

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

**Quantifizierung der Stabilisierungs-
effekte von Pflanzenwurzeln als Möglichkeit zur
Reduzierung der mechanischen Boden-
deformationen in Grünland**

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

vorgelegt von

M.Sc. Katrin Trükmann
aus Tartu/Estland

Kiel, 2011

Dekan: Prof. Dr. Schwarz
1. Berichterstatter: Prof. Dr. Rainer Horn
2. Berichterstatter: Dr. Endla Reintam
Tag der mündlichen Prüfung: 04.11.2010

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	III
TABELLENVERZEICHNIS.....	VII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	VIII
1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	1
1.1 Pflanzenwachstum im Grünland	2
1.1.1 Wurzel-Boden-Interaktionen	3
1.2 Faktoren der Bodenverdichtung im Zuge der Grünlandbewirtschaftung ...	13
1.3 Bodenstabilitätsparameter: Vorbelastung und Scherwiderstand	16
1.4 Mögliche Folgen der Bodenverdichtung	18
1.4.1 Einfluss auf Bodeneigenschaften	18
1.4.2 Einfluss auf Pflanzenwachstum	20
1.5 Zielsetzung	25
2 MATERIAL UND METHODEN.....	26
2.1 Untersuchungsgebiete.....	26
2.1.1 Standort Hohenschulen	26
2.1.2 Standorte Röhu und Vorbuse.....	28
2.2 Versuchsaufbau und Probennahme	30
2.2.1 Standort Hohenschulen	30
2.2.2 Standort Röhu	32
2.2.3 Standort Vorbuse.....	33
2.3 Durchgeführte Messungen.....	34
2.3.1 Allgemeine Kenngrößen	34
2.3.2 Bodenphysikalische Messungen an ungestörten Bodenproben.....	35
2.3.3 Messungen an Wurzeln.....	37
2.3.4 Modell zur armierenden Wirkung der Wurzeln.....	39
2.4 Statistische Auswertung	40
3 ERGEBNISSE	41
3.1 Standort Hohenschulen	41
3.2 Wurzeloberflächendichte und -trockengewicht im Boden	42
3.2.1 Standort Hohenschulen	42
3.2.2 Standort Röhu	45
3.3 Lagerungsdichte und Porengrößenverteilung	46
3.3.1 Standort Hohenschulen	46
3.3.2 Standort Röhu	49
3.3.3 Standort Vorbuse.....	50
3.4 Gesättigte Wasser- und Luftpfeifähigkeit	53

II		
3.4.1	Standort Hohenschulen	53
3.4.2	Standort Röhu	54
3.4.3	Standort Vorbuse.....	56
3.5 Scherparameter: Kohäsion und Winkel der inneren Reibung	58	
3.5.1	Standort Hohenschulen	58
3.5.2	Standort Röhu.....	73
3.5.3	Standort Vorbuse.....	75
3.6 Vorbelastung	76	
3.6.1	Standort Hohenschulen	76
3.6.2	Standort Röhu.....	79
3.6.3	Standort Vorbuse.....	80
3.7 Änderungen der Bodenstruktur durch vorherige Bodenbearbeitung als Ackerstandort am Standort Hohenschulen.....	81	
3.7.1	Lagerungsdichte und Vorbelastung.....	81
3.7.2	Gesättigte Wasser- und Luftleitfähigkeit.....	82
4 DISKUSSION	84	
4.1 Einfluss von Pflanzenwachstum auf die Bodenstruktur	84	
4.1.1	Beeinflussung der Lagerungsdichte sowie der Porenkapazitäten und -funktionalität	84
4.2 Beeinflussung des Scherwiderstandes.....	90	
4.2.1	Direkte Auswirkungen von Wurzeln auf die Scherfestigkeit des Bodens90	
4.2.2	Vergleich der berechneten mit gemessener Erhöhung der Kohäsion c_w94	
4.2.3	Düngungsintensität und Wirksamkeit des Wurzelwerkes bei der Bodenstabilisierung.....95	
4.3 Auswirkung der organischen Substanz auf die Bodenstabilität.....	98	
4.3.1	Scherparameter.....	98
4.3.2	Rebound	100
4.4 Langfristig wirksame Aggregierungsunterschiede durch vorherige Bodenbearbeitung als Ackerstandort und in Abhängigkeit von der Dauer der Grünlandnutzung	102	
4.5 Veränderung der Bodeneigenschaften und des Wurzelwachstums durch mechanische Belastung	105	
4.5.1	Veränderungen der Lagerungsdichte, Porengrößenverteilung und Leitfähigkeiten	105
4.5.2	Veränderung der Bodenstabilitätsparameter (Vorbelastung, Kohäsion und Winkel der inneren Reibung)	110
4.5.3	Veränderung der Wurzeloberflächendichte und des -trockengewichts....114	
5 ZUSAMMENFASSUNG	119	
6 SUMMARY.....	123	
7 LITERATURVERZEICHNIS	126	
DANKSAGUNG	139	

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Geographische Lage der Versuchsstandorte	26
Abb. 2: Schematische Darstellung der Zugfestigkeitsmessung	38
Abb. 3: Modell der Armierung durch Wurzeln (Gray & Leiser 1989, verändert).....	39
Abb. 4: Wurzeloberflächendichte ($\text{cm}^2 \text{ cm}^{-3}$) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt) im Juli 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; $n: 10$ (5cm), 8 (10-20cm).....	42
Abb. 5: Wurzeltrockengewicht (g cm^{-3}) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt) im Juli 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; $n: 10$ (5cm), 8 (10-20cm).....	43
Abb. 6: Wurzeloberflächendichte ($\text{cm}^2 \text{ cm}^{-3}$) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, Oktober), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) in 5cm Tiefe in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Zeitpunkten der Probennahme bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; n : siehe Abbildung.....	44
Abb. 7: Wurzeltrockengewicht (g cm^{-3}) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, Oktober), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) in 5cm Tiefe in 2008 als Boxplots mit Median (-), Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Zeitpunkten der Probennahme bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; n : siehe Abbildung.....	44
Abb. 8: Wurzeloberflächendichte ($\text{cm}^2 \text{ cm}^{-3}$) (Standort: Röhu) in Abhängigkeit von der Pflanzenart (Knaulgras - Kg, Rohrglanzgras - Rg), der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 2x - mit zwei Überfahrten) und der Tiefe (0-25cm) im September 2008 als Mittelwert. Die Balken zeigen die Standardabweichung, $n: 3$	45
Abb. 9: Wurzeltrockengewicht (g cm^{-3}) (Standort: Röhu) in Abhängigkeit von der Pflanzenart (Knaulgras - Kg, Rohrglanzgras - Rg), der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 2x - mit zwei Überfahrten) und der Tiefe (0-25cm) im September 2008 als Mittelwert. Die Balken zeigen die Standardabweichung, $n: 3$	45
Abb. 10: Lagerungsdichte pt (g cm^{-3}) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, Oktober), der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; n : siehe Abbildung, pt-Klassifizierung nach AG Boden (2005).....	47
Abb. 11: Luftkapazität LK (Vol.%) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, Oktober), der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; n : siehe Abbildung, LK-Klassifizierung nach AG Boden (2005).....	47
Abb. 12: Nutzbare Feldkapazität nFK (Vol.%) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, Oktober), der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; n : siehe Abbildung, nFK-Klassifizierung nach AG Boden (2005).....	48
Abb. 13: Medianwerte der nutzbaren Feldkapazität nFK (Vol.%) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Gehalt an organischem Kohlenstoff C_{org} (g kg^{-1}). Daten beider Bestandeszusammensetzungen (mehr Leguminosen, mehr Graspflanzen) und allen Tiefen (5, 10, 20cm) von der Kontrollfläche im Juli 2008; $n: 12$	48
Abb. 14: Lagerungsdichte pt (g cm^{-3}) (Standort: Röhu) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, September), der Tiefe (5, 20cm), der Pflanzenart (Kg - Knaulgras, Rg - Rohrglanzgras) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; $n: 17$, pt-Klassifizierung nach AG Boden (2005)....	49
Abb. 15: Luftkapazität LK (Vol.%) (Standort: Röhu) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, September), der Tiefe (5, 20cm), der Pflanzenart (Kg - Knaulgras, Rg - Rohrglanzgras) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; $n: 5$, LK-Klassifizierung nach AG Boden (2005)....	50

IV

- Abb. 16: Lagerungsdichte ρ_t (g cm^{-3}) (Standort: Vorbuse) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt) im September 2007 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; $n: 18$, ρ_t -Klassifizierung nach AG Boden (2005). 51
- Abb. 17: Luftkapazität LK (Vol.%) (Standort: Vorbuse) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt) im September 2007 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; $n: 5$, LK-Klassifizierung nach AG Boden (2005). 51
- Abb. 18: Nutzbare Feldkapazität nFK (Vol.%) (Standort: Vorbuse) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt) im September 2007 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; $n: 5$, nFK-Klassifizierung nach AG Boden (2005). 52
- Abb. 19: Gesättigte Wasserleitfähigkeit kf ($\log \text{cm d}^{-1}$) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, Oktober), der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; n : siehe Abbildung, kf-Klassifizierung nach AG Boden (2005). 53
- Abb. 20: Luftleitfähigkeit kl ($\log \text{cm s}^{-1}$) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, Oktober), der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) nach Vorentwässerung auf -6kPa in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; n : siehe Abbildung, kl-Klassifizierung nach DVWK (1997). 54
- Abb. 21: Gesättigte Wasserleitfähigkeit kf ($\log \text{cm d}^{-1}$) (Standort: Röhu) in Abhängigkeit von der Pflanzenart (Kg - Knaulgras, Rg - Rohrglanzgras), der Tiefe (5, 20cm) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 2x - mit zwei Überfahrten) im September 2007 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; $n: 7$, kf-Klassifizierung nach AG Boden (2005). 55
- Abb. 22: Luftleitfähigkeit kl ($\log \text{cm s}^{-1}$) (Standort: Röhu) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, September), der Tiefe (5, 20cm), der Pflanzenart (Kg - Knaulgras, Rg - Rohrglanzgras) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) nach Vorentwässerung auf -6kPa in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; $n: 12$, kl-Klassifizierung nach DVWK (1997). 55
- Abb. 23: Gesättigte Wasserleitfähigkeit kf ($\log \text{cm d}^{-1}$) (Standort: Vorbuse) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt) im September 2007 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; $n: 13$, kf-Klassifizierung nach AG Boden (2005). 56
- Abb. 24: Luftleitfähigkeit kl ($\log \text{cm s}^{-1}$) (Standort: Vorbuse) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt) nach Vorentwässerung auf -6kPa im September 2007 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; $n: 6$, kl-Klassifizierung nach DVWK (1997). 57
- Abb. 25: Medianwerte der gesättigten Wasser kf ($\log \text{cm d}^{-1}$)- und der Luftleitfähigkeit kl ($\log \text{cm s}^{-1}$) (Standort: Vorbuse) in Abhängigkeit vom Gesamtporenvolumen (Vol.%) und der weiten Grobporen (Vol.%). Daten aus allen Tiefen (5, 10, 20cm) und Überfahrungshäufigkeiten (0x - Kontrolle; 1x - mit einer Überfahrt) nach Vorentwässerung auf -6kPa im September 2007, $n: 6$ 57
- Abb. 26: Winkel der inneren Reibung ϕ ($^\circ$) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen), der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) und der Düngungsstufe (N0 K300 - 0kg Stickstoff, 300kg Kalium ha^{-1} ; N0 K600 - 0kg Stickstoff, 600kg Kalium ha^{-1} ; N360 K300 - 360kg Stickstoff, 300kg Kalium ha^{-1} ; N360 K600 - 360kg Stickstoff, 600kg Kalium ha^{-1}) nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli und Oktober 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●), $n: 3$ 59
- Abb. 27: Kohäsion c (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen), der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) und der Düngungsstufe (N0 K300 - 0kg Stickstoff, 300kg Kalium ha^{-1} ; N0 K600 - 0kg Stickstoff, 600kg Kalium ha^{-1} ; N360 K300 - 360kg Stickstoff, 300kg Kalium ha^{-1} ; N360 K600 - 360kg Stickstoff, 600kg Kalium ha^{-1}) nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli und Oktober 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●), $n: 3$ 60
- Abb. 28: Winkel der inneren Reibung ϕ ($^\circ$) und Kohäsion c (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm) als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Daten beider Bestandeszusammensetzungen (mehr Leguminosen, mehr Graspflanzen) von der Kontrollfläche nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli und Oktober 2008. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; $n: 18$ 61
- Abb. 29: Maximaler (Max.) Scherwiderstand τ (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Auflast (40, 70, 100, 200 und 400kPa) und der Tiefe (5, 20cm) als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Daten beider Bestandeszusammensetzungen (mehr Leguminosen, mehr Graspflanzen) von der Kontrollfläche nach

Vorentwässerung auf -6kPa im Juli und Oktober 2008. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: 24 (40-200kPa), 32 (400kPa). .62	
Abb. 30: Maximaler (Max.) Scherwiderstand τ (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Wurzeltrockengewicht ($g \text{ cm}^{-3}$) der Pflanzenarten (Gras- und Leguminosenwurzeln) und der Auflast (40, 70 und 100kPa). Daten der Kontrollfläche in 5cm Tiefe nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli und Oktober 2008....63	
Abb. 31: Maximaler (Max.) Scherwiderstand τ (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Wurzeloberflächendichte ($\text{cm}^2 \text{ cm}^{-3}$) und der Auflast (40, 70 und 100kPa). Daten der Kontrollfläche, aus Stechzyylinderproben mit Graswurzeln in 5cm Tiefe nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli und Oktober 2008, n:5.....63	
Abb. 32: Kohäsion c (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Wurzeloberflächendichte ($\text{cm}^2 \text{ cm}^{-3}$) in 5 und 10-20cm Tiefe. Daten beider Bestandeszusammensetzungen (mehr Leguminosen, mehr Graspflanzen) der Kontrollfläche nach Vorentwässerung bei -6kPa im Juli und Oktober 2008, n: 20 (5cm), 16 (10-20cm).....64	
Abb. 33. Reißkraft der Wurzel (N) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Wurzeldurchmesser (mm) bei Gras und Leguminosen. Daten aus aller Düngungsstufen der Kontrollfläche im Juli 2008, n: 95 (Graswurzeln) 170 (Leguminosenwurzeln).65	
Abb. 34: Zugfestigkeit der Wurzeln (MPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Wurzeldurchmesser (mm) bei Gras und Leguminosen. Daten aller Düngungsstufen der Kontrollfläche im Juli 2008, n: 95 (Graswurzeln) 170 (Leguminosenwurzeln).65	
Abb. 35: Zugfestigkeit der Wurzeln (MPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Wurzeldurchmesser (0,2; 0,3mm) und dem Wurzelwassergehalt in Gewichtsprozent (WG Gew.%). Daten von Graswurzeln der Düngungsstufe N360 K600 (360 kg Stickstoff ha^{-1} 600kg Kalium ha^{-1}) im Juli 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Wurzelwassergehaltsklassen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: siehe Abbildung.....66	
Abb. 36: Zugfestigkeit von Graswurzeln (MPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Durchmesser (0,2; 0,3 und 0,4mm) und der Düngungsstufe (N0 K300 - 0kg Stickstoff, 300kg Kalium ha^{-1} ; N0 K600 - 0kg Stickstoff, 600kg Kalium ha^{-1} ; N360 K300 - 360kg Stickstoff, 300kg Kalium ha^{-1} , N360 K600 - 360kg Stickstoff, 600kg Kalium ha^{-1}) als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Daten von Wurzeln mit Wassergehalten von 20-30Gew.% im Juli 2008. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Durchmesserklassen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05, n: siehe Abbildung.....67	
Abb. 37: Zugfestigkeit von Leguminosenwurzeln (MPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Durchmesser (1-6mm) und der Düngungsstufe (N0 K300 - 0kg Stickstoff, 300kg Kalium ha^{-1} ; N360 K600 - 360kg Stickstoff, 600kg Kalium ha^{-1}) als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Daten von Wurzeln mit Wassergehalten von 50-60Gew.% im Juli 2008. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Durchmesserklassen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05, n: siehe Abbildung.....67	
Abb. 38: Berechnete Erhöhung der Kohäsion c_w (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm) und der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) der Kontrollfläche im Juli 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: 10 (5cm), 8 (10-20cm).68	
Abb. 39: Berechnete Erhöhung der Kohäsion c_w (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom maximalen (Max.) Scherwiderstand τ (kPa) für die Auflaststufen 40-400kPa. Daten der Kontrollfläche, aus Stechzyylinderproben mit Graswurzeln in 5cm Tiefe im Juli und Oktober 2008, n:469	
Abb. 40: Wassergehalt (Vol.%) des Bodens (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Gehalt des Bodens an organischem Kohlenstoff C_{org} (g kg^{-1}). Daten beider Bestandeszusammensetzungen (mehr Leguminosen, mehr Graspflanzen) und aller Tiefen (5, 10, 20cm) der Kontrollfläche nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli 2008 (Punkte der Variante mL K600 in weiß gekennzeichnet), n: 12.....70	
Abb. 41: Maximaler (Max.) Scherwiderstand τ (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Gehalt an organischem Kohlenstoff C_{org} (g kg^{-1}) für die Auflaststufen 40-400kPa. Daten beider Bestandeszusammensetzungen (mehr Leguminosen, mehr Graspflanzen) und aller Tiefen (5, 10, 20cm) der Kontrollfläche nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli 2008 (bei der Auflaststufe 40kPa Punkte der Variante mL K600 in weiß gekennzeichnet), n: 1271	
Abb. 42: Matrixpotenzial (hPa) im Moment des maximalen Scherwiderstandes (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Gehalt an organischem Kohlenstoff C_{org} (g kg^{-1}) für die Auflaststufen 40-400kPa. Daten beider Bestandeszusammensetzungen (mehr Leguminosen, mehr Graspflanzen) und aller Tiefen (5, 10, 20cm) der Kontrollfläche nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli 2008 (bei der Auflaststufe 40kPa Punkte der Variante mL K600 in weiß gekennzeichnet), n: 12.....72	
Abb. 43: Mittel-/Einzelwerte der Kohäsion c (kPa) und Winkel der inneren Reibung ϕ (°) (Standort: Röhu) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, September), der Tiefe (5, 20cm), der Pflanzenart (Kg - Knaulgras, Rg - Rohrglanzgras) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) nach Vorentwässerung auf -6kPa in 2008, n: 2 (Juli), 1 (September).....73	
Abb. 44: Maximaler (Max.) Scherwiderstand τ (kPa) (Standort: Röhu) in Abhängigkeit von der Pflanzenart (Knaulgras, Rohrglanzgras), der Auflast (40, 70, 100, 200 und 400kPa) und der Tiefe (5, 20cm) als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Daten der Kontrollfläche nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli und September 2008, n: 3 (40-200kPa), 4 (400kPa).74	
Abb. 45: Einzelwerte der Kohäsion c (kPa) (Standort: Röhu) in Abhängigkeit vom Wurzeltrockengewicht ($g \text{ cm}^{-3}$) in 5-25cm Tiefe. Daten beider Kulturen (Knaulgras, Rohrglanzgras) der Kontrollfläche nach Vorentwässerung auf -6kPa im September 2008, n: 5.74	

VI

- Abb. 46: Einzelwerte der Kohäsion c (kPa) und Winkel der inneren Reibung φ ($^{\circ}$) (Standort: Vorbuse) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle; 1x - mit einer Überfahrt 1x) nach Vorentwässerung auf -6kPa im September 2007, n: 1 75
- Abb. 47: Vorbelastung Pv (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, Oktober), der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) nach Vorentwässerung auf -6kPa in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (•). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von α : 0,05; n: siehe Abbildung, Pv-Klassifizierung nach DVWK (1995)..... 76
- Abb. 48: Vorbelastung Pv (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte pt ($g \text{ cm}^{-3}$). Daten aller Überfahrungshäufigkeiten (0x - Kontrollfläche, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten), beider Bestandeszusammensetzungen (mehr Leguminosen, mehr Graspflanzen) und aller Tiefen (5, 10, 20cm) nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli und Oktober 2008, n: 56 77
- Abb. 49: Rebound (%) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Gehalt an organischem Kohlenstoff C_{org} ($g \text{ kg}^{-1}$) für die Auflaststufen 40-400kPa. Daten beider Bestandeszusammensetzungen (mehr Leguminosen, mehr Graspflanzen) und aller Tiefen (5, 10, 20cm) von der Kontrollfläche nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli 2008, n: 12 78
- Abb. 50: Vorbelastung Pv (kPa) (Standort: Röihu) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, September), der Tiefe (5, 20cm), der Pflanzenart (Kg - Knaulgras, Rg - Rohrglanzgras) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) nach Vorentwässerung auf -6kPa in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (•), n: 3, Pv-Klassifizierung nach DVWK (1995) 79
- Abb. 51: Vorbelastung Pv (kPa) (Standort: Röihu) in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte pt ($g \text{ cm}^{-3}$). Daten aller Überfahrungshäufigkeiten (0x - Kontrollfläche, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten), beider Kulturen (Knaulgras, Rohrglanzgras) und Tiefen (5, 20cm) nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli und September in 2008, n: 32 79
- Abb. 52: Mittel-/Einzelwerte der Vorbelastung Pv (kPa) (Standort: Vorbuse) in Abhängigkeit von der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle; 1x - mit einer Überfahrt) und der Tiefe (5, 10, 20cm) nach Vorentwässerung auf -6kPa im September 2007, n: siehe Abbildung, Pv-Klassifizierung nach DVWK (1995)... 80
- Abb. 53: Vorbelastung Pv (kPa) (Standort: Vorbuse) in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte pt ($g \text{ cm}^{-3}$). Daten aller Tiefen (5, 10, 20cm) und Überfahrungshäufigkeiten (0x - Kontrollfläche und 1x - mit einer Überfahrt) nach Vorentwässerung auf -6kPa im September 2007..... 80
- Abb. 54: Lagerungsdichte pt ($g \text{ cm}^{-3}$) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der vorherigen Bewirtschaftung (konventionell, konservierend) und der Dauer unter Grünland (konventionell 4 Jahre, konservierend 3 Jahre), in den Jahren 2007-2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (•). Daten von Kontrollfläche in 10cm Tiefe. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei einem Signifikanzniveau von α : 0,05; n: konservierend 72, konventionell 57, pt-Klassifizierung nach AG Boden (2005). 81
- Abb. 55: Vorbelastung Pv (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der vorherigen Bewirtschaftung (konventionell, konservierend) und der Dauer unter Grünland (konventionell 4 Jahre, konservierend 3 Jahre) in den Jahren 2007-2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (•). Daten der Kontrollfläche in 10cm Tiefe nach Vorentwässerung auf -6kPa. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei einem Signifikanzniveau von α : 0,05; n: konservierend 12, konventionell 14, Pv-Klassifizierung nach DVWK (1995). 82
- Abb. 56: Gesättigte Wasserleitfähigkeit k_f ($\log \text{ cm d}^{-1}$) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der vorherigen Bewirtschaftung (konventionell, konservierend) und der Dauer unter Grünland (konventionell 4 Jahre, konservierend 3 Jahre) in den Jahren 2007-2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (•). Daten der Kontrollfläche in 10cm Tiefe. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei einem Signifikanzniveau von α : 0,05; n: konservierend 10, konventionell 16, kf-Klassifizierung nach DVWK (1997).. 83
- Abb. 57: Luftleitfähigkeit k_l ($\log \text{ cm s}^{-1}$) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der vorherigen Bewirtschaftung (konventionell, konservierend) und der Dauer unter Grünland (konventionell 4 Jahre, konservierend 3 Jahre) in den Jahren 2007-2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (•). Daten der Kontrollfläche in 10cm Tiefe nach Vorentwässerung auf -6kPa. Die Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei einem Signifikanzniveau von α : 0,05; n: konservierend 12, konventionell 30, kl-Klassifizierung nach DVWK (1997).. 83

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Bodentextur (Standort: Hohenschulen) der Pseudogley-Parabraunerde aus Geschiebelehm.	27
Tab. 2: Einige bodenphysikalische Kenngrößen (Standort: Hohenschulen) in 10cm Tiefe nach Vorentwässerung auf - 6kPa.....	28
Tab. 3: Bodentextur und einige bodenchemische Kenngrößen (Standort: Röhu) der Parabraunerde aus Geschiebelehm (Daten: E. Reintam unveröffentlicht).	29
Tab. 4: Bodentextur (Standort: Vorbuse) der Braunerde aus Geschiebelehm (Daten: E. Reintam, unveröffentlicht)....	29
Tab. 5: Ansaatmischung (Standort: Hohenschulen) des Grünlandversuches im Jahr 2004.	30
Tab. 6: Übersicht über Zeitpunkt der Probennahme und- umfang (Standort: Hohenschulen).....	32
Tab. 7: Übersicht über Zeitpunkt der Probennahme und -umfang (Standort: Röhu).....	33
Tab. 8: Einstufung bodenphysikalischer Kennwerte nach AG Boden (2005) und DVWK (1995, 1997).	37
Tab. 9: Bodenchemische Eigenschaften (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Düngungsintensität (N: 0, 360kg ha ⁻¹ ; K: 300, 600kg ha ⁻¹) und der Bodentiefe (5, 10, 20cm).	41

Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Zahlen- und Buchstabensymbole

Überfahrungsintensitäten

- 0x Kontrolle, ohne Überfahrung
 1x eine Überfahrung
 2x zwei Überfahrungen

Düngungsintensitäten

- N0 K300 kein Stickstoff und 300kg Kalium pro Hektar
 N0 K600 kein Stickstoff und 600kg Kalium pro Hektar
 N360 K300 360kg Stickstoff und 300kg Kalium pro Hektar
 N360 K600 360kg Stickstoff und 600kg Kalium pro Hektar

Pflanzen

- mL mehr Leguminosenpflanzen
 mG mehr Grasfarnen
 Rg Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea* L.)
 Kg Knaulgras (*Dactylis glomerata* L.)

A	Grundfläche der abgescherten Probe, cm ²
A _K	Reifenkontaktfläche, cm ²
A _R	Summe der Wurzelquerschnitte in der Scherfläche, cm ² cm ²
b _R	Reifenbreite, cm
c	Kohäsion, kPa
C _{org}	organischer Kohlenstoffgehalt, g kg ⁻¹
C _w	Erhöhung der Kohäsion durch die Wurzeln, kPa
D	Durchmesser, mm
d _R	Reifendurchmesser, cm
F	Reißkraft (Zugkraft, bei der die Wurzel zerreißt), N
h	Länge, mm
GPV	Gesamtporenvolumen, Vol.%
k _f	gesättigte Wasserleitfähigkeit, cm d ⁻¹
k _l	Luftleitfähigkeit, cm s ⁻¹
LK	Luftkapazität, Vol.%
n	Stichprobenanzahl
nFK	nutzbare Feldkapazität, Vol.%
O	Wurzeloberflächendichte, cm ² cm ⁻³
ODR	Sauerstoffdiffusionsrate, µg m ⁻² s ⁻¹
pF	Logarithmus des Betrags des Matrixpotenzials, log -hPa
PGA	Pseudomonas-Glutaminase-Asparaginase
pH	negativer dekadischer Logarithmus der H ⁺ -Ionen Konzentration
p _i	Reifeninnendruck, kPa

P_R	Radlast, Mg
P_v	Vorbelastung, kPa
r	Radius, mm
T_R	Zugfestigkeit, MPa
t_w	Wurzelzugfestigkeit pro Flächeneinheit des Bodens, MPa cm ⁻²
u_a	Porenluftdruck, kPa
u_w	Porenwasserdruck, kPa
VA-Mykorrhiza	Vesikular-arbuskuläre Mykorrhiza
WG	Wassergehalt, Vol.% oder Gew.%

Griechische Buchstabensymbole

α	Signifikanzniveau, %
θ	Winkel der Wurzelverdrehung beim Schervorgang, °
ρ_t	Lagerungsdichte, g cm ⁻³
σ'	effektive Spannung, kPa
σ_n	Normalspannung, kPa
τ	Scherwiderstand, kPa
φ	Winkel der inneren Reibung, °
χ	Wassersättigungsgrad, cm ³ cm ⁻³

1 Einleitung und Zielsetzung

In Estland und Deutschland stehen ca. 30% der landwirtschaftlich genutzten Flächen unter Grünlandnutzung (Stand: 2008) (Statistisches Bundesamt Deutschland, Statistikaamet), wobei sich durch den starken ökonomischen Einfluss der Grünlandanteil stetig ändert. So stehen bei der zunehmenden Reduzierung der Grünlandflächen (Auerswald & Schnyder 2009, Zander 2006) insgesamt immer weniger Flächen für die Milchviehhaltung zur Verfügung, gleichzeitig ist eine hohe Milchqualität gefragt. Somit erfordert eine hohe Futterqualität eine intensive Grünlandbewirtschaftung mit Intensivierung der Schnittnutzung und Düngungsgaben (Diepolder 2004, Elsäßer & Grund 2003). Weiterhin gab es in den letzten Jahrzehnten deutliche Änderungen in den Maschinengewichten. So werden Schlepper, Erntemaschinen und Güllefässer immer leistungsfähiger und damit schwerer (Diepolder & Rieder 2006, Alakukku 1999, Soane & van Ouwerkerk 1994). Lagen mittlere Radlasten im Jahre 1970 noch bei 1-2t, stiegen sie im Jahre 2000 um über 1t auf 2-3t an (Sommer et al. 2003). Nach Bolling (1984) kommen bei Lade- und Tankwagen immer höhere Radlasten zum Einsatz, die bis zu 20t betragen können. Frost (1988) gibt 5t als typische Radlast für Güllefässer an, genauso wie Stahl et al. (2009) darauf hinweisen, dass Radlasten vieler der zur Grünlandbewirtschaftung üblichen Maschinen und Geräte bei über 5t liegen. Intensiv genutztes Grünland wird also häufig mit schweren Fahrzeugen mechanisch beansprucht. Im Vergleich zu Ackerflächen sind die Grünlandflächen außerdem wesentlich stärker durch Befahrungen betroffen (Douglas & Crawford 1998, Douglas 1994, Frost 1988). Insbesondere während der Gülleausbringung, der Ernte und Bergung des Grases findet intensivster Verkehr auf Grünlandflächen statt. Nach Diepolder & Raschbacher (2008) werden je Erntevorgang etwa 80% eines Schlages einmal überfahren. Bei drei bzw. fünf Schnitten wird die gesamte Fläche damit drei- bis fünffach überfahren, wobei Pflegemaßnahmen und eine wiederholte organische Düngung diese Belastung noch weiter erhöhen.

Um den Anforderungen der Futterqualität gerecht zu werden, erfordert die Erzeugung von hochwertigem Futter zusätzlich einen früheren ersten Schnitt, wodurch häufig auch zu früherer Jahreszeit auf noch feuchtem und instabilem Boden gefahren wird (Diepolder et al. 2005, Hakkanson 2005). Weiterhin ist durch das im Frühjahr und Frühsommer teilweise sehr enge Zeitfenster mit optimaler Futterqualität eine hohe Flächenleistung bei der Futterernte und -aufbereitung (wie Heubergung und Silage) und damit der Einsatz von schweren Maschinen mit hoher Schlagkraft erforderlich (Diepolder et al. 2005).

Obwohl bekannt ist, dass der Anstieg der Nutzungs frequenz und der Maschinengewichte zu nennenswerten technogenen Belastungen auf Grünlandböden führt, beschränken sich die meisten wissenschaftlichen Studien zum Thema Bodenverdichtung auf Flächen mit

ackerbaulicher Nutzung (im Vegl. Horn et al. 2006, Horn et al. 2000, Pagliai & Jones 2002). Eine Ausnahme stellt die Arbeit von Hammel (1993) dar, der auf zwei Böden unter Dauergrünland den Zusammenhang zwischen mechanischer Beanspruchung und Bodenverformung in Feld- und Laborversuchen untersuchte und den räumlichen Spannungszustand modellierte. Allerdings fehlen Betrachtungen des Pflanzen- bzw. Wurzelwachstums sowie der Verteilung der Wurzeln im Boden. Ähnliche Defizite weist die Arbeit von Stahl (2009) auf, in der zwar eine Erfassung der Spannungseinträge erfolgte, jedoch keine umfassende Verbindung zu weiteren bodenphysikalischen oder -biologischen Eigenschaften erstellt wurde. Nach Oldeman et al. (1991) ist Bodenverdichtung eine bedeutende Art der Bodendegradation in der Landwirtschaft, wovon weltweit über 68Mio. ha Ackerflächen betroffen sind, davon allein 33Mio. ha in Europa.

1.1 Pflanzenwachstum im Grünland

Das Pflanzenwachstum im Grünland wird von Düngung und Nutzungsintensität beeinflusst, was zu Änderungen der botanischen Zusammensetzung und des Spross-Wurzel-Verhältnisses des Grünlandpflanzenbestandes führt (Auerswald & Schnyder 2009, Diepolder et al. 2009, Diepolder & Rieder 2006). So werden bei hohen Stickstoffdüngungsmengen eine Abnahme der Artenvielfalt sowie die Verdrängung N-fixierender Bestandesbildner zu Gunsten von Grasarten bei einseitiger N-Gabe hervorgerufen (Trott 2003, Opitz & Boberfeld 1994). Mit der P- und K-Düngung steigt der Anteil an Leguminosen an, und mit zunehmender Nutzungshäufigkeit wird sowohl Wurzelmasse als auch -tiefgang zugunsten der oberirdischen Teile reduziert (Voigtländer & Jacob 1987). Die steigenden Stickstoffgaben bewirken, dass mit zunehmender N-Düngung das oberirdische Pflanzenwachstum steigt, während das verminderte Wurzelwachstum dazu führt, dass Pflanzenbestände empfindlich gegenüber Stressbedingungen wie Trockenheit oder oberflächennahem Bodendruck reagieren (Diepolder & Rieder 2006, Opitz & Boberfeld 1994). Nach dem Schnitt der oberirdischen Biomasse kann es zur Abnahme des Wurzelwachstums durch Änderungen im Wurzelsystem und zu einer verringerten Nährstoffaufnahme kommen (Rawnsley et al. 2002, Arredondo & Johnson 1998, Donaghy & Fulkerson 1997).

Das Wurzelsystem dient dazu, die Pflanzen im Boden zu verankern sowie Wasser und die darin gelösten Mineralstoffen aufzunehmen (Hooker et al. 2000). Die Adsorption erfolgt direkt an der Rhizodermis, hauptsächlich über die Wurzelhaare, die eine riesige Adsorptionsfläche bilden. Die Wurzelhaare werden in kurzer Zeit gebildet und sind nur wenige Tage funktionstüchtig (Gregory 2006b, Nguyen 2003). Um ihre Funktionen zu erfüllen, müssen Wurzeln in den Boden hineinwachsen. Dabei erfolgt das Längenwachstum der

Wurzel in einem kleinen Bereich in der Streckungszone (Glinski & Lipiec 1990, Raven et al. 1985). Die Wurzelspitze ist mit einer Wurzelhaube, diese wiederum mit Mucigel überzogen, das als Austrocknungsschutz dient, den Weg durch den Boden „schmiert“ und damit die Reibung verringert (Clark et al. 2003, Engels et al. 2000, Ijima et al. 2000, Bengough et al. 1997).

1.1.1 Wurzel-Boden-Interaktionen

Die Wurzeln wachsen nach dem Prinzip „Weg des kleinsten Widerstandes“ in bestehende Hohlräume des Bodens ein (Gregory 2006b, Glinski & Lipiec 1990). Eine Auswertung von mehreren Untersuchungsergebnissen ergab, dass der häufigste Durchmesser der Hauptwurzeln für Dikotyledonen (zweikeimblättrigen) 1300µm und für Monokotylen (einkeimblättrigen) Pflanzen 700 bzw. 900µm beträgt (Polomski & Kuhn 1998). Der Durchmesser von Wurzelhaaren liegt dagegen bei etwa 5-20µm (Gregory 2006b, Raven et al. 1985), die häufigste Wurzelhaarlänge für Pflanzenarten der Grünlandvegetation bei 1000µm (Polomski & Kuhn 1998). So werden die Wurzeln zuerst in Grobporen (mit einem Durchmesser von über 50µm) hineinwachsen, zu denen auch Bioporen wie alte Wurzelkanäle und Wurmgänge oder horizontale und vertikale Klüfte, Spalten und Risse gehören. Mittels Wurzelhaaren können auch Poren mit einem Durchmesser von 0,2-50µm erschlossen werden (Hartge 1978 zit. in Polomski & Kuhn 1998). Die stärkste Bewurzelung ist in Poren mit einem Durchmesser zwischen 400 und 1500µm zu erwarten (Polomski & Kuhn 1998). Dies entspricht den weiten Grobporen, die nicht zur Speicherung von pflanzenverfügbarem Wasser beitragen. Durch das Hineinwachsen in diese Poren wird ein Teil des Porenquerschnitts von der Wurzel eingenommen und die Poren somit „de facto“ für den Wassertransport deutlich enger. Dadurch können Pflanzen das zu schnelle Versickern von Niederschlagswasser verhindern.

Wenn Poren aufgrund der Größe für die Wurzeln nicht zugänglich sind, muss an der Wurzelspitze genügend Kraft ausgeübt werden, um den Boden zu verformen (Gregory 2006a). Nach Clark et al. (2003) und Bengough et al. (1997) wird die maximale Festigkeit der Böden, in die eine Wurzel eindringen kann, beim maximalen Turgor definiert. Folglich hört die Verlängerung der Wurzelspitze auf, wenn der hydrostatische Druck nicht ausreicht, um diesen Widerstand im Boden zu überwinden. Nach Bengough et al. (1997) können Wurzeln sowohl in Interaggregatporen als auch in zylinderförmige Sekundärporen eindringen, die schmäler als die Wurzel selbst sind. Auch Scolefield & Hall (1985) konnten belegen, dass Wurzeln von *Lolium perenne* (<0,88mm) in Poren mit nur einem Drittel dieses Durchmessers (>0,32mm) hineinwachsen; der Durchmesser der Wurzeln verringert sich dann durch das Flachdrücken der Kortexzellen. Dieser Vorgang ist durch den

Durchmesser der Wurzelhaube und des primären Leitgewebes (Xylem und Phloem) begrenzt.

Wenn die Bodenkanäle kleiner als die Durchmesser der Wurzeln sind, dann müssen sie einen Wurzelwachstumsdruck (Turgordruck minus Verformungsbehinderung der Zellwand) ausüben, um die zwischen den Bodenpartikeln wirksamen Bindungskräfte zu überwinden und die Partikel zu verdrängen (Clark et al. 2003). So kann ihr Wachstum fortschreiten, wenn der Turgordruck der Verlängerungszelle ausreicht, die Begrenzungen zu überwinden, die ihr durch die viskoelastischen Zellwände und die Bodenmatrix auferlegt werden (Gregory 2006b, Clark et al. 2003, Bengough et al. 1997).

Der beim Hineinwachsen von Wurzeln ausgeübte Druck auf den umgebenden Boden liegt nach Misra et al. (1986b) bei bis zu 0,5MPa, während bei Clark & Barraclough (1999) Mittelwerte zwischen 0,41 und 0,44MPa gemessen wurden. Drücke von Maiswurzeln sind nach Bengough & Mullins (1991) bei 0,26-0,47MPa anzusetzen. Der Druck wirkt sich sowohl in radialer (zur Seite) als auch axialer (vorwärts gerichteter) Richtung aus (Clark et al. 2003, Clark & Barraclough 1999, Misra et al. 1986a). Gill & Bolt (1955 zit. in Gregory 2006b) haben bei verschiedenen Kulturen Drücke in axialer Richtung von 0,7 bis 2,5MPa und in radialer Richtung von 0,4 bis 0,6MPa bestimmt. Dagegen haben Misra et al. (1986a) größere Werte in die radiale als in die axiale Richtung gemessen. Nach Gregory (2006b) könnten die unterschiedlichen Ergebnisse in den unterschiedlichen Messmethoden begründet sein. Den zuvor ist Atwell (1993) zu dem Schluss gekommen, dass der Druck bedingt durch die größere Fläche zur Seite größer sein sollte als in axialer Richtung. Im Vergleich dazu haben McKenzie & Dexter (1987, 1988) festgestellt, dass der von Regenwürmern verursachte Druck deutlich geringer ist als der von Wurzeln (in radialer Richtung ein Viertel und in axialer Richtung ein Zehntel des Wurzeldrucks).

Dies kann zu Änderungen der Porositäts- bzw. Lagerungsdichtewerte im wurzelnahen Bereich führen (Gregory 2006a, Young 1998, Bruand et al. 1996, Dorioz et al. 1993). In dem Zusammenhang berichten Bruand et al. (1996), dass in den Boden eindringende Maiswurzeln die Porosität des Bodens um 22-24% reduzieren und die Lagerungsdichte auf bis zu $1,80\text{g cm}^{-3}$ in Wurzelnähe erhöhen können, während der umliegende Boden eine Dichte von $1,54\text{g cm}^{-3}$ aufwies. Jedoch wird die Erhöhung der Lagerungsdichte mit dem Abstand zur Wurzel geringer (Dexter 1987). Nach Dorioz et al. (1993) treten diese Änderungen meistens innerhalb einer 0,05-0,2mm breiten Zone um die Wurzeln auf (homogenisierte Lehmbrocken mit Graswurzeln), während Braunack & Freebairn (1988 zit. in Young 1998) eine Auswirkung noch bis in 3-4mm Umkreis festgestellt haben. Im Vergleich dazu konnte Bruand et al. (1996) dies nur bis 1,4mm nachweisen. Die Intensität dieser durch die Volumenexpansion der Wurzeln geringfügigen Verdichtung des Bodens

hängt aber wiederum von den Bodenkenngroßen genauso wie von den Wurzeleigenschaften ab (Glinski & Lipiec 1990). In diesem Zusammenhang haben Materechera et al. (1991, 1992) in einem Vergleich der Sämlingwurzeln von 22 Arten gezeigt, dass die Wurzeln von Dikotyledonen Pflanzen besser in verdichtete Böden eindringen können als die von Monokotyledonen Pflanzen. Cochrane & Aylmore (1994) berichteten, dass Hülsenfrüchte (Dikotyledonen) als wirkungsvoller gelten, um die Bodenstruktur zu stabilisieren als Nichthülsenfrüchte, Lupinen waren dabei die leistungsfähigsten. Als Grund dafür sehen Materechera et al. (1991, 1992), dass Dikotyledonen einen höheren axialen Wurzelwachstumsdruck erzeugen können. Im Gegensatz dazu haben Clark & Barraclough (1999) keine Unterschiede zwischen axialem Wurzelwachstumdruck von Dikotyledonen und Monokotyledonen feststellen und auch keine Korrelation zwischen maximalem Wurzelwachstumsdruck und Durchmesser erkennen können.

1.1.1.1 Aggregierung

Pflanzenwurzeln übernehmen eine wichtige Rolle bei der Aggregierung des Bodens. Änderungen der Bodenstruktur können dabei in einem sehr kurzen Zeitraum passieren. In Gewächshausuntersuchungen konnten Reid & Goss (1981) und Tisdall & Oades (1979) zeigen, dass sich die Stabilität von Bodenaggregaten schon nach 6 Wochen durch das Wachstum von Pflanzen erhöht hatte. Die Aggregatbildung durch mechanisches und biologisches Vernetzen und Verkleben sowie durch Quellung und Schrumpfung führte zu einer Umstrukturierung des Bodens, womit ein grobes Interaggregat- und gleichzeitig feineres Intraaggregatporensystem gebildet wurde, das die Funktionen des Bodens veränderte und auch die Stabilität gegenüber mechanischen Belastungen erhöhte.

Der Aggregierungsprozess Schrumpfung hängt von der Bodenart und von der Strukturstabilität ab und ist umso ausgeprägter, je feinkörniger der Boden und je geringer die Stabilität ist (Peng & Horn 2005, Hartge & Horn 1999, Mitchell & van Genuchten 1992). Dabei können Wurzeln über Wasseraufnahme kleinräumige Rissbildungen in der Wurzelumgebung induzieren (Oades 1993, Mitchell & van Genuchten 1992). Der Effekt ist abhängig vom Wurzelsystem und z.B. von der Art der Ansaat. So kann man bei Pflanzen in Reihensaft eine Rissbildung parallel zur Reihe feststellen, da der Boden zwischen den Reihen mehr Wasser enthält und das Wasser gerichtet zu den Pflanzen und folglich rechtwinklig zu den Pflanzenreihen fließt (Mitchell & van Genuchten 1992). Im Vergleich dazu ist im Grünland keine spezifische Lagebestimmung auszumachen (Oades 1993). Vergleicht man die Dikotyledonen mit den Monokotyledonen, dann hängt die Wasseraufnahme vom dem Wurzelsystem ab. Die einkeimblättrigen Pflanzen haben deutlich mehr feinere Wurzeln (Oades 1993). In dem Zusammenhang hat Vetterlein (1993) festgestellt,

dass eine hohe Wurzellängendichte eine verstärkte Wasserextraktion aus der betroffenen Bodenregion bedingt und dadurch die Austrocknung beschleunigt. Daraus resultieren eine intensivere Austrocknung in Wurzelnähe und damit einhergehende Aggregierungsprozesse.

Die unterschiedliche Quellungs- und Schrumpfungsintensität sowie -häufigkeit haben einen Einfluss auf die Ausprägung der Aggregate. Je häufiger und intensiver die Zyklen ablaufen, desto stärker ist die Aggregierung (Six et al. 2004, Angers & Caron 1998, Materechera et al. 1992, Dexter 1988). Zudem spielt nach Horn (1990) und Semmel et al. (1990) die Austrocknungsgeschwindigkeit eine entscheidende Rolle. Bei langsammerer Austrocknung ermöglicht ein über längere Zeit mobiler Wasserfilm eine verstärkte Ummorientierung der Partikel auf Ebenen geringer freier Energie, wodurch die Lagerungsdichte und Stabilität der Aggregate erhöht wird. Zusätzlich kann es durch den Wasserentzug der Wurzel zu Änderungen der Porengrößenverteilung kommen, wenn Potenzialgradienten zwischen Aggregatinnerem und -äußerem entstehen, die eine Verlagerung von Tonpartikeln von innen bis zum Aggregatrand bewirken können (Junkersfeld 1995).

Weiterhin können Pflanzenwurzeln die Mikroaggregate mechanisch „vernetzen“. Six et al. (2004) haben darauf hingewiesen, dass verschiedene Bindemittel in den verschiedenen hierarchischen Stadien der Aggregate vorkommen. So erfolgt die Stabilisierung von Makroaggregaten ($>250\mu\text{m}$) mit Hilfe von Pflanzenwurzeln, aber auch durch Pilzhypfen von der VA-Mykorrhiza (vesikular-arbuskuläre Mykorrhiza) (Six et al. 2004, Drury et al. 1991, Tisdall & Oades 1982). In dem Zusammenhang nimmt das Glycoprotein Glomalin eine wichtige Rolle bei der Bodenstrukturierung ein (Rillig et al. 2003). Bearden & Petersen (2000) stellten fest, dass für die Entstehung von Aggregaten mit einem Durchmesser von 1-2mm Pilzhypfen und ab 2mm Durchmesser Wurzeln und Pilzhypfen verantwortlich sind. Moreno-Espindola et al. (2007) wiesen nach, dass Feinwurzeln ($<1\text{mm}$) effektiver Partikel binden als Pilzhypfen. Miller & Jastrow (1990) fanden signifikante Korrelationen zwischen Wurzellänge, -masse und Aggregierung. Die Entstehung von Mikroaggregaten (20-250 μm) erfolgt durch Wurzelexsudate, deren Polysaccharide wie „Klebstoff“ wirken (Tisdall & Oades 1982). Aber die Wurzelexsudation ist von vielen Faktoren abhängig, so wird im trockenen Boden mehr produziert (Six et al. 2004). Die Produktion ist bei verschiedenen Pflanzenarten unterschiedlich und ist größer in früheren Entwicklungsstadien (Six et al. 2004). Weiterhin nimmt die Exsudation mit einer Zunahme der Bodendichte zu (Iijima et al. 2000, Boeuf-Tremblay et al. 1995).

Das Eindringen der Pflanzenwurzeln kann die Bodenstruktur jedoch auch durch die Zerstörung von Makroaggregaten verändern. Materechera et al. (1994) berichten von größeren Mengen an kleinen Aggregaten im Boden mit Wurzeln im Vergleich zum Boden ohne

Pflanzen. Six et al. (2004) und Denef et al. (2002) haben festgestellt, dass durch Wurzelwachstum der Anteil an Makroaggregaten verringert wurde, während sich die Menge an Mikroaggregaten erhöhte. Reid & Goss (1982) fanden dazu heraus, dass es schon nach 25 Tagen zu einer 10-20%igen Abnahme von Makroaggregaten gekommen ist.

Der Effekt von Wurzeln auf die Bodenstruktur hängt auch von den Pflanzenkulturen ab. Zum einen können die Monokotyledonen den Boden besser als die Dikotyledonen zusammenhalten, da mehr Wurzeln und Wurzelexsudate vorhanden sind (Haynes & Beare 1997, Glinski & Lipiec 1990). Aber auch der Einfluss der Wurzel-Knöllchenbakterien (Rhizobien) auf Aggregierung ist anzunehmen, weil diese in der Lage sind, Polysaccharide im Überfluss zu produzieren. Fehrman & Weaver (1978 zit. in Mytton et al. 1993) konnten dabei in rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen erkennen, wie Schluffpartikel durch derartige Polysaccharide verbunden wurden. Ähnliches gilt auch für Latif et al. (1992), die nach drei Jahren unter einer Mischkultur von Leguminosen (Luzerne, Klee und Wicke) und Mais beobachteten, dass die Leguminosen einen signifikant höheren Effekt auf den Aggregatdurchmesser und die Stabilität hatten.

Bezogen auf die organische Substanz, weisen von Lützow et al. (2007) darauf hin, dass fast 90% des organischen Kohlenstoffs im Boden in Aggregaten, davon 20-40% in Mikroaggregaten, enthalten sind. So beinhalten Makroaggregate zwar mehr organische Substanz als Mikroaggregate, doch verringert sich gleichzeitig der Anteil an schnell abbaubarer organischer Substanz mit der Aggregatgröße (von Lützow et al. 2007). In diesem Zusammenhang hat Steffens (2009) auf Grünlandflächen im Norden Chinas festgestellt, dass die Einträge der organischen Substanz primär in größeren Aggregatgrößenklassen und besonders in Form partikulärer organischer Substanz stattfinden. Abiven et al. (2009) konnten beobachten, dass schnell abbaubare organische Substanz (Mucilage, Exsudate) einen sehr schnell wirksamen und starken Effekt auf die Aggregatstabilität hat, während schwer abbaubare Substanzen wie Torf und Lignin fast keinen Effekt auf die gesamte Stabilität über die gemessenen Zeitskalen aufweisen (ab 3 Monaten). Auch Loveland & Webb (2003) weisen auf die stabilisierende Wirkung von organischer Substanz hin, die vor allem auf die „frischen“ Bestandteile (Mono-, Polysaccharide, Wurzeln Pilzhyphen) zurückzuführen ist. Da aber Wurzeln und Pilzhyphen nur temporäre Bindemittel darstellen, gelten die Makroaggregate als nicht langlebig (<1 Jahr) (Oades 1984).

Die organische Substanz kann auch die Benetzbarkeit des Bodens verändern. Hierzu zeigten Whalley et al. (2005) und Hallett & Young (1999), dass die Wurzelexsudate nach Trocknung wasserabweisend werden. Der Grund dafür ist, dass die hydrophob wirkenden Substanzen amphiphile Eigenschaften (ein hydrophobes und ein hydrophiles Ende) aufweisen (Hallett 2008). Zunächst liegen beide Enden ungeordnet vor, bei Austrocknung

richten sich jedoch die hydrophilen Enden zu den mineralischen Oberflächen aus, so dass die hydrophoben Enden in den Porenraum reichen. Czarnes et al. (2000a,b) haben in Versuchen mit PGA (Pseudomonas-Glutaminase-Asparaginase) festgestellt, dass die Festigkeit zwischen Partikeln stieg und die Benetzungsrate bei Aggregaten abnahm. Weiterhin können die Wurzeln die Zugfestigkeit von Aggregaten erhöhen. Nach Amellal et al. (1998) ist in der Nähe von Wurzeln die Zugfestigkeit von Aggregaten erhöht, denn Wurzelexsudate stimulieren die mikrobielle Aktivität und erzeugen damit adhäsive Kräfte, die wiederum Bodenaggregate in der Rhizosphäre stabilisieren.

Als weiteren Effekt der organischen Substanz und der Aggregierung kann man die Bodenresilienz betrachten. Das ist die Fähigkeit des Bodens, seine Anfangseigenschaften und Funktionen zum Teil wiederherzustellen, wenn der Druck verringert oder entfernt wird (z.B. nach der Überfahrt mit Maschinen) (Gregory et al. 2007, Baldock 2002). Der Rebound als Parameter für die Resilienz (Gregory et al. 2009, Griffiths et al. 2005, Zhang et al. 2005) kennzeichnet den elastischen Anteil der Setzung und ist die Differenz der Setzung während der Be- und Entlastung bezogen auf die Gesamtsetzung. In dem Zusammenhang weist Soane (1990) darauf hin, dass die Zunahme der organischen Substanz im Boden die Elastizität des Bodens erhöhen kann. O'Dogherty & Wheeler (1984) untersuchten in Kompressionsversuchen homogenisierte Proben mit Stroh mit dem Ergebnis, dass das Stroh die Elastizität nach dem Komprimieren erhöht. Durch den Zusatz von Stroh konnte eine Reduzierung der Erhöhung der Lagerungsdichte nach Entlastung von 25-45% erreicht werden. Nach Gregory et al. (2007) wird die Resilienz von Böden durch Quellungs-, Schrumpfungs- und durch Gefrier- und Tauzyklen sowie durch Wurzelwachstum und die Bodenfauna-Aktivität erhöht. So verfügten in ihren Untersuchungen Grünlandflächen durch den höheren Anteil an organischer Substanz über einen höheren Rebound als die Ackerflächen. In dem Zusammenhang konnten da Veiga et al. (2007) einen bodenbearbeitungsspezifischen Reboundeffekt nachweisen. So beläuft sich der Effekt für die „no tillage“ Fläche in 5cm Tiefe auf über 30% und für die konventionell bearbeiteten auf fast 20%. Die Erhöhung des Rebounds ließ sich dabei durch höhere Strukturstabilität erklären.

1.1.1.2 Bodenarmierung

Inwiefern die mechanische Stabilität eines Bodens durch die mit der Durchwurzelung verbundene Bodenarmierung beeinflusst wird, soll im Folgenden besprochen werden. Es gibt sehr viele Untersuchungen (theoretische Modelle sowie „in situ“ und Labormessungen) über den Einfluss der Vegetation (meistens Baumwurzeln) als lebende Bodenarmierung, die im Zusammenhang mit dem Erosionsschutz und Renaturierung rutschgefährde-

ter Gebiete und Uferschutz an Gewässern erarbeitet wurden (z.B. Graf et al. 2009, De Baets et al. 2008, Stokes et al. 2008, Abernethy & Rutherford 2001, Operstein & Frydman 2000, Wu & Watson 1998, Greenway 1987).

Der Vorstellung von einer Bodenstabilisierung durch Vegetation liegt die Idee zugrunde, dass die Pflanzenwurzeln ähnlich wie der Bewehrungsstahl im Beton wirken (Schiechtl 1985). Dahinter steht die Theorie, dass durch einen durchwurzelten Boden die beiden Komponenten der Festigkeitserhöhung, nämlich Zugfestigkeit und Kompressionsverhalten, verbessert werden. Während Pflanzenwurzeln zwar zugfest sind, können sie der Kompression kaum standhalten. Anders verhält es sich beim Boden, der weniger stark auf Kompression reagiert, aber empfindlich gegenüber Zugspannungen ist. Eine Kombination in einer Boden-Wurzel-Matrix ist daher viel stabiler als es die Einzelkomponenten sein können (Gray & Leiser 1989, Greenway 1987).

Der mechanische Einfluss der Durchwurzelung auf die Bodenstabilität als lebende Bodenarmierung ist also hauptsächlich auf die Erhöhung der Scherfestigkeit zurückzuführen. Viele Autoren haben darauf hingewiesen, dass durchwurzelte Böden eine deutlich höhere Scherfestigkeit aufweisen als nicht durchwurzelte. Das hat man sowohl an Hand von „*in situ*“ Schertests (z.B. Fan & Su 2009, Docker & Hubble 2008, Cazzuffi et al. 2006, Wu & Watson 1998), als auch an Hand von Bodenproben mit unter Laborbedingungen gewachsenen Wurzeln feststellen können (Loades et al. 2010, Operstein & Frydman 2000, Tengbeh 1993, Waldron & Dakessian 1982). Des Weiteren konnten Zhang et al. (2010) mittels homogenisierter Proben und künstlicher Wurzeln diese Ergebnisse bestätigen.

In den theoretischen Modelle, die Wu & Watson (1998) ausgearbeitet haben, wird der Beitrag von Wurzeln zur Bodenstabilität über einen Kohäsionsfaktor formuliert, der eine Funktion der in der Wurzel mobilisierbaren Zugkräfte ist. Die Scherfestigkeit des durchwurzelten Bodens berechnet sich demnach aus einer Erweiterung der Mohr-Coulomb'schen Bruchbedingung nach folgender Gleichung:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \varphi + c + c_w \quad (1)$$

(τ =Scherwiderstand, σ_n =Auflast, φ =Winkel der inneren Reibung, c =die Kohäsion) In Gl. 1 ergibt sich die Erhöhung der Kohäsion c durch c_w als Folge der stabilisierenden Wirkung der Wurzeln aus der Wurzelzugfestigkeit und der Menge an Wurzeln in der Scherzone.

So ist die Erhöhung des Scherwiderstandes als eine Funktion der Durchwurzelungsintensität zu sehen. In dem Zusammenhang haben viele Autoren eine positive Korrelation zwischen der Wurzellängendichte (Normaniza et al. 2008, Normaniza & Barakbah 2006), der Pflanzendichte (Loades et al. 2010, Pollen & Simon 2005), der Wurzelmasse (Ziemer

1981), der Summe der Wurzelquerschnittsflächen (Mickovski et al. 2009, Reubens et al. 2007, Wu & Watson 1998, Waldron & Dakessian 1982) und der Zunahme des Scherwiderstands im Boden gefunden.

Die Erhöhung des Scherwiderstandes kommt zustande durch die Erhöhung der Kohäsion infolge von Austrocknung, wobei der Winkel der inneren Reibung durch das Vorhandensein von Wurzeln unbeeinflusst bleibt (Loades et al. 2010, Zhang et al. 2010, De Baets et al. 2008, Fan & Su 2009, Norris et al. 2008, Stokes et al. 2008, Cazzuffi et al. 2006, Gent et al. 2005, Mattia et al. 2005, Abernethy & Rutfherfurd 2001, Operstein & Frydman 2000, Wu & Watson 1998).

Die Erhöhung der Bodenstabilität aufgrund der Zunahme der Kohäsion kann durch die stabilisierend wirkenden feinen Wurzeln und durch die erhöhte Adhäsion zwischen den Bodenpartikeln und Wurzeln erklärt werden (Styczen & Morgan 1995). Die Wurzelfasern erhöhen dabei die Scherfestigkeit hauptsächlich durch das Übertragen und Weiterleiten der Scherspannungen. Die Wurzel verformt sich durch Dehnung und gibt dem Boden Stabilität bzw. Elastizität, vorausgesetzt, sie ist gut verankert, so dass sie nicht aus dem Boden gezogen wird. Die Dehnung der Wurzel mobilisiert dadurch deren Zugwiderstand und erhöht damit die Stabilität des Bodens (Gray & Sotir 1996).

