

SCHRIFTENREIHE

**Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde
Universität Kiel**



Nr. 109 (2015)

Dipl.-Geograph Thomas Neugebauer

**Bodenphysikalische Untersuchungen an
Uferböden der Tideelbe als Grundlage für die
Prognose des Kompressibilitätsindex als Maß
für den Widerstand gegen Wellenschlag**

Herausgeber: R. Horn und K. H. Mühling

**Gedruckt mit Genehmigung der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel**

**Vertrieb: Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Hermann Rodewald Str. 2
D - 24118 Kiel
(e-Mail: h.fleige@soils.uni-kiel.de)**

ISSN 0933-680 X

Preis: Eur 15 (incl. Versandkosten)

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

**Bodenphysikalische Untersuchungen an Uferböden
der Tideelbe als Grundlage für die Prognose des
Kompressibilitätsindex als Maß für den
Widerstand gegen Wellenschlag**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät

der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Dipl.-Geogr. Thomas Christian Neugebauer

aus Paderborn

Kronshagen, 2015

Dekan: Prof. Dr. Eberhard Hartung

Erstgutachter: Prof. Dr. Rainer Horn

Zweitgutachter: Prof. Dr. Rainer Duttmann

Tag der mündlichen Prüfung: 29.10.2015

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XV
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung	3
2.1 Schiffsinduzierte Wellenbelastungen und deren Auswirkung am Ufer	3
2.2 Schutz- und Befestigung	5
2.3 Auswirkungen von mechanischer Belastung auf Porenkapazitäts- und Funktio- nalitätskennwerte	6
2.4 Quantifizierung der Uferstabilität anhand von Bodenkennwerten	8
2.4.1 Trockenrohddichte	8
2.4.2 Vorbelastung	8
2.4.3 Scherwiderstand	9
2.4.4 Zyklische Kompressibilität	10
3 Material und Methoden	12
3.1 Untersuchungsgebiet	12
3.2 Leitprofile	13
3.3 Bodenphysikalische Untersuchungen	13
3.3.1 Korngrößenverteilung	13
3.3.2 Trockenrohddichte und Festsubstanzdichte	14
3.3.3 Gesättigte Wasserleitfähigkeit	14
3.3.4 Luftleitfähigkeit	15
3.3.5 Matrixpotenzial-/Wassergehaltskurve	15
3.3.6 Vorbelastung	16
3.3.7 Scherwiderstand	16
3.3.8 Zyklische Belastung	17

3.3.9	Statistische Auswertung	18
4	Ergebnisse	19
4.1	Bodentypen und Profilbeschreibungen	19
4.1.1	Standort ES1	19
4.1.2	Standort ES2	20
4.1.3	Standort ES3	21
4.1.4	Standort ES4	22
4.1.5	Standort ES5	23
4.1.6	Standort ES6	24
4.1.7	Standort ES7	25
4.1.8	Standort ES8	26
4.1.9	Standort ES10	27
4.1.10	Standort ES11	28
4.1.11	Standort ES12	29
4.1.12	Standort ES13	30
4.1.13	Standort ES14	30
4.1.14	Standort ES15	31
4.1.15	Standort ES16	32
4.1.16	Standort ES18	33
4.1.17	Standort ES19	34
4.1.18	Standort ES20	35
4.1.19	Standort ES21	36
4.1.20	Standort ES22	37
4.1.21	Standort ES23	38
4.1.22	Standort ES24	39
4.2	Bodenphysikalische Kennwerte	40
4.2.1	Bodenart	40
4.2.2	Trockenrohdichte und Humusgehalte	41
4.2.3	Kennwerte der Wasserbindung	42
4.2.4	Gesättigte Wasserleitfähigkeit	45

4.2.5	Vorbelastung und Scherwiderstandskennwerte	47
4.2.5.1	Vorbelastung in Abhängigkeit der Bodenentwicklung	47
4.2.5.2	Scherwiderstandskennwerte: Kohäsion und Winkel der inneren Reibung in Abhängigkeit der Bodenentwicklung	48
4.2.5.3	Vorbelastung und Trockenrohdichte in Abhängigkeit von Bodenarten-Hauptgruppe und Gefügeform	49
4.2.5.4	Vorbelastung, Kohäsion und Winkel der inneren Reibung in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte für verschiedene Bodenarten-Hauptgruppen und Gefügeformen.	52
4.2.6	Kompressibilitätsindizes in Abhängigkeit von Textur, Gefügeform und Matrixpotenzial	54
4.2.7	Kompressibilitätsindizes für die Standorte in Abhängigkeit Tiefe, Textur und Matrixpotenzial	60
4.2.8	Luftleitfähigkeit in Abhängigkeit von Entwässerungsgrad, statischer und zyklischer Belastung	64
4.3	Pedotransferfunktionen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex (c_n) über bodenphysikalische Parameter	72
4.3.1	Klassifizierung des Kompressibilitätsindex (c_n) in Abhängigkeit von der Textur	72
4.3.2	Pedotransferfunktionen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex für Sande (ss)	74
4.3.3	Pedotransferfunktionen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex für Sande (Lehmsande (ls) und Schluffsande (us))	75
4.3.4	Pedotransferfunktionen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex für Lehme (sl, ll)	77
4.3.5	Pedotransferfunktionen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex für Schluffe (su, lu, tu)	78
4.3.6	Pedotransferfunktionen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex für Tone (ut)	80

5 Diskussion	82
5.1 Bewertung der Bodenstabilität an den Ufern der Tideelbe auf der Mesoskala anhand der ermittelten bodenphysikalischen Kennwerte	83
5.1.1 Trockenrohddichte	83
5.1.2 Vorbelastung	85
5.1.3 Scherwiderstandskennwerte	86
5.1.4 Kompressibilitätsindex	88
5.1.5 Die Wasserleitfähigkeit und deren Auswirkung auf die Uferstabilität . .	90
5.1.6 Die Luftleitfähigkeit und Rückschlüsse auf die Wasserleitfähigkeit . . .	91
5.2 Stabilität der Böden an der Tideelbe in Abhängigkeit von der Entfernung zum Ufer und zur Mündung in die Nordsee	92
5.3 Ansätze zur Berechnung der mechanischen Uferstabilität	93
5.4 Parameter und Bewertung der Pedotransferfunktionen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex	95
6 Fazit und Ausblick	98
7 Zusammenfassung	99
8 Abstract	100
9 Literatur	101
A Anhang	i
Danksagung	

Abbildungsverzeichnis

3.1	Karte des Untersuchungsgebietes mit den Untersuchungsflächen. Quelle: Open-StreetMap 2014.	12
3.2	Beprobungsschema für einen Standort mit den unterschiedlichen Tiefen. MThw = mittleres Tidehochwasser, MTnw = mittleres Tideniedrigwasser. . . .	13
4.1	Profile am Standort ES1 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	19
4.2	Profile am Standort ES2 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	20
4.3	Profile am Standort ES3 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	21
4.4	Profile am Standort ES4 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	22
4.5	Profile am Standort ES5 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	23
4.6	Profile am Standort ES6 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	24
4.7	Profile am Standort ES7 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	25
4.8	Profile am Standort ES8 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	26
4.9	Profile am Standort ES10 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	27
4.10	Profile am Standort ES11 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	28
4.11	Profile am Standort ES12 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	29
4.12	Profil am Standort ES13 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	30

4.13	Profil am Standort ES14 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	30
4.14	Profile am Standort ES15 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	31
4.15	Profile am Standort ES16 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	32
4.16	Profile am Standort ES18 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	33
4.17	Profile am Standort ES19 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	34
4.18	Profile am Standort ES20 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	35
4.19	Profile am Standort ES21 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	36
4.20	Profile am Standort ES22 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	37
4.21	Profile am Standort ES23 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	38
4.22	Profile am Standort ES24 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.	39
4.23	Feinbodenartendiagramm nach AD - HOC - AG BODEN (2005) mit Angabe der Bodenarten der untersuchten Standorte. Jeder Punkt entspricht einem Horizont.	40
4.24	Trockenrohdichten und Humusgehalte mit linearer Gleichung und Bestimmtheitsmaß, unterteilt nach Bodenarten: Sande, Lehme, Schluffe und Tone und den Gefügeformen: ein (Einzelkorn), koh (Kohärentgefüge), koh/pri (Kohärent-/ Prismengefüge), pri (Prismengefüge), kru (Krümelgefüge), sub (Subpolyedergefüge), sub/pol (Subpolyeder-/ Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge), pri/pol (Prismen-/ Polyedergefüge), klu (Klumpengefüge), musch (Horizont mit hohem Muschelschalenanteil).	42

- 4.25 Boxplots der Vorbelastung nach Vorentwässerung auf -6 kPa für die Profilgruppen (Grünland, Röhricht und Watt) in den entsprechenden Tiefen (10 cm, 30 cm, 50 cm, 70 cm). Die gestrichelten Linien zeigen die Einstufung nach DVWK (1995). Mittelwerte werden als weißes Dreieck dargestellt und Anzahl der Proben (n). 48
- 4.26 Boxplots der Kohäsion und Winkel der inneren Reibung nach Vorentwässerung auf -6 kPa für die Profilgruppen (Grünland, Röhricht und Watt) in den entsprechenden Tiefen (10 cm, 30 cm, 50 cm und 70 cm). Mittelwerte werden als weißes Dreieck dargestellt und Anzahl der Proben (n). 49
- 4.27 Vorbelastung, Kohäsion und Winkel der inneren Reibung in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte. Aufgeteilt nach den Bodenarten-Hauptgruppen: Sande, Lehme, Schluffe und Tone. Trendlinien zeigen den Verlauf der Parameter in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte für die Gefügeformen: : ein (Einzelkorn), koh (Kohärentgefüge), koh/pri (Kohärent-/ Prismengefüge), pri (Prismengefüge), kru (Krümelgefüge), sub (Subpolyedergefüge), sub/pol (Subpolyeder-/ Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge), pri/pol (Prismen-/ Polyedergefüge), klu (Klumpengefüge), musch (Horizont mit hohem Muschelschalenanteil). 53
- 4.28 Boxplots der Kompressibilitätsindizes für die Bodenarten-Hauptgruppen: Sande, Lehme, Schluffe und Tone in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial (Ψ_m): -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa), mit der Anzahl der Proben (n). 55
- 4.29 Mittelwerte der Kompressibilitätsindizes (c_n) für die Bodenarten-Gruppen: Reinsande, Lehmsande und Schluffsande bei verschiedenen Matrixpotenzialen (ψ_m : -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa) und den Trockenrohdichteklassen (ρ_{t1} bis ρ_{t5}) nach AD - HOC - AG BODEN (2005). Eine weitere Unterteilung der Daten erfolgte nach den Gefügeformen: ein (Einzelkorn), koh (Kohärentgefüge), kru (Krümelgefüge), sub (Subpolyedergefüge), sub/pol (Subpolyeder-/ Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge), klu (Klumpengefüge). Die Trendlinien zeigen den Verlauf der Kompressibilitätsindizes mit negativerem Matrixpotenzial. 56

- 4.30 Mittelwerte der Kompressibilitätsindizes (c_n) für die Bodenarten-Gruppen: Sandlehme und Normallehme bei verschiedenen Matrixpotenzialen (ψ_m : -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa) und den Trockenrohdichteklassen (ρ_t1 bis ρ_t5) nach AD-HOC - AG BODEN (2005). Eine weitere Unterteilung der Daten erfolgte nach den Gefügeformen: koh (Kohärentgefüge), pri (Prismengefüge), kru (Krümelgefüge), sub/pol (Subpolyeder-/ Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge). Die Trendlinien zeigen den Verlauf der Kompressibilitätsindizes mit negativerem Matrixpotenzial. 57
- 4.31 Mittelwerte der Kompressibilitätsindizes (c_n) für die Bodenarten-Gruppen: Sandschluffe, Lehmschluffe und Tonschluffe bei verschiedenen Matrixpotenzialen (ψ_m : -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa) und den Trockenrohdichteklassen (ρ_t1 bis ρ_t5) nach AD - HOC - AG BODEN (2005). Eine weitere Unterteilung der Daten erfolgte nach den Gefügeformen: koh (Kohärentgefüge), koh/pri (Kohärent-/ Prismengefüge), pri (Prismengefüge), kru (Krümelgefüge), pol (Polyedergefüge). Die Trendlinien zeigen den Verlauf der Kompressibilitätsindizes mit negativerem Matrixpotenzial. 58
- 4.32 Mittelwerte der Kompressibilitätsindizes (c_n) für die Bodenarten-Gruppe der Schlufftone bei verschiedenen Matrixpotenzialen (ψ_m : -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa) und den Trockenrohdichteklassen (ρ_t1 bis ρ_t5) nach AD - HOC - AG BODEN (2005). Eine weitere Unterteilung der Daten erfolgte nach den Gefügeformen: koh (Kohärentgefüge), pri (Prismengefüge), sub/pol (Subpolyeder-/ Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge), pri/pol (Prismen-/ Polyedergefüge). Die Trendlinien zeigen den Verlauf der Kompressibilitätsindizes mit negativerem Matrixpotenzial. 59
- 4.33 Boxplots der Kompressibilitätsindizes (c_n) an den Grünlandstandorten. Unterteilt nach den Tiefen 10 cm, 30 cm, 50 cm und 70 cm, den Bodenarten-Hauptgruppen: Sande, Lehme, Schluffe und Tone, den Matrixpotenzialen (ψ_m : -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa) und der Anzahl der Proben (n). Gestrichelte Linien zeigen die Klassengrenzen nach Tabelle 4.4. 61

- 4.34 Boxplots der Kompressibilitätsindizes (c_n) an den Röhrichtstandorten. Unterteilt nach den Tiefen 10 cm, 30 cm und 50 cm, den Bodenarten-Hauptgruppen: Sande, Lehme, Schluffe und Tone, den Matrixpotenzialen (ψ_m : -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa) und der Anzahl der Proben (n). Gestrichelte Linien zeigen die Klassengrenzen nach Tabelle 4.4. 62
- 4.35 Boxplots der Kompressibilitätsindizes (c_n) an den Wattstandorten. Unterteilt nach den Tiefen 10 cm und 30 cm, den Bodenarten-Hauptgruppen: Sande und Tone, den Matrixpotenzialen (ψ_m : -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa) und der Anzahl der Proben (n). Gestrichelte Linien zeigen die Klassengrenzen nach Tabelle 4.4. . . . 63
- 4.36 Boxplots der Luftleitfähigkeit in logarithmischer Darstellung für die Bodenarten-Hauptgruppe der Sande mit den Gefügeformen: ein (Einzelkorngefüge), koh (Kohärentgefüge), kru (Krümelgefüge) und sub (Subpolyedergefüge) bei den Matrixpotenzialen (ψ_m) -3 kPa bis -50 kPa, für die zyklischen Belastung bei -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa (c_{n3} , c_{n6} , c_{n15}) vor (v) und nach (n) der Belastung und für die Vorbelastung bei -6 kPa (P_v), jeweils vor (v) und nach (n) der Belastung. 65
- 4.37 Boxplots der Luftleitfähigkeit in logarithmischer Darstellung für die Bodenarten-Hauptgruppe der Sande mit den Gefügeformen: sub/pol (Subpolyeder-Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge), klu (Klumpengefüge) bei den Matrixpotenzialen (ψ_m) -3 kPa bis -50 kPa, für die zyklischen Belastung bei -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa (c_{n3} , c_{n6} , c_{n15}) vor (v) und nach (n) der Belastung und für die Vorbelastung bei -6 kPa (P_v), jeweils vor (v) und nach (n) der Belastung. . . . 66
- 4.38 Boxplots der Luftleitfähigkeit in logarithmischer Darstellung für die Bodenarten-Hauptgruppe der Lehme mit den Gefügeformen: ein (Einzelkorn), koh (Kohärentgefüge), pri (Prismengefüge), kru (Krümelgefüge) bei den Matrixpotenzialen (ψ_m) -3 kPa bis -50 kPa, für die zyklischen Belastung bei -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa (c_{n3} , c_{n6} , c_{n15}) vor (v) und nach (n) der Belastung und für die Vorbelastung bei -6 kPa (P_v), jeweils vor (v) und nach (n) der Belastung. . . . 67

4.39	Boxplots der Luftleitfähigkeit in logarithmischer Darstellung für die Bodenarten-Hauptgruppe der Lehme mit den Gefügeformen: pol (Polyedergefüge), sub/pol (Subpolyeder-/Polyedergefüge) bei den Matrixpotenzialen (ψ_m) -3 kPa bis -50 kPa, für die zyklischen Belastung bei -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa (c_n3 , c_n6 , c_n15) vor (v) und nach (n) der Belastung und für die Vorbelastung bei -6 kPa (P_v), jeweils vor (v) und nach (n) der Belastung.	68
4.40	Boxplots der Luftleitfähigkeit in logarithmischer Darstellung für die Bodenarten-Hauptgruppe der Schluffe mit den Gefügeformen: koh (Kohärentgefüge), kru (Krümelgefüge), pri (Prismengefüge) pol (Polyedergefüge) bei den Matrixpotenzialen (ψ_m) -3 kPa bis -50 kPa, für die zyklischen Belastung bei -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa (c_n3 , c_n6 , c_n15) vor (v) und nach (n) der Belastung und für die Vorbelastung bei -6 kPa (P_v), jeweils vor (v) und nach (n) der Belastung. . . .	69
4.41	Boxplots der Luftleitfähigkeit in logarithmischer Darstellung für die Bodenarten-Hauptgruppe der Tone mit den Gefügeformen: koh (Kohärentgefüge), sub/pol (Subpolyeder-/Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge) bei den Matrixpotenzialen (ψ_m) -3 kPa bis -50 kPa, für die zyklischen Belastung bei -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa (c_n3 , c_n6 , c_n15) vor (v) und nach (n) der Belastung und für die Vorbelastung bei -6 kPa (P_v), jeweils vor (v) und nach (n) der Belastung. . . .	70
4.42	Boxplots der Luftleitfähigkeit in logarithmischer Darstellung für die Bodenarten-Hauptgruppe der Tone mit den Gefügeformen: pri (Prismengefüge), pri/pol (Prismen-/Polyedergefüge) bei den Matrixpotenzialen (ψ_m) -3 kPa bis -50 kPa, für die zyklischen Belastung bei -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa (c_n3 , c_n6 , c_n15) vor (v) und nach (n) der Belastung und für die Vorbelastung bei -6 kPa (P_v), jeweils vor (v) und nach (n) der Belastung.	71
4.43	Wertebereich des Kompressibilitätsindex (c_n) für die verschiedenen Texturen, Minimalwert, 1. Quartil, Median, 3. Quartil und Maximalwert.	73

- 4.44 Beziehung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Kompressibilitätsindex (c_n) für Sande (ss) bei einem Matrixpotenzial von -3 kPa (links), -6 kPa (Mitte) und -15 kPa (rechts). Die gestrichelte Linie zeigt die 1:1 Linie, die durchgezogene Linie zeigt die Trendlinie der Pedotransferfunktion. Im Diagramm wird außerdem die lineare Funktionsgleichung für die Trendlinie, das Bestimmtheitsmaß (R^2) und die Anzahl der Proben (n) gezeigt. 75
- 4.45 Beziehung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Kompressibilitätsindex (c_n) für Sande (ls, us) bei einem Matrixpotenzial von -3 kPa (links), -6 kPa (Mitte) und -15 kPa (rechts). Die gestrichelte Linie zeigt die 1:1 Linie, die durchgezogene Linie zeigt die Trendlinie der Pedotransferfunktion. Im Diagramm wird außerdem die lineare Funktionsgleichung für die Trendlinie, das Bestimmtheitsmaß (R^2) und die Anzahl der Proben (n) gezeigt. 76
- 4.46 Beziehung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Kompressibilitätsindex (c_n) für Lehme (sl, ll) bei einem Matrixpotenzial von -3 kPa (links), -6 kPa (Mitte) und -15 kPa (rechts). Die gestrichelte Linie zeigt die 1:1 Linie, die durchgezogene Linie zeigt die Trendlinie der Pedotransferfunktion. Im Diagramm wird außerdem die lineare Funktionsgleichung für die Trendlinie, das Bestimmtheitsmaß (R^2) und die Anzahl der Proben (n) gezeigt. 78
- 4.47 Beziehung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Kompressibilitätsindex (c_n) für Schluffe (su, lu, tu) bei einem Matrixpotenzial von -3 kPa (links), -6 kPa (Mitte) und -15 kPa (rechts). Die gestrichelte Linie zeigt die 1:1 Linie, die durchgezogene Linie zeigt die Trendlinie der Pedotransferfunktion. Im Diagramm wird außerdem die lineare Funktionsgleichung für die Trendlinie, das Bestimmtheitsmaß (R^2) und die Anzahl der Proben (n) gezeigt. 79
- 4.48 Beziehung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Kompressibilitätsindex (c_n) für Tone (ut) bei einem Matrixpotenzial von -3 kPa (links), -6 kPa (Mitte) und -15 kPa (rechts). Die gestrichelte Linie zeigt die 1:1 Linie, die durchgezogene Linie zeigt die Trendlinie der Pedotransferfunktion. Im Diagramm wird außerdem die lineare Funktionsgleichung für die Trendlinie, das Bestimmtheitsmaß (R^2) und die Anzahl der Proben (n) gezeigt. 81

5.1 Anwendung der Parameter Tiefe, Vorbelastung (P_v), Trockenrohdichte (ρ_t), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ), Humus, α und n (van Genuchten Parameter) bei verschiedenen Texturen: Sanden, Lehmen, Schluffen und Tonen. Dabei steht ein \square für die Anwendung bei einem Matrixpotenzial von -3 kPa, \circ bei -6 kPa und \triangle bei -15kPa. Wenn das Symbol leer ist geht der Parameter mit einem positiven Vorzeichen, und bei einem ausgefüllten Symbol mit einem negativen Vorzeichen in die Pedotransferfunktion ein. 96

Tabellenverzeichnis

3.1	Übersicht der Vorentwässerungsgrade bei denen eine zyklische Belastung durchgeführt wurde. Bei einem schwarzen Punkt erfolgte eine Messung.	17
4.1	Kennwerte der Wasserbindung für Sande (ss, ls, us), Lehme (sl, ll), Schluffe (su, lu, tu) und Tone (ut) bei verschiedenen Gefügeformen: : ein (Einzelkorn), koh (Kohärentgefüge), koh/pri (Kohärent-/ Prismengefüge), pri (Prismengefüge), kru (Krümelgefüge), sub (Subpolyedergefüge), sub/pol (Subpolyeder-/ Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge), pri/pol (Prismen-/ Polyedergefüge), klu (Klumpengefüge), musch (Horizont mit hohen Muschelschalenanteil). Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005.	44
4.2	Gesättigte Wasserleitfähigkeit für die Bodenarten-Gruppen der Sande (ss, ls, us), Lehme (sl, ll), Schluffe (su, lu, tu) und Tone (ut) bei verschiedenen Gefügeformen: ein (Einzelkorn), koh (Kohärentgefüge), koh/pri (Kohärent-/ Prismengefüge), pri (Prismengefüge), kru (Krümelgefüge), sub (Subpolyedergefüge), sub/pol (Subpolyeder-/ Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge), pri/pol (Prismen-/ Polyedergefüge), klu (Klumpengefüge), musch (Horizont mit hohen Muschelschalenanteil) und Anzahl der Proben (n). Einstufung nach AD - HOC - AG BODEN, 2005.	46
4.3	Bodenphysikalische Kennwerte, Vorbelastung (P_v) bei einer Vorentwässerung von -6 kPa, Trockenrohddichte (ρ_t) und Festsubstanzdichte (ρ_f) für die Bodenarten-Gruppe und den Gefügeformen: ein (Einzelkorn), koh (Kohärentgefüge), koh/pri (Kohärent-/ Prismengefüge), pri (Prismengefüge), kru (Krümelgefüge), sub (Subpolyedergefüge), sub/pol (Subpolyeder-/ Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge), pri/pol (Prismen-/ Polyedergefüge), klu (Klumpengefüge), musch (Horizont mit hohen Muschelschalenanteil). Und der Anzahl der Messungen (n).	51
4.4	Einstufungen des Kompressibilitätsindex in Abhängigkeit der Textur.	73

4.5	Pedotransferfunktionen des Kompressibilitätsindex für Sande (ss). Bei den Matrixpotenzialen -3 kPa (c_{n3}), -6 kPa (c_{n6}) und -15 kPa (c_{n15}), mit dem Bestimmtheitsmaß (R^2), dem Root-Mean-Square-Error (RMSE) und der Anzahl der Daten (n). Einheiten der Parameter: Tiefe (cm), P_v bei ψ -6 kPa (kPa), ρ_t ($g\ cm^{-3}$), c bei ψ -6 kPa (kPa), φ bei ψ -6 kPa ($^\circ$), Humus ($g\ 100\ g^{-1}$), α und n ().	74
4.6	Pedotransferfunktionen des Kompressibilitätsindex für Sande (Lehmsande (ls) und Schluffsande (us)). Bei den Matrixpotenzialen -3 kPa (c_{n3}), -6 kPa (c_{n6}) und -15 kPa (c_{n15}), mit dem Bestimmtheitsmaß (R^2), dem Root-Mean-Square-Error (RMSE) und der Anzahl der Daten (n). Einheiten der Parameter: Tiefe (cm), P_v bei ψ -6 kPa (kPa), ρ_t ($g\ cm^{-3}$), c bei ψ -6 kPa (kPa), φ bei ψ -6 kPa ($^\circ$), Humus ($g\ 100\ g^{-1}$), α und n ().	76
4.7	Pedotransferfunktionen des Kompressibilitätsindex für Lehme (sl, ll). Bei den Matrixpotenzialen -3 kPa (c_{n3}), -6 kPa (c_{n6}) und -15 kPa (c_{n15}), mit dem Bestimmtheitsmaß (R^2), dem Root-Mean-Square-Error (RMSE) und der Anzahl der Daten (n). Einheiten der Parameter: Tiefe (cm), P_v bei ψ -6 kPa (kPa), ρ_t ($g\ cm^{-3}$), c bei ψ -6 kPa (kPa), φ bei ψ -6 kPa ($^\circ$), Humus ($g\ 100\ g^{-1}$), α und n ().	77
4.8	Pedotransferfunktionen des Kompressibilitätsindex für Schluffe (su, lu, tu). Bei den Matrixpotenzialen -3 kPa (c_{n3}), -6 kPa (c_{n6}) und -15 kPa (c_{n15}), mit dem Bestimmtheitsmaß (R^2), dem Root-Mean-Square-Error (RMSE) und der Anzahl der Daten (n). Einheiten der Parameter: Tiefe (cm), P_v bei ψ -6 kPa (kPa), ρ_t ($g\ cm^{-3}$), c bei ψ -6 kPa (kPa), φ bei ψ -6 kPa ($^\circ$), Humus ($g\ 100\ g^{-1}$), α und n ().	79
4.9	Pedotransferfunktionen des Kompressibilitätsindex für Tone (ut). Bei den Matrixpotenzialen -3 kPa (c_{n3}), -6 kPa (c_{n6}) und -15 kPa (c_{n15}), mit dem Bestimmtheitsmaß (R^2), dem Root-Mean-Square-Error (RMSE) und der Anzahl der Daten (n). Einheiten der Parameter: Tiefe (cm), P_v bei ψ -6 kPa (kPa), ρ_t ($g\ cm^{-3}$), c bei ψ -6 kPa (kPa), φ bei ψ -6 kPa ($^\circ$), Humus ($g\ 100\ g^{-1}$), α und n ().	80

Abkürzungsverzeichnis

β	Winkel der Abrutschfläche ($^{\circ}$)
χ	Wassersättigungsgrad ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)
ϵ	Aktuelle Porenziffer
$\epsilon(\text{N})$	Porenziffer als Funktion der Be- und Entlastungszyklus
ϵ_{r}	Endporenziffer
ϵ_{s}	Anfangsporenziffer
ϵ_u^1	Porenziffer nach dem ersten Be- und Entlastungszyklus
η	Viskosität
γ_{w}	Gewicht des Wasser ($9,81 \text{ kN m}^{-3}$)
κ	Erodierbarkeitskoeffizient ($\text{m}^3 \text{N}^{-1} \text{s}^{-1}$)
ψ_{m}	Matrixpotenzial (kPa)
ρ_{f}	Festsubstanzdichte (g cm^{-3})
ρ_{l}	Dichte der Luft (g cm^{-3})
ρ_{m}	Dichte des umgebenden Mediums
ρ_{t}	Trockenrohddichte (g cm^{-3})
σ'	effektive Spannung (kPa)
σ_{n}	Normalspannung (kPa)
τ	Schwerwiderstand (kPa)
τ_{c}	kritischer Scherwiderstand (kPa)
τ_{o}	durchschnittlicher Scherwiderstand (kPa)
φ	Winkel der inneren Reibung ($^{\circ}$)
φ'	effektive Winkel der inneren Reibung ($^{\circ}$)
φ^b	Winkel zwischen Scherwiderstand und Matrixpotenzial ($^{\circ}$)

α	empirischer Parameter nach VAN GENUCHTEN (1980)
Δp	der eingestellte Durchströmungsdruck (hPa)
Δt	Zeit in der das Luftvolumen die Bodenprobe durchströmt (m s^{-1})
ΔV	Luftvolumen das die Bodenprobe durchströmt (kg m^{-3})
s_d	Gewicht des Bodens (kPa)
s_r	Scherwiderstand (kPa)
A	Fließquerschnittsfläche der zylindrischen Bodenprobe (cm^2)
c	Kohäsion (kPa)
c'	effektive Kohäsion (kPa)
c_n	Kompressibilitätsindex
ein	Einzelkorngefüge
f	Grundfläche der abnehmenden Wassersäule (cm^{-2})
FK	Feldkapazität (Vol.-%)
g	Erdbeschleunigung
GPV	Gesamtporenvolumen (Vol.-%)
h_0	Anfangshöhe der perkolierenden Wassersäule (cm)
h_1	Endhöhe der perkolierenden Wassersäule (cm)
k_f	gesättigte Wasserleitfähigkeit (cm d^{-1})
k_l	Luftleitfähigkeitskoeffizient (cm s^{-1})
klu	Klumpengefüge
koh	Kohärentgefüge
kru	Krümelfgefüge
l	Fließstrecke (cm)
LK	Luftkapazität (Vol.-%)

ln	logarithmus naturalis
m	empirischer Parameter nach VAN GENUCHTEN (1980)
m_f	Masse der Festsubstanz (g cm^{-3})
m_l	Volumen der Festsubstanz (cm^3)
MThw	mittleres Tidehochwasser
MTnw	mittleres Tideniedrigwasser
musch	Horizont mit Muschelschalenanteil
N	Anzahl der Lastzyklen
n	Manning Rauigkeitskoeffizient
n	empirischer Parameter nach VAN GENUCHTEN (1980)
nFK	nutzbare Feldkapazität (Vol.-%)
P_v	Vorbelastung (kPA)
pF	dekadischer Logarithmus der Wasserspannung
pol	Polyedergefüge
pri	Prismengefüge
R	hydraulischer Radius (m)
r	Radius der Körner
RMSE	root-mean-square error
S	Neigung des Wasserlaufs (m m^{-1})
SE	Schafeinheit (Mutterschaf, 1,5 Lämmern und 0,3 Zutretern (Jährlinge))
sub	Subpolyedergefüge
T	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
t	Fließzeit (sek.)
TW	Totwasser (Vol.-%)

U	Geschwindigkeitszunahme (m s^{-1})
u	gemittelte Wassergeschwindigkeit (m s^{-1})
u_a	Porenluftdruck (kPa)
u_w	Porenwasserdruck (kPa)
V_g	Gesamtbodenvolumen (Vol.-%)
W	Gewicht des feuchten Bodenblocks (kN m^{-2})
WG	Wassergehalt (Vol.-%)
WS	Wassersäule (m)

1 Einleitung

Ein Ästuar ist ein dynamisches System das stetiger Veränderung unterliegt. Durch Ablagerungen an den Gleithängen und Abtrag an den Prallhängen werden die Uferbereiche kontinuierlich verändert (STRAHLER und STRAHLER, 2009). Vor allem bei Hochwasser können erhebliche Mengen Sediment transportiert werden, die an anderer Stelle wieder abgesetzt werden. Dabei bleiben Partikel mit einem kleinen Äquivalentdurchmesser länger in Schwebelage und setzen sich erst in ruhigen Gewässerabschnitten ab. Die daraus entstehenden Aluvialböden wurden schon früh besiedelt. Damit die Schiffbarkeit dieser dynamischen Systeme, und somit die Erreichbarkeit der wachsenden Städte an den Flussufern erhalten blieb, wurden schon frühzeitig Uferbefestigung und Vertiefung als anthropogene Eingriffe vorgenommen. Dies war auch im Bereich der Tideelbe der Fall.

Durch die Vertiefungen der Tideelbe seit 1818 (MEIER, 2014), kann die Tide inzwischen weiter stromaufwärts vordringen, wodurch das Tidehochwasser in Hamburg heute höher und das Tideniedrigwasser tiefer ist. Das hat zur Folge, dass durch die stärker einlaufende Tide heute mehr Sediment in Richtung Hamburger Hafen transportiert wird, die schwächere Ebbe aber weniger Sediment wieder abtransportieren kann. Dieser Effekt wird als „tidal pumping“ bezeichnet (FREITAG et al., 2007). Hierdurch bedingt hat eine stärkere Sedimentation an bestimmten Bereichen der Elbe eingesetzt. Wenn durch die Sedimentation die Schifffahrt beeinträchtigt wird, muss ausgebaggert werden. Dabei sind die Mengen an Baggergut in den letzten Dekaden von 5 Mio. m³ auf 10 Mio. m³ pro Jahr angestiegen (ROLINSKI und EICHWEBER, 2000). Durch die Fahrinnenanpassung, die Uferbefestigung und die Deiche ist das ehemals dynamische Ästuar zu einem starren System geworden.

An den Ufern dieses starren Systems trifft die Wellenenergie als zyklische Last auf den Boden. Dies führt zunächst zu einer elastischen, mit steigender Anzahl von Belastungen jedoch zu einer plastisch werdenden Verformung des Bodens. Die dabei auftretende Setzung des Bodens führt zu einer Veränderung des Gas- und Wasserhaushaltes innerhalb der Bodenporen und wirkt sich damit auf das Matrixpotenzial aus. Wird das Matrixpotenzial während der zyklischen Belastung positiv, kann dies zu einer Destabilisierung des Bodens, bis hin zum Abrutschen des Ufers führen. Das Sediment vom Ufer wird in den Fluss eingebracht und muss bei ungünstiger Sedimentation als Baggergut wieder aus der Elbe entfernt werden.

Die Ziele der vorliegenden Arbeit sind:

- Die Erhebung von bodenphysikalischen Parametern entlang der Tideelbe (Vorbelastung Scherparameter, Kompressibilitätsindex, gesättigte Wasserleitfähigkeit, Lagerungsdichte, Festsubstanzdichte), als Eingangsparameter für Pedotransferfunktionen.
- Entwicklung von Pedotransferfunktionen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex anhand von einfachen bodenphysikalischen Kenngrößen zur Bestimmung der Bodenstabilität gegenüber zyklischer Belastung an den Ufern anhand von einfachen bodenphysikalischen Kenngrößen.

2 Stand der Forschung

2.1 Schiffsinduzierte Wellenbelastungen und deren Auswirkung am Ufer

Die Ufer der Tideelbe sind wind- oder schiffsinduzierten Wellenbelastungen ausgesetzt. Die schiffsinduzierten Wellenbelastungen werden durch die Verdrängung von Wasser an Bug, Heck und der Seiten von passierenden Schiffen erzeugt. Hierbei werden Wellensysteme mit unterschiedlichen Perioden generiert. FLÜGGE UND ULICZKA (1996) unterschieden zwischen den langperiodischen, vorauslaufenden Schwallwellen, dem Bugstau direkt am Schiffskörper, dem Absunk seitlich am Schiff, der Heckwelle als Teil des durch den Absunk angeregten langperiodischen Primärwellensystems und der kurzperiodischen Heckwelle. Diese unterschiedlichen Wellensysteme sorgen für schwankende Wasserstände am Ufer. Jedes Schiff erzeugt eine charakteristische Wellenform, die von der Schiffsform, der Schiffsgeschwindigkeit, dem Passierabstand vom Ufer, dem Tiefgang und der Gesamtwassertiefe abhängig ist (NANSON et al., 1994; BAW, 1996; BAW, 2004a; NAKISA et al., 2014). Sowohl der Absunk als auch die danach auflaufenden Wellen üben Belastungen auf die Uferböschung aus. Die durch den Wellenschlag auf das Ufer einwirkende Energie ist nach FÜHRBÖTER (1991) von den Wellenhöhen, den Perioden mit denen die Wellen auflaufen, der Wassertiefe vor dem Ufer und der Neigung des Ufers abhängig. Vor allem die Uferneigung und die Wassertiefe beeinflussen das Brechen der Welle am Ufer und damit den Energieinput auf das Ufer. Schon wenn sich auf dem Ufer noch eine einige wenige Zentimeter hohe Wasserschicht befindet, kann dies den Druckschlag dämpfen da in der Wasser-Wasser Aufschlagsfläche mehr Luft eingeschlossen wird als bei der Aufschlagsfläche Wasser-Ufer. Die eingeschlossene Luft hat eine höhere Elastizität als das Wasser. 1 % Luft im Wasser reduzieren die Schallgeschwindigkeit um ca. 10 % und dadurch auch die Belastung auf das Ufer (LUNDGREN, 1969; FÜHRBÖTER, 1986).

Damit es durch die Wellen zu einer Erosion kommt, ist die Fließgeschwindigkeit im Gewässer von Bedeutung. Dieser Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit und Erosion wird im Hjulström-Diagramm (HJULSTRÖM, 1935) gezeigt. Demnach wird für die Erosion von Ton

durch die kohäsiven Kräfte eine höhere Energie benötigt als für die Erosion von Sanden. In einer Suspension, bleiben Partikel mit einem kleineren Äquivalentdurchmesser aber länger in der Schwebe als Partikel mit größerem Äquivalentdurchmesser (STOKE, 1845). Nach der Untersuchung von ROBERTS ET AL. (1998) verhalten sich kleinere Quarzpartikel gegenüber fluvialer Erosion wie Tone; aber insgesamt sind feinkörnige, kohäsionsarme oder -lose Sedimente wie Schluffe und Sande stärker von Erosion betroffen als Tone (RINALDI et al., 2004). Die Gefahr der Entstehung eines Porenwasserüberdrucks, und damit der Bodenverflüssigung ist nach LADE UND YAMAMURO (1997) abhängig von der Zusammensetzung der Textur. Dabei zeigen Reinsande die geringste Gefahr für Porenwasserüberdrücke. Enthalten Sande höhere Anteile feinerer Texturen, erhöht sich die Gefahr für Porenwasserüberdrücken und damit der Verflüssigung. Nach SLADEN ET AL. (1985) und CASAGLI ET AL. (1990) kommt es in Schluffen und Tonen durch die geringe Wasserleitfähigkeit eher zu Porenwasserüberdrücken und dadurch zu Instabilität. Die Gefahr von Bodenverflüssigung sehen MÉNARD UND BROISE (1975) jedoch in einem Sand- oder Schluffhorizont höher als in einem Tonhorizont.

In den fluvial abgelagerten Sedimenten einer Uferböschung liegen häufig sehr unterschiedliche Texturen geschichtet vor, wodurch die Wasserleitfähigkeit beeinflusst wird. Schon ein Unterschied von 16 % im Tonanteil kann ausreichen um die Wasserleitfähigkeit zwischen zwei Horizonten um das 2,5 fache zu reduzieren (WILSON et al., 2007). Dies kann am Ufer dazu führen, dass vor allem in sandigen Horizonten laterale Flüsse entstehen, und der Austritt von Bodenwasser an der Uferböschung erfolgt. Dadurch können Partikel mit dem Bodenwasser verlagert und mit dem Flusswasser abtransportiert werden (DUNNE, 1990; HAGERTY, 1991b). Der Abtransport von Sedimenten aus der Uferböschung kann zu einer Aushöhlung führen und damit zu einer Destabilisierung beitragen, die einen Teilabbruch des Ufers zur Folge haben kann. Bei Lysimeterversuchen mit geschichteten Substraten unterschiedlicher Textur konnten FOX ET AL. (2006) vor dem Versagen des Bodenkörpers, Spannungsrisse beobachten, welche bei WILSON ET AL. (2007) in ähnlichen Laborversuchen aber nicht aufgetreten sind. Für das letztendliche Versagen der Bodenstabilität ist der Wassergehalt von Bedeutung. OWOPUTI UND STOLTE (2001) haben festgestellt, dass ein Versagen der Bodenstabilität am Ufer schon vor der vollständigen Sättigung eintreten kann. Nach RINALDI UND CASAGLI (1999) müssen Ufer nicht komplett gesättigt sein oder Unterspülungen vorliegen damit es zu einem Abbruch des

Ufers kommt. Schon geringe Porenwasserüberdrücke können zu einem Verlust der Kohäsion führen. Dies ist besonders in Schluffen und Sanden mit geringer Kohäsion der Fall. Auch Niederschläge können zu einer Aufsättigung des Oberbodens führen die den Überlagerungsdruck auf die unteren Horizonte erhöht und hier die Entstehung von Porenwasserüberdrücken begünstigt. Ebenso kann bei geringer Wasserleitfähigkeit des Bodens der erhöhte Überlagerungsdruck nach einem Hochwasser zu einer Destabilisierung führen, sobald der Gegendruck des Wassers an der Böschung fehlt. Durch die entstehenden Porenwasserüberdrücke nimmt vor allem die Scherfestigkeit des Ufers ab (CASAGLI et al., 1999). Außerdem können mechanische Belastungen in wassergesättigtem Boden zu Porenwasserüberdrücken und zu einem vollständigen Stabilitätsverlust führen. Im ungesättigten Boden können Lasteinträge durch den kompressiblen Gasanteil gedämpft werden. KÖHLER (1997) geht davon aus, dass im Wasser unterhalb des Wasserspiegels Gasblasen einen Anteil von 20 % ausmachen können, dies aber vom Umgebungsdruck in der Wassersäule abhängig ist und erst bei 10 bis 20 m WS, bzw. unter besonderen Voraussetzungen erst ab 80 m WS keine Bedeutung mehr hat. Dieser Gasanteil im Porenwasser kann zu einer Verzögerung bei den Porenwasserdruckanpassungen führen. In Sandhorizonten unterhalb der Wasserlinie kann das komprimierte Gas durch den Absink von Schiffen allerdings zu einer Umlagerung des Sedimentes führen, wenn der Gegendruck der Wassersäule fehlt (KÖHLER, 2000).

2.2 Schutz- und Befestigung

An der Tideelbe gibt es verschiedene Uferverbauungen (Deckwerk) mit Steinschüttungen, Pflasterungen und Buhnen, die eine Erosion am Ufer verhindern oder minimieren sollen. Jedoch auch an einem Ufer mit einem Deckwerk welches vor Erosion schützen soll kann es zu Erosionsereignissen kommen. Wenn ein Porenwasserüberdruck im Boden des Deckwerks entsteht, kann dies zum Abgleiten des Ufers führen (BAW, 2004b). Dieser Porenwasserüberdruck kann beispielsweise nach einem Hochwasser entstehen, wenn der Wasserspiegel an der Böschung absinkt. Dann fehlt der Gegendruck der Wassersäule und es entsteht ein instationärer Porenwasserüberdruck, der zu einem Versagen des Bodens an der Uferböschung führt (ULLRICH et al., 1986; KÖHLER, 2000; RINALDI et al., 2004; DAPPORTO et al., 2003). Eine weitere

Möglichkeit der Befestigung von Ufern ist der Bewuchs mit Röhricht. Durch die Aufnahme von Wasser über die Pflanzenwurzeln wird das Matrixpotenzial negativer und die Stabilität im Boden nimmt zu (SIMON und COLLISON, 2002). Außerdem verringern Pflanzen im Uferbereich die Erosion, da sich zwischen den Pflanzen Sediment akkumuliert. Dieser positive Einfluss der Pflanzen als Uferbefestigung wird aber mit zunehmender Wellenhöhe geringer (COOPS et al., 1996).

2.3 Auswirkungen von mechanischer Belastung auf Porenkapazitäts- und Funktionalitätskennwerte

Poren sind im Boden für den Gas- und Wasseraustausch zuständig (HORN et al., 1994). Ein erhöhter Anteil an organischer Substanz führt zu einer Erhöhung des Gesamtporenvolumens und zu einem besseren Gas- und Wasseraustausch. Bei mechanischer Belastung wird die Trockenrohdichte erhöht und die Porengrößenzusammensetzung verändert (KUNCORO et al., 2014). Dabei führt die Belastung von ungestörten tonigen Böden zu einer Abnahme der Grobporen und zur Abnahme des Gesamtporenvolumens (ALAKUKKU, 1996). In sandigen Böden ist eine Abnahme der Grobporen ($>50 \mu m$) und eine Zunahme der Mittelporen ($10-50 \mu m$) nach GEBHARDT ET AL. (2009) zu sehen. Bei Böden mit organischen Anteilen kommt es nach ALAKUKKU (1996) eher zu einer Verschiebung der Porenzusammensetzung. Nach KUNCORO ET AL. (2014) kommt es bei steigender mechanischer Belastung zu einer Abnahme der Poren mit einem Durchmesser von $\geq 30 \mu m$, während die Anzahl der Poren von $< 30 \mu m$ gleich bleibt. Es erfolgt also eine Verschiebung der Porenräume. Dieser Effekt der Abnahme von Poren $\geq 30 \mu m$ ist nach MATTHEWS ET AL. (2010) besonders groß, wenn der Boden bei Matrixpotenzialen feuchter als -10 kPa belastet wird. Insgesamt nimmt damit durch die mechanische Belastung die Kontinuität der Makroporen ab und die Tortuosität zu, wodurch der Gas- und Wasseraustausch behindert wird (KUNCORO et al., 2014; BERISSO et al., 2012). Dabei zeigen Bioporen eine höhere Stabilität gegenüber Belastung als Inter-Aggregat Poren (SCHÄFFER et al., 2008b; LIPIEC et al., 2015). Die Bioporen werden durch biogene, organische Beschichtungen stabilisiert, die von Wurzelexsudaten oder Wurmausscheidungen stammen (CHENU et al., 2000; JÉGOU et al.,

2002). Die Stabilität der Poren sind neben der Aggregation außerdem vom Wassergehalt im Boden abhängig. KREMER ET AL. (2002) konnte bei höheren Wassergehalten unter Belastung eine geringere Stabilität von Porensystemen feststellen, was zu ihrer Zerstörung oder zu Verengungen („bottle necks“) führte. Außerdem können feinere Poren mit Wassermenisken verschlossen werden und stehen so nicht mehr für den Gasaustausch zu Verfügung (GEBHARDT et al., 2009). Die Stabilität der Poren sind außerdem von der Lage abhängig, vertikale Poren sind stabiler als horizontale Poren (BOHNE und HARTGE, 1982). Neben den Änderungen im Porensystem erhöhen sich im Zuge der Verdichtung die Kontaktpunkte zwischen den einzelnen Partikeln und die Stabilität steigt (HORN, 2004). Eine Zunahme von Kontaktpunkten kann neben mechanischer Belastung auch durch Quellung und Schrumpfung im Boden entstehen (HORN und SMUCKER, 2005; PENG et al., 2007; FERRERO et al., 2007). Die Schrumpfung ist dabei umso stärker ausgeprägt, je kontinuierlicher und häufiger sich Schrumpfung und Quellung wiederholen. Damit sich Quellung und Schrumpfung auf das Bodengefüge auswirken, muss nach HEINONEN (1982) zit. in OADES (1993) mindestens 15 % Ton enthalten sein. Durch die Quellung wird die Trockenrohdichte geringer (HÅKANSSON und LIPIEC, 2000) und die Zahl der Kontaktpunkte zwischen den Partikeln nehmen ab. Während der Schrumpfung kommt es zu einer Abnahme des Volumens, einer Erhöhung der Trockenrohdichte und einer Zunahme von Kontaktpunkten zwischen den Partikeln (SIMMS und YANFUL, 2001; WHALLEY et al., 2008). Dies führt zu einer Erhöhung der Aggregatstabilität und damit der Widerstandsfähigkeit des Bodens gegenüber mechanischen Belastungen (ARTHUR et al., 2012) und zur Abnahme der nutzbaren Feldkapazität. Durch eine dichtere Lagerung der Bodenpartikel bei der Schrumpfung kann es zu einer Abnahme der Wasserleitfähigkeit kommen (SEMMELE et al., 1990). Wenn durch die horizontale Schrumpfung Risse entstehen, wird die Wasserleitfähigkeit allerdings erhöht, wodurch das Wasser schneller in den Unterboden vordringen kann (LIU et al., 2003).

2.4 Quantifizierung der Uferstabilität anhand von Bodenkennwerten

2.4.1 Trockenrohdichte

Die Trockenrohdichte eines Bodens ist ein erster grober Parameter, der etwas über die Stabilität des Bodens aussagt. Sie wird vom Gehalt an organischer Substanz, vom Wassergehalt, vom Tongehalt und von der Tiefe beeinflusst (GOSSELINK et al., 1984; HEUSCHER et al., 2005; SUUSTER et al., 2011). Mit zunehmender Tiefe erhöht sich der Überlagerungsdruck auf den Bodenhorizont und damit die Trockenrohdichte. Es gibt verschiedene Ansätze die Trockenrohdichte über die vorher genannten Parameter zu modellieren (HEUSCHER et al., 2005; KELLER und HÅKANSSON, 2010; SUUSTER et al., 2011). Die Trockenrohdichte wird außerdem durch Quellung und Schrumpfung beeinflusst, da die Partikel neu zu Aggregaten angeordnet werden. Wie stark die Partikel zu neuen Aggregaten angeordnet werden ist abhängig vom Matrixpotential, dem Gehalt an organischer Substanz, und der Tonmineralogie (LAL, 2006). Pflanzen mit ihrem Wurzelwachstum können instabile Makroaggregate zerstören, wodurch kleinere, stabilere Mikroaggregate geschaffen werden (SIX et al., 2004). Außerdem erhöhen Pflanzen durch Wurzelausscheidungen und abgestorbene Wurzeln den Gehalt an organischer Substanz im Boden (BLUME et al., 2010). Durch einen höheren Anteil von organischer Substanz steigt wiederum die Porosität im Aggregat und die Stabilität bei mechanischer Belastung wird kleiner; gleichzeitig steigt die Wasserstabilität der Aggregate (ZHANG, 1994; SPACCINI und PICCOLO, 2013). All diese Auswirkungen auf die Aggregate wirken sich auch auf die Trockenrohdichte aus. Denn je dichter der Boden gelagert ist, entweder durch mechanische Belastung oder durch Aggregation, desto höher ist die Trockenrohdichte.

2.4.2 Vorbelastung

Die Vorbelastung ist ein Bodenstabilitätsparameter, der etwas über frühere hydraulische, chemische oder biologische Belastungen aussagt, die auf den Boden eingewirkt haben (LEBERT et al., 2007; BLUME et al., 2010). Wird erneut eine Last auf den Boden aufgetragen, so entsteht

im Wiederverdichtungsbereich eine elastische (reversible) oder bei Überschreitung der Vorbelastung im Erstverdichtungsbereich eine plastische (irreversible) Verformung des Bodens, je nach aufgebrachtener Last (WICHTMANN et al., 2005). Bei einer plastischen Verformung kommt es zu einer Änderung der Bodenstruktur und der Bodenfunktionen, während es im elastischen Bereich der Wiederverdichtung als Ergebnis der früheren Belastung durch Mechanik, Wasser, chemische Prozesse und biologische Einflüsse zu keiner weiteren Verformungen kommt (HORN et al., 1995; MOSADDEGHI et al., 2007; KELLER et al., 2012).

Die Bodenstruktur beeinflusst die Vorbelastung, indem es mit steigender Aggregierung zu einem Ansteigen der Vorbelastung kommt (Prismen-/Kohärentgefüge < Subpolyederggefüge). Neben der Textur und Aggregierung sind die aufgetragene Last und das Matrixpotenzial für die Stabilität des Bodens von Bedeutung (HORN und FLEIGE, 2003). Je negativer das Matrixpotenzial desto größer ist der Unterdruck und damit die Festigkeit in Abhängigkeit von der Textur. Die Eigenfestigkeit des Bodens kann durch die Gleichung 2.1 nach BISHOP (1961, zit. in SNYDER und MILLER, 1985) abgeleitet werden. Dabei wird von einem drei Phasensystem von Feststoff, Wasser (u_w) und Gas (u_a) im Boden ausgegangen.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2.1)$$

Der Faktor χ beschreibt dabei die Wassersättigung des Bodens. Bei gesättigten Verhältnissen ist der Wert 1 und bei pF7 0. Wenn die Gasphase in Folge einer Belastung entwichen ist, kürzt sich die Gleichung auf $\sigma' = \sigma + \chi \cdot (-u_w)$, und beschreibt damit die destabilisierende Wirkung des Wassers im Boden (FAZEKAS und HORN, 2005; HARTGE und HORN, 2014).

2.4.3 Scherwiderstand

In einer Belastungssituation gibt es neben der vertikal einwirkenden Last meist tangentiale Kräfte und eine horizontale Komponente, wodurch es im Falle der nicht Rechtwinkligkeit zu einer Aufteilung des resultierenden Kraftvektors in eine Scherkomponente und Normalkomponente kommt. Der Widerstand, den der Boden diesen Kräften pro Fläche entgegensetzt, wird über die Scherwiderstandsparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung beschrieben. Bei

der Kohäsion muss zwischen der scheinbaren Kohäsion und der tatsächlichen Kohäsion unterschieden werden. Bei der scheinbaren Kohäsion sind Wassermenisken zwischen den Körnern wirksam, wodurch die Körner keine dichtere Struktur bilden können. Durch Anwesenheit von Wassermenisken und organischer Substanz kann aber z.B. die Kohäsion auch in Sanden erhöht werden (ZHANG und HARTGE, 1990; BACHMANN und ZHANG, 1991). Insgesamt steigt der Winkel der inneren Reibung mit steigenden Anteilen organischer Substanz (HARTGE, 1988). Werden die Aggregate beim Schervorgang durch hohe Auflasten zerstört und damit der Porenraum verkleinert, kommt es durch das Porenwasser zu einer Abnahme von Kohäsion und Winkel der inneren Reibung (BAUMGARTL und HORN, 1991). Verschwinden diese Menisken, entweder durch völlige Sättigung oder durch Austrocknung, können die Körner dichter aneinander gelagert werden und die Trockenrohdichte steigt an (KÉZDI, 1964). Die Kohäsion in trockenen Reinsanden beträgt dann 0 kPa, während der Winkel der inneren Reibung von der Porenziffer abhängig ist, da sich die Körner bei der Scherung nicht nur verschieben, sondern auch drehen müssen.

2.4.4 Zyklische Kompressibilität

Bei der zyklischen Belastung handelt es sich um eine dynamische Messung der Bodenstabilität. Dabei wird der Boden wiederholt mit einer bestimmten Auflast be- und entlastet und die Setzung über die Zeit gemessen. Die Setzung ist besonders bei dominierenden Textureffekten sehr hoch, denn je höher der Feinbodenanteil, desto leichter können die einzelnen Bodenpartikel während der zyklischen Belastung zusammenrücken (BAUMGARTL und HORN, 1991; PETH und HORN, 2006). Entsprechend dem Zeit-Setzungsverhalten ist die Setzung zu Beginn (d.h. nach den ersten Zyklen) am größten (MOSES et al., 2003; PETH und HORN, 2006). Wenn die Setzung so stark ausgeprägt ist, dass sich die Wassermenisken miteinander verbinden, steigt der Porenwasserdruck (FAZEKAS und HORN, 2005). Durch das inkompressible Verhalten des Wassers, wird dieses aus den Poren herausgedrückt, die Menisken flachen ab. Kann der Boden das Porenwasser dann nicht drainieren wird er dadurch instabiler (LARSON und GUPTA, 1980; YILDIRIM und ERŞAN, 2007). Das Vorkommen von Porenwasserüberdrücken und der dadurch bedingten Verflüssigung des Bodens (Thixotropie) ist von der Frequenz der Belas-

tung, der Struktur und der Textur des Bodens abhängig (ACKERMANN, 1949; MORDHORST et al., 2012). Feiner texturierte Böden sind anfälliger für die Entstehung von Porenwasserüberdrücken und damit für eine Verflüssigung (ERKEN und ULKER, 2007; YILMAZ et al., 2008; BELKHATIR et al., 2011). Bei Tonen ist außerdem die Quellfähigkeit für den Grad der Verflüssigung entscheidend (GRATCHEV et al., 2006; ABEDI und YASROBI, 2010). In Reinsanden ist die Gefahr des Bodenfließens am geringsten (LADE und YAMAMURO, 1997), da durch die grobe Textur von Sanden eine gute Umverteilung von Porenwasser gewährleistet ist. Werden Reinsanden kleinere Partikel hinzugemischt, so steigt die Gefahr der Verflüssigung (XENAKI und ATHANASOPOULOS, 2003; LADE und YAMAMURO, 1997; KARIM und ALAM, 2014).

