungsgeraden führt und damit zu einer Abnahme des Vorbelastungswertes. Ähnliche Zusammenhänge der Bodenstabilität als Funktion der Auflastzeit sind in Arbeiten von Fazekas & Horn (2005) und Lebert et al. (1989) beschrieben, in denen von einer Zunahme der Bodenstabilität mit abnehmender Belastungszeit berichtet wird. Gebhardt, (2007), Peth & Horn (2006) und Horn & Hartge (1990) unterstreichen die Beeinflussung der belastungszeitabhängigen Stabilitätsunterschiede durch die Porenkontinuität und die hydraulischen Eigenschaften unterschiedlicher Bodenausgangssubstrate. In ihren Untersuchungen zeigen aufsummierte Belastungszeiten größere Stabilitätsabnahmen in bindigen Substraten, so wurde in einem Tonboden mit geringer hydraulischer Leitfähigkeit unter einem kurzfristigen Spannungseintrag beinahe eine Verdoppelung der Bodenstabilität gegenüber dem statisch konsolidierten Versuch festgestellt (Peth & Horn, 2006). Für den untersuchten Lössboden konnte bei den eigenen Untersuchungen mit einmalig impulsartiger Belastung eine mittlere Stabilitätszunahme um ca. 55kPa ausgewiesen werden.

Die eigenen Ergebnisse verdeutlichen, dass auch die Bodenbearbeitung Einfluss auf das Setzungsverhalten nimmt. Die ermittelten horizontspezifischen Kurzbelastungsstabilitäten weisen abhängig von der Bodenbearbeitung unterschiedliche Stabilitätszunahmen bzw. Setzungsdifferenzen auf, folgen aber im Tiefenverlauf den Stabilitätsunterschieden der statischen Basisstabilität der ausgewiesenen Bodenhorizonte. Auffällig unterschiedliche Stabilitätszunahmen zeigen sich im konventionell gepflügten Ap-Horizont im Vergleich zum Unterkrumenbereich der konservierend bearbeiteten Versuchsfläche. Die deutlichere Zunahme der Stabilität im Ap-Horizont, trotz vergleichbarer Textur, könnte mit der fehlenden Porenkontinuität bzw. verstärkter Strukturzerstörung und damit einhergehenden geringeren gesättigten Wasserleitfähigkeit sowie der Entstehung von Porenwasserüberdruck während der kurzfristigen Belastung erklärbar sein (Baumgartl, 1991). Auch Janßen (2008) stellte bei

kurzzeitigen zyklischen Belastungsversuchen Porenwasserüberdrücke fest, die einen Stabilisierungseffekt in Form eines erhöhten elastischen Rebounds in homogenisierten gegenüber strukturierten Bodenproben verursachten, jedoch beschränkt sich dieses Phänomen auf die ersten Lastwiederholungen. Lebert et al. (1989) berichten von zeitabhängigen Setzungsunterschieden in vergleichbaren Ausgangssubstraten und sprechen strukturiertem Boden mit größerer hydraulischer Leitfähigkeit und guter Porenkontinuität eher Sofortsetzung dominiertes Setzungsverhalten und weniger Belastungszeit abhängige Eigenschaften zu. Peth & Horn (2006) berichten von ähnliche Erfahrungen bei zyklischen Belastungsversuchen von konventionell und konservierend bearbeiteten Oberböden und finden heraus, dass der belastungszeitabhängige Anteil der Primär- und Sekundärsetzung an der Gesamtsetzung und damit eine höhere zyklische Kompressibilität in den konventionell bearbeiteten Oberböden dominiert.

Mit fehlender Porenkontinuität und kurzfristiger Belastungsdauer kommt es dazu, dass mobilisiertes Porenwasser langsamer abgeleitet werden kann und ein Teil der aufgebrachten Auflast von der inkompressiblen Wasserphase getragen wird (neutrale Spannung) (Horn et al., 1989). Semmel (1993), der in konventionell und konservierend bearbeiteten Oberböden während dynamischer Belastungsversuchen (1,5s Belastungszeit) im Freiland ( $pF_{1,8}$ ) Wasserspannungsmessungen durchführte, berichtet von deutlich höheren lastinduzierten Porenwasserdrücken im gepflügten Ap-Horizont gegenüber dem konservierend bearbeiteten Unterkrumenbereich. Diese Ergebnisse unterstützen den eigenen Interpretationsansatz der unterschiedlichen effektiven Spannungsanteile aufgrund bodenstruktureller Unterschiede.

Texturbedingte Unterschiede der Stabilitätszunahme mit kurzfristiger Belastung, wie sie bei Horn (1993) und Lebert et al. (1989) beschrieben werden, lassen sich mit 3-4% Tongehaltsunterschied zwischen Al- und Bt-Horizonten den eigenen Ergebnissen der Lössstandorte nicht entnehmen.

Über die Anpassung der Belastungszeit im Laborversuch und die Bestimmung dynamischer Stabilitätsparameter können neben dem bisherigen Vergleich der mechanischen Belastung zur Basisstabilität und der damit ermittelten langfristigen Verdichtungsgefahr nun auch tiefenbezogen bewertende Aussagen über die sofortige Gefügeschädigung bei nur einfacher Überfahrt gemacht werden.

Der Effekt der Bodenverdichtung ist immer mit der Umlagerung und Neuordnung von Bodenpartikeln und einer Abnahme des Porenvolumens verbunden und tritt erst dann ein, wenn die Eigenstabilität eines Horizonts überschritten wird (Arvidsson, 2001; Hartge & Horn, 1999; Sommer, 1998; Horn, 1981; Casagrande, 1936). Damit charakterisiert der Kennwert der Vorbelastung den Übergang von elastischem zu plastisch irreversiblen Deformationsverhalten und dauerhaften Gefügeveränderungen mit beeinträchtigenden Folgen für die Bodenfunktionen (Gebhardt et al., 2009; Horn & Fleige, 2008; Pagliai et al., 2003). Botta et al. (2006), Alakukku et al. (2003), Arvidsson (2001) und Ehlers et al. (2000) zeigen über die Änderung von Bodenfunktionskenngrößen, dass eine direkte Beziehung zwischen aktueller Auflast, Druckfortpflanzung und der jeweiligen Eigenfestigkeit der Bodenhorizonte besteht. Keller (2004) verwendet das Konzept bei

Überführungsexperimenten in Verbindung mit zeitgleichen Bodendeformationsmessungen. Seine dynamischen Belastungsstudien bestätigen den Ansatz des Vorbelastungskonzeptes mit deutlich zunehmender irreversibler Bodenverformung bei einem Spannungseintrag/Vorbelastungsverhältnis  $>1,5$ , wobei er selbst dem Vorbelastungswert keine Grenzwerteigenschaften als Stabilitätsparameter zuspricht.

Den Differenzen zwischen Spannungseintrag und Vorbelastungswert der eigenen Ergebnisse ist zu entnehmen, dass die Verdichtungswirkung der externen Belastungen im Oberboden am größten ist. Das durch die mechanische Strukturzerstörung (Pflug oder Grubber) nahezu homogenisierte lockere Krümelgefüge der Bearbeitungshorizonte mit geringer Eigenstabilität ist kaum in der Lage Kräfte gegenüber dem Spannungseintrag zu mobilisieren und reagiert mit deutlichen irreversiblen Setzungsraten um das nötige Gleichgewicht zwischen externer Belastung und interner Stabilität wieder herzustellen. Die hohen Deformationsraten weisen gleichzeitig auf eine fehlende horizontale Abstützung, einen geringen Ruhedruckbeiwert ( $k_0$ ) und den daraus resultierenden großen Konzentrationsfaktor hin. Diese mechanischen Rahmenbedingungen führen wiederum zu einer geringen Druckkompensation und vertikal dominierter Druckfortpflanzung (Becher, 2004; Söhne, 1953; Fröhlich, 1934) die sich in den z.T. hohen Spannungseinträgen in 20cm Messtiefe widerspiegeln. Mit zunehmender Tiefe verengt sich das Verhältnis zwischen Spannungseintrag und Eigenstabilität, bis letztendlich mit Zunahme der Druckkompensation und des Überlagerungsdrucks die Verdichtungswirkung vollständig aufgehoben wird (Horn, 1986). Neben der Überlagerungsspannung haben die Korngrößenverteilung, der Gehalt an Tonmineralen, der Gehalt an organischer Substanz, die Bodenstruktur, die Porengrößenverteilung und die hydraulischen Eigenschaften entscheidenden Einfluss auf das Druckkompensationsvermögen und die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens (Janßen, 2008; Horn & Lebert, 1994; Horn, 1993). Wogegen bei den untersuchten Bodentypen und Ausgangssubstraten ähnliche mechanische Stabilität festgestellt wurde, zeigt der Vergleich der beiden Bodenbearbeitungssysteme und der daraus resultierenden Bodengefügeformen Unterschiede in der Druckfortpflanzung auf. Die Entwicklung der Bodenstruktur, die in Ackerböden zum großen Teil von der Grundbodenbearbeitung bestimmt ist, spielt hinsichtlich der mechanischen Stabilität eine wichtige Rolle und ist von der maximalen vorausgegangenen Austrocknung (Quellung und Schrumpfung), dem Zeitraum ohne mechanische Umlagerung, der mechanischen Belastungshistorie sowie der biologischen Aktivität von Pflanzen und Bodentieren abhängig (Janßen, 2008; Hamza & Anderson, 2005; Dexter, 1988). Durch die Einregelung von Bodenpartikeln durch Quellungs- und Schrumpfungsprozesse nehmen diese eine Position geringerer freier Energie ein (Utomo & Dexter, 1981). Die damit einhergehende Gefügeentwicklung mit sekundären Grobporen und vertikalen Bioporen kann in Verbindung mit Kittsubstanzen wie Kalzium oder organischer Substanz zu Bindungen zwischen den Bodenpartikeln und Aggregatbildung führen und die Stabilität des Bodens erhöhen (Baumgartl, 1991).

Den Messungen unter konservierender Bodenbearbeitung ist in den Oberbodenhorizonten ein verbessertes Druckkompensationsvermögen mit geringeren Differenzen zwischen

Spannungseintrag und Eigenstabilität sowie eine verbesserte Reduktion scherender Verformungen in die Tiefe zu entnehmen. Wiermann et al. (2000) führen diesen Stabilitätsgewinn hauptsächlich auf die ungestörte Restrukturierung des Bodengefüges im ehemaligen bearbeiteten, humusreichen Unterkrumenbereich zurück. Ehlers et al. (2000) berichten im Zusammenhang dynamischer Belastungsversuche von stärkeren und länger anhaltenden Veränderungen des Bodengefüges sowie einer gestörten Tiefendurchwurzelung in konventionell bearbeiteten Flächen gegenüber Festmulch bewirtschafteten. Der Stabilitätsgewinn der konservierenden Bearbeitung ist allerdings nach eigenen Untersuchungen auflastabhängig und bewirkte bodenschonende Spannungskompensationen nur für die Radlast 3,3Mg. Verringertes Deformationsverhalten und damit wirksamer Unterbodenschutz ist nach den eigenen Ergebnissen auf Radlasten <6,3Mg (vgl. Kap.3.3.3) beschränkt. Diese Auflastabhängigkeit der bodenschonenden Funktionen durch die Bodenbearbeitung werden durch Untersuchungen zur Luftkapazität und –leitfähigkeit von Koch et al. (2008) bestätigt. Die Autoren sprechen einer konservierend bearbeiteten Ackerfläche unter Belastungen mit Radlasten von 7,8 - 11,7Mg keine verbesserten Stabilitätseigenschaften zu, liegen mit ihren Radlasten allerdings auch deutlich über den eigenen ermittelten Grenzlaster. Auch Ehlers et al. (2000) machen ähnliche Erfahrung beim Vergleich ungesättigter Wasserleitfähigkeiten in konservierend und konventionell bearbeiteten Versuchsflächen unter hohen Belastungseinträgen (5Mg Radlast). Wiermann (1998), der ebenfalls Spannungsmessungen durchführte, berichtet schon ab der Radlast 2,5Mg vom Verlust des Kompensationsvermögens durch konservierende Bearbeitung.

Die Betrachtung der Stabilitätsverhältnisse im Oberboden zeigen, dass unabhängig vom untersuchten Bodenbearbeitungssystem und der Belastungsdauer des Lasteintrages die horizontspezifischen Eigenstabilitäten von allen Belastungsvarianten überschritten werden. Ähnliche bodenverdichtende Spannungseinträge unter vergleichbaren Radlasten werden von (TLL, 2008; SMUL, 2005; Yavuzcan et al., 2005; Grecenko, 2003) angegeben. Die nach dem Druckbelastungskonzept zu erwartende Verdichtung und irreversible Setzung wird durch die Ergebnisse der Deformationsmessungen in Form der ermittelten Spurtiefen (Bodenoberfläche) und der gemessenen plastischen Verformungsraten in 20cm Tiefe bestätigt.

Die Tiefenwirkung des Verdichtungsimpulses und die vertikale Deformation nehmen auflastabhängig mit höheren Radlasten zu und sind ab der Radlast 6,3Mg, mit Spannungseinträgen welche die statische und dynamische Stabilität im Unterboden deutlich überschreiten und irreversible plastische Deformationen hervorrufen, als stark verdichtungsgefährdend einzustufen. Hakansson (2005) spricht jeder Belastung, welche die Stabilität des Unterbodens (ab 35cm) überschreitet, permanente Bodenschädigung zu. Danfors (1994) ermittelt für tonig lehmige Ackerböden in Schweden hinsichtlich der Unterbodenverdichtungsgefahr geringere Grenzlaster. Er bekräftigt im Zuge von Verdichtungsexperimenten mit unterschiedlichen Reifeninnendrücker seine seit 1974 geforderte Beschränkung der Achslast auf unter 6Mg. Rusanov (1994) begrenzt



bodenfeuchteabhängig die Kontaktflächendrücke zwischen 80-210kPa und den maximal erlaubten Bodendruck in 50cm Tiefe auf 25-50kPa. Petelkau (1998) spricht sich unter Verwendung von Standardreifen für Radlasten kleiner 1,5 – 2Mg aus und zitiert Tijink et al. (1995) der unter Verwendung bodenschonender Breitreifen Radlasten bis 5Mg bzw. Kontaktflächendrücke bis 100kPa für tragbar einstuft. In direktem Bezug auf das untersuchte Ausgangssubstrat Löss und den Bodentyp Parabraunerde werden von Semmel & Horn (1994) maximal zulässige Radlasten von 4Mg angegeben. Für einen nachhaltigen Unterbodengefügeschutz konventionell bearbeiteter Pseudogley-Parabraunerden aus Geschiebemergel beschränken Horn & Fleige (2008) die Radlasten für den Bodenfeuchtezustand der Feldkapazität sogar auf 3,3Mg.

Hinsichtlich bodenschonender Effekte durch verminderten Reifeninnendruck ist die Betrachtung der realen Spannungseinträge in Gegenüberstellung zur Bodenstabilität gerade bei schweren Reifen/Radlastkombinationen eher ernüchternd. Allein für die Radlastvariante 3,3Mg können mit niedrigem Reifeninnendruck für den getesteten Reifen bodenschutzrelevante Reduzierungen des Bodendrucks ermittelt werden. Die mit der Reduzierung des Reifeninnendrucks verbundene Aufstandsflächenvergrößerung in der Kontaktfläche Reifen/Boden, die auch von Way et al. (2000), Raper et al. (1995), Tijink et al. (1995) und Soane et al. (1980a) festgestellt wird, führt zwar zur Abnahme des Kontaktflächendrucks, reicht jedoch unter den gegebenen Reifen/Radlastkombinationen nicht aus, um den Kontaktflächendruck soweit zu minimieren, dass die tiefer in den Boden eingetragenen Spannungen unter den Stabilitätsgrenzwert der Vorbelastung begrenzt werden. Solange dieser Sachverhalt durch eine Reifendruckminderung nicht erfüllt ist, kann dieser technischen Maßnahme keine bodenschonende Funktion zugesprochen werden.

Arvidsson et al. (2002) machen ähnliche Erfahrungen bei Überfahrungsversuchen mit Radlasten von 8,3 und 12,1Mg und sprechen der Reifendruckminderung hauptsächlich oberbodennahe Effekte der Belastungsminderung zu. Ein bodenschonender Effekt mit erhöhter Radlast kann ihrer Meinung nach nur durch eine überproportionale Lastflächenvergrößerung erreicht werden, d.h., dass eine Verminderung der Tiefenwirkung des Bodendrucks in Verbindung mit einer vergrößerten Lastfläche nur mit gleichzeitiger Abnahme des Kontaktflächendrucks realisiert werden kann. Wird das überproportionale Verhältnis von Flächenzunahme zu Lastzunahme nicht eingehalten, kommt es zwar in der Kontaktfläche immer noch zu mäßigen Abnahmen der Drücke, in größeren Tiefen nehmen allerdings die Spannungseinträge, wie auch mit den eigenen Ergebnissen gezeigt werden konnte, zu (vgl. Kap.3.3.2.4) (Raper, 2005; Ehlers et al., 2000).

Ähnliche Zusammenhänge der Abschätzung mechanischer Bodenbelastungen sind der Gegenüberstellung der Mohr-Coulomb'schen Bruchgeraden zu den Spannungsumhüllenden der 1. und 3. Hauptspannung zu entnehmen. Diese Darstellungsweise ermöglicht es, Aussagen über das Auftreten von Scherverformungen für unterschiedliche Belastungssituationen einschließlich ihrer Tiefenwirkung zu treffen (Horn et al., 1994). Wiermann et al. (1999) und Bailey et al. (1995) untersuchen ähnliche Zusammenhänge scherender Belastungen über den Vergleich mittlerer Normalspannung (MNS) zu

oktaedrischer Scherspannung (OCTSS) und sprachen einem Verhältnis  $>1$  der oktaedrischen Spannung (ORS) Scherverformungen im Boden zu. Diese Annahme idealisiert allerdings die Mohr-Coulomb'sche Bruchgerade für kohäsionsloses Material mit einem Winkel der inneren Reibung von  $45^\circ$ .

Bei den eigenen Betrachtungen veranschaulichen vor allem die Ergebnisse der Oberbodenmessungen der beiden Schwerlastvarianten, dass die Hauptspannungskombinationen das Bruchkriterium überschreiten. Die geringe Strukturstabilität des gepflügten Bearbeitungshorizontes zeigt mit den höchsten Einträgen der 1.Hauptspannung und den größten Hauptspannungsdifferenzen die deutlichsten Anzeichen scherender Verformung. Der natürliche geringe Ruhedruckbeiwert ( $k_0$ ) in dem lockeren krümeligen Gefüge bietet für die vertikale Belastung keine horizontale Abstützung und führt daher zu großer vertikaler Deformation bevor über die Verminderung des Porenvolumens und die Erhöhung der Kornkontakte wieder ein Gleichgewicht zwischen externer Auflast und internem Widerstand hergestellt werden kann. Ergebnisse von Pagliai et al. (2003) zeigen anhand von Dünnschliffen des Oberbodens nach Befahrungen mit geringen Kontaktflächendrücken, dass auch kurzfristiges Überschreiten der internen Bodenstabilität Setzungsvorgänge hervorrufen kann, die zuerst das Interaggregatporenvolumen verringern und später über scherende Verformung zur Aggregatzerstörung bis hin zur vollständigen Homogenisierung des Bodens führen. Horn et al. (1994) stellen diese Prozesse mit Röntgennativaufnahmen dar und Wiermann et al. (2000) gelingt dasselbe mit computertomographischen Aufnahmen. Die eigenen gemessenen Spurtiefen sowie die Ausprägung des Spurbildes deuten im Oberboden auf den Prozess des Grundbruchs mit seitlichem Ausweichen des Materials hin, was ein weiteres Indiz für das Überschreiten des Bruchkriteriums ist. Die Sensormessungen spiegeln für die Radlastvariante 7,5Mg homogenisierende und aggregatzerstörende Zustände der Spannungsverteilung im Boden bis in 40cm wieder.