In dem Zusammenhang spielt die Wurzelzugfestigkeit eine wichtige Rolle, diese ist die Kraft, bei der die Wurzeln zerreißen, bezogen auf die Fläche. Die Zugfestigkeit steigt exponentiell mit der Reduzierung des Wurzeldurchmessers. Dieser Trend wurde in vielen Untersuchungen gefunden (Comino et al. 2010, Mickovski et al. 2009, De Baets et al. 2008, Bischetti et al. 2005, Gent et al. 2005, Mattia et al. 2005, Abernethy & Rutfherfurd 2001, Operstein & Frydman 2000, Nilaweera & Nutalaya 1999). Die Zugfestigkeit kann aber in sehr großen Bereichen variieren. Bischetti et al. (2005 zit. in Stokes et al. 2009) haben angegeben, dass man bei Wurzeln mit einem Durchmesser von 0,15-4,5mm Zugfestigkeiten von 20-730MPa erwarten kann.

Die Zugfestigkeit von Wurzeln variiert nicht nur erheblich zwischen den Arten, sondern auch innerhalb der Art, da die Zugfestigkeit von vielen Faktoren abhängt (Greenway 1987). So haben De Baets et al. (2008) und Tosi (2007) berichtet, dass sowohl von der Messmethodik als auch in Abhängigkeit des chemischen Zustandes der Wurzeln Unterschiede auftreten können. Hierzu gibt es beispielsweise Untersuchungen an Baumwurzeln, die belegen, dass es eine hohe Korrelation zwischen dem Zellulosegehalt und der Zugfestigkeit einer Wurzel gibt und feinere Wurzeln mehr Zellulose als dicke beinhalten (Gent et al. 2005).

Schiechtl (1985) hat festgestellt, dass die Zugfestigkeitswerte mit dem Wassergehalt variieren und dass die Wurzeln umso zugfester sind, je trockener sie sind. Gray & Barker

(2004 zit. in De Baets et al. 2008) haben belegt, dass die Zugfestigkeit von Wurzeln im feuchten und lufttrockenen Zustand signifikant verschieden ist. Weiterhin gibt es in der Literatur Angaben zum Einfluss der Jahreszeit auf die Zugfestigkeit. Nach Turmaniana (1965 zit. in Stokes et al. 2008) sind die Unterschiede in der Wurzelzugfestigkeit im Sommer und Winter nur durch die Änderungen im Wurzelwassergehalt bedingt. Überdies haben Loades et al. (2010) untersucht, dass es bei Gerste einen vom Vegetationszeitpunkt abhängigen Effekt geben kann, obwohl sie keine eindeutigen Unterschiede in den Zugfestigkeitsdaten erkennen konnten. Sie haben nachgewiesen, dass während der Wachstumsphasen der Gerste der Stabilisierungseffekt durch Wurzeln nach 20 Wochen geringer war als nach 4 Wochen. Eine Erklärung könnte sein, dass die Wurzelfestigkeit während der Getreidereifung abnimmt.

In diesem Zusammenhang weist Hähne (1991) darauf hin, dass die Zugfestigkeit auch vom Alter der Wurzel abhängt, da diese mit dem Alter abnimmt. Ursache hierfür ist, dass die Festigkeitselemente der Graswurzel mit zunehmendem Alter verhältnismäßig langsamer mitwachsen als z.B die Versorgungszellen. Schmidt et al. (2001) und Watson et al. (1999) zeigten an Baumwurzeln, dass die Zugfestigkeit lebender Wurzeln signifikant größer ist als die verwesender. Nach dem Fällen der Bäume verloren sie ihre Festigkeit in Raten von 0,3 bis 0,5MPa pro Monat bei einer ursprünglichen Zugfestigkeit von 10-60MPa (O'Loughlin & Ziemer 1982).

Außerdem sollte man neben den Wurzeleigenschaften bei der Zugfestigkeitsbestimmung auch die Eigenschaften des bewurzelten Bodenabschnittes betrachten. Gent et al. (2006 zit. in Bischetti et al. 2009) konnten z.B. zeigen, dass die Zugfestigkeit bei gleicher Kultur auf zwei Standorten verschieden sein kann durch die verschiedenen klimatischen Bedingungen. Weiterhin haben Goodman & Ennos (1999) beobachtet, dass Wurzeln von *Zea mays L.* fester waren, wenn sie auf einem Boden mit geringerer Lagerungsdichte wuchsen.

Weiterhin haben Operstein & Fryzman (2000) eine positive Korrelation zwischen dem Feinwurzelanteil und dem Stabilisierungseffekt festgestellt. Untersuchungen dazu von Reubens et al. (2007), Bischetti et al. (2005) und Gent et al. (2005) ergaben, dass die Wurzelzugfestigkeit im Bereich geringer Durchmesser sehr stark mit höherem Durchmesser abnimmt, um dann ab etwa 3mm Durchmesser nur noch geringere Veränderung zu erfahren. Daraus lässt sich ableiten, dass eine große Anzahl dünnerer Wurzeln den Boden stärker stabilisiert als eine geringe Anzahl dickerer Wurzeln (De Baets et al. 2008, Reubens et al. 2007).

Über den Stabilisierungseffekt entscheiden jedoch nicht nur die Zugfestigkeit und die Menge der Wurzeln, sondern ebenso deren Verteilung innerhalb des Bodens. In dem Zu-

sammenhang haben Fan & Chen (2010) nachgewiesen, dass die Erhöhung des Scherwiderstandes bei vertikal wachsenden Wurzeln deutlich höher war als bei solchen mit dominierendem seitlichen Wachstum. Zhang et al. (2010) konnten dies mit homogenisierten Proben mittels eines triaxialen Scherversuchs gut verdeutlichen. Sie haben festgestellt, dass eine Probe mit einer künstlichen Wurzel in vertikaler Richtung über einen deutlich höheren Kohäsionswert verfügt als eine Probe mit zwei Wurzeln in horizontaler Richtung. Der geringere Scherwiderstand in der triaxial abgesicherten Probe mit horizontal eingefügten künstlichen Wurzeln, ist darauf zurück zu führen, dass diese im Gegensatz zu den vertikal eingefügten Wurzeln durch den tangentialen Schervorgang nicht zerrissen worden sind.

Weiterhin ist der Stabilisierungseffekt auch von der Bodenart und dem Wassergehalt abhängig. In den Untersuchungen von Tengbeh (1993) war die von Wurzeln hervorgerufene Erhöhung des Scherwiderstandes in Tonböden deutlich höher als in Lehmböden. Auch die Bodenfeuchtigkeit beeinflusst nach Collins (2001 zit. in Pollen 2007) diese Prozesse. Auch Pollen (2007), Tosi (2007) und Tengbeh (1993) konnten zeigen, dass der Armierungseffekt von Wurzeln bei hohem Bodenwassergehalt verringert wird. Dies belegten Zhang et al. (2010) an homogenisierten Proben mit künstlichen Wurzeln, bei denen sowohl die maximalen Scherwiderstandswerte als auch die Erhöhung der Kohäsion deutlich geringer in feuchterem Boden (20% Wassergehalt) als in trockenerem ausfielen (12% Wassergehalt).

1.2 Faktoren der Bodenverdichtung im Zuge der Grünlandbewirtschaftung

In welchem Maß die Bodenverdichtung auf Grünland zustande kommt, hängt von der Intensität und der Höhe der Belastung, d.h. von bodenexogenen Faktoren wie maschinenpezifischen Parametern (Radlast, Reifeninnendruck, Kontaktfläche und Kontaktflächendruck) und der Art der mechanischen Belastung (statisch oder dynamisch) ab (Hakkansson 2005, Alakukku 1999, Semmel & Horn 1993). Zusätzlich spielen die Belastungsdauer (Fazekas & Horn 2005), die Fahrgeschwindigkeit (Horn et al. 1991) und die Befahrungshäufigkeit (Horn et al. 2003) eine wichtige Rolle.

Beim Überfahren wird der innere Spannungszustand des Bodens, der sich aus verschiedenen Kräften zusammensetzt (Gewichtskraft, Auflast, Strömungsdruck des Bodenwassers sowie Ko- und Adhäsionskräften), verändert. Ist der Spannungseintrag kleiner als die interne Strukturstabilität, kann der Boden die Belastung tragen, reagiert elastisch und es kommt zu keiner Veränderung der Bodenstruktur. Liegt der Spannungseintrag allerdings über der Bodentragfähigkeit, kann der Boden diesen äußeren Kräften nicht durch mobilisierbare Reaktionskräfte (Auflagerkraft und Scherwiderstand) entgegenwirken, reagiert mit plastischer Verformung und es kommt zur Umorientierung des Korngerüstes, zu einer Zunahme der Korn-zu-Korn-Kontakte mit Komprimierung des Porenraumes und einer Erhöhung der Stabilität bis die resultierende bodeninterne Kraft wieder ein Spannungsgleichgewicht hergestellt hat (Hartge & Horn 1999).

Titze (2010) und Stahl et al. (2009) haben gezeigt, dass viele zur Grünlandbewirtschaftung übliche Maschinen und Geräte hohe vertikale Bodenspannungen in der Oberkrume verursachen. Diese sind häufig doppelt bis viermal so hoch wie die Tragfähigkeit der Böden bei Feldkapazität, d.h. häufig im Bereich von 200 bis 400kPa. Weiterhin führen mehrfache Überfahrten im Zuge der Bewirtschaftung zu kumulativen Bodenverdichtungseffekten. So zeigten Kopec et al. (2001), wie eine zunehmende Überfahrungshäufigkeit eine Erhöhung der Lagerungsdichte im Grünland verursachte. Weiterhin konnten Kopec & Glab (2003) feststellen, dass es mit steigender Anzahl von Überfahrten zu deutlicher Ertragsreduktion im Grünland kam, die sich mit höherem Traktorgewicht noch verstärkte. Untersuchungen von Jorajuria & Draghi (1997) über den Einfluss von einem „leichten“ (Radlast: 2,3t) und „schweren“ (Radlast: 4,1t) Traktor bei jeweils gleichem Kontaktflächendruck in einem Befahrungsversuch führten zu dem Ergebnis, dass ein leichter Traktor mit einer großen Anzahl an Überfahrten sich im Hinblick auf Bodenstruktur und Ertrag stärker negativ auswirkt als ein schwerer Traktor mit weniger Überfahrten. Dies unterstreicht die Auswirkung der mehrfachen Befahrung im Hinblick auf ihre kumulativen Effekte, und dass der Vorteil einer leichten Maschine mit mehreren Überfahrten

gen verloren geht. In diesem Zusammenhang haben auch Peth et al. (2010), Zink (2009) und O'Sullivan et al. (1999a) gezeigt, dass es durch wiederholtes Belasten, auch mit Auflasten kleiner als die Tragfähigkeit des Bodens, zu weiteren Setzungen bzw. plastischen Verformungen im Boden kommen kann.

Böden sind ein Dreiphasensystem, in dem die Gesamtspannung bzw. Auflast nicht nur über die Festphase bzw. über Korn-zu-Korn-Kontaktpunkte übertragen wird, sondern auch über die Gas- und Flüssigphase. Außerdem ist der Wassersättigungsgrad des Bodens wichtig (Horn & Rostek 2000, Horn et al. 1991). Als effektive Spannung wird die Spannung bezeichnet, die direkt auf das Korngerüst übertragen wird. Ihr Anteil steigt mit der Zunahme an Berührungspunkten der Bodenpartikel untereinander. Bei hohem Wassergehalt im Boden ist die Bodenstabilität vermindert, da Wasser nicht nur als Gleitfilm zwischen Bodenpartikeln wirkt und so Verschiebungen der Bodenteilchen untereinander stark erleichtert, sondern auch die Matrixpotenzialkräfte fehlen. Im wasserungesättigten Boden bilden sich Wassermenisken, die bei sinkendem Matrixpotenzial zunächst einen Stabilisierungseffekt haben, sobald aber die Wassermenisken bei Austrocknung abreißen, geht dieser Effekt wieder verloren. Im Boden überträgt die Neutralspannung oder der Porenwasserdruck einen Teil der wirkenden Auflast bzw. der Gesamtspannung und verringert damit die effektive Spannung (Baumgartl 1991). Die Zusammenhänge werden durch die effektive Spannungsgleichung von Bishop (1959 zit. in Baumgartl 1991) näher beschrieben:

$$\sigma' = (\sigma_n - u_a) + \chi(u_a \cdot u_w) \quad (2)$$

(σ' =effektive Spannung, σ_n =Normalspannung, u_a =Porenluftdruck, u_w =Porenwasserdruck, χ Faktor, der den Sättigungszustand des Bodens beschreibt $pF=-\infty$: $\chi=1$, $pF=7$: $\chi=0$).

Diesbezüglich stellte Hakkansson (2005) eine zunehmend intensivere Bodenverdichtung fest, je größer der Spannungseintrag und je feuchter der Boden beim Befahren war. Neben dem Wassergehalt des Bodens spielen hinsichtlich der mechanischen Belastbarkeit des Bodens weitere Faktoren eine wichtige Rolle. So wird die Strukturstabilität des Bodens unter anderem aus dem Zusammenwirken von Bodentextur, Lagerungsdichte, Aggregierungsgrad, Gehalt an organischer Substanz, Bodenwassergehalt, Art und Gehalt an Tonmineralen und Anteil austauschbarer Kationen (Horn & Rostek 2000, Semmel & Horn 1993, Horn et al. 1991) bestimmt. Horn & Rostek (2000) geben an, dass eine höhere Stabilität des Bodengefüges gegenüber mechanischen Belastungen zu erwarten sei, je mehr der Boden aggregiert ist. So nimmt die Bodenfestigkeit in der Reihenfolge der Gefügeformen kohärent < prismatisch < polyedrisch < krümelig, plattig < subpolyedrisch zu.

Im Grünland wird der Boden durch den Pflanzenbewuchs mechanisch stabilisiert. Da die intensive Durchwurzelung eine deutliche Verminderung der Druckfortpflanzung bewirkt (Stahl et al. 2009), wird die Tragfähigkeit des Bodens erhöht. Cofie et al. (2000) haben festgestellt, dass die vertikale Setzung unter einer Wurzelmatte im Wald deutlich geringer ist als auf Flächen ohne Pflanzen. Kleinfelder et al. (1992) konnten zeigen, dass die einaxiale Druckfestigkeit bei Flussufermaterial mit Krautvegetation wesentlich größer ist als von unbewachsenem und mit höherer Wurzellängendichte im Boden ansteigt.

1.3 Bodenstabilitätsparameter: Vorbelastung und Scherwiderstand

Die Bodenstabilität kann als Widerstandsfähigkeit des Bodens gegenüber plastischer Deformation verstanden werden. Die Bodenstruktur bleibt so lange unverändert, wie die aufgebrachten Lasten bzw. scherenden Kräfte kleiner als die inneren Kräfte des Bodens sind (Horn et al. 1995). Wird die Eigenstabilität des Bodens beim Befahren überschritten, z.B. bei der Futterernte oder bei der Düngerausbringung (exogener Spannungseintrag), kann der Boden den aufgebrachten Lasten bzw. wirkenden Scherkräften nicht mehr standhalten, und es kommt zu einer Bodenverformung (Horn & Lebert 1994).

Die Stabilität eines Bodens kann anhand der Setzung in einem einaxialen statischen Oedometerversuch nach dem grafischen Auswertungsverfahren nach Casagrande (1936) bestimmt werden. Dabei wird der Boden bei behinderter Seitenausdehnung zunehmend vertikal belastet, und es kommt zu vertikalen Verformungen mit Volumenänderung ohne horizontale Scherbeanspruchung. Eine Volumenänderung des Bodens kann elastisch (reversibel) oder plastisch (irreversibel) sein. Dabei stellt der Vorbelastungswert als Maß für die Eigenfestigkeit des Bodens den Übergang vom Wiederverdichtungsbereich (elastische Verformung) in den Erstverdichtungsbereich (plastische Verformung) dar (Baumgartl 1991). Verformungen im plastischen Bereich sind immer mit bleibenden Veränderungen des Bodengefüges und der Bodenfunktionen verbunden (Mosaddeghi et al. 2007, Horn & Lebert 1994).

Im natürlichen Boden erfolgt die Aufbringung einer Last nicht nur in vertikaler Richtung, es gibt außerdem auch scherende Beanspruchungen im Boden. Gegen die resultierende Verschiebung der Bodenpartikel wirken tangentiale Reibungskräfte. Die Gegenkraft des Bodens ist der Scherwiderstand mit den Scherfestigkeitsparametern Kohäsion und Winkel der inneren Reibung. Der Winkel der inneren Reibung ist dabei eine Funktion der Bodenart, der Größe und Form der Bodenpartikel, der chemischen und physikalischen Bindungen zwischen den Bodenpartikeln sowie des Lagerungszustandes (Baumgartl 1991) aber auch der Aggregierung (Horn & Fleige 2003). Die Kohäsion zeigt die bodeninterne Stabilität im unbelasteten Zustand und wird direkt vom zusammenhaltenden Effekt der interpartikulären Kräfte bestimmt (Baumgartl 1991).

Die Kohäsion im Boden besteht aus der wahren und scheinbaren Kohäsion. Die wahre Kohäsion wird beeinflusst von Kräften, welche die Bodenpartikel zusammenhalten, wie van-der-Waals-Kräfte, Wasserstoffbrücken, elektrostatische Anziehung oder Verbindungen mit Kittsubstanzen (Kalk, Silikate) und organische Substanz. Die scheinbare Kohäsion wird zum einen durch die Menisken zwischen Partikeln ausgelöst und zum anderen

durch die Verhakung von Bodenpartikeln aufgrund von Oberflächenrauigkeit (Bodenpartikelgeometrie). So ist die scheinbare Kohäsion mit negativerem Matrixpotenzial höher (Mitchell 1993).

Die Erhöhung des Scherwiderstandes durch Wurzeln wird häufig als Erhöhung der scheinbaren Kohäsion angegeben (Operstein & Frydman 2000, Wu & Watson 1998). Der Pflanzenbestand im Grünland kann über die hohe Transpiration schnell den Oberboden austrocknen und dadurch den Boden stabilisieren (Gray & Sotir 1996, Wu 1995, Greenway 1987). Dazu kommt noch, dass durch das Austrocknen vorhandene organische Substanz hydrophob und damit benetzungshemmend werden kann. So haben Hallett et al. (2003) festgestellt, dass die Wurzelexsudate eine hydrophobisierende Wirkung haben, die Aggregate sind weniger feucht und dadurch stabiler.

1.4 Mögliche Folgen der Bodenverdichtung

1.4.1 Einfluss auf Bodeneigenschaften

Eine Bodenverformung ist mit einer Umlagerung und Neuanordnung von Bodenpartikeln verbunden. Dies führt zu irreversiblen Umlagerungsprozessen im Drei-Phasen-System Boden (Horn et al. 1995). Am Anfang werden die Struktureinheiten auf ein kleineres Gesamtvolumen zusammengedrückt, ohne die Eigenschaften der Aggregate zu verändern, d.h. es kommt zur Komprimierung von Interaggregatporen während das Intraaggregatporenvolumen konstant bleibt (Horn et al. 1995, Dexter 1988). Zusätzlich können scherende Verformungen auftreten, die in Verbindung mit der Freisetzung von Wasser die Bodenmatrix zerknicken und homogenisieren, so dass Poren umorientiert werden und sich die Kontinuität ursprünglicher Leitbahnen verändert. Auch können Bodenpartikel so umverteilt werden, dass Sekundärporen verschlossen werden, wovon z.B. vertikale, zylinderförmige Poren wie Wurm- und Wurzelkanäle (Bioporen) betroffen sein können (Schäffer et al. 2007, Horn 2004a). So kommt es im Boden zu Gefügeveränderungen und damit verbunden zu Änderungen der räumlichen Anordnung der festen Bodenpartikel. Gleichzeitig wird auch der Anteil an Korn-zu-Korn-Kontaktpunkten erhöht (Mosaddegghi et al. 2003, Horn & Lebert 1994, Baumgartl 1991). Dies kann zu höheren Werten der Lagerungsdichte (Stahl et al. 2009, Glab 2008, Diepolder et al. 2005, Jorajuria & Draghi 1997, Frame & Merrilees 1996, Frost 1988) und des penetrometrischen Widerstands (Glab 2008, Frame & Merrilees 1996, Frost 1988) im Grünland führen, aber auch zu Änderungen der Vorbelastung. Stahl et al. (2009) untersuchten in Sachsen mit den betriebsüblichen Maschinen (Güllewagen mit 4,5t Radlast und einem Kontaktflächendruck von über 150kPa) „normal befahrene“ und „stark befahrene“ Flächen hinsichtlich der Veränderung ihrer Vorbelastung. Die Vorbelastung stieg in 10cm Bodentiefe um 27kPa und in 20cm Bodentiefe um 17kPa an. Auch Hammel (1993) konnte eine durch Befahrung verursachte Erhöhung der Vorbelastung in 5cm Tiefe feststellen.

Die von der Auflast abhängige Volumenreduzierung geht hauptsächlich zu Lasten grober Poren (Seguel & Horn 2005, Tarawally et al. 2004, Pagliai et al. 2003, Richard et al. 2001). Auch bei Hammel (1993) wurden Porengrößenverteilung und Porosität durch Befahrung mit hoher Radlast über 3t signifikant verändert. Dabei kam es vor allem zur Verringerung der weiten Grobporen. Auch Douglas et al. (1995) und Koppi et al. (1992) haben auf einer Grünlandfläche unter verschiedenen Bewirtschaftungsintensitäten eine Abnahme der Grobproben festgestellt. Kooistra & Tovey (1994) zeigten, dass das Gesamtluftvolumen häufig weniger als die Makroporosität durch Verdichtung beeinflusst wurde, weil sich gleichzeitig die Mikroporosität erhöhte, es kam also zur Umwandlung des Porenraums.

Letztlich führen derartige Veränderungen der Porengrößenverteilung sowie eine Abnahme bzw. ein Verschließen der sekundären Interaggregat-Makroporen zur Abnahme der gesättigten Wasser- und Luitleitfähigkeit bzw. der Porenkontinuität (Schäffer et al. 2007, Pagliai et al. 2003, Richard et al. 2001). Lipiec & Hatano (2003) und Horton et al. (1994) konnten die Wichtigkeit von Bioporen und sekundären Makroporen für den präferentiellen vertikalen Fluss bestätigen. Lin et al. (1996) haben festgestellt, dass, obwohl die Makroporen ($>0,5\text{mm}$) und Mesoporen (0,06-0,5mm) nur 5% des Gesamtporenvolumens ausmachen, sie zu 95% des Gesamtwasserflusses beisteuern. Hammel (1993) wies auf Grünlandfeldversuchen nach, dass die hydraulische Leitfähigkeit beim Überfahren nicht signifikant verringert wurde, da ein großer Anteil der Bioporen auch nach dem Befahren noch intakt war. Die Bioporen sind aufgrund ihrer Ausrichtung im Kraftfeld gegenüber Druckbelastungen widerstandsfähiger als horizontal orientierte Poren (Hartge & Bohne 1983). Schäffer et al. (2007) haben auch festgestellt, dass Bioporen gegenüber Interaggregatporen stabiler sind. Nach Blackwell et al. (1990) können Bioporen axialen Spannungen von bis zu 200kPa standhalten ohne große Abnahmen in der Permeabilität zu zeigen.

Durch die eingeschränkte Leitfähigkeit und Änderungen der vertikalen Fließrichtung wird die Infiltration von Niederschlagwasser eingeschränkt, wodurch die Gefahr oberflächlichen Abflusses und der Erosion ansteigt (Horn 2004a, Fleige & Horn, 2000). Sveistrup & Haraldsen (1997) zeigten, wie sich die Infiltrationsrate durch Maschinenverkehr erheblich (bis zu 60%) im Vergleich zu einem nicht befahrenen Standort verschlechterte. Andererseits kann es beim Wassertransport durch die Zunahme von wasserleitenden Poren auch zu einer Erhöhung der ungesättigten Wasserleitfähigkeit kommen (Horn 2004a). Durch die Bodenverdichtung kommt es zur Komprimierung des Porenraumes, was zu kleineren Durchmessern führt, d.h. bei stärker negativen Matrixpotenzialen trägt noch ein größerer Fließquerschnitt zum Fluss bei (Horn et al. 2003)

Für die Leitfähigkeit ist neben der Menge der groben Poren auch deren Tortuosität und Kontinuität von Bedeutung, die besonders intensiv durch scherende Verformungsprozesse beeinflusst werden können (Stepniewski et al. 1994). So können Deformationsvorgänge auch ohne Volumenreduzierung die Funktionalität des Porenleitsystems beeinträchtigen. Die hydraulische Leitfähigkeit im Boden ist u.a. von den vorliegenden Gefügeformen abhängig. Dörner & Horn (2006) konnten im Plattengefuge eine Anisotropie der Leitfähigkeiten mit einer Abnahme in vertikaler und einer Zunahme in horizontaler Richtung feststellen. In dem Zusammenhang haben Reszkowska et al. (2010) gezeigt, dass es durch Beweidung zu Änderungen des Bodengefüges kommt und dies eine Anisotropie der Bodenfunktionen durch die Neuordnung der Partikel und Entstehung eines Plattengefuges verursacht.

1.4.2 Einfluss auf Pflanzenwachstum

Beim Befahren mit schweren Geräten im Jahresverlauf werden Grasnarbe und Pflanzen-gewebe physikalisch direkt geschädigt (Elsäßer & Grund 2003, Frame & Merrilees 1996, Frost 1988). Stahl et al. (2009) sprechen hierbei von Scher- und Druckkräften, die die Wurzeln zum Reißen bringen können. Diepolder et al. (2009) konnten nach dreizehn Überrollvorgängen in fünf Versuchsjahren zwar keinen Einfluss der mechanischen Belastung auf bodenphysikalische Kennwerte feststellen. Stattdessen reagierten aber sowohl der Pflanzenbestand als auch das Ertragspotenzial auf die erhöhte Belastung, so dass die negativen Ertragseffekte der befahrenen Flächen auf Verletzungen an Pflanzen und/oder Wurzeln zurückzuführen sind. Die Zerstörung der Grasnarbe durch mechanische Belastung führt gleichzeitig zu einer erheblichen Abnahme der Tragfähigkeit (Titze 2010). Ebenso kann es durch Bodenverdichtung auch zu Veränderungen der Bestandeszusammensetzung kommen. Reintam (2006) konnte auf einem Gerstenfeld zeigen, dass nach zwei Jahren Breitwegerich (*Plantago major* L.) und Acker-Spark (*Spergula arvensis* L.) als Unkrautarten auf den verdichteten Arealen dominierten. Nach fünf Jahren konnte man mehrere mehrjährige Unkrautpflanzen, v.a. Acker-Gänsedistel (*Sonchus arvensis* L.) und Huflattich (*Tussilago farfara* L.) auf dem Feld feststellen. Im Grünland kommt es zu einer Ausbreitung der *Poa trivialis*, die sich als aggressiver Lückenfüller im Dauergrünland auf verdichteten Flächen ansiedelt (Diepolder & Rieder 2006, Elsäßer & Grund 2003).

Generell führen Veränderungen der Porengrößenverteilung und der Porenkontinuität durch komprimierende und scherende Verformungen zu weiteren negativen Änderungen hinsichtlich der Standortbedingungen für das Pflanzenwachstum. Es kommt zu entscheidenden Änderungen im Wasser-, Gas- und Wärmehaushalt und den damit verbundenen Redoxreaktionen, sowie zu einer Verschlechterung der Durchwurzelbarkeit und auch der Nährstoffaufnahme (Hakansson 2005, Lipiec & Hatona 2003, Houlbrooke et al. 1997, Glinski & Lipiec 1990).

In der Literatur gibt es kritische Grenzwerte für den Eindringwiderstand und die Lagerungsdichte, bei denen das Pflanzen- und Wurzelwachstum beeinträchtigt wird. Nach Materechera et al. (1992) und Bengough & Mullins (1991) kann eine Einschränkung der Durchwurzelung schon ab Eindringwiderständen von 2MPa erfolgen, während Cook et al. (1996) eine Abnahme des Wurzelwachstums bei *Lolium perenne* schon bei Eindringwiderständen von 0,5-1,5MPa festgestellt haben. Diesbezüglich haben Boon & Veen (1994) angenommen, dass ein Eindringwiderstand von 1,5MPa die Wurzelwachstumsrate verringert und ab 3MPa die kritische Grenze erreicht wird, bei der sich das Wurzelwachstum sehr stark verlangsamt. Houlbrooke et al. (1997) geben an, dass Lagerungsdichtewerte von 1,3-1,7g cm⁻³ das Eindringen der Pflanzenwurzeln behindern können. Reintam

(2006) konnte eine deutliche Abnahme der Durchwurzelungsintensität von Gerste bei Dichtewerten von $>1,56\text{ g cm}^{-3}$ feststellen.

Viele Autoren haben gezeigt, dass Wurzeln in verdichtete Böden nur hineinwachsen können, wenn bereits bestehende Risse oder Poren mit genügender Größe vorhanden sind (Tennant & Hall 2001, Logsdon & Linden 1992, Ehlers et al. 1983). In dem Zusammenhang sind die zylinderförmigen Sekundärporen, die von Bodentieren oder abgestorbenen Wurzeln stammen, von Bedeutung. Jedoch gibt es auch Indizien dafür, dass nicht viele Wurzeln diese vertikalen Makroporen nutzen (Hirth et al. 2005). Werden die Makroporen von den Wurzeln genutzt, so führt dies häufig zu einer Ansammlung vieler Wurzeln in einer Pore, was zu einer ineffizienteren Wasseraufnahme im Vergleich zu gleichmäßig verteilten Wurzeln führt (White & Kirkegaard 2010, Passioura 2002).

Die Reaktionen von Wurzeln auf den mechanischen Widerstand zeigen sich auch an Hand der Reduktion der Durchwurzelung und der Veränderungen der Pflanzenmorphologie. So konnte Glab (2008) bei *Medicago sativa L.* feststellen, dass die Wurzellängendichte auf den überfahrenen Flächen ab- und der Wurzeldurchmesser zunahm. Bei *Festuca arundinacea* war eine Erhöhung des mittleren Wurzeldurchmessers auf der 4mal überfahrenen Grünlandfläche von über 40% (von 0,31 auf 0,44mm) erkennbar (Glab 2007). Goodman & Ennos (1999) konnten sowohl bei Monokotyledonen als auch bei Dikotyledonen eine Zunahme des Wurzeldurchmessers der Lateralwurzel feststellen. Auch Bengough et al. (1997) und Atwell (1993) konnten in ihren Untersuchungen zeigen, dass die Verdickung der Wurzelachsen häufig von einer Abnahme der Wurzellänge begleitet wird. Crush et al. (2002) wiesen bei *Lolium perenne* eine Erhöhung der Durchmesser um über 0,6mm nach. Weiterhin haben sie festgestellt, dass die morphologischen Änderungen des Wurzelwachstums auch nach dem Durchwachsen der dichten Zonen erhalten bleiben. Die Zunahme des Wurzelradius wird dabei durch eine Zunahme der mittleren Größe der Kortexzellen erzielt (Crush et al. 2002, Atwell 1990). Nach Bengough et al. (2006) kommt es zur Erhöhung des Wurzeldurchmessers als Folge der mechanischen Beanspruchung durch die biochemischen Prozesse in der Wurzel. Die Erhöhung des Wurzeldurchmessers ist dabei nach Taylor & Brar (1991) und Kays et al. (1974) durch eine erhöhte Ethylenkonzentration bedingt. Alessa & Earnhart (2000) haben festgestellt, dass Bodenverdichtung zu einer Änderung der Morphologie der Wurzelhaare führt (die Wurzelhaare wurden kürzer und dicker). Zusätzlich kam es zu Änderungen beim Zellenaufbau von Wurzelhaaren, was die Nährstoff- und Wasseraufnahme verringerte.

Bei verdichtungsbedingter Abnahme des luftgefüllten Porenvolumens im Boden ist z.B. davon auszugehen, dass es zu einer Abnahme der Respirationsrate kommt, d.h. die Versorgung mit Sauerstoff (O_2) und die Entsorgung von Kohlendioxid (CO_2) gestört ist. Die

geringeren Gasdiffusionskoeffizienten führen damit zu einer höheren CO₂-Konzentration in der Bodenluft (Conlin & Driessche 2000, Hansen et al. 1993). Somit kann es durch Änderungen des O₂- bzw. CO₂-Gehaltes der Bodenluft zu Beeinträchtigungen des Wurzelwachstums im Boden kommen (Whalley et al. 1995). In der Literatur wird ein Gehalt von 5% CO₂ als die obere und von 10% O₂ als die untere Grenze bezeichnet, ab der mit einer Verlangsamung des Pflanzenwachstums gerechnet werden muss Blume et al. (1978 zit. in Scheffer & Schachtschabel 2010).

Die Erreichbarkeit von O₂ für die Wurzeln hängt nicht nur von seiner Konzentration in der Bodenluft ab, sondern auch von den physikalischen Eigenschaften und den Bedingungen in der Wurzelumgebung, d.h. von der tatsächlich in der direkten Nähe der Wurzeloberfläche vorhandenen O₂-Menge. Bei der Charakterisierung der O₂-Versorgung der Pflanzenzellen kommt die Sauerstoffdiffusionsrate (ODR) als Summenfaktor aus Massenfluss und Diffusion in den Boden zur Anwendung (Horn 2004a, Stepniewski et al. 1994). Czyz (2004) konnte signifikante Unterschiede auf einer mehrmalig überfahrenen Fläche in der ODR feststellen, der Grund dafür ist, dass es durch die Bodenverformung zur Abnahme des luftgefüllten Porenraumes kam und die ODR durch wassergefüllte Poren sehr gering ist. Eine Erhöhung der Überfahrten (von einer auf vier) verursachte eine Verringerung der ODR und eine Zunahme der Lagerungsdichte. Die Werte der ODR zeigten daher eine negative lineare Korrelation mit der Lagerungsdichte.

Auch Watson & Kelsey (2006) beobachteten eine Reduzierung der ODR durch Bodenverdichtung, die zu einer Abnahme der Feinwurzeldichte bei *Quercus palustris* führte. Weiterhin wird die Wurzelatmungsaktivität verringert, wodurch das Wurzelwachstum durch eine verschlechterte Wasser- und Nährstoffaufnahme vermindert ist (Gregory 2006b). Zusätzlich wird auch das Sprosswachstum der Pflanzen bei Abnahme des Wurzellängenwachstums beeinträchtigt (Hakansson 2005, Stepniewski et al. 1994) und die N-Fixierungsleistung der Leguminosen reduziert (Frame et al. 1998, Lipiec & Stepniewski 1995). Voorhees et al. (1976 zit. in Lipiec & Stepniewski 1995) konnten für Sojapflanzen zeigen, dass es im Vergleich zu einer unbefahrenen auf der befahrenen Fläche 20-30% weniger Knöllchenbakterien gab, wobei die N-Gehalt im Boden nicht angegeben wurden.

Darüber hinaus wird das Redoxpotenzial im Boden von der Sauerstoffkonzentration beeinflusst und sinkt bei Sauerstoffmangel (Stepniewski et al. 1994). In dem Zusammenhang hat Horn (1985) an Hand von vorentwässerten Bodenmonolithen unter Laborbedingungen gezeigt, dass mit steigender Auflast die Redoxpotenzialwerte abnehmen. Dabei ist das Redoxpotenzial von der Vorbelastung des Bodens abhängig; wird die Eigenstabilität des Bodens überschritten, dann steigen die Redoxpotenziale selbst während anschlie-

βender Entlastungsphasen nicht mehr an. Unter diesen zunehmend anaeroben Bedingungen im Boden wird der Abbau von organischer Substanz stark eingeschränkt (De Neve & Hofman 2000) und für Pflanzen wichtige Nährstoffe reduziert, somit sind diese dann nicht mehr verfügbar. Bei anhaltender Anaerobiose kommt es nach Erschöpfung des Nitratvorrates zu weiteren Reduktionen, die von einem Absinken des Redoxpotenzials im Boden begleitet sind (Nitrat → Mangan(III, IV) → Eisen(III) → Sulfat → Methan) (Trolldenier 1996).

Weiterhin führen anaerobe Verhältnisse im Boden zur Verminderung der Nährstoffaufnahme (Gregory 2006b, Motavalli et al. 2003, Lipiec & Stepniewski, 1995), zur Nährstoffauswaschung (Lipiec & Stepniewski 1995, Hakansson & Reeder 1994) und zu gasförmigen Verlusten von Stickstoff (Breland & Hansen 1996, Lipiec & Stepniewski 1995). Douglas & Crawford (1993) stellten dar, wie sich die N-Aufnahme und die N-Nutzungseffizienz mit zunehmender Bodenverdichtung verringern. Hierzu haben Petelkau & Dannowski (1990) festgestellt, dass sich mit steigender Bodenbelastung die Nährstoffaufnahme von Hafer verschlechtert (z.B. N-Aufnahme von 81% bei 100kPa Belastung, 70% bei 300kPa und 61% bei 500kPa bezogen auf nicht verdichtete Flächen). Auf der anderen Seite konnte Arvidsson (1999) zeigen, dass durch eine mäßige Verdichtung die Bodenpartikel näher zusammengedrückt werden. Die dadurch stattfindende Porenverfeinerung führt bei gleichbleibendem Matrixpotenzial zu einem höheren Wassergehalt einhergehend mit einem Wasserfilm auf den Partikeln (Carminati et al. 2008). Daher wird der passive Nährstofftransport über Diffusion erleichtert und des Weiteren durch den verbesserten Boden-Wurzel-Kontakt infolge der Verdichtung verstärkt (Kooistra et al. 1992).

Es ist davon auszugehen, dass verdichtete Böden die Emission von Lachgas (N_2O) und Methan (CH_4) stark fördern (Merino et al. 2001, Sitaula et al. 2000, Ball et al. 1999). Hansen et al. (1993) stellte dabei eine über sieben Mal höhere N_2O Konzentration in der Bodenluft auf verdichtetem schluffigen Sand unter Grünland im Vergleich zu unverdichtetem Boden fest. In einer neuerer Untersuchung von Hansen (2009) beläuft sich die Erhöhung der Lachgasemission pro kg Trockenmasse durch Bodenverdichtung auf das 2-3fache. Da intensive Grünlandbewirtschaftung mit hohen Stickstoffdüngungsgaben verbunden ist, kann die zusätzliche N-Gabe die klimarelevante Lachgas-Emission erhöhen. Dabei sind Lachgasemissionen bei der organischen N-Düngung höher anzusetzen als bei der mineralischen N-Düngung infolge der die leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen (Merino et al. 2001). Sitaula et al. (2000) weisen darauf hin, dass das Zusammenwirken von Bodenverdichtung und Stickstoffdünger den Effekt der N_2O -Emissionen noch weiter verstärkt.

Durch die Beeinträchtigung der Durchwurzelung kommt es zur Verschlechterung der Nährstoff- und Wasseraufnahme. So dringen die Wurzeln nicht mehr in die verdichteten Aggregate ein, sondern umwachsen sie (Horn 2004a). Aus der Darcy-Gleichung wird erkennbar, dass sich die Aufnahmefähigkeit der Wurzeln für Wasser und Nährstoffe verschlechtert, da längere Fließstrecken den Wasserfluss zur Wurzel reduzieren (Hartge & Horn 1999). Damit verschlechtert sich die Aufnahme der innerhalb der Aggregate gespeicherten Nährstoffe und Wasservorräte umso mehr, je größer die Aggregate und damit die Fließstrecke sind (Passioura 2002, Alexander & Miller 1991).

Für das Pflanzenwachstum von Bedeutung sind die länger anhaltenden Feuchtphasen infolge von Verdichtung, die zu einer verspäteten Erwärmung der Böden führen. Trotz verbesserter Wärmeleitfähigkeit, aber bei gleichzeitig erhöhter Wärmekapazität, wird die Erwärmung des Oberbodens verzögert (Horn 2004a). Veränderungen der Bodentemperatur haben einen großen Einfluss auf das Pflanzenwachstum, da Keimung und Wachstumsbeginn der Pflanzen stark temperaturabhängig sind (Starr et al. 2004, Boucher et al. 2001). Zudem kann die Verringerung der Temperatur im Boden das Wurzelwachstum beeinträchtigen, so dass das Wachstum und die Verzweigung der Wurzeln eingeschränkt ist (McMichael & Quisenberry 1993). Nach Starr et al. (2004) wird mit der Abnahme der Wurzeltemperaturen (Temperatur der Nährlösung) die Nährstoff- und Wasseraufnahme begrenzt und die Photosyntheseleistung verringert.

Die Beeinträchtigungen der aufgeführten ökologischen Kenngrößen und des Wurzelwachstums, sowie der Wurzelfunktionen, führten dazu, dass die Blattflächendichte auf einer verdichten Fläche um bis zu 54% verringert wurde (Montagu et al. 2001). Eine hohe Korrelation zwischen Wurzellänge und Blattfläche machte deutlich, dass eine Abnahme der Wurzellänge mit einer Abnahme der Blattfläche verbunden ist. Houlbrooke et al. (1997) und Cook et al. (1996) konnten in diesem Zusammenhang feststellen, dass sich, bei gleich bleibendem Spross-Wurzel-Verhältnis, sowohl die oberirdischen als auch die unterirdischen Organe mit steigender Lagerungsdichte verkleinern. Goodman & Ennos (1999) berichteten im Gegensatz dazu von Änderungen im Spross-Wurzel-Verhältnis.

Durch die Reduzierung der oberirdischen Biomasse kommt es zu Ertragsreduktionen. Jorajurai & Draghi (1997) konnten eine Ertragsverringerung im Grünland von 52-76% in der Fahrspur feststellen, während Douglas (1994) von Ertragseinbußen von 20% ausgeht. Im 5-Jahresmittel ist nach Diepolder et al. (2009) eine Minderung des Trockenmasse-Ertrages um ca. 12% und des Energieertrages um ca. 10% zu erwarten. Glab (2008) konnte bei Luzerne eine Abnahme der oberirdischen Trockenmasse von bis zu 27% nachweisen, die vor allem beim zweiten und dritten Schnitt auftrat. Im Vergleich dazu beobachteten Douglas & Crawford (1993) auf verdichten Flächen eine deutlich höhere

Ertragsreduktion von *Lolium perenne* nach dem ersten Schnitt als nach dem zweiten oder dritten.

1.5 Zielsetzung

Im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Promotionsstipendiums konzentrierten sich die bodenkundlichen Untersuchungen auf folgende Fragestellungen:

- Wie können die Pflanzenwurzeln die Bodenstruktur verändern und welche Stabilisierungseffekte haben verschiedene Pflanzenwurzeln/Pflanzenbestände auf die Bodenstruktur?
- Welche Auswirkungen hat die vorherige Bodenbearbeitung als Ackerstandort auf die Bodenstruktur in Abhängigkeit von der Dauer der Grünlandnutzung?
- Welche Auswirkungen hat die Überfahrungshäufigkeit mit verschiedenen Kontaktflächendrücken im Grünland bei unterschiedlichen Bodenwassergehalten auf die Bodeneigenschaften und das Wurzelwachstum unterschiedlicher Pflanzenbestände?

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiete

Als Versuchsstandorte standen drei Untersuchungsflächen zur Verfügung. Die Versuchsfläche in Deutschland befindet sich auf dem Versuchsgut Hohenschulen der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 15km westlich von Kiel (Abb. 1). Die beiden Versuchsflächen in Estland liegen in der Nähe der Stadt Tartu. Die erste der beiden befindet sich auf dem Versuchsgut Röhu der Eesti Maaülikool, 13km westlich von Tartu, während die zweite (Vorbuse) 9km nördlich von Tartu gelegen ist.

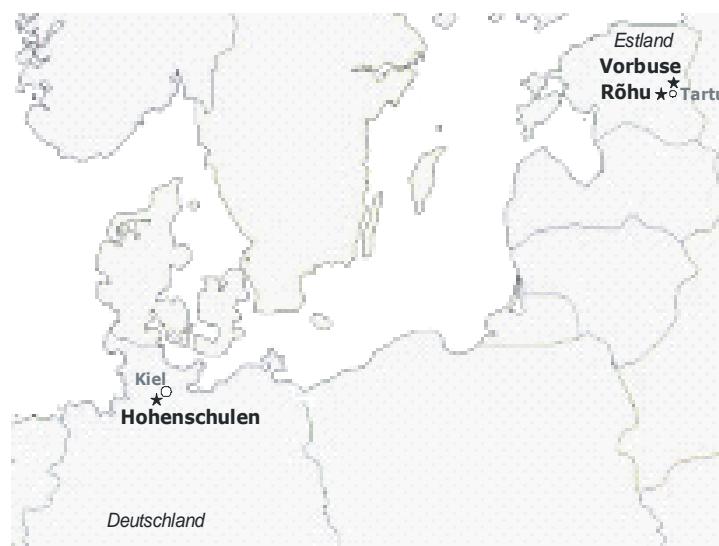


Abb. 1: Geographische Lage der Versuchsstandorte.

2.1.1 Standort Hohenschulen

2.1.1.1 Geologische Ausgangssituation und klimatische Bedingungen

Der Versuchsstandort Hohenschulen befindet sich im Bereich des östlichen Hügellands Schleswig-Holsteins in einer Jungmoränenlandschaft zwischen dem Zungenbecken des Westensees im Süden und dem Eider-Tidalbecken im Norden (Horn et al. 1993). Die geologische Entstehung lässt sich auf die Weichselvereisung zurückführen. Die Gletscher der Weichselvereisung brachten zum Teil frisches Material aus dem skandinavischen und baltischen Raum mit, arbeiteten aber auch viel bereits in vorherigen Eiszeiten (Elster- und Saaleeiszeit) herantransportiertes Material auf (LANU 2006). Das Relief zeigt die für das ostholsteinische Hügelland charakteristische Abfolge von Kuppen und Senken (Horn et al. 1993). Das Ausgangsmaterial der Bodenbildung ist Geschiebemergel, die Entkalkungstiefe liegt im Mittel bei >2m (Horn et al. 1993). Der Standort wurde als Pseudogley-Parabraunerde (Stagnic Luvisol) aus Geschiebelehm klassifiziert (Tab. 1) (Zink 2009). Die

Bodenarten variieren zwischen stark lehmigem Sand und mittel sandigem Lehm. Die Tongehalte liegen somit zwischen 14 und 19%, wobei das Maximum entsprechend der Pedogenese in den SwBtv-Horizonten liegt.

Tab. 1: Bodentextur (Standort: Hohenschulen) der Pseudogley-Parabraunerde aus Geschiebelehm.

Tiefe, cm	Horizont	Textur, %			Bodenart
		Sand	Schluff	Ton	
0-25	rAp	54	30	16	SI4
25-45	SwBtv ₁	50	31	19	Ls3
45-70	SwBtv ₂	49	33	18	Ls3
70-	Bv	55	31	14	SI4

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 verzögerten Temperaturanstieg im Frühjahr und wenige Hitzetage im Sommer. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 8,5°C mit einer mittleren Mindesttemperatur von 0°C im Januar und mittleren Höchsttemperatur von 13°C im Juli. Die Jahresniederschläge in Höhe von 750-830mm sind über das Jahr gleichmäßig verteilt (DWD 2009).

2.1.1.2 Vorherige Bodenbearbeitung

Die Versuchsfläche wurde in einem vorangegangenen Versuch über einen Zeitraum von 1991-2004 konservierend und konventionell bewirtschaftet. Im konventionellen Verfahren wurden die Flächen in jedem Herbst bis in 25cm Tiefe gepflügt. Bei der konservierenden Bodenbearbeitung handelt es sich um eine pfluglose Bodenbearbeitung, bei der ohne vorheriges Grubbern die Ernterückstände mit einer Fräse (Fa. Horsch) in 8cm Tiefe eingearbeitet werden (Frey 1998). Lagerungsdichte (pt), Vorbelastung (Pv) und gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) zeigen deutliche Unterschiede bezüglich vorheriger Bewirtschaftung (Tab. 2). Die pt-Werte sind in 10cm Tiefe auf der konventionell bearbeiteten Fläche deutlich geringer als auf der konservierend bearbeiteten, die Pv- und kf- Daten zeigen dagegen eine höhere Stabilität und Leitfähigkeit auf Seiten der konservierenden Bodenbearbeitung. Die Unterschiede sind auch nach 2 bzw. 3-4 Jahren unter Grünland vorhanden.

Tab. 2: Einige bodenphysikalische Kenngrößen (Standort: Hohenschulen) in 10cm Tiefe nach Vorentwässerung auf -6kPa.

Bodenbearbeitung	Bodennutzung	Zeitraum	ρ_t , g cm $^{-3}$	kf, cm d $^{-1}$	Pv, kPa
konventionell vorherige konventionelle	Ackerfläche seit 2004 Grünland	1991-1999	1,45	228	57
		2006	1,43	257	65
		2008	1,52	118	63
konservierend vorherige konservierende	Ackerfläche seit 2004 Grünland	1991-1999	1,57	428	81
		2006	1,54	247	76
		2007	1,56	219	97

pt - Lagerungsdichte

kf - gesättigte Wasserleitfähigkeit

Pv - Vorbelastung

2.1.2 Standorte Rõhu und Vorbuse

2.1.2.1 Geologische Ausgangssituation und klimatische Bedingungen

Die Versuchsstandorte Rõhu und Vorbuse befinden sich, ähnlich zum Standort Hohen schulen, in der Jungmoränenlandschaft Estlands. Der geologische Unterbau ist auch hier durch die glazialen Ablagerungen überdeckt, die in Richtung Süden in ihrer Mächtigkeit zunehmen (Reintam 1962). Nahe Vorbuse befindet sich ein weit gestrecktes Drumlingebiet. Die Drumlins bestehen aus ungeschichtetem Grundmoränenmaterial und zeigen die Bewegungsrichtung des Eises an (Haltenberger 1926). Der Versuchstandort Rõhu im Süden befindet sich im Bereich der Grund- und Endmoränenlandschaft, in dem die glazialen Aufschüttungsformen durch das häufige Oszillieren des Eisrandes geprägt wurden (Haltenberger 1926). Die Ausgangsmaterialien der Bodenbildung im Süden Estlands sind karbonatarme rötlich-braune sandige Tone und Geschiebelehme (Reintam 1962).

Estland liegt im nördlichen Teil der gemäßigten Zone und in der Übergangszone zwischen maritimem und kontinentalem Klima. Das Klima in Tartu ist kontinental geprägt und gezeichnet durch kurze heiße Sommer und kalte Winter. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 4,4°C mit einer mittleren Mindesttemperatur von -6,6°C im Januar und einer mittleren Höchsttemperatur von 17,3°C im Juli. Die durchschnittlichen Jahresniederschläge sind 591mm, der meiste Niederschlag fällt im Spätsommer und im Herbst (Aunap 2007).

Standort Röhu

Der Versuch auf dem Versuchsgut Röhu wurde im Frühling 2007 angelegt. Die Flächen wurden zuvor (1960- 2006) als Obstplantage genutzt. Der Standort Röhu wurde als Parabraunerde (Haplic Luvisol) aus rötlich-braunem Geschiebelehm klassifiziert. Die jeweiligen Substrate können der Tab. 3 entnommen werden.

Tab. 3: Bodentextur und einige bodenchemische Kenngrößen (Standort: Röhu) der Parabraunerde aus Geschiebelehm (Daten: E. Reintam unveröffentlicht).

Tiefe, cm	Horizont	Textur, %			Bodenart	C_{ora} g kg ⁻¹	pH-Wert	
		Sand	Schluff	Ton			KCl _{1M}	H ₂ O
0-18	rAp	52	37	11	SI3	13	5,6	7,1
18-35	Al	57	33	10	SI3	3	5,2	6,1
35-88	Bt	50	30	20	Ls4	2	5,4	6,6
88-	C	53	29	18	Ls4	0	6,2	7,4

Standort Vorbuse

Am Standort Vorbuse liegen Versuchsflächen eines landwirtschaftlichen Betriebes vor. Vor der Anlage des Versuches wurde auf den Flächen Getreide unter konventioneller Bewirtschaftung angebaut, seit 2006 dienen die Flächen dem Luzerne-Anbau. Die Bodenproben wurden nach dem dritten Schnitt im zweiten Jahr nach der Ansaat entnommen (September 2007). Am Standort Vorbuse findet sich eine Braunerde (Cambisol) aus rötlich braunem Geschiebelehm. Die jeweiligen Eigenschaften können der Tab. 4 entnommen werden.

Tab. 4: Bodentextur (Standort: Vorbuse) der Braunerde aus Geschiebelehm (Daten: E. Reintam, unveröffentlicht).

Tiefe, cm	Horizont	Textur, %			Bodenart	pH-Wert		C_{ora} g kg ⁻¹
		Sand	Schluff	Ton		KCl _{1M}	H ₂ O	
0-30	rAp	58	31	11	SI3	6,4	6,9	12
30-70	Bv	64	21	15	SI4	6,5	6,5	2
70-	Cv	65	18	17	Ls4	-	-	-

2.2 Versuchsaufbau und Probennahme

Um den Stabilisierungseffekt von Pflanzenwurzeln zu untersuchen, wurden ein Grünlandstandort und zwei Standorte unter Futterbau ausgewählt. Um den Einfluss der Befahrungsintensität auf bodenphysikalische Kennwerte zu erfassen, wurden verschiedene Überfahrungsintensitäten gewählt. Weiterhin kommt als Versuchsfaktor die Zeit der Probennahme nach der Überfahrt und die Zeit unter Grünlandbewirtschaftung hinzu.

2.2.1 Standort Hohenschulen

Pflanzen

Der Grünlandversuch wurde als orthogonale split-plot-Versuchsanlage in vierfacher Wiederholung im Jahr 2004 angelegt (Tab. 5).

Tab. 5: Ansaatmischung (Standort: Hohenschulen) des Grünlandversuches im Jahr 2004.

Art	Funktionelle Gruppe	Menge, kg ha ⁻¹
<i>Lolium perenne</i>	Gras, Untergras	10
<i>Poa pratensis</i>	Gras, Untergras	2
<i>Phleum pratense</i>	Gras, Obergras	2
<i>Festuca pratensis</i>	Gras, Obergras	6
<i>Dactylis glomerata</i>	Gras, Obergras	4
<i>Trifolium repens</i>	Leguminosen, keine Pfahlwurzeln	2
<i>Medicago sativa</i>	Leguminosen, Pfahlwurzeln	2
<i>Lotus corniculatus</i>	Leguminosen, Pfahlwurzeln	2
<i>Cichorium intybus</i>	krautartige Pflanzen, Pfahlwurzeln	2

Düngung

Die Düngung erfolgte in unterschiedlicher Art und Menge. Stickstoff wurde als Kalkammonsalpeter gegeben, dieser enthält 74% Ammoniumnitrat (NH_4NO_3) und 26% Calciumcarbonat (CaCO_3). Unterschieden wird zwischen einer Nullvariante (N0) und einer 360 kg ha⁻¹ (N360) Variante. Kalium wurde als 40er Korn-Kali in den Varianten 300 (K300) und 600 kg ha⁻¹ (K600) appliziert. Korn-Kali ist ein kombinierter Kali- und Magnesiumdünger mit 40% K₂O in Form von Kaliumchlorid und 6% MgO. Weitere wichtige Inhaltsstoffe sind Natrium (3%) und Schwefel (4%).

Folglich gibt es vier Düngungsvarianten:

- N0 K300
- N0 K600
- N360 K300
- N360 K600

Infolge der Düngung ist das Artenspektrum des Pflanzenbestandes verschoben. Auf den Parzellen mit Stickstoffdüngung dominieren Grasbestände (N360 K300, N360 K600), während sich auf den Parzellen ohne Stickstoff Leguminosen (Weißklee und Luzerne) durchgesetzt haben (N0 K300, N0 K600) (Schmeer et al. 2009a). Darauf basierend werden im Folgenden die Parzellen ohne Stickstoffdüngung (N0 K300, N0 K600) zusammengefasst als Varianten mit mehr Leguminosenpflanzen (mL) und die Parzellen mit Stickstoffdüngung (N360 K300, N360 K600) als Varianten mit mehr Graspflanzen (mG).

Überfahrungsintensität

Für die Überfahrung wurde ein Gespann aus Schlepper und Güllefass verwendet, welches eine Radlast (P_R) von 4Mg aufwies. Dies entspricht einem Kontaktflächendruck von 321kPa. Für die Berechnung der Kontaktflächengröße (A_K) wurde das Modell von O`Sullivan et al. (1999a) für feste Fahrbahnoberfläche verwendet:

$$A_K = 0,041 \cdot b_R \cdot d_R + 0 \cdot P_R + 0,613 \cdot \frac{P_R}{p_i} \quad (3)$$

wobei b_R und d_R Reifenbreite (cm) und –durchmesser (cm) und p_i den Reifeninnendruck (kPa) darstellen

- 0x - die Kontrollfläche bleibt unbefahren.
- 1x - es fand eine Überfahrt im April statt (Matrixpotenzial im Boden im April in 0-30cm Tiefe pF=1,3).
- 2x - nach der Überfahrt im April fand eine zweite Überfahrt im Juli statt (Matrixpotenzial im Boden im Juli in 0-30cm Tiefe pF=2,7).

Probennahme

Die Proben wurden ca. 2 Monate nach der Überfahrt auf der Fläche mit vorheriger konventioneller Bodenbearbeitung und im Jahr 2006 aus der Kontrollfläche entnommen (Tab. 6). Im Jahr 2008 kamen Proben aus den Parzellen mit verschiedenen Überfahrungshäufigkeiten hinzu. 2006 wurden beide Stickstoffdüngungsstufen mit 300kg Kalium ha^{-1} , 2008 alle vier Düngungsstufen beprobt. Im Jahr 2008 wurden zusätzlich zu den Bodenproben auch Wurzelproben aus 0-20cm Tiefe entnommen.

Tab. 6: Übersicht über Zeitpunkt der Probennahme und- umfang (Standort: Hohenschulen).

Probennahmezeitpunkt	Vorherige Bodenbearbeitung	Überfahrungs-häufigkeit	Tiefe, cm	Düngungsstufe
Mai 2006	Konventionell Konservierend	0x	10	N0 K300, N360 K300
April 2007	Konservierend	0x	10	N0 K300, N360 K300, N360 K600
Juli 2008	Konventionell	0x, 1x	5, 10, 20	N0 K300, N0 K600, N360 K300, N360 K600
Oktober 2008	Konventionell	0x, 2x	5, 10, 20	N0 K300, N0 K600, N360 K300, N360 K600

0x - kontrolle, ohne Überfahrung

1x - eine Überfahrung

2x - zwei Überfahrungen

N0 K300 - kein Stickstoff, 300kg Kalium ha^{-1} N0 K600 - kein Stickstoff, 600kg Kalium ha^{-1} N360 K300 - 360kg Stickstoff, 300kg Kalium ha^{-1} N360 K600 - 360kg Stickstoff, 600kg Kalium ha^{-1}

2.2.2 Standort Rõhu

Kulturen

Auf den Flächen wurden zu Vergleichszwecken zwei Kulturen ausgesät, zum einen Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea L.*) mit einer Saatstärke von 16kg ha^{-1} , und Knaulgras (*Dactylis glomerata L.*) (Saatstärke 20kg ha^{-1}). Bei beiden Gräsern handelt es sich um ausdauernde Obergräser. Rohrglanzgras bildet unterirdisch kriechende Ausläufer mit kräftiger Bewurzelung, deren mittlerer Wurzeldurchmesser zwischen 0,22 und 0,25mm liegt, die Ausläufer selbst haben einen Durchmesser von 2-4mm. Knaulgras hat feinere Wurzeln mit einem mittleren Wurzeldurchmesser von 0,2mm (Kutschera & Lichtenegger 1982). Beide Gräser werden als Futterpflanzen genutzt. Rohrglanzgras findet jedoch auch Verwendung im Energiepflanzenanbau als nachwachsender Rohstoff.