3 Material und Methoden

3.1 Untersuchungsgebiet

Im Projekt ElbStabil wurden insgesamt 166 Horizonte in 58 Profilen an 22 Standorten untersucht. Die erste Untersuchungsfläche (1) lag bei Elbe Strom km 594 und die letzte Untersuchungsfläche (24) bei Elbe Strom km 712 (Abbildung 3.1).

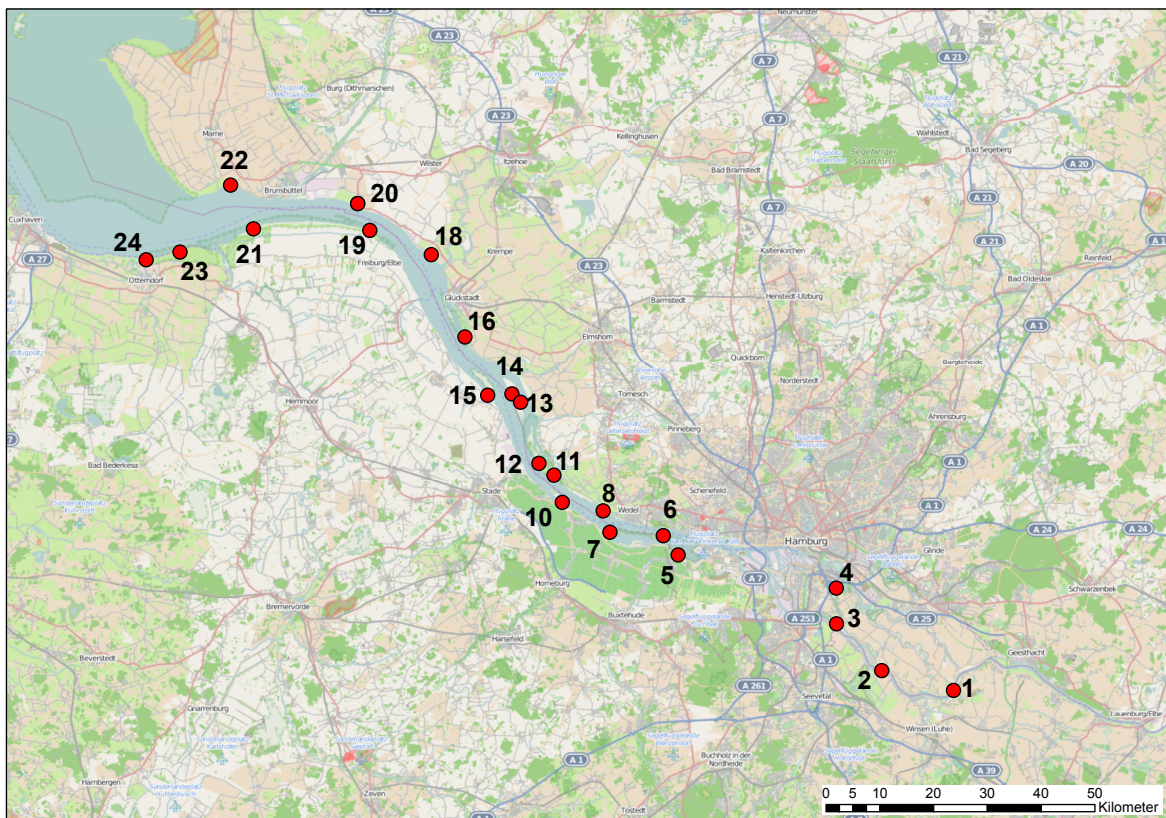


Abbildung 3.1: Karte des Untersuchungsgebietes mit den Untersuchungsflächen. Quelle: OpenStreetMap 2014.

3.2 Leitprofile

An jedem Standort wurden nach Möglichkeit drei Profile angelegt. Hierbei lag ein Profil („Grünland“) über dem MThw (mittleres Tidehochwasser), ein Profil („Röhricht“) an der Grenze des MThw und ein Profil („Watt“) zwischen MThw und MTnw (mittlerem Tideniedrigwasser). Die Beprobung erfolgte tiefenabhängig und für die verschiedenen Profile unterschiedlich (Abbildung 3.2). Die Koordinaten der einzelnen Profile sind den Tabellen A.1 bis A.39 im Anhang zu entnehmen.

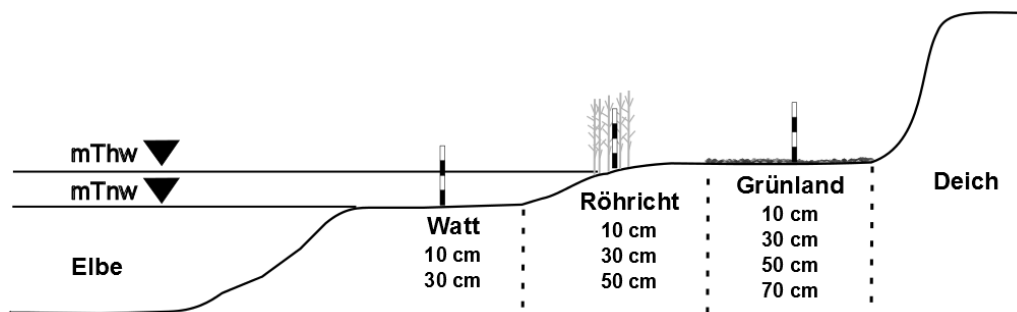


Abbildung 3.2: Beprobungsschema für einen Standort mit den unterschiedlichen Tiefen. MThw = mittleres Tidehochwasser, MTnw = mittleres Tideniedrigwasser.

3.3 Bodenphysikalische Untersuchungen

3.3.1 Korngrößenverteilung

Für die Korngrößenverteilung wurden die Fraktionen $>63 \mu\text{m}$ durch Nasssiebung bestimmt. Die Fraktionen $<63 \mu\text{m}$ wurden mit der Pipettmethode nach Köhn ermittelt (BLUME et al., 2011, (HARTGE und HORN, 2014)) und nach Gleichung 3.1 berechnet.

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{(\rho_f - \rho_m) \cdot r^2 \cdot g}{\eta} \quad (3.1)$$

3.3.2 Trockenrohddichte und Festsubstanzdichte

Für die Bestimmung der Trockenrohddichte (ρ_t) wurden die strukturierten ungestörten Bodenproben in 100 cm³ Zylindern bei 105 °C für 16 Stunden getrocknet und die Trockenrohddichte anschließend durch Wägung nach Gleichung 3.2 bestimmt.

$$\rho_t = \frac{m_f}{V_g} \quad (3.2)$$

Zur Bestimmung der Festsubstanzdichte (ρ_f) nach ROWELL (1997), BLAKE UND HARTGE (1986) wurde das getrocknete Bodenmaterial der Trockenrohddichtemessung verwendet. Für die Messung wurde als Fluid Ethanol (99 % vergällt mit 1 % Methylethylketon) verwendet, um eine vollständige Benetzung des Bodenmaterials zu gewährleisten. Die Festsubstanzdichte wurde nach Gleichung 3.3 berechnet. Bei der Wägung wurde auch die Temperatur (T) des Ethanols gemessen, da die Dichte von Ethanol temperaturabhängig ist. Pro Horizont wurden fünf Wiederholungen durchgeführt.

$$\rho_f = \frac{m_f}{m_1} \cdot (-0,0009 \cdot T + 0,8069) \quad (3.3)$$

3.3.3 Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) wurde mit fünffacher Wiederholung an kapillar aufgesättigten, ungestörten Stechzylinderproben mit einem Volumen von 100 cm³ gemessen. Für die Messungen wurde ein Haubenpermeameter nach HARTGE (1966) verwendet. Die Berechnung der gesättigten Wasserleitfähigkeit erfolge nach Gleichung 3.4.

$$k_f = \frac{f \cdot l}{t \cdot A} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (3.4)$$

3.3.4 Luftleitfähigkeit

Die Luftleitfähigkeit wurde nach jeder Entwässerungsstufe der pF Kurve und an den Proben für die zyklische Belastung und Vorbelastung vor und nach der Belastung gemessen. Die Berechnung des Luftleitfähigkeitskoeffizienten (k_l) erfolgte nach der Gleichung 3.5 (PETH, 2004).

$$k_l = \rho_l \cdot g \left(\frac{\Delta V \cdot l}{\Delta t \cdot \Delta p \cdot A} \right) \quad (3.5)$$

3.3.5 Matrixpotenzial-/Wassergehaltskurve

Für die Matrixpotenzial-/Wassergehaltskurve wurden ungestörte Stechzylinderproben mit einem Volumen von 100 cm³ verwendet. Diese wurden kapillar aufgesättigt und danach stufenweise auf -3, -6, -15, -30, -50, -1500 kPa und -1 GPa entwässert. Für die Entwässerung auf -3 und -6 kPa wurde ein Sandbad verwendet. Für die Entwässerung auf -15, -30 und -50 kPa wurden Keramikplatten verwendet, an denen der entsprechende Unterdruck angelegt wurde. Für die Entwässerung auf -1500 kPa wurde gestörtes Bodenmaterial verwendet. Dieses wurde im Überdruckverfahren in einem Drucktopf entwässert (HARTGE und HORN, 2014). Zur Entwässerung auf -1 GPa wurden die Proben für 16 Stunden bei 105 °C in den Trockenschrank gestellt.

Die so ermittelte Kurve wurde mit dem Programm RETC (Version 6.02, VAN GENUCHTEN et al., 1991) geglättet, und die Parameter α , n und m berechnet (VAN GENUCHTEN, 1980).

3.3.6 Vorbelastung

Für die Messung der Vorbelastung wurden ungestörte Stechzylinderproben mit einem Volumen von 236 cm^3 verwendet. Die Proben wurden kapillar aufgesättigt und mittels eines Sandbades auf -6 kPa vorentwässert. Die Belastung erfolgte mit einem pneumatischen Multistep Odeometer (PMO).

$$\epsilon = \epsilon_r + \left(\frac{\epsilon_s \cdot \epsilon_r}{[1 + (\alpha\sigma)^n]^m} \right) \quad (3.6)$$

Jede Messung bestand aus 11 Druckstufen mit einer steigenden Auflast von 10 bis 400 kPa und einer Dauer jeder Laststufe von 30 Minuten. Während der Messung wurden das Matrixpotenzial, die Setzung und die aufgebrachte Last während der Messung kontinuierlich aufgezeichnet. Je Horizont wurden fünf Wiederholungen nach CASAGRANDE (1936) ausgewertet und über die Gleichung 3.6 nach BAUMGARTL UND KÖCK (2004) berechnet.

3.3.7 Scherwiderstand

Zur Bestimmung des auflastabhängigen Scherwiderstandes wurden ungestörte Stechzylinderproben mit einem Volumen von 236 cm^3 verwendet. Die Proben wurden vor der Messung kapillar aufgesättigt und mittels eines Sandbades auf -6 kPa vorentwässert. Für die Vorkonsolidierungen von 20, 50, 100 und 200 kPa wurden die Proben sechs Stunden in einem Odeometer bei verhinderter Seitenausdehnung belastet. Für die Vorkonsolidierung von 400 kPa wurde eine Probe aus der Vorbelastungsmessung verwendet. Die Bodenproben wurden anschließend mit einem Kastenscherversuch als konsolidierter, drainierter (CD) Versuch, mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $0,3 \text{ mm min}^{-1}$ abgeschert. Die Auswertung der Auflast/Scherwiderstandskurve ergibt die Parameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung gemäß der Mohr-Columb'schen Bruchgeraden (Gleichung 3.7). Dabei steht der Parameter τ für den Scherwiderstand (kPa), φ für den Winkel der inneren Reibung ($^\circ$), σ_n für die Normalspannung und c für die Kohäsion (kPa).

$$\tau = \tan\varphi \cdot \sigma_n + c \quad (3.7)$$

3.3.8 Zyklische Belastung

Durch die zyklische Belastung wurde die Energie die durch Wellenschlag auf das Ufer übertragen wird simuliert. Hierzu wurde ein pneumatisches Multistep Odeometer (PMO) verwendet. Vor der Messung wurden die Proben kapillar aufgesättigt und je nach Standort unterschiedlich vorentwässert (siehe Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: Übersicht der Vorentwässerungsgrade bei denen eine zyklische Belastung durchgeführt wurde. Bei einem schwarzen Punkt erfolgte eine Messung.

	Grünland	Röhricht	Watt
zykl. Belastung bei -3 kPa			•
zykl. Belastung bei -6 kPa	•	•	
zykl. Belastung bei -15 kPa	•	•	

Die vorentwässerten Proben wurden anschließend in 50 Zyklen mit jeweils 30 sekundlicher Be- und Entlastung mit 20 kPa belastet. Die Auflast entspricht einer Wellenhöhe von 50 cm (ZHANG und HORN, 1995). Über die Abnahme der Porenziffer wurde der Kompressibilitätsindex (c_n) nach Gleichung 3.8 (PETH und HORN, 2006) berechnet. Dabei steht der Parameter $\epsilon(N)$ für die Porenziffer als Funktion der Be- und Entlastungszyklen, N ist die Anzahl der Zyklen und ϵ_u^1 die Porenziffer nach dem ersten Be- und Entlastungszyklus. Der Kompressibilitätsindex (c_n) beschreibt die Kompressibilität bei zyklischer Belastung; je kleiner der Wert, desto stabiler ist der Boden gegenüber zyklischer Belastung.

$$\epsilon(N) = c_n \cdot \log N + \epsilon_u^1 \quad (3.8)$$

3.3.9 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit der Statistiksoftware R (Version 3.1.1, R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013). Zur Auswertung der Daten wurde ein geeignetes gemischtes Modell aufgestellt (LAIRD und WARE, 1982; VERBEKE und MOLENBERGHS, 2008). Von den Daten wurde angenommen, dass sie normalverteilt und homoskedastisch sind. Diese Annahme basierte auf einer graphischen Residuenanalyse.

Das statistische Modell zur Berechnung von Signifikanz beinhaltet einen Pseudo-Faktor als festen Faktor (G110, G130, G150, G170, Ro10, Ro30, Ro 50, Wa10, Wa30), zusammengesetzt aus den tatsächlichen Faktoren: Profil (Grünland = Gr, Röhricht = Ro, Watt = Watt) und Tiefe (10 cm - 70 cm) (SCHAARSCHMIDT und VAAS, 2009). Der Standort wurde als zufälliger Faktor betrachtet. Basierend auf diesem Modell wurden multiple Kontrasttests durchgeführt (BRETZ et al., 2011), um verschiedene Ebenen der Profile zu vergleichen.

Zur Ableitung des Kompressibilitätsindex wurde eine Pedotransferfunktion erstellt. Als Zufallsfaktor wurde der Standort eingesetzt. Die Kovarianten für die Funktion waren: Tiefe, Trockenrohddichte, Vorbelastung, Kohäsion, Winkel der inneren Reibung, α , n und Humusgehalt. Basierend auf dem Modell wurde eine multiple Regressionsanalyse durchgeführt, um die geeignete Pedotransferfunktion zu erhalten.

4 Ergebnisse

4.1 Bodentypen und Profilbeschreibungen

Im Folgenden werden die untersuchten Leitprofile an den Standorten vorgestellt. Auf der linken Seite befinden sich die Horizontsymbole. Auf der rechten Seite sind die bodenphysikalischen Kennwerte, klassifiziert nach AD - HOC - AG BODEN (2005) und DVWK (1995) für die beprobten Tiefen aufgeführt.

4.1.1 Standort ES1

Die Abbildung 4.1 zeigt die Profile am Standort ES1 (Drage) bei Elbe Strom km 594.

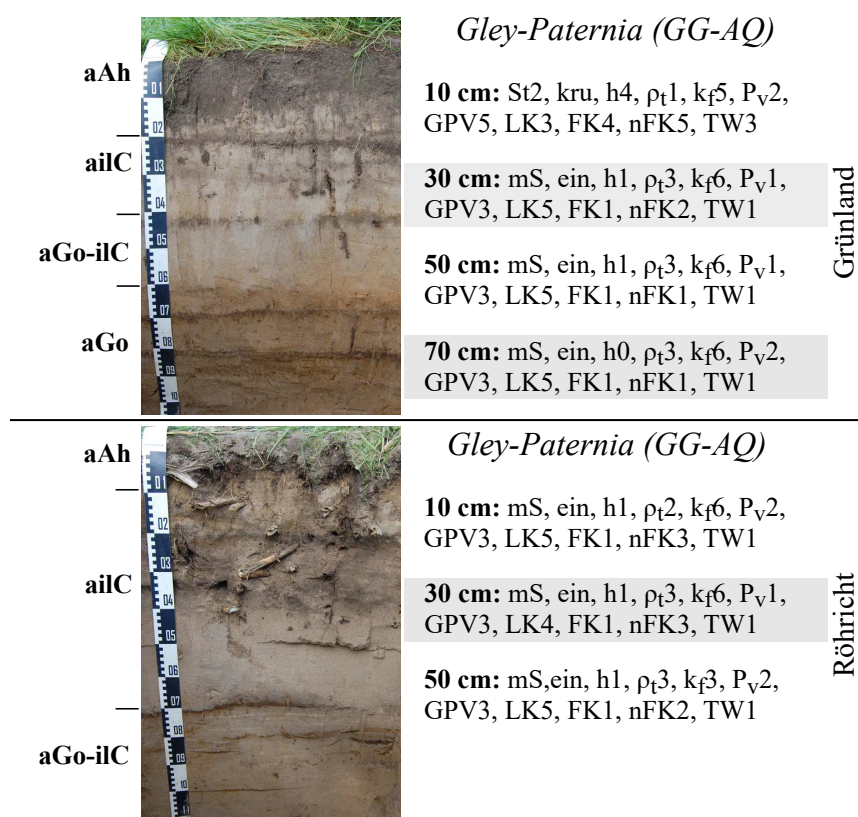


Abbildung 4.1: Profile am Standort ES1 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.2 Standort ES2

Die Abbildung 4.2 zeigt die Profile am Standort ES2 (Fliegenberg) bei Elbe Strom km 604.

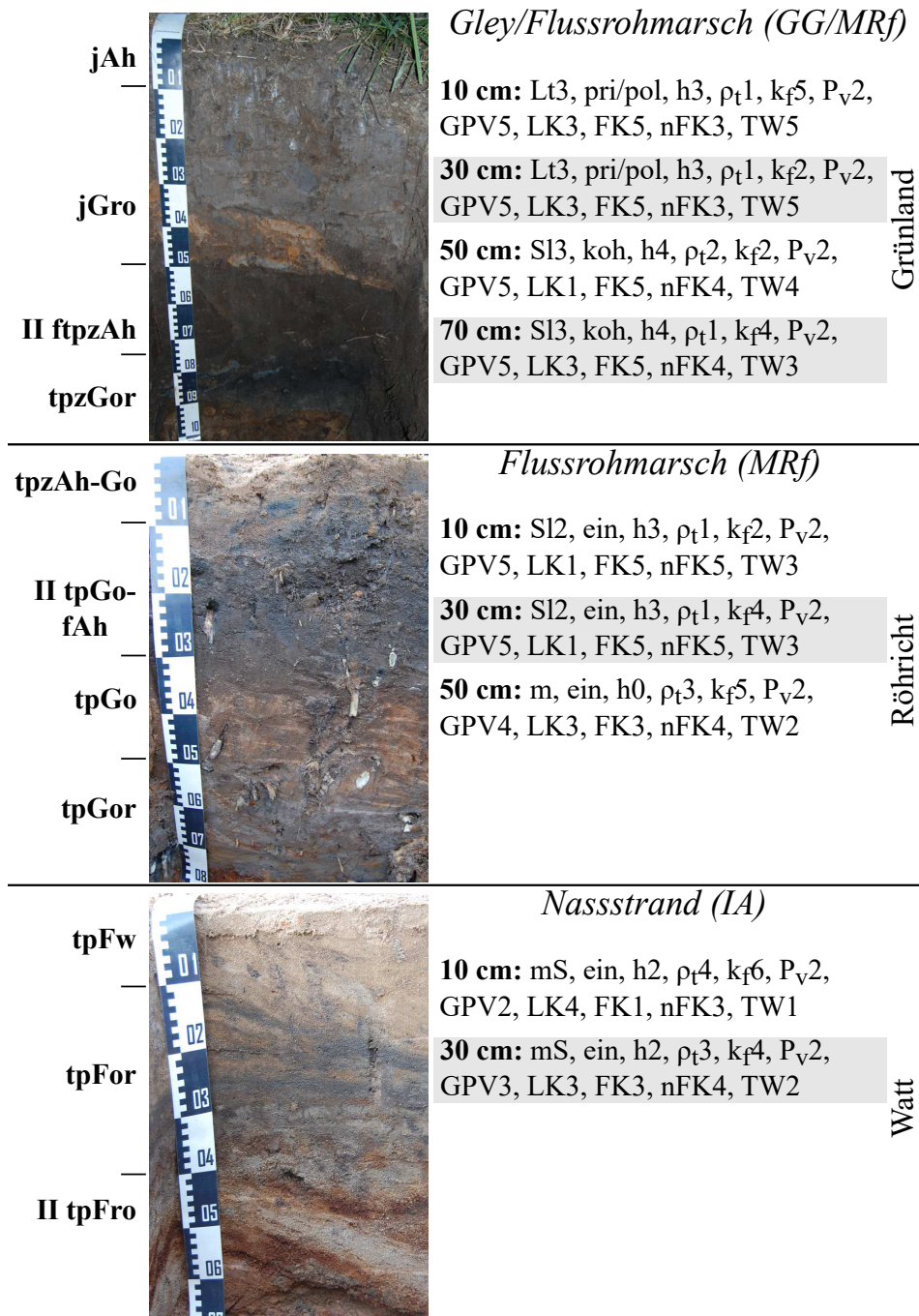


Abbildung 4.2: Profile am Standort ES2 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.3 Standort ES3

Die Abbildung 4.3 zeigt die Profile am Standort ES3 (Naturschutzgebiet Heuckenlock) bei Elbe Strom km 611 (Süderelbe).

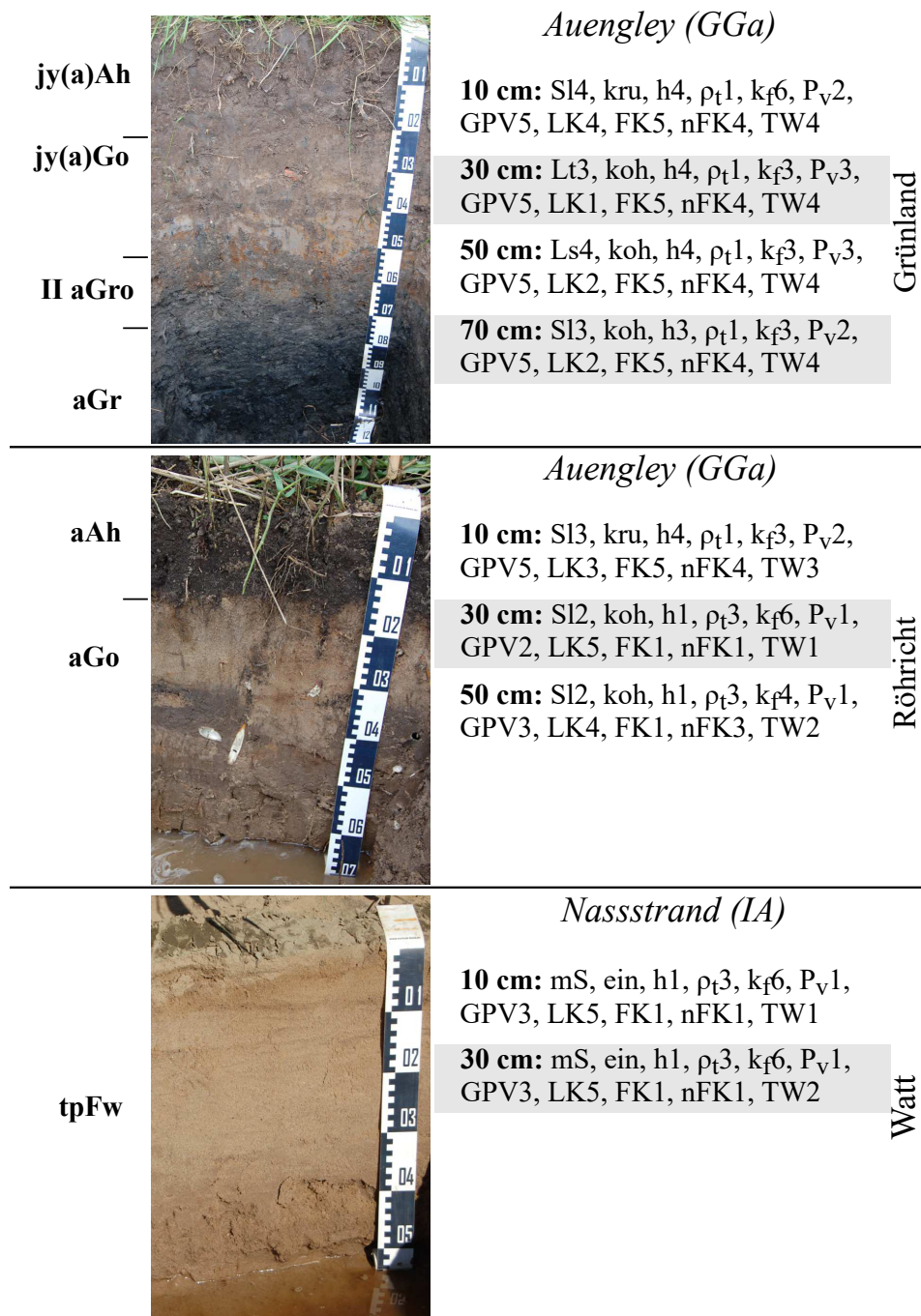


Abbildung 4.3: Profile am Standort ES3 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.5 Standort ES5

Die Abbildung 4.5 zeigt die Profile am Standort ES5 (Naturschutzgebiet Mühlenberger Loch) bei Elbe Strom km 634.

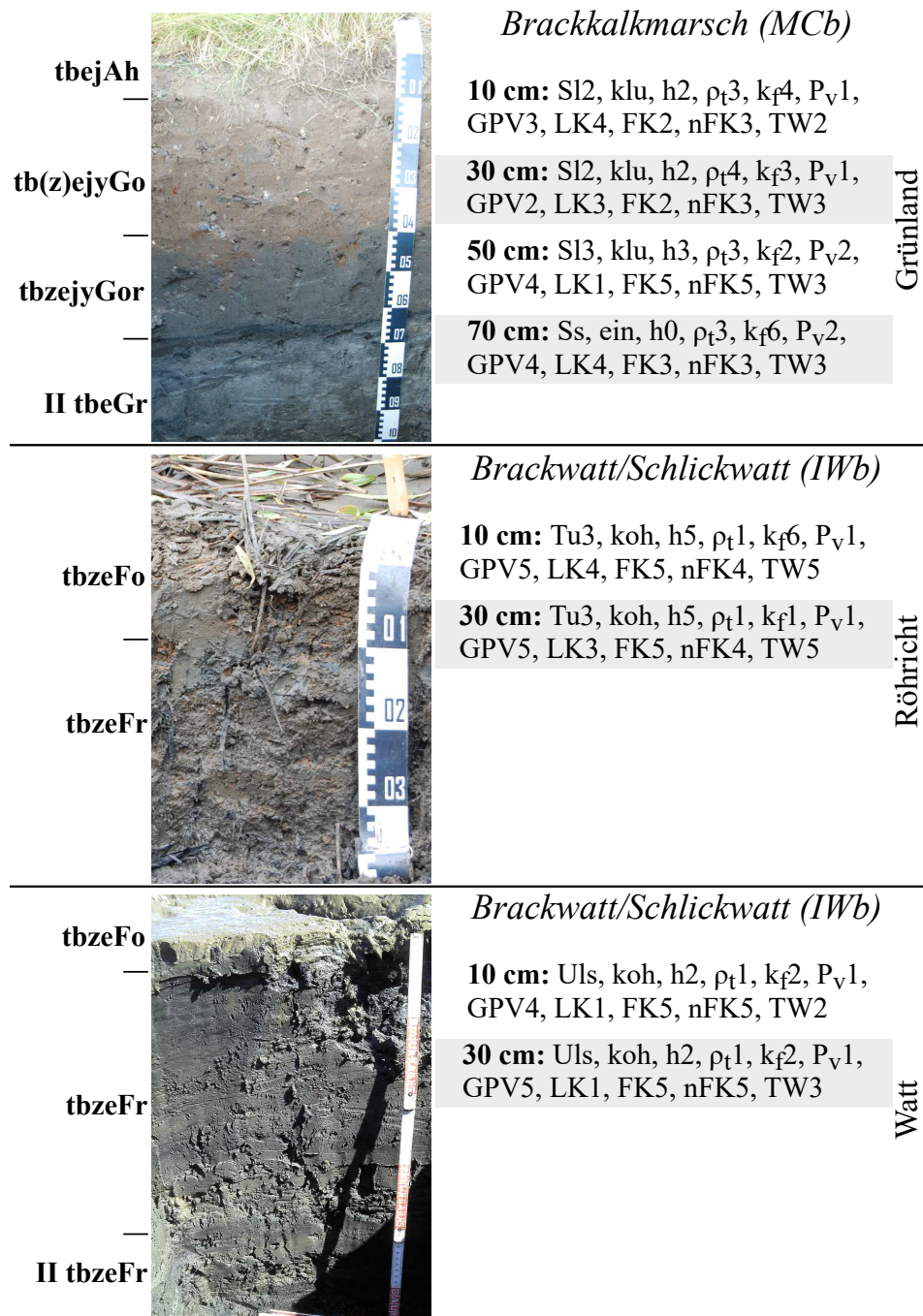


Abbildung 4.5: Profile am Standort ES5 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.6 Standort ES6

Die Abbildung 4.6 zeigt die Profile am Standort ES6 (Naturschutzgebiet Neßsand) bei Elbe Strom km 636.

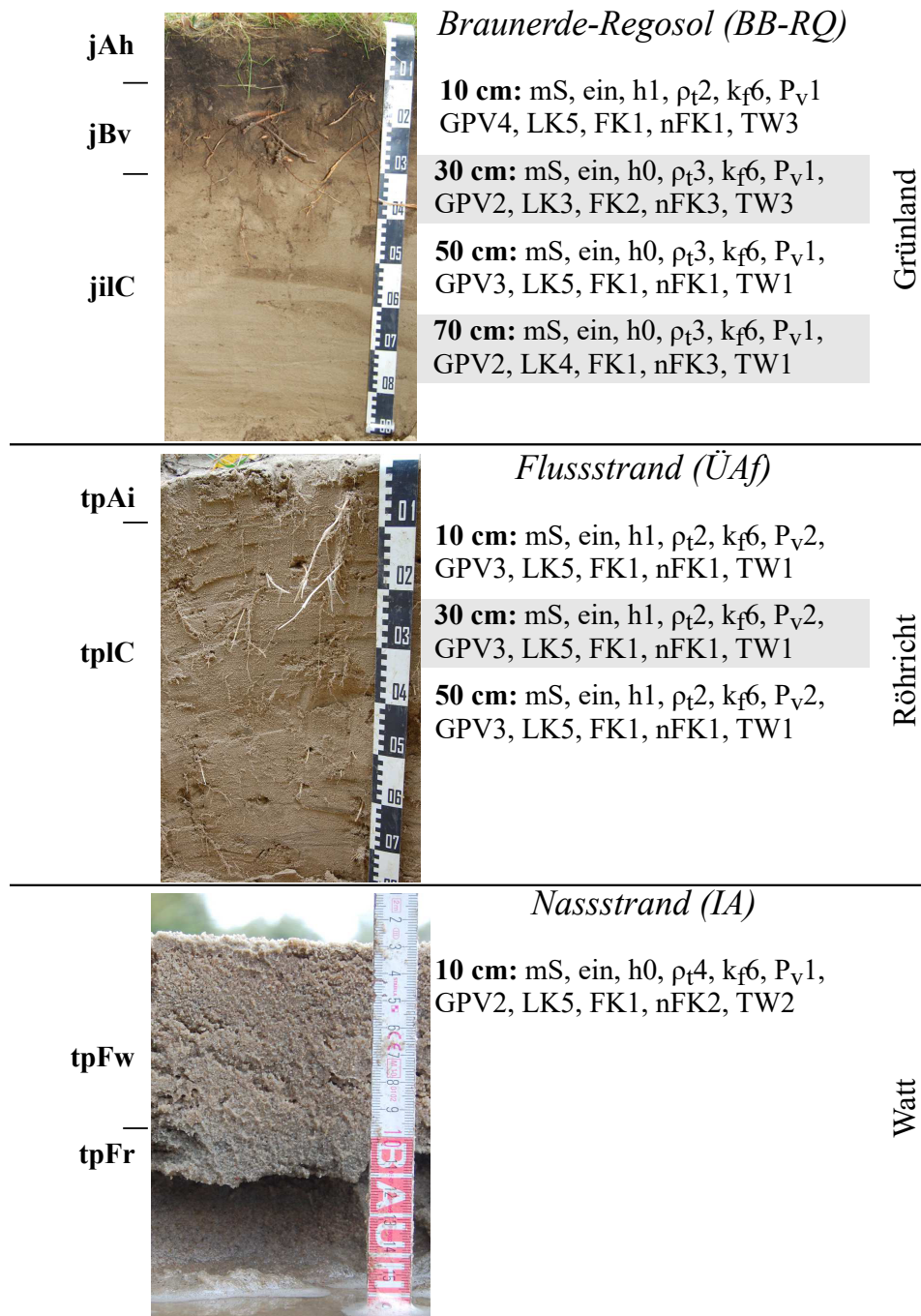


Abbildung 4.6: Profile am Standort ES6 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.7 Standort ES7

Die Abbildung 4.6 zeigt die Profile am Standort ES7 (Naturschutzgebiet Hanskalbsand) bei Elbe Strom km 642.

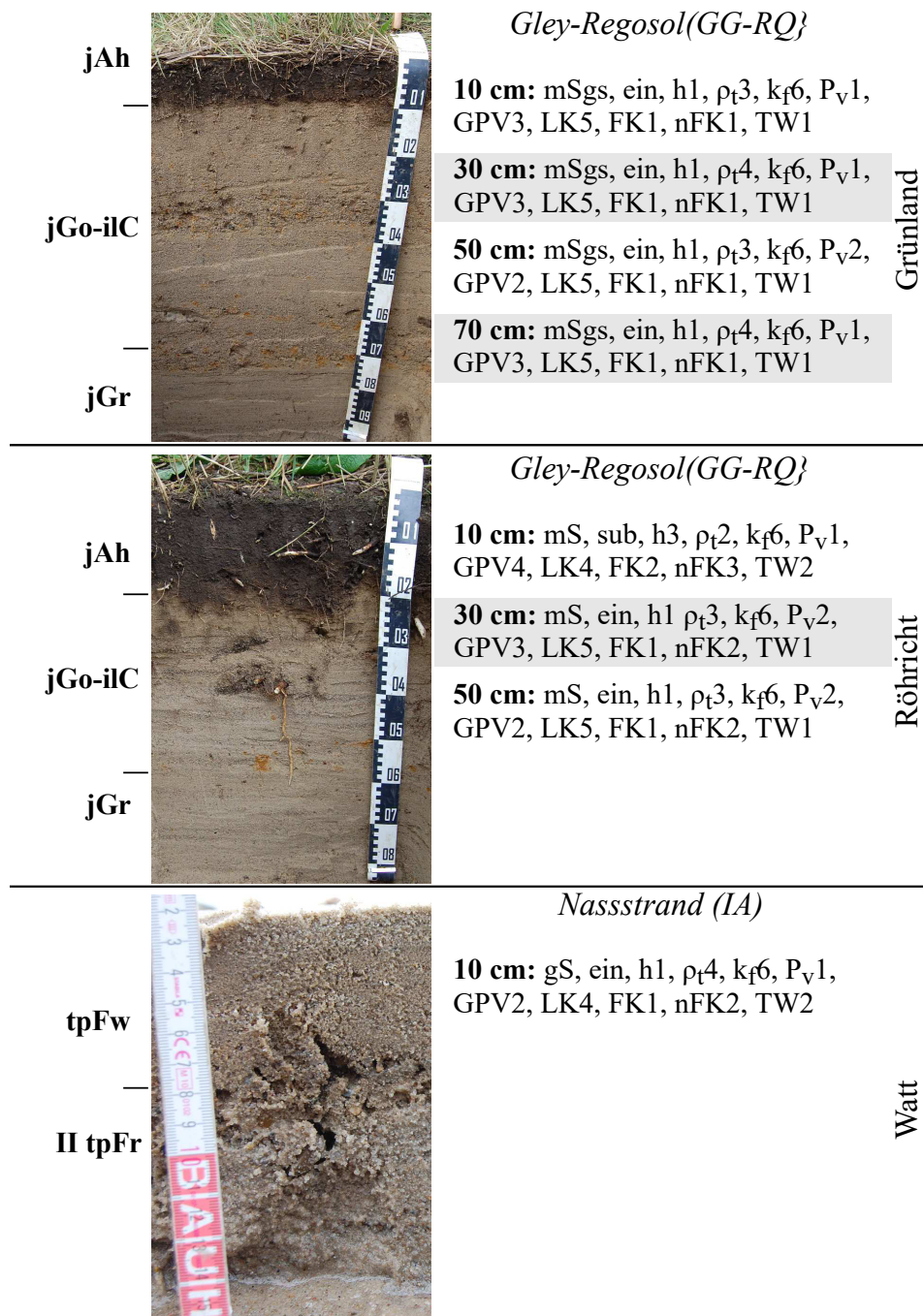


Abbildung 4.7: Profile am Standort ES7 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.8 Standort ES8

Die Abbildung 4.8 zeigt die Profile am Standort ES8 (Fährmannssander Watt) bei Elbe Strom km 644.

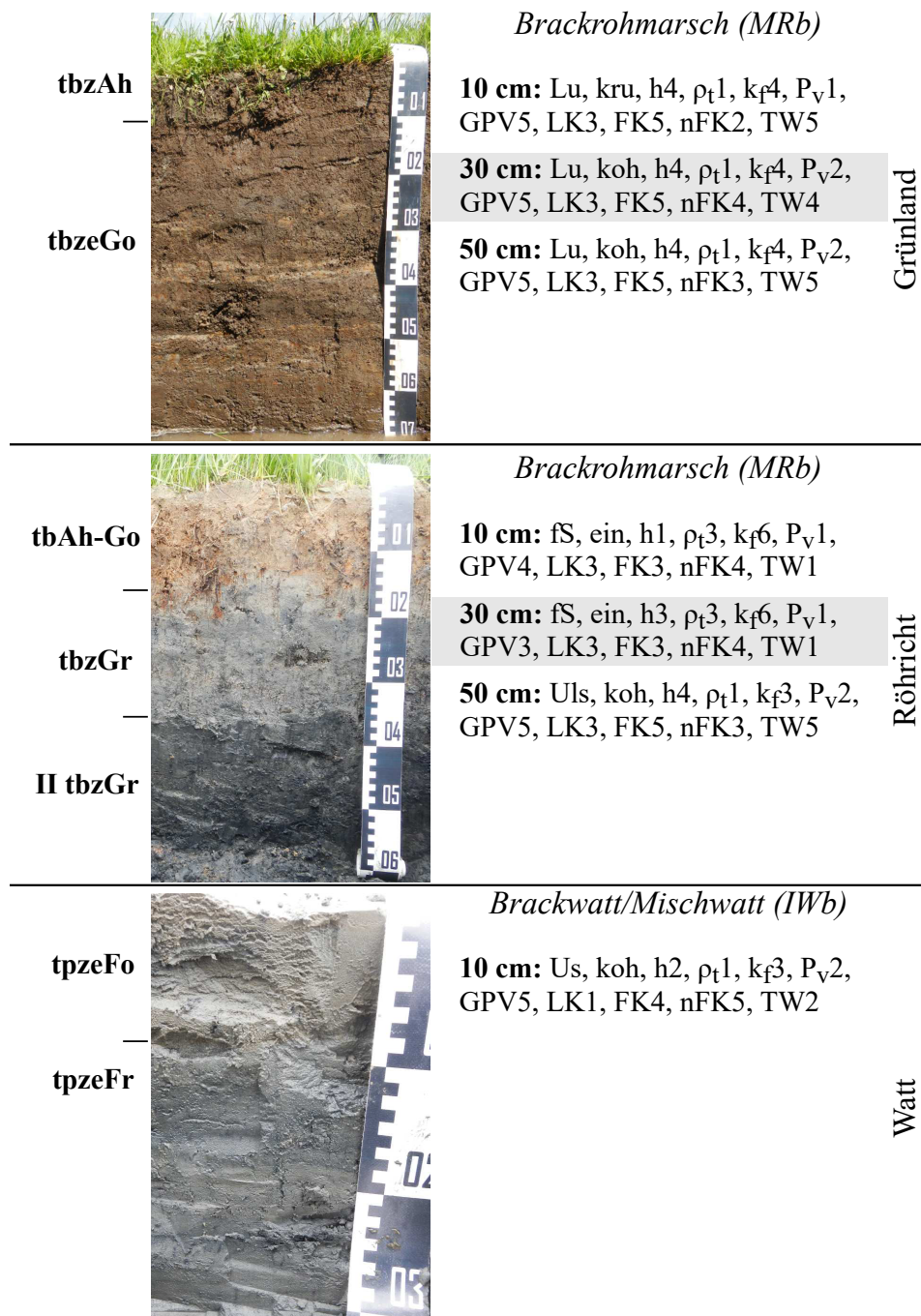


Abbildung 4.8: Profile am Standort ES8 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.9 Standort ES10

Die Abbildung 4.9 zeigt die Profile am Standort ES10 (Lühesand) bei Elbe Strom km 648.

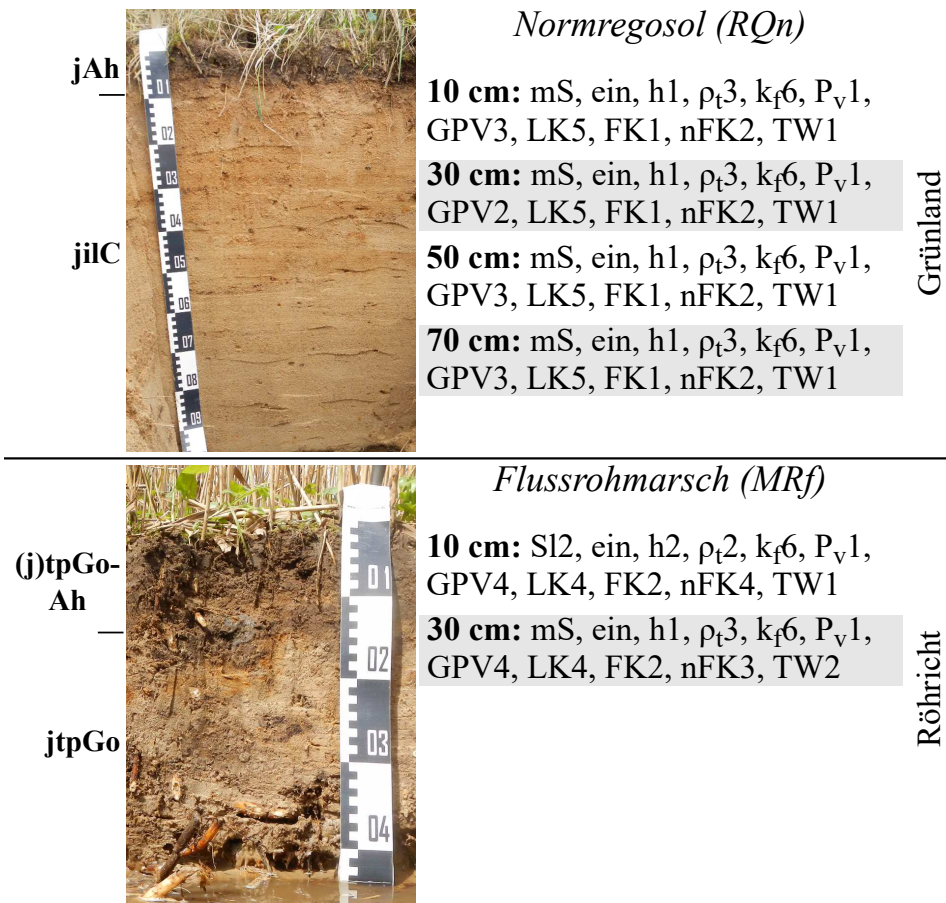


Abbildung 4.9: Profile am Standort ES10 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.10 Standort ES11

Die Abbildung 4.10 zeigt die Profile am Standort ES11 (Hetlingen) bei Elbe Strom km 651.

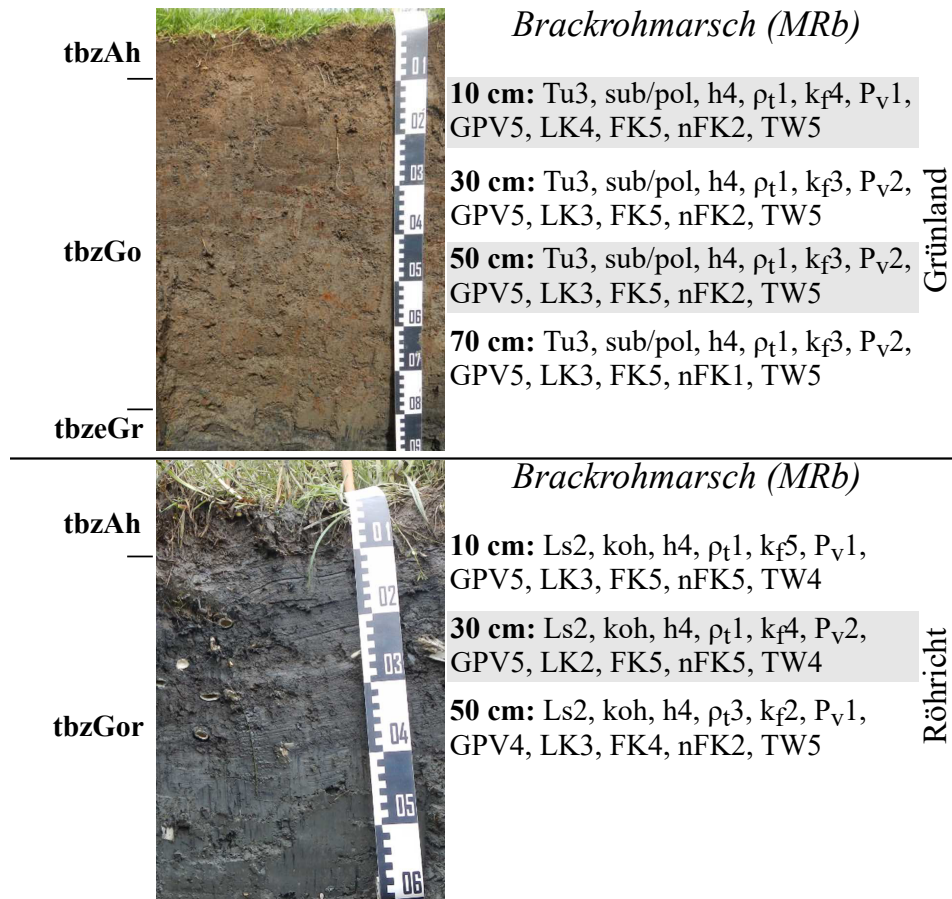


Abbildung 4.10: Profile am Standort ES11 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.11 Standort ES12

Die Abbildung 4.11 zeigt die Profile am Standort ES12 (Dwarsloch) bei Elbe Strom km 653.

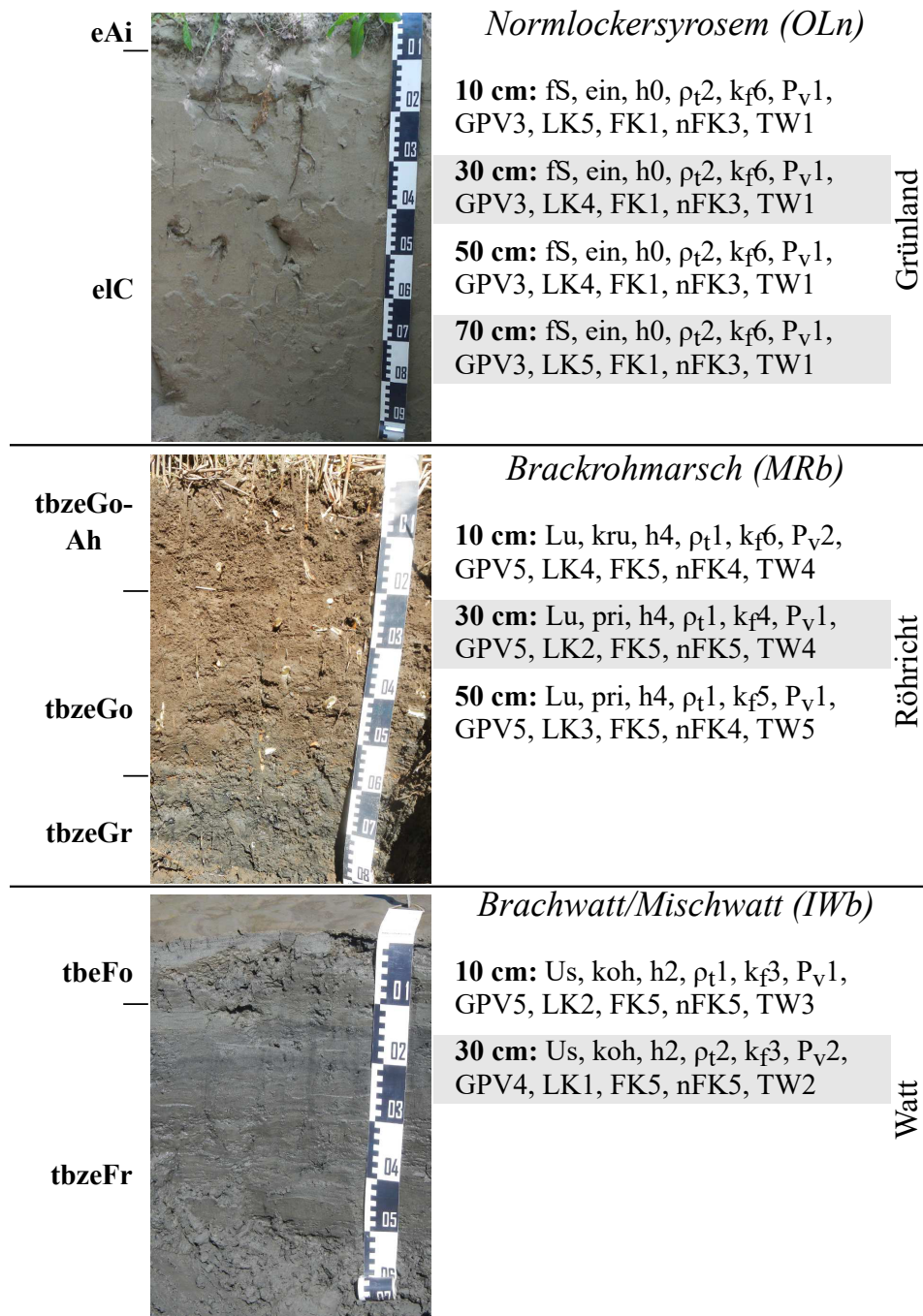


Abbildung 4.11: Profile am Standort ES12 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.12 Standort ES13

Die Abbildung 4.12 zeigt das Profil am Standort ES13 (Pagensand-Ost) bei Elbe Strom km 661.

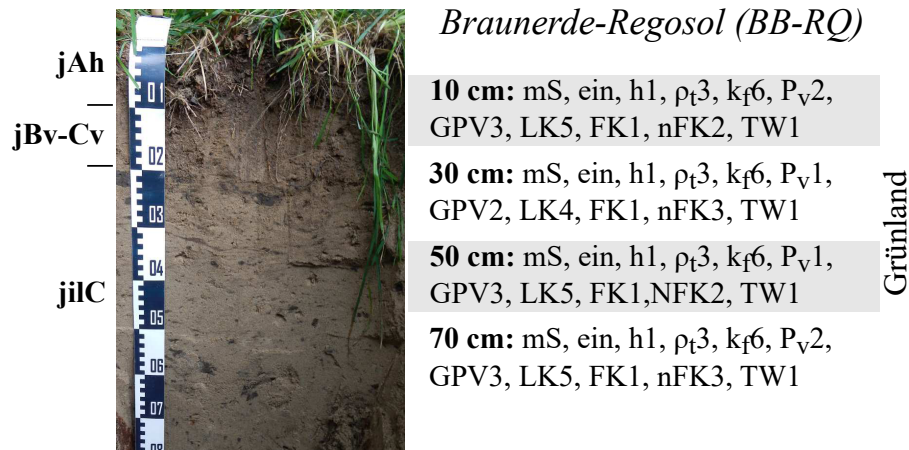


Abbildung 4.12: Profil am Standort ES13 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.13 Standort ES14

Die Abbildung 4.13 zeigt das Profil am Standort ES14 (Pagensand-West) bei Elbe Strom km 662.

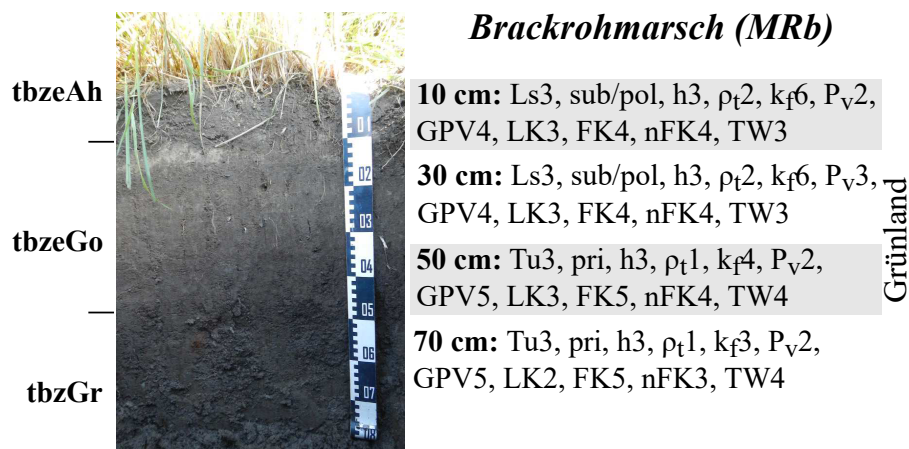


Abbildung 4.13: Profil am Standort ES14 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.14 Standort ES15

Die Abbildung 4.14 zeigt die Profile am Standort ES15 (Asseler Sand) bei Elbe Strom km 663.

