

**Charakteristik der Benetzungshemmung quartärer und tertiärer Substrate –
Räumliche und zeitliche Variabilität, Schlüsselfaktoren für die Ausbildung und
Eingang in die hydrologische Modellierung.**

Von der Fakultät für Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg zur Erlangung des
akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom Geoökologin

Christine Lemmnitz
aus Leipzig

Gutachter: Prof. Dr. Dr. h.c. Reinhard F. Hüttl
Gutachter: Prof. Dr. Thomas Raab

Tag der mündlichen Prüfung: 21.11.2013

Inhalt

1 Einleitung.....	11
1.1 Stand der Forschung	14
1.1.1 Grundlagen der Grenzflächentheorie	14
1.1.2 Benetzungshemmung beeinflussende Parameter.....	16
1.1.3 Einfluss der Benetzungshemmung auf bodenhydrologische Prozesse ...	21
1.2 Zielsetzung und Fragestellungen	22
2 Material und Methoden	24
2.1 Untersuchungsgebiet	24
2.2 Freilandversuche	27
2.2.1 Untersuchungskonzept zur zeitlichen und räumlichen Dynamik der Benetzungshemmung	27
2.2.2 Probenahmen und Probenaufbereitung	30
2.2.3 Methoden	30
2.3 Laborversuche	36
2.3.1 Untersuchungskonzept.....	36
2.3.2 Versuchsdurchführung	36
2.3.3 Methoden zur Erfassung der Benetzungseigenschaften	37
2.4 Verfahren der statistischen Datenanalyse	37
3 Ergebnisse.....	39
3.1 Charakteristik der untersuchten Substrate	39
3.2 Methodenvergleich zur Erfassung der Benetzungseigenschaften am Beispiel der quartären und tertiären Substrate	47
3.3 Räumliche Heterogenität der Benetzungshemmung	53
3.4 Zeitliche Variabilität der Benetzungshemmung	59
3.5 Einfluss abiotischer Parameter auf die Benetzungshemmung	66
3.6 Einfluss organischer Substanz auf das Benetzungsverhalten	78
3.7 Einfluss von Anfangsfeuchte und Trocknungstemperatur auf die Ausbildung von Benetzungshemmung	85
3.8 Benetzungseigenschaften als Parameter hydrologischer Modellierung	88
4 Diskussion	98
4.1 Charakteristik der untersuchten Substrate	98

4.2 Methodenvergleich am Beispiel der tertiären Substrate und der mit organischer Substanz angereicherten quartären Substrate	102
4.3 Räumliche Heterogenität der untersuchten Substrate	105
4.4 Zeitliche Variabilität der Benetzungshemmung	109
4.5 Einfluss abiotischer Parameter auf die Benetzungshemmung	113
4.6 Einfluss organischer Substanz auf das Benetzungsverhalten	121
4.7 Einfluss von Anfangsfeuchte und Trocknungstemperatur auf die Ausbildung von Benetzungshemmung	125
4.8 Benetzungseigenschaften als Parameter hydrologischer Modellierung	128
5 Zusammenfassung	133
Summary	136
Literatur	138
Anhang	153
Danksagung	200

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines amphiphilen Moleküls und des Benetzungsvorgangs (nach Doerr et al., 2000)	15
Abbildung 2: Schematische Darstellung typischer Benetzungsvarianten (a - vollständige Benetzung, b - partielle Benetzung mit $\alpha < 90^\circ$, c – Super-hydrophobie mit $\alpha > 150^\circ$).....	16
Abbildung 3: Lage des Untersuchungsgebiets (nach: Forschungszentrum Landschaftsentwicklung und Bergbaulandschaften, BTU Cottbus)	25
Abbildung 4: Untersuchungsgebiet und schematische Darstellung des Detailszugs-gebiets mit Transekten.....	26
Abbildung 5: Untersuchungsgebiet mit quartärem, bewachsenem Substrat und Klimastation im Vordergrund, im Hintergrund tertiäre Substrate (a); Erosionsrinne im tertiären Substrat (b)	27
Abbildung 6: Lage der Probenahmepunkte auf den Transekten, Abstand zwischen den Probenahmepunkten etwa 0,7 m.....	28
Abbildung 7: Schematische Darstellung der mit organischer Substanz angereicher-ten Plots	29
Abbildung 8: Schema der tiefendifferenzierten Probenahme mittels Stechzylinder..	30
Abbildung 9: Goniometer OCA 5 (DataPhysics) und Blick durch das Okular (Quelle: DataPhysics).....	31
Abbildung 10: Ungleichmäßige Aufsättigung benetzungsgehemmter Proben des tertiären Substrats: dunkle Bereiche sind durchfeuchtet, helle noch trocken	34
Abbildung 11: Prozentualer Anteil der Kiesfraktion im Detailszugsgebiet für Boden-oberfläche und die Tiefenstufe 1-5 cm, n = 4.....	40
Abbildung 12: Lagerungsdichte der Plotbeprobung, n = 20 (a), des Detailszugs-gebiets, n = 8 (b) und der mit organischer Substanz angereicherten Plots, n = 24	41
Abbildung 13: Wassergehalte quartärer und tertiärer Substrate (a) und der geomorphologischen Bereiche (b) in Abhängigkeit vom Matrixpotential, n = 6	42
Abbildung 14: pH-Werte der Plotbeprobung, n = 23 (a) pH-Werte des Detailszugs-gebiets, n = 8 (b) und der mit organischer Substanz angereicherten Plots, n = 25 (c);unterschiedliche Skalierung	43
Abbildung 15: Elektrische Leitfähigkeit der Plotbeprobung, n = 22 (a), des Detailszugs-gebiets, n = 8 (b) und der mit organischer Substanz angereicherten Plots, n = 24 (c);unterschiedliche Skalierung	45
Abbildung 16: Gehalte an organischem Kohlenstoff der Plotbeprobung, n = 101 je Variante (a), Gehalte an organischem Kohlenstoff im Detailszugs-gebiet, n = 50 je Variante (b) und Gehalte an organischem Kohlenstoff der mit organischer Substanz angereicherten Plots, n = 118 je Variante.....	46
Abbildung 17: Tiefenverteilung der Kohlenstoffgehalte im quartären (a) und tertiären (b) Substrat, n = 28; unterschiedliche Skalierung	47
Abbildung 18: Kontaktwinkel und WDPT-Zeiten, n = 281 (a) sowie Mediane von Kontaktwinkeln und WDPT-Zeiten, n = 28 (b) für die aktuelle Benetzungshemmung der Plots T1 und T2 über eine Zeitdauer von 28 Monaten, unterschiedliche Skalierung.....	49
Abbildung 19: Mediane von Kontaktwinkeln und WDPT-Zeiten potenzieller Benetzungshemmung der Substratmischungen aus dem Laborversuch, jeweils n = 18	51
Abbildung 20: WDPT-Zeiten und Kontaktwinkel potenzieller Benetzungshemmung: Verschneidung von Labor- und Freilanddaten der Variante W3 (a), der Variante W0 (b) und der Variante K (c), unterschiedliche Skalierung.....	52

Abbildung 21: Dendrogramm der aktuellen Benetzungshemmung (WDPT-Zeiten) aller beprobten Punkte quartärer und tertiärer Sande, n = 50	54
Abbildung 22: Prozentuale Anteile der gemessenen WDPT-Klassen (Einteilung nach Bisdom et al. (1993), Kapitel 2.2.1) im Detailinzugsgebiet, n = 50.....	55
Abbildung 23: Prozentualer Anteil benetzungsgehemmter Proben der geomorphologischen Einheiten an Ober-, Mittel- und Unterhang, n = 9-12 (nach Kuhnert, 2009)	56
Abbildung 24: Prozentuale Anteile der gemessenen WDPT-Klassen am Plot T1, n = 145; Einteilung nach Bisdom et al. (1993).....	57
Abbildung 25: Algen an der Oberfläche des tertiären Substrats (a) und mikroskopische Aufnahme (b).....	59
Abbildung 26: Dendrogramm der aktuellen Benetzungshemmung (Kontaktwinkel und WDPT) für Plot T1 nach Probenahmeterminen (Zahlen in Klammern bezeichnen den ersten und zweiten Probenahmetermin bei mehrmaliger Beprobung in einem Monat)	61
Abbildung 27: Mittlere Lufttemperatur und aktuelle Benetzungseigenschaften (Kontaktwinkel, WDPT) tertiärer Sande (T1) im Untersuchungszeit-raum. Lagen mehrere Probenahmen in einem Monat, wurde jeweils der stärker benetzungsgehemmte Wert dargestellt.	62
Abbildung 28: Hygrischer Index nach de Martonne und Lauer (1952) mit WDPT-Zeiten aktueller Benetzungshemmung am Plot T1 für den Untersuchungszeitraum, Ariditätsgrenze bei I = 20.....	63
Abbildung 29: Saisonale Variabilität der WDPT-Test-Zeiten in Abhängigkeit von der geomorphologischen Struktur.....	65
Abbildung 30: Gemittelte Werte von WDPT-Zeiten aktueller Benetzungshemmung und korrespondierende Wassergehalte im gesamten Untersuchungs-zeitraum für die Plots T1 und T2, je n = 28	67
Abbildung 31: Darstellung der Wassergehalte (< 8 %) mittels Boxplots getrennt für benetzbare (WDPT ≤ 5 s) und benetzungsgehemmte (WDPT > 5 s) Proben der Plots T1 und T2, n = 143 (a), sowie für das Detail-einzugsgebiet, n = 138 (b) ..	68
Abbildung 32: Boxplots der Wassergehalte benetzbarer (WDPT ≤ 5 s) und benetzungsgehemmter (WDPT > 5 s) Proben für das Detaileinzugs-gebiet, gruppiert nach geomorphologischen Einheiten, n = 396	69
Abbildung 33: Boxplots der Wassergehalte in Abhängigkeit von der WDPT-Klasse (● Extremwerte, * Ausreißer) für das tertiäre Substrat (T1, T2 und Detaileinzugsgebiet)	70
Abbildung 34: Aktuelle Kontaktwinkel in Abhängigkeit von der Wasserspannung..	72
Abbildung 35: Aktuelle WDPT-Zeiten in Abhängigkeit von der Wasserspannung..	72
Abbildung 36: Aktuelle Benetzungshemmung (WDPT-Zeiten) am Punkt T1 in Abhängigkeit meteorologischer Parameter vor der Probenahme	76
Abbildung 37: Kontaktwinkel potenzieller Benetzungshemmung der Variante W0 in Abhängigkeit verschiedener meteorologischer Parameter vor der Probenahme	77
Abbildung 38: Kontaktwinkel in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt (a) und den geomorphologischen Einheiten (b); unterschiedliche Skalierung	78
Abbildung 39: Dendrogramm der Clusteranalyse der Kontaktwinkel aktueller Benetzungshemmung, n = 137	80
Abbildung 40: Kontaktwinkel aktueller Benetzungshemmung der mit organischer Substanz angereicherten Plots in Abhängigkeit vom Kohlenstoff-gehalt, n=132 (mit Trendlinien)	81
Abbildung 41: Kontaktwinkel (Mediane) potenzieller Benetzungshemmung in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehalts	85

Abbildung 42: Kontaktwinkel und WDPT-Zeiten der Varianten W0, W3 und K in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur (unterschiedliche Skalierung).....	87
Abbildung 43: Grafische Darstellung zur Beurteilung der Trennkraft der Diskriminanzanalyse für den Punkt T1, n = 18, Zuordnung in hydrophile, mäßig benetzungsgehemmte und sehr stark benetzungsgehemmte Proben	93
Abbildung 44: Diskriminanzanalyse für alle mit organischer Substanz angereicherten Plots, n = 97	97

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifikationen der Benetzungshemmung mittels WDPT-Test aus der Literatur, WDPT in Sekunden.....	32
Tabelle 2: Klassifikation der Benetzungshemmung mittels MED-Test.....	32
Tabelle 3: Im Untersuchungsgebiet erfasste meteorologische Parameter.....	35
Tabelle 4: Varianten zur Untersuchung der Benetzungshemmung in Abhängigkeit von Kohlenstoff- und Anfangswassergehalt	37
Tabelle 5: Klassifizierung der Rangkorrelations- und Regressionskoeffizienten nach Zöfel (1998)	38
Tabelle 6: Korngrößenverteilungen der untersuchten Substrate, n = 4 (Mischproben)	39
Tabelle 7: pH-Werte quartärer und tertiärer Substrate im Untersuchungsgebiet.....	42
Tabelle 8: Spannweiten der aktuellen und potenziellen Benetzungseigenschaften quartärer und tertiärer Substrate	48
Tabelle 9: Spearman-Rangkorrelationen (r_s) und lineare Regressionen (R^2) zwischen Kontaktwinkeln und WDPT-Zeiten (aktuelle Benetzungshemmung); ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$	49
Tabelle 10: Spearman-Rangkorrelationen (r_s) und lineare Regressionen (R^2) der Mediane aktueller Benetzungshemmung zwischen Kontaktwinkel und WDPT, n = 50; ** $p < 0,01$	49
Tabelle 11: Spearman-Rangkorrelationen (r_s) und lineare Regressionen (R^2) zwischen WDPT und Kontaktwinkel (aktuelle Benetzungshemmung) der mit organischer Substanz angereicherten Plots, ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$	50
Tabelle 12: Spearman-Rangkorrelationen (r_s) zwischen WDPT und Kontaktwinkel (potenzielle Benetzungshemmung) für die mit organischer Substanz angereicherten Plots, n = 125; ** $p < 0,01$	50
Tabelle 13: Spearman-Rangkorrelationen (r_s) und lineare Regressionen (R^2) zwischen Medianen der Kontaktwinkel und WDPT-Zeiten (potenzielle Benetzungshemmung) der Substratmischungen aus dem Laborversuch, ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$	51
Tabelle 14: Spearman-Rangkorrelationen (r_s) und lineare Regressionen (R^2) der Kontaktwinkel und der WDPT-Zeiten potenzieller Benetzungshemmung aller Temperaturen; ** $p < 0,01$	53
Tabelle 15: Spearman-Rangkorrelationen von WDPT zu Kontaktwinkel (aktuelle Benetzungshemmung) , ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$	58
Tabelle 16: Prozentuale Anteile sehr stark (WDPT > 600 s) und extrem benetzungs- gehemmter (WDPT > 3600 s) Proben in Abhängigkeit ihrer geomorpho- logischen Struktur, Entnahmetiefen 0 - 1 cm, n = 10 und > 1 - 5 cm, n = 40	58
Tabelle 17: Ergänzende Messung der Benetzungshemmung mittels MED-Test in Ab- hängigkeit der geomorphologischen Strukturen im Verlauf eines Jahres (nach Kuhnert, 2009); am 25.01.2006 lag teilweise gefrorener Boden vor, so dass Messungen nicht möglich waren.....	66
Tabelle 18: Spearman-Rangkorrelationen aktueller Benetzungshemmung (Kontakt- winkel, WDPT) mit dem Wassergehalt, ** $p < 0,01$	67
Tabelle 19: Spearman Rangkorrelationen der Mediane aktueller Benetzungshem- mung (Kontaktwinkel, WDPT) und Wassergehalt, n = 50, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$	68
Tabelle 20: Mediane der Parameter aktueller Benetzungshemmung (Kontaktwinkel, WDPT) und Wassergehalte für das tertiäre Substrat, unterteilt für be- netzungsgehemmte und benetzbare Proben.....	69

Tabelle 21: Wassergehalte des Detailstudiengebiets, unterteilt für benetzbare (WDPT \leq 5 s) und benetzungsgehemmte (WDPT > 5 s) Proben in Abhängigkeit der geomorphologischen Struktur	69
Tabelle 22: Parameter aktueller Benetzungshemmung (Mediane Kontaktwinkel und WDPT) in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt für das Detail-einzugsgebiet	71
Tabelle 23: Spearman-Rangkorrelationen für das tertiäre Substrat zwischen allen WDPT-Zeiten und Niederschlagsmengen sowie Zeiten ohne Nieder-schlag vor der Probenahme, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$	74
Tabelle 24: Spearman-Rangkorrelationen für das tertiäre Substrat zwischen WDPT-Zeiten < 600 s und Niederschlagsmengen sowie Zeiten ohne Nieder-schlag vor der Probenahme, ** $p < 0,01$	74
Tabelle 25: Spearman-Rangkorrelationen der Plots T1 und T2 zwischen Kontaktwinkel sowie WDPT-Zeiten und der Bodentemperatur vor der Probe-nahme, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$	75
Tabelle 26: Korrelationen zwischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}) und WDPT-Zeiten (aktu-elle Benetzungshemmung); ** $p < 0,01$	79
Tabelle 27: Aktuelle Benetzungseigenschaften der Nullfläche und der mit organischer Substanz angereicherten Plots, $n = 132$	79
Tabelle 28: Spearman-Rangkorrelationen zwischen WDPT-Zeiten (aktueller Be-netzungshemmung) und dem Gehalt an organischem Kohlenstoff, $n = 132$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$	80
Tabelle 29: Spearman-Rangkorrelationen zwischen WDPT (potenzielle Benetzungs-hemmung) und C_{org} , $n = 125$, ** $p < 0,01$	82
Tabelle 30: Spearman-Rangkorrelationen zwischen WDPT, Kontaktwinkeln (aktuelle und potenzielle Benetzungshemmung) zum C_{org} vergleichend für die Null-fläche und alle mit organischer Substanz angereicherten Varianten, ** $p < 0,01$	83
Tabelle 31: Mediane der Kontaktwinkel potenzieller Benetzungshemmung [θ] in Ab-hängigkeit von der Trocknungstemperatur	84
Tabelle 32: Minimale und maximale Kontaktwinkel [θ] vergleichend für alle Trock-nungstemperaturen und Mediane von Kontaktwinkeln und WDPT-Zeiten potenzieller Benetzungseigenschaften	86
Tabelle 33: Rotierte Komponentenmatrix der Faktorenanalyse für den Punkt T1 ($n=18$), Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse, Rotations-methode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung, Rotation ist in acht Iteratio-nen konvergiert ..	90
Tabelle 34: Klassifizierungsergebnisse der Diskriminanzanalyse in Abhängigkeit der genutzten meteorologischen Daten vor der Probenahme für den Plot T1 und alle Proben des tertiären Substrats (T gesamt)	94
Tabelle 35: Standardisierte kanonische Diskriminanzkoeffizienten für alle mit organischer Substanz angereicherten Plots	95
Tabelle 36: Zuordnung der Benetzungseigenschaften für alle mit organischer Substanz angereicherten Proben und gesondert nach Arten organischen Kohlenstoffs in Prozent [%]	96

Abkürzungsverzeichnis

α	Kontaktwinkel
σ	Oberflächenspannung
1a	Probenahmepunkt a auf Transekt 1
1b	Probenahmepunkt b auf Transekt 1
1c	Probenahmepunkt c auf Transekt 1
1d	Probenahmepunkt d auf Transekt 1
1e	Probenahmepunkt e auf Transekt 1
2a	Probenahmepunkt a auf Transekt 2
2b	Probenahmepunkt b auf Transekt 2
2c	Probenahmepunkt c auf Transekt 2
C _{org}	Organischer Kohlenstoff
EC	Elektrische Leitfähigkeit
fS	Feinsand
fU	Feinschluff
gS	Grobsand
gU	Grobschluff
I	Hygrischer Index
K1	Plot mit 1 % C _{org} aus Kompost
K3	Plot mit 3 % C _{org} aus Kompost
KW	Kontaktwinkel
Med	Median
MED	“Molarity of Ethanol Droplet”
mS	Mittelsand
mU	Mittelschluff
MW	Mittelwert
N	Anzahl
n.b.	nicht bestimmt
NF	Nullfläche, quartärer Sand ohne Zugabe organischer Substanz
p	Signifikanzniveau
Q1	Probenahmepunkt 1 im Bereich mit quartärem Sand
Q2	Probenahmepunkt 2 im Bereich mit quartärem Sand
r	Korrelationskoeffizient
r _s	Spearman Rangkorrelationskoeffizient

RegBkPIG	Gesetz zur Regionalplanung, zur Braunkohlen- und Sanierungsplanung
T	Ton
T1	Probenahmepunkt 1 im Bereich mit tertiärem Sand
T2	Probenahmepunkt 2 im Bereich mit tertiärem Sand
W0/1	Plot mit 1 % C _{org} aus unverwitterter Braunkohle
W0/3	Plot mit 3 % C _{org} aus unverwitterter Braunkohle
W3/1	Plot mit 1 % C _{org} aus verwitterter Braunkohle
W3/3	Plot mit 3 % C _{org} aus verwitterter Braunkohle
WDPT	“Water Drop Penetration Time”

1 Einleitung

Der Boden ist eine der wichtigsten und komplexesten natürlichen Ressourcen. Weltweit bedrohen zunehmend vielfältige Entwicklungstrends diese wertvolle Ressource. Infolge des Bevölkerungswachstums, aber auch wegen des gestiegenen Bedarfs an Energie aus nachwachsenden Rohstoffen und veränderter Ernährungsmuster, führen heute hohe und vielfach miteinander konkurrierende Nutzungsansprüche aller Arten der Flächen- und Bodennutzung (Nahrungsmittelproduktion, Rohstoffförderung, Lebensraum, Infrastruktur und industrielle Fertigung) zu erheblichen Überbeanspruchungen und rascher als je zuvor zum irreversiblen Verlust von Boden und somit zur Landdegradation (Bai et al., 2008; EEA, 2000). Als eine Form der Landdegradierung tritt Bodendegradation als natürlicher (Klimaveränderungen, Naturkatastrophen: Unwetter, Stürme, Dürren) oder anthropogen beeinflusster (Bewirtschaftung, Missmanagement) Prozess auf (Blum, 1998; Oldemann, 1988). Laut Bai et al. (2008) wurden bereits 24 % der Böden weltweit als „in unterschiedlichem Grad von Degradationserscheinungen gekennzeichnet“ klassifiziert. Dies ist um so höher zu werten, da im Zuge deutlicher Veränderungen im bodennahen Klima, die für die meisten Regionen der Erde im Verlauf des 21. Jahrhunderts prognostiziert werden, ein drastisch erhöhter Anteil degradierter Böden zu erwarten ist (IPCC, 2007).

Anhand vorliegender Projektionen wird für den Osten Deutschlands, insbesondere den Raum Südbrandenburg und Nordsachsen, zunehmende Trockenheit während einer sich tendenziell verlängernden Vegetationsperiode prognostiziert (LUA, 2010; Schönwiese und Janoschitz, 2007; Spektat et al., 2007; Jonas et al., 2005; Stock, 2004; Gerstengarbe et al., 2003). Die nur geringen Wasserhaltekapazitäten der Böden mit vorwiegend sandiger Textur und das, im Vergleich mit anderen Regionen Deutschlands, sehr trockene Klima der Region Berlin-Brandenburg bedingen bereits aktuell eine angespannte Situation im Bezug auf den Wasserhaushalt auf Landschaftsebene. Die damit verbundene erhöhte Waldbrandgefahr und drohende Ernteauffälle, aber auch die Erosionsanfälligkeit der Böden insbesondere nach sommerlichen Starkregenereignissen würde sich im Zuge zunehmender Klimaänderungen weiter verschärfen (Küchler, 2007).

Das Zusammenspiel von Wasserdargebot, Boden und Vegetation hat für Wasser- und Stofftransportprozesse an Offenland- oder Neulandstandorten eine große Bedeutung. Im Zuge verstärkter Trockenheit gilt das besondere Augenmerk den

Prozessen an der Bodenoberfläche, der Kontaktzone von Pedosphäre, Biosphäre und Atmosphäre.

Die Bodenqualität wird maßgeblich durch den Gehalt und die Verfügbarkeit von organischem Kohlenstoff charakterisiert. Zunehmende Trockenheit und steigende Bodentemperaturen können zum verzögerten Abbau organischer Streustoffe im Oberboden führen und damit zu einer verringerten Humusspeicherung im Boden (Podmanicky et al., 2011; Suckow et al., 2009). Die Folge wäre eine weitere Abnahme der Wasser- und Nährstoffspeicherkapazität, vor allem in sandigen Substraten und demzufolge zunehmende edaphische Trockenheit (Prechtel et al., 2009). Der Rückgang des Kohlenstoffgehalts reduziert somit die Bodenproduktivität und hat dadurch auch negative sozioökonomische Effekte. Diese sich gegenseitig verstärkenden Rückkopplungsmechanismen werden zum einen durch eine verstärkte trockenheitsbedingte Abnahme der Vegetationsdichte und Biomasseproduktion intensiviert, zum anderen durch das Auftreten von Benetzungshemmung, welche mit zunehmenden Temperaturen und abnehmender Feuchte stark an Bedeutung gewinnt.

Benetzungshemmung von Bodenoberflächen ist nicht auf einzelne Regionen mit speziellen Umweltbedingungen beschränkt. Sie wurde auf allen Kontinenten, von tropischen bis subarktischen Klimaten, intensiv genutztem Land und verschiedenen Arten von Forsten bis hin zu Steppenland und diversen Bodenarten nachgewiesen (Doerr et al., 2007). Für die Interaktionen Boden-Wasser-Atmosphäre ist der Einfluss des Parameters Benetzungshemmung in den letzten Jahrzehnten zunehmend auch für Mitteleuropa deutlich geworden (Doerr et al., 2006; Wahl et al., 2003; Buczko et al., 2002; Schäfer et al., 2002). Obwohl es viele Böden weltweit mit einem breiten Spektrum möglicher Benetzungshemmung gibt, wird Benetzungshemmung selten oder nur in Extremfällen optisch wahrgenommen (Doerr et al., 2003; DeBano, 2000). Dabei hat die Benetzungshemmung von Böden bedeutenden Einfluss auf die Prozesse der Wasserbewegung in der ungesättigten Bodenzone, beispielsweise für die räumliche Wasserverteilung und die Dynamik von Be- und Entwässerung (Einecke, 2005; Hangen et al., 2005; Ritsema und Dekker, 1998). Auch Prozesse an der Bodenoberfläche, beispielsweise Abflussbildung und Bodenerosion, werden von benetzungsgehemmten Böden und Bodenoberflächen maßgeblich beeinflusst (Lemnitz et al., 2008; Doerr et al., 2006; Biemelt et al., 2005; Shakesby et al., 2002a). Somit ist Benetzungshemmung von Böden eine indirekt beeinflussende

Größe für den Wasserhaushalt und folglich ein relevanter Standortfaktor für den Wasserhaushalt auf verschiedenen Maßstabsebenen (Woche et al., 2005; Deurer et al., 2003).

Es ist unerlässlich, Benetzungshemmung in zeitlicher und räumlicher Skala sowie ihre Wechselwirkungen und Boden-Wasser-Interaktionen statistisch zu erfassen, um pedologische und hydrologische Prozesse der sogenannten „critical zone“ (Lin, 2010; NRC, 2001) umfassend zu beschreiben. Die prognostizierten anhaltend steigenden Bevölkerungszahlen in Verbindung mit der Verknappung von fruchtbarem Land führen zu zunehmender Bodenbelastung und Bodendegradierung (Bai et al., 2008; EEA, 2000). Zum Erhalt von Bodenfunktionen, zur möglichen Prävention vor Degradation und zur Sanierung ist es daher dringlich, die noch nicht hinreichend geklärten Ursachen und Mechanismen, die zur Ausbildung von Benetzungshemmung in Böden führen, zu verstehen und soweit möglich zu erfassen und zu quantifizieren (Doerr et al., 2000a).

Vor diesem Hintergrund war die Weiterentwicklung vorhandener Abfluss- und Erosionsmodelle oder die Erstellung eines neuen Teilmoduls mit Integration des Parameters Benetzungshemmung ein Ziel des Verbundprojekts der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus und des Deutschen GeoForschungsZentrums Potsdam, um fundierte Prognosen im Hinblick auf Wasserhaushaltsszenarien im Zusammenhang mit Klimaänderungen und veränderter Landnutzung zu ermöglichen. Die Aufklärung der Zusammenhänge von Bodeneigenschaften und deren Auswirkungen auf hydrologische Prozesse, speziell Benetzungseigenschaften und Abflusscharakteristika, erfolgte prozessorientiert auf verschiedenen Betrachtungsebenen. Somit werden einzugsgebiets- und landschaftsbezogene Aussagen zur Bewertung von Veränderungen des standörtlichen Wasserhaushalts und Bodendegradation im Kontext zunehmender Trockenheit ermöglicht, beispielsweise die Prognose von Oberflächenabflussbildung und Bodenerosion.

1.1 Stand der Forschung

Erste Forschungsarbeiten zum Thema verminderter Benetzbarkeit von Böden wurden zu Beginn des 20. Jahrhunderts durchgeführt. Zunächst wurde Benetzungshemmung nur bei sandigen Böden unter Zitruskulturen oder in Verbindung mit dem Vorhandensein von Pilzen beobachtet und als außergewöhnlich eingestuft (Schreiner and Shorey, 1910; Bayliss, 1911). Seit einigen Jahren ist ein gestiegenes Forschungsinteresse zu verzeichnen und die erzielten Ergebnisse belegen, dass Benetzungshemmung von Böden in nahezu allen Klimaten und Regionen der Erde auftreten kann (Doerr et al., 2007; Dekker et al., 2005; DeBano, 2000; Doerr et al., 2000a). Benetzungshemmung speziell auf Neulandstandorten wurde in Dünengebieten (Fischer et al., 2012; Dekker et al., 2001; Witter et al., 1991; Jungerius und De Jong, 1989) und an Rekultivierungsstandorten nach Kohlebergbau beschrieben (Biemelt et al., 2011; Hieke, F., 2011; Hangen et al., 2005; Gerke et al., 2001; Sharma et al., 1993; Miyamoto et al., 1977).

1.1.1 Grundlagen der Grenzflächentheorie

Physikalisch-chemische Austauschvorgänge erfolgen über Phasengrenzflächen oder werden durch Grenzflächen bestimmt, beispielsweise Lösung, Kristallisation oder optische Reflektivität. Dabei haben Grenzflächenschichten in der Regel Dicken von nur wenigen Moleküldurchmessern (Ziechmann und Müller-Wegener, 1990). Die physikalischen Eigenschaften in der Grenzfläche werden durch elektrostatische Kräfte, durch permanente Oberflächenladungen, Coulombsche Kräfte, van der Waals-Kräfte und Wasserstoffbrückenbindungen bestimmt. Die Grenzflächen- oder Oberflächenspannung ist für die Prozesse an Grenzflächen entscheidend, beispielsweise für Benetzungsvorgänge (Ziechmann und Müller-Wegener, 1990). Damit Oberflächen durch Wasser benetzbar sind, müssen diese eine höhere Oberflächenspannung als Wasser ($72,75 \cdot 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$) besitzen. Minerale weisen Oberflächenspannungen im Bereich zwischen 5 N m^{-1} und $5 \cdot 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$ auf, somit sind die meisten Böden gut benetzbar (Scheffer und Schachtschabel, 1998; Wallis und Horne, 1992; Tschapek, 1983). Sind Minerale oder Bodenpartikel aber von organischem Material mit niederenergetischen Oberflächen (Huminstoffe, Pflanzenreste, Mikroorganismen) überzogen, sogenannten „coatings“, kann ihre Oberflächenspannung deutlich verringert sein, und sie sind nur schwer benetzbar oder benetzungsgehemmt (Doerr et al., 2000b; Bachmann, 1988).

Die Benetzungshemmung einer Festkörperoberfläche beschreibt den Zustand, wenn die Kohäsionskräfte aufgetragener Wassermoleküle untereinander stärker sind als die Adhäsionskräfte in der Grenzfläche zwischen den Wassermolekülen und der Festkörperoberfläche (hier: Bodenoberfläche), so dass das Wasser an der Festkörperoberfläche verbleibt und sich kugelförmig auflagert (Kidron et al., 1999). Es handelt sich um einen bis zu einem gewissen Grad reversiblen und temporären Effekt (Doerr et al., 2002; Doerr und Thomas, 2000; van't Woudt, 1959) (Abbildung 1).

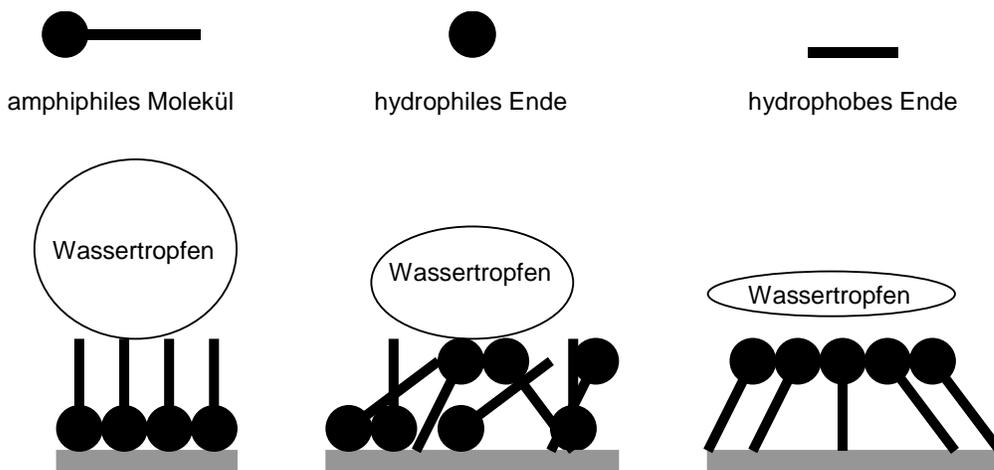


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines amphiphilen Moleküls und des Benetzungsvorgangs (nach Doerr et al., 2000)

Die Benetzungseigenschaften von Festkörpern werden hauptsächlich durch die Packungsdichte der oberflächenexponierten Moleküle bestimmt (Lahann et al., 2003). Änderungen der Dichte oder die Ausbildung von elektrischen Ladungen an Molekülketten sind von Feuchtezustand und Temperatur abhängig. Eine Reorientierung oder Neuordnung der Moleküle kann in Abhängigkeit von benetzender Flüssigkeit und Temperatur erfolgen. Reaktionen auf Unterschiede im elektrischen Potential sind abhängig von der Packungsdichte der Moleküle. Bei hoher Packungsdichte kann keine Umorientierung erfolgen, bei geringer Dichte ist eine Reorientierung möglich (Lahann et al., 2003).

Ein optisches Maß für die Benetzungseigenschaften ist der Kontaktwinkel α , geometrisch definiert als Dreiphasengrenze zwischen Festkörper, Flüssigkeit und Gasphase. Er charakterisiert quantitativ die Benetzungseigenschaften zwischen

festen und flüssigen Körpern. Er wird durch das Vermessen einzelner Tropfen Flüssigkeit auf Festkörpern bestimmt. Kleine Werte für α beschreiben durch die Flüssigkeit gut benetzbare Oberflächen, hohe Werte für α beschreiben geringe Benetzbarkeit, bei $\alpha > 90^\circ$ liegen benetzungsgehemmte Oberflächen vor. Bei $\alpha = 0$ besteht vollkommene Benetzbarkeit (Letey et al., 2003; Bachmann, 1996) (Abbildung 2).

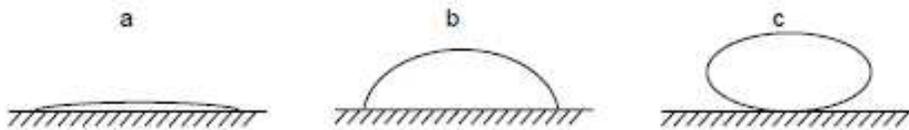


Abbildung 2: Schematische Darstellung typischer Benetzungsvarianten (a - vollständige Benetzung, b - partielle Benetzung mit $\alpha < 90^\circ$, c – Superhydrophobie mit $\alpha > 150^\circ$)

1.1.2 Benetzungshemmung beeinflussende Parameter

Sowohl pflanzliche organische Substanzen, die als Zersetzungsprodukte beim Streuabbau entstehen, als auch mikrobielle Stoffwechselprodukte können sich im Porenraum der Bodenmatrix anreichern oder Bodenpartikel überziehen und Benetzungshemmung hervorrufen (Robichaud, 2000; Hallet und Young, 1999; McKissock et al., 1998; Jex et al., 1985). Das Auftreten von Huminsäuren (Roberts und Carbon, 1972) und von Huminsäuren in Kombination mit Fe^{3+} -Komplexen führt dabei zu erhöhter Benetzungshemmung (Adhikari und Chakrabarti, 1976). Savage et al. (1969) stellten ebenfalls gesteigerte Benetzungswiderstände durch Huminsäuren bei sauren und neutralen pH-Werten fest, Fulvosäuren hingegen tragen unter gleichen Bedingungen zur besseren Benetzung bei. Bei hohen pH-Werten tragen sowohl Humin- als auch Fulvosäuren zur besseren Benetzbarkeit des Bodens bei (Chen und Schnitzer, 1978). Eine Anhebung des pH-Wertes durch Kalkung bewirkt den Rückgang der Benetzungshemmung (van't Woudt, 1959).

Zahlreiche hydrophobe Substanzen, wie Fette oder Wachse mit hydrophoben endständigen C-H-, C-H₂- oder C-H₃-Gruppen kommen in Böden natürlich vor: Terpene sind in vielen Pflanzenwachsen enthalten, Monoketone werden durch Bakterien und höhere Pflanzen gebildet, β -Diketone durch höhere Pflanzen (beispielsweise Eukalyptus, Gräser), n-Alkane und Olefine werden von Bakterien, Pilzen, Algen und höheren Pflanzen gebildet (Doerr et al., 2000b). Hydrophobe Fette, Wachse und phenolische Verbindungen werden langsamer abgebaut als Zucker,

Stärke, einfache Proteine oder Cellulose und reichern sich selektiv in der organischen Bodensubstanz an (Franco et al., 2000; Brady und Weil, 1990). Somit wird Benetzungshemmung von Böden oft mit bestimmten Vegetationsformen in Verbindung gebracht (*Citrus, Eucalyptus, Lupinus, Pinus, Quercus, Triticum*) (Wallis und Horne, 1992; Giovannini und Lucchesi, 1984). Es wurde durch verschiedene Studien belegt, dass Benetzungshemmung von Böden neben der Vegetationsart auch von deren Alter abhängt (Woche et al., 2005; Scott, 2000). Benetzungshemmung kann aber auch durch Verunreinigungen mit Mineralölen (Roy et al., 2003) oder durch Chemikalien (z.B. Silan, Octadecylamin) hervorgerufen werden (Bachmann et al., 2002; Feng et al., 2002).

Einige Autoren vertreten die These, dass die Menge der organischen Substanz die räumliche Anordnung der einzelnen Moleküle im Boden bestimmt (Ellerbrock et al., 2005; Capriel et al., 1995). Schon sehr geringe Mengen Kohlenstoff können in Kontaktwinkeln $> 90^\circ$ resultieren (Emerson, 1995; Mc Ghie und Posner, 1981; Bond und Harris, 1964). Allerdings kann keine grundsätzliche statistische Beziehung zwischen der Menge an organischer Bodensubstanz und dem Grad der Benetzungshemmung hergeleitet werden (Doerr et al., 2000b), obwohl einzelne Studien standortspezifisch gute positive Korrelationen zwischen dem Gehalt an organischer Substanz und Parametern, die die Benetzungshemmung charakterisieren, erzielen (Moral Garcia et al., 2005; Ellies et al., 2003; Harper et al., 2000; McKissock et al., 1998). Wang et al. (2010) untersuchten die Abhängigkeit der Benetzungseigenschaften vom Kohlenstoffgehalt auch in Wechselwirkung mit Textur und pH-Wert, können jedoch keinen prinzipiellen Zusammenhang herstellen. Welche Bedeutung die Qualität (rezent oder fossil) der organischen Substanz in diesem Zusammenhang für die Ausbildung von Benetzungshemmung besitzt, ist bisher nicht hinreichend geklärt.

Als Ursache von Benetzungshemmung werden neben organischen Überzügen auf Sandpartikeln auch aliphatische Verbindungen aus geogener organischer Substanz, beispielsweise von Kohlefragmenten, angesehen (Hangen et al., 2005; Buczko et al., 2002, Gerke et al., 2001). Miyamoto et al. (1977) stellten bei Untersuchungen von kohlehaltigen, grobsandigen Abraumsubstraten in New Mexico, U.S.A. fest, dass Kohle und kohlehaltige Substrate im Gegensatz zu Sanden und Asche schlechter benetzbar sind. Je höher der Anteil an Kohlefragmenten, desto geringer ist die Benetzbarkeit des Solums. Untersuchungen von Kohle und kohlehaltigen Böden in North

Dakota, U.S.A. zeigen, dass frische Kohle deutlich benetzungsgehemmter ist als verwitterte Kohle, was auf bei Verwitterungsprozessen oxidierende Polymere an der Kohleoberfläche zurückzuführen ist (Sharma et al., 1993).

Stärke und Persistenz der Benetzungshemmung von Böden sind ebenfalls von den standörtlichen Klimabedingungen abhängig und werden unter trockenen und warmen Bedingungen verstärkt (Doerr und Thomas, 2000). Unabhängig von der Nutzungsform wurde für unterschiedliche Standorte eine saisonale Variabilität der Benetzungshemmung in Dünengebieten (Jungerius und ten Harkel, 1994; Witter et al., 1991), auf Böden der Bergbaufolgelandschaft (Biemelt et al., 2005; Katur, 1998), für Grasland (Dekker et al. 2001; Dekker und Ritsema, 1994; Burch et al., 1989), für Eukalyptuswälder (Keizer et al., 2007; Keizer et al., 2005; Ferreira et al., 2000; Burch et al., 1989) sowie für Kiefernrein- und Kiefern-Buchen-Mischbestände nachgewiesen (Spröte et al., 2011; Buczko et al., 2005, Wöllecke et al., 2003; Buczko et al., 2002).

Die vorliegenden Studien gehen davon aus, dass die zeitliche Variabilität der Benetzungshemmung in Böden am stärksten durch den Parameter Bodenwassergehalt beeinflusst wird. Oft wird eine inverse Beziehung zwischen Wassergehalt und Grad der Benetzungshemmung (Doerr und Thomas, 2000; Dekker und Ritsema, 1994; Crockford et al., 1991) beschrieben. In einigen Studien konnte ein für den jeweils untersuchten Boden spezifischer sogenannter „kritischer“ Wassergehalt identifiziert werden, oberhalb dessen vollständige Benetzbarkeit des Bodens vorlag (Doerr und Thomas, 2000; Berglund und Persson, 1996; Dekker und Ritsema, 1996; Witter et al., 1991). Nach länger anhaltenden Niederschlägen wird der Zusammenbruch der Benetzungshemmung beschrieben (Doerr et al., 2003; Crockford et al., 1991). Hendrickx et al. (1993) begründen die zeitliche Variabilität nicht allein durch Benetzung nach Niederschlag, sondern sieht auch eine Beziehung zu kapillarem Aufstieg in Verbindung mit Grundwasserspiegelschwankungen. Somit stellen die räumliche Lage in Beziehung zur Verteilung von Oberflächenwasser nach Niederschlägen (Biemelt et al., 2005), ebenso wie die Lage zum Grundwasserspiegel (Hendrickx et al., 1993), wichtige Faktoren für die Benetzbarkeit dar.

Doerr und Thomas (2000) erklären die abnehmende Benetzungshemmung bei zunehmendem Wassergehalt durch die Ablösung hydrophober Materialien von mineralischen Bodenpartikeln, was zu polaren Oberflächen führt (Ritsema und Dekker, 1998; Tschapek, 1983). Aber auch bei hohen Wassergehalten von bis zu

38 Volumen-% in tonigem Torf konnte Benetzungshemmung von Böden nachgewiesen werden (Dekker und Ritsema, 1996; Doerr und Thomas, 2000). Jex et al. (1985) begründen andererseits die verstärkte Benetzungshemmung bei höheren Wassergehalten durch eine gesteigerte mikrobielle Aktivität, die zur verstärkten Produktion hydrophober Substanzen führen kann.

Abnehmende Bodenwassergehalte infolge trockener Perioden können zum (Wieder-) Auftreten von Benetzungshemmung führen. Dabei reichen bereits wenige Tage trockenen und heißen Wetters, um eine nach Niederschlägen abgebaute Benetzungshemmung wieder nachweisen zu können (Robichaud, 2000; Crockford et al., 1991). Doerr und Thomas (2000) zeigen in Laborexperimenten, dass sich durch alleiniges Trocknen der ursprüngliche Grad der Benetzungshemmung nicht wieder herstellen lässt. Zusätzlich zu abnehmenden Bodenwassergehalten ist die Trocknungstemperatur für das Auftreten von Benetzungshemmung von Bedeutung. Einigkeit besteht darüber, dass ansteigende Temperaturen eine Verstärkung der Benetzungshemmung hervorrufen. Crockford et al. (1991) wiesen bei 43°C, Moral Garcia et al. (2005) bei 60°C sowie Ritsema und Dekker (1998) bei 70°C induzierte Benetzungshemmung in Böden nach. Temperaturen über 280°C führen hingegen zur Zerstörung der Benetzungshemmung (DeBano, 2000; Doerr et al., 2000b; Giovannini et al., 1983). Über die genaue Höhe der einwirkenden Temperatur, ab der der Übergang zur Benetzbarkeit eintritt, bestehen allerdings widersprüchliche Angaben (Doerr et al., 2000; Bachmann, 1996; DeByle, 1973). Obwohl zahlreiche Studien Benetzungsverhalten von Böden im Zusammenhang mit hohen Temperaturen untersuchen, ist es bisher ungeklärt, welchen Einfluss bereits geringe Temperaturerhöhungen im Bereich natürlich auftretender Bodentemperaturen auf die Ausbildung von Benetzungshemmung im Zusammenhang mit Trocknungsvorgängen besitzen.

Eine Vielzahl von Studien im Zusammenhang mit der Wirkung erhöhter Temperaturen untersucht die Ausbildung feuerinduzierter Benetzungshemmung (Doerr et al., 2006; Coelho et al., 2004; Imeson et al., 1992; McGhie und Posner, 1981; Reeder und Jurgensen, 1979). Neben einer extremen Veränderung der Bodentemperatur bei Bränden werden organische Substanzen sublimiert oder verdampft. Die Pyrolyseprodukte kondensieren in kälteren Bodentiefen und resultieren in einer benetzungsgehemmten Bodenschicht nahe und parallel zur Bodenoberfläche, da pyrolysierte Humin- und Fulvosäuren hydrophob wirken (DeBano, 2000).

Neben extrem hohen können auch tiefe Temperaturen zum Zusammenbruch der Benetzungshemmung führen. Ma'shum und Farmer (1985) konnten benetzungsgehemmten Boden nach Aufsättigung mit Wasser und anschließender Gefrietrocknung wieder benetzen. Als Ursache für die verbesserte Benetzbarkeit wird die Konservierung der polaren funktionellen Gruppen an der Oberfläche postuliert. Die Wiederbenetzung des gefriergetrockneten Bodens ist somit unverzüglich möglich (Roy und McGill, 2000).

Benetzungsgehemmte Böden besitzen häufig eine sandige, grobe Textur und meist weniger als 10 % Tonanteil (Doerr et al., 2000b; Harper et al., 2000; McKissock et al. 1998; Capriel, 1997). In Ausnahmen wird auch bei bis zu 40 % Tonanteil Benetzungshemmung beobachtet (DeJonge et al., 1999; Giovannini et al., 1983). Aufgrund der kleineren spezifischen Oberfläche grobtexturierter Böden ist die Wasserhaltekapazität gering und Wasser wird schnell zur Verdunstung freigegeben. So können sich auf den oberflächennahen Kornoberflächen durch Evaporation Überzüge (coatings) anlagern. Bei grobkörnigem Substrat werden dickere Schichten angelagert als bei feinkörnigen Böden (Tschapek et al., 1983). Lichner et al. (2006) beobachteten nach der Zugabe von Kaolinit zu einem benetzungsgehemmten Substrat einen Rückgang der Benetzungshemmung .

Im Ergebnis zahlreicher Studien wurde eine hohe räumliche Variabilität der Benetzungseigenschaften in Böden dokumentiert, sowohl horizontal als auch vertikal. Als Ursachen gelten die heterogene Verteilung des Bodenwassers, der Anteil an CaCO_3 und hydrophoben Substanzen, die Heterogenität der Vegetationsmuster sowie die Mächtigkeit der Streuschicht (Dekker und Ritsema, 1996; Ritsema und Dekker, 1998; Crockford et al., 1991; Burch et al., 1989).

In meliorierten Böden der Bergbaufolgelandschaft der Niederlausitz wurden Unterschiede der Benetzungshemmung in Oberboden (hydrophil) und Unterboden (benetzungsgehemmt) nachgewiesen (Hangen et al., 2005; Gerke et al., 2001). Gerke et al. (2001) führen die räumliche Heterogenität der Benetzungshemmung auf die heterogene Verteilung von Braunkohlepartikeln im Bodenprofil zurück. Biemelt et al. (2005) stellten auf tertiärem Substrat nur oberflächennah Benetzungshemmung fest, nicht jedoch in Tiefen von 20 und 40 cm. Zusätzlich ist eine benetzbare dünne Schicht an der Bodenoberfläche ausgebildet, die sich ständig benetzen lässt (Biemelt, 2001). Auf Dünensanden besteht ebenfalls eine hohe räumliche Variabilität der Benetzbarkeit im Tiefenprofil (Jungerius und De Jong, 1989). Die gute Benetzbarkeit

an der Oberfläche wird zum einen durch die Anwesenheit von hydrophilen Algen begründet, zum anderen wird vermutet, dass die hydrophoben Schichten auf Sandkörnern an der Oberfläche abgebaut werden oder sich infolge von Abrasion hydrophile Sande an der Oberfläche ablagern (Jungerius und De Jong, 1989; King, 1981).

1.1.3 Einfluss der Benetzungshemmung auf bodenhydrologische Prozesse

Die Auswirkungen von Benetzungshemmung auf Infiltrations- und Abflussverhalten wurden in verschiedenen Studien nachgewiesen (Doerr et al., 2003; Crockford et al., 1991; McGhie und Posner, 1981). Die am häufigsten beobachteten Effekte sind verminderte Infiltrationskapazität (Imeson et al., 1992; van Dam et al., 1990) und erhöhte Abflussraten (Ferreira et al., 2000; Witter et al., 1991; Crockford et al., 1991). In benetzungsgehemmten Böden kann die Infiltrationsrate bis auf 1 % der Rate benetzbarer Böden reduziert sein (Wallis und Horne, 1992) und es können sich infolge räumlicher Heterogenität der Benetzungshemmung präferentielle Fließwege durch das fingerartige Fortschreiten der Befeuchtungsfront herausbilden (Morales et al., 2010; Wessolek et al., 2009; Dekker und Ritsema, 2005; Bauters et al., 2000; Ritsema und Dekker, 1998).

Die verminderte Infiltrationskapazität benetzungsgehemmter Böden führt zur Bildung von verstärktem Oberflächenabfluss und nachfolgender Bodenerosion durch Wasser (Poulenard et al., 2001; Imeson et al., 1992; Witter et al., 1991; Burch et al., 1989). Die Beeinflussung des Abflussverhaltens durch Benetzungshemmung wurde bisher hauptsächlich kleinmaßstäblich oder experimentell untersucht (Leighton-Boyce et al., 2007; Dekker und Ritsema, 2005; Ferreira et al., 2000; Witter et al., 1991; Wallis und Horne, 1992). Hingegen ist der Einfluss auf Einzugsgebietsebene bisher wenig erforscht (Doerr et al., 2003; Shakesby et al., 2002b; Burch et al., 1989). Jungerius und ten Harkel (1994) untersuchten an einer Düne in den Niederlanden die Auswirkungen von Benetzungshemmung vergleichend unter Bedingungen mit Benetzungshemmung und guter Benetzbarkeit. Sie postulierten, dass unter vorherrschender Benetzungshemmung ein Anstieg der Abflussbildung gegenüber Bedingungen guter Benetzbarkeit erfolgt. Auch Keitzer et al. (2007) beobachteten auf benetzungsgehemmtem trockenen Boden höhere Abflussraten als auf feuchtem Boden im Winter.

Etablierte Wasserhaushalts- und Erosionsmodelle bilden die Prozesse insbesondere an Neulandstandorten bisher nur unzureichend ab. Daher ist die prozessorientierte

Bewertung hydrologischer Prozesse unter Einbeziehung der Benetzungseigenschaften und ihrer Auswirkungen auf die Abflusscharakteristika unerlässlich für die Prognosen von Oberflächenabflussbildung und Bodenerosion.

1.2 Zielsetzung und Fragestellungen

Gegenstand dieser Arbeit ist die prozessorientierte Charakterisierung der Ausbildung von oberflächennaher Benetzungshemmung mit dem Ziel, den Einfluss von Trockenheit auf hydraulische Eigenschaften des Oberbodens zu quantifizieren. Dies erfolgt über die Analyse relevanter Einflussparameter, die Benetzungshemmung verursachen oder beeinflussen.

Im Hinblick auf die Charakterisierung oberflächennaher Benetzungshemmung waren dabei die folgenden Fragestellungen zu beantworten:

1. Welche Methode zur Erfassung der Benetzungseigenschaften der zu untersuchenden Substrate und Substratmischungen ermöglicht eine Quantifizierung der Benetzungseigenschaften über das gesamte beobachtete Spektrum an Benetzungshemmung?
2. Welche Benetzungseigenschaften weisen die untersuchten quartären und tertiären Substrate im Untersuchungsgebiet auf?
3. Ist die Benetzungshemmung gleichmäßig oder kleinräumig heterogen ausgeprägt?
4. Unterliegt die Benetzungshemmung zeitlichen Schwankungen?
5. Welche abiotischen Parameter beeinflussen die Benetzungseigenschaften des untersuchten tertiären Substrats?
6. In welchem Grad ist Benetzungshemmung von der Quantität organischer Substanz im Boden abhängig und verursachen unterschiedliche Qualitäten organischer Substanz (rezent, fossil) verschieden starke Ausprägungen von Benetzungshemmung?
7. Welchen Einfluss haben die Anfangsfeuchte vor dem Austrocknungsprozess und die Trocknungstemperatur in diesem Zusammenhang auf die Ausbildung von Benetzungshemmung?
8. Wie können die Benetzungseigenschaften beeinflussende Parameter in die hydrologische Modellierung implementiert werden?

Zur in situ Charakterisierung von Intensität und Persistenz der Benetzungshemmung erfolgten Freilanduntersuchungen an zwei unterschiedlichen sandigen Substraten mit verschiedenen aktuellen und potenziellen Benetzungseigenschaften. Um dabei den Einfluss der Menge organischer Substanz, von Temperatur und Ausgangsfeuchte auf das Benetzungsverhalten quantifizieren zu können, wurden Freilanduntersuchungen und ergänzende Laboruntersuchungen unter definierten Bedingungen durchgeführt.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts entstehen in der Niederlausitz infolge des Braunkohlebergbaus und der dabei eingesetzten Tagebautechnologie großräumig Abraumkippen und -halden. Damit erfolgt eine großflächige Unterbrechung der natürlichen Bodengenese, die seit dem letzten Glazial andauert. Die durch den Bergbau in Anspruch genommenen Flächen von ca. 85.700 ha im Lausitzer Braunkohlenrevier (Stand Februar 2012; Statistik der Kohlenwirtschaft e.V., 2012) sind besonders durch einen veränderten Wasser-, Stoff- und Wärmehaushalt gegenüber den gewachsenen Böden charakterisiert (Hüttl et al., 2000). Die Standorte aus heterogenen, sandigen und teilweise kohlehaltigen Substraten mit zum Teil extrem saurer Bodenreaktion sind durch eine kleinräumig hohe Heterogenität physikalischer und chemischer Parameter gekennzeichnet (Biemelt et al., 2005, Hangen et al., 2005; Gerke et al., 2001). Gegenüber gewachsenen Böden herrschen stark veränderte und wechselnde Wasserhaushaltsbedingungen vor (Einecke, 2005).

Die jährliche Flächeninanspruchnahme von durchschnittlich 550 ha wird schrittweise durch Wiedernutzbarmachung und Rekultivierung ausgeglichen. Die Rekultivierung erfolgt gemäß dem Gesetz zur Regionalplanung, zur Braunkohlen- und Sanierungsplanung (RegBkPIG) und den festgelegten Nutzungszielen. Nach derzeitigem Genehmigungsstand sind insgesamt 29.310 ha Bergbaufolgelandschaft neu zu gestalten und wieder nutzbar zu machen (Kendzia und Neumann, 2010).

Das in Abbildung 3 dargestellte Untersuchungsgebiet „Neuer Lugteich“ liegt im rekultivierten Bereich des Tagebaus Welzow-Süd im Lausitzer Braunkohlenrevier (51°35' N, 14°17' E). Es wurde im Rahmen der gesetzlichen Auflagen des Braunkohlenbergbaus im Zuge der Rekultivierung als Ausgleichsfläche gezielt als Feuchtbiotop zur Wiederansiedlung von an Feuchtgebiete gebundene Flora und Fauna angelegt (Kendzia et al., 2008).

Die Ausgleichsfläche besteht aus drei Teilbereichen mit Substraten unterschiedlicher Genese. Ein etwa 1 bis 2 m mächtiger Stauhorizont, bestehend aus teilverdichteten tertiären Tonen („Flaschenton“) aus dem Bereich des Kauscher Grabens, wird von einem darüber liegenden 0 bis 2 m mächtigen Wasserleiter aus sandigen Tertiärsubstraten der Raunoer Folge (Senftenberger Elbeläufe) und kohlefreien Quartärsanden aus dem Vorfeld des Tagebaus Welzow-Süd bedeckt.