Überfahrungsintensität

Die Verdichtung erfolgte durch Überfahrung mit einem Traktor und einem angehängten Wassertank mit einer Radlast von 1,5Mg und einem Kontaktflächendruck von 118kPa (berechnet nach O` Sullivan et al. 1999a).

- 0x - kontrollfläche, bleibt unbefahren.
- 1x - eine Überfahrt Anfang Mai (Matrixpotenzial im Boden in 0-30cm Tiefe pF=2,7).
- 2x - zwei Überfahrten im Mai und Ende Juli (Matrixpotenzial im Boden im Juli in 0-30cm Tiefe pF=3).

Probennahme

Die Proben wurden jeweils aus 5 und 20cm entnommen, wobei im Juli die unbefahrenen (0x) bzw. die einmalig befahrenen Parzellen (1x) und im September die Parzellen ohne (0x) und mit zweimaliger Überfahrung (2x) beprobt wurden. Dies entspricht einer Beprobung ca. 2 Monate nach der Überfahrung.

Tab. 7: Übersicht über Zeitpunkt der Probennahme und -umfang (Standort: Röhu).

Probename/Zeitpunkt	Überfahrungshäufigkeit	Tiefe, cm	Kulturen
Juli 2008	0x	5, 20	Kaulgras Rohrglanzgras
September 2008	0x, 1x	5, 10, 15, 20, 25	Kaulgras Rohrglanzgras

0x - kontrolle, ohne Überfahrung

1x - eine Überfahrung

2x - zwei Überfahrungen

2.2.3 Standort Vorbuse

Überfahrungsintensität

Zur Verdichtung am Standort Vorbuse bestand das Gespann aus einem Traktor mit einem Ladewagen. Die Radlast betrug 3,5Mg und der Kontaktflächendruck 258kPa (berechnet nach O` Sullivan et al. 1999a).

- 0x - kontrollfläche, bleibt unbefahren.
- 1x - eine Überfahrt (Matrixpotenzial im Boden in 0-30cm Tiefe pF=1,7).

Probennahme

Anders als bei den Standorten Hohenschulen und Röhu wurden die Proben nach dem dritten Schnitt im September in 5, 10 und 20cm Tiefe gleich nach der Überfahrt entnommen. Dabei erfolgte die Entnahme auf der überfahrenen Fläche aus der Fahrspur.

2.3 Durchgeführte Messungen

Es wurden gestörte Bodenproben für die allgemeinen Bodendaten und ungestörte Bodenproben in Stechzylindern für die Untersuchung von bodenphysikalischen Parametern entnommen. Zusätzlich wurden an Wurzelproben des Standortes Hohenschulen Zugfestigkeitsmessungen durchgeführt.

2.3.1 Allgemeine Kenngrößen

2.3.1.1 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenzusammensetzung wurde durch Nasssiebung und Pipettenverfahren bestimmt (Hartge & Horn 2009).

2.3.1.2 pH-Wert

Der pH-Wert wurde am Standort Hohenschulen mit einer 0,01M CaCl_2 -Lösung bestimmt (Schlichting et al. 1995). Die pH-Werte der estnischen Standorte Rõhu und Vorbuse dagegen wurden landesüblich mit einer 1M KCl- und H_2O -Lösung gemessen (Kitse & Rooma 1984). Die Bestimmung des pH-Wertes mit einer CaCl_2 -Lösung führt im Mittel zu $0,6 \pm 0,2$ tieferen pH-Einheiten als mit der H_2O -Lösung bestimmten pH-Werte (Scheffer & Schachtschabel 2010).

2.3.1.3 Gehalt an organischem Kohlenstoff

Die Bestimmung des Gehaltes an organischer Substanz als organischem Koflenstoff (C_{org}) des Bodens am Standort Hohenschulen erfolgte mittels Titration und Verbrennung mit einem Ströhlein-Coulomat 702 (Schlichting et al. 1995). Für die Standorte Rõhu und Vorbuse wurde C_{org} nach Tjurin bestimmt (Vorobyova 1998).

2.3.1.4 Kationenaustauschkapazität

Die austauschbar gebundenen Nährstoffe (K, Na, Mg, Ca) wurden mittels Flammen-Atomabsorptionsspektrometrie (Flammen-AAS) in einer mit BaCl_2 versetzten und homogenisierten Bodenlösung bestimmt (Schlichting et al. 1995).

2.3.2 Bodenphysikalische Messungen an ungestörten Bodenproben

2.3.2.1 Matrixpotenzial-/Wassergehaltskurve und Lagerungsdichte

Für die Bestimmung der Matrixpotenzial-/Wassergehaltskurve wurden 5 feldfeuchte ungestörte Stechzylinderproben (100cm^3) langsam kapillar aufgesättigt und auf abnehmende definierte Matrixpotenziale (-3, -6, -15 -30 -50 -1500kPa und ofentrocken bei 105°C) entwässert. Zur Entwässerung wurden Sandbäder (bis -6kPa), keramische Platten mit Unterdruckentwässerung (bis -50kPa) und Überdruckentwässerung (bis -1500kPa) verwendet. Als repräsentative Kennwerte können die Luftkapazität (LK) (Wassergehalt bei -6kPa), nutzbare Feldkapazität (nFK) (zwischen -6kPa und -1500kPa) und Totwasseranteil (<-1500kPa) anhand der Entwässerungsdaten berechnet werden, während die Lagerungsdichte sich aus dem Trockengewicht nach 24h bei 105°C und dem Zylindervolumen ergibt (Hartge & Horn 2009).

2.3.2.2 Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) wurde an 8 Stechzylinderproben (100cm^3) mittels Haubenpermeameter unter instationären Bedingungen nach De Boodt (1967 zit. in Hartge & Horn 2009) mit 3 Wiederholungen je Stechzylinderprobe bestimmt.

2.3.2.3 Luftsleitfähigkeit

Die Bestimmung der Luftsleitfähigkeit (kl) erfolgte an definiert auf -6kPa vorentwässerten ungestörten Stechzylinderproben (236cm^3) mittels eines Acryldurchflussmessgerätes mit Schwebekörpern bei konstantem Luftdruckgradienten von 0,1kPa (Peth 2004).

2.3.2.4 Bestimmung von Bodenstabilitätsparametern

Die Ermittlung der mechanischen Stabilität erfolgt unter Laborbedingungen an 236cm^3 großen ungestörten Stechzylinderproben, die zunächst kapillar aufgesättigt und danach auf -6kPa entwässert wurden. -6kPa bzw. pF 1,8 entspricht dabei dem Matrixpotenzialwert unter Feldbedingungen im Frühjahr und charakterisiert somit den mechanisch empfindlichsten Bodenzustand im Jahresverlauf.

2.3.2.4.1 Vorbelastung im statischen Belastungsversuch

Nach Vorentwässerung (-6kPa) wurden die Proben in einer Multistepanlage mit behinderter Seitenausdehnung vertikal mit stufenweise steigender Auflast (von 10 bis 400kPa) bei definierter Belastungsdauer (10min) komprimiert und die zeit- sowie auflastabhängige Höhenänderung erfasst. Am Ende der höchsten Belastungsstufe erfolgte eine 10-minütige Entlastung der Proben. Aus der Differenz der Setzung nach Belastung (bei Auflaststufen 40, 70, 100, 200 und 400kPa) zur Setzung nach Entlastung erhält man den Reboundeffekt als Maß für den elastischen Anteil der Setzung. Die Bestimmung der Vorbelastung wurde wie bei Fazekas (2005) beschrieben (nach Casagrande 1936) durchgeführt.

2.3.2.4.2 Scherparameter: Kohäsion und Winkel der inneren Reibung

Das Verhalten der Bodenproben unter Scherverformung wurde mit Hilfe eines Kastenscherversuches an vorkonsolidierten Bodenproben bestimmt. Bei konstantem horizontalen Vorschub von $0,3\text{mm min}^{-1}$ und verhinderter Seitenausdehnung wird bei jeweils definierten und konstanten Auflasten der dem Schub entgegen gerichtete Scherwiderstand ermittelt. Die Vorkonsolidierung erfolgt in einer Drucksetzungsanlage unter Auflasten von 20, 70, 100 und 200kPa über einen Zeitraum von 5 Stunden mit anschließender Entlastungsphase von 1 Stunde Dauer. Für die Auflaststufe von 400kPa wurden Proben verwendet, die ihre Vorkonsolidierung in Form der Vorbelastungsmessung in der Multistep-Drucksetzungsanlage erfahren haben. Zur Auswertung wird der jeweils maximale Scherwiderstand bei gegebener Auflast als Funktion der Auflast aufgetragen. Der Scherwiderstand (τ) ist die Kraft die an der Berührungsstelle zweier fester Körper mobilisiert wird, wenn diese gegeneinander bewegt werden (Hartge & Horn 1999). Er kennzeichnet die Reibungswiderstände, sagt also aus, wie schwer sich die Teile des Bodens gegeneinander verschieben lassen. Der Scherwiderstand ist keine Konstante, sondern von der Auflast (σ_n) abhängig (Hartge & Horn 1999). Dieser Zusammenhang ist in der Mohr-Coulomb'schen Formel beschrieben:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \varphi + c \quad (4)$$

Als Stabilitätswerte für den Strukturzustand dienen die Kohäsion (c) und der Winkel der inneren Reibung (φ) als Materialeigenschaften des Bodens (Hartge & Horn 1999).

Die Einordnung der bodensystematischen Einheit und die Bewertung der bodenphysikalischen Eigenschaften erfolgte nach AG Boden (2005) und DVWK (1997, 1995) (Tab. 8).

Tab. 8: Einstufung bodenphysikalischer Kennwerte nach AG Boden (2005) und DVWK (1995, 1997).

	Einheit	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch	extrem hoch
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
GPV^a	Vol.%	<30	30-38	38-46	46-54	≥54	-
LK^b	Vol.%	<2	2-5	5-13	13-26	≥26	-
nFK^c	Vol.%	<6	6-14	14-22	22-30	≥30	-
TW^d	Vol.%	<4	4-10	10-22	22-34	≥34	-
kf(log)^e	cm d ⁻¹	<0	0-1	1-1,6	1,6-2	2-2,5	≥2,5
kl(log)^f	cm s ⁻¹	<-3,3	-3,3 - 2,9	-2,9 - -2,6	-2,6 - -2,3	≥ -2,3	
Pv^g	kPa	<30	30-60	60-90	90-120	120-150	≥150
pt^h	g cm ⁻³	<1,2	1,2-1,4	1,4-1,6	1,6-1,8	≥1,8	-

^aGesamtporenvolumen^bLuftkapazität^cnutzbare Feldkapazität^dTotwasser^egesättigte Wasserleitfähigkeit^fLuftleitfähigkeit^gVorbelastung^hLagerungsdichte

2.3.3 Messungen an Wurzeln

2.3.3.1 Zugfestigkeit

Am Standort Hohenschulen wurden aus der Rhizosphäre Wurzelproben entnommen, gewaschen und in Plastiktüten mit 15%iger Ethanollösung bei einer Temperatur von 10°C gelagert (Böhm 1979). Vor der Zugfestigkeitsmessung wurde der Durchmesser der Wurzel mit Hilfe eines Dickenmessgeräts sowie deren Länge bestimmt. Je nach Durchmesser erfolgte die Zugfestigkeitsmessung mit unterschiedlichen Geräten:

Durchmesser >1mm: umgebautes Mikropenetrometer

Durchmesser zwischen 1 und 8 mm: Lastrahmen

Für beide Verfahren wurde folgender Messaufbau gewählt: Die Wurzel wurde an beiden Enden mit speziellen Schrauben befestigt, und es erfolgte ein vertikaler Zug (0,02mm min⁻¹ beim modifizierten Mikropenetrometer und 0,08mm min⁻¹ beim Lastrahmen) (Abb. 2). Unter dem kontinuierlich steigenden Zug dehnt sich die Wurzel aus, wird immer dünner und zerreißt schließlich. Die zum Zerreissen der Wurzel erforderliche Kraft F wird erfasst. Problematisch bei der Messung ist der feste Einbau der Wurzel, ohne sie dabei zu

beschädigen. Dies geschieht daher mit Hilfe von Gummistreifen zwischen Schrauben und Wurzel.

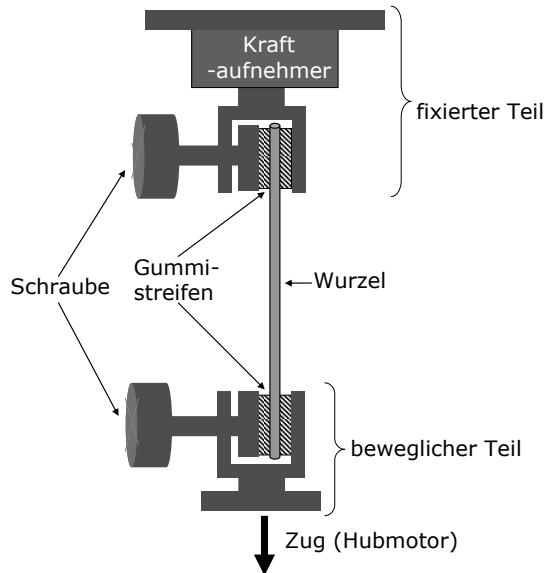


Abb. 2: Schematische Darstellung der Zugfestigkeitsmessung.

Die mittlere Zugfestigkeit T_R (MPa) einer Wurzel wird berechnet aus der Kraft F (N), bei der die Wurzel zerrißt, bezogen auf die Fläche der Wurzel (cm^2):

$$T_R = \frac{F}{\pi(D/2)^2} \quad (5)$$

2.3.3.2 Wurzeloberflächendichte und -trockengewicht

Die Bodenproben wurden nach der Schermessung vorsichtig zerteilt und die Wurzeln mit Hilfe eines Siebes mit einer Maschenweite von $0,64\mu\text{m}$ ausgewaschen. Dann wurden Digitalbilder von den Wurzeln hergestellt. Um die Qualität der Digitalbilder bezüglich des Kontrastes zu erhöhen, wurden die Wurzeln zunächst mit einer Eisen-Gallus-Tinte angefärbt. Die Färbezeit betrug 30min. Danach wurden die Proben 10min lang mit destilliertem Wasser gespült und in einer DIN A4 großen Glasschale auf einen Scanner gelegt, der für die Anwendung umgebaut und kalibriert wurde. Mit Pinzetten wurden die Wurzeln so ausgebreitet, dass möglichst wenig Überlappungen und Aneinanderlagerungen entstanden. Mit Hilfe von Adobe Photoshop Elements (Adobe, USA) wurden die digitalen Graustufenbilder in Schwarzweißbilder umgewandelt (Wienforth 2006) und über die Software WinRhizo 2003b ausgewertet. Als Rohdaten erhält man dabei sowohl die Gesamtwurzel-länge als auch den mittleren Wurzeldurchmesser innerhalb von 16 Wurzeldurchmesser-

klassen (i). Die Wurzeloberflächendichte im Boden O ($\text{cm}^2 \text{ cm}^{-3}$) wird aus den mittleren Wurzeldurchmessern r (cm) und der Wurzellänge h (cm) in der jeweiligen Wurzeldurchmesserkategorie i nach folgender Formel berechnet:

$$O = \sum 2\pi r_i \cdot (h_i + r_i) \quad (6)$$

Das Trockengewicht der Wurzeln wurde durch Trocknung bei 80°C für 48h bestimmt (Böhm 1979).

2.3.4 Modell zur armierenden Wirkung der Wurzeln

Wu & Watson (1998) haben ein theoretisches Modell entwickelt, wonach sich der Wurzelarmierungseffekt im Boden bestimmen lässt (Abb. 3). Hierbei wird angenommen, dass der Winkel der Wurzelverdrehung beim Schervorgang (θ) unbeeinflusst bleibt. Weiterhin wird vorausgesetzt, dass die Wurzeln ihre Zugfestigkeit (T_R) vollständig mobilisieren, d.h. die Wurzeln zerreißen in der Scherzone. So bleibt der Winkel der inneren Reibung von Wurzeln unbeeinflusst und die Scherfestigkeit steigt nur durch die Erhöhung der Kohäsion.

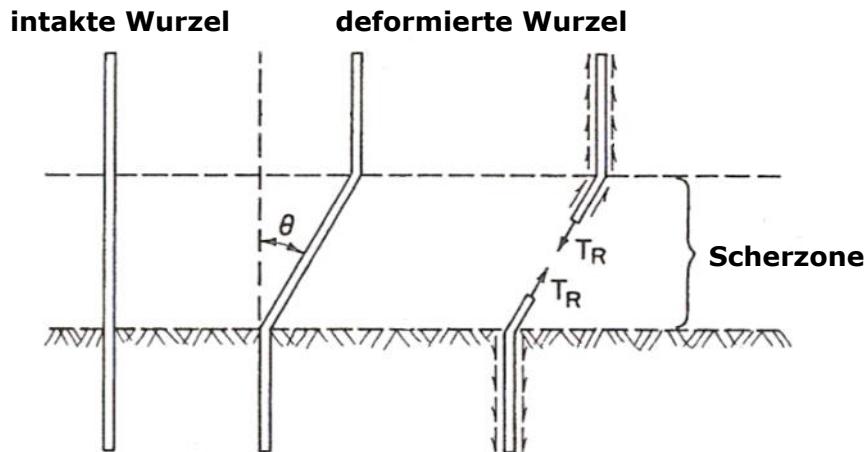


Abb. 3: Modell der Armierung durch Wurzeln (Gray & Leiser 1989, verändert).

Der Armierungseffekt von Wurzeln kann über eine Erweiterung der Mohr-Coulomb'schen Bruchbedingung nach Gleichung 1 berechnet werden. Die Erhöhung der Kohäsion c_w durch die stabilisierenden Wurzeln ergibt sich dabei aus der Wurzelzugfestigkeit:

$$c_w = t_w(\cos \theta \cdot \tan \varphi + \sin \theta) \quad (7)$$

mit

$$t_w = T_R \left(\frac{A_R}{A} \right) \quad (8)$$

(t_w =Wurzelzugfestigkeit pro Flächeneinheit des Bodens, T_R =Zugfestigkeit einer Wurzel, $\sum A_R$ =Summe der Wurzelquerschnitte in der Scherfläche, A =Grundfläche der abgescher-ten Probe) (Gray & Sotir 1996). Wu et al. (1979 zit. in Wu 1995) haben angegeben, dass derer Klammerausdruck ($\cos\theta \cdot \tan\phi + \sin\theta$) in der Gleichung 4 nur unwesentlich mit θ und ϕ variiert. Für θ zwischen 40° und 70° und für ϕ zwischen 25° und 40° ergibt sich ein Wert von 1,0 bis 1,3. Deswegen wird häufig 1,2 als Mittelwert angenommen.

$$c_w = 1,2 \cdot T_R \left(\frac{A_R}{A} \right) \quad (9)$$

2.4 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung wurde mit der frei verfügbaren Software R Version 2.9.1 durchgeführt. Es wurde angenommen, dass die Daten näherungsweise Normalverteilt sind (Überprüfung durch theoretische Überlegungen zur Verteilung sowie graphische Methoden). Die bekannterweise nicht normalverteilten Daten der gesättigten Wasser- und Luftleitfähigkeit wurden logarithmiert, um als normalverteilte Daten ausgewertet zu werden. Um Aussagen über den Einfluss einzelner Versuchsfaktoren treffen zu können, wurde die Datendarstellung in Form von Box-Plots gewählt, wobei die Box das 25%- und 75%- Quartil mit Median (-) und arithmetischem Mittelwert (•) repräsentiert. Die Whisker (Vertikallinien) stellen das Minimum und Maximum der Daten dar, sofern diese innerhalb der 1,5-fachen Interquartilsdistanz liegen, ansonsten werden diese Daten als Ausreißer dargestellt (McGill et al. 1978). Zur Klärung der Frage, ob sich die arithmetischen Mittelwerte (innerhalb einer Tiefe) signifikant unterschieden, wurde eine einfaktorielle ANOVA durchgeführt mit anschließendem post hoc Test nach Tukey. Signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Versuchvarianten sind mit Kleinbuchstaben gekennzeichnet (bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$). Des Weiteren wurden lineare Regressionen ermittelt und auf ein Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$ geprüft.

3 Ergebnisse

3.1 Standort Hohenschulen

Laut AG Boden (2005) liegt der pH-Wert im mäßig sauren bis sehr schwach sauren Bereich (Tab. 9). Mit zunehmender Tiefe nimmt der pH-Wert zu. Als optimaler pH-Wert im Grünland auf sandigem Lehm wird ein Wert zwischen 5,3 und 5,7 angesehen (Finck 1992), sodass die pH-Werte in 10-20cm Tiefe leicht oberhalb des optimalen Wertes liegen. Der organische Kohlenstoffgehalt (C_{org}) ist auf den Flächen mit mehr Graspflanzen deutlich höher als auf denjenigen mit mehr Leguminosenpflanzen. Mit zunehmender Tiefe nimmt der C_{org} -Gehalt ab. An Hand der Gehalte an austauschbaren Kationen kann man die Düngungsgabe nachvollziehen. So ist auf den Flächen mit 600kg K ha^{-1} (K600) im Boden auch mehr Kalium und Natrium vorhanden als auf den Flächen mit nur 300kg K ha^{-1} (K300). Da im verwendeten Stickstoffdünger (Kalkammonsalpeter) Ca vorhanden ist, sind auf den Flächen mit höherer N-Düngung auch höhere Ca-Gehalte.

Tab. 9: Bodenchemische Eigenschaften (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Düngungsintensität (N: 0, 360kg ha^{-1} ; K: 300, 600kg ha^{-1}) und der Bodentiefe (5, 10, 20cm).

Düngung		Tiefe, cm	Boden -art	pH-Werte, $CaCl_2 \text{ 0,01M}$	$C_{org}, g kg^{-1}$	K,	Na,	Mg,	Ca,
N, $kg ha^{-1}$	K						meq kg^{-1}		
0	300	5	SI4	5,3	16	12	0,5	16	84
		10	SI4	6,3	15	5	0,7	14	104
		20	SI4	6,3	15	4	0,7	13	108
0	600	5	SI3	5,3	13	14	0,9	13	66
		10	SI3	5,9	13	6	0,8	12	83
		20	SI4	6,3	12	4	0,8	11	90
360	300	5	SI4	5,0	17	7	0,3	16	89
		10	SI4	6,3	16	3	0,4	12	100
		20	SI4	6,5	15	2	0,4	11	106
360	600	5	SI3	5,4	19	15	0,3	17	71
		10	SI4	6,5	17	6	0,9	18	116
		20	SI4	6,4	18	4	0,9	15	122

3.2 Wurzeloberflächendichte und -trockengewicht im Boden

3.2.1 Standort Hohenschulen

Sowohl Wurzeloberflächendichte als auch -trockengewicht nehmen mit der Tiefe im Boden ab (Abb. 4, Abb. 5). Die Wurzeloberfläche ist auf der Fläche mit mehr Graspflanzen (mG) in 5-10cm Tiefe deutlich größer als auf der Fläche mit mehr Leguminosenpflanzen (mL). In 5cm Tiefe sind die Unterschiede sogar statistisch signifikant ($mL\ 0,55-0,62\text{ cm cm}^{-3}$ und $mG\ 1,37-1,14\text{ cm cm}^{-3}$). Beim Wurzeltrockengewicht kann man keine eindeutigen Unterschiede hinsichtlich der Bestandeszusammensetzung erkennen. Weiterhin hat unter mL und mG in allen Tiefen (außer mG 5cm) eine Verringerung der Wurzeloberflächendichte im Boden durch die Überfahrung stattgefunden. Im Gegensatz dazu wurde eine leichte Zunahme in 5cm auf der einmal überfahrenen Fläche bei mG festgestellt.

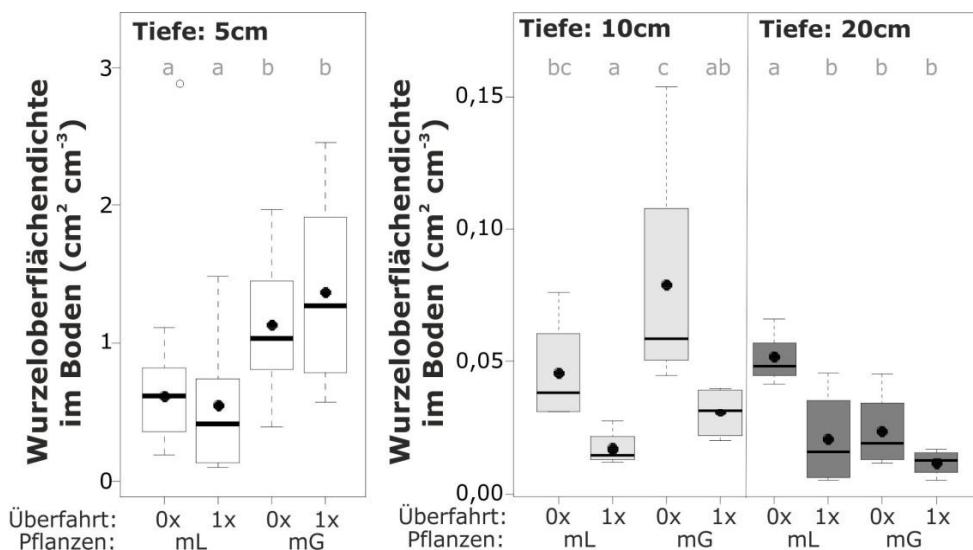


Abb. 4: Wurzeloberflächendichte ($\text{cm}^2 \text{ cm}^{-3}$) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt) im Juli 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: 10 (5cm), 8 (10-20cm).

Bezüglich des Wurzeltrockengewichts ist eine eindeutige Abnahme bei mG in 10cm Tiefe festzustellen, wobei tendenziell dieser Wurzelparameter auf der einmalig befahrenen Fläche (1x) sogar noch zunimmt. Diese Unterschiede sind allerdings nicht statistisch signifikant, mit Ausnahme der Fläche mit mehr Leguminosen in 20cm Tiefe.

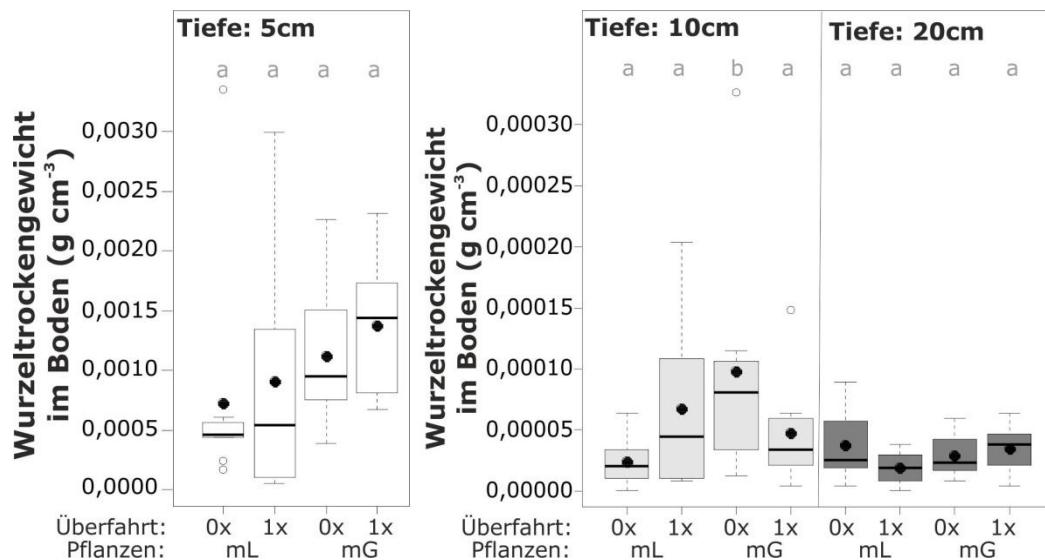


Abb. 5: Wurzeltrockengewicht (g cm^{-3}) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt) im Juli 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: 10 (5cm), 8 (10-20cm).

Neben den Änderungen der Wurzelparameter mit der Tiefe wurden auch Änderungen im Laufe der Vegetationsperiode festgestellt (Abb. 6, Abb. 7). Betrachtet man die Kontrollfläche, so ist die Wurzeloberflächendichte im Oktober auf der Fläche mit mehr Leguminosenpflanzen höher als im Juli, dies wird noch deutlicher beim Wurzeltrockengewicht (Juli 0,004 und Oktober 0,011 g cm^{-3}). Auch bei mG hat eine leichte Zunahme der untersuchten Wurzelparameter im Oktober im Vergleich zum Juli stattgefunden, aber diese ist weniger deutlich (als bei mL). Durch die zweifache Überfahrung sind beide Wurzelparameter bei mL verringert worden (Unterschiede im Trockengewicht von 0x zu 2x sind statistisch signifikant). Auf der mG-Fläche kann man keinen Überfahrungseffekt nach zwei Überfahrten auf die Wurzeloberflächendichte feststellen, aber im Trockengewicht hat eine leichte Abnahme stattgefunden.

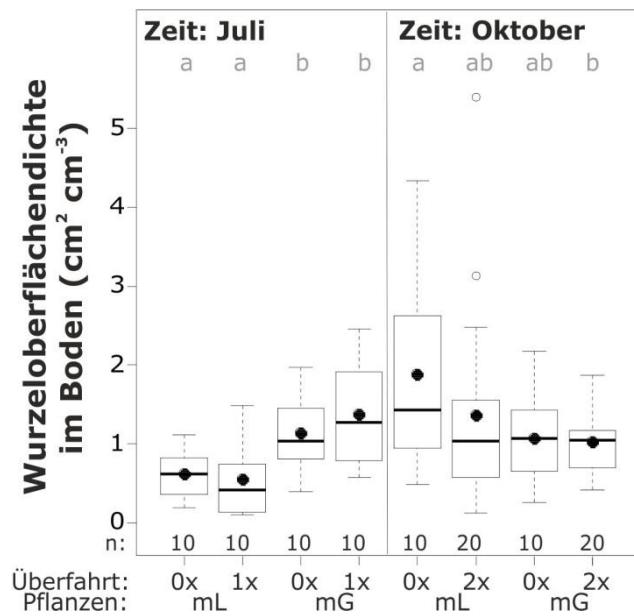


Abb. 6: Wurzeloberflächendichte ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, Oktober), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) in 5cm Tiefe in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Zeitpunkten der Probennahme bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: siehe Abbildung.

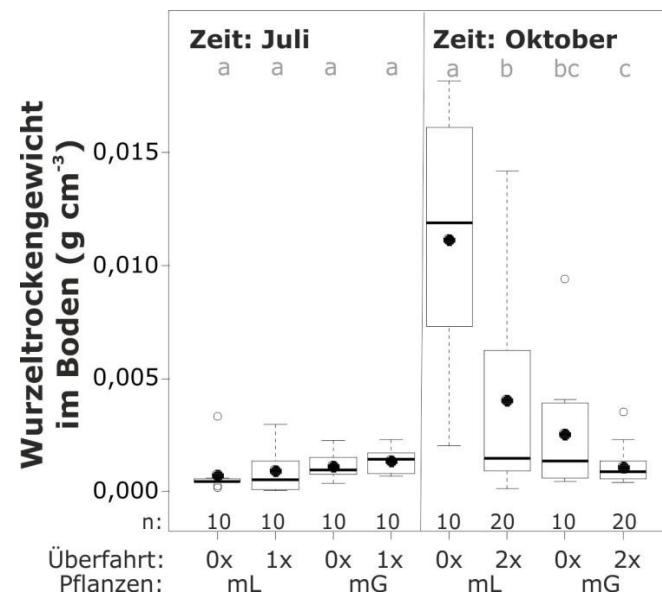


Abb. 7: Wurzeltrockengewicht (g cm^{-3}) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, Oktober), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) in 5cm Tiefe in 2008 als Boxplots mit Median (-), Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Zeitpunkten der Probennahme bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: siehe Abbildung.

3.2.2 Standort Röhu

Sowohl Wurzeloberfläche als auch -trockengewicht zeigen unter beiden Kulturen einen ähnlichen abnehmenden Verlauf mit der Tiefe (Abb. 8, Abb. 9). Bei Knaulgras (Kg) nehmen beide Wurzelparameter ab 10cm Tiefe stark ab, bei Rohrglanzgras (Rg) ist die Reduzierung nicht so stark. Den Überfahrungseffekt kann man sehr deutlich bei Kg erkennen, hier sind die Werte für die Wurzeloberflächendichte und das -trockengewicht auf der 2mal überfahrenen Fläche (2x) in allen untersuchten Tiefen geringer als auf der Kontrollfläche (0x). Bei Rohrglanzgras findet die durch Überfahrung bedingte Abnahme sowohl hinsichtlich der Wurzeloberfläche in 15-25cm als auch hinsichtlich des Trockengewichtes in 10-15cm Tiefe statt.

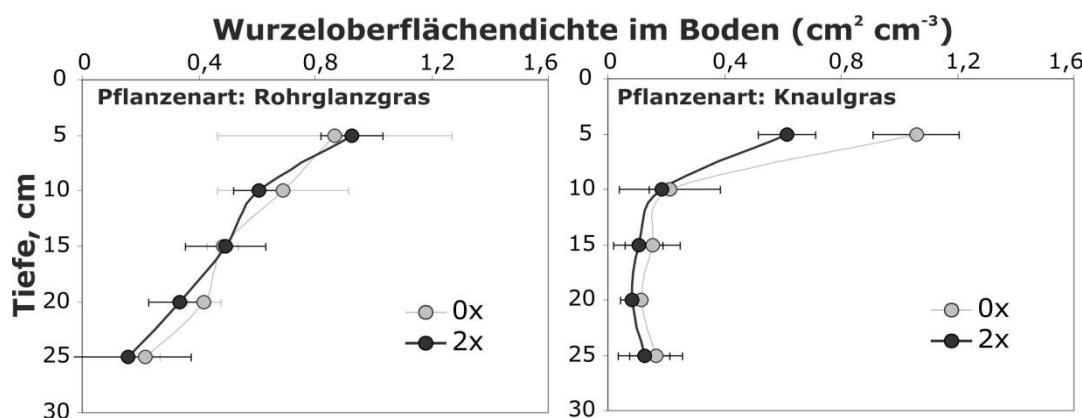


Abb. 8: Wurzeloberflächendichte ($\text{cm}^2 \text{ cm}^{-3}$) (Standort: Röhu) in Abhängigkeit von der Pflanzenart (Knaulgras - Kg, Rohrglanzgras - Rg), der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 2x - mit zwei Überfahrten) und der Tiefe (0-25cm) im September 2008 als Mittelwert. Die Balken zeigen die Standardabweichung, n: 3.

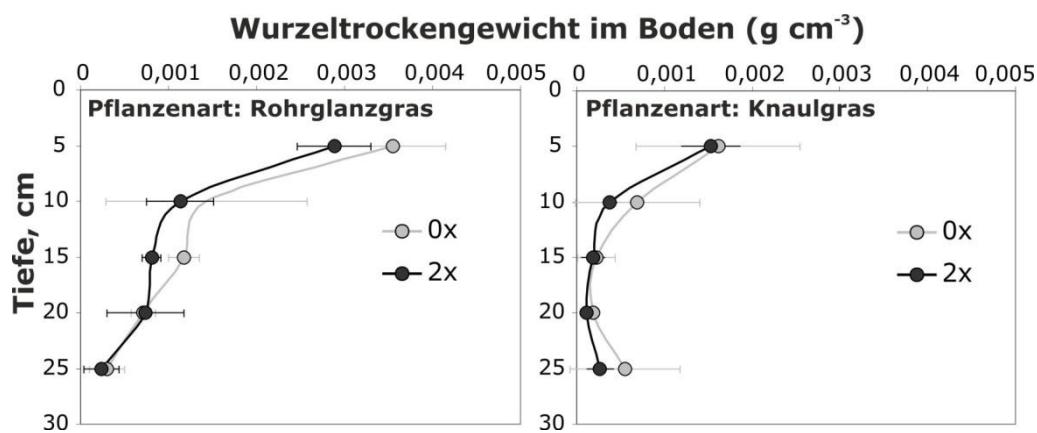


Abb. 9: Wurzeltrockengewicht (g cm^{-3}) (Standort: Röhu) in Abhängigkeit von der Pflanzenart (Knaulgras - Kg, Rohrglanzgras - Rg), der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 2x - mit zwei Überfahrten) und der Tiefe (0-25cm) im September 2008 als Mittelwert. Die Balken zeigen die Standardabweichung, n: 3.

3.3 Lagerungsdichte und Porengrößenverteilung

3.3.1 Standort Hohenschulen

Die Lagerungsdichtewerte (pt) liegen im Juli und Oktober im Jahr 2008 im mittleren bis sehr hohen Bereich (Abb. 10). Die pt zeigt Unterschiede zwischen den Parzellen mit mehr Leguminosenpflanzen (mL) bzw. mehr Graspflanzen (mG). In allen Tiefen und Überfahrtshäufigkeiten sind die pt-Werte (Ausnahme mL Oktober 0x 5cm) auf der mL-Fläche deutlich höher und dies um bis zu $0,11\text{ g cm}^{-3}$. Hinsichtlich der Überfahrtshäufigkeit kann man auf allen Parzellen eine tendenzielle Erhöhung der Lagerungsdichte auf der einmal überfahrenen Fläche erkennen, die nach der zweiten Überfahrt noch deutlicher wird (mL 5 und 20cm).

Einen deutlichen Unterschied zwischen den Pflanzenbeständen kann man im Juli mittels der Daten der nutzbaren Feldkapazität (nFK) und der Luftkapazität (LK) erkennen, z.T. aber auch nur als Tendenzen (Abb. 11, Abb. 12). Die nFK ist auf der mG-Fläche deutlich höher als auf der mL-Fläche. Insgesamt befinden sich die meisten LK-Werte im mittleren und die nFK-Werte im mittleren bis hohen Bereich nach AG Boden (2005). Des Weiteren ist eine durch die Überfahrt bedingte leichte Abnahme der Luftkapazität im Juli in allen Tiefen auf der Parzelle mit mehr Graspflanzen zu erkennen, im Oktober dagegen nur in 5 und 20cm Tiefe. Auf der mL-Fläche ist die Verringerung im Oktober in 5 und 20cm Tiefe auch statistisch signifikant. Die Überfahrt führte in 5cm Tiefe zu einer Abnahme der nFK in (in Juli bei mL und mG, in Oktober bei mL). Außerdem ist es zu einer Erhöhung der LK auf der zweimal überfahrenen mG-Fläche in 10cm Tiefe bzw. die nFK in 5 und 20cm Tiefe gekommen. Auf der Kontrollfläche haben leichte Änderungen in LK und nFK während der Vegetationsperiode von Juli bis Oktober stattgefunden. So gibt es im Oktober in 5 und 20cm Tiefe auf der mL-Fläche höhere LK-Werte, während die nFK gleich geblieben ist.

Ferner konnte eine Korrelation zwischen dem organischen Kohlenstoff-Gehalt (C_{org}) im Boden und der nutzbaren Feldkapazität ausgemacht werden, die darauf hinweist, dass mit steigender Menge an organischer Substanz im Boden der Anteil an engen Grob- und Mittelporen zunimmt (Abb. 13).

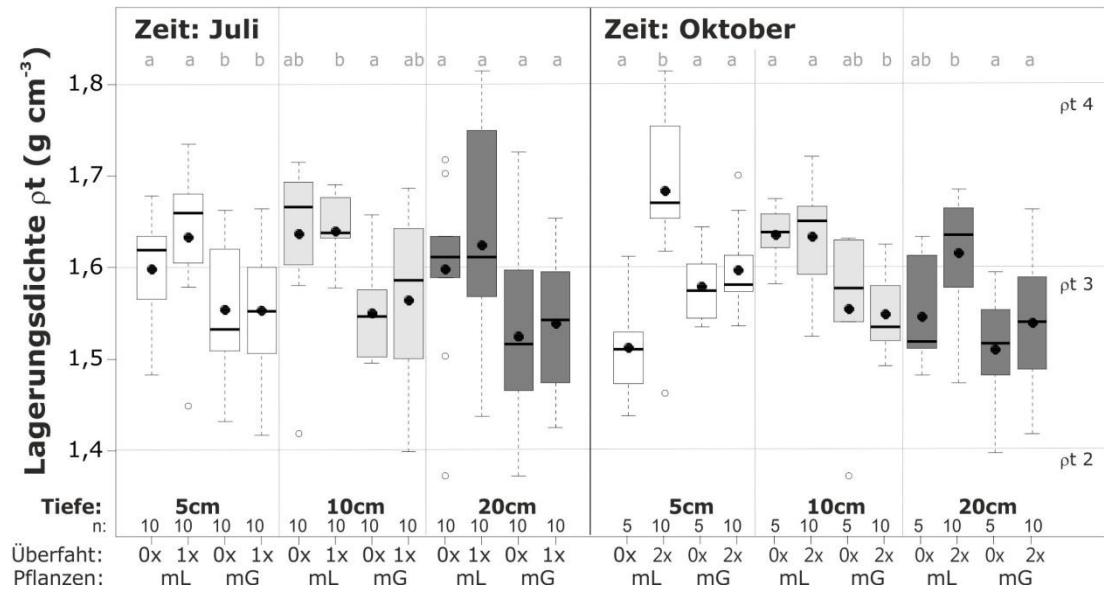


Abb. 10: Lagerungsdichte ρ_t (g cm^{-3}) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, Oktober), der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (•). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von α : 0,05; n: siehe Abbildung, ρ_t -Klassifizierung nach AG Boden (2005).

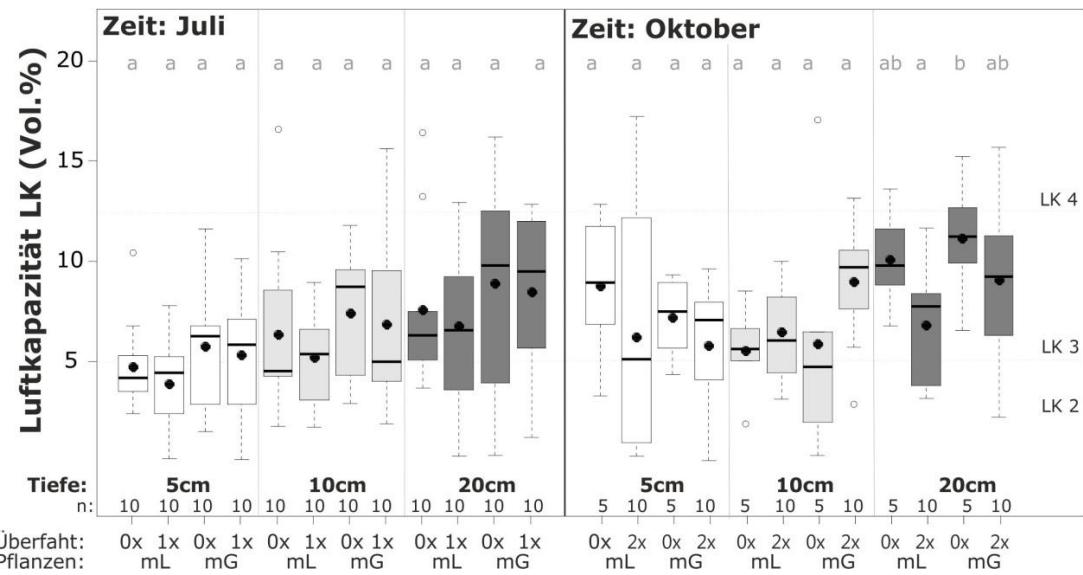


Abb. 11: Luftkapazität LK (Vol.%) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probenahme (Juli, Oktober), der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (\bullet). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von α : 0,05; n: siehe Abbildung, LK-Klassifizierung nach AG Boden (2005).

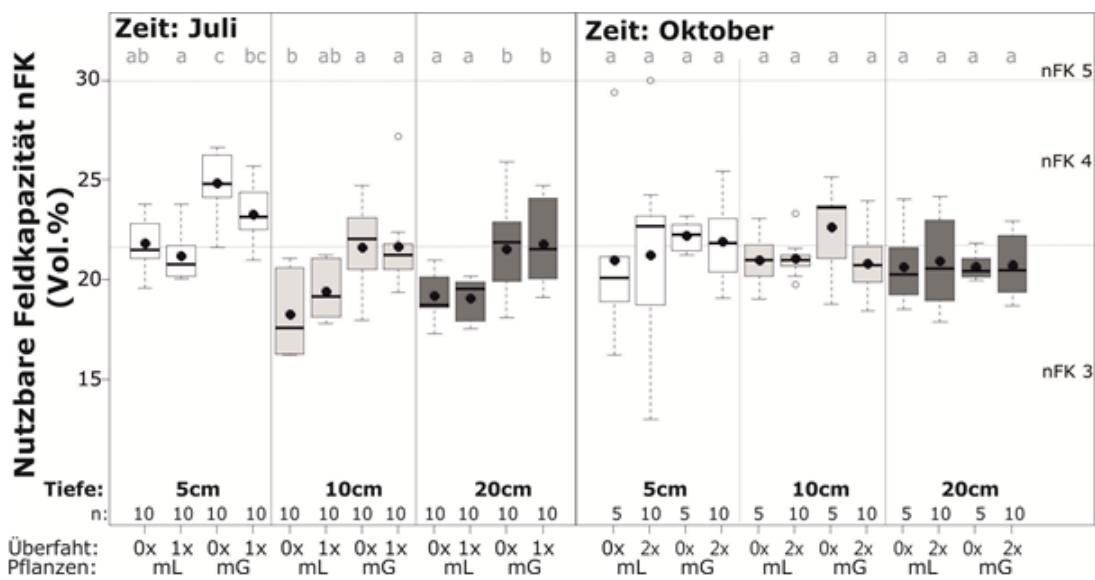


Abb. 12: Nutzbarer Feldkapazität nFK (Vol.%) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, Oktober), der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: siehe Abbildung, nFK-Klassifizierung nach AG Boden (2005).

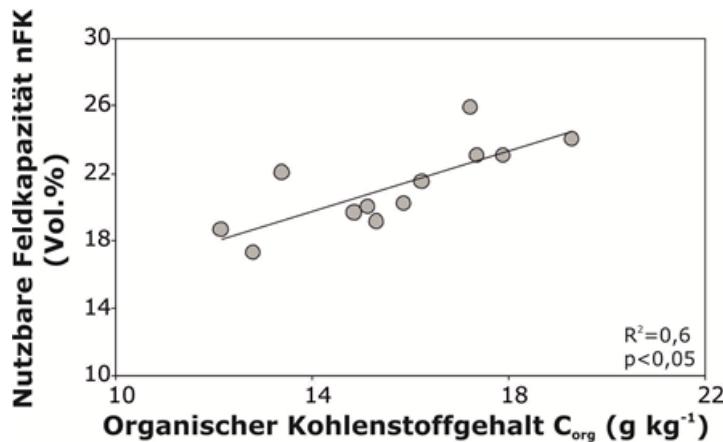


Abb. 13: Medianwerte der nutzbaren Feldkapazität nFK (Vol.%) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Gehalt an organischem Kohlenstoff C_{org} (g kg⁻¹). Daten beider Bestandeszusammensetzungen (mehr Leguminosen, mehr Graspflanzen) und allen Tiefen (5, 10, 20cm) von der Kontrollfläche im Juli 2008; n: 12.

3.3.2 Standort Röhu

Die Lagerungsdichte- (pt) und Luftkapazitätswerte (LK) liegen am Standort Röhu im mittleren bis sehr hohen Bereich (Abb. 14, Abb. 15). Des Weiteren kann man in den pt -Werten einen tendenziellen Einfluss der Pflanzenart feststellen: die Lagerungsdichte ist unter Rohrglanzgras (Rg) im Juli höher als unter Knaulgras (Kg). In den Lagerungsdichtewerten ist ein Tiefeneffekt erkennbar, die Werte sind im September in 20cm höher als in 5cm Tiefe, wobei in den LK-Werten kein Tiefeneffekt festzustellen ist. Die Auswirkungen der Überfahrung auf die Lagerungsdichte und Luftkapazität sind tendenziell nachweisbar. Die größte Erhöhung infolge Überfahrung der pt -Werte betrug $0,1\text{g cm}^{-3}$ (5cm Tiefe bei Rg im September). Die Abnahme der Luftkapazität war im Juli am deutlichsten in 5cm und im September in 20cm Tiefe, die Reduzierung entsprach meistens ca. 4Vol.%. Ferner kann man den kumulativen Effekt der Überfahrungshäufigkeit am Standort Röhu in 5cm Tiefe geringfügig feststellen, da es hier zu einer weiteren Zunahme der Lagerungsdichte um $0,1\text{g cm}^{-3}$ und Abnahme der Luftkapazität über 2Vol.% mit einer weiteren Überfahrt kam.

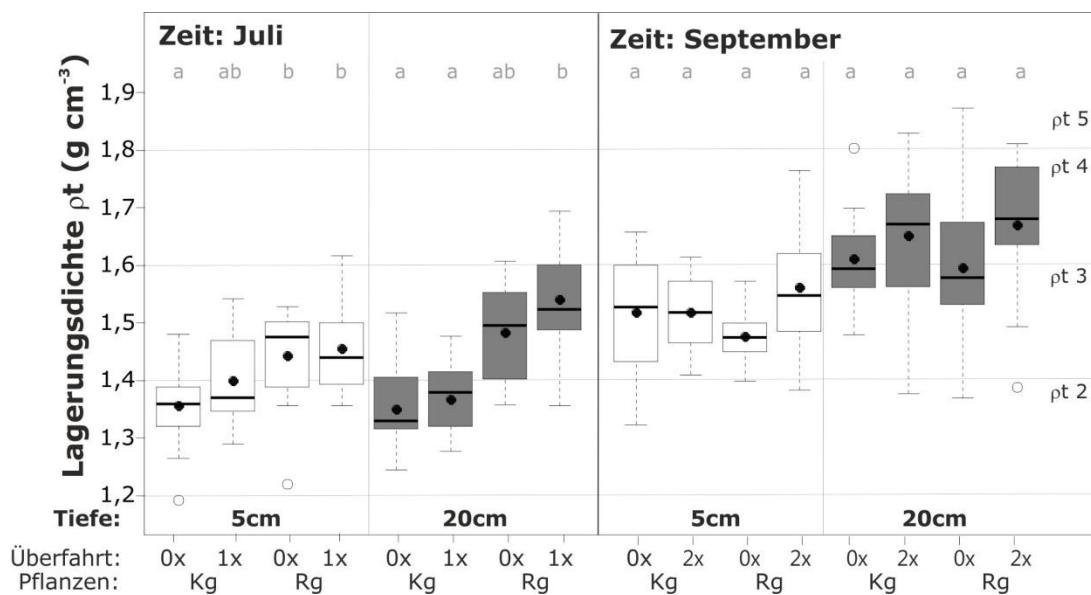


Abb. 14: Lagerungsdichte pt (g cm^{-3}) (Standort: Röhu) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probenahme (Juli, September), der Tiefe (5, 20cm), der Pflanzenart (Kg - Knaulgras, Rg - Rohrglanzgras) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: 17, pt -Klassifizierung nach AG Boden (2005).

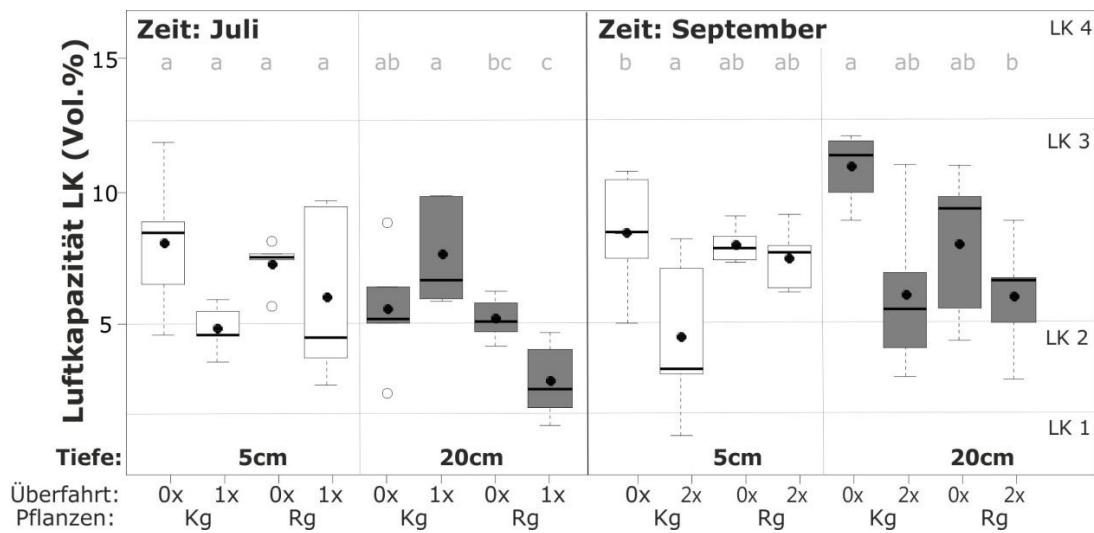


Abb. 15: Luftkapazität LK (Vol.%) (Standort: Röhu) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, September), der Tiefe (5, 20cm), der Pflanzenart (Kg - Knaulgras, Rg - Rohrglanzgras) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: 5, LK-Klassifizierung nach AG Boden (2005).

3.3.3 Standort Vorbuse

Die Lagerungsdichte (pt) zeigt eine Abhängigkeit von der Bodentiefe (Abb. 16). Die pt-Daten sind in 5cm Tiefe auf der Kontrollfläche deutlich niedriger (klassifiziert als gering) als in 20cm Tiefe (klassifiziert als mittel). Die Luftkapazität- (LK) und nutzbaren Feldkapazitätswerte (nFK) liegen auf der Kontrollfläche im geringen bis sehr hohen Bereich, in den Parametern kann man keinen Tiefeneffekt feststellen (Abb. 17, Abb. 18). Unmittelbar nach der Befahrung ist eine Abnahme des Gesamtporenvolumens festzustellen bzw. eine Erhöhung der Lagerungsdichte (in 5-10cm). Die Erhöhung beträgt in 5cm $0,19\text{g cm}^{-3}$ und in 10cm $0,14\text{g cm}^{-3}$. Die Unterschiede zur Kontrollfläche sind statistisch signifikant. In 5-10cm Tiefe hat eine Komprimierung des Porenraumes stattgefunden, was in einer Abnahme der LK und Zunahme der nFK resultierte. So beträgt die Abnahme der LK über 10Vol.% bzw. die Zunahme der nFK bis zur 5Vol.%.

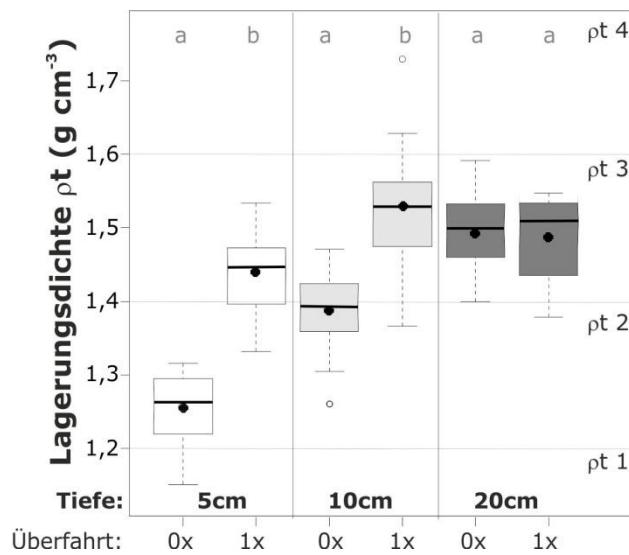


Abb. 16: Lagerungsdichte ρ_t (g cm^{-3}) (Standort: Vorbuse) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt) im September 2007 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; $n: 18$, ρ_t -Klassifizierung nach AG Boden (2005).

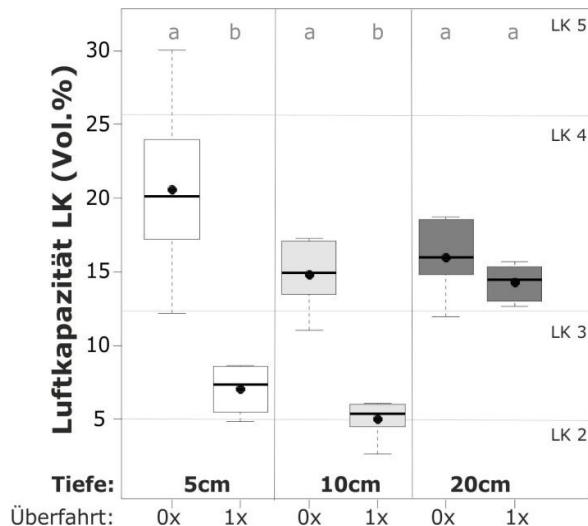


Abb. 17: Luftkapazität LK (Vol.%) (Standort: Vorbuse) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt) im September 2007 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; $n: 5$, LK-Klassifizierung nach AG Boden (2005).

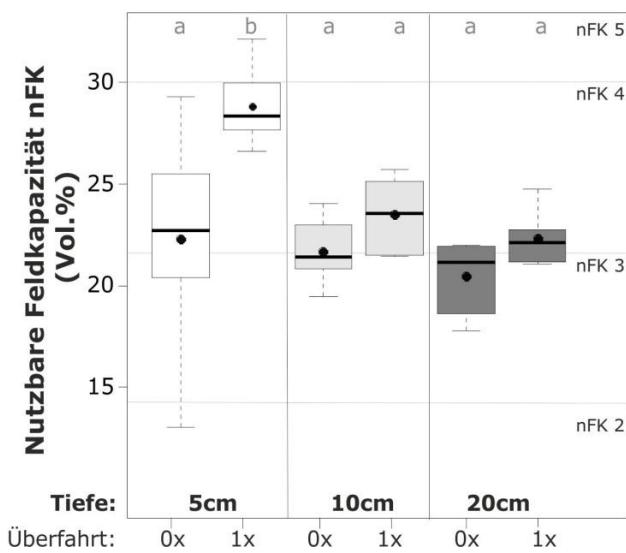


Abb. 18: Nutzbare Feldkapazität nFK (Vol. %) (Standort: Vorbuse) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt) im September 2007 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: 5, nFK-Klassifizierung nach AG Boden (2005).

3.4 Gesättigte Wasser- und Luftpfeifähigkeit

3.4.1 Standort Hohenschulen

Die gesättigte Wasser- (kf) und Luftpfeifähigkeit (kl) weisen eine sehr große Streuung auf, die Werte schwanken zwischen sehr gering bis sehr hoch (Abb. 19, Abb. 20). Zwischen den Pflanzenbeständen der Standorte sind keine deutlichen Unterschiede in den Leitfähigkeiten erkennbar. Aber man kann einen Tiefeneffekt feststellen; demnach sind die kf- und kl-Werte in 20cm deutlich höher als in 5cm Tiefe. Die Reduzierung der Medianwerte der gesättigten Wasserleitfähigkeit liegt zwischen 60 bis 90% (Ausnahme: mG im Oktober), in der Luftpfeifähigkeit erreicht die Verringerung zwischen 30-70%. Weiterhin fand eine Abnahme (30-85%) der gesättigten Wasserleitfähigkeit im Oktober im Vergleich zum Juli statt (Ausnahme: mG in 5cm). Hinsichtlich des Überfahrtseffektes gibt es zwei Tendenzen: Zum einen nehmen die Leitfähigkeiten auf der überfahrenen Fläche zu, wie es bei mG in 10cm (kf, kl) im Juli und im Oktober der Fall ist, während in der mL-Fläche dies nur auf kf im Juni und in 10-20cm Tiefe bzw. im Oktober in 5 und 20cm Tiefe zutrifft. Zum anderen findet eine Reduzierung der Leitfähigkeiten statt, die man auf der mG-Fläche (Oktober) in 5 und 20cm bei den kf und kl-Werten feststellen kann.