Die konservierende Bodenbearbeitung zeigt durch den verfestigten, strukturierten Oberboden deutlich geringere Hauptspannungskombinationen, da der Boden über einen größeren Ruhedruckbeiwert ( $k_0$ ) und kleineren Konzentrationsfaktor ein höheres Druckkompensationsvermögen besitzt. Dadurch tritt unter der konservierenden Bodenbearbeitung auch der Effekt der Reifendruckminderung deutlicher zu Tage. Bodenschonende Effekte dieser technischen Maßnahme können aber auch in Gegenüberstellung zu den Scherparametern, zumindest für die Radlast 7,5Mg, nicht ausgemacht werden.

Vergleicht man die Gegenüberstellungen zu Vorbelastungswert und Scherparametern lässt sich festhalten, dass komprimierende Bodendegradation besonders mit höherer Radlast (7,5Mg) und zunehmender Überrollhäufigkeit bis in den tieferen Unterboden (60cm) auftritt, scherende und aggregatzerstörende Belastung allerdings auch mit hohen Lasten bei einmaligen Überfahrten noch auf den Oberboden beschränkt zu sein scheint.

#### **4.4 Auswirkung der mechanischen Belastung auf Bodenkenngrößen**

Für die Charakterisierung der Bodengefügeveränderung und der Auswirkungen auf physikalische Bodenfunktionen in praxisüblich befahrenen Ackerböden wurden unter definierten Belastungsbedingungen die Kenngrößen (1) Vorbelastung, (2) Luftkapazität, (3) gesättigte Wasserleitfähigkeit und (4) Luftleitfähigkeit horizontspezifisch untersucht. Zusätzlich zu Auswirkungen einmaliger dynamischer Belastungen wurden unter anderem, in Bezugnahme auf mehrachsige Fahrzeuge und häufiger befahrene Feldareale, auch die Veränderungen wiederholender Lasteinträge auf die Bodeneigenschaften betrachtet.

Für mehrere der getesteten Belastungskombinationen wurden Spannungszustände ermittelt, die zu einem Überschreiten der bodeninternen statischen und dynamischen Stabilität führten. Eine damit einhergehende irreversible Abnahme des Porenvolumens und umlagernde Neuordnung der Bodenpartikel mit gleichzeitiger Erhöhung der Kornkontakte verändert dabei die mechanischen wie auch hydraulischen und pneumatischen Eigenschaften des Bodens. Die betrachteten Kennwerte erlauben, trotz des Problems der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Untersuchungen, die Auswirkungen der unterschiedlichen mechanischen Belastungen auf den Boden zu quantifizieren. Die auflastabhängige Einstufung der Veränderungen, die Klassifizierung der Kennwerte und letztendlich die vergleichende Gegenüberstellung zu Schadschwellenwerten ermöglicht, Verdichtungseffekte der einzelnen Reifen/Radlastkombinationen bewertend zu betrachten. Im folgenden Kapitel werden die ermittelten kurzfristigen Veränderungen dieser Eigenschaften bewertend diskutiert.

##### **Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften**

(1) Der bodenphysikalische Kennwert "Vorbelastung" gibt die mechanische Eigenstabilität oder das wasserspannungsabhängige Druck-Zeit-Setzungsverhalten eines Bodens wieder (Horn, 1981). Die Untersuchungen zum Stabilitätsparameter Vorbelastung ergaben, unabhängig vom Ausgangssubstrat, auflastabhängige, z.T. signifikante Zunahmen der Vorbelastung mit steigender Radlast. Die Beeinflussung dieses Bodenfunktionskennwertes erfolgte zumindest für die Schwerlastvariante mit 7,5Mg bis in den Unterboden (60cm). Wiermann (1998) berichtet bei mehrfacher dynamischer Belastung mit 5Mg Radlast ebenfalls von Veränderungen der Vorbelastung bis in 60cm Tiefe.

Das Überschreiten der Bodentragfähigkeit durch externe Spannungseinträge hat eine irreversible plastische Verformung und die Setzung des Bodens zur Folge. Mit der Veränderung des Porenraumes und abnehmendem Interaggregatporenvolumen kommt es zu mehr Kornkontakten und damit zu einer langfristig stabilisierenden Zunahme der Gesamtspannung. Einen weiteren Stabilitätseffekt im belasteten Boden hat die Veränderung des  $\chi$ -Faktors, der den Anteil des wassergefüllten Porenraumes angibt. Berücksichtigt man im Dreiphasensystem Boden die proportionale Verteilung der flüssigen und gasförmigen Phase im Porensystem und die über das Bodenwassers beeinflusste effektive Spannung

(Bishop, 1959; Terzaghi & Jelinek, 1954), führt die mit plastischer Deformation verbundene Verringerung des Grobporenvolumens im ungesättigten Zustand zu einer Vergrößerung der Ansatzfläche für wasserspannungsabhängige kohäsive und adhäsive Kräfte (Baumgartl, 1991). Die auf  $-60\text{hPa}$  vorentwässerten Proben haben, solange die belastungsinduzierte Setzung nicht zu Porenwasserüberdruck führt, einen Stabilitätsgewinn an effektiver Spannung (Horn, 1993). Die Gesamtzunahme des Vorbelastungswertes durch kurzfristige Belastungen entspricht allerdings nicht wie erwartet der Differenz von ehemaliger Stabilität zu dynamischem Spannungseintrag. Ähnliche Erfahrungen macht Voßbrink (2005) bei dynamischen Belastungsversuchen mit Holzerntemaschinen im Schwarzwald, er erklärt die Differenz mit einem ausgeprägtem Wurzelwerk, welches die eingetragenen Spannungen ableitet.

Die eigenen Ergebnisse lassen vermuten, dass durch die dynamischen kurzzeitigen Belastungen die Sekundärsetzung oder Konsolidierung nicht abgeschlossen ist, bzw. der Boden unter kurzfristiger Belastung mit erhöhtem Neutralspannungsanteil höhere interne Kräfte mobilisiert (vgl. Ausführungen in Kap. 3.2) und nur ein Teil des Setzungs- oder Stabilisierungsprozesses stattfindet. Der Anteil der Stabilitätzunahme an der maximal durch den Spannungseintrag Möglichen ist dabei nicht alleine durch die Belastungsdauer bestimmt, sondern ebenso als textur- und strukturabhängige Funktion der hydraulischen Eigenschaften zu verstehen (Baumgartl, 1991).

Mit der Zunahme der Vorbelastungswerte unterhalb stabiler Oberbodenhorizonte konnte gezeigt werden, dass die Stabilisierung des Oberbodens nicht nur als positiv im Sinne erhöhter Tragfähigkeit und verbessertem Druckkompensationsvermögens (kleinerer  $v_k$ ) gewertet werden kann. Diese Horizonte scheinen trotz eigener Steifigkeit durchaus die eingetragenen Spannungen über translatorische volumenkonstante Bewegung an unterliegende Horizonte weiterzureichen. Liegen die austretenden Spannungen an der unteren Horizontgrenze über der Eigenstabilität des folgenden Horizontes kommt es zu einer Verdichtung des Unterbodens mit stabilen Oberbodenverhältnissen (Lamandé et al., 2007; Guerif, 1984). Dieser Sachverhalt sollte gerade bei Befahrungen im zeitigen Frühjahr berücksichtigt werden, wenn die zuvor aufgesättigten Böden oberflächlich abgetrocknet sind und für den Bauern den vermeintlichen Eindruck eines stabilen Bodengefüges wiedergeben. Brunotte (2007), empfiehlt daher die Grundbodenbearbeitung der Folgefrucht möglichst in den Herbst vorzulegen, da zu dieser Jahreszeit die Bodenfeuchte des Unterbodens deutlich geringer ist und ein höheres Druckkompensationsvermögen besitzt. Arvidsson (1998) macht diese Erfahrungen bei sehr trockenen Oberbodenverhältnissen mit Untersuchungen der horizontspezifischen Vorbelastung in Verbindung mit Überfahrexperimenten und gibt ähnliche Handlungsempfehlungen.

Bewertende Aussagen zur auflastinduzierten Veränderungen der Vorbelastung können nur texturabhängig und nur in Verbindung mit weiteren Bodenfunktionskennwerten erfolgen (Horn & Fleige, 2008). In sandigen Substraten können die mechanische Belastung und die Komprimierung des Primärporenvolumens zu einer Zunahme des Anteils an Mittelporen und damit zu erhöhter nFK führen. Die damit einhergehende Veränderung des Wasserhaushaltes

dieser grobporigen Böden wäre damit bis zu einem bestimmten Grad als positiv zu werten. In bindigen Substraten mit geringerem Grobporenanteil wirkt dagegen weniger die Wasserhaltekapazität als vielmehr die Belüftung des Bodens limitierend auf die ökologischen Funktionen. In diesen Böden stehen die Funktion der Belüftung und der Schutz des für den Sauerstofftransport wichtigen Sekundärporensystems im Vordergrund. Eine Zerstörung dieser Porenfunktionen kann in bindigen Substraten schnell zu verminderter Infiltrationsleistung, Stauwasser und anaeroben Bedingungen führen und wäre demnach immer als negativ zu bewerten.

### **Einfluss auf die Bodenfunktion**

Durch die kleinräumliche Texturheterogenität der Geschiebemergelstandorte kam es in Verbindung mit der Beprobungen der verschiedenen Fahrspuren an unterschiedlichen Standorten zu größeren Varianzen der Kennwerte einzelner Belastungsstufen, die z.T. die verdichtungsbedingten Belastungseffekte der Bodeneigenschaften vollständig überlagerten. Aufgrund dieses Umstandes und der dominierenden Bedeutung der Gasdiffusion gegenüber dem Massenflusses hinsichtlich der Belüftung des Bodens, werden die auflastabhängigen Beeinflussungen der Bodenfunktionen anhand der Kennwerte Luftkapazität, Luftleitfähigkeit und gesättigte Wasserleitfähigkeit ausschließlich für die texturhomogeneren Lössstandorte in NRW diskutiert.

(2) Die Luftkapazität als Maß für die Belüftung des Bodens, ist eine potentielle Kenngröße die von der Textur und Struktur des Bodens abhängt und für die Bodenfeuchte der Feldkapazität ( $pF_{1,8}$ ) angegeben wird (Horn & Smucker, 2005). Der Bodenkennwert beurteilt die Belüftung des Bodens bei hohem Wassersättigungsgrad, der in unserem Klima über längeren Zeitraum im Winterhalbjahr bis ins Frühjahr auftritt. Im Pflanzenbau konzentriert sich das Interesse an der Luftkapazität auf die Betrachtung der Sauerstoffversorgung der Kulturpflanzen (insb. der Winterfrüchte). Der Luftmangel hat über die Beeinträchtigung der Wurzelatmung Einfluss auf das Wurzellängenwachstum und damit auf den Ertrag (Stepniewski & Stepniewska, 2008; Hakansson, 2005; Czyz, 2004). Um die nötigen  $O_2$ -Konzentrationen für den optimalen Anbau von Kulturpflanzen zu gewährleisten, werden in der Literatur texturabhängig Luftkapazitäten von 10-20Vol% angegeben (Hartge & Horn, 1999; Richard et al., 1999; Stepniewski et al., 1994). In DVWK (1997) werden Luftkapazitäten unter 4Vol% als "gering" eingestuft, Geisler (1980) zitiert in UBA (2004a) bezeichnet Luftkapazitäten <5Vol% bereits als "sehr gering". Eingeschränkte Belüftung, anaerobe Bedingungen und verminderten  $O_2$ -Partialdruck werden durch Blume (1968) und Fühler (1973) zitiert in Hartge & Horn (1999) und Scheffer & Schachtschabel (2002) bereits Luftvolumen unter 4-6% zugeschrieben. Mit Luftkapazitäten <5Vol% im Unterboden wurde nach Dumbeck (1986) und Werner und Paul (1999) zitiert in Lebert et al. (2006) ein Schadschwellenwert für diese Bodenfunktion definiert, ab dem eine gestörte Sauerstoffnachlieferung in den Boden zu erwarten ist, die sich nachteilig auf das Pflanzenwachstum auswirken kann.

Mechanische Belastungen mit ihren Auswirkungen auf das Porensystem und die für die Sauerstoffdiffusion wichtige Porenkontinuität können über komprimierende und schernde Verformungen die Belüftung des Bodens entscheidend beeinflussen. Mehrere Autoren beschäftigten sich bereits mit den Auswirkungen der Bodenbearbeitung und Befahrung auf die Sauerstoffverfügbarkeit für Pflanzen in Verbindung mit Untersuchungen der Sauerstoffdiffusionsrate (ODR) und fanden heraus, dass insbesondere mehrfache Befahrung die Lagerungsdichte des Bodens erhöhen und dabei gleichzeitig die Sauerstoffdiffusion soweit vermindern, dass es negative Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum hat (Stepniewski & Stepniewska, 2008; Czyz, 2004; Glinski & Stepniewski, 1985; Stepniewski, 1981).

Die eigenen auflastabhängigen Untersuchungen zeigen insbesondere bei Mehrfachüberfahrungen Abnahmen der Luftkapazität mit steigender Radlast. Mit dem Überschreiten der Bodenstabilität und der damit verbundenen plastischen Verformung und Erstverdichtung kommt es, im Zuge der Sofortsetzung, zuerst zur Abnahme des Interaggregatporenvolumens und zur Verringerung des Anteils an weiten Grobporen (Dexter, 1988). Dieser luftgefüllte Porenanteil ist nach Horn & Smucker (2005) gegenüber dem meist CO<sub>2</sub> enthaltenden sauerstoffarmen Intraaggregatporen besonders wichtig für die Belüftung.

Die Belastungskombination mit 3,3Mg, die im vorherigen Kapitel als stabil gegenüber dem Spannungseintrag im Unterboden bewertet wurde, lässt keine Beeinträchtigung des Grobporenvolumens erkennen. Für die 7,5Mg Variante können dagegen z.T. signifikante Abnahmen der Luftkapazität um ca. 2Vol% bis in den Unterboden (60cm) ausgewiesen werden. Yavuzcan et al. (2005) untersucht ebenfalls die Veränderung der Luftkapazität in konservierend und konventionell bearbeiteten Lössparabraunerden bei Überfahrungsversuchen mit einem Zuckerrübenroder mit 11Mg Radlast. Auch er stellt unter beiden Bodenbearbeitungssystemen signifikante Abnahmen der weiten Grobporen bis in 40cm Tiefe fest. Die von ihm angegebene Reduzierung kommt mit ca. 2Vol% den eigenen Ergebnissen nahe. Zink et al. (2008) führen Belastungsversuche in unterschiedlich bearbeiteten, setzungsempfindlichen Marschböden durch und berichten bei nur einmaliger Überfahrung von Abnahmen der Luftkapazität um 5Vol% im Oberboden. Hakansson (2005) zitiert in diesem Zusammenhang Untersuchungen von Mc Afee et al. (1989), die die Veränderung des Sauerstoffdiffusionskoeffizienten ( $\rho F_{1,8}$ ) unter mechanischer Belastung betrachteten und bei Versuchen mit einer Gesamtlast von 3,3Mg und 200kPa Kontaktflächendruck ebenfalls eine deutliche Reduzierung dieses Kennwertes bis in 40cm Tiefe aufweisen konnten.

(3)(4) Die tatsächliche Diffusionsgeschwindigkeit des Sauerstoff in den Boden wird neben dem Vorhandensein von Luftvolumen auch sehr stark vom Porendurchmesser und der Porenkontinuität bestimmt (Stepniewski & Stepniewska, 2008; Horn & Smucker, 2005). Die Komprimierung und Erhöhung der Lagerungsdichte ist umso diffusionshemmender, je mehr wasserfreie Sekundärporen dabei zerstört werden. Bei der mechanischen Belastung kann durch eine Verengung der Poren und damit veränderten Wassergehalts/Wasserspannungsbeziehung das leitfähige Volumen stark beeinträchtigt

werden. Durch engere Porendurchmesser können ehemals bei Feldkapazität luftführende Poren nun z.T. noch Wasser enthalten und wirken durch den geringen Diffusionskoeffizienten des Wassers als Diffusionsbarriere. In Folge scherender Beanspruchung, die unter den Lasteinträgen besonders im Oberboden festgestellt wurden, können volumenkonstanten Umlagerungsprozesse auch ohne Lagerungsdichteerhöhung die Porenkontinuität stark verringern (Horn, 2002; Hartge & Horn, 1999). In diesem Zusammenhang sind zur Bestimmung der Porenfunktionsfähigkeit für die Beurteilung der hydraulischen und pneumatischen Bodeneigenschaften Untersuchungen der gesättigten Wasserleitfähigkeit  $k_f$  und der Luftleitfähigkeit ( $pF_{1,8}$ )  $kl$  durchgeführt worden, um Aussagen zur Kontinuität des Porensystems machen zu können.

Beide Parameter beschreiben den zeitabhängigen Durchfluss der beiden unterschiedlich viskosen Fluide durch einen definierten Bodenquerschnitt unter der antreibenden Kraft eines Druckgradienten. Sie charakterisieren den Massenfluss im Boden und eignen sich nach Hartge (1967) und Kmoch & Hanus (1965) als gleichwertig zur Bestimmung der Kontinuität des Porensystems. Die beiden Kennwerte werden als sensible Parameter für die Beschreibung funktionaler Veränderungen der Bodenstruktur angesehen und treten immer wieder als Kennwerte in Verbindung mit der Beurteilung nutzungsbedingter Beeinflussung der physikalischen Bodeneigenschaften auf (Horn & Fleige, 2008; TLL, 2008; Lebert et al., 2007; Lebert et al., 2004a; Werner & Paul, 1999; Petelkau et al., 1998). In der Literatur lassen sich hinsichtlich nutzungsbedingter Bodenverdichtung viele Angaben zu negativen Beeinträchtigungen des Porensystems finden die anhand dieser Funktionswerte ausgewiesen werden (Hakansson, 2005; Van den Akker, J. J. H. et al., 2003; Richard et al., 2001; Horn et al., 2000; Soane & van Ouwerkerk, 1994).

Ehlers et al. (2000) untersuchen Ertragsrückgang und gesättigte Wasserleitfähigkeit in Verbindung mit Belastungsversuchen in einer Lössparabraunerde mit unterschiedlicher Bodenbearbeitung. Bei ihren Untersuchungen stellen sie, in Verbindung deutlich beeinträchtigter Grobporenleitfähigkeit, vermindertes Wurzellängenwachstum und Ertragsdepressionen unter mechanischer Belastung fest und verdeutlichen die direkten Zusammenhänge zwischen funktionierendem Sekundärporensystem und der Produktionsleistung des Bodens.

Ein ausschlaggebender Nachteil der beiden Funktionskennwerte ist die Bestimmung über ungestörte Stechzylinderproben im Laborversuch. Der begrenzte Ausschnitt des Bodens durch das definierte Volumen des Stechzylinders führt besonders bei großen Texturunterschieden und ausgeprägtem Sekundär- und Bioporensystem zu einer sehr hohen Streubreite der Einzelmesswerte (z.T. mehrerer Zehnerpotenzen). Schäfer-Landefeld et al. (2004) fügt diesen Effekten noch die Variation der Eigenschaften unterschiedlicher Bodenhorizonte hinzu. In den strukturierten Lössböden mit ausgeprägtem Bioporensystem dominiert hinsichtlich verzerrter Leitfähigkeitswerte der Struktureffekt, die Geschiebemergelstandorte zeigen hauptsächlich Beeinflussung durch die Texturheterogenität auf. Der hohe Anteil gut vernetzter Sekundärporen und die z.T. sehr sandige Textur äußern sich bei den Laborversuchen durch eine bimodale

Häufigkeitsverteilung der Stichprobenwerte die auch mehrfach von anderen Autoren beschrieben wird (TLL, 2008; Wiermann, 1998). Über die statistische Auswertung kann es dadurch zu überschätzten mittleren Leitfähigkeiten kommen, die auflastabhängige Belastungseffekte überlagern. Um die hydraulische Situation im Feld wahrheitsgemäß wiederzugeben, wurden zum einen Extremwerte der Haubenpermeametermethode über einen Ausreißertest aus den Berechnungen ausgeschlossen (vgl. Kap. 2.7), zum anderen erfolgten zur weiteren Verifizierung der im Labor ermittelten vertikalen gesättigten Wasserleitfähigkeit Feldinfiltrationsversuche mit dem Haubeninfiltrimeter und dem Guelph-Permeameter. Die damit ermittelte feldgesättigte Leitfähigkeit  $K_{fs}$  unterscheidet sich von dem entsprechenden Laborwerten primär dadurch, dass im Feld die völlige Aufsättigung des Porenraumes oberhalb des Grundwasserspiegels aufgrund von Lufteinschlüssen praktisch nie erreicht werden kann (Schwärzel & Punzel, 2007; Reynolds & Elrick, 1991; Reynolds & Elrick, 1990). Auch wenn die Versuchsbedingungen nicht vollständig vergleichbar sind erlauben diese Feldmessungen die relative Veränderungen der horizontspezifischen ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten zu ermitteln, um über Infiltration und gesättigten Wasserleitfähigkeit skaleninvariant Beeinträchtigungen der Porenkontinuität festzustellen.