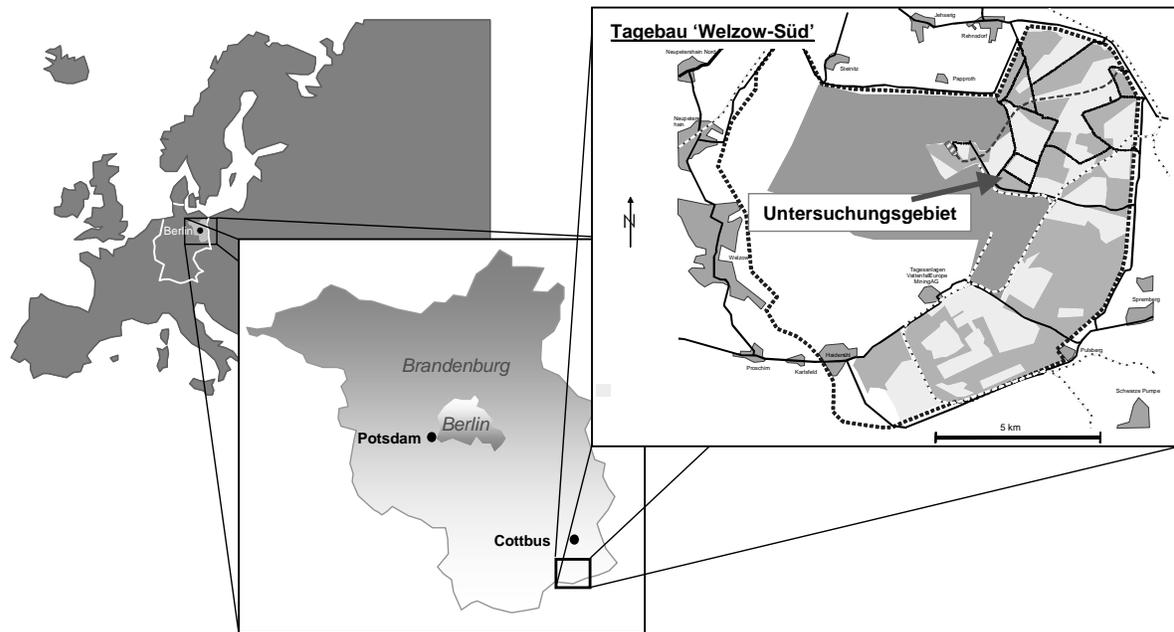


Abbildung 3: Lage des Untersuchungsgebiets (nach: Forschungszentrum Landschaftsentwicklung und Bergbaulandschaften, BTU Cottbus)

Die 2001 erstellte Versuchsfläche bildet ein Einzugsgebiet von 43.000 m² und ein angrenzendes Feuchtgebiet von 7.000 m² Größe (Kendzia et al., 2008). Das südwestlich exponierte Einzugsgebiet mit einer mittleren Hangneigung von 0 bis 6 % und einer maximalen Hangneigung von 25 % liegt zwischen 129,4 m und 135,6 m über NN (Kuhnert, 2009).

Standorte der Bergbaufolgelandschaft wie dieses künstlich geschaffene Einzugsgebiet und das angrenzende Feuchtgebiet ermöglichen Untersuchungen zur Genese eines Ökosystems nahezu vom Punkt Null an (Hüttl und Gerwin, 2005). Im nördlichen Teil der Fläche, einem etwa vier Hektar großen Teileinzugsgebiet, wurden die Untersuchungen der hydrologischen Prozesse und die Prozessstudien zur Erosion durchgeführt (Abbildung 4). Die weitgehend ungestörte Entwicklung der Standorte in der Bergbaufolgelandschaft bildet die Grundlage zahlreicher wissenschaftlicher Prozess- und Strukturstudien (Elmer et al., 2013; Dümig et al., 2013; Gerwin et al., 2011; Hofer et al., 2011; Mazur et al., 2011; Schaaf et al., 2011; Spröte et al., 2010; Kendzia et al., 2008; Lemnitz et al., 2008).

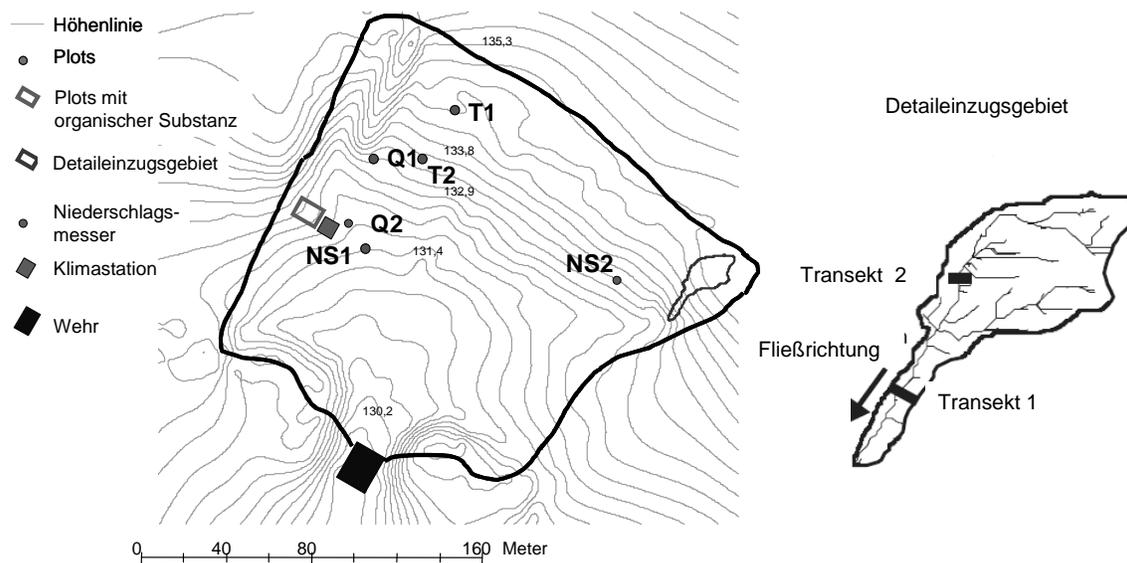


Abbildung 4: Untersuchungsgebiet und schematische Darstellung des Detailszugsgebiets mit Transekten

Die im Untersuchungsgebiet vorherrschenden Substrate mit Einzelkorngefüge sind als Lockersyrosem (Lockergestein mit Ai/ IC-Profil aus Silikatlockergestein nach AG Boden, 2005) bzw. Technosol (WRB, 2006) zu klassifizieren. Die Substrate sind in unregelmäßigen Abständen mit Fragmenten von Xylit (niedrig inkohlte langfasrige Reste mit sichtbaren holzigen Strukturen fossiler Stubben und Stämme der miozänen Lausitzer Braunkohle) aller Größen durchsetzt.

In Abhängigkeit des vorherrschenden Substrattyps treten im Untersuchungsgebiet unterschiedliche Vegetationsformen auf. Zu Beginn des Untersuchungszeitraums im Jahr 2003 war der Bereich quartärer Sande durch eine spärliche, unregelmäßige Bedeckung mit Kräutern und Gräsern gekennzeichnet. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurde eine erhebliche Zunahme der Vegetationsdichte beobachtet. Im Gegensatz dazu war der Bereich tertiärer Sande unverändert nahezu unbewachsen und dadurch besonders für Bodenerosion exponiert. Durch Wind- und Wassererosion entwickelten sich auf der unbewachsenen Fläche des tertiären Sandes die charakteristischen geomorphologischen Kuppen- und Rinnenstrukturen (Abbildungen 5, 6).

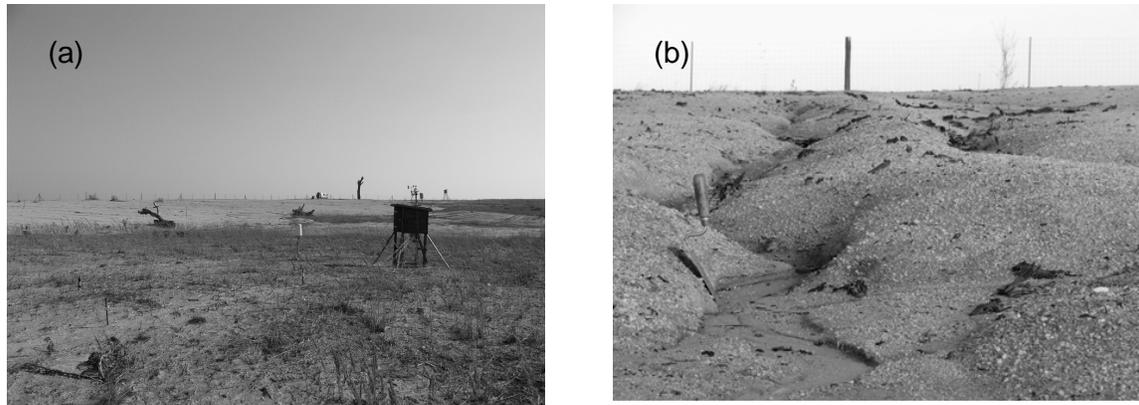


Abbildung 5: Untersuchungsgebiet mit quartärem, bewachsenem Substrat und Wetterstation im Vordergrund, im Hintergrund tertiäre Substrate (a); Erosionsrinne im tertiären Substrat (b)

Im Vergleich zu anderen Regionen Deutschlands ist die Niederlausitz durch geringe mittlere Niederschlagssummen und eine hohe potenzielle Evapotranspiration gekennzeichnet. Der mittlere Jahresniederschlag beträgt 563 mm, die Temperatur 9,3°C und die potenzielle jährliche Evapotranspiration 600-650 mm (Wendling et al., 1999). Bei der vorherrschenden kontinentalen Ausprägung des Klimas ist das Auftreten wochen- oder monatelanger heißer und trockener Perioden möglich und Niederschläge treten innerhalb der Vegetationsperiode überwiegend als konvektive Starkregenereignisse auf (Regionaler Planungsverband Oberlausitz-Niederschlesien 1993). Die gemessenen Niederschläge im Untersuchungszeitraum lagen mit 432,7 mm im Jahr 2004 und 483,9 mm im Jahr 2005 deutlich unter dem 30-jährigen Mittel (1961-1990). Die berechnete potenzielle Evapotranspiration lag 2004 etwas niedriger als das Mittel (582 mm), im Jahr 2005 mit 735 mm wesentlich höher.

2.2 Freilandversuche

2.2.1 Untersuchungskonzept zur zeitlichen und räumlichen Dynamik der Benetzungshemmung

Um die substratinduzierte Variabilität der aktuellen und potenziellen Benetzungshemmung zu charakterisieren, wurden je zwei repräsentative Probenahmeflächen (Plots) im Bereich quartärer Sande (Q1 und Q2) und tertiärer Sande (T1 und T2) eingerichtet (Abbildung 4). Die zeitliche Variabilität der aktuellen und potenziellen Benetzungshemmung wurde durch eine regelmäßige Probenahme an den Plots Q1, Q2, T1 und T2 im Abstand von etwa vier Wochen im Zeitraum von August 2003 bis Dezember 2005 an 28 Terminen charakterisiert.

Neben den substratabhängigen Unterschieden der Benetzungseigenschaften sollten weitere kleinräumige Unterschiede im Benetzungsverhalten des tertiären Substrats beobachtet werden. Diese Unterschiede im Benetzungsverhalten waren an die durch Erosion gebildeten morphologischen Strukturen gekoppelt. Die Ausbildung von Rinnen, Zwischenrinnenbereichen und Kuppen trat im Laufe des Untersuchungszeitraums immer deutlicher hervor. Infolgedessen wurden zusätzliche Untersuchungen an einem Detailszugsgebiet innerhalb des Untersuchungsgebiets durchgeführt. Die gebildeten morphologischen Strukturen (Kuppe, Zwischenrinne, Rinne) wurden beispielhaft am Verlauf einer deutlich ausgeprägten Erosionsrinne hinsichtlich ihrer Benetzungseigenschaften untersucht. Es wurden je ein Transekt im unteren Hangbereich (Probenahmepunkte: 1a, 1b, 1c, 1d, 1e) und im oberen Hangbereich (2a, 2b, 2c) der Rinnenstruktur angelegt und von Dezember 2004 bis Dezember 2005 im Abstand von ebenfalls etwa vier Wochen an zehn Terminen beprobt (Abbildungen 4 und 6).

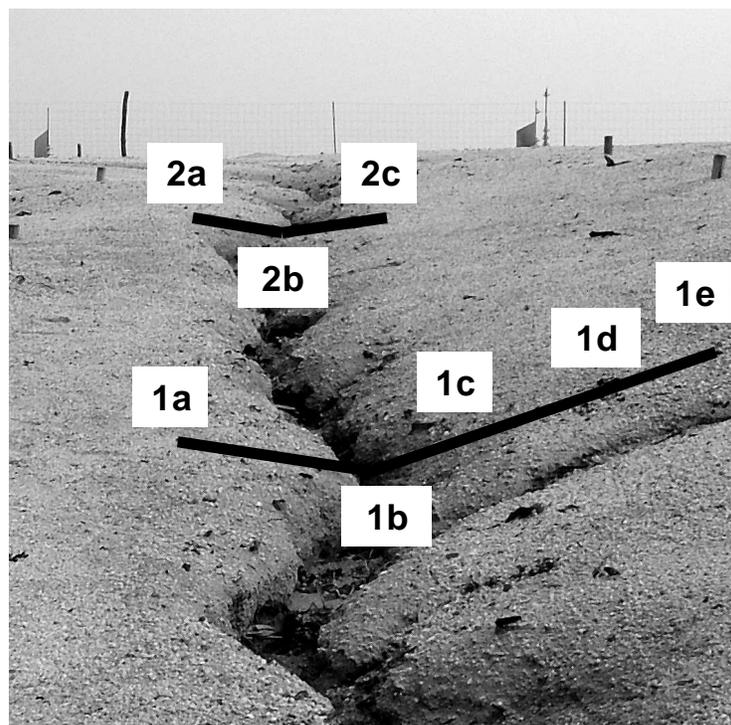


Abbildung 6: Lage der Probenahmepunkte auf den Transekten, Abstand zwischen den Probenahmepunkten etwa 0,7 m

Um die Benetzungshemmung in Abhängigkeit von Art und Gehalt der organischen Substanz zu charakterisieren, erfolgte die Einrichtung weiterer Plots, die mit unterschiedlichen Qualitäten sowie verschiedenen Gehalten organischer Substanz angereichert wurden (Abbildung 4). Die Gehalte an organischer Substanz sollten jeweils auf 1 und 3 Masse-% Kohlenstoffanteil in der Mischung mit nahezu kohlenstofffreiem quartären Sand aus dem Vorfeld des Tagebaus eingestellt werden. Als zu untersuchende organische Substanzen wurden Braunkohle als Kohlenstoffquelle fossilen Ursprungs und Kompost als rezente Kohlenstoffquelle gewählt. Um eventuelle Unterschiede der Benetzungseigenschaften zwischen unverwitterter und verwitterter Kohle zu identifizieren, wurden frisch abgebagerte Braunkohle aus dem Flözanschnitt und drei Jahre der Witterung ausgesetzte Braunkohle jeweils aus dem Tagebau Welzow-Süd verwendet. Die Kohle wurde nach Lufttrocknung mit einer Mühle (Retsch SM 2000) zerkleinert und die Anteile > 2 mm mit einer Siebmaschine (JEL FIX 50; J. Engelsmann AG) abgetrennt. Der Kompost (RAL[®]-Kompost, Rottegrad 5) wurde mit einer Siebmaschine auf < 2 mm gesiebt.

Die Mengen an Braunkohle und Kompost, die 1 und 3 Masse-% Kohlenstoffgehalt (1 % C und 3 % C) entsprechen, wurden nach Ausbringung und gleichmäßiger Verteilung auf den vorbereiteten Flächen mit einer Fräse (Köppl Bodenfräse, K11 60) zweimal orthogonal bis in etwa 25 cm Tiefe in den quartären Sand möglichst homogen eingearbeitet. In unmittelbarer Nähe wurde eine identische Fläche aus quartärem Sand ohne Beimengung organischer Substanz angelegt und als Kontrollfläche (Nullfläche) genutzt, um den Einfluss organischer Substanz auf das Benetzungsverhalten des quartären Substrats quantifizieren zu können (Abbildung 7).

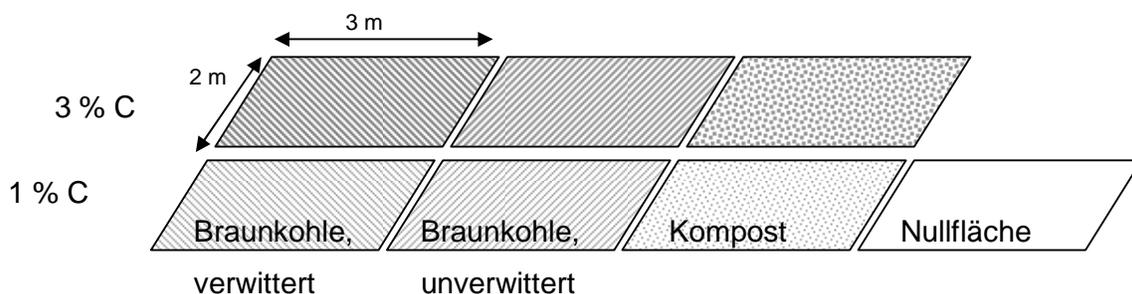


Abbildung 7: Schematische Darstellung der mit organischer Substanz angereicherten Plots

2.2.2 Probenahmen und Probenaufbereitung

Um die zeitliche Variabilität der Benetzungshemmung zu erfassen, wurden die Plots im Untersuchungszeitraum in Abständen von vier bis sechs Wochen beprobt. Im Januar 2004 und Februar 2005 konnten aufgrund von Bodenfrost keine Probenahmen durchgeführt werden. Pro Probenahmepunkt und -termin wurden jeweils zwei 250 cm³ Stechzylinder direkt an der Bodenoberfläche entnommen. Im Labor erfolgte die horizontale Aufteilung in fünf Abschnitte à 1 cm (Abbildung 8).

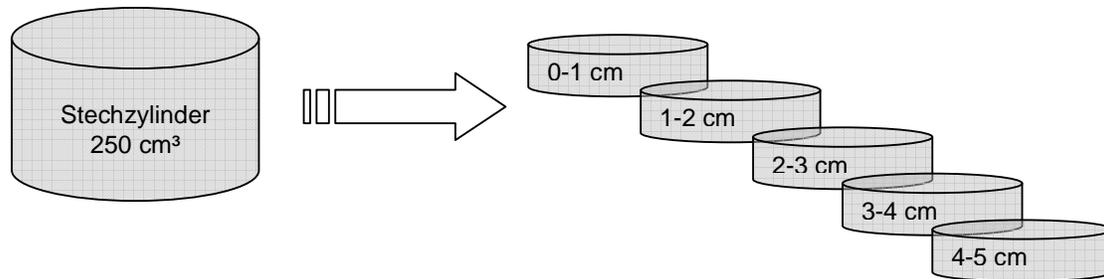


Abbildung 8: Schema der tiefendifferenzierten Probenahme mittels Stechzylinder

Der Inhalt des einen Stechzylinders wurde zur Bestimmung von Lagerungsdichte und Wassergehalt genutzt. Am zweiten Stechzylinder erfolgte die Charakterisierung der aktuellen Benetzungseigenschaften. Im Anschluss daran erfolgte die Lufttrocknung für etwa zwei Wochen und die Abtrennung des Grobbodenanteils > 2 mm durch vorsichtiges Sieben von Hand. Am Feinboden wurden die potenziellen Benetzungseigenschaften bestimmt. Von jedem Abschnitt wurden zusätzlich Aliquote zur Bestimmung des organischen Kohlenstoffgehalts entnommen und eine Mischprobe zur Analyse bodenchemischer Parameter hergestellt.

2.2.3 Methoden

Benetzungseigenschaften

Der Grad der Benetzungshemmung (= Intensität) wurde durch direkte mikroskopische Bestimmung der Kontaktwinkel am Kontaktwinkelmessgerät (Goniometer OCA 5, DataPhysics) bestimmt (Bachmann, 1996), die Persistenz der Benetzungshemmung wurde indirekt über den „Water Drop Penetration Time“ (WDPT)-Test (Bisdorf et al., 1993; DeBano, 1981) und den „Molarity of Ethanol Droplet“ (MED)-Test ermittelt (Doerr, 1998; Crockford et al., 1991). Nach Dekker und Ritsema (1994) wird zur Beurteilung der Benetzungseigenschaften in aktuelle und potenzielle Benetzungseigenschaften unterschieden. Dabei werden aktuelle Benetzungs-

eigenschaften an feldfeuchten, potenzielle Benetzungseigenschaften an getrockneten Proben erhoben.

Kontaktwinkelmessung

Als Maß für den Grad der Benetzungshemmung wurde der Kontaktwinkel mit einem Kontaktwinkelmessgerät (Goniometer OCA 5, DataPhysics) bestimmt (Abbildung 9). Kontaktwinkel aktueller Benetzungshemmung wurden an feldfeuchten Proben gemessen, deren Oberfläche manuell leicht geglättet wurde. Kontaktwinkel potenzieller Benetzungshemmung wurden an luftgetrocknetem Feinboden gemessen, der auf mit doppelseitigem Klebeband versehene Objektträger aufgepulvert wurde (Bachmann et al., 2000). Je Probe wurden zehn Tropfen deionisiertes Wasser (Tropfenvolumen: $1,7 \text{ mm}^3$) auf die Probenoberfläche aufgebracht und der Kontaktwinkel jeweils am linken und rechten Dreiphasenpunkt ermittelt (Burghardt, 1985). Zum Zeitpunkt der Messungen erfolgte eine Aufzeichnung von Temperatur und relativer Luftfeuchte, um die Vergleichbarkeit der Randbedingungen zu gewährleisten.

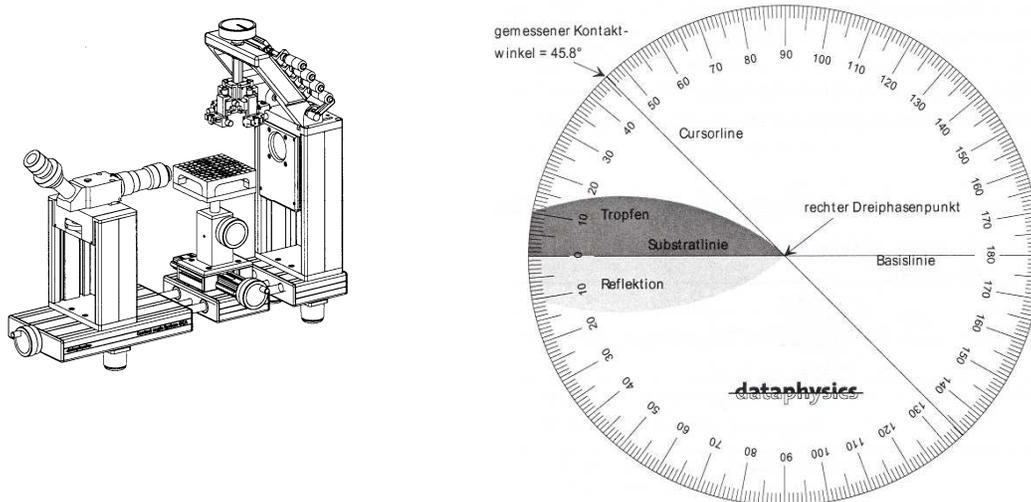


Abbildung 9: Goniometer OCA 5 (DataPhysics) und Blick durch das Okular (Quelle: DataPhysics)

Water Drop Penetration Time (WDPT)-Test

Die Persistenz (= Andauer) der aktuellen und der potenziellen Benetzungshemmung wurde mit der sogenannten Wassertropfenmethode bestimmt (Bisdorn et al., 1993; DeBano, 1981). Dabei werden zehn Wassertropfen auf die geglättete Probenoberfläche aufgebracht und die Zeitspanne erfasst, die zur Infiltration der Tropfen in die

Probe verstreicht. Die Klassifizierung der Benetzungshemmung erfolgte in Anlehnung an Bisdorn et al. (1993). Allerdings wurde die Klasse „sehr stark benetzungsgehemmt“ in kürzere Zeitabschnitte weiter unterteilt (600 bis < 1200 s; < 1800 s; < 2400 s; < 3000 s; < 3600 s), um eine detailliertere Einordnung der Benetzungshemmung der Substrate zu ermöglichen sowie Beziehungen zu anderen Parametern herstellen zu können (Tabelle 1).

Tabelle 1: Klassifikationen der Benetzungshemmung mittels WDPT-Test aus der Literatur, WDPT in Sekunden

Klassifikation	Bauters (2000)	Bisdorn (1993)	DeBano (1981)	Jaramillo (2000)	Robichaud (2000)
hydrophil	< 0,5	< 5	< 5	< 5 - 10	0 - 5
schwach benetzungsgehemmt	40	5 - 60	5 - 60	< 60 - 90	5 - 60
mäßig benetzungsgehemmt					60 - 180
stark benetzungsgehemmt		60 - 600	< 600	> 90	
sehr stark benetzungsgehemmt	2400	600 - 3600	> 600		
extrem benetzungsgehemmt	> 3600	> 3600			> 180

Molarity of Ethanol Droplet (MED)-Test

Der MED-Test klassifiziert die Benetzungshemmung mittels Bestimmung der Oberflächenspannung eines Substrats (Dekker und Ritsema, 1994; King, 1981). Drei bis zehn Tropfen steigender Ethanolkonzentration werden auf die Substratoberfläche aufgebracht. Die Ethanolkonzentration, deren Tropfen innerhalb drei Sekunden ins Substrat infiltrierte, kennzeichnet den Grad der Benetzungshemmung (Doerr, 1998; Crockford et al., 1991) (Tabelle 2).

Tabelle 2: Klassifikation der Benetzungshemmung mittels MED-Test

Klasse	Grad der Benetzungshemmung	Ethanolkonzentration [%]
1	sehr hydrophil	0
2	hydrophil	3
3	leicht benetzungsgehemmt	5
4	moderat benetzungsgehemmt	8,5
5	stark benetzungsgehemmt	13
6	sehr stark benetzungsgehemmt	24
7	extrem benetzungsgehemmt	36

Gesamtkohlenstoffgehalt

Der Gesamtkohlenstoffgehalt wurde mit einem CNS-Analyser (Elementar Vario EL) in Masse-% bestimmt. Dabei wurde der in einer feingemörserten Feststoffprobe enthaltene Kohlenstoff zu CO₂ oxidiert und anschließend detektiert (DIN ISO 10694, 1996).

pH-Wert und Elektrische Leitfähigkeit (EC)

Aus einer Mischprobe der homogenisierten Feinbodenanteile wurde eine Suspension mit einem Boden-Wasser (H₂O_{dest})-Mischungsverhältnis von 1 : 2,5 hergestellt (Schlichting und Blume, 1995). Im klaren Überstand der Suspension erfolgte die Bestimmung des pH-Wertes potentiometrisch mittels Glaselektrode (MTW Multilab 540 MTW pH 96). Im Anschluss wurde die Suspension filtriert und die Leitfähigkeit des Filtrats in $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ gemessen (MTW Multilab 50, Hanna HI 8733).

Korngrößenverteilung des Ausgangssubstrats

Zur Bestimmung des Verhältnisses von Grob- (> 2 mm) zu Feinboden (< 2 mm) erfolgte die Trockensiebung des Substrats. Auf die Zerstörung von organischer Substanz und Carbonat wurde aufgrund der sehr geringen Anteile verzichtet. Mittels Nasssiebung des Feinbodens erfolgte die Fraktionierung in Grob- (2.000-630 μm), Mittel- (630-200 μm) und Feinsand (200-63 μm). Anschließend wurde die Bestimmung der Grob- (63-20 μm), Mittel- (20-6,3 μm) und Feinschluffanteile (6,3-2 μm) sowie des Tonanteils (< 2 μm) mittels Pipettanalyse nach Köhn durchgeführt. Die Korngrößenverteilung in Masse-% wurde nach DIN 19683 (Blatt 1 und 2) in zweifacher Wiederholung durchgeführt, die Einteilung in Bodenarten erfolgte nach KA 5 (AG Boden, 2005).

Porengrößenverteilung

Mit definierten Druckkräften wurden den Proben definierte Wassermengen entzogen, die entsprechenden Äquivalenzporendurchmessern zugeordnet werden können (Schlichting und Blume, 1995). Zur Bestimmung der Porengrößenverteilung wurden in 0 bis 4 cm Bodentiefe mit 100 cm³-Stechzylindern ungestörte Proben entnommen. Es wurden bis zu sechs Entwässerungsstufen in drei- bis sechsfacher Wiederholung untersucht. Die feldfrischen Proben wurden mit entgastem Wasser aufgesättigt (Abbildung 10) und mittels Unterdruckmethode an keramischen Platten auf Wasser-

spannungen von 31 hPa, 62 hPa, 98 hPa und 310 hPa eingestellt. Gestörte Proben in 10 cm³-Zylindern wurden im Drucktopf mittels Überdruckmethode Wasserspannungen von 980 hPa und 15.500 hPa ausgesetzt (Schlichting und Blume, 1995). Die Ermittlung des Sättigungswassergehalts erfolgte durch Berechnung aus Lagerungsdichte und Festsubstanz. Die Angabe erfolgt in Volumen-%.

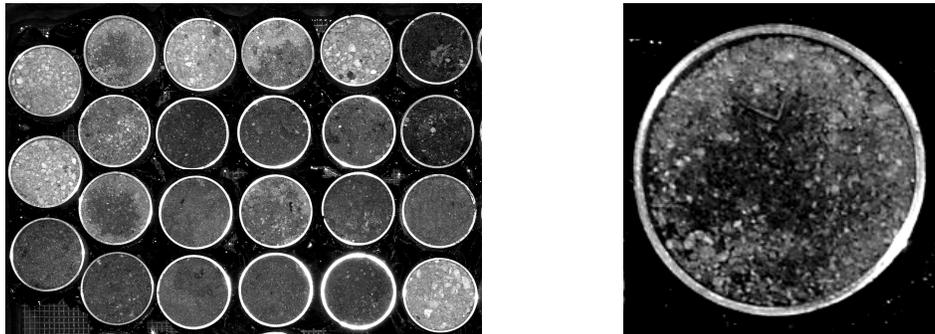


Abbildung 10: Ungleichmäßige Aufsättigung benetzungsgehemmter Proben des tertiären Substrats: dunkle Bereiche sind durchfeuchtet, helle noch trocken

Aufgrund starker Benetzungshemmung waren vor allem die Proben aus dem Kuppenbereich nur sehr schwer aufzusättigen (Abbildung 10), teilweise musste die Befeuchtung daher zusätzlich und in Abwandlung der Methode von oben erfolgen, so dass das Vorhandensein von Lufteinschlüssen nicht vollkommen ausgeschlossen werden kann.

Trockenrohichte/ Lagerungsdichte

Die Lagerungsdichte wurde durch Trocknen der Probe bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz in g·cm⁻³ ermittelt (Hartge und Horn, 1992).

Wassergehalt

Der gravimetrische Wassergehalt wurde durch Trocknung bis zur Gewichtskonstanz bei 105°C in g·cm⁻³ einzeln für die jeweils fünf Abschnitte der 250 cm³-Stechzylinder bestimmt (Hartge und Horn, 1992). Der volumetrische Wassergehalt konnte anschließend rechnerisch unter Einbeziehung der Lagerungsdichte ermittelt werden.

Meteorologische Parameter

Die in Tabelle 3 aufgelisteten Parameter wurden mit einer Minimet-Wetterstation (Abbildung 5) der Firma UP (SDL 2900) gemessen und kontinuierlich über einen 6-Kanal-Skye-Datahog 2 aufgezeichnet.

Tabelle 3: Im Untersuchungsgebiet erfasste meteorologische Parameter

Parameter	Einheit	Messintervall	Messinstrument
Niederschlag	mm	10min	Niederschlagssensor ARG 100
Relative Luftfeuchte	%	1h	Luftfeuchtesensor
Lufttemperatur	°C	1h	Temperatursensor
Bodentemperatur	°C	1h	Temperatursensor
Sonneneinstrahlung	kW/m ⁻²	1h	Pyranometersensor SKS1110
Windgeschwindigkeit	m/s	1h	Anemometer A100R (Fa. UP)
Windrichtung	Grad	1h	Windrichtungssensor W200P

Berechnung des Trockenindex nach de Martonne und Lauer

Zur Feststellung verschiedener Grade von Humidität und Aridität wurde der Trockenindex nach de Martonne und Lauer (1952) angewendet. Die Trockengrenze liegt bei einem Wert von etwa $I = 20$. Für monatliche Werte wird der Index wie folgt berechnet:

$$I = \frac{12 \cdot N}{(T + 10)} \quad [1]$$

I = Trockenindex

N = monatliche Niederschlagsmenge [mm]

T = mittlere Monatslufttemperatur [°C]

2.3 Laborversuche

2.3.1 Untersuchungskonzept

Zur Charakterisierung der Abhängigkeit der Benetzungshemmung von Gehalt und Beschaffenheit organischer Substanz, von der Temperatur und vom Wassergehalt wurden Versuche im Labor unter definierten Bedingungen durchgeführt.

2.3.2 Versuchsdurchführung

Der zur Herstellung der kohlenstoffhaltigen Substrate als Matrix verwendete Quarzsand (Praktiker Baumarkt, Körnung < 2 mm) sowie ein Teil der organischen Substanz wurden bei 25 kGy sterilisiert. Damit ist ein Vergleich zwischen sterilisierten und nicht sterilisierten Varianten möglich, um potenzielle Veränderungen der Benetzungseigenschaften durch in der organischen Substanz oder in der Matrix enthaltene Mikroorganismen (Bakterien oder Pilze) auszuschließen.

Die organischen Substrate wurden auf < 2 mm gesiebt und durch Trocknung oder Befeuchtung jeweils auf Wassergehalte von 8 und 15 % eingestellt. Der als Matrix verwendete Quarzsand wurde befeuchtet, bis 8 und 15 % Wassergehalt erreicht wurden. Durch die anschließende manuelle Homogenisierung der sandigen Matrix mit dem jeweiligen Anteil an organischer Substanz entstanden Versuchsvarianten mit 1; 3 und 5 % Kohlenstoffgehalt mit jeweils zwei unterschiedlichen Wassergehalten (8 und 15 %) (Tabelle 4).

Die Versuchsansätze wurden in Aluminium-Laborschalen (300 cm³ Fassungsvermögen) gefüllt, die Oberflächen mit einem Stempel begradigt und anschließend bei der jeweiligen Temperaturstufe (20 °C; 25 °C; 30 °C ; 40 °C; 50 °C; 60 °C) bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Zusätzlich erfolgte die Gefriertrocknung ausgewählter Versuchsansätze. Die getrockneten Proben wurden analog den Probenahmen im Gelände in Zentimeter-Abschnitte unterteilt und an den Tiefenstufen die potenziellen Benetzungseigenschaften bestimmt.

Tabelle 4: Varianten zur Untersuchung der Benetzungshemmung in Abhängigkeit von Kohlenstoff- und Anfangswassergehalt

Kohlenstoffgehalt [Masse-%]	0		1		3		5	
	8	15	8	15	8	15	8	15
Sand tertiär	x	x						
Sand quartär	x	x						
Quarzsand	x	x						
Braunkohle, frisch			x	x	x	x	x	x
Braunkohle, frisch + sterilisiert			x	x	x	x	x	x
Braunkohle, verwittert			x	x	x	x	x	x
Braunkohle, verwittert + sterilisiert			x	x	x	x	x	x
Kompost			x	x	x	x	x	x
Kompost, sterilisiert			x	x	x	x	x	x

2.3.3 Methoden zur Erfassung der Benetzungseigenschaften

Zur Charakterisierung der Benetzungseigenschaften wurden die Kontaktwinkel gemessen und der WDPT-Test durchgeführt wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben.

2.4 Verfahren der statistischen Datenanalyse

Da die meisten Daten auch nach einer Transformation keine Normalverteilung aufwiesen, wurden verteilungsunabhängige, nichtparametrische Verfahren angewandt. Soweit nicht anders angegeben, beziehen sich die angegebenen Mittelwerte auf den geometrischen Mittelwert (Median). Die Datenauswertung erfolgte mit dem Computerprogramm SPSS 17.0 (SPSS Inc.TM). Signifikante Unterschiede zwischen zwei Stichproben wurden mittels U-Test nach Mann und Whitney ermittelt. Die Berechnung von Rangkorrelationskoeffizienten verschiedener Parameter erfolgte nach Spearman. Korrelationskoeffizienten sind statistische Maßzahlen zur Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Variablen. Regressionskoeffizienten quantifizieren diese Zusammenhänge. Die ermittelten Rangkorrelationskoeffizienten und Regressionskoeffizienten wurden nach Zöfel (1998) eingestuft (Tabelle 5). Soweit nicht anders angegeben, beziehen sich die angegebenen Signifikanzniveaus auf Irrtumswahrscheinlichkeiten $\alpha \leq 0,05$ (* signifikant) und $\alpha \leq 0,01$ (** hoch signifikant).

Tabelle 5: Klassifizierung der Rangkorrelations- und Regressionskoeffizienten nach Zöfel (1998)

Korrelationskoeffizient	Klassifikation
$0 < r \leq 0,2$	sehr geringe Korrelation
$0,2 < r \leq 0,5$	geringe Korrelation
$0,5 < r \leq 0,7$	mittlere Korrelation
$0,7 < r \leq 0,9$	hohe Korrelation
$0,9 < r \leq 1$	sehr hohe Korrelation

Zur Identifizierung natürlicher, gut voneinander abgrenzbarer Gruppierungen innerhalb eines Datensatzes wurden hierarchische Clusteranalysen als explorative Verfahren durchgeführt. Die Clusteranalysen erfolgten mit der quadrierten euklidischen Distanz als Ähnlichkeitsmaß und dem Average-Linkage-Verfahren als Algorithmus für die iterative Clusterfusion. Im Dendrogramm werden die Distanzen auf Werte zwischen 0 bis 25 skaliert dargestellt.

Mittels Faktorenanalysen wurden die tatsächlich für die Benetzungseigenschaften erklärungsrelevanten Variablen identifiziert und die Anzahl der Variablen auf eine kleinere Anzahl von Dimensionen (Faktoren) reduziert. Aus einer ursprünglich großen Anzahl von Eingangsparametern (meteorologisch, bodenphysikalisch, bodenchemisch) werden so neue Faktoren extrahiert, die Eingangsparameter logisch bündeln und sich inhaltlich zu übergeordneten Einheiten zusammenfassen lassen. Zur jeweiligen Anzahl extrahierter Faktoren wird angegeben, welcher Anteil der Gesamtvarianz der Benetzungshemmung damit erklärbar ist.

Als strukturprüfendes Verfahren wurde die Diskriminanzanalyse eingesetzt. Anhand von 48 Eingangsparametern (meteorologisch, bodenphysikalisch, bodenchemisch) sollte die Zugehörigkeit der entnommenen Proben in die Gruppen hydrophil, mäßig benetzungsgehemmt und sehr stark benetzungsgehemmt möglichst optimal prognostiziert werden. Mittels der berechneten Diskriminanzfunktionskoeffizienten werden auch Prognosen der Gruppenzugehörigkeiten für neue Proben ermöglicht. Im Vorfeld der Diskriminanzanalyse wurden alle Werte z-standardisiert (normiert), um ein gleiches Gewicht der einzelnen Parameter zu gewährleisten. Somit wurde der Effekt unterschiedlicher Maßeinheiten bereinigt.

3 Ergebnisse

In diesem Kapitel erfolgt die Darstellung der Ergebnisse getrennt für die Grundcharakteristik der Substrate im Untersuchungsgebiet (3.1) und die unter 1.2 aufgeführten Fragestellungen.

3.1 Charakteristik der untersuchten Substrate

Die quartären Sande (NF, Q1, Q2) mit Ton- und Schluffanteilen unter 10 % werden als schwach kiesiger, feinsandiger Mittelsand (mSfs) klassifiziert. Der tertiäre Sand (T1, T2 und Detailszugsgebiet) ist als mittel kiesiger, grobsandiger Mittelsand (mSgs) einzustufen (AG Boden, 2005). Der Kiesanteil der tertiären Sande liegt mit zirka 30 % deutlich höher als beim quartären Sand mit zirka 12 % (Tabelle 6, Abbildung 10). Die untersuchten Substrate werden nach der Bodenart als sehr gering erodierbar durch Wasser eingestuft (AG Boden, 2005).

Tabelle 6: Korngrößenverteilungen der untersuchten Substrate, n = 4 (Mischproben)

Probenahmepunkt	Korngrößenverteilung [g 100 g ⁻¹]							Kiesanteil [g 100 g ⁻¹]
	gS	mS	fS	gU	mU	fU	T	
quartärer Sand								
NF	13,8	57,2	22,8	2,0	0,9	0,3	3,0	12,7
Q1	10,3	57,1	26,8	1,9	0,9	0,2	2,8	11,7
Q2	10,3	56,8	27,4	1,7	0,9	0,3	2,6	12,5
tertiärer Sand								
T1	45,7	34,5	13,8	1,3	0,8	0,5	3,5	33,2
T2	43,5	34,4	16,7	0,8	0,6	0,4	3,6	32,3

An den Punkten T1 und T2 wurde kein signifikanter Unterschied in der Korngrößenverteilung zwischen Bodenoberfläche und den darunterliegenden Bereichen festgestellt. Der Kiesanteil des tertiären Substrats im Detailszugsgebiet ist hingegen an der Bodenoberfläche (0-1 cm) bis zu 10 % tendenziell höher als im Tiefenbereich 1-5 cm (Abbildung 11). Der Punkt 1b mit seiner Position in einer Rinne bildet eine Ausnahme, hier ist der Feinbodenanteil oberflächennah deutlich erhöht. Der Feinbodenanteil am Punkt 1b beträgt an der Oberfläche mehr als 80 % gegenüber etwa 60 % Feinbodenanteil an der Bodenoberfläche auf Kuppen und in Zwischenrinnenbereichen.

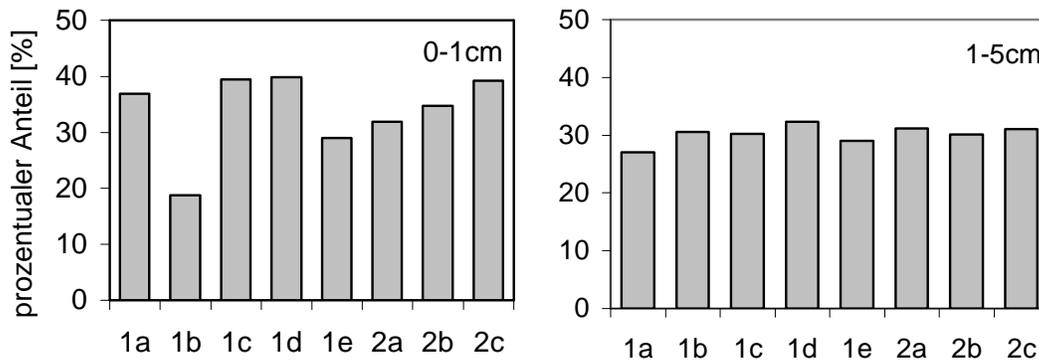


Abbildung 11: Prozentualer Anteil der Kiesfraktion im Detailszugsgebiet für Bodenoberfläche und die Tiefenstufe 1-5 cm, n = 4

Lagerungsdichte

Die Lagerungsdichte der Substrate an der Oberfläche ist als mittel ($1,4\text{-}1,6\text{ g cm}^{-3}$) bis hoch ($1,6\text{-}1,8\text{ g cm}^{-3}$) einzustufen (AG Boden, 2005). Zwischen den beprobten Plots quartärer und tertiärer Sande bestehen bezüglich der Lagerungsdichte keine signifikanten Unterschiede. Der Punkt T1 im oberen Hangbereich weist die höchste Lagerungsdichte auf ($1,72\text{ g cm}^{-3}$), im unteren Hang weisen T2 und Q2 ($1,63\text{ g cm}^{-3}$) einen geringfügig niedrigeren Wert auf (Abbildung 12a). Für die Beprobungspunkte entlang der Transekte im Detailszugsgebiet lassen sich keine signifikanten Unterschiede in der Lagerungsdichte zwischen den einzelnen geomorphologischen Einheiten feststellen (Abbildung 12b). Tendenziell liegt die Lagerungsdichte der Rinnenbereiche (1b, 2b) mit $1,62\text{ g cm}^{-3}$ nicht wesentlich höher als die des Zwischenrinnenbereichs ($1,61\text{ g cm}^{-3}$), aber deutlich höher ($1,53\text{ g cm}^{-3}$) als die der Kuppenbereiche (1e, 2a) (Abbildung 12b).

Durch die Beimengung organischer Substanz wurde die Lagerungsdichte des quartären Substrats ($1,67\text{ g cm}^{-3}$) in allen Varianten gegenüber der Nullfläche signifikant reduziert (Abbildung 12c). Die deutlichste Verminderung konnte durch die Zugabe von 3 % Kohlenstoff in Form von Kompost (K3) erreicht werden ($1,01\text{ g cm}^{-3}$). Innerhalb der Varianten K, W0 und W3 unterscheiden sich die Applikationen von 1 und 3 % Kohlenstoff hinsichtlich der Lagerungsdichte signifikant. Zwischen W0/1 und W3/1 ($1,5\text{ g cm}^{-3}$) sowie zwischen W0/3 und W3/3 ($1,2\text{ g cm}^{-3}$) ist kein signifikanter Unterschied in der Lagerungsdichte festzustellen.

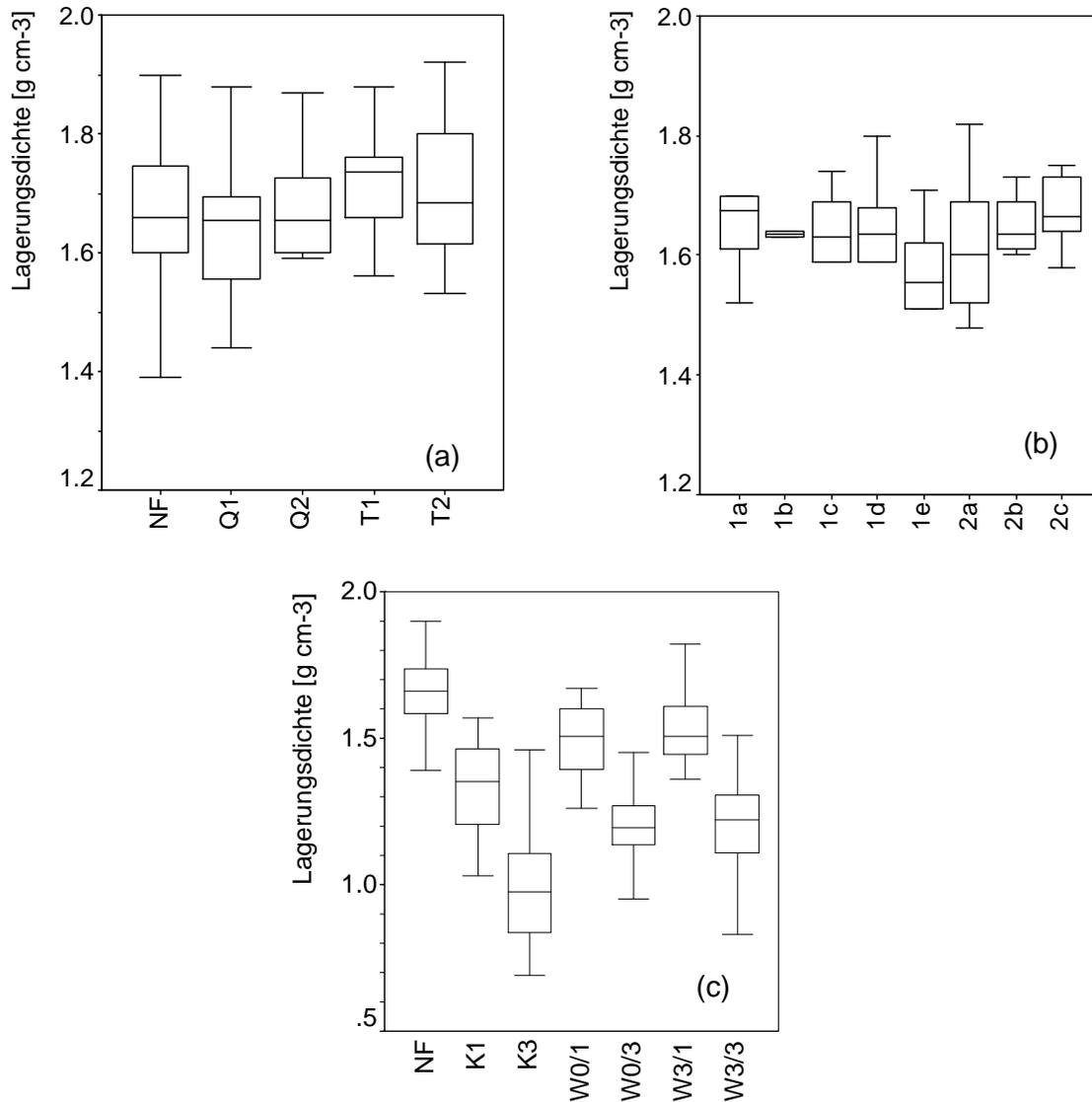


Abbildung 12: Lagerungsdichte der Plotbeprobung, $n = 20$ (a), des Detailinzugsgebiets, $n = 8$ (b) und der mit organischer Substanz angereicherten Plots, $n = 24$

Wasserhaushalt

Die Kennwerte der Wasserbindung sind für die untersuchten Substrate vom Primärporensystem, und somit ausschließlich von der Korngrößenverteilung abhängig und zeigen den für Sandböden typischen Verlauf (Scheffer und Schachtschabel, 1998). Zwischen den Entwässerungscharakteristika der quartären und tertiären Sande bestehen nur sehr geringe Unterschiede (Abbildung 13a). Das Gesamtporenvolumen von 37 % ist als gering einzustufen (AG Boden, 2005). Der Anteil der weiten Grob-

poren ist mit 27 % dominierend gegenüber 3 % engen Grobporen sowie 3 % Mittel- und 5 % Feinporen.

Hinsichtlich ihres Entwässerungsverhaltens unterscheiden sich die geomorphologischen Strukturbereiche Rinne, Zwischenrinne und Kuppe des tertiären Substrats im Detailszugsgebiet. Während die Werte für Rinnen- und Kuppenbereich keine Unterschiede aufweisen, sind die Werte des Zwischenrinnenbereichs für Wassersättigung, pF 1,8 und pF 2,0 tendenziell erhöht (Abbildung 13b).

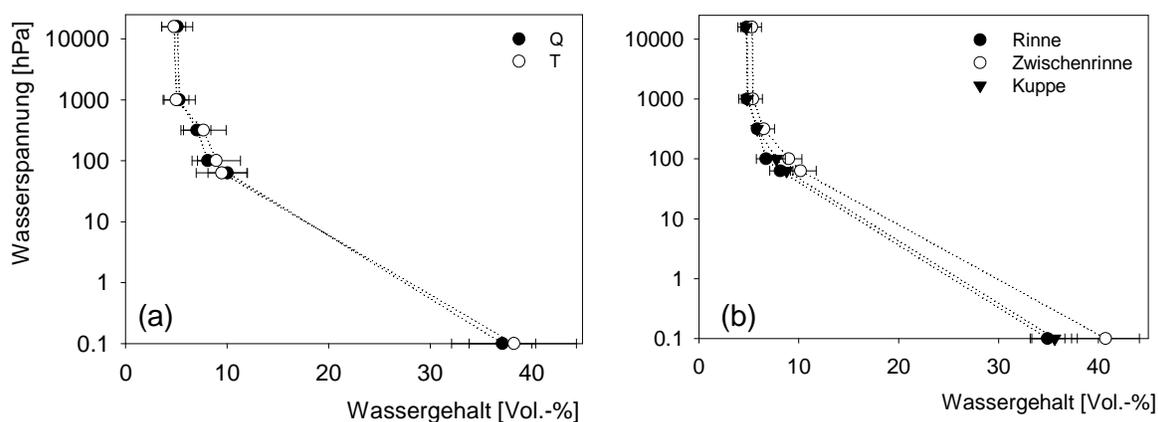


Abbildung 13: Wassergehalte quartärer und tertiärer Substrate (a) und der geomorphologischen Bereiche (b) in Abhängigkeit vom Matrixpotential, $n = 6$

pH-Werte der Substrate

Die quartären Sande weisen im Mittel eine sehr schwach saure Bodenreaktion auf. Die pH-Werte streuen von mäßig sauer bis schwach alkalisch und sind signifikant höher als die pH-Werte der tertiären Sande. Innerhalb der quartären Sande gibt es zwischen den Plots Q1 und Q2 keinen signifikanten Unterschied (Tabelle 7, Abbildung 14a).

Tabelle 7: pH-Werte quartärer und tertiärer Substrate im Untersuchungsgebiet

	Quartär ($n = 76$)	Tertiär		
		Gesamt ($n = 116$)	T1 und T2 ($n = 52$)	Detailstudie ($n = 64$)
Median	6,5	3,7	4,0	3,1
Minimum	4,7	2,6	3,2	2,6
Maximum	7,9	4,8	4,8	3,7

Die pH-Werte der tertiären Sande liegen im Mittel im sehr stark sauren Bereich und schwanken zwischen extrem sauer bis mäßig sauer. Die Plots T1 und T2 unter-

scheiden sich bezüglich des pH-Wertes nicht signifikant voneinander und sind signifikant höher als die pH-Werte der Substrate im Detaileinzugsgebiet, die im extrem sauren bis sehr stark sauren Bereich liegen (AG Boden, 2005). Zwischen den einzelnen geomorphologischen Einheiten der Rinnenstruktur lassen sich signifikante Unterschiede im pH-Wert feststellen. Die höchsten pH-Werte (pH 3,2) wurden für den Rinnenbereich (1b, 2b) erhoben. Vom Zwischenrinnenbereich (pH 3,0) nehmen die Werte bis zum Kuppenbereich (1e) hin ab (pH 2,7) (Abbildung 14b).

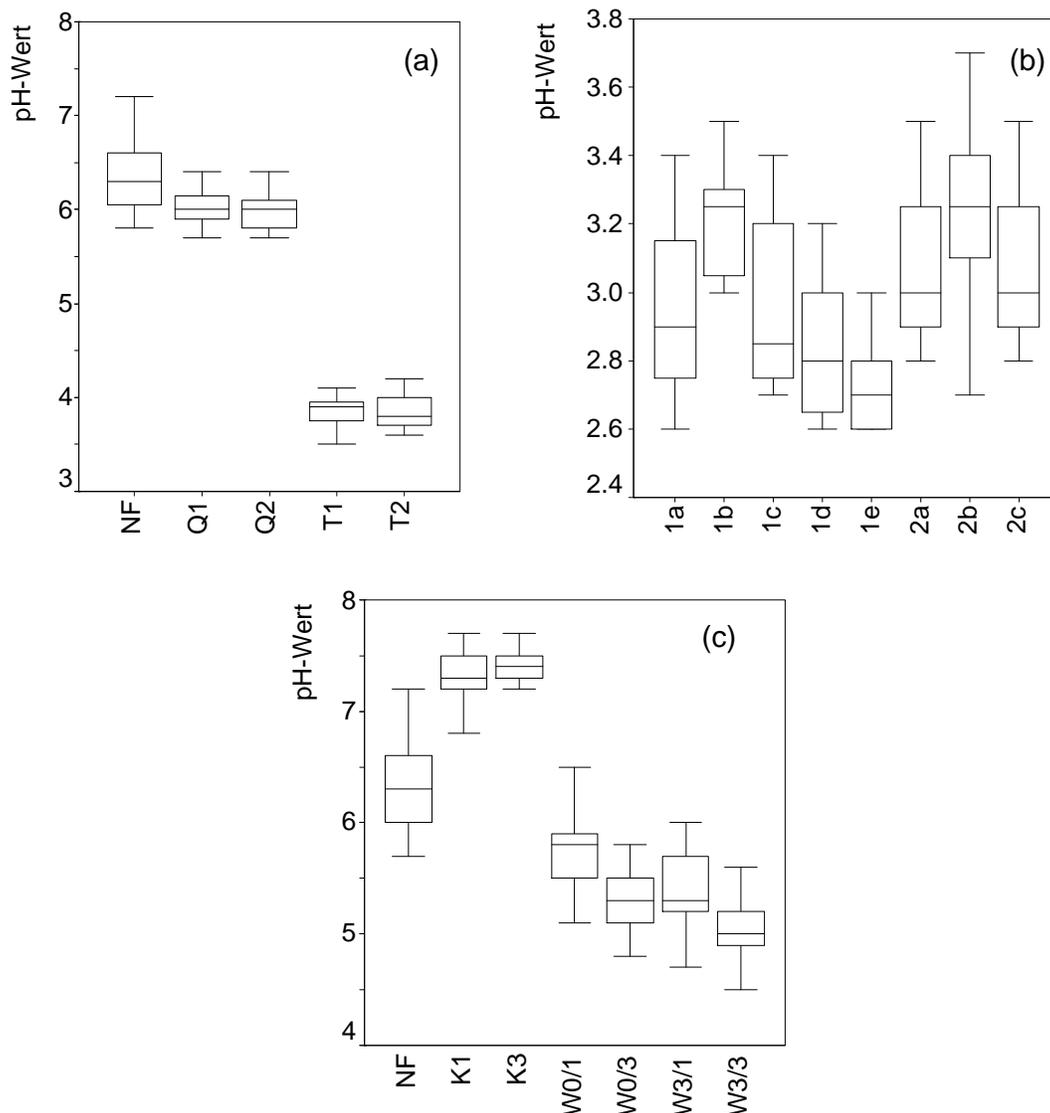


Abbildung 14: pH-Werte der Plotbeprobung, n = 23 (a) pH-Werte des Detaileinzugsgebiets, n = 8 (b) und der mit organischer Substanz angereicherten Plots, n = 25 (c); unterschiedliche Skalierung

Die mit organischer Substanz angereicherten Plots aus quartären Sanden weisen in Kombination mit kohligter Substanz signifikant niedrigere pH-Werte gegenüber der Nullfläche auf (Abbildung 14c). Die Plots mit frischer Kohle (W0) besitzen, wie die Nullfläche, eine schwach saure Bodenreaktion, die Plots mit verwitterter Kohle (W3) eine mäßig saure Bodenreaktion. Die Plots mit der frischen (W0/1, W0/3) sowie mit der verwitterten Kohle (W3/1, W3/3) weisen jeweils signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit 1 und 3 % Kohlenstoff auf. Dabei unterscheiden sich W0/1 und W3/1 signifikant voneinander. Zwischen W0/3 und W3/3 besteht im pH-Wert kein signifikanter Unterschied.

In Kombination mit dem eingearbeiteten Kompost wird der pH-Wert des quartären Sandes signifikant erhöht, hier ist die Bodenreaktion als sehr schwach alkalisch einzustufen. Zwischen den Varianten K1 und K3 besteht jedoch kein signifikanter Unterschied, die Menge der applizierten organischen Substanz hat in diesem Fall keine Auswirkung auf den pH-Wert.