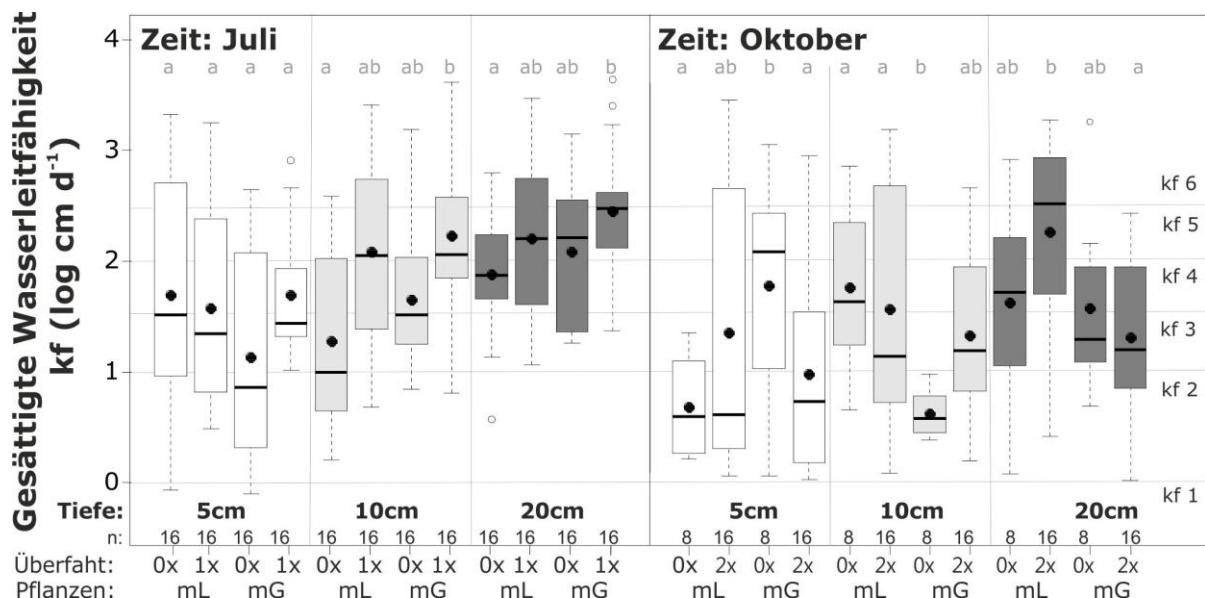


Abb. 19: Gesättigte Wasserleitfähigkeit kf ($\log \text{cm d}^{-1}$) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probenahme (Juli, Oktober), der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrtshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von $\alpha: 0,05$; n: siehe Abbildung, kf-Klassifizierung nach AG Boden (2005).

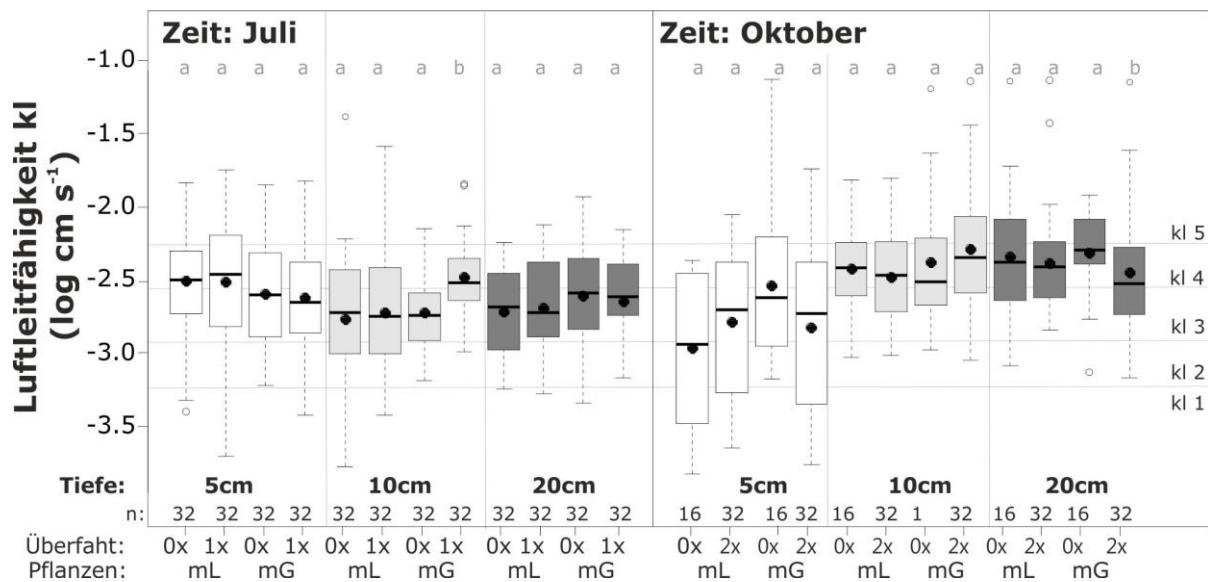


Abb. 20: Luftleitfähigkeit kl ($\log \text{cm s}^{-1}$) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, Oktober), der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) nach Vorentwässerung auf -6kPa in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: siehe Abbildung, kl-Klassifizierung nach DVWK (1997).

3.4.2 Standort Röhu

Die Werte für gesättigte Wasser (kf)- und Luftleitfähigkeit (kf) liegen im geringen bis sehr hohen, bei kf auch im extrem hohen Bereich (Abb. 21, Abb. 22). Der Einfluss der Pflanzenart zeigt sich in den Leitfähigkeiten im September in 5cm Tiefe, wo die kf- und kl-Werte unter Rohrglanzgras höher als unter Knaulgras sind. Weiterhin kann man bei den kf-Daten einen deutlichen Tiefeneffekt feststellen: die kf-Werte sind unter beiden Kulturen in 20cm Tiefe ca. 80% höher als in 5cm Tiefe. Im Vergleich dazu sind die Tiefenunterschiede in den kl-Werten nicht so deutlich zu erkennen (bis zu 12% Differenz) und auch nur bei Knaulgras.

Bezüglich des Überfahrungseffektes gibt es ähnlich wie am Standort Hohenschulen auch hier zwei Tendenzen: Zum einen nimmt die Luftleitfähigkeit in 5cm Tiefe im Juli auf der überfahrenen Fläche ab (bis zu 20%), und in 20cm Tiefe findet eine Erhöhung der kl-Werte statt. Im September kann man keine durch die Überfahrungshäufigkeit bedingten Unterschiede in den kl- und kf-Werten feststellen.

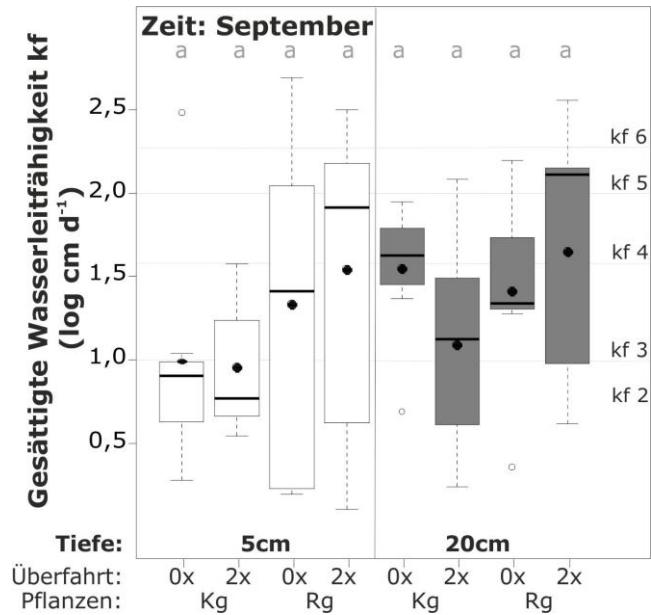


Abb. 21: Gesättigte Wasserleitfähigkeit kf ($\log \text{cm d}^{-1}$) (Standort: Röihu) in Abhängigkeit von der Pflanzenart (Kg - Knaulgras, Rg - Rohrglanzgras), der Tiefe (5, 20cm) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 2x - mit zwei Überfahrten) im September 2007 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: 7, kf-Klassifizierung nach AG Boden (2005).

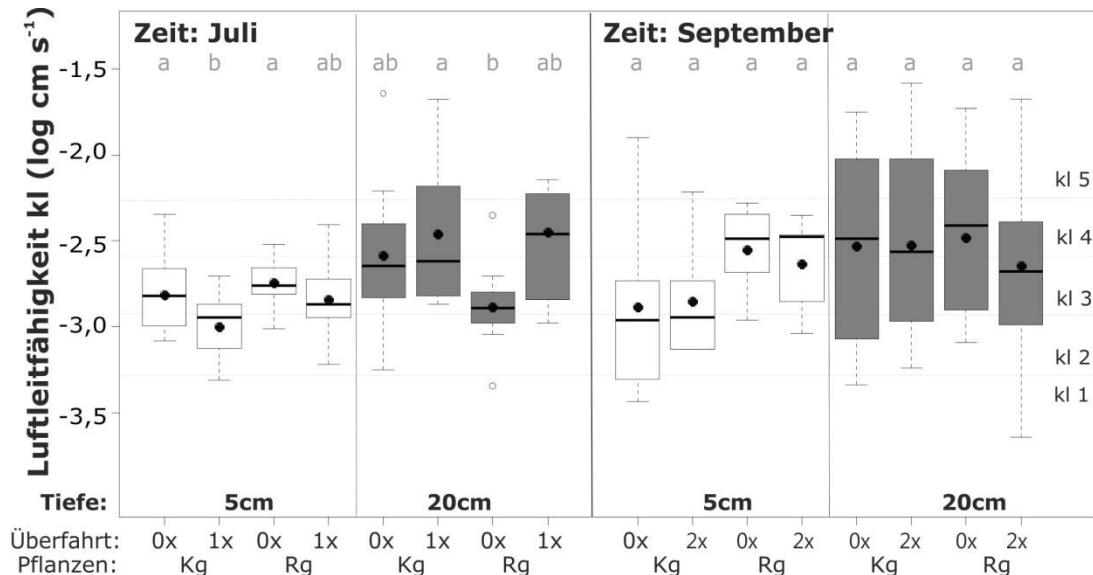


Abb. 22: Luftleitfähigkeit kl ($\log \text{cm s}^{-1}$) (Standort: Röihu) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probenahme (Juli, September), der Tiefe (5, 20cm), der Pflanzenart (Kg - Knaulgras, Rg - Rohrglanzgras) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) nach Vorentwässerung auf -6kPa in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: 12, kl-Klassifizierung nach DVWK (1997).

3.4.3 Standort Vorbuse

Die gesättigte Wasser (kf)- und Luftleitfähigkeit (kl) sind auf der Kontrollfläche in 5cm Tiefe (kf extrem hoch, kl sehr hoch) deutlich höher als in 10-20cm Tiefe, wobei sich die Leitfähigkeiten in 10-20cm Tiefe sogar einander annähern (kf sehr hoch, kl mittel) (Abb. 23, Abb. 24). Weiterhin ist sowohl bei den kf- als auch bei den kl-Werten der überfahrenen Flächen eine deutliche Abnahme zu erkennen (in 5-10cm Tiefe statistisch signifikant). Die Verringerung der gesättigten Wasserleitfähigkeit überschritt 20%, die der Luftleitfähigkeit lag zwischen 20 bis 70% in 5-10cm Tiefe. Ferner zeigt die Korrelation zwischen dem Anteil an weiten Grobporen bzw. des Gesamtporenvolumens und der gesättigten Wasser- und Luftleitfähigkeit, dass mit steigender Menge an weiten Grobporen bzw. steigendem Gesamtporenvolumen die Leitfähigkeiten zunehmen (Abb. 24).

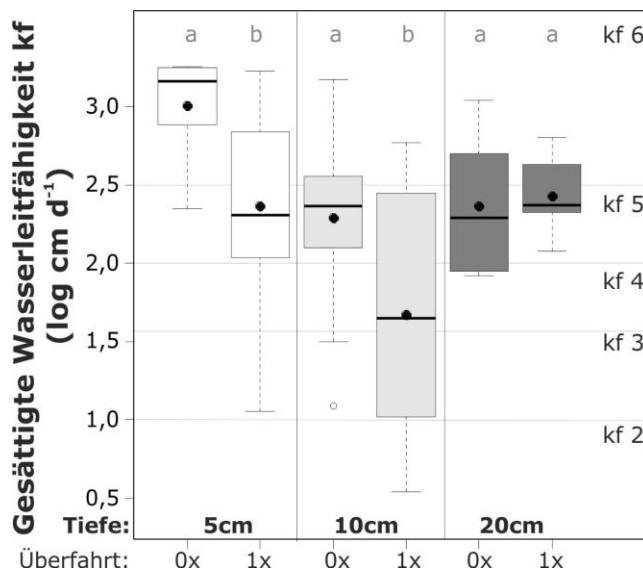


Abb. 23: Gesättigte Wasserleitfähigkeit kf ($\log \text{cm d}^{-1}$) (Standort: Vorbuse) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt) im September 2007 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (•). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: 13, kf-Klassifizierung nach AG Boden (2005).

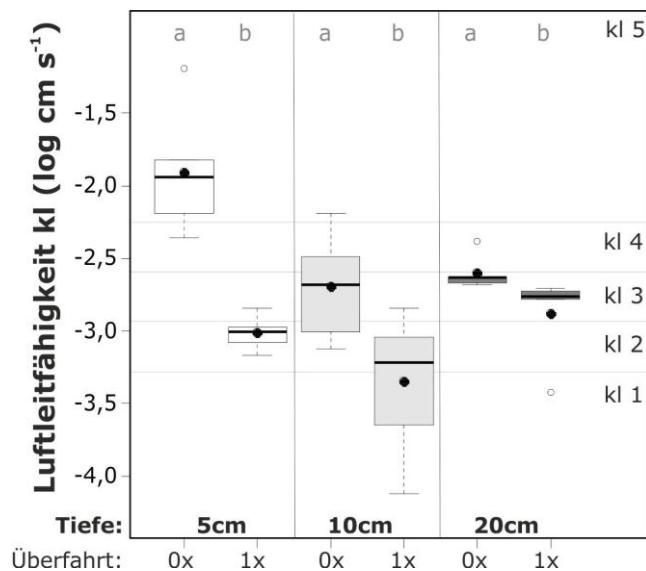


Abb. 24: Luftleitfähigkeit kl ($\log \text{cm s}^{-1}$) (Standort: Vorbuse) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt) nach Vorentwässerung auf -6kPa im September 2007 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (•). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: 6, kl-Klassifizierung nach DVWK (1997).

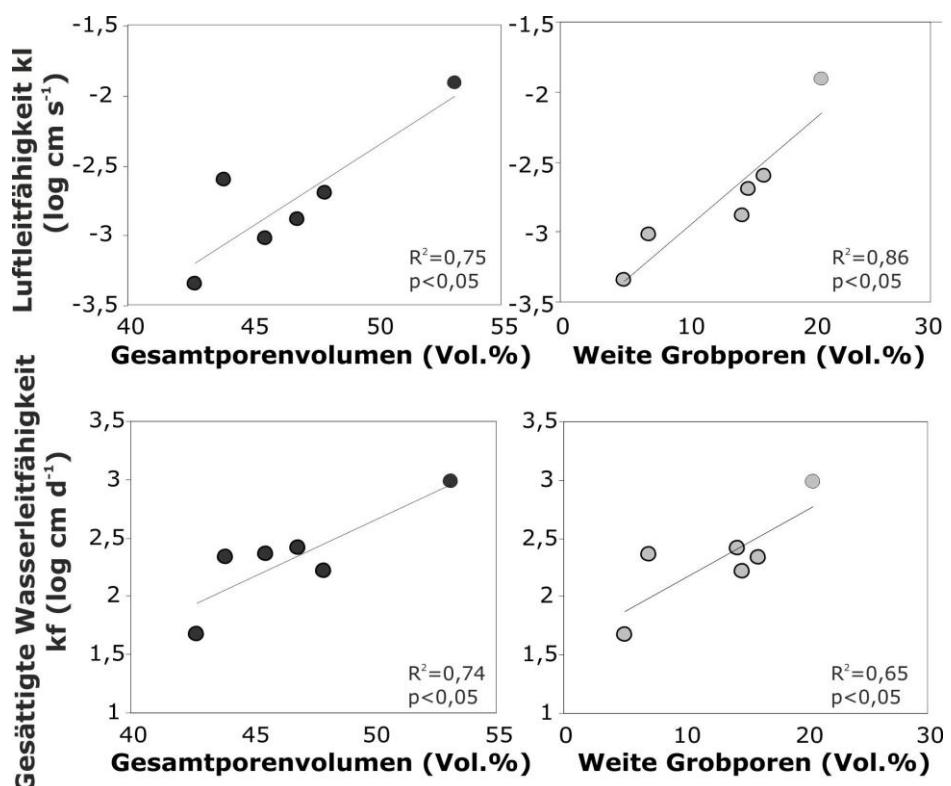


Abb. 25: Medianwerte der gesättigten Wasser k_f ($\log \text{cm d}^{-1}$)- und der Luftleitfähigkeit kl ($\log \text{cm s}^{-1}$) (Standort: Vorbuse) in Abhängigkeit vom Gesamtporenvolumen (Vol.%) und der weiten Grobporen (Vol.%). Daten aus allen Tiefen (5, 10, 20cm) und Überfahrungshäufigkeiten (0x - Kontrolle; 1x - mit einer Überfahrt) nach Vorentwässerung auf -6kPa im September 2007, n: 6.

3.5 Scherparameter: Kohäsion und Winkel der inneren Reibung

3.5.1 Standort Hohenschulen

Die Pflanzenart (mL – mehr Leguminosenpflanzen, mG – mehr Graspflanzen), aber auch die Kaliumdüngung scheinen einen großen Einfluss auf die Scherparameter zu haben (Abb. 26, Abb. 27). Auf der mG-Fläche haben sowohl der Winkel der inneren Reibung (ϕ) als auch die Kohäsion (c) einen sehr ähnlichen Verlauf, und es gibt keine Unterschiede zwischen K300 und K600. Auf der Fläche mit mehr Leguminosenpflanzen sind die Unterschiede hinsichtlich der Kaliumdüngung deutlich erkennbar. Der Winkel der inneren Reibung ist auf der Kontrollfläche bei N0 K300 höher als bei N0 K600. Bei den Kohäsionswerten ist dies umgekehrt, dort sind die höchsten Werte bei N0 K600 zu finden. Unterscheidet man die Scherparameter nach mL und mG, dann ist ϕ auf der 0x-Fläche bei mL mit K300 immer höher und mit K600 geringer als bei mG in 5cm Tiefe. Die Kohäsion ist in 5 und 20cm Tiefe auf der mL-Fläche mit K300 geringer als auf der mG-Fläche. In 5cm Tiefe ist c auf der mL-Fläche mit K600 am höchsten.

Weiterhin ist ein Einfluss der Überfahrungshäufigkeit feststellbar. Mit steigender Anzahl von Überfahrten nimmt der ϕ -Wert ab, die größte Abnahme findet bereits nach der ersten Überfahrt statt, während die Verringerung nach der zweiten kleiner ist. Besonders deutlich ist dies in 5cm Tiefe zu erkennen. Bei den Kohäsionswerten sind die Tendenzen nicht so eindeutig. Auf der mL-Fläche ist es in 5cm Tiefe zu einer leichten Abnahme nach der ersten Überfahrt (1x) gekommen und nach der zweiten zu starken Zunahmen. In 10-20cm Tiefe sind die c-Werte auf den überfahrenen Parzellen leicht erhöht bzw. gleich geblieben. Auf der Fläche mit mehr Graswurzeln (mG) fand in 5cm Tiefe eine starke Zunahme der c-Werte nach der ersten Überfahrt (1x) statt, während die zweite Überfahrt zu Abnahmen führte (umgekehrt zur mL-Fläche). In 10-20cm Tiefe kam es auf der 1x-Fläche zur Abnahme der Kohäsion.

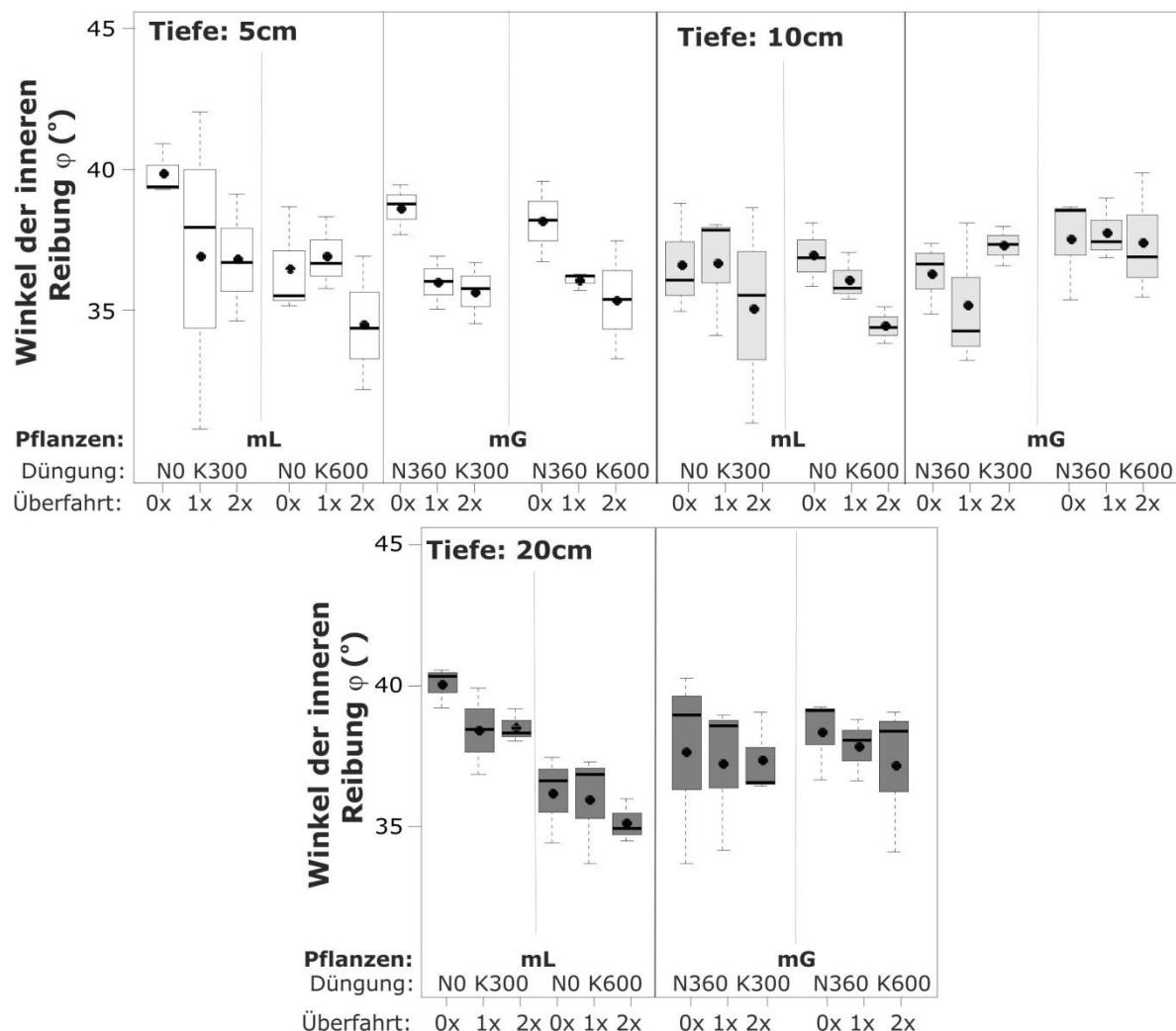


Abb. 26: Winkel der inneren Reibung φ (°) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen), der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) und der Düngungsstufe (N0 K300 - 0kg Stickstoff, 300kg Kalium ha^{-1} ; N0 K600 - 0kg Stickstoff, 600kg Kalium ha^{-1} ; N360 K300 - 360kg Stickstoff, 300kg Kalium ha^{-1} ; N360 K600 - 360kg Stickstoff, 600kg Kalium ha^{-1}) nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli und Oktober 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●), n: 3.

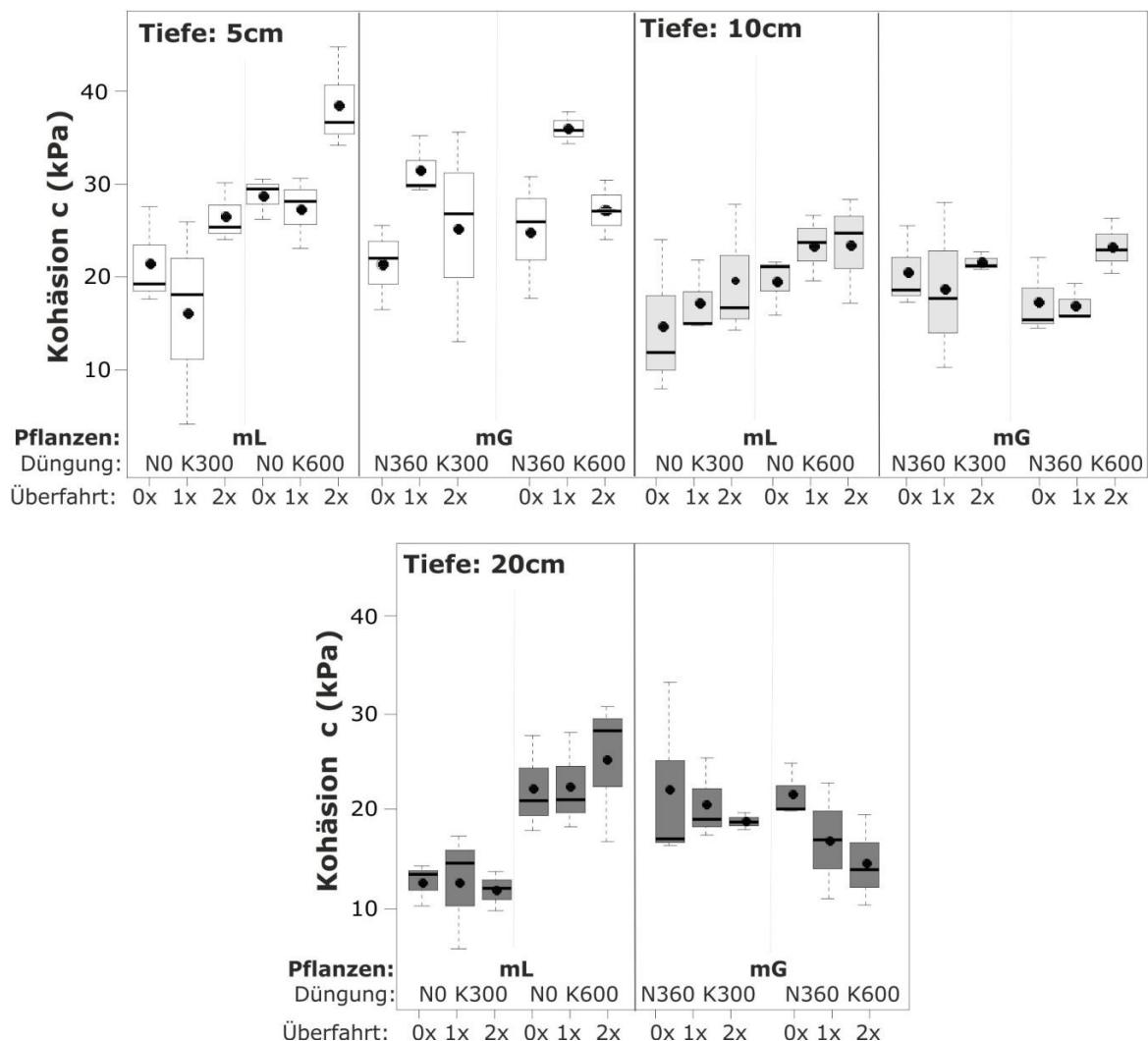


Abb. 27: Kohäsion c (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG – mehr Graspflanzen), der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) und der Düngungsstufe (N0 K300 - 0kg Stickstoff, 300kg Kalium ha^{-1} ; N0 K600 - 0kg Stickstoff, 600kg Kalium ha^{-1} ; N360 K300 - 360kg Stickstoff, 300kg Kalium ha^{-1} ; N360 K600 – 360kg Stickstoff, 600kg Kalium ha^{-1}) nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli und Oktober 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●), n: 3.

Um den Tiefeneffekt auf die Scherparameter genauer zu betrachten, sind in Abb. 28 alle Daten aus der Kontrollfläche zusammengefasst. In 5cm Tiefe ist die Kohäsion stets höher als in 20cm Tiefe, wohingegen zwischen den Werten des Winkels der inneren Reibung ϕ keine deutlichen Tiefenunterschiede bestehen.

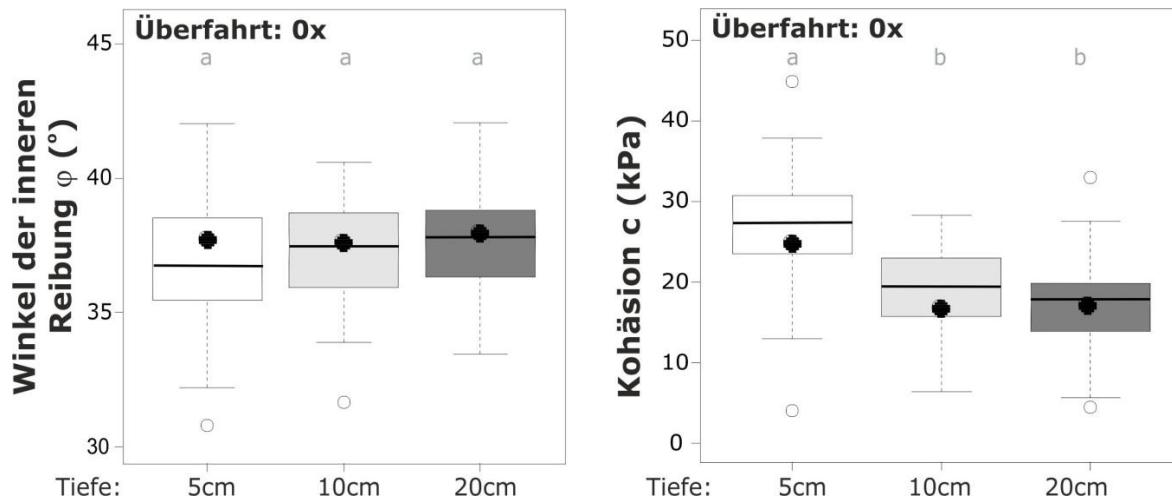


Abb. 28: Winkel der inneren Reibung ϕ ($^{\circ}$) und Kohäsion c (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm) als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Daten beider Bestandeszusammensetzungen (mehr Leguminosen, mehr Graspflanzen) von der Kontrollfläche nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli und Oktober 2008. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: 18.

3.5.1.1 Einfluss des Wurzelwachstums auf den Scherwiderstand des strukturierten Gesamtbodens

Aus den Abb. 4 und Abb. 5 konnte man ablesen, dass die Durchwurzelung in 20cm Tiefe sehr stark abnimmt. Um den Durchwurzelungseffekt genauer zu betrachten, sind in Abb. 29 die maximalen Scherwiderstandswerte aus den Proben in 5cm und 20cm Tiefe dargestellt. Es zeigt sich, dass die Werte in der gut durchwurzelten Tiefe (5cm) deutlich höher (7-14kPa) als in 20cm Tiefe bei Auflasten von 40-100kPa sind. Bei 200 und 400kPa gibt es keine Unterschiede zwischen 5 und 20cm Tiefe. Außerdem ist der maximale Scherwiderstand der Proben mit Gras- höher als mit Leguminosenwurzeln (Abb. 30). Weiterhin kann man bei den Proben mit Graswurzeln aus 5cm Tiefe eine Korrelation zwischen Wurzeloberflächendichte im Boden und dem maximalen Scherwiderstand bei den Auflaststufen 40-100kPa feststellen (Abb. 31). Mit steigender Wurzeloberflächendichte im Boden steigt auch der maximale Scherwiderstand an. Dies führt zu einer entsprechenden Erhöhung der Kohäsionswerte (Abb. 32).

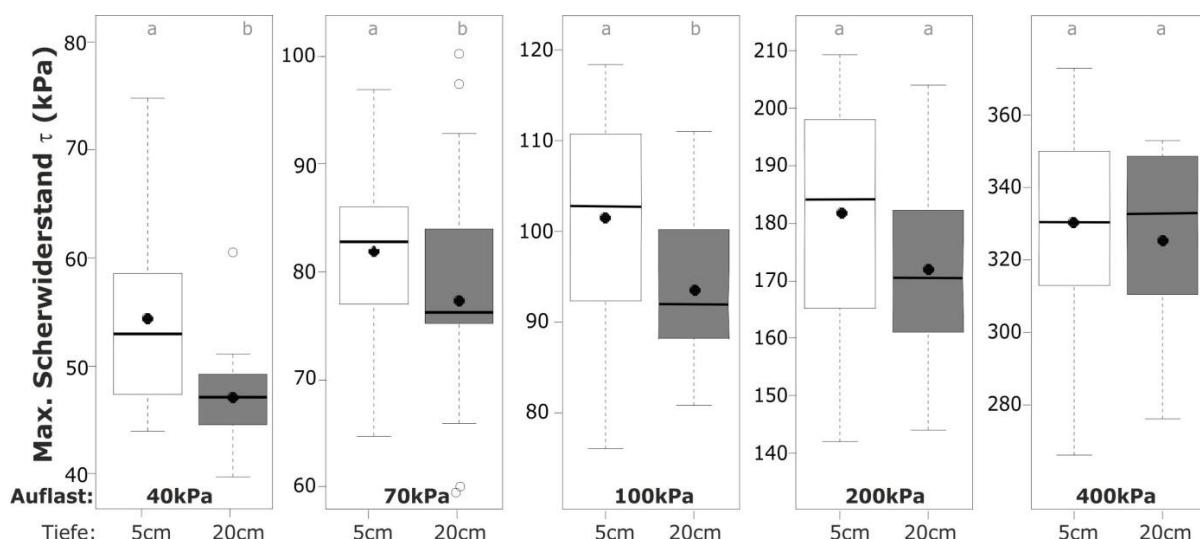


Abb. 29: Maximaler (Max.) Scherwiderstand τ (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Auflast (40, 70, 100, 200 und 400kPa) und der Tiefe (5, 20cm) als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Daten beider Bestandeszusammensetzungen (mehr Leguminosen, mehr Graspflanzen) von der Kontrollfläche nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli und Oktober 2008. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: 24 (40-200kPa), 32 (400kPa).

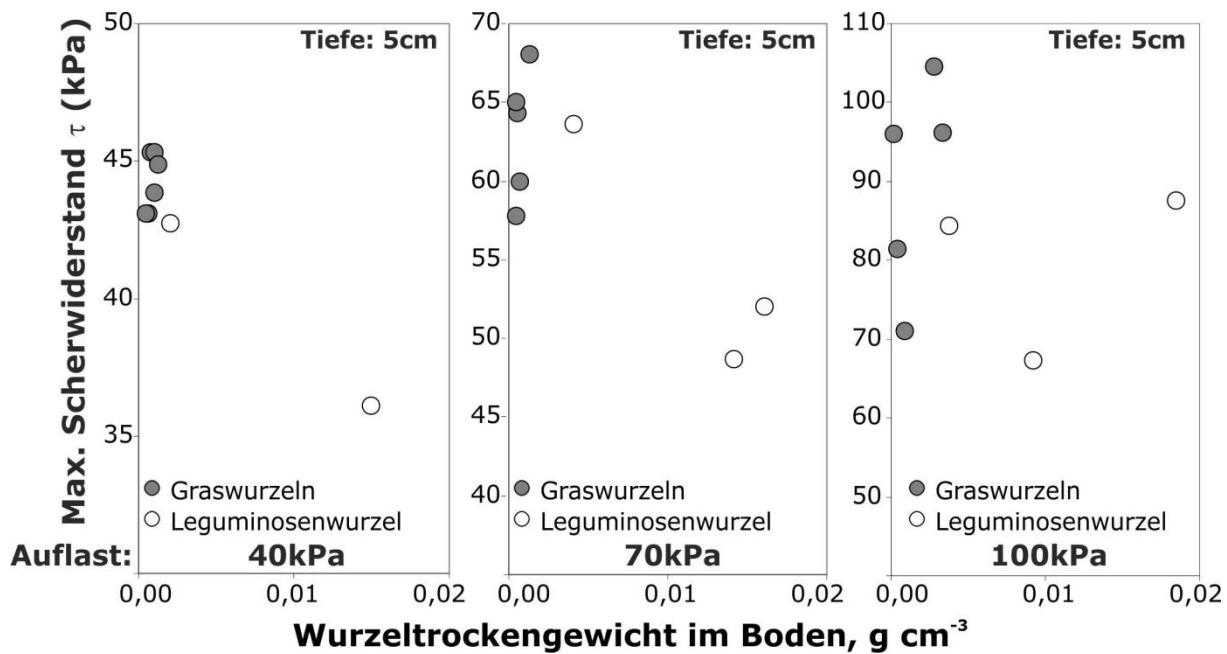


Abb. 30: Maximaler (Max.) Scherwiderstand τ (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Wurzeltrockengewicht (g cm^{-3}) der Pflanzenarten (Gras- und Leguminosenwurzeln) und der Auflast (40, 70 und 100kPa). Daten der Kontrollfläche in 5cm Tiefe nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli und Oktober 2008.

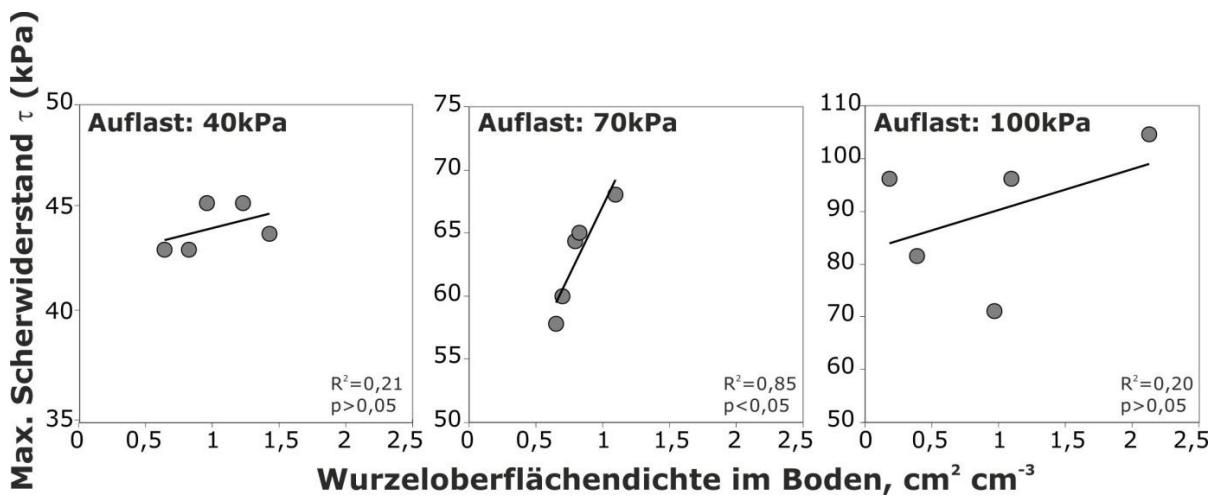


Abb. 31: Maximaler (Max.) Scherwiderstand τ (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Wurzeloberflächendichte ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$) und der Auflast (40, 70 und 100kPa). Daten der Kontrollfläche, aus Stechzylinderproben mit Graswurzeln in 5cm Tiefe nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli und Oktober 2008, n:5.

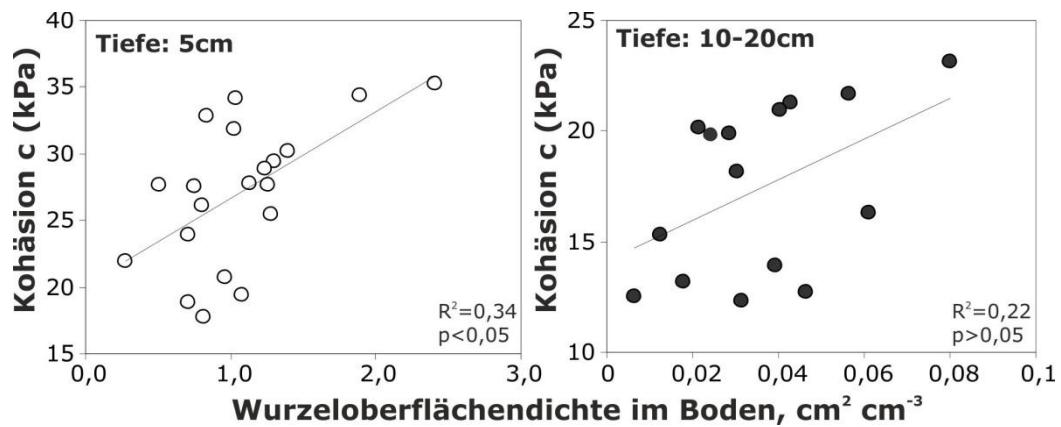


Abb. 32: Kohäsion c (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Wurzeloberflächendichte ($\text{cm}^2 \text{ cm}^{-3}$) in 5 und 10-20cm Tiefe. Daten beider Bestandeszusammensetzungen (mehr Leguminosen, mehr Graspflanzen) der Kontrollfläche nach Vorentwässerung bei -6kPa im Juli und Oktober 2008, n: 20 (5cm), 16 (10-20cm).

3.5.1.1.1 Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit ist ein Maß dafür, wie empfindlich Wurzeln auf Zugkräfte reagieren, gewichtet über den Wurzelquerschnitt. Es gibt eine hohe Korrelation zwischen Wurzeldurchmesser und Reißkraft (Abb. 33). Je dicker die Wurzel, desto mehr Kraft wird benötigt, um sie zu zerreißen. Die maximalen Werte der Reißkraft bei Gras bleiben unter 8N, die der Leguminosen unter 350N. Die Zugfestigkeit als Kraft pro Fläche steigt entsprechend mit abnehmendem Wurzeldurchmesser und ist bei Graswurzeln deutlich höher als bei Leguminosen (Abb. 34).

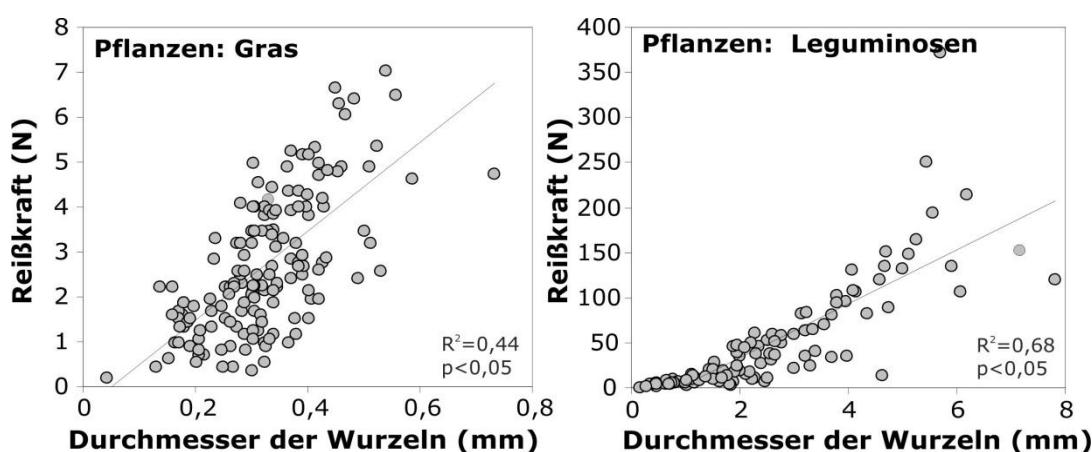


Abb. 33: Reißkraft der Wurzel (N) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Wurzeldurchmesser (mm) bei Gras und Leguminosen. Daten aus aller Düngungsstufen der Kontrollfläche im Juli 2008, n: 95 (Graswurzeln) 170 (Leguminosenwurzeln).

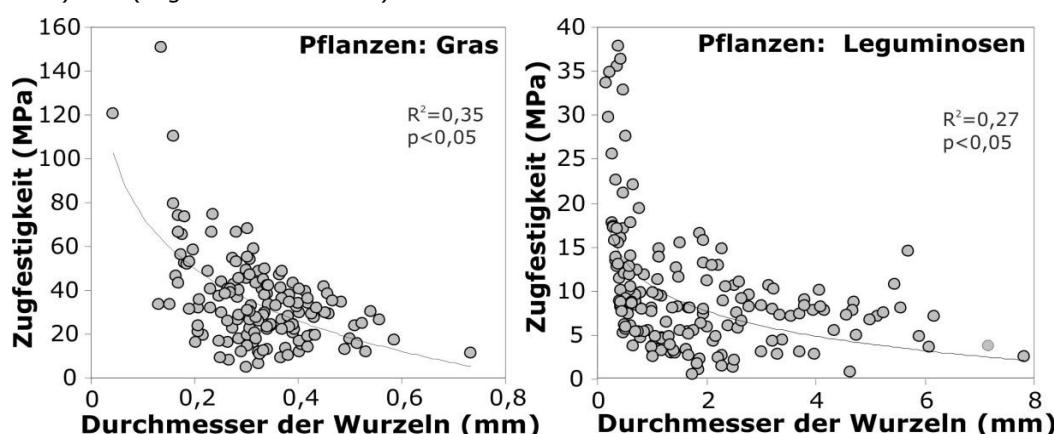


Abb. 34: Zugfestigkeit der Wurzeln (MPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Wurzeldurchmesser (mm) bei Gras und Leguminosen. Daten aller Düngungsstufen der Kontrollfläche im Juli 2008, n: 95 (Graswurzeln) 170 (Leguminosenwurzeln).

Des Weiteren ist die Zugfestigkeit vom Wassergehalt (WG) der Wurzel abhängig. Mit steigendem Wassergehalt (in Gewichtsprozent) verringert sich die Zugfestigkeit (Abb. 35). Bei Wurzeln mit mittlerem Durchmesser von 0,2mm beträgt die Zugfestigkeit bei 11%

WG 97MPa und bei 32% WG 53MPa, bei einem mittleren Durchmesser von 0,3mm liegen die Werte bei den gleichen Wassergehalten bei 83 bzw. 30MPa.

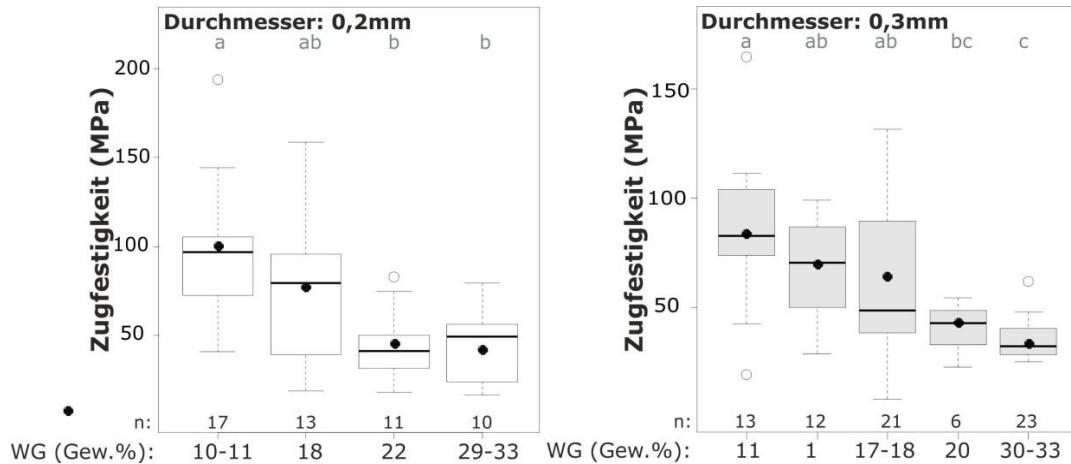


Abb. 35: Zugfestigkeit der Wurzeln (MPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Wurzel-durchmesser (0,2; 0,3mm) und dem Wurzelwassergehalt in Gewichtsprozent (WG Gew.%). Daten von Graswurzeln der Düngungsstufe N360 K600 ($360 \text{ kg Stickstoff ha}^{-1}$ $600 \text{ kg Kalium ha}^{-1}$) im Juli 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Wurzelwassergehaltsklassen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: siehe Abbildung.

Die Zugfestigkeit ist auch von der Düngungsstufe abhängig (Abb. 36, Abb. 37). Mit steigender K-Düngung steigt die Zugfestigkeit, dies kann man deutlich bei den Graswurzeln mit einem Durchmesser von 0,2mm erkennen, wo die Zugfestigkeit in N0 K600 deutlich höher als in N0 K300 ist. Bei Leguminosewurzeln kann man ähnliche Tendenzen erkennen, die Zugfestigkeit ist hier bei der Düngungsstufe N360 K600 höher als bei N0 K300.

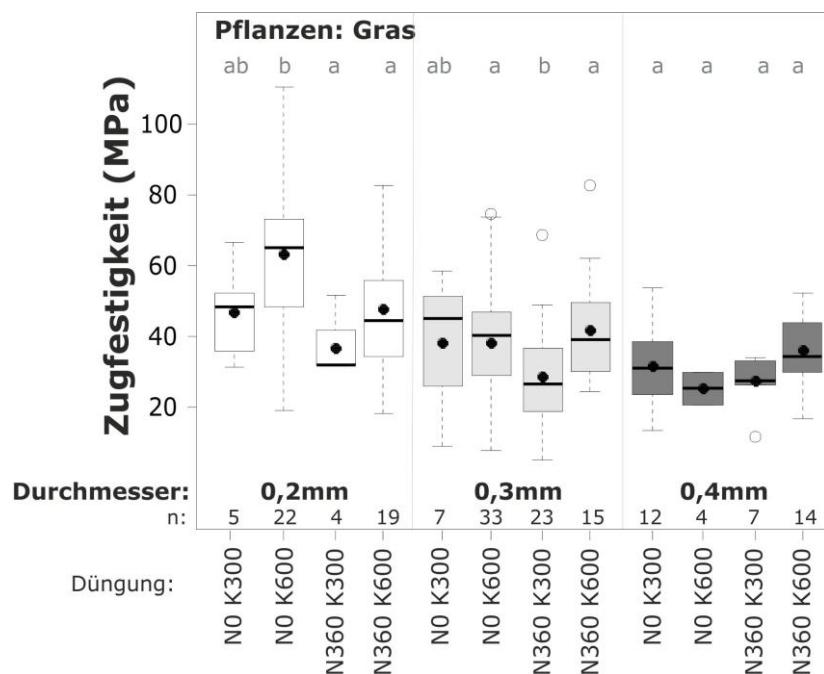


Abb. 36: Zugfestigkeit von Graswurzeln (MPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Durchmesser (0,2; 0,3 und 0,4mm) und der Düngungsstufe (N0 K300 - 0kg Stickstoff, 300kg Kalium ha^{-1} ; N0 K600 - 0kg Stickstoff, 600kg Kalium ha^{-1} ; N360 K300 - 360kg Stickstoff, 300kg Kalium ha^{-1} , N360 K600 - 360kg Stickstoff, 600kg Kalium ha^{-1}) als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Daten von Wurzeln mit Wassergehalten von 20-30Gew.% im Juli 2008. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Durchmesserklassen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05, n: siehe Abbildung.

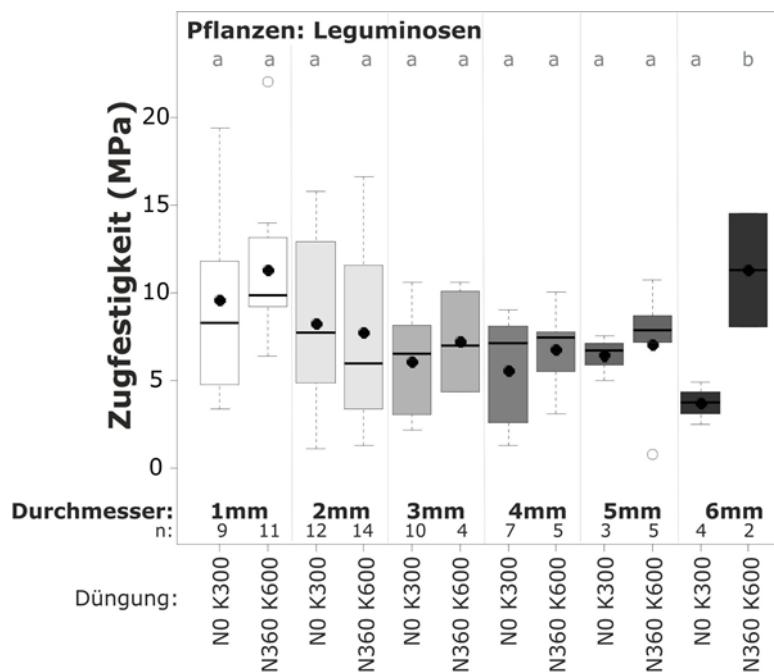


Abb. 37: Zugfestigkeit von Leguminosenwurzeln (MPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Durchmesser (1-6mm) und der Düngungsstufe (N0 K300 - 0kg Stickstoff, 300kg Kalium ha^{-1} ; N360 K600 - 360kg Stickstoff, 600kg Kalium ha^{-1}) als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Daten von Wurzeln mit Wassergehalten von 50-60Gew.% im Juli 2008. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Durchmesserklassen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05, n: siehe Abbildung.

3.5.1.1.2 Berechnung der Erhöhung des Scherwiderstands nach dem Armierungsmodell

Die Erhöhung des Scherwiderstands bzw. der Kohäsion (c_w) wurde nach Gleichung 6 berechnet. Dabei erfolgte die Berechnung unter der Annahme, dass sich 10% der Wurzeln im Stechzylinder ($235,62\text{cm}^3$) in der Scherfläche befinden. Aus den Ergebnissen ist zum einen zu erkennen, dass die c_w -Werte in 5cm deutlich höher (bis zu 180kPa) als in 10 und 20cm Tiefe liegen, und zum anderen, dass sie auf der Fläche mit mehr Graspflanzen (mG) in 5cm Tiefe deutlich größer (146kPa) als auf der Fläche mit mehr Leguminosenpflanzen (mL) (83kPa) sind (Abb. 38). Des Weiteren ist eine positive Korrelation zwischen den maximalen Scherwiderstandswerten und den berechneten c_w -Werten für die Proben mit Graswurzeln erkennbar (Abb. 39). Aber die Korrelation besteht nur unter Auflasten von 40-100kPa, bei 200-400kPa gibt es keine Beziehung.

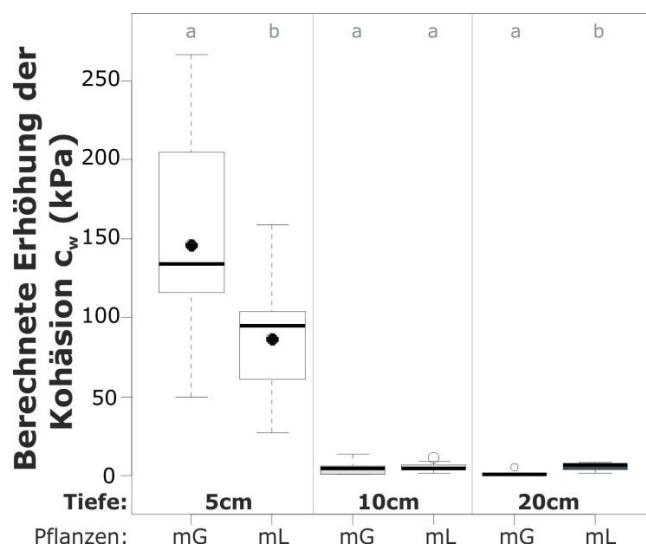


Abb. 38: Berechnete Erhöhung der Kohäsion c_w (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm) und der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) der Kontrollfläche im Juli 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: 10 (5cm), 8 (10-20cm).

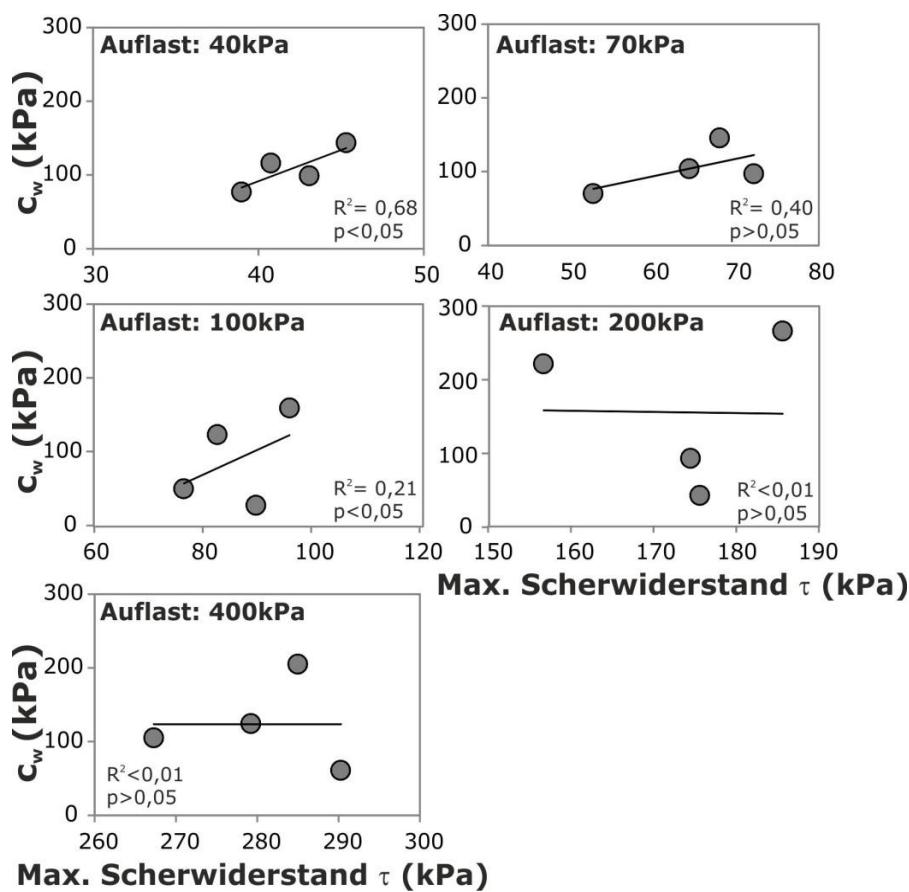


Abb. 39: Berechnete Erhöhung der Kohäsion c_w (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom maximalen (Max.) Scherwiderstand τ (kPa) für die Auflaststufen 40-400kPa. Daten der Kontrollfläche, aus Stechzylinderproben mit Graswurzeln in 5cm Tiefe im Juli und Oktober 2008, n:4

3.5.1.1.3 Einfluss von C_{org} auf den Scherwiderstand

Der Scherwiderstand wird indirekt durch den organischen Kohlenstoff (C_{org}) im Boden beeinflusst. Mit steigender Menge an organischer Substanz im Boden steigt der Anteil an engen Grob- und Mittelporen (s. Abb. 13). Im ungesättigten Boden führt dies dazu, dass es in Proben mit höherem C_{org} -Gehalt bzw. feineren Poren bei gleichem Matrixpotenzial mehr Wasser gibt (Abb. 40). Durch diesen höheren Anteil an Wasser ist die Zahl der Wassermenisten erhöht, dies wiederum erhöht den Scherwiderstand.