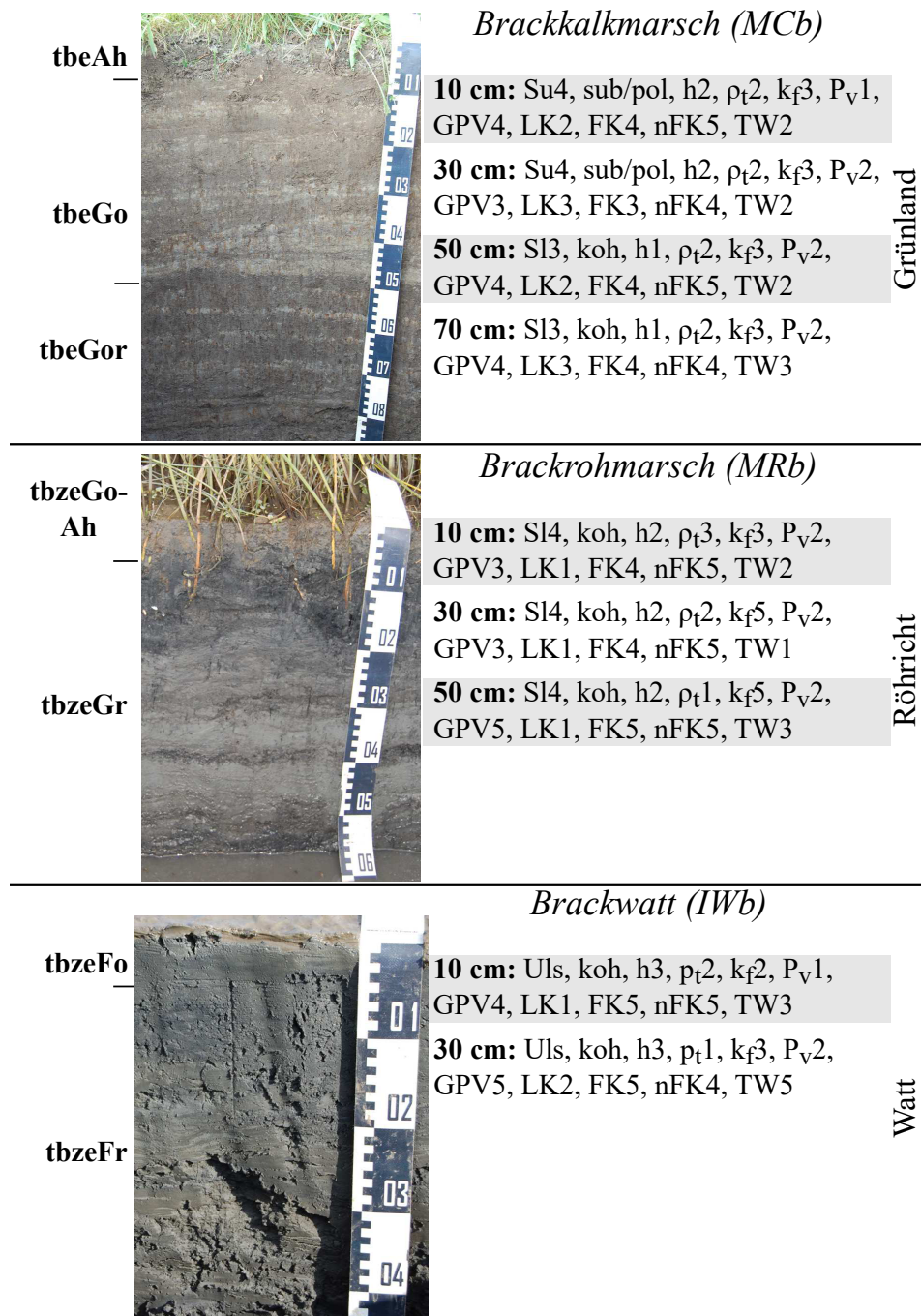


Abbildung 4.14: Profile am Standort ES15 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.15 Standort ES16

Die Abbildung 4.15 zeigt die Profile am Standort ES16 (Bielenberger Wäldchen) bei Elbe Strom km 670.

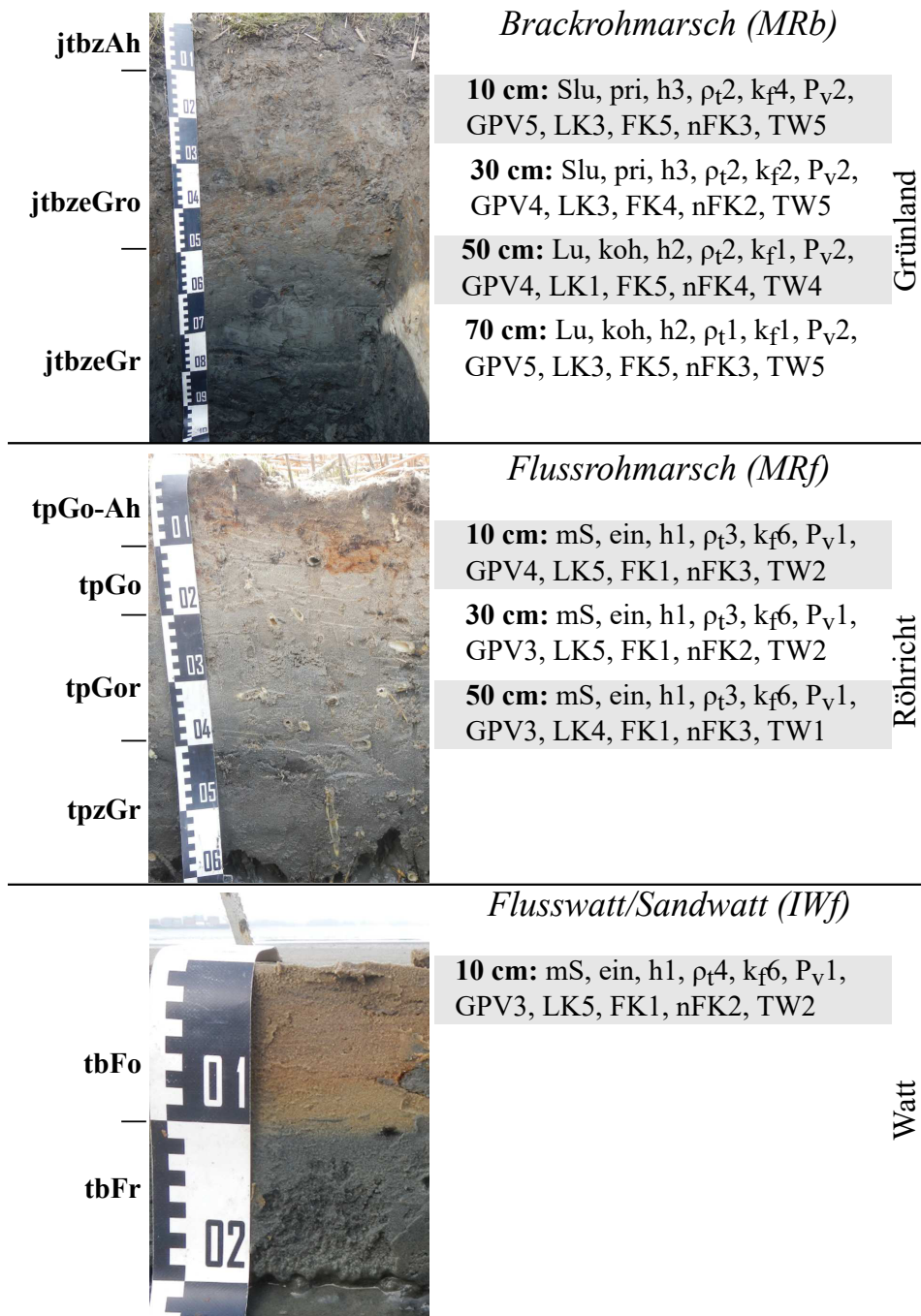


Abbildung 4.15: Profile am Standort ES16 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.16 Standort ES18

Die Abbildung 4.16 zeigt die Profile am Standort ES18 (Hollerwettern) bei Elbe Strom km 680.

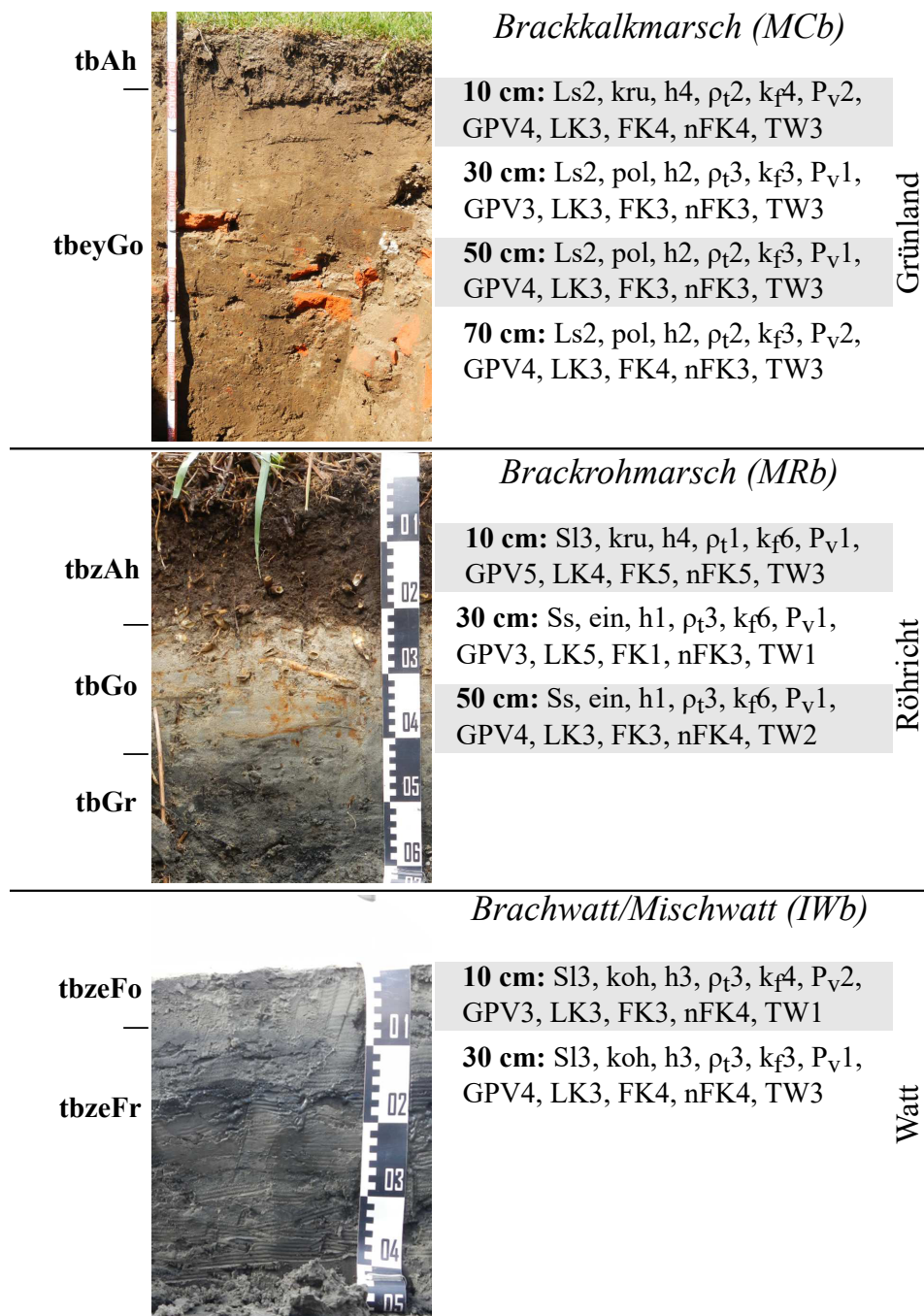


Abbildung 4.16: Profile am Standort ES18 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.17 Standort ES19

Die Abbildung 4.17 zeigt die Profile am Standort ES19 (Nordkehdingen II) bei Elbe Strom km 686.

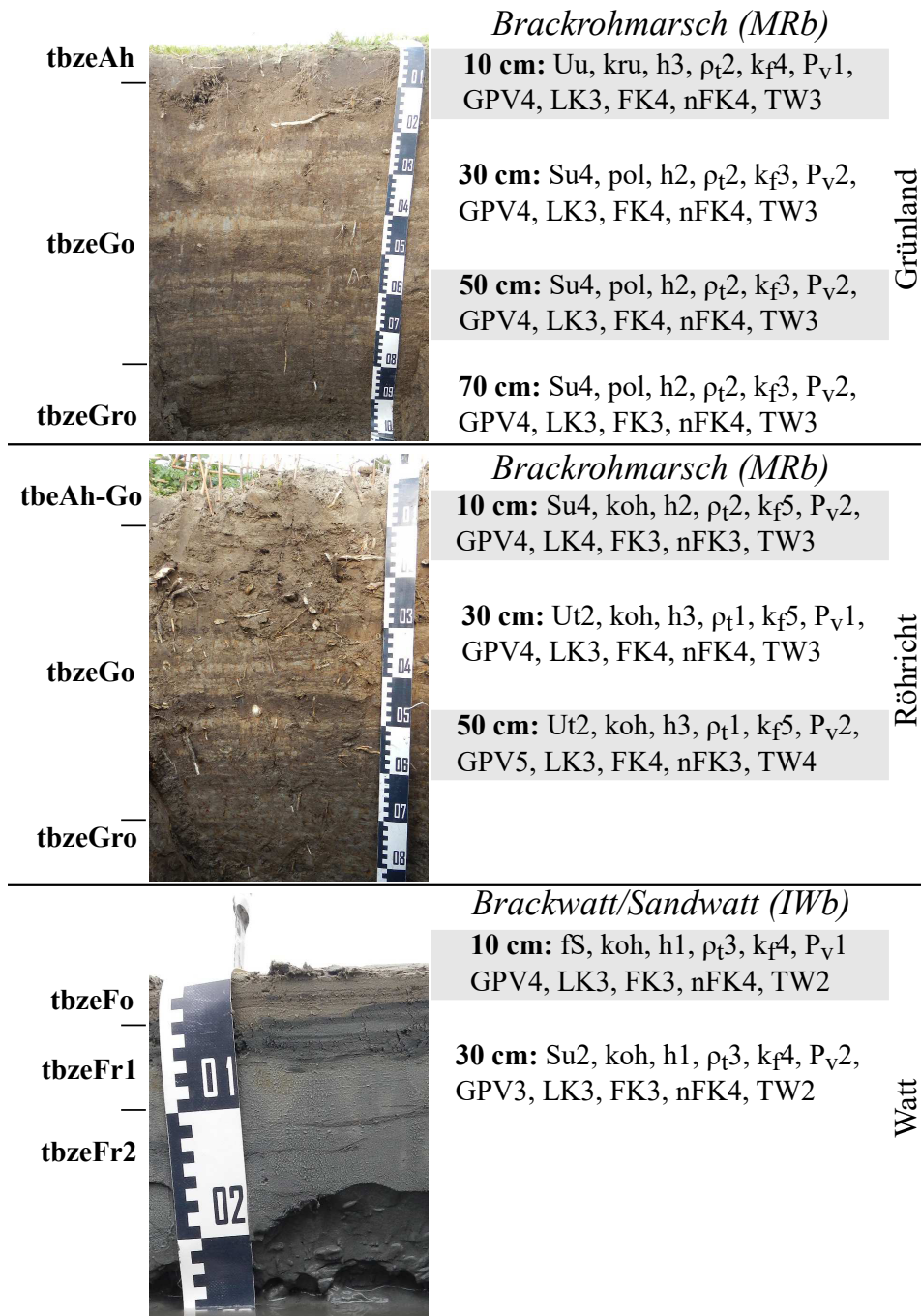


Abbildung 4.17: Profile am Standort ES19 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.18 Standort ES20

Die Abbildung 4.18 zeigt die Profile am Standort ES20 (St. Magarethen) bei Elbe Strom km 689.

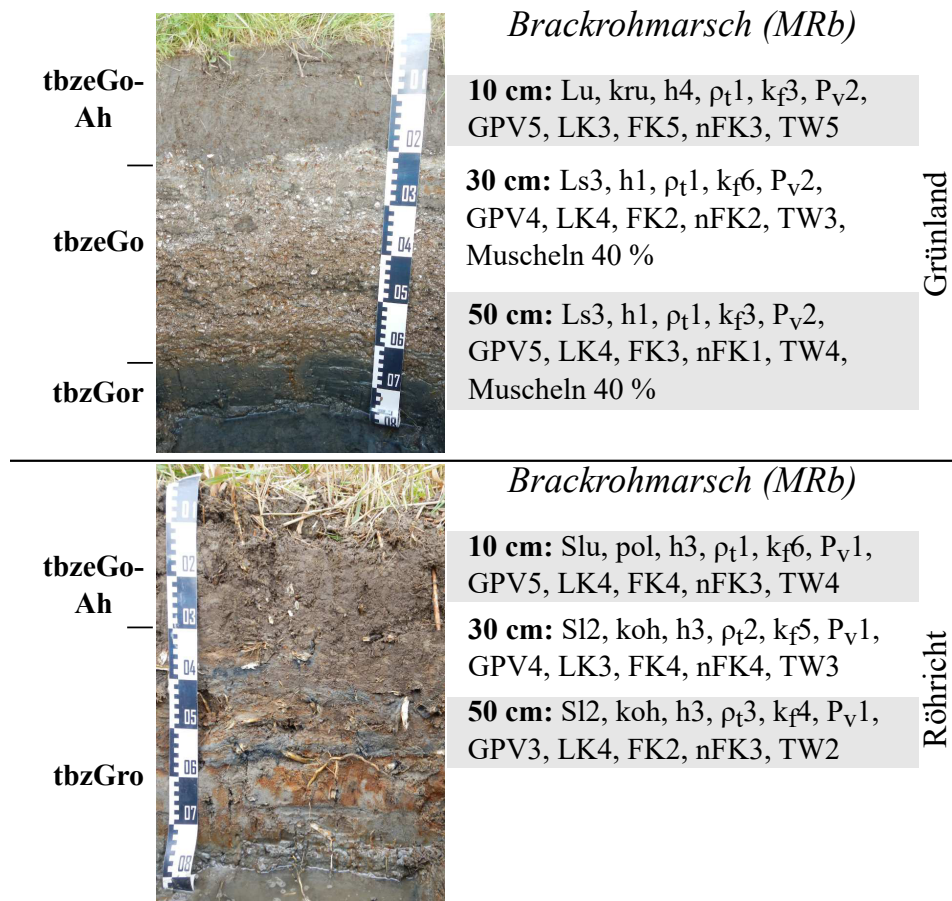


Abbildung 4.18: Profile am Standort ES20 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.19 Standort ES21

Die Abbildung 4.19 zeigt die Profile am Standort ES21 (Nordkehdingen I) bei Elbe Strom km 700.

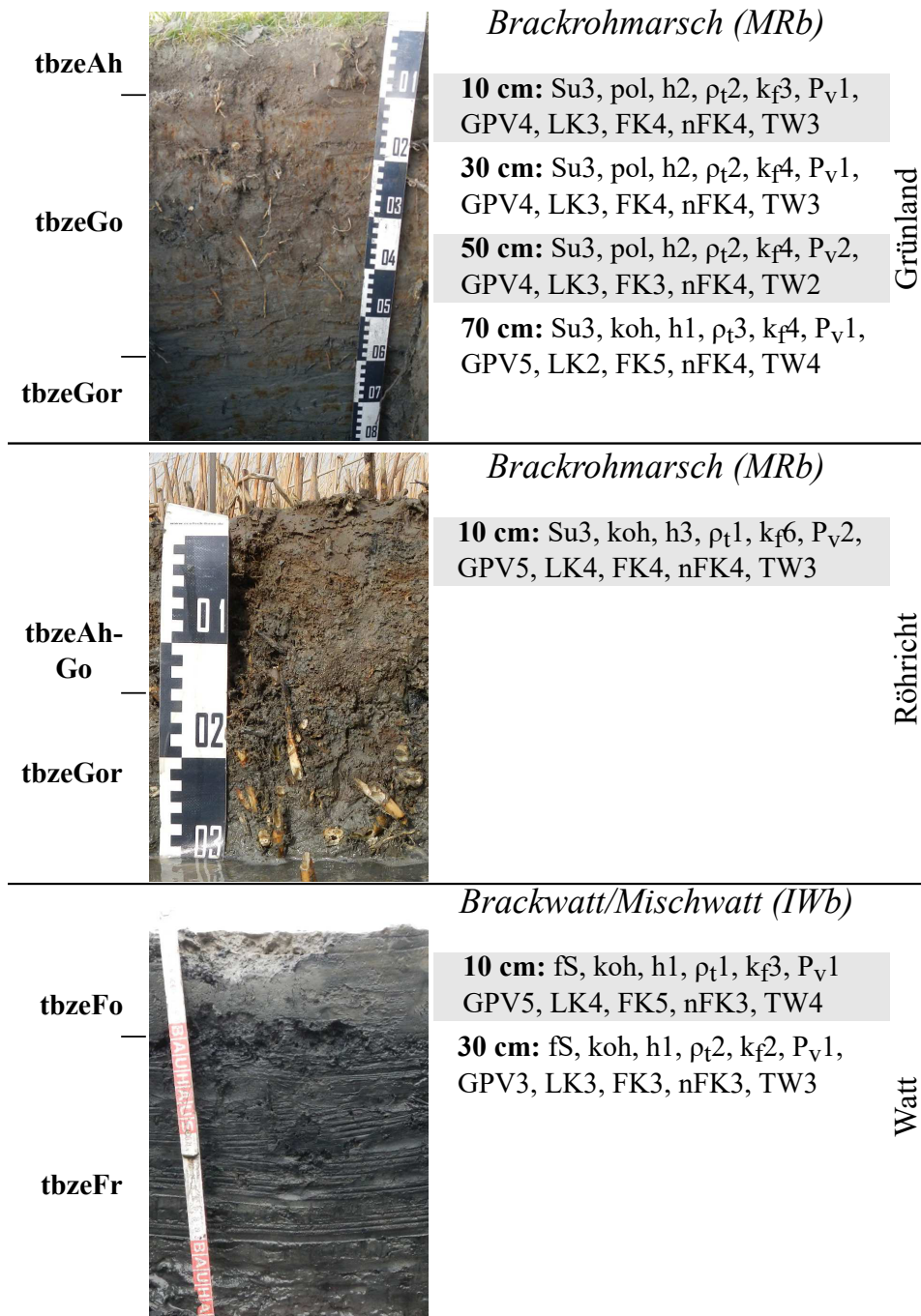


Abbildung 4.19: Profile am Standort ES21 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.20 Standort ES22

Die Abbildung 4.20 zeigt die Profile am Standort ES22 (Neufelder Watt) bei Elbe Strom km 703.

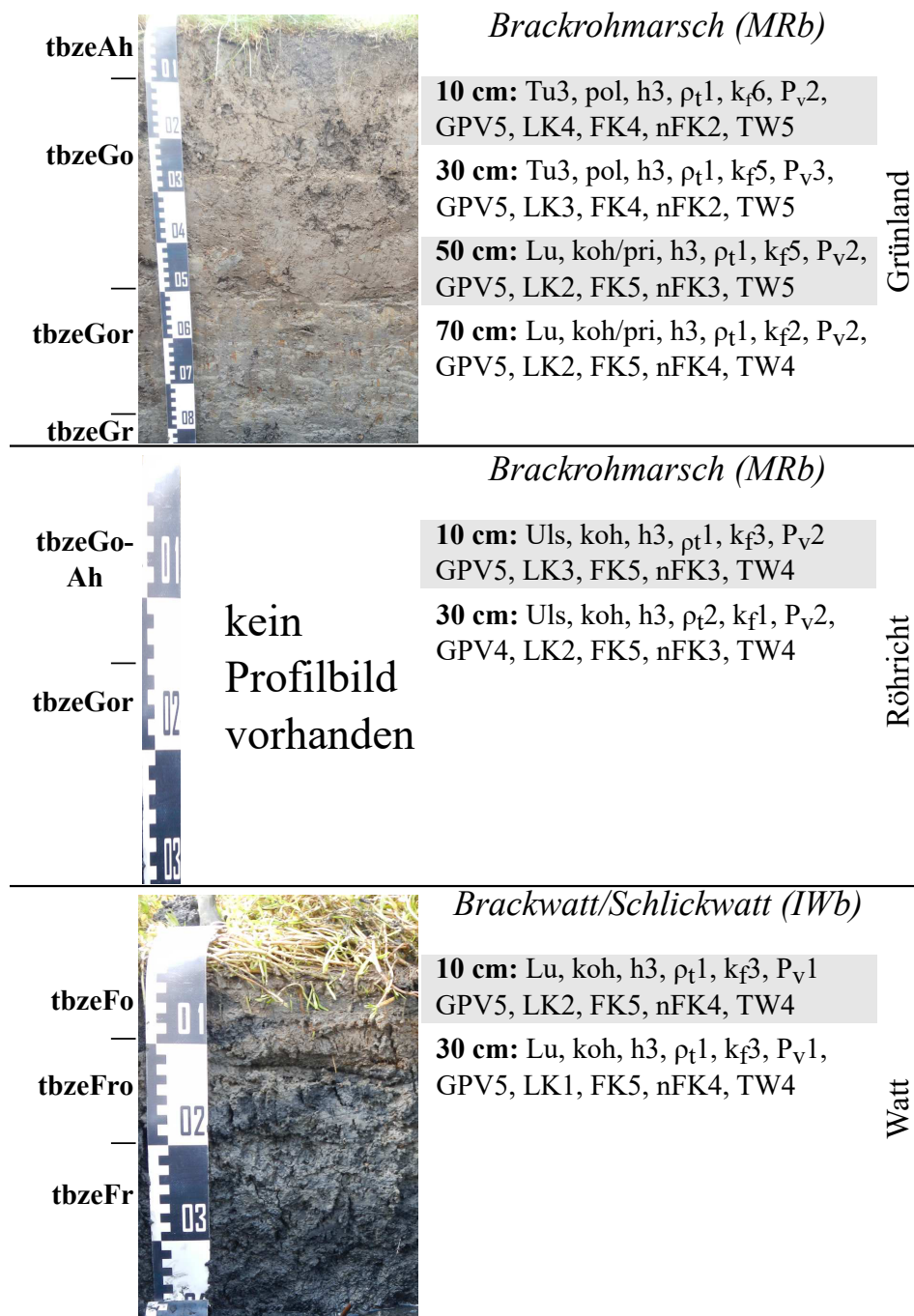


Abbildung 4.20: Profile am Standort ES22 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.21 Standort ES23

Die Abbildung 4.21 zeigt die Profile am Standort ES23 (Belumer Außendeich) bei Elbe Strom km 709.

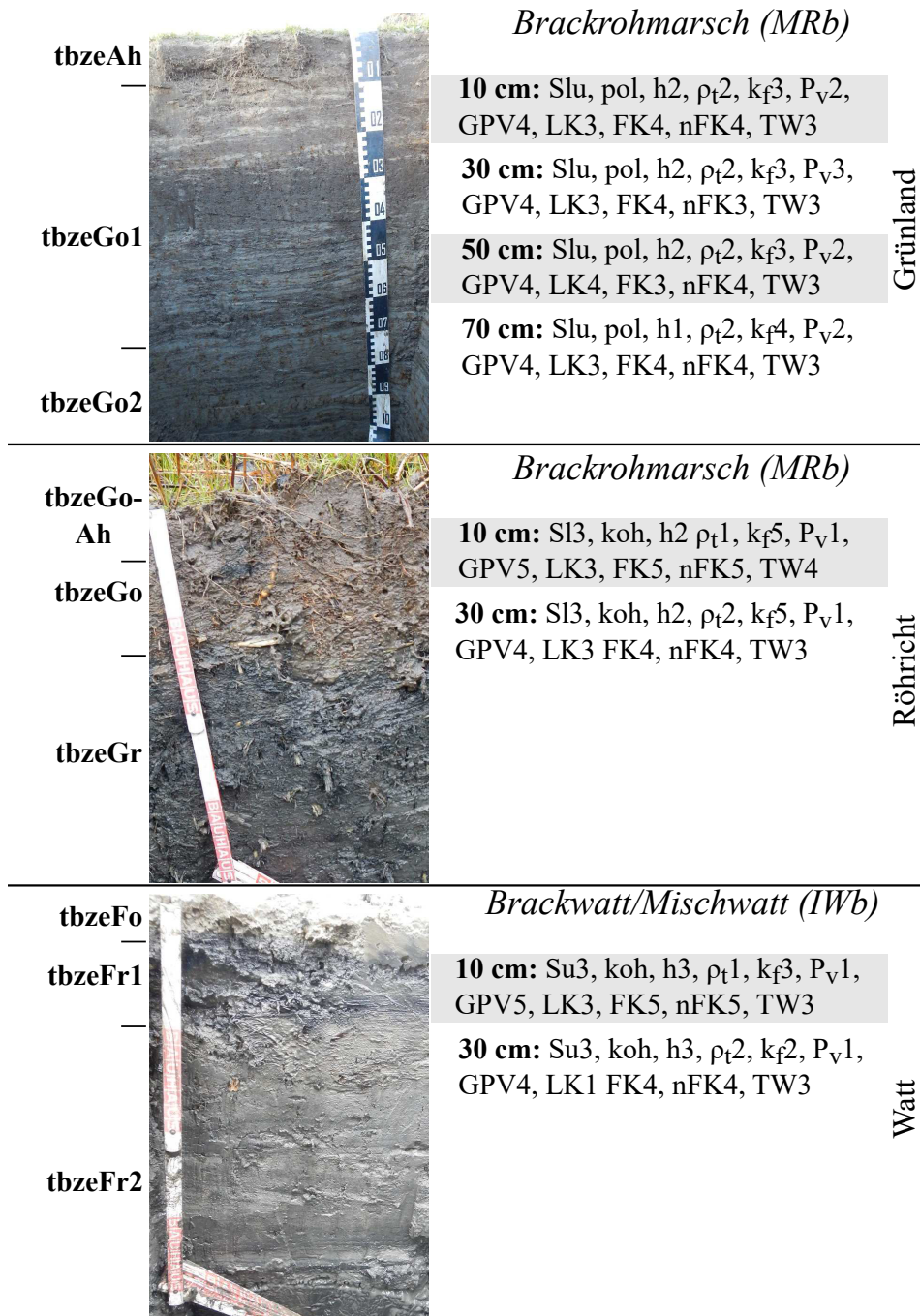


Abbildung 4.21: Profile am Standort ES23 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.1.22 Standort ES24

Die Abbildung 4.22 zeigt die Profile am Standort ES24 (Otterndorf) bei Elbe Strom km 712.

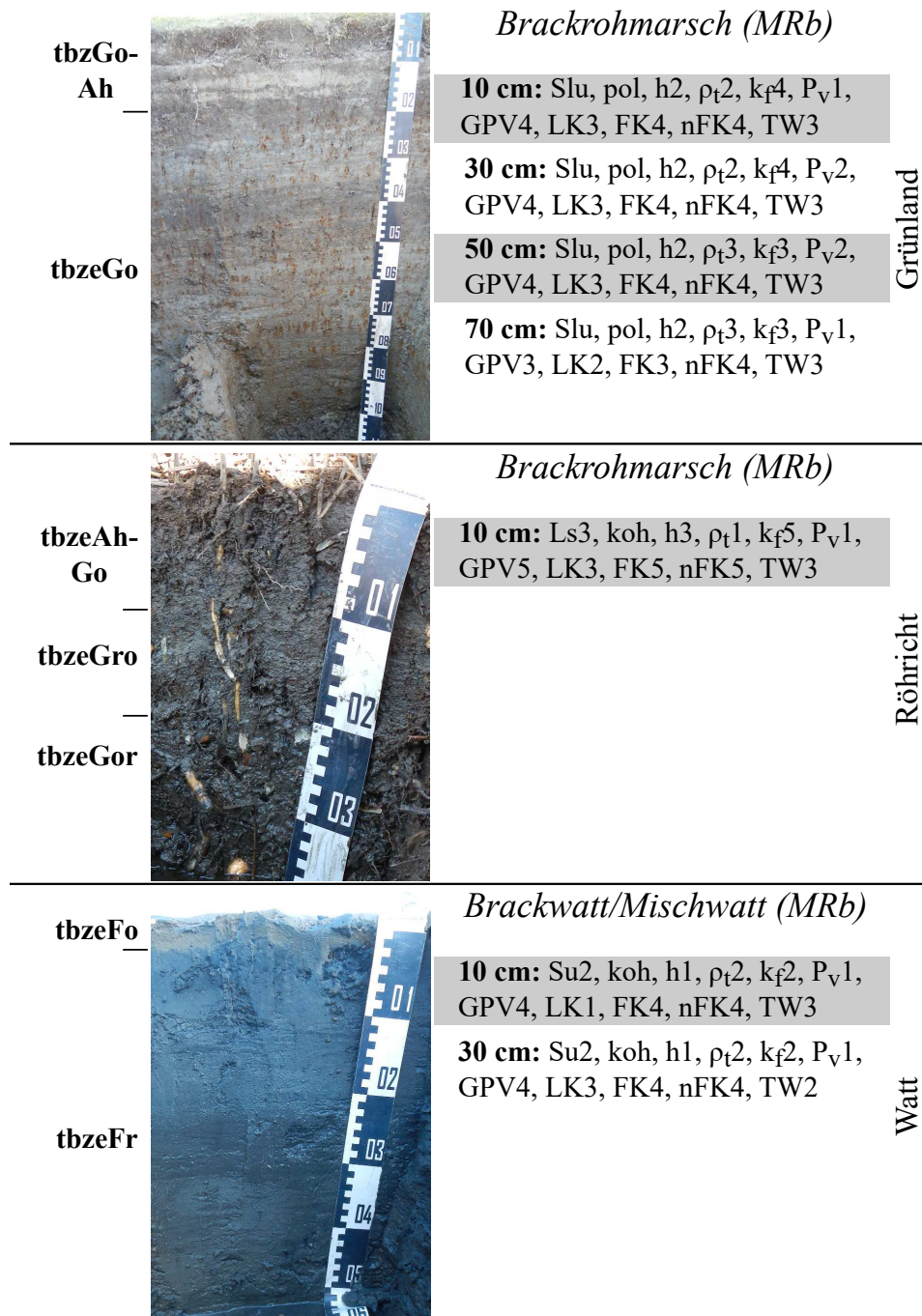


Abbildung 4.22: Profile am Standort ES24 mit bodenphysikalischen Kennwerten. Einstufung der Werte nach AD-HOC-AG BODEN, 2005 und DVWK, 1995.

4.2 Bodenphysikalische Kennwerte

Die bodenphysikalischen Kennwerte werden im Folgenden nach Bodenarten“=Hauptgruppen und Gefügestufen unterteilt dargestellt.

4.2.1 Bodenart

Abbildung 4.23 zeigt die Bodenarten der untersuchten 166 Horizonte. Es dominieren die Sande (n=99), während Lehme (n=24), Schluffe (n=28) und Tone (n=19) deutlich seltener auftreten. Der Schluffanteil der untersuchten Bodenhorizonte lag bei maximal 95% und der Tonanteil bei maximal 43%.

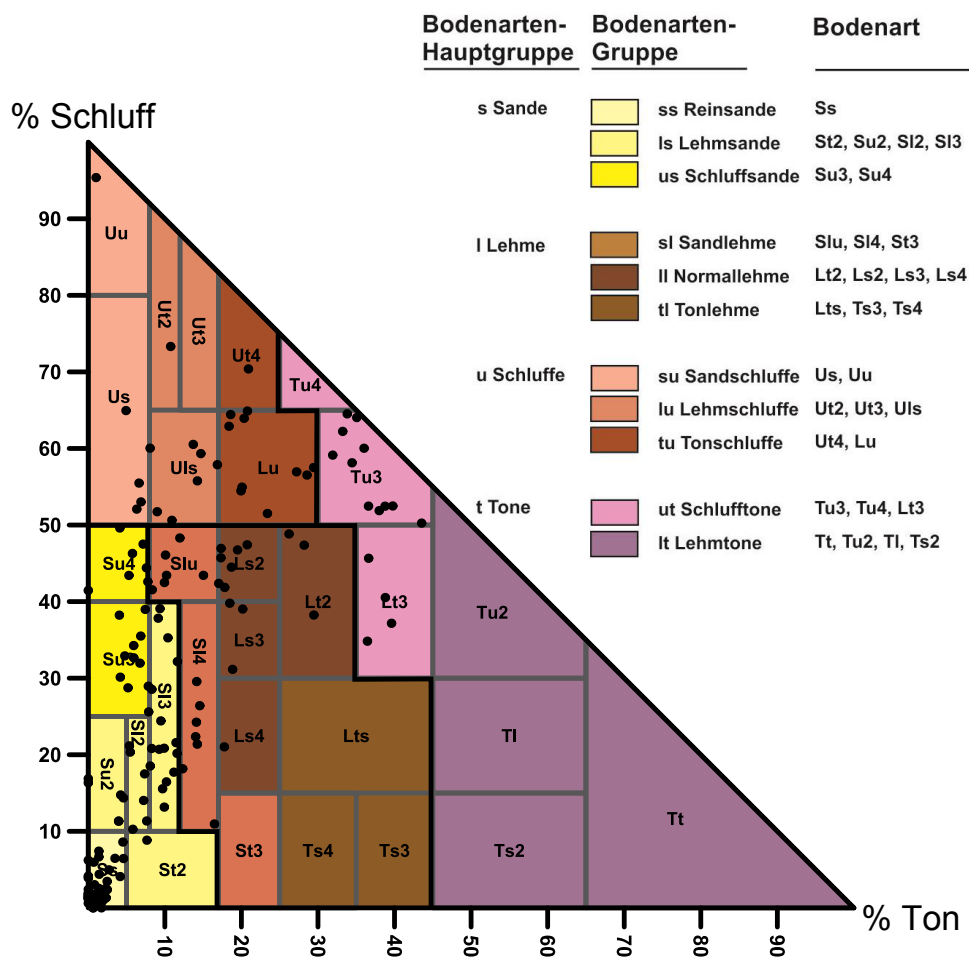


Abbildung 4.23: Feinbodenartendiagramm nach AD - HOC - AG BODEN (2005) mit Angabe der Bodenarten der untersuchten Standorte. Jeder Punkt entspricht einem Horizont.

4.2.2 Trockenrohdichte und Humusgehalte

In Abbildung 4.24 sind die mittleren Trockenrohdichten und Humusgehalte nach den Bodenarten-Hauptgruppen Sande (ss, ls, us), Lehme (sl, ll) Schluffe (su, lu, tu) und Tone (ut) und den jeweils vorherrschenden Gefügeformen in den Horizonten gruppiert aufgeführt. Die Einstufung der Werte erfolgte nach AD - HOC - AG BODEN (2005).

Bei den Sanden (ss, ls, us) ist die Trockenrohdichte zwischen sehr gering bis hoch und die Humusgehalte sind als sehr schwach humos bis stark humos einzustufen. Die höchste Trockenrohdichte und der geringste Humusgehalt wurden bei Einzelkorngefüge gemessen. In Horizonten mit Krümelgefüge wurden die geringste Trockenrohdichte und der höchste Humusgehalt festgestellt.

Die Lehme (sl, ll) haben sehr geringe bis mittlere Trockenrohdichten und sind sehr schwach bis sehr stark humos. In den Lehmen wurde die höchste Trockenrohdichte in einem Horizont mit Polyedergefüge gemessen, welcher gleichzeitig auch einen der geringsten Humusgehalte hatte. Die geringste Trockenrohdichte wurde in einem Horizont mit Kohärentgefüge gemessen, der höchste Humusgehalt wurde in einem Horizont mit Krümelgefüge gemessen.

Die Schluffe (su, tu) haben eine sehr geringe bis geringe Trockenrohdichte während die Humusgehalte zwischen schwach bis sehr stark humos variieren. Die höchste Trockenrohdichte wurde in dem Polyedergefüge mit den geringsten Humusgehalten gemessen. Das Kohärentgefüge mit dem geringsten Humusgehalt hatte auch die geringste Trockenrohdichte.

Die Tone (ut) haben eine sehr geringe bis geringe Trockenrohdichte und sind sehr schwach bis sehr stark humos. Die Horizonte mit Kohärentgefüge haben bei hohen Trockenrohdichten geringe Humusgehalte bzw. geringe Trockenrohdichten bei hohen Humusgehalten. Bei allen Texturen kommt es mit steigenden Humusgehalten zu einer Abnahme der Trockenrohdichte.

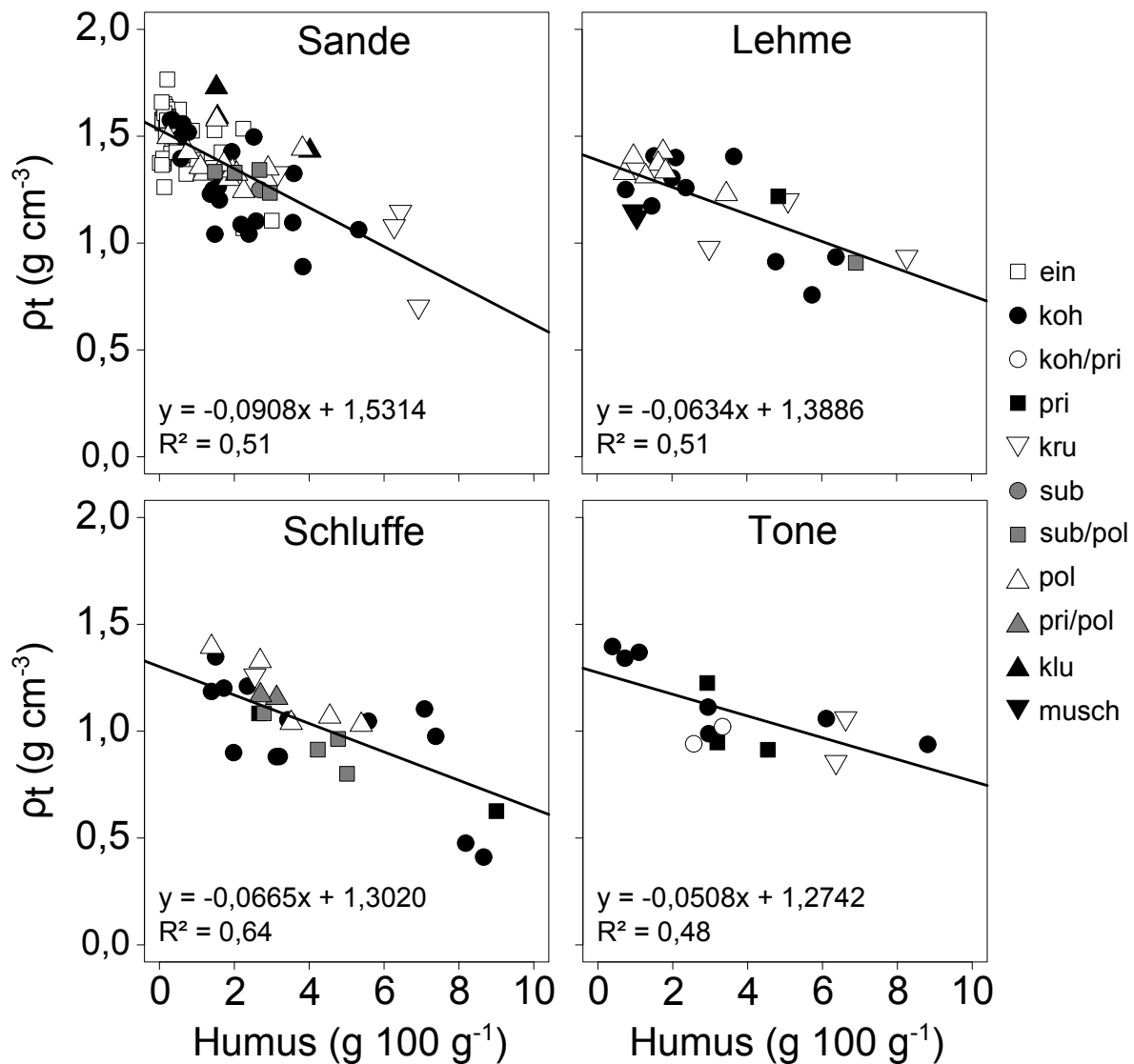


Abbildung 4.24: Trockenrohdichten und Humusgehalte mit linearer Gleichung und Bestimmtheitsmaß, unterteilt nach Bodenarten: Sande, Lehme, Schluffe und Tone und den Gefügeformen: ein (Einzelkorn), koh (Kohärentgefüge), koh/pri (Kohärent-/ Prismengefüge), pri (Prismengefüge), kru (Krümelgefüge), sub (Subpolyedergefüge), sub/pol (Subpolyeder-/ Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge), pri/pol (Prismen-/ Polyedergefüge), klu (Klumpengefüge), musch (Horizont mit hohem Muschelschalenanteil).

4.2.3 Kennwerte der Wasserbindung

Tabelle 4.1 zeigt Kennwerte der Wasserbindung, gruppiert nach den Bodenarten-Hauptgruppen: Sande (ss, ls, us), Lehme (sl, ll), Schluffe (su, lu, tu) und Tone (ut) und den jeweils vorherrschenden Gefügeformen in den Horizonten. Die Einstufung der Werte erfolgt nach AD-HOC-AG BODEN (2005).

Bei den Reinsanden (ss) mit Einzelkorngefüge ist die Luftkapazität sehr hoch, die Feldkapazität sehr gering und die nutzbare Feldkapazität und der Totwasseranteil gering. Die Reinsande mit Kohärent- und Subpolyedergefüge haben eine geringe Feldkapazität. Bei den Lehmsanden (ls) mit Kohärentgefüge ist die nutzbare Feldkapazität sehr hoch und das Gesamtporenvolumen hoch. Im Krümelgefüge sind das Gesamtporenvolumen und die nutzbare Feldkapazität sehr hoch. Bei den Schluffsanden (us) mit Subpolyeder-/Polyedergefüge ist der Totwasseranteil gering.

Das Gesamtporenvolumen der Lehme (sl, ll) ist insgesamt hoch bis sehr hoch. Bei den Sandlehmen (sl) mit Kohärentgefüge ist die Luftkapazität gering und der Totwasseranteil mittel. Die Sandlehme mit Polyedergefüge haben eine mittlere Luftkapazität und einen mittleren Totwasseranteil. Der Horizont mit Muschelschalen (musch) hat eine mittlere Feldkapazität und eine sehr geringe nutzbare Feldkapazität. Bei den Normallehmen (ll) kann die Luftkapazität als mittel eingestuft werden. Das Prismengefüge hat eine geringe und das Krümelgefüge eine mittlere nutzbare Feldkapazität. Im Polyedergefüge sind die Feldkapazität, die nutzbare Feldkapazität und der Totwasseranteil mittel. Der Muschelhorizont hat eine geringe Feldkapazität, eine sehr geringe nutzbare Feldkapazität und einen mittleren Totwasseranteil.

Die Sandschluffe (su) haben bei allen Gefügeformen ein hohes Gesamtporenvolumen. Die Luftkapazität bei Kohärentgefüge ist sehr gering, sowohl Feldkapazität als auch die nutzbare Feldkapazität sind sehr hoch während der Totwasseranteil gering ist. Wenn die Aggregation weiter fortschreitet, ändern sich diese Werte beträchtlich. So liegen bei Polyedergefüge eine mittlere Luftkapazität, eine hohe Feldkapazität und nutzbare Feldkapazität und ein mittlerer Totwasseranteil vor. Die Lehmschluffe (lu) haben ein sehr hohes Gesamtporenvolumen, eine sehr hohe Feldkapazität und einen hohen Totwasseranteil.

Die nutzbare Feldkapazität ist bei Kohärentgefüge hoch und bei Prismen- und Polyedergefüge mittel. Horizonte mit Prismengefüge haben eine mittlere Luftkapazität während solche mit Polyedergefüge über eine hohe Feld- und Luftkapazität charakterisiert werden können.

Das Gesamtporenvolumen und die Feldkapazität sind bei den Tonschluffen (tu) sehr hoch. Die Luftkapazität ist bei Kohärent- und Krümelgefüge mittel und bei Kohärent-/Prismen- und Prismengefüge gering. Die nutzbare Feldkapazität und der Totwasseranteil sind bei Kohärent-,

4 Ergebnisse

Tabelle 4.1: Kennwerte der Wasserbindung für Sande (ss, ls, us), Lehme (sl, ll), Schluffe (su, lu, tu) und Tone (ut) bei verschiedenen Gefügestrukturen: : ein (Einzelkorn), koh (Kohärentgefüge), koh/pri (Kohärent-/ Prismengefüge), pri (Prismengefüge), kru (Krümelgefüge), sub (Subpolyedergefüge), sub/pol (Subpolyeder-/ Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge), pri/pol (Prismen-/ Polyedergefüge), klu (Klumpengefüge), musch (Horizont mit hohem Muschelschalenanteil). Einstufung der Werte nach AD - HOC - AG BODEN, 2005.

Bodenarten-Gruppe	Gefügestruktur	GPV (Vol.-%)	Stufe	LK (Vol.-%)	Stufe	FK (Vol.-%)	Stufe	nFk (Vol.-%)	Stufe	TW (Vol.-%)	Stufe
ss	ein	41,9	GPV3	26,2	LK5	15,8	FK1	11,5	nFK2	4,2	TW1
ss	koh	43,9	GPV3	20,9	LK4	23,0	FK2	14,9	nFK3	8,1	TW2
ss	sub	48,4	GPV4	20,1	LK4	28,3	FK2	19,3	nFK3	9,0	TW2
ls	ein	50,5	GPV4	11,9	LK3	38,7	FK3	27,2	nFK4	11,4	TW3
ls	koh	51,8	GPV4	7,7	LK3	44,1	FK4	30,7	nFK5	13,4	TW3
ls	pol	47,1	GPV4	16,9	LK4	30,2	FK3	14,4	nFK3	15,7	TW3
ls	sub/pol	49,2	GPV4	7,9	LK3	41,3	FK4	26,9	nFK4	14,4	TW3
ls	kru	58,7	GPV5	11,2	LK3	47,5	FK4	31,6	nFK5	15,9	TW3
ls	klu	43,6	GPV3	9,1	LK3	34,4	FK3	22,9	nFK4	11,5	TW3
us	koh	52,9	GPV4	4,8	LK2	48,1	FK5	36,2	nFK5	11,9	TW3
us	pol	50,1	GPV4	7,8	LK3	42,3	FK4	27,3	nFK4	15,0	TW3
us	sub/pol	46,7	GPV4	5,5	LK3	41,1	FK4	31,8	nFK5	9,4	TW2
sl	koh	50,5	GPV4	2,0	LK2	48,5	FK5	32,4	nFK5	16,1	TW3
sl	pol	50,9	GPV4	10,8	LK3	40,1	FK4	26,5	nFK4	13,6	TW3
sl	kru	75,2	GPV5	22,9	LK5	52,3	FK5	23,7	nFK4	28,6	TW4
sl	musch	54,2	GPV5	21,8	LK4	32,4	FK3	3,0	nFK1	29,4	TW4
ll	koh	59,1	GPV5	6,0	LK3	53,1	FK5	27,0	nFK4	26,1	TW4
ll	pri	57,0	GPV5	7,2	LK3	49,9	FK5	10,4	nFK2	39,4	TW5
ll	pol	47,8	GPV4	10,3	LK3	37,5	FK3	21,1	nFK3	16,4	TW3
ll	sub/pol	63,9	GPV5	7,1	LK3	56,9	FK5	27,1	nFK4	29,8	TW4
ll	kru	54,6	GPV5	6,2	LK3	48,4	FK5	14,0	nFK3	34,4	TW5
ll	musch	49,6	GPV4	25,3	LK4	24,3	FK2	4,5	nFK1	19,8	TW3
su	koh	49,7	GPV4	0,5	LK1	49,2	FK5	42,2	nFK5	6,9	TW2
su	pol	50,0	GPV4	9,5	LK3	40,5	FK4	25,9	nFK4	14,6	TW3
lu	koh	59,5	GPV5	8,1	LK3	51,4	FK5	23,1	nFK4	28,3	TW4
lu	pri	58,4	GPV5	6,9	LK3	51,5	FK5	18,4	nFK3	33,1	TW4
lu	pol	59,0	GPV5	13,8	LK4	45,2	FK4	20,6	nFK3	24,6	TW4
tu	koh	55,2	GPV5	6,6	LK3	48,6	FK5	24,0	nFK4	24,6	TW4
tu	koh/pri	60,8	GPV5	2,1	LK2	58,7	FK5	25,4	nFK4	33,2	TW4
tu	pri	60,9	GPV5	4,8	LK2	56,1	FK5	24,9	nFK4	31,3	TW4
tu	kru	65,7	GPV5	12,0	LK3	53,7	FK5	18,6	nFK3	34,9	TW5
ut	koh	72,6	GPV5	8,7	LK3	63,9	FK5	30,1	nFK5	33,8	TW4
ut	pri	75,3	GPV5	12,6	LK3	62,7	FK5	24,2	nFK4	38,5	TW5
ut	pri/pol	58,2	GPV5	7,8	LK3	50,4	FK5	11,8	nFK2	38,6	TW5
ut	pol	57,4	GPV5	13,4	LK4	44,0	FK4	8,1	nFK2	35,9	TW5
ut	sub/pol	64,6	GPV5	9,4	LK3	55,2	FK5	10,2	nFK2	45,0	TW5

Kohärent-/Prismen- und Prismengefüge hoch. Beim Krümelgefüge ist die nutzbare Feldkapazität mittel und der Totwasseranteil sehr hoch.

Die Schlufftone (ut) haben ein sehr hohes Gesamtporenvolumen und einen sehr hohen Totwasseranteil. Bei Polyedergefüge sind die Luftkapazität und die Feldkapazität hoch. In den anderen Gefügeformen ist die Luftkapazität mittel und die Feldkapazität sehr hoch. Die nutzbare Feldkapazität ist bei Kohärentgefüge sehr hoch, im Prismengefüge hoch und bei den übrigen Gefügeformen gering.

4.2.4 Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Tabelle 4.2 zeigt die mittleren gesättigten Wasserleitfähigkeiten, gruppiert nach den Bodenarten-Hauptgruppen Sande (ss, ls, us), Lehme (sl, ll), Schluffe (su, lu, tu) und Tone (ut), sowie den vorliegenden Gefügeformen in den Horizonten. Die Einstufung der gemessenen Werte erfolgte nach AD - HOC - AG BODEN (2005).

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit der Reinsande (ss) ist bei allen Gefügeformen extrem hoch. Bei den Lehmsanden (ls) und Schluffsand (us) mit Kohärentgefüge ist die gesättigte Wasserleitfähigkeit hoch. Die Lehmsande (ls) haben im Polyeder- und Krümelgefüge eine sehr hohe gesättigte Wasserleitfähigkeit und im Subpolyeder-/Polyedergefüge eine extrem hohe gesättigte Wasserleitfähigkeit. Eine mittlere gesättigte Wasserleitfähigkeit haben die Lehmsande mit Klumpengefüge (klu) und die Schluffsand mit Subpolyeder-/Polyedergefüge.

Die Sandlehme (sl) haben bei Polyedergefüge und im Muschelhorizont (musch) eine mittlere, im Kohärentgefüge eine hohe und im Krümelgefüge eine extrem hohe gesättigte Wasserleitfähigkeit. Bei den Normallehmen (ll) mit Polyeder- und Krümelgefüge ist die gesättigte Wasserleitfähigkeit mittel, im Muschelhorizont extrem hoch und bei den anderen Gefügeformen hoch.

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit der Schluffsand (su) ist gering. Bei den Lehmschluffen (lu) ist die gesättigte Wasserleitfähigkeit mit Polyedergefüge extrem hoch und in den anderen Gefügeformen mittel.

Tabelle 4.2: Gesättigte Wasserleitfähigkeit für die Bodenarten-Gruppen der Sande (ss, ls, us), Lehme (sl, ll), Schluffe (su, lu, tu) und Tone (ut) bei verschiedenen Gefügeformen: ein (Einzelkorn), koh (Kohärentgefüge), koh/pri (Kohärent-/ Prismengefüge), pri (Prismengefüge), kru (Krümelgefüge), sub (Subpolyedergefüge), sub/pol (Subpolyeder-/ Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge), pri/pol (Prismen-/ Polyedergefüge), klu (Klumpengefüge), musch (Horizont mit hohem Muschelschalenanteil) und Anzahl der Proben (n). Einstufung nach AD-HOC-AG BODEN, 2005.