Elektrische Leitfähigkeit

Die Werte der elektrischen Leitfähigkeit sind für die quartären Sande geringfügig niedriger als für die tertiären Sande (Abbildung 15a). Die in sich inhomogenen tertiären Substrate sind zudem weiter zu differenzieren, denn im Gebiet des Detailszugsgebiets sind die Werte um ein Vielfaches (maximal $3910 \mu\text{S cm}^{-1}$) gegenüber den übrigen Versuchsplots (maximal $392 \mu\text{S cm}^{-1}$) erhöht. Zwischen den einzelnen geomorphologischen Einheiten der Rinnenstruktur im Detailszugsgebiet bestehen signifikante Unterschiede in der elektrischen Leitfähigkeit (Abbildung 15b). Die höchsten mittleren Leitfähigkeitswerte ($2508 \mu\text{S cm}^{-1}$) liegen im Kuppenbereich (1e) vor. Vom Zwischenrinnenbereich ($1123 \mu\text{S cm}^{-1}$) nehmen die Werte bis zum Rinnenbereich hin ab (1b, 2b) ($393 \mu\text{S cm}^{-1}$).

Die mit organischer Substanz angereicherten quartären Sande verfügen über signifikant erhöhte Leitfähigkeitswerte gegenüber der Nullfläche (Abbildung 15c). Innerhalb der Varianten W0/1 und W0/3 sowie K1 und K3 unterscheiden sich die Leitfähigkeitswerte signifikant, die Varianten W3/1 und W3/3 weisen hingegen keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit auf.

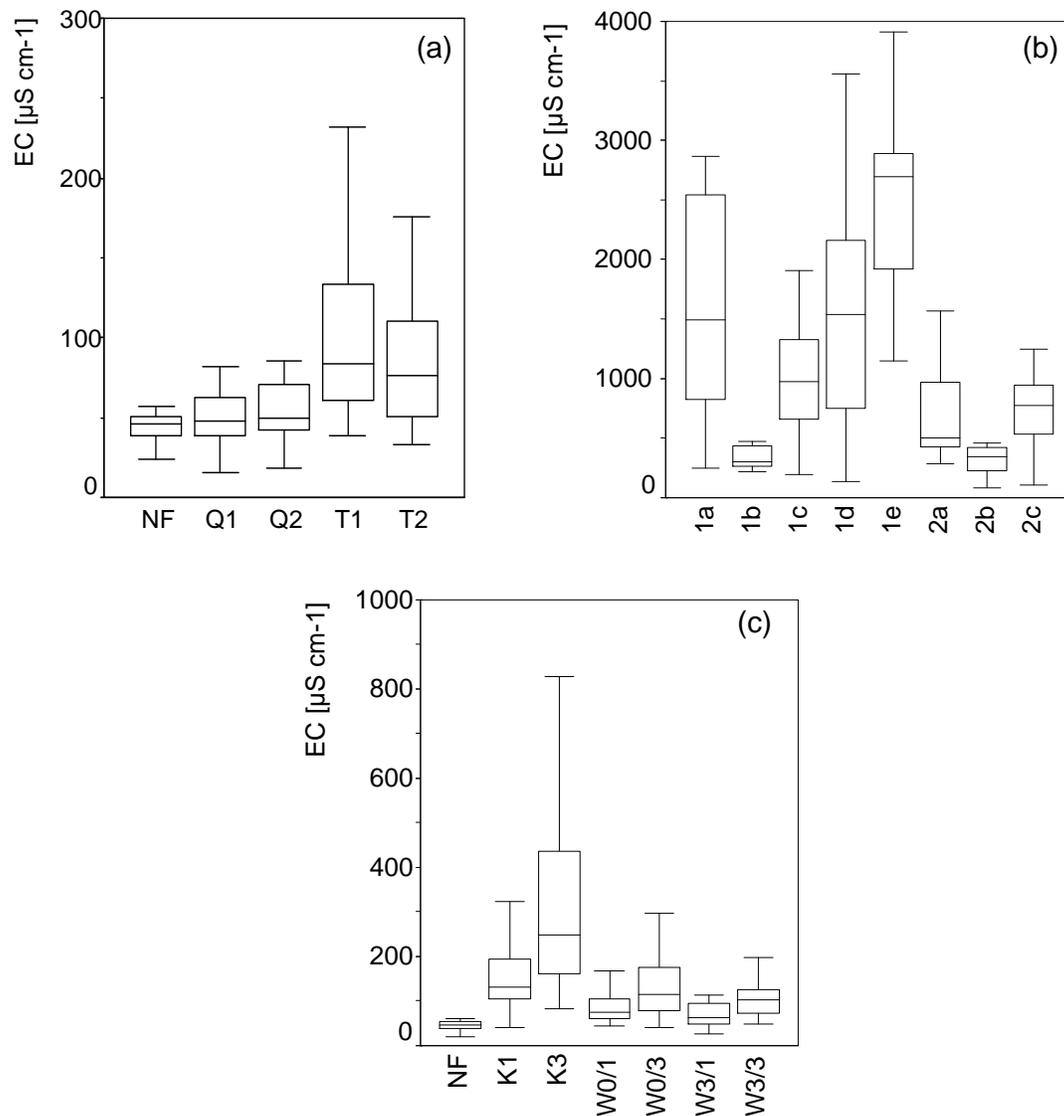


Abbildung 15: Elektrische Leitfähigkeit der Plotbeprobung, $n = 22$ (a), des Detail-einzugsgebiets, $n = 8$ (b) und der mit organischer Substanz ange-reicherten Plots, $n = 24$ (c); unterschiedliche Skalierung

Gehalt an organischem Kohlenstoff

Der Kohlenstoffgehalt der quartären Sande ist im Mittel mit 0,12 % signifikant niedriger als der Gehalt der tertiären Sande (0,37 %). Innerhalb des quartären Substrats bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Plots (NF, Q1 und Q2). Die beiden im Bereich tertiärer Sande angelegten Plots unterscheiden sich hinsichtlich des Kohlenstoffgehalts signifikant von den Plots quartärer Sande, wobei T1 durchschnittlich geringfügig höhere Gehalte (0,38 %) an organischem Kohlenstoff als T2 (0,35 %) aufweist (Abbildung 16a). Im Detaileinzugsgebiet konnte nur für den

Rinnenpunkt 1b ein signifikant geringerer Kohlenstoffgehalt (0,25 %) zu den restlichen, auf Kuppen (0,4 %) und im Zwischenrinnenbereich (0,35 %) gelegenen Probenahmepunkten festgestellt werden (Abbildung 16b). Die mit organischer Substanz angereicherten quartären Sande weisen signifikant erhöhte Kohlenstoffgehalte gegenüber der Nullfläche auf (Abbildung 16c).

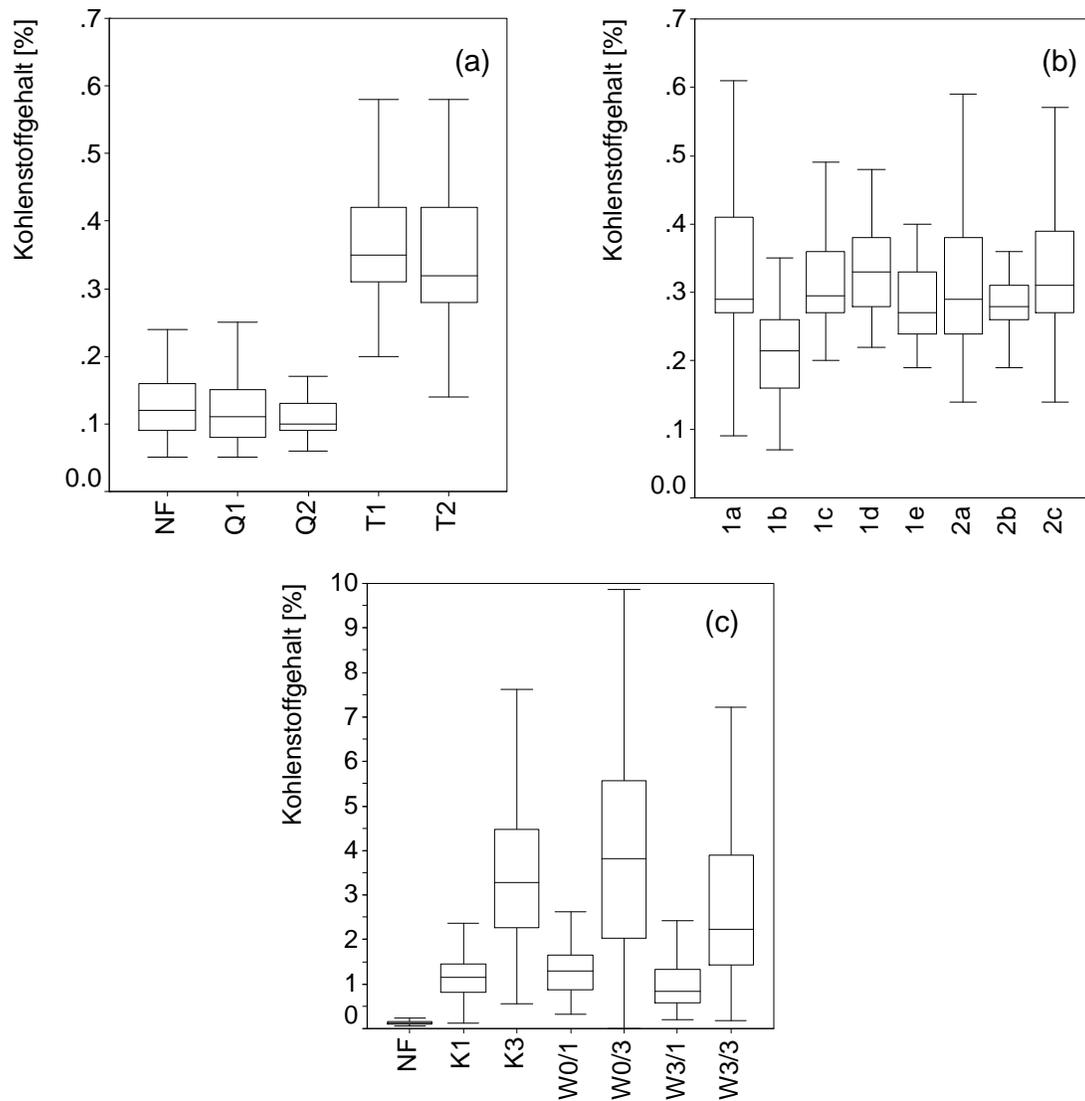


Abbildung 16: Gehalte an organischem Kohlenstoff der Plotbeprobung, $n = 101$ je Variante (a), Gehalte an organischem Kohlenstoff im Detailszugsgebiet, $n = 50$ je Variante (b) und Gehalte an organischem Kohlenstoff der mit organischer Substanz angereicherten Plots, $n = 118$ je Variante

Bis auf K1 und W0/1 unterscheiden sich alle anderen Varianten mit frischer Kohle, verwitterter Kohle und Kompost signifikant im Kohlenstoffgehalt voneinander. Aufgrund der künstlichen Einmischung der organischen Substanz ist der Kohlenstoffgehalt der untersuchten Tiefenstufen annähernd konstant und homogen verteilt.

An den untersuchten Punkten der tertiären Sande (Plots und Detailszugsgebiet) wurden keine signifikanten Unterschiede der Kohlenstoffgehalte, bezogen auf die Tiefe, ermittelt. Der Kohlenstoffgehalt im quartären Sand nimmt dagegen tendenziell von der Bodenoberfläche nach unten ab. Dabei weist der oberste Zentimeter signifikant höhere Kohlenstoffgehalte als in ein bis fünf Zentimeter Tiefe auf (Abbildung 17).

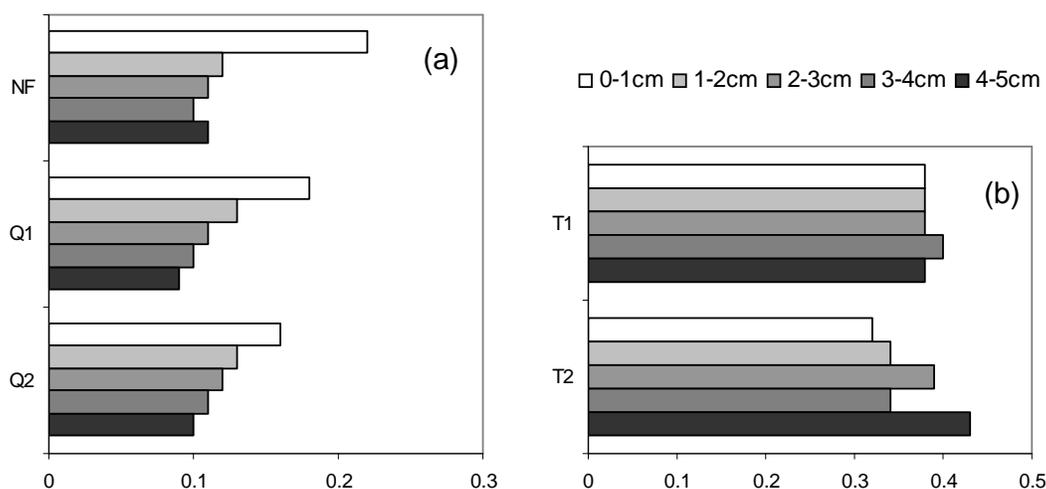


Abbildung 17: Tiefenverteilung der Kohlenstoffgehalte im quartären (a) und tertiären (b) Substrat, n = 28; unterschiedliche Skalierung

3.2 Methodenvergleich zur Erfassung der Benetzungseigenschaften am Beispiel der quartären und tertiären Substrate

Die Beurteilung der Benetzungseigenschaften der untersuchten tertiären und quartären Substrate erfordert eine Methode, die eine umfassende und hinreichend genaue Einschätzung der Benetzungshemmung im gesamten Variationsbereich der Benetzungseigenschaften ermöglicht. Es wurden sowohl Kontaktwinkelmessungen als auch der WDPT-Test auf ihre qualitative Eignung geprüft.

Die sandigen Substrate weisen ein differenziertes aktuelles und potenzielles Benetzungsverhalten auf. Im Untersuchungszeitraum waren die quartären Sande

durchgehend gut benetzbar (aktuelle und potenzielle Benetzungshemmung). Die gemessenen Kontaktwinkel aktueller Benetzungshemmung betragen stets 0° und die WDPT-Zeiten waren nicht höher als 5 s. Die Kontaktwinkel potenzieller Benetzungshemmung waren selten größer als 20° (Tabelle 8). Die Ergebnisse beider Methoden ergeben übereinstimmend, dass der quartäre Sand gut benetzbar ist.

Tabelle 8: Spannweiten der aktuellen und potenziellen Benetzungseigenschaften quartärer und tertiärer Substrate

Substrat	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]	
	aktuell	potenziell	aktuell	potenziell
quartärer Sand	0...15	0...40	0...< 5	0
tertiärer Sand	0...125	0...20	0...> 3600	0

Die tertiären Sande weisen eine signifikant geringere aktuelle Benetzbarkeit als die quartären Sande auf. Im luftgetrockneten Zustand (potenzielle Benetzbarkeit) sind sie durchgehend sehr gut benetzbar, was übereinstimmend durch die Ergebnisse von Kontaktwinkel- und WDPT-Messungen widerspiegelt wird (Tabelle 8). Die Benetzungshemmung der hier untersuchten tertiären Substrate variierte dagegen im feldfeuchten Zustand in einer weiten Spanne von sehr gut benetzbar bis extrem benetzungsgehemmt (WDPT > 3600 s), obwohl die gemessenen Kontaktwinkel aktueller Benetzungshemmung mit Medianen < 60° teilweise sehr klein waren (Tabelle 8). Die beiden angewandten Methoden zur Erfassung der Benetzungseigenschaften ergeben unterschiedliche Ergebnisse, nach Einstufung mittels WDPT-Messung wäre das tertiäre Substrat extrem benetzungsgehemmt, jedoch nach Einstufung mittels Kontaktwinkelmessung gut benetzbar.

Zwischen den Kontaktwinkeln und WDPT-Zeiten aktueller Benetzungshemmung der Plots T1 und T2 bestehen signifikante Korrelationen ($p < 0,01$) und Regressionen ($p < 0,01$), wobei die Korrelationen für Plot T2 stärker als für Plot T1 ausgeprägt sind (Tabellen 9 und 10, Abbildung 18). Um die Parameter der Benetzungshemmung in der weiteren Auswertung in Beziehung zu anderen Parametern setzen zu können, wurden Kontaktwinkel und WDPT-Zeiten über die beprobten Tiefenstufen gemittelt (je ein Wertepaar pro Plot und pro Probenahme). Bei Berechnung der Korrelationen und Regressionen der gemittelten Werte erhöhen sich die Koeffizienten gegenüber den Koeffizienten der Einzelwerte (Tabelle 9).

Tabelle 9: Spearman-Rangkorrelationen (r_s) und lineare Regressionen (R^2) zwischen Kontaktwinkeln und WDPT-Zeiten (aktuelle Benetzungshemmung); ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

Kontaktwinkel [°] zu WDPT [s]	T1 (n = 145)	T2 (n = 136)	T gesamt (n = 281)	Mediane T1 (n = 28)	Mediane T2 (n = 28)	Mediane T gesamt (n = 56)
r_s	0,699*	0,791**	0,742**	0,858**	0,867**	0,874**
R^2	0,513**	0,780**	0,625**	0,729**	0,852**	0,884**

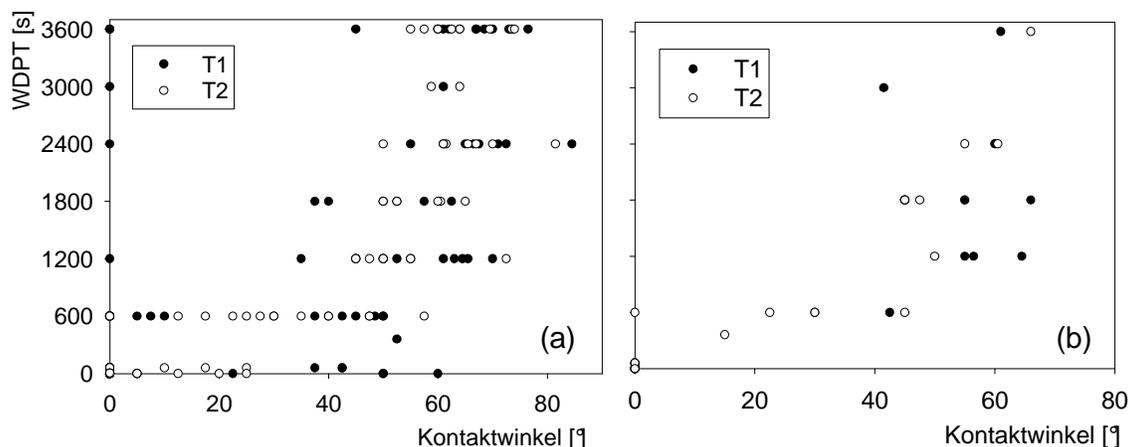


Abbildung 18: Kontaktwinkel und WDPT-Zeiten, n = 281 (a) sowie Mediane von Kontaktwinkeln und WDPT-Zeiten, n = 28 (b) für die aktuelle Benetzungshemmung der Plots T1 und T2 über eine Zeitdauer von 28 Monaten, unterschiedliche Skalierung

Analog zu den untersuchten Plots T1 und T2 liegen für alle Punkte des Detaileinzugsgebiets Korrelationen ($p < 0,01$) der Kontaktwinkel mit den WDPT-Zeiten aktueller Benetzungshemmung vor (Tabelle 10). Außer am Punkt 1b (Rinne) liegen die Korrelationskoeffizienten aller Punkte in Bereichen hoher bis sehr hoher Korrelation.

Tabelle 10: Spearman-Rangkorrelationen (r_s) und lineare Regressionen (R^2) der Mediane aktueller Benetzungshemmung zwischen Kontaktwinkel und WDPT, n = 50; ** $p < 0,01$

Kontaktwinkel [°] zu WDPT [s]	1a	1b	1c	1d	1e	2a	2b	2c
r_s	0,920**	0,402**	0,896**	0,895**	0,884**	0,804**	0,804**	0,921**
R^2	0,842**	0,794**	0,658**	0,784**	0,793**	0,793**	0,468**	0,776**

Für die im Freilandversuch untersuchten Mischungen quartären Sandes mit rezenter (K1, K3) und geogener (W0/1, W0/3, und W3/1, W3/3) organischer Substanz in verschiedenen Anteilen ergaben sich Korrelationen ($p < 0,01$) zwischen Kontaktwinkeln und WDPT-Zeiten sowohl für das aktuelle als auch für das potenzielle Benetzungsverhalten. Die Korrelationen für das aktuelle und für das potenzielle Benetzungsverhalten liegen dabei in etwa der gleichen Größenordnung, in Bereichen zwischen mittlerer und hoher Korrelation (Tabellen 11, 12).

Tabelle 11: Spearman-Rangkorrelationen (r_s) und lineare Regressionen (R^2) zwischen WDPT und Kontaktwinkel (aktuelle Benetzungshemmung) der mit organischer Substanz angereicherten Plots, ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

Kontaktwinkel [°] zu WDPT [s]	NF	K1	K3	W0/1	W0/3	W3/1	W3/3
Einzelwerte, n = 133							
r_s	-	0,601**	0,721**	0,443**	0,657**	0,426**	0,606**
R^2	-	0,506**	0,467**	0,703**	0,434**	0,453**	0,602**
Gemittelte Werte, n = 28							
r_s	-	0,716**	0,826**	0,664**	0,697**	0,688**	0,798**
R^2	-	0,147*	0,430**	0,900**	0,401**	0,810**	0,781**

Tabelle 12: Spearman-Rangkorrelationen (r_s) zwischen WDPT und Kontaktwinkel (potenzielle Benetzungshemmung) für die mit organischer Substanz angereicherten Plots, n = 125; ** $p < 0,01$

Kontaktwinkel [°] zu WDPT [s]	NF	K1	K3	W0/1	W0/3	W3/1	W3/3
r_s	-	0,729**	0,774**	0,433**	0,613**	0,598**	0,658**

Für das potenzielle Benetzungsverhalten der untersuchten Substratmischungen im Labor bestehen Korrelationen ($p < 0,01$) zwischen Kontaktwinkeln und WDPT-Zeiten. Trotz gemessener Kontaktwinkel unterhalb 90° sind die dazugehörigen WDPT-Zeiten häufig größer als 600 s (Tabelle 13, Abbildung 19). Die Korrelationen liegen beim Laborversuch für die Substratmischungen mit geogenem Kohlenstoff (W0, W3) im hohen bis sehr hohen Bereich und für die Substratmischung mit rezentem Kohlenstoff (K) im Bereich mittlerer Korrelation (Tabelle 13). Die Korrelation zwischen den Medianen der Kontaktwinkel und den Medianen der WDPT-Zeiten für die Substrat-

mischung mit rezentem Kohlenstoff liegt in der gleichen Größenordnung wie bei den Freilanduntersuchungen. Für die Substratmischungen mit geogenem Kohlenstoff liegen die Korrelationen hingegen deutlich über denen der Freilanduntersuchungen.

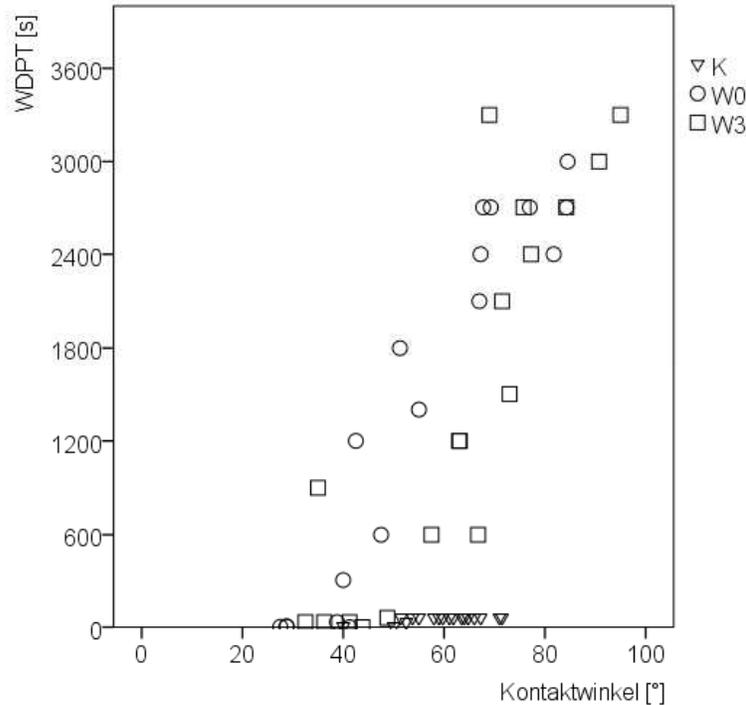


Abbildung 19: Mediane von Kontaktwinkeln und WDPT-Zeiten potenzieller Benetzungshemmung der Substratmischungen aus dem Laborversuch, jeweils $n = 18$

Tabelle 13: Spearman-Rangkorrelationen (r_s) und lineare Regressionen (R^2) zwischen Medianen der Kontaktwinkel und WDPT-Zeiten (potenzielle Benetzungshemmung) der Substratmischungen aus dem Laborversuch, ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

Kontaktwinkel [°] zu WDPT [s]	W0	W3	geogen	K
r_s	0,940** ($n = 18$)	0,868** ($n = 18$)	0,892** ($n = 36$)	0,623** ($n = 18$)
R^2	0,892**	0,762**	0,795**	0,506**

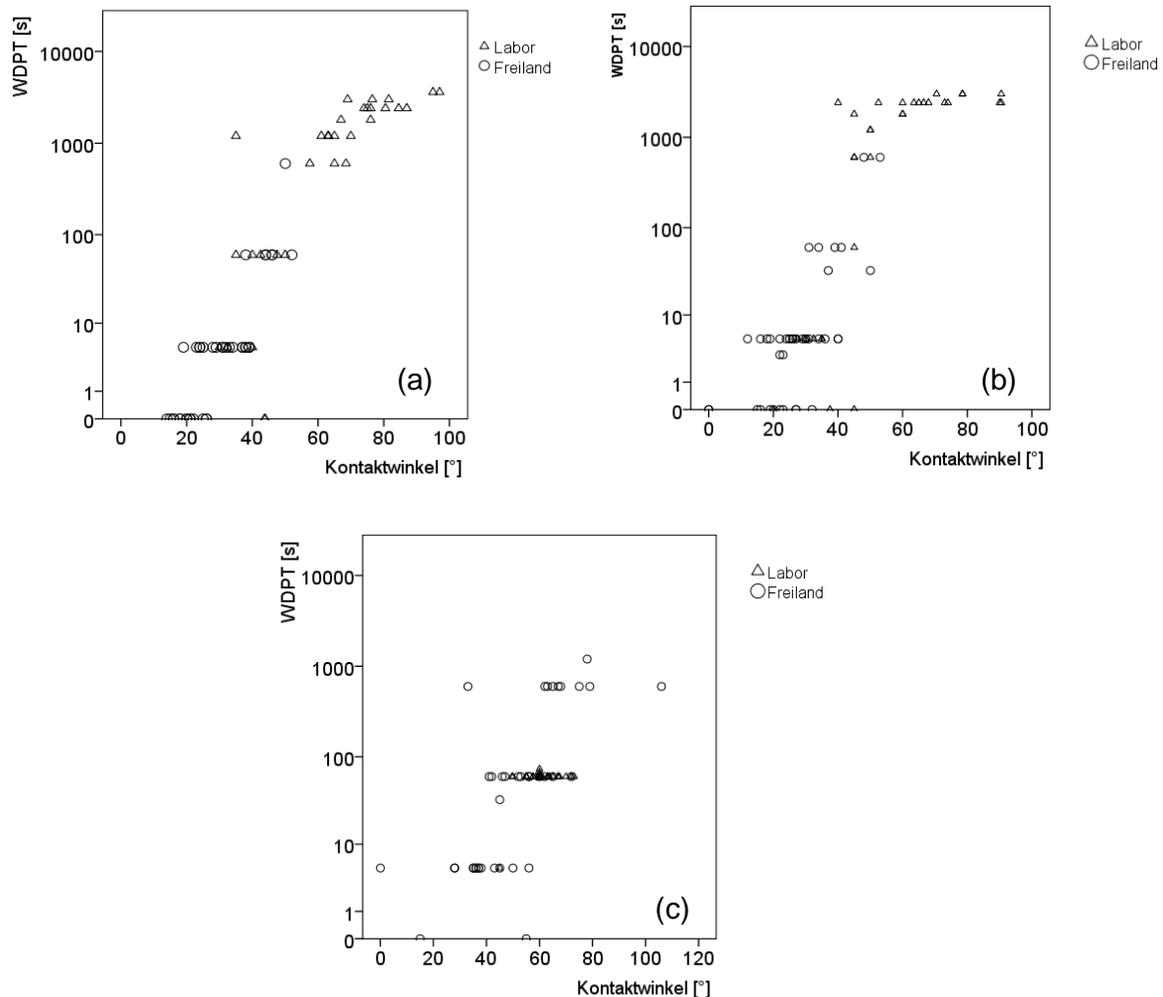


Abbildung 20: WDPT-Zeiten und Kontaktwinkel potenzieller Benetzungshemmung: Verschneidung von Labor- und Freilanddaten der Variante W3 (a), der Variante W0 (b) und der Variante K (c), unterschiedliche Skalierung

Die Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten der Kontaktwinkel und WDPT-Zeiten potenzieller Benetzungshemmung aus Labor- und Freilanddaten liegen für die Varianten mit Kohle jeweils im Bereich hoher Korrelation (Tabellen 13, 14, Abbildung 20). Der lineare Zusammenhang beider Parameter wird durch hohe lineare Regressionskoeffizienten ausgedrückt (Tabellen 13, 14). Für die Variante mit Kompost besteht dieser positive Zusammenhang zwischen ermittelter potenzieller Benetzungshemmung mit zunehmender Trocknungstemperatur nur im Temperaturbereich unterhalb 30 °C (hauptsächlich Freilanddaten). Oberhalb 30 °C (Labordaten) ist tendenziell eine Stagnation der Stärke und Persistenz der Benetzungshemmung

zu beobachten (Abbildung 20). Die Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten der Kontaktwinkel und WDPT-Zeiten potenzieller Benetzungshemmung aus Labor- und Freilanddaten liegen für die Variante mit Kompost im Bereich mittlerer Korrelation (Abbildung 20, Tabelle 13). Für die Variante mit Kompost bilden WDPT-Zeit und Kontaktwinkel einen Koeffizienten mittlerer Korrelation, es besteht keine lineare Beziehung (Tabelle 14).

Tabelle 14: Spearman-Rangkorrelationen (r_s) und lineare Regressionen (R^2) der Kontaktwinkel und der WDPT-Zeiten potenzieller Benetzungshemmung aller Temperaturen; ** $p < 0,01$

Kontaktwinkel [°] zu WDPT [s]	W3 ($n = 72$)	W0 ($n = 64$)	K ($n = 70$)
r_s	0,873**	0,848**	0,672**
R^2	0,763**	0,744**	0,192**

3.3 Räumliche Heterogenität der Benetzungshemmung

Am Beispiel der tertiären und quartären Substrate im Untersuchungsgebiet wurde geprüft, ob die Benetzungseigenschaften der untersuchten Substrate einer räumlichen Heterogenität unterliegen. Mittels einer Clusteranalyse der aktuellen WDPT-Zeiten aller beprobten Punkte quartärer und tertiärer Sande wird die Heterogenität der Ausbildung der Benetzungseigenschaften sowohl in Abhängigkeit des Substrats als auch in Abhängigkeit von der morphologischen Struktur deutlich (Abbildung 21). Es werden zwei Hauptcluster jeweils mit mehreren Unterclustern differenziert. Dabei fasst der erste Hauptcluster die Punkte mit guter Benetzbarkeit und nur teilweiser Benetzungshemmung zusammen, der zweite Hauptcluster beinhaltet ausschließlich beprobte Punkte im tertiären Substrat mit stark bis extrem benetzungsgehemmten Eigenschaften. Der erste Hauptcluster beinhaltet die gut benetzbaren Plots im quartären Sand (Q1, Q2 und NF), die gut benetzbaren Rinnenpunkte der Kuppen-Rinnenstruktur im Detailsinzugsgebiet (1b, 2b) sowie die Plots T1 und T2, die an verschiedenen Probenahmeterminen sowohl gut benetzbar, als auch stark benetzungsgehemmt waren. Dabei bilden NF, Q1, Q2 und 1b als Punkte nahezu vollständiger Benetzbarkeit einen gesonderten homogenen Untercluster und unterscheiden sich von den Punkten 2b, T2 und T1. Der Punkt 2b mit der Lage im Rinnenbereich wies im Beprobungszeitraum nur selten Benetzungshemmung auf und ist somit den

vollständig benetzbaren Proben des homogenen Unterclusters am ähnlichsten. Die Plots T1 und T2 unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Benetzungseigenschaften geringfügig voneinander und lassen sich aufgrund ihrer nicht durchgängig ausgebildeten Benetzungshemmung deutlich von den Punkten der Zwischenrinnen- und Kuppenbereiche im Detaileinzugsgebiet abgrenzen, jedoch auch von den Plots im quartären Substrat und den Punkten im Rinnenbereich des Detaileinzugsgebiets. Der zweite Hauptcluster umfasst ausschließlich die überwiegend stark benetzungsgemehrten Punkte der Zwischenrinnen- und Kuppenbereiche im Detaileinzugsgebiet, wobei die Zwischenrinnenbereiche (1a, 1c, 1d) und die Kuppen (1e, 2a, 2c) jeweils separate Untercluster bilden. Der Untercluster mit den Punkten in Kuppenlage (1e, 2a, 2c) repräsentiert den Cluster mit der höchsten gemessenen Benetzungshemmung (Abbildung 21).

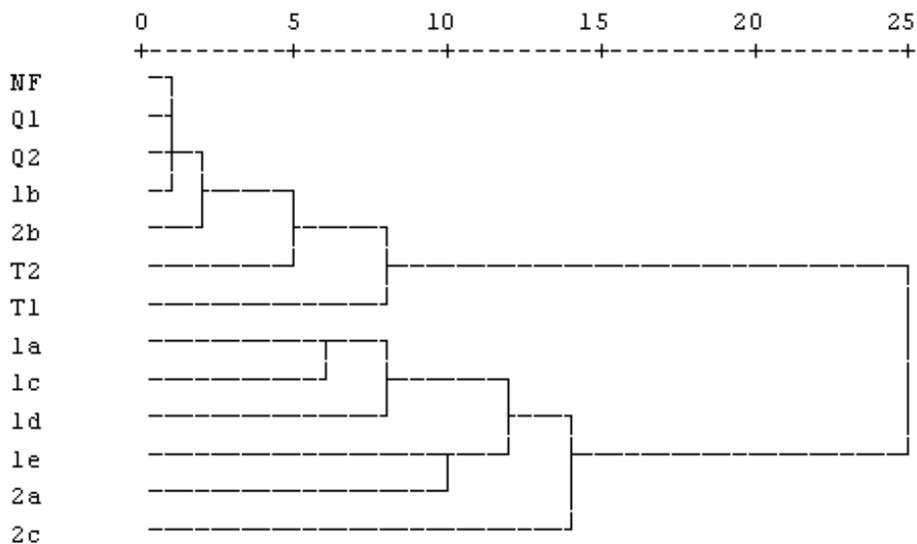


Abbildung 21: Dendrogramm der aktuellen Benetzungshemmung (WDPT-Zeiten) aller beprobten Punkte quartärer und tertiärer Sande, n = 50

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung mittels U-Test bestätigen, dass sich die Plots Q1, Q2 und NF im quartären Substrat hinsichtlich der oberflächennahen räumlichen Heterogenität des aktuellen Benetzungsverhaltens nicht signifikant voneinander unterscheiden. Auch innerhalb des tertiären Substrats besteht kein signifikanter Unterschied hinsichtlich des aktuellen Benetzungsverhaltens zwischen den beprobten Plots T1 und T2. In Abhängigkeit von der Ausprägung geomorphologischer Einheiten (Kuppe, Zwischenrinne, Rinne) besteht jedoch innerhalb der

tertiären Sande eine ausgeprägte kleinräumige horizontale Heterogenität bezüglich ihrer Benetzungseigenschaften. Innerhalb der untersuchten Kuppen-Rinnen-Struktur im Detailszugsgebiet zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen überwiegend gut benetzbaren Rinnen und häufig stark ausgeprägter Benetzungshemmung im Zwischenrinnen- und Kuppenbereich. Die Benetzungshemmung nimmt in der Reihenfolge Rinne, Zwischenrinne, Kuppe zu (Abbildung 22).

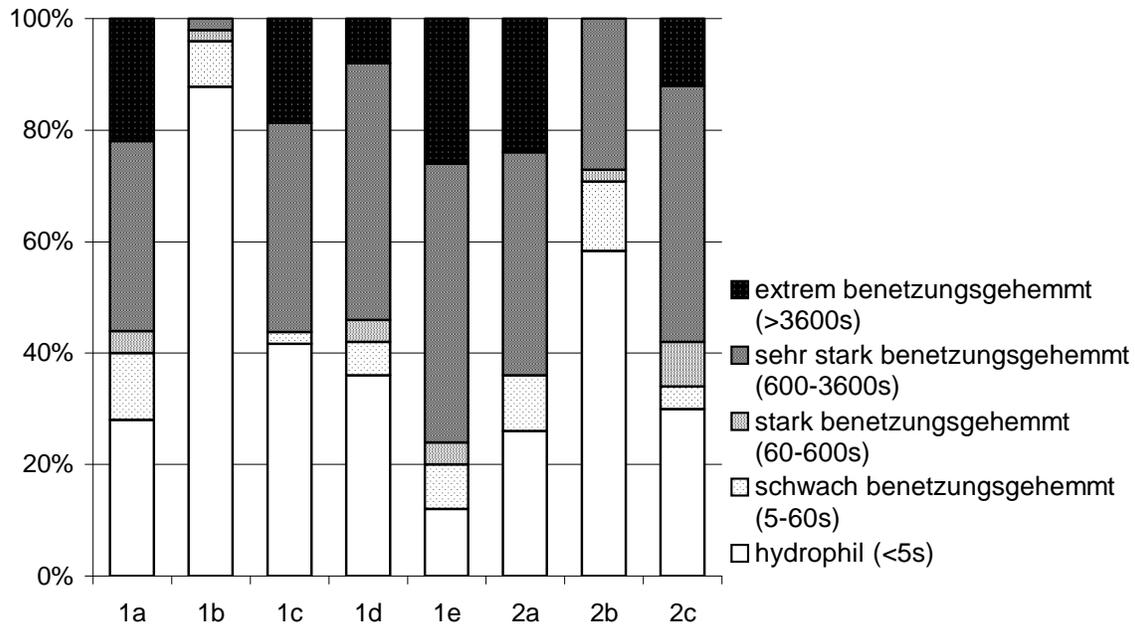


Abbildung 22: Prozentuale Anteile der gemessenen WDPT-Klassen (Einteilung nach Bisdom et al. (1993), Kapitel 2.2.1) im Detailszugsgebiet, n = 50

Beim Vergleich der untersuchten Transekte konnten für die beiden Rinnenpunkte (1b, 2b) signifikante Unterschiede in den aktuellen Benetzungseigenschaften zu den auf Kuppen und im Zwischenrinnenbereich gelegenen Punkten festgestellt werden. Innerhalb des Transektes 1 bestehen zwischen den einzelnen Messpunkten, mit Ausnahme von Punkt 1b, keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Benetzungseigenschaften. Die Punkte 1a, 1c und 1d liegen im Zwischenrinnenbereich und weisen keine signifikanten Unterschiede zum Punkt 1e (Kuppe) auf. Jedoch kann der Punkt 1e aufgrund der deutlich stärker ausgeprägten extremen Benetzungshemmung als Einzelpunkt abgegrenzt werden. Innerhalb des Transektes 2 bilden die beiden Punkte 2a und 2c eine Einheit ohne signifikante Unterschiede, die sich vom Punkt 2b (Rinne) signifikant in den aktuellen Benetzungseigenschaften unterscheidet.

Unterschiede im Benetzungsverhalten lassen sich nicht nur in Abhängigkeit von Kuppen- und Rinnenstrukturen nachweisen, das Benetzungsverhalten variiert auch mit der Lage der untersuchten Punkte am Hang. Wie die Ergebnisse von zusätzlich durchgeführten MED-Tests zeigen, ist die Anzahl benetzungsgehemmter Proben im oberen Hangbereich deutlich größer als am Mittel- und Unterhang. Die Benetzungshemmung nimmt in der Reihenfolge Oberhang, Mittelhang, Unterhang ab. Anhand der Abbildung 23 ist ersichtlich, dass sich das Schema zunehmender Benetzungshemmung in der Reihenfolge Rinne, Zwischenrinne, Kuppe über die gesamte Länge des untersuchten Hanges im Detailszugsgebiet bestätigen lässt (Kuhnert, 2009).

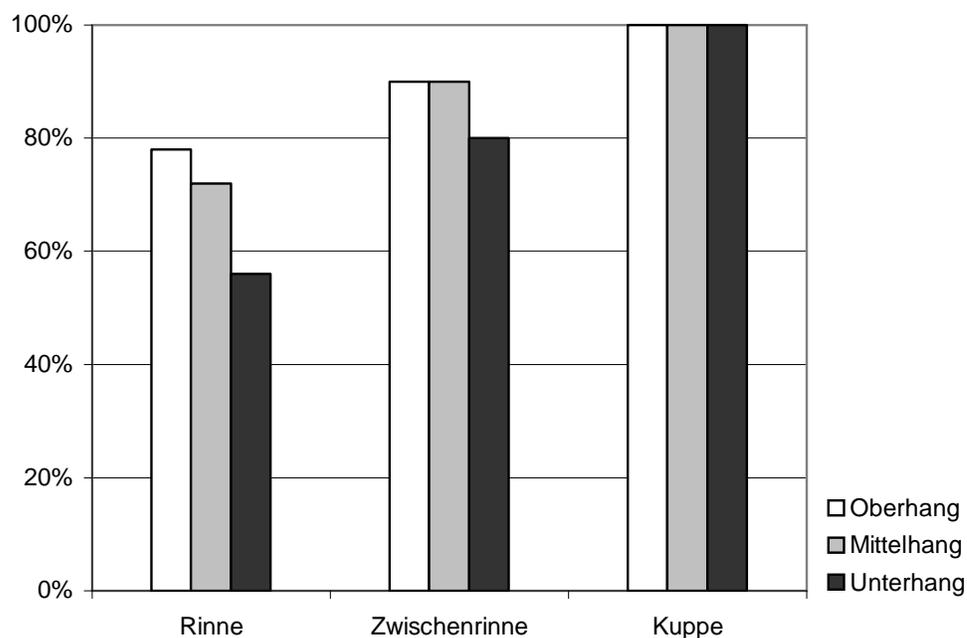


Abbildung 23: Prozentualer Anteil benetzungsgehemmter Proben der geomorphologischen Einheiten an Ober-, Mittel- und Unterhang, n = 9-12 (nach Kuhnert, 2009)

Im Hinblick auf die tiefenbezogenen Benetzungseigenschaften (0-5 cm) wurden für das quartäre Substrat keine signifikanten Unterschiede der Benetzungshemmung nachgewiesen. Bei Betrachtung der Benetzungseigenschaften der tertiären Sande über die Tiefe wird für die Plots T1 und T2 offensichtlich, dass zwischen dem obersten Zentimeter und den darunter liegenden vier Zentimetern bezüglich des Benetzungsverhaltens differenziert werden muss (Abbildung 24). Dabei ist die Bodenoberfläche (0-1 cm) mit kleineren Kontaktwinkeln und geringeren WDPT-Zeiten signifikant weniger stark benetzungsgehemmt als die darunter liegenden Bereiche.

Der Anteil der gut benetzbaren Proben an der Oberfläche ist mit etwa 80 % fast doppelt so hoch wie in den darunter liegenden Bereichen. Ursache dafür ist ein nur wenige Millimeter starker, gut benetzbarer Bereich direkt an der Bodenoberfläche. Der darunter liegende Bereich des ersten Zentimeters weist ähnliche Benetzungseigenschaften auf wie der Tiefenbereich 1-5 cm.

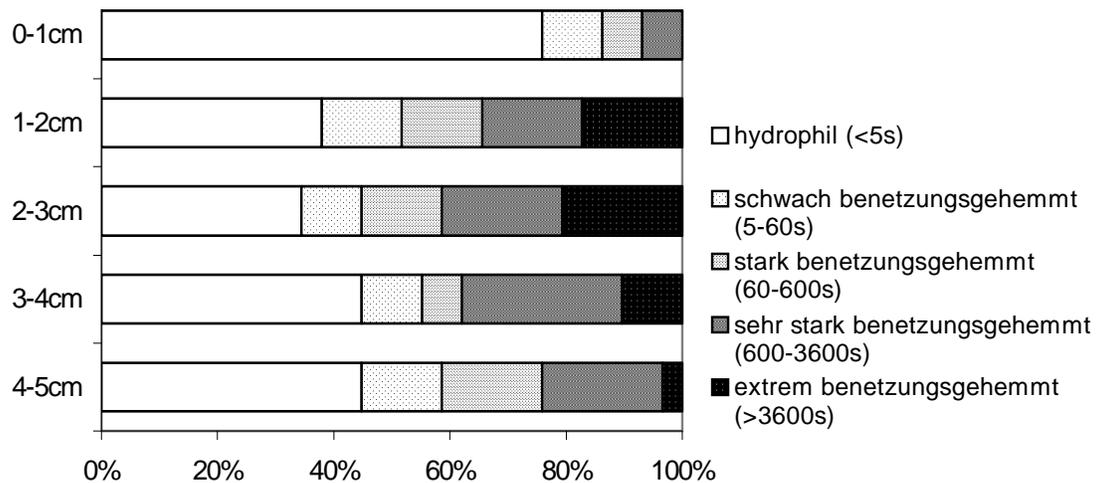


Abbildung 24: Prozentuale Anteile der gemessenen WDPT-Klassen am Plot T1, n = 145; Einteilung nach Bisdorn et al. (1993)

Kontaktwinkel und WDPT-Zeiten aktueller Benetzungshemmung weisen für die beiden beprobten Plots T1 und T2 hohe Korrelationen auf, die sich nur geringfügig voneinander unterscheiden (Kapitel 3.2, Tabelle 9). Betrachtet man auch hier den Tiefenbereich 1-5 cm gesondert und vergleicht die ermittelten Korrelationskoeffizienten zwischen Kontaktwinkeln und WDPT-Zeiten aktueller Benetzungshemmung gegenüber dem obersten Zentimeter, so erhöhen sich die Korrelationskoeffizienten deutlich (Tabelle 15). Die nur gering ausgeprägte Korrelation der Kontaktwinkel und WDPT-Zeiten aktueller Benetzungshemmung an der Bodenoberfläche ist in der ausgeprägten Benetzbarkeit begründet. Es bestehen nur wenige Datenpaare (Kontaktwinkel und WDPT-Zeiten aktueller Benetzungshemmung) mit Werten größer Null.

Tabelle 15: Spearman-Rangkorrelationen von WDPT zu Kontaktwinkel (aktuelle Benetzungshemmung) , ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$

Tiefe	T1	T2	T gesamt
0-1 cm	0,416* (n = 29)	0,410* (n = 27)	0,414** (n = 56)
>1-5 cm	0,712** (n = 116)	0,817** (n = 108)	0,759** (n = 224)

Auch für die Kuppen-Rinnen-Struktur des Detailszugsgebiets ist bei tiefenbezogener Betrachtung der einzelnen Messpunkte festzustellen, dass der oberste Zentimeter, wie an den Punkten T1 und T2, signifikant höhere aktuelle Benetzbarkeit aufweist als die darunter liegenden 1-5 cm (Tabelle 16). Bei tiefenbezogener Analyse der Daten der Punkte der Transekte 1 und 2 wurden für fast alle Punkte ein signifikant differenziertes Benetzungsverhalten des obersten Zentimeters ermittelt. Lediglich am Punkt 1b wurden keine tiefenabhängigen Unterschiede nachgewiesen, da hier fortwährend eine sehr gute Benetzbarkeit des Substrats vorlag.

Tabelle 16: Prozentuale Anteile sehr stark (WDPT > 600 s) und extrem benetzungsgehemmter (WDPT > 3600 s) Proben in Abhängigkeit ihrer geomorphologischen Struktur, Entnahmetiefen 0 - 1 cm, n = 10 und > 1 - 5 cm, n = 40

Tiefe	Grad der Benetzungshemmung	Rinne		Zwischenrinne			Kuppe		
		1b	2b	1a	1c	1d	1e	2a	2c
0-1 cm	sehr stark benetzungsgehemmt	0 %	0 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %
	extrem benetzungsgehemmt	0 %	0 %	10 %	0 %	0 %	0 %	10 %	0 %
>1-5 cm	sehr stark benetzungsgehemmt	0 %	30 %	65 %	65 %	65 %	90 %	75 %	65 %
	extrem benetzungsgehemmt	0 %	0 %	25 %	25 %	10 %	25 %	30 %	15 %

Im Zusammenhang mit den gut benetzbaren Oberflächen der untersuchten Plots und Punkte im tertiären Substrat des Untersuchungsgebiets wurde das Auftreten und die Bildung biologischer Krusten beobachtet (Abbildung 25a). In den entnommenen Proben von der Bodenoberfläche konnten mittels lichtmikroskopischer Untersuchung fadenförmige Grünalgen identifiziert werden (Abbildung 25b). Die im Untersuchungsgebiet ausgebildete biologische Kruste ist überwiegend sehr gut benetzbar.

Orientierende zusätzliche Untersuchungen bestätigten die uneingeschränkt gute Benetzbarkeit der Bereiche, an denen die beschriebene Kruste auftrat. Die bessere Benetzbarkeit der Krusten im Vergleich zu den darunterliegenden Bereichen spiegelt sich auch in den Korrelationskoeffizienten zwischen Kontaktwinkeln und WDPT-Zeiten aktueller Benetzungshemmung wider (Tabelle 15).

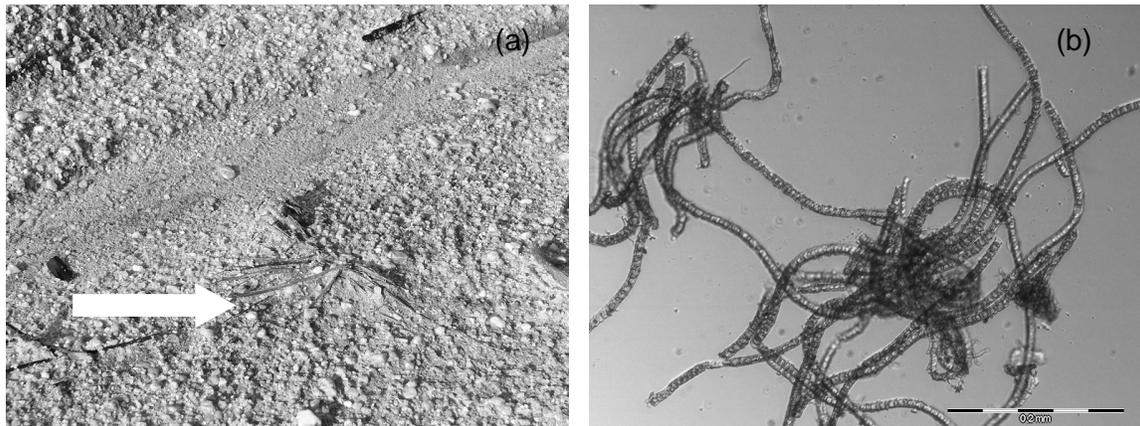


Abbildung 25: Algen an der Oberfläche des tertiären Substrats (a) und mikroskopische Aufnahme (b)

3.4 Zeitliche Variabilität der Benetzungshemmung

Die Benetzungseigenschaften der untersuchten tertiären Substrate unterlagen innerhalb des Beprobungszeitraums sehr starken Schwankungen. Die im folgenden dargestellten Ergebnisse sollen aufklären, ob die zeitliche Variabilität der Benetzungseigenschaften gegebenenfalls einem saisonalen Muster unterliegt.

Zur Identifizierung von Zeiträumen, innerhalb derer Proben mit ähnlichen Benetzungseigenschaften gewonnen worden sind, wurde eine Clusteranalyse der Benetzungseigenschaften in Abhängigkeit des jeweiligen Probenahmetermins durchgeführt. Im Dendrogramm als Ergebnis der Clusteranalyse werden die Probenahmetermine gebündelt und abgebildet, in denen ähnliche Benetzungseigenschaften gemessen wurden (Abbildung 26). Als Ergebnis ist eine deutliche Unterteilung aller Proben in zwei große Gruppen (Hauptcluster) und eine Vielzahl Untergruppen (Untercluster) sichtbar. Die zwei Hauptcluster lassen sich wie folgt definieren: Einen Hauptcluster bilden die Zeitpunkte, zu denen das tertiäre Substrat sehr gut benetzbar war (18 Probenahmetermine), den zweiten bilden Zeitpunkte, zu denen das tertiäre Substrat benetzungsgehemmt war (10 Probenahmetermine) (Abbildung 26).

Der erste Hauptcluster beinhaltet einen Untercluster, der ausschließlich die Termine im Untersuchungszeitraum mit benetzbaren Bedingungen umfasst. In diesem Hauptcluster sind ebenfalls Probenahmetermine enthalten, an denen vereinzelt Messungen eine Benetzungshemmung bestätigten, jedoch mit sehr kleinen Kontaktwinkeln und kleinen WDPT-Zeiten (Januar, März und Juni 2005). Bis auf die Monate August und September, die nicht diesem Cluster zugeordnet werden können, sind alle anderen Monate im Verlauf des Untersuchungszeitraums mindestens mit einem Probenahmetermin in diesem Cluster vertreten. Der zweite Hauptcluster ist aus einer Vielzahl von Unterclustern aufgebaut, die Probenahmetermine bündeln, an denen jeweils ähnlich starke Benetzungshemmung des tertiären Substrats gemessen wurde. Der Untercluster mit den Terminen Oktober 2004 und September 2005 repräsentiert dabei die höchste gemessene Benetzungshemmung im Untersuchungszeitraum. Diesem zweiten Hauptcluster sind neben dem Probenahmetermin im April 2005 ausschließlich Probenahmetermine im Zeitraum von Juni bis Oktober zugeordnet (Abbildung 26).

Mittels der Clusteranalyse lässt sich die Gesamtheit der untersuchten Proben sehr gut in zwei Untergruppen trennen: Proben mit Benetzungshemmung wurden während der Sommer- und Herbstmonate entnommen, benetzbare Proben waren über den gesamten Untersuchungszeitraum vertreten, jedoch nicht im Spätsommer, in den Monaten August und September. Die so identifizierten Zeiträume mit Probenahmeterminen, an denen gute Benetzbarkeit oder Benetzungshemmung des Substrats vorlag, werden im folgenden zu weiterführenden Analysen herangezogen und hinsichtlich potenzieller Einflussparameter auf die Ausbildung von Benetzungshemmung separat ausgewertet.

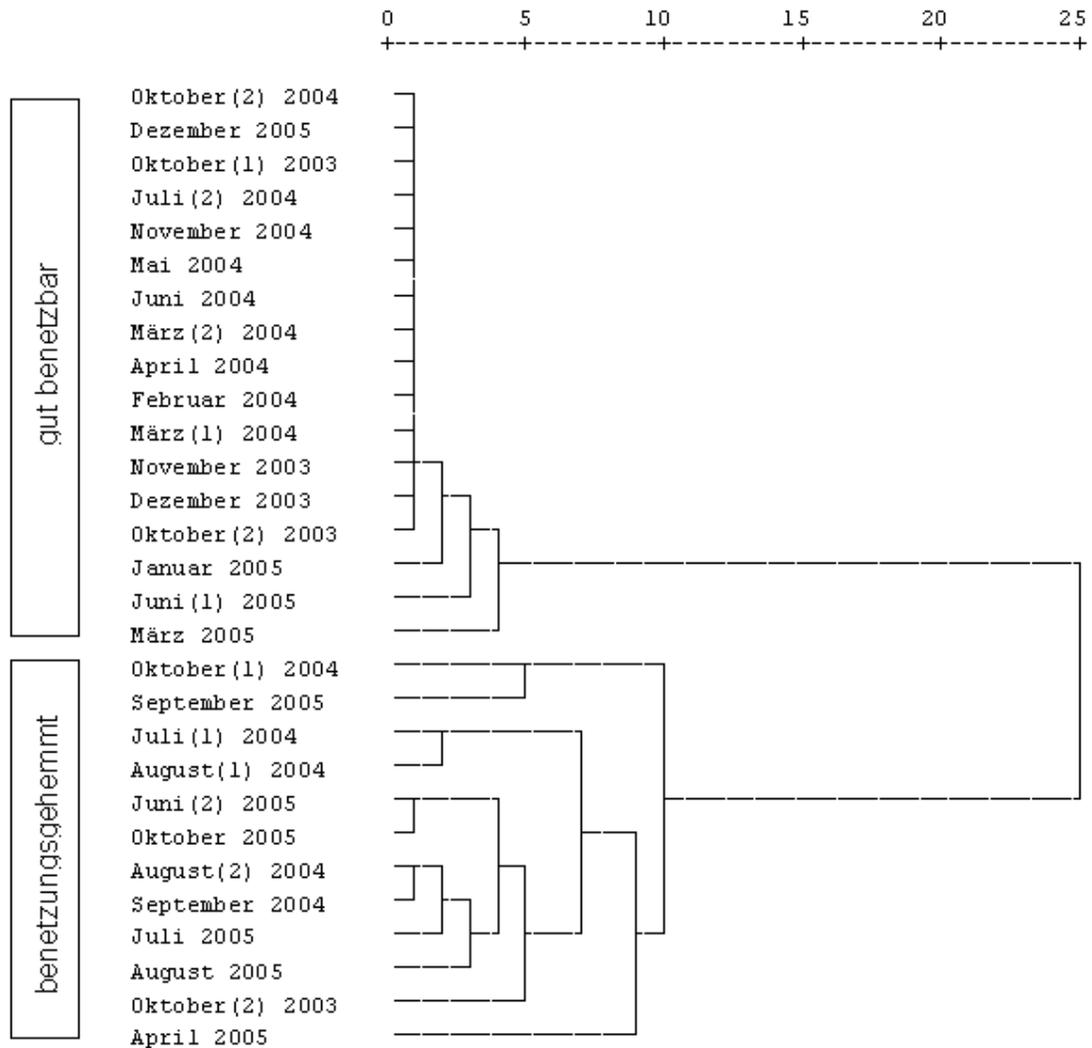


Abbildung 26: Dendrogramm der aktuellen Benetzungshemmung (Kontaktwinkel und WDPT) für Plot T1 nach Probenahmeterminen (Zahlen in Klammern bezeichnen den ersten und zweiten Probenahmetermin bei mehrmaliger Beprobung in einem Monat)

Werden die Probenahmetermine chronologisch über den gesamten Untersuchungszeitraum dargestellt, wird die Entwicklung der Benetzungseigenschaften im Jahresverlauf deutlich sichtbar. Neben saisonalen Schwankungen der Benetzbarkeit innerhalb des Jahresverlaufs sind auch Unterschiede zwischen den Jahresverläufen erfasst worden. Während des 28-monatigen Untersuchungszeitraumes wurde in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der vorgestellten Clusteranalyse eine hohe saisonale Variabilität der Benetzungseigenschaften des tertiären Substrats innerhalb des Jahresverlaufs beobachtet (Abbildung 27).