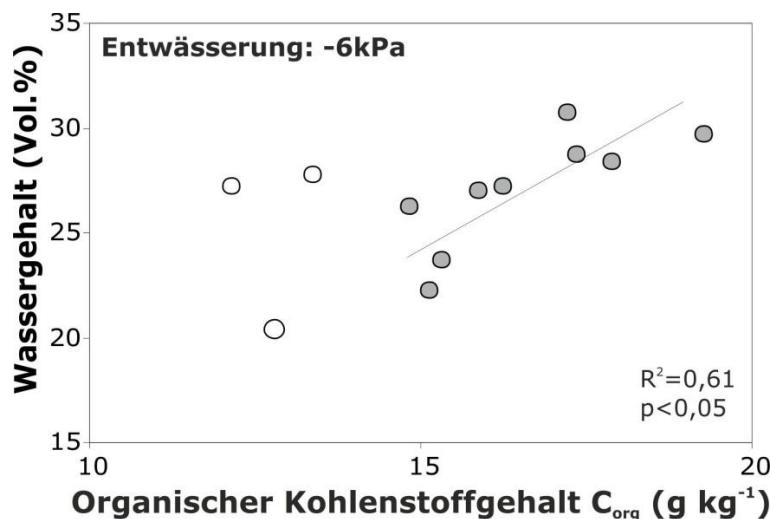


Abb. 40: Wassergehalt (Vol.%) des Bodens (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Gehalt des Bodens an organischem Kohlenstoff C_{org} (g kg⁻¹). Daten beider Bestandeszusammensetzungen (mehr Leguminosen, mehr Grasfarnen) und aller Tiefen (5, 10, 20cm) der Kontrollfläche nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli 2008 (Punkte der Variante mL K600 in weiß gekennzeichnet), n: 12

Folglich kann man eine linear steigende Korrelation zwischen dem C_{org} -Gehalt des Bodens und dem maximalen Scherwiderstand (τ) feststellen, d.h. in Proben mit höherem C_{org} -Gehalt ist τ größer (Abb. 41). Dies gilt für alle untersuchten Auflaststufen. Dabei ist die Beziehung sehr eng bei der Auflast von 40kPa, wird geringer bei 70-100kPa und wieder signifikant bei 200-400kPa. Ferner ist der maximale Scherwiderstand von der Auflast abhängig und steigt mit der wirkenden Auflast.

Des Weiteren kann man feststellen, dass mit steigendem C_{org} -Gehalt im Boden das Matrixpotenzial bei der entsprechenden Auflaststufe negativer wird, d.h. mit höherer Menge an organischer Substanz im Boden ist das Matrixpotenzial im Moment des maximalen Scherwiderstandes negativer (außer bei Auflast 40kPa) (Abb. 42). Dazu ist das Matrixpotenzial im Moment des maximalen Scherwiderstandes von der wirkenden Auflast abhängig und nähert sich mit steigender Auflast positiven Werten bzw. erreicht diese.

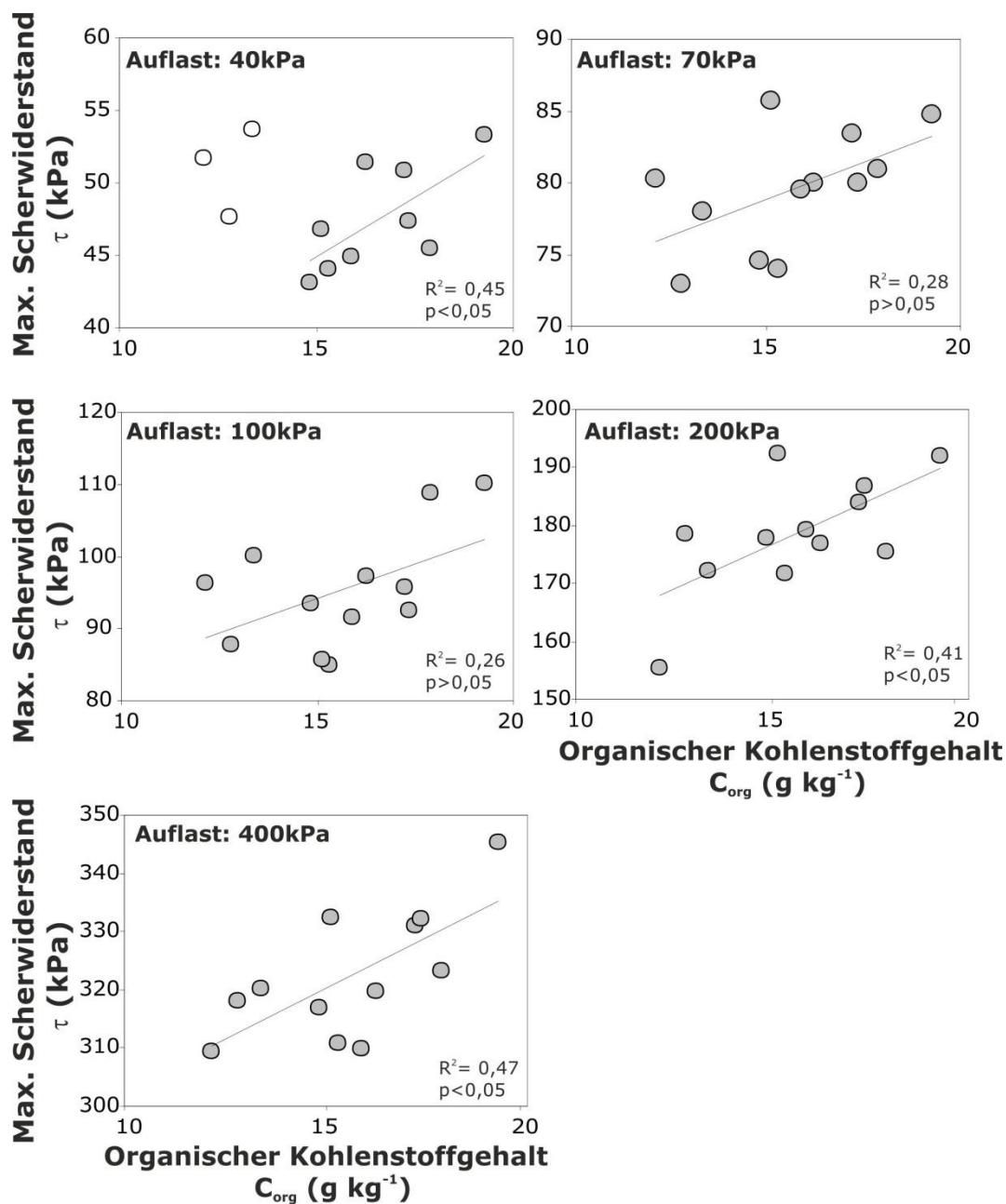


Abb. 41: Maximaler (Max.) Scherwiderstand τ (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Gehalt an organischem Kohlenstoff C_{org} (g kg^{-1}) für die Auflaststufen 40-400kPa. Daten beider Bestandeszusammensetzungen (mehr Leguminosen, mehr Graspflanzen) und aller Tiefen (5, 10, 20cm) der Kontrollfläche nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli 2008 (bei der Auflaststufe 40kPa Punkte der Variante mL K600 in weiß gekennzeichnet), n: 12.

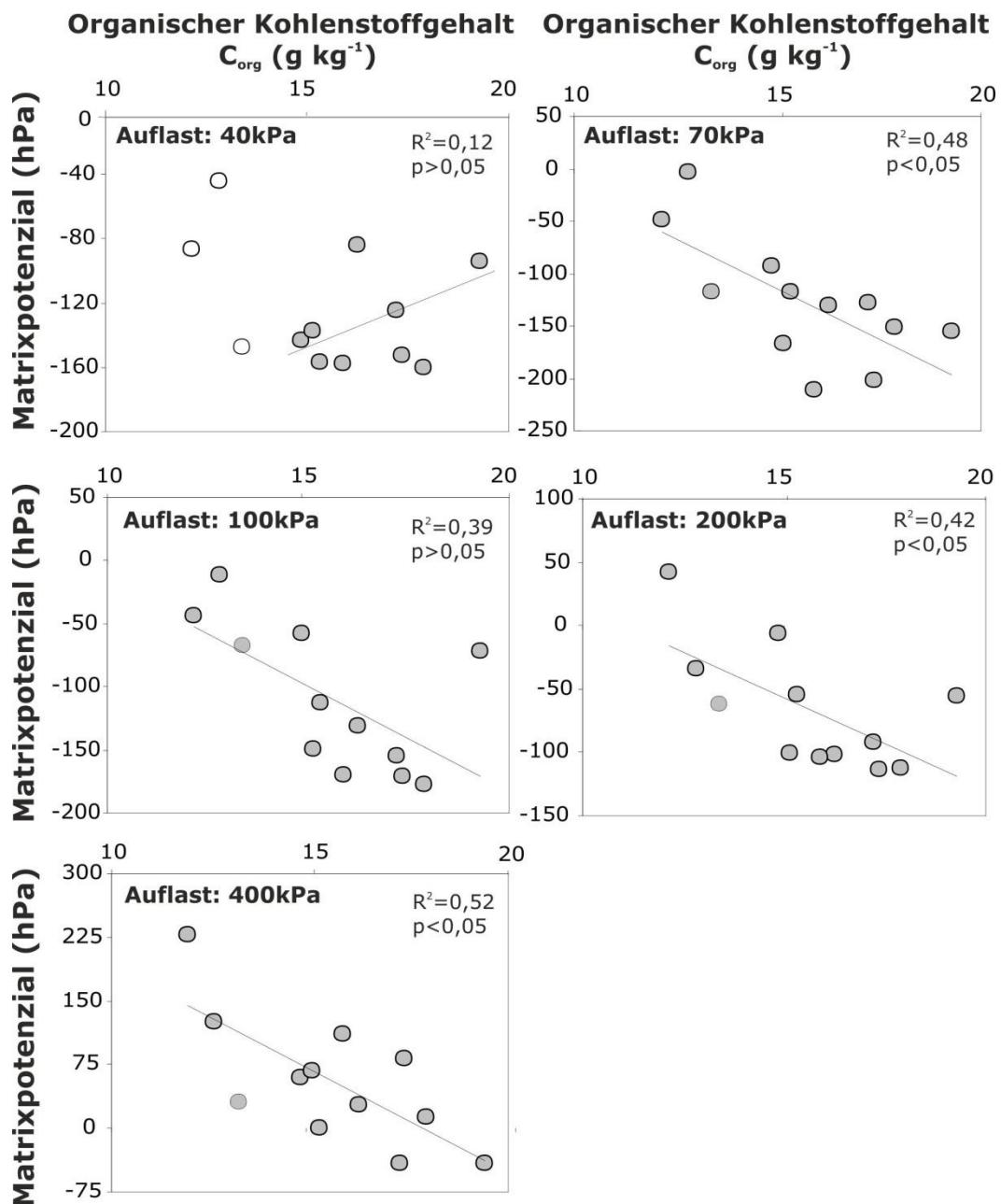


Abb. 42: Matrixpotenzial (hPa) im Moment des maximalen Scherwiderstandes (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Gehalt an organischem Kohlenstoff C_{org} (g kg^{-1}) für die Auflaststufen 40-400kPa. Daten beider Bestandeszusammensetzungen (mehr Leguminosen, mehr Graspflanzen) und aller Tiefen (5, 10, 20cm) der Kontrollfläche nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli 2008 (bei der Auflaststufe 40kPa Punkte der Variante ML K600 in weiß gekennzeichnet), n: 12.

3.5.2 Standort Röhu

Hinsichtlich der verschiedenen Pflanzenarten (Rohrglanzgras – Rg, Knaulgras – Kg) kann man am Standort Röhu keine eindeutigen Unterschiede anhand der Scherparameter feststellen (Abb. 43). Bezuglich der Überfahrung sind die Kohäsionswerte (c) in 20cm Tiefe auf der Kg-Fläche ohne Überfahrt deutlich geringer als auf den überfahrenen Flächen (1x, 2x). Der Winkel der inneren Reibung (ϕ) ist im Juli in 5cm unter Kg und in 20cm Tiefe unter Rg höher auf der 1x-Fläche im Vergleich zur Kontrollfläche. Im Juli kann man den Tiefeneffekt auf 0x-Fläche an den ϕ - und c -Daten erkennen. So sind die ϕ -Werte in 20cm höher als in 5cm Tiefe unter Kg.

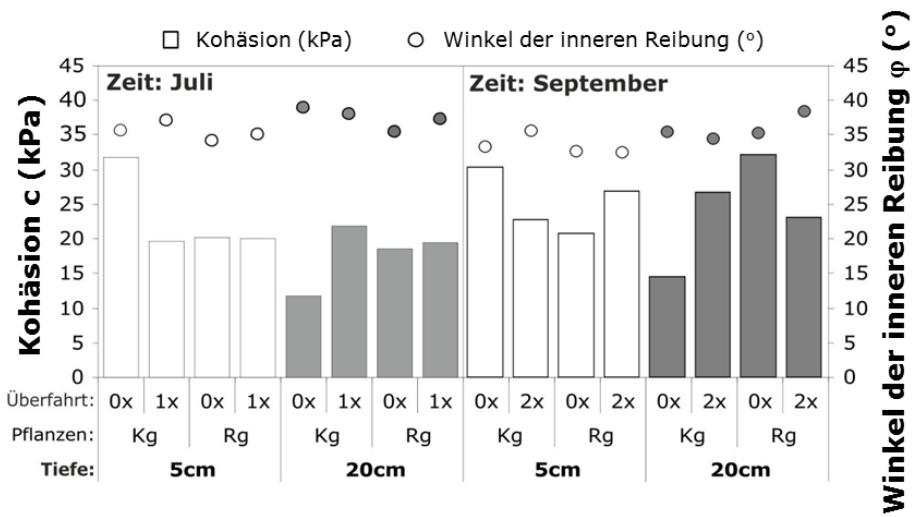


Abb. 43: Mittel-/Einzelwerte der Kohäsion c (kPa) und Winkel der inneren Reibung ϕ (°) (Standort: Röhu) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, September), der Tiefe (5, 20cm), der Pflanzenart (Kg - Knaulgras, Rg - Rohrglanzgras) und der Überfahrtshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) nach Vorentwässerung auf -6kPa in 2008, n: 2 (Juli), 1 (September).

Aus Abb. 8 und Abb. 9 konnte man ablesen, dass die Durchwurzelung bereits in den oberen 20cm Tiefe sehr stark abnimmt. Um die Interaktion zwischen Tiefen- und Durchwurzelungseffekt genauer zu betrachten, sind in Abb. 44 die maximalen Scherwiderstandswerte aus den Proben in 5cm und 20cm Tiefe für beide Kulturen dargestellt. Bei Kg sind die Werte in 5cm Tiefe deutlich höher als in 20cm Tiefe bei Auflasten von 40-100kPa. Bei 200 und 400kPa gibt es keine Unterschiede in den Proben aus 5 und 20cm Tiefe. Bei Rg unterscheiden sich die Werte zwischen 5 und 20cm Tiefe hingegen gar nicht.

Weiterhin kann man in den Proben aus der Kg-Fläche eine Korrelation zwischen Wurzeloberflächendichte im Boden und Kohäsion feststellen (Abb. 45). Bei Rg ist eine Korrelation mit Wurzeldaten nur ab 10 bis 25cm Tiefe vorhanden, wobei die Wurzeldaten aus 5cm Tiefe keine Korrelation mit der Kohäsion erkennen lassen.

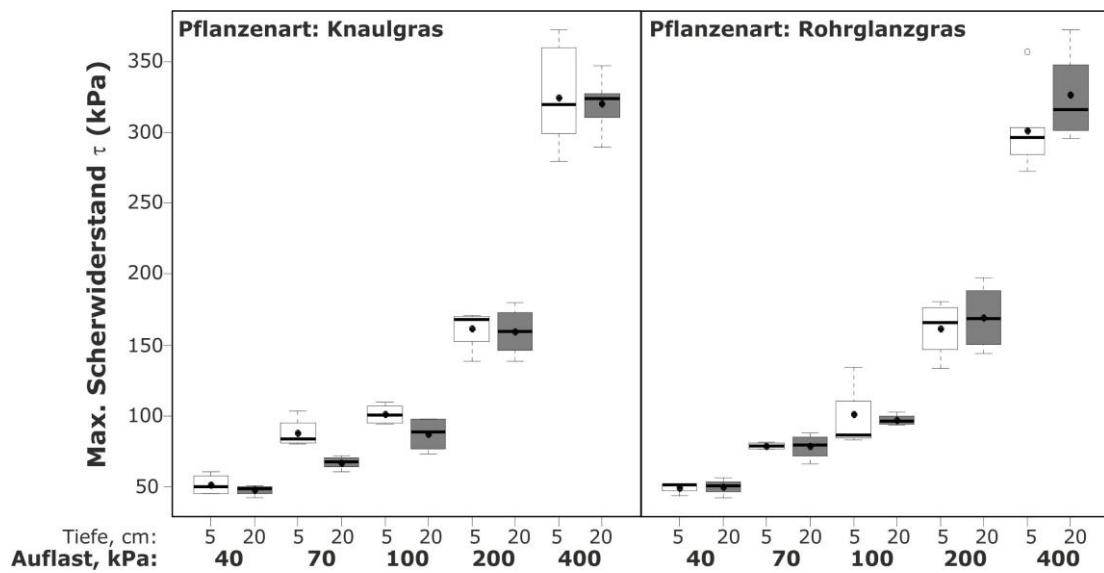


Abb. 44: Maximaler (Max.) Scherwiderstand τ (kPa) (Standort: Röhu) in Abhängigkeit von der Pflanzenart (Knaulgras, Rohrglanzgras), der Auflast (40, 70, 100, 200 und 400kPa) und der Tiefe (5, 20cm) als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Daten der Kontrollfläche nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli und September 2008, n: 3 (40-200kPa), 4 (400kPa).

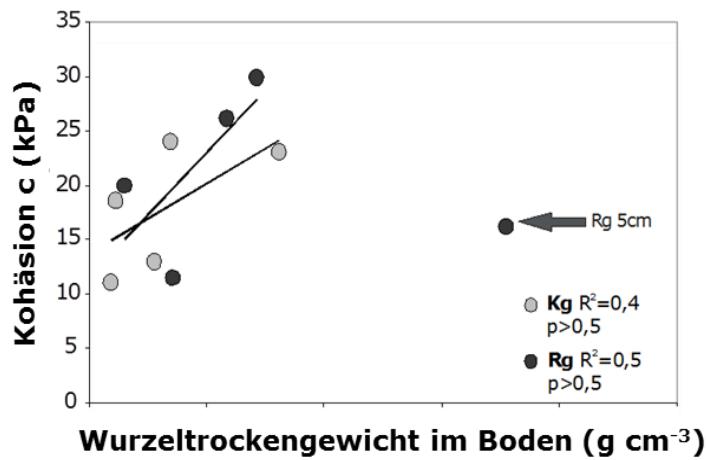


Abb. 45: Einzelwerte der Kohäsion c (kPa) (Standort: Röhu) in Abhängigkeit vom Wurzeltrockengewicht (g cm^{-3}) in 5-25cm Tiefe. Daten beider Kulturen (Knaulgras, Rohrglanzgras) der Kontrollfläche nach Vorentwässerung auf -6kPa im September 2008, n: 5.

3.5.3 Standort Vorbuse

Am Standort Vorbuse kann man bei den Kohäsionswerten (c) einen Tiefeneffekt erkennen: Die c -Werte auf der Kontrollfläche sind in 5-10cm höher als in 20cm Tiefe (Abb. 46). Dabei gibt es beim Winkel der inneren Reibung (ϕ) keine deutlichen Unterschiede zwischen den Tiefen. Durch die Überfahrt ist es zu Änderungen der Kohäsion und des Winkels der inneren Reibung gekommen. Die c -Werte sind auf der überfahrenen Fläche deutlich höher (über 10kPa) (in allen Tiefen) und ϕ im Vergleich zur Kontrollfläche leicht verringert.

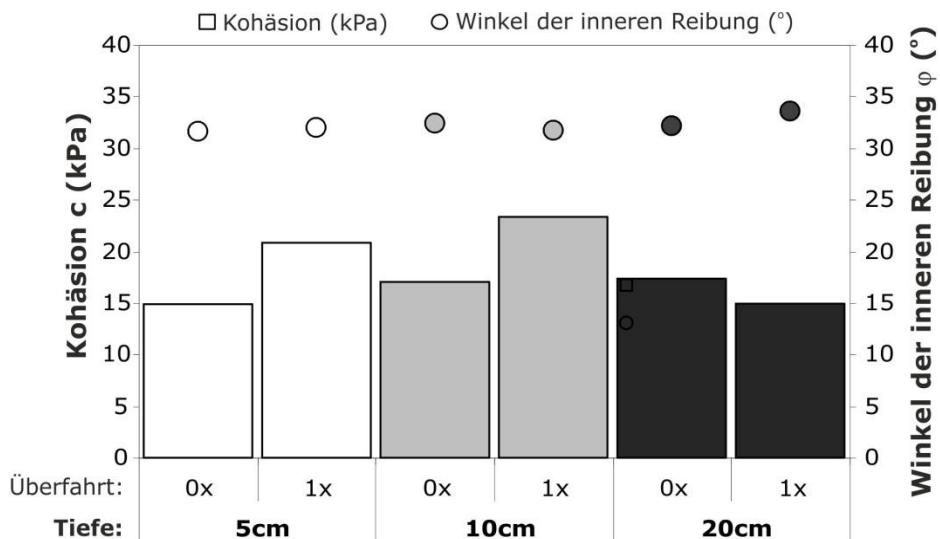


Abb. 46: Einzelwerte der Kohäsion c (kPa) und Winkel der inneren Reibung ϕ (°) (Standort: Vorbuse) in Abhängigkeit von der Tiefe (5, 10, 20cm) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle; 1x - mit einer Überfahrt 1x) nach Vorentwässerung auf -6kPa im September 2007, n: 1.

3.6 Vorbelastung

3.6.1 Standort Hohenschulen

Die meisten Vorbelastungswerte (P_v) liegen in den Klassen 2 und 3, was gleichbedeutend mit einer geringen bis mittleren Eigenfestigkeit ist (Abb. 47). Zwischen den P_v -Werten kann man keine eindeutigen Tendenzen bezüglich verschiedener Pflanzen oder Überfahrtshäufigkeiten feststellen. Lediglich bei den Proben im Juli erkennt man einen Tiefeneffekt, so ist die P_v auf der Fläche mit mehr Graspflanzen in 5cm Tiefe bis zu 15kPa und auf der mit mehr Leguminosenpflanzen bis zu 10kPa höher als in 20cm Tiefe. Ferner kann man keine Korrelation zwischen Vorbelastung und Lagerungsdichte feststellen (Abb. 48).

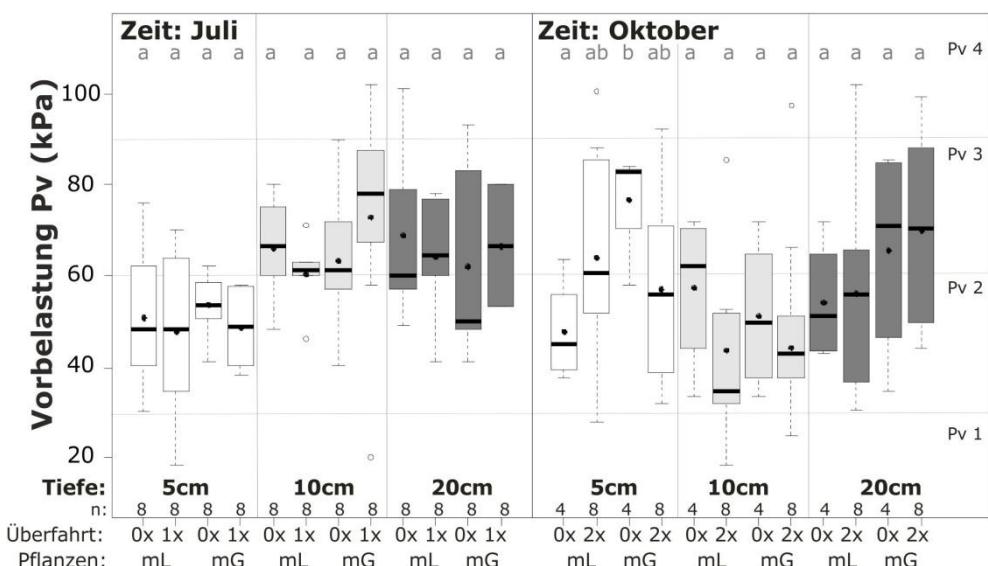


Abb. 47: Vorbelastung P_v (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probenahme (Juli, Oktober), der Tiefe (5, 10, 20cm), der Bestandeszusammensetzung (mL - mehr Leguminosen, mG - mehr Graspflanzen) und der Überfahrtshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) nach Vorentwässerung auf -6kPa in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede in einzelnen Tiefen bei einem Signifikanzniveau von α : 0,05; n: siehe Abbildung, P_v -Klassifizierung nach DVWK (1995).

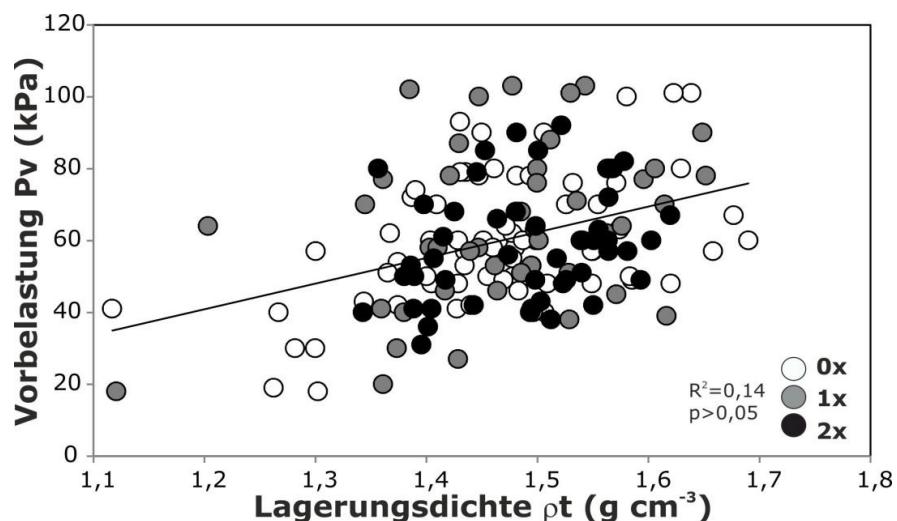


Abb. 48: Vorbelastung Pv (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte ρ_t (g cm⁻³). Daten aller Überfahrtshäufigkeiten (0x - Kontrollfläche, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten), beider Bestandeszusammensetzungen (mehr Leguminosen, mehr Graspflanzen) und aller Tiefen (5, 10, 20cm) nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli und Oktober 2008, n: 56.

3.6.1.1 Einfluss von C_{org} auf den Reboundeffekt

Während der Belastung setzt sich die Probe und hebt sich in der darauf folgenden Entlastungsphase wieder. Diese Differenz der Setzung während der Be- und Entlastung (bezogen auf die Gesamtsetzung) wird Rebound genannt und kennzeichnet den elastischen Anteil der Setzung. Mit steigendem C_{org} -Gehalt steigt der Rebound im Auflastbereich zwischen 40-100kPa, während für die höheren Auflaststufen (200-400 kPa) keine Korrelationen auftreten (Abb. 49).

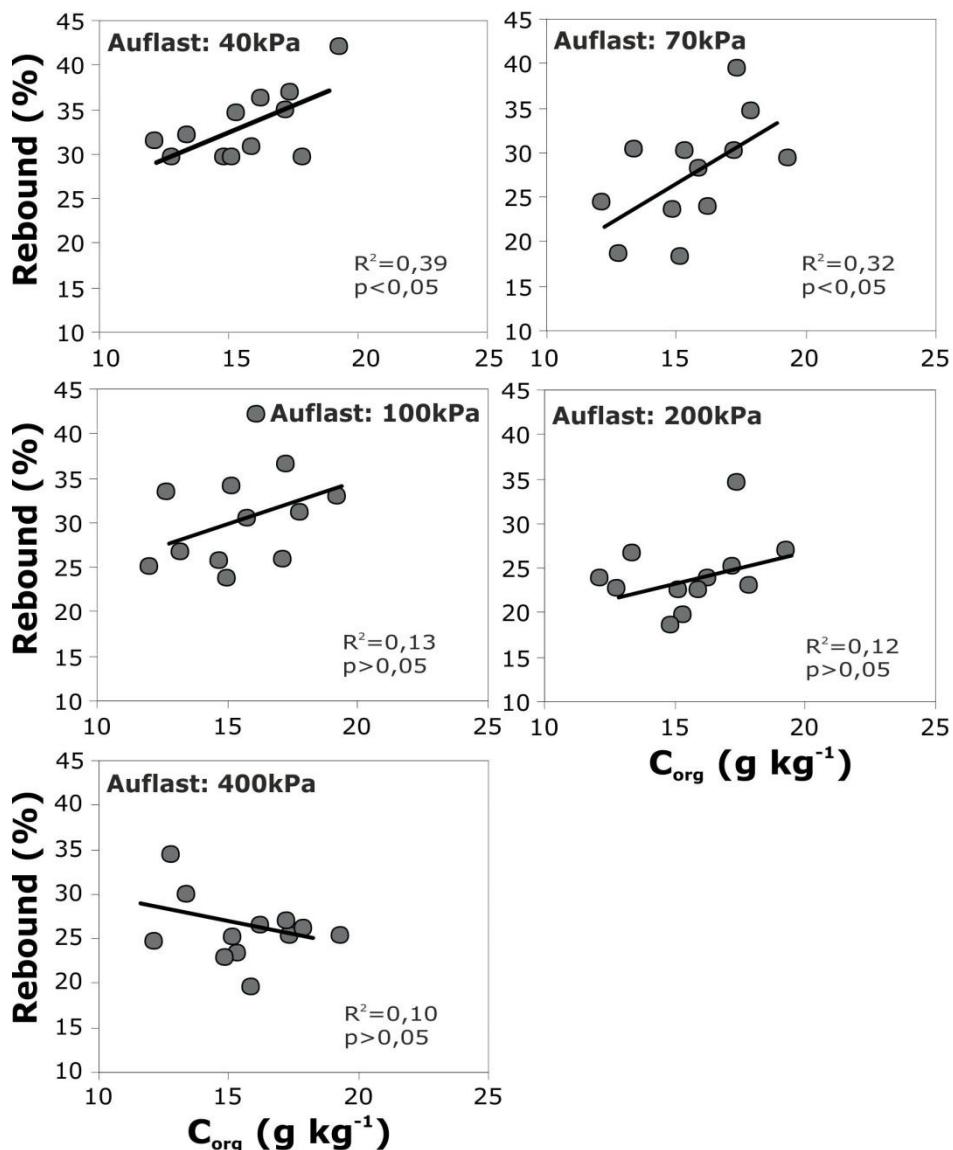


Abb. 49: Rebound (%) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit vom Gehalt an organischem Kohlenstoff C_{org} (g kg^{-1}) für die Auflaststufen 40-400kPa. Daten beider Bestandeszusammensetzungen (mehr Leguminosen, mehr Graspflanzen) und aller Tiefen (5, 10, 20cm) von der Kontrollfläche nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli 2008, n: 12.

3.6.2 Standort Rõhu

Die Vorbelastungswerte (Pv-Werte) des Standortes Rõhu liegen im geringen bis mittleren Bereich (Abb. 50). Die Pv-Werte sind unter Rohrglanzgras (Rg) deutlich höher als unter Knaulgras (Kg), dies ist ausgeprägter im Juli als im September in beiden untersuchten Tiefen. Die Vorbelastung ist unter Rg bis zu 40kPa höher als unter der Kg-Fläche. Des Weiteren kann man aus den Daten einen Tiefeneffekt ableiten: Die Pv-Werte sind im Juli in 5cm Tiefe geringer als in 20cm Tiefe, bei Kg ca. 10kPa und bei Rg über 20kPa. Weiterhin kann man aus den Daten keinen durch die Überfahrungshäufigkeit bedingten Effekt ableiten. Ferner gibt es eine tendenziell positive Korrelation zwischen der Vorbelastung und der Lagerungsdichte, diese ist nicht signifikant (Abb. 51).

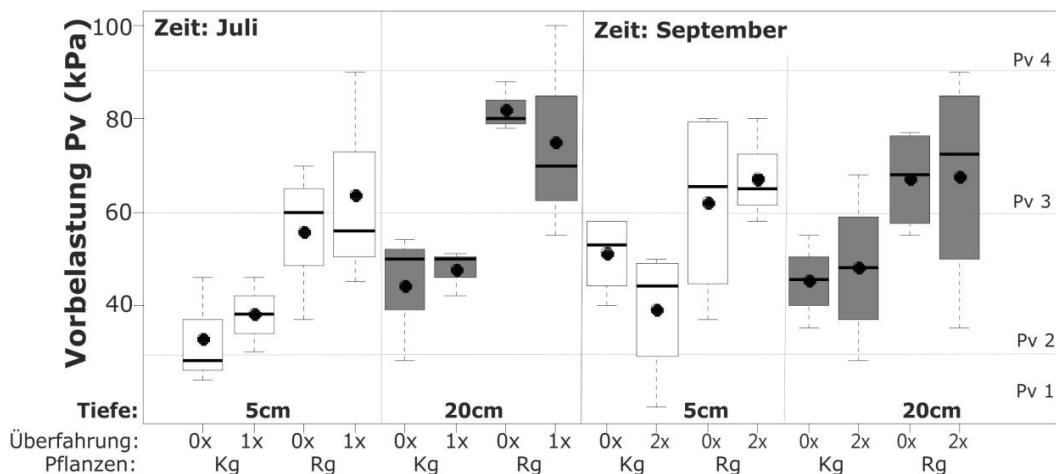


Abb. 50: Vorbelastung Pv (kPa) (Standort: Rõhu) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probennahme (Juli, September), der Tiefe (5, 20cm), der Pflanzenart (Kg - Knaulgras, Rg - Rohrglanzgras) und der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten) nach Vorentwässerung auf -6kPa in 2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●), n: 3, Pv-Klassifizierung nach DVWK (1995).

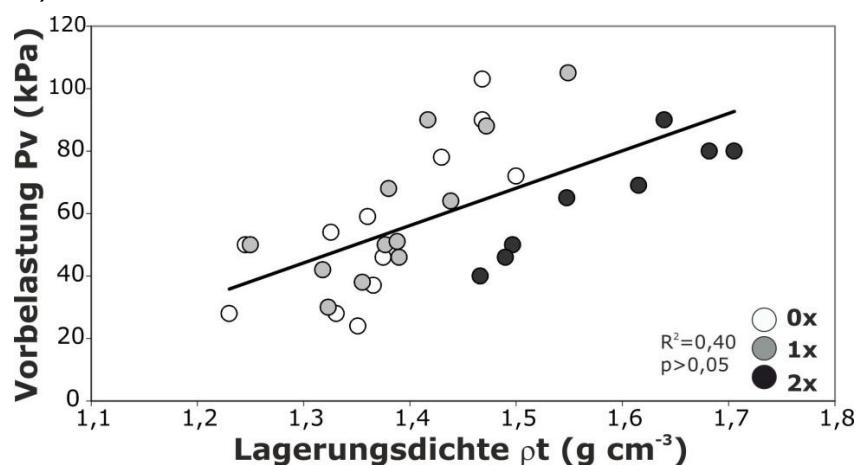


Abb. 51: Vorbelastung Pv (kPa) (Standort: Rõhu) in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte pt (g cm⁻³). Daten aller Überfahrungshäufigkeiten (0x - Kontrollfläche, 1x - mit einer Überfahrt, 2x - mit zwei Überfahrten), beider Kulturen (Knaulgras, Rohrglanzgras) und Tiefen (5, 20cm) nach Vorentwässerung auf -6kPa im Juli und September in 2008, n: 32.

3.6.3 Standort Vorbuse

Am Standort Vorbuse kann man bei der Vorbelastung (P_v) einen deutlichen Tiefeneffekt erkennen, so sind die P_v -Werte in 5-10cm Tiefe (im geringen Bereich) ca. 20kPa geringer als in 20cm Tiefe (im mittleren Bereich) (Abb. 52). In Hinblick auf die Bodenverdichtung, kann man deutliche Änderungen der Bodenstruktur vermuten, so sind die P_v -Werte auf der überfahrenen Fläche in allen Tiefen deutlich höher als auf der Kontrollfläche. Am größten ist die Erhöhung in 5cm Tiefe (66kPa). Des Weiteren gibt es eine signifikante Korrelation zwischen Vorbelastung und Lagerungsdichte (Abb. 53).

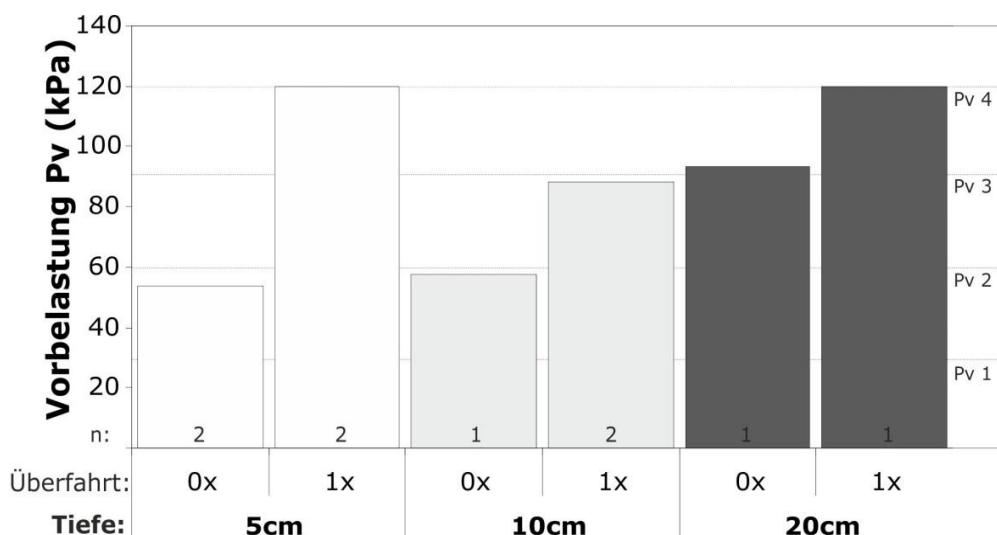


Abb. 52: Mittel-/Einzelwerte der Vorbelastung P_v (kPa) (Standort: Vorbuse) in Abhängigkeit von der Überfahrungshäufigkeit (0x - Kontrolle; 1x - mit einer Überfahrt) und der Tiefe (5, 10, 20cm) nach Vorentwässerung auf -6kPa im September 2007, n: siehe Abbildung, P_v -Klassifizierung nach DVWK (1995).

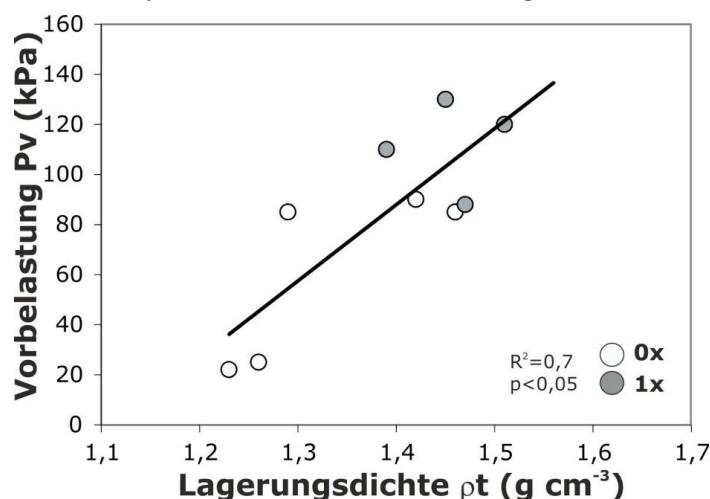


Abb. 53: Vorbelastung P_v (kPa) (Standort: Vorbuse) in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte ρ_t (g cm⁻³). Daten aller Tiefen (5, 10, 20cm) und Überfahrungshäufigkeiten (0x - Kontrollfläche und 1x - mit einer Überfahrt) nach Vorentwässerung auf -6kPa im September 2007.

3.7 Änderungen der Bodenstruktur durch vorherige Bodenbearbeitung als Ackerstandort am Standort Hohenschulen

Um den Einfluss der vorherigen Bewirtschaftung (konventionell - gepflügt bis in 25cm Tiefe, konservierend - gefräst bis in 8cm Tiefe) zu erfassen, werden die Daten der Lagerungsdichte (ρ_t), Vorbelastung (P_v) und gesättigten Wasser - (kf)- und Luftleitfähigkeit (kl) dargestellt. Die Betrachtung der Werte erfolgt nach 3 bzw. 4 Jahren unter Grünland in Hohenschulen.

3.7.1 Lagerungsdichte und Vorbelastung

Die Lagerungsdichte und Vorbelastung zeigen deutliche Unterschiede bezüglich der vorherigen Bewirtschaftung (Abb. 54, Abb. 55). Die ρ_t -Werte sind auf der konventionell bearbeiteten Fläche geringer (Medianwert: $1,5\text{g cm}^{-3}$) als auf der konservierend bearbeiteten (Medianwert: $1,58\text{g cm}^{-3}$). Ähnliche Tendenzen kann man auch bei den P_v -Daten feststellen, wobei die P_v -Werte auf der Fläche mit vorheriger konservierender Bodenbearbeitung im hohen und mit vorheriger konventioneller Bodenbearbeitung im mittleren Bereich sind, der Unterschied beträgt über 30kPa.

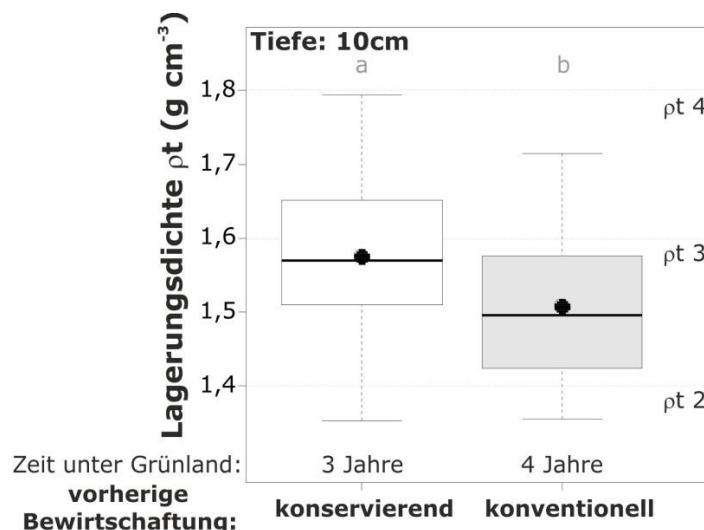


Abb. 54: Lagerungsdichte ρ_t (g cm^{-3}) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der vorherigen Bewirtschaftung (konventionell, konservierend) und der Dauer unter Grünland (konventionell 4 Jahre, konservierend 3 Jahre), in den Jahren 2007-2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Daten von Kontrollfläche in 10cm Tiefe. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: konservierend 72, konventionell 57, pt-Klassifizierung nach AG Boden (2005).

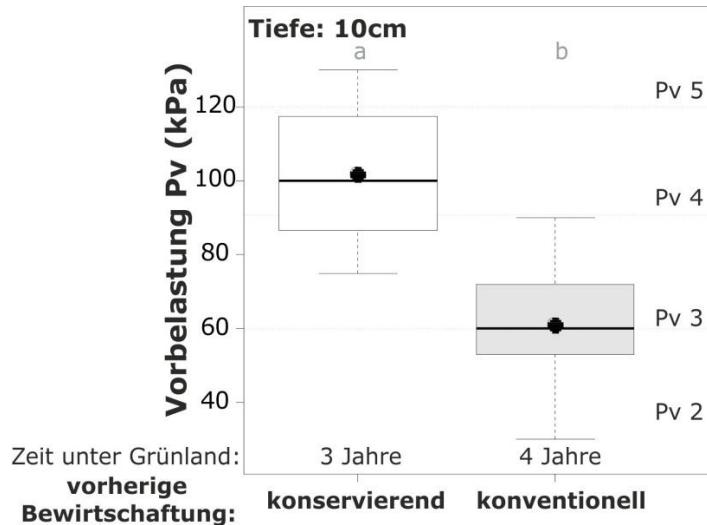


Abb. 55: Vorbelastung Pv (kPa) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der vorherigen Bewirtschaftung (konventionell, konservierend) und der Dauer unter Grünland (konventionell 4 Jahre, konservierend 3 Jahre) in den Jahren 2007-2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (•). Daten der Kontrollfläche in 10cm Tiefe nach Vorentwässerung auf -6kPa. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: konservierend 12, konventionell 14, Pv-Klassifizierung nach DVWK (1995).

3.7.2 Gesättigte Wasser- und Luftleitfähigkeit

Auch die gesättigte Wasser- (kf) und Luftleitfähigkeit (kl) zeigen deutliche bodenbearbeitungsspezifische Unterschiede (Abb. 56 Abb. 57). Die kf-und kl-Werte sind deutlich geringer in der vorher gepflügten Fläche (Medianwerte im sehr hohen und hohen Bereich) als unter derjenigen mit konservierender Bodenbearbeitung (Medianwerte im hohen und mittleren Bereich).

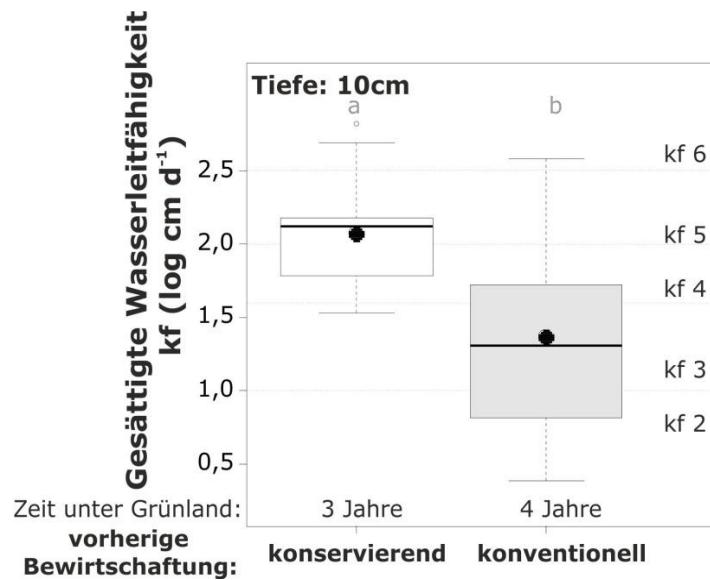


Abb. 56: Gesättigte Wasserleitfähigkeit kf ($\log \text{cm d}^{-1}$) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der vorherigen Bewirtschaftung (konventionell, konservierend) und der Dauer unter Grünland (konventionell 4 Jahre, konservierend 3 Jahre) in den Jahren 2007-2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Daten der Kontrollfläche in 10cm Tiefe. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: konservierend 10, konventionell 16, kf-Klassifizierung nach DVWK (1997).

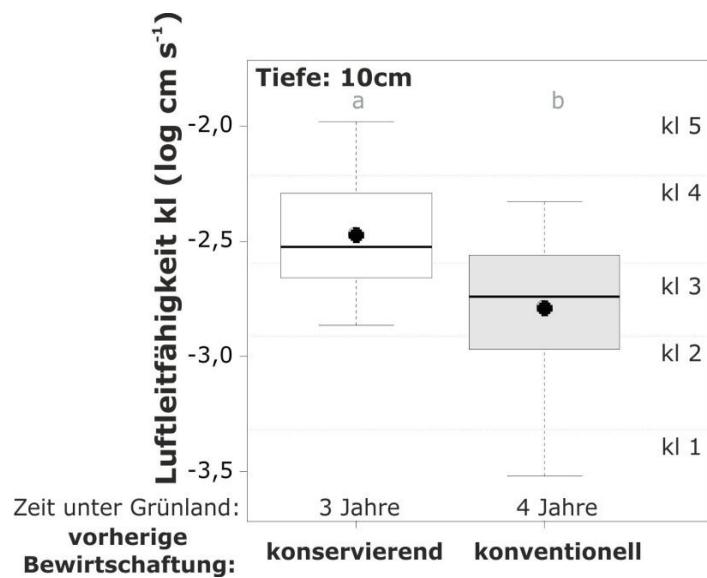


Abb. 57: Luftleitfähigkeit kl ($\log \text{cm s}^{-1}$) (Standort: Hohenschulen) in Abhängigkeit von der vorherigen Bewirtschaftung (konventionell, konservierend) und der Dauer unter Grünland (konventionell 4 Jahre, konservierend 3 Jahre) in den Jahren 2007-2008 als Boxplots mit Median (-) und Mittelwert (●). Daten der Kontrollfläche in 10cm Tiefe nach Vorentwässerung auf -6kPa. Die Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede bei einem Signifikanzniveau von a: 0,05; n: konservierend 12, konventionell 30, kl-Klassifizierung nach DVWK (1997).

4 Diskussion

4.1 Einfluss von Pflanzenwachstum auf die Bodenstruktur

Um die Veränderungen der Bodenstruktur sowie die Auswirkungen auf physikalische Bodenfunktionen und Bodenstabilität von Grünlandstandorten zu charakterisieren, wurden die Kenngrößen: Lagerungsdichte, Porengrößenverteilung, gesättigte Wasser- und Luftleitfähigkeit und Scherparameter (Kohäsion und Winkel der inneren Reibung) sowie die Elastizität im Anschluss an eine Belastung mit 400kPa (d.h. Rebound) betrachtet. Weiterhin wurde der indirekte Effekt von Pflanzenwurzeln in Form von organischer Substanz (C_{org}) sowie der langfristige Effekt von dauerhaftem Pflanzenbewuchs auf die Bodenstruktur untersucht.

4.1.1 Beeinflussung der Lagerungsdichte sowie der Porenkapazitäten und -funktionalität

In den Untersuchungen konnten Unterschiede in der Lagerungsdichte bezüglich der Bestandeszusammensetzung für den Standort Hohenschulen festgestellt werden. Bei gleicher Bodentextur zeigten die Flächen mit mehr Leguminosen eine höhere Lagerungsdichte von bis zu $0,11\text{g cm}^{-3}$ gegenüber den Flächen mit mehr Grasfarnen auf. Die unterschiedlichen Lagerungsdichtewerte können mehrere Gründe haben. Eine Erklärung könnte sein, dass die Pflanzenwurzeln beim Hineinwachsen in den Boden die Bodenpartikel durch laterale Expansion verschieben können und es damit zu Änderungen der Porosität bzw. Lagerungsdichte kommt. In dem Zusammenhang berichteten Bruand et al. (1996), dass die Lagerungsdichte im maiswurzelnahen Bereich um bis zu $0,26\text{g cm}^{-3}$ höher bzw. die Porosität um 22-24% geringer im Vergleich zum umliegenden Boden war. Um diese Theorie an den eigenen Daten zu überprüfen, wurde unter der Annahme, dass das Wurzelvolumen selber von der Lagerungsdichteberechnung ausgenommen ist, die Anzahl der Wurzeln ausgerechnet, die für eine Erhöhung der Lagerungsdichte um $0,1\text{g cm}^{-3}$ notwendig ist. Diese beträgt bei Leguminosenwurzeln mit einem Durchmesser von 0,7mm 15 und bei Graswurzeln mit einem Durchmesser von 0,2mm 200 Wurzeln. In der vorliegenden Lagerungsdichte-Untersuchung wurde die Anzahl der Wurzeln in den Bodenproben nicht bestimmt, aber man kann davon ausgehen, dass in der Probe deutlich mehr Wurzeln waren. Wenn man, unter der Annahme, dass alle Wurzeln die Zylinderhöhe erreichen und in vertikaler Ausrichtung vorliegen, die gesamte Wurzellänge in einem Stechzylinder auf die Zylinderhöhe verteilt, entsprechen die Mittelwerte für die Anzahl der

Wurzeln (im Juli) auf der Fläche mit mehr Graspflanzen fast 800 und auf der mit mehr Leguminosenpflanzen ca. 350 Stück.

Als nächster Erklärungsansatz ist die Verringerung der Lagerungsdichte unter Grasdominierten Beständen infolge von organischer Substanz im Boden zu nennen. Dies wird im C_{org}-Gehalt sowie im Wurzeltrockengewicht und in der -oberflächendichte reflektiert. In der Literatur wurde häufig festgestellt, dass mit der Zunahme an organischer Substanz die Lagerungsdichte sich dadurch ändert, dass die Dichte der organischen Substanz kleiner ist als die des mineralischen Bodens. Stock & Downes (2008) konnten an Hand der Mischungen aus organischer Substanz (1-4%) und Geschiebemergel eine signifikante Korrelation zeigen: Mit der Zunahme an organischer Substanz (Kompost) verringerte sich die Lagerungsdichte. Ekwue (1990) konnte in ungestörten Bodenproben einer Grasfläche zeigen, dass bei 1,2% Gehalt an organischer Substanz die Lagerungsdichte um bis zu 0,3g cm⁻³ höher war im Vergleich zu 5,6% organischer Substanz. Des Weiteren hat Steffens (2009) auf Grünlandflächen im Norden Chinas eine hoch signifikante negative Korrelation zwischen C_{org}-Gehalten und Lagerungsdichten festgestellt. Dies könnte die geringeren Dichten unter Grasbewuchs erklären, denn in den vorliegenden Untersuchungen sind die C_{org}-Gehalte auf der Fläche mit mehr Graspflanzen um bis zu 6g kg⁻¹ (ca. 30%) höher als auf den Flächen mit mehr Leguminosen am Standort Hohenschulen, was eine Folge des geringeren unterirdischen Inputs bei Leguminosen sein kann. Dies steht im Einklang mit den Beobachtungen von Whitehead (1995 zit. in Auerswald & Schnyder 2009), der bei Leguminosen ein kleineres Wurzelsystem sowie weniger und kürzere Wurzelhaare als bei Gräsern im Oberboden fand. So war auf dem Grünland in Hohenschulen die Wurzellängendichte in den oberen 10cm im Juli ca. 30% höher auf den Parzellen mit mehr Gras als auf denen mit mehr Leguminosenpflanzen. Auch Gill et al. (1999) bestätigen, dass mit einer höheren Wurzeldichte mehr organische Substanz im Boden akkumuliert werden kann. In der vorliegenden Untersuchung am Standort Hohenschulen gemessene Zahlenwerte betragen <0,2g cm⁻³ Wurzeltrockengewicht und <5cm² cm⁻³ Wurzeloberflächendichte im Boden. Wahrscheinlich sind die Werte im realen Boden deutlich höher, da beim Auswaschen der Wurzeln eine Fehlerquelle vorliegt. Dies ist begründet dadurch, dass zum einen die feineren Wurzeln sehr stark mit der Festsubstanz verbunden sind und zum anderen hinsichtlich ihrer Größe nicht von den mineralischen Partikeln zu unterscheiden sind und daher ausgesiebt werden. In dem Zusammenhang haben Grzebisz et al. (1989) und van Noordwijk & Floris (1979) gezeigt, dass man beim Auswaschen der Wurzeln 20-40% Wurzelmasse verlieren kann. Des Weiteren ist der Verlust an Wurzellängendichte beim Auswaschen deutlich größer als der von Wurzelmasse (Amato & Pardo 1994), da es meistens Feinwurzeln (5-20µm) sind, die beim Auswaschen verloren gehen

(Böhm 1979). Aufgrund des höheren Anteils an Feinwurzeln ist dies besonders ausgeprägt bei Graswurzeln.

Ein weiterer Erklärungsansatz ist der Armierungseffekt der Wurzeln, dessen Auswirkungen auf die Scherfestigkeit des Bodens im Kapitel 4.2 ausführlicher beschrieben sind. Hierbei wirken die Wurzeln im Boden ähnlich wie Stahlmatten im Beton, indem sie auftretende Spannungen aufnehmen und ableiten. Wenn angenommen wird, dass Graswurzeln aufgrund des Wurzelsystems stärker zu einer Armierung beitragen können als Leguminosen, hat dies Folgen für die Verdichtungsanfälligkeit. So finden im Laufe des Jahres verschiedene Bewirtschaftungsmaßnahmen statt (Düngergabe, Schnitt), welche nicht notwendigerweise die Tragfähigkeit des Bodens überschreiten müssen. Dennoch kann es zu geringer plastischer Verformung kommen, welche besser von Gras-reichen Beständen als von solchen mit mehr Leguminosen verhindert wird. Dies wird bestätigt durch die Ergebnisse des Rebounds unterschiedlicher Bestände, die ausführlicher im Kapitel 4.3.2 diskutiert werden: Die Bestände mit mehr Gras wiesen einen höheren Rebound auf, zeigten also eine höhere Elastizität an. Hingegen ist anzunehmen, dass auf den Leguminosen-reichen Beständen die Armierung weniger effizient war und daher eine stärkere Dichtlagerung möglich ist. Diese wiederum spiegelt sich in höheren Lagerungsdichten der Leguminosen-reicher Flächen wieder.

Anders als bei der Lagerungsdichte, die direkt von den Wurzeln beeinflusst wird, zeigt sich bei den Poren ein stärkerer Zusammenhang über den Gehalt an organischer Substanz zu indirekten Auswirkungen des Wurzelwachstums. In den vorliegenden Daten wurde eine positive Korrelation zwischen dem C_{org}-Gehalt und dem Anteil an engen Grob- und Mittelporen (50-0,2µm) aufgezeigt. Der Grund dafür ist, dass die partikuläre organische Substanz, die überwiegend aus teilweise abgebauten Pflanzenresten besteht, sich in den Hohlräumen zwischen den Primärteilchen anlagert und damit die Poren verkleinert. Außerdem fördern organische Makromoleküle (z.B. Polysaccharide), die positive und negative Ladungen besitzen (je nach pH-Wert), die Aggregierung und Strukturierung des Bodens. Sie können wie Kationen von Tonmineralen absorbiert werden und dabei gleichzeitig mehrere Tonminerale miteinander verbinden oder an mehreren Stellen des gleichen Tonmineralteilchens absorbiert werden, weil sie mehrere positive Ladungen besitzen (Murray & Quirk 1990 zit. in Becher 2004).