Die Ergebnisse der eigenen Versuche mit einmaliger Belastung, lassen über den Funktionskennwert der Luftleitfähigkeit ( $pF_{1,8}$ ) unabhängig vom Ausgangssubstrat und der Bodenbearbeitung keine auflastabhängige Beeinflussung der Porenkontinuität erkennen. Die Leitfähigkeiten zeigen die bereits erwähnte hohe Streubreite und schwanken im mittleren bis hohen Bereich.

Die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens wurde neben der einfach belasteten Fahrspur zusätzlich in mehrfach befahrenen Bereichen untersucht. Unter den einfachen Belastungen zeigt dieser Parameter bereits signifikante Beeinträchtigung der Porenkontinuität im Oberboden der Lössstandorte. Diese Abnahme der  $k_f$ -Werte ließ sich anhand der Feldinfiltrationsversuche mit ebenfalls verminderten Infiltrationsraten bestätigen.

Im Oberboden ist durch mechanische Beanspruchung nicht nur von komprimierenden sondern ebenfalls auch scherenden Bodenverformungen auszugehen (vgl. Kap.3.4). Gerade diese volumenkonstanten Deformationen haben entscheidenden Einfluss auf die Porenkontinuität (SMUL, 2005; Horn, 2002). Wogegen sich die Beeinträchtigungen mit dem viskoserem Fluid Luft anhand des Funktionskennwertes Luftleitfähigkeit bei einfacher Befahrung noch nicht nachweisen lassen, zeigt die gesättigte Wasserleitfähigkeit schon eindeutig Veränderungen der Porengeometrie auf. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die Proben für den Laborversuch definiert entwässert wurden, der Effekt der volumetrischen Wassergehaltsveränderung mit Beeinträchtigung des Diffusionsvermögens also nicht berücksichtigt ist und im Feldversuch in situ kleinere Luftleitfähigkeiten erwarten ließe. Verengte Grobporen, die noch in der Lage sind Luft zu leiten, sind hinsichtlich der Wasserleitfähigkeit schon beeinträchtigt (Gebhardt, 2007). Unter Berücksichtigung der Zusammenhänge in der Hagen-Poiseuille'schen Gleichung und des starken Einflusses des Porenradius auf die Leitfähigkeit, kommt es durch die Verengung der Grobporen zur Abnahme des Massenfluss. Des Weiteren kann es unter Berücksichtigung



des Kontinuitätsgesetzes, unter Annahme des eindimensionalen Flusses, zu veränderten Fließgeschwindigkeiten und damit zu unterschiedlichem Strömungsverhalten im Bereich verengter Poren kommen. Durch Zunahme der Fließgeschwindigkeit tritt gegenüber der erst laminaren Strömung nun vermehrt turbulentes Fließverhalten mit insgesamt geringerer Transportleistung auf (Hartge & Horn, 1999).

Ergebnisse anderer Autoren decken sich mit den eigenen, so berichten Yavuzcan et al. (2005) und Schäfer-Landefeld et al. (2004) in Verbindung mit Überfahrexperimenten ebenfalls von Beeinträchtigung der hydraulischen und pneumatischen Eigenschaften. Yavuzcan et al. (2005) stellen unter mechanischen Belastungen mit 11Mg Radlast eines Zuckerrübenroders bis zu 90% Abnahme der gesättigten Wasserleitfähigkeit und eine Reduzierung der Luftleitfähigkeit bis in 40cm Tiefe fest und bestätigen beide Funktionswerte als sensitive Kennwerte für Belastungseffekte. Radford et al. (2000) untersuchen die Kontinuität des Porensystems anhand der Verteilung der sichtbaren Poren und stellen in mechanisch verdichteten Fahrspuren eine deutliche Abnahme an auszählbaren Grobporen pro m<sup>2</sup> fest. In Befahrungsexperimenten von Arvidsson (2001) zeigte sich unter Radlasten von 8Mg deutlich die Tiefenwirkung solch hoher Fahrzeuggesamtlasten. Wogegen die eigenen Experimente mit einmaliger Befahrung hauptsächlich Beeinträchtigungen des Oberbodens der Lössstandorte aufweisen, wird in seinen Versuchen auch die hydraulische Leitfähigkeit mehrerer Unterböden auf 10% ihrer ursprünglichen Durchlässigkeit reduziert. Achslasten über 10Mg und Kontaktflächendrücke über 300kPa verändern seiner Meinung nach, in jedem Boden mit Tongehalten zwischen 2-65% die physikalischen Eigenschaften bis in 50cm Tiefe und stellen damit eine besonders hohe Unterbodenverdichtungsgefahr dar. Alakukku et al. (2003) spricht allgemein von einer Unterbodenverdichtungsgefahr wenn die horizontspezifische Bodentragfähigkeit überschritten ist, neben den Parametern Lagerungsdichte, Luftleitfähigkeit und Luftkapazität spricht auch sie dem Funktionskennwert der gesättigten Leitfähigkeit die höchste Sensitivität zu. Abweichend zu diesen Erfahrungen stehen Ergebnisse von Koch et al. (2008). Er untersuchte kumulative Bodenverdichtung in Lössparabraunerden mit mehrfacher Überfahrung in drei aufeinander folgenden Jahren und berichtet, trotz hoher mechanischer Belastungen mit bis zu 11,7 Mg Radlast, von keinen Belastungseffekten hinsichtlich der Anzahl an Bioporen. Feldinfiltrationsversuche unter konservierender Bodenbearbeitung zeigten bei seinen Experimenten sogar verbesserte hydraulische Bedingungen unter mechanischer Belastung auf. Ergebnisse zur auflastabhängigen Veränderung der Luftleitfähigkeit und der Luftkapazität wiesen dagegen auch bei seinen Untersuchungen unter mechanischer Belastung Abnahmen bis in den Unterboden auf und bewegen ihn zu Empfehlungen die Belastung des Unterbodengefüges dieser empfindlichen Böden zu minimieren.

Die mehrfach belasteten Fahrspuren zeigen im Löss gegenüber Einfachbefahrungen eine sehr viel deutlichere Beeinträchtigung der vertikalen kf-Werte bis in den nahen Unterboden (40cm). Wogegen bei einmaligem Überfahren hauptsächlich die Luftkapazität die Veränderung des Porensystems über Sofortsetzungsverhalten anzeigt, nimmt mit 10facher Überrollung auch der prozentuale Anteil der Proben mit verminderten kf-Werten deutlich zu.

Durch wiederholende scherende Beanspruchungen im Oberboden, bzw. mit den 6,3 und 7,5Mg Varianten z.T. auch im nahen Unterboden, kommt es zu additiven Verdichtungseffekten mit knetenden Verformungen, die die Porenkontinuität stark beeinträchtigen und damit die Leitfähigkeit deutlich unter den von Werner & Paul (1999) definierten Schadschwellenwert von 10cm/d reduzieren. Dexter (1988) beschreibt diesen Vorgang über mehrere Teilprozesse. Zunächst kommt es bei einmaligen Überfahrten mit der Verminderung des Interaggregatporenvolumens dazu, dass Struktureinheiten näher zusammengedrückt werden, die Eigenschaften der Aggregate selbst werden noch nicht verändert. Mit zunehmender Überrollhäufigkeit erfolgt dann eine Zerschering der Aggregate die sich als Bruchstücke in Interaggregatporen schieben können und zu deutlicher Verminderung der Leitfähigkeit und verminderter Strukturstabilität führen. Zuletzt resultiert eine vollständige Homogenisierung der Bodenstruktur mit verringerter Eigenstabilität, rein texturbestimmter Leitfähigkeit der Primärporen und vollständigem Verlust der Leitfähigkeit des Sekundärporensystems. Auch Gebhardt et al. (2009), und Schäfer-Landefeld et al. (2004) gehen davon aus, dass gerade in feuchten Böden diese knetenden Beanspruchungen und die damit verbundene Strukturzerstörung die Kontinuität von Poren <50µm beeinträchtigt. Ihre Untersuchungen zur Porengrößenverteilung zeigen jedoch, dass die Abnahme der Leitfähigkeit von der Dezimierung der weiten Grobporen dominiert wird. Wiermann et al. (2000) stellen in mehrfach befahrenen Fahrspuren knetende Prozesse fest, die seiner Meinung nach zu einem Kollabieren des stabilen Pflugsohlenbereiches führen können und zu erhöhten Spannungseinträge und größerer Verdichtungsgefahr im Unterboden beitragen. Hakansson (2005) und Pagliai et al. (2003) berichten in diesem Zusammenhang neben einer deutlichen Abnahme des Grobporenanteils von Gefügeveränderungen bis hin zur vollständigen Homogenisierung und Destabilisierung des Oberbodens. Hernanz & Sánchez-Girón (2000) aber auch Botta et al. (2004) ermitteln eine Abnahme der Strukturporosität im Zusammenhang mit mehrfacher Überführung schon mit 85kPa Kontaktflächendruck und 4Mg bzw. 3,9Mg Gesamtgewicht.

#### **4.5 Bewertung der auflastabhängigen Bodenfunktionsänderung nach Indikatorsystem UBA (2004a)**

In Verbindung mit einer Beurteilung der Verdichtungsgefährdung bzw. der auflastabhängigen Beeinträchtigung der Gefügefunktion müssen immer die Veränderung mehrerer Kennwerte im Zusammenhang betrachtet werden. Für eine bewertende Betrachtung der auflastabhängigen Beeinflussung des Bodengefüges und der Bodenfunktionen wurden auf Grundlage des von Lebert et al. (2004) vorgestellten Indikatorsystems die Indikatoren gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) und Luftkapazität (LK) gewählt. Brunotte et al. (2008) verwenden das Indikatorsystem mit Gegenüberstellung der beiden Funktionskennwerte um den prozentualen Anteil schadverdichteter Unterböden für die Südniedersächsische Lössbörde zu ermitteln. Nur 17% ihrer untersuchten Unterböden weisen dabei eine schadverdichtete Einschränkung mindestens einer Bodenfunktion auf. Im Ausgangszustand weisen die Lössböden der nordrheinwestfälischen Börde bei den eigenen Untersuchungen

mit ca. 20% schadverdichteter Bodenfunktion im Unterboden (40cm) ähnliche Verdichtungszustände auf.

Mit der auflastabhängigen Gegenüberstellung der ermittelten Funktionskennwerte zu den von Horn et al. (2008), TLL (2008) und Lebert et al. (2004) proklamierten Schadschwellen- bzw. Maßnahmenwerten zeigt sich in Betrachtung der prozentualen Klassenanteile der Einzelmesswerte, dass zunehmende Radlasten die Gefügefunktionen zunehmend beeinträchtigen (vgl. Kap.3.5.5). Die belastungsbedingte Veränderung der beiden Parameter ist auf den verdichtungsempfindlichen Lössstandorten deutlicher ausgeprägt, die Texturheterogenität des Geschiebemergels überlagert auch in dieser Art der Darstellung die im Löss ermittelten Effekte. In der Darstellungsweise ist erkennbar, dass der Indikatorwert Luftkapazität die auflastabhängige Gefügedegradierung insgesamt besser verdeutlicht.

Die horizontspezifische Betrachtung der auflastabhängigen Veränderung der Klassenanteile deutet darauf hin, dass in den verschiedenen Bodenhorizonten unterschiedliche Teilprozesse dominieren, die sich anhand der Reaktion der unterschiedlichen Indikatoren differenziert wiedergeben lassen. So dominiert im Oberboden mit deutlich scherenden Beanspruchungen die Degradation der gesättigten Wasserleitfähigkeit, wogegen im Unterboden hauptsächlich kompressible Normalspannungen zur vertikalen Sofortsetzung beitragen und damit insbesondere die Verminderung der Luftkapazität bewirken.

Auch Wiermann et al. (2000) wählt die gegenüberstellende Darstellung der Makroporosität zur gesättigten Wasserleitfähigkeit, jedoch ohne Grenzwertbezug. Er stellt den korrelativen Zusammenhang der gesättigten Wasserleitfähigkeit als Funktion der Luftkapazität in den Vordergrund seiner Betrachtung. Aus seinen Ergebnissen von Befahrungsversuchen mit Radlasten von 2,5 bis 6Mg lässt sich zwar eine auflastabhängige Abnahme des Grobporenvolumens ableiten, eine Beeinflussung der hydraulischen Leitfähigkeit ist allerdings nicht erkennbar.

Die eigenen Ergebnisse zeigen im Zuge der mechanischen Belastung gravierende prozentuale Zunahmen der schadverdichteten Klassenanteile, was die Verdichtungsempfindlichkeit der Lössböden veranschaulicht. Der Indikatorwert der Luftkapazität weist häufig Werte auf, die nur knapp über 5Vol% an der Untergrenze des in der Literatur beschriebenen Grenzwertes liegen. Ähnliche Gefügeeigenschaften beschreibt Cramer (2006) bei Untersuchungen des Verdichtungszustandes nordrheinwestfälischer Ackerböden. SMUL (2005) gibt vergleichbare Luftkapazitäten nahe des Grenzwertes für Ackerböden des sächsischen Lösshügellandes an. Gerade die bereits im Vorfeld kritische zu bewertende Luftkapazität reagiert bei den dynamischen Lasteinträgen mit Abnahmen und deutlichem Überschreiten des Grenzwertes. Befinden sich im Ausgangszustand noch 65% der Werte oberhalb beider Schadschwellenwerte sind schon nach einmaliger Überfahrt mit 7,5Mg nur noch 18% ohne Beeinträchtigung. Von veränderten bodenphysikalischen Eigenschaften und der auflastabhängigen Abnahme der Luftkapazität in Verbindung mit einmaliger Überfahung berichten auch Ehlers et al. (2000). Sie stellen im konventionell bearbeiteten Oberboden einer Lössparabraunerde Abnahme der weiten Grobporen von 6 auf

3% fest, Überfahrten auf einer konservierend bearbeiteten Fläche zeigten eine Reduzierung von 5 auf 4%.

Die horizontspezifische Aufgliederung verdeutlicht, dass diese Prozesse bei den Schwerlastvarianten nicht allein auf den Oberboden beschränkt sind und betont die Dringlichkeit einer Begrenzung der mechanischen Belastung für einen nachhaltigen Gefügeschutz im Unterboden. Horn et al. (2005) veranschaulicht mit der flächenhaften Darstellung der Unterbodengefährdung mit Kontaktflächendrücken um 200kPa das Ausmaß dieses Problems und unterstreicht damit die Bedeutsamkeit. Auch Koch et al. (2008) kommt zu dem Schluss, dass unter den derzeitigen hohen mechanischen Belastungen Bemühungen zur Minimierung der dauerhaften Degradation der Unterbodenstruktur getroffen werden müssen, um eine nachhaltige Bodenfruchtbarkeit zu erhalten. Brunotte et al. (2008) fordert -im Sinne der Vorsorge- die Landmaschinenindustrie auf, weitere technische Entwicklungen am Bodenschutz zu orientieren und heutige max. Radlasten nicht mehr zu erhöhen.

Hinsichtlich der Beurteilung einer kritischen Radlast lässt sich aus der Erhöhung von 6,3 auf 7,5Mg und der daraus resultierenden deutlichen Abnahme beider Kennwerte ein Grenzwert der Bodentragfähigkeit für die untersuchten Böden ableiten. Wogegen einfache Überfahrten mit Radlasten bis 6,3Mg das Gefüge dieser Böden geringer beeinträchtigen, ist ab Radlasten mit 7,5Mg schon ab der ersten Überfahrt mit einer umfangreichen Degradierung zu rechnen.

Die Experimente der mehrfachen Belastung korrigieren den Grenzwert der kritischen Radlast weiter nach unten. Die Ergebnisse zeigen unter mehrfacher Belastung bereits mit Radlasten von 6,3Mg eine mechanische Degradierung des Bodengefüges durch komprimierende und scherende Beanspruchung. Die daraus resultierende Empfehlung, die mechanische Belastung dieser Lössböden zu begrenzen, weist mit Berücksichtigung eines nachhaltigen Unterbodengefügeschutzes auf eine kritische Obergrenze der Radlast <6,3Mg. Diese aus den eigenen Ergebnissen abgeleitete Größenordnung fügt sich gut in das Bild bereits veröffentlichter Grenzwerte von (KTBL, 1998; Tijink et al., 1995; Danfors, 1994; Rusanov, 1994; Semmel & Horn, 1994) ein, die für unterschiedliche Texturen kritische Radlasten mit Werten zwischen 1,5-5Mg angeben.

## 5 Fazit

Dynamische, kurzfristige Lasteinträge von landwirtschaftlichen Fahrzeugen stellen besondere mechanische Belastungen für den Boden dar. In der vorliegenden Arbeit wurden zum einen im Labor kurzfristige Belastungspfade simuliert, um dynamische Stabilitätsparameter zu bestimmen, die eine Abschätzung der Bodenbelastbarkeit unter praxisnahen Bedingungen zulassen und zum anderen, durch eine Gegenüberstellung der ermittelten horizontspezifischen Bodenstabilität zu den belastenden Spannungseinträgen simulierter Radfahrzeuge, die kurz- und langfristige Verdichtungsgefährdung unterschiedlicher Radlasten untersucht.

Mit dem Ziel der Verminderung mechanischer Bodenbelastung durch landwirtschaftlichen Verkehr wurden (1) zwei Ausgangssubstrate (Löss/Geschiebemergel), (2) die Bodenbearbeitung (konservierend/konventionell), (3) die Gesamtlast (3,3/6,3/7,5Mg) und (4) der Reifeninnendruck (niedrig/hoch) auf ihre Auswirkungen hinsichtlich des Gesamtspannungseintrages und der Spannungsfortpflanzung untersucht. Über eine klassifizierte Betrachtung ausgewählter Bodenfunktionskennwerte, wurden anhand eines Indikatorsystems bodenschonende oder gefügeschädigende Effekte dieser Maßnahmen beurteilt und kritische Reifen/Radlastkombination für die untersuchten Böden definiert.

(1) Der Vergleich der beiden *Ausgangssubstrate* Löss und Geschiebemergel zeigte unter den dynamischen Belastungsversuchen keine Unterschiede bezüglich der Spannungsfortpflanzung und des Druckkompensationsvermögens auf. Ein mechanischer Lasteintrag ist demnach in beiden Ausgangssubstraten, abhängig von der Eigenstabilität des Standortes, als gleich verdichtungsgefährdend einzustufen.

(2) Die langfristige Anwendung *konservierender Bodenbearbeitung* und die daraus resultierenden physikalischen und biologischen Strukturierungsprozesse verbessern die mechanische Stabilität und ökologische Funktionalität der Böden im Vergleich zur *konventionellen Bodenbearbeitung*. Auch wenn sich die Spannungsfortpflanzung unter konservierender Bodenbearbeitung nicht verändert, ergaben die Untersuchungen ein verbessertes Druckkompensationsvermögen des Oberbodens mit insgesamt geringeren Spannungseinträgen in allen Messtiefen. Das pflanzenbauliche Verfahren leistet damit einen bodenschonenden Beitrag für eine nachhaltigere Bodenbewirtschaftung, wobei zu beachten ist, dass dem Stabilitätsgewinn und der verbesserten Tragfähigkeit natürliche Grenzen gesetzt sind. Wie sich in den Untersuchungen des Deformationsverhaltens zeigte, lässt sich für Radlasten bis 3,3Mg mit einmaliger Überfahung noch ein reduziertes Deformationsverhalten im Ober- und besonders Unterboden feststellen. Die Radlastvarianten mit 6,3 und 7,5Mg überfordern allerdings den Stabilitätsgewinn der Bodenstruktur der konservierenden Bodenbearbeitung und führen unter beiden Bodenbearbeitungsvarianten zu Verdichtung bis in den Unterboden. Der Verlust eines bodenschonenden Stabilisierungseffektes in Folge konservierender Bodenbearbeitung ist damit in den untersuchten Böden für einfache Überfahrungen für Radlasten ab 6,3Mg anzunehmen.