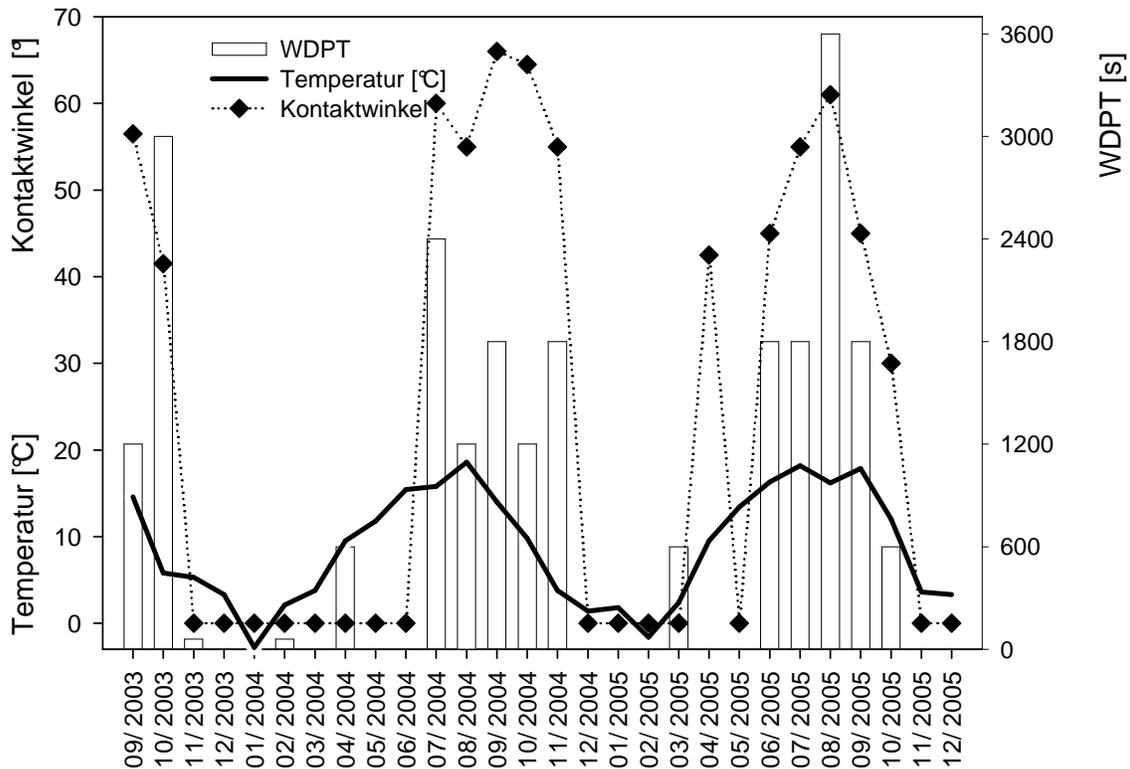


Abbildung 27: Mittlere Lufttemperatur und aktuelle Benetzungseigenschaften (Kontaktwinkel, WDPT) tertiärer Sande (T1) im Untersuchungszeitraum. Lagten mehrere Probenahmen in einem Monat, wurde jeweils der stärker benetzungsgehemmte Wert dargestellt.

Im Frühjahr konnten weitgehend gute Benetzungseigenschaften des Substrats nachgewiesen werden, obwohl an vereinzelt Probenahmeterminen sehr starke Benetzungshemmung gemessen wurde (April 2004, März 2005). Spätestens ab Juli war eine ausgeprägte Benetzungshemmung erreicht, die in den Folgemonaten im Sommer und Herbst fast durchgängig stark ausgeprägt war. Zwischen Juli und Oktober wurde dabei das Maximum der Benetzungshemmung erreicht. Innerhalb der Sommer- und Herbstmonate gab es vereinzelt Schwankungen des Grades der Benetzungshemmung von extremer Benetzungshemmung bis hin zur vollständigen Benetzbarkeit (Juli 2004, Oktober 2004)(Abbildung 26). Ein Wechsel in den Benetzungseigenschaften von starker Benetzungshemmung zur vollständigen Benetzbarkeit wurde erst im Spätherbst beobachtet: Im Jahr 2003 war ein Wechsel ab November zu beobachten, in den Jahren 2004 und 2005 ab Ende Oktober (Abbildung 27).

Um den Einfluss von Trockenheit auf die Benetzungseigenschaften zu bewerten, wurde der Zusammenhang im Auftreten von Benetzungshemmung mit dem zeitlichen Aufeinandertreffen trockener Monate untersucht. Eine Charakterisierung der klimatischen Trockenheit ist mittels Trockenindex nach de Martonne (1926) möglich. Dieser Index fällt mit zunehmender Trockenheit. Als Trockengrenze gilt ein Wert von $I = 20$. Nach der Berechnung für monatliche Werte nach de Martonne und Lauer (1952) sind folgende Monate des hier betrachteten Untersuchungszeitraums als arid zu klassifizieren: September, Oktober und November 2003, August und September 2004 sowie Juni, September und Oktober 2005 (Abbildung 28).

Für diese als arid eingestuft Monate im Sommer und Herbst wurde für das tertiäre Substrat eine stark ausgeprägte Benetzungshemmung nachgewiesen. Die Trockenindizes für die Monate Februar, März und April 2004 sowie März und April 2005 liegen ebenfalls deutlich unter der Ariditätsgrenze von $I = 20$, sollten aber aufgrund der Tatsache, dass nur Niederschlag in Form von Regen direkt erfasst wurde (kein Tau, Schnee oder Hagel), hier nicht betrachtet werden (Abbildung 28).

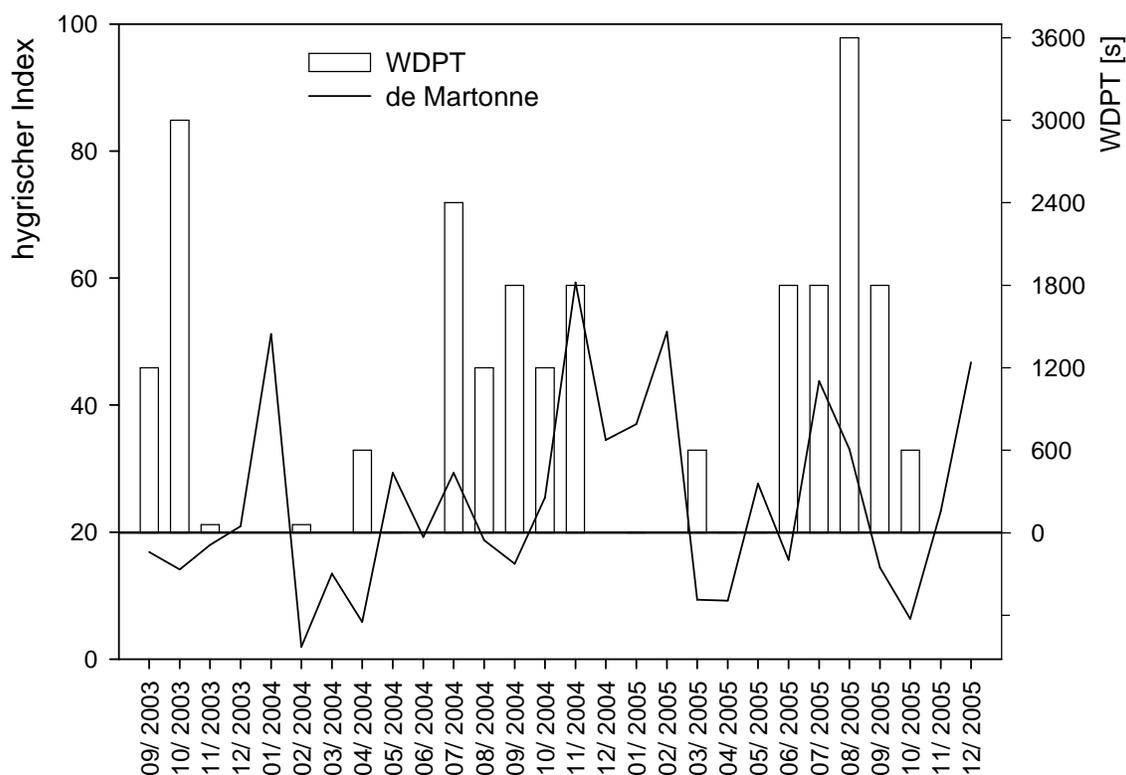


Abbildung 28: Hygrischer Index nach de Martonne und Lauer (1952) mit WDPT-Zeiten aktueller Benetzungshemmung am Plot T1 für den Untersuchungszeitraum, Ariditätsgrenze bei $I = 20$

Mit Blick auf den saisonalen Verlauf der Benetzungshemmung am Beispiel der WDPT-Zeiten für die untersuchte Kuppen- und Rinnenstruktur im Detailszugsgebiet lässt sich innerhalb des gesamten zwölfmonatigen Beprobungszeitraumes kein einheitlicher Trend ableiten (Abbildung 29). Mit Ausnahme des Punktes 2c (Kuppe) wurde zu Beginn der Beprobung im Dezember 2004 für alle Punkte sehr gute Benetzbarkeit festgestellt. Die Ausbildung der Benetzungshemmung erfolgt tendenziell ähnlich wie bei den untersuchten Plots tertiärer Sande während des Frühjahrs, aber in starker Abhängigkeit von der geomorphologischen Struktur: Während die Kuppenbereiche (1e, 2a, 2c) relativ früh schon stark benetzungsgehemmt sind (April), findet die Ausbildung von Benetzungshemmung im Zwischenrinnenbereich (1a, 1c, 1d) verzögert und im Rinnenbereich nur vereinzelt (2b) beziehungsweise gar nicht statt (1b). Abgesehen von den Punkten im Rinnenbereich bestehen im Zeitraum Juli bis November mit stark ausgeprägter Benetzungshemmung nur geringe Unterschiede im Benetzungsverhalten zwischen den Beprobungspunkten unterschiedlicher geomorphologischer Lage. Analog zu den Beobachtungen am Plot T1 nimmt auch an der untersuchten Kuppen- und Rinnenstruktur im Detailszugsgebiet die Benetzungshemmung unabhängig von der geomorphologischen Struktur vom November ab und erreicht im Dezember teilweise bereits den Zustand vollständiger Benetzbarkeit (1a, 1c, 2a). An den Punkten 1d und 1e liegt im Gegensatz zu den weiteren Beprobungspunkten im Dezember 2005 nicht der gleiche Status der Benetzbarkeit wie im Dezember 2004 vor. Es herrscht somit noch immer ausgeprägte Benetzungshemmung (Abbildungen 27 und 29).

Kuhnert (2009) konnte bei ergänzenden und zeitlich weiterführenden Messungen im Verlauf eines Jahres mittels MED-Test im Detailszugsgebiet auch im Winter 2005/2006 durchgängig sehr stark ausgeprägte Benetzungshemmung auf Kuppenbereichen feststellen (Tabelle 17). Auch bei einer stichprobenartigen Einzelmessung am 22.01.2007 wurden für die Zwischenrinnen- und Kuppenbereiche extrem benetzungsgehemmte Bedingungen nachgewiesen (Kuhnert, 2009).

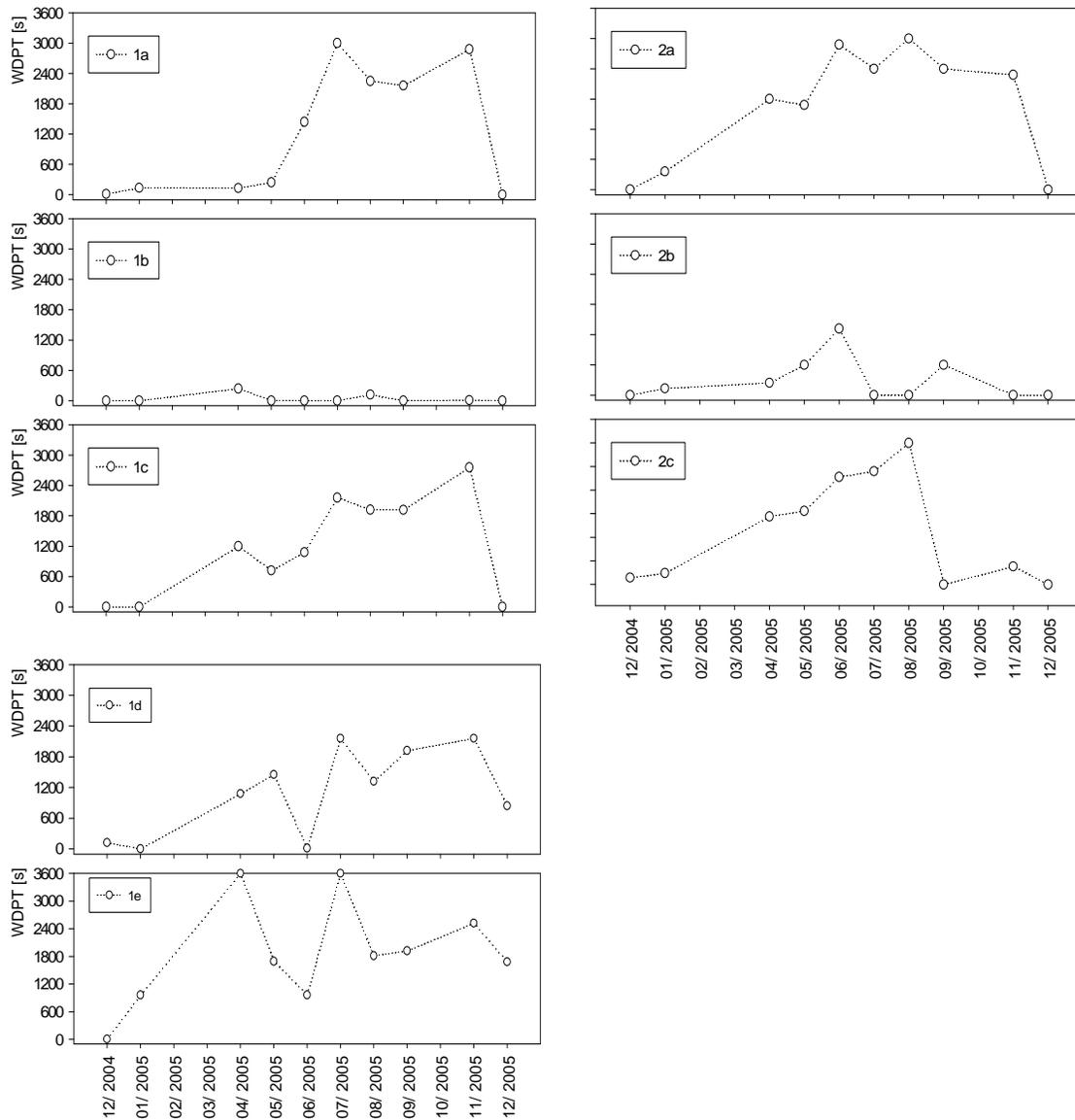


Abbildung 29: Saisonale Variabilität der WDPT-Test-Zeiten in Abhängigkeit von der geomorphologischen Struktur

Tabelle 17: Ergänzende Messung der Benetzungshemmung mittels MED-Test in Abhängigkeit der geomorphologischen Strukturen im Verlauf eines Jahres (nach Kuhnert, 2009); am 25.01.2006 lag teilweise gefrorener Boden vor, so dass Messungen nicht möglich waren

Datum	Rinne	Zwischenrinne	Kuppe
19.08.2005	stark benetzungsgehemmt	stark benetzungsgehemmt	mäßig benetzungsgehemmt
20.09.2005	schwach benetzungsgehemmt	extrem benetzungsgehemmt	sehr stark benetzungsgehemmt
19.10.2005	extrem benetzungsgehemmt	extrem benetzungsgehemmt	sehr stark benetzungsgehemmt
25.01.2006	- (Frost)	- (Frost)	sehr stark benetzungsgehemmt
30.03.2006	benetzbar	benetzbar	sehr stark benetzungsgehemmt
04.04.2006	benetzbar	mäßig benetzungsgehemmt	sehr stark benetzungsgehemmt
14.08.2006	sehr stark benetzungsgehemmt	extrem benetzungsgehemmt	sehr stark benetzungsgehemmt

3.5 Einfluss abiotischer Parameter auf die Benetzungshemmung

Der Kurvenverlauf der Benetzungseigenschaften des tertiären Substrats in Abhängigkeit von der Lufttemperatur im Untersuchungszeitraum verdeutlicht, dass die Maxima in der Ausprägung der Benetzungshemmung den Maxima der Temperaturkurve mit zeitlicher Verzögerung folgen (Abbildung 27). Deshalb wurden im weiteren die Zusammenhänge zwischen den Benetzungseigenschaften und abiotischen Parametern am Beispiel von meteorologischen Parametern und dem Bodenwassergehalt analysiert.

Zwischen Wassergehalt und Grad sowie Persistenz der Benetzungshemmung wurden hoch signifikante Korrelationen nachgewiesen (Tabelle 18). Die Korrelationen sind für die Plots T1 und T2 ähnlich, wobei die Einzelwerte nur gering bis mittel korreliert sind. Die Korrelationen für die Mediane von Kontaktwinkeln und WDPT-Zeiten mit dem Wassergehalt liegen im mittleren Bereich. Große Kontaktwinkel und hohe WDPT-Zeiten sind vorwiegend mit sehr geringen Bodenfeuchten verbunden (Abbildung 30). Aber auch bei, für das untersuchte Substrat, sehr hohen Wassergehalten (bis 13,3 Masse-%) wurde vereinzelt Benetzungshemmung mit großen Kontaktwinkeln ($> 65^\circ$) und hohen WDPT-Zeiten (> 600 s) gemessen (beispielsweise am Punkt 1a, Probenahme am 12.04.2005, 2 - 3 cm Tiefe).

Tabelle 18: Spearman-Rangkorrelationen aktueller Benetzungshemmung (Kontaktwinkel, WDPT) mit dem Wassergehalt, ** $p < 0,01$

	T1 (n = 144)	T2 (n = 134)	T gesamt (n = 278)	Mediane T1 (n = 29)	Mediane T2 (n = 28)	Mediane T gesamt (n = 57)
Kontaktwinkel zu Wassergehalt	-0,528**	-0,387**	-0,466**	-0,684**	-0,643**	-0,654**
WDPT zu Wassergehalt	-0,515**	-0,364**	-0,446**	-0,579**	-0,625**	-0,608**

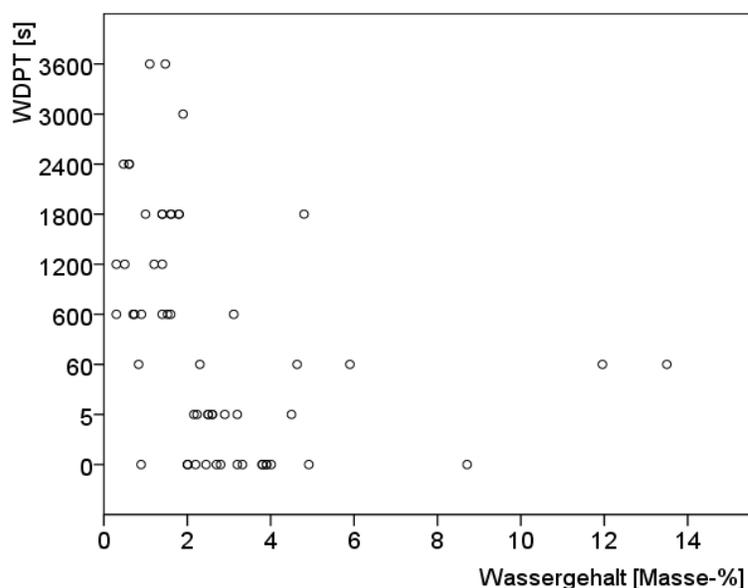


Abbildung 30: Gemittelte Werte von WDPT-Zeiten aktueller Benetzungshemmung und korrespondierende Wassergehalte im gesamten Untersuchungszeitraum für die Plots T1 und T2, je n = 28

Im Gegensatz zu den Plots T1 und T2 besteht an den Messpunkten im Detailszugsgebiet kein durchgängiger Zusammenhang zwischen den beiden, die Benetzung charakterisierenden Parametern mit dem Wassergehalt (Tabelle 19). Für einzelne Punkte ist der Zusammenhang nur schwach oder gar nicht ausgeprägt (1a, 1b). Die Mehrzahl der Korrelationen liegt jedoch im mittleren Bereich. Unterschiede in der geomorphologischen Lage der Untersuchungspunkte lassen sich mittels der Korrelationskoeffizienten im Hinblick auf den Einfluss des Bodenwassergehalts nicht eindeutig differenzieren. Aber auch hier sind, analog zu den Befunden der Plots T1 und T2, große Kontaktwinkel und hohe WDPT-Zeiten an niedrige Bodenwassergehalte gebunden.

Tabelle 19: Spearman-Rangkorrelationen der Mediane aktueller Benetzungshemmung (Kontaktwinkel, WDPT) und Wassergehalt, $n = 50$, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$

	1a	1b	1c	1d	1e	2a	2b	2c
Kontaktwinkel zu Wassergehalt	-	-	-0,566**	-0,473**	-0,428**	-0,427**	-0,372**	-0,675**
WDPT zu Wassergehalt	-0,304*	-	-0,589**	-0,501**	-0,535**	-0,402**	-0,439**	-0,734**

Bei der Klassifizierung der Messwerte in benetzungsgehemmte ($WDPT > 5$ s) und benetzbare Proben ($WDPT \leq 5$ s) ist ein signifikanter Unterschied hinsichtlich des Wassergehalts für die Plots T1 und T2 sowie für das Detaileinzugsgebiet nachweisbar (Abbildungen 31a, b). Der gemittelte Bodenwassergehalt der benetzungsgehemmten Proben an den Punkten T1 und T2 beträgt nur etwa 50 % des mittleren Wassergehalts der benetzbaren Proben. Im Detaileinzugsgebiet ist der Unterschied des mittleren Wassergehalts zwischen benetzbaren (3,2 Masse-%) und benetzungsgehemmten (1,4 Masse-%) Proben noch stärker ausgeprägt (Tabelle 20). In Abhängigkeit von der geomorphologischen Struktur nimmt der gemessene Wassergehalt der benetzungsgehemmten Proben vom Rinnenbereich über den Zwischenrinnenbereich zur Kuppe hin ab (Abbildung 32, Tabelle 21).

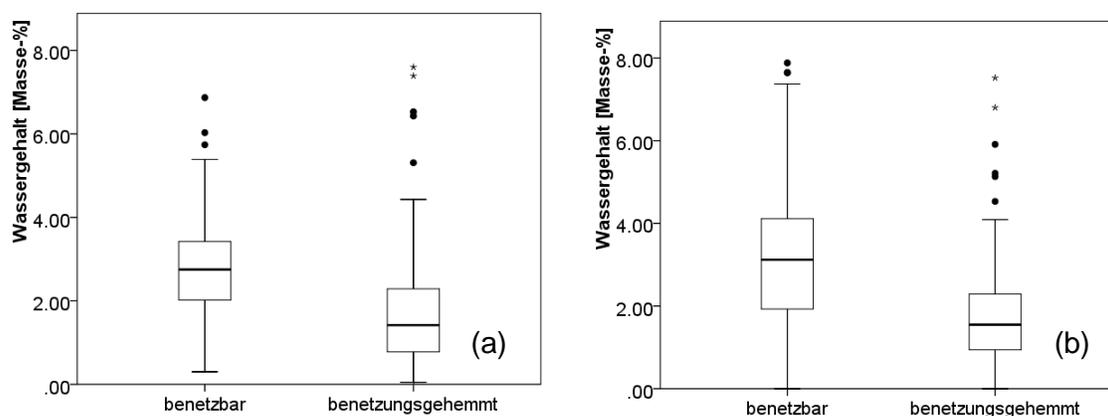


Abbildung 31: Darstellung der Wassergehalte (< 8 %) mittels Boxplots getrennt für benetzbare ($WDPT \leq 5$ s) und benetzungsgehemmte ($WDPT > 5$ s) Proben der Plots T1 und T2, $n = 143$ (a), sowie für das Detaileinzugsgebiet, $n = 138$ (b)

Tabelle 20: Mediane der Parameter aktueller Benetzungshemmung (Kontaktwinkel, WDPT) und Wassergehalte für das tertiäre Substrat, unterteilt für benetzungsgehemmte und benetzbare Proben

	T1		T2		Detailstudiengebiet	
	≤ 5 s	> 5 s	≤ 5 s	> 5 s	≤ 5 s	> 5 s
	(n = 69)	(n = 74)	(n = 76)	(n = 62)	(n = 195)	(n = 201)
Kontaktwinkel [°]	0	43,8	0	47,5	0	50
WDPT [s]	0	1200	0	600	0	1800
Wassergehalt [Masse-%]	2,8	1,5	2,4	1,3	3,2	1,4

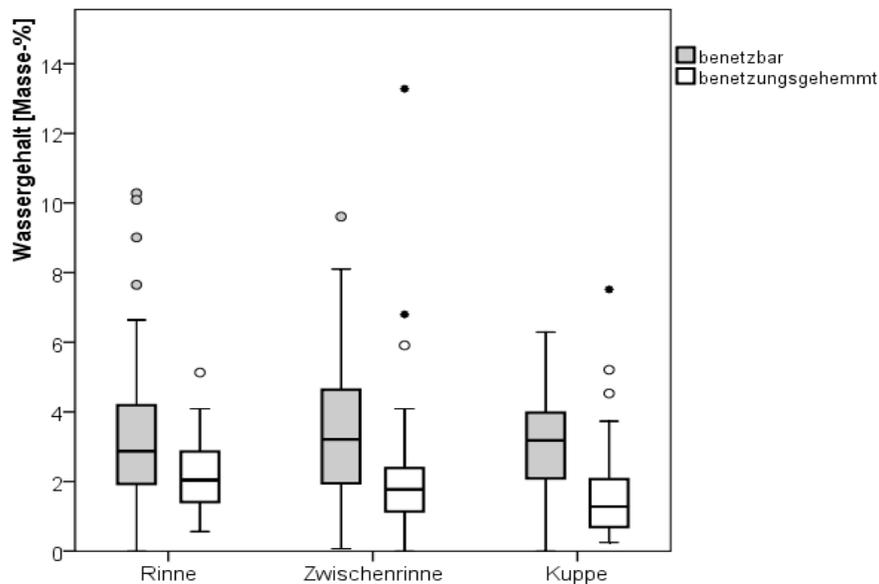


Abbildung 32: Boxplots der Wassergehalte benetzbarer (WDPT ≤ 5 s) und benetzungsgehemmter (WDPT > 5 s) Proben für das Detaileinzugsgebiet, gruppiert nach geomorphologischen Einheiten, n = 396

Tabelle 21: Wassergehalte des Detailstudiengebiets, unterteilt für benetzbare (WDPT ≤ 5 s) und benetzungsgehemmte (WDPT > 5 s) Proben in Abhängigkeit der geomorphologischen Struktur

	Rinne		Zwischenrinne		Kuppe	
	≤ 5 s	> 5 s	≤ 5 s	> 5 s	≤ 5 s	> 5 s
	(n = 83)	(n = 17)	(n = 63)	(n = 83)	(n = 49)	(n = 101)
Anteil [%]	83	17	43	57	33	67
Wassergehalt [Masse-%]	2,9	2,0	3,2	1,8	3,2	1,3

Für das tertiäre Substrat besteht eine Abhängigkeit der WDPT-Zeiten vom Wassergehalt: Hohe Wassergehalte sind an geringe WDPT-Zeiten gebunden, abnehmende Wassergehalte resultieren vorwiegend in höheren WDPT-Zeiten. Entgegen dem zu erwartenden Trend stetig abnehmender Wassergehalte mit zunehmenden WDPT-Zeiten können für das tertiäre Substrat drei Gruppen von WDPT-Zeiten differenziert werden, die sich im Wassergehalt (Median) signifikant unterscheiden (Abbildung 33).

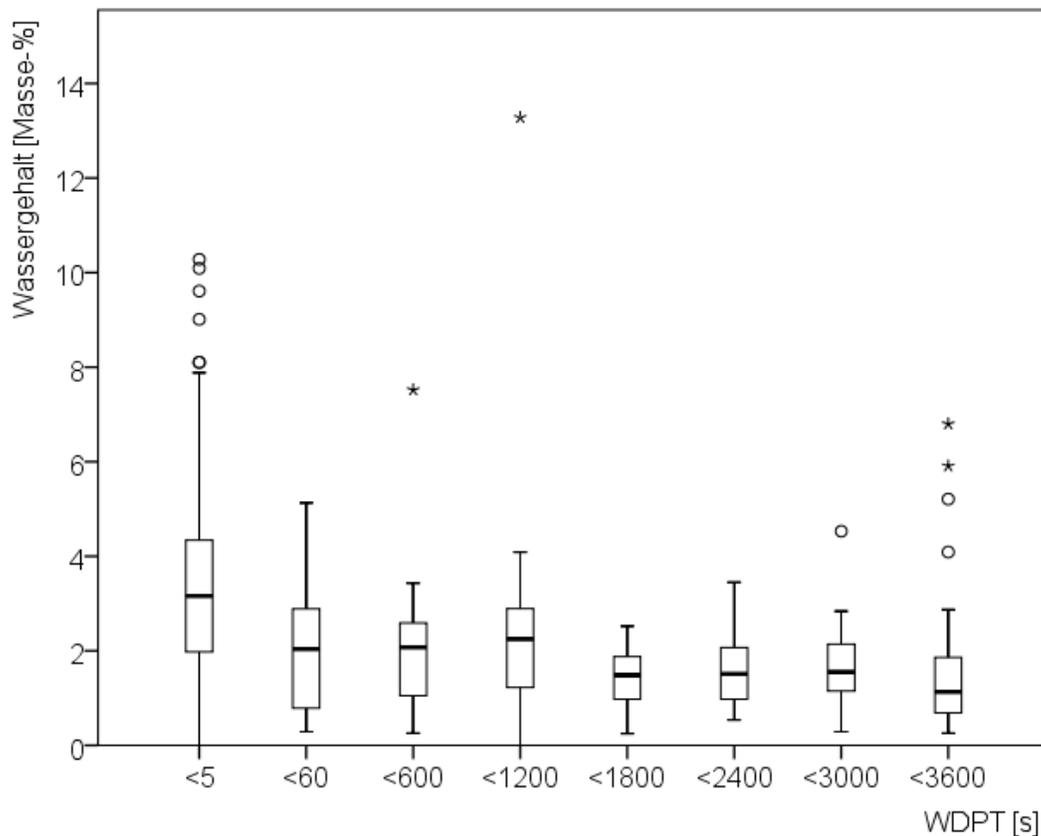


Abbildung 33: Boxplots der Wassergehalte in Abhängigkeit von der WDPT-Klasse (● Extremwerte, * Ausreißer) für das tertiäre Substrat (T1, T2 und Detailinzugsgebiet)

Die Proben mit WDPT-Zeiten von ≤ 5 s weisen mit durchschnittlich 3 Masse-% den höchsten Wassergehalt auf und sind im Wassergehalt signifikant verschieden von allen anderen WDPT-Zeiten. Proben mit WDPT-Zeiten zwischen > 5 s und < 1800 s unterscheiden sich mit durchschnittlich 2,1 Masse-% Wassergehalt nicht signifikant untereinander, grenzen sich jedoch signifikant von allen Proben mit WDPT-Zeiten > 1800 s ab. Die WDPT-Klassen < 1800 s bis 3600 s unterscheiden sich wiederum untereinander nicht signifikant hinsichtlich des Wassergehalts, der durchschnittlich

1,3 Masse-% beträgt. Somit sind nicht nur benetzbare ($WDPT \leq 5$ s) und benetzungsgehemmte Proben ($WDPT > 5$ s) hinsichtlich des Wassergehalts verschieden, sondern auch innerhalb der stark benetzungsgehemmten Proben können in Abhängigkeit vom Wassergehalt zwei Untergruppen (< 1200 s und > 1200 s) differenziert werden (Abbildung 33).

Für die Plots T1 und T2 lassen sich Bodenwassergehalte bestimmen, unterhalb deren vorwiegend Benetzungshemmung vorherrscht. Am Plot T1 ist Benetzungshemmung stets an Wassergehalte $\leq 1,9$ Masse-% gebunden. Am Plot T2 ist, bis auf eine Ausnahme (22.07.2004), Benetzungshemmung an Wassergehalte unterhalb 1,6 Masse-% gebunden. Für die Punkte des Detailszugsgebiets lässt sich kein definierter Wert als kritischer Bodenwassergehalt identifizieren, der benetzungsgehemmte und benetzbare Proben strikt voneinander trennt. Benetzungsgehemmte Proben haben je nach geomorphologischer Struktur einen Bodenwassergehalt zwischen 1,3 bis 2,0 Masse-% (Tabelle 21). Wird jedoch anhand dieser Werte und der kritischen Wassergehalte der Plots T1 und T2 (Tabelle 20) ein Bodenwassergehalt bei 1,8 Masse-% festgelegt, unterscheiden sich die Werte der aktuellen Benetzungshemmung der Gruppen mit Wassergehalten $\leq 1,8$ Masse-% und $> 1,8$ Masse-% signifikant voneinander (Tabelle 22). Ein kritischer Bodenwassergehalt für das Detailszugsgebiet unterhalb dessen vorwiegend Benetzungshemmung vorliegt, ist somit im Bereich von etwa 1,8 Masse-% anzugeben.

Tabelle 22: Parameter aktueller Benetzungshemmung (Mediane Kontaktwinkel und WDPT) in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt für das Detailszugsgebiet

Wassergehalt	$\leq 1,8$ Masse-% ($n = 162$)	$> 1,8$ Masse-% ($n = 237$)
Kontaktwinkel [°]	52	0
WDPT [s]	1800	0

Diese Befunde korrespondieren sehr gut mit den Resultaten der Untersuchung der aktuellen Benetzungseigenschaften in Abhängigkeit von der Wasserspannung. Bei Wasserspannungen unterhalb 100 hPa sind die untersuchten Proben des tertiären Substrats sehr gut benetzbar, es treten keine Unterschiede im Benetzungsverhalten der untersuchten Proben auf. Eine deutliche Verringerung in der Benetzbarkeit der Proben verbunden mit Kontaktwinkeln $> 60^\circ$ und WDPT-Zeiten > 600 s tritt erst ab

Wasserspannungen oberhalb 100 hPa auf (Abbildungen 34, 35). Während die Kontaktwinkelmessungen keinen eindeutigen Trend oberhalb 316 hPa zeigen, ist für die Ergebnisse des WDPT-Tests eine starke Abhängigkeit von der Wasserspannung erkennbar. Bei Wasserspannungen oberhalb 100 hPa unterscheiden sich die WDPT-Zeiten der Proben unterschiedlicher Entwässerungsstufen deutlich voneinander. Aufgrund der geringen Probenanzahl, die für Analysen zur Verfügung stand, können zu diesem Aspekt lediglich tendenzielle Aussagen getroffen werden.

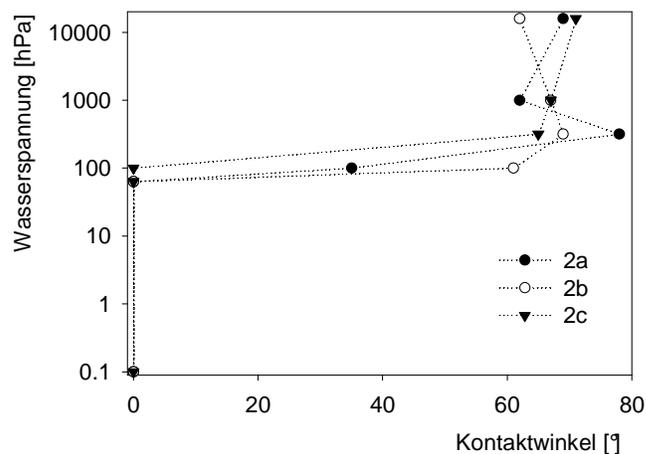


Abbildung 34: Aktuelle Kontaktwinkel in Abhängigkeit von der Wasserspannung

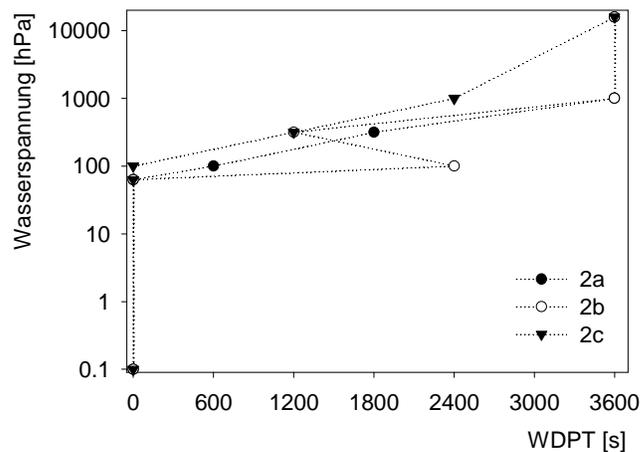


Abbildung 35: Aktuelle WDPT-Zeiten in Abhängigkeit von der Wasserspannung

Da eine eindeutige Abhängigkeit der Benetzungseigenschaften vom Bodenwassergehalt nachgewiesen werden konnte, üben indirekt auch die meteorologischen Bedingungen Einfluss auf das Benetzungsverhalten aus. Bei einer Differenzierung der den Probenahmen vorausgegangenen Witterungsbedingungen können Zusammen-

hänge zwischen Niederschlag und aktueller Benetzungshemmung aufgezeigt werden.

Für alle Probenahmen der Plots T1 und T2 bestehen nur geringe Korrelationen zwischen den WDPT-Zeiten und der Niederschlagsmenge am Tag der Probenahme sowie dem der Probenahme vorhergehenden Tag. Bei ausschließlicher Betrachtung von Probenahmen mit WDPT-Zeiten kleiner 600 s erhöhen sich diese Korrelationen deutlich und bei Betrachtung der Messwerte in saisonaler Abhängigkeit sind mittlere bis hohe Korrelationen zu verzeichnen (Tabellen 23, 24). Bei Darstellung der vorwiegend von starker Benetzungshemmung geprägten Monate April bis Oktober bestehen geringe Korrelationen zwischen den WDPT-Zeiten und den Niederschlagsmengen an den der Probenahme vorangegangenen Tagen. Wenn jedoch die als sehr stark und extrem benetzungsgehemmten klassifizierten Proben nicht in die Berechnungen einbezogen werden (> 600 s), ergeben sich mittlere bis hohe Korrelationen der WDPT-Zeiten mit den Niederschlagsmengen am Tag der Probenahme sowie mit den Niederschlagsmengen an den der Probenahme vorangegangenen Tagen. Alle Korrelationen der Benetzungshemmung zu den Niederschlagsmengen sind negativ, das heißt hohe WDPT-Zeiten sind an geringe Niederschlagsmengen gebunden (Tabelle 23). Für Proben mit WDPT-Zeiten < 600 s besteht zudem ein Zusammenhang der WDPT-Zeiten mit der Anzahl der Tage ohne Niederschlag vor der Probenahme. Je länger die Zeitspanne ohne Niederschlag im Vorfeld der Probenahme war, desto größer waren die gemessenen WDPT-Zeiten (Tabelle 24). Für Probenahmen mit sehr stark und extrem ausgeprägter Benetzungshemmung (WDPT-Zeiten > 600 s) wurden keine signifikanten Zusammenhänge mit den Niederschlagsparametern identifiziert.

Deshalb wurde im Folgenden der Einfluss weiterer meteorologischer Parameter auf die Ausbildung von Benetzungshemmung untersucht. Neben den Korrelationen der meteorologischen Parameter zu den Parametern der Benetzungshemmung zum Zeitpunkt der Probenahme wurden auch jeweils die Zeiträume von einem, zwei, sieben, zehn und 14 Tagen vor der Probenahme analysiert.

Tabelle 23: Spearman-Rangkorrelationen für das tertiäre Substrat zwischen allen WDPT-Zeiten und Niederschlagsmengen sowie Zeiten ohne Niederschlag vor der Probenahme, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$

Beprobungszeitraum	Korrelationen der WDPT-Zeiten zur Niederschlagsmenge vor der Probenahme			Korrelationen der WDPT-Zeiten zur Anzahl der Tage ohne Regen
	1 Tag	2 Tage	3 Tage	
Januar-Dezember	-0,264* (<i>n</i> = 56)	-0,273* (<i>n</i> = 56)	-	-
Saisonal (April-Oktober)	-	-0,390* (<i>n</i> = 41)	-0,466** (<i>n</i> = 41)	-

Tabelle 24: Spearman-Rangkorrelationen für das tertiäre Substrat zwischen WDPT-Zeiten < 600 s und Niederschlagsmengen sowie Zeiten ohne Niederschlag vor der Probenahme, ** $p < 0,01$

Beprobungszeitraum	Korrelationen der WDPT-Zeiten zur Niederschlagsmenge vor der Probenahme			Korrelationen der WDPT-Zeiten zur Anzahl der Tage ohne Regen
	1 Tag	2 Tage	3 Tage	
Januar-Dezember	-0,413** (<i>n</i> = 39)	-0,438** (<i>n</i> = 38)	-	-
Saisonal (April-Oktober)	-0,600** (<i>n</i> = 20)	-0,730** (<i>n</i> = 20)	-0,567** (<i>n</i> = 20)	0,661** (<i>n</i> = 20)

Die Korrelationen der Parameter der aktuellen Benetzungshemmung für die Plots T1 und T2 mit der Bodentemperatur (Bodenoberfläche) ergeben für die der Probenahme vorangegangenen Tage nur geringe bis mittlere Korrelationen über den gesamten betrachteten Zeitraum von 14 Tagen. Bei Verkürzung des betrachteten Zeitraums vor der Probenahme ist keine wesentliche Erhöhung der Korrelationskoeffizienten zu verzeichnen (Tabelle 25). Die höchste Korrelation zwischen Benetzungshemmung und Bodentemperatur besteht bei einem betrachteten Zeitraum von drei Tagen vor der Probenahme (inklusive dem Tag der Probenahme). Bei der Betrachtung der täglichen maximalen Bodentemperaturen ergeben sich nur wenige signifikante Korrelationen zwischen Bodentemperatur und Benetzungseigenschaften. Wird hingegen der Zusammenhang der Benetzungseigenschaften und der täglichen minimalen Bodentemperaturen geprüft, so bestehen für alle betrachteten Zeiträume durchgängig hoch signifikante Korrelationen (Tabelle 25). Die Korrelationen der

Parameter der aktuellen Benetzungshemmung zur maximalen Bodentemperatur an der Bodenoberfläche ergeben im Vergleich die niedrigsten Korrelationskoeffizienten. Die Korrelationen der Parameter der aktuellen Benetzungshemmung zur minimalen Bodentemperatur an der Bodenoberfläche und für die über 24 Stunden gemittelten Bodentemperaturen sind ähnlich.

Tabelle 25: Spearman-Rangkorrelationen der Plots T1 und T2 zwischen Kontaktwinkel sowie WDPT-Zeiten und der Bodentemperatur vor der Probenahme, ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$

Bodentemperatur		0 Tage	1 Tag	2 Tage	7 Tage	10 Tage	14 Tage
Mittelwert	Kontaktwinkel	0,478** (<i>n</i> = 33)	0,481** (<i>n</i> = 33)	0,524** (<i>n</i> = 35)	0,463* (<i>n</i> = 35)	0,436** (<i>n</i> = 35)	0,413* (<i>n</i> = 35)
	WDPT	0,482** (<i>n</i> = 34)	0,472* (<i>n</i> = 34)	0,538** (<i>n</i> = 36)	0,462** (<i>n</i> = 36)	0,426** (<i>n</i> = 36)	0,393* (<i>n</i> = 36)
Maximum	Kontaktwinkel	0,381* (<i>n</i> = 35)	-	-	-	-	-
	WDPT	0,388* (<i>n</i> = 36)	-	0,415** (<i>n</i> = 32)	-	-	0,323* (<i>n</i> = 38)
Minimum	Kontaktwinkel	0,406* (<i>n</i> = 37)	0,420* (<i>n</i> = 37)	0,502** (<i>n</i> = 39)	0,511** (<i>n</i> = 39)	0,442** (<i>n</i> = 39)	0,457** (<i>n</i> = 39)
	WDPT	0,329* (<i>n</i> = 38)	0,344* (<i>n</i> = 38)	0,451** (<i>n</i> = 40)	0,456** (<i>n</i> = 40)	0,381* (<i>n</i> = 40)	0,386* (<i>n</i> = 40)

Für das tertiäre Substrat (T1) besteht zwischen den aktuellen Benetzungseigenschaften (Kontaktwinkel und WDPT-Zeiten) und Globalstrahlung (Tageswerte) am Probenahmetag und in den Tagen vor der Probenahme ein positiver Zusammenhang. Zur Boden- sowie Lufttemperatur, die von der Globalstrahlung direkt abhängig sind, existieren ebenfalls positive Zusammenhänge. Zwischen den aktuellen Benetzungseigenschaften und der relativen Luftfeuchte besteht eine negative Abhängigkeit, bei höheren relativen Luftfeuchten nimmt die aktuelle Benetzungshemmung tendenziell ab (Abbildung 36).

Die Betrachtung der Abhängigkeiten der aktuellen Benetzungshemmung von den meteorologischen Parametern erfolgt auch anhand der im Untersuchungsgebiet angelegten und mit organischer Substanz angereicherten Plots exemplarisch für die

Variante mit unverwitterter Kohle (W0). Mit zunehmender Globalstrahlung und damit verbundener steigender Lufttemperatur nimmt die beobachtete aktuelle Benetzungshemmung zu. Zwischen der aktuellen Benetzungshemmung und der mittleren Bodentemperatur wurde im Gegensatz zum Plot T1 kein Zusammenhang festgestellt, zwischen der aktuellen Benetzungshemmung und der relativen Luftfeuchte besteht ein positiver Zusammenhang (Abbildung 37).

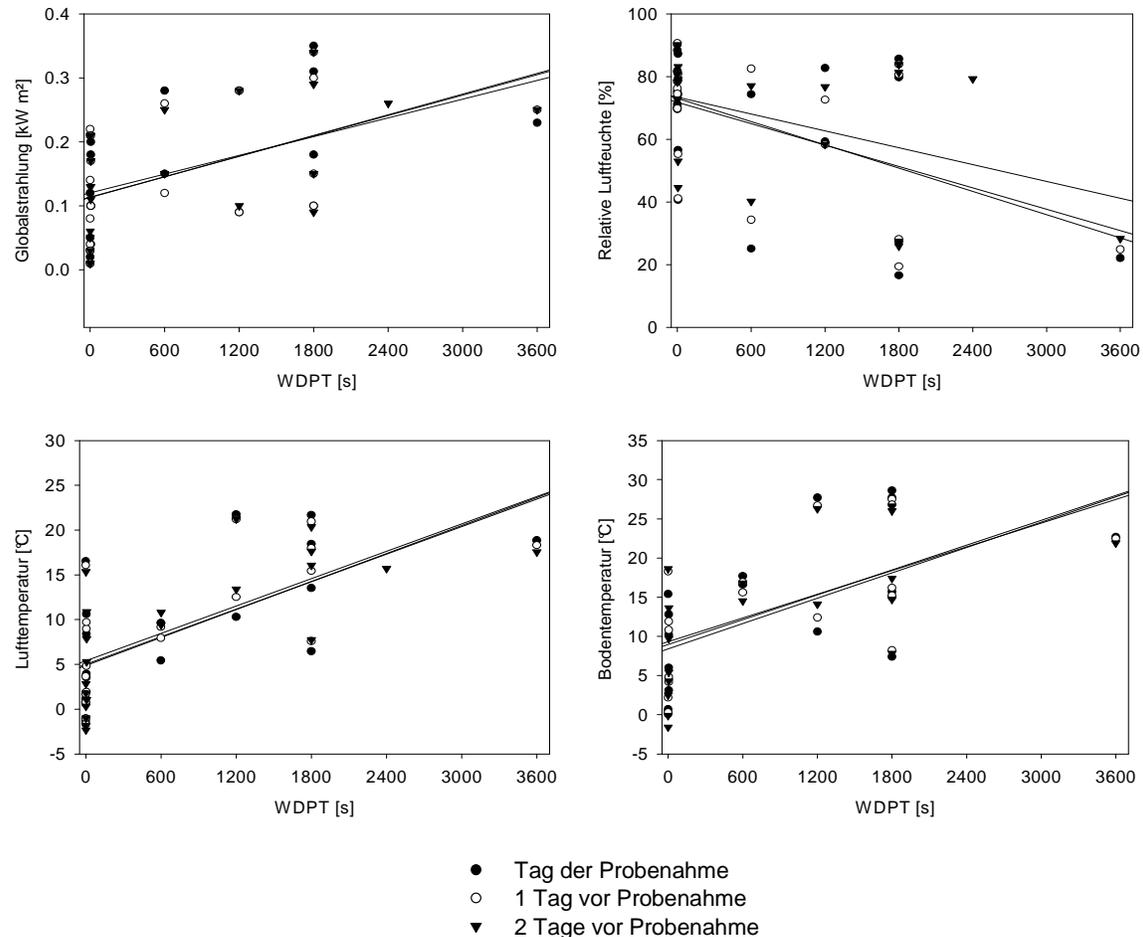


Abbildung 36: Aktuelle Benetzungshemmung (WDPT-Zeiten) am Punkt T1 in Abhängigkeit meteorologischer Parameter vor der Probenahme

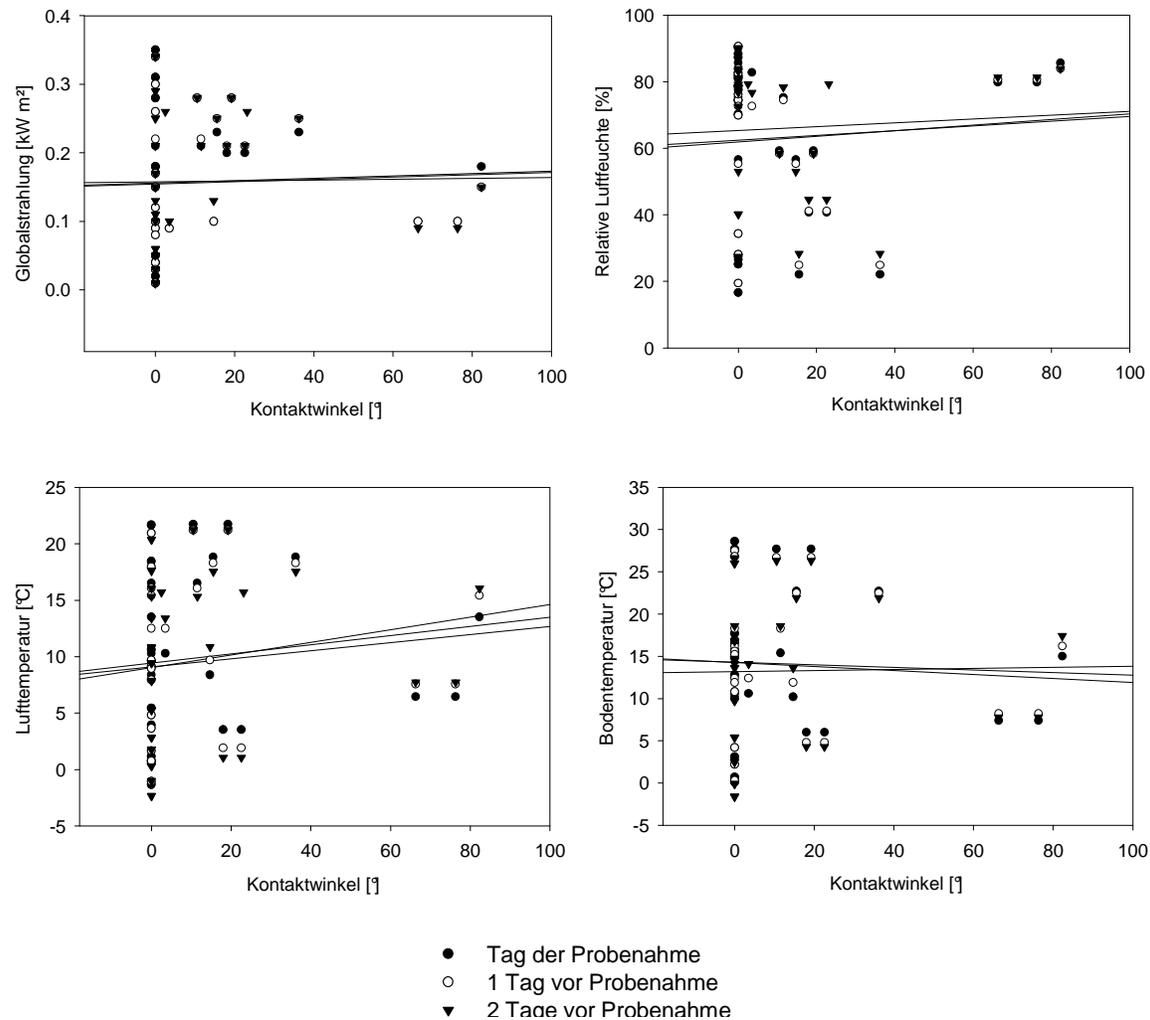


Abbildung 37: Kontaktwinkel potenzieller Benetzungshemmung der Variante W0 in Abhängigkeit verschiedener meteorologischer Parameter vor der Probenahme

Da für das tertiäre Substrat keine potenzielle Benetzungshemmung nachweisbar ist, wurde der Einfluss meteorologischer Parameter auf die Ausbildung von potenzieller Benetzungshemmung anhand der im Untersuchungsgebiet angelegten und mit organischer Substanz angereicherten Plots untersucht. Neben den Korrelationen der meteorologischen Parameter zu den Parametern der potenziellen Benetzungshemmung zum Zeitpunkt der Probenahme wurden auch jeweils die Zeiträume von einem, zwei, sieben, zehn und 14 Tagen vor der Probenahme analysiert. Für alle mit organischer Substanz angereicherten Plots wurde ein positiver Zusammenhang zwischen der potenziellen Benetzungshemmung (Kontaktwinkel und WDPT-Zeiten)

und der Globalstrahlung am Tag der Probenahme nachgewiesen. Ein Zusammenhang der potenziellen Benetzungshemmung (Kontaktwinkel und WDPT-Zeiten) mit der Boden- sowie Lufttemperatur (Tageswerte) ist ebenfalls gegeben. Die Tendenz steigender Benetzungshemmung mit höheren Temperaturen lässt sich über den gesamten Zeitraum von 14 Tagen vor der Probenahme nachweisen. Zwischen der potenziellen Benetzungshemmung und der relativen Luftfeuchte besteht für die untersuchten Substrate kein Zusammenhang.

Somit sind vorrangig meteorologische Einflussgrößen von Bedeutung, die die Austrocknung positiv über die Temperatur (Globalstrahlung, Boden-, Lufttemperatur) beeinflussen. Meteorologische Parameter, die vorrangig in Zusammenhang mit der Feuchtigkeit stehen (Relative Luftfeuchte, Windrichtung, -geschwindigkeit), zeigen tendenziell weder positiven noch negativen Einfluss auf die Ausbildung von potenzieller Benetzungshemmung.

3.6 Einfluss organischer Substanz auf das Benetzungsverhalten

Am Beispiel der tertiären und quartären Substrate sowie an mit organischer Substanz angereicherten Plots wurde die Wirkung organischer Substanz auf die Ausprägung von Benetzungshemmung untersucht. Für das tertiäre Substrat (T1, T2) und die geomorphologischen Einheiten im Detailszugsgebiet bestehen keine signifikanten Korrelationen zwischen den Parametern der aktuellen Benetzungshemmung (WDPT, Kontaktwinkel) und dem organischen Kohlenstoffgehalt im Substrat (Abbildung 38).

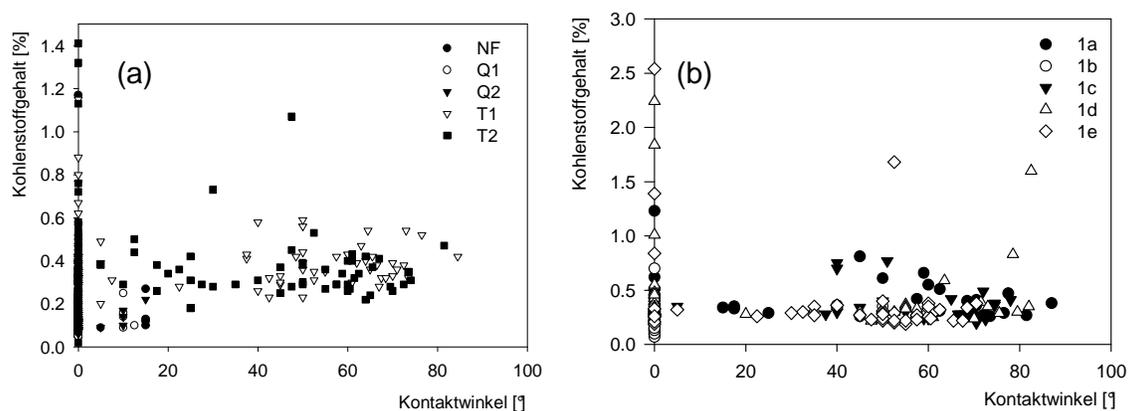


Abbildung 38: Kontaktwinkel in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt (a) und den geomorphologischen Einheiten (b); unterschiedliche Skalierung

Für das quartäre Substrat (Q1, Q2) bestehen für die Beziehung zwischen Kohlenstoffgehalt und WDPT-Zeiten sehr schwache Korrelationen (Tabelle 26). Für die Null-

fläche als Kontrolle zu den mit organischer Substanz angereicherten Plots bestehen dagegen keine statistischen Zusammenhänge zwischen Benetzungshemmung und organischem Kohlenstoffgehalt. Die im folgenden dargestellten Zusammenhänge sind somit ausschließlich auf die Effekte der zusätzlich eingearbeiteten organischen Substanz zurückzuführen.