In dem Zusammenhang haben Zhang et al. (2005) in einer Torfbodenmischung nachweisen können, dass die partikuläre organische Substanz die Porosität des Bodens durch die Zunahme von Porenraum in der Größenklasse <6µm (entsprechend den Mittelporen) verändert zu Ungunsten der Makroporen. Schjønning et al. (1994 zit. in Haynes & Naidu

1998) haben auf natürlichen Böden unter verschiedenen Getreidekulturen nach 90 Jahren Düngung mit Stallmist in 0-20cm Tiefe eine Erhöhung des Porenanteils in der Porengröße-Klasse von 30-0,2 µm festgestellt. Akhter et al. (2004) fanden bei der Rekultivierung eines salinen und Natrium-reichen Bodens mit *Leptochloa fusca* nach 5 Jahren eine Erhöhung der nutzbaren Feldkapazität um 5,9Vol.% von 0,155kg kg⁻¹ auf 0,214kg kg⁻¹ in 0-20cm Tiefe. Auch Holthusen (2010) konnten den positiven Effekt von organischer Substanz nachweisen: Organische und mineralische Düngung über mehrere Jahrzehnte führte zu einem doppelt so hohen Anteil organischer Substanz wie in einer ungedüngten Variante bei einer gleichzeitigen Steigerung der nutzbaren Feldkapazität um 3 Prozentpunkte.

Hudson (1994) ermittelte Pedotransferfunktionen (Daten für drei Bodentexturklassen von je 20 Standorten) und Stock & Downes (2008) unternahmen Labormessungen an Geschiebemergel mit zusätzlicher organischer Substanz in Form von Kompost - beide stellten fest, dass mit der Erhöhung des Gehalts an organischer Substanz bei der Feldkapazität mehr Wasser im Boden gehalten wird. Dies war geringfügig auch beim permanenten Welkepunkt festzustellen (Hudson 1994). In pflanzenbaulicher Hinsicht führt das zu besseren Bedingungen für die Wasseraufnahme und für das Wurzelwachstum. Mit Erhöhung des Bodenwassergehaltes bei gleichem Matrixpotenzial ist die Bodenfestigkeit geringer, d.h. die kritischen Penetrometerwiderstände, bei denen es zur Behinderung des Pflanzenwachstums kommen könnte, werden nicht erreicht. In der Untersuchung von Stock & Downes (2008) reichten schon 2% organische Substanz aus, damit der kritische Penetrometerwiderstand <3,5MPa blieb, im Vergleich dazu waren die kritischen Werte in Proben ohne organische Substanz überschritten. Der Grund für die zusätzliche Speicherung von Wasser im Boden bei gleichem Matrixpotenzial liegt neben der Änderung der Porengrößenverteilung auch daran, dass organische Substanz selber viel Wasser speichert (Haynes & Naidu 1998). So kann sie (z.B. im Form von Torf) das 80-90-fache ihres Eigengewichtes an Wasser aufnehmen (Bohn et al. 2001).

Hinsichtlich des direkten Einflusses des Wurzelwachstums auf die Porenfunktionen konnte man auf den Standorten Rõhu und Hohenschulen feststellen, dass die Leitfähigkeiten in 5cm Tiefe geringfügig unterhalb derjenigen in 20cm Tiefe lagen, d.h. diese waren geringer mit höherer Durchwurzelungsintensität (Wurzeltrockengewicht und -oberflächendichte sind in 5cm Tiefe am Standort Rõhu ca. 80% und am Hohenschulen über 90% höher als in 20cm Tiefe). Ein Grund dafür ist, dass die Pflanzenwurzeln in die Bodenporen hineinwachsen, die verantwortlich für die gesättigte Wasser- und Luftleitfähigkeit sind (weite Grobporen mit Durchmesser >50µm). In der vorliegenden Untersuchung beträgt der mittlere Wurzeldurchmesser am Standort Hohenschulen 500µm und am Standort Rõhu 200-300µm. Nach Polomski & Kuhn (1998) ist die stärkste Bewurze-

lung in Poren mit einem Durchmesser zwischen 400 und 1500µm festzustellen. Damit wird ein Teil des Porenquerschnitts mit der Biomasse der Wurzeln selbst gefüllt und somit liegen „de facto“ engere Poren vor. In Bezug auf die Zusammenhänge in der Hagen-Poisseuille’schen Gleichung, wonach die pro Zeiteinheit transportierte Flüssigkeitsmenge von der vierten Potenz des effektiven Porenradius abhängt, kommt es mit der „de facto“ Verengung der Grobporen zur Abnahme des Massenflusses (Hartge & Horn 1999), und dies wiederum führt zur Verringerung der gesättigte Wasser- und Luftleitfähigkeit. Der große Einfluss der in den Bodenporen wachsenden Wurzeln auf die Leitfähigkeiten wird deutlich dadurch, dass die gemessenen Wurzelvolumina in den vorliegenden Bodenproben höchstens 1% betrugen, die Reduzierung der gesättigten Wasser- bzw. Luftleitfähigkeit jedoch bis zu 90 bzw. 70% am Standort Hohenschulen und bis zu 80 bzw. 12% am Standort Röhu erreichte. Dies passt auch zu den kleineren Wurzeldurchmessern der jeweiligen Standorte, so dass in Röhu die Reduktion der Leitfähigkeiten aufgrund geringerer mittlerer Wurzeldurchmesser weniger stark ausfiel.

In dem Zusammenhang konnten auch Richner & Smucker (1993 zit. in Pietola et al. 2005) dies bestätigen mit einer Verringerung der gesättigten Wasserleitfähigkeit durch in Makroporen hineinwachsenden Wurzeln. Auch Suwardji & Eberbach (1998) konnten nachweisen, dass Getreidewurzeln in die Makroporen hineinwachsen und diese dann nicht mehr für gesättigte Wasser und -luftleitfähigkeit zur Verfügung stehen. Weiterhin führen Änderungen des Wurzelwachstums während der Vegetationsperiode meist auch zu Veränderungen der Porenleitfähigkeiten. In dem Zusammenhang berichten Lampurlanes & Cantero-Martínez (2006) von abnehmenden Leitfähigkeiten im Herbst durch eine Zunahme des Wurzelwerkes gegenüber dem Sommer, was auch die im Oktober geringere gesättigte Wasserleitfähigkeit des Standortes Hohenschulen auf der Fläche mit mehr Leguminosenpflanzen in 5cm Tiefe im Vergleich zum Juli erklären könnte.

Ein weiterer Grund für die Abnahme der gesättigten Wasserleitfähigkeit in 5cm im Vergleich zu 20cm Tiefe könnte in der hydrophob wirkenden Komponente der organischen Substanz liegen. Hierzu zeigten Whalley et al. (2005) und Hallett & Young (1999), dass die Wurzelexsudate nach Trocknung wasserabweisend werden. Während der Vegetationsperiode kann es mehrere Male zum Austrocknen des Bodens in 5cm Tiefe gekommen sein. Hallett et al. (2003) konnten zeigen, dass die Wurzelexsudate die hydraulischen Leitfähigkeiten verändern, indem sie zu einer Hydrophobisierung und damit Verengung der Porenabschnitte führen können. Dies kann man an Hand der Young-Laplace-Gleichung für den kapillaren Aufstieg nachweisen, da der Kontaktwinkel α als Maß für die Hydrophobie berücksichtigt wird. Nach Scheffer & Schachtschabel (2010) kann der Kontaktwinkel im Grünland bis zu 80° betragen, d.h. der in die Young-Laplace eingehende Faktor, $\cos \alpha$ beträgt 0,1. Dies führt zu deutlichen Einschränkungen des für den Wasser-

transport verfügbaren Porenradius. Weiterhin kann die Benetzungsbehemmung im Herbst durch dann größere Mengen an hydrophobisierend wirkenden organischen Substanzen (Wurzelexsudate, mikrobielle Ausscheidungen, Pilzhyphen, Huminsäuren) infolge der größeren Durchwurzelungsintensität ausgeprägter sein.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Pflanzenwurzeln die Lagerungsdichte ändern können, direkt durch Erhöhung der Dichtlagerung beim Einwachsen in den Boden oder indirekt durch die Anreicherung von organischer Substanz und durch die Bodenarmierung. Diese Effekte führen zu Veränderungen der Porengrößenverteilung des Bodens, die eine Erhöhung der Mittelporen sowie engen Grobporen beinhalten. Des Weiteren werden die gesättigte Wasser- und Luftleitfähigkeit beeinflusst, direkt durch Hineinwachsen der Wurzeln in Poren (Absenken der Leitfähigkeit) oder indirekt durch den hydrophobisierenden Einfluss von organischer Substanz (Verengung der Porenquerschnitte).

4.2 Beeinflussung des Scherwiderstandes

4.2.1 Direkte Auswirkungen von Wurzeln auf die Scherfestigkeit des Bodens

Hinsichtlich des Scherwiderstandes konnte ein Armierungseffekt von Pflanzenwurzeln ausgemacht werden. So sind die maximal gemessenen Scherwiderstände in Hohenschulen und Röhu bei Knaulgras (Auflaststufen 40-100kPa) in den intensiv durchwurzelten obersten 5cm deutlich höher als in 20cm Tiefe, wo weniger Wurzeln gefunden wurden. Allerdings finden sich diese Stabilisierungseffekte durch Wurzeln nur bis zu einer Normalspannung von 100kPa, da bei Belastung darüber hinaus die Eigenstabilität des Bodens überschritten wird und die Wurzeln als vertikale „Stützelemente“ des Bodens keine Rolle mehr spielen. Auch die durch Wurzeln hervorgerufene Aggregierung, infolge des Wasserentzugs, und damit verbundener Schrumpfung sowie das Vernetzen und Zusammenhalten von Partikeln ist bei diesen hohen Auflasten zerstört und kann der Scherung nicht mehr entgegen wirken. Folglich sind die Unterschiede im Scherverhalten nur im Auflastbereich bis 100kPa auf das Vorhandensein der Wurzeln zurückzuführen.

Der maximale Scherwiderstand am Standort Hohenschulen in der gut durchwurzelten Tiefe von 5cm im Vergleich zu 20cm Tiefe, wo es deutlich weniger Wurzeln gibt, ist 7 bis 14kPa höher (im Auflastbereich von 40 bis 100kPa). Am Standort Röhu zeigten sich bei der Knaulgrasvariante um 3 bis 10kPa erhöhte Scherwiderstandswerte in 5cm Tiefe im Vergleich zu 20cm Tiefe (Auflasten 40-100kPa). In der Literatur wird die gemessene Erhöhung des Scherwiderstandes in Verbindung mit unterschiedlichen Wurzelarten in ähnlichen Größenordnungen angegeben. So haben Comino et al. (2010) eine Scherwiderstandserhöhung („*in situ*“ Messung) von 8,6kPa bei zwei Grasarten (*Festuca pratensis* und *Lolium perenne*) gemessen, wie auch Cazzuffi et al. (2006), die eine Erhöhung von 2-15kPa unter Süßgräsern vorgefunden haben.

Ferner ist die Erhöhung des Scherwiderstandes als eine Funktion der Durchwurzelungintensität zu sehen, was tendenziell aus den vorliegenden Daten des Standortes Hohenschulen in Form einer positiven linearen Beziehung zwischen den maximalen Scherwiderstand und Wurzeloberflächendichte bzw. -trockengewicht zu erkennen ist. Des Weiteren ist eine Erhöhung des maximalen Scherwiderstands (ca. 4kPa) auf dem Standort Hohenschulen gegenüber Röhu (Knaulgras) zu erkennen bei ansonsten ähnlicher Bodentextur. Der Grund dafür kann sein, dass die mittlere Wurzeloberflächendichte am deutschen Standort deutlich größer ist als in Röhu (1,2 bzw. $0,7\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$). In dem Zusammenhang stellen auch Normaniza & Barakbah (2006) zwischen der Wurzellängendichte und dem

maximalen Scherwiderstand eine positive Korrelation fest, die ebenfalls bei Normaniza et al. (2008) unter Auflasten von 10-30kPa nachgewiesen werden konnte. Auch Loades et al. (2010) konnten zeigen, dass die Scherfestigkeit des Bodens mit einer höheren Pflanzenzahl im Boden zunahm. Pollen & Simon (2005) stellten fest, dass mit höherer Anzahl an Graswurzeln (*Panicum virgatum*) im Boden der Scherwiderstand stieg.

In der vorliegenden Untersuchung ist die Erhöhung des Scherwiderstandes auf höhere Werte der Kohäsion zurückzuführen, wohingegen der Winkel der inneren Reibung trotz des Vorhandenseins von Wurzeln unbeeinflusst blieb. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit vielen anderen Untersuchungen (z.B. De Baets et al. 2008, Norris et al. 2008, Stokes et al. 2008). Im Gegensatz dazu hat Frei (2009) bei gestörten Bodenproben unter Einfluss von Pflanzen oder Mykorrhiza Unterschiede beim Winkel der inneren Reibung und keine bei der Kohäsion feststellen können. Der Grund dafür war, dass es durch das Wurzelwachstum und die Mykorrhiza zur Aggregierung im Boden kam, da die Pilzfäden und Wurzeln durch Ausscheidungen oder durch Umwachsen Partikel verbinden. Korrelationen zwischen Aggregatstabilität und Scherwinkel bestätigen den überlagernden Einfluss der Aggregierung über die Kohäsion. Auch Graf et al. (2009) haben bei der Untersuchung von frisch homogenisierten und vor 4 Wochen homogenisierten und seither bepflanzten Bodenproben keine Unterschiede in der Kohäsion gefunden, jedoch signifikante Unterschiede von 5° beim Winkel der inneren Reibung. Dies kann man dadurch erklären, dass es durch das Wurzelwachstum im homogenisierten Boden zu ersten Aggregierungserscheinungen durch das Zusammenkleben von Bodenpartikeln kommt, was wiederum den Winkel der inneren Reibung erhöht. In diesem Zusammenhang geben Horn & Rostek (2000) an, dass eine höhere Stabilität des Bodengefüges gegenüber mechanischen Belastungen zu erwarten sei, je mehr der Boden aggregiert ist, d.h. polyedrische Gefüge sind stabiler als prismatische. In der vorliegenden Untersuchung wurden keine deutlichen Unterschiede beim Winkel der inneren Reibung am Standort Hohenschulen in 0-20cm Tiefe gefunden, was auf ein gleichmäßiges Aggregatgefüge in dem untersuchten Grünlandoberboden hinweist. Somit überwiegt hier der direkte Einfluss der Wurzeln als Armierungseffekt.

Die Erhöhung des Scherwiderstands durch die Zunahme der Kohäsion kann zum einen durch die stabilisierend wirkenden feinen Wurzeln und zum anderem durch die erhöhte Adhäsion zwischen den Bodenpartikeln und Wurzeln erklärt werden (Styczen & Morgan 1995). Die Wurzelfasern können die Scherspannungen abfangen, indem sie einen Teil der eingebrachten Spannung aufnehmen und nur den Rest an den umgebenden Boden weiterleiten. Dabei sind die elastischen Eigenschaften sowie die gute Verankerung der Wurzeln im Boden von Bedeutung (Gray & Sotir 1996).

Durch die Veränderungen des Wurzelwerks während der Vegetationsperiode kommt es ebenfalls zu Veränderungen der bodenstabilisierenden Wirkung. Dies erklärt auch die Zunahme der Kohäsion bei den im Oktober genommenen Proben im Vergleich zu den im Juli genommenen (Standort Hohenschulen), da zum Ende der Vegetationsperiode das Wurzelwerk ausgeprägter ist. Des Weiteren ließe sich damit auch die Zunahme der Kohäsion auf der Fläche mit mehr Grasfarnen nach einer Überfahrt in 5cm Tiefe begründen. In dem Zusammenhang zeigten auch Normaniza et al. (2008) und Ali & Osman (2007) in Versuchen mit *Leucaena leucocephala*, dass eine sechsmonatige Wachstumsperiode zu einer Verdopplung der Kohäsion und eine zwölfmonatige zu einem achtfach höheren Wert führten. Als Ursache ist die Zunahme der Wurzellängendichte um bis zu 100% zwischen dem 6. und 12. Monat zu nennen.

Eigene Stabilitätsuntersuchungen unterschiedlicher Wurzeln haben gezeigt, dass die Reißkraft der Wurzel vom Wurzeldurchmesser abhängt. So haben die Graswurzeln maximale Werte der Reißkraft von bis zu 8N bei Wurzeldurchmessern von 0,8mm. Leguminosenwurzeln weisen bis zu 350N bei Wurzeldurchmessern von 7mm auf. Auch Operstein & Frydman (2000) und Nilaweera & Nutalaya (1999) konnten eine linear zunehmende Reißkraft mit ansteigendem Wurzeldurchmesser feststellen und bestimmten z.B. eine entsprechende Reißkraft von über 500N bei Wurzeln mit 15mm Durchmesser.

Betrachtet man die gemessenen bzw. berechneten Zugfestigkeiten, so wurde eine exponentielle Zunahme der Reißkraft pro Fläche mit abnehmendem Wurzeldurchmesser ermittelt und dies sowohl für die Gras- als auch für die Leguminosenwurzeln. Von diesem Zusammenhang wird auch in anderen Untersuchungen berichtet (z.B. Mickovski et al. 2009, De Baets et al. 2008, Bischetti et al. 2005, Gent et al. 2005). Dies bedeutet, dass viele dünne Wurzeln überproportional viel zur Bodenstabilität beitragen können im Vergleich zu wenigen dicken Wurzeln.

Die Maximalwerte der Zugfestigkeit in unseren Untersuchungen zeigten sich bei Graswurzeln mit 0,2mm Durchmesser, hier lagen die Werte bei 150MPa. Im Vergleich dazu stellten Comino et al. (2010) deutlich höhere Zugfestigkeitswerte für zwei Grasarten (*Festuca pratensis* und *Lolium perenne*) fest, die von 3,5MPa (0,65mm Wurzeldurchmesser) bis 365MPa (0,1mm) reichten. Simon & Collison (2002) haben bei *Tripsacum dactyloides* Zugfestigkeiten von bis zu 98MPa gemessen (0,5mm), während Cazzuffi et al. (2006) für vier Süßgräser Werte von bis zu 70MPa bestimmten, jedoch wurden in dieser Arbeit keine Angaben zum Wurzeldurchmesser gemacht. Die Leguminosenwurzeln in Hohenschulen wiesen dagegen Zugfestigkeiten von bis zu 40kPa bei einem Durchmesser von 8mm auf. Im Vergleich dazu berichten Comino et al. (2010) bei den Leguminosenarten *Lotus corniculatus* und *Trifolium pratense* Werte von bis zu 150kPa bei einem Durchmesser von 10mm.

culatus von deutlich höheren Werte von 1,5MPa (0,93mm) bis 19,8MPa (0,34mm) und bei *Medicago sativa* von 5MPa (0,14mm) und bis zu 335MPa (0,01mm).

Der Grund für die so unterschiedlichen Werte für Süßgräser und Leguminosen in der Literatur im Vergleich zu den eigenen Ergebnisse ist, dass die Zugfestigkeit neben dem Wurzeldurchmesser von einigen weiteren Faktoren abhängt und im Falle der anderen Untersuchungen nicht vergleichbar ist. In diesem Zusammenhang wurde während der durchgeführten Laborversuche festgestellt, dass die Zugfestigkeit vom Wurzelwassergehalt abhängt und sich mit steigendem Wassergehalt der Wurzeln verringert. Ähnliche Zusammenhänge wurden auch von Gray & Barker (2004 zit. in De Baets et al. 2008) und Schiechtl (1985) beschrieben. Dies könnte auch bedeuten, dass der Stabilisierungseffekt von Wurzeln in Sommer größer ist als im Herbst, da die Wurzeln im Sommer trockener sind als im Herbst Turmaniana (1965 zit. in Stokes et al. 2008) und dadurch eine höhere Zugfestigkeit haben sollten. Dies konnte jedoch mit den vorliegenden Untersuchungen der Wurzelzugfestigkeiten im Juli und Oktober nicht festgestellt werden.

Außerdem sollte man neben den Wurzeleigenschaften bei der Zugfestigkeitsbestimmung auch die Eigenschaften des bewurzelten Bodenabschnittes betrachten. In dem Zusammenhang haben Goodman & Ennos (1999) beobachtet, dass Wurzeln von *Zea mays L.*, die auf einem Boden mit geringerer Lagerungsdichte wachsen, fester sind als die, die auf einem Boden mit einer höheren Lagerungsdichte wachsen. Hinsichtlich des Stabilisierungseffekts gegenüber mechanischen Belastungen bedeutet dies, dass auf überfahrenen Flächen ein geringerer Armierungseffekt zu erwarten ist, da die Wurzeln in dem dichten Boden eine nicht so hohe Reißfestigkeit aufweisen wie in dem lockeren Boden.

In den eigenen Untersuchungen konnten keine Unterschiede in den Wurzelzugfestigkeiten im Vergleich zwischen unbelasteter Kontrolle und überfahrenen Flächen festgestellt werden. Am Standort Hohenschulen wurden die Wurzelproben ca. vier Monate nach der Überfahrt entnommen, die mittlere Lebensdauer einer Graswurzel reicht jedoch nur von ein paar Wochen bis zu mehreren Monaten (Pritchard & Rogers 2000). Watson et al. (2000) haben festgestellt, dass nach 21 Tagen 73% der *Trifolium-repens*-Wurzeln bzw. 84% der *Lolium-perenne*-Wurzeln abgestorben waren, und Goins & Russelle (1996) geben als mittlere Lebensdauer für *Medicago sativa* 58-131 Tage an. Daher ist anzunehmen, dass zur Zeitnahme der Probenentnahme eine neue Wurzelgeneration im Boden vorliegt, deren Morphologie unbeeinflusst ist von der Überfahrung.

Über den Stabilisierungseffekt entscheiden jedoch nicht nur die Zugfestigkeit und die Menge der Wurzeln, sondern ebenso deren Verteilung innerhalb des Bodens (Reubens et al. 2007). In der Literatur gibt es hinsichtlich dieses Themas bis jetzt nur Untersuchungen mit Baum- bzw. Strauchwurzeln (Fan & Chen 2010) bzw. mit künstlichem Wurzel-

werk (Zhang et al. 2010). Die eigenen Untersuchungsergebnisse am Standort Röhu bestätigen erstmals, dass es auch bei Grünlandgrasarten vom Wurzelsystem abhängige Unterschiede gibt. So ist beim Knaulgras mit vertikalem Wurzelwerk die Erhöhung des maximalen Scherwiderstands deutlich größer als bei Rohrglanzgras mit horizontal ausgerichteten Rhizomen in 5cm Tiefe. In größeren Tiefen jedoch weisen beide Pflanzenarten vorwiegend vertikale Wurzeln auf, so dass sich die Werte angleichen. Dennoch sind die Ergebnisse nicht auf realen Boden übertragbar, da in realem Boden die Scherbewegung nicht nur auf eine Richtung beschränkt ist, sondern sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung abläuft, dies konnten Zink (2009) und Fazekas (2005) mit „in situ“ Messungen feststellen.

4.2.2 Vergleich der berechneten mit gemessener Erhöhung der Kohäsion c_w

Die berechnete Erhöhung der Kohäsion (c_w) nach dem Armierungsmodell ergab Werte von bis zu 265kPa für den Standort Hohenschulen in 5cm Tiefe (unter Berücksichtigung, dass sich 10% der Wurzeln aus dem Stechzylinder mit einem Volumen von 235,6cm³ in der Scherzone befinden). Auch De Baets et al. (2008) haben bei verschiedenen Grasarten c_w -Werte von bis zu 250kPa festgestellt. Im Vergleich dazu haben Mattia et al. (2005) bei einer Grassart mit dichten faserartigen Wurzeln (*Lygeum spartum*) c_w -Werte von bis zu 60kPa und bei Pfahlwurzeln (*P. lentiscus*) von bis zu 20kPa vorgefunden. Die höheren c_w -Werte bei Gras mit feinerem Wurzelsystem kommen durch die größere Anzahl an Wurzelquerschnitten in der Scherfläche zustande. Dies bestätigen auch die eigenen Ergebnisse: in 5cm Tiefe sind die berechneten c_w -Mittelwerte auf der Fläche mit mehr Graspflanzen mit 146kPa deutlich höher als auf der mit mehr Leguminosen (83kPa).

Die Unterschiede in den berechneten c_w -Werte zwischen 5cm und 20cm Tiefe betragen ca. 80-140kPa, die gemessenen liegen dagegen mit ca. 10kPa deutlich niedriger, also werden bei der Berechnung die Werte unverkennbar überschätzt. Dieser Missstand wurde auch mehrmals in der Literatur bestätigt (Bischetti et al. 2009, De Baets et al. 2008). Als Erklärung wird angegeben, dass im Laborversuch nicht alle Wurzeln gleichzeitig zerreißen, deren Zugfestigkeit mobilisiert werden könnte. Die Wurzeln in der Bodenprobe werden eher ausgedehnt oder beim scherenden Vorgang herausgezogen. Wenn man den Klammerausdruck ($\cos\theta \cdot \tan\phi + \sin\theta$) für die gegebenen Verhältnisse berechnet ($\theta=18,4^\circ$, $\phi=38^\circ$ als Mittelwert des Winkels der inneren Reibung aller Bodenproben), erhält man statt 1,2 den Wert 1,06. Dies führt zu im Mittel 14kPa geringeren Werten (also 66-126kPa), die aber immer noch deutlich höher sind als die gemessenen. Für eine korrekte Vorhersage müsste der Faktor bei ca. 0,01 liegen.

In der vorliegenden Untersuchung kommt als weiterer Faktor hinzu, dass nicht genau bestimmt wurde, wie viele Wurzeln sich in der Scherzone befinden. Dabei ist auch die Ausrichtung heterogen und einige Wurzeln liegen parallel zur Scherzone, sie tragen also physikalisch nicht zur Stabilisierung bei. Aber das Armierungsmodell zeigt die richtige Tendenz einer Stabilisierung auf, die auch anhand der eigenen Ergebnisse in Form einer positiven Korrelation zwischen den berechneten c_w -Werten und den gemessenen maximalen Scherwiderständen festgestellt wurde. Jedoch ist die Korrelation nur unter Auflasten von 40-100kPa festzustellen. Der Grund für die nicht vorhandene Beziehung bei 200-400kPa liegt daran, dass bei der Berechnung bei allen Auflasten von einer Bodenarmierung ausgegangen wird, es aber bei den realen Messungen nach dem deutlichen Überschreiten der Bodeneigenstabilität zu Bodenstrukturzerstörung kommt. In Hinblick auf die Pflanzenwurzeln bedeutet dies, dass diese nicht mehr fest im Boden verankert sind, d.h. sie werden herausgezogen und können ihre Zugfestigkeit nicht mehr mobilisieren.

4.2.3 Düngungsintensität und Wirksamkeit des Wurzelwerkes bei der Bodenstabilisierung

Im Grünland hängt der Stabilisierungseffekt noch zusätzlich von der Düngungs- und Nutzungsintensität und deren Einfluss auf das Wurzelwachstum ab. So wird durch häufigen Schnitt die Durchwurzelung geringer, da sich das Wachstum hauptsächlich auf den oberirdischen Pflanzenanteil konzentriert (Rawnsley et al. 2002, Arredondo & Johnson 1998), dies führt zur einer geringeren Erhöhung des Scherwiderstandes durch Wurzeln. Huat et al. (2005) untersuchten Düngungseffekte hinsichtlich des Scherwiderstandes. Ihre Untersuchungen zeigten, dass es durch die Nutzung von NPK-Dünger zu einer Erhöhung der Durchwurzelungsintensität und damit zu einer Erhöhung des Scherwiderstandes kam.

Aber Düngung kann auch direkten Einfluss auf die Wurzeleigenschaften nehmen. In der vorliegenden Arbeit konnte bei Graswurzeln ein leicht positiver Effekt von Kaliumdüngung auf die Zugfestigkeit von Graswurzeln festgestellt werden. Dies könnte daran liegen, dass die Zelfestigkeit der Pflanzen durch die vermehrte Nährstoffaufnahme erhöht wird (Raven et al. 1985) und damit die Wurzeln elastischer reagieren.

Ferner kommt es durch Düngungsgaben und Schnittnutzung zu Veränderungen in der Zusammensetzung des Pflanzenbestandes. Auf den Flächen ohne N-Dünger gibt es mehr Leguminosen- als Graspflanzen, dies hat eine Auswirkung auf die Erhöhung des maximalen Scherwiderstandes. In der Literatur gibt es Angaben, dass Wurzeln mit bis zu 3mm Durchmesser die höchsten Zugfestigkeiten und damit größere Stabilisierungswirkungen aufweisen (Reubens et al. 2007, Bischetti et al. 2005, Gent et al. 2005). Dies bestätigen

auch die vorliegenden Ergebnisse, die um 3 bzw. 10kPa höhere maximale Scherwiderstände der Proben mit Graswurzeln (Büschenwurzler mit vielen dünnen Wurzeln) zeigten als mit Leguminosenwurzeln (Pfahlwurzler mit einer dicken Zentralwurzel und wenigen weiteren Wurzeln).

Des Weiteren kam es zu direkten düngungsbedingten Änderungen der Bodenstabilität. So ist auf der Fläche mit mehr Leguminosen und mit der höchsten Kalium-Düngerstufe (600kg ha^{-1}) die Kohäsion deutlich höher als auf derjenigen mit weniger Kalium (300kg ha^{-1}). Weiterhin weichen die Werte dieser Variante (mL K600) bei Korrelationen zwischen C_{org} und dem maximalen Scherwiderstand bzw. dem Matrixpotenzial im Moment des maximalen Scherwiderstandes deutlich von den Werten der anderen Varianten ab. Der Grund dafür kann sein, dass durch die hohe Düngermenge bei gleichzeitig nur wenigen Kationenaustauscherplätzen für K⁺-Ionen (auf der Fläche K600 lag als Bodenart SI3 vor, sonst - ton- und damit austauscherreicher - SI4) das Kalium in der Bodenlösung verbleibt. Dies führt zu Änderungen der Salzkonzentration der Bodenlösung. Entsprechend der Theorie der diffusen elektrischen Doppelschicht verringert die erhöhte Salzkonzentration die Dicke dieser Schicht, daher liegt bei einer hohen Elektrolytkonzentration eine dünnerne diffuse Doppelschicht vor mit der Folge, dass die geladenen Teilchen sich anziehen (van Olphen 1963). In dem Zusammenhang konnten Markgraf & Horn (2006) mit einem rheologischen Amplitudentest einen positiven Einfluss von K⁺ auf die mikrostrukturelle Stabilität feststellen. Dabei handelte es sich um homogenisiertes Bodenmaterial aus vorher gedüngten Parzellen. Holthusen et al. (2010) haben auch homogenisiertes Bodenmaterial verwendet, aber um den K⁺-Gehalt im Boden genauer zu steuern, wurden die Proben mit KCl-Lösung aufgesättigt. Holthusen et al. (2010) konnten eine Erhöhung der mikrostrukturellen Stabilität in Form eines größeren rheologischen Scherwiderstandes mit höherer K-Konzentration in der Bodenlösung zeigen. Die Zunahme des Scherwiderstandes betrug im Vergleich zur Kontrolle bei der maximalen KCl-Konzentration (1mol L^{-1}) über 100% (von 0,01 auf 1,02kPa). Weiterhin hat Holthusen (2010) bei der Untersuchung eines Dauerdüngungsversuches einen positiven Effekt der Kaliumdüngung auf die Scherfestigkeit festgestellt einhergehend mit einem zunehmenden Anteil an austauschbarem Kalium. Diese Zunahme liegt auch in den eigenen Ergebnissen vor und unterstützt damit die oben gemachte Annahme, dass eine erhöhte Salzkonzentration bei höherer Kaliumdüngung vorliegt. Des Weiteren wird der Konzentrationseffekt des Kaliums bestätigt durch den abnehmenden Anteil an austauschbarem Calcium von K300 zu K600 (Konzentrationseffekt überwiegt Wertigkeitseffekt (Vgl. Bolt et al. 1978)). In den eigenen Ergebnissen kann man den Stabilisierungseffekt von erhöhten Salzkonzentrationen allerdings nur unter der Auflast von 40kPa feststellen. Dies liegt daran, dass bei dieser Auflast die Bodenstruktur noch intakt ist. Unter höheren Auflasten kommt es zu Boden-

strukturzerstörungen, und die dabei wirksamen Kräfte sind größer als die von erhöhter K⁺-Konzentration verursachten anziehenden Kräfte zwischen Bodenpartikeln.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Armierungseffekt von Grünlandpflanzen nicht nur von der Durchwurzelungsintensität, sondern auch von der Bestandeszusammensetzung und Wurzelverteilung (vertikale bzw. horizontale Ausrichtung des Wurzelwerkes) abhängt. So sind die gemessenen maximalen Scherwiderstandswerte und die berechneten c_w-Werte auf der Fläche mit mehr Gras- pflanzen bzw. größerer Wurzeloberflächendichte höher als auf denjenigen mit mehr Leguminosenpflanzen, und das Knaulgras mit feinen vertikalen Wurzeln zeigt einen höheren Stabilisierungseffekt als das Rohrglanzgras mit vorwiegend horizontal ausgerichteten Rhizomen. In diesem Zusammenhang muss die Wurzelzugfestigkeit als wichtiger Stabilitätsbeeinflussender Faktor berücksichtigt werden, die neben dem Wurzeldurchmesser auch vom Wurzelwassergehalt abhängt. Darüber hinaus zeigten die berechneten c_w-Werte die richtige Tendenz einer Stabilisierung auf, überschätzten aber im Vergleich zu den gemessenen Ergebnissen dabei allerdings deutlich den Stabilisierungseffekt der Wurzeln. Ebenfalls wurde ein Kaliumdüngungsbedingter Einfluss auf die Bodenstabilität festgestellt, zum einen durch die höhere Festigkeit der Wurzeln und zum anderen durch die Salzkonzentrationsänderungen in der Bodenlösung und eine dadurch erhöhte Anziehung zwischen Partikeln.

4.3 Auswirkung der organischen Substanz auf die Bodenstabilität

4.3.1 Scherparameter

Mit den vorliegenden Untersuchungen konnten stabilisierende Auswirkungen der organischen Substanz anhand des maximalen Scherwiderstandes bzw. dem Matrixpotenzial beim maximalen Scherwiderstand sowie der Kohäsion aufgezeigt werden. Bei den Laboranalysen wurden mit höheren C_{org} -Gehalten steigende maximale Scherwiderstände ermittelt. Auch Ekwue (1990) hat in ungestörtem Boden unter Grünpflanzen festgestellt, dass in den Proben mit höherem Gehalt an organischer Substanz infolge längerer Zeit unter Pflanzenbewuchs auch der Scherwiderstand höher war. Der Grund dafür lag in der Zunahme der Aggregatstabilität: durch das Pflanzenwachstum kommt es zu mechanischer und biologischer Vernetzung und Verklebung von Bodenpartikeln sowie zu intensiveren Schrumpfungzyklen im Boden.

Des Weiteren kann man an Hand der Korrelationen zwischen C_{org} -Gehalt und dem maximalen Scherwiderstand eine Auflast-abhängige Tendenz feststellen. So gibt es unter der Auflast 40kPa eine enge Beziehung, diese nimmt mit den Auflasten 70-100kPa ab und fängt dann ab Auflaststufe 200kPa wieder an zu steigen. Die Erklärung dafür ist, dass bei 40kPa der maximale Scherwiderstand eine Funktion der Aggregatstabilität und des Wurzelarmierungseffektes ist. Da es auf den Flächen mit höherem C_{org} -Gehalt auch mehr Wurzeln gab, sind dort die Aggregatstabilität und der Wurzelarmierungseffekt ausgeprägter. Mit dem Überschreiten der Bodeneigenstabilität (= Vorbelastung) ist die Korrelation zwischen maximalem Scherwiderstand und C_{org} -Gehalt nicht mehr so eng. Unter Auflaststufen von 200-400kPa ist der maximale Scherwiderstand nicht mehr von Bodenaggregaten, sondern von einzelnen Bodenpartikeln abhängig und der Beitrag der Wurzeln nicht mehr so groß. Die Wurzeln sind zerrissen und/oder haben sich aus der Scherzone heraus gezogen, dies kann man auch an Hand der Korrelationen zwischen c_w und den gemessenen maximalen Scherwiderständen feststellen – ab 200kPa gibt es keine Korrelation mehr.

In diesem Zusammenhang haben Heil & Sposito (1995) festgestellt, dass die organische Substanz auf den Bodenpartikeln die Oberflächenrauigkeit erhöht. So hatten die Illit-Tonminerale aus einem natürlichen Boden mit entsprechendem C_{org} -Gehalt eine rauere, unregelmäßige Oberfläche im Gegensatz zu einem geologischen Illitmineral ohne Einfluss organischer Substanz mit einer glatten und flachen Oberfläche. Auch Zhang & Hartge (1989) haben bei Untersuchungen von sandigen Böden festgestellt, dass die Zugabe von stark zersetzt Schwarztorf im ungesättigten Zustand den Reibungswinkel erhöhen

kann. Dies erfolgt durch Aggregierung von Mineralkörnern und Vergrößerung der Aggregatoberfläche. Nach Mitchell (1993) kann es aufgrund der Oberflächenrauigkeit (Bodenpartikelgeometrie) zur Verhakung von Bodenpartikeln kommen, und dies führt zu einer höheren scheinbaren Kohäsion und damit zu den höheren Werten beim maximalen Scherwiderstand in den Proben mit mehr organischer Substanz.

Ferner zeigen die eigenen Ergebnisse, dass das Matrixpotenzial im Moment des maximalen Scherwiderstandes mit steigendem C_{org} -Gehalt im Boden bei der entsprechenden Auflaststufe abnimmt und so einen höheren Scherwiderstand verursacht (außer unter der Auflast 40kPa). So kann man die höhere Stabilität des untersuchten Bodens nach Überschreiten der Bodeneigenstabilität als indirekten Einfluss der Organik auf das Matrixpotenzial verstehen. Zhang & Hartge (1990) haben ähnliche Beobachtungen in einem Sandboden mit partikulärer organischer Substanz damit erklärt, dass mit Unterstützung von organischer Substanz bei gleichem Matrixpotenzial mehr Wassermenisen gebildet werden können, die dann eine größere Fläche einnehmen und nach der Theorie der effektiven Spannung den Bodenparameter χ sowie den Scherwiderstand erhöhen. Auch in den eigenen Untersuchungen wurde festgestellt, dass im Boden mit mehr C_{org} der Anteil an engen Grob- und Mittelporen steigt, und dass bei einem Matrixpotenzial von -6kPa mehr Wasser im Boden gehalten wird (bis zu 6Vol.% mehr). Dies führt zur Ausbildung von mehr Menisken, und im ungesättigten Boden wirken die Meniskenkräfte stabilisierend und erhöhen den Scherwiderstand.

Durch die Setzung beim Belasten kommt es zur Abnahme der weiten Grobporen und damit zu einer Behinderung des Wassertransports. Aber nach Larson & Gupta (1980) kann es trotz des verkleinerten Porenvolumens immer noch luftgefüllten Porenraum geben. Durch die Dränmöglichkeit ist der Abbau des Porenwasserüberdruckes eine Funktion des hydraulischen Gradienten und der gesättigten Wasserleitfähigkeit. So ist die Wasserrumverteilung in den Bodenproben mit höherem C_{org} -Gehalt bzw. mehr feineren Poren, die intakt bleiben, besser. Folglich kann ein bei Belastung aufgebauter Porenwasserüberdruck schneller abgebaut werden und die zuvor konvexen Menisken werden wieder konkav und damit zusammenziehend. Im Gegensatz dazu wird der Abbau des Porenwasserüberdruckes schlechter je stärker die Bodenstruktur und Porenkontinuität zerstört wurde. Dies ist auch der Grund für die steigenden Porenwasserdrücke mit der Zunahme der wirkenden Auflast; so wurden unter Auflasten von 200-400kPa positive Matrixpotenzialwerte gemessen, weil infolge des Überschreitens der Eigenstabilität des Bodens, das unter Überdruck stehende Porenwasser nicht mehr hinreichend schnell umverteilt werden konnte.

4.3.2 Rebound

Der Rebound als ein Parameter für die physikalische Bodenresilienz kennzeichnet den elastischen Anteil der Setzung d.h. bis zu welchem Maße der Boden seine Anfangseigenschaften wiederherzustellen vermag, wenn der Druck entfernt wird (z.B. nach der Überfahrt mit Maschinen). Damit ist der Rebound sehr stark von der wirkenden Auflast abhängig. In der vorliegenden Untersuchung lagen die Rebound-Werte von 0,02 bis 0,10g cm⁻³ bzw. 18 bis 50% bei Auflasten von 40 bis 400kPa. Hinsichtlich von Literaturergebnissen haben Stone & Larson (1980) unter Auflasten von 100-1000kPa eine Abnahme der Lagerungsdichte von <0,05g cm⁻³ gefunden. McBride & Watson (1990) konnten auf ungestörten Ackeroberböden Werte von 0,018 bis 0,075g cm⁻³ unter gleichen Auflaststufen feststellen, wobei unter 400kPa Auflast der Rebound ca. 0,04g cm⁻³ war. Damit ist der Rebound bzw. die Abnahme der Lagerungsdichte in den ungestörten Grünlandböden in Hohenschulen im Vergleich zum partiell homogenisierten Bodenmaterial bei Stone & Larson (1980) oder zum gepflügten Ap-Horizont bei McBride & Watson (1990) durch die vorhandene Bodenstruktur und deren Stabilität deutlich höher. In Bezug auf die Bodenstrukturstabilität haben Da Veiga et al. (2007) einen bodenbearbeitungsspezifischen Reboundeffekt nachgewiesen. So ist der Reboundeffekt für die „no tillage“ Fläche in 5cm Tiefe mit ca. 30% über 10% Prozentpunkte höher als für die konventionell bearbeiteten Flächen, die eine Strukturzerstörung durch Pflügen erfahren haben. Auch Räty et al. (2010) haben gezeigt, dass die Flächen mit Vegetation eine größere Resilienzkapazität aufweisen als frisch bearbeitete Flächen ohne Vegetationsbesatz. Außerdem haben sie festgestellt, dass die älteren Grünlandflächen (14 Jahre) einen höheren Reboundeffekt aufwiesen als die jüngeren Flächen (3 Jahre).

Die eigenen Ergebnisse zeigen, dass sich mit steigendem C_{org}-Gehalt der Reboundanteil erhöht. Zhang et al. (2005) fanden heraus, dass sich der Rebound mit dem Zusatz von partikulärem Torf (50g kg⁻¹) in den Boden erhöhen ließ. Dabei war die Erhöhung bei Proben mit 50g kg⁻¹ partikulärer organischer Substanz um bis zu 100% höher als in denjenigen mit 10g kg⁻¹. In den eigenen Daten konnte an Hand der Korrelationen zwischen Rebound und C_{org}-Gehalt im Boden berechnet werden, dass 1g kg⁻¹ C_{org} zu einem bis zu 4 Prozentpunkten höheren Rebound führen kann. In dem Zusammenhang konnten Gregory et al. (2009) anhand der Daten aus 15 Bodenprofilen in England zeigen, dass der Rebound in Grünlandböden insgesamt höher war als auf Ackerflächen. Als Grund haben sie den höheren Anteil organischer Substanz in Grünland angegeben. Dabei gilt, dass die Flächen mit höherem Rebound eine geringere Festigkeit aufweisen, d.h. die Setzung höher ist und damit auch der Rebound.

Die Korrelation zwischen Rebound und C_{org}-Gehalt war am größten unter Auflasten von 40 und 70kPa und nahm mit steigender Auflast (bis zu 200kPa) ab. Weiterhin wurde die Korrelation bei der Auflast von 400kPa leicht negativ, d.h. mit steigendem C_{org}-Gehalt im Boden wurde der Rebound geringer. Der Grund dafür ist, dass bei 40-70kPa Auflast die Bodeneigenstabilität noch nicht überschritten war und daher der Rebound eine Funktion der Bodenstrukturelastizität ist, welche mit dem Überschreiten des Vorbelastungswertes abnimmt. Bei der Auflast 400kPa ist nichts mehr von der ursprünglichen Bodenstruktur vorhanden und durch den höheren Organikgehalt im Boden ist in den Poren mehr Wasser (bis zu 10Vol.%). Durch den höheren Wassergehalt wird die Bodenhomogenisierung unter Auflast ausgeprägter und der Rebound reduziert. In dem Zusammenhang haben Tobias et al. (2001) bei „in situ“ Messungen festgestellt, dass im trockenen Boden im Juli nach der Überfahrt die elastische die plastische Deformation überwiegt, während auf dem nassen Boden das elastische Verhalten sehr gering ist und hauptsächlich plastische Setzung stattfindet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es einen Einfluss von organischer Substanz (C_{org}) auf die Bodenstabilität anhand des Parameters Scherwiderstand gab. So stieg der maximale Scherwiderstand mit höherem Anteil an Organik im Boden. Dabei war die Korrelation Auflast-abhängig: bei 40kPa war sie eine Funktion der Aggregatsstabilität und Wurzelarmierungseffektes, dieser Zusammenhang wird bei 70-100kPa verringert; bei 200-400kPa ist im strukturlosen Boden die Erhöhung nur noch auf die stärkere Oberflächenrauigkeit der Partikel zurück zu führen. Weiterhin resultiert die Erhöhung des maximalen Scherwiderstandes mit höherem C_{org}-Anteil aus der höheren Zahl von Menisken bei gleichem Matrixpotenzial durch den größeren Anteil an engen Grob- und Mittelporen und daraus, dass die feineren Poren stabiler bzw. die Menisken länger wirksam sind unter Auflasten. Dabei wurde diese Korrelation nur bis zu einer Auflast von 70kPa festgestellt d.h. bis die Eigenstabilität überschritten wurde.

Des Weiteren wurde eine Korrelation zwischen dem Rebound und der organischen Substanz festgestellt; der Reboundeffekt stieg mit Erhöhung des C_{org}-Gehaltes im Boden d.h. der Boden weist eine höhere Elastizität auf und ist damit in der Lage, sich nach einer mechanischen Belastung besser zu erholen. Aber auch hier konnte man eine Auflast-Abhängigkeit feststellen; so war die Korrelation am größten unter Auflasten von 40 und 70kPa und nahm mit steigender Auflast (bis zu 200kPa) ab. Folglich ist der Rebound-Effekt eine Funktion der Bodenstruktur.

4.4 Langfristig wirksame Aggregierungsunterschiede durch vorherige Bodenbearbeitung als Ackerstandort und in Abhängigkeit von der Dauer der Grünlandnutzung

Die Grünlandflächen auf dem Standort Hohenschulen waren vorher unter Ackernutzung und wurden über 10 Jahre mit konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung bewirtschaftet. Durch die unterschiedliche Bodenbearbeitung konnte Horn (2004b) auf diesem Standort schon nach 3 Jahren eine Veränderung der Bodenstruktur in 10-15cm Tiefe feststellen. Auf der konservierend bearbeiteten Fläche waren die Vorbelastung, die Lagerungsdichte und die gesättigte Wasserleitfähigkeit höher als unter konventioneller Bearbeitung. Es gibt in der Literatur viele weitere Arbeiten, die die höhere Strukturstabilität (Brunotte 2007, Ehlers et al. 2000, Wiermann et al. 2000, Petelkau 1998) und die verbesserte Leitfähigkeit durch eine Zunahme der Porenkontinuität auf konservierend bearbeiteten Flächen bestätigen (Unger & Fulton 1990, Ehlers et al. 1983). Der Grund dafür ist, dass durch das Pflügen bei konventioneller Bodenbearbeitung die Bodenstruktur zerstört wird und die Aggregate zerkleinert werden, während die Bodenstruktur am Standort Hohenschulen auf der konservierend bearbeiteten Fläche nur bis in 8cm Tiefe (Fräse) mechanisch verändert wurde (Frey 1998). Ausschlaggebend dabei sind die ungestört ablaufenden Aggregierungsprozesse infolge des Ausbleibens des regelmäßigen Umbruchs (Wiermann et al. 2000, Dexter 1988). Des Weiteren erfolgt keine Strukturzerstörung durch mechanische Belastungen, die im Extremfall einer Homogenisierung des Oberbodens gleichkommen könnten, da durch die erhöhte Strukturstabilität infolge der konservierenden Bodenbearbeitung der Spannungseintrag kleiner als die Tragfähigkeit des Bodens gehalten wird (Horn 2004b).

Derartige Unterschiede in der Bodenstruktur und -stabilität sind nach 3 bzw. 4 Jahren unter Grünlandbewirtschaftung noch immer in Hohenschulen vorhanden. So sind die gesättigte Wasser- und Luftleitfähigkeit höher auf der Grünlandfläche mit zuvor konservierender Bewirtschaftung als auf der mit vorheriger konventioneller Bearbeitung. In dem Zusammenhang konnten Francis & Kemp (1990) zeigen, dass die Erhöhung der gesättigten Wasserleitfähigkeit umso ausgeprägter ist, je länger die Fläche als Grünland genutzt wurde. Sie haben festgestellt dass die Leitfähigkeit in folgender Reihenfolge stieg: bearbeitete Fläche < 2-jähriges Grasland < 4-jähriges Grasland < 36-jähriges Grasland. Der Grund dafür ist, dass nach dem Absterben der Wurzeln Hohlräume frei werden, welche die Wurzeln zuvor geschaffen haben. Diese Bioporen haben im Vergleich zu den Interag-

gregatporen eine ausgeprägtere Kontinuität, eine geringere Tortuosität und sind meistens vertikal ausgerichtet (Hirth et al. 2005).

Weiterhin ließen sich Unterschiede bei der Untersuchung der Lagerungsdichtewerte der beiden Grünlandflächen in Hohenschulen feststellen. Die Lagerungsdichte ist auf der Fläche mit vorheriger konservierender Bodenbearbeitung höher als auf der vorher gepflügten Grünlandfläche. Ähnliche Unterschiede in der Lagerungsdichte kann man auch zwischen den Standorten feststellen. Zwar ist ein Vergleich der Standorte aufgrund der räumlichen Distanz schwierig, jedoch sind die Bodenarten gleich und auch die klimatischen Bedingungen ähnlich. So gibt es in der Lagerungsdichte beim Vergleich der vorher gepflügten Standorte Vorbuse und Hohenschulen deutliche Unterschiede und man kann eine Reihenfolge feststellen: Standort Vorbuse < Hohenschulen: vorherige konventionelle Bodenbearbeitung, seit 4 Jahren unter Grünland < Hohenschulen: vorherige konservierende Bodenbearbeitung, seit 3 Jahren unter Grünland. Der Grund dafür ist, dass die Aggregierungsprozesse auf der Fläche mit vorheriger konservierender Bodenbearbeitung viel früher angefangen haben und daher bereits bei der Umstellung auf Grünland deutlich ausgeprägter waren bzw. die Aggregierungsdauer höher war: Hohenschulen ist schon 4 Jahre, Vorbuse 1,5 Jahre unter dauerhaftem Pflanzenbewuchs. Dies bedeutet, dass mehrere Quellungs-Schrumpfungszyklen stattgefunden haben, und dies führt zu einer stärkeren Dichtlagerung durch Partikelumorientierung bzw. An- und Einlagerung zwischen größeren Teilchen (Horn et al. 1986). Unterschiedliche Quellungs-/Schrumpfungsintensitäten und -häufigkeiten haben Einfluss auf die Ausprägung der Aggregate; je häufiger und intensiver die Zyklen ablaufen, desto stärker ist die Aggregierung (Six et al. 2004). Semmel et al. (1990) konnten anhand homogenisierter Bodenproben zeigen, dass mit der Zunahme an Quellungs- und Schrumpfungzyklen die Anzahl der kleineren Aggregate erhöht wurde, weiterhin stieg die Aggregatdichte. Auch Francis & Kemp (1990) konnten an Hand mikromorphologischer Verfahren feststellen, dass die Bodendichte sich mit der Zeit unter Grasland erhöht hatte.

Ein weiteres Indiz dafür, dass es durch die Aggregierungsdauer zu den Unterschieden in der Bodenstruktur kommt, sind die Werte für den Winkel der inneren Reibung. So ist der Winkel umso höher, je länger die Fläche sich bereits unter dauerhaftem Pflanzenbewuchs befindet: Vorbuse: 35.6° , Hohenschulen: 38° . In dem Zusammenhang haben Horn & Fleige (2003) Werte für den Winkel der inneren Reibung von 34° für Kohärent-/Prismengefüge und 39° für Polyedergefüge für einen schluffig-lehmigen Sand angegeben (bei $pF=1,8$). So ist vermutlich am Standort Hohenschulen infolge der längeren Zeit ein Polyeder- oder Subpolyeder-Gefüge entstanden, während am Standort Vorbuse ein Prismen-Gefüge vorliegen könnte.

Ferner konnte bei den Untersuchungen der beiden Grünlandflächen in Hohenschulen festgestellt werden, dass die Stabilität des Gesamtbodens erhöht wird, vermutlich durch die höhere Aggregierungsduer. Die Vorbelastungswerte bei vorheriger konservierender Bewirtschaftung liegen ca. 30kPa höher als auf der vorher gepflügten Grünlandfläche. In dem Zusammenhang konnte Glüser (2006) schon nach ca. 1,5 Jahren unter 6 Grünfutterpflanzen und Angers & Mehuys (1988) nach 2 Jahren unter Gerste und Luzerne eine Erhöhung der Aggregatstabilität im Vergleich zu den Anfangsbedingungen feststellen. In Hinblick auf die Zeit unter Grünlandnutzung haben Haynes et al. (1991) eine Korrelation zwischen der Aggregatstabilität und der Zeit unter Grünland festgestellt, die Steigerung von 0-3 Jahren bis >9 Jahren betrug über 40%.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass am Standort Hohenschulen die Aggregationsprozesse auf der Fläche mit vorheriger konservierender Bodenbearbeitung viel früher angefangen haben und daher bereits bei der Umstellung auf Grünland deutlich ausgeprägter waren. Dies erhöhte die Werte von Lagerungsdichte, gesättigter Wasser- und Luftleitfähigkeit sowie der Vorbelastung. Einen ähnlichen Verlauf kann man im Vergleich der Standorte Hohenschulen und Vorbuse feststellen. Die beiden Flächen wurden vorher gepflügt und waren im Moment der Probennahme seit 4 bzw. 1,5 Jahren unter permanentem Pflanzenbestand. Durch die längere Aggregierungsduer sind sowohl die Lagerungsdichte als auch der Winkel der inneren Reibung in Hohenschulen höher.

4.5 Veränderung der Bodeneigenschaften und des Wurzelwachstums durch mechanische Belastung

Um die Veränderung des Bodengefüges der Grünlandflächen nach den Überfahrungsversuchen zu charakterisieren, wurden die Kenngrößen Lagerungsdichte, Porengrößenverteilung, gesättigte Wasser- und Luftleitfähigkeit sowie Vorbelastung und Scherwiderstand mit den Parametern Kohäsion und Winkel der inneren Reibung bestimmt. Änderungen des Wurzelwachstums, nach den Überfahrungsversuchen wurden anhand der Wurzeloberflächendichte und des Wurzeltrockengewichtes charakterisiert.

4.5.1 Veränderungen der Lagerungsdichte, Porengrößenverteilung und Leitfähigkeiten

Durch die Überfahrt(en) kam es im Boden zur Bodenverformung, die mit einer Umlagerung und Neuanordnung von Bodenpartikeln verbunden ist. Dexter (1988) hat diesen Vorgang in mehreren Schritten beschrieben; so werden am Anfang die Struktureinheiten auf ein kleineres Gesamtvolumen zusammengedrückt, ohne die Eigenschaften der Aggregate zu verändern. Nachdem diese allerdings in kleinere Bruchstücke zerschert und in das Interaggregatporensystem eingelagert sind, findet eine vollständige Zerstörung der Struktureinheiten statt. Gleichzeitig wird auch der Anteil an Korn-zu-Korn-Kontaktpunkten erhöht. Dies kann man an Hand der Änderungen der Lagerungsdichte bzw. des Porenvolumens feststellen. Auf dem Luzernefeld in Vorbuse war auf der belasteten Parzelle eine deutlich höhere Lagerungsdichte gegenüber der Kontrolle festzustellen. Die Erhöhung beträgt bis zu $0,19\text{ g cm}^{-3}$ in 5cm Tiefe. Im Vergleich dazu waren die durch Überfahrung bedingten Änderungen am Standort Röhu in 5cm Tiefe mit bis zu $0,1\text{ g cm}^{-3}$ deutlich geringer.

Die in der Literatur angegebenen Änderungen in der Lagerungsdichte nach Überfahrt liegen in vergleichbaren Bereichen. So konnte auch Glab (2008) eine Erhöhung um $0,14\text{ g cm}^{-3}$ nach 6 Überfahrten (Kontaktflächendruck ca. 125kPa) auf einem Luzernefeld in 0-30cm Tiefe feststellen. In der Untersuchung von Jorajurai & Draghi (1997) auf Grasland mit unterschiedlichen Überfahrungshäufigkeiten (mittlerer Kontaktflächendruck 107kPa) wurden bei Überfahrten 1 bis 10mal Änderungen der Bodendichte von $0,03\text{-}0,14\text{ g cm}^{-3}$ festgestellt.

Weiterhin ist das Ausmaß der Erhöhung der Lagerungsdichte auf den überfahrenen Flächen an beiden Standorten trotz gleicher Bodentextur (mittel lehmiger Sand) unter-

schiedlich. Ein Grund dafür liegt in den unterschiedlichen Bodenwassergehalten bzw. -matrixpotenzialwerten während der Überfahrt (Vorbuse $pF=1,7$, Röhu $pF=2,7-3$), da ein höherer Wassergehalt im Zusammenhang mit höherer Kompressibilität des Bodens steht: mit zunehmendem Wassergehalt wird die Reibung zwischen den Bodenpartikeln verringert, da durch Anlagerung von Wasser die Anzahl der direkten Korn-zu-Korn-Kontaktpunkte abnimmt und es zur Reduzierung der Meniskenkräfte zwischen den Bodenpartikeln kommt (Yavuzcan et al. 2005, Hartge & Horn 1999). In diesem Sinne wirkt Wasser wie ein Schmiermittel zwischen den Bodenpartikeln und verursacht eine Verschiebung derselben (Horn et al. 1990). In dem Zusammenhang konnten Kuht et al. (2006) eine signifikante positive Korrelation zwischen dem Bodenwassergehalt während der Überfahrt und der Zunahme der Lagerungsdichte bzw. des penetrometrischen Widerstandes durch die Überfahrt auf einem mit Gerste bestellten Feld feststellen. Auch Yavuzcan et al. (2005) konnten bei der Zuckerrübenernte beobachten, dass mit ansteigendem Bodenwassergehalt (von $0,17$ auf $0,35\text{g g}^{-1}$) die Fahrspurtiefe unter einem vollen Rübenroder (Kontaktflächendruck: ca. 140kPa) um bis zu 30% zunehmen kann. Die daraus resultierende Erhöhung der Lagerungsdichte betrug bis zu $0,3\text{g cm}^{-3}$ im feuchteren und bis zu $0,1\text{g cm}^{-3}$ im trockeneren Boden in 0-10cm Tiefe. Ebenso konnten Tarawally et al. (2004) die Wichtigkeit des Bodenwassergehaltes in Hinblick auf die Änderungen des Bodengefüges beweisen: So war die Zunahme der Lagerungsdichte in 0-10cm Tiefe in einem Zuckerrohrfeld nach dem Belasten (7 Überfahrten mit 10Mg Traktor) im Boden mit einem Wassergehalt nahe Feldkapazität um $0,20\text{g cm}^{-3}$ höher als im trockenen Boden. Hinsichtlich der Belastbarkeit des Bodens spielen neben dem Bodenwassergehalt weitere bodenendogene Faktoren wie z.B. der Aggregierungsgrad (s. auch Kapitel 4.5.2) und die Bodenbedeckung bzw. die Durchwurzelungsintensität (s. auch Kapitel 4.2) und der Gehalt an der organischen Substanz (s. auch Kapitel 4.3) eine wichtige Rolle.