(3) Die Untersuchungen der simulierten Gesamtgewichte offenbaren zunehmende Verdichtungsgefahr mit steigenden Radlasten. Durch annähernde Verdoppelung der Radlast der getesteten Reifen/Lastkombinationen wurden ebenso verdoppelte Spannungseinträge bis in den Unterboden und eine tiefere Spannungsausbreitung ermittelt. Einige der heutigen in der Praxis gebräuchlichen Last/Flächen- bzw. Reifen/Radlastkombinationen befinden sich nahe der getesteten Versuchsvarianten und sind in Verbindung mit den ermittelten Kontaktflächendrücken und den in 60cm Tiefe gemessenen Spannungseinträgen als verdichtungsgefährdend einzustufen. Unter der Berücksichtigung der Straßenverkehrsordnung und der damit begrenzten Reifendimension, sollte von Seiten der Landmaschinenindustrie auf eine Beschränkung der Maschinengewichte geachtet werden bzw. von Seiten der Entscheidungsträger diese limitiert werden. Eine standortbezogene Empfehlung hinsichtlich der Radlast muss zusätzlich immer auf die Stabilität der entsprechenden Böden ausgerichtet sein.

(4) Bezüglich der Bewertung der Reifeninnendruckminderung lässt sich zusammenfassen, dass über die Absenkung des Reifeninnendrucks und die damit einhergehende Zunahme der Aufstandsfläche, die positive Wirkung eines reduzierten Kontaktflächendrucks erreicht wird. Ein bodenschonender Effekt hinsichtlich des Unterbodengefügeschutzes ist allerdings nur für definierte Flächen/Lastkombinationen gegeben. Für eine Bewertung muss immer die Bodenstabilität im Vordergrund stehen und die Dominanz der Radlast hinsichtlich des Spannungseintrages berücksichtigt sein. Nur wenn die Verminderung des Reifeninnendrucks den Spannungseintrag unter die horizontspezifische Eigenstabilität reduziert, ist dieser technischen Maßnahme eine bodenschonende Empfehlung zuzusprechen. Für die eigenen Untersuchungen kann eine derartige Empfehlung mit dem gewählten Reifen der Größe (650/75 R38) ausschließlich für die Radlast mit 3,3Mg erfolgen.

In den durchgeführten Einfach- und Mehrfachüberfahrexperimenten wurde die Eigenstabilität der Böden gezielt überschritten, um die Auswirkungen der mechanischen Belastungen auf ausgewählte physikalische Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen sowie ihre Tiefenwirkung zu untersuchen.

Die im Labor ermittelten dynamischen Stabilitätsparameter gestatteten die Verdichtungsgefährdung eines einzelnen kurzfristigen, dynamischen Lasteintrages für den Boden zu bestimmen. Mit der Simulation praxisnaher Spannungspfade, wurde unter Laborbedingungen ein vermindertes Druck-Zeit-Setzungsverhalten mit kurzfristig höherer Tragfähigkeit des Bodens gegenüber dem im Ödometerversuch ermittelten statischen Setzungsverhalten festgestellt. Die Gegenüberstellung der ermittelten Stabilitäten zu den kurzfristigen, dynamischen Spannungseinträgen der unterschiedlichen Radlasten verdeutlicht jedoch, dass ab einer Radlast von 6,3Mg auch bei einmaliger Überfahrt von einer Schädigung des Bodengefüges bis in den Unterboden auszugehen ist. Unter Berücksichtigung realer Überrollhäufigkeiten, wurde mit Mehrfachüberfahrungsversuchen eine Abnahme der Bodenstabilität mit gleichzeitig zunehmender Tiefenwirkung der Spannungseinträge festgestellt, die eine erhöhte Unterbodenverdichtungsgefahr bewirkt. Die Bewertung und Empfehlung technischer Lasteinträge hinsichtlich eines nachhaltigen

Unterbodengefügeschutzes sollte sich daher immer am statischen Vorbelastungswert orientieren, der im gegebenen Fall bereits mit der Radlast 6,3Mg überschritten wurde.

Zu den untersuchten Indikatoren für die Charakterisierung der physikalischen Eigenschaften des Bodens zählen (1) der Vorbelastungswert, (2) die Luftkapazität, (3) die gesättigte Wasserleitfähigkeit und (4) die Luftleitfähigkeit.

(1) Am Beispiel der Vorbelastung wurde festgestellt, dass mit zunehmender Belastung die mittlere Stabilität der Böden von ursprünglich mittlerer zu hoher Vorbelastung bis in den Unterboden zugenommen hat. Die eigenen Untersuchungen zeigten, dass dieser Kennwert am unabhängigsten von den Rahmenbedingungen ist und er trotz existierender Bodenbearbeitungs- und Texturunterschiede die mechanische Reaktion des Bodens gegenüber den externen Belastungen differenziert aufzeigen konnte. Dieses Ergebnis isoliert betrachtet, wäre für die Befahrbarkeit oder Verdichtungsempfindlichkeit als positiv zu bewerten, ließe allerdings alle damit einhergehenden Veränderungen anderer den Porenraum betreffender Bodeneigenschaften außer Acht. Die Vorbelastung kann ohne zusammenhängende Betrachtung anderer Bodeneigenschaften nur indirekt als Maß für eine Gefügeveränderung verstanden werden, eine Beeinträchtigung ökologischer Bodenfunktionen vermag dieser Kennwert alleine nicht auszuweisen.

Eine Beurteilung der Verdichtungsgefährdung bzw. der auflastabhängigen Beeinträchtigung der Gefügefunktion ist nur dann möglich, wenn die Veränderungen mehrerer Kennwerte im Zusammenhang betrachtet werden. Mit der kombinierten Betrachtung der Parameter Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) (vgl. Indikatorsystem UBA (2004a)) war es möglich auflastabhängige Beeinträchtigungen des Bodengefüges aufzuzeigen und Bodenfunktionsänderungen zu bewerten.

(2/3) Beide Parameter (LK und kf) zeigten sich deutlich texturabhängig. Die Bestimmung von Verdichtungseffekten über diese Funktionskennwerte stellte sich als zweckmäßig für homogene, bindige Texturen heraus. Mit einmaligem Belastungsimpuls ließen sich nur für die Oberböden der Lössstandorte auflastinduzierte Reaktionen der Bodenfunktion gegenüber natürlichen Variationen abgrenzen, was unter der natürlichen Texturheterogenität des Geschiebemergels nicht möglich war. Mit zunehmender Überrollhäufigkeit reagierten beide Parameter im Löss mit signifikanten Veränderungen. Im Ausgangssubstrat Geschiebemergel reichte der gewählte Stichprobenumfang beider Kennwerte nicht aus, um Verdichtungseffekte gegenüber der natürlichen Heterogenität der Bodeneigenschaften hervorzuheben.

(4) Der Funktionskennwert Luftleitfähigkeit lässt in den Ausgangssubstraten Löss und Geschiebemergel keine signifikanten auflastabhängigen Beeinträchtigungen erkennen. Verengte Grobporen scheinen trotz komprimierender Verformung noch in der Lage zu sein die Luft zu leiten, die Beeinträchtigungen der Porengeometrie lässt sich anhand des Funktionskennwertes Luftleitfähigkeit mit dem viskoserem Fluid Luft nicht nachweisen.

Das Indikatorsystem zeigt sich mit den zwei gewählten Indikatoren und den angegebenen Schadschwellenwerten als sensibel gegenüber mechanischen Verdichtungsprozessen in homogenen, bindigen Texturen, setzt allerdings bodenkundlichen Sachverstand voraus, um

anthropogene bzw. technogene Verdichtungen von pedogenen oder geogenen abgrenzen zu können. Im Gesamtbild der durchgeführten Untersuchungen beweist dieses Konzept seine Anwendbarkeit für die Ermittlung von Gefügeschäden auf den Lössstandorten. Für wiederholte Lasteinträge, die nach dem Vorbelastungskonzept die mechanische Stabilität des Bodens überschreiten, wurden irreversible plastische Deformationen des Bodens anhand erhöhter Vorbelastungswerte festgestellt, die sich mit den gewählten Bodenfunktionsschadschwellenwerten eindeutig abbilden lassen und in horizontspezifischer Betrachtung sogar die Differenzierung unterschiedlicher Verdichtungsintensität erlauben.

Bei der Anwendung beider Konzepte ("Vorbelastung" und "Indikatorsystem") muss immer die Bodentextur berücksichtigt werden. Dabei sind für das Indikatorsystem Schadschwellenwerte für sandige Texturen zu ergänzen. Hinsichtlich der Untersuchungen in verschiedenen Ausgangssubstraten sind für beide Konzepte standortspezifische Stichprobenumfänge zu empfehlen, um Verdichtungseffekte, gerade bei kleinräumiger Texturheterogenität, deutlicher von natürlichen Variationen der Bodeneigenschaften hervorheben zu können.

Die statistisch sichere Bestimmung „schädlicher Bodenveränderungen“ (BBodSchG, 1998), bspw. im Verlauf eines Beweissicherungsverfahrens stellte sich auch für das homogene bindige Ausgangssubstrat Löss, mit häufig nur tendenziellen Beeinträchtigungen der einzelnen Indikatoren, als problematisch heraus. Für Mehrfachüberfahrungen war es möglich die Unterschreitung von Schadschwellenwerten und Beeinträchtigungen des Bodengefüges bis in den Unterboden z.T. als signifikant auszuweisen. Die Ergebnisse der einfachen Befahrungen zeigten dagegen häufig nur auf den Oberboden begrenzte, tendenzielle Unterschiede auf.



## 6 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der mechanischen Bodenbelastung durch landwirtschaftlichen Verkehr. Das ausgewählte Versuchskonzept ist dabei auf die Untersuchung der physikalischen Bodenbelastbarkeit in Gegenüberstellung zu dynamischen Lasteinträgen gerichtet und soll der Entscheidungsfindung hinsichtlich praktischer Handlungsempfehlungen dienen. Im Vordergrund stehen die Betrachtung nutzungsbedingter Verdichtung im Bodenbereich unterhalb der regelmäßig bearbeiteten Ackerkrume sowie die Bewertung unterschiedlicher technischer und pflanzenbaulicher Bodenschutzmaßnahmen.

Auf vier Versuchsflächen wurden die bodenkundlichen Ausgangsbedingungen durch Leitprofilbeprobungen ermittelt und landtechnische Freilandbelastungsversuche mit Bodendruck- und Deformationsmessungen sowie Beprobungen begleitet. Als Versuchsfaktoren wurden verschiedene Radlasten (3,3, 6,3, 7,5Mg) mit variierenden Reifeninnendrücker unter konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung in den Bodenregionen der nordrhein-westfälischen Löss- und Sandlösslandschaft und der schleswig-holsteinischen Jungmoränenlandschaft untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich insbesondere die Bodenbearbeitung, die Gesamtlast und der Reifeninnendruck auf die mechanische Belastung des Ackerbodens auswirken. Zwischen den beiden Ausgangssubstraten (Löss und Geschiebemergel) konnten keine signifikanten Unterschiede der Druckfortpflanzung festgestellt werden. Die konservierende Bodenbearbeitung zeigt im Oberboden eine höhere Strukturstabilität gegenüber der konventionell wendenden Bodenbearbeitung und weist hinsichtlich mechanischer Belastungen ein erhöhtes Druckkompensationsvermögen und eine verbesserte Reduktion scherender und komprimierender Bodenverformung mit der Tiefe auf. Die dynamischen Belastungsversuche der simulierten Maschinengewichte offenbaren mit schwereren Radlasten eine Zunahme der Spannungseinträge mit verstärkter Tiefenwirkung der Belastungsimpulse und eine erhöhte Gefahr der Unterbodenverdichtung. Für die landtechnische Maßnahme des abgesenkten Reifeninnendrucks konnten für die beiden Radlastvarianten 3,3 und 6,3Mg verminderte Kontaktflächendrücke, eine Abnahme der Spannungseinträge bis in den Unterboden und damit positive Effekte hinsichtlich der Bodenbelastung festgestellt werden.

Um die Stabilität des Bodens gegenüber Belastungssituationen eines landwirtschaftlichen Radfahrzeuges abzuschätzen, wurde das Druck-Zeit-Setzungsverhalten der Böden untersucht und statische und dynamische Stabilitäten der Böden über den Ödometerversuch bestimmt. Mit der Simulation des realen Spannungspfades einer Überfahrt im Laborversuch konnte die zu erwartende Stabilität der Böden für einmalige bis 10malige Überfahung ermittelt werden. Mit kurzer, dynamischer Belastung wurde dabei eine kurzfristig höhere Stabilität gegenüber der statischen Belastung verzeichnet.

Die Auswirkungen technogener Belastung auf die physikalischen Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen konnten über Einfach- und Mehrfachüberfahungsexperimente, bei denen die Eigenstabilität der Böden gezielt überschritten wurde, ermittelt werden.

Mit der Gegenüberstellung der horizontspezifischen Stabilitätsparameter zu den gemessenen Spannungseinträgen, unter Anwendung des Prüfkonzeptes „Vorbelastung“, war es möglich beurteilende Aussagen über die Verdichtungsgefährdung verschiedener Lastsituationen zu treffen. Aus den Ergebnissen der Spannungs- und Deformationsmessungen ließ sich für Radlasten ab 6,3Mg schon mit einmaliger Überrollung eine Unterbodenverdichtung verzeichnen. Eine bodenschonende Wirkung durch abgesenkten Reifeninnendruck und damit vergrößerte Reifenkontaktfläche und verminderten Kontaktflächendruck, konnte für die untersuchten Reifen/Radlastkombinationen nur für die Radlast 3,3Mg ausgewiesen werden. Für Radlasten >3,3Mg reichte die Abnahme des Kontaktflächendrucks mit der gewählten Reifenkombination nicht aus, um die Spannungseinträge unter den Vorbelastungswert zu beschränken und damit eine Stabilisierung der Lastsituation zu erreichen. Die 7,5Mg Variante zeigte in Verbindung mit der Kontaktflächenvergrößerung sogar negative Effekte mit Zunahme der Spannungseinträge im Unterboden. Mit ansteigender Überrollhäufigkeit wurde eine zunehmende Tiefenwirkung des Spannungseintrages mit gleichzeitiger Abnahme der Bodenstabilität festgestellt. Ab Radlasten >6,3Mg beschränkten sich gefügebeeinträchtigende, scherende Bodenbeanspruchungen nicht mehr allein auf den bearbeiteten Oberboden.

Das Ausmaß und die Auswirkung bzw. „Schadhaftigkeit“ der Belastungen auf das Bodengefüge und seine Funktionen wurden über die horizontspezifische Betrachtung der auflastabhängigen Veränderungen der Bodenkennwerte Vorbelastung (Pv), Luftkapazität (LK), gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) und Luftleitfähigkeit (kl) charakterisiert.

Am Beispiel der Vorbelastung wurde festgestellt, dass mit zunehmender Belastung die Stabilität der Böden z.T. signifikant bis in den Unterboden zugenommen hat. Die eigenen Ergebnisse zeigen, dass dieser Kennwert am wenigsten abhängig von den Rahmenbedingungen ist und er trotz existierender Bodenbearbeitungs- und Texturunterschiede die mechanische Reaktion des Bodens gegenüber den externen Belastungen differenziert aufzeigt. Der Funktionskennwert der Luftleitfähigkeit ( $pF_{1,8}$ ) weist dagegen in keinem Ausgangsubstrat eine auflastabhängige Beeinflussung durch einmalige Befahrung auf.

Die Beurteilung der Verdichtungsgefahr bzw. der auflastabhängigen Beeinträchtigung der Gefügefunktion ist nur dann möglich, wenn die Veränderungen mehrerer Kennwerte im Zusammenhang betrachtet werden. Mit der kombinierten Darstellung der Parameter Luftkapazität (LK) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) (nach Indikatorsystem UBA (2004a)), war es unter Berücksichtigung proklamierter Schadschwellenwerte möglich, auflastabhängige Beeinträchtigungen des Bodengefüges aufzuzeigen und Bodenfunktionsänderungen zu bewerten.

Die Bestimmung von Verdichtungseffekten über diese Funktionskennwerte stellte sich als zweckmäßig für homogene, bindige Texturen heraus. Mit einmaligem Belastungsimpuls ließen sich für die Oberböden der Lössstandorte, mit Abnahmen der hydraulischen Leitfähigkeit und Verringerung des Anteils an weiten Grobporen, auflastinduzierte

Reaktionen der Bodenfunktion schon ab 3,3Mg gegenüber natürlichen Variationen abgrenzen, was unter der natürlichen Texturheterogenität des Geschiebemergels nicht möglich war. Deutlich schadhafte Beeinträchtigungen beider Parameter ließen sich für Radlasten >6,3Mg feststellen. Mit zunehmender Überrollhäufigkeit reagierten die Bodenfunktionen im Löss mit signifikanter Beeinträchtigung und verstärkter Tiefenwirkung. Im Ausgangssubstrat Geschiebemergel reichte der gewählte Stichprobenumfang beider Kennwerte nicht aus, um Verdichtungseffekte gegenüber der natürlichen Heterogenität der Bodeneigenschaften hervorzuheben.

Schlagwörter:

Überfahrungsversuche, Bodendruckmessungen, Deformationsmessungen,  
dynamische Stabilität, bodenschonende Maßnahmen, Bodenkennwerte,  
Indikatorsystem

## 7 Abstract

The aim of the present work is to quantify mechanical soil degradation by agricultural traffic. The experimental concept is based on investigations of soil bearing capacity and dynamic soil loading to support decision making and give practical recommendations for sustainable land use. The investigations primarily focus on subsoil compaction and the assessment of different technical and horticultural measures for improving soil protection.

Initial soil physical conditions of four experimental sites were determined by standard physical laboratory analysis. Additionally wheeling experiments were carried out and accompanied by soil stress (Stress State Transducer) and deformation measurements (Displacement Transducer System). The impact of different wheel loads with varying inflation pressure (3.3, 6.3, 7.5Mg) was examined on two parent materials, glacial till and loess and on two tillage systems, conservation and conventional tillage.

Results revealed that particularly the tillage system, the total load and the inflation pressure have effects on the mechanical stress impact in agricultural used soil. However, there were no significant differences in stress distribution and stress penetration between soils derived from the two parent materials. In contrast the comparison of tillage systems showed an enhanced structural stability of the top soil under conservation tillage and thereby higher stress compensation accompanied by a stronger attenuation of shearing and compression with depth. The dynamic loading tests with various simulated machine weights revealed intensified stress impact and deeper stress transmission with heavier wheel loads, which means an increased risk for subsoil compaction. Lowering tire inflation pressure resulted in a reduction of ground pressures and diminished stress impacts up to 60cm depth for wheel loads of 3.3 and 6.3Mg.

In order to assess the soil stability in relation to different load situations of agricultural wheeled vehicles, stress strain relationship during short and long term uniaxial confined compression (oedometer tests) was examined and static and dynamic stability parameters were determined.

Simulating a real stress path, measured during a wheel passage, in laboratory tests allowed the determination of soil stability for single and up to ten wheel passes. Further, short term dynamic loading tests revealed temporary higher soil stability in relation to the consolidated static loading experiment.

The effects of dynamic loading on soil physical properties and ecological soil functions could be determined by single and multiple wheeling field experiments exceeding natural soil stability systematically.