Bodenarten-Gruppe	Gefügeform	k_f cm d ⁻¹	n	Einstufung
ss	ein	876,0 ± 519,3	51	k_{f6}
ss	koh	348,5 ± 351,8	3	k_{f6}
ss	sub	608,4	1	k_{f6}
ls	ein	312,5 ± 194,2	3	k_{f6}
ls	koh	57,6 ± 56,8	11	k_{f4}
ls	pol	296,6 ± 186,3	4	k_{f5}
ls	sub/pol	331,9 ± 5,7	2	k_{f6}
ls	kru	183,6 ± 180,0	4	k_{f5}
ls	klu	36,5 ± 34,2	3	k_{f3}
us	koh	99,0 ± 130,3	6	k_{f4}
us	pol	40,4 ± 19,2	8	k_{f4}
us	sub/pol	19,7 ± 5,5	2	k_{f3}
sl	koh	60,9 ± 55,8	5	k_{f4}
sl	pol	27,7 ± 10,5	4	k_{f3}
sl	kru	361,4	1	k_{f6}
sl	musch	34,0	1	k_{f3}
ll	koh	64,5 ± 92,2	6	k_{f4}
ll	pri	77,1	1	k_{f4}
ll	pol	17,8 ± 2,0	2	k_{f3}
ll	sub/pol	43,2	1	k_{f4}
ll	kru	22 ± 19,1	2	k_{f3}
ll	musch	556,5	1	k_{f6}
su	koh	12,6 ± 7,5	2	k_{f2}
su	pol	42,9 ± 9,9	3	k_{f2}
lu	koh	39,4 ± 38,6	6	k_{f3}
lu	pri	32,2	1	k_{f3}
lu	pol	781,4	1	k_{f6}
tu	koh	17,7 ± 18,8	7	k_{f3}
tu	koh/pri	77,2 ± 72,3	2	k_{f4}
tu	pri	39,8 ± 35,1	3	k_{f3}
tu	kru	180,3 ± 160,4	2	k_{f5}
ut	koh	124,8 ± 118,7	4	k_{f5}
ut	pri	139,8	1	k_{f5}
ut	pri/pol	105,9 ± 98,3	2	k_{f5}
ut	pol	560,0 ± 263,8	2	k_{f6}
ut	sub/pol	34,4 ± 27,9	5	k_{f3}

Bei den Tonschluffen (tu) ist die Wasserleitfähigkeit bei Kohärent- und Prismengefüge mittel, bei Kohärent-/Prismengefüge hoch und bei Krümelgefüge sehr hoch.

Die Tonschluffe (ut) mit Subpolyeder-/Polyedergefüge haben eine mittlere gesättigte Wasserleitfähigkeit, das Polyedergefüge eine extrem hohe und die übrigen Gefügeformen eine sehr hohe Wasserleitfähigkeit.

4.2.5 Vorbelastung und Scherwiderstandskennwerte

Bei der Darstellung der Vorbelastung und der Scherwiderstandskennwerte sind die Werte zunächst nach den drei Profilgruppen (Grünland, Röhricht, Watt) sortiert, um durch den Bodenentwicklungsgrad bedingte Unterschiede zwischen den Profilen darzustellen. Anschließend sind die Daten nochmals wie bereits im vorherigen Abschnitt nach den Bodenarten-Hauptgruppen und den Gefügeformen unterteilt.

4.2.5.1 Vorbelastung in Abhängigkeit der Bodenentwicklung

Abbildung 4.25 zeigt die Vorbelastungen für alle Böden unter Grünland, Röhricht und Watt in den Tiefen 10 cm, 30 cm, 50 cm und 70 cm. Die Vorbelastung der Profile ist im Röhricht und Watt in einer Tiefe von 10 cm sehr gering (Abbildung 4.25). In den übrigen Tiefen ist die Vorbelastung gering. Grundsätzlich steigt die Vorbelastung in allen drei Profilgruppen mit zunehmender Tiefe an. Beim statistischen Vergleich gleicher Tiefen zwischen den Profilen besteht in 10 cm Tiefe ein signifikanter Unterschied (p-Wert: $<0,001$ ***) zwischen Grünland und Röhricht und zwischen Grünland und Watt (p-Wert: $<0,001$ ***). Zwischen den anderen Tiefen konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Folglich unterscheidet sich die Vorbelastung zwischen den Grünland und Röhricht sowie den Grünland und Watt Profilen nur in 10 cm Tiefe signifikant. Die visuellen Trends deuten bei allen drei Profilen mit steigender Tiefe auf höhere Vorbelastungswerte hin.

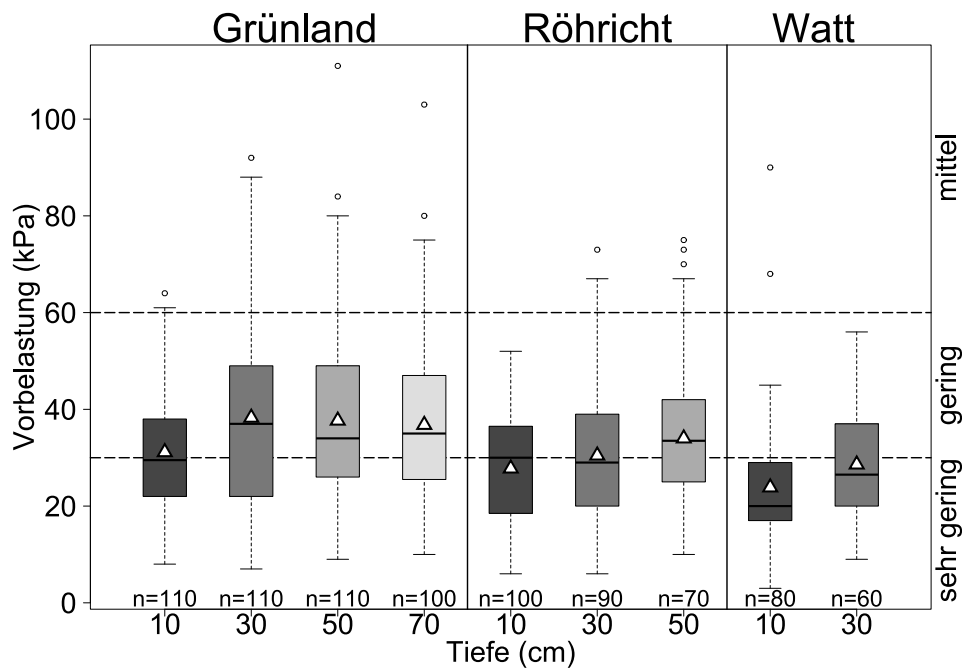


Abbildung 4.25: Boxplots der Vorbelastung nach Vorentwässerung auf -6 kPa für die Profilgruppen (Grünland, Röhricht und Watt) in den entsprechenden Tiefen (10 cm, 30 cm, 50 cm, 70 cm). Die gestrichelten Linien zeigen die Einstufung nach DVWK (1995). Mittelwerte werden als weißes Dreieck dargestellt und Anzahl der Proben (n).

4.2.5.2 Scherwiderstandskennwerte: Kohäsion und Winkel der inneren Reibung in Abhängigkeit der Bodenentwicklung

Abbildung 4.26, oben, zeigt die Kohäsion der Profilgruppen Grünland, Röhricht und Watt in den Tiefen 10 cm, 30 cm, 50 cm und 70 cm. In 10 cm und 30 cm Tiefe weist das Grünland eine höhere Kohäsion auf als das Röhricht und das Watt. In 50 cm Tiefe ist die Kohäsion im Grünland und Röhricht in Median und Mittelwert fast gleich. Die Röhrichtprofile zeigen hinsichtlich der minimalen und maximalen Werte größere Streuungen auf als die Grünlandstandorte. Die statistische Auswertung der Kohäsion zeigt hoch signifikante Unterschiede (p-Wert: <0,001 ***) zwischen Grünland und Röhricht sowie zwischen Grünland und Watt in 10 cm Tiefe. Außerdem besteht ein signifikanter Unterschied zwischen Grünland und Watt in 30 cm Tiefe (p-Wert: 0.049 *).

Die Winkel der inneren Reibung (Abbildung 4.26, unten) nehmen vom Grünland zum Watt in den Tiefen 10 cm und 30 cm leicht zu. Insgesamt liegen die Werte für alle Tiefen zwischen 35° und 40°. Die statistische Auswertung der Winkel der inneren Reibung zeigt hoch signifikante

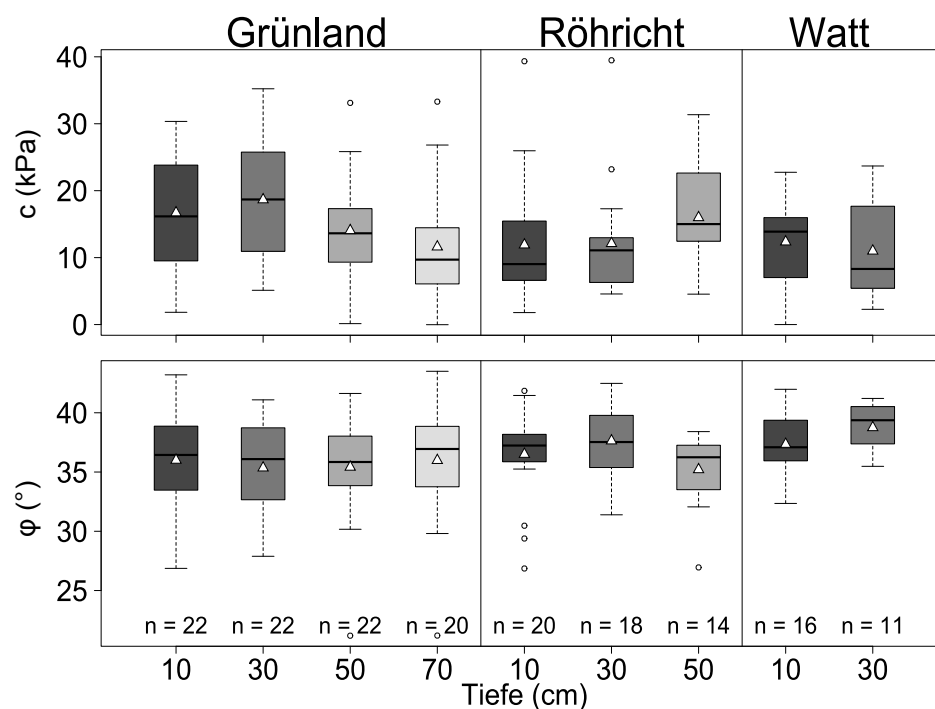


Abbildung 4.26: Boxplots der Kohäsion und Winkel der inneren Reibung nach Vorentwässerung auf -6 kPa für die Profilgruppen (Grünland, Röhricht und Watt) in den entsprechenden Tiefen (10 cm, 30 cm, 50 cm und 70 cm). Mittelwerte werden als weißes Dreieck dargestellt und Anzahl der Proben (n).

Unterschiede (p -Wert: $<0,001$ ***) zwischen Grünland und Röhricht sowie zwischen Grünland und Watt in 10 cm Tiefe.

4.2.5.3 Vorbelastung und Trockenrohdichte in Abhängigkeit von Bodenarten-Hauptgruppe und Gefügestruktur

Die Vorbelastungen und Trockenrohdichten sind im Folgenden nach den Bodenarten-Hauptgruppen und den Gefügestrukturen in den jeweiligen Horizonten sortiert. Diese Gruppierung bildet die Basis für die spätere Anwendung einer Pedotransferfunktion zur Ableitung der Kompressibilitätsindizes anhand der Bodenarten und Gefügestrukturen.

Tabelle 4.3 zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der Scherwiderstandskennwerte: Kohäsion und Winkel der inneren Reibung, der Vorbelastung, der Trockenroh- und der Festsubstanzdichte, unterteilt nach Bodenarten-Gruppen: Sande (ss, ls, us), Lehme (sl, ll), Schluffe

(su, lu, tu) und Tone (ut) sowie Gefügeformen. Die Einstufung der Vorbelastung erfolgte nach DVWK (1995) und die der Trockenrohdichte nach AD - HOC - AG BODEN (2005).

Die mittlere Vorbelastung der Reinsande (ss) ist sehr gering und die Trockenrohdichte mittel im Einzelkorn-, Kohärentgefüge bis gering im Subpolyedergefüge. Bei den Lehmsanden (ls) ist die Vorbelastung im Polyeder-, Krümel- und Klumpengefüge sehr gering, in den anderen Gefügeformen gering. Die Trockenrohdichte ist sehr gering im Krümelgefüge, gering im Einzelkorn-, Kohärent-, Subpolyeder-/Polyedergefüge oder mittel im Polyeder-, Klumpengefüge. Die Schluffe haben bei Kohärentgefüge eine sehr geringe, und bei den anderen Gefügeformen (Polyeder-, Subpolyeder-/Polyedergefüge) eine geringe Vorbelastung. Die Trockenrohdichte der Schluffe (us) ist bei allen Gefügeformen gering.

Schlufflehm (sl) haben eine geringe Vorbelastung. Die Trockenrohdichte des Krümelgefüges und des Muschelhorizontes ist sehr gering, die des Kohärent- und Polyedergefüges gering. Die Vorbelastung des Einzelkorngefüges bei Normallehmen (ll) ist sehr gering, die den anderen Gefügeformen gering. Die Trockenrohdichte der Gefügeformen (Kohärent-, Krümel-, Subpolyeder-/Polyedergefüge, Muscheln) ist sehr gering, für das Prismen-, Polyedergefüge gering und im Einzelkorngefüge mittel.

Bei den Schluffen (su) mit Kohärentgefüge ist die Vorbelastung sehr gering und in Horizonten mit Polyedergefüge gering. Die Trockenrohdichte aller Gefügeformen ist gering. Die Lehmschluffe (lu) haben bei Polyedergefüge eine sehr geringe und bei Kohärent- und Prismengefüge eine geringe Vorbelastung. Die Trockenrohdichte ist bei allen Gefügeformen sehr gering. Bei den Tonschluffen (tu) ist die Vorbelastung bei allen Gefügeformen gering und die Trockenrohdichte sehr gering.

Bei durchgängig sehr niedrigen Trockenrohdichten haben die Tonschluffe (ut) in den untersuchten Bodenhorizonten mit Prismengefüge eine sehr geringe Vorbelastung. Bei den anderen Gefügeformen ist die Vorbelastung sehr gering.

Tabelle 4.3: Bodenphysikalische Kennwerte, Vorbelastung (P_v) bei einer Vorentwässerung von -6 kPa, Trockenrohdichte (ρ_t) und Festsubstanzdichte (ρ_f) für die Bodenarten-Gruppe und den Gefügeformen: ein (Einzelkorn), koh (Kohärentgefüge), koh/pri (Kohärent-/ Prismengefüge), pri (Prismengefüge), kru (Krümelgefüge), sub (Subpolyedergefüge), sub/pol (Subpolyeder-/ Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge), pri/pol (Prismen-/ Polyedergefüge), klu (Klumpengefüge), musch (Horizont mit hohen Muschelschalenanteil). Und der Anzahl der Messungen (n).

Bodenarten-Gruppe	Gefügeform	P_v (kPa)	n	ρ_t (g cm ⁻³)	n	ρ_f (g cm ⁻³)	n
ss	ein	27,5 ± 13,6	260	1,50 ± 0,13	260	2,54 ± 0,07	260
ss	koh	19,2 ± 8,4	15	1,41 ± 0,22	15	2,49 ± 0,06	15
ss	sub	27,4 ± 5,5	5	1,26 ± 0,04	5	2,48 ± 0,01	5
ls	ein	44,1 ± 21,3	15	1,30 ± 0,18	15	2,47 ± 0,09	15
ls	koh	35,0 ± 11,0	55	1,29 ± 0,23	55	2,44 ± 0,10	55
ls	pol	29,0 ± 9,2	20	1,42 ± 0,13	20	2,55 ± 0,08	20
ls	sub/pol	58,0 ± 21,2	10	1,29 ± 0,10	10	2,56 ± 0,05	10
ls	kru	31,6 ± 13,6	20	1,08 ± 0,24	20	2,36 ± 0,06	20
ls	klu	25,7 ± 14,8	15	1,58 ± 0,21	15	2,55 ± 0,04	15
us	koh	24,9 ± 10,6	30	1,20 ± 0,15	30	2,48 ± 0,13	35
us	pol	30,2 ± 11,2	35	1,36 ± 0,08	40	2,50 ± 0,04	40
us	sub/pol	38,1 ± 14,5	10	1,35 ± 0,05	10	2,45 ± 0,05	10
sl	koh	40,9 ± 13,8	25	1,30 ± 0,13	25	2,42 ± 0,07	25
sl	pol	46,1 ± 13,6	20	1,32 ± 0,06	20	2,52 ± 0,05	20
sl	kru	33,8 ± 7,6	5	0,99 ± 0,09	5	2,36 ± 0,04	5
sl	musch	49,0 ± 18,5	5	1,08 ± 0,01	5	2,63 ± 0,05	5
ll	koh	39,1 ± 18,8	30	1,11 ± 0,25	30	2,42 ± 0,09	30
ll	pri	35,6 ± 4,1	5	1,25 ± 0,05	5	2,44 ± 0,02	5
ll	pol	28,1 ± 4,7	10	1,38 ± 0,04	10	2,53 ± 0,06	10
ll	sub/pol	39,8 ± 12,3	5	0,87 ± 0,02	5	2,39 ± 0,04	5
ll	kru	42,1 ± 11,6	10	1,09 ± 0,18	10	2,39 ± 0,04	10
ll	musch	42,6 ± 4,8	5	1,17 ± 0,08	5	2,61 ± 0,04	5
su	koh	28,3 ± 6,8	10	1,28 ± 0,09	10	2,57 ± 0,12	10
su	pol	31,2 ± 9,8	15	1,32 ± 0,07	15	2,47 ± 0,04	15
lu	koh	32,3 ± 9,8	35	1,04 ± 0,15	35	2,37 ± 0,08	35
lu	pri	34,2 ± 10	5	1,05 ± 0,04	5	2,50 ± 0,02	5
lu	pol	23,6 ± 4,0	5	0,99 ± 0,08	5	2,58 ± 0,01	5
tu	koh	35,6 ± 17,8	35	1,17 ± 0,20	35	2,42 ± 0,10	35
tu	koh/pri	44,8 ± 5,3	10	1,00 ± 0,03	10	2,55 ± 0,04	10
tu	pri	31,3 ± 11,9	15	1,02 ± 0,17	15	2,50 ± 0,09	15
tu	kru	45,4 ± 11,8	10	0,94 ± 0,11	10	2,44 ± 0,09	10
ut	koh	39,4 ± 29,4	25	0,67 ± 0,30	25	2,26 ± 0,11	25
ut	pri	26,4 ± 5,6	5	0,59 ± 0,04	5	2,39 ± 0,04	5
ut	pri/pol	39,4 ± 10,4	10	1,18 ± 0,05	10	2,23 ± 0,08	10
ut	pol	54,0 ± 15,2	10	1,04 ± 0,03	10	2,44 ± 0,06	10
ut	sub/pol	37,6 ± 10,8	25	0,91 ± 0,12	25	2,34 ± 0,13	25

4.2.5.4 Vorbelastung, Kohäsion und Winkel der inneren Reibung in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte für verschiedene Bodenarten-Hauptgruppen und Gefügeformen.

Abbildung 4.27 zeigt die Vorbelastung, Kohäsion und Winkel der inneren Reibung in Abhängigkeit der Trockenrohdichte für Sande, Lehme, Schluffe und Tone. Bei den Bodenarten-Hauptgruppen ist die Streuung zwischen der Trockenrohdichte und den Parametern Vorbelastung, Kohäsion und Winkel der inneren Reibung sehr groß. Es ist kein einheitlicher Trend bei den Gefügeformen zu erkennen.

Bei den Sanden steigt die Vorbelastung beim Subpolyeder- und Subpolyeder-/Polyedergefüge mit steigender Trockenrohdichte. Bei den anderen Gefügeformen wird die Vorbelastung mit steigender Trockenrohdichte geringer. Die Kohäsion nimmt im Kohärent-, Krümel-, Prismen- und Polyedergefüge mit steigender Trockenrohdichte zu. Im Kohärent-/Prismengefüge sinkt die Kohäsion mit höherer Trockenrohdichte. Der Winkel der inneren Reibung sinkt beim Prismengefüge mit zunehmender Trockenrohdichte. In den anderen Gefügeformen der Sande steigt der Winkel der inneren Reibung mit steigender Trockenrohdichte an.

In den Lehmen sinkt im Polyeder- und Subpolyeder-/Polyedergefüge die Vorbelastung mit steigender Trockenrohdichte. In den übrigen Gefügeformen steigt die Vorbelastung mit zunehmender Trockenrohdichte an. In Horizonten mit Prismen- und Subpolyeder-/Polyedergefüge ändern sich die Kohäsion und der Winkel der inneren Reibung mit steigender Trockenrohdichte nicht, während in Horizonten mit Krümel- und Polyedergefüge die Kohäsion mit steigender Trockenrohdichte geringer wird. Bei den übrigen Gefügeformen steigt die Kohäsion mit zunehmender Trockenrohdichte. Der Winkel der inneren Reibung wird im Polyeder- und Krümelgefüge mit steigender Trockenrohdichte größer, bei den anderen Gefügeformen geringer.

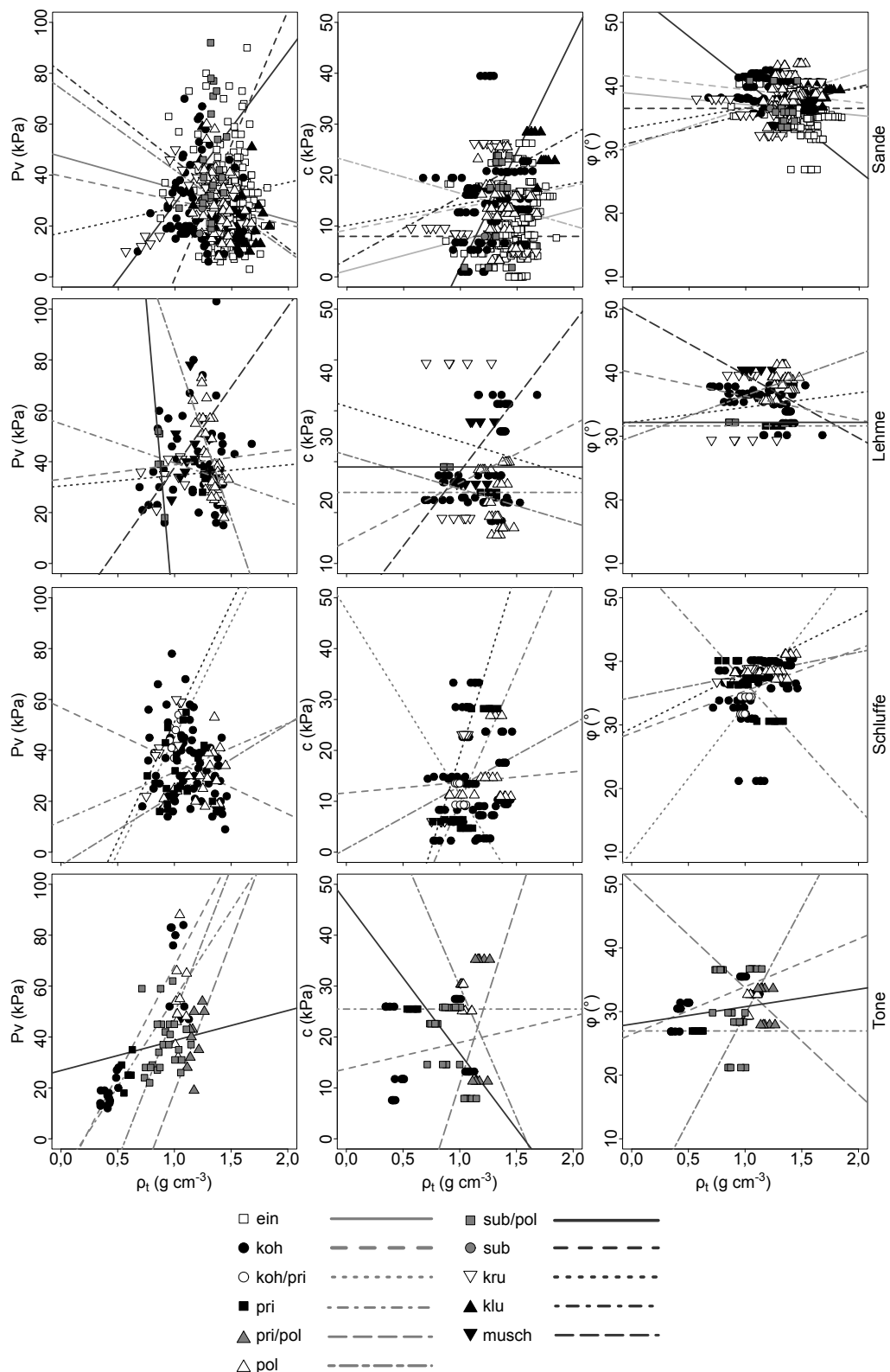


Abbildung 4.27: Vorbelastung, Kohäsion und Winkel der inneren Reibung in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte. Aufgeteilt nach den Bodenarten-Hauptgruppen: Sande, Lehme, Schluffe und Tone. Trendlinien zeigen den Verlauf der Parameter in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte für die Gefügestrukturen: \square ein (Einzelkorn), koh (Kohärentgefüge), koh/pri (Kohärent-/ Prismengefüge), pri (Prismengefüge), kru (Krümelgefüge), sub (Subpolyedergefüge), sub/pol (Subpolyeder-/ Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge), pri/pol (Prismen-/ Polyedergefüge), klu (Klumpengefüge), musch (Horizont mit hohem Muschelschalenanteil).

Bei den Schluffen erhöht sich die Vorbelastung mit steigender Trockentrockenrohddichte in allen Gefügeformen außer dem Kohärentgefüge, wo der Trend entgegengesetzt ist. Das Kohärent-/Prismengefüge und das Prismengefüge hat mit steigender Trockenrohddichte eine abnehmende Kohäsion. Die anderen Gefügeformen haben mit höherer Trockenrohddichte höhere Scherwiderstandskennwerte.

Die Vorbelastung steigt bei den Tonen mit höherer Trockenrohddichte in allen Gefügeformen. Die Kohäsion steigt im Kohärent- und Prismen-/Polyedergefüge mit zunehmender Trockenrohddichte. Bei den anderen Gefügeformen sinkt die Kohäsion mit zunehmender Trockenrohddichte. Im Polyeder-, Kohärent- und Subpolyeder-/Polyedergefüge steigt der Winkel der inneren Reibung mit höherer Trockenrohddichte, bei den anderen Gefügeformen sinkt er.

4.2.6 Kompressibilitätsindizes in Abhängigkeit von Textur, Gefügeform und Matrixpotenzial

Abbildung 4.28 zeigt die Kompressibilitätsindizes für Sande, Lehme, Schluffe und Tone bei Matrixpotenzialen von -3 kPa, -6 kPa und -15 kPa. Unabhängig vom Matrixpotenzial wird mit feinerer Textur (Sand \Rightarrow Ton) der Kompressibilitätsindex größer, der Boden also instabiler. Bei Sanden ändert sich der Kompressibilitätsindex bei unterschiedlichen Matrixpotenzialen nur wenig. Bei den anderen Texturen nimmt der Kompressibilitätsindex mit negativerem Matrixpotenzial ab. Die untersuchten Lehme, Schluffe und Tone werden folglich gegenüber zyklischer Belastung stabiler, je negativer das Matrixpotenzial (-3 kPa \Rightarrow -15 kPa) wird.

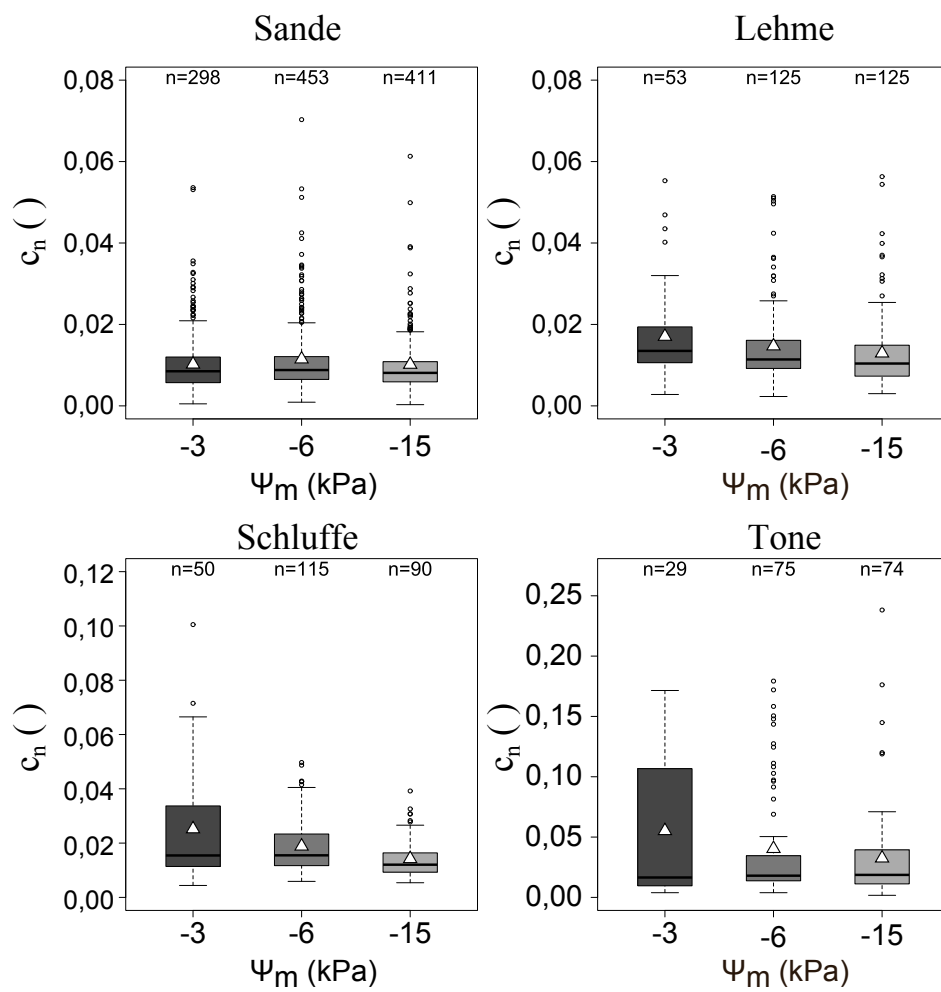


Abbildung 4.28: Boxplots der Kompressibilitätsindizes für die Bodenarten-Hauptgruppen: Sande, Lehme, Schluffe und Tone in Abhängigkeit vom Matrixpotenzial (Ψ_m): -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa), mit der Anzahl der Proben (n).

In den Abbildungen 4.29 bis 4.32 sind die gemessenen Kompressibilitätsindizes in Abhängigkeit von Bodenarten-Gruppe, Gefügeform und Matrixpotenzial abgebildet.

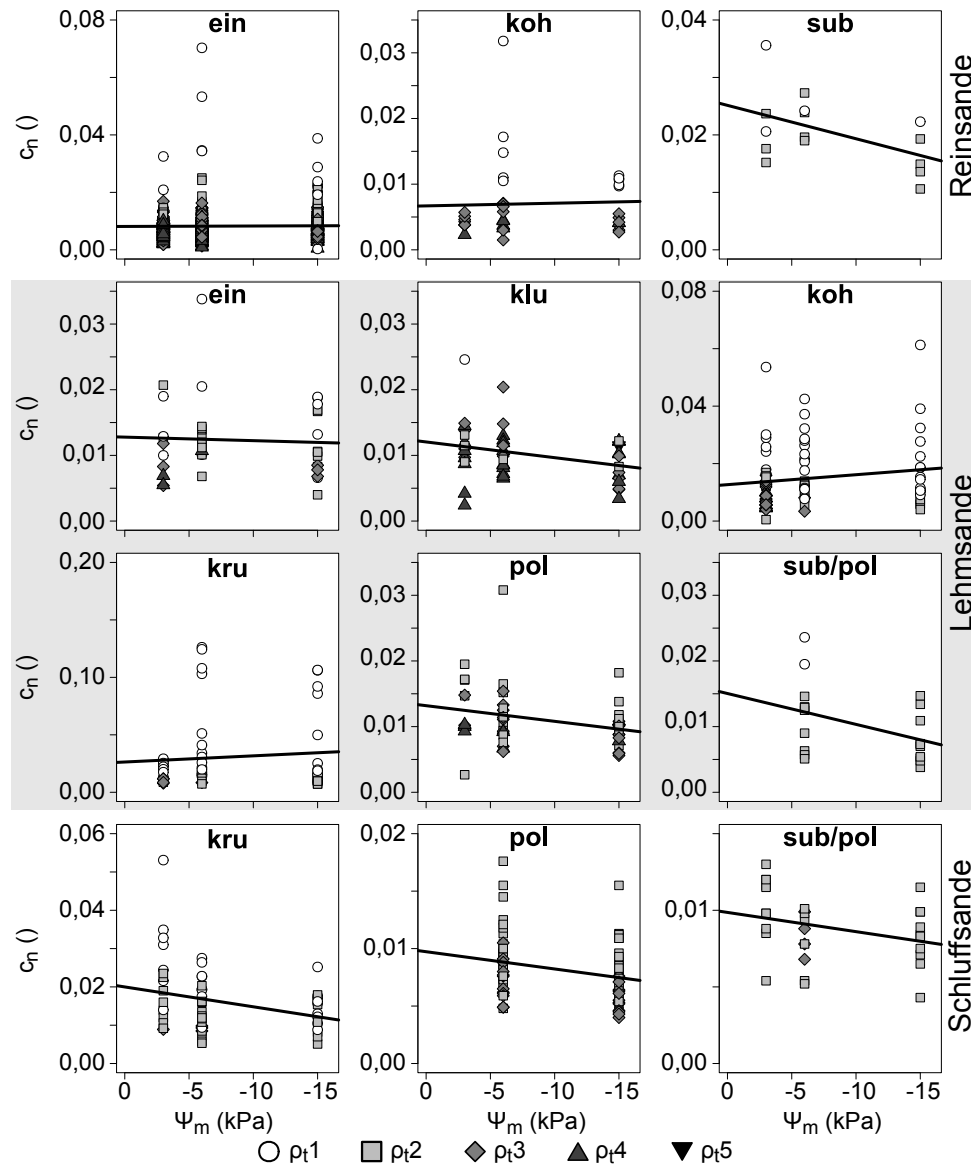


Abbildung 4.29: Mittelwerte der Kompressibilitätsindizes (c_n) für die Bodenarten-Gruppen: Reinsande, Lehmsande und Schluffssande bei verschiedenen Matrixpotenzialen (ψ_m : -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa) und den Trockenrohdichteklassen (ρ_{t1} bis ρ_{t5}) nach AD-HOC-AG BODEN (2005). Eine weitere Unterteilung der Daten erfolgte nach den Gefügeformen: ein (Einzelkorn), koh (Kohärentgefüge), kru (Krümelgefüge), sub (Subpolyedergefüge), sub/pol (Subpolyeder-/ Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge), klu (Klumpengefüge). Die Trendlinien zeigen den Verlauf der Kompressibilitätsindizes mit negativerem Matrixpotenzial.

Die Abbildung 4.29 zeigt diese Zusammenhänge für die Bodenarten-Hauptgruppe der Sande. Bei den Reinsanden mit Einzelkorngefüge ist keine Abhängigkeit des Kompressibilitätsindex von den Matrixpotenzialen zu erkennen. Bei Reinsanden und Lehmsanden mit Kohärentgefüge

steigt der Kompressibilitätsindex mit negativerem Matrixpotenzial. Bei Lehmsanden mit Krümelgefüge ist dieser ansteigende Trend ebenfalls zu sehen.

In der Bodenarten-Hauptgruppe der Lehme ist ein Anstieg des Kompressibilitätsindex mit negativerem Matrixpotenzial nur bei den Normallehmen mit Polyedergefüge zu sehen (Abbildung 4.30).

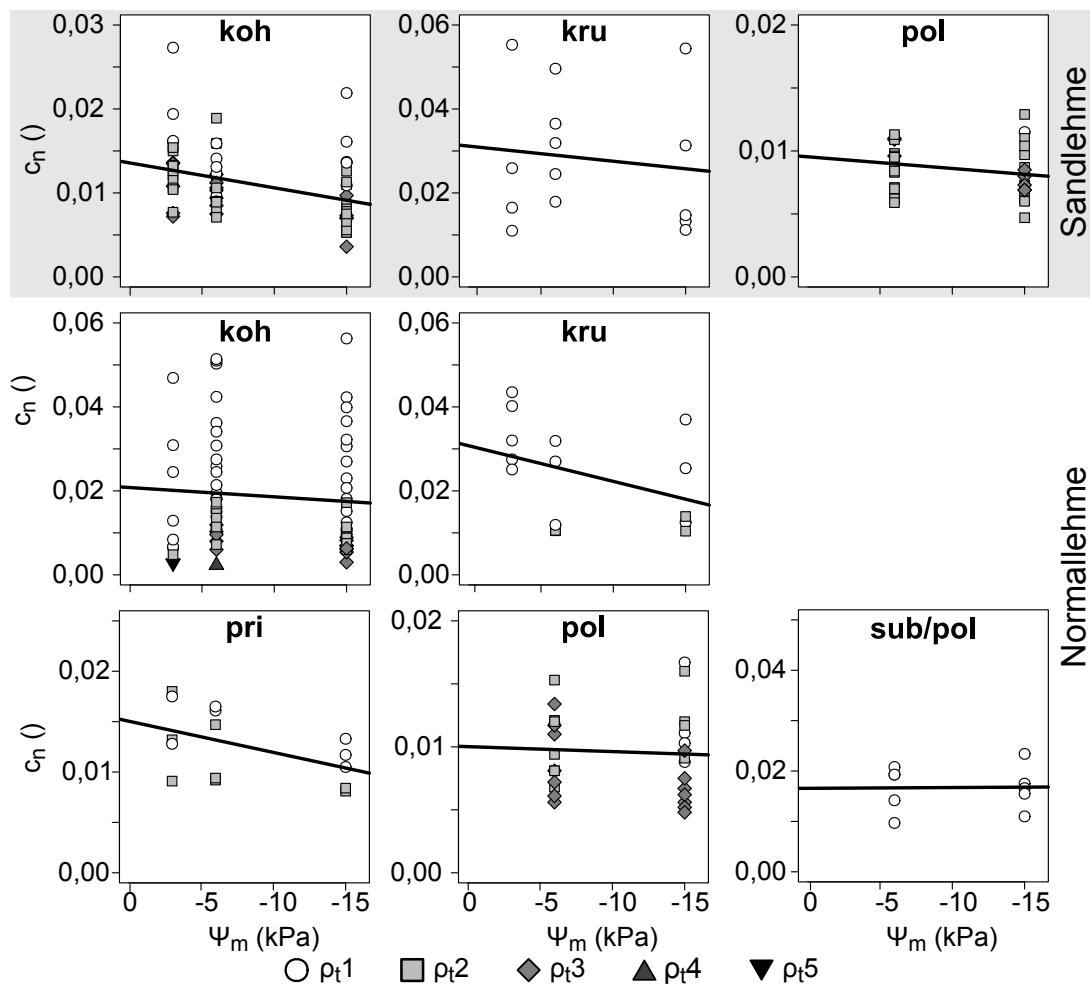


Abbildung 4.30: Mittelwerte der Kompressibilitätsindizes (c_n) für die Bodenarten-Gruppen: Sandlehme und Normallehme bei verschiedenen Matrixpotenzialen (ψ_m : -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa) und den Trockenrohdichteklassen (ρ_{t1} bis ρ_{t5}) nach AD-HOC-AG BODEN (2005). Eine weitere Unterteilung der Daten erfolgte nach den Gefügeformen: koh (Kohärentgefüge), pri (Prismengefüge), kru (Krümelgefüge), sub/pol (Subpolyeder-/ Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge). Die Trendlinien zeigen den Verlauf der Kompressibilitätsindizes mit negativerem Matrixpotenzial.

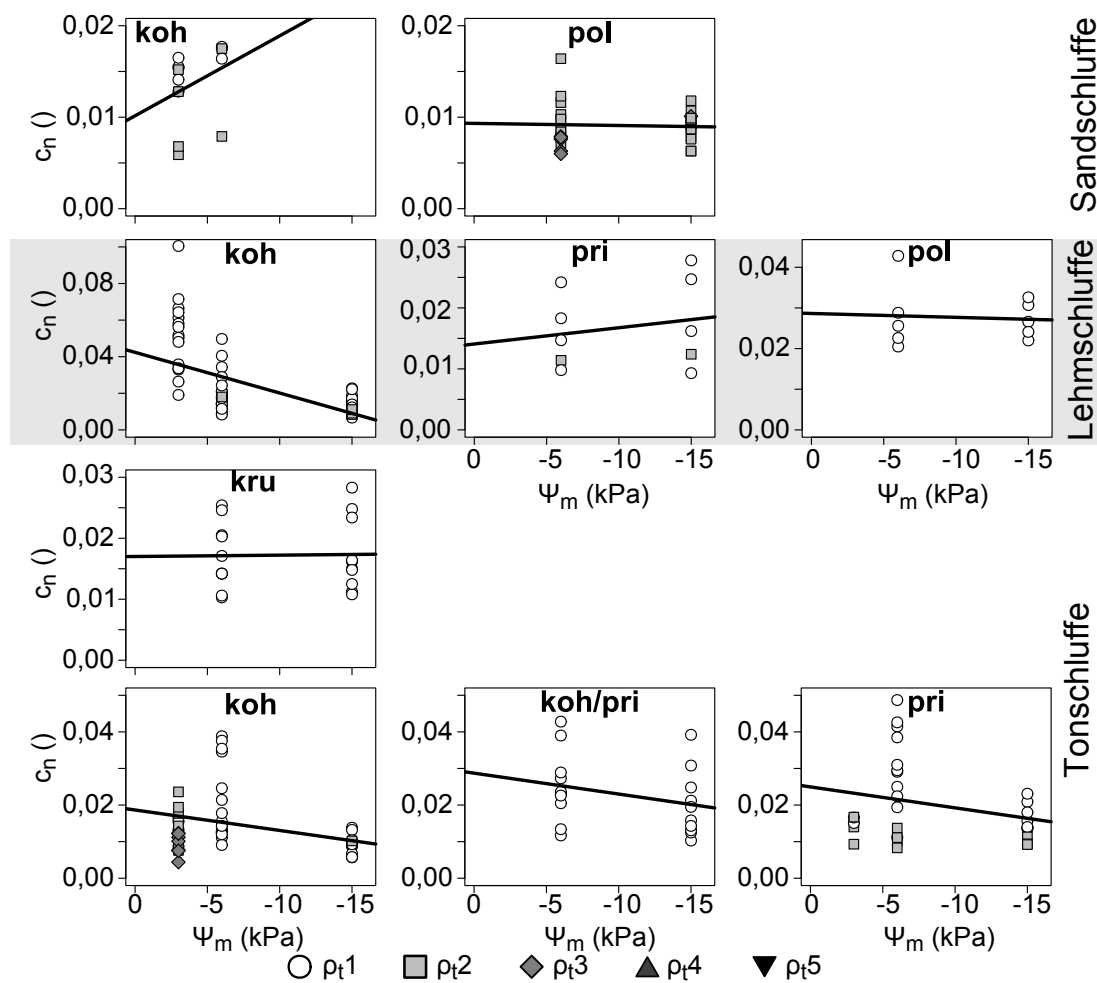


Abbildung 4.31: Mittelwerte der Kompressibilitätsindizes (c_n) für die Bodenarten-Gruppen: Sandschluffe, Lehmschluffe und Tonschluffe bei verschiedenen Matrixpotenzialen (ψ_m : -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa) und den Trockenrohdichteklassen (ρ_{t1} bis ρ_{t5}) nach AD-HOC-AG BODEN (2005). Eine weitere Unterteilung der Daten erfolgte nach den Gefügestrukturen: koh (Kohärentgefüge), koh/pri (Kohärent-/ Prismengefüge), pri (Prismengefüge), kru (Krümelgefüge), pol (Polyedergefüge). Die Trendlinien zeigen den Verlauf der Kompressibilitätsindizes mit negativerem Matrixpotenzial.

In der Bodenarten-Hauptgruppe der Schluffe (Abbildung 4.31) zeigen die Sandschluffe mit Kohärentgefüge, die Lehmschluffe mit Prismengefüge und die Tonschluffe mit Krümelgefüge einen Anstieg des Kompressibilitätsindex mit negativerem Matrixpotenzial.

In der Bodenarten-Hauptgruppe der Tone sinkt mit negativerem Matrixpotenzial der Kompressibilitätsindex unabhängig von der Gefügeform. (Abbildung 4.32).

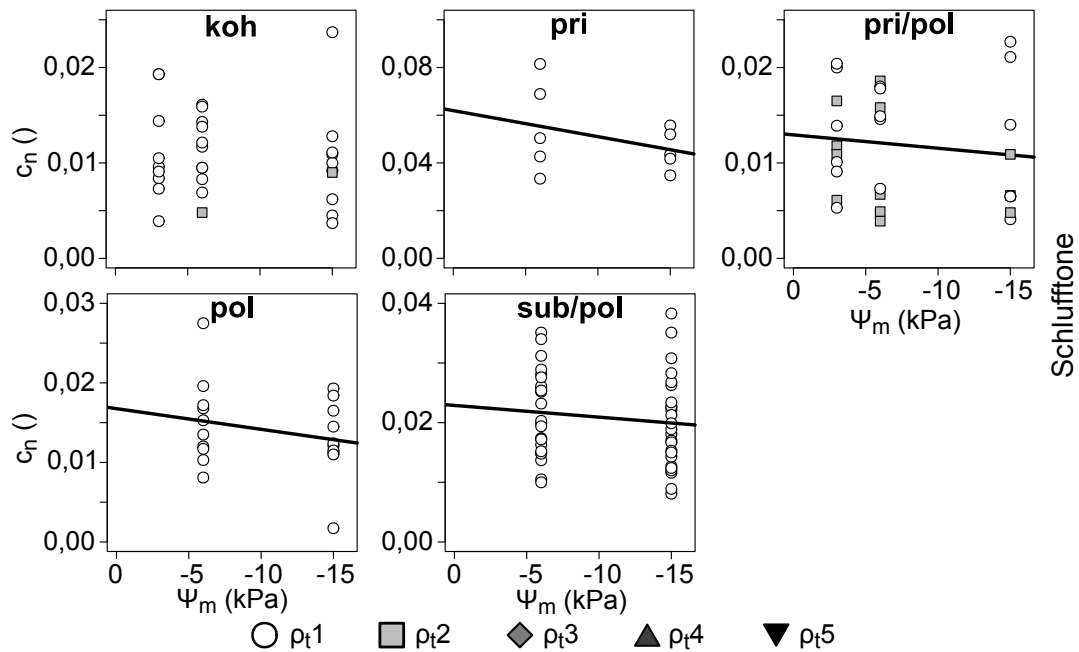


Abbildung 4.32: Mittelwerte der Kompressibilitätsindizes (c_n) für die Bodenarten-Gruppe der Schlufftone bei verschiedenen Matrixpotenzialen (ψ_m : -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa) und den Trockenrohdichteklassen (ρ_t1 bis ρ_t5) nach AD-HOC-AG BODEN (2005). Eine weitere Unterteilung der Daten erfolgte nach den Gefügeformen: koh (Kohärentgefüge), pri (Prismengefüge), sub/pol (Subpolyeder-/ Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge), pri/pol (Prismen-/ Polyedergefüge). Die Trendlinien zeigen den Verlauf der Kompressibilitätsindizes mit negativerem Matrixpotenzial.

4.2.7 Kompressibilitätsindizes für die Standorte in Abhängigkeit Tiefe, Textur und Matrixpotenzial

Die Abbildungen 4.33 bis 4.35 zeigen die Kompressibilitätsindizes für die Standorte Grünland, Röhricht und Watt, aufgeteilt nach den Bodenarten-Hauptgruppen Sande, Lehme, Schluffe, Tone bei Matrixpotenzialen von -3 kPa, -6 kPa und -15 kPa. Die Einstufung der Werte erfolgt nach der Tabelle 4.4.

In den Sanden der Grünlandstandorte (Abbildungen 4.33) sind bei Matrixpotenzialen von -3 kPa und -6 kPa die Kompressibilitätsindizes hoch, bei -15 kPa mittel. In den Lehmen sind die Kompressibilitätsindizes in 70 cm Tiefe, bei einem Matrixpotenzial von -3 kPa sehr hoch. In den weiteren Tiefen und Matrixpotenzialen sind die Kompressibilitätsindizes zwischen gering und hoch. In den Schluffen sind die meisten Werte zwischen gering und hoch. Bei einem Matrixpotenzial von -6 kPa ist ein Anstieg der Kompressibilitätsindizes mit größerer Tiefe zu sehen. Bei den Tonen sind die Werte in 10 cm Tiefe mittel, werden dann in 30 cm Tiefe gering, um im weiteren Tiefen wieder anzusteigen.

An den Röhrichtstandorten sind die Kompressibilitätsindizes in den Sanden bei Matrixpotenzialen von -6 kPa und -15 kPa in 10 cm Tiefe sehr hoch (Abbildung 4.34). Bei den anderen Tiefen und Matrixpotenzialen sind die Kompressibilitätsindizes hoch bis mittel. Bei den Lehmen in 10 cm Tiefe sind die Kompressibilitätsindizes bei allen Matrixpotenzialen sehr hoch. In den Tiefen 30 cm und 50 cm sind die Werte gering bis hoch. Die Einstufung für die Schluffe ist bei den Matrixpotenzialen -6 kPa und -15 kPa mittel bis hoch. Ein negativer Trend mit zunehmender Tiefe ist bei den Tonen zu sehen, insgesamt sind die Werte aber sehr hoch. Nur bei einem Matrixpotenzial von -6 kPa in 50 cm Tiefe und bei -15 kPa in 30 cm und 50 cm Tiefe sind die Werte als hoch einzustufen.

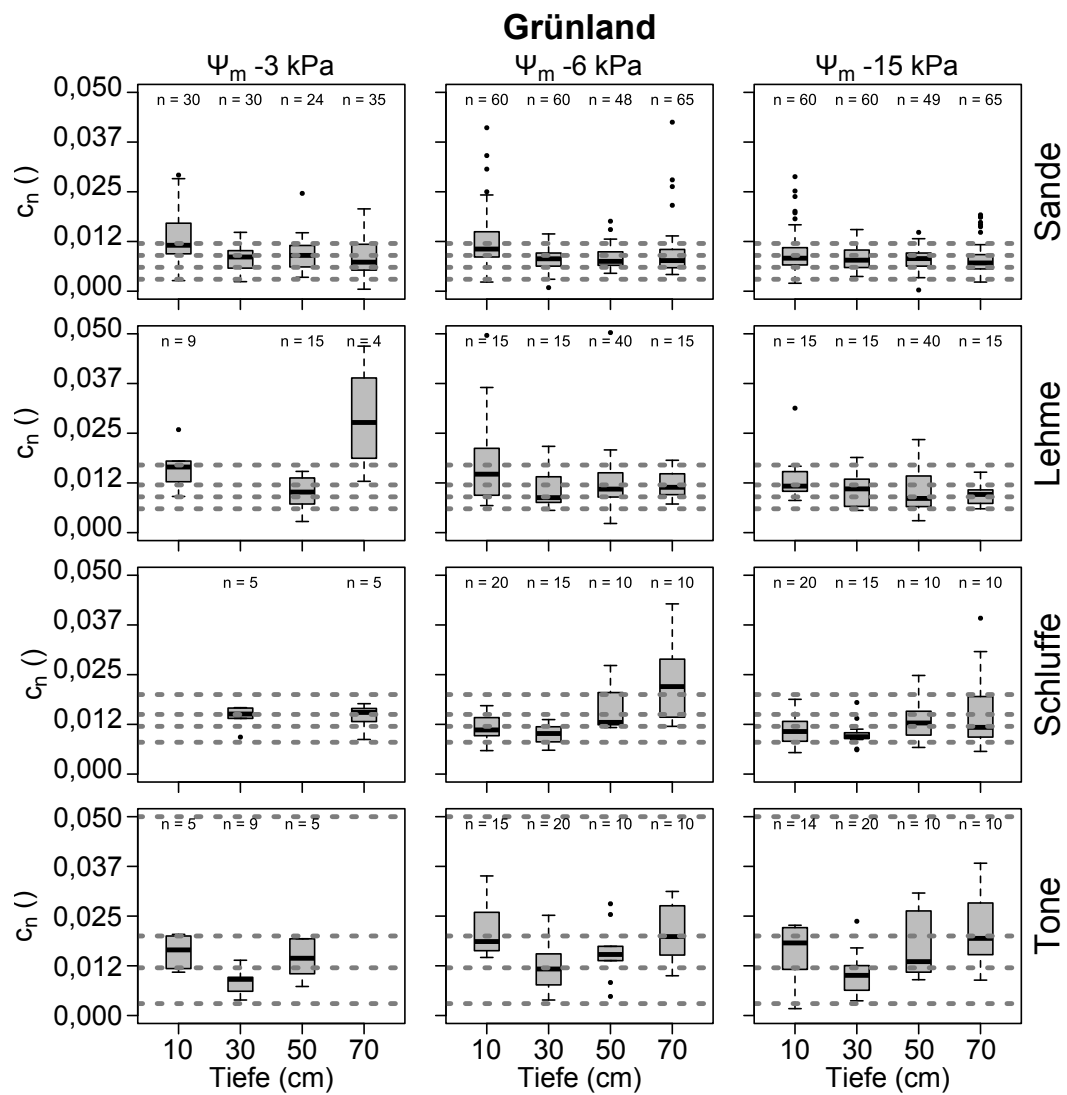


Abbildung 4.33: Boxplots der Kompressibilitätsindizes (c_n) an den Grünlandstandorten. Unterteilt nach den Tiefen 10 cm, 30 cm, 50 cm und 70 cm, den Bodenarten-Hauptgruppen: Sande, Lehme, Schluffe und Tone, den Matrixpotenzialen (ψ_m : -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa) und der Anzahl der Proben (n). Gestrichelte Linien zeigen die Klassengrenzen nach Tabelle 4.4.

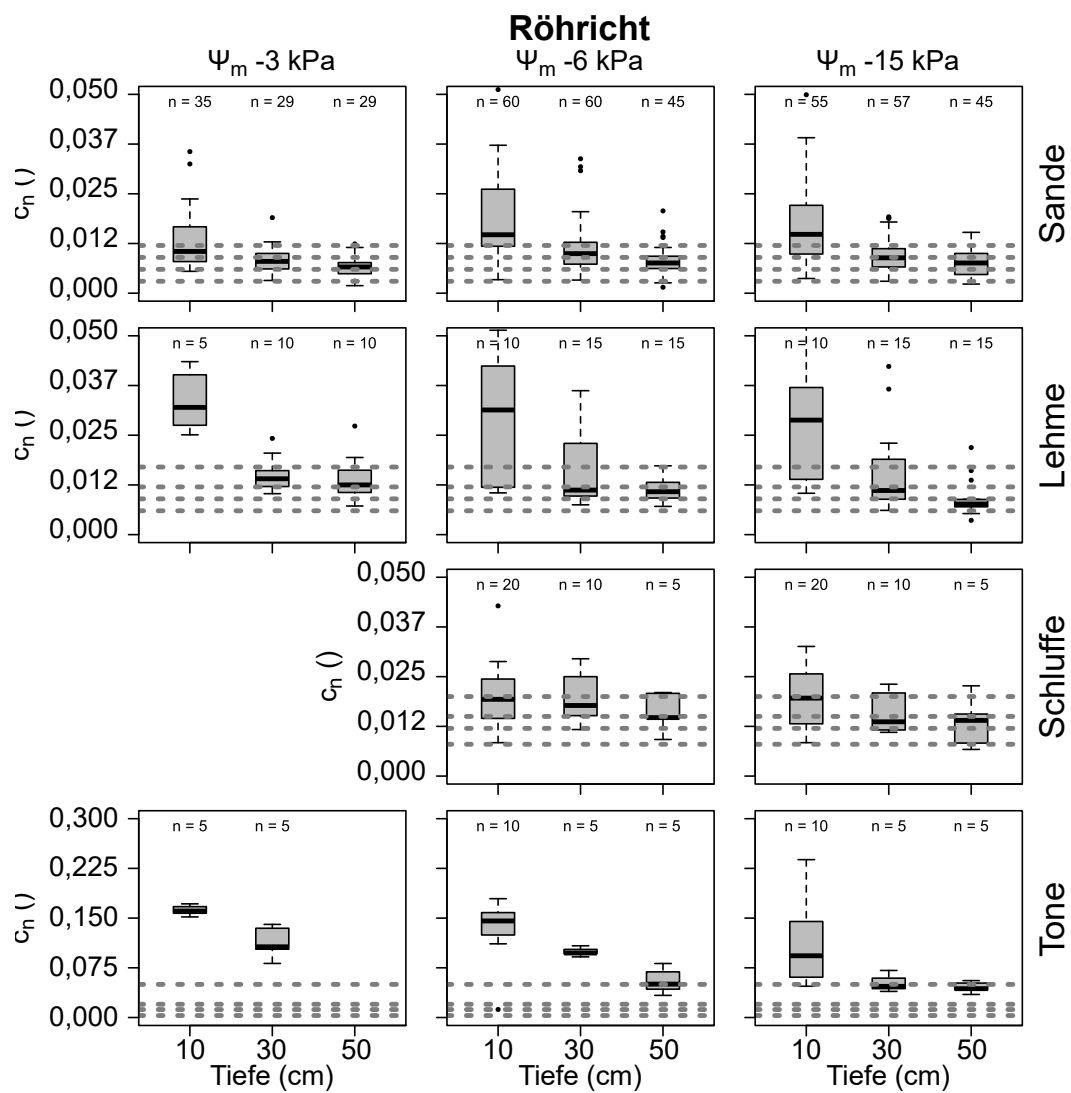


Abbildung 4.34: Boxplots der Kompressibilitätsindizes (c_n) an den Röhrichtstandorten. Unterteilt nach den Tiefen 10 cm, 30 cm und 50 cm, den Bodenarten-Hauptgruppen: Sande, Lehme, Schluffe und Tone, den Matrixpotenzialen (ψ_m : -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa) und der Anzahl der Proben (n). Gestrichelte Linien zeigen die Klassengrenzen nach Tabelle 4.4.