Tabelle 26: Korrelationen zwischen Kohlenstoffgehalt (C_{org}) und WDPT-Zeiten (aktuelle Benetzungshemmung); ** $p < 0,01$

	Q1 ($n = 139$)	Q2 ($n = 125$)	NF ($n = 133$)
C_{org} zu WDPT	0,287**	0,279**	-

Bei der Auswertung des aktuellen Benetzungsverhaltens konnten zwischen der Nullfläche mit einem durchschnittlichen Kohlenstoffgehalt von 0,13 % und allen mit organischer Substanz angereicherten Plots signifikante Unterschiede festgestellt werden (Tabelle 27). Das Ergebnis einer Clusteranalyse der aktuellen Benetzungseigenschaften der Nullfläche und der verschiedenen mit organischer Substanz angereicherten Substrate verdeutlicht, dass zwischen den Varianten mit 1 % C_{org} und den Varianten mit 3 % C_{org} signifikante Unterschiede bestehen (Abbildung 39). Es werden zwei Cluster separiert, die wie folgt definiert sind: Einen Cluster bilden die mit 1 % C_{org} angereicherten Substrate und die Nullfläche (NF, K1, W0/1, W3/1), den zweiten bilden ausschließlich die mit 3 % C_{org} angereicherten Substrate (K3, W0/3, W3/3).

Tabelle 27: Aktuelle Benetzungseigenschaften der Nullfläche und der mit organischer Substanz angereicherten Plots, $n = 132$

	NF	K1	K3	W0/1	W0/3	W3/1	W3/3
Spanne gemessener Kontaktwinkel [°]	0	0 ... 93	0 ... 106	0 ... 93	0 ... 102	0 ... 76	0 ... 94
Spanne gemessener WDPT-Zeiten [s]	0 ... 5	0 ... 600	0 ... 3600	0 ... 3600	0 ... 3600	0 ... 3600	0 ... 3600

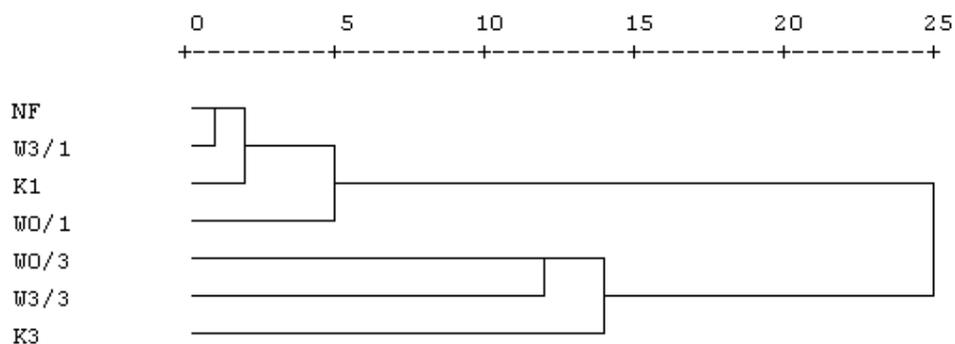


Abbildung 39: Dendrogramm der Clusteranalyse der Kontaktwinkel aktueller Benetzungshemmung, $n = 137$

Hinsichtlich der Parameter aktueller Benetzungshemmung (Kontaktwinkel, WDPT) bestehen keine Unterschiede zwischen den Varianten mit 1 % C_{org} und den Varianten mit 3 % C_{org} . Alle mit organischer Substanz angereicherten Varianten unterscheiden sich jedoch im aktuellen Benetzungsverhalten signifikant von der Nullfläche. Somit führt die Zugabe und Einarbeitung bereits von 1 % organischer Substanz nachweislich zur Induzierung oder Verstärkung von Benetzungshemmung im quartären Substrat. Die Qualität der organischen Substanz (rezent oder fossil) hat in dieser Versuchsanordnung allerdings bei niedrigen Kohlenstoffgehalten (1 %, 3 % C_{org}) keinen Einfluss auf das aktuelle Benetzungsverhalten (Tabelle 27).

Die Abhängigkeit der aktuellen Benetzungshemmung vom Kohlenstoffgehalt ist für alle untersuchten Varianten schwach ausgeprägt (Tabelle 28, Abbildung 40). Trotz der nur geringen Korrelation zwischen aktueller Benetzungshemmung und Kohlenstoffgehalt ist der Gehalt an organischer Substanz ein wichtiger Faktor für die Ausbildung von aktueller Benetzungshemmung (Tabellen 27, 28), dennoch sind weitere Faktoren für die Ausbildung und Verstärkung von Benetzungshemmung von Bedeutung (Kapitel 3.5).

Tabelle 28: Spearman-Rangkorrelationen zwischen WDPT-Zeiten (aktueller Benetzungshemmung) und dem Gehalt an organischem Kohlenstoff, $n = 132$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$

	NF	K1	K3	W0/1	W0/3	W3/1	W3/3
WDPT zu C_{org}	-	0,270**	0,195*	0,227**	0,319**	0,321**	0,212*

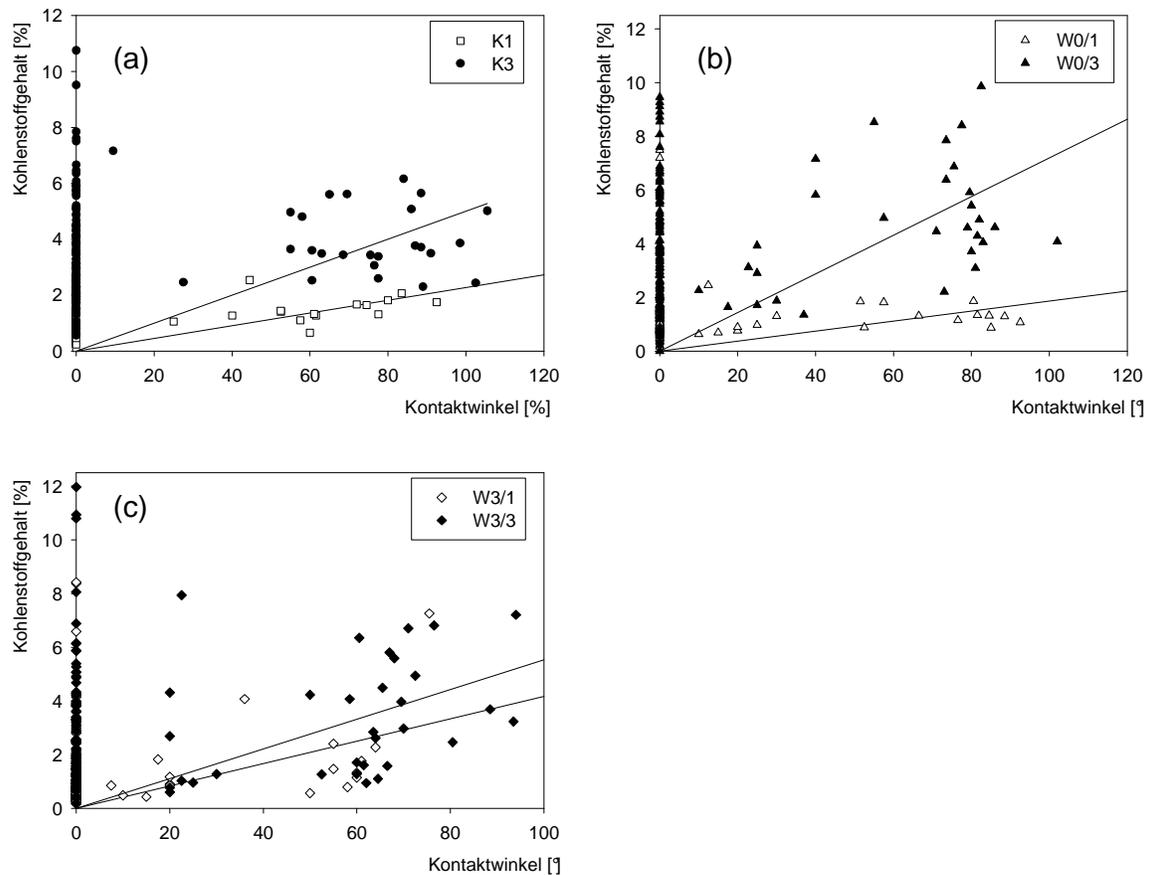


Abbildung 40: Kontaktwinkel aktueller Benetzungshemmung der mit organischer Substanz angereicherten Plots in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt, $n=132$ (mit Trendlinien)

Die beiden Varianten mit unterschiedlichen Anteilen (1 % und 3 % C_{org}) frischer Kohle (W0/1, W0/3) unterscheiden sich untereinander hinsichtlich des aktuellen Benetzungsverhaltens signifikant (WDPT, Kontaktwinkel). Die Plots mit verwitterter Braunkohle (W3/1, W3/3) und die beiden Varianten mit Kompost (K1, K3) hingegen weisen nur hinsichtlich eines Parameters aktueller Benetzungshemmung einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Varianten mit unterschiedlichen Kohlenstoffanteilen auf (1 % und 3 % C_{org}). Ebenso konnten nur bedingt statistisch signifikante Unterschiede zwischen beiden Varianten mit unterschiedlich stark verwittertem organischem Material fossilen Ursprungs (W0 und W3) festgestellt werden. Auch hinsichtlich der potenziellen Benetzungshemmung sind analog zu den aktuellen Benetzungseigenschaften alle mit organischer Substanz angereicherten Plots signifikant stärker benetzungsgehemmt gegenüber der Nullfläche als Referenz.

Bezüglich der Parameter potenzieller Benetzungshemmung (Kontaktwinkel, WDPT-Zeiten) bestehen ebenfalls jeweils signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit 1 % C_{org} und den Varianten mit 3 % C_{org} .

Im Unterschied zum aktuellen Benetzungsverhalten hat die Qualität (rezent oder fossil) der organischen Substanz jedoch bereits bei niedrigen Kohlenstoffgehalten (1 %) signifikanten Einfluss auf das potenzielle Benetzungsverhalten (Kontaktwinkel, WDPT-Zeiten) des untersuchten Substrats. Auch bei Kohlenstoffgehalten von 3 % C_{org} treten signifikante Unterschiede im potenziellen Benetzungsverhalten zwischen den Varianten mit Kohle und Kompost auf. Dagegen weisen die beiden mit Braunkohle angereicherten Varianten (W0, W3) untereinander nur bedingt Unterschiede im potenziellen Benetzungsverhalten auf.

Die Korrelationskoeffizienten der potenziellen Benetzungshemmung zum Gehalt an Kohlenstoff aller untersuchten Varianten liegen für Kontaktwinkel im mittleren, für WDPT-Zeiten im hohen Bereich (Tabelle 29). Die Abhängigkeit der potenziellen Benetzungshemmung vom Gehalt an organischem Kohlenstoff ist somit deutlich stärker ausgeprägt als für die aktuelle Benetzungshemmung (Tabellen 28, 29).

Tabelle 29: Spearman-Rangkorrelationen zwischen WDPT (potenzielle Benetzungshemmung) und C_{org} , $n = 125$, ** $p < 0,01$

	NF	K1	K3	W0/1	W0/3	W3/1	W3/3
WDPT zu C_{org}	-	0,489**	0,477**	0,558**	0,565**	0,282**	0,669**

Die mit organischer Substanz angereicherten Plots unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der aktuellen als auch der potenziellen Benetzungshemmung signifikant von der Nullfläche (Tabelle 30). Dabei sind die Parameter potenzieller Benetzungshemmung aller untersuchten Varianten signifikant größer als die der aktuellen Benetzungshemmung. Die Varianten mit 3 % C_{org} sind durch höhere Werte sowohl für die Parameter der potenziellen Benetzungshemmung als auch der aktuellen Benetzungshemmung gegenüber den Varianten mit 1 % C_{org} gekennzeichnet (Abbildung 40, Tabelle 27). Somit konnte mit zunehmendem Gehalt an organischem Kohlenstoff eine Verstärkung der Benetzungshemmung nachgewiesen werden.

Tabelle 30: Spearman-Rangkorrelationen zwischen WDPT, Kontaktwinkeln (aktuelle und potenzielle Benetzungshemmung) zum C_{org} vergleichend für die Nullfläche und alle mit organischer Substanz angereicherten Varianten, ** $p < 0,01$

	aktuelle Benetzungseigenschaften		potenzielle Benetzungseigenschaften	
	WDPT zu C_{org}	Kontaktwinkel zu C_{org}	WDPT zu C_{org}	Kontaktwinkel zu C_{org}
Nullfläche	- ($n = 132$)		- ($n = 132$)	- ($n = 132$)
alle mit organischer Substanz angereicherten Plots	0,387** ($n = 973$)		0,707** ($n = 871$)	0,558** ($n = 934$)

Zur Beurteilung des Einflusses organischer Substanz auf das Benetzungsverhalten wurden unter kontrollierten Bedingungen Versuche mit den verschiedenen Substraten des Untersuchungsgebiets und Mischungen mit organischer Substanz durchgeführt. Die quartären und tertiären Sande aus dem Untersuchungsgebiet blieben im Labor auch nach der Trocknung stets gut benetzbar. Somit konnten die Messungen der potenziellen Benetzungshemmung im Freiland verifiziert werden. Die gemessenen Kontaktwinkel waren meist 0° , die WDPT-Zeiten stets Null. Auch der als Matrix verwendete Normsand war nach der Trocknung stets gut benetzbar. Folglich ist die auftretende Benetzungshemmung der Substratgemische aus organischer Substanz und Matrix auch im Laborexperiment ursächlich direkt auf die Effekte der zusätzlich eingearbeiteten organischen Substanz zurückzuführen.

Als Ergebnis der Untersuchung zur Abhängigkeit der Benetzungshemmung vom Kohlenstoffgehalt im Labor wurde festgestellt, dass mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt auch die potenzielle Benetzungshemmung verstärkt wird (Tabelle 31). Die Kontaktwinkel der Varianten mit einem höheren Anteil an organischem Kohlenstoff sind größer, allerdings unterscheiden sie sich in Einzelfällen (rezenter Kohlenstoff) nicht signifikant von den entsprechenden Varianten mit einem niedrigeren Anteil an Kohlenstoff. Für die Varianten mit fossiler organischer Substanz (W0, W3) besteht eine stetige Zunahme der Benetzungshemmung mit steigendem Kohlenstoffgehalt. Ebenso sind die WDPT-Zeiten der Varianten mit einem höheren Anteil an fossilem Kohlenstoff größer als die WDPT-Zeiten der entsprechenden Varianten mit einem niedrigeren Kohlenstoffgehalt. Für die Varianten mit rezenter Kohlenstoff kann

aufgrund der nahezu gleichbleibenden WDPT-Zeiten keine Aussage zum Einfluss steigender Gehalte an organischem Kohlenstoff auf die resultierenden WDPT-Zeiten getroffen werden.

Tabelle 31: Mediane der Kontaktwinkel potenzieller Benetzungshemmung [°] in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur

Temperatur	Kontrolle	W0			W3			K		
	0 %C	1 %C	3 %C	5 %C	1 %C	3 %C	5 %C	1 %C	3 %C	5 %C
20°C	0	43	67	84	49	67	77	55	54	65
25°C	0	41	51	82	44	63	91	51	62	61
30°C	0	39	40	77	36	58	72	60	59	72
40°C	0	29	48	68	33	63	76	53	66	67
50°C	0	29	55	69	41	73	84	50	64	64
60°C	0	28	67	85	35	69	95	40	58	71
Median	0	34	53	79,5	38,5	65	80,5	52	60,5	66

Bei Mittelung der Kontaktwinkel über alle Trocknungstemperaturen und getrennt nach Kohlenstoffgehalten zeigt sich, dass unabhängig von der Art des Kohlenstoffs mit steigendem Kohlenstoffgehalt stets ein Anstieg in der Benetzungshemmung einhergeht. Für die Variante W0 ist jedoch die Zunahme der Kontaktwinkel pro Prozent Kohlenstoff anfänglich deutlich geringer als für die Varianten W3 oder K. Der Graph für die Variante K entspricht einer beginnenden „Sättigungskurve“. Der Kurvenverlauf für W3 zeigt ein ähnliches Bild, aber auf höherem Niveau des Grades der Benetzungshemmung. Dennoch deutet sich für alle Varianten mit weiterer Zunahme des Kohlenstoffgehalts eine Zunahme der Benetzungshemmung an (Abbildung 41).

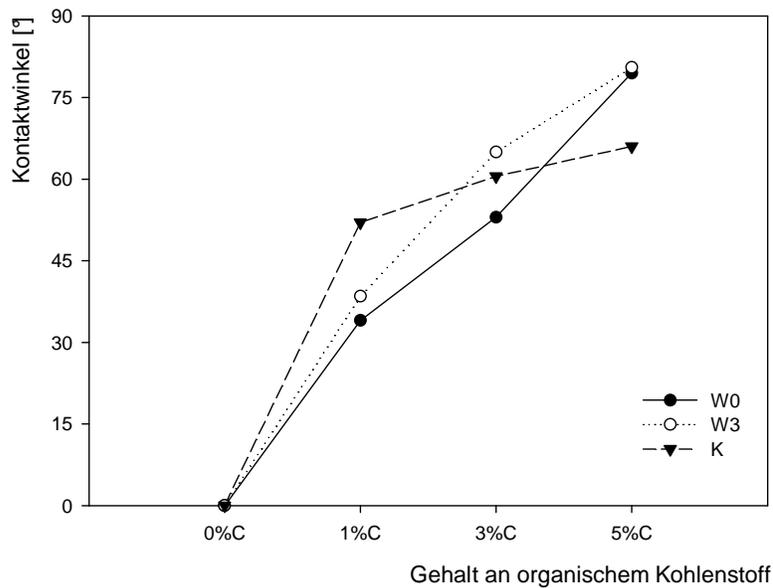


Abbildung 41: Kontaktwinkel (Mediane) potenzieller Benetzungshemmung in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehalts

3.7 Einfluss von Anfangsfeuchte und Trocknungstemperatur auf die Ausbildung von Benetzungshemmung

Zur Charakterisierung der Abhängigkeit der Benetzungshemmung unter Ausschluss von meteorologischen Einflüssen wurden Versuche unter definierten Bedingungen im Labor durchgeführt. Die Erhebung der Benetzungseigenschaften quartärer und tertiärer Sande sowie verschiedener Substratmischungen erfolgte in Abhängigkeit von Gehalt und Art organischer Substanz, von Trocknungstemperatur und vom Wassergehalt (Kapitel 2.3).

Als Referenzpunkt wurde zu Beginn dieser Studien die aktuelle Benetzungshemmung aller Versuchsvarianten ermittelt. Im Ausgangszustand vor der Trocknung wiesen alle Substrate und Substratmischungen eine sehr gute Benetzbarkeit auf. Somit ist die nach der Trocknung bei allen im Laborversuch untersuchten Varianten aufgetretene Benetzungshemmung direkt auf Effekte zurückzuführen, die im Zusammenhang mit dem Trocknungsprozess stehen.

Für die untersuchten Substrate und Substratmischungen ist entgegen der Hypothese keine statistisch signifikante Abhängigkeit der potenziellen Benetzungshemmung von der Höhe der Trocknungstemperatur zu beobachten. Es zeichnet sich keine einheitliche Tendenz bezüglich der Veränderung der Benetzungshemmung mit steigender

Temperatur ab. Die ermittelten potenziellen Kontaktwinkel schwanken vielmehr innerhalb eines Bereiches unabhängig von der Trocknungstemperatur (Abbildung 42). Dabei sind die Spannweiten der gemessenen Kontaktwinkel der Varianten mit geogenem Kohlenstoff fast doppelt so groß wie die der Variante mit rezentem Kohlenstoff. Zwischen den Varianten mit rezentem und geogenem Kohlenstoff besteht hinsichtlich der resultierenden WDPT-Zeiten ein signifikanter Unterschied (Tabelle 32).

Tabelle 32: Minimale und maximale Kontaktwinkel [°] vergleichend für alle Trocknungstemperaturen und Mediane von Kontaktwinkeln und WDPT-Zeiten potenzieller Benetzungseigenschaften

Variante	Kontaktwinkel [°]			WDPT [s]
	Minimum	Maximum	Median	Median
Kontrolle	0	0	0	0
W0	20	102	51	1600
W3	25	100	65	1200
K	35	80	60	60

Bei Auswertung der WDPT-Zeiten aller Substratmischungen mit geogenem Kohlenstoff in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur wird im Gegensatz zur Abhängigkeit der Kontaktwinkel von der Trocknungstemperatur eine Tendenz steigender Benetzungshemmung mit steigender Temperatur deutlich (Abbildung 45). Zwischen 20 °C und 25 °C Trocknungstemperatur variiert die Benetzungshemmung noch stark. Für die Varianten mit frischer, unverwitterter Kohle nimmt die Benetzungshemmung von 20 °C auf 25 °C ab, für die Varianten mit verwitterter Kohle nimmt die Benetzungshemmung in diesem Temperaturbereich zu oder stagniert auf einem Niveau (W3/1). Ab 30 °C Trocknungstemperatur steigen die WDPT-Zeiten beider Substratmischungen mit geogenem Kohlenstoff stetig an oder stagnieren auf einem Niveau. Für die Substratmischung mit rezentem Kohlenstoff sind die WDPT-Zeiten für die Varianten mit 3 % und 5 % Kohlenstoffgehalt unabhängig von der Temperatur als nur schwach benetzungsgehemmt einzustufen. Die Variante mit 1 % rezentem Kohlenstoff ist nach Trocknung bei 50 °C und 60 °C vollständig benetzbar, während bei niedrigeren Trocknungstemperaturen auch diese Variante schwach benetzungsgehemmt ist (Abbildung 42).

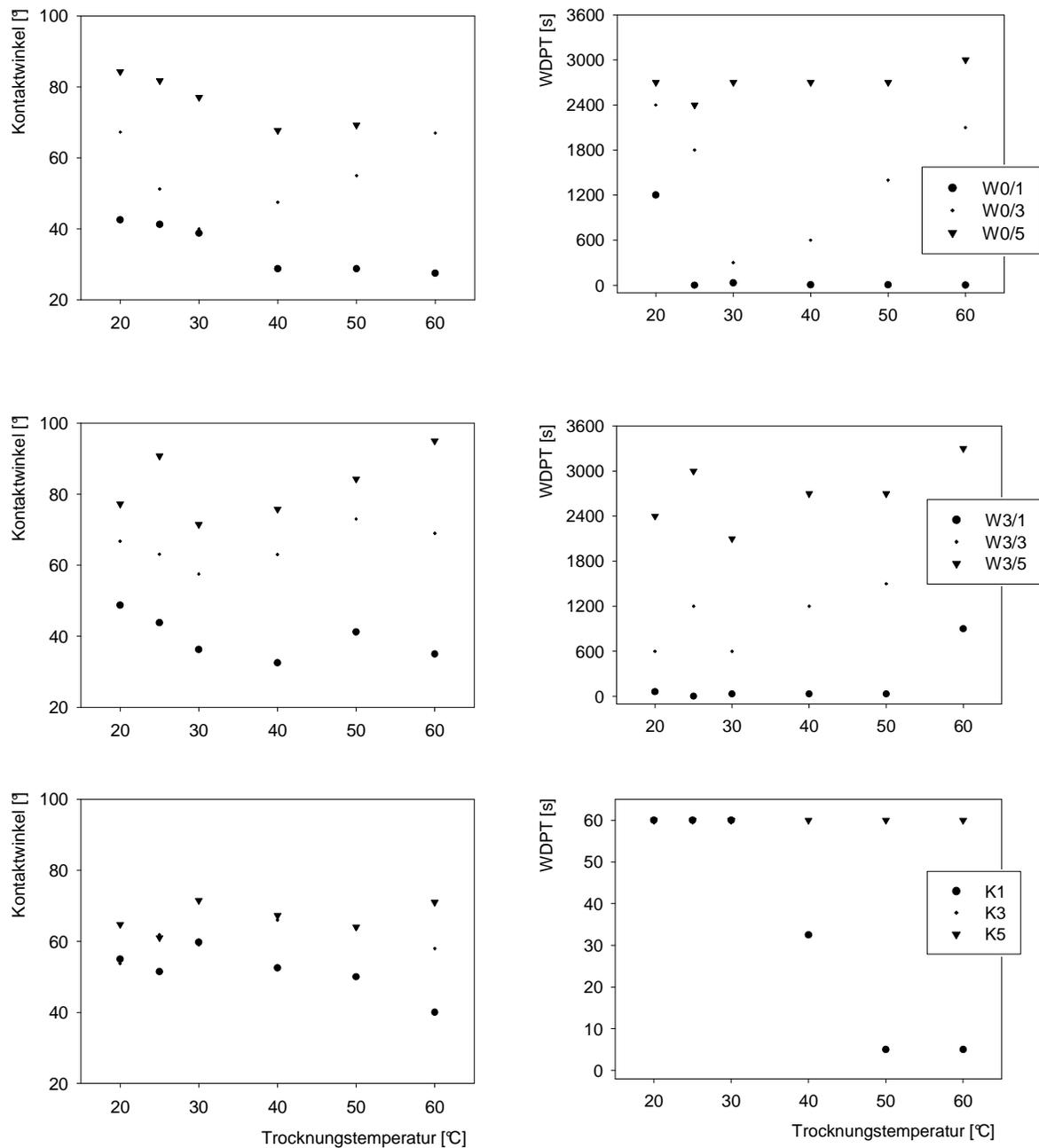


Abbildung 42: Kontaktwinkel und WDPT-Zeiten der Varianten W0, W3 und K in Abhängigkeit von der Trocknungstemperatur (unterschiedliche Skalierung)

Zur Bestimmung des Einflusses des Anfangswassergehalts auf die Benetzungseigenschaften wurden Versuchsansätze mit 8 % und 15 % Anfangswassergehalt parallel getrocknet. Für die potenziellen Benetzungseigenschaften besteht keine

einheitliche Tendenz bezüglich ihrer Abhängigkeit vom Anfangswassergehalt des Substrats. Varianten mit 15 % Anfangswassergehalt resultieren nach der Trocknung teilweise in größeren Kontaktwinkeln oder höheren WDPT-Zeiten, teils in kleineren Kontaktwinkeln oder kleineren WDPT-Zeiten als Varianten mit 8 % Anfangswassergehalt. Es bestehen dabei keine Unterschiede zwischen den untersuchten Substratmischungen mit rezentem oder geogenem Kohlenstoff.

Die Trocknungszeit bis zur Gewichtskonstanz betrug zwischen 8 und 37 Tagen. Allerdings wird bei Lufttrocknung keine absolute Trockenheit erreicht, die ermittelten Restwassergehalte betragen zwischen 0 und 3 Masse-%. Zwischen dem nach Trocknung verbleibenden Restwassergehalt und den WDPT-Zeiten potenzieller Benetzungseigenschaften der untersuchten Substrate wurde nur ein schwacher Zusammenhang für die Variante mit frischer Kohle festgestellt ($r_s=0,375$; $p < 0,05$). Für die Varianten mit Kompost und verwitterter Kohle konnte hingegen kein derartiger Zusammenhang festgestellt werden.

3.8 Benetzungseigenschaften als Parameter hydrologischer Modellierung

Die Gesamtheit der in dieser Untersuchung gewonnenen Daten wurde statistischen Verfahren der multivariaten Datenanalyse unterzogen, um die Benetzung beeinflussende Parameter zu identifizieren.

Im Folgenden wurde für das tertiäre Substrat (T1) eine Faktorenanalyse durchgeführt, die tatsächlich erklärungsrelevante Variablen identifiziert und die Anzahl der Variablen auf eine kleinere Anzahl von Dimensionen (Faktoren) reduziert. Werden alle hier untersuchten meteorologischen Parameter sowie bodenphysikalische und bodenchemische Parameter in einer Faktorenanalyse zusammengeführt, so lassen sich aus den ursprünglich 48 Eingangsparametern acht neue Faktoren extrahieren, die zusammen 92 % der Gesamtvarianz der Benetzungshemmung erklären. Die extrahierten Faktoren lassen sich inhaltlich wie folgt zusammenfassen: Die ersten sechs Faktoren führen die verschiedenen meteorologischen Parameter zusammen, der siebente Faktor bündelt die bodenphysikalischen, der achte Faktor die bodenchemischen Parameter. Den größten Beitrag zur Erklärung der Gesamtvarianz liefern die relative Luftfeuchte und die Bodentemperatur im Zeitraum von 14 Tagen vor der Probenahme (Faktor eins), ebenso wie die Lufttemperatur und die Globalstrahlung im Zeitraum von 14 Tagen vor der Probenahme (Faktor zwei). Die Niederschlagsmengen im Vorfeld der Probenahme werden auf zwei getrennte Faktoren aufgeteilt:

Faktor drei bilden die Niederschlagsmengen am Tag der Probenahme und den zwei vorhergehenden Tagen sowie die Anzahl der Tage ohne Regen vor der Probenahme, die etwas weiter zurückliegenden Niederschlagsereignisse bilden den Faktor sechs. Der Parameter Windrichtung wird analog in den Faktoren drei und vier wiedergespiegelt. Faktor fünf umfasst die Windgeschwindigkeiten im Vorfeld der Probenahme (Tabelle 33).

Mittels der Diskriminanzanalyse soll die Zugehörigkeit der entnommenen Proben in die Gruppen hydrophil, mäßig benetzungsgehemmt und sehr stark benetzungsgehemmt anhand der auch schon bei der Faktorenanalyse verwendeten 48 bodenphysikalischen, bodenchemischen und meteorologischen Eingangsparameter prognostiziert werden. Anhand dieser Variablen wird eine Funktion erstellt, die eine Zuordnung der Gruppenzugehörigkeit möglichst optimal erlaubt. Mit dieser strukturprüfenden Funktion sollen auch Prognosen der Gruppenzugehörigkeiten für neue Proben ermöglicht werden. Am Beispiel des Plot T1 wurde anhand von 18 Datensätzen eine mögliche Trennung der Gruppen geprüft. Mit den ermittelten kanonischen Diskriminanzfunktionskoeffizienten (Tabelle 34) werden die Diskriminanzfunktionen D1 und D2 berechnet, die eine Zuordnung der jeweiligen Gruppenzugehörigkeit ermöglichen.

Tabelle 33: Rotierte Komponentenmatrix der Faktorenanalyse für den Punkt T1 (n=18), Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse, Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung, Rotation ist in acht Iterationen konvergiert

	Faktoren							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Relative Luftfeuchte Tag 10	0,915							
Relative Luftfeuchte Tag 7	0,911							
Relative Luftfeuchte Tag 14	0,902							
Bodentemperatur Tag 10	0,899							
Bodentemperatur Tag 7	0,898							
Bodentemperatur Tag 14	0,887	-0,306						
Bodentemperatur Tag 1	0,872				-0,313			
Bodentemperatur Tag 2	0,855					-0,378		
Relative Luftfeuchte Tag 3	0,847		0,344					
Bodentemperatur Tag 3	0,828					-0,395		
Relative Luftfeuchte Tag 2	0,801		0,382					
Relative Luftfeuchte Tag 1	0,773		0,418					
Lufttemperatur Tag 2		0,936						
Lufttemperatur Tag 7		0,934						
Lufttemperatur Tag 3		0,931						
Lufttemperatur Tag 10		0,926						
Lufttemperatur Tag 14		0,901						
Lufttemperatur Tag 1		0,898						
Globalstrahlung Tag 1	-0,394	0,641	-0,440	0,355				
Globalstrahlung Tag 2	-0,482	0,598	-0,490					
Globalstrahlung Tag 3	-0,533	0,598	-0,435					
Globalstrahlung Tag 10		0,723	0,591					
Globalstrahlung Tag 7		0,695	0,597					
Globalstrahlung Tag 14	-0,336	0,561	0,445					
Niederschlagsmenge Tag 1			0,849					
Niederschlagsmenge Tag 2			0,788	-0,352				
Niederschlagsmenge Tag 3			0,761	0,386				
Windrichtung Tag 2	-0,527		-0,716					
Windrichtung Tag 3	-0,500		-0,715	0,393				
Windrichtung Tag 1	-0,437	-0,342	-0,635					
Tage ohne Niederschlag	-0,342		-0,673	0,328		-0,417		

Tabelle wird auf der nächsten Seite fortgesetzt

Tabelle 33: Rotierte Komponentenmatrix der Faktorenanalyse für den Punkt T1 (n=18), Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse, Rotationsmethode: Varimax mit Kaiser-Normalisierung, Rotation ist in acht Iterationen konvergiert - Fortsetzung

	Faktoren							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Windrichtung Tag 10				0,941				
Windrichtung Tag 7				0,937				
Windrichtung Tag 14				0,924				
Windgeschwindigkeit Tag 1					0,944			
Windgeschwindigkeit Tag 3					0,909			
Windgeschwindigkeit Tag 2					0,886			
Windgeschwindigkeit Tag 7		-0,506			0,779			
Windgeschwindigkeit Tag 10		-0,560			0,735			
Windgeschwindigkeit Tag 14		-0,614			0,673			
Niederschlagsmenge Tag 10		0,473				0,805		
Niederschlagsmenge Tag 7		0,306				0,758		
Niederschlagsmenge Tag 14		0,554				0,657		
Gehalt an organischem Kohlenstoff							0,856	
Bodenwassergehalt							0,854	
Lagerungsdichte							-0,823	
Elektrische Leitfähigkeit							0,417	0,453
pH-Wert								0,803

Tabelle 34: Kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten zur Berechnung der Diskriminanzfunktionen für den Punkt T1

Eingangsparameter	Funktion D1	Funktion D2
Bodenwassergehalt am Probenahmetag	5,313	-0,163
Niederschlagsmenge am Probenahmetag	17,765	2,172
Lufttemperatur im Zeitraum von 2 Tagen vor der Probenahme	40,234	2,762
Lufttemperatur im Zeitraum von 3 Tagen vor der Probenahme	-40,568	-0,201
Globalstrahlung im Zeitraum von 7 Tagen vor der Probenahme	-1,031	-1,474
Konstante	5,460	0,455

$$D_1 = 5,460 + 5,313 \cdot \text{Bodenwassergehalt}_{\text{Tag}_{-1}} + 17,765 \cdot \text{Niederschlagsmenge}_{\text{Tag}_{-1}} + 40,234 \cdot \text{Lufttemperatur}_{\text{Tag}_{-2}} - 40,568 \cdot \text{Lufttemperatur}_{\text{Tag}_{-3}} - 1,031 \cdot \text{Globalstrahlung}_{\text{Tag}_{-7}} \quad [2]$$

$$D_2 = 0,455 - 0,163 \cdot \text{Bodenwassergehalt}_{\text{Tag}_{-1}} + 2,172 \cdot \text{Niederschlagsmenge}_{\text{Tag}_{-1}} + 2,762 \cdot \text{Lufttemperatur}_{\text{Tag}_{-2}} - 0,201 \cdot \text{Lufttemperatur}_{\text{Tag}_{-3}} - 1,474 \cdot \text{Globalstrahlung}_{\text{Tag}_{-7}} \quad [3]$$

Am Beispiel des Plots T1 ist anhand der fünf Variablen Bodenwassergehalt, Niederschlagsmenge am Beprobungstag, Lufttemperatur an den beiden der Beprobung vorausgegangenen Tagen und der Globalstrahlung sieben Tage im Vorfeld der Probenahme sowie zweier berechneter Konstanten eine sehr gute Trennung der Gruppen möglich (Abbildung 46). Die hydrophilen Proben konzentrieren sich in der rechten Diagrammhälfte und sind durch überwiegend negative Funktionswerte der ersten Diskriminanzfunktion (D1) und positive Funktionswerte der zweiten Diskriminanzfunktion (D2) gekennzeichnet. Die mäßig benetzungsgehemmten Proben sind mit negativen Funktionswerten beider Diskriminanzfunktionen assoziiert und die sehr stark benetzungsgehemmten Proben sind durch Werte um Null für die erste Diskriminanzfunktion und positive Funktionswerte der zweiten Diskriminanzfunktion charakterisiert. Die erste Diskriminanzfunktion verfügt über eine höhere Trennkraft bei der Unterscheidung der einzelnen Gruppen als die zweite Diskriminanzfunktion. Während die erste Diskriminanzfunktion Proben mit hydrophilen deutlich von Proben mit mäßiger und sehr starker Benetzungshemmung trennt, werden Proben mit sehr stark benetzungsgehemmten Eigenschaften durch die zweite Diskriminanzfunktion von Proben mit mäßiger Benetzungshemmung separiert (Abbildung 43).

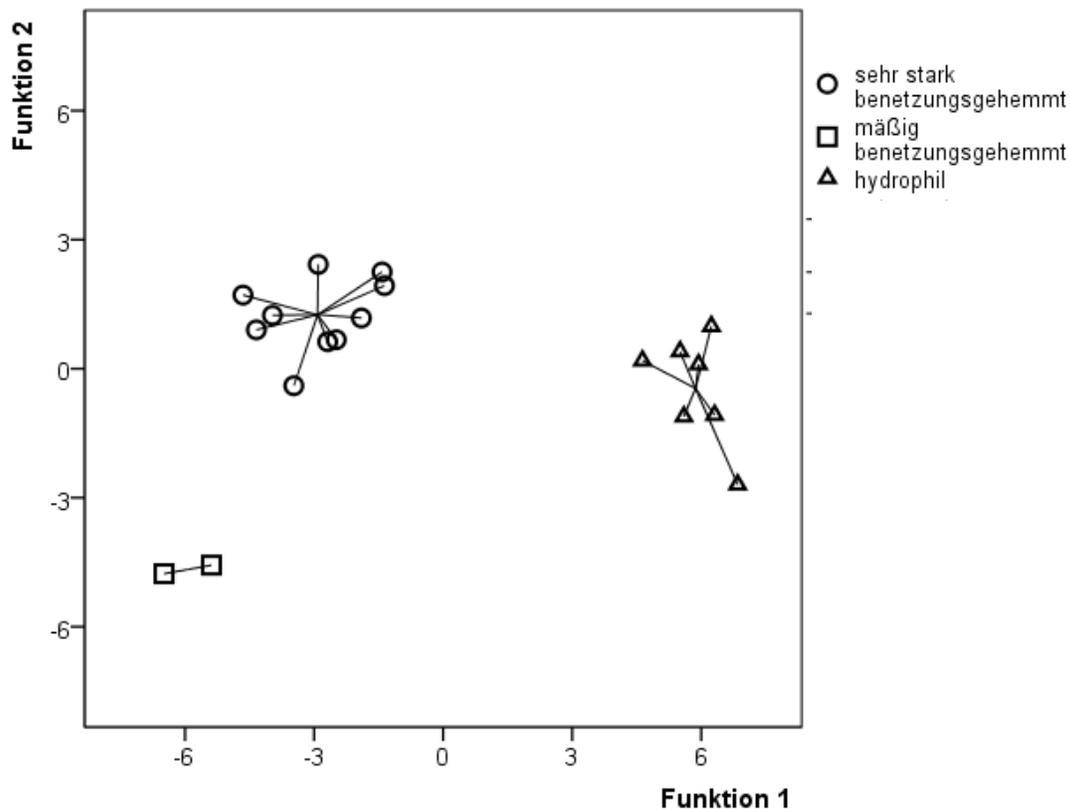


Abbildung 43: Grafische Darstellung zur Beurteilung der Trennkraft der Diskriminanzanalyse für den Punkt T1, n = 19, Zuordnung in hydrophile, mäßig benetzungsgehemmte und sehr stark benetzungsgehemmte Proben

Anhand der berechneten Diskriminanzfunktionen erfolgte in allen Fällen eine eindeutige Zuordnung der Proben am Punkt T1 in die Gruppen hydrophil, mäßig benetzungsgehemmt und sehr stark benetzungsgehemmt. Bei einer zufälligen Zuordnung der Proben wäre eine Trefferquote von nur 33 % zu erwarten.

Wird der Zeitraum vor der Probenahme reduziert und lediglich die meteorologischen und standortkundlichen Kennwerte der letzten 7 anstelle von 14 Tagen vor der Probenahme analysiert, erfolgt die Zuordnung der Proben am Probenahmepunkt T1 noch immer bis zu 100 % genau. Werden ausschließlich die meteorologischen und standortkundlichen Kennwerte vom Tag der Probenahme zur Zuordnung der Proben in Gruppen mit hydrophilen, mäßig benetzungsgehemmten und sehr stark benetzungsgehemmten Eigenschaften herangezogen, so können 78,9 % der Fälle für Proben des tertiären Substrats am Punkt T1 exakt klassifiziert werden. Für eine

exakte Zuordnung der Proben ist somit eine möglichst genaue Kenntnis der Witterungsbedingungen vor der Probenahme unerlässlich. Bei Verkürzung des betrachteten Zeitraums der Witterungsbedingungen vor der Probenahme sinkt auch die Zuordnungswahrscheinlichkeit.

Werden zusätzlich zu den Daten des Punktes T1 auch die Daten des Punktes T2 einer Diskriminanzanalyse unterzogen, sinkt die Zuordnungsgenauigkeit erwartungsgemäß. Mit über 80 % korrekt zugeordneten Proben anhand der Datengrundlage am Tag der Probenahme und der beiden der Probenahme vorangegangenen Tage ist jedoch eine zufriedenstellende Zuordnung der Gruppenzugehörigkeit möglich. Die Kenntnis der Daten im Zeitraum bis zu 14 Tagen vor der Probenahme bietet für die Gesamtheit der Proben des tertiären Substrats keine Verbesserung der Zuordnungsgenauigkeit (Tabelle 34).

Während die Zuordnungsgenauigkeit für die Proben des tertiären Substrats am Punkt T1 mittels fünf Variablen eine genaue Zuordnung der Proben bis zu 100 % erlaubt, ist für die Proben des gesamten tertiären Substrats mittels der gleichen fünf Variablen nur eine 80 %-ige Zuordnung möglich. Da vier dieser fünf Variablen meteorologische Parameter repräsentieren und für alle betrachteten Probenahmepunkte gleichbleibend sind, so sind die Unterschiede im Bodenwassergehalt begründet. Da der Bodenwassergehalt kleinräumig heterogen ausgeprägt ist und die Parameter der aktuellen Benetzungshemmung nur mittlere Korrelationen zum Bodenwassergehalt aufweisen (Kapitel 3.5), sind die Ergebnisse der Diskriminanzanalyse auch eines repräsentativen Probenahmepunktes nur begrenzt auf andere Standorte übertragbar.

Tabelle 34: Klassifizierungsergebnisse der Diskriminanzanalyse in Abhängigkeit der genutzten meteorologischen Daten vor der Probenahme für den Plot T1 und alle Proben des tertiären Substrats (T gesamt)

	Plot T1	T gesamt
Einbeziehung		
meteorologischer Daten	korrekte Zuordnung	korrekte Zuordnung
x Tage vor Probenahme	[%]	[%]
1	100,0	59,5
2	100,0	89,2
3	100,0	86,5
7	100,0	86,5
10	100,0	88,6
14	100,0	88,6

Für die mit organischer Substanz angereicherten Plots wurden mittels einer neu berechneten, analog zum tertiären Substrat durchgeführten Diskriminanzanalyse, die aus 17 Variablen besteht (Tabelle 35), korrekte Zuordnungen von durchschnittlich 66 % für alle Plots möglich (Tabelle 36). Die relativ große Heterogenität der mit organischer Substanz angereicherten Plots und die daraus resultierende Diskriminanzfunktion mit 17 Variablen bedingt jedoch die Überlagerung vieler Punkte, so dass Zuordnungen nur bedingt korrekt erfolgen (Abbildung 47). Neben meteorologischen Parametern (vorwiegend Niederschlagsmengen im Vorfeld und Windgeschwindigkeiten, sowie relative Luftfeuchte), die für alle Punkte gleich sind, gehen hier, im Gegensatz zur Diskriminanzfunktion für den Plot T1, neben der Bodenfeuchte auch weitere bodenphysikalische Parameter wie pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Gehalt an organischer Substanz und Lagerungsdichte in die Berechnung ein (Tabelle 35).

Tabelle 35: Standardisierte kanonische Diskriminanzkoeffizienten für alle mit organischer Substanz angereicherten Plots

Eingangsparameter	Funktion D1	Funktion D2
Niederschlagsmenge am Probenahmetag	0,904	-1,235
Niederschlagsmenge im Zeitraum von 2 Tagen vor der Probenahme	1,283	1,818
Niederschlagsmenge im Zeitraum von 3 Tagen vor der Probenahme	-1,196	-,702
Niederschlagsmenge im Zeitraum von 7 Tagen vor der Probenahme	0,532	-1,826
Niederschlagsmenge im Zeitraum von 10 Tagen vor der Probenahme	-1,630	-0,085
Niederschlagsmenge im Zeitraum von 14 Tagen vor der Probenahme	2,100	1,722
Tage ohne Niederschlag vor dem Probenahmetag	2,695	0,109
Windgeschwindigkeit am Probenahmetag	-0,893	-2,769
Windgeschwindigkeit im Zeitraum von 2 Tagen vor der Probenahme	0,844	2,573
Windgeschwindigkeit im Zeitraum von 3 Tagen vor der Probenahme	-1,459	0,301
Windgeschwindigkeit im Zeitraum von 7 Tagen vor der Probenahme	1,435	0,490
relative Luftfeuchte am Probenahmetag	2,543	0,343
Bodenwassergehalt am Probenahmetag	0,167	0,018
pH-Wert	-0,118	-0,306
Elektrische Leitfähigkeit	0,090	0,069
Gehalt an organischem Kohlenstoff	-0,519	0,042
Lagerungsdichte	0,084	0,453

Werden die Proben nach Art der organischen Substanz (Kompost, Kohle) sowie deren Verwitterungsgrad (W0, W3) differenziert, sind für die einzelnen Varianten der mit organischer Substanz angereicherten Plots (K, W0, W3) korrekte Zuordnungen zwischen 84 % und 100 % in die Gruppen hydrophil, mäßig benetzungsgehemmt und sehr stark benetzungsgehemmt möglich (Tabelle 36). Die Verwendung der Daten vom Tag der Probenahme und des der Probenahme vorangegangenen Tages führen zur höchsten Zuordnungsgenauigkeit. Werden nur die Einflussparameter dieses Zeitraumes vor der Probenahme berücksichtigt, verringert sich die Anzahl der Variablen der Diskriminanzfunktion von 17 auf 11 Variablen.

Tabelle 36: Zuordnung der Benetzungseigenschaften für alle mit organischer Substanz angereicherten Proben und gesondert nach Arten organischen Kohlenstoffs in Prozent [%]

Tage vor Probenahme	Alle Proben mit organischer Substanz (n = 80...97)	K	W	W0	W3
1	67,5	92,9	73,1	96,4	100,0
2	66,3	92,9	71,2	92,9	100,0
3	63,7	84,4	69,5	84,4	100,0
7	65,9	81,3	71,2	90,6	100,0
10	69,4	90,0	76,4	86,7	100,0
14	69,1	85,3	69,8	88,2	93,1

Sowohl mit den Diskriminanzfunktionen des Plots T1 als auch mit den Diskriminanzfunktionen der mit organischer Substanz angereicherten Substrate konnte jeweils eine gute Zuordnung der Proben zu den Gruppen hydrophil, mäßig benetzungsgehemmt und sehr stark benetzungsgehemmt erreicht werden. Dabei wurden Proben mit sehr starker Benetzungshemmung am deutlichsten separiert, die Abgrenzung von mäßig benetzungsgehemmten Proben zu den Gruppen hydrophil und sehr stark benetzungsgehemmt erwies sich am schwierigsten. Durch Auftrennung der Daten nach Probenahmeterminen, die jeweils innerhalb des Zeitraumes April bis Oktober (überwiegend ausgebildete Benetzungshemmung) und innerhalb des Zeitraumes November bis März (vorwiegend hydrophile Bedingungen) erfolgten (Kapitel 3.4), kann keine Verbesserung der Trennung von Gruppen mit hydrophilen, mäßig benetzungsgehemmten und stark benetzungsgehemmten Eigenschaften erreicht

werden. Somit können anhand der vorliegenden Daten Proben mit sehr starker Benetzungshemmung und damit auch die Zeiträume, in denen das tertiäre Substrat überwiegend sehr stark benetzungsgehemmt reagiert, identifiziert werden.

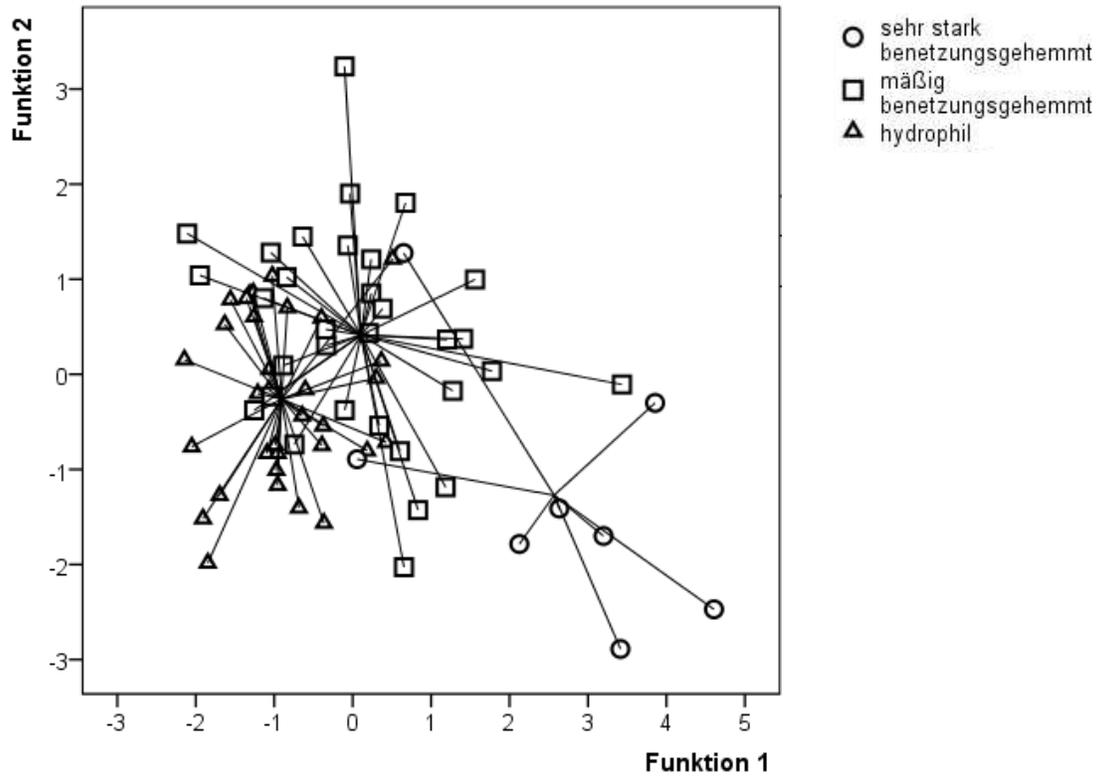


Abbildung 44: Diskriminanzanalyse für alle mit organischer Substanz angereicherten Plots, n = 97

4 Diskussion

In diesem Kapitel erfolgt die Diskussion der Ergebnisse in Anlehnung an die unter 1.2 aufgeführten Fragestellungen getrennt für die Freiland- (Kapitel 4.1 bis 4.6) und Laboruntersuchungen (Kapitel 4.7) sowie die Implementierung des Parameters Benetzungshemmung in die hydrologische Modellierung (Kapitel 4.8).

4.1 Charakteristik der untersuchten Substrate

Die im Untersuchungsgebiet vorherrschenden tertiären und quartären Substrate unterscheiden sich zum Teil deutlich hinsichtlich ihrer bodenphysikalischen und bodenchemischen Eigenschaften. Beide Substrate wurden als Mittelsande klassifiziert. Deutliche Unterschiede bestehen allerdings im Kiesanteil, der für die tertiären gegenüber den quartären Sanden mehr als doppelt so hoch ist (Tabelle 6). Für das tertiäre Substrat im Detailszugsgebiet wurde zudem eine Tiefenabhängigkeit des Kiesanteils beobachtet: Direkt an der Bodenoberfläche war der Kiesanteil gegenüber dem darunterliegenden Bereich um bis zu 10 % erhöht. Dagegen war im Rinnenbereich der beprobten Kuppen- und Rinnenstruktur der Feinbodenanteil oberflächennah erhöht (Abbildung 10). Auf vergleichbarem Substrat wurden von Biemelt (2001) bis zu mehrere Zentimeter starke Feinsandschichten für vergleichbare Rinnen dokumentiert. Maurer und Gerke (2011) dokumentierten in einem benachbarten Untersuchungsgebiet regelmäßig Umlagerungsprozesse durch Winderosion. Die infolge von Wind- und Wassererosion von Kuppen- und Zwischenrinnenbereichen ausgetragenen Partikel sedimentieren in den Rinnenbereichen. Während die Feinbodenanteile und Feinsande abgetragen und in Rinnen akkumuliert werden, erhöht sich somit der prozentuale Anteil der Kies- und Grobbodenfraktion auf den umliegenden Kuppen- und Zwischenrinnenbereichen. Dementsprechend liegt die Lagerungsdichte für die Rinnenbereiche (1b, 2b) infolge der Akkumulation erodierten Materials mit einheitlichem Korngrößenspektrum etwas höher als die des Zwischenrinnenbereichs und deutlich höher als die der Kuppenbereiche (Abbildung 12b). Die untersuchte Kuppen-Rinnen-Struktur befand sich zur Zeit der Untersuchungen in einer initialen Entstehungsphase, trotzdem sind Unterschiede in der oberflächennahen Textur zwischen Rinnen- und Kuppenbereichen bereits deutlich ausgebildet. Befunde von Biemelt et al. (2005) bestätigen die höheren Lagerungsdichten in den Rinnen gegenüber den Kuppen auch für ältere, stark ausgeprägte Kuppen- und Rinnenstrukturen.

Die Textur und somit die Porengrößenverteilung der untersuchten Substrate sind die maßgeblich beeinflussenden Parameter der Bodenwassercharakteristik. Für die quartären und tertiären Substrate sind die Kennwerte der Wasserbindung vom Primärporensystem dominiert und damit ausschließlich von der Korngrößenverteilung abhängig. Wie in Abbildung 13 zu sehen ist, zeigen sie den für Sandböden typischen Verlauf mit den größten Änderungen im Wassergehalt bei geringen Wasserspannungen (Scheffer und Schachtschabel, 1998). Die Substrate verfügen gemäß KA 5 bei einem mittleren Gesamtporenvolumen über hohe Luftkapazitäten bei sehr geringer Feldkapazität und nutzbarer Feldkapazität (AG Boden, 2005). Das errechnete Gesamtporenvolumen liegt zum Teil erheblich höher als die gemessenen Sättigungsgehalte (bis zu 9 % bei der Kuppe). Eine mögliche Ursache hierfür sind Änderungen der Porenstruktur (Biemelt und Gerke, 2011) oder Lufteinschlüsse in den Proben, die aufgrund der sehr stark ausgeprägten Benetzungshemmung und der teilweise durch Überstau erfolgten Aufsättigung nicht zu vermeiden sind (Abbildung 10, Kapitel 2.2.3). Biemelt et al. (2005) beschreiben für ähnliche Substrate ebenfalls extrem lange Aufsättigungszeiten von bis zu drei Wochen. Vor allem die Proben der tertiären Substrate, insbesondere die der Kuppenbereiche, waren sehr schwer aufzusättigen. Das tatsächliche Porenvolumen ist mutmaßlich infolge von Lufteinschlüssen deutlich größer, und die Proben des Kuppenbereichs unterscheiden sich tatsächlich deutlich von denen des Zwischenrinnen- und Rinnenbereichs.

Die als sehr niedrig einzustufenden pH-Werte des tertiären Substrats sind ursächlich auf die Oxidation von vorliegendem Pyrit (FeS_2) zurückzuführen. Werden Eisensulfide durch den Braunkohlebergbau dem Luftsauerstoff ausgesetzt, erfolgt bei der Oxidation die Freisetzung von Schwefelsäure. Die gebildete Schwefelsäure wird anschließend durch Sickerwasser in tiefere Bereiche ausgewaschen und verlagert (Schöpke, 2000). Die hohen elektrischen Leitfähigkeiten im Kuppen- und Zwischenrinnenbereich basieren auf sehr großen Mengen wasserlöslicher Salze, die vom Pyritgehalt der Substrate, der Pyritoxidation und dem Grad der Auswaschung der Salze abhängig sind (Neumann, 1999). Auf den Kuppenbereichen liegen die höchsten EC-Werte vor. In den meist gut benetzbaren Bereichen der Rinnen (1b, 2b) sind die EC-Werte hingegen signifikant niedriger, da hier eine rasche Verlagerung wasserlöslicher Salze mit dem Sickerwasser erfolgt (Abbildung 15b). Damit korrespondiert die Verteilung der EC-Werte gut mit der räumlichen Verteilung der Bodenacidität. Eine mögliche Ursache für die Heterogenität der Bodenacidität

innerhalb des Untersuchungsgebiets wäre ein fortgeschritteneres Stadium der Pyritoxidation des tertiären Substrats im Bereich der Plots T1 und T2, wenn beispielsweise das Substrat bereits zu einem früheren Zeitpunkt dem Luftsauerstoff ausgesetzt gewesen ist (Abbildung 14).