The compaction endangerment of the different tire/load combinations was assessed by a horizon-specific comparison of soil stability parameters (precompression stress) and the measured stress impacts. For wheel loads >6.3Mg stress and deformation measurements of a single pass showed mechanical degradation of the soil structure down to the subsoil. Reduced tire inflation pressure serves as a method of soil protection due to increased tire contact area and decreased ground pressure only for the tire/load combination of 3.3Mg. For the selected tire and wheel loads >3.3Mg the reduction of contact ground pressure was not

sufficient to reduce stress impact below the precompression stress. For the 7.5Mg load even a negative effect of contact area enlargement was observed with increased stress impacts into the subsoil. Rising number of repeated wheel passes increased stress transmission into deeper soil layers accompanied by a reduction of soil stability. Wheel loads >6.3Mg generated structure-impairing shear deformations also in subsoil layers. The damage of the different loaded wheel passes on both soil structure and its ecological function was distinguished by horizon-specific consideration of the load-dependent changes in soil characteristics:(1) precompression stress ( $P_c$ ), (2) air capacity ( $A_c$ ), (3) saturated water conductivity ( $k_s$ ) and (4) air conductivity ( $k_l$ , pF 1.8).

With the example of precompression stress it was observed that increasing load raised (partly significantly) soil stability down to the subsoil. Further it appears that  $P_c$  is independent of experimental boundary conditions. This parameter is able to point out mechanical reactions of the soil caused by the external loads despite existing tillage and texture differences. For both parent materials characteristic value of air conductivity (pF1.8) demonstrated no significant influence of single wheel passes on soil aeration for the examined loads.

The combined changes of several characteristic values have to be considered for the assessment of compaction and load-dependent deterioration of soil structural functions. The application of the indicator system suggested by the *German Federal Environmental Agency UBA (2004a)*, where threshold values for  $A_c$  and  $k_s$  are suggested, *proved suitable* to assess load-dependent variations of soil structure and evaluate soil functional deterioration. The determination of mechanical compaction effects with these parameters turned out as appropriate for homogeneous, cohesive textures.

Single wheel passes on loess topsoils showed a load-dependent reduction of macropores and thus hydraulic conductivity. In these soils the load-induced reactions started from 3.3Mg and could clearly be separated from natural variations. This distinct separation could not be observed for the glacial till and its small-scale natural texture heterogeneity. Clear indication of soil functional deterioration was determined from wheel loads heavier than 6.3Mg. Increasing number of wheel passes intensified stress transmission into deeper soil layers and revealed significant impairment of soil functions and harmful soil compaction in loess soils. For soils derived from glacial till deposits the selected quantity of samples and repetitions was not sufficient to distinguish between load-induced compaction effects and natural heterogeneity of the soil properties.

Keywords:

soil stability, dynamic precompression load, dynamic load, wheeling experiments, stress and deformation measurements, conservation/conventional tillage, tire inflation pressure, saturated hydraulic conductivity, air capacity, indicator system

## 8 Literaturverzeichnis

- AD-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5). 5. verbesserte und erweiterte Auflage, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Schweitzbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 438 S.
- Alakukku, L., P. Weisskopf, W. C. T. Chamen, F. G. J. Tjink, J. P. van der Linden, S. Pires, C. Sommer, G. Spoor (2003): Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 1. Machine/soil interactions. *Soil & Tillage Research* **73**, S. 145-160
- Alakukku, L. (2000): Response of Annual Crops to Subsoil Compaction in a Field Experiment on Clay Soil Lasting 17 Years. In: R. Horn, J. J. H. van den Akker & J. Arvidsson Subsoil Compaction - Distribution, Processes and Consequences (Hrsg.), *Advances in Geocology* **32**, S. 205-208
- Arvidsson, J., T. Keller (2004): Soil precompression stress I. A survey of Swedish arable soils. *Soil & Tillage Research* **77** (1), S. 85-95
- Arvidsson, J., A. Trautner, T. Keller (2002): Influence of tyre inflation pressure on stress and displacement in the subsoil. In: M. Pagliai, Jones, R. (Hrsg.) *Sustainable Land Management - Environmental Protection – A Soil Physical Approach*, *Advances in Geocology* **35**, S. 331-338
- Arvidsson, J. (2001): Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southern Sweden - I. Soil physical properties and crop yield in six field experiments. *Soil & Tillage Research* **60** (1-2), S. 67-78
- Arvidsson, J. (1998): A new method of measurement of stress and compaction in the subsoil. In: *Reports from the Division of Soil Management* (Hrsg.), 45 S., Uppsala
- Bailey, A. C., R. L. Raper, C. E. Johnson, E. C. Burt (1995): An Integrated Approach to Soil Compaction Prediction. *Journal of Agricultural Engineering Research* **65** (1), S. 73-80
- Baumgartl, T., B. Koeck (2004): Modelling volume change and mechanical properties with hydraulic models. *Soil Science Society of America Journal* **68**, S. 57-65
- Baumgartl, T. (1991): Spannungsverteilung in unterschiedlich texturierten Böden und ihre Bedeutung für die Bodenstabilität. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel
- BBodSchG (1998): Gesetz zum Schutz des Bodens vom 17.03.1998. BGB, I. S.502
- Becher, H. H. (2004): Is the concentration factor k of an aggregated soil constant as the determining measure for the stress distribution in soils? *Journal of Plant Nutrition and Soil Science - Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **167** (4), S. 525-531
- Bengough, A. G., C. E. Mullins (1990): Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of Soil Science* **41**, S. 341-358
- Bishop, W. (1959): The principle of effective stress. In: T. Ukeblad. **106**, 39 S.
- Blake, G. R., K. H. Hartge (1986): Particle Density. In: A. Klute, *Methods of Soil Analysis Part I. Physical and Mineralogical Methods*. Madison (Wisconsin), USA, Amer. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. Amer., Agronomy Monograph no. 9 (2nd ed.), S. 363-375

- BMELV (2008): Verbreitung von Bodenschadverdichtungen in Südniedersachsen. In: Berichte über Landwirtschaft, **86**, Heft 2, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), Bonn
- BMELV (2008): Anwendbarkeit geophysikalischer, bodenphysikalischer und landtechnischer Methoden zur Bestimmung von flächenhaften Bodenverdichtungen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Abschlussbericht Forschungsvorhaben 03Hs003, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), Bonn
- BMVEL (2002): Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen und Bodenerosion. Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.), Bonn, 105 S.
- Bolling, I. (1984): Bodenverdichtung und Bereifung bei landwirtschaftlichen Fahrzeugen. Landtechnik **39** (10), S. 449-452
- Botta, G. F., D. Jorajuria, R. Balbuena, H. Rosatto (2004): Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycine max* L.) yields. Soil & Tillage Research **78** (1), S. 53-58
- Botta, G. F., D. Jorajuria, H. Rosatto, C. Ferrero (2006): Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. Soil & Tillage Research **86** (1), S. 9-14
- Boussinesq, J. (1885): Application des potentials à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastique. Gauthier-Villais, Paris
- Brandt-Sassen, H. (2004): Bodenschutz in der deutschen Landwirtschaft - Stand und Verbesserungsmöglichkeiten. Institut für Agrarökonomie, Dissertation, Georg-August-Universität, Göttingen
- Brandt, A. A., A. D. Zink, J. M. Reichert, D. J. Reinert, R. Horn (2007): Effect of the straw in the surface of the soil under the traffic of agricultural machines. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Bonito, MS
- Brümmer, W. G. (2001): Schadverdichtungen in Ackerböden - Entstehung, Folgen, Gegenmaßnahmen. 14. Wissenschaftliche Fachtagung, Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn
- Brunotte, J. (2007): Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur Minderung von Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig
- Brunotte, J., C. Sommer, M. Lebert (2001): A practice- oriented concept with solutions and results to the precaution against soil compaction. 14. Wissenschaftliche Fachtagung, Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, S. 136-149
- Burt, E. C., R. K. Wood, A. C. Bailey (1989): Effects of Dynamic Load on Normal Soil-Tire Interfaces Stresses. Transactions of the ASAE **32** (6), S. 1843-1846
- Casagrande, A. (1936): The determination of preconsolidation load and its practical significance. Proc. of the 1st Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Cambridge, S. 60-64
- Cooper, A. W., G. E. Vanden Berg, H. F. Mc Colly, A. E. Erickson (1975): Strain gauge cell measures soil pressure. Agricultural Engineering.
- Cramer, B. (2006): Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerböden. Dissertation, Institut für Nutzpflanzenwissenschaft und Ressourcenschutz. Fachbereich Bodenwissenschaften, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn

- Czyz, E. A. (2004): Effect of traffic on soil aeration, bulk density and growth of barley. *Soil & Tillage Research* **79** (1), S. 153-166
- da Silva, S. R., N. F. de Barros, L. M. da Costa, F. P. Leite (2008): Soil compaction and eucalyptus growth in response to forwarder traffic intensity and load. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo* **32** (3), S. 921-932
- Danfors, B. (1994): Changes in subsoil porosity caused by heavy vehicles. *Soil & Tillage Research* **29** (2), S. 135-144
- Defossez, P., G. Richard (2002): Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil & Tillage Research* **67** (1), S. 41-64
- Dexter, A. R. (1988): Advances in Characterization of Soil Structure. *Soil & Tillage Research* **11** (3-4), S. 199-238
- Dias Junior, M. S., F. J. Pierce (1995): A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technology* **8**, S. 139-151
- Diez, T., H. Weigelt (1997): Bodenstruktur erkennen und beurteilen. In: Sonderdruck DLZ Agrarmagazin, Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (Hrsg.), München
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (Hrsg.) (2000): "Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Eindimensionaler Kompressionsversuch." in Handbuch der Bodenuntersuchungen: Terminologie, Verfahrenstechnik und Datenblätter; physikalische, chemische, biologische Untersuchungsverfahren: gesetzliche Regelwerke. Grundwerk 2000, Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zürich
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (Hrsg.) (2000): "Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Scherfestigkeit - Teil 3: Direkter Scherversuch." In: Handbuch der Bodenuntersuchungen. Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zürich
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (Hrsg.) (2000): "Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des pH-Wertes (ISO 10390: 2005)." In: Handbuch der Bodenuntersuchungen. Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zürich
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (Hrsg.) (2000): "Bodenbeschaffenheit - Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse)." In: Handbuch der Bodenuntersuchungen. Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zürich
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (Hrsg.) (2000): "Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens - Laborverfahren (ISO 11274: 1998)." In: Handbuch der Bodenuntersuchungen. Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zürich
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (Hrsg.) (2000): "Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden - Verfahren mittels Siebung und Sedimentation." In: Handbuch der Bodenuntersuchungen. Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zürich
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) (Hrsg.) (2000): "Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Trockensubstanz und des Wassergehalts auf Grundlage der Masse - Gravimetrisches Verfahren (ISO 11465: 1993)." In: Handbuch der Bodenuntersuchungen. Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zürich
- Döll, H. (1999): Bewertung von Landwirtschaftsreifen nach agrotechnischen, ökologischen und technisch- energetischen Kriterien. Proceedings of the Conference "Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community", Commission of the European Communities, Directorate General for Agriculture, Wageningen, S. 86-94



- Durner, W. (2008): Bohrloch-Infiltration. Skript. Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik. TU Braunschweig, 7 S.
- DVWK (1997): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden; Teil 2: Auflastabhängige Veränderung von bodenphysikalischen Kennwerten. DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft Heft **235**, ATV-DVWK, Hennef
- DVWK (1995): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden; Teil 1: Mechanische Belastbarkeit. DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft Heft **234**, ATV-DVWK, Hennef
- DWD (2008): Ausgabe der Klimadaten: Tageswerte Station 10315 Münster-Osnabrück. <http://www.dwd.de/>, Datum des Zugriffs: 28.03.08
- Ehlers, W., D. Werner, T. Mähner (2000): Wirkung mechanischer Belastung auf Gefüge und Ertragsleistung einer Löss-Parabraunerde mit zwei Bearbeitungssystemen. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **163**, S. 321-333
- Elrick, D. E., W. D. Reynolds (1992): Methods for Analyzing Constant-Head Well Permeameter Data. *Soil Science Society of America Journal* **56** (1), S. 320-323
- Erkwoh, F. D. (1986): Bodenkarte von Nordrhein-Westfalen 1:50.000, Blatt L 4514 Soest. Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), Krefeld
- Fazekas, O. (2005): Bedeutung der Bodenstruktur und Wasserspannung als stabilisierende Kenngrößen gegen intensive mechanische Belastungen in einer Parabraunerde aus Löss unter Pflug- und Mulchsaat. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel
- Fazekas, O., R. Horn (2005): Interaction between mechanically and hydraulically affected soil strength depending on time of loading. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science - Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* **168** (1), S. 60-67
- Febo, P. (1999): Research and experiences on agricultural tyres to minimize soil compaction. Proceedings of the Conference "Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community", Commission of the European Communities, Directorate General for Agriculture, Wageningen
- Fleige, H., R. Horn, F. Stange (2002): Soil mechanical parameters derived from the CA-database on subsoil compaction. *Sustainable Land Management - Environmental Protection, Advances in Geoecology* **35**, S. 359-366
- Fleige, H., R. Horn (2000): Field experiments on the effect of soil compaction on soil properties, runoff, interflow and erosion. In: R. Horn, J. J. H. van den Akker & J. Arvidsson *Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences, Advances in Geoecology* **32**, S. 258-268
- Frede, H. G., S. Dabbert (1998): Handbuch zum Gewässerschutz in der Landwirtschaft. Ecomed, Landsberg
- Frielinghaus, M., H. Petelkau, K. Seidel, B. Winnige, L. Völker (2002): Beiträge zum Bodenschutz in Mecklenburg-Vorpommern-Bodenverdichtung. Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung ZALF e.V., Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg- Vorpommern (Hrsg.)
- Fröhlich, O. K. (1934): Druckverteilung im Baugrunde. Springer Verlag, Wien
- Gebhardt, S., H. Fleige, R. Horn (2009): Effect of compaction on pore functions of soils in a North German Saalean moraine landscape. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **in Press**
- Gebhardt, S. (2007): Wasserhaushalt und Funktion der Böden im Grundwasserabsenkbereich des Wasserwerkes Wacken in Schleswig-Holstein.

- Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel
- Geischeder, R., M. Demmel (2006): Landtechnische Möglichkeiten zur Vermeidung von schädigenden Bodenbelastungen im Ackerbau. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) **21**, S. 75-88
- Glinski, J., W. Stepniewski (1985): Soil Aeration and Its Role for Plants. 229 S., CRC Press, Boca Raton, Fl.
- Gräsele, W. (1999): Numerische Simulation mechanischer, hydraulischer und gekoppelter Prozesse in Böden unter Verwendung der Finite Elemente Methode. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel
- Grecenko, A. (2003): Tire load rating to reduce soil compaction. Journal of Terramechanics **40**, S. 97-115
- Guerif, J. (1984): The Influence of Water-Content Gradient and Structure Anisotropy on Soil Compressibility. Journal of Agricultural Engineering Research **29** (4), S. 367-374
- Gysi, M., A. Ott, H. Fluhler (1999): Influence of single passes with high wheel load on a structured, unploughed sandy loam soil. Soil & Tillage Research **52** (3-4), S. 141-151
- Hakansson, I. (2005): MACHINERY-INDUCED COMPACTION of ARABLE SOILS INCIDENCE-CONSEQUENCES-COUNTER-MEASURES. Swedish University of Agricultural Sciences Department of Soil Science, Uppsala, 109 S.
- Hakansson, I., R. C. Reeder (1994): Subsoil Compaction by Vehicles with High Axle Load Extent, Persistence and Crop Response. Soil & Tillage Research **29** (2-3), S. 277-304
- Hammel, J. E. (1994): Effect of High-Axle Load Traffic on Subsoil Physical-Properties and Crop Yields in the Pacific-Northwest USA. Soil & Tillage Research **29** (2-3), S. 195-203
- Hamza, M. A., W. K. Anderson (2005): Soil compaction in cropping systems; A review of the nature, causes and possible solutions. Soil & Tillage Research **82**, S. 121-145
- Hartge, K. H., R. Horn (1999): Einführung in die Bodenphysik. 3. überarbeitete Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- Hartge, K. H., R. Horn (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- Hartge, K. H. (1967): Der Zusammenhang zwischen Luft- und Wasserpermeabilität in Bodenproben. Journal of Plant Nutrition and Soil Science - Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde **117**, S. 97-107
- Hernanz, J. L., V. Sánchez-Girón (2000): Compaction Effects Due to Field Traffic on Soil Properties and the Response of Different Crops in Three Tillage Systems. In: R. Horn, J. J. H. van den Akker & J. Arvidsson Subsoil Compaction. Advances in Geoecology **32**, S. 269-277
- Hohnvehlmann, J. (1963): Vergesellschaftung, Entstehung und Eigenschaften der Böden im Soester Hellweggebiet. Dissertation, Landwirtschaftliche Fakultät, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn
- Horn, R., H. Fleige (2008): Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany. Soil & Tillage Research **102** (1), S. 201-208

- Horn, R., A. Smucker (2005): Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil & Tillage Research* **82** (1), S. 5-14
- Horn, R., H. Fleige, F. H. Richter, E. A. Czyz, A. Dexter, E. Diaz-Pereira, E. Dumitru, R. Enarache, F. Mayol, K. Rajkai, D. de la Rosa, C. Simota (2005): SIDASS project - Part 5: Prediction of mechanical strength of arable soils and its effects on physical properties at various map scales. *Soil & Tillage Research* **82** (1), S. 47-56
- Horn, R. (2004): Time Dependence of Soil Mechanical Properties and Pore Functions of arable Soils. *Soil Science Society of America Journal* **68** (4), S.1131-1137
- Horn, R. (2003): Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. *Geoderma* **116**, S. 77 – 88
- Horn, R., H. Fleige (2003): A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil & Tillage Research* **73** (1-2), S. 89-99
- Horn, R. (2002): Stress strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. Paper no. 387. 17 WCSS, 14-21August, Thailand
- Horn, R. (2001): Soil deformation- causes and consequences for a sustainable landuse. 14.Wissenschaftliche Fachtagung, Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn
- Horn, R., J. J. H. van den Akker, J. Arvidsson (2000): Subsoil Compaction - Distribution, Processes and Consequences. *Advances in Geoecology* **32**, Reiskirchen
- Horn, R., J. Rostek (2000): Subsoil Compaction Processes- State of Knowledge. In: R. Horn, J. J. H. van den Akker & J. Arvidsson Subsoil Compaction, *Advances in Geoecology* **32**, S. 44-54
- Horn, R., C. Wiermann (1999): Input parameters for soil mechanical properties -Theory and first approach-. Proceedings of the Conference "Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community", Commission of the European Communities, Directorate General for Agriculture, Wageningen, S.132-155
- Horn, R., B. G. Richards, W. Gräsele, T. Baumgartl, C. Wiermann (1998): Theoretical principles for modelling soil strength and wheeling effects -a review-. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **161**, S. 333-346
- Horn, R., H. Domzal, A. Slowinskajurkiewicz, C. Van Ouwerkerk (1995): Soil Compaction Processes and Their Effects on the Structure of Arable Soils and the Environment. *Soil & Tillage Research* **35** (1-2), S. 23-36
- Horn, R., M. Lebert (1994): Soil Compactability and Compressibility. In: B. D. Soane & C. van Ouwerkerk, *Soil Compaction in Crop Production*. Amsterdam, Elsevier, S. 45-69
- Horn, R., D. Werner, T. Baumgartl, C. Winterot (1994): Wirkung technogener Druckbelastung auf die Spannungsverteilung und das Bodengefüge einer Schwarzerde aus Löß. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **157**, S. 433-440
- Horn, R. (1993): Mechanical-Properties of Structured Unsaturated Soils. *Soil Technology* **6** (1), S. 47-75
- Horn, R., T. Baumgartl, H. Roweck, C. Köbbemann (1993): Versuchsgut Hohenschulen - Bodenkundliche Untersuchungen im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 192. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **70**, S. 275-286
- Horn, R., C. Johnson, H. Semmel, R. Schafer, M. Lebert (1992): Räumliche Spannungsmessungen mit dem Stress State Transducer (SST) in ungesättigten aggregierten Böden -theoretische Betrachtungen und erste Ergebnisse. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **155** (4), S. 269-274