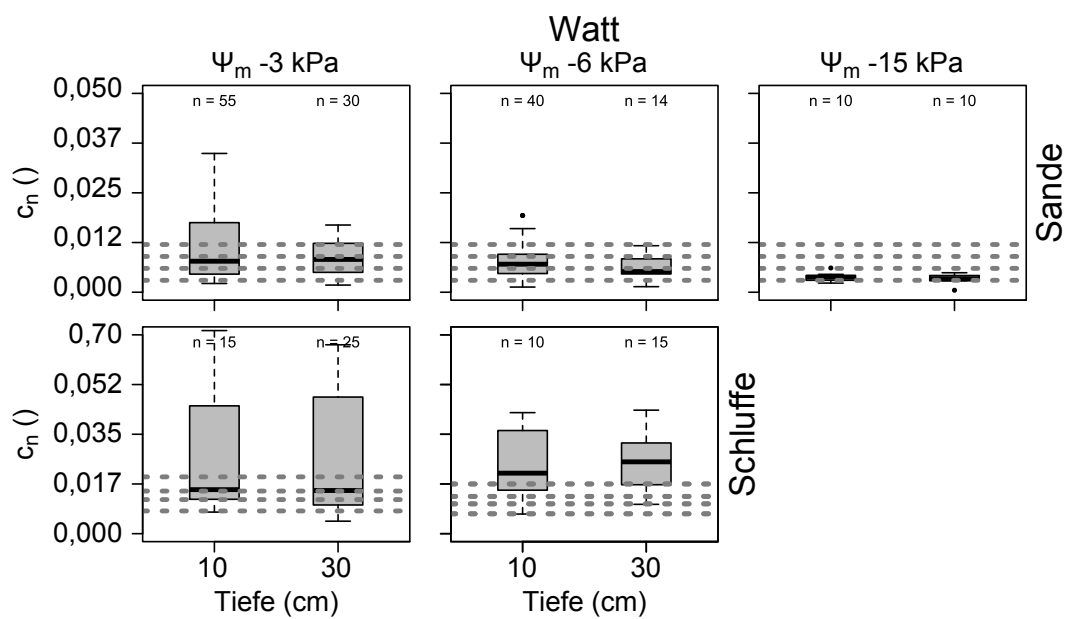


Abbildung 4.35: Boxplots der Kompressibilitätsindizes (c_n) an den Wattstandorten. Unterteilt nach den Tiefen 10 cm und 30 cm, den Bodenarten-Hauptgruppen: Sande und Tone, den Matrixpotenzialen (ψ_m : -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa) und der Anzahl der Proben (n). Gestrichelte Linien zeigen die Klassengrenzen nach Tabelle 4.4.

An den Wattstandorten sind die Kompressibilitätsindizes bei den Matrixpotenzialen -3 kPa und -6 kPa mittel und bei -15 kPa gering. Bei den Schluffen sind die Werte bei einem Matrixpotenzial von -3 kPa hoch und bei -6 kPa sehr hoch Abbildung 4.35.

4.2.8 Luftleitfähigkeit in Abhängigkeit von Entwässerungsgrad, statischer und zyklischer Belastung

Die Abbildungen 4.36 bis 4.42 zeigen für verschiedene Texturen und Gefügeformen die Luftleitfähigkeiten in Abhängigkeit von Entwässerungsgrad, statischer und dynamischer Belastung. Die Einstufung der Luftleitfähigkeit erfolgte nach DVWK (1997).

Der Anstieg der Luftleitfähigkeit mit zunehmender Entwässerung ist in den Sanden unabhängig von der Gefügeform zwischen -3 kPa und -6 kPa am größten. Die Abnahme der Luftleitfähigkeit durch statische Belastung mit 400 kPa ist so groß, dass die Luftleitfähigkeit im Krümel- und Kohärentgefüge um eine Stufe und im Subpolyedergefüge um zwei Stufen geringer wird (Abbildung 4.36). In Horizonten mit Polyeder- und Subpolyeder-/Polyedergefüge nimmt die Luftleitfähigkeit ebenfalls ab, die Einstufung bleibt aber erhalten (Abbildung 4.37). Im Einzelkorngefüge wird die Luftleitfähigkeit durch die Belastung mit 400 kPa nicht beeinflusst. In den auf -6 kPa vorentwässerten Proben ist die Luftleitfähigkeit im Subpolyeder-/Polyedergefüge nach der zyklischen Belastung um eine Stufe geringer. In den auf -15 kPa vorentwässerten Proben mit Subpolyedergefüge ist die Luftleitfähigkeit nach der zyklischen Belastung geringfügig höher, die Einstufung bleibt jedoch erhalten. Bei den anderen Gefügeformen führt die zyklische Belastung nur zu einer geringen Abnahme der Luftleitfähigkeit, so dass die Einstufungen erhalten bleiben.

Der Änderung der Luftleitfähigkeit mit zunehmender Entwässerung verläuft bei den Lehmen unterschiedlich (Abbildung 4.38, 4.39). Das Subpolyeder-/Polyedergefüge hat bei -30 kPa eine geringere Luftleitfähigkeit als bei -15 kPa, um dann bei -50 kPa den maximalen Wert zu erreichen. Insgesamt steigt die Luftleitfähigkeit jedoch mit negativerem Matrixpotenzial. Die statische Belastung mit 400 kPa führt zu einer Abnahme der Luftleitfähigkeit um zwei Stufen im Prismengefüge und um eine Stufe in den anderen Gefügen. Nach der zyklischen Belastung ist im Subpolyeder-/Polyedergefüge bei den auf -15 kPa vorentwässerten Proben und im Prismengefüge bei den auf -6 kPa vorentwässerten Proben die Luftleitfähigkeit um eine Stufe geringer. Bei den anderen Gefügeformen bleiben die Einstufungen erhalten.

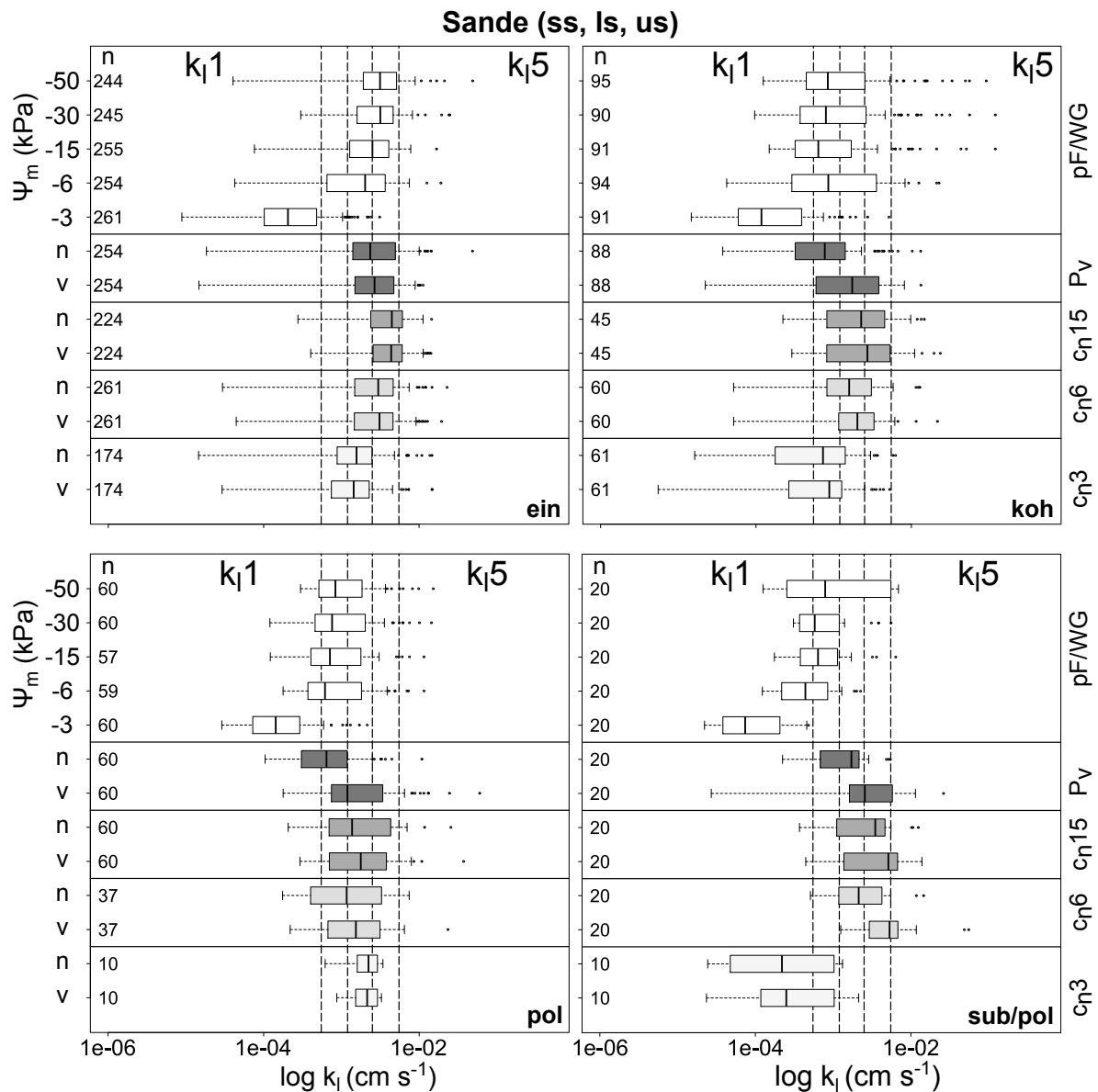


Abbildung 4.36: Boxplots der Luftleitfähigkeit in logarithmischer Darstellung für die Bodenarten-Hauptgruppe der Sande mit den Gefügeformen: ein (Einzelkorngefüge), koh (Kohärentgefüge), kru (Krümelgefüge) und sub (Subpolyederggefüge) bei den Matrixpotenzialen (ψ_m) -3 kPa bis -50 kPa, für die zyklische Belastung bei -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa (c_{n3} , c_{n6} , c_{n15}) vor (v) und nach (n) der Belastung und für die Vorbelastung bei -6 kPa (P_v), jeweils vor (v) und nach (n) der Belastung.

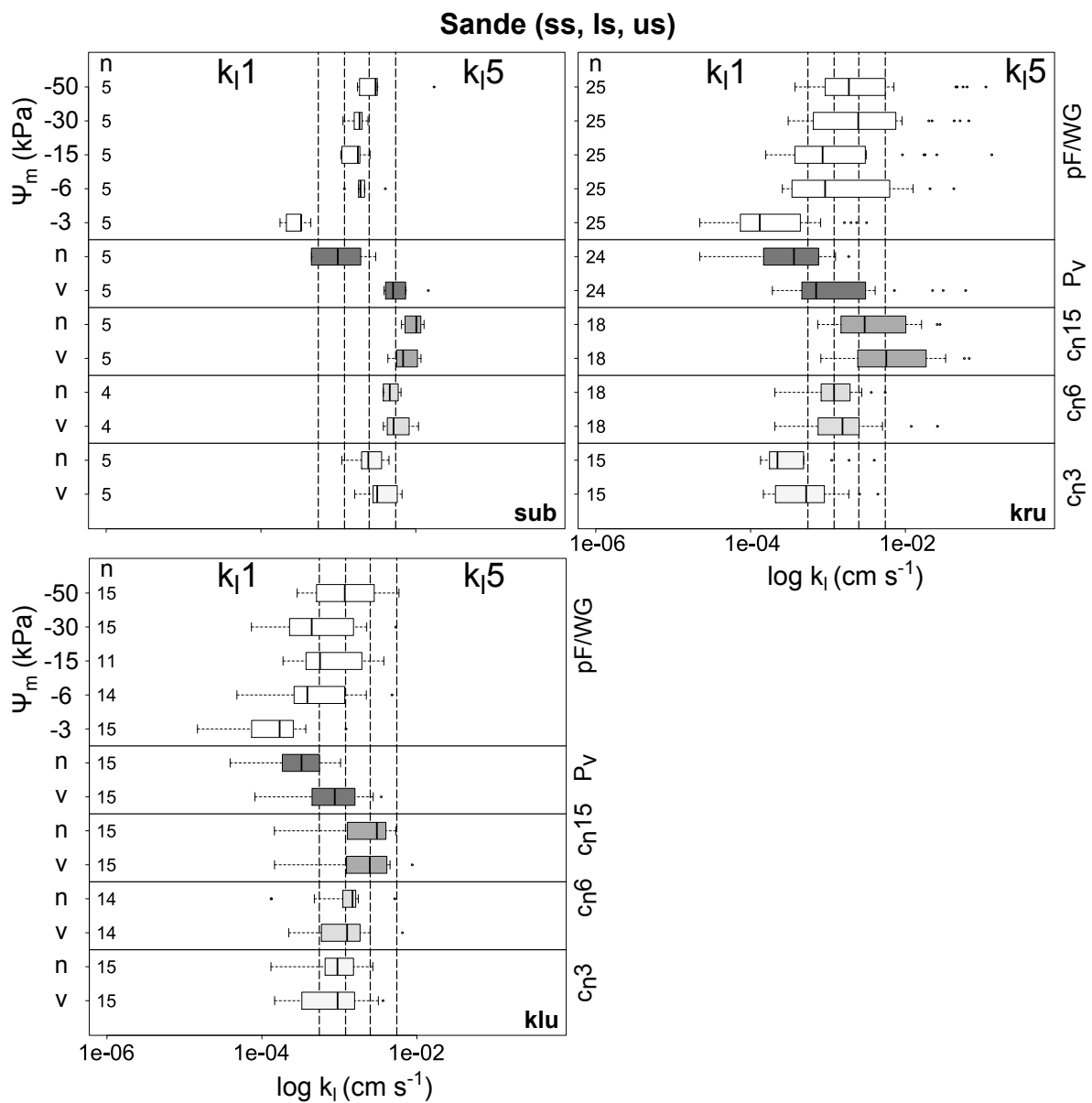


Abbildung 4.37: Boxplots der Luftleitfähigkeit in logarithmischer Darstellung für die Bodenarten-Hauptgruppe der Sande mit den Gefügestrukturen: sub/pol (Subpolyeder- Polyedergefüge), pol (Polyedergefüge), klu (Klumpengefüge) bei den Matrixpotenzialen (ψ_m) -3 kPa bis -50 kPa, für die zyklischen Belastung bei -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa (c_{n3} , c_{n6} , c_{n15}) vor (v) und nach (n) der Belastung und für die Vorbelastung bei -6 kPa (P_v), jeweils vor (v) und nach (n) der Belastung.

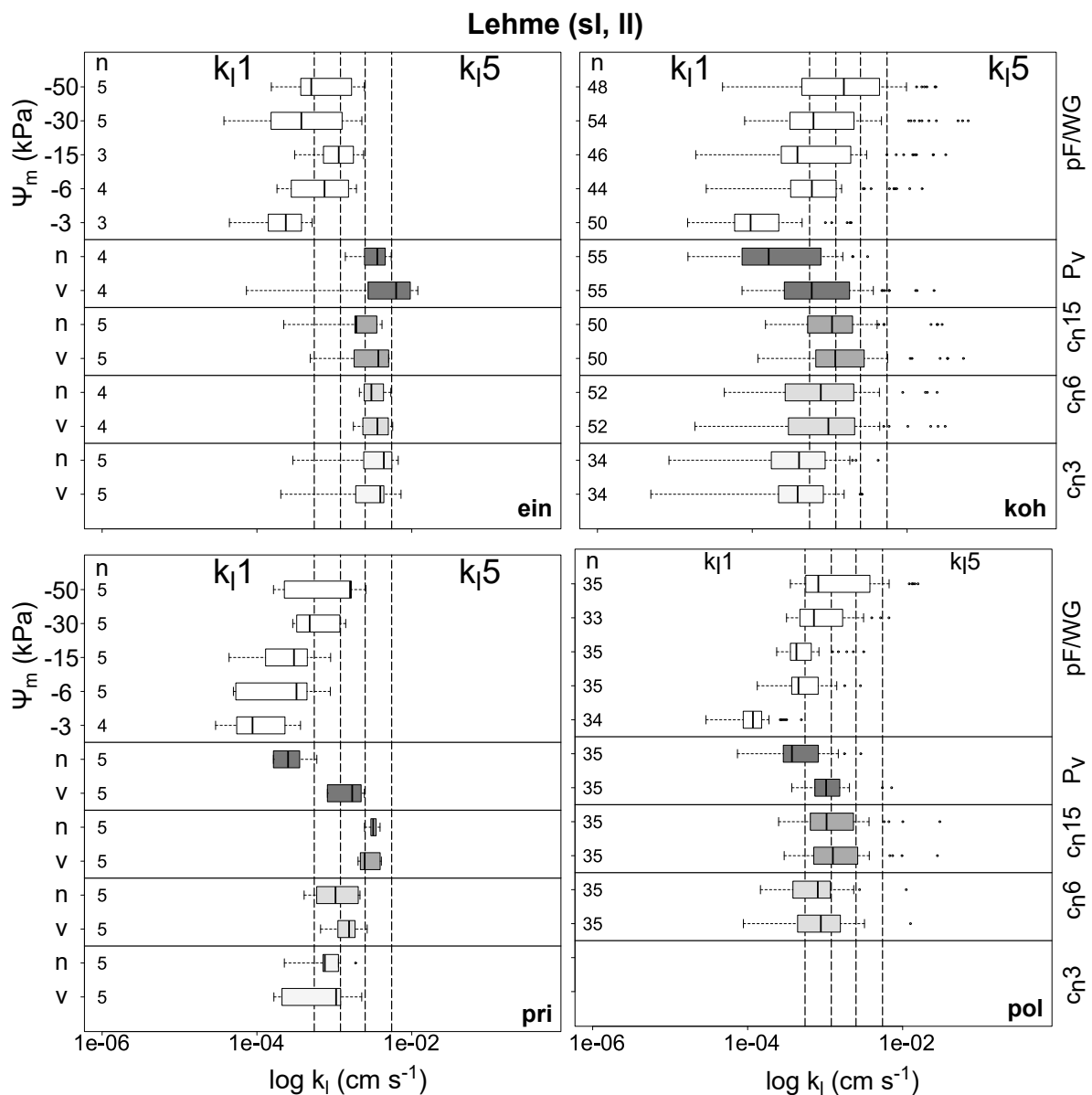


Abbildung 4.38: Boxplots der Luftleitfähigkeit in logarithmischer Darstellung für die Bodenarten-Hauptgruppe der Lehme mit den Gefügestrukturen: ein (Einzelkorn), koh (Kohärenzgefüge), pri (Prismengefüge), kru (Krümelgefüge) bei den Matrixpotenzialen (ψ_m) -3 kPa bis -50 kPa, für die zyklischen Belastung bei -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa (c_{n3} , c_{n6} , c_{n15}) vor (v) und nach (n) der Belastung und für die Vorbelastung bei -6 kPa (P_v), jeweils vor (v) und nach (n) der Belastung.

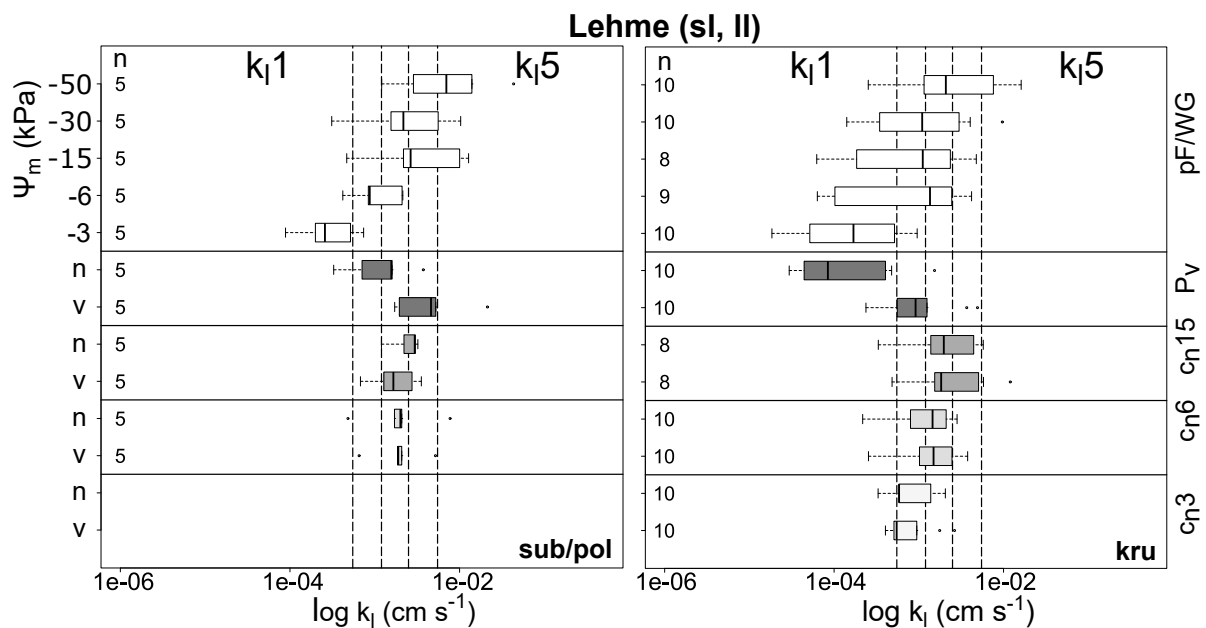


Abbildung 4.39: Boxplots der Luftleitfähigkeit in logarithmischer Darstellung für die Bodenarten-Hauptgruppe der Lehme mit den Gefügeformen: pol (Polyedergefüge), sub/pol (Subpolyeder-/Polyedergefüge) bei den Matrixpotenzialen (ψ_m) -3 kPa bis -50 kPa, für die zyklischen Belastung bei -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa (c_{n3} , c_{n6} , c_{n15}) vor (v) und nach (n) der Belastung und für die Vorbelastung bei -6 kPa (P_v), jeweils vor (v) und nach (n) der Belastung.

Bei den Schluffen ist mit negativer werdendem Matrixpotenzial ein Anstieg der Luftleitfähigkeit bei Kohärent-, Prismen und Krümelgefüge zu sehen (Abbildung 4.40). Im Polyedergefüge bleiben die Werte ab -6 kPa relativ konstant. Nach der Belastung mit 400 kPa nimmt die Luftleitfähigkeit beim Kohärent-, Krümel- und Polyedergefüge um zwei Stufen, im Prismengefüge um drei Stufen ab. Bei auf -6 kPa vorentwässerten Proben mit Kohärentgefüge, sowie bei den auf -6 kPa und -15 kPa vorentwässerten Proben mit Prismengefüge nimmt die Luftleitfähigkeit nach der zyklischen Belastung um eine Stufe ab. In den anderen Gefügeformen bleibt die Einstufung erhalten.

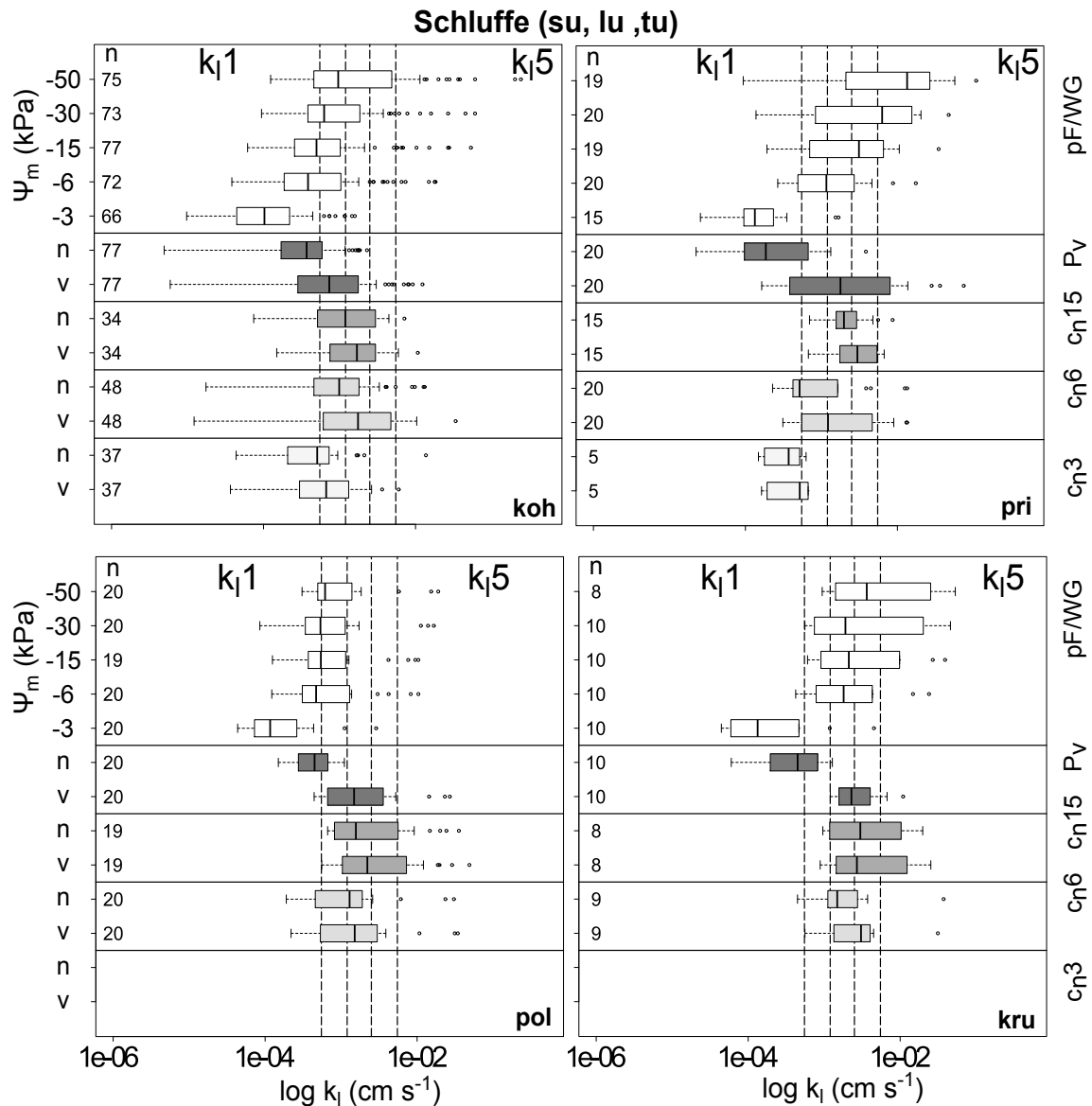


Abbildung 4.40: Boxplots der Luftleitfähigkeit in logarithmischer Darstellung für die Bodenarten-Hauptgruppe der Schluffe mit den Gefügeformen: koh (Kohärentgefüge), kru (Krümelgefüge), pri (Prismengefüge) pol (Polyedergefüge) bei den Matrixpotenzialen (ψ_m) -3 kPa bis -50 kPa, für die zyklischen Belastung bei -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa (c_{n3} , c_{n6} , c_{n15}) vor (v) und nach (n) der Belastung und für die Vorbelastung bei -6 kPa (P_v), jeweils vor (v) und nach (n) der Belastung.

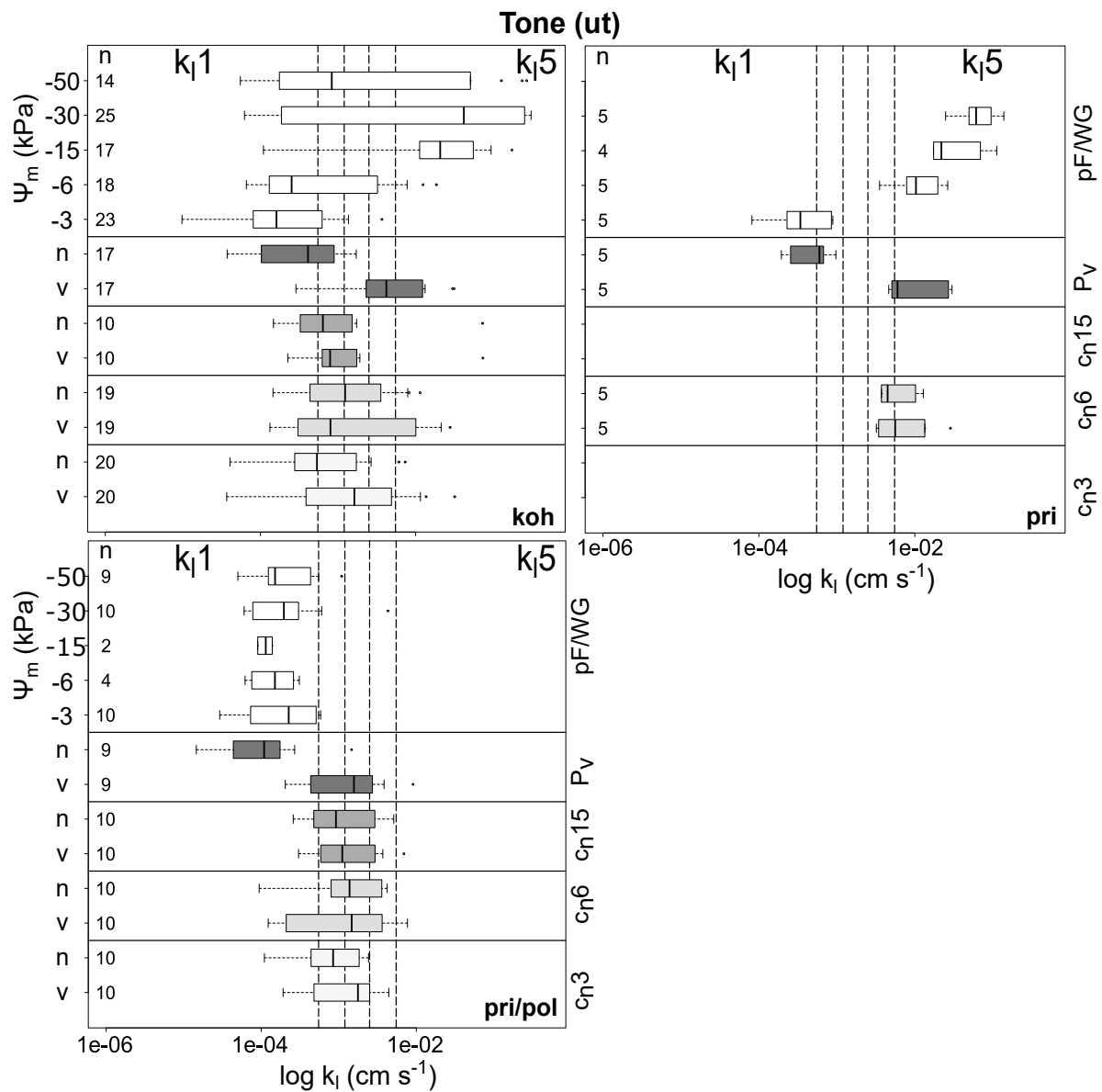


Abbildung 4.41: Boxplots der Luftleitfähigkeit in logarithmischer Darstellung für die Bodenarten-Hauptgruppe der Tone mit den Gefügeformen: koh (Kohärentgefüge), sub/pol (Subpolyeder-/Polyederggefüge), pol (Polyederggefüge) bei den Matrixpotenzialen (ψ_m) -3 kPa bis -50 kPa, für die zyklischen Belastung bei -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa (c_{n3} , c_{n6} , c_{n15}) vor (v) und nach (n) der Belastung und für die Vorbelastung bei -6 kPa (P_v), jeweils vor (v) und nach (n) der Belastung.

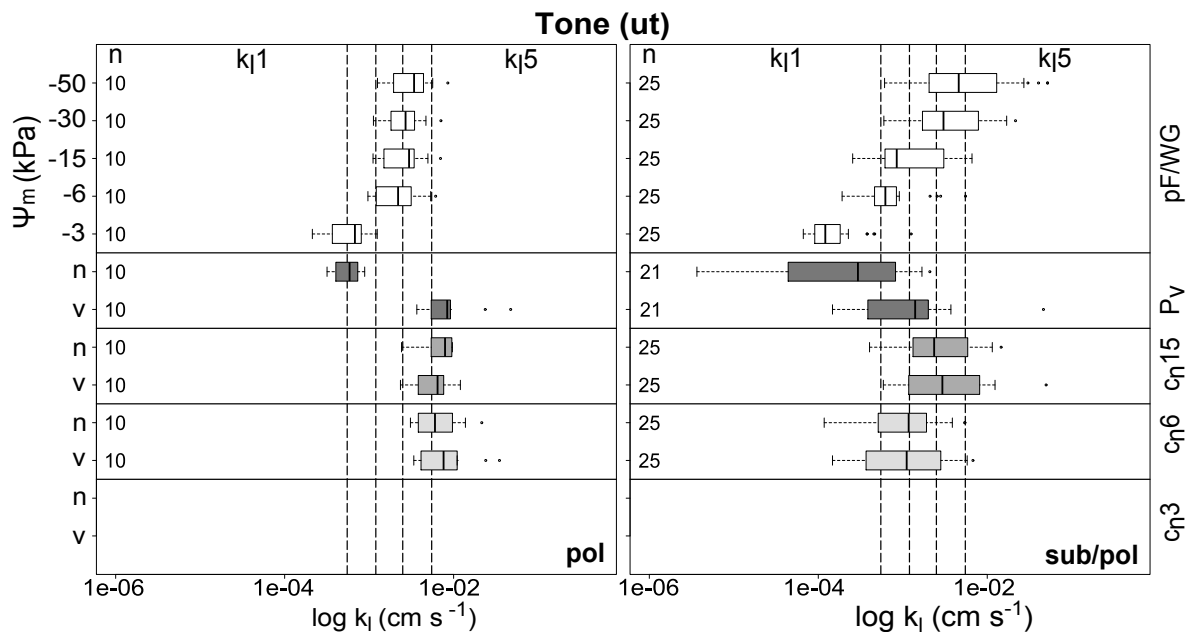


Abbildung 4.42: Boxplots der Luftleitfähigkeit in logarithmischer Darstellung für die Bodenarten-Hauptgruppe der Tone mit den Gefügeformen: pri (Prismengefüge), pri/pol (Prismen-/Polyedergefüge) bei den Matrixpotenzialen (ψ_m) -3 kPa bis -50 kPa, für die zyklische Belastung bei -3 kPa, -6 kPa, -15 kPa (c_{n3} , c_{n6} , c_{n15}) vor (v) und nach (n) der Belastung und für die Vorbelastung bei -6 kPa (P_v), jeweils vor (v) und nach (n) der Belastung.

Bei den Tönen steigt die Luftleitfähigkeit mit zunehmender Entwässerung an (Abbildung 4.41, 4.42) wobei dieser Anstieg im Prismen-/Polyedergefüge insgesamt sehr gering ist. Im Polyedergefüge bleibt die Luftleitfähigkeit ab -6 kPa relativ konstant. Nach der Belastung mit 400 kPa nimmt die Luftleitfähigkeit im Polyeder-, Kohärent- und Prismengefüge um drei Stufen und in den anderen Gefügen um zwei Stufen ab. Nach der zyklischen Belastung nimmt die Luftleitfähigkeit bei auf -3 kPa vorentwässerten Proben mit Kohärentgefüge um zwei und im Prismen-/Polyedergefüge um eine Stufe ab. Bei den auf -6 kPa vorentwässerten Proben mit Kohärentgefüge erhöht sich die Luftleitfähigkeit um eine Stufe. Bei den anderen Gefügeformen bleiben die Einstufungen nach der zyklischen Belastung erhalten.

4.3 Pedotransferfunktionen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex (c_n) über bodenphysikalische Parameter

Die Pedotransferfunktionen wurden für die Bodenarten-Hauptgruppen Sande, Lehme, Schluffe und Tone und die Matrixpotenziale -3 kPa (c_{n3}), -6 kPa (c_{n6}) und -15 kPa (c_{n15}) jeweils einzeln erstellt. Die Bodenarten-Hauptgruppe der Sande wurde nochmals unterteilt in die Bodenarten-Gruppe der Reinsande (ss), der Lehmsande (ls) und Schluffe (us). Diese Unterteilung der Pedotransferfunktion nach den Bodenarten-Hauptgruppen bzw. Bodenarten-Gruppen war notwendig, da bei gleicher Trockenrohdichte in Abhängigkeit von der Textur sehr unterschiedliche Kompressibilitätsindizes auftreten. Bei der Anpassung der Funktionen wurden in allen Funktionen anfangs mit den gleichen Parametern gerechnet. Zur besseren Anpassung der Funktionen wurden aber im Verlauf der Analyse Parameter heraus genommen. Dabei bedeutet ein positives Vorzeichen in den Funktionen, dass sich der Kompressibilitätsindex mit Erhöhung dieses Parameters ebenfalls erhöht und entsprechend eine geringere Stabilität gegenüber zyklischer Belastung besteht.

4.3.1 Klassifizierung des Kompressibilitätsindex (c_n) in Abhängigkeit von der Textur

In dieser Arbeit erfolgt erstmalig eine Klassifizierung des Kompressibilitätsindex. Da der Kompressibilitätsindex von der Textur abhängig ist, wurden die Einstufungen und die Klassengrenzen für die Bodenarten-Hauptgruppen unterschiedlich gewählt. Abbildung 4.43 zeigt den minimalen, 1. Quartil, Median, 3. Quartil und den maximalen Kompressibilitätsindex für die Bodenarten-Hauptgruppe der Sande, Lehme, Schluffe und Tone. Die daraus resultierende Einstufung ist der Tabelle 4.4 zu entnehmen.

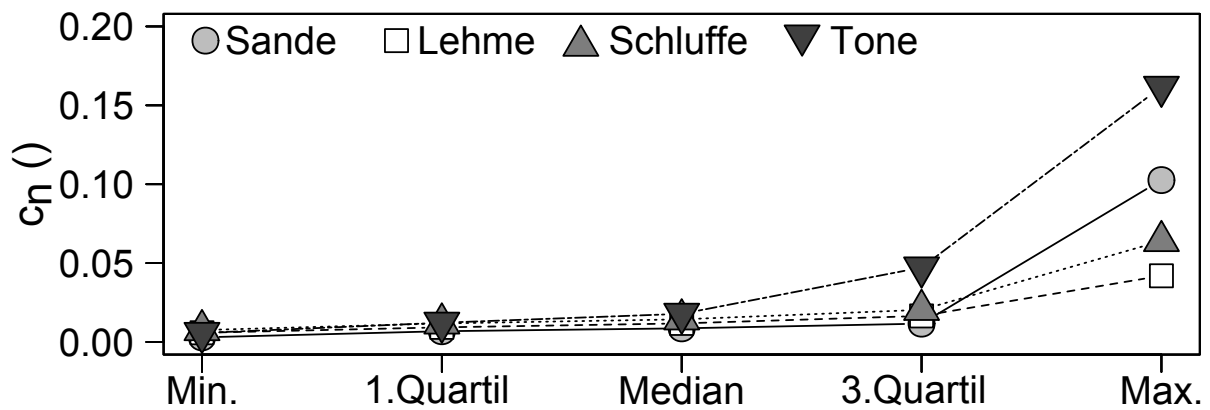


Abbildung 4.43: Wertebereich des Kompressibilitätsindex (c_n) für die verschiedenen Texturen, Minimalwert, 1. Quartil, Median, 3. Quartil und Maximalwert.

Tabelle 4.4: Einstufungen des Kompressibilitätsindex in Abhängigkeit der Textur.

	Sande	Lehme	Schluffe	Tone
sehr hoch	> 0,012	> 0,017	> 0,02	> 0,05
hoch	0,009 bis < 0,012	0,012 bis < 0,017	0,015 bis < 0,02	0,02 bis < 0,05
mittel	0,006 bis < 0,009	0,009 bis < 0,012	0,012 bis < 0,015	0,012 bis < 0,02
gering	0,003 bis < 0,006	0,006 bis < 0,009	0,008 bis < 0,012	0,003 bis < 0,012
sehr gering	< 0,003	< 0,006	< 0,008	< 0,003

4.3.2 Pedotransferfunktionen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex für Sande (ss)

Tabelle 4.5 zeigt die Pedotransferfunktionen und Bestimmtheitsmaße der Reinsande für die drei Matrixpotenziale -3 kPa, -6 kPa und -15 kPa. In allen drei Pedotransferfunktionen für Sande kommen die gleichen Parameter zur Anwendung, die Steigungen und den Vorzeichen der einzelnen Parameter sind jedoch unterschiedlich. Die Unterschiede der Vorzeichen zwischen den Pedotransferfunktionen sind bei c_{n3} ein positives Vorzeichen beim Humusgehalt, bei c_{n6} erhält die Tiefe ein negatives Vorzeichen und bei c_{n15} erhalten Kohäsion und Winkel der inneren Reibung ein negatives Vorzeichen. Trotz der Unterschiede bei den Vorzeichen wird die Anpassung der Funktionen mit steigender Probenanzahl besser. Die Abbildung 4.44 zeigt eine Gegenüberstellung der mittels der Pedotransferfunktion berechneten Kompressibilitätsindizes und der gemessenen Kompressibilitätsindizes. Die lineare Funktionsgleichung für diese Gegenüberstellung zeigt insgesamt eine Unterschätzung der berechneten Kompressibilitätsindizes durch die Pedotransferfunktion. Diese Unterschätzung ist bei c_{n3} am höchsten und bei c_{n6} am geringsten.

Tabelle 4.5: Pedotransferfunktionen des Kompressibilitätsindex für Sande (ss). Bei den Matrixpotenzialen -3 kPa (c_{n3}), -6 kPa (c_{n6}) und -15 kPa (c_{n15}), mit dem Bestimmtheitsmaß (R^2), dem Root-Mean-Square-Error (RMSE) und der Anzahl der Daten (n). Einheiten der Parameter: Tiefe (cm), P_v bei ψ -6 kPa (kPa), ρ_t ($g\ cm^{-3}$), c bei ψ -6 kPa (kPa), φ bei ψ -6 kPa ($^\circ$), Humus ($g\ 100\ g^{-1}$), α und n ().

	Funktion	R^2	RMSE	n
c_{n3}	$= 2,75 \cdot 10^{-2} + 5,29 \cdot 10^{-6} \cdot Tiefe - 1,02 \cdot 10^{-4} \cdot P_v - 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot \rho_t + 9,35 \cdot 10^{-5} \cdot c + 1,89 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi + 2,10 \cdot 10^{-3} \cdot Humus + 7,59 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha + 5,62 \cdot 10^{-4} \cdot n$	0,50	0,0027	36
c_{n6}	$= 4,96 \cdot 10^{-2} - 2,62 \cdot 10^{-5} \cdot Tiefe - 4,24 \cdot 10^{-5} \cdot P_v - 3,47 \cdot 10^{-2} \cdot \rho_t + 1,81 \cdot 10^{-4} \cdot c + 2,98 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi - 3,54 \cdot 10^{-4} \cdot Humus + 2,71 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha + 2,10 \cdot 10^{-4} \cdot n$	0,79	0,0027	54
c_{n15}	$= 5,57 \cdot 10^{-2} + 3,40 \cdot 10^{-5} \cdot Tiefe - 2,99 \cdot 10^{-5} \cdot P_v - 2,71 \cdot 10^{-2} \cdot \rho_t - 1,13 \cdot 10^{-5} \cdot c - 2,28 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi - 1,27 \cdot 10^{-4} \cdot Humus + 8,25 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha + 1,80 \cdot 10^{-4} \cdot n$	0,70	0,0021	49

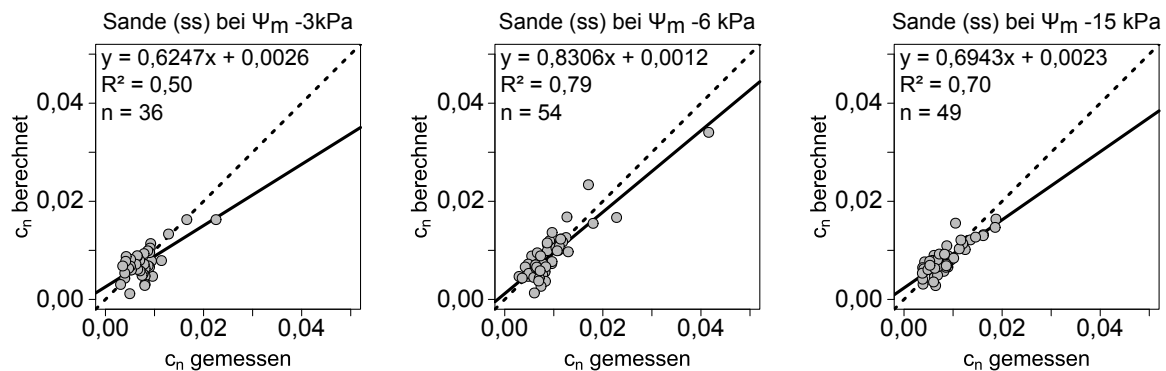


Abbildung 4.44: Beziehung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Kompressibilitätsindex (c_n) für Sande (ss) bei einem Matrixpotenzial von -3 kPa (links), -6 kPa (Mitte) und -15 kPa (rechts). Die gestrichelte Linie zeigt die 1:1 Linie, die durchgezogene Linie zeigt die Trendlinie der Pedotransferfunktion. Im Diagramm wird außerdem die lineare Funktionsgleichung für die Trendlinie, das Bestimmtheitsmaß (R^2) und die Anzahl der Proben (n) gezeigt.

4.3.3 Pedotransferfunktionen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex für Sande (Lehmsande (ls) und Schluffe (us))

Die Pedotransferfunktionen für Sande (Lehmsande (ls) und Schluffe (us)) sind der Tabelle 4.6 zu entnehmen. Bei c_{n3} und c_{n6} gehen die gleichen Parameter ein. Bei c_{n15} gehen die Parameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung nicht in die Funktion ein, da hiermit eine bessere Modellgüte erreicht wird. Im Vergleich zur Pedotransferfunktion c_{n6} , sind die Vorzeichen beim Humusgehalt und den van Genuchten Parametern unterschiedlich und bei c_{n15} die Tiefe. Das Modell mit der geringsten Datengrundlage (c_{n3}) hat die beste Anpassung. Das Modell c_{n6} hat das geringste Bestimmtheitsmaß und unterschätzt den Kompressibilitätsindex am stärksten (Abbildung 4.45).

Tabelle 4.6: Pedotransferfunktionen des Kompressibilitätsindexes für Sande (Lehmsande (ls) und Schluffsand (us)). Bei den Matrixpotenzialen -3 kPa (c_{n3}), -6 kPa (c_{n6}) und -15 kPa (c_{n15}), mit dem Bestimmtheitsmaß (R^2), dem Root-Mean-Square-Error (RMSE) und der Anzahl der Daten (n). Einheiten der Parameter: Tiefe (cm), P_v bei ψ -6 kPa (kPa), ρ_t (g cm^{-3}), c bei ψ -6 kPa (kPa), φ bei ψ -6 kPa ($^\circ$), Humus ($\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$), α und n ().

	Funktion	R^2	RMSE	n
c_{n3}	$= 6,60 \cdot 10^{-2} - 1,65 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Tiefe} - 1,89 \cdot 10^{-4} \cdot P_v - 4,27 \cdot 10^{-2} \cdot \rho_t + 3,65 \cdot 10^{-4} \cdot c + 2,99 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi - 1,01 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Humus} - 2,85 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha - 6,88 \cdot 10^{-4} \cdot n$	0,74	0,0039	23
c_{n6}	$= 3,34 \cdot 10^{-2} - 3,19 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Tiefe} - 7,58 \cdot 10^{-5} \cdot P_v - 2,28 \cdot 10^{-2} \cdot \rho_t - 3,42 \cdot 10^{-5} \cdot c + 2,23 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi + 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Humus} + 8,59 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha + 1,06 \cdot 10^{-3} \cdot n$	0,73	0,0030	35
c_{n15}	$= 6,48 \cdot 10^{-2} + 2,46 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Tiefe} - 1,84 \cdot 10^{-4} \cdot P_v - 3,50 \cdot 10^{-2} \cdot \rho_t + 2,65 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Humus}$	0,62	0,0100	33

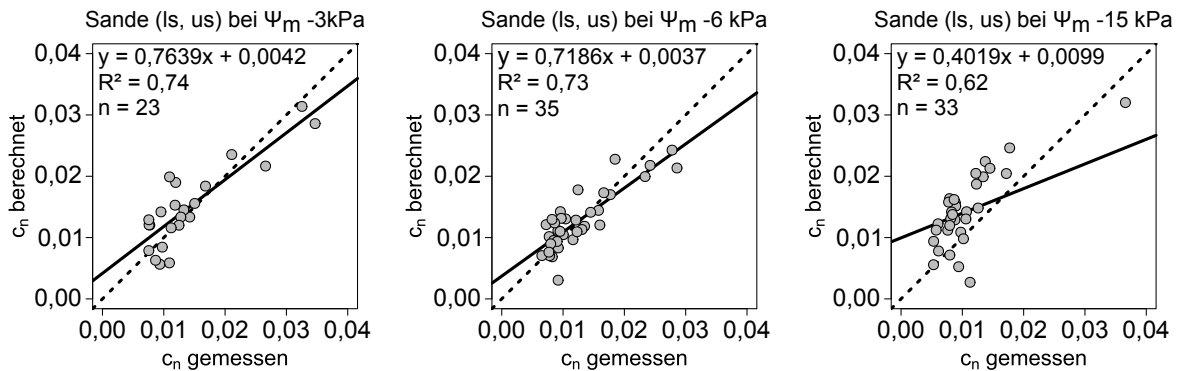


Abbildung 4.45: Beziehung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Kompressibilitätsindex (c_n) für Sande (ls, us) bei einem Matrixpotenzial von -3 kPa (links), -6 kPa (Mitte) und -15 kPa (rechts). Die gestrichelte Linie zeigt die 1:1 Linie, die durchgezogene Linie zeigt die Trendlinie der Pedotransferfunktion. Im Diagramm wird außerdem die lineare Funktionsgleichung für die Trendlinie, das Bestimmtheitsmaß (R^2) und die Anzahl der Proben (n) gezeigt.

4.3.4 Pedotransferfunktionen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex für Lehme (sl, ll)

Tabelle 4.7 zeigt die Pedotransferfunktion für die Lehme (sl, ll). In die Pedotransferfunktion c_{n3} gehen die Scherwiderstandskennwerte und die van Genuchten Parameter nicht mit ein. Im Vergleich zu den anderen Pedotransferfunktionen der Lehme, ist bei c_{n15} , das Vorzeichen bei der Tiefe negativ. Das Bestimmtheitsmaß bei c_{n3} ist fast identisch mit dem der Pedotransferfunktion bei c_{n15} , trotz eines kleineren Probenumfangs. Die lineare Funktionsgleichung zeigt aber, dass die Unterschätzung des Kompressibilitätsindex bei c_{n15} und auch bei c_{n6} geringer ist als bei c_{n3} (Abbildung 4.46).

Tabelle 4.7: Pedotransferfunktionen des Kompressibilitätsindex für Lehme (sl, ll). Bei den Matrixpotenzialen -3 kPa (c_{n3}), -6 kPa (c_{n6}) und -15 kPa (c_{n15}), mit dem Bestimmtheitsmaß (R^2), dem Root-Mean-Square-Error (RMSE) und der Anzahl der Daten (n). Einheiten der Parameter: Tiefe (cm), P_v bei ψ -6 kPa (kPa), ρ_t ($g\ cm^{-3}$), c bei ψ -6 kPa (kPa), φ bei ψ -6 kPa ($^\circ$), Humus ($g\ 100\ g^{-1}$), α und n ($^\circ$).

	Funktion	R^2	RMSE	n
c_{n3}	$= 7,16 \cdot 10^{-2} + 3,54 \cdot 10^{-5} \cdot Tiefe - 3,49 \cdot 10^{-4} \cdot P_v - 3,33 \cdot 10^{-2} \cdot \rho_t - 3,70 \cdot 10^{-4} \cdot Humus$	0,89	0,0033	11
c_{n6}	$= 5,91 \cdot 10^{-2} - 9,86 \cdot 10^{-6} \cdot Tiefe - 2,56 \cdot 10^{-4} \cdot P_v - 3,54 \cdot 10^{-2} \cdot \rho_t + 5,96 \cdot 10^{-5} \cdot c + 2,38 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi - 2,90 \cdot 10^{-4} \cdot Humus + 5,24 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha - 9,28 \cdot 10^{-7} \cdot n$	0,83	0,0033	25
c_{n15}	$= 4,70 \cdot 10^{-2} - 5,09 \cdot 10^{-5} \cdot Tiefe - 2,22 \cdot 10^{-4} \cdot P_v - 3,31 \cdot 10^{-2} \cdot \rho_t + 1,17 \cdot 10^{-4} \cdot c + 4,09 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi - 2,88 \cdot 10^{-4} \cdot Humus + 5,17 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha + 5,86 \cdot 10^{-4} \cdot n$	0,90	0,0023	25

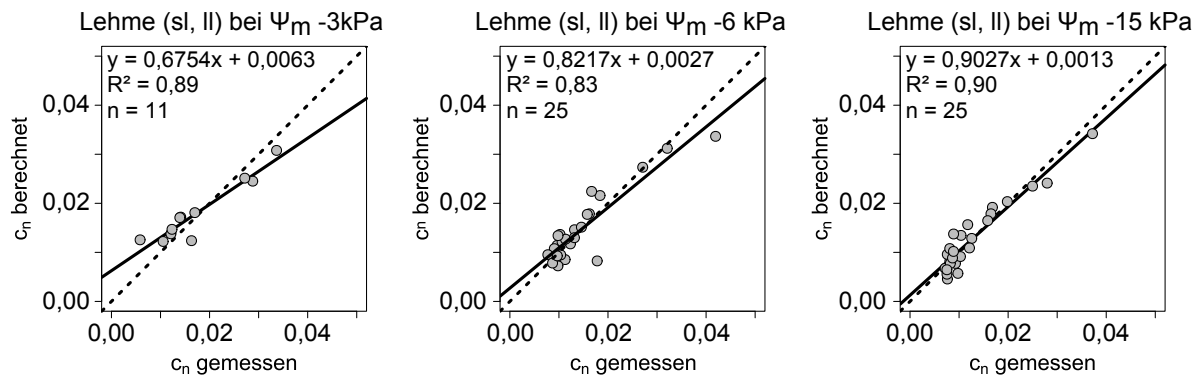


Abbildung 4.46: Beziehung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Kompressibilitätsindex (c_n) für Lehme (sl, ll) bei einem Matrixpotenzial von -3 kPa (links), -6 kPa (Mitte) und -15 kPa (rechts). Die gestrichelte Linie zeigt die 1:1 Linie, die durchgezogene Linie zeigt die Trendlinie der Pedotransferfunktion. Im Diagramm wird außerdem die lineare Funktionsgleichung für die Trendlinie, das Bestimmtheitsmaß (R^2) und die Anzahl der Proben (n) gezeigt.