Diese Unterschiede zeigen sich auch in der Vegetationsentwicklung im Untersuchungsgebiet: Während im Bereich des quartären Substrats eine Besiedlung durch Gräser und Kräuter zu beobachten war, deren Deckungsgrad während des Untersuchungszeitraums stetig zunahm, entwickelte sich im Bereich der tertiären Sande über den gesamten Untersuchungszeitraum nahezu keine Vegetation. Da durch vorherrschende pH-Werte auch die Konzentration sowie die Pflanzenverfügbarkeit sowohl von Schad- aber auch Nährstoffen entscheidend beeinflusst wird, sind die Auswirkungen für das Pflanzenwachstum von großer Bedeutung. So wird beispielsweise bei sinkendem pH-Wert eine gleichzeitig steigende Al^{3+} -Konzentration in der Bodenlösung beobachtet (Marschner, 1995), die zu einer Behinderung der Kalzium-, Magnesium- oder Phosphoraufnahme durch die Wurzeln führt und sich somit kontraproduktiv auf das Pflanzenwachstum auswirkt (Hüttl, 1991). Zusätzlich zu den ungünstigen Bedingungen der Bodenwasserverfügbarkeit, ist die Hemmung der spontanen Vegetationsentwicklung auf dem tertiären Substrat hauptsächlich in den ungünstigen bodenchemischen Parametern begründet. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit lassen zudem auf einen negativen Einfluss der ausgeprägten Benetzungshemmung des tertiären Substrats auf die Vegetationsentwicklung schließen.

Ursache für die Heterogenitäten der bodenchemischen und bodenphysikalischen Eigenschaften innerhalb der tertiären Sande können weiterhin Unterschiede in der Substratzusammensetzung sein. Die Schüttung der Substrate im Untersuchungsgebiet erfolgte mittels einer Schaufelradbagger-Band-Absetzer-Kombination (Kendzia et al., 2008). Demzufolge entstammen die Substrate der Plots im westlichen und die des Detailszugsgebiets im östlichen Teil des Untersuchungsgebiets nicht zwangsläufig identischen Bereichen des Vorschnittbereichs. Dafür sprechen vor allem die deutlichen Unterschiede in der Korngrößenverteilung und der bodenchemischen Parameter.

Die untersuchten Substrate liegen mit Gehalten an organischem Kohlenstoff von deutlich unter 1 % auf einem sehr niedrigen Niveau. Dabei weisen die quartären Sande signifikant niedrigere Kohlenstoffgehalte als die tertiären Sande auf. Die

differenzierte Tiefenverteilung des Kohlenstoffs im quartären Substrat mit erhöhten Werten an der Bodenoberfläche deutet darauf hin, dass der Kohlenstoff im quartären Substrat durch Algen- und initiales Pflanzenwachstum induziert wird. Im vorwiegend vegetationsfreien tertiären Substrat hingegen spricht die relativ homogene Tiefenverteilung für einen hauptsächlich fossilen Ursprung des Kohlenstoffs (Kohlefragmente, Kohlestaub, Xylit). Die Gehalte an organischem Kohlenstoff variieren in Abhängigkeit der geomorphologischen Einheiten: In Übereinstimmung mit Biemelt et al. (2005) wurde in den Rinnen ein geringerer Kohlenstoffgehalt als auf den benachbarten Punkten beobachtet (Abbildungen 16, 17). Eine mögliche Ursache für diese Differenzierung ist die beschleunigte Verlagerung von Partikeln durch Oberflächenabfluss in den Rinnen. Kohlige Fragmente verfügen zudem über eine geringere Raum- und Partikeldichte als mineralische Partikel (Einecke, 2005) und können ebenso wie xylitische Fragmente mit dem Oberflächenwasser bevorzugt hangabwärts verlagert werden. Das an organischen Bestandteilen verarmte Substrat verbleibt in der Rinne.

Die geringe Wasserbindungskapazität und das beobachtete hohe Austrocknungspotenzial der untersuchten Substrate sowie das hohe Versauerungs- und Versalzungspotenzial des tertiären Substrats (Neumann, 1999) in Verbindung mit nur geringen Mengen an leicht verfügbarem Kohlenstoff (Rumpel und Kögel-Knabner, 2004) und zusätzlich geringen Niederschlagsmengen bei ausgeprägter Sommer-trockenheit (Müller und Bolte, 2009; Regionaler Planungsverband Oberlausitz-Niederschlesien, 1993) bilden für die Vegetationsentwicklung äußerst erschwerende Bedingungen. Infolgedessen bietet das gewählte Untersuchungsgebiet sehr günstige Voraussetzungen, um die Benetzungseigenschaften verschiedener Substrate und Substratmischungen räumlich und zeitlich differenziert zu untersuchen sowie die Ausbildung von Benetzungshemmung und ihre Wechselwirkungen mit bodenhydrologischen Prozessen nahezu losgelöst vom Einfluss von Vegetation zu beobachten.

4.2 Methodenvergleich am Beispiel der tertiären Substrate und der mit organischer Substanz angereicherten quartären Substrate

Trotz teilweise ähnlicher Eigenschaften und Charakteristika wiesen die beiden untersuchten Substrate ein differenziertes Benetzungsverhalten auf. Während die quartären Substrate im gesamten Untersuchungszeitraum durchgängig als gut benetzbar klassifiziert und als hydrophil eingestuft wurden, waren die zum Teil extrem benetzungsgehemmten feldfeuchten Proben des tertiären Substrats nach der Trocknung in den meisten Fällen gut benetzbar. Deshalb wird im folgenden nur auf die tertiären Substrate und die künstlich mit organischer Substanz angereicherten quartären Sande eingegangen.

In der Literatur werden Böden und Substrate mit kleinen Kontaktwinkeln generell als gut benetzbar klassifiziert und erst bei Kontaktwinkeln größer 90° erfolgt die Einstufung als benetzungsgehemmtes Substrat (Bachmann, 1996; Doerr et al., 2000b). Wenn für die Einstufung in benetzungsgehemmtes oder benetzbares Substrat ausschließlich die Kontaktwinkelgrenze von 90° (Letey et al., 2003) herangezogen wird, gelten die tertiären Sande hinsichtlich sowohl aktueller als auch potenzieller Benetzbarkeit als gut benetzbar. Hingegen zeigen die mittels WDPT-Test ermittelten Benetzungseigenschaften eine deutlich stärkere Benetzungshemmung an. Auch Buczko und Bens (2006) sowie Greiffenhagen et al. (2006) stellten beim Vergleich von Kontaktwinkelmessungen mit dem WDPT-Test Diskrepanzen fest. Ursächlich dafür ist die schwache Sensibilität des WDPT-Tests für Kontaktwinkel $< 90^\circ$ (Bachmann et al., 2000; Letey, 1969). Die qualitativ reproduzierbaren Ergebnisse des WDPT-Tests für die aktuellen Benetzungseigenschaften mit WDPT-Zeiten > 600 s deuten auf ausgeprägte Benetzungshemmung hin. Somit sind die tertiären Sande nach der Klassifikation von Bisdom et al. (1993) stark bis äußerst benetzungsgehemmt. Dementsprechend werden die tertiären Sande bei einer Klassifikation nach WDPT-Zeiten als benetzungsgehemmt eingestuft. Diese Klassifizierung entspricht auch den Beobachtungen im Gelände, wo für das tertiäre Substrat häufig starke Benetzungshemmung mit der Bildung von Oberflächenabfluss beobachtet wurde, einhergehend mit der Entwicklung von Kuppen- und Rinnenstrukturen (Kuhnert, 2009; Lemnitz et al., 2008). Demzufolge ist die alleinige Charakteristik der Benetzungseigenschaften nach Letey et al. (2003) nicht ausreichend.

Werden die Werte der Kontaktwinkelmessungen und WDPT-Zeiten des tertiären Substrats zueinander in Beziehung gesetzt, besteht eine signifikante Abhängigkeit, so dass trotz der relativ kleinen Kontaktwinkel die Einstufung des tertiären Substrats als benetzungsgehemmt gerechtfertigt ist (Lemmnitz et al., 2008). Auch an den Punkten der Transekte im Detailszugsgebiet können ausgeprägte positive Korrelationen zwischen gemessenen Kontaktwinkeln und WDPT-Zeiten nachgewiesen werden. Die geringe Korrelation der Parameter Kontaktwinkel und WDPT-Zeit am Punkt 1b (Rinne) ist durch die überwiegend gute Benetzbarkeit des Substrats in der Rinne zu erklären, es existieren nur wenige Datenpaare (Kontaktwinkel und WDPT-Zeiten aktueller Benetzungshemmung) mit Werten größer Null (Tabellen 9, 10).

Die in dieser Studie nachgewiesenen ausgeprägten Korrelationen zwischen gemessenen Kontaktwinkeln und WDPT-Zeiten aktueller Benetzungseigenschaften bestehen für das tertiäre Substrat und ebenfalls für alle Mischungen quartären Sandes mit organischer Substanz des Freilandversuches. Auch für das potenzielle Benetzungsverhalten der untersuchten Substratmischungen im Labor bestehen die im Freilandversuch für das aktuelle und potenzielle Benetzungsverhalten festgestellten, hoch signifikanten Korrelationen zwischen Kontaktwinkeln und WDPT-Zeiten der Mischungen quartären Sandes mit organischer Substanz (Tabelle 11). Trotz gemessener Kontaktwinkel unterhalb 90° sind die dazugehörigen WDPT-Zeiten häufig größer als 600 s (Abbildung 22). Während die Korrelationen für die Substratmischungen mit rezentem Kohlenstoff im Laborversuch die gleiche Größenordnung wie bei den Freilanduntersuchungen aufweisen, liegen die Korrelationen für die Substratmischungen mit geogenem Kohlenstoff hingegen deutlich über denen der Freilanduntersuchungen (Abbildung 20). Mögliche Ursachen für diese Unterschiede zwischen den Versuchen im Freiland und den Laborversuchen liegen neben den reduzierten Umwelteinflüssen vermutlich in der besseren Homogenität der Mischungen, die im Labormaßstab besser gewährleistet werden kann als im Freilandversuch und somit die Streuungen der Messergebnisse beeinflusst. Durch den Einsatz von Quarzsand gegenüber dem Einsatz quartären Sandes aus dem Untersuchungsgebiet besteht im Labor zudem die Möglichkeit, konkurrierende Nebeneffekte biologischer Parameter weitgehend auszuschließen.

Die Anwendung von Kontaktwinkelmessungen und des WDPT-Tests wurde im gesamten Untersuchungszeitraum durchgängig für alle Messungen aktueller und potenzieller Benetzungseigenschaften parallel durchgeführt. Beim Vergleich der

Messungen wird deutlich, dass Unterschiede der aktuellen Benetzungseigenschaften der hier untersuchten Substrate am deutlichsten mittels WDPT-Werten und Unterschiede der potenziellen Benetzungseigenschaften am deutlichsten mittels Kontaktwinkelmessungen widergespiegelt werden. Zur Beurteilung der aktuellen Benetzungshemmung sollte daher der WDPT-Test angewandt werden. Zur Bewertung der potenziellen Benetzungshemmung eignet sich dagegen vorrangig die Messung von Kontaktwinkeln. Die Konsistenz der Ergebnisse ist dabei durch die signifikanten Korrelationen zwischen beiden die Benetzungseigenschaften charakterisierenden Parametern gewährleistet (Tabellen 9, 12).

Neben WDPT- und Kontaktwinkelmessungen wurde auch der MED-Test auf seine Eignung hin geprüft, die Benetzungseigenschaften der untersuchten Substrate qualitativ und quantitativ zu charakterisieren. Die Ergebnisse entsprechen weitgehend denen des WDPT-Tests. Jedoch wurde bis auf Ausnahmen auf seine Anwendung verzichtet, da die Aufbringung von Chemikalien (Ethanol) weitere Analysen an derselben Probe verhindert. Dennoch ist der MED-Test grundsätzlich gut geeignet, um eine grobe Einschätzung der vorliegenden Benetzungseigenschaften im Gelände vorzunehmen.

Die hier angewandten Methoden ermöglichen eine Quantifizierung der Benetzungseigenschaften mit guter Reproduzierbarkeit der Ergebnisse über das gesamte beobachtete Spektrum der Benetzungshemmung der untersuchten Substrate und Substratmischungen. Zusätzlich sind weitere Analysen am gleichen Substrat möglich, da keine Chemikalien eingesetzt wurden.

Wie mit dieser Arbeit nachgewiesen wurde, kann trotz kleiner gemessener Kontaktwinkel eine stark ausgeprägte Benetzungshemmung bestehen. Der Grenzwert für Kontaktwinkel von 90° (nach Letey et al., 2003) sollte vor diesem Hintergrund entsprechend kritisch betrachtet werden, wenn es sich um die Klassifizierung von benetzbaren oder benetzungsgehemmten Substraten handelt. Bei Einstufung der Messwerte allein analog dieser Referenz kann eine Fehlbeurteilung der Benetzungseigenschaften des Substrats erfolgen. Um Unterschätzungen der Benetzungshemmung zu vermeiden, sollte zur Beurteilung der aktuellen Benetzungseigenschaften zusätzlich zu Kontaktwinkelmessungen der WDPT-Test angewandt werden, um die tatsächlichen Gegebenheiten vollständig widerzuspiegeln. Zur Erfassung der potenziellen Benetzungseigenschaften wird hingegen vorrangig die

Messung der Kontaktwinkel empfohlen. Wie diese Studie bestätigt, sind die Ergebnisse beider Methoden für die hier untersuchten Substrate konsistent.

4.3 Räumliche Heterogenität der untersuchten Substrate

Die tertiären und quartären Sande im Untersuchungsgebiet wurden hinsichtlich ihrer räumlichen horizontalen und vertikalen Heterogenität der Benetzungseigenschaften im Oberboden untersucht. Auf Basis statistischer Analysen und unterstützt durch subjektive Beobachtungen im Untersuchungszeitraum kann das quartäre Substrat als räumlich homogen in Bezug auf das Benetzungsverhalten eingestuft werden. Es lag einheitlich sowohl horizontal als auch vertikal eine sehr gute Benetzbarkeit vor (Tabelle 8, Abbildung 21). Für die Plots im tertiären Substrat im westlichen Bereich des Untersuchungsgebiets kann nur bedingt eine kleinräumige, horizontale Heterogenität der Benetzungseigenschaften nachgewiesen werden. Durch die morphologisch gleichmäßige Struktur der Bodenoberfläche ähneln sich die Benetzungseigenschaften der untersuchten Plots (Abbildung 21).

Die tertiären Substrate im Bereich des Detailszugsgebiets sind durch eine ausgeprägte kleinräumige, horizontale Heterogenität der Benetzungseigenschaften in Abhängigkeit von der Ausprägung geomorphologischer Einheiten charakterisiert. Die Benetzungshemmung nimmt in der Reihenfolge Rinne, Zwischenrinne, Kuppe zu (Tabelle 16, Abbildung 22). Auch Crockford et al. (1991) beobachten im Rinnenbereich eines Einzugsgebiets deutlich bessere Benetzbarkeit als in den benachbarten Kuppenbereichen. Anhand dieser Erkenntnisse lassen sich die Ergebnisse der bodenchemischen Analysen begründen: Da aufgrund der starken Benetzungshemmung die Kuppenbereiche nur sehr zögerlich befeuchtet werden und somit kaum Auswaschung gelöster Inhaltsstoffe stattfindet, liegt hier die höchste Konzentration wasserlöslicher Salze vor. In den meist gut benetzbaren Bereichen der Rinnen (1b, 2b) erfolgt eine stärkere Durchfeuchtung und eine rasche Verlagerung der wasserlöslichen Salze, so dass die Werte der elektrischen Leitfähigkeit abnehmen (Abbildung 15b). Durch die Verlagerung des Sickerwassers bevorzugt in den Rinnen und Zwischenrinnenbereichen nehmen die pH-Werte von den Kuppen über die Zwischenrinnenbereiche zu den Rinnen hin zu (Abbildung 14b). Diehl et al. (2010) und Bayer et al. (2007) unterstützen diese Ergebnisse mit der Beobachtung der maximalen Benetzungshemmung der von ihnen untersuchten Böden in einem pH-Wert-Bereich zwischen pH 4 bis pH 7. Van't Woud beschrieb bereits 1959, dass der Eintrag von

Kalk in den Boden und die damit einhergehende Anhebung des pH-Wertes einen Rückgang der Benetzungshemmung bewirkt.

Zusätzlich zur horizontalen Heterogenität weisen die untersuchten tertiären Substrate im gesamten Untersuchungsgebiet eine vertikale Heterogenität in ihren Benetzungseigenschaften auf. In Publikationen wird häufig die Abnahme der Benetzungshemmung mit zunehmender Tiefe beschrieben (Doerr et al., 2006; Woche et al., 2005; Dekker et al., 2001). Im Untersuchungsgebiet wurde ein benetzungsgehemmter Tiefenbereich beginnend an der Bodenoberfläche identifiziert. Seine Ausdehnung variiert in Abhängigkeit der geomorphologischen Lage, die geringste Mächtigkeit lag mit 7 cm am Oberhang vor, die größte Mächtigkeit am Unterhang. Unterhalb dieses benetzungsgehemmten Bereichs mit einer maximalen Tiefe von 26 cm lag vollständige Benetzbarkeit vor (Kuhnert, 2009). Der Kohlenstoffgehalt weist zwischen den untersuchten Punkten und im Tiefenverlauf bis fünf Zentimeter keine signifikanten Unterschiede auf (Abbildung 17). Da die Böden der Bergbaufolgelandschaft über eine starke kleinräumige Heterogenität bezüglich physikalischer (Buczko et al., 2002; Gerke et al., 2001) und chemischer Parameter (Gerke et al., 2001; Schaaf et al., 2001) verfügen, kann die heterogene Verteilung von Braunkohleresten, Kohlenstaub, Xylit (Hangen et al., 2005; Gerke et al., 2001), Eisen- und Aluminiumhumaten oder von Wachsresten tertiärer Sauergräser (Katzur, 1998) im Tiefenprofil als Erklärung der unterschiedlichen Benetzungseigenschaften herangezogen werden.

Analog zu den Ergebnissen von Jungerius und De Jong (1989) bei Untersuchungen an Dünenstränden in den Niederlanden ist dabei die Bodenoberfläche (0 - 1 cm) mit kleineren Kontaktwinkeln und geringeren WDPT-Zeiten weniger stark benetzungsgehemmt als die direkt darunter liegenden Bereiche. Die Mächtigkeit des weniger stark benetzungsgehemmten Bereichs betrug nur wenige Millimeter, jedoch war im Umfang und im Rahmen des Probenahmedesigns dieser Arbeit eine detailliertere Segmentierung innerhalb des obersten Zentimeters nicht möglich. Die differenzierte Benetzungshemmung im Tiefenprofil kann durch die Bildung einer biologischen Kruste an der Bodenoberfläche erklärt werden, die vorwiegend aus fadenförmigen Grünalgen besteht (Abbildung 25) und die über eine hohe Toleranz bezüglich extremer Temperaturen, Feuchtebedingungen sowie Sonneneinstrahlung verfügt (Belnap, 2006). Spröte et al. (2012, 2010) beschreiben auf vergleichbaren Substraten initiale

Bodenkrusten, die auf vegetationsfreiem Substrat und dünn mit Vegetation besiedelter Oberfläche aus Cyanobakterien und Grünalgen bestehen.

Bei Infiltrationsversuchen auf dem tertiären Substrat wurde die sehr gute Benetzbarkeit lediglich der obersten Bodenschicht beobachtet (Kuhnert, 2009). Nachdem die oberste Bodenschicht gesättigt ist, findet keine weitere Infiltration in den Boden statt, oder erfolgt nur sehr verzögert nach langer Kontaktzeit (Kuhnert, 2009; Biemelt et al., 2005). Auch Belnap et al. (2003) und Warren (2003) beobachten eine reduzierte Infiltration in sandige Böden in Anwesenheit biologischer Bodenkrusten. Im Zusammenhang mit dem Auftreten von Cyanobakterien und Grünalgen im Initialstadium der mikrobiellen Krustenbildung an Neulandstandorten stellten Fischer et al. (2012, 2010) eine gesteigerte Benetzungshemmung fest. Mit fortschreitender Krustenentwicklung wurde hingegen eine erhöhte Benetzbarkeit beobachtet (Fischer et al., 2010). Auch Eldridge und Greene (1994) beschreiben, dass biologische Krusten im allgemeinen die Infiltration auf degradierten Flächen erhöhen. Diese konträren Ergebnisse lassen sich auch durch das Vorhandensein von Bakterien erklären, die sowohl hydrophobe Zelloberflächen (*Variovorax paradoxus*, α -Proteobacterium) als auch hydrophile Zelloberflächen (*Bacillus sphaericus*) besitzen können und das Benetzungsverhalten von Böden nachweislich beeinflussen (Kirchner et al., 2005). Lichner et al. (2012) weisen eine Abhängigkeit im Benetzungsverhalten von der Artenzusammensetzung der Kruste nach. Auch die im Laborexperiment untersuchten Proben wurden analog den im Freiland gewonnenen in Zentimeter-Abschnitte unterteilt. Hier wurde aber aufgrund der Homogenität der Substrate durch zusätzliche Durchmischungen und dem Fehlen einer Kruste keine Tiefenabhängigkeit der Benetzungseigenschaften festgestellt.

Abgesehen von der Entwicklung biologischer Krusten lässt sich die größtenteils sehr gute Benetzbarkeit der Oberfläche auf die Ablagerung von hydrophilen Sanden infolge von Abrasion an der Bodenoberfläche zurückzuführen (Jungerius und De Jong, 1989). King (1981) und Tillman et al. (1989) konnten an gesiebten Proben keine oder eine reduzierte Benetzungshemmung der vor der Siebung benetzungsgehemmten Proben nachweisen. Beim Umlagerungsprozess von Bodenpartikeln durch Wind oder Wasser können „coatings“ beziehungsweise hydrophobe Moleküle an der Oberfläche der Bodenpartikel abgerieben werden (Jungerius und De Jong, 1989; King, 1981).

Infolge der zum Teil stark ausgeprägten Benetzungshemmung bildet sich schon bei geringen Niederschlagsintensitäten und -mengen Oberflächenabfluss auf Kuppen und in Zwischenrinnenbereichen (Lemnitz et al., 2008; Biemelt et al., 2005). Initiale Rinnen oder Senken stellen Akkumulationsbereiche für das dabei umgelagerte Material dar. Bei Austrocknung sind die untersuchten Sande zudem anfällig für Erosion durch Wind. Die damit einhergehende Substratverlagerung hat eine fortschreitende Reliefbildung der Kuppen- und Rinnenstruktur zur Folge. Auf ähnlichem Substrat wurde dokumentiert, dass die Anzahl der Rillen vom Ober- zum Unterhang zunahm und der Hauptteil der Rillen sich bereits im ersten Jahr der Ökosystemgenese bildete (Hofer et al., 2012). Biemelt et al. (2011, 2005) beobachteten, dass mit der Ausbildung geomorphologischer Strukturen eine Differenzierung der hydraulischen Parameter eng verbunden ist. Sie formulierten die These, dass der Abtrag benetzungsgehemmter Partikel von den Kuppen, deren durch mechanischen Abrieb verursachte Veränderung der Oberflächeneigenschaften und die anschließende Akkumulation hydrophiler Partikel in den Rinnenbereichen möglicherweise ursächlich für die differenzierten Benetzungseigenschaften in Abhängigkeit der geomorphologischen Einheiten sind. Mittels des Beprobungsschemas mit Transekten über die Kuppen- und Rinnenstruktur sowie am Ober- und Unterhang konnte diese These verifiziert werden (Abbildung 6). Das im oberen Hangbereich gelegene Transekt 2 ist nahezu nur durch den Austrag benetzungsgehemmter Partikel geprägt und weist höhere Benetzungshemmung auf als das im unteren Hangbereich gelegene Transekt 1. Die Ergebnisse zusätzlicher orientierender Untersuchungen mittels MED-Test stützen diese These ebenfalls: Im oberen Hangbereich ist die Anzahl benetzungsgehemmter Proben deutlich größer als am Mittel- und Unterhang. Die Anzahl benetzungsgehemmter Proben nimmt von der Kuppe über die Zwischenrinnenbereiche hin zu den Rinnenbereichen ab (Abbildung 23). Der Punkt 1b weist zudem infolge der Ablagerung von Partikeln oberflächlich einen deutlich höheren Feinbodenanteil auf als im darunterliegenden Bereich (Abbildung 11). Mögliche zusätzliche Erklärungen für die räumliche Heterogenität der Benetzungshemmung der tertiären Sande durch unterschiedliche Vegetationsformen oder deren Einfluss (Spröte et al., 2011; Keitzer et al., 2005; Wöllecke et al., 2003; Jungerius und De Jong, 1989) sind durch die weitgehend fehlende Vegetationsdecke im Untersuchungsgebiet ausgeschlossen.

Entgegen der Einordnung des Substrats als „gering erodierbar durch Wasser“ entsprechend der in der KA 5 gegebenen Klassifikation, wurden im Untersuchungszeitraum Umlagerungsprozesse beobachtet, verbunden mit einer fortschreitenden Reliefbildung und veränderten bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften (Kapitel 3.1). Die Benetzungseigenschaften des tertiären Substrats weisen kleinräumig eine hohe horizontale und vertikale räumliche Variabilität auf, die eng an die gebildeten topografischen Strukturen im Untersuchungsgebiet gekoppelt ist und dabei mit den Verteilungen der EC- und pH-Werte korrespondiert. Es konnte nachgewiesen werden, dass der mechanische Abrieb an den Oberflächen benetzungsgemhmter Partikel beim Abtrag von den Kuppen und die anschließende Ablagerung ursächlich für die differenzierten Benetzungseigenschaften ist. Die Rinnen waren als Akkumulationsbereiche hydrophiler Partikel überwiegend sehr gut benetzbar, in den Zwischenrinnen- und Kuppenbereichen wurde hingegen überwiegend starke Benetzungshemmung nachgewiesen.

Die Benetzungshemmung des tertiären Substrats ist auf die heterogene Verteilung von Kohlerpartikeln, Wachsen sowie Eisen- und Aluminiumhumaten im Bodenprofil zurückzuführen. Neben der Umlagerung von Partikeln mit einhergehender Abrasion hydrophober Moleküle ist die Benetzbarkeit der Bodenoberfläche auf das Vorhandensein einer biologischen Kruste sowie von Mikroorganismen mit hydrophilen Zelloberflächen zurückzuführen.

4.4 Zeitliche Variabilität der Benetzungshemmung

Eine durch hohe zeitliche Variabilität gekennzeichnete Benetzungshemmung von Böden wird in der Literatur häufig beschrieben (Biemelt et al., 2005; Buczko et al., 2005; Dekker et al., 2001; Katzur, 1998; Jungerius und ten Harkel, 1994; Crockford et al., 1991; Witter et al., 1991). Dabei wird langanhaltende Benetzungshemmung teilweise von gut benetzbaren Bedingungen gefolgt (Doerr und Thomas, 2000; Walsh et al., 1998; Crockford et al., 1991). Die erneute Ausbildung oder Entwicklung verstärkter Benetzungshemmung von Böden erfolgt hauptsächlich unter trockenen und warmen Umweltbedingungen (Doerr und Thomas, 2000).

Gegenüber den ganzjährig sehr gut benetzbaren quartären Sanden unterlagen die Benetzungseigenschaften der untersuchten tertiären Substrate innerhalb des Untersuchungszeitraums einer hohen zeitlichen Variabilität. Dabei ist ein saisonales Muster der Zu- und Abnahme von Benetzungshemmung zu erkennen: Während im

Winter und im Frühjahr an fast allen Punkten gute Benetzbarkeit vorherrschte, wurde im Sommer und im Herbst zum Teil erheblich ausgeprägte Benetzungshemmung der tertiären Substrate nachgewiesen (Abbildungen 26, 27). Das deutet auf die Temperaturabhängigkeit der Benetzungseigenschaften hin, denn die Maxima der Benetzungshemmung folgen im Jahresgang den Temperaturmaxima der Luft (Abbildung 27). Auch in den Studien von Dekker et al. (2001) sowie Jungerius und ten Harkel (1994) wurden entsprechende Zeiträume identifiziert, in denen die Benetzungshemmung am stärksten ausgeprägt war. Buczko et al. (2005), Burcar et al. (1994) und Burch et al. (1989) belegen das Auftreten der am stärksten ausgeprägten Benetzungshemmung im Zusammenhang mit hohen sommerlichen Temperaturen. Allerdings wurde von Buczko et al. (2005), entgegen den Ergebnissen dieser Studie, für das Frühjahr bereits eine teilweise stark ausgeprägte Benetzungshemmung, im Herbst hingegen keine Benetzungshemmung mehr beobachtet.

Mittels einer Clusteranalyse wurden benetzungsgehemmte und gut benetzbare Proben nach ihrem Beprobungsdatum getrennt und es konnte gezeigt werden, dass starke und extreme Benetzungshemmung des tertiären Substrats im Untersuchungsgebiet vorwiegend in den Sommer- und Herbstmonaten auftrat (Abbildung 26). Außer den Monaten August und September sind alle Monate auch mindestens mit einem Beprobungstermin im Cluster „gut benetzbar“ vertreten. Phasen guter Benetzbarkeit des Substrats sind bis auf die genannten Monate somit im ganzen Jahr vertreten. Entweder lag in den Monaten August und September tatsächlich durchgängig starke Benetzungshemmung vor oder die Benetzungshemmung hat sich nach einem möglichen Zusammenbruch innerhalb weniger Tage mit günstigen Bedingungen - warm und trocken (Doerr und Thomas, 2000) - wieder aufgebaut und wurde infolge dessen als ununterbrochen wahrgenommen, jedoch war dies mit dem gewählten Beprobungsschema nicht zu detektieren. Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, korrespondieren Zeiträume mit nur gering ausgeprägter Benetzungshemmung innerhalb des Sommers mit dem Auftreten von Niederschlagsereignissen hoher Intensität (Kuhnert, 2009). Darüber hinaus beschreiben Leighton-Boyce et al. (2005) und Crockford et al. (1991) ähnliche, abrupte Änderungen im Grad der Benetzungseigenschaften innerhalb weniger Tage oder Wochen.

Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass eine flexible und zeitlich hohe Auflösung der Messungen erforderlich ist, um die Variabilität der Benetzungseigenschaften umfassend zu charakterisieren. Nur wenige Studien betrachten hingegen Be-

netzungseigenschaften über einen so langen Zeitraum, vergleichsweise zeitlich hochauflösend, wie es Bestandteil dieser Arbeit war. Zeitlich hochauflösende Studien erfolgen oft nur über kürzere Zeiträume (Keitzer et al., 2005; Leighton-Boyce et al., 2005; Jungerius und ten Harkel, 1994). Bei zeitlich länger andauernden Studien wird hingegen oft nur einmalig pro Saison beprobt (Rodriguez-Alleres and Benito, 2012; Biemelt et al., 2005; Buzcko et al., 2005; Wahl et al., 2003).

Die Saisonalität der Benetzungseigenschaften variiert in Abhängigkeit von der geomorphologischen Lage der beprobten Punkte. Im Detailszugsgebiet bilden die Kuppenbereiche im Vergleich zu den Zwischenrinnenbereichen sehr zeitig im Jahresverlauf Benetzungshemmung aus (Abbildung 29) oder bleiben teilweise ganzjährig extrem benetzungsgehemmt (Kuhnert, 2009). Über den Untersuchungszeitraum hinaus wurde im Winter 2005/2006 durchgängig sehr stark ausgeprägte Benetzungshemmung auf den Kuppenbereichen im Detailszugsgebiet festgestellt (Tabelle 17). Auch im Winter 2007 wurden bei einer stichprobenartigen Einzelmessung für die Zwischenrinnen- und Kuppenbereiche extrem benetzungsgehemmte Bedingungen nachgewiesen (Kuhnert, 2009). Biemelt et al. (2005) beschreiben für ähnliche Substrate im Winter ebenfalls extreme Benetzungshemmung. Auch Täumer et al. (2005), Ritsema und Dekker (1998) sowie Dekker und Ritsema (1997) beobachteten benetzungsgehemmte Böden, in denen während einer langen und feuchten Winterperiode die Benetzungshemmung des Substrats erhalten blieb.

Aufgrund der exponierten Lage der Kuppen im Untersuchungsgebiet erfolgt an diesen Stellen eine nachhaltige Austrocknung des sandigen Substrats durch Wind und Sonneneinstrahlung. Somit herrschen nach Doerr und Thomas (2000) günstige Bedingungen für die Aufrechterhaltung der Benetzungshemmung. In den Rinnebereichen liegt hingegen fast durchgängig sehr gute Benetzbarkeit des Substrats vor, da sie vor Austrocknung durch Wind und Sonneneinstrahlung aufgrund der Depressionslage stärker geschützt sind. Zudem wird das Substrat infolge der einheitlicheren Korngrößenverteilung gegenüber den angrenzenden Bereichen (Abbildung 10) hier gleichmäßiger durchfeuchtet. Gleichzeitig erfolgt die Bildung einer Barriere gegenüber dem kapillaren Aufstieg des Bodenwassers und der damit verbundenen Evaporation. Gegenüber den Zwischenrinnen- und Rinnebereichen verzögert sich die Austrocknung zeitlich somit stark und die gute Benetzbarkeit im Rinnebereich bleibt weitgehend aufrecht erhalten.

Nach Doerr und Thomas (2000) geht eine Verstärkung der Benetzungshemmung mit trockenen und warmen standörtlichen meteorologischen Bedingungen einher. Das Untersuchungsgebiet liegt im Bereich vorherrschend kontinentaler Ausprägung des Klimas verbunden mit geringen mittleren Niederschlagssummen und einer hohen potenziellen Evapotranspiration (Wendling et al., 1999). Langanhaltende trockene und heiße Perioden und Niederschläge, die innerhalb der Vegetationsperiode überwiegend als konvektive Starkregenereignisse auftreten, erhöhen in Verbindung mit den vorherrschenden sandigen Substraten das Risiko edaphischer Trockenheit (Regionaler Planungsverband Oberlausitz-Niederschlesien, 1993). Zur Identifizierung von Zeiträumen, in denen objektiv Trockenheit vorherrscht, wurde die Klassifikation nach de Martonne und Lauer (Lauer, 1952) herangezogen. Herrschen im Sommer und Herbst im Untersuchungsgebiet trockene Bedingungen nach de Martonne und Lauer vor, gehen diese immer mit dem Auftreten von Benetzungshemmung im tertiären Substrat einher. Trockenheit im Sommer und Herbst ist für das untersuchte tertiäre Substrat somit unmittelbar mit Benetzungshemmung verbunden (Abbildung 28). Der Umkehrschluss, dass Benetzungshemmung an Trockenheit gebunden ist, trifft jedoch nicht konsistent zu. In diesem Zusammenhang ist zu untersuchen, ob auftretende Starkregenereignisse ursächlich dafür sind, dass auftretende Benetzungshemmung im Zeitraum Sommer und Herbst nicht immer an Trockenheit gebunden ist.

Im Untersuchungsgebiet traten neben den beschriebenen saisonalen Schwankungen der Benetzbarkeit innerhalb eines Jahresverlaufs auch deutliche Unterschiede in der Benetzbarkeit zwischen den Jahresverläufen auf (Abbildung 27). Feste Zeiträume für den Wechsel von benetzungsgehemmten zu hydrophilen Bodeneigenschaften bestehen nicht. Als Ursachen für die Saisonalität gelten hauptsächlich die Variabilität im Bodenwassergehalt (Doerr et al., 2000b; Burch et al., 1989; Ferreira, 2000) sowie Temperaturänderungen (Jungerius und ten Harkel, 1994; Ma'shum und Farmer, 1985).

Wie gezeigt werden konnte, unterliegen die Benetzungseigenschaften einer saisonalen Ausprägung. Die zeitlich hochauflösenden, über einen Zeitraum von 28 Monaten geführten Untersuchungen ermöglichten die Identifizierung starker und extremer Benetzungshemmung vorwiegend im Sommer und Herbst. Somit folgt das Maximum der Benetzungshemmung den Temperaturmaxima der Luft verzögert nach. Die An-

wendung eines Trockenheitsindex ermöglicht die objektive Identifizierung trockener Monate. Es konnte nachgewiesen werden, dass im Untersuchungszeitraum im Sommer und Herbst Trockenheit streng mit Benetzungshemmung verbunden ist. Der Einfluss ausgewählter meteorologischer Parameter und der Bodenfeuchte auf die Ausbildung der Benetzungseigenschaften der tertiären Substrate wird nachfolgend im Kapitel 4.5 diskutiert.

4.5 Einfluss abiotischer Parameter auf die Benetzungshemmung

Die in der Literatur beschriebene inverse Beziehung zwischen Bodenwassergehalt und Benetzungshemmung (Czachor et al., 2010; Keitzer et al., 2007; Doerr et al., 2000b; Ferreira et al., 2000; Crockford, 1991) konnte im Rahmen der vorliegenden Studie für die aktuellen Benetzungseigenschaften des tertiären Substrats sowohl für die untersuchten Plots T1 und T2 als auch für das Detailuntersuchungsgebiet bestätigt werden. Dabei ist starke Benetzungshemmung vorrangig an niedrige Bodenwassergehalte gekoppelt. Doerr et al. (2007) stützen diese Befunde, führen aber aus, dass starke oder extreme Benetzungshemmung nicht zwangsläufig an niedrige Wassergehalte gekoppelt ist (Keitzer et al., 2007; Kobayashi und Shimizu, 2007; Verheijen und Cammeraat, 2007). In Einzelfällen konnte trotz hoher Bodenwassergehalte Benetzungshemmung auch für das untersuchte tertiäre Substrat nachgewiesen werden (Abbildung 36). Dabei war starke beziehungsweise extreme Benetzungshemmung nicht notwendigerweise an niedrigste Wassergehalte gekoppelt. Zwischen benetzungsgehemmten ($WDPT > 5$ s) und benetzbaren Proben ($WDPT \leq 5$ s) bestehen dennoch Unterschiede im Bodenwassergehalt (Abbildung 31). In Abhängigkeit von der geomorphologischen Struktur nehmen die mittleren Bodenwassergehalte der benetzungsgehemmten Proben von Rinne über Zwischenrinne hin zur Kuppe ab, während der Anteil an benetzungsgehemmten Proben in gleicher Reihenfolge zunimmt (Abbildung 32, Tabelle 21). Diese Ergebnisse verdeutlichen die besondere Charakteristik der Kuppenpunkte: Die Kuppen sind nicht grundsätzlich stärker benetzungsgehemmt, aber durch ihre exponierte Lage und das vorliegende Korngrößenspektrum erfolgt hier die Austrocknung des Substrats deutlich eher und schneller als an benachbarten Stellen. Dadurch fällt der Bodenwassergehalt zeitiger im Jahr oder teilweise ganzjährig unter einen kritischen Wert. Es bildet sich früher und länger anhaltend Benetzungs-

hemmung aus, die wiederum die Wiederbefeuchtung des Substrats an dieser Stelle behindert.

Da sich benetzbare und benetzungsgehemmte Proben bezüglich ihres Wassergehalts unterscheiden, wurde aus den im Rahmen dieser Studie gewonnenen Ergebnissen ein „kritischer Bodenwassergehalt“ (Dekker und Ritsema, 1996) ermittelt, der für die einzelnen Untersuchungspunkte des tertiären Substrats zwischen 1,6 und 1,9 Masse-% liegt, unterhalb dessen vorwiegend Benetzungshemmung und oberhalb dessen hauptsächlich gute Benetzbarkeit vorliegt (Abbildung 31, Tabelle 20). Dekker und Ritsema (1994) ermittelten für sandiges Substrat (Dünen-sand) einen ähnlichen kritischen Wassergehalt in 5 bis 10 cm Bodentiefe unterhalb dessen stets Benetzungshemmung auftrat. Täumer et al. (2005) berechneten 3 Masse-% als kritischen Bodenwassergehalt für den sandigen Oberboden eines ehemaligen Rieselfeldes.

Die negative Abhängigkeit von Wassergehalt und Benetzungshemmung (Keitzer et al., 2007; Doerr et al., 2000) lässt stetig abnehmende Wassergehalte mit zunehmender Benetzungshemmung erwarten. Die wenigsten Studien nehmen allerdings, wie in dieser Untersuchung, nochmalige Unterteilungen der WDPT-Zeiten oberhalb 600 s vor (Tabelle 1). Entgegen dem zu erwartenden Trend konnten für das untersuchte tertiäre Substrat bei stetig abnehmendem Wassergehalt drei Gruppen von WDPT-Zeiten differenziert werden, die sich im Wassergehalt unterscheiden (Abbildung 33). Somit unterscheiden sich nicht nur benetzbare ($WDPT \leq 5$ s) und benetzungsgehemmte Proben ($WDPT > 5$ s) hinsichtlich ihres Bodenwassergehalts, sondern auch innerhalb der stark benetzungsgehemmten Proben können in Abhängigkeit vom Wassergehalt zwei Untergruppen (< 1200 s, > 1200 s) differenziert werden. Dabei sind die Proben des tertiären Substrats mit WDPT-Zeiten > 1200 s durch besonders niedrige Wassergehalte deutlich unterhalb des kritischen Bodenwassergehalts gekennzeichnet. Ist dieses Ergebnis auch auf andere Substrate übertragbar, so ist es sinnvoll, für die Abhängigkeit der Benetzungshemmung vom Bodenwassergehalt anstelle nur eines kritischen Bodenwassergehalts mehrere Schwellenwerte zu berücksichtigen. Doch nicht nur starke, sondern auch bereits geringe Grade von Benetzungshemmung können gravierende Auswirkungen auf die Wasserverteilung beispielsweise innerhalb von Bodenaggregaten ausüben (Hallet et al., 2001). So werden $WDPT > 1$ und < 5 s in einigen Publikationen als „subcritically repellent“

klassifiziert (Cerdea und Doerr, 2007; Hallet et al., 2001), insofern sie zu einer verminderten Infiltrationsleistung in den Boden führen.

Auch in Abhängigkeit von der Wasserspannung sind Veränderungen der Benetzungseigenschaften des tertiären Substrats zu beobachten. Unterhalb von 100 hPa liegt durchgängig gute Benetzbarkeit vor (Abbildungen 34, 35). In den Laborversuchen zur Entwässerungscharakteristik liegen die Wassergehalte deutlich höher als im Freiland, doch trotz der höheren Bodenwassergehalte tritt sehr starke Benetzungshemmung bei Werten oberhalb von 100 hPa auf. Die deutliche Verringerung der Benetzbarkeit des tertiären Substrats tritt mit Erreichen von Wassergehalten, die der Feldkapazität entsprechen ein und bleibt bis zum permanenten Welkepunkt durchgängig erhalten. Somit liegt die maximale Ausprägung der Benetzungshemmung im Bereich pflanzenverfügbaren Wassers und erschwert die Wiederbefeuchtung des Substrats in genau dem Bereich, der für das Pflanzenwachstum essentiell ist. Eine ähnliche Beobachtung machten Greiffenhagen et al. (2006), die ebenfalls oberhalb von 100 hPa starke Benetzungshemmung feststellten. Als Ursache abnehmender Benetzungshemmung bei zunehmendem Wassergehalt gilt die Entstehung polarer Oberflächen durch die Ablösung hydrophober Materialien von mineralischen Bodenpartikeln (Doerr und Thomas, 2000; Tschapek, 1983; Ritsema und Dekker, 1998). Bei zunehmendem Wassergehalt ist allerdings auch eine Veränderung in der räumlichen Anordnung hydrophober Moleküle möglich, da Änderungen der Dichte oder die Ausbildung von elektrischen Ladungen an Molekülketten neben der Temperatur auch vom Feuchtezustand abhängig sind (Lahann et al., 2003). Die Erhöhung des Bodenwassergehalts führt zur Verringerung der Packungsdichte von Molekülen an der Oberfläche der mineralischen Bodenpartikel. Da eine Reorientierung der oberflächenexponierten endständigen hydrophoben Gruppen nur im Zustand geringer Packungsdichte möglich ist (Lahann et al., 2003), bewirkt eine Befeuchtung des Substrats durch die Zufuhr von Niederschlagswasser die Ablösung oder Umorientierung hydrophober Moleküle. Dies resultiert in der Positionierung polarer funktioneller Gruppen an der Oberfläche und infolgedessen geringerer Benetzungshemmung des Substrats. Wird auch bei hohen Wassergehalten in spezifischen Böden Benetzungshemmung nachgewiesen (Dekker und Ritsema, 1996; Doerr und Thomas, 2000), kann dies durch eine gesteigerte mikrobielle Aktivität beispielsweise von Schlauch-, Ständer- oder Schimmelpilzen, verbunden mit der verstärkten Produktion hydrophober Substanzen begründet sein

(Chan, 1992; Jex et al., 1985; Bond und Harris, 1964). Chan (1992) postuliert eine Zunahme der WDPT-Zeiten mit gleichzeitiger Zunahme der Hyphendichte von *Trichoderma* und *Fusarium*. Auch eine unvollständige Reorientierung der oberflächenexponierten endständigen hydrophoben Moleküle erklärt Benetzungshemmung bei hohen Wassergehalten.

Studien, die analog zu der vorliegenden Untersuchung einen saisonalen Wechsel der Benetzungshemmung belegen, führen die Änderungen im Benetzungsverhalten auf Änderungen im Bodenwassergehalt zurück (Leighton-Boyce et al., 2005; Doerr et al., 2003; Ferreira et al., 2000; Witter et al., 1991; Crockford et al., 1991). Crockford et al. (1991) beobachteten, dass langanhaltende feuchte und kühle Bedingungen über mehrere Wochen Voraussetzung sind, um Änderungen im Benetzungsverhalten von benetzungsgehemmten zu hydrophilen Bedingungen zu erreichen.

Da in der vorliegenden Untersuchung ein eindeutiger Zusammenhang der Ausprägung der Benetzungseigenschaften vom Bodenwassergehalt nachgewiesen werden konnte, üben indirekt auch die meteorologischen Bedingungen Einfluss auf das Benetzungsverhalten aus, insbesondere die Niederschlagsmenge vor der Probenahme. Bei einer Differenzierung der den Probenahmen vorausgegangenen Witterungsbedingungen hinsichtlich der wöchentlichen oder 14-tägigen Niederschlagsmengen analog der Studien von Witter et al. (1991) und Doerr et al. (2003) oder des von Buczko et al. (2007) betrachteten Zeitraums von 60 Tagen, kann für die hier analysierten sandigen Substrate im aktuellen Benetzungsverhalten kein Unterschied festgestellt werden. Von Doerr et al. (2003) und Witter et al. (1991) werden lediglich Kriterien für Niederschlagsmengen, die der Probenahme vorausgingen, aufgestellt; die Messungen der Bodenwassergehalte erfolgen nicht in situ. Dabei gehen Witter et al. (1991) bei einer wöchentlichen Niederschlagssumme von mindestens 2 mm und Doerr et al. (2003) bei einer 14-tägigen Niederschlagssumme von größer 50 mm von feuchten Bedingungen aus. Diese Zeitspannen vor der Probenahme haben sich für die vorliegende Untersuchung als zu lang erwiesen. Bei Abwandlung der Kriterien von Witter et al. (1991) und Doerr et al. (2003) sowie der Betrachtung der Anzahl trockener Tage im Vorfeld der Probenahmen wird jedoch differenziertes aktuelles Benetzungsverhalten festgestellt. Dabei sind, wie von Buczko et al. (2007) vorgeschlagen, nur wenige Tage vor der Probenahme relevant. Es können für den Zeitraum der ersten drei Tage, inklusive des Tages der Probenahme, zum Teil deutliche inverse Zusammenhänge zwischen Niederschlagsmenge und aktueller Be-

netzungshemmung aufgezeigt werden (Tabellen 23, 24). Diese Beziehungen gelten vor allem während der Sommersaison, die überwiegend durch Benetzungshemmung gekennzeichnet ist. Je länger die Zeitspanne ohne Niederschlag vor der Probenahme war, desto schwächer war die Benetzungshemmung ausgeprägt. Diese Zusammenhänge gelten jedoch nicht für Proben mit sehr stark oder extrem ausgeprägter Benetzungshemmung. Daraus folgt, dass Perioden ohne Niederschlag, unabhängig von weiteren meteorologischen Parametern, die Ausbildung und Verstärkung von Benetzungshemmung im Oberboden begünstigen. Auch Bond und Harris (1964) beobachteten, dass mit zunehmender Trockenheit die Benetzungshemmung zunahm. Für Proben mit sehr stark und extrem ausgeprägter Benetzungshemmung (WDPT-Zeiten > 600 s) wurden für die vorliegende Untersuchung keine signifikanten Zusammenhänge mit den Niederschlagsparametern vor der Probenahme identifiziert. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass Niederschläge und damit gegebenenfalls einhergehende Änderungen des Bodenwassergehalts kurzfristig nur einen geringen Einfluss auf Grad und Persistenz der Benetzungshemmung des tertiären Substrats ausüben, wenn zuvor bereits sehr starke oder extreme Benetzungshemmung ausgebildet war. Somit ist die ausgebildete Benetzungshemmung des vorliegenden Substrats sehr robust, wenn sie bereits ein gewisses Persistenzniveau erreicht hat. Diese Schlussfolgerung wurde durch die Untersuchungen von Doerr et al. (2006) untermauert, die beschreiben, dass die Wasseraufnahmerate stark oder extrem benetzungsgehemmter Proben über Zeiträume von mehr als sieben Tagen gegenüber weniger stark benetzungsgehemmten Proben deutlich reduziert bleibt.

Eine scheinbare Ausnahme bilden die abrupten Änderungen im Benetzungsverhalten des tertiären Substrats von benetzungsgehemmt zu hydrophil am 22.07.2004 und 07.06.2005. Aber auch Leighton-Boyce et al. (2005) und Doerr et al. (2000a) beschreiben nach lang anhaltenden oder starken Niederschlagsereignissen reduzierte Benetzungshemmung oder vollständige Benetzbarkeit der untersuchten Substrate. In den Probenahmen vor dem 22.07.2004 konnte sehr stark ausgeprägte Benetzungshemmung bei Bodenwassergehalten unter 2 Masse-% identifiziert werden. Hingegen wurde am 22.07.2004 gute Benetzbarkeit des Substrats mit korrespondierenden Wassergehalten über dem kritischen Bodenwassergehalt festgestellt. Am Tag der Beprobung selbst war allerdings mit 24,1 mm die höchste Niederschlagsmenge während des gesamten Untersuchungszeitraumes gemessen worden. Auch bei den

Probenahmen vor der Beprobung am 07.06.2005 konnte schwache bis starke Benetzungshemmung identifiziert werden. Am 07.06.2005 lagen hydrophile Bedingungen und Wassergehalte über dem kritischen Wassergehalt vor. Dieser Beprobung gingen ebenfalls intensive Niederschlagsereignisse voraus.

Es ist daher naheliegend, dass Niederschlagsereignisse hoher Intensität dazu führen, dass durch die Energie des Aufpralls der Regentropfen auf die Bodenoberfläche Wasser in die Bodenmatrix gepresst wird, gefolgt vom Ansteigen des Bodenwassergehalts und der Abnahme der Benetzungshemmung. Indiz dafür sind Ergebnisse von Infiltrationsmessungen im Detailszugsgebiet, die bei anfänglichem Überdruck die Infiltration von Wasser in benetzungsgehemmten Boden zeigen, während ohne Überdruck keine Infiltration erfolgt (Kuhnert, 2009). Die Wasseraufnahme durch benetzbare Bodenpartikel in der Matrix und eine daraus resultierende Erhöhung des Wasseranteils in der gesamten Matrix (Imeson et al., 1992) ist ein weiterer möglicher Wirkmechanismus, der eine Erhöhung des Wassergehalts in benetzungsgehemmten Böden zur Folge haben kann, ebenso wie die Kondensation des Wasseranteils, der als Wasserdampf im Porenraum enthalten ist (Doerr et al., 2000b).

Diese drastischen Änderungen im Benetzungsverhalten wurden in der vorliegenden Arbeit jeweils zu Beginn der Sommersaison mit ausgeprägter Benetzungshemmung dokumentiert (Juli, Juni), danach wurden keine weiteren abrupten Schwankungen verzeichnet. Diese Befunde stimmen mit den Ergebnissen bezüglich der Abhängigkeiten der Benetzungseigenschaften von den Niederschlagsparametern überein und unterstützen die These, dass anhaltende und sehr stark oder extrem ausgebildete Benetzungshemmung äußerst robust gegenüber Änderungen des Bodenwassergehalts reagiert. Weniger stark ausgebildete Benetzungshemmung wird durch Variationen im Bodenwassergehalt offensichtlich wesentlich stärker beeinflusst (Doerr et al., 2006). Hurraß und Schaumann (2007) untersuchten die Benetzungskinetik benetzungsgehemmter Böden und beobachteten, dass es in Abhängigkeit der Porengröße bis zu drei Wochen dauert, bis Proben benetzungsgehemmter Böden wieder benetzbar reagieren. Zuerst wird die Benetzungshemmung grober Poren überwunden, dann die der feinen Poren. Bei geringen Wassergehalten des Bodens und der Umorientierung der funktionellen Gruppen ins Molekülinnere bestehen nur wenige freie Sorptionsplätze für Wasser (Bayer et al., 2007). Durch Hydratation lösen

sich Verknüpfungen zwischen funktionellen Gruppen zunehmend auf und es werden freie Sorptionsplätze erschlossen (Schaumann et al., 2005).

Erst im späten Herbst oder Winter erfolgt ein nachhaltiger Rückgang der Benetzungshemmung, zu dem nicht ausschließlich Änderungen im Bodenwassergehalt führen. Für ein komplexes Zusammenwirken verschiedener Parameter spricht auch das Auftreten von Perioden geringer Niederschläge im Frühjahr in denen, trotz der Einstufung nach de Martonne und Lauer (Lauer, 1952) als arid, keine andauernde Benetzungshemmung ausgebildet wird (Abbildung 28). Ein weiterer meteorologischer Parameter, der die Ausbildung von Benetzungshemmung beeinflusst, ist die Bodentemperatur. Eine Tendenz steigender Benetzungshemmung mit höheren Temperaturen wurde nachgewiesen. Die Ergebnisse belegen, dass innerhalb des untersuchten Temperaturbereichs (-10°C bis 55°C) die maximale Bodentemperatur an der Bodenoberfläche weniger relevant ist als die vorherrschenden Minimaltemperaturen (Tabelle 25).

Ein Zusammenbruch von Benetzungshemmung kann durch hohe Temperaturen erreicht werden (Doerr et al., 2006; Coelho et al., 2004; DeBano, 2000). Diese Temperaturbereiche werden unter natürlichen Bedingungen nur durch Brände erreicht. Eine Verminderung oder ein Zusammenbruch von Benetzungshemmung durch hohe Temperaturen ist somit auszuschließen, jedoch führen auch tiefe Temperaturen zum Zusammenbruch der Benetzungshemmung (Roy und McGill, 2000; Ma'shum und Farmer, 1985). Im Untersuchungszeitraum konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Wiederherstellung der vollständigen Benetzbarkeit des Substrats und dem Auftreten von Frost hergestellt werden. Eine Beeinflussung der Benetzungseigenschaften durch tiefe Temperaturen ist jedoch deutlich wahrzunehmen: In den Phasen zwischen den ersten Nachtfrösten und den letzten auftretenden Frösten besteht keine sehr stark ausgeprägte Benetzungshemmung des tertiären Substrats. Erst nach dem letzten Frost im Frühjahr (Ende März 2004 und Mitte April 2005) erfolgt der Anstieg der Benetzungshemmung. Ob einmalige oder leichte Nachtfröste ausreichend sind, um Benetzungshemmung dauerhaft zu zerstören, oder ob es dazu strengen Dauerfrostes bedarf, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht abschließend geklärt werden. Als Ursache für die verbesserte Benetzbarkeit infolge der Frosteinwirkung wird die mögliche Reorientierung der Moleküle an den Partikeloberflächen sowie die Konservierung der polaren funktionellen Gruppen an der Oberfläche postuliert. Die Wiederbenetzung

des Bodens ist somit unverzüglich möglich (Roy und McGill, 2000; Ma'shum und Farmer, 1985). Dennoch ist Frost kein alleiniger Auslöser für den Wechsel von benetzungsgehemmten zu benetzbaren Substrateigenschaften, denn es besteht in einigen Kuppenbereichen des Detailszugsgebiets durchgängig hochgradige Benetzungshemmung, obwohl in jedem Winter im Untersuchungszeitraum Dauerfrost verzeichnet wurde (Tabelle 17). Das Beprobungsschema erlaubt keine eindeutige Aussage, jedoch fallen Zeiträume mit dem Auftreten von Frost und das Abklingen der Benetzungshemmung ebenso zusammen wie die Zeiträume nach dem letzten Frost und sich wieder ausbildende Benetzungshemmung. Eine weitere Erklärung dafür, dass auch bei Frost Teile des Bodens benetzungsgehemmt reagieren, ist das Vorhandensein nicht-gefrierbaren Wassers. Schaumann et al. (2005) beschreiben, dass es im Boden immer einen Anteil nicht-gefrierbaren Wassers gibt, das durch spezifische Wechselwirkungen an polare funktionale Gruppen gebunden ist, in glasartige Phasen eingeschlossen oder selbst glasartig ist.

Neben der Bodentemperatur und der Niederschlagsmenge beeinflussen weitere meteorologische Parameter die aktuellen Benetzungseigenschaften des tertiären Substrats. So bestehen zwischen den Benetzungseigenschaften und der Globalstrahlung am Probenahmetag und in den Tagen vor der Probenahme positive Zusammenhänge. Zur Lufttemperatur, die von der Globalstrahlung direkt abhängig ist, bestehen ebenfalls positive Zusammenhänge. Die Benetzungseigenschaften stehen hingegen in negativer Abhängigkeit zur relativen Luftfeuchte: Mit steigender relativer Luftfeuchte nimmt die aktuelle Benetzungshemmung tendenziell ab (Abbildung 36). Windrichtung und -geschwindigkeit zeigen tendenziell für das untersuchte Substrat weder positiven noch negativen Einfluss auf die Ausbildung von Benetzungshemmung. Somit sind meteorologische Einflussgrößen von Bedeutung, die vorrangig die Austrocknung des Solums positiv über die Temperatur (Globalstrahlung, Boden-, Lufttemperatur) beeinflussen. Da aktuelle Klimaprojektionen und Datenauswertungen für die Region Brandenburg neben der Abnahme an verfügbarem Bodenwasser (Holsten et al., 2009) eine abnehmende Anzahl an Frosttagen sowie eine sinkende Tendenz der relativen Luftfeuchte indizieren (Holsten et al., 2013; Cubasch et al., 2011) werden folglich Faktoren positiv beeinflusst, die nach der vorliegenden Arbeit tendenziell zur Intensivierung von Benetzungshemmung führen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Benetzungseigenschaften des tertiären Substrats direkt abhängig von den meteorologischen Größen Globalstrahlung, Luft- und Bodentemperatur sowie Niederschlag sind. Entgegen bestehenden Auffassungen wurden zwei kritische Bodenwassergehalte identifiziert. Für schwach bis stark benetzungsgehemmte Proben wurde vor allem für die Sommermonate eine Abhängigkeit der Benetzungseigenschaften von vorausgegangenen Niederschlägen nachgewiesen. Für sehr stark oder extrem benetzungsgehemmte Proben ist entsprechend ihrer Benetzungskinetik der Einfluss von Niederschlägen nur begrenzt nachweisbar.