- Horn, R., K. H. Hartge (1990): Effects of Short-Time Loading on Soil Deformation and Strength of an Ameliorated Typic Paleustalf. *Soil & Tillage Research* **15**(3), S. 247-256
- Horn, R., M. Kirby, T. Baumgartl (1989): Einfluß der Belastungsdauer auf die Spannungsverteilung in Böden. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **59** (1), S. 185-186
- Horn, R., M. Burger, M. Lebert, G. Badewitz (1986): Druckfortpflanzung in Böden unter langsam fahrenden Traktoren. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung* **28**, S. 94-102
- Horn, R. (1986): Auswirkung unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf die mechanische Belastbarkeit von Ackerböden. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **149** (1), S. 9-18
- Horn, R. (1981): Eine Methode zur Ermittlung der Druckbelastung von Böden anhand von Drucksetzungsversuchen. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung* **22**, S. 20-26
- Horn, R. (1980): Die Ermittlung der vertikalen Druckfortpflanzung im Boden mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung* **21**, S. 343-349
- Janetzko, P., R. Schmidt (1996): Norddeutsche Jungmoränenlandschaften. In: H. P. Blume *Handbuch des Bodenschutzes*. Landsberg, Ecomed
- Janßen, I. (2008): Landnutzungsabhängige Dynamik hydraulischer und mechanischer Bodenstrukturfunktionen in Nassreisböden. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel
- Jones, R. J. A., G. Spoor, A. J. Thomasson (2003): Vulnerability of subsoils in Europe to compaction: a preliminary analysis. *Soil & Tillage Research* **73** (1-2), S.131-143
- Keller, T. (2004): Soil Compaction and Soil Tillage- Studies in Agricultural Soil Mechanics. Dissertation, Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala
- Keller, T., J. Arvidsson (2004): Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil & Tillage Research* **79** (2), S. 191-205
- Keller, T., J. Arvidsson, J. B. Dawidowski, A. J. Koolen (2004): Soil precompression stress II. A comparison of different compaction tests and stress-displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil & Tillage Research* **77** (1), S.97-108
- Kezdi, A. (1969): *Handbuch der Bodenmechanik*. VEB Verlag, Berlin
- Kirby, M. (2007): Whither soil compaction research? *Soil & Tillage Research* **93** (2), S. 472-475
- Kirby, M. (1999): Soil Stress Measurement: Part I. Transducer in a Uniform Stress Field. *JOURNAL OF AGRICULTURAL ENGINEERING RESEARCH* **72**, S. 151-160
- Kmoch, H. G., H. Hanus (1965): Vereinfachte Methodik und Auswertung der Permeabilitätsmessung des Bodens für Luft. *Zeitschrift für Pflanzenernährung Düngung und Bodenkunde* **111** (1), S. 1-10
- Koch, H.-J., H. Heuer, O. Tomanová, B. Märländer (2008): Cumulative effect of annually repeated passes of heavy agricultural machinery on soil structural properties and sugar beet yield under two tillage systems. *Soil & Tillage Research* **101**, S. 69-77

- Kooistra, J. M., N. K. Tovey (1994): Effects of compaction on soil microstructure. In: B. D. Soane & C. van Ouwerkerk Soil Compaction in Crop Production, Elsevier Science, S. 91-111
- Koolen, A. J., H. Kuipers (1983): Agricultural Soil Mechanics. Advanced Series in Agricultural Sciences 13, Springer Verlag, Heidelberg
- Krümmelbein, J., S. Peth, R. Horn (2008): Determination of pre-compression stress of a variously grazed steppe soil under static and cyclic loading. Soil & Tillage Research **99**, S. 139-148
- KTBL (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschutz - Schlussfolgerung für gute fachliche Praxis. In: Arbeitspapier **266**, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.), Darmstadt
- Kühner, S. (1997): Simultane Messung von Spannung und Bodenbewegungen bei statischen und dynamischen Belastungen zur Abschätzung der dadurch induzierten Bodenbeanspruchung. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel
- Lal, R. (1996): Axle load and tillage effects on crop yields on a Mollic Ochraqualf in Northwest Ohio. Soil & Tillage Research **37** (2-3), S. 143-160
- Lamandé, M., P. Schjonning (2008): The ability of agricultural tyres to distribute the wheel load at the soil-tyre interface. Journal of Terramechanics **45** (4), S. 109-120
- Lamandé, M., P. Schjonning, F. A. Togersen (2007): Mechanical behaviour of an undisturbed soil subjected to loadings: Effects of load and contact area. Soil & Tillage Research **97** (1), S. 91-106
- LANU (2006): Böden Schleswig-Holsteins; Entstehung, Verbreitung, Nutzung, Eigenschaften und Gefährdung. Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, Schriftenreihe LANU SH – Dezernat Geologie und Boden, 108 S.
- Lebert, M., H. Boken, F. Glante (2007): Soil compaction - indicators for the assessment of harmful changes to the soil in the context of the German Federal Soil Protection Act. Journal of Environmental Management **82** (3), S. 388-397
- Lebert, M., J. Brunotte, C. Sommer, H. Boken (2006): Protecting soil structure against compaction - proposed solutions to safeguard agricultural soils. Journal of Plant Nutrition and Soil Science - Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde **169** (5), S. 633-641
- Lebert, M., J. Brunotte, C. Sommer (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden / Regelungen zur Gefahrenabwehr. Umweltbundesamt (Hrsg.), UBA Texte **46/04**
- Lebert, M., W. Schäfer (2005): Verdichtungsgefährdung niedersächsischer Ackerböden. Bodenschutz (2), S. 42-46
- Lebert, M., W. Schäfer (2005): Landwirtschaft/Bodenverdichtung - Verdichtungsgefährdung Niedersächsischer Ackerböden. Bodenschutz **10** (2), S. 42-46
- Lebert, M., N. Burger, R. Horn (1989): Effects of dynamic and static loading on compaction of structured soils. NATO ASI SERIES E: APPLIED SCIENCES 172, Kluwer Academic Publishers, S. 73-80
- Lebert, M. (1989): Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Dissertation, Fakultät für Biologie, Chemie, und Geowissenschaften, Universität Bayreuth

- Lebert, M., N. Burger, R. Horn (1987): Die Bedeutung des Bodengefüges und der Belastungsdauer für die Druckfortpflanzung. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft **55** (1), S. 187-192
- LfL (2006): Ackerbau vor neuen Herausforderungen. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), Schriftenreihe Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik **21**, München, S. 1-93
- LfL (1997): Mechanische Bodenbelastung durch landwirtschaftliche Pflanzenproduktion in Bayern. Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau (Hrsg.), In: Bodenkultur und Pflanzenbau, Heft **7**, München
- Lindstrom, M. J., W. B. Voorhees (1994): Responses of temperate crops in North America. In: B. D. Soane & C. van Ouwerkerk Soil Compaction in Crop Production. Amsterdam, Elsevier, S. 265-286.
- Lütke Entrup, N. (1999): Stickstoffdynamik während und nach dem Anbau von Körnerleguminosen (Ackerbohnen) und Stickstoffaustrag mit dem Dränwasser bei konventioneller und konservierender Bodenbearbeitung. Universität Paderborn (Hrsg.), Soest
- Materechera, S. A., A. M. Alston, J. M. Kirby, A. R. Dexter (1992): Influence of Root Diameter on the Penetration of Seminal Roots into a Compacted Subsoil. Plant and Soil **144** (2), S. 297-303
- MURL (1989): Klimaatlas von NRW, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), Düsseldorf
- MLUV (2000): Ermittlung des Verdichtungswiderstandes des Landes Brandenburg und Bewertung von Landmaschinen und landwirtschaftlichen Anbauverfahren hinsichtlich der Beeinträchtigung von Bodenfunktionen durch die Verursachung von schwer regenerierbaren Schadverdichtungen. Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg (Hrsg.), Potsdam
- Newmark, N. M. (1942): Influence charts for computation of stress in elastic foundations. Eng. Exp. Stat. Bull. Series No.338, University of Illinois, Urbana
- Nichols, T. A., A. Bailey, C. Johnson, R. Grisso (1987): A stress state Transducer for soil. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers **30** (5), S. 1237-1241
- Pagliai, M., A. Marsili, P. Servadio, N. Vignozzi, S. Pellegrini (2003): Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. Soil & Tillage Research **73** (1-2), S. 119-129
- Petelkau, H. (1998): Bodenbearbeitung und Bodenschadverdichtung. In, Bodenbearbeitung und Bodenschutz - Schlußfolgerungen für gute fachliche Praxis. Darmstadt, KTBL. **266**.
- Peth, S., R. Horn (2007): Reply to comment on "Heavy soil loading and its consequences for soil structure, strength, and deformation of arable soils" of H.J. Koch and B. Märkländer. Journal of Plant Nutrition and Soil Science **170** (5), S. 696-698
- Peth, S., R. Horn (2006): The mechanical behavior of structured and homogenized soil under repeated loading. Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Für Pflanzenernahrung Und Bodenkunde **169** (3), S. 401-410
- Peth, S. (2004): Bodenphysikalische Untersuchungen zur Trittbelastung von Böden bei der Rentierweidewirtschaft an borealen Wald- und subarktisch-alpinen Tundrenstandorten. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernahrung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel

- Pytka, J. (2005): Effects of repeated rolling of agricultural tractors on soil stress and deformation state in sand and loess. *Soil & Tillage Research* **82** (1), S. 77-88
- Radford, B. J., B. J. Bridge, R. J. Davis, D. McGarry, U. P. Pillai, J. F. Rickman, P. A. Walsh, D. F. Yule (2000): Changes in the properties of a Vertisol and responses of wheat after compaction with harvester traffic. *Soil & Tillage Research* **54** (3-4), S.155-170
- Raper, R. L. (2005): Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics* **42** (2), S.259-280
- Raper, R. L., A. C. Bailey, E. C. Burt, T. R. Way, P. Liberati (1995): Inflation Pressure and dynamic load effects on soil deformation and soil-tire interface stresses. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **38** (2), S. 658-689
- Reintam, E., J. Kuht, K. Trükmann, V. Raats (2006): Soil compaction and fertilization effect on weed community and nutrient uptake on spring barley field. *Soil Management for Sustainability* **38**, S. 157-164
- Reynolds, W. D., D. E. Elrick (1991): Determination of Hydraulic Conductivity Using a Tension Infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* **55** (3), S. 633-639
- Reynolds, W. D., D. E. Elrick (1990): Poned infiltration from a single ring: I. Analysis of steady Flow. *Soil Science Society of America Journal* **54** (5), S. 1233-1241
- Richard, G., H. Boizard, J. Roger-Estrade, J. Boiffin, J. Guerif (1999): Field study of soil compaction due to traffic in northern France: pore space and morphological analysis of the compacted zones. *Soil & Tillage Research* **51** (1-2), S. 151-160
- Richard, G., I. Cousin, J. F. Sillon, A. Bruand, J. Guerif (2001): Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science* **52** (1), S. 49-58
- Richter, F.-H. (2005): Vergesellschaftung und Eigenschaften von Böden unterschiedlicher Geomorpher Einheiten einer Jungmoränenlandschaft des Ostholsteinischen Hügellandes. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel
- Richter, F. H., R. Horn, H. Fleige (2003): Mechanical stability of soils derived from moraine material. *Proceedings of 16. ISTRO Conference Brisbane*, S. 997-1002
- Richter, G. (1998): Bodenerosion- Analyse und Bilanz eines Umweltproblems. *Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt*, 264 S.
- Ruhm, E. (1983): Schlechte Voraussetzungen für eine gute Ernte. *Hannoversche land- und forstwirtschaftliche Zeitung* **4**, S. 3-4
- Rusanov, V. A. (1994): Ussr Standards for Agricultural Mobile Machinery - Permissible Influences on Soils and Methods to Estimate Contact Pressure and Stress at a Depth of 0.5-M. *Soil & Tillage Research* **29** (2-3), S. 249-252
- Schäfer-Landefeld, L., R. Brandhuber, S. Fenner, H. J. Koch, N. Stockfisch (2004): Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields. *Soil & Tillage Research* **75**, S. 75-86
- Scheffer, F., P. Schachtschabel (2002): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Schjonning, P., M. Lamande, F. A. Togersen, J. Arvidsson, T. Keller (2006): Distribution of Vertical Stress at the Soil- Tyre Interface: Effects of Tyre Inflation Pressure and the Impact on Stress Propagation in the Soil Profile. In: *Advances in Geocology* **38**, S. 38-46

- Schlichting, E., H.-P. Blume, K. Stahr (1995): *Bodenkundliches Praktikum.2*, Blackwell, Berlin
- Schulze Lammers, P., M. Tschepe, J. Strätz (2001): Bodenbelastung durch Rad- und Achslasten von Landmaschinen in der Zuckerrübenenernte. 14. Wissenschaftliche Fachtagung: Schadverdichtung in Ackerböden, Bonn, S. 150-157
- Schwärzel, K., J. Punzel (2007): Hood Infiltrometer- A New Type of Tension. *Soil Science Society of America Journal* **71** (5), S. 1438-1447
- Semmel, H., R. Horn (1994): Spannungen und Spannungsverteilung in Ackerböden aufgrund von Befahrungen - Überlegungen zur Druckfortpflanzung und der mechanischen Belastbarkeit. *Landbauforschung Völkenrode* **147**, S. 41-61
- Semmel, H. (1993): Auswirkungen kontrollierter Bodenbelastung auf das Druckfortpflanzungsverhalten und physikalisch-mechanische Kenngrößen von Ackerböden. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel
- Soane, B. D., C. van Ouwerkerk (1994): *Soil compaction in Crop Production.11*, Elsevier
- Soane, B. D., P. S. Blackwell, J. W. Dickson, D. J. Painter (1980a): Compaction by agricultural vehicles: a review I. Soil and wheel characteristics. *Soil & Tillage Research* **1** (1), S. 207-237
- Soane, B. D., P. S. Blackwell, J. W. Dickson, D. J. Painter (1980b): Compaction by agricultural vehicles: A review II. Compaction under tyres and other running gear. *Soil & Tillage Research* **1** (1), S. 373-400
- Söhne, W. (1953): Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. *Grundlagen der Landtechnik* **Heft 5**, S. 49-63
- Söhne, W. (1951): Das mechanische Verhalten des Ackerbodens bei Belastungen, unter rollenden Rädern sowie bei der Bodenbearbeitung. *Grundlagen der Landtechnik* (Heft 1), S. 87-94
- Sommer, C., M. Lebert, J. Brunotte (2003): Indikatoren zum physikalischen Bodenschutz – warum, wofür, wie? In: DAV, *Umweltindikatoren – Schlüssel für eine umweltverträgliche Land- und Forstwirtschaft*. Frankfurt am Main, Schriftenreihe Agrarspectrum **36**, S.175-186
- Sommer, C. (1998): Ein Konzept zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen in der pflanzlichen Produktion. *Bodenschutz* **1**, S. 12-16
- Sommer, C. (1985): Ursache und Folgen von Bodenverdichtung sowie Möglichkeiten zu ihrer Verminderung. *Landtechnik* **9** (40), S. 378-383
- SMUL (2005): Bodendruck und Bodenbelastbarkeit. In: Schriftenreihe der sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.), Leipzig
- Stahl, H., W. Schmidt, U. Gierke (2001): Beratung zur guten fachlichen Praxis zum Schutz des Bodengefüges - Ansätze, Strategien, offene Fragen. 14.Wissenschaftliche Fachtagung, Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, S. 101-113
- Stemann, G., D. Jenschke, N. Lütke Entrup (2005): *Versuchsfeldführer - Versuchsgut Merklingsen*. Fachbereich Agrarwirtschaft Fachhochschule Südwestfalen (Hrsg.), Soest
- Stepniewski, W., Z. Stepniewska (2009): Selected oxygen-dependent process—Response to soil management and tillage. *Soil & Tillage Research* **102** (1), S. 193-200



- Stepniewski, W., J. Glinski, B. C. Ball (1994): Effects of compaction on soil aeration properties. In: B. D. Soane & C. van Ouwerkerk (Hrsg.) Soil Compaction in Crop Production. Amsterdam, Elsevier 167-189
- Stepniewski, W. (1981): Oxygen diffusion and strength as related to soil compaction. II Oxygen diffusion coefficient. Polish Journal of Soil Science **14** (3)
- Terzaghi, K., R. Jelinek (1954): Theoretische Bodenmechanik. Springer Verlag
- TLL (2008): Risikoanalyse zur Schadverdichtung in der Thüringer Landwirtschaft. Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt (Hrsg.), Jena
- Tijink, F. G. J., H. Döll, G. D. Vermeulen (1995): Technical and economic feasibility of low ground pressure running gear. Soil & Tillage Research **35** (1), S. 99-110
- Trautner, A., J. Arvidsson (2003): Subsoil compaction caused by machinery traffic on a Swedish Eutric Cambisol at different soil water contents. Soil & Tillage Research **73** (1), S. 107-118
- UBA (2004a): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden / Regelungen zur Gefahrenabwehr. Umweltbundesamt (Hrsg.), Texte **46/04**, Berlin, 122 S.
- UBA (2004b): Bodenschutz und landwirtschaftliche Bodennutzung - Umweltwirkungen am Beispiel der konservierenden Bodenbearbeitung. Gemeinsame Fachveranstaltung der Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung (GKB e.V.), Umweltbundesamt (Hrsg.), Texte **35/04**, Berlin, 143 S.
- Utomo, W. H., A. R. Dexter (1981): Age Hardening of Agricultural Top Soils. Journal of Soil Science **32** (3), S. 335-350
- van den Akker, J. J. H., J. Arvidsson, R. Horn (2003): Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. Soil & Tillage Research **73** (1-2), S. 1-8
- van den Akker, J. J. H., A. Canarache (2001): Two European concerted actions on subsoil compaction. Landnutzung und Landentwicklung **42**, S. 15-22
- van den Akker, H. (1994): Comparison of stress, compactions and increase of penetration resistances caused by a low ground pressure tyre and a normal tyre. Soil & Tillage Research **29** (2), S. 125-134
- van der Ploeg, R., M. Gieska, P. Schweigert (2001): Landschaftshydrologische und hochwasserrelevante Aspekte der ackerbaulichen Bodenbewirtschaftung in der deutschen Nachkriegszeit. Berichte über Landwirtschaft **79**, S. 447-465
- Volk, L., S. Denker (2008): Diesel sparen beim Fahren -Bodenschutz und Deseffizienz werden auch vom Fahrer beeinflusst-. Neue Landwirtschaft **1** (dlv), S. 1-3
- Voßbrink, J. (2005): Bodenspannungen und Deformationen in Waldböden durch Ernteverfahren. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel
- Voßbrink, J., R. Horn (2004): Modern forestry vehicles and their impact on soil physical properties. European Journal of Forest Research **123** (4), S. 259-267
- Way, T. R., T. Kishimoto, E. C. Burt, A. C. Bailey (2000): Soil-Tire Interface Pressures of a Low Aspect Ratio Tractor Tire. In: R. Horn, J. J. H. van den Akker & J. Arvidsson, Subsoil Compaction, Advances in Geocology. **32**, S. 82-92

- Werner, D., R. Paul (1999): Kennzeichnung der Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. *Wasser und Boden* **51**, S. 10-14
- Weyer, T., W. Buchner (2001): Bodenschadverdichtungen- Ausmaß, Ursachen, Wirkungen und Lösungsansätze. Fachhochschule Südwestfalen. Tagungsband der Fachtagung "Bodenbewirtschaftung im Umbruch", Soest
- Wiermann, C., D. Werner, R. Horn, J. Rostek, B. Werner (2000): Stress/strain processes in a structured unsaturated silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. *Soil & Tillage Research* **53** (2), S.117-128
- Wiermann, C., T. R. Way, R. Horn, A. C. Bailey, E. C. Burt (1999): Effect of various dynamic loads on stress and strain behavior of a Norfolk sandy loam. *Soil & Tillage Research* **50** (2), S.127-135
- Wiermann, C. (1998): Auswirkung differenzierter Bodenbearbeitung auf die Bodenstabilität und das Regenerationsvermögen lößbürtiger Ackerstandorte. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel
- Wiermann, C., M. Langmaack, R. Röhrig, S. Schrader, R. Horn, O. Larink (1997): Mehrjährige Untersuchung zur Regeneration von Bodenstruktur und Enchytraeiden-Abundanzen nach mechanischer Belastung. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* **85** (3), S. 1611-1614
- Wood, R. K., E. C. Burt, C. E. Johnson (1991): Dynamic Load Effects on Thrust Components Along The Soil-Tire Contact Zone. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **34** (1), S. 43-46
- Wooding, R. A. (1968): Steady Infiltration from a Shallow Circular Pond. *Water Resources Research* **4** (6), S. 1259-1263
- Yavuzcan, H. G., D. Matthies, H. Auernhammer (2005): Vulnerability of Bavarian silty loam soil to compaction under heavy wheel traffic: impacts of tillage method and soil water content. *Soil & Tillage Research* **84** (2), S. 200-215
- Zink, A., H. Fleige, R. Horn (2008): Zur mechanischen Stabilität von Kalkmarschen-Bodenstabilitätsmessungen und Überfahrungsversuche in Dithmarschen. <http://www.dbges.de>, Berichte der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft online Tagungsbeitrag zur Sitzung der Kommission V der DBG, Oldenburg
- Ziogas, G. (1995): Geologie und Böden der Versuchsbetriebe Lindhof und Hohenschulen der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Quartärgeologische und bodenkundliche Kartierung, Genese, Vergesellschaftung, Ökologie, Funktionen. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel

## 9 Anhang

### Tabellenanhang

*Tabelle A 1: Bodenbearbeitung und Fruchtfolge auf den Versuchsfeldern in Nordrhein Westfalen 2000 bis 2008*

	Aussaat	NRW kons vorgehende BB	Aussaat	NRW konv vorgehende BB
2000	WW	2x Grubber Kreiselegge 5cm	WG	2x Grubber 15cm Pflug 28cm Kreiselegge
2001	Körnererbse	SRR-egge 5cm Kreiselegge 5cm	WR	2x Grubber 15cm Pflug 28cm; Kreiselegge
2002	Körnermais	SPR-egge 7cm Mulchsaat (flach)	ZR	2x Grubber 15cm Pflug 28cm; Kreiselegge
2003	WW	2x Sch.-egge 8cm Scheibenegge 6cm	WW	2x Grubber 15cm Pflug 28cm; Kreiselegge
2004	WH	Scheibenegge 5cm Universaleggen 10cm Kreiselegge 5cm	WW	Grubber 12cm
2005	WG	2x Schegge 6cm Univ.-egge 6cm Kreiselegge 6cm	Gelbsenf	Grubber 12cm
2006	Ölrettich	Grubber 8cm MOVIS Kreiselegge 5cm	Ölrettich	Pflug 28cm MOVIS Grubbersaat
2007	SR	MOVIS Grubber 12cm (2006) MOVIS Grubber 8cm (2007)	SR	MOVIS Grubber 12cm (2006) MOVIS Grubber 8cm (2007) MOVIS
2008	Silomais	MOVIS Grubber 12cm MOVIS Parapflug 40cm	ZR	Tiefenlockerer 35cm MOVIS Pflug 28cm

**Tabelle A 2: Bodenbearbeitung und Fruchtfolge auf den Versuchsfeldern in Schleswig-Holstein 2000 bis 2008**

	Aussaat Ost/West	SH kons vorgehende BB	Aussaat	SH konv vorgehende BB
2000	WR / WG	2x Grubber 8cm Grubber 15cm Kreiselegge	WW	Scheibenegge Pflug
2001	WW / WR	2x Grubber 8cm Grubber 15cm; Kreiselegge	Kleegrass	2x Striegel
2002	WG / WW	2x Grubber 8cm Grubber 15cm; Kreiselegge	SHA	2x Scheibenegge Pflug
2003	WR / WG	2x Schichtengrubber 8cm Schichtengrubber 20cm	Kartoffeln	Scheibenegge; Grubber Dämme aufgefplügt; Separiert
2004	WW / WR	2x Schichtengrubber 8cm Schichtengrubber 20cm	Erbsen	Grubber Rohphosphat gestreut Pflug
2005	WG / WW	2x Schichtengrubber 8cm Schichtengrubber 20cm	SW Untersaat: Kleegrass	3x Sch.-egge
2006	WR / WG	2x Schichtenegge 5cm Schichtengrubber 20cm Kreiselegge	Kleegrass	Mulcher
2007	WW / WW	2x Scheibenegge 5cm Schichtengrubber 20cm Kreiselegge	SHA	2x Scheibenegge Pflug 28cm
2008			Kartoffeln	2x Scheibenegge 2x Grubber Pflug ,Dämme aufgefplügt; Separiert

**Tabelle A 3: Ermittelte Verformungsraten der Versuchsvarianten aus DTS Feldmessungen**

Variante/Messtiefe	Verformungsrate, % im Feldversuch		
	20cm	40cm	Gesamt
A1	13	9	11
A2	20	13	16
A3	19	7	16
B1	12	6	10
B2	19	8	16
B3	19	10	17

Tabelle A 4: Statistische Teilvergleiche des Versuchsfaktors Bodenart; P-Werte und Signifikanzniveaus nach Wilcoxon-Rangsummentest; Signifikanzniveaus \*(95%), \*\*(99%), \*\*\*(99,9%)

Vergleich der Bodenarten im Spannungseintrag						
Messtiefe 20cm			Signifikanz			
Vergleich	p.val.adj	p.val.raw	niveau	Bewirtschaftung	Reifendruck	Auflast
loess-geschiebemergel	1,000	0,190		mulch	A	3,3
loess-geschiebemergel	1,000	0,312		mulch	A	6,5
loess-geschiebemergel	1,000	0,190		mulch	A	7,5
loess-geschiebemergel	0,008	0,001	**	mulch	B	3,3
loess-geschiebemergel	0,832	0,104		mulch	B	6,5
loess-geschiebemergel	0,999	0,143		mulch	B	7,5
loess-geschiebemergel	1,000	0,551		pflug	A	3,3
loess-geschiebemergel	0,663	0,074		pflug	A	6,5
loess-geschiebemergel	1,000	0,738		pflug	A	7,5
loess-geschiebemergel	0,259	0,026		pflug	B	3,3
loess-geschiebemergel	1,000	0,849		pflug	B	6,5
loess-geschiebemergel	0,010	0,001	**	pflug	B	7,5
Messtiefe 40cm			Signifikanz			
Vergleich	p.val.adj	p.val.raw	niveau	Bewirtschaftung	Reifendruck	Auflast
loess-geschiebemergel	1,000	0,387		mulch	A	3,3
loess-geschiebemergel	1,000	0,885		mulch	A	6,5
loess-geschiebemergel	0,823	0,103		mulch	A	7,5
loess-geschiebemergel	0,972	0,142		mulch	B	3,3
loess-geschiebemergel	1,000	0,320		mulch	B	6,5
loess-geschiebemergel	0,016	0,001	*	mulch	B	7,5
loess-geschiebemergel	0,369	0,037		pflug	A	3,3
loess-geschiebemergel	1,000	0,551		pflug	A	6,5
loess-geschiebemergel	0,611	0,068		pflug	A	7,5
loess-geschiebemergel	1,000	0,945		pflug	B	3,3
loess-geschiebemergel	0,263	0,024		pflug	B	6,5
loess-geschiebemergel	0,972	0,139		pflug	B	7,5
Messtiefe 60cm			Signifikanz			
Vergleich	p.val.adj	p.val.raw	niveau	Bewirtschaftung	Reifendruck	Auflast
loess-geschiebemergel	1,000	0,383		mulch	A	3,3
loess-geschiebemergel	1,000	0,665		mulch	A	6,5
loess-geschiebemergel	0,528	0,066		mulch	A	7,5
loess-geschiebemergel	0,019	0,002	*	mulch	B	3,3
loess-geschiebemergel	0,008	0,001	**	mulch	B	6,5
loess-geschiebemergel	1,000	0,312		mulch	B	7,5
loess-geschiebemergel	0,467	0,052		pflug	A	3,3
loess-geschiebemergel	0,369	0,037		pflug	A	6,5
loess-geschiebemergel	0,532	0,076		pflug	A	7,5
loess-geschiebemergel	1,000	0,301		pflug	B	3,3
loess-geschiebemergel	1,000	0,497		pflug	B	6,5
loess-geschiebemergel	1,000	0,734		pflug	B	7,5

**Tabelle A 5:** Statistisch gepoolter Vergleich des Versuchsfaktors Bodenart unter Zusammenfassung aller weiteren Versuchsfaktoren; P-Werte und Signifikanzniveaus nach Wilcoxon-Rangsummentest; Signifikanzniveaus \*(95%), \*\*(99%), \*\*\*(99,9%)

<b>Zusammenfassender Vergleich der Bodenart; Spannungseinträge aller Versuchsfaktoren</b>		
<b>Messtiefe 20cm</b>	p.val.adj	Signifikanzniveau
loess-geschiebemergel	0,603	
<b>Messtiefe 40cm</b>		
loess-geschiebemergel	0,588	
<b>Messtiefe 60cm</b>		
loess-geschiebemergel	0,967	

**Tabelle A 6:** Zusammenfassung der numerischen Variablen für den Versuchsfaktor Bodenart

<b>Zusammenfassung der numerischen Variablen der Boxplotauswertung Bodenart</b>								
Bodenart / Tiefe	Mittelwert	Standardabw.	Min	25%Quantil	Median	75% Quantil	Max	n
Geschiebe 20cm	364	173	73	247	361	425	976	105
Geschiebe 40cm	211	79	53	156	217	240	509	105
Geschiebe 60cm	107	58	21	71	93	134	297	105
Löss 20cm	363	122	28	286	353	432	695	105
Löss 40cm	209	81	8	176	209	243	446	105
Löss 60cm	100	42	7	65	100	139	208	105
Geschiebemergel	228	157	21	107	200	311	976	315
Löss	224	140	7	111	202	316	695	315

**Tabelle A 7: Statistische Teilvergleiche des Versuchsfaktors Bodenbearbeitung;**  
**P-Werte und Signifikanzniveaus nach Wilcoxon-Rangsummentest; Signifikanzniveaus**  
**\*(95%), \*\*(99%), \*\*\*(99,9%)**

<b>Vergleich der Bodenbearbeitung im Spannungseintrag</b>						
<b>Messtiefe 20cm</b>			<b>Signifikanz</b>			
Vergleich	p.val.adj	p.val.raw	niveau	Bodenart	Reifendruck	Auflast
pflug-mulch	0,184	0,037		geschiebemergel	A	3,3
pflug-mulch	0,120	0,020		geschiebemergel	A	6,5
pflug-mulch	0,000	0,000	***	geschiebemergel	A	7,5
pflug-mulch	0,005	0,001	**	geschiebemergel	B	3,3
pflug-mulch	0,918	0,918		geschiebemergel	B	6,5
pflug-mulch	0,001	0,000	**	geschiebemergel	B	7,5
pflug-mulch	0,243	0,081		loess	A	3,3
pflug-mulch	0,207	0,052		loess	A	6,5
pflug-mulch	0,049	0,007	*	loess	A	7,5
pflug-mulch	0,018	0,002	*	loess	B	3,3
pflug-mulch	0,243	0,105		loess	B	6,5
pflug-mulch	0,005	0,001	**	loess	B	7,5
<b>Messtiefe 40cm</b>			<b>Signifikanz</b>			
Vergleich	p.val.adj	p.val.raw	niveau	Bodenart	Reifendruck	Auflast
pflug-mulch	0,611	0,074		geschiebemergel	A	3,3
pflug-mulch	0,779	0,111		geschiebemergel	A	6,5
pflug-mulch	0,123	0,012		geschiebemergel	A	7,5
pflug-mulch	0,795	0,133		geschiebemergel	B	3,3
pflug-mulch	1,000	0,505		geschiebemergel	B	6,5
pflug-mulch	0,002	0,000	**	geschiebemergel	B	7,5
pflug-mulch	1,000	0,387		loess	A	3,3
pflug-mulch	1,000	0,377		loess	A	6,5
pflug-mulch	0,076	0,007		loess	A	7,5
pflug-mulch	1,000	0,292		loess	B	3,3
pflug-mulch	0,611	0,068		loess	B	6,5
pflug-mulch	1,000	0,935		loess	B	7,5
<b>Messtiefe 60cm</b>			<b>Signifikanz</b>			
Vergleich	p.val.adj	p.val.raw	niveau	Bodenart	Reifendruck	Auflast
pflug-mulch	0,236	0,052		geschiebemergel	A	3,3
pflug-mulch	0,140	0,020		geschiebemergel	A	6,5
pflug-mulch	0,072	0,007		geschiebemergel	A	7,5
pflug-mulch	0,008	0,001	**	geschiebemergel	B	3,3
pflug-mulch	0,080	0,009		geschiebemergel	B	6,5
pflug-mulch	0,117	0,015		geschiebemergel	B	7,5
pflug-mulch	1,000	1,000		loess	A	3,3
pflug-mulch	1,000	1,000		loess	A	6,5
pflug-mulch	1,000	1,000		loess	A	7,5
pflug-mulch	0,002	0,000	**	loess	B	3,3
pflug-mulch	0,197	0,033		loess	B	6,5
pflug-mulch	0,236	0,047		loess	B	7,5

**Tabelle A 8:** Statistisch gepoolter Vergleich des Versuchsfaktors Bodenbearbeitung unter Zusammenfassung aller weiteren Versuchsfaktoren; P-Werte und Signifikanzniveaus nach Wilcoxon-Rangsummentest; Signifikanzniveaus \*(95%), \*\*(99%), \*\*\*(99,9%)

<b>Zusammenfassender Vergleich der Bodenbearbeitung</b>		
<b>Spannungseinträge aller Versuchsfaktoren</b>		
Messtiefe 20cm	p.val.adj	Signifikanzniveau
pflug-mulch	0,000	***
<b>40cm</b>		
pflug-mulch	0,004	**
<b>60cm</b>		
pflug-mulch	0,027	*

**Tabelle A 9:** Zusammenfassung der numerischen Variablen für den Versuchsfaktor Bodenbearbeitung

<b>Zusammenfassung der numerischen Variablen der Boxplotauswertung Bodenbearbeitung</b>								
Bodenbearbeitung / Tiefe	Mittelwert	Standardabw.	Min	25%Quantil	Median	75% Quantil	Max	n
kons 20cm	308	114	6	273	333	370	584	99
kons 40cm	187	66	7	133	208	229	383	99
kons 60cm	98	54	10	58	87	141	279	99
konv 20cm	440	156	97	352	420	511	976	99
konv 40cm	240	80	24	195	225	284	509	99
konv 60cm	113	47	33	87	107	129	297	99
kons	199	119	6	99	187	279	584	297
konv	265	171	24	120	225	369	976	297



**Tabelle A 10: Statistische Teilvergleiche des Versuchsfaktors Auflast; P-Werte und Signifikanzniveaus nach Wilcoxon-Rangsummentest; Signifikanzniveaus \*(95%), \*\*(99%), \*\*\*(99,9%)**

Vergleich der Auflast im Spannungseintrag						
Messtiefe 20cm		Signifikanz				
Vergleich	p.val.adj	p.val.raw	niveau	Bodenart	Reifendruck	Bodenbearbeitung
6.5-3.3	0,498	0,112		geschiebemergel	A	mulch
7.5-3.3	0,137	0,010		geschiebemergel	A	mulch
7.5-6.5	0,056	0,004		geschiebemergel	A	mulch
6.5-3.31	0,498	0,095		geschiebemergel	A	pflug
7.5-3.31	0,024	0,001	*	geschiebemergel	A	pflug
7.5-6.51	0,372	0,047		geschiebemergel	A	pflug
6.5-3.32	0,001	0,000	**	geschiebemergel	B	mulch
7.5-3.32	0,001	0,000	**	geschiebemergel	B	mulch
7.5-6.52	0,550	0,275		geschiebemergel	B	mulch
6.5-3.33	0,001	0,000	**	geschiebemergel	B	pflug
7.5-3.33	0,000	0,000	***	geschiebemergel	B	pflug
7.5-6.53	0,000	0,000	***	geschiebemergel	B	pflug
6.5-3.34	0,550	0,377		loess	A	mulch
7.5-3.34	0,137	0,010		loess	A	mulch
7.5-6.54	0,137	0,013		loess	A	mulch
6.5-3.35	0,498	0,081		loess	A	pflug
7.5-3.35	0,498	0,071		loess	A	pflug
7.5-6.55	0,137	0,012		loess	A	pflug
6.5-3.36	0,056	0,004		loess	B	mulch
7.5-3.36	0,219	0,024		loess	B	mulch
7.5-6.56	0,498	0,157		loess	B	mulch
6.5-3.37	0,001	0,000	***	loess	B	pflug
7.5-3.37	0,000	0,000	***	loess	B	pflug
7.5-6.57	0,137	0,010		loess	B	pflug
Messtiefe 40cm		Signifikanz				
Vergleich	p.val.adj	p.val.raw	niveau	Bodenart	Reifendruck	Bodenbearbeitung
6.5-3.3	1,000	0,596		geschiebemergel	A	mulch
7.5-3.3	0,563	0,038		geschiebemergel	A	mulch
7.5-6.5	1,000	0,222		geschiebemergel	A	mulch
6.5-3.31	1,000	0,403		geschiebemergel	A	pflug
7.5-3.31	0,579	0,047		geschiebemergel	A	pflug
7.5-6.51	1,000	0,890		geschiebemergel	A	pflug
6.5-3.32	1,000	0,137		geschiebemergel	B	mulch
7.5-3.32	1,000	0,133		geschiebemergel	B	mulch
7.5-6.52	0,018	0,001	*	geschiebemergel	B	mulch
6.5-3.33	0,003	0,000	**	geschiebemergel	B	pflug
7.5-3.33	0,001	0,000	**	geschiebemergel	B	pflug
7.5-6.53	0,579	0,044		geschiebemergel	B	pflug
6.5-3.34	1,000	0,488		loess	A	mulch
7.5-3.34	0,513	0,032		loess	A	mulch
7.5-6.54	0,063	0,004		loess	A	mulch
6.5-3.35	0,809	0,081		loess	A	pflug
7.5-3.35	0,196	0,012		loess	A	pflug
7.5-6.55	0,579	0,051		loess	A	pflug
6.5-3.36	0,009	0,000	**	loess	B	mulch
7.5-3.36	0,007	0,000	**	loess	B	mulch
7.5-6.56	1,000	0,817		loess	B	mulch
6.5-3.37	1,000	0,456		loess	B	pflug
7.5-3.37	0,039	0,002	*	loess	B	pflug
7.5-6.57	0,579	0,041		loess	B	pflug
Messtiefe 60cm		Signifikanz				
Vergleich	p.val.adj	p.val.raw	niveau	Bodenart	Reifendruck	Bodenbearbeitung
6.5-3.3	1,000	0,377		geschiebemergel	A	mulch
7.5-3.3	0,137	0,010		geschiebemergel	A	mulch
7.5-6.5	0,063	0,004		geschiebemergel	A	mulch
6.5-3.31	0,557	0,111		geschiebemergel	A	pflug
7.5-3.31	0,063	0,004		geschiebemergel	A	pflug
7.5-6.51	1,000	0,431		geschiebemergel	A	pflug
6.5-3.32	0,072	0,005		geschiebemergel	B	mulch
7.5-3.32	0,013	0,001	*	geschiebemergel	B	mulch
7.5-6.52	0,550	0,077		geschiebemergel	B	mulch
6.5-3.33	0,139	0,013		geschiebemergel	B	pflug
7.5-3.33	0,004	0,000	**	geschiebemergel	B	pflug
7.5-6.53	0,550	0,069		geschiebemergel	B	pflug
6.5-3.34	1,000	0,596		loess	A	mulch
7.5-3.34	0,137	0,010		loess	A	mulch
7.5-6.54	0,063	0,004		loess	A	mulch
6.5-3.35	0,550	0,081		loess	A	pflug
7.5-3.35	0,139	0,012		loess	A	pflug
7.5-6.55	0,139	0,012		loess	A	pflug
6.5-3.36	0,001	0,000	***	loess	B	mulch
7.5-3.36	0,001	0,000	***	loess	B	mulch
7.5-6.56	0,794	0,198		loess	B	mulch
6.5-3.37	0,013	0,001	*	loess	B	pflug
7.5-3.37	0,001	0,000	***	loess	B	pflug
7.5-6.57	0,545	0,061		loess	B	pflug