4.3.5 Pedotransferfunktionen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex für Schluffe (su, lu, tu)

Tabelle 4.8 zeigt die Pedotransferfunktionen des Kompressibilitätsindex für Schluffe (su, lu, tu). Bei der Funktion c_{n3} finden die Parameter Humusgehalt, Scherwiderstandskennwerte und van Genuchten Parameter keine Anwendung. Die Vorzeichen der Parameter unterscheiden sich nur bei dem van Genuchten Parameter n zwischen c_{n6} und c_{n15} . Das Bestimmtheitsmaß ist bei allen Funktionen über 0,88. Bei der Funktion c_{n3} wird der Kompressibilitätsindex nach den linearen Funktionsgleichung leicht überschätzt und bei c_{n6} und c_{n15} wird der Kompressibilitätsindex leicht unterschätzt (Abbildung 4.47).

Tabelle 4.8: Pedotransferfunktionen des Kompressibilitätsindex für Schluffe (su, lu, tu). Bei den Matrixpotenzialen -3 kPa (c_{n3}), -6 kPa (c_{n6}) und -15 kPa (c_{n15}), mit dem Bestimmtheitsmaß (R^2), dem Root-Mean-Square-Error (RMSE) und der Anzahl der Daten (n). Einheiten der Parameter: Tiefe (cm), P_v bei ψ -6 kPa (kPa), ρ_t (g cm^{-3}), c bei ψ -6 kPa (kPa), φ bei ψ -6 kPa ($^\circ$), Humus ($\text{g } 100 \text{ g}^{-1}$), α und n ($^\circ$).

	Funktion	R^2	RMSE	n
c_{n3}	$= 1,57 \cdot 10^{-1} + 5,7 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Tiefe} - 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot P_v - 9,11 \cdot 10^{-2} \rho_t$	0,98	0,0030	10
c_{n6}	$= 1,03 \cdot 10^{-1} + 1,95 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Tiefe} - 7,26 \cdot 10^{-4} \cdot P_v - 3,63 \cdot 10^{-2} \cdot \rho_t - 2,94 \cdot 10^{-4} \cdot c - 5,53 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi - 3,96 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Humus} + 1,91 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha + 4,09 \cdot 10^{-4} \cdot n$	0,89	0,0030	23
c_{n15}	$= 9,49 \cdot 10^{-2} + 9,48 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Tiefe} - 4,87 \cdot 10^{-4} \cdot P_v - 2,49 \cdot 10^{-2} \cdot \rho_t - 4,98 \cdot 10^{-4} \cdot c - 6,84 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi - 5,27 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Humus} + 1,76 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha - 4,22 \cdot 10^{-3} \cdot n$	0,88	0,0018	18

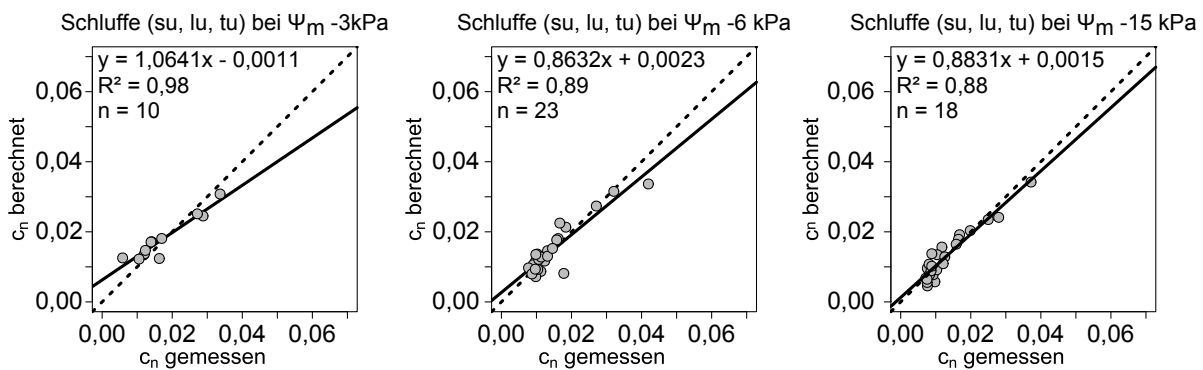


Abbildung 4.47: Beziehung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Kompressibilitätsindex (c_n) für Schluffe (su, lu, tu) bei einem Matrixpotenzial von -3 kPa (links), -6 kPa (Mitte) und -15 kPa (rechts). Die gestrichelte Linie zeigt die 1:1 Linie, die durchgezogene Linie zeigt die Trendlinie der Pedotransferfunktion. Im Diagramm wird außerdem die lineare Funktionsgleichung für die Trendlinie, das Bestimmtheitsmaß (R^2) und die Anzahl der Proben (n) gezeigt.

4.3.6 Pedotransferfunktionen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex für Tone (ut)

Tabelle 4.9 zeigt die Pedotransferfunktionen für Tone. Die Pedotransferfunktionen c_{n3} hat mit Tiefe, Vorbelastung und Trockenrohdichte die wenigsten Parameter. In den beiden anderen Funktionen gehen zusätzlich die Parameter Kohäsion, Winkel der inneren Reibung und Humusgehalt ein. In der Funktion c_{n15} ändert sich im Vergleich zu den beiden anderen Funktionen das Vorzeichen bei Vorbelastung und Humusgehalt. Das Bestimmtheitsmaß bei den drei Funktionen ist über 0,88, und die linearen Funktionsgleichungen zeigen eine geringe Unterschätzung der Werte (Abbildung 4.47).

Tabelle 4.9: Pedotransferfunktionen des Kompressibilitätsindex für Tone (ut). Bei den Matrixpotenzialen -3 kPa (c_{n3}), -6 kPa (c_{n6}) und -15 kPa (c_{n15}), mit dem Bestimmtheitsmaß (R^2), dem Root-Mean-Square-Error (RMSE) und der Anzahl der Daten (n). Einheiten der Parameter: Tiefe (cm), P_v bei ψ -6 kPa (kPa), ρ_t ($g\ cm^{-3}$), c bei ψ -6 kPa (kPa), φ bei ψ -6 kPa ($^\circ$), Humus ($g\ 100\ g^{-1}$), α und n ().

	Funktion	R^2	RMSE	n
c_{n3}	$= 2,35 \cdot 10^{-1} - 7,33 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Tiefe} - 2,55 \cdot 10^{-4} \cdot P_v - 1,72 \cdot 10^{-1} \cdot \rho_t$	0,98	0,0072	6
c_{n6}	$= 2,79 \cdot 10^{-1} - 6,67 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Tiefe} - 1,34 \cdot 10^{-4} \cdot P_v - 1,71 \cdot 10^{-1} \cdot \rho_t - 8,63 \cdot 10^{-4} \cdot c - 5,63 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi - 4,6 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Humus}$	0,93	0,0111	15
c_{n15}	$= 1,06 \cdot 10^{-1} - 4,91 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Tiefe} + 1,17 \cdot 10^{-4} \cdot P_v - 4,85 \cdot 10^{-2} \cdot \rho_t - 5,93 \cdot 10^{-4} \cdot c - 1,06 \cdot 10^{-3} \cdot \varphi + 6,65 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Humus}$	0,88	0,0061	14

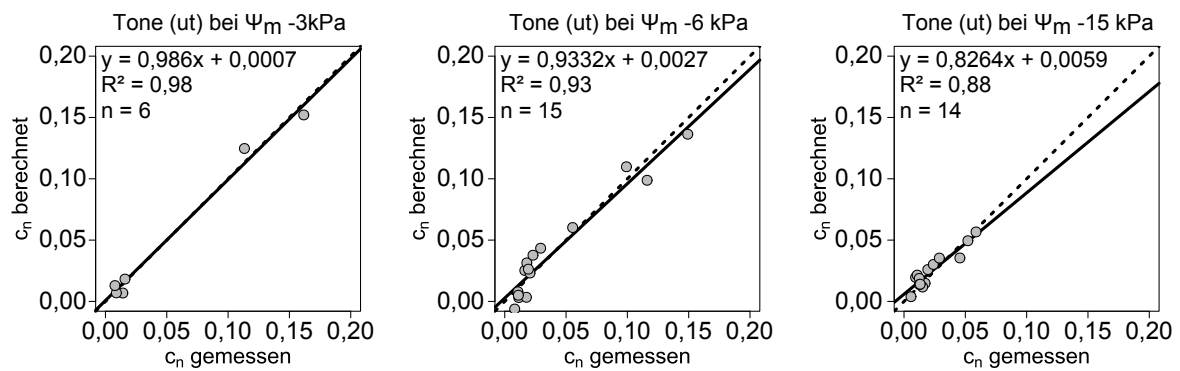


Abbildung 4.48: Beziehung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Kompressibilitätsindex (c_n) für Töne (ut) bei einem Matrixpotenzial von -3 kPa (links), -6 kPa (Mitte) und -15 kPa (rechts). Die gestrichelte Linie zeigt die 1:1 Linie, die durchgezogene Linie zeigt die Trendlinie der Pedotransferfunktion. Im Diagramm wird außerdem die lineare Funktionsgleichung für die Trendlinie, das Bestimmtheitsmaß (R^2) und die Anzahl der Proben (n) gezeigt.

5 Diskussion

Die Tideelbe wird von Hamburg bis zu ihrer Mündung in die Nordsee zunehmend salziger. Die Überschneidungszone zwischen Süß- und Salzwasser ist die Brackwassergrenze. Diese liegt nach verschiedenen Ansätzen, die in RIEDEL-LORJÉ ET AL. (1992) beschrieben sind ungefähr bei Glückstadt (siehe Abbildung 3.1). Folglich sind die Profile ES18 bis ES24 als von Salzwasser beeinflusst einzuordnen, während die übrigen im Rahmen dieser Arbeit beprobten Standorte als süßwassergeprägt definiert werden können. Außerdem nehmen die Salzgehalte in den Oberböden mit zunehmender Entfernung vom Ufer ab, während sie aufgrund des salzhaltigen Grundwassers im Profil mit der Tiefe zunehmen (PRANGE, 1978). Der Einfluss des Salzgehaltes im Flusswasser ist folglich in den Wattprofilen größer als in den Grünlandprofilen, in denen nur noch im Unterboden eventuell erhöhte Salzgehalte erwartet werden. Im Zusammenhang mit dem Salzgehalt ist vor allem auf den Effekt des Natriums (Na^+) einzugehen, da im humiden Klima an der Tideelbe durch den vorherrschenden Versickerungseffekt keine Salzakkumulation durch Auskristallisation sondern vielmehr eine Dispergierung und Verlagerung von Tonpartikeln durch hohe Natriumgehalte in der Bodenlösung und somit ein destabilisierender Effekt erwartet werden kann (ODEH und ONUS, 2008). Durch die Verwitterung von carbonathaltigen Ausgangsubstraten oder von Kalken aus biogener Herkunft kann über die Freisetzung von Calcium (Ca^{2+}) generell die Stabilität im Boden wieder erhöht werden (ARMSTRONG und TANTON, 1992; BRONICK und LAL, 2005). Obwohl die genannten Auswirkungen von Salzeinträgen vor allem auf der Mikroskala stattfinden und somit in den durchgeführten Untersuchungen nicht im Detail erfasst wurden, können Sie zur Erklärung von Unterschieden der mechanischen Stabilität auf der Mesoebene hinzugezogen werden. Im Fokus der Untersuchungen stand allerdings nicht primär der Salzgehalt sondern vielmehr der Grad der Bodenentwicklung und die Entwicklung der Matrixpotenziale mit zunehmender Entfernung vom Ufer (Watt → Röhricht → Grünland) als Einflussparameter auf die Stabilität. Um dabei allerdings auch einen indirekten Bezug zu den auf der Mikroskala ablaufenden chemischen Ad- und Desorptionsprozessen zu erstellen, wurden nicht nur die Stabilität der Uferbereiche gegenüber mechanischer Wellenbelastung anhand des Kompressibilitätsindex bewertet (PETH und HORN, 2006), sondern in der Zusammenarbeit mit STOPPE (2015) auch der Versuch unternommen, mit rheologischen Parametern einen skalenübergreifenden Auswertungsansatz zwischen Mikro- und Mesoskala zu entwickeln, der die Einstufung derartig empfindlicher Ökosysteme ermöglicht. In dieser Arbeit

steht allerdings die Entwicklung von Pedotransferfunktion zur Ableitung des Kompressibilitätsindex anhand von Bodenkennwerten und damit der mechanischen Uferstabilität, als innovativer Ansatz im Vordergrund.

5.1 Bewertung der Bodenstabilität an den Ufern der Tideelbe auf der Mesoskala anhand der ermittelten bodenphysikalischen Kennwerte

Im folgenden Abschnitt werden die Kennwerte Trockenrohdichte, Vorbelastung, Kohäsion, Winkel der inneren Reibung, Kompressibilitätsindex, Wasser- und Luftfähigkeit und deren Bedeutung für die Bodenstabilität an den Untersuchungsstandorten diskutiert.

5.1.1 Trockenrohdichte

Die Trockenrohdichte wird in einer Reihe von Arbeiten als Kennwert der Stabilität oder der mechanischen Belastung von Böden herangezogen (DA SILVA et al., 1997; HÅKANSSON und LIPIEC, 2000; LESTARININGSIH et al., 2013). Die Höhe der Trockenrohdichte wird von den Parametern organische Substanz, Textur, mechanische Belastung und zeitliche Entwicklung (Aggregation) beeinflusst (HORN et al., 1994; BOIX-FAYOS et al., 2001; DAM et al., 2005; REICHERT et al., 2009), die sich wiederum auch auf Stabilitätsparameter wie die Vorbelastung, die Scherparameter Kohäsion und Winkel der inneren Reibung und den Kompressibilitätsindex auswirken. Die Aggregation von Bodenpartikeln kann durch Quellungs- und Schrumpfungsprozesse erfolgen, welche wiederum durch die unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse im Jahresverlauf beeinflusst werden (HU et al., 2012; MORA und LÁZARO, 2014). Außerdem kann eine Aggregation durch die Verklebung der Partikel mit organischer Substanz gefördert werden (JASTROW, 1996; SIX et al., 2002). Durch die Aggregation kommt es zu einer dichteren Lagerung der Partikel und damit zu einer höheren Trockenrohdichte und einer größeren Stabilität. Dieser Trend der Erhöhung der Trockenrohdichte mit zunehmender Aggregation konnte

auch an den Standorten im Untersuchungsgebiet nachgewiesen werden. So kommt es bei den Sanden vom Kohärentgefüge zum Subpolyeder-/Polyedergefüge oder Polyedergefüge zu einer Erhöhung der Trockenrohdichte. Ebenso ist bei den Schluffen mit Subpolyeder-/Polyedergefüge zum Polyedergefüge eine Erhöhung der Trockenrohdichte zu sehen. Damit es zu einer höheren Stabilität des Bodens durch Aggregation kommt, muss mindestens ein Tonanteil von 15 % vorliegen (HEINONEN, 1982 zit. in OADES, 1993), bzw. 12 % Ton oder Salze in sandigen Substraten (HORN und SMUCKER, 2005). Die Aggregation durch Salze ist aber hauptsächlich in ariden Gebieten von Bedeutung. In humiden Klimaten spielt bei der Aggregation in schluff- und tonreichen Böden, vor allem die Intensität von Quellung und Schrumpfung eine Rolle (HORN und FLEIGE, 2009). 55 der untersuchten Bodenhorizonte an der Tideelbe weisen einen Tonanteil von $\geq 12\%$ auf, so dass hier bei entsprechend schwankenden Wassergehalten nach HORN und SMUCKER (2005) von einer stabilisierend wirkenden Aggregation durch Quellung und Schrumpfung ausgegangen werden kann. Von den genannten 55 Horizonten weisen 50 ein Aggregatgefüge auf. Einige der Horizonte in den Watt-Profilen weisen ebenfalls einen Tonanteil von $\geq 12\%$ Ton auf, durch die kurzen Zeiträume zwischen den Tiden ist die Austrocknung für die Bildung von Aggregaten hier jedoch zu gering. Im Datensatz mit den 50 aggregierten Horizonten sind auch Krümelgefüge enthalten. Die Aggregation ist hier nicht alleine durch den Tongehalt bestimmt, sondern vielmehr durch die Verklebung mit organischer Substanz als Folge der mikrobiellen Aktivität. Erhöhte Gehalte an stark zersetzter organischer Substanz, führen in Marschen zu einer Abnahme der Erosion (FEAGIN et al., 2009), verbessern die Wasserstabilität der vorhandenen Aggregate (OADES und WATERS, 1991; SPACCINI und PICCOLO, 2013) und können so die Uferstabilität verbessern und Erosionsprozessen entgegenwirken. Ein höherer Anteil von organischer Substanz, bedeutet aufgrund geringerer Feststoffdichten der organischen Bestandteile eine geringere Trockenrohdichte (SOANE, 1990). Dieser Effekt der bei hohen Gehalten an organischer Substanz trotz stärkerer Aggregation geringeren Trockenrohdichte konnte auch an den untersuchten Standorten nachgewiesen werden. Bei den Tonen hat ein Prismengefüge eine geringere Trockenrohdichte als ein Kohärentgefüge mit geringeren Anteilen organischer Substanz. Ein Kohärentgefüge im Lehm hat ebenfalls eine höhere Trockenrohdichte als ein Subpolyeder-/Polyedergefüge mit höheren Anteilen organischer Substanz. Dies bedeutet, dass bei hohen Gehalten an organischer Substanz auch eine Stabilisierung des Bodens durch Aggregation stattfinden kann, ohne dass die Trockenrohdich-

te erhöht wird. Daher ist die Stabilität von humosen Böden allein anhand der Trockenrohddichte nur schwer abzuleiten.

5.1.2 Vorbelastung

Die Vorbelastung eines Bodens ist das Ergebnis von Befahrung, Aggregierung durch Quellung und Schrumpfung, Frost und biogener Aggregierung (RÜCKNAGEL et al., 2007). An der Tideelbe liegt die Vorbelastung an den meisten Standorten zwischen 30 kPa und 60 kPa und ist als sehr gering bis gering einzustufen. Hohe Vorbelastungen wurden an 18 Grünlandhorizonten in den Tiefen ≤ 30 cm gemessen und 17 in Tiefen ≥ 50 cm entlang der gesamten Tideelbe gemessen. Am Standort ES2 kommen im Röhricht- und Wattprofil ebenfalls Vorbelastungen bis 90 kPa vor.

Der Einfluss der Bodenentwicklung auf die Vorbelastung zeigt sich in der abnehmenden Vorbelastung in der Folge Grünland \rightarrow Röhricht \rightarrow Watt, und dem Anstieg der Vorbelastung mit zunehmender Tiefe. Den Anstieg der Vorbelastung mit zunehmender Tiefe durch den zusätzlichen Einfluss des Überlagerungsdrucks in Addition zu Befahrungen und Aggregierungsprozessen, konnten auch STAHL ET AL. (2009) und KREBSTEIN ET AL. (2013) an Grünlandstandorten feststellen. An den Grünlandstandorten der Tideelbe wurden hohe Vorbelastungen, bis maximal 111 kPa in 50 cm gemessen. Diese erhöhte Vorbelastung kann durch die Beweidung mit Schafen an den Standorten bedingt sein (RESZKOWSKA et al., 2010). Die Last die durch Schafe in den Boden eingetragen wird ist von der Anzahl der Tiere und der Trittfrequenz bei gegebenen hydraulischen Bedingungen abhängig. KRÜMMELBEIN ET AL. (2006) und TOLLNER ET AL. (1990) haben durch die Trittbelastung von Schafen eine Vorbelastung zwischen 80 kPa und 126 kPa gemessen. ZHANG UND HORN (1995) haben in der Vorlandbewirtschaftung an der Nordsee ein Ansteigen der Vorbelastung mit steigender Anzahl von Tieren in 0-10 cm Tiefe von 30 kPa auf 62 kPa und in 20-40 cm Tiefe von 29 kPa auf 45 kPa nachgewiesen. Mit steigender Anzahl der Tiere erhöhte sich zudem die Vorbelastung im Oberboden stärker als im Unterboden. Dabei hat sich 1,0 SE/ha als idealer Wert zur Stabilisierung des Deichvorlandes herausgestellt.

Die unterschiedliche Entwicklung der Böden an den Untersuchungsstandorten ist durch den Einfluss der Tideelbe bedingt. An den Röhricht- und Wattstandorten kommt es innerhalb von ca. 6 Stunden zu einem Wechsel zwischen trockenen und feuchten Bedingungen. Dabei ist der trockene Zeitraum an den Wattprofilen kürzer als an den Röhrichtprofilen, wodurch der strukturbildende und stabilisierende Wechsel von Trocknung und Wiederbefeuchtung (HORN und DEXTER, 1989; SALIRE et al., 1994; WHALLEY et al., 2008), in den Röhrichtprofilen stärker ausgeprägt ist als in den Wattprofilen. Außerdem bewirkt das Röhricht durch den Wasserentzug seiner Wurzeln eine weitere Austrocknung der Rhizosphäre und damit auch im gesamten Wurzelraum (COOPS et al., 1996; RASSE et al., 2000; UTEAU et al., 2013). An den sandigen Standorten ist die Aggregation durch Quellung und Schrumpfung nur marginal. Die aktuelle Stabilität hängt hier stark vom Matrixpotenzial ab, da mit steigender Austrocknung der χ -Faktor sehr schnell sinkt und damit auch die Stabilisierung durch Meniskenkräfte intensiv abnimmt. Durch die verklebende Wirkung der organischen Substanz, die bei günstigen mikrobiologischen Verhältnissen zur Ausbildung eines Kitt- oder Hüllengefüges, bis hin zu einem Feinkoagulat bzw. optimal zu einem Krümelgefüge führt, können jedoch auch in Sandböden stabile Aggregate entstehen. Eine generell steigende Stabilität in Form einer höheren Vorbelastung mit fortschreitender Aggregation vom Kohärent- zum Prismen- zum Polyeder- zum Subpolyedergefüge, wie von LEBERT UND HORN (1991) beschrieben, ist an den Vorbelastungen der nach den Parametern Textur und Gefügestufe zusammen gefassten Daten von der Tideelbe nicht durchgängig zu erkennen.

5.1.3 Scherwiderstandskennwerte

Bei der Scherung findet neben der vertikalen auch eine horizontale Beanspruchung des Bodens statt. Da die aufgebrachten vertikalen Auflasten zur Bestimmung der Scherwiderstandskennwerte in den durchgeführten Versuchen bereits bei 50 kPa die Vorbelastung der meisten Proben überschritt kann davon ausgegangen werden, dass es ab dieser Auflaststufe zu einer Zerstörung der Aggregate bzw. der Bodenstruktur kam, und somit die Kohäsion zuerst deutlich erhöht, der Winkel der inneren Reibung hingegen verringert wurde, bevor dann beide Parameter hauptsächlich von der Textur bestimmt wurden (LEBERT und HORN, 1991). Das Überschreiten der Vorbe-

lastung durch die Normalspannung führt zu einer Zerstörung der Aggregate und der Boden kann über die Zwischenstufen der Dichtpackung und anschließenden Bildung von Plattenstrukturen als homogenisiert betrachtet werden (DÖRNER und HORN, 2009). In homogenisierten Böden sind Kohäsion und der Winkel der inneren Reibung geringer als in aggregierten Böden (HORN et al., 1991; BAUMGARTL und HORN, 1991). Eine grundsätzliche Zunahme von Kohäsion und Winkel der inneren Reibung in den stärker aggregierten Proben konnte anhand der Ergebnisse an der Tideelbe nicht festgestellt werden, was eventuell auch auf die oben genannte frühe Überschreitung der Vorbelastung während der Messung der Scherwiderstandskennwerte und die damit einhergehende Zerstörung von Aggregaten bedingt ist. Neben Textur und Bodenstruktur beeinflusst auch der Gehalt von Salz und organischer Substanz die Scherwiderstandsparameter. Der Einfluss von Salzen auf die Bodenstabilität kann in dem humiden Klima in dem sich die Tideelbe befindet vernachlässigt werden da diese der Auswaschung unterliegen und nicht im Boden akkumuliert werden. Hohe Na^+ -Gehalte würden bei Tonen zu einer Dispergierung führen. Ein entsprechender Salzwassereinfluss ist jedoch nur an den Standorten ES18 bis ES24 zu erwarten. Da am Standort ES22 in einem Tu3 eine der höchsten Kohäsionen gemessen wurde, wird die Beeinflussung der Scherwiderstandsparameter durch die Natriumeffekte in diesem Untersuchungsgebiet ausgeschlossen. Einen höheren Einfluss auf die Scherwiderstandsparameter der untersuchten Böden haben daher organische Substanzen. Dabei ist u.a. der Umsetzungsgrad der organischen Substanz von Bedeutung. EKWUE (1990) und ZHANG (1994) konnten eine Verringerung der Scherwiderstände durch die Zugabe von weniger stark humifizierter organischer Substanz feststellen. Dies bedeutet, dass beispielsweise abgestorbenes Schilf das überschlickt und nicht umgesetzt wird die Stabilität des Bodens herabsetzen kann. In den Marschen haben FEAGIN ET AL. (2009) eine stärkere Erosion von Sedimenten festgestellt, die weniger stark umgesetztes organisches Material enthielten. An den Grünland- und Röhrichtstandorten führt ein höherer Gehalt an organischer Substanz zu höherer Kohäsion und zu einem geringeren Winkel der inneren Reibung. Einen Anstieg der Kohäsion und des Winkels der inneren Reibung mit steigenden Anteilen organischer Substanz zeigen auch ZHANG UND HARTGE (1995a) in ihren Ergebnissen. EKWUE (1990) zeigt, dass ein höherer Anteil an organischer Substanz zu einer höheren Wasserbindung und damit zu einem geringeren Scherwiderstand führt. Dieser Effekt der höheren Wasserbindung durch die organische Substanz kann zu einem leichteren Gleiten

zwischen den Partikeln und damit zu einer Abnahme des Winkels der inneren Reibung führen. Den selben Effekt haben ZHANG UND HORN (1995) bei höheren Tongehalten beschrieben.

5.1.4 Kompressibilitätsindex

Sowohl bei statischer als auch bei dynamischer Belastung kann es zu einer elastischen (reversiblen) oder plastischen (irreversiblen) Verformung eines Bodens kommen (LEBERT und HORN, 1991; KIRBY, 1991; MOSADDEGHI et al., 2003; HORN und FLEIGE, 2009). Die Textur, der Anteil an organischer Substanz und der Wassergehalt sind hierbei wichtige Einflussfaktoren für das Setzungsverhalten bei Belastung (MOSADDEGHI et al., 2007; SÁNCHEZ-GIRÓN et al., 1998). So lange die Auflast kleiner als die Vorbelastung ist, entsteht bei statischer Belastung nur eine elastische Verformung. In den untersuchten Bodenproben bewirkte die zyklische Belastung jedoch eine plastische Verformung des Bodens, obwohl die verwendete Auflast bei den meisten Proben unterhalb der Vorbelastung lag. Dass bei einer dynamischen Belastung schon bei Werten weit unterhalb der Vorbelastung eine plastische Verformung des Bodens auftreten kann, konnten KELLER ET AL. (2004) bei Überfahrungsversuchen ebenfalls feststellen. Nach HORN (1990) haben dynamische Belastungen generell einen größeren Einfluss auf die Änderung der Bodenstabilität als statische Belastungen. Durch die dynamische Be- und Entlastung kommt es zu gekoppelten hydraulischen und mechanischen Prozessen, die in einer kompletten Homogenisierung des Bodens resultieren können. Dies geschieht besonders in Böden, in denen das Porenwasser nicht umverteilt bzw. drainiert werden kann und durch seine InkompRESSIBILITÄT zunächst die Last trägt. Bei dynamischer oder scherender Belastung entstehen dann Porenwasserüberdrücke und der Boden verliert die Stabilität. Dies geschieht in feinkörnigen Böden eher, da hier das Porenwasser schlechter umverteilt werden kann. Die Umverteilung von Porenwasser, und damit die Intensität der plastischen Verformung bei zyklischer Belastung sind folglich auch texturabhängig (PETH und HORN, 2006; ERKEN und ULKER, 2007; BELKHATIR et al., 2011; BAUMGARTEN et al., 2012). Die Ergebnisse der zyklischen Belastung der Proben von der Tideelbe zeigen übereinstimmend einen mit feinerer Textur höher werdenden Kompressibilitätsindex was auch von PETH ET AL. (2006) festgestellt wurde. Bereits HORN UND LEBERT (1994) haben das Setzungsverhalten von Böden mit unterschiedlichen Tonanteilen unter einer

statischen Auflast von 30 kPa untersucht und dabei ebenfalls mit steigendem Tonanteil eine stärkere Setzung festgestellt. Das Verhältnis zwischen der Setzung bei Belastung und Hebung bei Entlastung wird mit steigender Zyklenanzahl kleiner („Reboundeffekt“, KRÜMMELBEIN et al., 2008), allerdings reichten 50 Zyklen bei den untersuchten Proben nicht aus um eine endgültige Setzung zu erreichen. Hierbei muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass durch die zyklische Belastung Wasser aus dem Boden gedrückt und bei Entlastung zum Teil wieder vom Boden aufgenommen wird. Durch diesen „Pumpeneffekt“ werden die Partikel im Boden bei Entlastung neu sortiert und der Boden instabiler, wodurch die Verzögerung der Endsetzung erklärbar wird (WILSON und ELGOHARY, 1974; KRÜMMELBEIN et al., 2008). Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch MORDHORST ET AL. (2012) und MOSES ET AL. (2003), bei deren Versuchen mit 100 Zyklen bzw. mit mehr als 2000 Zyklen auch keine endgültige Setzung nachwiesen werden konnte. Durch den abnehmenden „Reboundeffekt“ während der Messung wird der Porenraum zunehmend verengt und das Matrixpotenzial steigt an da die Umverteilung des Bodenwassers bei abnehmender Leitfähigkeit zunehmend schwieriger und langsamer wird (PETH et al., 2010). Das weniger negative Matrixpotenzial führt in den Poren zu Beginn zu einer höheren Anzahl von Wassermenisken und damit zu mehr Korn zu Korn Kontakten, wodurch über die größeren wassergefüllten Porenflächen eine steigende Festigkeit erzielt bzw. nachgewiesen werden kann (HORN, 1990). Wird das Matrixpotenzial bei der Belastung weiter positiv und das Porenwasser kann nicht schnell genug umverteilt oder drainiert werden, wirkt der zunehmende Druck im Porenwasser nunmehr destabilisierend (HICKS und SMITH, 1986; WICHTMANN et al., 2005). Eine Umverteilung oder Drainage von Porenwasser erfolgt in Sanden schneller und vollständiger als in feineren Texturen wie z.B. Tonen. In den feineren Texturen kann allerdings eine Aggregation zu einer besseren Drainage führen, solange das Gefüge erhalten bleibt. Bei der Entlastung des Bodens wird das abgeführte Porenwasser wie bereits erwähnt teilweise wieder angesogen. Durch den verengten Porenraum („bottle necks“) und dem verstärkten Sog in den engeren Poren können auch Partikel bewegt werden, wodurch weitere „bottle necks“ entstehen (KREMER et al., 2002). Kommt es bei der nächsten Belastung in diesen verengten Porenräumen dann zu Porenwasserüberdrücken, kann dies zu einer weiteren Destabilisierung des Bodens führen. Je mehr Belastungszyklen auftreten, desto eher kann durch diesen „Pumpeneffekt“ eine komplette Zerstörung der Struktur bis zur vollständigen Homogenisierung erfolgen. Durch die ausreichende Abführung von Porenwasser kann eine Erhöhung

der Stabilität erreicht werden. Die eigenen Messungen konnten diesen Prozess auch bestätigen, denn mit negativeren Matrixpotenzialen wird der Kompressibilitätsindex kleiner und damit der Boden stabiler gegen Belastungen. Eine Erhöhung der Bodenstabilität mit negativerem Matrixpotenzial konnte ebenfalls von ARVIDSSON UND KELLER (2004), PENG ET AL. (2004) und FAZEKAS (2006) beobachtet werden. Die Ergebnisse an der Tideelbe zeigen das bei den Sanden der Kompressibilitätsindex als mittel einzustufen ist und bei negativeren Matrixpotenzial keine Änderung eintritt. Bei den Lehmen, Schluffen und Tonen nimmt der Kompressibilitätsindex bei einem Matrixpotenzial von -15 kPa um eine Einstufungsklasse ab. Neben der Abhängigkeit von der Textur und dem Matrixpotenzial, spielt auch die Bodenentwicklungsgrad an den Standorten eine Rolle. An den Röhrichtstandorten wurden bei fast allen Texturen und Matrixpotentialen sehr hohe Kompressibilitätsindizes in 10 cm Tiefe festgestellt. Die Grünland- und Wattstandorte weisen teilweise ebenfalls hohe Werte auf, aber nicht so häufig wie die Röhrichtstandorte. Damit haben die Röhrichtstandorte, die geringste Stabilität gegenüber zyklischer Belastung, bei einer höheren Vorbelastung im Vergleich zu den Wattstandorten.

5.1.5 Die Wasserleitfähigkeit und deren Auswirkung auf die Uferstabilität

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit ist von der Größe, der Tortuosität und der Kontinuität der Poren im Boden abhängig, die wiederum von der Bodenart und der Lagerungsdichte abhängen (MERDUN et al., 2006). Nach REYNOLDS ET AL. (2003) ist ein Wert zwischen $43,2 \text{ cm d}^{-1}$ und 432 cm d^{-1} (k_f4 bis k_f6) für einen landwirtschaftlichen Boden optimal, da davon auszugehen ist, dass die Infiltrationsgeschwindigkeit in einem starren Porensystem ausreicht um Oberflächenabfluss und Erosion zu vermeiden. Betrachtet man nach diesem Kriterium die Oberböden der Grünland- und Röhrichtstandorte an der Tideelbe, so unterschreitet die gesättigte Wasserleitfähigkeit an verschiedenen Standorten diese Werte, so dass hier eine verzögerte Infiltration stattfindet und damit verbundene Erosionsprozesse nicht ausgeschlossen werden konnten. Neben einer geringen Wasserleitfähigkeit im Oberboden, können auch stark unterschiedliche Wasserleitfähigkeiten zwischen einzelnen Horizonten zu einer Destabilisierung des Bodens führen (HAGERTY, 1991a). Eine solche heterogene Schichtung kann typischer Weise durch die na-

türliche Sedimentation in Flussauen entstehen. Ein Tongehaltsunterschied von 16 % zwischen den Horizonten kann zu einer Herabsetzung der Wasserleitfähigkeit um das 2,5 fache führen (WILSON et al., 2007), wie z.B. im Röhrichtprofil am Standort ES8, wo es zwischen 30 cm und 50 cm zu einem Texturwechsel kommt und die Wasserleitfähigkeit stark abnimmt. Nach FOX ET AL. (2007) kann es durch solche Abnahmen zu horizontalem Fluss an den Horizontgrenzen kommen, wodurch Partikel an der Uferböschung aus dem Boden ausgespült werden (DUNNE, 1990; HAGERTY, 1991a; HAGERTY, 1991b). Die Gefahr, dass Sedimente ausgespült und verlagert werden, ist an den untersuchten Röhrichtstandorten von besonderer Bedeutung, da diese direkten Kontakt zu Elbe haben. Entsprechende Unterschiede in der Wasserleitfähigkeit zwischen zwei Horizonten wurden an verschiedenen Röhrichtprofilen festgestellt, z.B. ES20 und ES22. Das Ausspülen von Sedimenten an sogenannten „pipes“ führt dann zu einer langsamen Unterspülung des Ufers und letztendlich zu einem Versagen der Bodenstabilität (WILSON et al., 2007; LINDOW et al., 2009).

5.1.6 Die Luftleitfähigkeit und Rückschlüsse auf die Wasserleitfähigkeit

In den Poren erfolgt neben dem Wasser- auch der Gasaustausch (BLACKWELL et al., 1990; TULI et al., 2005). Die Luftleitfähigkeit der untersuchten Bodenproben steigt mit negativerem Matrixpotenzial, da durch den geringeren volumetrischen Wassergehalt mehr Poren für den Gasaustausch zur Verfügung standen. Außerdem können während der Entwässerung in Bodenproben mit einem Tongehalt von mindestens 15 % (HORN et al., 1994) durch Schrumpfung neue vertikale Risse entstehen, die dann am Gasaustausch beteiligt sind. Durch diese Schrumpfung werden die Poren zudem stabiler gegenüber mechanischen Belastungen (KREMER et al., 2002). Mit der Messung der Luftleitfähigkeit kann eine Aussage über die Änderung der Porenfunktionalität durch eine mechanische Belastung getroffen werden (PETH und HORN, 2006). Bei Belastungen die die Eigenstabilität des Bodens überschreiten kommt es zu einer Verengung des Porenraumes und damit zu einer Abnahme der Luftleitfähigkeit (PENG et al., 2004). Die Verengung des Porenraumes und die Umverteilung von Wasser bei Belastung kann außerdem dazu führen, dass Poren durch Wassermenisken verschlossen werden und damit nicht mehr am Gas-

austausch beteiligt sind (GEBHARDT et al., 2009). Die Art der Belastung ist ebenfalls entscheidend für die Luftleitfähigkeit. Bei scherender Beanspruchung des Bodens werden zusätzlich die Bodenpartikel verschoben, und damit die Kontinuität der Poren verringert (HORN und FLEIGE, 2009; WHALLEY et al., 2012). Die Abnahme der Luftleitfähigkeit ist nach den Messungen der Vorbelastung am höchsten da hier mit einer maximalen Auflast von 400 kPa die Eigenstabilität des Bodens in allen Proben überschritten wurde. Bei einer statischen Lasterhöhung ist die Zerstörung der Poren größer als bei dynamischer Lasterhöhung, weil nach SCHÄFFER ET AL. (2008a) bei der dynamischen Belastung das Porenwasser in den Poren umverteilt werden kann, während es bei der statischen Lasterhöhung zu höheren Porenwasserdrücken kommt. Folglich würde eine statische Belastung mit 20 kPa eine geringere Verformung der Bodenprobe nach sich ziehen als eine dynamische Belastung mit 20 kPa. Die Luftleitfähigkeit der untersuchten Proben nimmt entsprechend auch nach der zyklischen Belastung mit 20 kPa ab. Diese Abnahme wird mit zunehmend feineren Texturen größer. Schließt man nun von der Luftleitfähigkeit auf die verfügbaren Fließwege für Wasser und somit auf die gesättigte Wasserleitfähigkeit zurück so kann davon ausgegangen werden, dass es bei einer zyklischen Belastung mit 20 kPa durch den Wellenschlag ebenfalls zu einer Herabsetzung der gesättigten Wasserleitfähigkeit kommt. Die verringerte Wasserleitfähigkeit führt dann gegebenenfalls zu verzögerter Infiltration und zu Erosion.

5.2 Stabilität der Böden an der Tideelbe in Abhängigkeit von der Entfernung zum Ufer und zur Mündung in die Nordsee

Die Vorbelastungen und Scherwiderstandskennwerte in den Oberböden (10 cm) der Grünlandprofile sind signifikant höher als die der Röhricht und Wattprofile. Auch in der Abhängigkeit von der Lage der Standorte zur Mündung konnten Unterschiede in der Stabilität festgestellt werden. In den Grünlandstandorten werden die Vorbelastung und die Scherwiderstandskennwerte höher je näher man zur Elbmündung kommt, während der Kompressibilitätsindex geringer wird. Die Grünlandstandorte werden also in Richtung Mündung stabiler. Bei den Röhricht-

und Wattstandorten ist es hingegen umgekehrt. Hier wird die Vorbelastung geringer und der Kompressibilitätsindex steigt je näher man zur Mündung kommt, die Böden werden also instabiler. Die zunehmende Stabilität an den Grünlandstandorten kann dadurch bedingt sein, dass die Böden in der Nähe zur Elbmündung noch höhere Carbonatgehalte aufweisen, was die Stabilität im Bodengefüge erhöht. An den Röhricht- und Wattstandorten im Mündungsgebiet wird viel Sediment transportiert, aber auch immer wieder sedimentiert, wodurch die Bodenentwicklung stark eingeschränkt. Es kann durch diese Prozesse keine Stabilisierung erreicht werden kann. Je weiter man Richtung Hamburg kommt, wird durch den „tidal pumping“ Effekt mehr Sediment abgelagert und eine Bodenentwicklung kann einsetzen.

5.3 Ansätze zur Berechnung der mechanischen Uferstabilität

Um das Verhalten eines Ufers bei Belastung zu berechnen, gibt es bereits verschiedene Ansätze. Das mathematische 3-D Modell von JIA ET AL. (2010) berechnet den Abbruch des Ufers und den Sedimenteintrag in das Flussbett. Bei dem Modell handelt es sich um ein zwei Schichtenmodell, mit einem kohäsiven Oberboden und einen kohäsionslosen Unterboden. Die Eingangsparameter sind der longitudinale Verlauf der Erosion, die Mächtigkeit der Schichten und die Kohäsion im Oberboden. Ein weiterer Ansatz ist das BSTEM (Bank Stability and Toe Erosion Model) nach SIMON ET AL. (2000). Das Modell ermittelt die Stabilität des Ufers und berechnet daraus einen „factor of safty (FoS)“. Hierzu werden verschiedene mathematische Modelle verwendet (MIDGLEY et al., 2012; DALY et al., 2015). Um den FoS zu berechnen werden zunächst die stabilisierenden Kräfte über eine erweiterte Mohr-Coulomb'sche Gleichung 5.1 berechnet.

$$s_r = c' + \sigma \tan(\varphi') + \Psi \tan(\varphi^b) \quad (5.1)$$

Dabei ist s_r der Scherwiderstand (kPa), c' die effektive Kohäsion (kPa), σ' die Normalspannung (kPa), φ' der effektive Winkel der inneren Reibung ($^\circ$), Ψ das Matrixpotenzial (kPa) und φ^b der

Winkel der die Beziehung zwischen Scherwiderstand und Matrixpotenzial beschreibt ($^\circ$). Als dominante Kraft die zur Destabilisierung des Bodens beiträgt wird das Gewicht des Bodens s_d (kPa) über die Gleichung 5.2 berechnet.

$$s_d = W \sin(\beta) \quad (5.2)$$

W ist das Gewicht des feuchten Bodenblocks (kN m^{-2}) und (β) ist der Winkel der Abrutschfläche ($^\circ$). Die Erosion am Sockel, die zu einer Unterhöhnung des Ufers führen kann wird über die Gleichung 5.3 nach PARTHENIADES (1965) berechnet.

$$\epsilon = \kappa(\tau_o - \tau_c)a \quad (5.3)$$

Die Erosionsrate ϵ (m s^{-1}) wird anhand des Erodierbarkeitskoeffizienten κ ($\text{m}^3 \text{N}^{-1} \text{s}^{-1}$), des durchschnittlichen Scherwiderstand τ_o (kPa), (kPa) des für den Boden kritischen Scherwiderstands τ_c (kPa) und des Exponenten a . Der durchschnittliche Scherwiderstands wird nach der Gleichung 5.4 berechnet. Dabei stehen γ_w für das Gewicht des Wassers ($9,81 \text{ kN m}^{-3}$), R für den hydraulischen Radius (m) und S für die Neigung des Wasserlaufs (m m^{-1}).

$$\tau_o = \gamma_w R S \quad (5.4)$$

Im BSTEM wird der durchschnittliche Scherwiderstand um die Effekte der Krümmung an den Grenzen erweitert und nach dem „no-lag kinematic model“ nach CROSATO (2009) über die Gleichung 5.5 berechnet.

$$\tau_o = \frac{\gamma_w n^2 (u + U)^2}{R^{1/3}} \quad (5.5)$$

Dabei ist n der Manning Rauigkeitskoeffizient, u die gemittelte Wassergeschwindigkeit (m s^{-1}) und U die Geschwindigkeitszunahme (m s^{-1}) durch den Anstieg der Uferlinie.

Keiner der genannten Ansätze verwendet einfach zu erhebende bodenkundliche Parameter. Deshalb wurden als neuer methodischer Ansatz in dieser Arbeit mit Hilfe von einfach zu erhebenden bodenkundlichen Parametern Pedotransferfunktionen zur Ableitung der Uferstabilität anhand des Kompressibilitätsindex erstellt. Zur Berechnung der Vorbelastung, also der Stabilität des Bodens gegenüber einer statischen mechanischen Belastung, gibt es schon verschiedene Pedotransferfunktionen (LEBERT, 1989, DVWK, 1995; NISSEN, 1998; RÜCKNAGEL et al., 2007). Diese werden in den folgenden Abschnitten zum Vergleich mit den entwickelten Pedotransferfunktionen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex herangezogen.

5.4 Parameter und Bewertung der Pedotransferfunktionen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex

Die Abbildung 5.1 zeigt die verwendeten Parameter in den Pedotransferfunktionen als Funktion der Matrixpotenziale und der Textur. Der Einfluss der Textur auf den Kompressibilitätsindex wurde bereits in Abschnitt 5.1.4 diskutiert. Eine direkte Verwendung der Textur als Parameter in den Pedotransferfunktionen wurde über die Berücksichtigung der prozentualen Anteile von Sand, Schluff und Ton, sowie des d₅₀-Wertes versucht. Die Verwendung dieser Parameter lieferte jedoch keine gute Anpassung. Der Ungleichförmigkeitsgrad hätte bei Reinsanden als Parameter Anwendung finden können. Wenn die Tonanteile jedoch über 10 % liegen, ist der Ungleichförmigkeitsgrad nicht mehr zu berechnen (HARTGE und HORN, 2014). Um die Textur in den Pedotransferfunktionen trotzdem einzubeziehen, erfolgte eine Unterteilung der Textur anhand der Bodenarten-Hauptgruppen nach AD - HOC - AG BODEN (2005) in: Sande, Lehme, Schluffe und Tone, wobei die Gruppe der Sande, in „Sande (ss)“ und „Sande (ls, us)“ unterteilt wurden. Bei den Pedotransferfunktionen nach (LEBERT, 1989; DVWK, 1995) zur Ableitung der Vorbelastung wurde die Textur ebenfalls nicht direkt mit der Pedotransferfunktion eingesetzt, sondern auch in Texturklassen unterteilt.

	Reinsande (ss)	Sande (ls, us)	Lehme (sl, ll)	Schluffe (su, lu, tu)	Tone (ut)
Tiefe (cm)	□ ● ▲	■ ● ▲	□ ● ▲	□ ○ ▲	■ ● ▲
P_v (kPa)	■ ● ▲	■ ● ▲	■ ● ▲	■ ● ▲	■ ● ▲
ρ_t (g cm ⁻³)	■ ● ▲	■ ● ▲	■ ● ▲	■ ● ▲	■ ● ▲
c (kPa)	□ ○ ▲	□ ●	○ ▲	● ▲	● ▲
φ (°)	□ ○ ▲	□ ○	○ ▲	● ▲	● ▲
Humus (g 100 g ⁻¹)	□ ● ▲	■ ○ ▲	■ ● ▲	● ▲	● ▲
α	□ ○ ▲	■ ○	○ ▲	○ ▲	
n	□ ○ ▲	■ ○	● ▲	○ ▲	

Abbildung 5.1: Anwendung der Parameter Tiefe, Vorbelastung (P_v), Trockenrohddichte (ρ_t), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ), Humus, α und n (van Genuchten Parameter) bei verschiedenen Texturen: Sanden, Lehmen, Schluffen und Tonen. Dabei steht ein □ für die Anwendung bei einem Matrixpotenzial von -3 kPa, ○ bei -6 kPa und △ bei -15kPa. Wenn das Symbol leer ist geht der Parameter mit einem positiven Vorzeichen, und bei einem ausgefüllten Symbol mit einem negativen Vorzeichen in die Pedotransferfunktion ein.

Der Parameter, der in allen Pedotransferfunktionen vorkommt und immer ein negatives Vorzeichen hat, ist die Trockenrohddichte. Das negative Vorzeichen bedeutet, dass mit steigender Trockenrohddichte der Kompressibilitätsindex kleiner, der Boden also stabiler wird. Die Trockenrohddichte hat mit einem Faktor von 10^{-2} den größten Einfluss. Die Vorbelastung hat zwar bis auf die Pedotransferfunktion für Ton bei einem Matrixpotenzial von -15 kPa immer ein negatives Vorzeichen, aber der Faktor ist mit 10^{-4} bis 10^{-5} deutlich kleiner. Damit bleibt die Trockenrohddichte trotz der kleineren Dimension der absoluten Werte, der Parameter mit dem höchsten Einfluss. Der Parameter Tiefe ist als dritter Faktor in allen Funktionen enthalten. Die Vorzeichen weisen aber keinen eindeutigen Trend auf, und wechseln innerhalb der Texturgruppen und der Matrixpotenziale. Dieser Wechsel der Vorzeichen ist ebenfalls bei den Parametern

Kohäsion, Winkel der inneren Reibung, Humus, α und n zu sehen. Hierbei spielen auch Wechselwirkungen zwischen den Parametern eine Rolle, die zu einem Wechsel des Vorzeichens führen. In den Pedotransferfunktionen finden außerdem nicht alle Parameter Anwendung, da die Anpassung der Modelle ohne diese Parameter besser war, oder die multiple Regressionsanalyse mit zu vielen Parametern nicht zu lösen war. In der Diskussion wurde auf die Aggregierung und deren stabilisierenden Wirkung auf den Boden eingegangen. In den Pedotransferfunktionen ist die Aggregierung nicht direkt mit einbezogen, da eine numerische Wertung, der Stabilität einer Aggregierung schwer möglich ist. Daher wurde der Einfluss der Aggregierung in den Pedotransferfunktionen über die Parameter Vorbelastung und Scherwiderstandskennwerte abgebildet.

6 Fazit und Ausblick

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass sich der Kompressibilitätsindex über statische bodenphysikalische Parameter ableiten lässt. Auf Grund der starken Abhängigkeit des Kompressibilitätsindex von Textur und Matrixpotenzial war es aber nicht möglich eine einzige Pedotransferfunktion für alle Texturen und Matrixpotenziale zu erstellen. Daher wurden Pedotransferfunktionen für die fünf Bodenarten-Hauptgruppen, für jeweils drei Matrixpotenziale erstellt. Bei der Anwendung der Pedotransferfunktionen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex in der Praxis sollte ein horizontspezifisches Vorgehen erfolgen, da dieser stark von der Textur beeinflusst wird.

Aus den gewonnen Erkenntnissen können die folgenden Empfehlungen zur Überprüfung der Ergebnisse abgeleitet werden:

1. Die Erhebung weitere Daten, besonders für die feineren Texturen, da hier die Datengrundlage zur Erstellung der Pedotransferfunktionen teilweise sehr gering war, so dass eine Berechnung mit allen Parametern nicht lösbar war.
2. Durch den entsprechend größeren Datensatz könnte eine Validierung der erstellten Pedotransferfunktionen erfolgen, da die Überprüfung bis jetzt nur mit den Daten erfolgt ist, mit denen die Pedotransferfunktionen entwickelt worden sind.
3. Die zusätzlichen Messung der Vorbelastung und Scherwiderstandskennwerte bei Matrixpotenzialen von -3 kPa und -15 kPa, da bis jetzt in allen Pedotransferfunktionen die Werte der Vorbelastung und Scherwiderstandskennwerte bei -6 kPa gemessen worden sind.
4. Weitere Messungen bei 0 kPa anstelle der Messungen bei -15 kPa, da die Matrixpotenziale von 0 kPa wahrscheinlicher für die nahen Uferbereiche sind als Matrixpotenziale von -15 kPa.

7 Zusammenfassung

Im Forschungsprojekt „ElbStabil“ wurden insgesamt 22 Standorte an der Tideelbe zwischen Geesthacht und Cuxhaven untersucht. Das Ziel des Projektes war, die Stabilität der uferbildenden Böden auf der Mesoskala zu bewerten. Hierfür wurden an jedem Standort drei Profile angelegt: das Grünlandprofil über dem mittleren Tidehochwasser, das Röhrichtprofil an der Grenze zum mittleren Tidehochwasser und das Wattprofil zwischen dem mittleren Tidehoch- und Tideniedrigwasser. An ungestörten Bodenproben wurden die Parameter Trockenrohdichte, gesättigte Wasserleitfähigkeit, Luftleitfähigkeit, Matrixpotenzial-/Wassergehaltskurve, Vorbelastung, Scherwiderstandskennwerte und Kompressibilitätsindex bestimmt. Anhand dieser Parameter wurden Pedotransferfunktionen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex erstellt.

Die Vorbelastung stieg in den Profilen mit zunehmender Tiefe an. Dieser Anstieg der Vorbelastung entsteht durch den Überlagerungsdruck, in Addition zu mechanischen Belastungen und Aggregierungsprozessen. Nur an den Proben aus 10 cm Tiefe konnten signifikante Unterschiede zwischen der Vorbelastung und den Scherwiderstandskennwerten der Grünland- und Röhrichtprofile und der Grünland- und Wattprofile festgestellt werden. Dabei wiesen die Grünlandprofile signifikant höhere Stabilitäten auf als die Röhricht- und Wattprofile. Der Kompressibilitätsindex zeigte eine hohe Abhängigkeit von Textur und Matrixpotenzial. Mit feiner werdender Textur steigt er an, mit negativeren Matrixpotenzialen sinkt er. Das bedeutet, dass die Böden mit zunehmend feinerer Textur und positiven Matrixpotenzialen instabiler gegenüber zyklischer Belastung werden. Diese feineren Texturen, wie z.B. die Bodenarten-Gruppen Tonschluffe und Schlufftone kamen nur an den Standorten nordwestlich von Hamburg (ES5) vor, und treten nicht im ganzen Profil auf, sondern durch die Sedimentation bedingt in einzelnen Horizonten. So können unterschiedliche Stabilitäten innerhalb eines Profils entstehen.

Die Erstellung von Pedotransferfunktionen über multiple Regressionsanalysen zur Ableitung des Kompressibilitätsindex mittels bodenphysikalischer Kennwerte war möglich. Aufgrund der hohen Abhängigkeit von Textur und Matrixpotenzial wurden insgesamt 15 Pedotransferfunktionen erstellt. Dabei erfolgte eine Unterteilung nach den Bodenarten-Hauptgruppen „Sande (ss)“, „Sande (ls, us)“, Lehme, Schluff und Tone. Für jede Bodenartenhauptgruppe wurden die Pedotransferfunktion bei den Matrixpotenzialen von -3 kPa, -6 kPa und -15 kPa erstellt. Das Bestimmtheitsmaß der Pedotransferfunktionen lag zwischen 50 % bei Sanden und 98 % bei Tonen.

8 Abstract

In the research project “ElbStabil” 22 locations between Geesthacht and Cuxhaven were surveyed. The aim of the project was to estimate the stability of the bank on the mesoscale. For this purpose three profiles were sampled: “Grünland” above the mean high tide, “Röhricht” at the border of the mean high tide and “Watt” between the mean high tide and mean low tide. The parameters bulk density, water retention curve, saturated water conductivity, air conductivity, precompression stress, shear strength and cyclic-compressibility coefficients (c_n) were determined on undisturbed soil samples. Based on these parameters pedotransfer functions were created to derive the cyclic-compressibility coefficients.