Als weitere Gründ für die unterschiedlichen Änderungen der Lagerungsdichtewerte an den Standorten sind die bei den Überfahrten verwendeten unterschiedlichen Maschinen mit einem unterschiedlichen Kontaktflächendruck auf den Standorten Vorbuse und Röhu (258kPa bzw. 118kPa) zu nennen. So haben Trautner & Arvidsson (2003) festgestellt, dass die vertikale Bodensetzung auf einem Weizenfeld unter einer Radlast von 2Mg $0,9\text{mm}$ bzw. unter 7Mg 7mm betrug und somit die Bodensetzung bzw. die Änderungen der Bodenstruktur auflastabhängig war. In dem Zusammenhang haben Diepolder et al. (2005) im Grünland ebenfalls gezeigt, dass die Erhöhung der Lagerungsdichte größer war, je schwerer die eingesetzten Maschinen waren. Neben dem bodenexogenen Faktor Kontaktflächendruck, hängt die Änderung der Bodenstruktur auch von der Art der mechanischen Belastung (statisch oder dynamisch) (Semmel & Horn 1993), der Belastungs-

dauer (Fazekas & Horn 2005), der Fahrgeschwindigkeit (Horn et al. 1991) und der Befahrungshäufigkeit (Horn et al. 2003) ab.

Des Weiteren konnte man an Hand der eigenen Ergebnisse feststellen, dass die Volumenreduzierung hauptsächlich zu Lasten der luftgefüllten weiten Grobporen stattfand, wobei es in Röhu zu einer Abnahme von bis zu 4Vol.% und in Vorbuse von über 10Vol.% in 5cm Tiefe kam. In dem Zusammenhang fand auch Hammel (1993) eine signifikante Verringerung der weiten Grobporen in der Fahrspur unter einer Radlast von 3Mg, dies fand vor allem in 5cm Tiefe statt (Matrixpotenzial entsprechend $pF=2$). Auch Douglas & Crawford (1998) haben auf Grünlandflächen unter verschiedenen Überfahrungsintensitäten eine Zunahme der Lagerungsdichte und gleichzeitig eine Abnahme von weiten Grobporen festgestellt. Diepolder et al. (2005) führen die Abnahme der Luftkapazität auf die Zunahme von feineren Poren im Grünland zurück. Dies bestätigen auch die eigenen Ergebnisse des Standortes Vorbuse, auf dem es zu einer Komprimierung des Porenraumes in Form der weiten Grobporen (Poren $>50\mu\text{m}$) zugunsten einer Zunahme der engen Grobporen und Mittelporen ($50-0,2\mu\text{m}$) in 0-10cm Tiefe kam. In diesem Zusammenhang konnten Richard et al. (2001) in einem frisch gepflügten Ap-Horizont sowohl eine signifikante Abnahme der Poren mit einem Durchmesser von $4-40\mu\text{m}$ als auch eine Zunahme der Poren mit einem Durchmesser von $1-4\mu\text{m}$ nachweisen. Auch Schäfer-Landefeld et al. (2004) konnten in einer Untersuchung auf mehreren Ackerflächen ähnliche Porengrößenveränderungen feststellen, wobei die Anzahl an Poren $<30\mu\text{m}$ stieg. Pagliai et al. (2003) fügen ihren an Hand von Dünnschliffen gemachten Beobachtungen hinzu, dass es nach der Überfahrt zu einer Verringerung der Zahl der nicht unterbrochenen Poren kommt, nämlich infolge der Zerstörung von deren vertikaler Kontinuität.

Ferner kann man den kumulativen Effekt der Überfahrungshäufigkeit am Standort Röhu tendenziell in 5cm Tiefe feststellen, da es hier zu einer weiteren Zunahme der Lagerungsdichte um $0,1\text{g cm}^{-3}$ und Abnahme der Luftkapazität über 2Vol.% nach einer weiteren Überfahrt kam. In dem Zusammenhang haben Glab (2008) und Kopec et al. (2001) gezeigt, dass eine Zunahme der Lagerungsdichte mit steigender Anzahl von Überfahrten im Grünland einhergeht. Bei Glab (2008) handelte es sich um einen Luzerne-Bestand und bei Kopec et al. (2001) um ein Wiesen-Klee-Feld auf schluffig-lehmigem Boden. Nach der ersten Überfahrt mit einem ca. 2Mg schweren Traktor stieg die Lagerungsdichte unter beiden Kulturen um 6% und nach der sechsten Überfahrt um über 10% an im Vergleich zur unbefahrenen Variante. In dem Zusammenhang konnten Frame & Merrilees (1996) den kumulativen Effekt an Hand der Reduzierung des Porenvolumens bzw. des luftgefüllten Porenraumes in 3 Jahren durch die Bewirtschaftungsmaßnahmen (5 Überfahrten im Jahr) für Silage auf einer Ryegrass-Fläche zeigen. So nahm der Anteil an weiten Grobporen nach dem ersten Jahr um über 35% und nach dem dritten um über 50% ab.

Im Gegensatz zu den Standorten Röihu und Vorbuse sind am Standort Hohenschulen die durch Überfahrten bedingten Änderungen in ganz anderem Ausmaß festzustellen. So kann man bei der Lagerungsdichte keine deutliche Zunahme erkennen. Weiterhin ist die Luftkapazität am Standort Hohenschulen auf der überfahrenen Fläche unverändert bzw. sogar höher als auf der Kontrollvariante. Den Grund dafür könnte sein, dass es auf diesem Standort bei der ersten Überfahrt aufgrund der hohen Auflast (Kontaktflächendruck 321kPa) und des hohen Wassergehaltes bzw. niedrigen Matrixpotenzialwertes ($pF=1,3$) zu einer Verknetung und Homogenisierung der Bodenstruktur kam (mehr dazu in Kapitel 4.5.2). Einen Hinweis für die stattgefundene Bodengefügezerstörung liefern Schmeer et al. (2009b). Sie haben nach der ersten Überfahrt (auf der Fläche mit N-Düngung) im feuchten Bodenzustand (Matrixpotenzial in 0-30cm Tiefe $pF=1,3$) erhöhte Lachgasemissionen von bis zu 80% im Vergleich zur Kontrollfläche festgestellt. Dies deutet auf anaerobe Bedingungen im Boden infolge der Bodenstrukturzerstörung hin, die ein Abfließen des Wassers auf Grund von Porenverfeinerung und der dadurch verringerten Porenkontinuität verhindert.

Die eigenen Bodenproben wurden ca. vier Monate nach der Überfahrung entnommen, in dem Zeitraum kam es durch Niederschlagsereignisse und durch Austrocknung des Oberbodens zu Quellungs- und Schrumpfungszyklen. Diese führten zu einer Veränderung des Porensystems durch die Restrukturierung des Bodengefüges. Auch Fleige (2000) zeigte, dass die durch Scherung verursachte Verknetung ein ausgeprägtes Schrumpfungsverhalten in Fahrspuren bewirkt. So hängt das Schrumpfungsverhalten bzw. die Volumenänderung verbunden mit Rissbildung beim Entwässern von der Bodenstruktur ab. Peng & Horn (2005) und Mitchell & van Genuchten (1992) weisen nach, dass im Boden mit geringerer Stabilität, wie am Standort Hohenschulen durch die Verknetungen und Homogenisierung nach der ersten Überfahrt vorliegend, eine erhöhte Schrumpfung stattfinden kann. In dem Zusammenhang haben Peng et al. (2005) und Flowers & Lal (1999) gezeigt, dass innerhalb der Pflugsohle mit Plattengefüge ein weniger intensives Schrumpfungsverhalten auftritt als in den bearbeiteten Bodenhorizonten, wo der Boden seine Eigenstabilität noch nicht wieder erreicht hat. Wenn der Boden durch Verknetung in einen homogenisierten Zustand überführt wird, kommt es bei erstmaliger Austrocknung wieder zur Normalschrumpfung (Horn & Peth 2009), und dies leitet einen neuen Gefügezyklus ein (Werner & Werner 2001). Werner & Werner (2001) konnten feststellen, dass die Boden-Reaggregierung durch Schrumpfung und Rissbildung umso ausgeprägter ist, je stärker zuvor durch die Belastung eine Verformung und Homogenisierung des Bodengefüges eingetreten ist. Braudeau et al. (2004) haben festgestellt, dass innerhalb der Normalschrumpfung der Anteil an Mittel- und Mikroporen ab- und derjenige an Makroporen zunimmt. Werner & Werner (2001) fügen noch hinzu, dass die Zunahme an Makroporen

(innerhalb von 3 Jahren nach der Belastung) vor allem auf die Ausbildung von TrennrisSEN durch Schrumpfung in mehreren Generationen zurückzuführen ist. Dies könnte auch die gleichbleibenden bzw. höheren Werte für die Luftkapazität mit teils abnehmenden bzw. gleichbleibenden Werten für den Anteil an engen Grobporen und Mittelporen erklären.

Im Zuge der Überfahrt kann es am Standort Vorbuse zu einer deutlichen Abnahme des Gesamtporenvolumens gekommen sein; die Reduzierung fand dabei vor allem in den Makroporen (weite Grobporen) statt. In Bezug auf die Zusammenhänge in der Hagen-Poisseuille'schen Gleichung, kommt es mit der Verfeinerung der Grobporen zur Abnahme des Massenflusses (Hartge & Horn 1999), d.h. die gesättigte Wasser- und Luftleitfähigkeit werden verringert (s. auch Kapitel 4.1.1). Dabei führen nicht nur die auflastbedingte Verringerung des Porenraums sowie die Abnahme der sekundären Interaggregatporen zur Reduzierung der gesättigten Wasser- und Luftleitfähigkeit, sondern auch die durch scherende Prozesse bedingten Veränderungen der Porenkontinuität und Tortuosität. Dies konnten auch Pagliai et al. (2003) in einer Korrelation zwischen der Wasserleitfähigkeit und dem Anteil an ununterbrochenen Poren zeigen. Bezüglich der in dieser Arbeit gefundenen Ergebnisse trat dieser Effekt sehr deutlich am Standort Vorbuse auf den belasteten Bereichen auf, wo es eine Korrelation zwischen dem Gesamtporenvolumen bzw. den weiten Grobporen und der gesättigten Wasser- bzw. Luftleitfähigkeit gab, so dass es mit Abnahme des Gesamtporenvolumens bzw. der weiten Grobporen zur Reduzierung der Bodenleitfähigkeit kam. In 5-10cm Tiefe war der Rückgang der gesättigten Wasser- und Luftleitfähigkeit mit über 70% Abnahme feststellbar. In dem Zusammenhang konnten Yavucan et al. (2005) im Ap-Horizont unter mechanischen Belastungen mit einem schweren Zuckerrübenroder (Radlast: 11Mg) eine Abnahme von über 80% der gesättigten Wasser- und über 90% der Luftleitfähigkeit (bei Feldkapazität) beobachten.

Auch am Standort Röhu konnte unter beiden Kulturen eine ca. 20%ige Reduzierung der Luflleitfähigkeit in 5cm Tiefe im Juli festgestellt werden, obwohl bei der Lagerungsdichte bzw. dem Gesamtporenvolumen keine eindeutigen Änderungen nachweisbar waren. Der Grund dafür ist, dass in Folge von scherenden Prozessen unter Auflasten Deformationsvorgänge auch ohne Volumenreduzierung die Funktionalität des Porenleitsystems beeinträchtigen und die Porenkontinuität stark verringern können (Hartge & Horn 1999; Stepniewski et al. 1994). In dem Zusammenhang konnten O'Sullivan et al. (1999b) anhand ungestörter Bodenproben den Einfluss der Verringerung der Porenkontinuität (durch Scherung) auf die Luflleitfähigkeit nachweisen, obwohl die Lagerungsdichte gleich blieb. Werner & Werner (2001) stellten an Hand von computertomographischen Analysen fest, dass schon nach zwei Überfahrten mit 2,5Mg Radlast in einem Ap-Horizont der Makro-

porenanteil nahezu vollständig fehlte und dies zu einer deutlichen Reduzierung der gesättigten Wasserleitfähigkeit führte.

4.5.2 Veränderung der Bodenstabilitätsparameter (Vorbelastung, Kohäsion und Winkel der inneren Reibung)

Durch die Bodenverformung fand eine Umlagerung und Neuanordnung von Bodenpartikeln statt, d.h. die Struktureinheiten wurden auf ein kleineres Gesamtvolumen zusammengedrückt und der Anteil an Korn-zu-Korn-Kontaktpunkten erhöht. Dass die Überfahrt bei den eigenen Ergebnissen zu Änderungen der Bodenstruktur geführt hat, zeigt sich in den Werten der Bodenstabilitätsparameter. So kam es am Standort Vorbuse auf der einmal überfahrenen Fläche im Vergleich zur Kontrollfläche zu einer deutlichen Erhöhung der Vorbelastung. Die Zunahme betrug in den oberen 0-5cm 60kPa und in 5-10cm Tiefe ca. 20kPa. Im Vergleich dazu sind die Veränderungen der Eigenstabilität des Bodens am Standort Röhu deutlich geringer bzw. die Werte sind sogar unverändert. Die Anzahl von Untersuchungen über den Einfluss von mechanischer Belastung auf Vorbelastungswerte im Grünland ist sehr gering, aber die bei Stahl et al. (2009) und Hammel (1993) dargelegten Änderungen sind in einem vergleichbaren Bereich.

Des Weiteren lassen sich die von der Bodenverdichtung verursachten Veränderungen eindeutig in den Scherparametern am Standort Vorbuse erkennen, wo eine deutliche Erhöhung der Kohäsion um bis zu 10kPa in den belasteten Arealen festgestellt wurde. In dem Zusammenhang haben Baumgartl & Horn (1991) gezeigt, dass im ungestörten Boden mit höherer Auflast (150-400kPa) die Kohäsion zunimmt im Vergleich zu geringeren Auflasten (0-50kPa), während in homogenisiertem Boden keine Zunahme erkennbar ist. Lebert & Horn (1991) haben die höhere Kohäsion durch eine lastbedingt vermehrte Anzahl an Korn-zu-Korn-Kontaktpunkten erklärt. Dies wurde auch durch die Untersuchungen von Dörner & Horn (2009) und Horn et al. (1994) bestätigt, die von erhöhter Kohäsion in der mechanisch stark belasteten Pflugsohle berichten. Im Vergleich zu Vorbuse konnten am Standort Röhu keine eindeutigen, durch die Überfahrt bedingten Änderungen in den Scherparametern festgestellt werden.

Das unterschiedliche Ausmaß der Veränderungen im Bodengefüge bzw. der Zunahmen der Vorbelastung an den Standorten Vorbuse und Röhu kann man mit den unterschiedlichen Bodenwassergehaltswerten und Maschinen während der Überfahrt erklären (s. auch Kapitel 4.5.1). Denn je intensiver der Boden belastet und je größer gleichzeitig während der mechanischen Belastung auch die Wassersättigung ist bzw. die durch Belastung induzierten Porenwasserüberdrücke, desto intensivere Bodengefügeveränderungen sind zu

erwarten (Horn et al. 1994). Daher kam es am Standort Vorbuse während der Überfahrt mit sehr schweren Maschinen bei Feldkapazität (Kontaktflächendruck ca. 4mal größer als Bodeneigenstabilität) zu einer starken Veränderung der Bodenstruktur wie an Hand der Scherparameter festgestellt wurde. Am Standort Röhu war aber der Boden sehr trocken und die Überfahrt hat mit einem deutlich leichten Gerät stattgefunden (Kontaktflächendruck ca. 1,5-2mal größer als Bodeneigenstabilität), so dass sich hier kaum Veränderungen zeigten. Die eigenen Ergebnisse werden von der Literatur bestätigt: Stahl et al. (2009) untersuchten in Sachsen mit den betriebsüblichen Maschinen (Güllewagen mit Kontaktflächendruck von über 150kPa) Mähweideflächen hinsichtlich der Veränderung ihrer Vorbelastung. Sie stellten fest, dass es auf dem „schwach feuchten bis trockenen Boden“ zu keiner signifikanten Veränderung kam, aber auf dem „nassen bis feuchten Boden“ die Vorbelastung um 27 bzw. 17kPa in 10 bzw. 20cm Tiefe stieg. Gysi et al. (1999) konnten auf einem Zuckerrübenfeld unter einer Radlast von 11Mg zeigen, dass es auf Boden mit einem Matrixpotenzial von $pF=1,6$ zu einer deutlichen Veränderung der Bodenstruktur und zu einer Erhöhung der Vorbelastung kam. Dagegen war die Veränderung bei kleinerer Radlast (7,5Mg) sowie bei trockenem Feld ($pF=2,3$) nur geringfügig.

Des Weiteren kann die Ursache eine größeren Bodendeformation auf dem Luzernefeld am Standort Vorbuse im Vergleich zu den Grasflächen in Röhu in den unterschiedlichen Wurzelsystemen liegen, d.h. die Graswurzeln können einen dichten Wurzelfilz haben im Vergleich zu Leguminosen. Dies ist auch im Einklang mit den Ergebnissen im Kapitel 4.2.1 über den größeren Armierungseffekt von Graswurzeln, infolge von deren größerer Durchwurzelungsintensität und Zugfestigkeit im Vergleich zur Luzerne im Oberboden. Dies führt dann zu einer geringeren Änderung der Bodenstruktur bzw. Zunahme der Vorbelastung nach der Überfahrt. Aber auf lange Sicht können auch die Leguminosennwurzeln die Bodenstabilität erhöhen, wenn nämlich die Wurzeln absterben und Bioporen entstehen. Hartge & Bohne (1983) haben darauf hingewiesen, dass senkrechte Poresysteme bei Belastungen sehr viel stabiler sind als zufällig im Boden angeordnete oder solche mit horizontaler Ausrichtung. Nach Blackwell et al (1990) ertragen Bioporen axiale Spannungen bis 200kPa ohne große Abnahmen der Permeabilität. Auch Schäffer et al. (2007) haben festgestellt, dass Bioporen stabiler sind als Interaggregatporen welche aufgrund von Schrumpfung und Quellung entstehen. Am Standort Vorbuse ist das Luzernefeld erst 1,5 Jahre alt und der positive Effekt von Pfahlwurzeln wird vermutlich erst in ein paar Jahren sichtbar sein. In dem Zusammenhang konnten Kuht et al. (2009) und Trükmann et al. (2008) aus den Änderungen der Bodenstruktur erschließen, dass man schon nach 3 Jahren unter den klimatischen Bedingungen von Estland die Entstehung von Bioporen unter Luzerne und Gelber Lupine feststellen kann.

Im Vergleich zu den Standorten Röhu und Vorbuse war in Hohenschulen das Ausmaß der Gefügezerstörung nach der Überfahrt größer, da der Bodenwassergehalt während der ersten Überfahrt einem Matrixpotenzial unterhalb der Feldkapazität ($pF=1,3$) entsprach und der berechnete Kontaktflächendruck des Güllefasses ca. 5mal über der errechneten Tragfähigkeit des Bodens lag. So kam es durch die dynamischen Spannungseinträge und die daraus resultierende scherende Verformung auf dem feuchten Boden zur intensiven Aggregatzerstörung. In dem Zusammenhang konnten Pagliai et al. (2003) anhand von Dünnenschliffen beobachteten, dass durch mechanische Einwirkungen während Überrollungsvorgängen die Aggregate im Oberboden zerstört werden. Dabei wird am Anfang das Interaggregatporenvolumen verkleinert, und durch die scherenden Verformungen kommt es zur Aggregatzerstörung. Auch Frame & Merrilees (1996) haben eine Aggregatzerstörung durch den Maschineneinsatz während der Futterernte im Grünland festgestellt. Horn et al. (1994) sprechen in dem Zusammenhang von Zerknetzung; so werden die ehemals strukturierten Böden damit teilweise wieder in den homogenen Zustand versetzt, d.h. in den Normalschrumpfungsbereich. Dieses Phänomen ist besonders in feuchteren Fahrspuren im Acker, im Waldbau bei der Holzernte mit schweren Rückemaschinen und im Bereich von Trittspuren und in der Umgebung von Viehtränken zu finden (Scheffer & Schachtschabel 2010). Auch Schäfer-Landefeld et al. (2004) zeigten, dass gerade unter feuchten Bodenbedingungen bei der Zuckerübenernte diese knetenden Beanspruchungen stattfinden und damit verbunden eine Strukturzerstörung einsetzt.

Die Vorbelastung ist nach Horn & Rostek (2000) vom Grad der Aggregierung abhängig, d.h. Aggregierung führt zu einer höheren Stabilität gegenüber mechanischen Belastungen. Daher kann man davon ausgehen, dass im homogenisierten Boden die Stabilität geringer ist als im gut strukturierten Boden. Aber da die Proben in Hohenschulen ca. 4 Monate nach der Überfahrt entnommen wurden, haben bis dahin schon Gefügeänderungs- und Restrukturierungsprozesse stattgefunden, wie man an Hand der Daten der Porengrößenverteilung feststellen konnte (s. auch Kapitel 4.5.1). Deswegen kann man bei den Vorbelastungswerten keine eindeutigen Unterschiede feststellen. Aber die Aggregatzerstörung ist am Winkel der inneren Reibung, von dem man den Aggregierungszustand des Bodens ableiten kann, deutlich zu erkennen. In dem Zusammenhang stellte Baumgartl (1991) einen abnehmenden Winkel der inneren Reibung mit steigenden Auflasten fest. Zusätzlich haben Baumgartl & Horn (1991) gezeigt, dass in homogenisiertem Boden der Winkel der inneren Reibung unter geringeren Auflasten (0-50kPa) kleiner ist als im ungestörten Boden. Diese Aspekte spiegeln sich wieder im kleinen Wert des Winkels der inneren Reibung des Standortes Hohenschulen, wo er auf der überfahrenen Fläche deutlich geringer ausfällt (bis zu 3°) als auf der Kontrollfläche. Dies spricht für eine deutliche Aggregatdeformation. Diesen Prozess kann man besonders deutlich in 5cm Tie-

fe sehen, wo auf der Fläche mit mehr Graspflanzen eine Reduzierung von 38° auf 36° erfolgte. Auf der Fläche mit mehr Leguminosen sind die kleinsten gemessenen Werte für den Winkel der inneren Reibung nach der ersten Überfahrt in 5cm Tiefe festzustellen (31°). In dem Zusammenhang haben Horn & Fleige (2003) für Einzelkorngefüge bei gleicher Bodentextur wie am Standort Hohenschulen einen Winkel der inneren Reibung von 30° bestimmt.

Weiterhin konnte man an den estnischen Standorten eine Korrelation zwischen der Lagerungsdichte und der Vorbelastung (über alle Überfahrungshäufigkeiten und Tiefen) feststellen. Dabei war die Beziehung in Vorbuse signifikant, in Rõhu konnte man nur eine Tendenz erkennen. Im Vergleich dazu war am Standort Hohenschulen keine Korrelation feststellbar. In der Literatur kann man eine enge Beziehung in der Regel auf Böden mit schwach ausgeprägter Struktur finden. So konnten Canarache et al. (2000) eine signifikante Korrelation auf tiefgepflügten Ackerböden sowie Veenhof & McBride (1996) bei gestörten Bodenproben feststellen. Auch Cramer (2006) beschreibt ähnliche Zusammenhänge, wobei allerdings Unterschiede im Ausgangsmaterial nicht berücksichtigt wurden (Sand-, Lehm-, Ton- und Schluffstandorte) und so eine Korrelation eher durch die verschiedenen Texturen als durch tatsächliche Dichteunterschiede entsteht. Im Gegensatz dazu haben Stahl et al. (2005) und Semmel (1993) auf Ackerflächen keine bzw. sehr geringe Korrelationen festgestellt. In den eigenen Ergebnissen kommt die Korrelation an den estnischen Standorten aufgrund der noch nicht so ausgeprägten Aggregatgefügebildung zustande (siehe auch Kapitel 4.4.). Dazu kommt, dass durch die Überfahrt die Aggregate bzw. Bodenpartikel dichter aneinander gepresst worden sind und dies zu höheren Werten der Lagerungsdichte führte, d.h. an den Standorten Rõhu und Vorbuse ist der Vorbelastungswert eine Funktion der Dichtlagerung. Am Standort Hohenschulen dagegen hat die Aggregatentwicklung über einen längeren Zeitraum stattgefunden - auf gut aggregierten Flächen jedoch verschwindet der direkte Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und Vorbelastung, da eine höhere Aggregierung nicht gleichbedeutend mit höherer Dichte ist. So konnten Arvidsson & Keller (2004) und Semmel & Horn (1993) zeigen, dass man die Vorbelastung nicht alleine aus der Lagerungsdichte abschätzen kann, weil dies keine Aussage über die Strukturierung innerhalb des Bodens zulässt. Keller & Arvidsson (2007) fügten an Hand von 69 einzelnen Bodenhorizonten noch hinzu, dass die kompressiven Eigenschaften von Böden (Kompressions- und Wiederbelastungsbeiwert) sehr deutlich von deren Struktur abhängen.

4.5.3 Veränderung der Wurzeloberflächendichte und des -trockengewichts

Am Standort Röhu wurde das Wurzelwachstum auf der 2mal überfahrenen Fläche reduziert. Tendenziell konnte man dies unter beiden Kulturen in Wurzeloberflächendichte und Wurzeltrockengewicht feststellen, aber eine deutliche Abnahme (über 40%) der Wurzeloberflächendichte fand nur in den oberen 5cm mit Knaulgrasbewuchs statt. Dabei konnte man bei den bodenphysikalischen Parametern tendenziell durch die Bodendefor-mation bedingte Änderungen feststellen (s. Kapiteln 4.5.1 und 4.5.2). So kam es zu einer Erhöhung der Lagerungsdichte um bis zu $0,1\text{g cm}^{-3}$. Dies kann im Hinblick auf Grünland-pflanzenwachstum bedeuten, dass die Pflanzenwurzeln ab einer bestimmten Dichtlage-rung nicht mehr in der Lage sind, den Boden gut zu durchwurzeln. In der Literatur gibt es kritische Grenzwerte, ab denen das Pflanzen- und Wurzelwachstum beeinträchtigt ist; so können Lagerungsdichten von $1,55\text{-}1,85\text{g cm}^{-3}$ bereits die Wurzelwachstumsrate verringern (Mari & Changying 2008, Houlbrooke et al. 1997). In diesem Zusammenhang haben Barzegar et al. (2006) und Ishaq et al. (2001) eine enge Beziehung zwischen der Wurzel-längendichte und der Lagerungsdichte bzw. dem Eindringwiderstand gefunden. Ergän-zend dazu stellten Kuchenbuch & Ingram (2004) an Hand von Untersuchungen an Mais-wurzeln fest, dass eine zunehmende Bodendichte die Durchwurzelung durch eine Verringerung der Anzahl an Lateralwurzeln reduziert, während deren Länge nicht beein-flusst wird. Die Lagerungsdichte lag am Standort Röhu zwischen $1,35$ und $1,65\text{g cm}^{-3}$, wobei auf der 2mal überfahrenen Fläche auch Werte von $1,8\text{g cm}^{-3}$ festgestellt wurden. Infolge von höherer Dichtlagerung des Bodens könnte es zu einer Veränderung der Pflanzenmorphologie kommen, indem z.B. der Wurzeldurchmesser zunimmt. In der vorliegen-den Untersuchung wurden die Änderungen des Wurzeldurchmessers nicht untersucht. Aber Reintam et al. (2009) konnten bei Untersuchungen am Standort Röhu zeigen, dass es zu einer Erhöhung des mittleren Wurzeldurchmessers von Knaulgras in 5cm (um bis zu 0,08mm) und bei Rohrglanzgras in 15cm Tiefe (um bis zu 0,09mm) kam. So konnte auch Glab (2007) bei *Festuca arundinacea* eine Erhöhung des mittleren Wurzeldurchmes-sers auf der befahrenen Grünlandfläche von über 40% (von 0,31 auf 0,44mm) feststellen und Crush et al. (2002) bei *Lolium perenne* eine Erhöhung des Durchmesser um über 0,6mm nachweisen.

Weiterhin kam es zur einer verdichtungsbedingten Abnahme des luftgefüllten Porenvolu-mens im Boden und zu einer ca. 20%igen Reduzierung der Luftleitfähigkeit in 5cm Tiefe durch die verringerte Porenkontinuität. Eine Verschlechterung der Luftversorgung kann problematisch werden, wenn der luftgefüllte Porenraum unter 10% des Bodenvolumens sinkt (Bengough et al. 2006). Gaedeke (1941 zit. in Hammel 1993) gibt für Grünlandve-

getation eine minimale Luftkapazität von 6% an. Nach der AG Boden (2005) werden Luftkapazitäten von unter 5Vol% als gering eingestuft. In der vorliegenden Arbeit sind die Werte für die Luftkapazität am Standort Röhu auf den verdichteten Flächen im mittleren bis geringen Bereich eingestuft. Aber im September gibt es bei Knaulgras auf der zweimal überfahrenen Fläche auch Werte von nur 2Vol.% (nämlich dort, wo die Abnahme in der Wurzeloberflächendichte signifikant war). Hinsichtlich der Auswirkung der reduzierten Luftkapazität auf das Pflanzenwachstum haben Douglas & Crawford (1998) auf Grünland zwischen der Ertragsreduktion und dem luftgefüllten Porenraum im Boden eine Korrelation nachgewiesen: Je geringer der Anteil an luftgefüllten Poren ist, desto größer ist der Ertragsverlust. Weiterhin kommt es durch die Abnahme der weiten Grobporen und damit der Einbuße der Luftleitfähigkeit zu einer Verschlechterung des Gasaustauschs zwischen Boden und Atmosphäre, was an der Veränderung des Sauerstoff- bzw. CO₂-Gehaltes der Bodenluft zu erkennen ist. In dem Zusammenhang konnte Czyz (2004) zeigen, dass die Reduzierung der Wurzelmasse von Gerste auf die Verschlechterung der Luftversorgung im Boden zurückzuführen ist, und dass es auf dem verdichteten Boden eine signifikante negative Korrelation zwischen der Sauerstoffdiffusionsrate und der Lagerungsdichte gibt. Watson & Kelsey (2006) haben festgestellt, dass es durch die Verringerung der Sauerstoffdiffusionsrate zu einer Abnahme der Feinwurzeldichte bei *Quercus palustris* kommt. Die Verschlechterung der Sauerstoffversorgung der Wurzeln bzw. das Fehlen von ausreichender O₂-Konzentration im Boden führen zur Abnahme der Wurzelatmungsaktivität, wodurch es zu verschlechterter Wasser- und Nährstoffaufnahme kommt (Gregory 2006b, Conlin & Driessche 2000).

Weiterhin gibt es in der Literatur Angaben zur Reduzierung der Durchwurzelungsintensität im Grünland auch ohne deutliche Änderungen von bodenphysikalischen Parametern. Stahl et al. (2009) haben in einem Überfahrungsversuch auf trockenen Grünlandböden keine Unterschiede in der Vorbelastung und Lagerungsdichte festgestellt. Aber es kam zu bis zu 60% Reduzierung der Wurzellängendichte in 5cm Tiefe und zu einem Ertragsrückgang von über 50%. Bei Untersuchungen von Diepolder et al. (2009) fanden innerhalb von vier Jahren 13 Überfahrten Rad an Rad mit einem Schlepper statt. Am Ende des Versuchs wurden bei der Lagerungsdichte keine Unterschiede zwischen dem unbelasteten und dem belasteten Dauergrünland festgestellt, aber auf den befahrenen Parzellen sank der Trockenmasse-Ertrag im Mittel um ca. 12%. So liegt der Grund für die Abnahme der Wurzeloberflächendichte darin, dass es durch die dynamische Bodenbelastung zu scherenden und kompressiven Kräften kommt, welche die Wurzeln direkt schädigen. Die Wurzeln können dann zerreißen, folglich ist die Wasser- und Nährstoffaufnahme durch die geschädigten Wurzeln begrenzt. In dem Zusammenhang war in der vorher beschriebenen Untersuchung von Diepolder et al. (2009) die Stickstoff-Aufnahme auf dem belasteten

Dauergrünland um 17% geringer als auf dem unbelasteten. Die Beschädigungen der Pflanzen bzw. Wurzeln könnte auch ein Grund für die Reduzierung der Wurzeloberflächendichte sowohl am Standort Röhu als auch am Standort Hohenschulen sein. Die Narbenschädigung und der Wurzelabriß sind vor allem dann groß, wenn man schwere Schlepper und Großmaschinen in Feuchtperioden einsetzt (Diepolder & Rieder 2006), was der Fall in Hohenschulen war.

Am Standort Hohenschulen war das Wurzellängenwachstum auf der Fläche mit mehr Graspflanzen in 10cm Tiefe um bis zu 57% verringert. Auf der Fläche mit mehr Leguminosenpflanzen lag die Abnahme zwischen 12-27% in der untersuchten Tiefe. Ein Grund für die Abnahme des Wurzelwachstums kann wie vorher erwähnt in den beschädigten Wurzeln bzw. Pflanzen liegen. Als einen weiteren Grund kann man die Änderungen der Bodenstruktur nach der ersten Überfahrt sehen, welche in Bodenhomogenisierung resultierte. Demzufolge war der Boden wieder im Erstschrumpfungsbereich (siehe auch Kapiteln 4.5.1 und 4.5.2) und nach den ersten Quellungs- und Schrumpfungszyklen ist wahrscheinlich ein Prismengefüge entstanden. Die Form bzw. Größe der Bodenaggregate kann entscheidend für die Wasser- und Nährstoffaufnahme sein. In dem Zusammenhang konnten Alexander & Miller (1991) zeigen, dass das Pflanzenwachstum in Form von oberirdischer Trockenmasse bei Mais deutlich besser ist auf einem Boden mit kleineren Aggregaten als auf einem mit größeren. Der Grund dafür ist, dass im Boden mit größeren und ungleichmäßigeren Aggregaten (= vertikale und horizontale Achse ungleich lang) die für den Wasser- und Lufttransport verantwortlichen Grobporen ungleichmäßig verteilt sind und eine gleichmäßige Durchwurzelung behindern (Becher 2000). Unter Berücksichtigung der Darcy-Gleichung verschlechtert sich die Aufnahmefähigkeit der Wurzeln für Wasser und Nährstoffe, da längere Fließstrecken den Wasserfluss zur Wurzel reduzieren.

Ein Indiz für die ungleichmäßige Verteilung der Wurzeln im Boden nach Verdichtung ist, dass es in 5cm Tiefe im Juli zu einer 20%igen Erhöhung der Wurzeloberflächendichte auf der Fläche mit mehr Graswurzeln kam. Der Grund dafür ist, dass die Wurzeln in die Richtung des geringsten Widerstands wachsen - ist die Bodenfestigkeit größer als der Wachstumsdruck der Wurzeln, ändern sie ihre Wachstumsrichtung. Im Boden der überfahrenen Fläche liegen vermutlich infolge Homogenisierung und anschließender Normalschrumpfung Prismen als Gefügeform vor. Aufgrund von Spannungsverteilung im Boden während der Aggregatentwicklung sind Prismen in horizontaler Richtung weniger verdichtet als in vertikaler Richtung, d.h. die Pflanzenwurzeln können leichter von der Seite her in Prismen einwurzeln als in vertikaler Richtung (Horn et al. 1987). In dem Zusammenhang konnte auch Glab (2007) bei *Festuca arundinacea* eine höhere Wurzellängendichte nach zweimaliger Überfahrung feststellen und hat dies mit einem vermehrten horizontalen Wurzelwachstum erklärt.

Die Beeinträchtigung der Durchwurzelung, Veränderung der Wurzelmorphologie und damit einhergehender Verschlechterung der Wasser- und Nährstoffaufnahme, führten zu verminderterem Sprosswachstum und damit zu Ertragsreduktionen. Dies konnten Schmeer et al. (2009a) auf der für diese Arbeit beprobten Versuchsfläche an Hand einer deutlichen Abnahme des Trockenmasseertrags beobachten. So sind durch die Bodenverdichtung Ertragsdepressionen von bis zu 11%, vor allem nach dem ersten Schnitt, zu verzeichnen. In der Literatur werden im Grünland Ertragsabnahmen von 10 bis 76% festgestellt (Diedpolder et al. 2009, Glab 2008, Kopec & Glab 2003, Jorajurai & Draghi 1997, Frame & Merrilees 1996, Douglas 1994, Douglas & Crawford 1993).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Intensität der Veränderungen der Bodeneigenschaften zum einen vom Kontaktflächendruck der im Versuch verwendeten Maschinen und zum anderem vom Bodenwassergehalt während der Befahrung abhängig war. So fanden am Standort Röhu die beiden Überfahrten mit Traktor und Güllefass (Kontaktflächendruck 118kPa) auf sehr trockenem Boden statt ($pF=2,7-3$). Folglich kam es hier nur zu leichten Änderungen der Lagerungsdichte und zu einer geringen Porenkomprimierung. Aber durch den scherend wirkenden Spannungseintrag wurde die gesättigte Wasser- und Luftleitfähigkeit verringert. Im Gegensatz dazu lag der Kontaktflächendruck beim Standort Vorbuse bei 258kPa und die Bodenfeuchte war nahe der Feldkapazität, sodass die Änderungen der Bodenstruktur und -funktionen weitaus deutlicher zu erkennen waren. Durch die Zunahme der Dichtlagerung kam es zu einer Reduzierung der weiten Grobporen und gleichzeitiger Zunahme der engen Grob- und Mittelporen. Darüber hinaus wurden die gesättigte Wasser- und Luftleitfähigkeit deutlich reduziert. Weiterhin führte das Überschreiten der Bodeneigenstabilität zu einer Zunahme der Lagerungsdichte sowie zu Strukturzerstörung. So stieg die Anzahl der Korn-Korn-Kontaktpunkte an und dies führte zu höheren Kohäsionswerten. Am Standort Hohenschulen war der Boden bei der ersten Überfahrt am feuchtesten ($pF=1,3$) und der Kontaktflächendruck des zur Überfahrt verwendeten Traktors mit Güllefass ca. 5mal höher als die errechnete Strukturstabilität des Bodens. Damit kam es im Zuge der Überfahrt zu einer Verknetung und Homogenisierung des Bodens. Diese Strukturzerstörung konnte anhand der Abnahme des Winkels der inneren Reibung verdeutlicht werden. Da die Bodenproben ca. 4 Monate nach der Überfahrt entnommen wurden, erfuhr der Oberboden z.T. durch Wurzeln induzierte hohe Austrocknungsgrade, die im Boden Normalschrumpfungsprozesse bewirkten und so zur Rissbildung und damit zu einem höheren Anteil an Makroporen führten. Ferner kann man feststellen, dass durch die Veränderung der Bodenstruktur, infolge von Bodenverdichtung es zur Abnahme sowohl der Wurzeloberflächendichte als auch des Wurzeltrockengewichts auf den beiden untersuchten Standorten Hohenschulen und Röhu kam. In Hohenschulen wurden in den Gras-dominierten Flächen in 5cm Tiefe

mehr Wurzeln auf der einmalig befahrenen Fläche als auf der Kontrollfläche gefunden, was auf die erhöhte Orientierung der Wurzeln in vertikaler Richtung zurückgeführt wurde.

5 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Stabilisierungseffekt auf Böden durch Grünlandpflanzenwurzeln und ihre Beziehung zur mechanischen Bodenbelastung durch landwirtschaftliche Maschinen im Grünland. Gerade bei der intensiven Grünlandbewirtschaftung mit häufiger Schnittnutzung und Düngungsgabe, steht die Bodenstruktur durch die wiederholten Überfahrungen unter großem Druck, zumal die Erzeugung hochwertigen Futters einen frühen ersten Schnitt erfordert, wodurch häufig auf noch feuchtem und instabilem Boden gefahren wird. Um die negativen Folgen einer Bodendeformation durch Grünlandbewirtschaftung zu minimieren, bedarf es der zusätzlichen Strukturerhaltung oder -verbesserung in Form der armierenden Wirkung der Wurzeln. Anhand ungestörter Proben wurden folgende bodenphysikalische Stabilitätskennwerte erfasst: Vorbelastung, Kohäsion und Winkel der inneren Reibung sowie Porengrößenverteilung und Lagerungsdichte. Die Auswirkung von Überfahrungen auf Bodenfunktionen wurde anhand der Veränderungen von Wasser- und Luftleitfähigkeit erfasst. Wurzeloberflächendichte sowie die Zugfestigkeit einzelner Wurzeln wurden ermittelt und anschließend mit dem Wurzelmodell von Wu und Waltron (1998) verrechnet. Als Versuchsfaktoren wurden Pflanzenart (Knaul- und Rohrglanzgras sowie Luzerne), Bestandeszusammensetzung (mit mehr Gras- bzw. mehr Leguminosenpflanzen), Tiefe (5, 10, 20cm), Überfahrungshäufigkeit (unbefahren, mit einer und mit zwei Überfahrten) und die Zeit unter permanentem Pflanzenbewuchs (4 bzw. 1,5 Jahre) variiert. Die Beprobung erfolgte an drei Standorten, zwei davon in Estland (Rõhu und Vorbuse), einer in Deutschland (Hohenschulen).

In der Arbeit wurden folgende Fragestellungen betrachtet:

- *Wie können die Pflanzenwurzeln die Bodenstruktur verändern und welche Stabilisierungseffekte haben verschiedene Pflanzenwurzeln/Pflanzenbestände auf die Bodenstruktur?*

In der vorliegenden Untersuchung wurde festgestellt, dass die Pflanzenwurzeln die Bodenstruktur über die Beeinflussung der Lagerungsdichte und der Porengrößenverteilung ändern können. So wurden auf der Fläche mit mehr Leguminosen deutlich höhere Lagerungsdichtewerte am Standort Hohenschulen festgestellt, der Grund dafür kann in der Verschiebung der Bodenpartikel beim Hineinwachsen der Wurzeln in den Boden liegen. Weiterhin wurden auf der Fläche mit mehr Graspflanzen höhere Wurzeloberflächendichten und größere Gehalte an organischem Kohlenstoff (C_{org}) im Vergleich zu derjenigen mit mehr Leguminosen festgestellt. Der größere Anteil an organischer Substanz führte zu geringeren Lagerungsdichtewerten und zu Änderungen der Porengrößenverteilung, die eine Erhöhung der Mittelporen sowie engen Grobporen beinhaltete.

Des Weiteren haben die Pflanzenwurzeln die Porenfunktionen im Hinblick auf die gesättigte Wasser- und Luftleitfähigkeit beeinflusst. Somit waren die Leitfähigkeiten im gut durchwurzelten Boden in 5cm Tiefe durch das Hineinwachsen der Wurzeln in Poren deutlich geringer als in 20cm Tiefe (in Hohenschulen und Röhu). Ferner war die gesättigte Wasserleitfähigkeit im Oktober geringer als im Juli durch eine Zunahme des Wurzelwerkes gegenüber dem Sommer. Wasseraufnahme und Wurzelwachstum führen folglich zu sich mit der Zeit ändernden Funktionswerten.

Die Pflanzenwurzeln können die Bodenstabilität erhöhen, die Wirkung hängt dabei von der Durchwurzelungsintensität ab: der maximale Scherwiderstand war am Standort Hohenschulen und am Standort Röhu (bei Knaulgras) in der gut durchwurzelten Tiefe von 5cm im Vergleich zu 20cm Tiefe (wo es wesentlich weniger Wurzeln gibt) deutlich höher. Die Erhöhung des Scherwiderstandes resultierte aus höheren Werten der Kohäsion, wobei keine Änderungen des Winkels der inneren Reibung festgestellt wurden. Weiterhin hängt das Ausmaß des Wurzelstabilisierungseffektes von der Art der Pflanzenwurzeln bzw. der Bestandeszusammensetzung und der Wurzelverteilung im Boden ab. In dieser Untersuchung wurde festgestellt, dass die Zugfestigkeit mit abnehmendem Wurzeldurchmesser steigt. Außerdem sind die gemessenen maximalen Scherwiderstandswerte und die berechnete Erhöhung des maximalen Scherwiderstandes bzw. der Kohäsion durch Wurzeln (c_w) auf der Fläche mit mehr Grasplänen infolge der größeren Wurzelloberflächendichte höher. Die c_w -Werte zeigten die richtige Tendenz einer Stabilisierung auf, überschätzten aber im Vergleich zu den gemessenen Ergebnissen deutlich den Stabilisierungseffekt der Wurzeln. Des Weiteren wurden mit steigendem Gehalt an organischem Kohlenstoff im Boden (C_{org}) höhere Werte des Scherwiderstands und des Rebounds festgestellt.

Im Hinblick auf die mechanische Bodenbelastung wurde festgestellt, dass die Stabilisierungseffekte von Pflanzenwurzeln auflastabhängig waren, nämlich am deutlichsten bei einer Auflast von 40kPa, während bei 70-100kPa die Korrelation zwar noch zu erkennen, aber verringert war. Bei 200-400kPa gab es keine Korrelation mehr. Damit finden die Stabilisierungseffekte durch Pflanzenwurzeln nur bis zu einer Normalspannung von 100kPa statt. Bei Belastung >100kPa wird die Eigenstabilität des Bodens überschritten, und somit spielen die Wurzeln als vertikale „Stützelemente“ des Bodens keine Rolle mehr. Außerdem wird die durch Wurzeln hervorgerufene Aggregierung sowie das Vernetzen und Zusammenhalten von Boden bei hohen Auflasten zerstört und kann der Scherung nicht mehr entgegen wirken. Dies konnte man an Hand der Daten des maximalen Scherwiderstands in 5 und 20cm Tiefe und der Korrelation zwischen c_w und den tatsächlich gemessenen Scherwiderstandswerten sowie an den Korrelationen zwischen dem C_{org} -Gehalt und dem maximalen Scherwiderstand bzw. dem Rebound feststellen. Somit sind die Stabili-

sierungseffekte von Pflanzenwurzeln begrenzt und wirken am deutlichsten in jenem Boden, dessen Eigenstabilität nicht deutlich überschritten ist.

- *Welche Auswirkungen hat die vorherige Bodenbearbeitung als Ackerstandort auf die Bodenstruktur in Abhängigkeit von der Dauer der Grünlandnutzung?*

In der Untersuchung konnte man feststellen, dass am Standort Hohenschulen die Aggregationsprozesse auf der Fläche mit vorheriger konservierender Bodenbearbeitung viel früher angefangen haben und daher bereits bei der Umstellung auf Grünland deutlich ausgeprägter waren. Dies erhöhte die Werte der Lagerungsdichte, der gesättigten Wasser- und Luftleitfähigkeit sowie der Vorbelastung.

Im Hinblick auf die Zeit unter Grünland konnte man einen ähnlichen Verlauf im Vergleich der Standorte Hohenschulen und Vorbuse feststellen. Die beiden Flächen wurden vor der Ansaat des Grünlands gepflügt und waren im Moment der Probennahme seit 4 bzw. 1,5 Jahren unter permanentem Pflanzenbestand. Durch die längere Aggregationsdauer sind sowohl die Lagerungsdichte als auch der Winkel der inneren Reibung (die den Aggregationsgrad des Bodens repräsentiert) in Hohenschulen höher.

- *Welche Auswirkungen hat die Überfahrungshäufigkeit mit verschiedenen Kontaktflächendrücken im Grünland bei unterschiedlichen Bodenwassergehalten auf die Bodeneigenschaften und das Wurzelwachstum unterschiedlicher Pflanzenbestände?*

Am Standort Röhu fanden die Überfahrten mit geringem Kontaktflächendruck auf sehr trockenem Boden statt, so dass es nur zu leichten Änderungen von Lagerungsdichte und Vorbelastung und zu einer geringen Porenkomprimierung kam. Aber durch den dynamischen Spannungseintrag wurde die Porenkontinuität verringert und dadurch die gesättigte Wasser- und Luftleitfähigkeit reduziert. Am Standort Vorbuse traten im Anschluss an die Überfahrung mit mittelschwerer Maschine bei feuchtem Boden Porenverfeinerung und Verringerung der gesättigten Wasser- und Luftleitfähigkeit auf. Die Erhöhung der Korn-Korn-Kontaktpunkte führte zu höherer Lagerungsdichte, Vorbelastung und Kohäsion. Am Standort Hohenschulen war der Boden bei der ersten Überfahrt sehr feucht und der Kontaktflächendruck sehr hoch. Im Zuge der Überfahrt kam es vermutlich zu Verknetung und Homogenisierung des Bodens, wie anhand der Abnahme des Winkels der inneren Reibung nachgewiesen werden konnte. Da die Bodenproben ca. 4 Monate nach der Überfahrt entnommen wurden, haben Normalschrumpfungsprozesse eine erneute Rissbildung bewirkt, die zu einem höheren Anteil an Makroporen führte.

Durch die Veränderung der Bodenstruktur infolge von Bodenverdichtung wurden sowohl die Wurzeloberflächendichte als auch das Wurzeltrockengewicht auf den Standorten Hohenschulen und Röhu verringert. Des Weiteren wurden in Hohenschulen auf der Fläche mit mehr Grasfarnen in 5cm Tiefe mehr Wurzeln auf der einmalig befahrenen Fläche als

auf der Kontrollfläche gefunden, dies ist auf die erhöhte Orientierung der Wurzeln in horizontaler Richtung zurückzuführen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass, obwohl die Wurzeln ganz wesentlich zur zusätzlichen Stabilisierung des Bodens beitragen, die eigenen Ergebnisse auch darauf hinweisen, dass die stabilisierende Wirkung durch eine zu große Belastung wieder zerstört wird. Durch die mechanischen Belastungen im Zuge von Bodenbearbeitungsmaßnahmen kommt es wiederum im Grünland zu negativen Änderungen der Bodenstruktur und -funktionen im Hinblick auf das Wurzelwachstum.

6 Summary

The main purpose of this work was to study the stabilisation effect of grassland plants on soil in connection to agricultural machinery loads on grasslands. Grassland management has become more intensive with grass being cut and fertilised several times over the season which leads to more passes with high pressure. Moreover, the production of high quality fodder requires the first cut of grass to be done early in the growing season. This usually means that agricultural machinery would be driven over still wet soils. In order to minimize the negative consequences of a soil deformation by grassland management additional structural preservation or improvement is required by the reinforcing effect of the roots. On the basis of undisturbed samples the following soil physical stability characteristics were measured: precompression stress, cohesion and the angle of internal friction as well as pore size distribution and bulk density. To determine the effect of soil compaction on soil functions the saturated water and air conductivity were measured. Root dry weight, root surface area and root tensile strength were evaluated. The contribution of the roots to soil reinforcement was calculated with the reinforcing model after Wu & Waltron (1998). Experimental factors were plant species (*Dactylis glomerata*, *Phalaris arundinacea* and *Medicago sativa*), stand composition (plots containing either more grass or more legumes), soil depths (5, 10 and 20cm), driving frequency (without machinery compaction, with one and two passages), the time period of plant cover (4 or 1,5 years). Undisturbed soil samples were collected at three different locations: Rõhu and Vorbuse in Estonia, and Hohenschulen in Germany.

In this investigation the following aspects were examined:

- *How can plant roots affect the soil structure and how is this strengthening impact influenced by different kinds of roots and stand compositions?*

The plant roots can affect soil structure either directly, by high root density in the different layers of soil, or indirectly, by soil enrichment with organic substance. In this regard, a relationship between more legumes and higher bulk density could be seen at the experimental site Hohenschulen. One reason for that might be a lateral translocation of soil particles when the root penetrates the soil. Furthermore, the plot dominated by grass plants had a higher root surface area and a higher organic carbon content than the area with more legumes. This led to changes in soil pore size distribution as exhibited by an increase of the medium and narrow coarse sized pores in the soil.

Additionally, plant roots influence pore functionality, namely saturated hydraulic and air conductivity. Hence, the conductivities in the well-rooted depth (5cm) were distinctively lower than in 20cm depth (at Hohenschulen and Rõhu) due to flow-impeding roots that

grew within the pores. Also, the saturated water conductivity was lower in October compared to July due to the increased root system.

Plant roots can increase soil stability, however, the extent depends on the rooting density: the maximum shear resistance at Hohenschulen and at Röhu (*Dactylis glomerata*) in the well-rooted depth of 5cm was much higher compared to 20cm depth (where there were pronouncedly less roots). The increase in shear resistance originated in the increase of cohesion while the angle of internal friction remained unaltered. The soil reinforcement observed in this study, depended not only on root density in different soil layers but also on root type and root tensile strength, as well as on root distribution in the soil. The root tensile strength increased with increasing root diameter. The measured maximum shear strength and the calculated increase in soil cohesion due to roots (c_w) were higher in the areas with higher proportion of grass plants and with higher root surface density. C_w values indicated the right tendency of increasing stability due to plant roots, however, the measured values were overrated distinctively. Furthermore, increasing contents of organic carbon correlated well with higher shear resistance and rebound.

With regard to mechanical loading, the stabilisation effect of plant roots depended on the load itself as reflected by altering relationships. At 40kPa load the relationship was very distinct while it diminished for 70-100kPa and vanished at 200kPa. Hence, the stabilisation impact of plant roots is limited to a normal stress of 100kPa. Loads exceeding this value also exceed the internal soil strength, thus the roots lose their ability to vertically reinforce the soil. Furthermore, the aggregation, the bonding and enmeshing of particles caused by roots is destroyed at high loads and hence cannot prevail over shearing forces as was reflected by maximum shear resistance in 5 and 20cm depth and the correlation between c_w and measured shear resistance and the rebound, respectively. Hence, the stabilisation impact of plant roots is limited and most pronounced in soils whose internal strength is actually not exceeded.

- *What kind of effect had the previous soil management during cropping on soil stability with regard to the duration of landuse as grassland?*

The investigations showed that at Hohenschulen the aggregation processes started much earlier on the area with previously conservational soil management than with conventional soil management. Thus, the aggregation level was already advanced when grassland was established and hence increased bulk density, saturated water and air conductivity as well as precompression stress.

With regard to the duration of grassland landuse a similar development was found at Hohenschulen and Vorbuse. Both areas were ploughed before the establishment of grassland and experienced grassland landuse since 4 and 1.5 years, respectively, at the mo-

ment of sample taking. Due to increased duration of aggregation processes in Hohen-schulen both the bulk density and the angle of internal friction were increased, the latter indicating the level of aggregation.

- *What kind of effect had the passing frequency at different contact area pressures in grasslands at different soil water contents on soil properties and the root growth of different stands?*

At Rõhu, where the traffic took place with low contact area pressure and the soil was dry, only very small changes in the ground stability values were measured and small pore compression was found. Due to the shearing the pore continuity was destroyed and thereby saturated water and air conductivity were decreased. At Vorbuse, where the contact area pressure was medium and soil was moist, the changes in the soil properties due to soil compaction were much more pronounced: a drop in the amount of macropores and an increase in the amount of the medium size pores, reduction of the saturated wa-ter and air conductivity. The increase of the contact area pressure led to higher values of soil bulk density, precompression stress and cohesion. At Hohenschulen the soil was very wet when the heavy agricultural machinery passed over. Based on the reduction of the angle of internal friction it was concluded that in the course of the machinery passage over this soil it came to kneading and homogenization. By the time of the soil samples collection at this location (approximately 4 months after the passage of the machinery) soil had shrunken and big cracks had been formed in it resulting in a higher proportion of macropores.

Soil compaction resulted in a decrease of both root surface density and root dry weight at Rõhu and at Hohenschulen. Furthermore, there were more roots at Hohenschulen in 5cm depth on the areas with more grass plants due to a single passage compared to no pas-sage which is ascribed to a rooting anisotropy as the roots favour horizontal over vertical growth.

In a nutshell it can be concluded that although roots contribute pronouncedly to soil sta-bility the own results also indicate the destruction of this ability due to very high loads. This causes a denser packing, reduces air conductivity and increases soil moisture at a long-term range. Subsequently, new roots face severe impediments thus reducing roots growth.

7 Literaturverzeichnis

- Abernethy, B. & Rutherford, I.D. 2001. The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. *Hydrological Processes*, 15 (1): 63-79.
- Abiven, S., Menasseri, S. & Chenu, C. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis. *Soil Biology & Biochemistry*, 41 (1): 1-12.
- AG Boden, 2005. Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Auflage, Hannover. 438 Seiten.
- Akhter, J., Murray, R., Mahmood, K., Malik, K.A. & Ahmed, S. 2004. Improvement of degraded physical properties of a saline-sodic soil by reclamation with kallar grass (*Leptochloa fusca*). *Plant & Soil*, 258 (1): 207-216.
- Alakukku, L. 1999. Subsoil compaction due to wheel traffic. *Agricultural & Food Science in Finland*, 8 (4-5): 333-351.
- Alessa, L. & Earnhart, C.G. 2000. Effects of soil compaction on root and root hair morphology: implications for campsite rehabilitation. In: Cole, D.N., McCool, S.F., Borrie, W.T. & O'Loughlin, J. (Hrsg.) *Wilderness science in a time of change conference-Volume 5: Wilderness ecosystems, threats, and management*; 1999 May 23-27; Missoula, MT. Proceedings RMRS-P-15-VOL-5. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 99-104.
- Alexander, K.G. & Miller, M.H. 1991. The effect of soil aggregate size on early growth and shoot-root ratio of maize (*Zea mays* L.). *Plant & Soil*, 138: 189-194.
- Ali, F.H. & Osman, N. 2007. Soil-roots composite: correlation between shear strength and some plant properties. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, V12D.
- Amato, M. & Pardo, A. 1994. Root length and biomass losses during sample preparation with different screen mesh sizes. *Plant & Soil*, 161 (2): 299-303.
- Amellal, N., Burtin, F., Bartoli, F. & Heulin, T. 1998. Colonization of Wheat Roots by an Exopolysaccharide-Producing *Pantoea agglomerans* Strain and Its Effect on Rhizosphere Soil Aggregation. *Applied & Environmental Microbiology*, 64 (10): 3740-3747.
- Angers, D.A. & Caron, J. 1998. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. *Biogeochemistry*, 42: 44-72.
- Angers, D.A. & Mehuy, G.R. 1988. Effects of cropping on macro-aggregation of a marine clay soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 68: 723-132.
- Arredondo, J.T. & Johnson, D.A. 1998. Clipping effects on root architecture and morphology of 3 range grasses. *Journal of Range Management*, 51: 207-214.
- Arvidsson, J. & Keller, T. 2004. Soil precompression stress: I. A survey of Swedish arable Soils. *Soil & Tillage Research*, 74: 85-95.
- Arvidsson, J. 1999. Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction. *Plant & Soil*, 208: 9-19.
- Atwell, B.J. 1993. Response of roots to mechanical impedance. *Environmental & Experimental Botany*, 33 (1): 27-40.
- Atwell, B.J. & Newsome, J.C. 1990. Turgor pressure in mechanically impeded lupine roots. *Australian Journal of Plant Physiology*, 17: 49-56.
- Auerswald, K. & Schnyder, H. 2009. Böden als Grünlandstandorte. In: Blume H.-P., Felix-Henningsen P., Frede W.R., Horn H. & Stahr, K. (Hrsg.) *Handbuch der Bodenkunde*, Ecomed, Landsberg/Lech 31, 1-15.
- Aunap, R., Ainsaar, L., Rattas, M., Mardiste, H., Jaagus, J., Kull, A., Ahas, R., Aasa, A., Järvet, A., Rooma, I., Tarre, A., Kuusk, V., Arold, I., Remm, K., Timm, U., Tammaru, T., Kask, I., Pae, T., Liiber, Ü., Rõivas, T., Thomson, H., Vessin, U. & Kurs, O. 2007. *Eesti Atlas* (Estonian Atlas). Tartu, Avita, 56 Seiten.
- Baldock, J.A. 2002. Interactions of organic materials and microorganisms with minerals in the stabilization of soil structure. In: Huang, P.M., Bollag, J.-M. & Senesi, N. (Hrsg.) *Interactions Between Soil Particles and Microorganisms. Impact on the Terrestrial Environment*. John Wiley & Sons Ltd., 85-131.
- Ball, B.C., Scott, A. & Parker, J.P. 1999. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil & Tillage Research*, 53: 29-39.
- Barzegar, A.R., Nadian, H., Heidari, F., Herbert, S.J. & Hashemi, A.M. 2006. Interaction of soil compaction, phosphorus and zinc on clover growth and accumulation of phosphorus. *Soil & Tillage Research*, 87 (2): 155-162.