Tabelle A 11: Statistisch gepoolter Vergleich des Versuchsfaktors Auflast unter Zusammenfassung aller weiteren Versuchsfaktoren; P-Werte und Signifikanzniveaus nach Wilcoxon-Rangsummentest; Signifikanzniveaus \*(95%), \*\*(99%), \*\*\*(99,9%)

Zusammenfassender Vergleich der Auflast Spannungseinträge aller Versuchsfaktoren		
Messtiefe 20cm	p.val.adj	Signifikanzniveau
6.5-3.3	0,000	***
7.5-3.3	0,000	***
7.5-6.5	0,014	*
<b>40cm</b>	p.val.adj	
6.5-3.3	0,000	***
7.5-3.3	0,000	***
7.5-6.5	0,027	*
<b>60cm</b>	p.val.adj	
6.5-3.3	0,000	***
7.5-3.3	0,000	***
7.5-6.5	0,000	***

Tabelle A 12: Zusammenfassung der numerischen Variablen für den Versuchsfaktor Auflast

Zusammenfassung der numerischen Variablen der Boxplotauswertung Auflast									
Auflast / Tiefe	Mittelwert	Standardabw.	Min	25%Quantil	Median	75% Quantil	Max	n	
3,3 Mg / 20cm	211	91	28	150	219	268	457	52	
3,3 Mg / 40cm	149	62	8	118	160	185	304	52	
3,3 Mg / 60cm	57	26	7	42	56	71	144	52	
6,5 Mg / 20cm	378	107	152	336	371	419	695	64	
6,5 Mg / 40cm	210	64	58	188	217	236	438	64	
6,5 Mg / 60cm	99	45	32	66	89	123	236	64	
7,5 Mg / 20cm	432	141	150	339	405	504	976	105	
7,5 Mg / 20cm	235	79	53	200	229	271	509	105	
7,5 Mg / 20cm	129	45	56	95	119	148	297	105	
3,3 Mg	139	91	7	63	136	193	457	156	
6,5 Mg	229	138	32	107	214	340	695	192	
7,5 Mg	265	159	53	135	230	358	976	315	

**Tabelle A 13: Statistische Teilvergleiche des Versuchsfaktors Reifennendruck; P-Werte und Signifikanzniveaus nach Wilcoxon-Rangsummentest; Signifikanzniveaus \*(95%), \*\*(99%), \*\*\*(99,9%)**

<b>Vergleich des Reifennendruck im Spannungseintrag</b>						
<b>Messtiefe 20cm</b>						
Vergleich	p.val.adj	p.val.raw	Signifikanzniveau	Bodenart	Auflast	Bewirtschaftung
B-A	1,000	0,673		geschiebemergel	3,3	mulch
B-A	1,000	0,488		geschiebemergel	3,3	pflug
B-A	0,043	0,004	*	geschiebemergel	6,5	mulch
B-A	0,563	0,094		geschiebemergel	6,5	pflug
B-A	0,462	0,066		geschiebemergel	7,5	mulch
B-A	0,004	0,000	**	geschiebemergel	7,5	pflug
B-A	0,115	0,012		loess	3,3	mulch
B-A	1,000	0,488		loess	3,3	pflug
B-A	0,115	0,013		loess	6,5	mulch
B-A	0,115	0,012		loess	6,5	pflug
B-A	0,948	0,190		loess	7,5	mulch
B-A	0,948	0,201		loess	7,5	pflug
<b>Messtiefe 40cm</b>						
Vergleich	p.val.adj	p.val.raw	Signifikanzniveau	Bodenart	Auflast	Bewirtschaftung
B-A	1,000	0,371		geschiebemergel	3,3	mulch
B-A	1,000	0,431		geschiebemergel	3,3	pflug
B-A	0,604	0,101		geschiebemergel	6,5	mulch
B-A	1,000	0,767		geschiebemergel	6,5	pflug
B-A	0,487	0,070		geschiebemergel	7,5	mulch
B-A	1,000	0,801		geschiebemergel	7,5	pflug
B-A	0,442	0,055		loess	3,3	mulch
B-A	0,108	0,010		loess	3,3	pflug
B-A	0,042	0,004	*	loess	6,5	mulch
B-A	1,000	0,718		loess	6,5	pflug
B-A	0,109	0,011		loess	7,5	mulch
B-A	0,372	0,041		loess	7,5	pflug
<b>Messtiefe 60cm</b>						
Vergleich	p.val.adj	p.val.raw	Signifikanzniveau	Bodenart	Auflast	Bewirtschaftung
B-A	0,312	0,052		geschiebemergel	3,3	mulch
B-A	0,607	0,152		geschiebemergel	3,3	pflug
B-A	1,000	0,462		geschiebemergel	6,5	mulch
B-A	1,000	1,000		geschiebemergel	6,5	pflug
B-A	0,044	0,004	*	geschiebemergel	7,5	mulch
B-A	1,000	0,818		geschiebemergel	7,5	pflug
B-A	0,255	0,036		loess	3,3	mulch
B-A	0,098	0,010		loess	3,3	pflug
B-A	0,074	0,007		loess	6,5	mulch
B-A	0,138	0,017		loess	6,5	pflug
B-A	0,131	0,015		loess	7,5	mulch
B-A	0,606	0,121		loess	7,5	pflug

**Tabelle A 14:** Statistisch gepoolte Teilvergleiche des Versuchsfaktors Reifennendruck unter Berücksichtigung der Auflast; P-Werte und Signifikanzniveaus nach Wilcoxon-Rangsummentest; Signifikanzniveaus \*(95%), \*\*(99%), \*\*\*(99,9%)

Vergleich der Spannungseinträge beider Reifennendrucke unter Berücksichtigung der Auflast				
20cm	p.val.adj	p.val.raw	Signifikanzniveau	Auflast
B-A	0,142	0,142		3,3
B-A	0,027	0,009	*	6,5
B-A	0,036	0,018	*	7,5
40cm	p.val.adj	p.val.raw	Signifikanzniveau	Auflast
B-A	0,002	0,001	**	3,3
B-A	0,039	0,039	*	6,5
B-A	0,005	0,002	**	7,5
60cm	p.val.adj	p.val.raw	Signifikanzniveau	Auflast
B-A	0,011	0,011	*	3,3
B-A	0,011	0,005	*	6,5
B-A	0,001	0,000	***	7,5

**Tabelle A 15:** Zusammenfassung der numerischen Variablen für den Versuchsfaktor Reifennendruck

Zusammenfassung der numerischen Variablen der Boxplotauswertung Reifennendruck								
Reifendruck / Auflast / Tiefe	Mittelwert	Standardabw.	Min	25%Quantil	Median	75% Quantil	Max	n
A / 3,3 Mg / 20cm	175	119	28	84	154	257	426	12
A / 3,3 Mg / 40cm	71	64	10	21	55	105	198	8
A / 3,3 Mg / 60cm	38	15	7	31	41	46	58	12
A / 6,5 Mg / 20cm	327	213	6	171	278	412	695	16
A / 6,5 Mg / 40cm	165	104	7	96	121	262	352	14
A / 6,5 Mg / 60cm	73	41	10	56	64	76	175	16
A / 7,5 Mg / 20cm	399	95	247	341	388	430	755	50
A / 7,5 Mg / 40cm	247	65	53	216	243	282	366	50
A / 7,5 Mg / 60cm	133	33	64	111	127	147	226	46
B / 3,3 Mg / 20cm	225	96	83	148	253	277	377	12
B / 3,3 Mg / 40cm	152	69	9	137	155	187	247	8
B / 3,3 Mg / 60cm	66	38	21	41	58	87	144	12
B / 6,5 Mg / 20cm	374	52	263	347	375	411	457	16
B / 6,5 Mg / 40cm	224	71	122	207	225	239	438	16
B / 6,5 Mg / 60cm	114	52	60	83	93	142	236	14
B / 7,5 Mg / 20cm	461	162	150	347	454	551	976	50
B / 7,5 Mg / 40cm	222	90	91	188	207	243	509	50
B / 7,5 Mg / 60cm	118	50	56	87	102	131	297	48
Reifendruck / Tiefe	Mittelwert	Standardabw.	Min	25%Quantil	Median	75% Quantil	Max	n
A / 20cm	350	152	6	268	353	422	755	75
A / 40cm	211	94	7	126	226	272	366	75
A / 60cm	104	50	7	63	110	140	226	75
B / 20cm	407	161	83	295	375	496	976	75
B / 40cm	215	86	9	166	208	240	509	75
B / 60cm	109	52	21	82	96	125	297	75
Reifendruck	Mittelwert	Standardabw.	Min	25%Quantil	Median	75% Quantil	Max	n
A	224	147	6	109	212	316	755	225
B	246	165	9	112	208	347	976	225

### Abbildungen

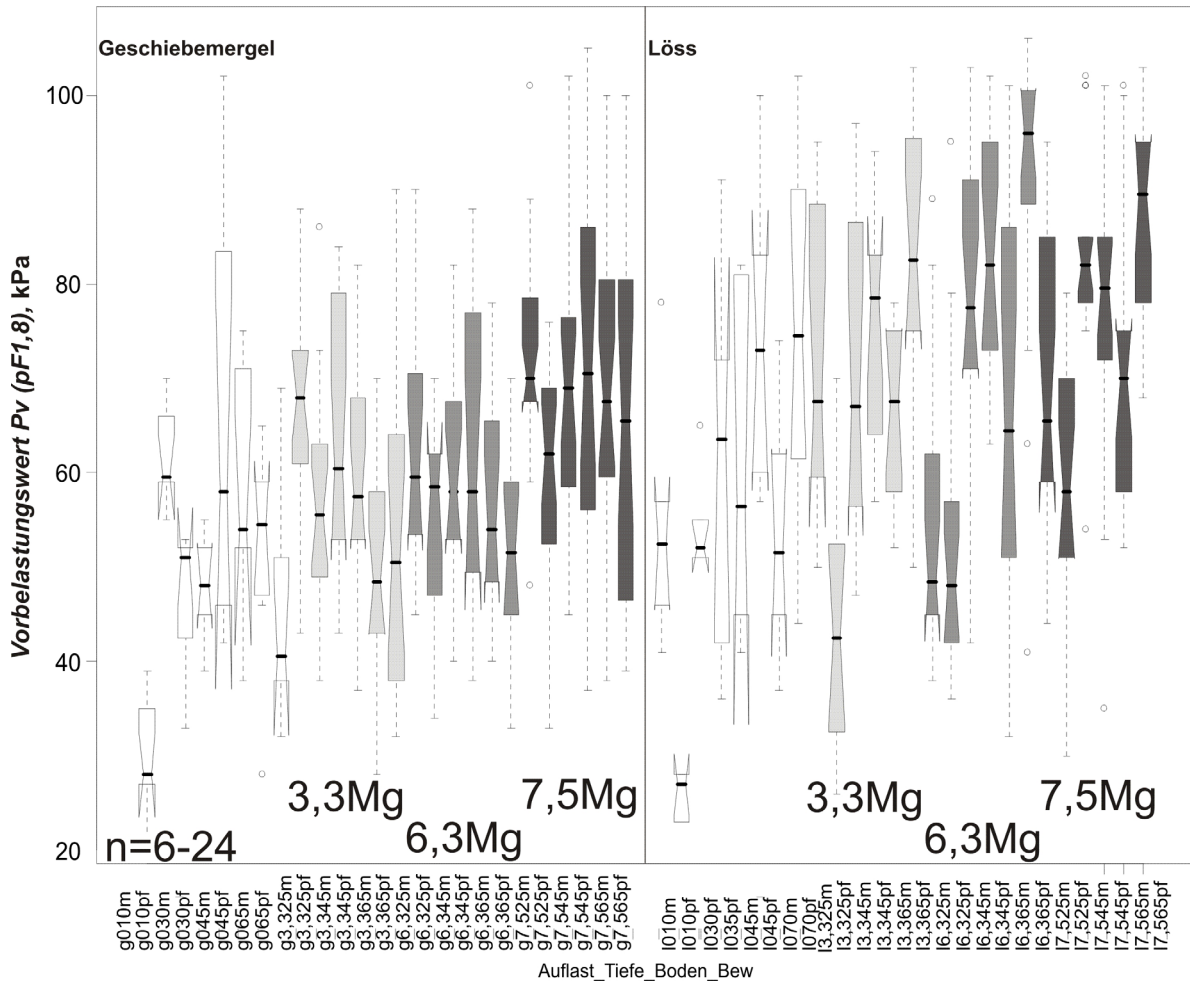


Abbildung A 1: Horizontspezifischer Vergleich der Vorbelastung unter Berücksichtigung der Auflast, des Ausgangsmaterials und der Bodenbearbeitung (n= siehe Abb.)

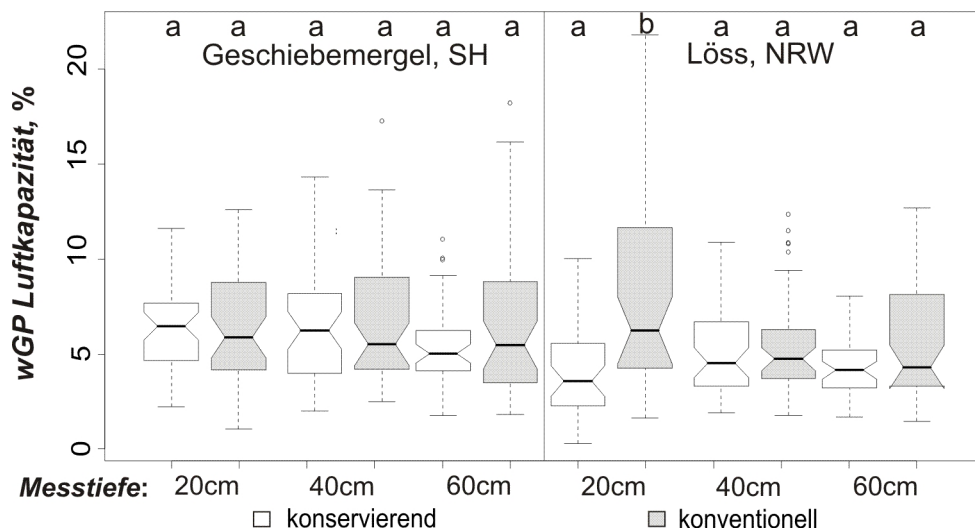


Abbildung A 2: Horizontspezifischer Vergleich der Luftkapazität unter Berücksichtigung des Ausgangsmaterials und der Bodenbearbeitung (n=45)



## Danksagung

Auf diesem Wege möchte ich allen danken, die am Gelingen der vorliegenden Dissertation mitgewirkt haben und mir mit Rat und Tat beiseite standen. Ohne die konstruktive Zusammenarbeit mit meinen Kollegen wäre die Arbeit in diesem Umfang nicht möglich gewesen.

Namentlich benennen möchte ich hier an erster Stelle Herrn Prof. Dr. Rainer Horn, der mir das Thema überlassen hat und stets unterstützend Zeit und Interesse für meine Arbeit fand.

Herrn Prof. Dr. Rainer Duttmann danke ich für die bereitwillige Übernahme des Koreferats.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Heiner Fleige, der sich intensiv mit meinen Ergebnissen auseinandersetzte, meine Arbeit stets mit Interesse verfolgte und mir immer wieder mit hilfreichen Ratschlägen und Anregungen zur Seite stand. Stephan Peth danke ich für die spontane Unterstützung in fachlichen Fragestellungen und die Einladung zum Forschungsaufenthalt in Schottland.

Ohne Frau Rebekka Diesing und ihre disziplinierte und straff organisierte umfangreiche Laborarbeit, sowie ihre unermüdlichen Feldeinsätze wäre diese Arbeit so nicht zustande gekommen. In diesem Zuge geht auch ein großer Dank an die HIWIS Frank Hamann, Markus Zunke, Patrick Neumann, Paul Zacharias, Tina Geisler, Thomas Neugebauer, Sebastian Pagenkemper, Christian Lemme und den Gastwissenschaftler André Brandt die tatkräftig und extrem flexibel auf allen Feldaufenthalten mitwirkten.

Jens Rostek danke ich für seine Unterstützung und seine hilfreichen Tipps hinsichtlich jeglicher Probleme digitaler Art. Joachim Lohse gilt der Dank für seinen unermüdlichen Einsatz im Kampf gegen den Verfall des Messsystems.

Ein Dank auch an Mario Hasler für die spontane statistische Beratung, die ich mehrfach in Anspruch nehmen durfte.

Stephan Denker und den HIWIS der FH Soest sei für die unkomplizierte und geduldige Zusammenarbeit auf dem Feld gedankt. Durch den unterschiedlichen zeitlichen Ablauf der Messvorhaben der beiden Fachbereiche kam es doch so einige Male zu längeren Wartezeiten für die Landtechniker.

Meinen Arbeitskollegen Peter, Kristine, Julia, Katrin und Stephan danke ich für ihre anregenden und ideengebenden Diskussionen, nicht nur fachlicher Art, den 15Uhr Kaffee mit Schokolade und die freundschaftliche Zusammenarbeit die ich sehr genossen habe.

Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner Familie die mir das Geographiestudium ermöglichten und mir stets unterstützend zur Seite standen.

Meiner lieben Freundin Imke danke ich nicht nur für ihren verständnisvollen moralischen Beistand trotz Schwangerschaft, sondern auch für ihre kritische fachliche Unterstützung und ihre Hilfsbereitschaft in jeglicher Beziehung.

## Lebenslauf

Name: Alexander Daniel Zink  
Geburtsdatum: 07. Juli 1975  
Geburtsort: Alfeld  
Nationalität: deutsch  
Familienstand: ledig, 1Kind

### Berufliche Tätigkeiten:

11/2005 – 11/2008 Befristete Anstellung als wissenschaftlicher Angestellter am INSTITUT FÜR PFLANZENERNÄHRUNG UND BODENKUNDE der Christian-Albrecht-Universität zu Kiel, Deutschland im Rahmen des BMELV geförderten Projektes „Anwendbarkeit geophysikalischer, bodenphysikalischer und landtechnischer Methoden zur Bestimmung von flächenhaften Bodenverdichtung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen“

08/2004 – 11/2005 Befristete Anstellung bei der Ingenieurgesellschaft MELCHIOR & WITTPOHL Hamburg, Deutschland als Geograph im Bereich der örtlichen Bauüberwachung, Projektsteuerung, Geodatenmanagement und labortechnischen Bodenuntersuchung mineralischer Baustoffe

### Studium:

10/1997 – 12/2003 Studium der Geographie an der Christian-Albrecht-Universität zu Kiel  
Nebenfächer: Bodenkunde und Wasserwirtschaft  
Abschluss: Diplom

### Studienbegleitende Tätigkeiten:

09/2002 - 11/2002 Praktikum im GEOGRAPHISCHEN INSTITUT der Universität Oulu, Finnland

07/2002 - 08/2002 Praktikum im HOLT FORSCHUNGSCENTER in Tromsø, Norwegen

09/2001 - 10/2003 Wissenschaftliche Hilfskraft am INSTITUT FÜR PFLANZENERNÄHRUNG UND BODENKUNDE der CAU Kiel, Deutschland

08/2001 - 09/2001 Praktikum im LANDESAMT FÜR NATUR UND UMWELT SCHLESWIG-HOLSTEIN, Dezerat Geologie/Boden, Flintbek, Deutschland

### Schul Ausbildung und Zivildienst:

08/1995 - 09/1996 Caritasverband für die Diözese Hildesheim: Zivildienst, Haus am Weiher Wohnheim für geistig Behinderte

07/1991 - 05/1995 Scharnhorstgymnasium Hildesheim: allgemeine Hochschulreife

07/1987 - 06/1991 Realschule Albertus Magnus Hildesheim: Realschulabschluss



## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel „Bodenstabilität und Auswirkungen dynamischer Lasteinträge auf physikalische Eigenschaften von Ackerböden unter konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung“ selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch keinem anderen Fachbereich bzw. noch keiner anderen Fakultät vorgelegt worden.

Hiermit erkläre ich ferner, dass gegen mich kein strafrechtliches Ermittlungsverfahren schwebt.

Kiel, den 10. Juni 2009

.....

Alexander Daniel Zink