The precompression stress in the profiles is increasing with depth. This increase in precompression stress is caused by the overburden pressure, in addition to mechanical stresses and aggregation processes. Only on the samples from 10 cm depth showed significant differences between the precompression stress and shear strength of “Grünland” and “Röhricht” and “Grünland” and “Watt”. The “Grünland” showed significantly higher rates than the “Röhricht”- und “Wattprofile”. The cyclic-compressibility coefficients showed a high dependency on texture and matrix potential. With finer texture the compressibility index rose, with more negativs matrix potentials it was lower. This means that the soils become more stable against cyclic loading with increasingly finer texture and positive matrix potentials. These finer textures, such as the soil texture groups Tonschluffe and Schlufftone were found only in the soils northwest of Hamburg (ES5). These finer textures do not occur throughout the profile, but are due to the sedimentation layeres in individual horizons. This leads to different stabilities within a profile.

The creation of pedotransfer functions by multiple regression analysis for deriving the cyclic-compressibility coefficients via soil physical characteristics was possible. Due to the high dependency on texture and matrix potential, 15 pedotransfer functions have been created. This subdivision was carried out according to the soil types maingroups “sand (ss)”, “sand (ls, us)”, loam , silt and clay. For each soil types the main group at the matricpotential of -3 kPa, -6 kPa and -15 kPa were created. The coefficient of determination of pedotransfer functions was between 50 % for sands and 98 % for clays.

9 Literatur

- Abedi, M. und Yasrobi, S. S.** (2010): Effects of plastic fines on the instability of sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 30 (3): 61–67.
- Ackermann, E.** (1949): Thixotropie bei Umlagerungen feinkörniger Sedimente. *Geologische Rundschau*. 1: 100–101.
- Ad-hoc-AG Boden** (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 5. Auflage. Hrsg. von **W. Eckelmann, H. Sponagel, W. Grottenthaler, K.-J. Hartmann, R. Hartwich, P. Janetzko, H. Joisten, D. Kühn, K.-J. Sabel und R. Traidl**. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Alakukku, L.** (1996): Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. I. Short-term effects on the properties of clay and organic soils. *Soil and Tillage Research*. 37 (4): 211–222.
- Armstrong, A. S. B. und Tanton, T. W.** (1992): Gypsum applications to aggregated saline—sodic clay topsoils. *Journal of Soil Science*. 43 (2): 249–260.
- Arthur, E., Schjøning, P., Moldrup, P. und Jonge, L. W. D.** (2012): Soil resistance and resilience to mechanical stresses for three differently managed sandy loam soils. *Geoderma*. 173–174: 50–60.
- Arvidsson, J. und Keller, T.** (2004): Soil precompression stress: I. A survey of Swedish arable soils. *Soil and Tillage Research*. 77 (1): 85–95.
- Bachmann, J. und Zhang, H.** (1991): Die Stabilität von Sandböden in Abhängigkeit vom Gehalt an organischer Substanz und deren Humifizierungsgrad. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.* 154 (1): 47–52.
- Baumgarten, W., Neugebauer, T., Fuchs, E. und Horn, R.** (2012): Structural stability of Marshland soils of the riparian zone of the Tidal Elbe River. *Soil and Tillage Research*. 125: 80–88.
- Baumgartl, T. und Köck, B.** (2004): Modeling Volume Change and Mechanical Properties with Hydraulic Models. *Soil Science Society of America Journal*. 68 (1): 57–65.
- Baumgartl, T. und Horn, R.** (1991): Effect of aggregate stability on soil compaction. *Soil and Tillage Research*. 19 (2): 203–213.
- BAW** (1996): Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt. Ermittlung und Bewertung ausbaubedingter Änderungen der schiffserzeugten Belastung - Schiffswellen und Strömungen. BAW Nr. 95 52 3422 / 95 52 3423.
- BAW** (2004a): Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt. Gutachten zu den ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastung. BAW-Nr. A3955 03 10062 H.1 d.

- BAW** (2004b): Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau. 87.
- Belkhatir, M., Arab, A., Schanz, T., Missoum, H. und Della, N.** (2011): Laboratory study on the liquefaction resistance of sand-silt mixtures: effect of grading characteristics. *Granular Matter*. 13 (5): 599–609.
- Berisso, F. E., Schjønning, P., Keller, T., Lamandé, M., Etana, A., Jonge, L. W. D., Iversen, B. V., Arvidsson, J. und Forkman, J.** (2012): Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil. *Soil and Tillage Research*. 122: 42–51.
- Bishop, A.** (1961): The measurement of pore pressure in the triaxial test. *Conf. British Nat. Soc. Int. Soil Mech. Found. Engrg.*, Butterworths, London: 38–46.
- Blackwell, P. S., Ringrose-Voase, A. J., Jayawardane, N. S., Olsson, K. A., Mckenzie, D. C. und Mason, W. K.** (1990): The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to air to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. *Journal of Soil Science*. 41 (2): 215–228.
- Blake, G. und Hartge, K. H.** (1986): Particle Density. In: A. Klute (Hrsg.), *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods*. Amer. Soc. Agron. and Soil Sci. Soc. Amer., Madison (Wisconsin), USA: 363–375.
- Blume, H.-P., Brümmer, G. W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M., Thiele-Bruhn, S. und Welp, G.** (2010): *Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Blume, H.-P., Stahr, K. und Leinweber, P.** (2011): *Bodenkundliches Praktikum: Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, Land- und Forstwirte, Geo- und Umweltwissenschaftler*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Bohne, H. und Hartge, K. H.** (1982): Auswirkungen der Gefügegeometrie auf den Wuchs von Getreidekeimlingen. *Mitteilungen Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft*. 34: 141–144.
- Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, A., Imeson, A. C. und Soriano-Soto, M. D.** (2001): Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. *CATENA*. 44 (1): 47–67.
- Bretz, F., Hothorn, T. und Westfall, P.** (2011): *Multiple Comparisons Using R*. Chapman & Hall/CRC, London.

- Bronick, C. J. und Lal, R.** (2005): Soil structure and management: a review. *Geoderma*. 124 (1-2): 3–22. ISSN: 0016-7061.
- Casagli, N., Rinaldi, M., Gargini, A. und Curini, A.** (1999): Pore water pressure and streambank stability: results from a monitoring site on the Sieve River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*. 24 (12): 1095–1114.
- Casagrande, A.** (1936): The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. Discussion in Proc. 1st Int Conf. Soil Mech. Found. Eng. Cambridge. 3: 60–64.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y. und Arrouays, D.** (2000): Organic Matter Influence on Clay Wettability and Soil Aggregate Stability. *Soil Science Society of America Journal*. 64 (4): 1479.
- Coops, H., Geilen, N., Verheij, H. J., Boeters, R. und Velde, G. v. D.** (1996): Interactions between waves, bank erosion and emergent vegetation: an experimental study in a wave tank. *Aquatic Botany*. 53 (3-4): 187–198.
- Crosato, A.** (2009): Physical explanations of variations in river meander migration rates from model comparison. *Earth Surface Processes and Landforms*. 34 (15): 2078–2086.
- da Silva, A. P., Kay, B. D. und Perfect, E.** (1997): Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. *Soil and Tillage Research*. 44 (1–2): 81–93.
- Daly, E. R., Miller, R. B. und Fox, G. A.** (2015): Modeling streambank erosion and failure along protected and unprotected composite streambanks. *Advances in Water Resources*. Im Druck.
- Dam, R. F., Mehdi, B. B., Burgess, M. S. E., Madramootoo, C. A., Mehuys, G. R. und Callum, I. R.** (2005): Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. *Soil and Tillage Research*. 84 (1): 41–53.
- Dapporto, S., Rinaldi, M., Casagli, N. und Vannocci, P.** (2003): Mechanisms of riverbank failure along the Arno River, central Italy. *Earth Surf. Process. Landforms*. 28 (12): 1303–1323.
- Dörner, J. und Horn, R.** (2009): Direction-dependent behaviour of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage. *Soil and Tillage Research*. 102 (2): 225–232.
- Dunne, T. et al.** (1990): Hydrology, mechanics, and geomorphic implications of erosion by subsurface flow. *Special Paper-Geological Society of America*. 252: 1–28.
- DVWK** (1995): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Minralböden. Teil I: Mechanische Belastbarkeit. *DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft Heft*. 234: 1–12.

- DVWK** (1997): Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden. Teil II: Auflastabhängige Veränderung von bodenphysikalischen Kennwerten. DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft Heft. 235: 1–7.
- Ekwe, E. I.** (1990): Organic-matter effects on soil strength properties. *Soil and Tillage Research*. 16 (3): 289–297.
- Erken, A. und Ulker, B. C.** (2007): Effect of cyclic loading on monotonic shear strength of fine-grained soils. *Engineering Geology*. 89: 243–257.
- Fazekas, O.** (2006): Bedeutung von Bodenstruktur und Wasserspannung als stabilisierende Kenngrößen gegen intensive mechanische Belastungen in einer Parabraunerde aus Löss unter Pflug- und Mulchsaat. Bd. 67. Schriftenreihe des Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- Fazekas, O. und Horn, R.** (2005): Zusammenhang zwischen hydraulischer und mechanischer Bodenstabilität in Abhängigkeit von der Belastungsdauer. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 168 (1): 60–67.
- Feagin, R. A., Lozada-Bernard, S. M., Ravens, T. M., Möller, I., Yeager, K. M. und Baird, A. H.** (2009): Does vegetation prevent wave erosion of salt marsh edges? *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 106 (25): 10109–10113.
- Ferrero, A., Lipiec, J., Turski, M. und Nosalewicz, A.** (2007): Stability and sorptivity of soil aggregates in grassed and cultivated sloping vineyards. *Polish Journal of Soil Science*. 40 (1): 1–8.
- Flügge, G. und Uliczka, K.** (1996): Schiffbedingte Wellen unter spezifischen Randbedingungen von Seewasserstraßen. *Dresdner wasserbauliche Mitteilungen*. 9: 75–90.
- Fox, G. A., Wilson, G. V., Periketi, R. K. und Cullum, R. F.** (2006): Sediment Transport Model for Seepage Erosion of Streambank Sediment. *Journal of Hydrologic Engineering*. 11 (6): 603–611.
- Fox, G. A., Wilson, G. V., Simon, A., Langendoen, E. J., Akay, O. und Fuchs, J. W.** (2007): Measuring streambank erosion due to ground water seepage: correlation to bank pore water pressure, precipitation and stream stage. *Earth Surface Processes and Landforms*. 32 (10): 1558–1573.
- Freitag, C., Hochfeld, B. und Ohle, N.** (2007): Lebensraum Tideelbe. *Coastline Reports*. 9: 69–79.
- Führböter, A.** (1986): Model and prototype tests for wave impact and run-up on a uniform 1:4 slope. *Coastal Engineering*. 10 (1): 49–84.
- Führböter, A.** (1991): Wellenbelastung von Deich- und Deckwerksböschungen. *Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft*. 47: 225–282.

- Gebhardt, S., Fleige, H. und Horn, R.** (2009): Effect of compaction on pore functions of soils in a Saalean moraine landscape in North Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 172 (5): 688–695.
- Gosselink, J., Hatton, R. und Hopkinson, C.** (1984): Relationship of organic carbon and mineral content to bulk density in Louisiana marsh soils. *Soil Science*. 137 (3): 177–180.
- Gratchev, I. B., Sassa, K., Osipov, V. I. und Sokolov, V. N.** (2006): The liquefaction of clayey soils under cyclic loading. *Engineering Geology*. 86: 70–84.
- Hagerty, D.** (1991a): Piping/Sapping Erosion. I: Basic Considerations. *Journal of Hydraulic Engineering*. 117 (8): 991–1008.
- Hagerty, D.** (1991b): Piping/Sapping Erosion. II: Identification/Diagnosis. *Journal of Hydraulic Engineering*. 117 (8): 1009–1025.
- Håkansson, I. und Lipiec, J.** (2000): A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil & Tillage Research*. 53: 71–85.
- Hartge, K. H.** (1966): Ein Haubenpermeameter zum schnellen Durchmessen zahlreicher Stechzylinderproben. *Z. Kulturtech. Flurbereinig.* 7: 155–163.
- Hartge, K. H.** (1988): The reference base for compaction state of soils. *Catena supplement*. 11: 73–77.
- Hartge, K. H. und Horn, R.** (2014): Einführung in die Bodenphysik. Hrsg. von **J. Bachmann and R. Horn and S. Peth**. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany.
- Heinonen, R.** (1982): Alleviation of soil compaction by natural forces and cultural practices. *Proc. Int. Conf. Land Clearing and Development, IITA Ibadan, Nigeria*.
- Heuscher, S. A., Brandt, C. C. und Jardine, P. M.** (2005): Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. *Soil Science Society of America Journal*. 69 (1): 51–56.
- Hicks, M. A. und Smith, I. M.** (1986): Influence of rate of porepressure generation on the stress–strain behaviour of soils. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 22 (3): 597–621.
- Hjulström, F.** (1935): Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. *Bulletin of the Geological Institut University of Uppsala*. 25: 221–527.
- Horn, R.** (1990): Aggregate characterization as compared to soil bulk properties. *Soil and Tillage Research*. 17 (3–4): 265–289.
- Horn, R.** (2004): Time Dependence of Soil Mechanical Properties and Pore Functions for Arable Soils. *Soil Science Society of America Journal*. 68 (4).

- Horn, R., Baumgartl, T., Kühner, S., Lebert, M. und Kayser, R.** (1991): Zur Bedeutung des Aggregierungsgrades für die Spannungsverteilung in strukturierten Böden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. 154 (1): 21–26.
- Horn, R. und Dexter, A. R.** (1989): Dynamics of soil aggregation in an irrigated desert loess. *Soil and Tillage Research*. 13 (3): 253–266.
- Horn, R., Domzzał, H., Słowińska-Jurkiewicz, A. und Ouwerkerk, C. v.** (1995): Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil and Tillage Research*. 35 (1): 23–36.
- Horn, R. und Fleige, H.** (2003): A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil and Tillage Research*. 73 (1): 89–99.
- Horn, R. und Fleige, H.** (2009): Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil and Tillage Research*. 102 (2): 201–208.
- Horn, R. und Lebert, M.** (1994): Soil compactability and compressibility. *Soil compaction in crop production*. 11: 45–69.
- Horn, R. und Smucker, A.** (2005): Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. *Soil and Tillage Research*. 82 (1): 5–14.
- Horn, R., Taubner, H., Wuttke, M. und Baumgartl, T.** (1994): Soil physical properties related to soil structure. *Soil and Tillage Research*. 30 (2): 187–216.
- Hu, W., Shao, M. A. und Si, B. C.** (2012): Seasonal changes in surface bulk density and saturated hydraulic conductivity of natural landscapes. *European Journal of Soil Science*. 63 (6): 820–830.
- Jastrow, J. D.** (1996): Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*. 28: 665–676.
- Jégou, D., Brunotte, J., Rogasik, H., Capowiez, Y., Diestel, H., Schrader, S. und Cluzeau, D.** (2002): Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using X-ray computed tomography: preliminary study. *European Journal of Soil Biology*. 38 (3–4): 329–336.
- Jia, D., Shao, X., Wang, H. und Zhou, G.** (2010): Three-dimensional modeling of bank erosion and morphological changes in the Shishou bend of the middle Yangtze River. *Advances in Water Resources*. 33 (3): 348–360.
- Karim, M. E. und Alam, M. J.** (2014): Effect of non-plastic silt content on the liquefaction behavior of sand–silt mixture. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 65: 142–150.

- Keller, T., Arvidsson, J., Dawidowski, J. B. und Koolen, A. J.** (2004): Soil precompression stress: II. A comparison of different compaction tests and stress–displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil and Tillage Research*. 77 (1): 97–108.
- Keller, T., Arvidsson, J., Schjønning, P., Lamandé, M., Stettler, M. und Weisskopf, P.** (2012): In Situ Subsoil Stress-Strain Behavior in Relation to Soil Precompression Stress. *Soil Science*. 177 (8): 490–497.
- Keller, T. und Håkansson, I.** (2010): Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma*. 154 (3): 398–406.
- Kézdi, Á.** (1964): *Bodenmechanik*. Bd. 1. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Kirby, J. M.** (1991): Strength and deformation of agricultural soil: measurement and practical significance. *Soil Use and Management*. 7 (4): 223–229.
- Köhler, H.-J.** (1997): Porenwasserdruckausbreitung im Boden, Messverfahren und Berechnungsansätze. *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau*. 75: 95–108.
- Köhler, H.-J.** (2000): Böschungs- und Sohlbelastung durch instationären Porenwasserdruck. *Dresdener wasserbauliche Mitteilungen*. 18: 93–111. ISSN: 3-86005-243-3.
- Krebstein, K., Janowsky, K. v., Reintam, E., Horn, R., Leeduks, J. und Kuht, J.** (2013): Soil compaction in a Cambisol under grassland in Estonia. *Zemdirbyste-Agriculture*. 100 (1): 33–38.
- Kremer, J., Wolf, B. und Matthies, D.** (2002): Verformungsverhalten künstlicher Makroporen unter variierenden Druck- und Bodenfeuchtebedingungen. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 165: 627–633.
- Krümmelbein, J., Peth, S. und Horn, R.** (2008): Determination of pre-compression stress of a variously grazed steppe soil under static and cyclic loading. *Soil and Tillage Research*. 99 (2): 139–148.
- Krümmelbein, J., Wang, Z., Zhao, Y., Peth, S. und Horn, R.** (2006): Influence of various grazing intensities on soil stability, soil structure and water balance of grassland soils in Inner Mongolia, PR China. *Advances in geoecology*. 38: 93–101.
- Kuncoro, P. H., Koga, K., Satta, N. und Muto, Y.** (2014): A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil pore structure indices. *Soil and Tillage Research*. 143: 180–187.
- Lade, P. V. und Yamamuro, J. A.** (1997): Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands. *Canadian geotechnical journal*. 34 (6): 918–928.

- Laird, N. M. und Ware, J. H.** (1982): Random-effects models for longitudinal data. *Biometrics*: 963–974.
- Lal, R.** (2006): *Encyclopedia of Soil Science*. CRC Press. 1600 S. ISBN: 9780849350535.
- Larson, W. E. und Gupta, S. C.** (1980): Estimating Critical Stress in Unsaturated Soils from Changes in Pore Water Pressure During Confined Compression¹. *Soil Science Society of America Journal*. 44 (6): 1127.
- Lebert, M.** (1989): Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Bd. 12. *Bayreuther Bodenkundlichen Berichte*.
- Lebert, M., Böken, H. und Glante, F.** (2007): Soil compaction—indicators for the assessment of harmful changes to the soil in the context of the German Federal Soil Protection Act. *Journal of Environmental Management*. 82 (3): 388–397.
- Lebert, M. und Horn, R.** (1991): A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil and Tillage Research*. 19 (2–3): 275–286.
- Lestariningsih, I. D., Widianto und Hairiah, K.** (2013): Assessing Soil Compaction with Two Different Methods of Soil Bulk Density Measurement in Oil Palm Plantation Soil. *Procedia Environmental Sciences*. 17: 172–178.
- Lindow, N., Fox, G. A. und Evans, R. O.** (2009): Seepage erosion in layered stream bank material. *Earth Surface Processes and Landforms*. 34 (12): 1693–1701.
- Lipiec, J., Turski, M., Hajnos, M. und Świeboda, R.** (2015): Pore structure, stability and water repellency of earthworm casts and natural aggregates in loess soil. *Geoderma*. 243–244: 124–129.
- Liu, C.-W., Cheng, S.-W., Yu, W.-S. und Chen, S.-K.** (2003): Water infiltration rate in cracked paddy soil. *Geoderma*. 117 (1): 169–181.
- Lundgren, H.** (1969): Wave shock forces: an analysis of deformations and forces in the wave and in the foundation. *Proc. Symp. Research on Wave Action*, Technical University Delft, Delft. 4.
- Matthews, G. P., Laudone, G. M., Gregory, A. S., Bird, N. R. A., G. Matthews, A. G. D. und Whalley, W. R.** (2010): Measurement and simulation of the effect of compaction on the pore structure and saturated hydraulic conductivity of grassland and arable soil. *Water Resources Research*. 46 (5).
- Meier, D.** (2014): *Die Unterelbe: Vom Urstromtal bis zur Elbvertiefung*. Boyens Buchverlag, Heide, Holst. 216 S. ISBN: 9783804213944.

- Ménard, L. und Broise, Y.** (1975): Theoretical and practical aspect of dynamic consolidation. en. *Géotechnique*. 25 (1): 3–18.
- Merdun, H., Çınar, Ö., Meral, R. und Apan, M.** (2006): Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Research*. 90 (1–2): 108–116.
- Midgley, T. L., Fox, G. A. und Heeren, D. M.** (2012): Evaluation of the bank stability and toe erosion model (BSTEM) for predicting lateral retreat on composite streambanks. *Geomorphology*. 145–146: 107–114.
- Mora, J. L. und Lázaro, R.** (2014): Seasonal changes in bulk density under semiarid patchy vegetation: the soil beats. *Geoderma*. 235–236: 30–38.
- Mordhorst, A., Zimmermann, I., Peth, S. und Horn, R.** (2012): Effect of hydraulic and mechanical stresses on cyclic deformation processes of a structured and homogenized silty Luvic Chernozem. *Soil and Tillage Research*. 125: 3–13.
- Mosaddeghi, M. R., Hemmat, A., Hajabbasi, M. A. und Alexandrou, A.** (2003): Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in central Iran. *Soil and Tillage Research*. 70 (1): 53–64.
- Mosaddeghi, M. R., Koolen, A. J., Hajabbasi, M. A., Hemmat, A. und Keller, T.** (2007): Suitability of pre-compression stress as the real critical stress of unsaturated agricultural soils. *Biosystems Engineering*. 98 (1): 90–101.
- Moses, G. G., Rao, S. N. und Rao, P. N.** (2003): Undrained strength behaviour of a cemented marine clay under monotonic and cyclic loading. *Ocean Engineering*. 30 (14): 1765–1789.
- Nakisa, M., Maimum, A., Yasser, M. A., Behrouzi, F., Jaswar Koto, A., Priyanto, A., Sian, A. und Ghazanfari, S.** (2014): Ship Navigation Effect on Sedimentation in Restricted Waterways. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*. 69 (7): 143–147.
- Nanson, G., Krusenstierna, A. v., Bryant, E. A. und Renilson, M. R.** (1994): Experimental measurements of river-bank erosion caused by boat-generated waves on the Gordon river, Tasmania. *Regulated Rivers: Research and Management*. 9: 1–14.
- Nissen, B.** (1998): Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von repräsentativen Ackerböden der Bundesrepublik Deutschland - bodenphysikalischer Ansatz. Bd. 50. Dissertation, Schriftenreihe des Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität, Kiel.

- Oades, J.** (1993): The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*. 56: 377–400.
- Oades, J. und Waters, A.** (1991): Aggregate hierarchy in soils. *Soil Research*. 29 (6): 815–828.
- Odeh, I. O. A. und Onus, A.** (2008): Spatial Analysis of Soil Salinity and Soil Structural Stability in a Semiarid Region of New South Wales, Australia. *Environmental Management*. 42 (2).
- Owoputi, L. O. und Stolte, W. J.** (2001): The role of seepage in erodibility. *Hydrological Processes*. 15: 13–22.
- Partheniades, E.** (1965): Erosion and deposition of cohesive soils. *Journal of the Hydraulics Division*. 91 (1): 105–139.
- Peng, X. H., Horn, R., Zhang, B. und Zhao, Q. G.** (2004): Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompacted Ultisols. *Soil and Tillage Research*. 76 (2): 125–137.
- Peng, X., Horn, R. und Smucker, A.** (2007): Pore Shrinkage Dependency of Inorganic and Organic Soils on Wetting and Drying Cycles. *Soil Science Society of America Journal*. 71 (4): 1095–1104.
- Peth, S.** (2004): Bodenphysikalische Untersuchungen zur Trittbelastung von Böden bei der Rentierwirtschaft an borealen Wald- und subarktisch-alpinen Tundrenstandorten. Bd. 64. Schriftenreihe des Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- Peth, S., Rostek, J., Zink, A., Mordhorst, A. und Horn, R.** (2010): Soil testing of dynamic deformation processes of arable soils. *Soil and Tillage Research*. 106 (2): 317–328.
- Peth, S. und Horn, R.** (2006): The mechanical behavior of structured and homogenized soil under repeated loading. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 169: 401–410.
- Peth, S., Horn, R., Fazekas, O. und Richards, B. G.** (2006): Heavy soil loading its consequence for soil structure, strength, deformation of arable soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 169: 775–783.
- Prange, W.** (1978): Das Ca/Mg-Verhältnis in den Marschböden, eine Folge postsedimentärer Faktoren. *Eiszeitalter und Gegenwart*. 28: 167–178.
- R Development Core Team** (2013): *R: A language and environment for statistical computing*. URL: <http://www.R-project.org>.
- Rasse, D. P., Smucker, A. J. M. und Santos, D.** (2000): Alfalfa Root and Shoot Mulching Effects on Soil Hydraulic Properties and Aggregation. *Soil Science Society of America Journal*. 64 (2): 725–731.

- Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Horn, R. und Håkansson, I.** (2009): Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*. 102 (2): 242–254.
- Reszkowska, A., Krümmelbein, J., Peth, S., Horn, R., Zhao, Y. und Gan, L.** (2010): Influence of grazing on hydraulic and mechanical properties of semiarid steppe soils under different vegetation type in Inner Mongolia, China. *Plant and Soil*. 340 (1-2): 59–72.
- Reynolds, W. D., Yang, X. M., Drury, C. F., Zhang, T. Q. und Tan, C. S.** (2003): Effects of selected conditioners and tillage on the physical quality of a clay loam soil. *Canadian Journal of Soil Science*. 83 (4): 381–393.
- Riedel-Lorjé, J. C., Möller-Lindenhof, N., Vaessen, B. und Elbe, W.** (1992): Salzgehalts-und Trübstoffverhältnisse in dem oberen Brackwassergebiet der Elbe. Wassergütestelle Elbe.
- Rinaldi, M. und Casagli, N.** (1999): Stability of streambanks formed in partially saturated soils and effects of negative pore water pressures: the Sieve River (Italy). *Geomorphology*. 26: 253–277.
- Rinaldi, M., Casagli, N., Dapporto, S. und Gargini, A.** (2004): Monitoring and modelling of pore water pressure changes and riverbank stability during flow events. *Earth Surface Processes and Landforms*. 29 (2): 237–254.
- Roberts, J., Jepsen, R., Gotthard, D. und Lick, W.** (1998): Effects of Particle Size and Bulk Density on Erosion of Quartz Particles. *Journal of Hydraulic Engineering*. 124 (12): 1261–1267.
- Rolinski, S. und Eichweber, G.** (2000): Deformations of the tidal wave in the elbe estuary and their effect on suspended particulate matter dynamics. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*. 25 (4): 355–358.
- Rowell, D. L.** (1997): *Bodenkunde: Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen*. Springer, Berlin.
- Rücknagel, J., Hofmann, B., Paul, R., Christen, O. und Hülsbergen, K.-J.** (2007): Estimating pre-compression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. *Soil and Tillage Research*. 92 (1-2): 213–220.
- Salire, E. V., Hammel, J. E. und Hardcastle, J. H.** (1994): Compression of intact subsoils under short-duration loading. *Soil and Tillage Research*. 31: 235–248.
- Sánchez-Girón, V., Andreu, E. und Hernanz, J. L.** (1998): Response of five types of soil to simulated compaction in the form of confined uniaxial compression tests. *Soil and Tillage Research*. 48 (1–2): 37–50.

- Schaarschmidt, F. und Vaas, L.** (2009): Analysis of Trials with Complex Treatment Structure Using Multiple Contrast Tests. *Hortscience*. 44 (1): 188–195.
- Schäffer, B., Mueller, T. L., Stauber, M., Müller, R., Keller, M. und Schulin, R.** (2008a): Soil and macro-pores under uniaxial compression. II. Morphometric analysis of macro-pore stability in undisturbed and repacked soil. *Geoderma*. 146 (1–2): 175–182.
- Schäffer, B., Stauber, M., Mueller, T., Müller, R. und Schulin, R.** (2008b): Soil and macro-pores under uniaxial compression. I. Mechanical stability of repacked soil and deformation of different types of macro-pores. *Geoderma*. 146 (1): 183–191.
- Semmel, H., Horn, R., Hell, U., Dexter, A. R. und Schulze, E. D.** (1990): The dynamics of soil aggregate formation and the effect on soil physical properties. *Soil Technology*. 3 (2): 113–129.
- Simms, P. H. und Yanful, E. K.** (2001): Measurement and estimation of pore shrinkage and pore distribution in a clayey till during soil-water characteristic curve tests. *Canadian Geotechnical Journal*. 38 (4): 741–754.
- Simon, A. und Collison, A. J. C.** (2002): Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surface Processes and Landforms*. 27 (5): 527–546.
- Simon, A., Curini, A., Darby, S. E. und Langendoen, E. J.** (2000): Bank and near-bank processes in an incised channel. *Geomorphology*. 35 (3–4): 193–217.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. und 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.
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A. und Paustian, K.** (2002): Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*. 241 (2): 155–176.
- Sladen, J. A., D'Hollander, R. D., Krahn, J. und Mitchell, D. E.** (1985): Back analysis of the Nerlerk berm liquefaction slides. *Canadian Geotechnical Journal*. 22 (4): 579–588.
- Snyder, V. A. und Miller, R. D.** (1985): Tensile Strength of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*. 49 (1): 58–65.
- Soane, B. D.** (1990): The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. *Soil and Tillage Research*. 16 (1–2): 179–201.
- Spaccini, R. und Piccolo, A.** (2013): Effects of field managements for soil organic matter stabilization on water-stable aggregate distribution and aggregate stability in three agricultural soils. *Journal of Geochemical Exploration*. 129: 45–51.

- Stahl, H., Marschall, K., Freytag, A. und Götze, H.** (2009): Bodendruck im Grünland. Bd. 3. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Freistaat Sachsen.
- Stoke, G. G.** (1845): On the Theories of the Internal Friction of Fluids in Motion, and of the Equilibrium and Motion of Elastic Solids. Transactions of the Cambridge Philosophical Society. 8: 287–305.
- Stoppe, N.** (2015): Rheologische Untersuchungen an tidebeeinflussten Uferböden der Elbe als Grundlage für die Entwicklung mikromechanischer Pedotransferfunktionen. Bd. 106. Dissertation, Schriftenreihe des Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- Strahler, A. H. und Strahler, A. N.** (2009): Physische Geographie. Auflage: 4., vollst. überarb. und erw. Aufl. UTB, Stuttgart, Stuttgart (Hohenheim). 688 S.
- Suuster, E., Ritz, C., Roostalu, H., Reintam, E., Kölli, R. und Astover, A.** (2011): Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils. Geoderma. 163 (1): 74–82.
- Tollner, E. W., Calvert, G. V. und Langdale, G.** (1990): Animal trampling effects on soil physical properties of two Southeastern U.S. ultisols. Agriculture, Ecosystems & Environment. 33 (1): 75–87.
- Tuli, A., Hopmans, J. W., Rolston, D. E. und Moldrup, P.** (2005): Comparison of Air and Water Permeability between Disturbed and Undisturbed Soils. Soil Science Society of America Journal. 69 (5): 1361–1371.
- Ullrich, C. R., Hagerty, D. J. und Holmberg, R. W.** (1986): Surficial failures of alluvial stream banks. Canadian Geotechnical Journal. 23 (3): 304–316.
- Uteau, D., Pagenkemper, S. K., Peth, S. und Horn, R.** (2013): Root and time dependent soil structure formation and its influence on gas transport in the subsoil. Soil and Tillage Research. 132: 69–76.
- Van Genuchten, M. T.** (1980): A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Science Society of America Journal. 44: 892–898.
- Van Genuchten, M. T., Leij, F., Yates, S. et al.** (1991): The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory.
- Verbeke, G. und Molenberghs, G.** (2008): Linear Mixed Models for Longitudinal Data. Springer New York, New York.
- Whalley, W. R., Matthews, G. P. und Ferraris, S.** (2012): The effect of compaction and shear deformation of saturated soil on hydraulic conductivity. Soil and Tillage Research. 125: 23–29.

- Whalley, W. R., Watts, C. W., Gregory, A. S., Mooney, S. J., Clark, L. J. und Whitmore, A. P.** (2008): The effect of soil strength on the yield of wheat. *Plant and Soil*. 306 (1): 237–247.
- Wichtmann, T., Niemunis, A. und Triantafyllidis, T.** (2005): Setzungsakkumulation in nichtbindigen Böden unter hochzyklischer Belastung. *Bautechnik*. 82 (1): 18–27.
- Wilson, G. V., Periketi, R. K., Fox, G. A., Dabney, S. M., Shields, F. D. und Cullum, R. F.** (2007): Soil properties controlling seepage erosion contributions to streambank failure. *Earth Surf. Process. Landforms*. 32 (3): 447–459.
- Wilson, N. E. und Elgohary, M. M.** (1974): Consolidation of Soils Under Cyclic Loading. *Canadian Geotechnical Journal*. 11 (3): 420–423.
- Xenaki, V. C. und Athanasopoulos, G. A.** (2003): Liquefaction resistance of sand–silt mixtures: an experimental investigation of the effect of fines. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 23 (3): 1–12.
- Yilmaz, Y., Mollamahmutoglu, M., Ozaydin, V. und Kayabalid, K.** (2008): Experimental investigation of the effect of grading characteristics on the liquefaction next term resistance of various graded previous termsands. *Engineering Geology*. 100: 91–100.
- Yıldırım, H. und Erşan, H.** (2007): Settlements under consecutive series of cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 27 (6): 577–585.
- Zhang, H.** (1994): Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. *Soil and Tillage Research*. 31 (2): 263–275.
- Zhang, H. und Hartge, K. H.** (1990): Die Kohäsion ungesättigter Sandböden und deren Beeinflussung durch organische Substanz. *Soil Technology*. 3 (4): 311–326.
- Zhang, H. und Horn, R.** (1995): Bewertung von Vorlandbewirtschaftungsverfahren nach bodenphysikalischen Kriterien. *Forschungsvorhaben des Landesamtes für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig Holstein*.
- Zhang, H. und Hartge, K. H.** (1995a): Mechanical properties of soils as influenced by the incorporation of organic matter. Hartge, K.H., Stewart, B.A. Eds. , *Advances in Soil Science: Soil structure, its development and function*. CRC Press, Boca Raton: S. 98–108.

A Anhang

Tabelle A.1: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünlandprofil am Standort ES1 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES1		Grünland			Koordinaten: N5919582 E3583068								
Tiefe cm	P_v kPa	c kPa	φ °	cn3	cn6	cn15	ρ_t g/cm ³	k_f cm/d	GPV	LK	FK	nFK	TW
										Vol.-%			
10	44	26,2	32,2	0,0254	0,0341	0,0121	1,2	150,5	57,9	10,3	47,2	36,4	10,8
10	37			0,0292	0,0307	0,0252	1,2	232,8					
10	39			0,0267	0,0411	0,0122	1,2	415,8					
10	36			0,0283	0,0156	0,0197	1,1	93,9					
10	33			0,0234	0,0214	0,0167	1,3	106,1					
30	28	7,0	36,8	0,0075	0,0055	0,0124	1,5	1169,4	39,9	29,7	9,6	5,8	3,9
30	40			0,0131	0,0079	0,0049	1,5	965,2					
30	23			0,0048	0,0070	0,0056	0,9	610,4					
30	20			0,0043	0,0036	0,0037	1,5	433,1					
30	16			0,0052	0,0099	0,0040	1,4	701,9					
50	14	13,2	34,7	0,0067	0,0045		1,5	1139,3	38,5	32,6	5,9	3,4	2,5
50	11			0,0083	0,0058	0,0041	1,5	1089,6					
50	9			0,0049	0,0045	0,0055	1,5	1110,1					
50	14			0,0085	0,0052	0,0059	1,5	1377,4					
50	13			0,0147	0,0075	0,0096	1,5	1019,2					
70	49	8,8	37,5	0,0072	0,0067	0,0049	1,5	738,5	38,5	31,7	6,8	3,3	3,4
70	30			0,0097	0,0054	0,0032	1,5	542,8					
70	12			0,0070	0,0065	0,0057	1,5	1042,3					
70	59			0,0035	0,0054	0,0049	1,5	798,1					
70	45			0,0037	0,0080	0,0023	1,5	784,5					

Tabelle A.2: Bodenphysikalische Kennwerte für das Röhrichtprofil am Standort ES1 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES1		Röhricht					Koordinaten: N5919587 E3583051						
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%		
10	39	3,7	36,5	0,0062	0,0117	0,0077	1,4	738,5	43,4	31,0	13,1	10,4	2,7
10	44			0,0059	0,0061	0,0057	1,4	467,8					
10	44			0,0085	0,0081	0,0099	1,4	2344,1					
10	41			0,0055	0,0079	0,0039	1,4	816,9					
10	36			0,0063	0,0097	0,0049	1,3	701,2					
30	29			0,0100	0,0073	0,0066	1,5	257,5					
30	17	5,7	37,4	0,0063	0,0076	0,0062	1,6	582,4	39,7	23,6	17,9	16,3	1,5
30	45			0,0032	0,0082	0,0070	1,5	556,0					
30	25			0,0061	0,0057	0,0058	1,5	634,6					
30	25			0,0073	0,0053	0,0034	1,6	743,0					
30	29			0,0100	0,0073	0,0066	1,5	257,5					
50	42	13,3	33,2	0,0070	0,0072	0,0045	1,4	797,9	35,0	32,6	9,5	8,8	0,7
50	37			0,0020	0,0026	0,0068	1,6	621,9					
50	25			0,0031	0,0061	0,0054	1,5	598,7					
50	30			0,0057	0,0087	0,0081	1,5	425,9					
50	49			0,0019	0,0069	0,0049	1,6	478,5					

Tabelle A.3: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünland und Röhrichtprofil am Standort ES2 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohdichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES2		Grünland					Koordinaten: N5921647 E3575062							
Tiefe cm	P_v kPa	c kPa	φ °	cn3	cn6	cn15	ρ_t g/cm ³	k_f cm/d	GPV	LK	FK Vol.-%	nFK	TW	
10	54	11,3	33,6	0,0200	0,0149	0,0140	1,2	44,6	59,0	9,4	49,5	9,9	39,7	
10	19			0,0204	0,0180		1,2	318,9						
10	40			0,0165	0,0158	0,0211	1,1	245,5						
10	32			0,0118	0,0146	0,0109	1,1	800,7						
10	28			0,0109	0,0186	0,0227	1,1	127,0						
30	50	35,2	27,9	0,0061	0,0178	0,0066	1,2	7,6	57,3	6,2	51,0	13,5	37,5	
30	50			0,0101	0,0049	0,0065	1,3	9,1						
30	43			0,0053	0,0039	0,0041	1,1	0,1						
30	43			0,0091	0,0073	0,0048	1,2	207,1						
30	35			0,0139	0,0067	0,0065	1,2	28,2						
50	80	33,1	30,2	0,0065	0,0109	0,0061	1,2	2,2	56,2	0,7	55,6	24,3	31,3	
50	66			0,0067	0,0195	0,0162	1,4	4,8						
50	47			0,0028	0,0023	0,0030	1,7	71,9						
50	29			0,0084	0,0503	0,0054	1,2	2,5						
50	33			0,0048	0,0060	0,0181	1,3	9,5						
70	53	1,0	39,9	0,0164	0,0425	0,0104	1,2	4,3	55,2	7,6	47,8	32,2	15,6	
70	48			0,0164	0,0263	0,0107	1,1	37,7						
70	62			0,0081	0,0280	0,0186	1,2	124,5						
70	37			0,0179	0,0121	0,0187	1,0	112,1						
70	38			0,0164	0,0121	0,0103	1,0	90,6						
Standort ES2		Röhricht					Koordinaten: N5921714 E3575080							
10	37	18,3	35,2	0,0078	0,0344	0,0227	0,9	0,7	63,6	1,8	61,8	49,1	12,8	
10	31			0,0081	0,0153	0,0388	1,4	0,2						
10	43			0,0136	0,0703	0,0219	1,3	0,6						
10	33			0,0325	0,0346	0,0037	0,9	5,2						
10	32			0,0209	0,0533	0,0066	1,4	24,4						
30	63	4,6	40,3	0,0129	0,0114	0,0066	0,9	141,6	57,3	0,8	56,5	42,4	14,0	
30	57			0,0118	0,0101	0,0132	1,0	179,6						
30	44			0,0190	0,0338	0,0188	1,2	0,5						
30	56			0,0127	0,0128	0,0040	1,2	209,6						
30	73			0,0100	0,0205	0,0189	1,1	604,0						
50	75	4,9	38,4	0,0029	0,0062	0,0031	1,5	79,9	47,7	13,3	35,0	29,3	5,7	
50	39			0,0048	0,0062	0,0039	1,5	32,6						
50	27			0,0049	0,0037	0,0031	1,5	87,8						
50	40			0,0069	0,0050	0,0023	1,5	677,5						
50	29			0,0069	0,0065	0,0066	1,4	153,3						

Tabelle A.4: Bodenphysikalische Kennwerte für das Wattprofil am Standort ES2 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES2		Watt			Koordinaten: N5921739 E3575058								
Tiefe cm	P_v kPa	c kPa	φ °	cn3	cn6	cn15	ρ_t g/cm ³	k_f cm/d	GPV	LK	FK	nFK	TW
												Vol.-%	
10	90	18,7	32,4	0,0028	0,0027	0,0028	1,6	454,5	33,0	19,1	18,0	14,7	3,3
10	16			0,0022	0,0013	0,0040	1,6	532,4					
10	45			0,0023	0,0055	0,0039	1,6	488,3					
10	17			0,0058	0,0028	0,0042	1,6	370,9					
10	68			0,0023	0,0023	0,0045	1,6	436,5					
30	37	3,5	39,5	0,0040	0,0046	0,0042	1,6	19,7	40,8	10,7	31,2	24,0	7,3
30	42			0,0045	0,0031	0,0032	1,5	43,5					
30	52			0,0050	0,0057	0,0029	1,4	21,1					
30	41			0,0097	0,0052	0,0049	1,5	525,6					
30	56			0,0024	0,0054	0,0038	1,5	64,4					

Tabelle A.5: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünlandprofil am Standort ES3 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES3		Grünland					Koordinaten: N5926759 E3569972							
Tiefe cm	P_v kPa	c kPa	φ °	cn3	cn6	cn15	ρ_t g/cm ³	k_f cm/d	GPV	LK	FK	nFK	TW	
										Vol.-%				
10	41	8,9	39,6	0,0165	0,0319	0,0313	0,9	610,1	75,2	22,9	52,0	23,4	28,6	
10	21			0,0259	0,0245	0,0133	0,8	336,5						
10	31				0,0365	0,0147	1,1	363,3						
10	34			0,0553	0,0179	0,0112	1,0	234,9						
10	42			0,0110	0,0496	0,0544	1,1	352,0						
30	76	27,5	35,5	0,0096	0,0069	0,0092	1,0	322,6	59,2	0,8	58,3	25,7	32,6	
30	83			0,0084	0,0095	0,0062	1,0	45,6						
30	83			0,0039	0,0161	0,0045	1,0	5,7						
30	52			0,0091	0,0117	0,0037	1,0	31,4						
30	80				0,0095	0,0237	1,0	4,2						
50	111	13,2	32,8	0,0193	0,0048	0,0109	1,1	7,1	55,3	2,4	52,9	28,0	25,0	
50	84			0,0105	0,0083	0,0100	1,1	11,8						
50	52			0,0073	0,0159	0,0128	1,1	56,7						
50	47			0,0193	0,0143	0,0090	1,0	40,7						
50	47			0,0144	0,0138	0,0111	1,1	12,5						
70	46	16,0	36,7	0,0469	0,0138	0,0125	1,0	15,5	60,9	4,9	56,1	27,4	28,7	
70	57			0,0309	0,0150	0,0105	0,9	1,4						
70	49				0,0180	0,0096	1,0	19,1						
70	53			0,0245	0,0182	0,0110	0,9	57,1						
70	60			0,0129	0,0160	0,0152	0,9	82,2						

Tabelle A.6: Bodenphysikalische Kennwerte für das Röhricht- und Wattprofil am Standort ES3 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohdichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES3			Röhricht				Koordinaten: N5926647 E3569922						
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%		
10	46	8,5	35,5	0,0133	0,0259	0,0150	1,0	4,8	58,9	8,6	50,5	30,4	20,1
10	50			0,0222	0,0176	0,0098	1,0	500,9					
10	30			0,0200	0,0152	0,0153	1,0	17,6					
10	42			0,0110	0,0139	0,0188	1,1	55,5					
10	38			0,0175	0,0198	0,0081	1,2	12,9					
30	9	6,3	37,2		0,0044		1,6	725,0	35,9	30,2	5,8	2,5	3,3
30	20			0,0038	0,0045		1,5	846,3					
30	15			0,0043	0,0037	0,0030	1,5	1221,5					
30	15			0,0038	0,0033	0,0049	1,6	771,5					
30	17			0,0046	0,0071		1,6	749,3					
50	12	13,2	36,2	0,0023	0,0066	0,0055	1,5	112,6	41,8	21,9	20,3	15,9	4,5
50	10			0,0038	0,0058	0,0037	1,6	778,7					
50	14				0,0030	0,0041	1,6	11,9					
50	26			0,0051	0,0070	0,0042	1,5	190,6					
50	18			0,0057	0,0015	0,0027	1,6	33,8					
Standort ES3			Watt				Koordinaten: N5926521 E3569906						
10	19	0,0	38,5	0,0041	0,0021	0,0037	1,5	1037,2	37,4	33,1	5,0	2,7	2,2
10	16			0,0023	0,0043	0,0036	1,5	1133,4					
10	18			0,0052	0,0060	0,0023	1,5	1019,9					
10	17			0,0037	0,0041	0,0061	1,6	1639,9					
10	22			0,0023	0,0044	0,0030	1,5	1018,6					
30	22			0,0075	0,0046	0,0005	1,6	1159,4	42,4	35,1	7,3	2,0	5,3
30	17			0,0050	0,0052	0,0043	1,6	1127,3					
30	11			0,0066	0,0031	0,0029	1,5	1046,7					
30	17			0,0039		0,0036	1,6	1192,7					
30	15			0,0018	0,0014	0,0030	1,6	1114,4					

Tabelle A.7: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünland und Röhrichtprofil am Standort ES4 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohdichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES4		Grünland					Koordinaten: N5930700 E3569887							
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW	
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%			
10	39	16,2	33,4	0,0171	0,0102	0,0056	1,3	405,4	46,9	23,4	23,2	7,6	15,6	
10	37			0,0027	0,0094	0,0071	1,4	347,6						
10	33			0,0172	0,0111	0,0088	1,3	596,9						
10	24			0,0195	0,0133	0,0182	1,2	582,4						
10	43			0,0147	0,0165	0,0090	1,4	1180,0						
30	21	15,8	38,7	0,0093	0,0093	0,0078	1,6	126,3	42,9	14,9	27,8	3,9	23,9	
30	40			0,0100	0,0092	0,0108	1,5	193,5						
30	20			0,0103	0,0067	0,0088	1,5	679,2						
30	26			0,0148	0,0090	0,0088	1,6	228,9						
30	41			0,0102	0,0070	0,0108	1,5	1748,8						
50	15	14,1	38,3	0,0099	0,0105	0,0087	1,5	1556,0	42,2	11,4	30,8	0,2	30,6	
50	18			0,0143	0,0108	0,0065	1,6	3,8						
50	19			0,0102	0,0162	0,0065	1,6	357,4						
50	26			0,0152	0,0054	0,0093	1,6	798,7						
50	27			0,0110	0,0059	0,0153	1,6	10,6						
70	24	10,6	33,8	0,0088	0,0053	0,0097	1,6	486,5	38,3	32,0	6,3	2,1	4,2	
70	19			0,0115	0,0045	0,0148	1,5	914,3						
70	23			0,0169	0,0057	0,0089	1,6	1017,6						
70	15			0,0067	0,0048	0,0058	1,6	1100,0						
70	10			0,0132	0,0042	0,0085	1,6	745,9						
Standort ES4		Röhricht					Koordinaten: N5930567 E3569872							
10	36	39,3	29,4	0,0402	0,0319	0,0125	0,7	149,0	54,2	6,4	48,2	13,9	34,4	
10	35			0,0275	0,0119	0,0254	0,9	0,8						
10	41			0,0251	0,0270	0,0139	1,1	4,4						
10	31			0,0320	0,0105	0,0104	1,3	3,9						
10	33			0,0435	0,0106	0,0370	0,9	0,1						
30	47	12,0	38,0	0,0148	0,0075	0,0097	1,4	0,6	45,2	4,0	41,3	25,7	15,6	
30	43			0,0205	0,0121	0,0110	1,5	0,3						
30	39			0,0103	0,0103	0,0126	1,2	0,3						
30	20			0,0118	0,0085	0,0070	1,2	1000,0						
30	31			0,0242	0,0106	0,0111	1,4	0,3						
50	44	31,4	32,1	0,0076	0,0108	0,0053	1,4	97,2	46,2	5,1	41,5	19,0	22,5	
50	21			0,0108	0,0122	0,0076	1,4	22,6						
50	19			0,0136	0,0079	0,0086	1,4	0,1						
50	51			0,0135	0,0115	0,0070	1,3	180,2						
50	34			0,0072	0,0094	0,0073	1,4	2,0						

Tabelle A.8: Bodenphysikalische Kennwerte für das Wattprofil am Standort ES4 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES4		Watt			Koordinaten: N5930701 E3569963								
Tiefe cm	P_v kPa	c kPa	φ °	cn3	cn6	cn15	ρ_t g/cm ³	k_f cm/d	GPV	LK	FK	nFK	TW
										Vol.-%			
10	15	14,5	36,3	0,0088	0,0068		1,6	5,7	44,1	10,0	34,6	28,2	6,5
10	16			0,0082	0,0113		1,6	19,0					
10	23			0,0072	0,0079		1,7	47,1					
10	18			0,0110	0,0074		1,7	45,9					
10	20			0,0097	0,0039		1,4	63,4					
30	43	17,8	35,5	0,0137	0,0084		1,3	355,2	53,0	10,1	43,8	33,1	10,7
30	50			0,0140	0,0094		1,2	1525,5					
30	34			0,0097	0,0117		1,4	4,0					
30	9			0,0146	0,0046		1,8	269,8					
30	47			0,0123	0,0117		1,4	4,4					

Tabelle A.9: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünland am Standort ES5 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES5		Grünland					Koordinaten: N5934139 E3552324						
Tiefe cm	P_v kPa	c kPa	φ °	cn3	cn6	cn15	ρ_t g/cm ³	k_f cm/d	GPV	LK	FK	nFK	TW
											Vol.-%		
10	23	6,0	36,3	0,0088	0,0091	0,0288	1,4	1477,2	48,0	34,9	12,8	2,5	10,3
10	15			0,0031	0,0242	0,0102	1,4	2491,5					
10	28			0,0102	0,0151	0,0100	1,4	1187,3					
10	8			0,0094	0,0167	0,0238	1,2	1356,8					
10	21			0,0146	0,0250	0,0201	1,4	1157,6					
30	14	5,1	36,5	0,0072	0,0084	0,0114	1,4	1184,6	37,8	8,7	28,9	17,3	11,6
30	19			0,0084	0,0065	0,0071	1,5	1072,2					
30	17			0,0046	0,0089	0,0104	1,5	1514,1					
30	19			0,0045	0,0134	0,0064	1,4	1221,3					
30	14			0,0078	0,0063	0,0095	1,5	1361,5					
50	14	0,1	37,7	0,0060	0,0122	0,0076	1,5	1095,2	38,1	32,8	5,3	2,0	3,2
50	25			0,0061	0,0054	0,0044	1,5	890,4					
50	36			0,0035		0,0061	1,6	993,6					
50	11			0,0050	0,0045	0,0064	1,4	1581,5					
50	18			0,0048	0,0083	0,0132	1,5	1109,7					
70	25	6,6	38,3	0,0041	0,0108	0,0079	1,5	622,7	37,8	24,8	13,2	10,7	2,5
70	35			0,0049	0,0105	0,0077	1,6	1299,4					
70	25			0,0050	0,0056	0,0106	1,6	2103,7					
70	12			0,0052	0,0065	0,0100	1,6	1136,8					
70	22			0,0044	0,0077	0,0085	1,6	654,4					

Tabelle A.10: Bodenphysikalische Kennwerte für das Röhricht- und Wattprofil am Standort ES5 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohdichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES5		Röhricht					Koordinaten: N5933427 E3554132							
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW	
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%			
10	37	1,8	37,1	0,0131	0,0123	0,0148	1,4	1355,6	39,5	32,6	7,1	3,5	3,5	
10	11			0,0077	0,0121	0,0125	1,3	1230,4						
10	42			0,0069	0,0128	0,0209	1,2	1206,6						
10	30			0,0082	0,0118	0,0181	1,3	1962,2						
10	34			0,0096	0,0144	0,0147	1,2	1548,3						
30	21	10,5	35,4	0,0107	0,0105	0,0134	1,3	1222,3	38,9	34,4	4,6	1,8	2,8	
30	34			0,0106	0,0098	0,0128	1,4	944,8						
30	36			0,0067	0,0142	0,0094	1,4	1090,2						
30	50			0,0091	0,0083	0,0128	1,4	1201,1						
30	31			0,0080	0,0146	0,0140	1,4	2298,8						
50	15	6,1	33,5	0,0080	0,0090	0,0151	1,4	833,9	39,2	34,6	4,5	1,8	2,7	
50	33			0,0083	0,0143	0,0142	1,4	865,4						
50	38			0,0066	0,0140	0,0151	1,4	901,5						
50	43			0,0074	0,0080	0,0121	1,3	1121,2						
50	35			0,0090	0,0111	0,0112	1,4	810,9						
Standort ES5		Watt					Koordinaten: N5934256 E3552357							
10	30	12,8	36,2	0,0046	0,0112		1,6	1042,1	37,6	28,3	9,3	4,9	4,4	
10	29			0,0030	0,0054		1,7	667,8						
10	40			0,0043	0,0067		1,7	702,5						
10	16			0,0041	0,0083		1,6	1037,2						
10	33			0,0037	0,0071		1,7	2116,7						

Tabelle A.11: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünland- und Röhrichtprofil am Standort ES6 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohdichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES6		Grünland					Koordinaten: N5936254 E3550647							
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW	
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%			
10	26	26,3	26,9	0,0080	0,0102	0,0064	1,6	1401,2	40,7	36,1	4,5	1,3	3,1	
10	30			0,0114	0,0119	0,0082	1,6	1678,7						
10	26			0,0075	0,0092	0,0065	1,5	1373,2						
10	38			0,0083	0,0112	0,0072	1,6	1344,3						
10	16			0,0052	0,0122	0,0081	1,4	1305,1						
30	28	16,7	31,6	0,0099	0,0095	0,0120	1,7	2574,6	34,9	35,9	4,0	2,6	1,4	
30	26			0,0072	0,0065	0,0057	1,6	1560,5						
30	29			0,0091	0,0096	0,0070	1,7	2270,0						
30	27			0,0084	0,0073	0,0060	1,7	1781,2						
30	21			0,0058	0,0086	0,0087	1,6	1665,6						
50	44	12,0	35,4	0,0095	0,0126	0,0065	1,6	1630,0	29,6	32,7	5,3	3,0	2,3	
50	37			0,0090	0,0108	0,0071	1,6	1438,5						
50	31			0,0105	0,0075	0,0100	1,5	1383,5						
50	33			0,0084	0,0095	0,0096	1,7	1656,6						
50	37			0,0106	0,0075	0,0113	1,5	1422,9						
70	60	4,1	39,6	0,0077	0,0047	0,0054	1,7	1833,3	26,0	33,9	4,9	2,5	2,4	
70	13			0,0073	0,0063	0,0065	1,6	2033,2						
70	34			0,0093	0,0045	0,0055	1,6	2314,1						
70	13			0,0047	0,0062	0,0069	1,7	2104,7						
70	27			0,0094	0,0079	0,0065	1,4	2041,6						
Standort ES6		Röhricht					Koordinaten: N5936243 E3550787							
10	32	8,0	36,5	0,0176	0,0273	0,0223	1,3	416,0	46,2	20,4	28,0	19,0	9,0	
10	31			0,0237	0,0242	0,0149	1,3	377,3						
10	17			0,0356	0,0190	0,0106	1,2	645,0						
10	27			0,0206	0,0196	0,0193	1,2	478,1						
10	30			0,0152	0,0239	0,0136	1,2	1721,8						
30	30	7,7	35,0	0,0102	0,0053	0,0074	1,6	1314,2	28,2	33,2	6,3	5,1	1,2	
30	67			0,0061	0,0073	0,0072	1,6	1571,4						
30	30			0,0067	0,0060	0,0080	1,6	1248,3						
30	15			0,0057	0,0083	0,0060	1,6	1184,3						
30	20			0,0086	0,0083	0,0068	1,8	2093,6						
50	47	4,5	36,5	0,0075	0,0066	0,0076	1,6	1187,6	24,1	27,8	7,1	6,3	0,7	
50	30			0,0059	0,0078	0,0078	1,5	1124,3						
50	33			0,0085	0,0052	0,0087	1,6	1408,1						
50	73			0,0074	0,0093	0,0081	1,6	1176,3						
50	56			0,0108	0,0081	0,0084	1,6	1302,4						