Liegt im Sommer (objektiv) Trockenheit vor, so ist dies immer mit Benetzungshemmung im tertiären Substrat verbunden. Entsprechend wurden mit steigenden Bodentemperaturen eine steigende Tendenz der Benetzungshemmung nachgewiesen, dabei beeinflussen minimale Bodentemperaturen die Benetzungseigenschaften stärker als maximale. Als weitere Einflussgröße für die Benetzbarkeit des tertiären Substrats konnte Bodenfrost identifiziert werden. Es liegen jedoch keine hinreichenden Daten vor, die erklären, ob bereits leichter Bodenfrost oder erst Dauerfrost zum Zusammenbruch der Benetzungshemmung führen.

Zukünftige Studien sollten sich den Prozessen und Rückkopplungsmechanismen zwischen Bodenwassergehalt und Benetzungshemmung sowie den verschiedenen Graden der Benetzbarkeit im Zusammenhang mit zeitlich veränderlichen Einflussgrößen wie meteorologischen Parametern und bodenmikrobiologischer Aktivität widmen. Diese Zusammenhänge haben sich auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse als relevant herausgestellt, konnten aber im Rahmen der vorliegenden Studie nicht erschöpfend geklärt werden.

4.6 Einfluss organischer Substanz auf das Benetzungsverhalten

Der Einfluss organischer Substanz auf die Benetzungshemmung ist Gegenstand zahlreicher Studien. Obwohl bereits kleinste Mengen organischer Substanz zur Induzierung von Benetzungshemmung im Boden führen können (Doerr et al., 2003) und schon sehr geringe Mengen Kohlenstoff in Kontaktwinkeln $> 90^\circ$ resultieren können (Emerson, 1995; McGhie und Posner, 1981; Bond und Harris, 1964), kann keine allgemein gültige statistische Beziehung zwischen der Menge an organischer Bodensubstanz und dem Grad der Benetzungshemmung hergeleitet werden (Doerr et al., 2000b). Während beispielsweise Kidron et al (2010); Moral Garcia et

al. (2005), Täumer et al. (2005), Mataix-Solera und Doerr (2004), Harper et al. (2000) sowie Berglund und Persson (1996) positive Korrelationen zwischen dem Gehalt organischer Substanz und der potenziellen Benetzungshemmung nachwiesen, wurden von de Jonge et al. (1999) keine und von Teramura (1980) negative Korrelationen berechnet. Eine mögliche Ursache für die widersprüchlichen Resultate ist die Tatsache, dass der Parameter Kohlenstoffgehalt oder der Gehalt organischer Substanz selten systematisch und isoliert untersucht wurde.

Beim Vergleich sowohl des aktuellen als auch des potenziellen Benetzungsverhaltens wurden zwischen der Nullfläche mit einem durchschnittlichen Kohlenstoffgehalt von 0,13 % signifikante Unterschiede zu allen mit organischer Substanz angereicherten Plots festgestellt (Tabellen 28, 29). Somit hat die Applikation und die Einarbeitung von organischer Substanz zum untersuchten Substrat nachweislich einen Einfluss auf dessen Benetzungsverhalten und führt zur Induzierung oder Verstärkung von Benetzungshemmung.

In der vorliegenden Untersuchung ist die Art der applizierten organischen Substanz (rezent, fossil) bei niedrigem Kohlenstoffgehalt (1 %, 3 %) für die Ausbildung aktueller Benetzungshemmung vernachlässigbar. Zwischen den Varianten mit rezentem und fossilem Kohlenstoff, aber auch zwischen den beiden Varianten mit unterschiedlich stark verwittertem organischem Material fossilen Ursprungs (W0, W3) wurden nur bedingt statistisch signifikante Unterschiede festgestellt (Abbildung 39). Im Unterschied dazu ist für das potenzielle Benetzungsverhalten auch die Art des Kohlenstoffs schon bei geringen Mengen (1 %) entscheidend. Die Varianten mit rezentem Kohlenstoff unterscheiden sich vor allem in deutlich niedrigeren WDPT-Zeiten von den Varianten mit fossilem Kohlenstoff.

Da sich die Varianten mit unterschiedlich stark verwittertem organischem Material fossilen Ursprungs (W0, W3) sowohl hinsichtlich des aktuellen als auch des potenziellen Benetzungsverhaltens in dieser Versuchsanordnung nur bedingt unterscheiden, konnten die Ergebnisse von Richardson und Wollenhaupt (1983) und Miyamoto et al. (1977) nicht verifiziert werden. Die Resultate zeigen, dass der relativ kurze Zeitraum von drei Jahren zu gering ist, um ein differenziertes aktuelles und potenzielles Benetzungsverhalten infolge von Oxidations- und Abbauprozessen an der Oberfläche der Kohlepartikel zu induzieren (Sharma et al., 1993; Richardson und Wollenhaupt, 1983). Um den Einfluss des Verwitterungsgrades auf das Benetzungsverhal-

ten präzise bewerten zu können, sollten vergleichend weitere, der Witterung länger als drei Jahre ausgesetzte kohlige Substrate untersucht werden.

Sowohl in den Freiland- als auch in den Laborversuchen wurde, unabhängig von der Art des Kohlenstoffs, mit steigendem Gehalt an organischem Kohlenstoff eine signifikant stärker ausgeprägte aktuelle und potenzielle Benetzungshemmung nachgewiesen (Abbildungen 40, 41). Die Varianten mit rezemem und fossilem Kohlenstoff unterscheiden sich dabei voneinander: Während für die Varianten mit fossilem Kohlenstoff mit steigendem Kohlenstoffgehalt stetig steigende Kontaktwinkel und WDPT-Zeiten verbunden sind, ähnelt die Kurve der Variante mit rezemem Kohlenstoff einer Sättigungskurve (Abbildung 41). Mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt ändert sich das Benetzungsverhalten nur geringfügig. Im Rahmen weiterführender Studien ist daher zu prüfen, bis zu welchem Gehalt an organischem Kohlenstoff die Benetzungshemmung ansteigt oder ab welchem Gehalt weitere Zunahmen des Kohlenstoffgehalts keine weiteren Änderungen im Benetzungsverhalten hervorrufen. Obwohl Doerr et al. (2006, 2000b) ausführen, dass weder die Menge organischer Substanz, die Menge organischen Kohlenstoffs noch der Anteil einzelner Fraktionen organischer Substanz für den Grad der Ausprägung von Benetzungshemmung in Böden entscheidend ist, wurde im Rahmen dieser Studie sowohl im Freiland als auch separat in Laborversuchen unter kontrollierten Bedingungen verstärkte Benetzungshemmung mit steigendem Kohlenstoffgehalt des Substrats nachgewiesen (Kapitel 3.6). Als Ursache von Benetzungshemmung werden organische Überzüge auf Mineralpartikeln, amphiphile Moleküle und aliphatische Verbindungen aus geogener organischer Substanz beschrieben (Hurraß und Schaumann, 2007; Hangen et al., 2005; Buczko et al., 2002). Auch Miyamoto et al. (1977) beschreiben eine Abhängigkeit vom Anteil an Kohlefragmenten und der Benetzbarkeit des Solums. Hieraus geht hervor, dass die Benetzungshemmung positiv mit dem Kohleanteil korreliert.

Die Korrelation der Benetzungshemmung mit dem Gehalt an organischem Kohlenstoff ist für die untersuchten Substrate und Substratmischungen vorwiegend geringfügig ausgeprägt. In Übereinstimmung mit den unter 3.1 und 3.6 dargestellten Ergebnissen kann jedoch ein kritischer Wert des Gehalts an organischem Kohlenstoff von 0,25 % als Grenzwert für die Ausbildung von Benetzungshemmung festgestellt werden: Die quartären Substrate verfügen über Gehalte von unter 0,25 % an organischem Kohlenstoff und reagieren benetzbar, die als benetzungsgehemmt charak-

terisierten tertiären Substrate hingegen besitzen Kohlenstoffanteile von 0,3 % oder darüber (Abbildungen 17, 38). Der Rinnenpunkt 1b im Detailszugsgebiet, als einziger im Untersuchungszeitraum als gut benetzbar charakterisierter Punkt tertiären Substrats, besitzt unter 0,25 % organischen Kohlenstoff. Auch Moral Garcia et al. (2005) beschreiben in ihrer Studie einen kritischen Gehalt von 6 Volumen-% an organischer Substanz, unterhalb dessen der untersuchte Boden leichte Benetzungshemmung aufweist, darüber aber starke bis extreme Benetzungshemmung vorliegt. Bei diesen Ergebnissen handelt es sich um standortspezifische, isoliert betrachtete Zusammenhänge, deren Ausprägung gegebenenfalls sonst durch die komplexen Vorgänge an der Kontaktzone von Pedosphäre, Biosphäre und Atmosphäre überlagert wird. Weitere Studien sollten sich daher mit dem Einfluss insbesondere von geringen Mengen organischen Kohlenstoffs kleiner 1 % auf die Benetzungseigenschaften befassen und prüfen, ob die hier diskutierten Grenzwerte Sonderfälle darstellen, oder ob auch für die Gehalte an Kohlenstoff ein kritischer Wert analog zum Wassergehalt definiert werden kann.

Gestützt wird die These eines Grenzwerts für den Gehalt an organischem Kohlenstoff auch dadurch, dass Benetzungseigenschaften sowohl durch die Menge der organischen Substanz als auch deren räumliche Anordnung einzelner Moleküle im Boden bestimmt wird (Ellerbrock et al., 2005; Capriel et al., 1995). Entsprechende Erkenntnisse belegen, dass diese räumliche Struktur maßgeblich durch den Wassergehalt und infolgedessen durch Aggregation und eine verstärkte Quervernetzung der molekularen Strukturen der organischen Bodensubstanz beeinflusst wird (Hurraß und Schaumann, 2007). Kommt es zum Entzug von Wasser aus dem Boden, führt dies zu einer langsamen Reorientierung der polaren und apolaren Gruppen organischer Bodensubstanz und resultiert in außenständigen hydrophoben Gruppen der Moleküle. Infolge von Wasserstoffbrückenbindungen untereinander orientieren sich polare Gruppen vorrangig nach innen (Ma'shum und Farmer, 1985; Valat et al., 1991; Roy et al., 2003). Somit reagieren die Oberflächen benetzungsgehemmt (Bayer und Schaumann, 2007). Bei der Befeuchtung wiederum orientieren sich hydrophile Gruppen der Moleküle nach außen, zum Schutz der hydrophoben Gruppen vor der wässrigen Phase. Diese Strukturänderungen an den Oberflächen organischer Bodensubstanz verlaufen teilweise sehr langsam und sind eine mögliche Ursache für den verlangsamten Benetzungsprozess benetzungsgehemmter Böden (Hurraß und Schaumann, 2007; Schaumann et al., 2005; Valat, 1991). Der direkte Ausdruck

dieser zeitlichen Variabilität des Benetzungsvorgangs auf molekularer Ebene spiegelt sich in den Resultaten des WDPT-Tests wider. Die Erforschung und Beschreibung der Wasserbindung an die organische Bodensubstanz im Detail ist Gegenstand andauernder Forschungsvorhaben (Schaumann and Mouvenchery, 2012; Schneckenburger et al., 2012; Jaeger et al., 2011).

Die Ergebnisse der Freiland- und Laborversuche zeigen übereinstimmend den Einfluss organischer Substanz auf das Benetzungsverhalten der untersuchten Substrate. Während die Art der organischen Substanz nur auf das potenzielle Benetzungsverhalten differenziert wirkte, führte ein höherer Gehalt an organischem Kohlenstoff immer zu stärkerer Benetzungshemmung. In weiterführenden Arbeiten sollte untersucht werden, ob auch für den Gehalt an organischem Kohlenstoff ein spezifischer kritischer Wert für das Benetzungsverhalten von Böden analog zum Wassergehalt existiert.

4.7 Einfluss von Anfangsfeuchte und Trocknungstemperatur auf die Ausbildung von Benetzungshemmung

Im Laborversuch wurden die Benetzungseigenschaften verschiedener Sande und Substratmischungen in Abhängigkeit von Gehalt und Typ organischer Substanz, von Trocknungstemperatur und vom Wassergehalt bestimmt (Kapitel 2.3).

Während zu Beginn der Experimente alle Substrate und Substratmischungen vor der Trocknung eine sehr gute Benetzbarkeit aufwiesen, trat nach der Trocknung bei allen im Laborversuch untersuchten Substratmischungen Benetzungshemmung in unterschiedlicher Stärke auf. Die aufgetretenen Veränderungen in den Benetzungseigenschaften sind direkt auf Effekte zurückzuführen, die im Zusammenhang mit dem Trocknungsprozess stehen, da die Experimente weitgehend unabhängig von äußeren Einflüssen unter definierten Bedingungen im Labor durchgeführt wurden. Ursächlich dafür ist der Entzug von Wasser, der, wie in Kapitel 4.6 erörtert, zu einer langsamen Reorientierung der polaren und apolaren Gruppen der organischen Substanz führt, so dass die Oberfläche benetzungsgehemmt reagiert (Bayer und Schaumann, 2007).

In Versuchsansätzen wurden Substratmischungen mit 8 % und 15 % Anfangswassergehalt parallel getrocknet. Aus den vorliegenden Ergebnissen lässt sich keine eindeutige Abhängigkeit der Benetzungseigenschaften vom Anfangswassergehalt

des Substrats ableiten. Varianten mit 15 % Anfangswassergehalt resultieren nach der Trocknung teilweise in größeren Kontaktwinkeln oder höheren WDPT-Zeiten, teils in kleineren Kontaktwinkeln oder kleineren WDPT-Zeiten als Varianten mit 8 % Anfangswassergehalt. Es bestehen dabei keine Unterschiede zwischen den untersuchten Substratmischungen mit rezentem oder geogenem Kohlenstoff. Aus diesen Ergebnissen wird gefolgert, dass auf molekularer Ebene keine langsamere und damit vollständigere Reorientierung der endständigen hydrophilen oder hydrophoben Gruppen erfolgt, je länger der Trocknungsprozess infolge eines höheren Anfangswassergehalts dauert.

Zusätzlich zum Bodenwassergehalt ist die Trocknungstemperatur für die Ausbildung von Benetzungshemmung ein entscheidender Faktor. In der Literatur ist unstrittig, dass ansteigende Temperaturen eine Verstärkung der Benetzungshemmung hervorrufen. Moral Garcia et al. (2005) weisen bei 60 °C, Ritsema und Dekker (1998) bei 70 °C induzierte Benetzungshemmung in Böden nach. Es ist bisher ungeklärt, welchen Einfluss bereits geringe Temperaturerhöhungen im Bereich natürlich auftretender Bodentemperaturen auf die Ausbildung von Benetzungshemmung im Zusammenhang mit Trocknungsvorgängen besitzen.

Entgegen der Eingangsthese, dass mit der Zunahme der Trocknungstemperatur auch eine Zunahme der Benetzungshemmung einhergeht, konnte keine eindeutige Abhängigkeit der Benetzungseigenschaften von der Trocknungstemperatur nachgewiesen werden (Abbildung 42). Die Mechanismen der Reorientierung polarer und apolarer Gruppen organischer Bodensubstanz, die beim Entzug von Feuchtigkeit aus dem Boden erfolgen (Bayer und Schaumann, 2007; Roy et al., 2003; Valat et al., 1991; Ma'shum und Farmer, 1985), müssten bei höheren Temperaturen infolge des Energieeintrags tendenziell schneller erfolgen als bei niedrigeren Temperaturen. Andererseits dauert der Trocknungsprozess bei niedrigeren Temperaturen im Vergleich zu höheren Temperaturen länger, damit könnte eine Reorientierung der polaren und apolaren Gruppen organischer Bodensubstanz aufgrund der längeren Prozessdauer des Trocknungsvorgangs vollständiger ablaufen und in einer höheren Benetzungshemmung resultieren.

Für das tertiäre Substrat wurde mit steigenden Boden- und Lufttemperaturen zunehmende aktuelle Benetzungshemmung beobachtet. Die Tendenz positiver Abhängigkeit der potenziellen Benetzungshemmung von der Temperatur aus den

Freilanduntersuchungen für die mit organischer Substanz angereicherten Plots konnte im Labor nicht verifiziert werden.

Eine weitere Möglichkeit des Wasserentzugs aus Bodenproben ist die Gefrier-trocknung. Ma'shum und Farmer (1985) konnten benetzungsgehemmte Substrate nach Aufsättigung mit Wasser und anschließender Gefriertrocknung wieder be-netzen. Als Ursache für die verbesserte Benetzbarkeit wird die Konservierung der polaren funktionellen Gruppen an der Oberfläche angenommen. Die Wieder-benetzung des zuvor gefriergetrockneten Bodens ist somit unverzüglich möglich (Roy und McGill, 2000). Entgegen den Befunden von Ma'shum und Farmer (1985) konnte an den in dieser Studie verwendeten Substraten und Substratmischungen kein Zu-sammenbruch der Benetzungshemmung nach Gefriertrocknung festgestellt werden.

Der Parameter der relativen Luftfeuchte ist in der vorliegenden Untersuchung von untergeordneter Bedeutung für die Ausbildung von potenzieller Benetzungshem-mung (siehe Kapitel 3.4). In anderen Studien, die den Einfluss der relativen Luft-feuchte auf die Benetzungseigenschaften untersuchten, wurde ein Toleranzbereich zwischen 10 und 80 % relativer Luftfeuchte angegeben, innerhalb dessen kaum Änderungen der Benetzungseigenschaften festzustellen waren (Wallach und Graber, 2007). Auch Jex et al. (1985) beobachteten erst oberhalb 90 % relativer Luftfeuchte signifikante Änderungen der Benetzungseigenschaften in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte (Wallach und Graber, 2007; Jex et al., 1985). Die während der Trocknungsvorgänge bei dieser Studie gemessene relative Luftfeuchte lag stets innerhalb der von Wallach und Graber (2007) angegebenen Spanne. Somit ist die relative Luftfeuchte als Einflussfaktor für die Ausbildung von potenzieller Benetzungs-hemmung unter den gegebenen Bedingungen für den gewählten Versuchsansatz zu vernachlässigen. Auch die Induzierung von Benetzungshemmung infolge mikrobieller Aktivität, beispielsweise durch Bakterien der Gattung *Variovorax paradoxus*, α -*Proteobacterium* (Kirchner et al., 2005), *Actinomyces* (Jex et al., 1985) oder Basidiomyceten (Bond und Harris, 1964) kann ausgeschlossen werden, da die Parallelansätze mit sterilisiertem Substrat im Benetzungsverhalten keine signifi-kanten Unterschiede im Vergleich zu den nicht sterilisierten Substraten aufwiesen. Entweder ist die Menge oder Aktivität enthaltener Mikroorganismen zu gering, um die Benetzungseigenschaften nachhaltig zu beeinflussen oder die im Substrat vorhan-denen Mikroorganismen beeinträchtigen das Benetzungsverhalten generell nicht.

Durch Hallet und Young (1999) wurde im Zusammenhang mit gesteigerter mikrobieller Aktivität eine signifikant erhöhte Benetzungshemmung nachgewiesen.

Im Laborversuch wurde gezeigt, dass die Trocknung von Substratmischungen mit organischer Substanz zur Induzierung von Benetzungshemmung führt. Eine Abhängigkeit der resultierenden Benetzungseigenschaften von der Trocknungstemperatur und dem Anfangswassergehalt der untersuchten Proben konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden. Inwiefern mögliche Wechselwirkungen, Aggregationen und verstärkte Quervernetzungen der molekularen Strukturen der organischen Substanz beim Trocknungsprozess die Benetzungseigenschaften der untersuchten Substrate beeinflussen und somit zu inkonsistenten Ergebnissen führen, könnte in weiteren Untersuchungen mit strukturaufklärenden Methoden (beispielsweise IR-Spektroskopie, NMR) analysiert werden.

4.8 Benetzungseigenschaften als Parameter hydrologischer Modellierung

Zur Implementierung des Parameters Benetzungshemmung in bestehende hydrologische Modelle bedarf es der Einbindung diagnostischer Bodenparameter, die die Ausbildung und Schwankungen von Benetzungseigenschaften beeinflussen und anhand derer indirekt Vorhersagen zum Benetzungsverhalten eines Bodens oder Substrats getroffen werden können. Die Gesamtheit dieser in der vorliegenden Untersuchung gewonnenen Daten (Kapitel 3.1 bis 3.7) wurde statistischen Verfahren der multivariaten Datenanalyse unterzogen, um die Benetzung beeinflussende Parameter objektiv zu identifizieren. Die im Kapitel 3.8 dargestellten Funktionen sind als konzeptioneller Ansatz zu bewerten, je nach vorherrschenden Standortbedingungen müssen weitere Variablen Eingang in die Diskriminanzfunktionen und Faktorenanalyse finden.

Obwohl die beiden angewendeten Methoden Faktorenanalyse und Diskriminanzanalyse zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen, überwiegt der Einfluss der der Probenahme vorausgehenden meteorologischen Bedingungen den der bodenchemischen und bodenphysikalischen Parameter auf die Benetzungseigenschaften. Mit den Parametern Globalstrahlung, Luft- und Bodentemperatur werden voneinander stark abhängige Einflussgrößen als bedeutendste Faktoren extrahiert. Während bei isolierter Betrachtung der Abhängigkeit zwischen den Benetzungseigenschaften und der relativen Luftfeuchte kein Zusammenhang abgeleitet wurde (Kapitel 3.5),

liefert die relative Luftfeuchte in der Faktorenanalyse gemeinsam mit der Bodentemperatur im gesamten Zeitraum von 14 Tagen vor der Probenahme dennoch den größten Betrag zur erklärten Gesamtvarianz (Tabelle 33). In die Diskriminanzanalyse der mit organischer Substanz angereicherten Plots hingegen geht nur die relative Luftfeuchte am Probenahmetag in die Berechnung der Koeffizienten ein (Tabelle 35). Bei der Diskriminanzanalyse für das tertiäre Substrat findet die relative Luftfeuchte aber keine Berücksichtigung (Tabelle 34). Im Unterschied zur Faktorenanalyse sind die Luft- und Bodentemperaturen sowie die Globalstrahlung für die Diskriminanzanalyse der mit organischer Substanz angereicherten Plots von untergeordneter Bedeutung.

Die Gewichtung der Niederschlagsparameter zeigt einen Unterschied hinsichtlich aktueller und zeitlich zurückliegender Niederschlagsereignisse. Die Niederschlagsmengen, die in den letzten drei Tagen vor der Probenahme fallen, beeinflussen die Ausbildung der Benetzungseigenschaften stärker als die der insgesamt letzten 14 Tage. Auch in der Diskriminanzanalyse der mit organischer Substanz angereicherten Plots finden die Niederschlagsmengen im gesamten Zeitraum von 14 Tagen vor der Probenahme Berücksichtigung. In die Diskriminanzanalyse für das tertiäre Substrat findet hingegen nur die Niederschlagsmenge am Probenahmetag Eingang (Tabellen 34, 35).

Als strukturprüfendes Verfahren liefert die Diskriminanzanalyse gute bis sehr gute Ergebnisse. Um die Diskriminanzanalyse hinreichend sicher als Prognosewerkzeug für die Gruppenzugehörigkeiten (hydrophil, mäßig benetzungsgehemmt und sehr stark benetzungsgehemmt) von Proben zu nutzen, bedarf es jedoch eines bedeutend größeren Probenvolumens (Kapitel 3.8).

Von den bodenphysikalischen und -chemischen Einflussgrößen (Wassergehalt, pH- und EC-Wert, Gehalt an organischem Kohlenstoff, Lagerungsdichte) wird alleine der Bodenwassergehalt in allen Analysen als relevanter, die Benetzungseigenschaften beeinflussender Parameter identifiziert. Daraus folgt, dass die Bodenfeuchte als eine essentielle Steuergröße der Benetzungseigenschaften einzustufen ist. Die Erkenntnisse dieser Studie belegen jedoch, dass der Bodenwassergehalt nicht isoliert als einzelner Faktor, sondern vor allem im Zusammenspiel mit den meteorologischen Parametern zu betrachten ist. Der häufig diskutierte „kritische Bodenwassergehalt“ oder ein „Bereich kritischer Bodenwassergehalte“ scheint somit als einzelne Steuergröße in die hydrologische Modellierung benetzungsgehemmter Böden ein-

gehender Parameter nicht geeignet. Ferner sind besonders benetzungsgehemmte Proben durch einen zweiten Bodenwassergehalt charakterisiert, der deutlich unterhalb des kritischen Bodenwassergehalts liegt (Kapitel 3.5). Folglich sollten für die Abhängigkeit der Benetzungshemmung vom Bodenwassergehalt mehrere Schwellenwerte oder kritische Bereiche anstelle nur eines kritischen Bodenwassergehalts Eingang in die Modellierung finden. Da die wenigsten Studien, wie in dieser Untersuchung, nochmalige Unterteilungen der WDPT-Zeiten oberhalb 600 s vornahmen (Tabelle 1), wurde bisher von einer inversen Abhängigkeit stetig abnehmender Wassergehalte mit zunehmenden WDPT-Zeiten ausgegangen.

Auch Täumer et al. (2005) weichen vom Ansatz kritischer Bodenwassergehalte als einzige Steuergröße der Benetzungshemmung ab. In ihren Berechnungen für den spezifischen untersuchten Boden bilden die WDPT-Zeiten unter Berücksichtigung kritischer Bodenwassergehalte und in Abhängigkeit des Gehalts an organischer Substanz die Benetzungshemmung gut ab. Bei der Implementierung der Benetzungseigenschaften in die hydrologische Modellierung sollte berücksichtigt werden, dass stark bis extrem benetzungsgehemmte Substrate besonders resistent gegenüber Durchfeuchtung reagieren. Doerr et al. (2003) stellen in Übereinstimmung mit den Ergebnissen dieser Untersuchung fest, dass besonders hohe Benetzungshemmung von Böden dem Befeuchtungsvorgang bei Niederschlagsereignissen besonders lange, teilweise über die Dauer des Ereignisses hinaus widersteht. So können benetzungsgehemmte Böden oder selektive Bereiche zu erheblichen Oberflächenabflüssen und Sedimentausträgen beitragen, da sie unter Umständen gar nicht an Infiltrations- und Speichervorgängen teilnehmen. Eine solche Implementierung könnte beispielsweise über die Einbeziehung von Trockenheitsindizes in hydrologische Modellvorstellungen erfolgen (Kapitel 3.4). Dabei muss jeweils die Übertragbarkeit der Ergebnisse einzelner Studien geprüft und verifiziert werden.

Wenige Studien betrachten den Parameter Benetzungshemmung und seine Auswirkungen auf bodenhydrologische Prozesse isoliert und prozessorientiert unter natürlichen Bedingungen (Freilandbedingungen). Häufig wird Benetzungshemmung nur in Kombination weiterer, die Benetzungshemmung verstärkender Parameter wie Feuer (Doerr et al., 2006; Coelho et al., 2004), spezieller Vegetation, Landnutzung oder vergleichend in ähnlichen Gebieten betrachtet (Spröte et al., 2011; Ferreira et al., 2000; Burch et al., 1989).

Im Gegensatz dazu wurde in ergänzenden Studien durch das Deutsche GeoForschungsZentrum die Auswirkung von Benetzungshemmung auf Oberflächenabfluss und Sedimentaustrag auf Plotebene (1 m²), im Detailszugsgebiet (300 m²) und im gesamten Untersuchungsgebiet (0,04 km²) weitgehend isoliert vom Einfluss durch Vegetation untersucht. Dabei lagen die Plots und das Detailszugsgebiet ausschließlich im tertiären Substrat. Das Untersuchungsgebiet umfasst jedoch neben tertiären auch quartäre Substrate. Messungen belegen auf benetzungsgehemmtem tertiären Substrat eine verringerte hydraulische Leitfähigkeit, die schon bei geringen Niederschlagsmengen und -intensitäten einen verstärkten Oberflächenabfluss zur Folge hat. Die Abflussbeiwerte nehmen mit zunehmender Skala ab: Auf der kleinsten Skala (Plotskala) wurde der höchste Abflussbeiwert, für das gesamte Untersuchungsgebiet erwartungsgemäß der niedrigste Abflussbeiwert ermittelt. Auf der Plotskala ist aufgrund der zum Teil sehr stark ausgeprägten Benetzungshemmung die Infiltration nur bedingt möglich. Im Detailszugsgebiet hingegen kann Oberflächenabfluss in hydrophilen Rinnenbereichen reinfiltrieren, auf Untersuchungsgebietsskala infiltriert Oberflächenabfluss zusätzlich auch im hydrophilen quartären Substrat. Der Zusammenhang von Niederschlag und Abfluss lässt sich im Untersuchungsgebiet auf allen Skalen durch einen linearen Zusammenhang beschreiben. Saisonale Änderungen im Benetzungsverhalten des tertiären Substrats resultieren in Unterschieden im Abflussbeiwert: Fast alle Werte liegen während der Sommersaison deutlich über denen der Wintersaison mit hydrophilen Bedingungen. Die Untersuchungen belegen die deutlichen Auswirkungen von Benetzungshemmung auf die Hydrologie durch verringerte hydraulische Leitfähigkeiten und damit einhergehend verringerten Infiltrationskapazitäten, die in erhöhtem Oberflächenabfluss resultieren und somit auch Auswirkungen auf Erosion und Grundwasserneubildung ausüben (Kuhnert, 2009).

Trotz einer Vielzahl an Studien zu Benetzungseigenschaften von Böden sind die Prozesse, die zur Ausbildung von Benetzungshemmung führen noch nicht gänzlich verstanden. Somit kann die Entwicklung von physikalisch basierten Modellen oder physikalisch basierten Ansätzen in bestehenden Modellen nicht umgesetzt werden und es besteht gegenwärtig nur die Möglichkeit, empirische Modelle für standortspezifische Aussagen anzuwenden. Die Kenntnis kritischer Werte von Bodenwassergehalt und organischer Substanz sowie meteorologischer Parameter ermöglicht unter

Berücksichtigung eines Trockenindex zunächst eine qualitative Prognose der Benetzungseigenschaften. Künftige Studien und somit ein umfassenderer Datenbestand bilden im weiteren die Grundlage für quantitative Prognosen.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte die Untersuchung quartärer und tertiärer sandiger Substrate im Untersuchungsgebiet „Neuer Lugteich“ im rekultivierten Bereich des Tagebaus Welzow-Süd im Lausitzer Braunkohlerevier über einen Zeitraum von 28 Monaten. Die Substrate und Substratmischungen wurden auf ihre Benetzungseigenschaften sowohl im Hinblick auf die räumliche Heterogenität und zeitliche Variabilität als auch in Abhängigkeit von Art und Gehalt an organischer Substanz untersucht. Die Bewertung der Benetzungseigenschaften erfolgte mittels Kontaktwinkelmessungen und WDPT-Test im Freiland und zusätzlich in Laborstudien.

Während die quartären Substrate im gesamten Untersuchungszeitraum durchgehend gut benetzbar waren und als hydrophil eingestuft wurden, wiesen die untersuchten tertiären Sande im feldfeuchten Zustand zum Teil extreme Benetzungshemmung auf. Wie die vorliegende Untersuchung bestätigt, wurde mit den eingesetzten Methoden WDPT-Test und Kontaktwinkelmessung nachgewiesen, dass trotz kleiner gemessener Kontaktwinkel eine ausgeprägte Benetzungshemmung vorliegen kann. Für eine gesicherte Bewertung der Benetzungshemmung wird empfohlen, mehrere Methoden zur Erfassung der Benetzungseigenschaften parallel heranzuziehen.

Die untersuchten tertiären Substrate sind durch eine hohe horizontale und vertikale räumliche Heterogenität der Benetzungseigenschaften gekennzeichnet. Am oberen Hangbereich und auf den Kuppenbereichen lag überwiegend starke Benetzungshemmung vor. Durch den daraus resultierenden Oberflächenabfluss verbunden mit Substratverlagerung wurden zum Teil erhebliche Reliefänderungen, resultierend in einer ausgeprägten Kuppen- und Rinnenstruktur, beobachtet.

Zudem wiesen die tertiären Substrate ein zeitlich stark differenziertes Benetzungsverhalten auf. Während im Winter und im Frühjahr überwiegend eine gute Benetzbarkeit des Substrats bestand, lag im Sommer und im Herbst zum Teil erheblich ausgeprägte Benetzungshemmung vor. Die zeitliche Variabilität der Benetzungseigenschaften des tertiären Substrats wird maßgeblich durch die Luft- und Bodentemperaturen sowie einen kritischen Bodenwassergehalt von 2 Masse-% beeinflusst. Des Weiteren konnten Abhängigkeiten zwischen schwach oder mäßig ausgeprägter Benetzungshemmung und der Niederschlagsmenge nachgewiesen werden. Je höher die Niederschlagsmenge, desto schwächer war die Benetzungshemmung ausgeprägt. Bei vorliegender starker Benetzungshemmung des tertiären Substrats erfolg-

ten Änderungen im Benetzungsverhalten hingegen vor allem durch langanhaltende Niederschlagsereignisse oder Niederschlagsereignisse hoher Intensität.

Zwischen den Benetzungseigenschaften der tertiären und quartären Substrate und dem Gehalt an organischem Kohlenstoff bestehen keine oder nur sehr schwache Korrelationen. Die Zugabe organischer Substanz verschiedener Art und Herkunft führte bei den vorliegenden Untersuchungen in allen Fällen zur Induzierung von Benetzungshemmung. Sowohl in den Freiland- als auch in den Laborversuchen wurde mit steigendem Gehalt an organischem Kohlenstoff eine stärker ausgeprägte Benetzungshemmung nachgewiesen. Für die untersuchten Substrate konnte ein kritischer Wert von 0,25 % organischen Kohlenstoffs ermittelt werden, unterhalb dessen vorwiegend Benetzbarkeit der Substrate vorlag.

Als Haupteinflussparameter für die Ausbildung der Benetzungseigenschaften des tertiären Substrats wurden die Parameter Globalstrahlung und Lufttemperatur sowie der Bodenwassergehalt mittels multivariater statistischer Methoden identifiziert. Ein konzeptioneller Ansatz zur Implementierung des Parameters Benetzungshemmung in die hydrologische Modellierung ermöglicht mittels meteorologischer und bodenphysikalischer Parameter die exemplarische Zuordnung von tertiären Substratproben in Gruppen mit hydrophilen, mäßig benetzungsgehemmten und sehr stark benetzungsgehemmten Eigenschaften ohne direkte Messung der Benetzungshemmung.

Der integrierte Versuchsansatz zur in situ Charakterisierung der Benetzungseigenschaften verschiedener Substrate und Substratmischungen im Freiland und ergänzender Laborstudien ermöglicht eine verbesserte Analyse der pedologischen und hydrologischen Prozesse der „critical zone“. Erstmals wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation anhand meteorologischer Parameter und dem Bodenwassergehalt eine Zuordnung von Benetzungseigenschaften durchgeführt.

Die im Rahmen der vorliegenden Datenanalyse gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der die Benetzungshemmung beeinflussenden Parameter bieten einen konzeptionellen Ansatz zur qualitativen Weiterentwicklung mathematischer Prozessmodelle der Abflussbildung. Die vorliegende Studie ermöglicht eine Abschätzung der vorliegenden Benetzungseigenschaften anhand meteorologischer Parameter sowie kritischer Werte für den Bodenwassergehalt und den Gehalt an organischem Kohlenstoff. Durch die Einbindung in hydrologische und Erosionsmodelle wird damit im

weiteren die Möglichkeit gegeben, Oberflächenabflüsse und Bodenabträge von benetzungsgehemmten Flächen zu prognostizieren.

Vor dem Hintergrund veränderter Niederschlagsmuster mit einer Häufung meteorologischer Extremereignisse ist eine Einstufung der Bodensubstrate in Gefährdungsklassen zweckmäßig, da die Ausbildung von Benetzungshemmung vor allem unter trockenen und warmen Bedingungen begünstigt wird. Somit kann ein Instrument geschaffen werden, um Bodendegradierung als Folge von Benetzungshemmung wirksam vorzubeugen. Folglich ist es möglich, bei prognostizierten steigenden Bevölkerungszahlen und steigendem Anteil an degradierten Böden der Verknappung von fruchtbarem Land entgegenzuwirken.

Summary

Water repellency of quaternary and tertiary sandy substrates was investigated in the present study over a period of 28 months. Spatial heterogeneity and seasonal variability of the soil water repellency as well as their dependence on their content and kind of soil organic matter were investigated at the study area “Neuer Lugteich” situated in the recultivation area of the open pit lignite mine Welzow-Süd.

Quaternary substrates remained wettable during the whole study period while extreme water repellency was partially shown by the tertiary substrates in field moist state. As presented here extreme water repellency can be found in soils in spite of small contact angles measured. The WDPT tests showed a differing result but were strongly correlated to the contact angle measurements. Thus, in order to prevent underestimation failures in assessing soil water repellency it is recommended to apply several methods for the assessment of soil water repellency.

The tertiary substrate exhibited a differing soil water repellency depending on the season. Wettable conditions were predominating during winter and spring season, whereas prevailing repellency was present during summer and autumn, distinctly controlled by soil and air temperatures as well as a critical soil water content. Temporal changes in soil water repellency are ascribed to antecedent rainfall.

Furthermore, the tertiary substrate was characterized by high horizontal and vertical spatial variability of soil water repellency. At the top areas and top of the hillslope strong soil water repellency was prevailing. In addition, the resulting increased surface runoff generation and related soil erosion led to the formation of a complex drainage network by erosion rills.

No or weak correlation was detected between soil water repellency and soil organic carbon content. The application of organic matter of different origin induced soil water repellency in all cases. Increasing soil water repellency was connected with increasing organic carbon content in the field as well as in the laboratory studies. A critical content of 0.25 % organic carbon was determined for the studied substrates, corresponding with the critical soil water content.

Global radiation, air temperature and soil water content were identified as main contributing factors on the development of soil water repellency by multivariate statistical analysis. The allocation of samples of the tertiary substrate into groups of different grades of repellency (hydrophilic, moderate and extreme water repellency)

was possible by means of meteorological and soil physical parameters due to statistical data analysis. Thus, soil water repellency can be implemented into hydrological modeling without direct measuring the water repellency.

The integrated experiment on in situ characterization of water repellency of different substrates in field and laboratory studies allows for an enhanced process analysis. Based on the findings of the present study, the actual status of soil water repellency has been qualitatively assessed by critical contents of soil water and soil organic carbon as well as meteorological parameters for the first time.

With regard to changing precipitation patterns combined with an increase in meteorological extremes contributing to soil water repellency this study provides the feasibility to assess indirectly actual water repellency of substrates and soils. Moreover, it allows the assessment of soil surface runoff and soil losses enhanced by soil water repellency due to implementing soil water repellency into hydrological and erosion models. Therefore, a classification in risk classes referring to soil water repellency is possible.

Literatur

- Ad-hoc AG Boden, 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Auflage, Hannover.
- Adhikari, M. and G. Chakrabarti, 1976: Contribution of natural and microbial humic acids to water repellency in soil. *Journal of Indian Soil Science* 24, 2, 217-219.
- Bachmann, J., 1996: Benetzbarkeit im Zusammenhang mit dem Humifizierungsgrad der organischen Substanz und ihr Einfluss auf Infiltration und Wasserretentionskurven. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung* 37, 190-196.
- Bachmann, J., 1988: Auswirkungen der organischen Substanz verschiedenen Zersetzungsgrades auf physikalische Bodeneigenschaften. Dissertation. Universität Hannover. 146 S.
- Bachmann, J., R. Horton, S. A. Grant and R. R. Van der Ploeg, 2002: Temperature dependence of water retention curves for wettable and water repellent soils. *Soil Science Society American Journal* 66, 44-52.
- Bachmann, J., R. Horton, R. R. Van der Ploeg, and S. Woche, 2000: Modified Sessile drop method for assessing initial soil water contact angle of sandy soil. *Soil Science Society American Journal* 64, 564-567.
- Bai, Z. G., Dent, D. L., Olsson, L. and M. E. Schaepman, 2008: Global assessment of land degradation and improvement. 1. Identification by remote sensing. Report 2008/01, ISRIC – World Soil Information, Wageningen.
- Bauters, T. W. J., Steenhuis, T. S., DiCarlo, D. A., Nieber, J. L., Dekker, L. W., Ritsema, C. J., Parlage, J.-Y. and R. Haverkamp, 2000: Physics of water repellent soils. *Journal of Hydrology* 231-232, 233-243.
- Bayer, J. V. and G. E. Schaumann 2007: Development of soil water repellency in the course of isothermal drying and upon pH changes in two urban soils. *Hydrological Processes* 21, 2266-2275.
- Bayliss, J.S., 1911: Observations on *Marasmius oreades* and *Clitocybe gigantea* as parasitic fungi causing fairy rings. *Journal of economic Biology* 6, 111-132.
- Belnap, J., 2006: The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. *Hydrological Processes* 20, 3159-3178.
- Belnap, J., Büdel, B. and O. Lange, 2003: Biological soil crusts: Characteristics and distribution. In: Belnap, J. and O. Lange (Hrsg.). *Biological soil crusts: structure, function, and management*. Springer. Berlin.
- Berglund, K. and L. Persson, 1996: Water repellence of cultivated organic soils. *Acta Agriculturae Scandinavica* 46, 145-152.
- Biemelt, D. and H. H. Gerke, 2011: Hysteretic soil water retention functions from field time series for initial development phases of an artificially-constructed hydrological catchment. *Geophysical Research Abstracts*, EGU 2011-63.

- Biemelt, D., Schapp, A. and U. Grünewald, 2011: Hydrological observation and modelling relationships for the determination of water budget in Lusatian post-mining landscape. *Physics and Chemistry of the Earth* 36, 3-18.
- Biemelt, D., Schapp, A., Kleeberg, A. and U. Grünewald, 2005: Overland flow, erosion, and related phosphorus and iron fluxes at plot scale: A case study from a non-vegetated lignite mining dump in Lusatia. *Geoderma* 129, 4-18.
- Biemelt, D., 2001: Bestimmung der Grundwasserneubildung auf Offenlandstandorten der Lausitzer Bergbaufolgelandschaft. Dissertation, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, BTU-AR I/2001, Cottbus, 126 S.
- Bisdorn, E. B. A., Dekker, L. W. and J. F. Th. Schoube, 1993: Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma* 56, 105-118.
- Blum, W. E. H., 1998: Soil degradation caused by industrialization and urbanization. In: Blume H.-P., Eger, H.; Fleischhauer, E.; Hebel, A.; Reij, C.; Steiner; K.G. (Hrsg.): *Towards Sustainable Land Use, Vol. I, 755-766: Advances in Geoecology* 31, Catena Verlag, Reiskirchen.
- Bond, R. D. and J. R. Harris; 1964. The influence of the microflora on physical properties of soils. *Australian Journal of soil research* 2, 111-122.
- Brady, N.C. and R.R. Weil, 1990: *The Nature and Properties of Soil*. 12th edition. Prentice-Hall Inc. p.363.
- Buczko, U., Bens, O. and R. F. Hüttl, 2007: Changes in soil water repellency in a pine-beech forest transformation chronosequence: Influence of antecedent rainfall and air temperatures. *Ecological Engineering* 31, 154-164.
- Buczko, U. and O. Bens, 2006: Assessing Soil Hydrophobicity and its Variability through the Soil Profile Using Two Different Methods. *Soil Science Society American Journal* 70, 718-727.
- Buczko, U., Bens, O. and R. F. Hüttl. 2005. Variability of soil water repellency in sandy forest soils with different stand structure under Scots pine and beech. *Geoderma* 126, 317-336.
- Buczko, U., Bens, O., Fischer, H. and R. F. Hüttl, 2002: Water repellency in sandy luvisols under different forest transformation stages in Northeast Germany. *Geoderma* 109, 1-18.
- Burcar, S., Miller, W. W., Tyler, S. W. and D. W. Johnson, 1994: Seasonal preferential flow in two Sierra Nevada soils under forested and meadow cover. *Soil Science Society American Journal* 58, 1555-1561.
- Burch, G. J., Moore, I. D. and J. Burns, 1989: Soil hydrophobic effects on infiltration and catchment runoff. *Hydrological Processes* 3, 211-222.

- Burghardt, W., 1985: Bestimmung der Benetzungseigenschaften von Moorbodenlösungen durch Kontaktwinkelmessung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 148, 66-72.
- Capriel, P., 1997: Hydrophobicity of organic matter in arable soils: Influence of management. *European Journal of Soil Science* 48, 457-462.
- Capriel, P., Beck, T., Borchert, H., Gronholz, J. and G. Zachmann, 1995: Hydrophobicity of the organic matter in arable soils. *Soil Biology & Biochemistry* 27, 11, 1453-1458.
- Cerda, A. and S. H. Doerr, 2007: Soil wettability, runoff and erodibility of major dry-Mediterranean land use types on calcareous soils. *Hydrological Processes* 21, 2325-2336.
- Chan, K. Y., 1992: Development of seasonal water repellence under direct drilling. *Soil Science Society American Journal* 56, 326-329.
- Chen, Y. and M. Schnitzer, 1978: The surface tension of aqueous solutions of soil humic substances. *Soil Science* 125, 1, 7-15.
- Coelho, C., Ferreira, A., Boulet, A. and J. J. Keizer, 2004: Overland flow generation processes, erosion yields and solute loss following different intensity fires. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 37, 233-240.
- Crockford, H., Topalidis, S. and D. P. Richardson, 1991: Water repellency in a dry sclerophyll eucalypt forest-measurements and processes. *Hydrological Processes* 5, 405-420.
- Cubasch, U. and C. Kadow, 2011. *Global Climate Change and Aspects of Regional Climate Change in the Berlin-Brandenburg Region*. Die Erde, Gesellschaft für Erdkunde Berlin 142, 3-20.
- Czachor, H., Doerr, S.H. and L. Lichner, 2010: Water retention of repellent and subcritical repellent soils: New insights from model and experimental investigations. *Journal of Hydrology* 380, 104–111.
- DeBano, L. F., 2000: Water repellency in soils: A historical overview. *Journal of Hydrology* 231-232, 4-32.
- DeBano, L. F., 1981: Water repellent soils: A state of the art. General Technical Report Forest service [46], 1-21.
- DeByle, N. V., 1973: Broadcast burning of logging residues and the water repellency of soils. *Northwest Science* 47, 77-87.
- DeJonge, L. W., Jacobson, O. H. and P. Moldrup, 1999: Soil water repellency: Effects of water content, temperature and particle size. *Soil Science Society American Journal* 63, 437-442.

- Dekker, L. W and C. J. Ritsema, 2005: How water moves in a water repellent sandy soil 1. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research* 30, 9, 2507-2517.
- Dekker, L. W, Doerr, S. H., Oostindie, K. and C. J. Ritsema, 2001: Water repellency and critical soil water content in a dune sand. *Soil Science Society American Journal* 66, 1667-1674.
- Dekker, L. W. and C. J. Ritsema, 1997: Effect of maize canopy and water repellency on moisture patterns in a Dutch black plaggen soil. *Plant and soil* 195, 339-350.
- Dekker, L. W. and C. J. Ritsema, 1996: Variation in water content and wetting pattern in Dutch water repellent peaty clay and clayey peat soils. *Catena* 28, 89-105.
- Dekker, L. W and C. J. Ritsema, 1994: How water moves in a water repellent sandy soil 1. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research* 30, 9, 2507-2517.
- de Martonne E., 1926. Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité. *La Meteorologie*, 449-458.
- Deurer, M., Green, S. R., Clothier, B. E., Böttcher, J. and W. H. M. Duijnsveld, 2003: Drainage networks in soils. A concept to describe bypass-flow pathways. *Journal of Hydrology* 272, 148-162.
- Deutsches Institut für Normung DIN, 1996: DIN ISO 10694 – Bodenbeschaffenheit, Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse).
- Deutsches Institut für Normung DIN, 1973: DIN 19683 – Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau. Bestimmung der Korngrößenzusammensetzung durch Siebung.
- Diehl, D.; Bayer, J.V.; Woche, S.K.; Bryant, R.; Doerr, S.H. and G.E. Schaumann, 2010: Reaction of soil water repellency to artificially induced changes in soil pH. *Geoderma* 158, 375–384.
- Doerr, S. H., Ritsema, C. J., Dekker, L. W., Scott, D. F. and D. J. Carter, 2007: Preface. *Hydrological Processes* 21, 2223-2228.
- Doerr, S. H., Shakesby, R. A., Dekker, L. W. and C. J. Ritsema, 2006: Occurrence, prediction and hydrological effects of water repellency amongst major soil and land-use types in a humid temperate climate. *European Journal of Soil Science* 57, 741-754.
- Doerr, S. H., Ferreira, A., Walsh, R. P. D., Shakesby, R. A., Leighton-Boyce, G. and C. Coelho, 2003: Soil water repellency as a potential parameter in rainfall-runoff modelling: Experimental evidence at point to catchment scales from Portugal. *Hydrological Processes* 17, 363-377.

- Doerr, S. H., Dekker, L. W., Ritsema, C. J., Shakesby, R. A. and R. Bryant, 2002: Water repellency of soils: The influence of ambient relative humidity. *Soil Science Society American Journal* 66, 401-405.
- Doerr, S. H. and A. D. Thomas, 2000: The role of soil moisture in controlling water repellency: New evidence from forest soils in Portugal. *Journal of Hydrology* 231-232, 134-147.
- Doerr, S. H., Shakesby, R. A. and R. P. D. Walsh, 2000a: Soil water repellency: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews* 51, 33-65.
- Doerr, S. H.; Shakesby, R. A. and R. P. D. Walsh, 2000b: Hydrophobicity in soils of the European Atlantic margin: Preliminary observations and implications for soil hydrological response. *British Hydrological Society Occasional Paper No. 11*, 211-218.
- Doerr, S. H., 1998: On standardizing the "water drop penetration time" and the "molarity of an ethanol droplet" techniques. *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 663-668.
- Dümig, A., Veste, M., Hagedorn, F., Fischer, T., Lange, P., Spröte, R. and I. Kögel-Knabner, 2013: Biological soil crusts on initial soils: Organic carbon dynamics and chemistry under temperate climatic conditions, *Biogeosciences Discussions* 10, 851-894.
- EEA, 2000. http://www.eea.europa.eu/de/publications/Environmental_issue_series_16 (Stand 25.03.2011)
- Einecke, M., 2005: Entwicklung bodenhydraulischer Pedotransferfunktionen für kohlehaltige Kippböden der Niederlausitzer Bergbaufolgelandschaft. *Cottbusser Schriften, Band 32*
- Eldridge, D. J. and R. S. B. Greene, 1994: Microbiotic soil crusts: A review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia. *Australian Journal of soil research* 32, 389-415.
- Ellerbrock, R. H., Gerke, H. H., Bachmann, J. and M.-O. Goebel, 2005: Composition of organic matter fractions for explaining wettability of three forest soils. *Soil Science Society American Journal* 69, 57-66.
- Ellies, A., Hartge, K. H., MacDonald, R. and C. Ramirez, 2003: Organische Substanz und Benetzbarkeit von Bodenproben - eine Interpretation. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 166, 120-123.
- Elmer, M., Gerwin, W., Schaaf, W., Zaplata, M.K., Hohberg, K., Nenov, R., Bens, O. and R.F. Hützl, 2013: Dynamics of initial ecosystem development at the artificial catchment Chicken Creek, Lusatia, Germany. *Environmental Earth Sciences* 69 (2) (in press), DOI 10.1007/s12665-013-2330-2.

- Emerson, W. W., 1995: Water retention, organic C and soil texture. *Australian Journal of soil research* 33, 241-251.
- Feng, G. L., Letey, J. and L. Wu, 2002: The influence of two surfactants on infiltration into a water repellent soil. *Soil Science Society American Journal* 66, 361-367.
- Ferreira, A., Coelho, C., Walsh, R. P. D., Shakesby, R. A., Ceballos, A. and S. H. Doerr, 2000: Hydrological implications of soil water repellency in *Eucalyptus globulus* forests. *Journal of Hydrology* 231-232, 165-177.
- Fischer, T. ; Veste, M.; Bens, O. and R. F. Hüttl, 2012: Dew formation on the surface of biological soil crusts in central European sand ecosystems. *Biogeosciences* 9, 4621-4628.
- Fischer, T., Veste, M., Wiehe, W. and P. Lange, 2010: Water repellency and pore clogging at early successional stages of microbiotic crusts on inland dunes, Brandenburg, NE Germany. *Catena* 80, 47-52.
- Franco, C. M. M., Clarke, P. J., Tate, M. E. and J. M. Oades, 2000: Hydrophobic properties and chemical characterization of natural water repellent materials in Australian sands. *Journal of Hydrology* 231-232, 47-58.
- Gerke, H. H., Hangen, E., Schaaf, W. and R. F. Hüttl, 2001: Spatial variability of potential water repellency in a lignitic mine soil afforested with *Pinus Nigra*. *Geoderma* 102, 255-274.
- Gerstengarbe, F.-W., Badeck, F., Hattermann, F., Krysanova, V., Lahmer, W., Lasch, P., Stock, M., Suckow, F., Wechsung, F. and P. C. Werner, 2003: Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. PIK Report No. 83, ISSN 1436-0179.
- Gerwin, W., Schaaf, W., Biemelt, D., Winter, S., Fischer, A., Veste, M. and R.F. Hüttl, 2011: Overview and first results of ecological monitoring at the artificial watershed Chicken Creek (Germany), *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 61-73.
- Giovannini, G. and S. Lucchesi, 1984: Differential thermal analysis and infrared investigations on soil hydrophobic substances. *Soil Science* 137, 6, 457-463.
- Giovannini, G., Lucchesi, S. and S. Cervelli, 1983: Water repellent substances and aggregate stability in hydrophobic soil. *Soil Science* 135, 2, 110-113.
- Greiffenhagen, A., Wessolek, G., Facklam, M., Renger, M. und H. Stoffregen, 2006: Hydraulic functions and water repellency of forest floor horizons on sandy soils. *Geoderma*, 132, 182-195.
- Hallet, P. D., Baumgartl, T. and I. M. Young, 2001: Subcritical water repellency of aggregates from a range of soil management practices. *Soil Science Society American Journal* 65, 184-190.

- Hallet, P. D. and I. M. Young, 1999: Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate induced microbial activity. *European Journal of Soil Science* 50, 35-40.
- Hangen, E., Gerke, H. H., Schaaf, W. and R. F. Hütthl, 2005: Assessment of preferential flow processes in a forest reclaimed lignitic mine soil by multicell sampling of drainage water and three tracers. *Journal of Hydrology* 303, 16-37.
- Harper, R. J., McKissock, I., Gilkes, R. J., Carter, D. J. and P. S. Blackwell, 2000: A multivariate framework for interpreting the effects of soil properties, soil management and land use on water repellency. *Journal of Hydrology* 231-232, 371-383.
- Hartge, K. H. und R. Horn, 1992: Einführung in die Bodenphysik. 3. Auflage, Enke, Stuttgart.
- Hendrickx, J. M. H., Dekker, L. W. and O.H. Boersma, 1993: Unstable wetting fronts in water repellent field soils. *Journal of Environmental Quality* 22, 109-118.
- Hieke, F., 2011: Der Einfluss von Bodeneigenschaften auf die Rillenerosion. Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, Saarbrücken, ISBN 978-3-8381-2346-2.
- Hofer, M., Lehmann, P., Stähli, M., Seifert, S. and M. Krafczyk, 2012: Two approaches to modeling the initiation and development of rill in a man-made catchment. *Water Resources Research* 48, W01531.
- Hofer, M., Lehmann, P., Biemelt, D., Stähli, M. and M. Krafczyk, 2011: Modelling subsurface drainage pathways in an artificial catchment: Physics and Chemistry of the Earth 36, 101-112.
- Holsten, A., Dominic, A. R., Costa, L. und J. P. Kropp, 2013: Evaluation of the Performance of Meteorological Forest Fire Indices for German Federal States. *Forest Ecology and Management* 287, 2076-2087.
- Holsten, A., Vetter, T., Vohland, K. and V. Krysanova, 2009. Impact of climate change on soil moisture dynamics in Brandenburg with a focus on nature conservation areas. *Ecological Modelling* 220, 123-131.
- Hurrass, J. und G. E. Schaumann, 2007. Hydration kinetics of wettable and water repellent soil samples. *Soil Science Society of America Journal* 71 (2): 280-288.
- Hütthl, R. F. und W. Gerwin, 2005: Editorial: Disturbed landscapes – development of ecosystems. *Geoderma* 129, 1-3.
- Hütthl, R. F., Weber, E. und D. Klem, 2000: Ökologisches Entwicklungspotential der Bergbaufolgelandschaften im Lausitzer Braunkohlerevier. In Hütthl, R. F., Weber, E. und D. Klem (Hrsg.): Ökologisches Entwicklungspotential der Bergbaufolgelandschaften im Lausitzer Braunkohlerevier. Teubner Verlag, Stuttgart.
- Hütthl, R. F., 1991: Die Nährelementversorgung geschädigter Wälder in Europa und Nordamerika. *Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen*, Heft 28, 440 S.