- Baumgartl, T. 1991. Spannungsverteilung in unterschiedlich texturierten Böden und ihre Bedeutung für die Bodenstabilität. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung & Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel.
- Baumgartl, T. & Horn, R. 1991. Effect of aggregate stability on soil compaction. *Soil & Tillage Research*, 19: 203-213.
- Bearden, B.N. & Peterson, L. 2000. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on soil structure and aggregate stability of a vertisol. *Plant & Soil*, 218: 173-183.
- Becher, H.H. 2000. Gefüge/Morphologie. In: Horn, R., Frede, H.-G., Fischer, W.R., Felix-Henningsen, P., Blume, H.-P. & Stahr, K. (Hrsg.) *Handbuch der Bodenkunde*. Ecomed, Landsberg, 1-19.
- Bengough, A.G., Bransby, M.F., Hans, J., McKenna, S.J., Roberts, T.J. & Valentine, T.A. 2006. Root response to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. *Journal of Experimental Botany*, 57: 437-447.
- Bengough, A.G., Croser, C. & Pritchard, J. 1997. A biophysical analysis of root growth under mechanical stress. *Plant & Soil*, 189: 155-164.
- Bengough, A.G. & Mullins, C.E. 1991. Penetrometer resistance, root penetration resistance and root elongation rate in two sandy loam soils. *Plant & Soil*, 131: 59-66.
- Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Epis, T. & Morlotti, E. 2009. Root cohesion of forest species in the Italian Alps. *Plant & Soil*, 324: 71-89.
- Bischetti, G.B., Chiaradia, E.A., Simonato, T., Speziali, B., Vitali, B., Vullo, P. & Zocco, A. 2005. Root strength and root area of forest species in Lombardy (Northern Italy). *Plant & Soil*, 278: 11-22.
- Blackwell, P.S., Ringrose-Voase, A.J., Jayawardane, N.S., Olsson, K.A., McKenzie D.C. & Mason, W.K. 1990. The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to characterise macropore structure and saturated hydraulic conductivity of clay soils. *Journal of Soil Science*, 41: 215-228.
- Boeuf-Tremblay, V., Plantureux, S. & Guckert, A. 1995. Influence of mechanical impedance on root exudation of maize seedlings at two developmental stages. *Plant & Soil*, 172: 279-287.
- Böhm, W. 1979. Methods of studying root systems. Berlin, Springer, 188 Seiten.
- Bohn, H., McNeal, B. & O'Conner, G.A. 2001. Soil chemistry. 3. Auflage, New York: John Wiley & Sons, 320 Seiten.
- Bolling, I. 1984. Bodenverdichtung und Bereifung bei landwirtschaftlichen Fahrzeugen. *Landtechnik*, 39 (10): 449-452.
- Bolt, G.H., Bruggenwert, M.G.M. & Kamphorst, A. 1978. Adsorption of Cations by Soil. In: Bolt, G.H. & Bruggenwert, M.G. (Hrsg.) *Soil Chemistry: Basic Elements (Developments in Soil Science, Vol 5a)* 2. Auflage. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 54-90.
- Boone, F.R. & Veen B.W. 1994. Mechanisms of crop response to soil compaction. In: Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C. (Hrsg.) *Soil Compaction in Crop Production*. Amsterdam, Elsevier, 237-264.
- Boucher, J.F., Bernier, P.Y. & Munson, A.D. 2001. Radiation and soil temperature interactions on the growth and physiology of eastern white pine (*Pinus strobus* L.) seedlings. *Plant & Soil*, 326: 165-174.
- Braudeau, E., Sene, M. & Mohtar, R.H. 2004. Characterizing nonrigid aggregated soil-water medium using its shrinkage curve. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 359-370.
- Breland, T.A. & Hansen, S. 1996. Nitrogen mineralization and microbial biomass as affected by soil compaction. *Soil Biology & Biochemistry*, 28: 655-663.
- Bruand, A., Cousin, I., Nicoulaud, B., Duval, O. & Bégon, J.C. 1996. Backscattered electron scanning images of soil porosity for analyzing soil compaction around roots. *Soil Science Society of America Journal*, 60: 895-901.
- Brunotte, J. 2007. Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur Minderung von Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide. Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig.
- Canarache, A., Horn, R. & Colibas, I. 2000. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. *Soil & Tillage Research*, 56 (3-4): 185-196.
- Carminati, A., Kaestner, A., Lehmann, P. & Flühler, H. Unsaturated water flow across soil aggregate contacts. *Advances in Water Resources*, 31: 1221-1232.
- Casagrande, A. 1936. The determination of preconsolidation load and its practical significance. Proceedings of the 1th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, 60-64.
- Cazzuffi, D., Corneo, A. & Crippa, E. 2006. Slope stabilisation by perennial "gramineae" in Southern Italy: plant growth and temporal performance. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24: 429-447.
- Clark, L.J., Whalley, W.R. & Barraclough, P.B. 2003. How do roots penetrate strong soil? *Plant & Soil*, 255: 93-104.

- Clark, L.J. & Barraclough, P.B. 1999. Do dicotyledons generate greater maximum axial root growth pressures than monocotyledons? *The Journal of Experimental Botany*, 50: 1263-1266.
- Cochrane, H.R. & Aylmore, L.A.G. 1994. The effects of plant roots on soil structure, *Proceedings of 3rd Triennial Conference "Soils 94"*, 207-212.
- Cofie, P., Koolen, A.J. & Perdok, U.D. 2000. Measurement of stress-strain relationship of beech roots and calculation of the reinforcement effect of tree roots in soil-wheel systems. *Soil & Tillage Research*, 57 (1-2): 1-12.
- Comino, E., Marengo, P. & Rolli, V. 2010. Root reinforcement effect of different grass species: A comparison between experimental and models results. *Soil & Tillage Research*, 110 (1): 60-68.
- Conlin, T.S.S. & Driessche, R. 2000. Response of soil CO₂ and O₂ productivity sites in central British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science*, 80: 625-632.
- Cook, A., Marriott, C.A., Seel, W. & Mullins, C.E. 1996. Effects of soil mechanical impedance on root and shoot growth of *Lolium perenne* L., *Agrostis capillaris* and *Trifolium repens* L. *Journal of Experimental Botany*, 47 (301): 1075-1084.
- 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.
- Crush, J.R., Ouyang, L., Eerens, J.P.J. & Stewart, A.V. 2002. The growth of roots of perennial, Italian, hybrid and annual ryegrasses through a high-strength root medium. *Grass & Forage Science*, 57: 322-328.
- Czarnes, S., Dexter, A.R. & Bartoli, F. 2000a. Wetting and drying cycles in the maize rhizosphere under controlled conditions. *Mechanics of the root-adhering soil*. *Plant & Soil*, 221: 253-271.
- Czarnes, S., Hallett, P.D., Bengough, A.G. & Young, I.M. 2000b. Root-and microbial-derived mucilages affect soil structure and water transport. *European Journal of Soil Science*, 51: 435-443.
- Czyz, E.A. 2004. Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. *Soil & Tillage Research*, 79: 153-166.
- Da Veiga, M., Horn, R., Reinert, D.J. & Reichert, J.M. 2007. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from Southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. *Soil & Tillage Research*, 92: 104-113.
- De Baets, S., Poesen, J., Reubens, B., Wemans, K., Baerdemaeker De J. & Muys, B. 2008. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. *Plant & Soil*, 305 (1-2): 207-226.
- De Neve, S. & Hofman, G. 2000. Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues. *Biology & Fertility of Soils*, 30: 544-549.
- Denef, K., Six, J., Merckx, R. & Paustian, K. 2002. Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy. *Plant & Soil*, 246: 185-200.
- Dexter, A.R. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil & Tillage Research*, 11 (3-4): 199-238.
- Dexter, A.R. Horn, R. & Kemper, W.D. 1988. Two mechanisms for age-hardening of soil. *Journal of Soil Science*, 39: 163-175.
- Dexter, A.R. 1987. Mechanics of root growth. *Plant & Soil*, 97: 401-406.
- Diepolder, M., Raschbacher, S., Brandhuber, R. & Kreuter, T. 2009. Auswirkung mechanischer Bodenbelastung auf Dauergrünland. *Neue Versuchsergebnisse*. Schule & Beratung, 8-9: 27-33.
- Diepolder, M. & Raschbacher, S. 2008. Versuch zu Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbelastung auf Ertrag und Futterqualität bei Dauergrünland. *Schule & Beratung*, 7-8: 14-18.
- Diepolder, M. & Rieder, J.B. 2006. Gefährdungspotenziale im Intensivgrünland <http://www.lfl.bayern.de/iab/gruenland/>, Datum des Zugriffs: 05.05.2010.
- Diepolder, M., Schröpel, R., Brandhuber, R., Bauchhenß, J. & Jakob B. 2005. Versuchsergebnisse zur Auswirkung mechanischer Belastung im Intensivgrünland. *Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland & Futterbau*, 7: 210-213.
- Diepolder, M. 2004. Anforderungen an eine intensive und nachhaltige Grünlandbewirtschaftung. <http://www.lfl.bayern.de/iab/gruenland/>, Datum des Zugriffs: 05.05.2010.
- Docker, B.B. & Hubble, T.C.T. 2008. Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species. *Geomorphology*, 100 (3-4): 401-418.
- Donaghy, D.J. & Fulkerson, W.J. 1997. The importance of water-soluble carbohydrate reserves on regrowth and root growth of *Lolium perenne* (L.). *Grass & Forage Science*, 52: 401-407.
- Dorioz, J.M., Robert, M. & Chenu, C. 1993. The role of roots, fungi and bacteria on clay particle organization. An experimental approach. *Geoderma*, 56: 179-194.

- Dörner, J. & Horn, R. 2009. Direction-dependent behaviour of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage. *Soil & Tillage Research*, 102 (2): 225-232.
- Dörner, J. & Horn, R. 2006. Anisotropy of pore functions in structured Stagnic Luvisols in the Weichselian moraine region in N Germany. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 169: 213-220.
- Douglas, J.T. & Crawford, C.E. 1998. Soil compaction effects on utilization of nitrogen from livestock slurry applied to grassland. *Grass & Forage Science*, 53: 31-40.
- Douglas, J.T., Crawford, C.E. & Campbell, D.J. 1995. Traffic systems and soil aerator effects on grassland for silage production. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 60: 261-270.
- Douglas, J.T. 1994. Responses of Perennial Forage Crops to Soil Compaction. In: Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C. (Hrsg.) *Soil Compaction in Crop Production*. Amsterdam, Elsevier, 343-364.
- Douglas, J.T. & Crawford, C.E. 1993. The response of a ryegrass sward to wheel traffic and applied nitrogen. *Grass & Forage Science*, 4 (2): 91-100.
- Drury, C.F., McKenney, D.J. & Findlay, W.I. 1991. Relationships between denitrification, microbial biomass and indigenous soil properties. *Soil Biology & Biochemistry*, 23 (8): 751-755.
- 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, 2009. Ausgabe der Klimadaten <http://www.dwd.de/>, Datum des Zugriffs: 04.03.09.
- Ehlers, W., Werner, D. & Mähner, T. 2000. Wirkung mechanischer Belastung auf Gefüge und Ertragsleistung einer Löss-Parabraunerde mit zwei Bearbeitungssystemen. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 163: 321-333.
- Ehlers, W., Kopke, U., Hesse F. & Bohm, W. 1983. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil & Tillage Research*, 3: 261-275.
- Ekwe, E.I. 1990. Organic matter effects on soil strength properties. *Soil & Tillage Research* 16 (3): 289-297.
- Elsäßer, M. & Grund, S. 2003. Entwicklung von Gemeiner Rispe (*Poa trivialis* L.) - in Abhängigkeit von Nutzungstiefe und Verdichtung des Bodens. *Landinfo*, 5: 9-16.
- Engels, C., Neumann, G., Gahoonia, T., George, E. & Schenk, M. 2000. Assessment of the ability of roots for nutrient acquisition. In: Smit, A.L., Bengough, A.G., Engels, C., van Noordwijk, M., Pellerin, S. & van de Greijn, S.C. (Hrsg.) *Root Research: A handbook of methods*. Springer Verlag, Berlin, 403-459.
- Fan, C.-C. & Chen, Y.-W. 2010. The effect of root architecture on the shearing resistance of root-permeated soils. *Ecological Engineering*, 36: 813-826.
- Fan, C.-C. & Su, C.-F. 2009. Effect of soil moisture content on the deformation behaviour of root-reinforced soils subjected to shear. *Plant & Soil*, 324 (1-2): 57-69.
- 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 & Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel.
- Fazekas, O. & Horn, R. 2005. Interaction between mechanically and hydraulically affected soil strength depending on time of loading. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 168 (1): 60-67.
- Fink, A. 1992. Dünger und Düngung. VCH-Verlagsgesmbh, Weinheim 488 Seiten.
- Fleige, H. 2000. Ökonomische und ökologische Bewertung der Bodenerosion am Beispiel einer Jungmoränenlandschaft Ostholsteins. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung & Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel.
- Fleige, H. & Horn, R. 2000. Field experiments on the effect of soil compaction on soil properties, runoff, interflow and erosion. *Advances in Geocology* 32, *Catena*, Reiskirchen, 251-258.
- Flowers, M. & Lal, R. 1999. Axle load and tillage effects on the shrinkage characteristics of a Mollic Ochraqualf in northwest Ohio. *Soil & Tillage Research*, 50 (3-4): 251-258.
- Frame, J., Charlton, J.F.L. & Laidlaw, A.S. 1998. Temperate Forage Legumes. Wallingford, UK, CAB International, 327 Seiten.
- Frame J. & Merrilees D.W. 1996. The effect of tractor wheel passes on herbage production from diploid and tetraploid ryegrass swards. *Grass & Forage Science*, 51: 13-20.
- Francis, G.S. & Kemp, R.A. 1990. Morphological and hydraulic properties of a silt loam soil in New Zealand as affected by cropping history. *Soil Use & Management*, 6: 145-151.

- Frei, M. 2009. Validation of a new approach to determine vegetation effects on superficial soil movements. Dissertation, Die Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Professur forstliches Ingenieurwesen.
- Frey, D. 1998. Eignung des Systems Horsch als reduzierte Bodenbearbeitung zur Förderung der Bodenfruchtbarkeit auf Böden des östlichen Hügellandes in Schleswig-Holstein. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel.
- Frost, J.P. 1988. Effects on Crop Yields of Machinery Traffic and Soil Loosening. Part 1. Effects on Grass Yield of Traffic Frequency and Date of Loosening. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 39: 301-312.
- Gent, M., Stokes, A., Salin, F., Mickovski, S., Fourcaud, T., Dumail, J.F. & van Beek, R. 2005. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. *Plant & Soil*, 278: 1-9.
- Gill, R., Burke, I.C., Milchunas, D.G. & Lauenroth, W.K. 1999. Relationship between root biomass and soil organic matter pools in the short grass steppe of eastern Colorado. *Ecosystems*, 2: 226-236.
- Glab, T. 2008. Effects of tractor wheeling on root morphology and yield of lucerne (*Medicago sativa* L.). *Grass & Forage Science*, 63: 398-406.
- Glab, T. 2007. Effect of soil compaction on root system development and yields of tall fescue. *International Agrophysics*, 21: 233-239.
- Glinski, J. & Lipiec, J. 1990. *Soil Physical Conditions and Plant Roots*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 250 Seiten.
- Glüser, C. 2006. Effect of forage cropping treatments on soil structure and relationships with fractal dimensions. *Geoderma*, 131 (1-2): 33-44.
- Goins, G.D. & Russelle, M.P. 1996. Fine root demography in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Plant & Soil*, 185: 281-291.
- Goodman, A.M. & Ennos, A.R. 1999. The Effects of Soil Bulk Density on the Morphology and Anchorage Mechanics of the Root Systems of Sunflower and Maize. *Annals of Botany*, 83: 293-302.
- Graf, F., Frei, M. & Böll, A. 2009. Effects of vegetation on the angle of internal friction of a moraine. *Forest Snow & Landscape Research*, 82 (1): 61-77.
- Gray, D.H. & Sotir, R.B. 1996. *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilisation: A Practical Guide for Erosion Control*. John Wiley & Sons, New York, 378 Seiten.
- Gray, D.H. & Leiser, A. T. 1989. *Biotechnical slope protection and erosion control*. Van Nostrand Reinhold Co, New York, 271 Seiten.
- Greenway, D.R. 1987. Vegetation and slope stability. In: Anderson, M.G. & Richards K.S. (Hrsg.) *Slope stability: geotechnical engineering and geomorphology*. Wiley, Chichester, 187-230.
- Gregory, A.S., Watts C.W., Griffiths B.S., Hallett P.D., Kuan H.L. & Whitmore A.P. 2009. The effect of long-term soil management on the physical and biological resilience of a range of arable and grassland soils in England. *Geoderma*, 153 (1-2): 172-185.
- Gregory, A.S., Watts, C.W., Whalley, W.R., Kuan, H.L., Griffiths, B.S., Hallett, P.D. & Whitmore, A.P. 2007. Physical resilience of soil to field compaction and the interactions with plant growth and microbial community structure. *European Journal of Soil Science*, 58: 1221-1232.
- Gregory, P.J. 2006a. Roots, rhizosphere and soil: the route to a better understanding of soil science? *European Journal of Soil Science*, 57: 2-12.
- Gregory, P.J. 2006b. *Plant Roots: Growth, Activity and Interactions with the Soil*. Wiley-Blackwell, 328 Seiten.
- Griffiths, B.S., Hallett, P.D., Kuan, H.L., Pitkin, Y. & Aitken, M.N. 2005. Biological and physical resilience of soil amended with heavy metal-contaminated sewage sludge. *European Journal of Soil Science*, 56: 197-205.
- Grzebisz, W., Floris, J. & van Noordwijk, M. 1989. Loss of dry matter and cell contents from fibrous roots of sugar beet due to sampling, storage and washing. *Plant & Soil*, 113: 53-57.
- Gysi, M., Ott, A. & Flühler, H. 1999. Infuence of single passes with high wheel load on a structured, unploughed sandy loam soil. *Soil & Tillage Research* 52: 141-151.
- Hähne, K. 1991. Der Einfluss von Gräser- und Gehölzwurzeln auf die Scherfestigkeit von Böden und damit Standsicherheit von Hängen und Böschungen. Dissertation, Institut für Landschaftsbau, Technischen Universität Berlin.
- Hakansson, I. 2005. *Machinery-Induced Compaction of Arable Soils Incidence-Consequences-Counter-Measures*. Swedish University of Agricultural Sciences Department of Soil Science, Uppsala, 109 Seiten.
- Hakansson, I. & Reeder, R.C. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load – extent, persistence and crop response. *Soil & Tillage Research*, 29: 277-304.
- Hallett, P.D. 2008. A brief overview of the causes, impacts and amelioration of soil water repellency - a review. *Soil & Water Research*, 3: 21-29.

- Hallett, P.D., Gordon, D.C. & Bengough, A.G. 2003. Plant influence on rhizosphere hydraulic properties: direct measurements using a miniaturized infiltrometer. *New Phytologist*, 157: 597-603.
- Hallett, P.D. & Young, I.M. 1999. Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity. *European Journal of Soil Science*, 50: 35-40.
- Haltenberger, M. 1926. Landeskunde von Eesti I. Die physische Struktur des Landes. In: *Eesti Vabariigi Tartu Ülikooli toimetused. Acta et commentationes Universitatis Tartuensis (Dorpatensis) Acta et Commentationes Universitatis Dorpatensis. A. Mathematica, physica, medica, Tartu-Dorpat*, 11-77.
- Hammel, K. 1993 Spannungsverteilung und Bodenverdichtung unter profilierten Reifen am Beispiel zweier Böden unter Grünland. Dissertation, Hohenheimer Bodenkundliche Hefte, Universität Hohenheim.
- Hansen, S. 2009. Effect of soil compaction on N₂O emission from a soil fertilized with mineral fertilizer or cattle slurry. *IOP Conference Series: Earth & Environmental Science*.
- Hansen, S., Mæhlum, J.E. & Bakken, L.R. 1993. N₂O and CH₄ fluxes in soil influenced by fertilization and tractor traffic. *Soil Biology & Biochemistry*, 5: 621-630.
- Hartge, K.H. & Horn, R. 2009. Die physikalische Untersuchung von Böden. 4. überarbeitete Auflage. E. Schweizerbart Stuttgart, 178 Seiten.
- Hartge, K.H. & Horn, R. 1999. Einführung in die Bodenphysik. 3. überarbeitete Auflage. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 304 Seiten.
- Hartge, K.H. & Bohne, H. 1983. Der Einfluss der Gefügegeometrie auf die Verdichtbarkeit des Bodens und auf Keimung von Roggen. *Zeitschrift für Kulturtechnik & Flurbereinigung*, 24: 5-10.
- Haynes, R.J. & Naidu, R. 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling Agroecosys*, 51: 123-137.
- Haynes, R.J. & Beare, M.H. 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biology & Biochemistry*, 29: 1647-1653.
- Haynes, R.J., Swift, R.S. & Stephen, R.C. 1991. Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter content, water stable aggregation and clod porosity in a group of soils. *Soil & Tillage Research*, 17: 77-87
- Heil, D. & Sposito, G. 1995. Organic-matter role in illitic soil colloids flocculation: III. scanning force microscopy. *Soil Science Society of America Journal* 59 (1) :266-269.
- Hirth, J.R., McKenzie, B.M. & Tisdall, J.M. 2005. Ability of seedling roots of *Lolium perenne* L. to penetrate soil from artificial biopores is modified by soil bulk density, biopore angle and biopore relief. *Plant & Soil*, 272: 327-336.
- Holthusen, D. 2010. Fertilization induced changes in soil stability at the microscale revealed by rheometry. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel.
- Holthusen, D., Peth, S. & Horn, R. 2010. Impact of potassium concentration and matric potential on soil stability derived from rheological parameters. *Soil & Tillage Research*, 111 (1): 75-85.
- Hooker, J.E., Hendrick, R. & Atkinson, D. 2000. The measurement and analysis of fine root longevity. In: Smith, A.L., Bengough, A.G., Engels, C., van Noordwijk, M., Pellerin, S. & van de Grijn, S.C. (Hrsg.) Root methods: a handbook. Springer Verlag, Berlin, 273-304.
- Horn, R. & Peth, S. 2009. Soil structure formation and management effects on gas emission. *Biologica*, 64: 449-454.
- Horn, R., Fleige, H., Peth, S. & Peng, X.H. 2006. Soil Management for Sustainability. *Advances in Geocology* 38, 497 Seiten.
- Horn, R. 2004a. Standortanforderungen der Pflanzen. In: Blume, H.P. (Hrsg.) Handbuch des Bodenschutzes. 3. Auflage. Ecomed Verlag, 93-102.
- Horn, R. 2004b. Time Dependence of Soil Mechanical Properties and Pore functions for Arable Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 68: 1131-1137.
- Horn, R. & Fleige, H. 2003. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil & Tillage Research*, 73 (1-2): 89-99.
- Horn, R., Way, T. & Rostek, J. 2003. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil & Tillage Research*, 73: 101-106.
- Horn, R., van den Akker, J.H. & Arvidsson, J. 2000. Subsoil Compaction – Distribution, Processes and Consequences. *Advances in Geocology* 32, *Catena*, Reiskirchen, 462 Seiten.
- Horn, R. & Rostek, J. 2000. Subsoil Compaction processes - state of knowledge. In: Horn, R., van den Akker, J.H. & Arvidsson, J. (Hrsg.) Subsoil Compaction - Distribution, Processes and Consequences. *Advances in Geocology* 32, *Catena*, Reiskirchen, 44-55.

- Horn, R., Domzal, H., Slowinskajurkiewicz, A. & van Ouwerkerk, C. 1995. Soil Compaction Processes and Their Effects on the Structure of Arable Soils and the Environment. *Soil & Tillage Research*, 35 (1-2): 23-36.
- Horn, R. & Lebert, M. 1994. Soil Compactability and Compressibility. In: Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C. (Hrsg.) *Soil Compaction in Crop Production*. Amsterdam, Elsevier 45-69.
- Horn, R., Werner, D., Baumgartl, T. & Winterot, C. 1994. Wirkung technogener Druckbelastung auf die Spannungsverteilung und das Bodengefüge einer Schwarzerde aus Löß. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 157: 433-440.
- Horn, R., Baumgartl, T., Roweck, H. & Köbbemann, C. 1993. Versuchsgut Hohenschulen - Bodenkundliche Untersuchungen im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 192. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 70: 275-286.
- Horn, R., Baumgartl, T., Kühner, S., Lebert, M. & Kayser, R. 1991. Zur Bedeutung des Aggregierungsgrades für die Spannungsverteilung in strukturierten Böden. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 154 (1): 21-26.
- Horn, R. 1990. Aggregate characterization as compared to soil bulk properties. *Soil & Tillage Research*, 17: 265-289.
- Horn, R., Stork, J. & Dexter, A.R. 1987. Untersuchungen über den Einfluss des Bodengefüges für den Eindringwiderstand in Böden. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 150 (5): 342-347.
- Horn, R., M. Burger, M. Lebert, G. Badewitz, G. 1986. Druckfortpflanzung in Böden unter langsam fahrenden Traktoren. *Zeitschrift für Kulturtechnik & Flurbereinigung*, 28: 94-102.
- Horn, R. 1985. Auswirkung mechanischer Belastungen auf die Redoxpotentiale von 3 Bodenmonolithen - ein Laborversuch. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 148: 47-53.
- Horton, R., Ankeny, M.D. & Allmaras, R.R. 1994. Effects of compaction on soil hydraulic properties. In: Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C. (Hrsg.) *Soil Compaction in Crop Production*. Amsterdam, Elsevier 141-165.
- Houlbrooke, D.J., Thom, E.R., Chapman, R. & McLaya, C.D.A. 1997. A study of the effects of soil bulk density on root and shoot growth of different ryegrass lines. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 40: 429-415.
- Huat, B.B.K., Ali, F.H. & Maail, S. 2005. The Effect of Natural Fiber on the Shear Strength of Soil. *American Journal of Applied Sciences*, Special Issue: 9-13.
- Hudson, B.D. 1994. Soil organic matter and water capacity. *Journal of Soil & Water Conservation*, 49: 189-197.
- Iijima, M., Griffith, B. & Bengough, A.G. 2000. Sloughing of cap cells and carbon exudation from maize seedling roots in compacted sand. *New Phytologist*, 145: 477-482.
- Ishaq, M., Ibrahim, M., Hassan, A., Saeed, M. & Lal, R. 2001. Subsoil compaction effects on crops in Panjab, Pakistan: 2. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. *Soil & Tillage Research*, 60: 153-161.
- Jorajuria, D. & Draghi, L. 1997. The Distribution of Soil Compaction with Depth and the Response of a Perennial Forage Crop. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66: 261-265.
- Junkersfeld, L. 1995. Dynamik der Wasserhaushaltsparameter von Aggregaten und Gesamtboden einer pseudovergleyten Parabraunerde aus Geschiebemergel. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung & Bodenkunde Christian-Albrecht-Universität, Kiel.
- Kays, S.J., Nicklow, C.W. & Simons, D.H. 1974. Ethylene in relation to the response of roots to physical impedance. *Plant & Soil*, 40: 565-571.
- Keller, T. & Arvidsson, J. 2007. Compressive properties of some Swedish and Danish structured agricultural soils measured in uniaxial compression tests. *European Journal of Soil Science*, 58: 1373-1381.
- Kitse, E. & Rooma, I. 1984. *Mullateaduse laboratoorne praktikum (Laboratory practice in soil science)*. Eesti Põllumajanduse Akadeemia, Tartu, 132 Seiten.
- Kleinfelder, D., Swanson, S., Norris, G. & Clary, W. 1992. Unconfined compressive strength of some stream bank soils with herbaceous roots. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 1920-1925.
- Kooistra, J. M. & Tovey, N.K. 1994. Effects of compaction on soil microstructure. In: Soane, B.D. & C. van Ouwerkerk (Hrsg.) *Soil Compaction in Crop Production*, Elsevier Science, 91-111
- Kooistra, M.J., Schoonderbeek, D., Boone F.R., Veen B.W., & van Noordwijk, M. 1992. Root-soil contact of maize, as measured by thin-section technique; II. Effects on soil compaction. *Plant & Soil*, 139: 119-129.
- Kopec, S.T. & Glab, T. 2003. The effect of tractor wheel passes on air-water properties of soil and production from red clover/grasses sward. 10. Gumpensteiner Lysimetertagung, 29.-30.04.2003 Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning.
- Kopec, S.T., Glab, T. & Zaleski, T. 2001. The influence of soil compaction on water retention of soil under red clover sward. 9. Gumpensteiner Lysimetertagung, 24.-25.04.2001. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irdning.

- Koppi, A.J., Douglas, J.T. & Moran, C.J. 1992. An image analysis evaluation of soil compaction in grassland. *European Journal of Soil Science*, 43 (1): 15-25.
- Kuchenbuch, R.O. & Ingram, K.T. 2004. Effects of soil bulk density on seminal and lateral roots of young maize plants (*Zea mays* L.). *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 167: 229-235.
- Kuht, J., Reintam, E., Lauringson E. & Talgre L. 2009. Lutserni kasvatamisest tihedal mullal (About alfalfa growing on compacted soil). *Agronomy*, 42-47.
- Kuht, J., Reintam, E., Trükmann, K., Nugis, E. & Edesi, L. 2006. Negative Technogenous Soil Residual Deformations and Suitable Crop Production. *Transactions of ERIA*, 71: 181-192.
- Kutschera, L. & Lichtenegger, E. 1982. Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen. Bd. 1, Monocotyledoneae. Fischer, Stuttgart, 516 Seiten.
- Lampurlanes, J. & Cantero-Martínez, C. 2006. Hydraulic conductivity, residue cover, and soil surface roughness under different tillage systems in semiarid conditions. *Soil & Tillage Research*, 85: 13-26.
- 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 Seiten.
- Larson, W.E. & Gupta, S.C. 1980. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 1127-1132.
- Latif, M.A., Meheus, G.R., Mackenzie, A.F., Alli, I. & Faris, M.A. 1992. Effects of legumes on soil physical quality in a maize crop. *Plant & Soil*, 140: 15-23.
- Lebert, M. & Horn, R. 1991. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil & Tillage Research*, 19: 275-286.
- Lin, H.S., McInnes, K.J., Wilding L.P. & Hallmark, C.T. 1996. Effective porosity and flow rate with infiltration at low tensions in a well-structured subsoil. *Transactions of the ASAE*, 39: 131-133.
- Lipiec, J. & Hatano, R. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116: 107-136.
- Lipiec, J. & Stepniewski, W. 1995. Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. *Soil & Tillage Research*, 35: 37-52.
- Loades, K.W., Bengough, A.G., Bransby, M.F. & Hallett P.D. 2010. Planting density influence on fibrous root reinforcement of soils. *Ecological Engineering*, 36 (3): 276-284.
- Logsdon, S.D. & Linden, D.R. 1992. Interactions of earthworms with soil physical conditions influencing plant growth. *Soil Science*, 154 (4): 330-337.
- Loveland, P. & Webb, J. 2003. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soil of temperate regions? *Soil & Tillage Research*, 70: 1-18.
- Mari, G.R. & Changying, J. 2008. Influence of agricultural machinery on soil compaction patterns, root development and plant growth, overview. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Science*, 3: 49-62.
- Markgraf, W. & Horn, R. 2006. Rheological-stiffness analysis of K⁺-treated and CaCO₃-rich soils. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 169 (3): 411-419.
- Materechera, S.A., Kirby, J.M., Alston, A.M. & Dexter, A.R. 1994. Modification of soil aggregation by watering regime and roots growing through beds of large aggregates. *Plant & Soil*, 160: 57-66.
- Materechera, S.A., Alston, A.M., Kirby, J.M. & Dexter, A.R. 1992. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant & Soil*, 144: 297-303.
- Materechera, S.A., Dexter, A.R. & Alston, A.M. 1991. Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species. *Plant & Soil*, 135: 31-41.
- Mattia, C., Bischetti, G.B. & Gentile, F. 2005. Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species. *Plant & Soil*, 278: 11-22.
- McBride R.A. & Watson G.C. 1990. An investigation of the re-expansion of unsaturated, structured soils during cyclic static loading. *Soil & Tillage Research*, 17: 241-253.
- McGill, R., Tukey, J.W. & Larsen, W.A. 1978. Variations of box plots. *American Statistician*, 12-16.
- McKenzie, B.M. & Dexter, A.R. 1988. Axial pressures generated by the earthworm *Aporrectodea rosea*. *Biology & Fertility of Soils*, 5 (4): 323-327.
- McKenzie, B.M. & Dexter, A.R. 1987. Physical properties of casts of the earthworm *Aporrectodea rosea*. *Biology & Fertility of Soils*, 5 (2): 152-157
- McMichael, B.L. & Quisenberry, J.E. 1993. The impact of the soil environment on the growth of root systems. *Environmental & Experimental Botany*, 33 (1): 53-61.

- Merino, P., Estavillo, J.M., Besga, G., Pinto, M. & González-Murua, C. 2001. Nitrification and denitrification derived N₂O production from a grassland soil under application of DCD and Actilith F2. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 60 (1-3): 9-14.
- Mickovski, S.B., Hallett, P.D., Bransby, M.F., Davies, M.C.R., Sonnenberg, R. & Bengough, A.G. 2009. Mechanical reinforcement of soil by willow roots: impacts of root properties and root failure mechanism. Soil Science Society of America Journal, 73: 1276-1285.
- Miller, R.M. & Jastrow, J.D. 1990. Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. Soil Biology & Biochemistry, 22: 579-584.
- Misra, R.K., Dexter, A.R. & Alston, A.M. 1986a. Maximum axial and radial growth pressures of plant roots. Plant & Soil, 95: 315-326.
- Misra, R.K., Dexter, A.R. & Alston, A.M. 1986b. Penetration of soil aggregates of finite size. II. Plant roots. Plant & Soil, 94: 59-85.
- Mitchell, J.K. 1993. Fundamentals of Soil Behaviour. Wiley and Sons, New York, 592 Seiten.
- Mitchell, A.R. & van Genuchten, M.T. 1992. Shrinkage of bare and cultivated soil. Soil Science Society of America Journal, 56: 1036-1042.
- Montagu, K.D., Conroy, J.P. & Atwell, B.J. 2001. The position of localized soil compaction determines root and subsequent shoot growth responses. Journal of Experimental Botany, 52: 2127-2133.
- Moreno-Espíndola, I.P., Rivera-Becerril, F., Ferrara-Guerrero, M.J. & De León-González, F. 2007. Role of Root-hairs and Hyphae in Adhesion of Sand Particles. Soil Biology & Biochemistry, 39: 2520-2526.
- Mosaddeghi, M.R., Koolen, A.J., Hajabbasi, M.A., Hemmat, A. & Keller, T. 2007. Suitability of pre-compression stress as the real critical stress of unsaturated agricultural soils. Biosystems Engineering, 98 (1): 90-101.
- Mosaddeghi, M.R., Hemmat, A., Hajabbasi, M.A. & Alexandrou, A. 2003. Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in central Iran. Soil & Tillage Research, 70 (1): 53-64.
- Motavalli, P.P., Anderson, S.H. & Pengthamkerati, P. 2003. Surface compaction effects on corn growth, nitrogen availability, and physical properties of a claypan soil. Field Crops Research, 84: 303-318.
- Mytton, L.R., Cresswell, A. & Colbourn, P. 1993. Improvement in soil structure associated with white clover. Grass & Forage Science, 48: 84-90.
- Nguyen C. 2003. Rhizodeposition of organic C by plants: mechanisms and controls. Agronomie, 23: 375-396.
- Nilaweera, N.S. & Nutalaya, P. 1999. Role of tree roots in slope stabilisation. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 57: 337-342.
- Normaniza, O., Faisal, H.A. & Barakbah, S.S. 2008. Engineering properties of *Leucaena leucocephala* for prevention of slope failure. Ecological Engineering, 32 (3): 215-221.
- Normaniza, O. & Barakbah, S.S. 2006. Parameters to predict slope stability - Soil water and root profiles. Ecological Engineering, 28: 90-95.
- Norris, J.E., Stokes, A., Mickovski, S.B., Cammeraat, E., van Beek, R., Nicoll, B.C. & Achim, A. 2008. Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions. Springer, 290 Seiten.
- Oades, J.M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. Geoderma, 56: 377-400.
- Oades, J.M. 1984. Soil organic matter and structural stability mechanisms and implications for management. Plant & Soil, 76: 319-337.
- O'Dogherty, M.J. & Wheeler, J.A. 1984. Compression of straw to high densities in closed cylindrical dies. Journal of Agricultural Engineering, 29: 61-72.
- Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A. & Sombroek, W.G. 1991. World Map of the Status of Human-Induced Soil Degradation. ISRIC, Wageningen, Netherlands, UNEP Nairobi, Kenya, 34 Seiten.
- O'Loughlin, C. & Ziemer, R.R. 1982. The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steepland forests. Proceedings of I.U.F.R.O. Workshop P.1.07-00 Ecology of Subalpine Ecosystems as a Key to Management. 2-3 August 1982, Corvallis, Oregon. Oregon State University, Corvallis, Oregon, 70-78.
- Operstein, V. & Frydman, S. 2000. The influence of vegetation on soil strength. Ground Improvement, 4: 81-89.
- Opitz, V. & Boberfeld, W. 1994. Grünlandlehre. Ulmer GmbH&Co, 336 Seiten.
- O'Sullivan, M.F., Henshall, J.K. & Dickson J.W. 1999a. A simplified method for estimating soil compaction. Soil & Tillage Research, 49 (4): 325-335.
- O'Sullivan, M.F., Robertson, E.A.G. & Henshall, J.K. 1999b. Shear effects on gas transport in soil. Soil & Tillage Research, 50: 73-83.

- Pagliai, M., Marsili, A., Servadio, P., Vignozzi, N. & Pellegrini, S. 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): 119-129.
- Pagliai, M. & Jones, R. 2002. Sustainable Land Management Environmental Protection - a Soil Physical Approach. *Advances in Geoecology* 35, Catena, Reiskirchen, 598 Seiten.
- Passioura, J.B. 2002. "Soil conditions and plant growth". *Plant, Cell & Environment*, 25 (2): 311-318.
- Peng, X. & Horn, R. 2005. Modeling soil shrinkage curve across a wide range of soil types. *Soil Science Society of America Journal*, 69: 584-592.
- Peng, X., Horn, R., Deery, D., Kirkham, M.B. & Blackwell, J. 2005. Influence of soil structure on the shrinkage behaviour of a soil irrigated with saline sodic water. *Australian Journal of Soil Research*, 43: 555-563.
- Petelkau, H. 1998. Bodenbearbeitung und Bodenschadverdichtung. In, *Bodenbearbeitung und Bodenschutz - Schlußfolgerungen für gute fachliche Praxis*. Darmstadt, KTBL, 266 Seiten.
- Petelkau, H. & Dannowski, M. 1990. Effect of repeated vehicle traffic in traffic lanes on soil physical properties, nutrient uptake and yield of Oats. *Soil & Tillage Research*, 15: 217-225.
- Peth, S., Rostek, J., Zink, A., Mordhorst, A. & Horn, R. 2010. Soil testing of dynamic deformation processes of arable soils. *Soil & Tillage Research*, 106 (2): 317-328.
- Peth, S. 2004. Bodenphysikalische Untersuchungen zur Trittbelaastung von Böden bei der Rentierweidewirtschaft an borealen Wald- und subarktisch-alpinen Tundrenstandorten. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel.
- Pietola, L., Horn, R. & Yli-Halla, M. 2005. Effects of trampling by cattle on the hydraulic and mechanical properties of soil. *Soil & Tillage Research*, 82 (1): 99-108.
- Pollen, N. & Simon, A. 2005. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on streambank stability using a fiber bundle model. *Water Resources Research*, 41: W07025.
- Pollen, N. 2007. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: accounting for soil shear strength and moisture. *Catena*, 69: 197-205.
- Polomski, J. & Kuhn, N. 1998. Wurzelsysteme. WSL/FNP, Bern - Stuttgart - Wien, Paul Haupt Verlag, 290 Seiten.
- Pritchard, S. & Rogers, H. 2000. Spatial and temporal deployment of crop roots in CO₂-enriched environments. *New Phytologist*, 147: 55-71.
- Räty, M., Horn, R., Rasa, K., Yli-Halla, M. & Pietola, L. 2010. Compressive behaviour of the soil in buffer zones under different management practices in Finland. *Agricultural & Food Science*, 19 (2): 160-172.
- Raven, P.H., Evert, R.E. & Curtis, H. 1985. Biologie der Pflanzen. Berlin de Gruyter, 764 Seiten.
- Rawnsley, R.P., Donaghy, D.J., Fulkerson, W.J. & Lane, P.A. 2002. Changes in the physiology and feed quality of cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.) during regrowth. *Grass & Forage Science*, 57: 203-211.
- Reid, J.B. & Goss, M.J. 1982. Interactions between soil drying due to plant water use and decreases in aggregate stability caused by maize roots. *Journal of Soil Science*, 33: 47-53.
- Reid, J.B. & Goss, M.J. 1981. Effect of living roots of different plant species on the aggregate stability of two arable soils. *Journal of Soil Science*, 32: 521-541.
- Reintam, E., Trükmann, K., Kuht, J., Raave, H., Krebsstein, K., Astover, A. & Leeduks, J. 2009. Mulla tallamise mõju harilikku keraheina, päidero ja ohtetu luste juurtele ning möningatele mulla füüsikalistele omadustele (Effect soil compaction on *Phalaris arundinacea*, *Dactylis glomerata* and *Bromus inermis* roots and on some soil physical properties). *Agronomy*, 34-41.
- Reintam, E. 2006. Changes in soil properties, spring barley (*Hordeum vulgare* L.) and weed nutrition and community due to soil compaction and fertilization on sandy loam Stagnic Luvisol. Dissertation. Institute of Agricultural and Environmental Sciences, Estonian University of Life Sciences.
- Reintam, L., Kitse, E., Piho, A., Rooma, I. & Tarandi, K. 1962. *Mullateadus (Soil science)*. Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn, 350 Seiten.
- Reszkowska, A., Krümmelbein, J., Zhao, Y., Peth, S., Horn, R. & Gan, L. 2010. Influence of grazing on hydraulic and mechanical properties of semiarid steppe soils under different vegetation type in Inner Mongolia, China. *Plant & Soil*, 340 (1-2): 59-72.
- Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., Geudens, G. & Muys, B. 2007. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture. *Trees*, 21: 385-402.
- Richard, G., Cousin, I., Sillon, J.F., Bruand, A. & Guérif, J. 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52: 49-58.
- Rillig, M.C., Ramsey, P.W., Morris, S. & Paul, E.A. 2003. Glomalin, an arbuscular-mycorrhizal fungal soil protein, responds to land-use change. *Plant & Soil*, 253: 293-299.

- Schäffer, B., Attinger, W. & Schilin, R. 2007. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery - Soil physical and mechanical aspects. *Soil & Tillage Research*, 93: 28-43.
- Schäfer-Landefeld, L., Brandhuber, R., Fenner, S., Koch, H.J. & Stockfisch, N. 2004. Effects of agricultural machinery with high axle load on soil properties of normally managed fields. *Soil & Tillage Research*, 75: 75-86.
- Scheffer, P. & Schachtschabel, P. 2010. Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage, Spektrum, Stuttgart, 570 Seiten.
- Schiechtl, H.M. 1985. Pflanzen als Mittel zur Bodenstabilisierung. *Jahrbuch der Gesellschaft für Ingenieurbiologie Aachen*, 2: 50-62,
- Schlichting, E., Blume, H.-P. & Stahr, K. 1995. Bodenkundliches Praktikum. 2. Auflage, Blackwell, Berlin Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, 295 Seiten.
- Schmeer, M., Loges, R. & Taube, F. 2009a. Der Einfluss von Grünlanderneuerung mit einer eingeschobenen Ackerzwischenutzung auf die Stickstoffflüsse im System Boden-Pflanze. *Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland & Futterbau*, 10: 88-91.
- Schmeer, M., Loges, R., Nannen, D., Senbayram, M. & Taube, F. 2009b. Lachgasemissionen auf intensiv genutztem Grünland in Abhängigkeit von Bodenverdichtung und Stickstoffdüngung. *Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Grünland & Futterbau*, 10: 79-82.
- Schmidt, K.M., Roering, J.J., Stock, J.D., Schaub, T., Dietrich, W.E. & Montgomery, D.R. 2001. The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the 20 Oregon Coast Range. *Canadian Geotechnical Journal*, 38: 995-1024.
- Scholefield, D. & Hall, D. M. 1985. Constricted growth of grass roots through rigid pores. *Plant & Soil*, 85: 153-162.
- Seguel, O. & Horn, R. 2005. Mechanical behavior of an ash soil under static and dynamic loading. *Soil & Tillage Research*, 82: 99-108.
- Semmel, H. 1993. Auswirkungen kontrollierter Bodenbelastung auf das Druckfortpflanzungsverhalten und physikalisch-mechanische Kenngrößen von Ackerböden. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzernährung & Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel.
- Semmel, H. & Horn, R. 1993 Möglichkeiten zur Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit und der Druckfortpflanzung im Boden im Hinblick auf die Ableitung von bodentyp- und maschinenspezifischen grenzwerten. KTBL, 362, Münster-Hiltrup, 61-92.
- Semmel, H., Horn, R., Hell, U., Dexter, A.R. & Schulze, E.D. 1990. The dynamics of soil aggregate formation and the effect on soil physical properties. *Soil Technology*, 3: 113-129.
- Simon, A. & Collison, A.J.C. 2002. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surface Processes & Landforms*, 27: 527-546.
- Sitaula, B.K., Hansen, S., Sitaula, J.I.B. & Bakken, L.R. 2000. Effects of soil compaction on N₂O emission in agricultural soil. *Chemosphere – Global Change*, 2: 367-371.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. & Denef, K. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, 79: 7-31.
- Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C. 1994. Soil Compaction Problems in World Agriculture. In: Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C. (Hrsg.) *Soil Compaction in Crop Production*. Amsterdam, Elsevier 1-21.
- Soane, B.D. 1990. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. *Soil & Tillage Research*, 16 (1-2): 179-201.
- Sommer, C., Lebert, M. & Brunotte, J. 2003. Indikatoren zum physikalischen Bodenschutz – warum, wofür, wie? In: DAV, Umweltindikatoren – Schlüssel für eine umweltverträgliche Land- und Forstwirtschaft. Frankfurt am Main, Agrarspectrum, 36: 175-186.
- Stahl, H., Marschall, K., Götze, H. & Freytag, A. 2009. Bodendruck im Grünland. In: Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie des Freistaates Sachsen, 3.
- Stahl, H., Marschall, K. & Götze, H. 2005. Bodendruck und Bodenbelastbarkeit. In: Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 15.
- Starr, G., Neuman, D.S. & Oberbauer, S.F. 2004. Ecophysiological analysis of two arctic sedges under reduced root temperatures. *Physiologia Plantarum*, 120: 458-464.
- Statistikaamet, www.stat.ee. Datum des Zugriffs: 1.04.2010.
- Statistisches Bundesamt Deutschland, www.destatis.de. Datum des Zugriffs: 01.04.2010.
- Steffens, M. 2009. Soils of a semiarid shortgrass steppe in Inner Mongolia: Organic matter composition and distribution as affected by sheep grazing. Dissertation, Lehrstuhl für Bodenkunde, Technischen Universität München.

- Stepniewski, W., Glinski, J. & Ball, B.C. 1994. Effects of Compaction on Soil Aeration Properties. In: Soane, B.D. & van Ouwerkerk, C. (Hrsg.) *Soil Compaction in Crop Production*. Amsterdam, Elsevier, 167-184.
- Stock, O. & Downes, N. 2008. Effects of additions of organic matter on the penetration resistance of glacial till for the entire water tension range. *Soil & Tillage Research* 99: 191-201.
- Stokes, A., Atger C., Bengough A.G., Fourcaud T. & Sidle R.C. 2009. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant & Soil*, 324 (1): 1-30.
- Stokes, A., Norris, J.E., van Beek, L.P.H., Bogaard, T., Cammeraat, E., Mickovski, S.B., Jenner, A., Di Iorio, A. & Fourcaud, T. 2008 How vegetation reinforces soil. In: Norris, J.E., Stokes, A., Mickovski, S.B., Cammeraat, E., van Beek, R., Nicoll, B.C. & Achim, A. (Hrsg.) *Slope stability and erosion control: Ecotechnological solutions*. Springer, 65-118.
- Stone, J.A. & Larson, W.E. 1980. Rebound of five one-dimensionally compressed unsaturated granular soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 819-822.
- Styczen, M.E. & Morgan, R.P.C. 1995. Engineering properties of vegetation. In: Morgan, R.P.C. & Rickson, R.J. (Hrsg.) *Slope stabilization and erosion control: A bioengineering approach*. E & FN Spon, London 5-58.
- Suwardji, P. & Eberbach, P.L. 1998. Seasonal changes of physical properties of an Oxic Paleustalf (Red Kandosol) after 16 years of direct drilling or conventional cultivation. *Soil & Tillage Research*, 49: 65-77.
- Sveistrup, T.E. & Haraldsen, T.K. 1997. Effects of soil compaction on root development of perennial grass leys in northern Norway. *Grass & Forage Science*, 52: 381-387.
- Tarawally, M.A., Medina, H., Frometa M.E. & Itza, C.A. 2004. Field compaction at different soil-water status: effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodic Ferrasol in Western Cuba. *Soil & Tillage Research*, 76: 95-103.
- Taylor, H.M. & Brar, G.S. 1991. Effect of soil compaction on root development. *Soil & Tillage Research*, 19 (2-3): 111-119.
- Tengbeh, G.T. 1993. The effect of grass roots on shear strength variations with moisture content. *Soil Technologies*, 6: 287-295.
- Tennant, D. & Hall, D. 2001. Improving water use efficiency of annual crops and pastures—limitations and opportunities in Western Australia. *Australian Journal of Agricultural Research*, 52: 171-182.
- Tisdall, J.M. & Oades, J.M. 1982. Organic matter and waterstable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33: 141-163.
- Tisdall, J.M. & Oades, J.M. 1979. Stabilization of Soil Aggregates by the Root Systems of Ryegrass. *Australian Journal of Soil Research*, 17 (3): 429-441.
- Titze, A. 2010. Bodenschadverdichtungen auf dem Grünland – Erkennen und Vorbeugen. Tellower Vortragsveranstaltung 2010, <http://agrarnet-mv.de/>, Datum des Zugriffs: 10.08.2010.
- Tobias, S., Hennes, M., Meier, E. & Schulin, R. 2001. Estimating soil resilience to compaction by measuring changes in surface and subsurface levels. *Soil Use & Management*, 17: 229-234.
- Tosi, M. 2007. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy). *Geomorphology*, 87 (4): 268-283.
- Trautner, A. & Arvidsson, J. 2003. Subsoil compaction caused by machinery traffic on a Swedish Eutric Cambisol at different soil water contents. *Soil & Tillage Research*, 73 (1-2): 107-118.
- Trolldenier, G. 1996. Die Ökopysiologie der Wurzeln und der Rhizosphäre. *Biologien in unserer Zeit*, 26: 56-65.
- Trott, H.T. 2003. Mittelfristige Auswirkungen einer variierten Bewirtschaftungsform und N-Intensität auf Leistungsparameter und die Stickstoffbilanz von Dauergrünland. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenbau & Pflanzenzüchtung, Christian-Albrecht-Universität, Kiel.
- Trükmann, K., Reintam, E., Kuht, J., Nugis, E. & Edesi, L. 2008. Effect of soil compaction on growth of narrow-leaved lupine, oilseed rape and spring barley on sandy loam soil. *Agronomy Research*, 6 (1): 101-108.
- Unger, P.W. & Fulton, L.J. 1990. Conventional- and no-tillage effects on upper root zone soil conditions. *Soil & Tillage Research*, 16 (4): 337-344.
- Van Noordwijk, M. & Floris, J. 1979. Loss of dry weight during washing and storage of root samples. *Plant & Soil*, 53: 239-243.
- Van Olphen, H. 1977. An introduction to clay colloid chemistry. 2. Auflage, New York: Wiley-Interscience. 318 Seiten.
- Veenhof, D.W. & McBride, R.A. 1996. Overconsolidation in agricultural soils. I. Compression and consolidation behaviour of remoulded and structured soils. *Soil Science Society of America Journal*, 60: 362-373.
- Vetterlein, D. 1993. Root induced spatial variation of soil water content and its effect on phosphorus uptake and growth of pearl millet (*Pennisetum americanum* [L.] Leeke) under drought conditions. Dissertation, Universität Hohenheim, U.E. Grauer Verlag, Wendlingen.

- Voigtländer, G. & Jacob, H. 1987. Grünlandwirtschaft und Futterbau. Ulmer, Stuttgart, 479 Seiten.
- Von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessa, H., Guggenberger, G., Matzner, E. & Marschner, B. 2007. SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilizationmechanisms-a review. *Soil Biology & Biochemistry*, 39 (9): 2183-2207.
- Vorobyova, L.A. 1998. Chemical Analysis of Soils. Moscow University Press, 250 Seiten.
- Waldron, L.J. & Dakessian, S. 1982. Effect of Grass, Legume, and Tree Roots on Soil Shearing Resistance. *Soil Science Society of America Journal*, 46 (5): 894-899.
- Watson, G.W. & Kelsey, P. 2006. The impact of soil compaction on soil aeration and fine root density of *Quercus palustris*. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4 (2): 69-74.
- Watson, C.A., Ross, J.M., Bagnaresi, U., Minotta, G.F., Roffi, F., Atkinson, D., Black, K.E. & Hooker, J.E. 2000 Environment-induced modifications to root longevity in *Lolium perenne* and *Trifolium repens*. *Annals of Botany*, 85: 397-401.
- Watson, A., Phillips, C. & Marden, M. 1999. Root strength, growth, and rates of decay: root reinforcement changes of two tree species and their contribution to slope stability. *Plant & Soil*, 217: 39-47.
- Werner, D. & Werner, B. 2001. Verdichtung und Regeneration des Gefüges eines schluffigen Tonbodens (Tschernosem): Bodenphysikalische, computertomographische und rasterelektronen-mikroskopische Untersuchungen. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 164 (1): 79-90.
- Whalley, W.R., Riseley, B., Leeds-Harrison, P.B., Bird, N.R.A., Leech, P.K. & Adderley, W.P. 2005. Structural differences between bulk and rhizosphere soil. *European Journal of Soil Science*, 56: 353-360.
- Whalley, W.R., Dumitru, E. & Dexter, A.R. 1995. Biological effects of soil compaction. *Soil & Tillage Research*, 35 (1-2): 53-68.
- White, R.G. & Kirkegaard, J.A. 2010. The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil - implications for water uptake. *Plant, Cell & Environment*, 33: 133-148.
- Wienforth, B. 2006. Untersuchungen zur Parametrisierung eines Wurzelsystem- Architektur-Modells für Sommergerste (*Hordeum vulgare* L.). Masterarbeit, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Christian-Albrecht-Universität, Kiel.
- Wiermann, C., Werner, D., Horn, R., Rostek, J. & Werner, B. 2000. Stress/strain processes in a structured unsaturated silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. *Soil & Tillage Research*, 53 (2): 117-128.
- Wu, T.H. & Watson, A. 1998. In-situ shear tests of soil blocks with roots. *Canadian Geotechnical Journal*, 35: 579-590.
- Wu, T.H. 1995. Slope stabilization. In: Morgan, R.P.C. & Rickson, R.J. (Hrsg.) *Slope stabilization and erosion control: A bioengineering approach*. E & FN Spon, London, 221-264.
- Yavuzcan, H.G., Matthies, D. & Auernhammer, H. 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): 200-215.
- Young, I.M. 1998. Biophysical interactions at the root-soil interface. *The Journal of Agricultural Science*, 130 (1): 1-7.
- Zander, J. 2006. Zukunft der Praxis in Grünland und Futterbau. Die Zukunft von Praxis und Forschung in Grünland und Futterbau. 50. Jahrestagung der AGGF. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 228-231.
- Zhang, C.-B., Chen, L.-H., Liu Y.-P., Ji, X.-D. & Liu, X.-P. 2010. Triaxial compression test of soil-root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength. *Ecological Engineering*, 36 (1): 19-26.
- Zhang, B., Horn, R. & Hallett, P.D. 2005. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 69: 864-871.
- Zhang, H.Q. & Hartge, K.H. 1990. Die Kohäsion ungesättigter sandböden und deren beeinflussung durch organische substanz. *Soil Technology*, 3 (4): 311-326
- Zhang, H.Q. & Hartge, K.H. 1989. Die Wechselwirkung zwischen Winkel der inneren Reibung, organischer Substanz und Wasserspannung. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 59 (1): 279-282.
- Ziemer, R.R. 1981. Roots and the stability of forested slopes. *International Association of Hydrologic Sciences*, 132: 343-361.
- Zink, A. 2009. Bodenstabilität und Auswirkungen dynamischer Lasteinträge auf physikalische Eigenschaften von Ackerböden unter konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung. Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Pflanzernährung und Bodenkunde, Christian-Albrecht-Universität, Kiel.

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. Rainer Horn, dass er mir die Möglichkeit gegeben hat, hier im Institut zu promovieren und für seine Betreuung. Weiterhin möchte ich Frau Dr. Endla Reintam danken, für die Unterstützung während meines Studiums in Estland und die Ermutigung in Kiel zu promovieren.

Für die finanzielle Unterstützung meiner wissenschaftlichen Arbeit danke ich der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Frau Dr. Nicole Freyer danke ich für ihre Betreuung bei allen Angelegenheiten das Stipendium betreffend. Die Versuche in Estland wurden mit Hilfe von ETF 7622 finanziert.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Babette Wienforth für die Hilfe bei den Wurzelmessungen. Mein Dank gilt auch allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Namentlich möchte ich Sabine Hamann, Thomas Neugbauer und Sandra Kolls danken für die Hilfe bei Messungen, Doris Rexilius für die guten Ideen bei der Wurzelzugfestigkeitsbestimmung und Joachim Lohse für deren Umsetzung, besonders der „Halb-Zwölf-Mensagruppe“ für die gemütliche Mittagspause.

Ich möchte auch herzlich Anneka und der Familie Zink danken für die fachliche und moralische Unterstützung sowie für die Hilfe bei der sprachlichen Korrektur meiner Arbeit.

Ich danke Dörthe, die in den drei Jahren alle Höhen und Tiefen der Promotion, welche die Zeit mit sich gebracht hat, mit mir durchgestanden hat. Ohne sie hätte diese Promotionszeit nur halb so viel Spaß gemacht.

Ich danke Simon, der immer für mich da war und an mich geglaubt hat.

Ma tänan kogu südameste oma perekonda, sõpru ja kõiki, kes aitasid kaasa selle töö valimisele. Teile möeldes: hinga sisse, hinga välja ja kirjuta edasi...