Tabelle A.12: Bodenphysikalische Kennwerte für das Wattprofil am Standort ES6 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES6		Watt						Koordinaten: N5936249 E3550731					
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%		
10	30	15,8	35,2	0,0078	0,0052		1,7	447,6	35,5	26,4	9,1	4,3	4,8
10	35			0,0066	0,0070		1,8	1254,9					
10	29			0,0081	0,0052		1,8	2228,4					
10	33			0,0076	0,0052		1,7	591,5					
10	20			0,0102	0,0076		1,8	302,4					

Tabelle A.13: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünland und Röhrichtprofil am Standort ES7 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohdichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES7		Grünland					Koordinaten: N5936558 E3544745							
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW	
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%			
10	26	26,3	26,9	0,0080	0,0102	0,0064	1,6	1401,2	40,7	36,1	4,5	1,3	3,1	
10	30	26,3	26,9	0,0114	0,0119	0,0082	1,6	1678,7						
10	26	26,3	26,9	0,0075	0,0092	0,0065	1,5	1373,2						
10	38	26,3	26,9	0,0083	0,0112	0,0072	1,6	1344,3						
10	16	26,3	26,9	0,0052	0,0122	0,0081	1,4	1305,1						
30	28	16,7	31,6	0,0099	0,0095	0,0120	1,7	2574,6	34,9	35,9	4,0	2,6	1,4	
30	26	16,7	31,6	0,0072	0,0065	0,0057	1,6	1560,5						
30	29	16,7	31,6	0,0091	0,0096	0,0070	1,7	2270,0						
30	27	16,7	31,6	0,0084	0,0073	0,0060	1,7	1781,2						
30	21	16,7	31,6	0,0058	0,0086	0,0087	1,6	1665,6						
50	44	12,0	35,4	0,0095	0,0126	0,0065	1,6	1630,0	29,6	32,7	5,3	3,0	2,3	
50	37	12,0	35,4	0,0090	0,0108	0,0071	1,6	1438,5						
50	31	12,0	35,4	0,0105	0,0075	0,0100	1,5	1383,5						
50	33	12,0	35,4	0,0084	0,0095	0,0096	1,7	1656,6						
50	37	12,0	35,4	0,0106	0,0075	0,0113	1,5	1422,9						
70	60	4,1	39,6	0,0077	0,0047	0,0054	1,7	1833,3	26,0	33,9	4,9	2,5	2,4	
70	13	4,1	39,6	0,0073	0,0063	0,0065	1,6	2033,2						
70	34	4,1	39,6	0,0093	0,0045	0,0055	1,6	2314,1						
70	13	4,1	39,6	0,0047	0,0062	0,0069	1,7	2104,7						
70	27	4,1	39,6	0,0094	0,0079	0,0065	1,4	2041,6						
Standort ES7		Röhricht					Koordinaten: N5936568 E3544705							
10	32	8,0	36,5	0,0176	0,0273	0,0223	1,3	416,0	46,2	20,4	28,0	19,0	9,0	
10	31	8,0	36,5	0,0237	0,0242	0,0149	1,3	377,3						
10	17	8,0	36,5	0,0356	0,0190	0,0106	1,2	645,0						
10	27	8,0	36,5	0,0206	0,0196	0,0193	1,2	478,1						
10	30	8,0	36,5	0,0152	0,0239	0,0136	1,2	1721,8						
30	30	7,7	35,0	0,0102	0,0053	0,0074	1,6	1314,2	28,2	33,2	6,3	5,1	1,2	
30	67	7,7	35,0	0,0061	0,0073	0,0072	1,6	1571,4						
30	30	7,7	35,0	0,0067	0,0060	0,0080	1,6	1248,3						
30	15	7,7	35,0	0,0057	0,0083	0,0060	1,6	1184,3						
30	20	7,7	35,0	0,0086	0,0083	0,0068	1,8	2093,6						
50	47	4,5	36,5	0,0075	0,0066	0,0076	1,6	1187,6	24,1	27,8	7,1	6,3	0,7	
50	30	4,5	36,5	0,0059	0,0078	0,0078	1,5	1124,3						
50	33	4,5	36,5	0,0085	0,0052	0,0087	1,6	1408,1						
50	73	4,5	36,5	0,0074	0,0093	0,0081	1,6	1176,3						
50	56	4,5	36,5	0,0108	0,0081	0,0084	1,6	1302,4						

Tabelle A.14: Bodenphysikalische Kennwerte für das Wattprofil am Standort ES7 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohdichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES7		Watt					Koordinaten: N5936526 E3544745						
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%		
10	30	15,8	35,2	0,0078	0,0052		1,7	447,6	35,5	26,4	9,1	4,3	4,8
10	35	15,8	35,2	0,0066	0,0070		1,8	1254,9					
10	29	15,8	35,2	0,0081	0,0052		1,8	2228,4					
10	33	15,8	35,2	0,0076	0,0052		1,7	591,5					
10	20	15,8	35,2	0,0102	0,0076		1,8	302,4					

Tabelle A.15: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünlandprofil am Standort ES8 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES8		Grünland					Koordinaten: N5938916 E3543980						
Tiefe cm	P_v kPa	c kPa	φ °	cn3	cn6	cn15	ρ_t g/cm ³	k_f cm/d	GPV	LK	FK	nFK	TW
											Vol.-%		
10	30	13,4	40,1		0,0093	0,0082	1,1	44,3	59,4	9,3	49,9	9,0	40,9
10	26				0,0140	0,0188	1,1	212,5					
10	28				0,0140	0,0150	1,1	12,7					
10	30				0,0123	0,0106	1,1	180,6					
10	17				0,0172	0,0140	1,1	40,5					
30	40	28,5	31,0		0,0091	0,0088	1,1	21,4	63,9	9,9	53,8	25,0	28,7
30	45				0,0133	0,0097	1,0	351,0					
30	45				0,0111	0,0061	1,1	70,4					
30	39				0,0126	0,0094	1,0	18,2					
30	46				0,0127	0,0091	1,1	24,2					
50	66	14,8	33,9		0,0155	0,0088	0,9	46,4	65,8	9,9	56,2	19,6	36,6
50	56				0,0121	0,0138	0,8	19,6					
50	78				0,0125	0,0132	1,0	66,0					
50	58				0,0124	0,0067	0,9	68,3					
50	30				0,0126	0,0098	1,0	56,8					

Tabelle A.16: Bodenphysikalische Kennwerte für das Röhricht und Wattprofil am Standort ES8 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohdichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES8		Röhricht			Koordinaten: N5938730 E3544000								
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%		
10	8	8,2	41,9		0,0147	0,0102	1,4	657,0	48,5	13,4	35,3	31,5	3,8
10	17				0,0101	0,0104	1,4	442,6					
10	7				0,0093	0,0099	1,4	321,8					
10	6				0,0137	0,0125	1,4	495,2					
10	7				0,0147	0,0076	1,3	142,2					
30	15	23,2	39,4		0,0078	0,0089	1,5	809,6	43,9	13,7	30,3	26,7	3,6
30	17				0,0048	0,0069	1,5	1098,0					
30	47				0,0089	0,0068	1,6	626,7					
30	21				0,0063	0,0046	1,5	627,5					
30	31				0,0054	0,0070	1,5	654,0					
50	43	22,6	37,3		0,0147	0,0156	1,1	7,5	66,2	10,0	56,3	17,0	39,3
50	42				0,0147	0,0227	1,1	3,0					
50	45				0,0092	0,0083	1,1	589,6					
50	36				0,0208	0,0140	1,0	1,9					
50	45				0,0210	0,0067	1,1	6,3					
Standort ES8		Watt			Koordinaten: N5938720 E3543952								
10	23	13,3	40,8		0,0093		1,4	25,1	45,9	1,5	44,4	39,8	4,6
10	28				0,0118		1,4	12,7					
10	15				0,0098		1,4	31,5					
10	19				0,0082		1,5	19,1					
10	9				0,0085		1,4	27,2					

Tabelle A.17: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünland- und Röhrichtprofil am Standort ES10 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES10		Grünland			Koordinaten: N5939821 E3539452								
Tiefe cm	P_v kPa	c kPa	φ °	cn3	cn6	cn15	ρ_t g/cm ³	k_f cm/d	GPV	LK	FK	nFK	TW
											Vol.-%		
10	9	9,5	36,5		0,0154	0,0074	1,4	1676,3	38,6	32,9	5,5	5,1	0,4
10	15				0,0109	0,0072	1,4	2043,9					
10	16				0,0102	0,0110	1,5	2177,3					
10	18				0,0102	0,0074	1,4	2046,7					
10	14				0,0123	0,0097	1,3	1987,4					
30	28	10,8	34,3		0,0144	0,0082	1,6	1386,7	36,7	32,4	4,9	4,4	0,5
30	41				0,0095	0,0079	1,5	1485,7					
30	18				0,0065	0,0058	1,6	1704,0					
30	22				0,0121	0,0073	1,5	1498,8					
30	15				0,0057	0,0052	1,6	1503,9					
50	37	16,4	32,2		0,0051	0,0047	1,6	1708,7	31,5	33,4	5,4	5,0	0,4
50	20				0,0056	0,0119	1,6	1707,1					
50	11				0,0073	0,0080	1,6	1760,5					
50	20				0,0067	0,0092	1,5	1670,9					
50	19				0,0072	0,0094	1,5	1685,8					
70	29	12,6	34,9		0,0059	0,0056	1,6	1527,3	32,5	35,8	7,6	6,7	0,9
70	40				0,0099	0,0068	1,5	1617,3					
70	29				0,0086	0,0051	1,6	1780,9					
70	16				0,0082	0,0082	1,6	1601,4					
70	35				0,0066	0,0084	1,5	1562,5					
Standort ES10		Röhricht			Koordinaten: N5939622 E539713								
10	29	10,2	36,3		0,0112	0,0078	1,4	967,5	45,8	21,2	25,2	22,9	2,3
10	32				0,0118	0,0099	1,4	295,1					
10	20				0,0139	0,0105	1,5	461,1					
10	24				0,0141	0,0169	1,4	65,5					
10	41				0,0144	0,0178	1,3	416,6					
30	31	13,0	33,8		0,0069	0,0068	1,4	449,4	49,2	25,1	24,9	20,6	4,2
30	21				0,0135	0,0069	1,3	562,4					
30	26				0,0111	0,0083	1,4	451,7					
30	26				0,0127	0,0064	1,4	579,2					
30	29				0,0080	0,0076	1,4	650,7					

Tabelle A.18: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünland- und Röhrichtprofil am Standort ES11 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohdichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES11		Grünland			Koordinaten: N5942801 E3538506								
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%		
10	24	22,6	36,6		0,0258	0,0226	0,7	77,1	68,1	14,1	53,8	8,6	45,2
10	29				0,0351	0,0221	0,8	89,8					
10	28				0,0340	0,0227	0,7	41,2					
10	28				0,0253	0,0116	0,8	484,5					
10	22				0,0261	0,0181	0,8	40,5					
30	37	25,8	28,4		0,0163	0,0127	0,9	25,9	60,6	10,9	50,4	7,1	43,3
30	45				0,0252	0,0170	1,0	8,4					
30	37				0,0149	0,0120	1,0	79,9					
30	62				0,0137	0,0081	1,0	114,5					
30	42				0,0199	0,0124	0,9	11,4					
50	34	25,8	21,2		0,0281	0,0263	0,9	4,8	66,2	9,4	57,9	9,9	48,0
50	27				0,0254	0,0213	0,8	25,6					
50	28				0,0174	0,0268	0,9	21,5					
50	31				0,0148	0,0143	1,0	33,9					
50	41				0,0173	0,0308	1,0	12,6					
70	45	14,6	29,8		0,0276	0,0383	0,8	1,1	71,0	9,2	61,9	2,8	59,1
70	45				0,0203	0,0283	0,9	90,9					
70	59				0,0289	0,0234	0,9	13,1					
70	59				0,0152	0,0351	0,7	101,8					
70	45				0,0232	0,0189	1,0	56,8					
Standort ES11		Röhricht			Koordinaten: N5942726 E3538014								
10	19	26,0	26,9		0,1793	0,1189	0,4	242,9	82,3	12,2	70,6	36,6	33,9
10	19				0,1274	0,1762	0,4	1971,7					
10	18				0,0121	0,1200	0,4	8,1					
10	14				0,1505	0,1449	0,3	385,5					
10	13				0,1112	0,2382	0,3	39,6					
30	37	17,3	35,4		0,0275	0,0230	0,9	27,0	68,5	3,5	65,1	39,7	25,5
30	30				0,0362	0,0423	0,9	179,8					
30	36				0,0214	0,0207	0,8	9,0					
30	28				0,0258	0,0366	1,2	138,0					
30	29				0,0245	0,0172	1,0	464,2					
50	23	26,0	33,9		0,0119	0,0089	1,4	98,6	48,5	7,8	42,5	8,2	34,3
50	36				0,0173	0,0077	1,4	3,3					
50	37				0,0080	0,0070	1,4	3,0					
50	16				0,0103	0,0082	1,4	0,3					
50	31				0,0142	0,0088	1,4	2,4					

Tabelle A.19: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünland- und Röhrichtprofil am Standort ES12 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES12		Grünland			Koordinaten: N5944099 E3536829								
Tiefe cm	P_v kPa	c kPa	φ °	cn3	cn6	cn15	ρ_t g/cm ³	k_f cm/d	GPV	LK	FK	nFK	TW
											Vol.-%		
10	28	16,1	33,5		0,0157	0,0045	1,3	517,2	43,5	26,2	16,2	13,9	2,2
10	23				0,0068	0,0065	1,5	811,2					
10	16				0,0086	0,0124	1,4	755,0					
10	19				0,0077	0,0135	1,3	1479,3					
10	15				0,0095	0,0067	1,4	1095,0					
30	7	5,5	37,8		0,0054	0,0099	1,3	591,5	41,8	25,0	16,1	13,6	2,5
30	10				0,0099	0,0118	1,4	663,5					
30	17				0,0092	0,0155	1,3	784,8					
30	8				0,0082	0,0095	1,4	894,8					
30	24				0,0106	0,0132	1,4	628,0					
50	32	6,2	35,6		0,0131	0,0091	1,4	721,0	42,6	25,6	17,0	15,5	1,5
50	25				0,0074	0,0130	1,4	672,9					
50	29				0,0105	0,0102	1,4	590,1					
50	29				0,0131	0,0148	1,3	402,3					
50	33				0,0115	0,0092	1,5	562,9					
70	20	6,6	35,4		0,0130	0,0117	1,4	801,7	41,3	27,1	14,3	10,9	3,4
70	19				0,0113	0,0085	1,4	845,8					
70	11				0,0074	0,0192	1,4	865,6					
70	14				0,0136	0,0162	1,3	1180,4					
70	17				0,0117	0,0173	1,4						
Standort ES12		Röhricht			Koordinaten: N5944017 E3536994								
10	22	6,1	36,8		0,0203	0,0162	0,8	863,3	67,3	15,0	53,4	25,1	28,3
10	39				0,0171	0,0248	0,8	71,4					
10	39				0,0254	0,0150	0,9	1262,9					
10	38				0,0205	0,0234	0,8	247,3					
10	41				0,0246	0,0283	0,9	238,6					
30	49	6,0	40,1		0,0291	0,0135	0,9	90,2	64,8	4,2	60,8	34,4	26,3
30	43				0,0295	0,0157	0,9	141,2					
30	25				0,0250	0,0138	0,9	795,2					
30	30				0,0194	0,0209	0,8	176,1					
30	27				0,0224	0,0231	0,8	2,8					
50	25	25,5	26,9		0,0815	0,0435	0,6	997,5	73,5	12,8	62,4	23,9	38,5
50	25				0,0689	0,0418	0,6	101,2					
50	18				0,0427	0,0348	0,6	16,9					
50	29				0,0504	0,0557	0,5	188,7					
50	35				0,0334	0,0520	0,6	165,7					

Tabelle A.20: Bodenphysikalische Kennwerte für das Wattprofil am Standort ES12 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES12		Watt					Koordinaten: N5943995 E3536991						
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%		
10	19	6,8	38,0	0,0328			1,2	6,4	56,6	3,8	53,0	35,5	17,6
10	19			0,0216			1,0	23,5					
10	20			0,0349			1,0	12,8					
10	20			0,0310			1,0	8,5					
10	15			0,0531			1,0	146,7					
30	37	23,7	35,8	0,0089			1,4	20,8	48,8	0,8	48,1	41,2	6,9
30	22			0,0152			1,5	8,4					
30	35			0,0068			1,2	28,5					
30	39			0,0128			1,2	15,8					
30	18			0,0059			1,4	42,4					

Tabelle A.21: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünlandprofil am Standort ES13 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES13		Grünland					Koordinaten: N5950813 E3534748						
Tiefe cm	P_v kPa	c kPa	φ °	cn3	cn6	cn15	ρ_t g/cm ³	k_f cm/d	GPV	LK	FK	nFK	TW
									Vol.-%				
10	61	4,5	36,4		0,0083	0,0062	1,5	433,8	38,5	28,3	9,8	7,3	2,5
10	32				0,0094	0,0084	1,6	431,0					
10	27				0,0067	0,0020	1,5	630,1					
10	32				0,0047	0,0028	1,5	532,6					
10	35				0,0023	0,0050	1,4	503,9					
30	33	8,2	39,2		0,0054	0,0046	1,6	329,2	37,4	25,8	11,4	10,1	1,4
30	24				0,0042	0,0078	1,6	426,2					
30	8				0,0030	0,0065	1,6	437,1					
30	43				0,0043	0,0079	1,6	542,3					
30	28				0,0009	0,0046	1,7	359,8					
50	19	11,6	36,1		0,0092	0,0052	1,6	556,5	39,5	30,1	9,5	5,6	3,9
50	14				0,0068	0,0069	1,6	425,4					
50	14				0,0070	0,0003	1,6	468,1					
50	29				0,0048	0,0085	1,6	425,2					
50	26				0,0065	0,0053	1,6	424,8					
70	26	0,0	39,2		0,0048	0,0056	1,5	440,2	41,6	31,7	11,4	9,8	1,6
70	70				0,0056	0,0053	1,4	633,6					
70	29				0,0057	0,0076	1,5	653,6					
70	16				0,0100	0,0045	1,5	631,5					
70	35				0,0065	0,0092	1,5	660,9					

Tabelle A.22: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünlandprofil am Standort ES14 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohdichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES14		Grünland					Koordinaten: N5951720 E3533790						
Tiefe cm	P_v kPa	c kPa	φ °	cn3	cn6	cn15	ρ_t g/cm ³	k_f cm/d	GPV	LK	FK	nFK	TW
										Vol.-%			
10	55	1,8	40,8		0,0195	0,0134	1,5	382,9	50,0	7,1	42,6	25,1	17,5
10	46				0,0125	0,0147	1,2	836,4					
10	27				0,0236	0,0074	1,0	673,9					
10	39				0,0146	0,0070	1,3	162,9					
10	29				0,0130	0,0109	1,2	105,0					
30	64	22,5	33,5		0,0063	0,0038	1,3	212,3	48,5	8,8	39,4	28,1	11,3
30	92				0,0090	0,0073	1,3	1100,3					
30	77				0,0057	0,0052	1,3	339,7					
30	78				0,0129	0,0048	1,3	450,8					
30	73				0,0051	0,0054	1,4	122,5					
50	18	19,0	32,2		0,0193	0,0175	0,9	4,8	63,9	7,1	56,9	27,1	29,8
50	51				0,0208	0,0110	0,9	4,5					
50	39				0,0097	0,0166	0,9	329,6					
50	39				0,0142	0,0155	0,9	156,6					
50	52				0,0193	0,0234	0,9	134,6					
70	31	7,9	36,7		0,0172	0,0167	1,1	89,2	54,8	3,7	51,1	21,8	29,4
70	26				0,0194	0,0199	1,1	2,8					
70	35				0,0100	0,0153	1,0	243,7					
70	43				0,0105	0,0089	1,1	0,4					
70	37				0,0312	0,0150	1,1	16,4					

Tabelle A.23: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünland- und Röhrichtprofil am Standort ES15 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohdichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES15		Grünland					Koordinaten: N5951560 E3531122							
Tiefe cm	P_v kPa	c kPa	φ °	cn3	cn6	cn15	ρ_t g/cm ³	k_f cm/d	GPV	LK	FK	nFK	TW	
											Vol.-%			
10	33	23,8	34,5	0,0116	0,0054	0,0099	1,4	52,6	48,2	3,1	44,9	36,1	8,8	
10	19				0,0068	0,0099	1,3	17,1						
10	36				0,0099	0,0071	1,3	15,7						
10	35				0,0078	0,0084	1,3	9,3						
10	21				0,0088	0,0089	1,3	4,5						
30	71	17,5	35,9	0,0054	0,0098	0,0115	1,3	12,1	45,1	7,9	36,8	26,9	9,9	
30	42				0,0101	0,0043	1,4	25,5						
30	54				0,0078	0,0083	1,4	10,3						
30	39				0,0094	0,0075	1,4	19,8						
30	31				0,0052	0,0065	1,3	163,6						
50	58	11,0	38,0	0,0092	0,0072	0,0051	1,3	30,6	50,2	3,0	47,2	42,5	4,7	
50	38				0,0058	0,0082	1,3	26,1						
50	40				0,0085	0,0105	1,3	27,8						
50	24				0,0094	0,0070	1,3	102,6						
50	28				0,0053	0,0088	1,3	22,7						
70	63	14,3	33,8	0,0122	0,0092	0,0070	1,2	20,2	48,7	6,6	42,2	30,3	11,9	
70	50				0,0054	0,0058	1,2	22,3						
70	38				0,0080	0,0059	1,3	13,6						
70	52				0,0216	0,0075	1,3	13,7						
70	67				0,0139	0,0040	1,2	11,3						
Standort ES15		Röhricht					Koordinaten: N5951550 E3531140							
10	46	20,6	38,0	0,0126	0,0034		1,5	357,8	44,2	0,5	43,7	34,0	9,6	
10	28				0,0091		1,4	2,1						
10	34				0,0081		1,4	14,2						
10	32				0,0128		1,4	5,5						
10	26				0,0124		1,4	57,5						
30	58	12,0	37,2	0,0133	0,0082	0,0109	1,1	94,2	44,5	0,3	44,2	41,7	2,5	
30	15				0,0096	0,0061	1,4	27,8						
30	39				0,0123	0,0080	1,2	965,5						
30	44				0,0098	0,0113	1,2	22,5						
30	39				0,0112	0,0081	1,4	179,8						
50	50	12,9	36,5	0,0273	0,0141	0,0053	1,4	30,1	57,1	1,0	56,1	42,7	13,5	
50	41				0,0159	0,0161	1,0	213,7						
50	67				0,0090	0,0036	1,1	177,6						
50	49				0,0106	0,0219	1,3	286,4						
50	41				0,0071	0,0137	1,0	133,2						

Tabelle A.24: Bodenphysikalische Kennwerte für das Wattprofil am Standort ES15 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES15		Watt			Koordinaten: N5951570 E3531177								
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%		
10	19	17,1	35,7	0,0244	0,0193		1,1	41,3	51,8	0,9	50,9	40,9	10,0
10	29				0,0193		1,3	6,6					
10	17				0,0160		1,1	0,8					
10	29				0,0108		1,4	0,3					
10	33				0,0135		1,1	1037,7					
30	45	2,3	38,5	0,0503	0,0137		0,8	1,2	69,1	4,9	64,7	29,6	35,2
30	39				0,0177		0,8	33,0					
30	36				0,0208		0,8	142,0					
30	37				0,0243		0,9	36,1					
30	40				0,0118		1,1	93,3					

Tabelle A.25: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünlandprofil am Standort ES16 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES16		Grünland					Koordinaten: N5957945 E3528564							
Tiefe cm	P_v kPa	c kPa	φ °	cn3	cn6	cn15	ρ_t g/cm ³	k_f cm/d	GPV	LK	FK	nFK	TW	
												Vol.-%		
10	35	14,0	31,6	0,0180	0,0092	0,0081	1,3	52,4	57,0	7,2	49,7	10,3	39,4	
10	40	14,0	31,6	0,0132	0,0165	0,0105	1,2	121,4						
10	37	14,0	31,6	0,0175	0,0161	0,0084	1,3	243,0						
10	38	14,0	31,6	0,0128	0,0147	0,0117	1,3	58,9						
10	28	14,0	31,6	0,0091	0,0094	0,0133	1,2	30,0						
30	41	28,2	30,6	0,0140	0,0102	0,0140	1,3	121,4	52,6	6,1	46,6	9,4	37,1	
30	55	28,2	30,6	0,0167	0,0112	0,0113	1,1	0,3						
30	42	28,2	30,6	0,0093	0,0137	0,0094	1,3	60,9						
30	37	28,2	30,6	0,0166	0,0083	0,0180	1,2	0,1						
30	20	28,2	30,6	0,0151	0,0111	0,0092	1,3	0,5						
50	74	17,3	35,0	0,0154	0,0089	0,0136	1,2	0,3	54,0	2,0	51,9	26,0	25,9	
50	35	17,3	35,0	0,0150	0,0131	0,0078	1,4	0,1						
50	31	17,3	35,0	0,0104	0,0090	0,0056	1,3	0,4						
50	51	17,3	35,0	0,0077	0,0189	0,0066	1,3	0,6						
50	39	17,3	35,0	0,0132	0,0159	0,0075	1,3	0,9						
70	58	33,3	21,2	0,0155	0,0178	0,0104	1,1	14,8	59,3	6,0	53,7	12,4	41,3	
70	57	33,3	21,2	0,0087	0,0142	0,0057	1,2	0,0						
70	51	33,3	21,2	0,0165	0,0120	0,0093	0,9	0,6						
70	52	33,3	21,2	0,0132	0,0143	0,0058	1,1	0,0						
70	68	33,3	21,2	0,0177	0,0214	0,0102	1,1	34,1						

Tabelle A.26: Bodenphysikalische Kennwerte für das Röhricht- und Wattprofil am Standort ES16 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohdichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES16		Röricht					Koordinaten: N5957866 E3528429							
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW	
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%			
10	16	7,2	38,5	0,0078	0,0097	0,0076	1,5	570,8	46,1	28,4	18,1	13,5	4,6	
10	39	7,2	38,5	0,0101	0,0071	0,0099	1,3	555,3						
10	21	7,2	38,5	0,0105	0,0126	0,0083	1,4	681,9						
10	15	7,2	38,5	0,0093	0,0130	0,0062	1,5	970,2						
10	21	7,2	38,5	0,0092	0,0111	0,0093	1,4	1722,0						
30	37	11,6	39,8	0,0092	0,0080	0,0062	1,6	881,2	41,8	32,3	9,5	4,0	5,5	
30	7	11,6	39,8	0,0067	0,0092	0,0078	1,5	758,7						
30	52	11,6	39,8	0,0095	0,0082	0,0039	1,6	904,3						
30	8	11,6	39,8	0,0086	0,0113	0,0061	1,5	1036,2						
30	18	11,6	39,8	0,0054	0,0051	0,0061	1,6	892,9						
50	18	16,7	36,3	0,0124	0,0067	0,0128	1,6	261,0	39,4	23,8	19,9	16,4	3,5	
50	26	16,7	36,3	0,0065	0,0063	0,0084	1,6	1124,9						
50	27	16,7	36,3	0,0077	0,0058	0,0047	1,6	149,3						
50	36	16,7	36,3	0,0115	0,0096	0,0086	1,7	1182,4						
50	22	16,7	36,3	0,0054	0,0077	0,0086	1,7	818,7						
Standort ES16		Watt					Koordinaten: N5957879 E3528396							
10	40	6,1	40,6	0,0101	0,0032		1,7	695,2	41,8	29,1	12,7	8,4	4,2	
10	20	6,1	40,6	0,0064	0,0071		1,7	715,1						
10	3	6,1	40,6	0,0087	0,0113		1,7	592,3						
10	36	6,1	40,6	0,0055	0,0080		1,5	470,5						
10	24	6,1	40,6	0,0046	0,0050		1,6	668,0						

Tabelle A.27: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünland- und Röhrichtprofil am Standort ES18 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohdichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES18		Grünland			Koordinaten: N5966980 E3524817								
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%		
10	64	18,4	35,6		0,0081	0,0111	1,2	75,2	51,9	11,3	40,3	22,6	17,7
10	40				0,0118	0,0103	1,2	59,4					
10	55				0,0068	0,0167	1,2	21,9					
10	57				0,0121	0,0088	1,2	10,4					
10	29				0,0094	0,0160	1,3	114,8					
30	18	19,9	37,2		0,0110	0,0067	1,4	8,5	44,6	8,7	35,7	19,2	16,5
30	24				0,0081	0,0056	1,4	5,9					
30	34				0,0072	0,0120	1,4	25,7					
30	32				0,0134	0,0075	1,4	2,0					
30	29				0,0056	0,0062	1,4	1194,1					
50	33	15,6	38,8		0,0117	0,0117	1,3	67,8	46,7	11,0	35,9	20,7	15,2
50	26				0,0081	0,0091	1,4	1524,4					
50	28				0,0120	0,0097	1,3	0,6					
50	25				0,0061	0,0052	1,4	4,5					
50	32				0,0153	0,0048	1,4	3,6					
70	103	8,4	38,3		0,0072	0,0060	1,4	38,2	48,8	9,6	39,5	21,0	18,5
70	33				0,0096	0,0069	1,3	141,0					
70	33				0,0135	0,0075	1,3	4,6					
70	33				0,0114	0,0063	1,3	8,4					
70	35				0,0146	0,0114	1,3	8,2					
Standort ES18		Röhricht			Koordinaten: N5966935 E3524819								
10	10	9,6	38,0		0,1244	0,0499	0,6	394,8	76,0	21,4	55,5	38,4	17,1
10	12				0,1031	0,0859	0,7	1309,9					
10	16				0,1079	0,1061	0,9	1496,4					
10	16				0,1262	0,0921	0,7	106,1					
10	13				0,0512	0,1064	0,8	314,9					
30	26	9,3	38,2		0,0077	0,0107	1,5	502,3	43,1	27,1	18,2	16,8	1,4
30	26				0,0115	0,0090	1,5	667,6					
30	47				0,0163	0,0093	1,5	1003,9					
30	24				0,0105	0,0098	1,5	670,8					
30	18				0,0187	0,0192	1,5	677,4					
50	26	16,8	36,1		0,0069	0,0039	1,5	63,4	49,8	12,3	38,1	30,2	7,9
50	20				0,0081	0,0049	1,4	472,8					
50	18				0,0085	0,0045	1,4	1258,2					
50	38				0,0044	0,0067	1,5	213,9					
50	37				0,0086	0,0064	1,5	832,7					

Tabelle A.28: Bodenphysikalische Kennwerte für das Wattprofil am Standort ES18 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES18		Watt				Koordinaten: N5966542 E3524885							
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%		
10	43	15,3	38,9	0,0075			1,5	36,3	43,5	9,0	34,9	31,5	3,4
10	39			0,0056			1,6	31,8					
10	22			0,0080			1,4	29,6					
10	33			0,0089			1,4	48,6					
10	19			0,0078			1,4	82,9					
30	21	4,9	40,6	0,0079			1,6	0,8	49,1	8,4	41,1	22,2	18,9
30	32			0,0118			1,5	1,1					
30	20			0,0088			1,7	344,1					
30	40			0,0117			1,5	51,7					
30	34			0,0086			1,5	27,2					

Tabelle A.29: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünland und Röhrichtprofil am Standort ES19 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohdichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES19		Grünland			Koordinaten: N5969608 E3518040								
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%		
10	40	14,6	38,4		0,0079	0,0118	1,3	180,7	51,7	8,5	42,9	24,9	18,0
10	25				0,0116	0,0095	1,3	27,8					
10	29				0,0103	0,0095	1,3	81,5					
10	20				0,0087	0,0092	1,2	25,9					
10	30				0,0164	0,0078	1,2	46,0					
30	42	11,8	39,5		0,0095	0,0071	1,3	68,6	50,7	11,0	39,4	26,0	13,4
30	38				0,0075	0,0089	1,2	5,6					
30	41				0,0104	0,0059	1,3	52,1					
30	28				0,0086	0,0109	1,3	234,8					
30	24				0,0125	0,0077	1,3	12,3					
50	54	18,0	36,8		0,0081	0,0068	1,3	19,8	51,0	11,0	40,1	23,0	17,0
50	41				0,0074	0,0067	1,3	12,1					
50	30				0,0113	0,0110	1,2	14,7					
50	60				0,0096	0,0088	1,3	28,3					
50	42				0,0067	0,0113	1,3	21,8					
70	39	26,8	37,2		0,0063	0,0090	1,3	9,6	49,8	11,4	38,5	23,6	14,9
70	34				0,0123	0,0088	1,3	72,7					
70	18				0,0098	0,0063	1,3	361,0					
70	28				0,0071	0,0076	1,4	9,4					
70	39				0,0097	0,0095	1,3	11,0					
Standort ES19		Röhricht			Koordinaten: N5969629 E3518058								
10	44	2,7	40,0		0,0084	0,0084	1,2	26,4	49,7	17,7	32,1	19,8	12,3
10	39				0,0180	0,0172	1,2	103,8					
10	20				0,0143	0,0100	1,2	95,5					
10	33				0,0173	0,0139	1,2	74,4					
10	40				0,0115	0,0091	1,3	1055,4					
30	31	5,3	41,3		0,0318	0,0107	1,2	56,8	53,3	12,0	41,6	25,0	16,6
30	15				0,0172	0,0113	1,2	127,4					
30	27				0,0105	0,0097	0,9	59,5					
30	41				0,0148	0,0099	1,1	1295,1					
30	18				0,0110	0,0109	1,1	25,5					
50	47	17,4	37,6		0,0207	0,0091	1,1	93,0	55,9	10,7	46,2	19,5	26,6
50	25				0,0111	0,0115	1,1	94,0					
50	44				0,0077	0,0153	1,1	174,0					
50	70				0,0112	0,0106	1,1	359,1					
50	33				0,0115	0,0145	1,1	511,5					

Tabelle A.30: Bodenphysikalische Kennwerte für das Wattprofil am Standort ES19 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES19		Watt			Koordinaten: N5969631 E3518114								
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%		
10	20	22,8	37,7	0,0042			1,6	49,3	45,8	10,7	35,8	28,5	7,2
10	17			0,0068			1,6	93,3					
10	24			0,0090			1,6	49,7					
10	19			0,0045			1,6	114,0					
10	17			0,0133			1,6	56,3					
30	43	20,8	40,6	0,0088			1,3	98,3	44,1	11,4	33,5	29,5	4,0
30	31			0,0040			1,5	62,3					
30	26			0,0065			1,6	127,0					
30	25			0,0139			1,6	47,3					
30	30			0,0048			1,2	137,0					

Tabelle A.31: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünland- und Röhrichtprofil am Standort ES20 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES20		Grünland			Koordinaten: N5972526 E3516699								
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%		
10	42	23,1	38,9		0,0142	0,0112	1,0	51,8	63,1	9,3	53,6	12,0	41,6
10	60				0,0106	0,0164	1,0	37,9					
10	59				0,0142	0,0148	1,1	1,5					
10	55				0,0103	0,0108	1,1	35,6					
10	59				0,0142	0,0125	1,0	29,6					
30	41	27,8	36,3		0,0160	0,0132	1,2	665,7	49,4	25,3	24,1	4,3	19,8
30	49				0,0185	0,0185	1,3	1058,6					
30	47				0,0217	0,0182	1,2	351,9					
30	40				0,0147	0,0189	1,1	790,8					
30	36				0,0080	0,0137	1,1	272,2					
50	78	15,6	40,4		0,0130	0,0149	1,1	87,1	54,2	22,1	32,1	2,7	29,4
50	51				0,0181	0,0161	1,0	96,3					
50	57				0,0128	0,0120	1,2	12,8					
50	25				0,0148	0,0130	1,0	20,5					
50	34				0,0142	0,0232	1,0	20,6					
Standort ES20		Röhricht			Koordinaten: N5972319 E3516652								
10	25	11,2	38,2		0,0288	0,0307	1,0	1837,3	57,8	14,0	45,0	20,4	24,6
10	21				0,0226	0,0326	0,9	216,0					
10	24				0,0205	0,0220	1,0	365,6					
10	18				0,0428	0,0266	0,9	1755,5					
10	30				0,0256	0,0241	1,1	1143,4					
30	31	13,5	37,6		0,0087	0,0118	1,3	40,5	53,1	11,6	42,3	25,7	16,5
30	17				0,0125	0,0103	1,2	7,6					
30	32				0,0128	0,0112	1,4	59,7					
30	25				0,0152	0,0101	1,4	2256,8					
30	38				0,0308	0,0095	1,3	3683,8					
50	38	12,5	38,3		0,0114	0,0083	1,4	314,4	43,0	18,5	26,2	19,4	6,8
50	14				0,0115	0,0138	1,5	1,1					
50	14				0,0154	0,0060	1,4	409,4					
50	26				0,0076	0,0100	1,4	239,0					
50	21				0,0062	0,0059	1,7	109,6					

Tabelle A.32: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünland- und Röhrichtprofil am Standort ES21 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohdichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES21		Grünland			Koordinaten: N5969737 E3505251								
Tiefe cm	P_v kPa	c kPa	φ °	cn3	cn6	cn15	ρ_t g/cm ³	k_f cm/d	GPV	LK	FK	nFK	TW
										Vol.-%			
10	25	23,2	37,5		0,0089	0,0045	1,2	45,4	50,3	8,8	41,3	25,9	15,4
10	27				0,0086	0,0052	1,4	17,7					
10	15				0,0118	0,0096	1,3	10,9					
10	23				0,0069	0,0040	1,4	27,5					
10	17				0,0048	0,0155	1,3	24,2					
30	58	25,5	34,7		0,0105	0,0084	1,4	66,1	46,8	7,1	39,5	25,9	13,5
30	8				0,0063	0,0075	1,4	85,0					
30	22				0,0062	0,0112	1,4	13,8					
30	32				0,0096	0,0075	1,3	901,8					
30	13				0,0073	0,0074	1,4	29,7					
50	28	9,3	41,6		0,0097	0,0080	1,4	68,8	46,0	10,5	35,6	25,8	9,8
50	39				0,0065	0,0093	1,3	8,2					
50	29				0,0155	0,0076	1,3	66,5					
50	30				0,0176	0,0063	1,3	105,1					
50	32				0,0121	0,0085	1,4	61,2					
70	35	13,5	38,5		0,0059	0,0053	1,4	54,2	62,2	2,2	60,1	30,6	29,4
70	29				0,0049	0,0052	1,4	174,0					
70	26				0,0076	0,0064	1,4	67,3					
70	28				0,0061	0,0055	1,4	21,7					
70	26				0,0082	0,0063	1,4	97,2					
Standort ES21		Röhricht			Koordinaten: N5969798 E3505230								
10	34	12,7	41,5		0,0175	0,0170	1,1	972,9	60,9	15,2	46,7	25,4	21,3
10	33				0,0227	0,0130	1,0	35,2					
10	35				0,0228	0,0157	1,0	1175,4					
10	34				0,0275	0,0177	1,1	125,9					
10	34				0,0264	0,0252	1,1	1458,4					

Tabelle A.33: Bodenphysikalische Kennwerte für das Wattprofil am Standort ES21 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES21		Watt			Koordinaten: N5969824 E3505173								
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%		
10	24	14,4	32,7	0,0580			1,0	5,8	59,6	13,3	49,0	21,1	27,9
10	18			0,0563			0,7	41,7					
10	17			0,0715			0,9	8,4					
10	16			0,0337			1,0	9,7					
10	14			0,1005			0,9	12,4					
30	28	17,6	39,4	0,0077			1,4	8,3	41,6	11,4	32,0	21,4	10,6
30	17			0,0118			1,4	7,0					
30	16			0,0044			1,4	13,2					
30	34			0,0544			1,4	6,5					
30	29			0,0143			1,3	15,8					

Tabelle A.34: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünland- und Röhrichtprofil am Standort ES22 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohdichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES22		Grünland					Koordinaten: N5974529 E3502744							
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW	
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%			
10	54	30,3	29,3	0	0,0275	0,0193	1,0	747,1	58,4	14,8	43,5	9,1	34,4	
10	46				0,0172	0,0017	1,0	423,2						
10	37				0,0153	0,0121	1,0	2037,9						
10	49				0,0196	0,0184	1,0	301,6						
10	32				0,0168	0,0112	1,0	1953,3						
30	66	25,1	32,7	0	0,0103	0,0145	1,0	357,6	56,3	12,1	44,2	6,9	37,3	
30	48				0,0135	0,0124	1,1	149,6						
30	88				0,0120	0,0165	1,0	234,5						
30	65				0,0117	0,0115	1,1	417,2						
30	55				0,0081	0,0110	1,0	435,3						
50	54	9,3	34,4	0	0,0273	0,0103	1,0	0,2	59,4	2,3	57,1	20,0	37,1	
50	49				0,0134	0,0125	1,0	273,2						
50	52				0,0117	0,0212	1,1	1533,0						
50	48				0,0205	0,0158	1,0	972,8						
50	41				0,0231	0,0248	1,0	792,2						
70	37	13,5	31,7	0	0,0226	0,0131	1,0	6,9	62,2	2,2	60,1	30,6	29,4	
70	41				0,0390	0,0308	1,0	2,0						
70	41				0,0289	0,0195	1,0	0,5						
70	41				0,0236	0,0392	1,0	4,5						
70	44				0,0428	0,0143	1,0	85,3						
Standort ES22		Röhricht					Koordinaten: N5974254 E3502819							
10	24	4,7	37,4	0	0,0098	0,0278	1,1	11,3	58,0	7,1	51,3	18,2	33,1	
10	26				0,0114	0,0247	1,1	249,7						
10	37				0,0183	0,0124	1,0	25,9						
10	32				0,0147	0,0162	1,0	15,5						
10	52				0,0242	0,0093	1,1	30,4						
30	48	9,0	37,4	0	0,0161	0,0116	1,2		53,3	2,2	51,2	18,9	32,3	
30	41				0,0142	0,0110	1,0							
30	30				0,0152	0,0123	1,2							
30	39				0,0155	0,0222	1,2							
30	41				0,0117	0,0111	1,3							

Tabelle A.35: Bodenphysikalische Kennwerte für das Wattprofil am Standort ES22 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES22		Watt					Koordinaten: N5974122 E3502769						
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%		
10	16	6,4	36,3	0	0,0426		0,9	19,0	64,8	4,5	60,5	30,2	30,4
10	23				0,0487		1,0	9,5					
10	25				0,0310		1,0	85,4					
10	17				0,0385		0,9	18,4					
10	19				0,0415		0,9	86,7					
30	20	5,9	38,1	0	0,0388		1,0	6,3	58,7	1,8	57,0	27,7	29,3
30	23				0,0246		1,0	9,4					
30	24				0,0346		1,0	6,2					
30	21				0,0376		1,0	6,7					
30	22				0,0354		0,9	48,0					

Tabelle A.36: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünland- und Röhrichtprofil am Standort ES23 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohdichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES23		Grünland			Koordinaten: N5967194 E3497188								
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%		
10	27	3,2	43,2		0,0100	0,0083	1,3	62,5	50,0	8,0	41,7	30,7	11,0
10	34				0,0100	0,0061	1,3	26,0					
10	31				0,0059	0,0074	1,3	15,7					
10	37				0,0076	0,0109	1,3	12,3					
10	28				0,0145	0,0054	1,3	21,2					
30	71	12,0	39,3		0,0062	0,0115	1,2	14,7	53,5	10,9	42,5	21,6	20,9
30	73				0,0062	0,0065	1,2	30,2					
30	51				0,0088	0,0061	1,2	7,8					
30	51				0,0092	0,0082	1,3	4,9					
30	57				0,0083	0,0110	1,3	28,3					
50	65	9,2	38,0		0,0059	0,0129	1,3	19,4	52,1	14,9	37,3	26,8	10,5
50	57				0,0070	0,0073	1,3	24,7					
50	57				0,0112	0,0068	1,3	47,5					
50	44				0,0098	0,0060	1,3	28,4					
50	49				0,0096	0,0047	1,3	45,9					
70	30	5,6	41,2		0,0113	0,0072	1,4	22,3	50,7	11,2	39,7	28,0	11,7
70	30				0,0109	0,0087	1,3	137,1					
70	43				0,0084	0,0097	1,3	34,4					
70	26				0,0095	0,0083	1,3	73,5					
70	32				0,0090	0,0104	1,3	17,9					
Standort ES23		Röhricht			Koordinaten: N5967333 E3497203								
10	25	19,4	38,2		0,0372	0,0277	0,8	1426,7	68,6	9,4	59,5	35,8	23,7
10	28				0,0233	0,0391	0,9	12,2					
10	19				0,0286	0,0613	0,9	109,4					
10	10				0,0322	0,0225	0,7	23,7					
10	23				0,0176	0,0324	1,0	834,3					
30	17	39,5	42,5		0,0162	0,0179	1,2	46,8	50,7	5,4	45,5	32,1	13,4
30	16				0,0119	0,0154	1,3	72,2					
30	6				0,0203	0,0122	1,3	467,3					
30	12				0,0124	0,0108	1,3	465,9					
30	23				0,0117	0,0162	1,2	59,0					

Tabelle A.37: Bodenphysikalische Kennwerte für das Wattprofil am Standort ES23 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES23		Watt			Koordinaten: N5967384 E3497182								
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%		
10	17	16,1	42,0	0,0242			1,1	35,8	59,6	12,1	48,4	34,2	14,2
10	20			0,0258			1,1	4,1					
10	17			0,0290			1,1	6,8					
10	20			0,0301			1,1	58,7					
10	17			0,0536			1,1	3,1					
30	22	6,6	41,2	0,0057			1,2	9,7	48,0	1,5	46,6	28,4	18,2
30	9			0,0153			1,3	2,5					
30	13			0,0056			1,3	11,0					
30	9			0,0169			1,4	2,1					
30	26			0,0157			1,4	4,4					

Tabelle A.38: Bodenphysikalische Kennwerte für das Grünland- und Röhrichtprofil am Standort ES24 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES24		Grünland			Koordinaten: N5966349 E3493464								
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d			Vol.-%		
10	35	25,6	39,1		0,0105	0,0090	1,3	22,1	50,3	8,8	41,1	28,7	12,4
10	20				0,0121	0,0072	1,4	16,2					
10	18				0,0095	0,0072	1,3	283,0					
10	17				0,0073	0,0102	1,4	56,8					
10	25				0,0084	0,0097	1,3	59,7					
30	53	10,9	41,1		0,0078	0,0107	1,4	306,9	48,4	9,1	39,0	28,1	10,9
30	19				0,0060	0,0101	1,4	16,4					
30	34				0,0076	0,0063	1,5	30,1					
30	41				0,0084	0,0099	1,4	56,8					
30	19				0,0079	0,0087	1,4	18,7					
50	39	7,0	39,2		0,0097	0,0080	1,4	18,6	46,8	7,4	39,5	28,3	11,2
50	33				0,0071	0,0085	1,5	120,8					
50	39				0,0109	0,0073	1,4	10,5					
50	38				0,0096	0,0069	1,4	10,0					
50	36				0,0110	0,0069	1,4	30,7					
70	21	5,6	43,5		0,0088	0,0046	1,5	40,5	43,6	5,1	38,5	28,3	10,2
70	16				0,0049	0,0071	1,5	25,2					
70	13				0,0077	0,0045	1,5	95,9					
70	34				0,0091	0,0061	1,5	14,1					
70	26				0,0080	0,0043	1,5	42,1					
Standort ES24		Röhricht			Koordinaten: N5966340 E3493506								
10	30	12,5	37,8		0,0341	0,0399	0,7	2358,7	68,9	10,5	58,6	40,5	18,2
10	16				0,0424	0,0306	0,9	60,2					
10	23				0,0514	0,0563	0,8	107,3					
10	23				0,0510	0,0322	0,8	256,0					
10	21				0,0308	0,0270	0,7	322,8					

Tabelle A.39: Bodenphysikalische Kennwerte für das Wattprofil am Standort ES24 mit Koordinaten und Einzelwerte für Vorbelastung (P_v), Kohäsion (c), Winkel der inneren Reibung (φ) Kompressibilitätsindex bei Matrixpotenzialen von -3 kPa (cn3), -6 kPa (cn6) und -15 kPa (cn15), Trockenrohddichte (ρ_t), gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) und Mittelwerte von fünf Daten und Anpassung der Wasserretentionsdaten mit RETC für das Gesamtporenvolumen (GPV), Luft- (LK), Feld- (FK), nutzbare Feldkapazität (nFK) und den Totwasseranteil (TW).

Standort ES24		Watt					Koordinaten: N5966541 E3493474						
Tiefe	P_v	c	φ	cn3	cn6	cn15	ρ_t	k_f	GPV	LK	FK	nFK	TW
cm	kPa	kPa	°				g/cm ³	cm/d		Vol.-%			
10	14	10,3	36,5	0,0084			1,3	11,7	47,9	1,7	46,2	29,2	17,0
10	16			0,0194			1,4	8,1					
10	9			0,0114			1,4	3,6					
10	30			0,0112			1,4	2,0					
10	23			0,0076			1,4	1,9					
30	34	9,5	40,4	0,0123			1,4	27,8	46,2	6,6	40,0	31,3	8,7
30	17			0,0122			1,4	12,7					
30	20			0,0075			1,4	1,8					
30	45			0,0236			1,4	3,0					
30	15			0,0101			1,4	1,5					

Danksagung

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Prof. h.c. Dr. Dr. h.c. Rainer Horn dafür bedanken, dass er mir die Möglichkeit zur Promotion gegeben hat und für seine Betreuung während des Projektes.

Des Weiteren möchte ich mich bei der BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde) bedanken, die dieses Projekt finanzierte. Und bei den Mitarbeitern Dr. Carolin Schmidt-Wygasch, Dr. Elmar Fuchs und Uwe Schröder, die in vielen Treffen immer durch Fragen und Anmerkungen zum Gelingen dieses Projektes beigetragen haben.

Mein Dank geht auch an Dr. habil. Wibke Baumgarten für die Schaffung dieses Projektes und an Dr. Heiner Fleige für Nachrichten und beruhigende Worte. Nina Stoppe danke ich für die Zusammenarbeit im Projekt und die Korrespondenz mit Koblenz. Außerdem möchte ich Veronika Schroeren danken, die bei einem Zischen immer dafür gesorgt hat, dass es schnell verschwunden ist und bei den Probennahmen für Erheiterung gesorgt hat. Weiterer Dank gilt Jens Rostek, der bei einem gewissen Eigenleben der Messanlagen sofort wusste wo der Fehler lag, und natürlich auch allen anderen Mitarbeitern im Institut, ohne die das alles nicht möglich gewesen wäre.

Meiner Familie möchte ich ebenfalls danken, für die Unterstützung bei diesem langen Weg, der im Jahr 2002 angefangen ist.

Auch wenn als letztes genannt, ein GANZ GANZ DICKES DANKESCHÖN an Iris Zimmermann, die mir fachlich mit vielen Anregungen eine Hilfe war, mich im privaten aber auch wieder auf andere Gedanken gebracht hat. DANKE!

Schriftenreihe des Instituts

- Band 86** **Mehmet Senbayram (2010):** Greenhouse gas emission from soils of bioenergy crop production systems and regulating factors
- Band 87** **Nicole Fanselow (2010):** Soil nitrogen - plant interactions as affected by grazing and water availability in semiarid grassland of Inner Mongolia
- Band 88** **Dorothee Steinfurth (2010):** Storage protein quality, metabolite composition, and baking quality of winter wheat as affected by late sulfur fertilization
- Band 89** **Dörthe Holthusen (2010):** Fertilization induced changes in soil stability at the microscale revealed by rheometry
- Band 90** **Agnieszka Reszkowska (2010):** Grazing effects on soil mechanical strength and physical functions in Inner Mongolia, China
- Band 91** **Christoph-Martin Geilfus (2011):** Expansin expression and apoplastic pH in expanding leaves under NaCl stress
- Band 92** **Muhammad Shahzad (2012):** Growth-related changes in subcellular ion and protein patterns in maize and field bean leaves under salt stress
- Band 93** **Sajid Masood (2012):** Interaction of salt stress and boron toxicity on subcellular ion relations, antioxidative activity and soluble apoplastic protein pattern in wheat leaves
- Band 94** **Lei Gan (2012):** Effects of different grazing intensities on soil water and thermal regimes under *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* vegetation types in Inner Mongolia grassland, China
- Band 95** **Hans-Peter Blume & Rainer Horn (Hrsg):** Persönlichkeiten der Bodenkunde III Vorträge der Arbeitsgruppe Geschichte der Bodenkunde im Rahmen der Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft im September 2011 in Berlin.
- Band 96** **Hans-Peter Blume & Rainer Horn (Hrsg):** Persönlichkeiten der Bodenkunde IV Die Tonverlagerung als profilprägender Prozeß in Böden aus jungpleistozänem Geschiebemergel. Faksimileausgabe der Dissertation von Hans-Peter Blume aus dem Jahre 1961
- Band 97** **Iris Zimmermann (2012):** Entwicklung einer umweltgerechten Erdbestattungspraxis im Hinblick auf die Folgewirkungen auf Böden, Grundwasser und Atmosphäre
- Band 98** **Daniel Uteau Puschmann (2013):** Aeration as influenced by soil structure dynamics – a contribution to improve the acquisition of nutrients from the subsoil
- Band 99** **Anneka Mordhorst (2013):** Soil Structure-Carbon Relations of Differently Textured and Managed Arable Soils Subjected to Mechanical Loading
- Band 100** **Sebastian Pagenkemper (2013):** Investigation of plant root and earthworm induced effects on properties and functions of pore networks with non-invasive X-ray computed tomography
- Band 101** **Hamoudy Ould Baba (2013):** Bodenphysikalische und -mechanische Untersuchungen zur Bestimmung der Bodenstrukturentwicklung unter besonderer Berücksichtigung der Interaktionen zwischen auflastabhängiger Entwicklung der Porenwasserdrücke und Bodenkriechvorgänge
- Band 102** **Christina Neuhaus (2014):** Development of Mg deficiency, ionic composition and yield of faba bean (*Vicia faba* L.) as affected by foliar MgSO₄ fertilization
- Band 103** **Hans-Peter Blume & Rainer Horn (Hrsg):** Persönlichkeiten der Bodenkunde V Vorträge der Arbeitsgruppe Geschichte der Bodenkunde im Rahmen der Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft im September 2013 in Berlin.
- Band 104** **Amrei Völkner (2015):** Influence of digestates on physicochemical properties of differently textured soils
- Band 105** **Morgan Sherif (2015):** In vivo detection of Ca²⁺ and pH in the apoplast and cytosol of plant leaves under salinity
- Band 106** **Nina Stoppe (2015):** Rheologische Untersuchungen an tidebeeinflussten Uferböden der Elbe als Grundlage für die Entwicklung mikromechanischer Pedotransferfunktionen
- Band 107** **Roland Riggert (2015):** Spannungseinträge unter Holzerntemaschinen und Auswirkungen auf bodenphysikalische Parameter
- Band 108** **Li Wang (2015):** Impacts of genotypic variations in sulfur distribution and branching characteristics on nitrogen efficiency of oilseed rape (*Brassica napus* L)