- Imeson, A. C., Verstraten, J. M., van Mulligen, E. J. and J. Sevink, 1992: The effects of fire and water repellency on infiltration and runoff under Mediterranean type forest. *Catena* 19, 345-361.
- IPCC, 2007: Working Group 1: The Physical Basis of Climate; Change. <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>. (Stand 23.03.2011)
- Jaeger, A., Schaumann, G. E. and M. Bertmer, 2011. Optimized NMR spectroscopic strategy to characterize water dynamics in soil samples. *Organic Geochemistry*. 10.1016/j.orggeochem.2011.03.021.
- Jaramillo, D. F., Dekker, L. W., Ritsema, C. J. and J. M. H. Hendrickx, 2000: Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates. *Journal of Hydrology* 231-232, 105-111.
- Jex, G. W., Bleakley, B. H., Hubbell, D. H. and L. L. Munro, 1985: High humidity induced increase in water repellency in some sandy soils. *Soil Science Society American Journal* 49, 1177-1182.
- Jonas, M., Staeger, T. and C.-D. Schönwiese, 2005: Berechnungen der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen – Schwerpunkt Deutschland. UBA Bericht.
- Jungerius, P. D. and M. J. ten Harkel, 1994: The effect of rainfall intensity on surface runoff and sediment yield in the grey dunes along the dutch coast under conditions of limited rainfall acceptance. *Catena* 23, 253-268.
- Jungerius, P. D. and J. H. De Jong, 1989: Variability of water repellence in the dunes along the Dutch coast. *Catena* 16, 491-497.
- Katur, J., 1998: Melioration schwefelhaltiger Kippenböden. In W. Pflug (Hrsg.): Braunkohlentagebau und Rekultivierung: Landschaftsökologie - Folgenutzung - Naturschutz. Springer Verlag, Berlin, 559-572.
- Keizer, J. J., Doerr, S. H., Malvar, M. C., Ferreira, A. and V. Pereira, 2007: Temporal and spatial variations in topsoil water repellency throughout a crop-rotation cycle on sandy soil in north-central Portugal. *Hydrological Processes* 21, 2317-2324.
- Keizer, J. J., Ferreira, A., Coelho, C., Doerr, S. H., Malvar, M. C., Domingues, C. S. P., Perez, B., Ruiz I. M. C. and K. Ferrari, 2005: The role of tree stem proximity in the spatial variability of soil water repellency in a eucalypt plantation in coastal Portugal. *Australian Journal of soil research* 43, 3, 251-259.
- Kendzia, G. and T. Neumann. 2010. Planen und Gestalten multifunktionaler Bergbaufolgelandschaften im Lausitzer Braunkohlenrevier der Vattenfall Europe Mining AG. Freiburger Forschungshefte C 534.
- Kendzia, G., Reißmann, R. and T. Neumann, 2008: Targeted development of wetland habitats for nature conservation fed by natural inflow in the post-mining landscape of Lusatia. *World of Mining – Surface & Underground* 60, 2, 88-95.

- Kidron, G.J.; Vonshak, A.; Dor, I.; Barinova, S. and A. Abeliovich, 2010: Properties and spatial distribution of microbiotic crusts in the Negev Desert, Israel. *Catena* 82, 92–101.
- Kidron, G. J., Yaalon, D. H. and A. Vonshak, 1999: Two causes for runoff initiation on microbiotic crusts: Hydrophobicity and pore clogging. *Soil Science* 164, 1, 18-27.
- King, P. M., 1981: Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement. *Australian Journal of soil research* 19, 275-285.
- Kirchner, D.; B. Braun; W. Rotard; U. Szewzyk; E. Grohmann und G. E. Schaumann, 2005: Influence of biofilms on the hydrophobicity of urban soils. *Geophysical Research Abstracts* 7 (SSS8 Soil water repellency: origin, environmental controls and hydrological impacts), EGU05-A-03060; SSS8-1FR5P-0149.
- Kobayashi, M. and T. Shimizu, 2007: Soil water repellency in a Japanese cypress plantation restricts increases in soil water storage during rainfall events. *Hydrological Processes* 21, 2356-2364.
- Kuhnert, M., 2009: Quantifizierung von Oberflächenabfluss und Erosion auf Böden mit hydrophoben Eigenschaften. Dissertation, Universität Potsdam, 175 S.
- Küchler, W., 2007: [http://www.smul.sachsen.de/umwelt/download/klima/Globaler_Klimawandel_Regionale_Klimaprojektionen\(1\).pdf](http://www.smul.sachsen.de/umwelt/download/klima/Globaler_Klimawandel_Regionale_Klimaprojektionen(1).pdf) (Stand 25.03.2011)
- Lahann, J., Mitragotri, S., Tran, T.-N., Kaido, H., Sundaram, J., Choi, I. S., Hoffer, S., Somorjai, G. A. and R. Langer, 2003: A reversibly switching surface. *Science* 299, 5605, 371-374.
- Landesumweltamt Brandenburg (LUA), 2010: Auswertung regionaler Klimamodelle für das Land Brandenburg. Darstellung klimatologischer Parameter mit Hilfe vier regionaler Klimamodelle (CLM, REMO10, WettReg, STAR2) für das 21. Jahrhundert. Fachbeiträge des Landesumweltamtes, Heft Nr. 113.
- Lauer, W., 1952: Humide und aride Jahreszeiten in Südamerika und Afrika und ihre Beziehung zu den Vegetationsgürteln. *Bonner Geogr. Abh.* Heft 9.
- Leighton-Boyce, G., Doerr, S. H., Shakesby, R. A. and R. P. D. Walsh, 2007: Quantifying the impact of soil water repellency on overland flow generation and erosion. *Hydrological Processes* 21, 2337-2334.
- Leighton-Boyce, G., Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Walsh, R.P.D., Ferreira, A.J.D., Boulet, A.K. and C.O.A. Coelho, 2005: Temporal dynamics of water repellency and soil moisture in eucalypt plantations, Portugal. *Australian Journal of Soil Research* 43, 269-280.
- Lemmnitz; C., Kuhnert; M., Güntner; A., Merz, B.; Bens O. and R.F. Hüttl, 2008: Spatial and temporal variations of soil water repellency and the influence on surface runoff. In: *Hydrological Processes* 22, 1976-1984.

- Letey, J., Carrillo, M. L. K. and X. P. Pang, 2003: Characterizing the degree of repellency. In Ritsema, C. J. and L. W. Dekker (Hrsg.): Soil water repellency: Occurrence, consequences, and amelioration. Elsevier, Amsterdam.
- Letey, J., 1969: Measurement of contact angle, WDPT, and critical surface tension. Pages 43-47 of: Symposium on water repellent soils.
- Lichner, L., et al., Algae influence the hydrophysical parameters of a sandy soil, *Catena* (2012), doi:10.1016/j.catena.2012.02.016
- Lichner, L., Dlapa, P., Doerr, S. H. and J. Mataix-Solera, 2006: Evaluation of different clay minerals as additives for soil water repellency alleviation. *Applied clay science* 31, 238-248.
- Lin, H., 2010: Earth's Critical Zone and hydrogeology: Concepts, characteristics, and advances. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 25–45.
- Marschner, H., 1995: Mineral Nutrition of higher plants. Academic press, London, 889 S.
- Ma'shum, M. and V. C Farmer, 1985: Origin and assessment of water repellency of a sandy South Australian soil. *Australian Journal of soil research* 23, 623-626.
- Mataix-Solera, J. and S. H. Doerr, 2004: Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forests in Southeastern Spain. *Geoderma* 118, 77-88.
- Mazur, K., Schoenheinz, D., Biemelt, D., Schaaf, W. and U. Grünewald, 2011: Observation of hydrological processes and structures in the artificial Chicken Creek catchment, *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 74-86.
- Maurer, T. and H. H. Gerke, 2011: Modelling aeolian sediment transport during initial soil development on an artificial catchment using WEPS and aerial images. *Soil and Tillage Research* 117, 148-162.
- McGhie, D. A. and A. M. Posner, 1981: The effect of plant top material on the water repellence of fired sands and water repellent soils. *Australian Journal of soil research* 32, 609-620.
- McKissock, I., Gilkes, R. J., Harper, R. J. and D. J. Carter, 1998: Relationships of water repellency to soil properties for different spatial scales of study. *Australian Journal of soil research* 36, 495-507.
- Miyamoto, S., Bristol, A. and W. L. Gould, 1977: Wettability of coal-mine spoils in Northwestern New Mexico. *Soil Science* 123, 4, 258-263.
- Moral Garcia, F. J., Dekker, L. W., Oostindie, K. and C. J. Ritsema, 2005: Water repellency under natural conditions in sandy soils of Southern Spain. *Australian Journal of soil research* 43, 291-296.

- Morales, V.L., Parlange, J.-Y. and T. S. Steenhuis, 2010: Are preferential flow paths perpetuated by microbial activity in the soil matrix? A review. *Journal of Hydrology* 393, 29–36.
- Müller, J. and A. Bolte, 2009: The use of lysimeters in forest hydrology research in North-East Germany. *Landbauforschung Volkenrode* 59, 1-10.
- Neumann, C., 1999: Zur Pedogenese pyrit- und kohlehaltiger Kippsubstrate im Lausitzer Braunkohlerevier. *Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung*. Band 8.
- National Research Council (NRC), 2001: *Basic Research Opportunities in Earth Science*. Washington, DC: National Academies Press.
- Oldeman, L. R. (Hrsg.), 1988: *Global Assessment of Soil Degradation (GLASOD). Guidelines for General Assessment of the Status of Human-Induced Soil Degradation*. Working Paper and Preprint, Nr. 88/4. Wageningen: International Soil Reference and Information Centre (ISRIC)
- Podmanicky, L., Balazs, K., Belenyasi, M., Centeri, C., Kristof, D. and N. Kohlheb, 2011: Modelling soil quality changes in Europe. An impact assessment of land use change on soil quality in Europe. *Ecological Indicators* 11, 4-15.
- Poulenard, J., Podwojewski, P., Janeau, J. L. and J. Collinet, 2001: Runoff and soil erosion under rainfall simulation of andisols from the Ecuadorian Paramo: effect of tillage and burning. *Catena* 45, 185-207.
- Prechtel, A., von Lützw, M., Schneider, B. U., Bens, O., Bannick, C. G., Kögel-Knabner, I. and R. F. Hüttl, 2009: Organic Carbon in soils of Germany: Status quo and the need for new data to evaluate potentials and trends of soil carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172, 601-614.
- Reeder, C. J. and M. F. Jurgensen, 1979: Fire-induced water repellency in forest soils of upper Michigan. *Canadian Journal of Forest Research* 9, 369-373.
- Regionaler Planungsverband Oberlausitz-Niederschlesien, 1993: *Braunkohleplan Tagebau Nochten, Bautzen, Germany*. 47 Seiten.
- Richardson, J. L. and N. C. Wollenhaupt, 1983: Water repellency of degraded lignite in a reclaimed soil. *Canadian Journal of Soil Science* 63, 405-407.
- Ritsema, C. J. and L. W. Dekker, 1998: Modeling and field evidence of finger formation and finger recurrence in a water repellent sandy soil. *Water Resources Research* 34, 4, 555-567.
- Roberts, F. J. and B. A. Carbon, 1972: Water repellence in sandy soils of South-western Australia. *Australian Journal of soil research* 10, 35-42.
- Robichaud, P. R., 2000: Fire effects on infiltration rates after prescribed fire in Northern Rocky Mountain forests, USA. *Journal of Hydrology* 231-232, 220-229.

- Rodriguez-Alleres, M. and E. Benito, 2012: Temporal fluctuations of water repellency in forest soils of Galicia, NW Spain. Do soil samples dried at laboratory reflect the potential soil water repellency? *Hydrological Processes* 26, 1179-1187.
- Roy, J. L., McGill, W. B., Lowen, H. A. and R. L. Johnson, 2003: Relationship between water repellency and native petroleum-derived organic carbon in soils. *Journal of Environmental Quality* 32, 583-590.
- Roy, J. L. and W. B. McGill, 2000: Flexible conformation in organic matter coatings: A hypothesis about soil water repellency. *Canadian Journal of Soil Science* 80, 143-152.
- Rumpel, C. und I. Kögel-Knabner, 2004: Microbial use of lignite compared to recent plant litter as Substrats in reclaimed coal mine soils. *Soil Biol. Biochem.* 36, 67-75.
- Savage, S. M., Martin, J. P. and J. Letey, 1969: Contribution of humic acid and a polysaccharide to water repellency in sand and soil. *Soil Science Society American Proceedings* 33, 149-150.
- Schaaf, W., Bens, O., Fischer, A., Gerke, H.H., Gerwin, W., Grünewald, U., Holländer, H.M., Kögel-Knabner, I., Mutz, M., Schloter, M., Schulin, R., Veste, M., Winter, S. and R.F. Hüttl, 2011: Patterns and processes of initial terrestrial-ecosystem development. , *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 174, 229-239
- Schaaf, W.; Neumann, C. und R. F. Hüttl, 2001: Short communication: Actual cation exchange capacity in lignite containing pyrite mine soils. *Journal of Plant Nutrition and soil Science* 164, 77-78.
- Schäfer, B., Bens, O. Fischer, H. and R. F. Hüttl, 2002: Einfluss des Baumartenwechsels auf die Wasserspeicherfähigkeit von sandigen Böden Nordost-Brandenburgs. *Forst und Holz* 57, 19, 571-575.
- Schaumann, G. E. and Y. Kunhi Mouvenchery, 2012. Potential of AFM-Nanothermal Analysis to study the microscale thermal characteristics in soils and natural organic matter (NOM). *Journal of Soils and Sediments*. 12 (1): 48-62.
- Schaumann, G. E.; Hobbey, E.; Hurraß, J. and W. Rotard, 2005. H-NMR Relaxometry to monitor wetting and swelling kinetics in high organic matter soils. *Plant and Soil*. 275 (1-2): 1-20.
- Scheffer, F. and P. Schachtschabel, 1998. *Lehrbuch der Bodenkunde*. 14. Auflage Spektrum Akademischer Verlag, Stuttgart.
- Schlichting, E., Blume, H. P. und K. Stahr, 1995: *Bodenkundliches Praktikum*. 2. Auflage, Blackwell, Berlin.
- Schneckenburger, T.; Schaumann, G. E.; Woche, S. Kand S. Thiele-Bruhn, 2012: Short-term evolution of hydration effects on soil organic matter properties and resulting implications for sorption of naphthalene- 2-ol. *Journal of Soils and Sediments*. Online first 10.1007/s11368-012-0503-3

- Schönwiese, C.-D. and R. Janoschitz, 2007: Klima-Trendatlas Deutschland 1901-2000. Bericht Nr. 4, Inst. Atmosphäre u. Umwelt, Univ. Frankfurt/M. Atlas.
- Schöpke, 2000: Hydrogeochemische Zustandsbeschreibung. In Hüttl, R. F., Weber, E. und D. Klem (Hrsg.): Ökologisches Entwicklungspotential der Bergbaufolgelandschaften im Lausitzer Braunkohlerevier. Teubner Verlag, Stuttgart.
- Schreiner, O. and E.C. Shorey, 1910: Chemical nature of soil organic matter. USDA Bureau of Soils Bulletin 74, 2-48.
- Scott, D. F., 2000: Soil wettability in forested catchments in South Africa; as measured by different methods and as affected by vegetation cover and soil characteristics. *Journal of Hydrology* 231-232, 87-104.
- Shakesby, R. A., Doerr, S. H., Coelho, C., Walsh, R. P. D., Keizer, J. J., Ferreira, A., Schnabel, S. and J. Contador, 2002a: A ranking methodology for assessing relative erosion risk and its application to Dehesas and Montados in Spain and Portugal. *Land degradation & development* 13, 129-140.
- Shakesby, R. A., Doerr, S. H. and R. P. D. Walsh, 2002b: The erosional impact of soil hydrophobicity: Current problems and future research directions. *Journal of Hydrology* 231-232, 178-191.
- Sharma, P. P., Carter, F. S. and G. A. Halvorson, 1993: Water retention by soils containing coal. *Soil Science Society American Journal* 57, 311-316.
- Spektat, A., Enke, W. and F. Kreienkamp, 2007: Neuentwicklung von regional hochaufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien auf Basis von globalen Klimasimulationen 2010 bis 2100, UBA Teilbericht 2007/02.
- Spröte, R., Veste, M., Fischer, T., Raab, T., Bens, O. and R.F. Hüttl, 2012: Development of biological soil crusts and their influence on soil hydrology in the recultivation area of lignite open-cast mining district in Lower Lusatia (Germany). *Geophysical Research Abstracts*, 14, EGU2012-63.
- Spröte, R., Veste, M., Fischer, T., Lange, P., Bens, O., Raab, T. und R.F. Hüttl, 2011: Wie beeinflussen Kiefern (*Pinus sylvestris* L.) die Entwicklung der Benetzungshemmung auf Sandböden?: Berichte der DBG, Jahrestagung der DBG "Böden verstehen - Böden nutzen - Böden fit machen", 03.-09.09.2011, Berlin.
- Spröte, R., Fischer, T., Veste, M., Raab, T., Wiehe, W., Lange, P., Bens, O. and R. F. Hüttl, 2010: Biological topsoil crusts at early successional stages on Quaternary Substrats dumped by mining in Brandenburg. *Géomorphologie* 4, 359-370.
- Statistik der Kohlenwirtschaft e.V., 2012: Der Kohlenbergbau in der Energiewirtschaft der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2012. Statistik der Kohlenwirtschaft e.V.

- Stock, M., 2004: Klimafolgenforschung - Mögliche Auswirkungen von Klimaänderung auf die Gesellschaft: 2. Fallstudien. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-forschung, Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie*, 16, 2, 115-124.
- Suckow, F., Schröder, J., Bäucker, E., Elmer, M., Frommhold, H. und M. Lange, 2009: Grundlagen und Forschungsfragen. In Elmer, M. (Hrsg.): *Nachhaltige Bewirtschaftung von Eichen-Kiefern-Mischbeständen*. Oekom Verlag, München.
- Täumer, K., Stoffregen, H. and G. Wessolek, 2005: Determination of repellency distribution using soil organic matter and water content. *Geoderma* 125, 107-115.
- Teramura, A. H., 1980: Relationships between stand age and water repellency of chaparral soils. *Bulletin of the torrey botanical club* 107, 42-46.
- Tillman, R. W., Scotter, D., Wallis, M. G. and B. E. Clothier, 1989: Water-repellency and its measurement by using intrinsic sorptivity. *Soil Physics and Hydrology* 27, 637-644.
- Tschapek, M., 1983: Criteria for determining the hydrophobicity-hydrophilicity of soils. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 147, 2, 137-149.
- van't Woudt, B. D., 1959: Particle Coatings affecting the wettability of soils. *Journal of Geophysical Research* 64, 2, 263-267.
- van Dam, J. C., Hendrickx, J. M. H., Van Ommen, H., Bannink, M. H., Van Genuchten, M. and L. W. Dekker, 1990: Water and solute movement in a coarse-textured water repellent field soil. *Journal of Hydrology* 120, 359-379.
- Verheijen, F. and L. H. Cammeraat, 2007: The association between three dominant shrub species and water repellent soils along a range of soil moisture contents in semi-arid Spain. *Hydrological Processes* 21, 2310–2316.
- Wahl, N. A., Bens, O., Schäfer, B. and R. F. Hüttl, 2003: Impact of changes in land-use management on soil hydraulic properties: hydraulic conductivity, water repellency and water retention. *Physics and chemistry of the earth* 28, 1377-1387.
- Wallach, R. and E. R. Graber, 2007: Infiltration into effluent irrigation-induced repellent soils and the dependence of repellency on ambient relative humidity. *Hydrological Processes* 21, 17, 2346-2355.
- Wallis, M. G. and D. J. Horne, 1992: Soil water repellency. In B. A. Stewart (Hrsg.): *Advances in soil science*, Vol. 20, Springer New York.
- Walsh R. P. D., Coelho, C. O. A., Elmes, A., Ferreira, A. J. D., Goncalves, A. J. B., Shakesby, R. A., Ternan, J. L. and A.G. Williams, 1998: Rainfall simulation plot experiments as a tool in overland flow and soil erosion assessment, North-central Portugal. *Geoökodynamik* 19, 139-152.
- Wang, X.Y., Zhao, Y. and R. Horn, 2010. Soil wettability as affected by soil characteristics and land use. *Pedosphere* 20, 43–54.

- Warren, S. D., 2003: (in Belnap 2003): Biological soil crusts and hydrology in North American deserts. Pages 327–337. In: Belnap, J. and O. Lange (Hrsg.). Biological soil crusts: Structure, function, and management. Springer Berlin, Heidelberg, New York
- Wendling, U., G. Fuchs und G. Müller-Westermeier, 1999: Mittlere jährliche potentielle Verdunstungshöhe als Gras-Referenzverdunstung. Hydrologischer Atlas von Deutschland 2.12, Bundesministerium für Umwelt, Bonn.
- Wessolek, G., Stoffregen, H. and K. Täumer, 2009: Persistency of flow patterns in a water repellent sandy soil – conclusions of TDR readings and a time-delayed double tracer experiment. *Journal of Hydrology* 375, 524–535.
- Witter, J. V., Jungerius, P. D. and M. J. ten Harkel, 1991: Modeling water erosion and the impact of water repellency. *Catena* 18, 115-124.
- Woche, S., Goebel, M.-O., Kirkham, M. B., Horton, R., Van der Ploeg, R. R. and J. Bachmann, 2005: Contact angle of soils as affected by depth, texture, and land management. *European Journal of Soil Science* 56, 239-251.
- Wöllecke, B., Woche, S., Bachmann, J., Bens, O. and R. F. Hüttl, 2003: Einfluss der organischen Bodensubstanz auf das Wasseraufnahmevermögen sandiger Böden bei unterschiedlicher Landnutzung. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* 102/1, 153-154.
- World Reference Base for Soil Resources (WRB), 2006. <http://www.fao.org/ag/agl/agll/wrb/doc/wrb2006final.pdf> (Stand 13.05.2011)
- Ziechmann, W. und U. Müller-Wegener, 1990: *Bodenchemie*. Wissenschaftsverlag, Mannheim.
- Zöfel, P., 1998: *Statistik in der Praxis*. UTB, Stuttgart.

Anhang

Tabelle A1: Ergebnisse der Körnungsanalysen, Punkt Nullfläche (NF)

Probe-Nr.		NF I	NF I	NF II	NF II	Mittelwert	
gS	%	14,17	17,26	11,73	11,15	13,58	
mS	%	57,89	52,27	57,62	57,75	56,38	
fS	%	20,36	23,89	23,69	22,05	22,50	
Sand	%	92,42	93,42	93,03	90,95	92,45	
Grobschl.	%	2,42	2,32	2,00	1,30	2,01	
Mittelschl.	%	1,27	0,78	0,80	0,60	0,86	
Feinschl.	%	0,35	0,22	0,03	0,42	0,25	
Schluff	%	4,05	3,34	2,83	2,32	3,13	
Ton	%	3,10	3,42	3,05	2,08	2,91	
Wiederfindung	%	98,45	99,53	98,25	94,88	97,78	mSfs

Tabelle A2: Ergebnisse der Körnungsanalysen, Punkt Quartär 1 (Q1)

Probe-Nr.		Q 1 I	Q 1 I	Q 1 II	Q 1 II	Mittelwert	
gS	%	10,98	10,30	8,43	10,64	10,09	
mS	%	57,83	57,00	54,11	55,18	56,03	
fS	%	24,12	24,30	30,09	26,59	26,28	
Sand	%	92,93	91,60	92,63	92,41	92,39	
Grobschl.	%	1,97	0,73	2,27	2,35	1,83	
Mittelschl.	%	1,37	0,22	0,97	1,05	0,90	
Feinschl.	%	0,02	0,13	0,37	0,37	0,23	
Schluff	%	3,37	1,08	3,62	3,78	2,96	
Ton	%	2,65	2,13	2,72	3,33	2,71	
Wiederfindung	%	97,73	94,69	98,15	98,62	97,30	mSfs

Tabelle A3: Ergebnisse der Körnungsanalysen, Punkt Quartär 2 (Q2)

Probe-Nr.		Q 2 I	Q 2 I	Q 2 II	Q 2 II	Mittelwert	
gS	%	11,13	10,99	8,63	9,44	10,05	
mS	%	55,92	53,80	54,60	56,76	55,27	
fS	%	25,96	26,17	28,79	25,71	26,66	
Sand	%	93,01	90,96	92,02	91,91	91,98	
Grobschl.	%	1,22	1,27	2,35	1,85	1,67	
Mittelschl.	%	0,87	0,60	1,35	0,62	0,86	
Feinschl.	%	0,50	0,22	0,12	0,35	0,30	
Schluff	%	2,60	2,10	3,82	2,82	2,84	
Ton	%	2,82	2,45	2,55	2,47	2,57	
Wiederfindung	%	97,70	95,04	97,19	96,72	96,66	mSfs

Tabelle A4: Ergebnisse der Körnungsanalysen, Punkt Tertiär 1 (T1)

Probe-Nr.		T 1 I	T 1 I	T 1 II	T 1 II	Mittelwert	
gS	%	43,58	37,15	57,19	42,24	45,04	
mS	%	33,43	37,55	28,82	36,25	34,01	
fS	%	14,43	17,10	8,69	14,13	13,59	
Sand	%	91,44	91,80	94,71	92,61	92,64	
Grobschl.	%	1,83	1,73	0,40	0,97	1,23	
Mittelschl.	%	1,32	0,92	0,42	0,37	0,76	
Feinschl.	%	0,65	0,63	0,47	0,22	0,49	
Schluff	%	3,80	3,28	1,30	1,57	2,49	
Ton	%	3,83	4,22	3,10	2,62	3,44	
Wiederfindung	%	97,92	98,56	98,82	96,56	97,97	mSgs

Tabelle A5: Ergebnisse der Körnungsanalysen, Punkt Tertiär 2 (T2)

Probe-Nr.		T 2 I	T 2 I	T 2 II	T 2 II	Mittelwert	
gS	%	40,86	42,48	41,33	43,91	42,14	
mS	%	34,16	33,18	33,03	32,92	33,32	
fS	%	16,39	16,24	16,89	15,13	16,16	
Sand	%	91,41	91,90	91,25	91,96	91,63	
Grobschl.	%	1,75	0,20	1,22	0,02	0,80	
Mittelschl.	%	1,35	0,00	0,60	0,47	0,60	
Feinschl.	%	0,47	0,52	0,27	0,20	0,37	
Schluff	%	3,57	0,70	2,10	0,70	1,77	
Ton	%	3,87	4,12	2,90	3,20	3,52	
Wiederfindung	%	97,68	96,91	95,79	95,52	96,48	mSgs

Tabelle A6: Mediane der Kontaktwinkel [°] der Versuche unter kontrollierten Bedingungen, n=20

Trocknungs- temperatur [°C]	W0 1/8		W0 1/15		W0 3/8		W0 3/15		W0 5/8		W0 5/15		W3 1/8		W3 1/15		W3 3/8		W3 3/15		W3 5/8		W3 5/15		K 1/8		K 1/15		K 3/8		K 3/15		K 5/8		K 5/15	
	W0 1/8	W0 1/15	W0 3/8	W0 3/15	W0 5/8	W0 5/15	W3 1/8	W3 1/15	W3 3/8	W3 3/15	W3 5/8	W3 5/15	K 1/8	K 1/15	K 3/8	K 3/15	K 5/8	K 5/15																		
20	40	45	68	66.5	90	78.5	50	47.5	68.5	65	80.5	74	57.5	52.5	50	57.5	72	57.5																		
25	37.5	45	50	52.5	90.5	73	43.7	43.9	63	63.2	84.5	97	53.3	49.6	63.7	60	63.5	58.6																		
30	45	32.5	35	45	90.5	63.5	40	32.5	57.5	n.b.	76	67	59	60.5	55	63	70	73																		
40	27.5	30	45	50	65	70.5	35	30	65	61	75	76.5	50	55	65	67	67.5	67																		
50	30	27.5	60	50	78.5	60	40	42.5	70	76	87	81.5	52,5	47,5	55	72	65	63																		
60	35	20	74	60	81,5	87,5	35	32,5	78,5	69	95	83,5	35	45	55	61	76,5	65,5																		

Tabelle A7: Mediane der WDPT-Zeiten [s] der Versuche unter kontrollierten Bedingungen, n=10

Trocknungs- temperatur [°C]																			
	W0 1/8	W0 1/15	W0 3/8	W0 3/15	W0 5/8	W0 5/15	W3 1/8	W3 1/15	W3 3/8	W3 3/15	W3 5/8	W3 5/15	K 1/8	K 1/15	K 3/8	K 3/15	K 5/8	K 5/15	
20	2400	1800	2400	2400	2400	3000	60	60	600	600	2400	2400	60	60	60	60	60	60	60
25	0	0	1200	2400	2400	2400	0	0	1200	1200	2400	3600	60	60	60	60	60	60	60
30	60	5	5	600	3000	2400	60	5	600	n.b.	2400	1800	60	60	60	60	60	60	60
40	5	5	600	600	2400	3000	60	5	1200	1200	2400	3000	5	60	60	60	60	60	60
50	5	5	1800	1200	3000	2400	5	60	1200	1800	2400	3000	5	5	60	60	60	60	60
60	5	0	2400	1800	3600	2400	1200	600	3600	3000	3600	3000	5	5	60	60	60	60	60

Tabelle A8: pH-Werte der Probenahmepunkte im Freiland, (n.b.- nicht bestimmt)

Datum	Nullfl.	K1	K3	W0/1	W0/3	W3/1	W3/3	T1	T2	Q1	Q2	1a	1b	1c	1d	1e	2a	2b	2c
21.08.2003	n.b.	8,2	8,3	5,5	5,3	4,8	5,3	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.								
22.09.2003	6,3	7,7	7,7	5,7	5,2	4,7	4,9	3,5	4,0	6,0	5,9								
10.10.2003	6,3	6,8	7,2	5,5	5,8	5,3	5,1	4,0	3,8	6,0	5,7								
28.10.2003	6,3	7,3	7,7	5,8	5,1	5,5	4,7	3,8	3,9	5,7	6,4								
27.11.2003	6,1	7,3	7,3	5,8	5,5	5,6	5,0	3,9	n.b.	6,2	6,1								
17.12.2003	6,1	7,6	7,7	5,9	5,5	5,9	5,4	3,9	3,9	6,2	6,0								
26.02.2004	5,9	7,3	7,4	6,2	5,1	6,0	5,6	3,6	4,1	6,0	6,0								
08.03.2004	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	5,1	n.b.	n.b.	3,9	n.b.	n.b.	n.b.								
25.03.2004	6,1	7,5	7,5	6,6	5,8	5,7	5,1	3,8	3,8	6,2	5,9								
21.04.2004	6,8	7,4	7,2	6,3	5,4	5,7	5,0	4,1	4,0	6,2	5,8								
25.05.2004	6,3	7,4	7,5	6,5	5,6	6,0	5,2	3,8	4,1	6,1	6,1								
16.06.2004	6,6	7,6	7,6	5,7	5,3	5,2	4,9	3,8	3,8	5,9	6,1								
08.07.2004	5,8	7,5	7,4	5,4	5,0	5,0	5,0	3,6	3,6	4,7	5,7								
22.07.2004	5,7	7,2	7,4	5,8	5,1	5,3	4,6	4,3	4,8	5,6	n.b.								
10.08.2004	5,9	7,2	7,4	5,8	5,0	6,0	5,2	3,9	4,0	6,1	6,2								
31.08.2004	6,0	7,3	7,5	5,2	5,8	5,3	5,9	3,9	4,1	6,2	4,9								
22.09.2004	5,8	6,3	4,9	5,5	5,4	5,3	5,3	4,3	3,2	6,0	6,1								
20.10.2004	6,0	7,0	7,5	6,0	5,4	5,3	5,1	4,4	3,7	6,3	6,0								
24.11.2004	6,4	6,7	7,3	5,9	5,1	5,3	5,5	4,4	4,1	6,0	6,1								
01.12.2004												3,3	3,5	3,4	3,2	3,0	3,5	3,5	3,5
16.12.2004	6,6	7,6	7,3	5,4	4,8	5,2	4,5	3,9	3,7	5,8	5,8								
18.01.2005	6,4	7,1	7,4	5,8	5,5	5,5	5,5	3,9	3,2	5,9	6,1	2,9	3,2	2,9	2,8	2,8	3,0	3,2	3,0
22.03.2005	6,7	6,9	7,2	5,4	5,3	5,7	4,9	3,5	4,2	6,4	6,2								
12.04.2005												3,4	3,3	3,0	2,9	2,8	3,4	3,7	3,0
20.04.2005	6,5	7,2	7,3	6,0	5,6	5,1	5,1	4,1	3,8	6,1	6,0								
02.05.2005												2,9	3,3	3,4	2,8	2,7	3,0	2,7	3,5
07.06.2005	7,1	7,3	7,4	5,1	5,7	5,6	4,9	3,7	3,6	5,7	6,1								
14.06.2005												3,0	3,1	2,7	3,1	2,6	3,1	3,3	2,9
20.06.2005	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	4,1	3,4	6,4	6,1								
12.07.2005	6,3	7,4	7,3	5,7	5,1	5,4	4,7	3,24	3,62	6,0	5,8								
21.07.2005												2,6	3,3	2,7	2,6	2,7	2,8	3,3	2,8
min	5,7	6,3	4,9	5,1	4,8	4,7	4,5	3,2	3,2	4,7	4,9	2,6	3,1	2,7	2,6	2,6	2,8	2,7	2,8
max	7,1	8,2	8,3	6,6	5,8	6,0	5,9	4,4	4,8	6,4	6,4	3,4	3,5	3,4	3,2	3,0	3,5	3,7	3,5
MW	6,8	7,5	7,5	6,2	5,4	5,6	5,3	4,0	4,0	6,5	6,0	3,2	3,3	3,2	3,0	2,8	3,3	3,4	3,3
Median	6,4	7,3	7,4	5,8	5,3	5,3	5,1	3,9	3,9	6,0	6,0	3,1	3,3	3,2	2,9	2,8	3,2	3,4	3,3

Tabelle A9: Elektrische Leitfähigkeit [$\mu\text{S cm}^{-1}$] der Probenahmepunkte im Freiland, (n.b.- nicht bestimmt)

Datum	Nullfl.	K1	K3	W0/1	W0/3	W3/1	W3/3	T1	T2	Q1	Q2	C	1a	1b	1c	1d	1e	2a	2b	2c
21.08.2003	n.b.	292,0	572,0	149,0	118,0	224,0	89,0	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.								
22.09.2003	38,0	569,0	542,0	110,0	190,0	263,0	125,0	232,0	81,0	29,0	36,0	166,0								
10.10.2003	44,0	324,0	1538,0	168,0	110,0	82,0	106,0	204,0	110,0	48,0	44,0	215,0								
28.10.2003	35,0	276,0	994,0	97,0	296,0	55,0	319,0	86,0	73,0	39,0	49,0	n.b.								
27.11.2003	61,0	202,0	828,0	72,0	156,0	49,0	127,0	77,0	n.b.	35,0	35,0	n.b.								
17.12.2003	46,0	119,0	268,0	55,0	106,0	43,0	70,0	219,0	59,0	56,0	43,0	n.b.								
26.02.2004	57,0	234,0	267,0	45,0	79,0	64,0	71,0	109,0	51,0	47,0	51,0	n.b.								
08.03.2004	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	84,0	n.b.	n.b.	67,0	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.								
25.03.2004	50,0	135,0	329,0	53,0	72,0	49,0	89,0	65,0	49,0	44,0	50,0	57,0								
21.04.2004	44,0	194,0	1262,0	66,0	148,0	49,0	101,0	62,0	56,0	44,0	56,0	85,0								
25.05.2004	39,0	126,0	542,0	76,0	129,0	34,0	82,0	106,0	51,0	66,0	31,0	98,0								
16.06.2004	49,0	172,0	246,0	213,0	165,0	95,0	135,0	61,0	176,0	47,0	50,0	80								
22.07.2004	43,0	194,0	186,0	92,0	209,0	60,0	226,0	94,0	64,0	56,0	n.b.	n.b.								
10.08.2004	105,0	147,0	308,0	84,0	211,0	91,0	109,0	66,0	85,0	70,0	222	n.b.								
31.08.2004	119,0	160,0	263,0	123,0	122,0	68,0	63,0	81,0	122,0	82,0	86,0	n.b.								
22.09.2004	51,0	118,0	158,0	112,0	188,0	108,0	102,0	52,0	98,0	165,0	200,0	122								
20.10.2004	40,0	120,0	250,8	66,1	58,0	179,1	110,5	39,3	45,8	63,0	306,0	76,0								
24.11.2004	46,0	52,6	89,9	44,2	79,9	93,3	49,4	38,5	33,2	48,1	42,3	n.b.								
01.12.2004													2005,0	273,3	760,0	1660,0	2673,0	423,0	382,0	464,0
16.12.2004	112,0	154,5	229,6	99,7	380,0	97,7	197,8	67,4	133,0	67,2	70,7	n.b.								
18.01.2005	46,6	110,9	181,0	66,4	69,2	48,5	53,3	51,9	282,1	48,7	54,4	n.b.	874,0	267,1	554,0	1079,0	1362,0	434,0	225,8	662,0
22.03.2005	50,3	93,2	212,7	73,1	107,5	50,1	90,6	276,7	54,8	42,1	43,3	n.b.								
12.04.2005													246,1	262,1	832,0	1418,0	2714,0	282,2	79,8	1247,0
20.04.2005	56,2	127,1	146,7	49,7	40,7	112,3	73,7	97,8	79,2	51,2	43,9	n.b.								
02.05.2005													977,0	217,8	195,8	134,6	2483,0	489,0	1241,0	105,0
07.06.2005	39,1	68,4	83,0	112,2	39,4	57,8	70,3	155,5	198,5	29,6	23,5	n.b.								
14.06.2005													770,0	397,0	1905,0	425,0	2940,0	565,0	229,0	882,0
20.06.2005	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	105,0	392,0	32,0	36,0	n.b.								
12.07.2005	23,9	50,8	165,2	48	90,1	48,1	133,7	133,1	43,4	31,2	342,0									
21.07.2005												n.b.	2670,0	334,0	1517,0	2109,0	2840,0	1368,0	328,0	902,0
min	23,9	50,8	83,0	44,2	39,4	34,0	49,4	38,5	33,2	29,0	23,5	57	246,1	217,8	195,8	134,6	1362,0	282,2	79,8	105,0
max	119,0	569,0	1538,0	213,0	380,0	263,0	319,0	276,7	392,0	165,0	342,0	215,0	2670,0	397,0	1905,0	2109,0	2940,0	1368,0	1241,0	1247,0
MW	54,3	175,6	420,1	90,2	135,3	87,9	112,8	106,1	106,2	54,0	87,1	112,4	1257,0	291,9	960,6	1137,6	2502,0	593,5	414,3	710,3
Median	46,3	147,0	263,0	76,0	114,0	64,0	101,0	83,5	76,1	48,0	49,5	91,5	925,5	270,2	796,0	1248,5	2693,5	461,5	278,5	772,0

Tabelle A10: Messwerte am Punkt 1a

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]	WDPT [s]	Wassergehalt [%]	Corg [%]
01.12.2004	0-1cm	0	0	4.11	0.23
01.12.2004	1-2cm	0	0	3.26	0.22
01.12.2004	2-3cm	0	5	7.64	0.25
01.12.2004	3-4cm	0	5	1.82	0.22
01.12.2004	4-5cm	0	60	1.77	0.29
18.01.2005	0-1cm	0	5	1.68	0.27
18.01.2005	1-2cm	25	600	2.35	0.29
18.01.2005	2-3cm	17.5	60	2.45	0.35
18.01.2005	3-4cm	0	5	2.67	0.46
18.01.2005	4-5cm	0	0	2.85	0.44
12.04.2005	0-1cm	60	1800	1.77	0.55
12.04.2005	1-2cm	57.5	1800	1.74	0.42
12.04.2005	2-3cm	68.5	1200	13.28	0.4
12.04.2005	3-4cm	50	1200	2.15	0.61
12.04.2005	4-5cm	40	600	2.47	0.36
02.05.2005	0-1cm	0	5	0.5	0.34
02.05.2005	1-2cm	0	5	0.71	0.27
02.05.2005	2-3cm	15	600	1.15	0.34
02.05.2005	3-4cm	17.5	600	1.73	0.33
02.05.2005	4-5cm	0	0	2.16	0.28
14.06.2005	0-1cm	0	0	0.07	0.27
14.06.2005	1-2cm	72.5	1800	2.52	0.27
14.06.2005	2-3cm	72.5	2400	2.92	0.27
14.06.2005	3-4cm	87	2400	2.75	0.38
14.06.2005	4-5cm	50	600	2.2	0.28
21.07.2005	0-1cm	45	1800	1.25	0.26
21.07.2005	1-2cm	73.5	3600	1.4	0.26
21.07.2005	2-3cm	62.5	3600	1.18	0.31
21.07.2005	3-4cm	57.5	3000	1.38	0.27
21.07.2005	4-5cm	69	3000	1.34	0.27
19.08.2005	0-1cm	0	0	1.1	0.25
19.08.2005	1-2cm	45	2400	1.06	0.81
19.08.2005	2-3cm	59	3000	0.88	0.66
19.08.2005	3-4cm	62.5	3600	0.8	0.51
19.08.2005	4-5cm	77.5	3600	0.92	0.47
29.09.2005	0-1cm	0	0	4.8	0.34
29.09.2005	1-2cm	0	0	2.2	0.26
29.09.2005	2-3cm	69	3600	1.56	0.26
29.09.2005	3-4cm	72	3600	1.54	0.27
29.09.2005	4-5cm	81.5	3600	1.84	0.27
02.11.2005	0-1cm	0	0	8.1	0.43
02.11.2005	1-2cm	70.5	3600	6.8	0.25
02.11.2005	2-3cm	70.5	3600	5.91	0.36
02.11.2005	3-4cm	76.5	3600	4.09	0.29
02.11.2005	4-5cm	70.5	3600	2.87	0.41
09.12.2005	0-1cm	0	0	2.88	0.09
09.12.2005	2-3cm	0	0	5.4	0.15
09.12.2005	2-3cm	0	0	6.79	0.27
09.12.2005	3-4cm	0	0	7.37	1.23
09.12.2005	4-5cm	0	0	6.61	0.62

Tabelle A11: Messwerte am Punkt 1b

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]	WDPT [s]	Wassergehalt [%]	Corg [%]
01.12.2004	0-1cm	0	0	4.58	0.13
01.12.2004	1-2cm	0	0	3.8	0.13
01.12.2004	2-3cm	0	0	3.84	0.12
01.12.2004	3-4cm	0	0	4.15	0.28
01.12.2004	4-5cm	0	0	3.58	0.18
18.01.2005	0-1cm	0	0	3.71	0.17
18.01.2005	1-2cm	0	0	4.79	0.1
18.01.2005	2-3cm	0	0	2.5	0.07
18.01.2005	3-4cm	0	0	3.34	0.1
18.01.2005	4-5cm	0	0	3.42	0.13
12.04.2005	0-1cm	50	1200	4.09	0.35
12.04.2005	1-2cm	0	5	2.32	0.29
12.04.2005	2-3cm	0	5	2.15	0.29
12.04.2005	3-4cm	0	0	2.48	0.22
12.04.2005	4-5cm	0	0	2.1	0.18
02.05.2005	0-1cm	0	5	1.46	0.3
02.05.2005	1-2cm	0	5	1.29	0.22
02.05.2005	2-3cm	0	0	1.4	0.43
02.05.2005	3-4cm	0	0	1.2	0.43
02.05.2005	4-5cm	0	0	1.22	0.27
14.06.2005	0-1cm	0	0	0.83	0.2
14.06.2005	1-2cm	0	0	0.99	0.24
14.06.2005	2-3cm	0	0	1.23	0.26
14.06.2005	3-4cm	0	0	2.29	0.51
14.06.2005	4-5cm	0	0	5.36	0.7
21.07.2005	0-1cm	0	0	2.03	0.1
21.07.2005	1-2cm	0	0	2.25	0.12
21.07.2005	2-3cm	0	0	3.91	0.15
21.07.2005	3-4cm	0	0	3.14	0.2
21.07.2005	4-5cm	0	0	2.97	0.19
19.08.2005	0-1cm	0	600	2.86	0.25
19.08.2005	1-2cm	0	0	1.59	0.31
19.08.2005	2-3cm	0	0	1.56	0.25
19.08.2005	3-4cm	0	0	1.11	0.22
19.08.2005	4-5cm	0	0	1	0.2
29.09.2005	0-1cm	0	0	10.28	0.21
29.09.2005	1-2cm	0	0	10.09	0.22
29.09.2005	2-3cm	0	0	9.01	0.22
29.09.2005	3-4cm	0	0	7.65	0.21
29.09.2005	4-5cm	0	0	6.64	0.19
02.11.2005	0-1cm	0	0	4.43	0.22
02.11.2005	1-2cm	0	60	5.13	0.16
02.11.2005	2-3cm	0	0	4.83	0.18
02.11.2005	3-4cm	0	0	4.53	0.28
02.11.2005	4-5cm	0	0	4.93	0.25
09.12.2005	0-1cm	0	0	5.41	0.25
09.12.2005	2-3cm	0	0	4.56	0.18
09.12.2005	2-3cm	0	0	2.64	0.22
09.12.2005	3-4cm	0	0	2.57	0.14
09.12.2005	4-5cm	0	0	3.16	0.15

Tabelle A12: Messwerte am Punkt 1c

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]	WDPT [s]	Wassergehalt [%]	Corg [%]
01.12.2004	0-1cm	0	0	6.42	0.28
01.12.2004	1-2cm	0	0	5.85	0.35
01.12.2004	2-3cm	0	0	4.7	0.25
01.12.2004	3-4cm	0	0	3.03	0.27
01.12.2004	4-5cm	0	0	2.88	0.23
18.01.2005	0-1cm	0	0	8.1	0.29
18.01.2005	1-2cm	0	0	3.49	0.3
18.01.2005	2-3cm	0	0	2.82	0.26
18.01.2005	3-4cm	0	0	3.28	0.28
18.01.2005	4-5cm	0	0	4.34	0.29
12.04.2005	0-1cm	40	600	0.52	0.75
12.04.2005	1-2cm	65	1800	0.98	0.42
12.04.2005	2-3cm	55	1800	2.31	0.3
12.04.2005	3-4cm	40	1200	2.88	0.31
12.04.2005	4-5cm	40	600	2.39	0.7
02.05.2005	0-1cm	0	0	0.99	0.37
02.05.2005	1-2cm	66.5	1200	1.91	0.28
02.05.2005	2-3cm	68	1200	2.29	0.28
02.05.2005	3-4cm	59	600	2.38	0.24
02.05.2005	4-5cm	57.5	600	2.01	0.25
14.06.2005	0-1cm	0	0	0.66	0.48
14.06.2005	1-2cm	72	1200	0.94	0.49
14.06.2005	2-3cm	51	1200	1.55	0.77
14.06.2005	3-4cm	78	1800	2.15	0.41
14.06.2005	4-5cm	70	1200	2.7	0.32
21.07.2005	0-1cm	0	0	2.84	0.29
21.07.2005	1-2cm	45	1800	2.3	0.34
21.07.2005	2-3cm	40	1800	1.7	0.3
21.07.2005	3-4cm	60	3600	1.47	0.34
21.07.2005	4-5cm	74.5	3600	1.86	0.38
19.08.2005	0-1cm	0	0	0.5	0.28
19.08.2005	1-2cm	0	5	0.3	0.29
19.08.2005	2-3cm	68	3600	0.69	0.26
19.08.2005	3-4cm	72.5	3600	1.05	0.23
19.08.2005	4-5cm	74.5	2400	0.94	0.36
29.09.2005	0-1cm	0	0	5.04	0.27
29.09.2005	1-2cm	0	0	3.77	0.34
29.09.2005	2-3cm	5	600	2.59	0.35
29.09.2005	3-4cm	69	3600	2.52	0.38
29.09.2005	4-5cm	67	3600	2.78	0.28
02.11.2005	0-1cm	0	0	3.98	0.33
02.11.2005	1-2cm	37.5	3000	2.15	0.28
02.11.2005	2-3cm	70.5	3600	2.01	0.2
02.11.2005	3-4cm	60	3600	2.11	0.24
02.11.2005	4-5cm	50	3600	1.95	0.4
09.12.2005	0-1cm	0	0	7.34	0.28
09.12.2005	2-3cm	0	0	5.1	0.34
09.12.2005	2-3cm	0	0	5.96	0.22
09.12.2005	3-4cm	0	0	3.98	0.26
09.12.2005	4-5cm	0	0	4.58	0.43

Tabelle A13: Messwerte am Punkt 1d, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]	WDPT [s]	Wassergehalt [%]	Corg [%]
01.12.2004	0-1cm	0	0	4.11	0.45
01.12.2004	1-2cm	0	0	7.88	0.27
01.12.2004	2-3cm	0	5	3.12	0.48
01.12.2004	3-4cm	0	0	3.21	1.01
01.12.2004	4-5cm	0	600	2.91	0.46
18.01.2005	0-1cm	0	0	2.82	0.3
18.01.2005	1-2cm	61	1200	1.5	0.29
18.01.2005	2-3cm	0	0	4.52	0.26
18.01.2005	3-4cm	0	0	3.56	0.23
18.01.2005	4-5cm	0	0	3.01	0.28
12.04.2005	0-1cm	45	600	1.24	0.3
12.04.2005	1-2cm	57.5	1800	0.66	0.33
12.04.2005	2-3cm	50	1200	3.63	0.23
12.04.2005	3-4cm	55	1200	2.48	0.22
12.04.2005	4-5cm	47.5	1200	3.26	0.22
02.05.2005	0-1cm	0	60	0.6	0.3
02.05.2005	1-2cm	0	60	0.91	0.24
02.05.2005	2-3cm	71.5	1800	1.16	0.39
02.05.2005	3-4cm	73	1800	1.55	0.35
02.05.2005	4-5cm	75.5	1800	1.71	0.29
14.06.2005	0-1cm	0	0	0.4	0.25
14.06.2005	1-2cm	40	1800	1.21	0.35
14.06.2005	2-3cm	0	5	1.5	0.28
14.06.2005	3-4cm	0	5	2.08	0.35
14.06.2005	4-5cm	0	0	2.83	0.29
21.07.2005	0-1cm	0	0	1.21	0.35
21.07.2005	1-2cm	55	1200	0	0.37
21.07.2005	2-3cm	50	2400	0.98	0.33
21.07.2005	3-4cm	78.5	3600	1.13	0.83
21.07.2005	4-5cm	82.5	3000	1.1	1.6
19.08.2005	0-1cm	0	0	0.28	0.29
19.08.2005	1-2cm	35	2400	2.6	0.33
19.08.2005	2-3cm	55	1200	0.3	0.35
19.08.2005	3-4cm	55	1200	0.47	0.33
19.08.2005	4-5cm	63.5	3000	0.33	0.59
29.09.2005	0-1cm	0	0	5.07	0.43
29.09.2005	1-2cm	0	0	1.59	0.38
29.09.2005	2-3cm	20	1800	2.29	0.28
29.09.2005	3-4cm	61	2400	2.25	0.25
29.09.2005	4-5cm	70	3000	2.13	0.24
02.11.2005	0-1cm	0	0	3.95	0.32
02.11.2005	1-2cm	0	0	4.04	0.55
02.11.2005	2-3cm	52.5	3600	n.b.	0.3
02.11.2005	3-4cm	79.5	3600	0.68	0.3
02.11.2005	4-5cm	82	3600	1.56	0.35
09.12.2005	0-1cm	0	0	3.16	0.29
09.12.2005	2-3cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
09.12.2005	2-3cm	0	0	9.61	2.24
09.12.2005	3-4cm	0	0	3.65	1.84
09.12.2005	4-5cm	0	0	1.71	0.33

Tabelle A14: Messwerte am Punkt 1e

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]	WDPT [s]	Wassergehalt [%]	Corg [%]
01.12.2004	0-1cm	0	0	2.59	0.26
01.12.2004	1-2cm	0	5	1.9	0.27
01.12.2004	2-3cm	0	5	2.09	0.84
01.12.2004	3-4cm	0	5	4.28	2.54
01.12.2004	4-5cm	0	5	4.51	1.39
18.01.2005	0-1cm	0	0	4.83	0.28
18.01.2005	1-2cm	32.5	1200	2.71	0.3
18.01.2005	2-3cm	45	1200	2.24	0.27
18.01.2005	3-4cm	40	1200	2.98	0.36
18.01.2005	4-5cm	50	1200	2.91	0.4
12.04.2005	0-1cm	55	3600	0.58	0.19
12.04.2005	1-2cm	50	3600	0.58	0.22
12.04.2005	2-3cm	61	3600	0.82	0.29
12.04.2005	3-4cm	60.5	3600	1.1	0.24
12.04.2005	4-5cm	67.5	3600	1.15	0.22
02.05.2005	0-1cm	5	60	0.29	0.32
02.05.2005	1-2cm	22.5	1800	0.25	0.26
02.05.2005	2-3cm	47.5	1800	0.32	0.23
02.05.2005	3-4cm	65.5	2400	0.63	0.22
02.05.2005	4-5cm	70.5	2400	0.81	0.38
14.06.2005	0-1cm	0	0	0.6	0.28
14.06.2005	1-2cm	50	600	0.66	0.31
14.06.2005	2-3cm	30	600	1.03	0.29
14.06.2005	3-4cm	50	1800	1.31	0.28
14.06.2005	4-5cm	68.5	1800	1.42	0.34
21.07.2005	0-1cm	60	3600	0.69	0.38
21.07.2005	1-2cm	60	3600	0.69	0.33
21.07.2005	2-3cm	60	3600	0.52	0.26
21.07.2005	3-4cm	60	3600	0.53	0.35
21.07.2005	4-5cm	62.5	3600	0.65	0.32
19.08.2005	0-1cm	0	60	0.67	0.26
19.08.2005	1-2cm	35	1800	0.32	0.35
19.08.2005	2-3cm	52.5	3000	0.29	0.29
19.08.2005	3-4cm	35	2400	0.54	0.27
19.08.2005	4-5cm	52.5	1800	0.83	1.68
29.09.2005	0-1cm	0	0	2.74	0.27
29.09.2005	1-2cm	50	2400	1.63	0.24
29.09.2005	2-3cm	50	2400	1.11	0.29
29.09.2005	3-4cm	52.5	2400	0.98	0.2
29.09.2005	4-5cm	57.5	2400	1.54	0.23
02.11.2005	0-1cm	0	0	1.87	0.27
02.11.2005	1-2cm	57.5	3600	1.14	0.25
02.11.2005	2-3cm	57.5	3600	1.11	0.27
02.11.2005	3-4cm	55	3000	1.36	0.22
02.11.2005	4-5cm	52.5	2400	1.61	0.22
09.12.2005	0-1cm	0	0	3.45	0.27
09.12.2005	2-3cm	0	0	1.65	0.19
09.12.2005	2-3cm	0	0	1.33	0.21
09.12.2005	3-4cm	0	0	1.37	0.33
09.12.2005	4-5cm	0	0	1.98	0.26

Tabelle A15: Messwerte am Punkt 2a

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]	WDPT [s]	Wassergehalt [%]	Corg [%]
01.12.2004	0-1cm	0	0	4.6	0.37
01.12.2004	1-2cm	0	0	3.15	0.34
01.12.2004	2-3cm	0	0	2.51	0.32
01.12.2004	3-4cm	0	5	4.67	0.31
01.12.2004	4-5cm	0	5	0	0.29
18.01.2005	0-1cm	0	0	3.62	0.37
18.01.2005	1-2cm	27.5	5	3.26	0.44
18.01.2005	2-3cm	35	600	7.52	0.22
18.01.2005	3-4cm	0	1200	3.42	0.26
18.01.2005	4-5cm	0	5	4.11	0.25
12.04.2005	0-1cm	78	1800	0.87	0.87
12.04.2005	1-2cm	63	1800	1.08	0.59
12.04.2005	2-3cm	80	1800	1.62	0.53
12.04.2005	3-4cm	73	1800	2.04	0.44
12.04.2005	4-5cm	62.5	1800	1.98	0.41
02.05.2005	0-1cm	0	0	0.43	0.97
02.05.2005	1-2cm	68	1800	0.57	0.47
02.05.2005	2-3cm	47.5	1800	0.98	0.42
02.05.2005	3-4cm	70	2400	1.48	0.28
02.05.2005	4-5cm	67.5	2400	1.47	0.29
14.06.2005	0-1cm	0	0	1.1	0.34
14.06.2005	1-2cm	57.5	3600	0.66	0.28
14.06.2005	2-3cm	60	3600	0.77	0.29
14.06.2005	3-4cm	68.5	3600	1.28	0.23
14.06.2005	4-5cm	70	3600	1.13	0.31
21.07.2005	0-1cm	0	5	1.7	0.37
21.07.2005	1-2cm	47.5	2400	1.51	0.34
21.07.2005	2-3cm	78.5	3600	2.47	0.38
21.07.2005	3-4cm	78	3600	2.11	0.44
21.07.2005	4-5cm	69	2400	2.07	0.53
19.08.2005	0-1cm	25	600	0.26	0.31
19.08.2005	1-2cm	68	3600	0.26	0.24
19.08.2005	2-3cm	72.5	3600	0.29	0.25
19.08.2005	3-4cm	78.5	3600	0.49	0.23
19.08.2005	4-5cm	60.5	3600	0.84	0.18
29.09.2005	0-1cm	0	0	5.08	0.28
29.09.2005	1-2cm	69.5	3000	2.84	0.25
29.09.2005	2-3cm	63	3000	2.4	0.19
29.09.2005	3-4cm	62	3600	2.15	0.2
29.09.2005	4-5cm	50	2400	2.43	0.22
02.11.2005	0-1cm	0	0	4.89	0.29
02.11.2005	1-2cm	40	2400	3.45	0.28
02.11.2005	2-3cm	64.5	3600	5.21	0.27
02.11.2005	3-4cm	61	3000	4.53	0.24
02.11.2005	4-5cm	45	2400	2.05	0.21
09.12.2005	0-1cm	0	0	4.59	0.58
09.12.2005	2-3cm	0	0	2.84	0.19
09.12.2005	2-3cm	0	0	3.05	0.14
09.12.2005	3-4cm	0	0	3.2	0.18
09.12.2005	4-5cm	0	0	3.05	0.22

Tabelle A16: Messwerte am Punkt 2b

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]	WDPT [s]	Wassergehalt [%]	Corg [%]
01.12.2004	0-1cm	0	0	3.33	0.29
01.12.2004	1-2cm	0	0	4.91	0.41
01.12.2004	2-3cm	0	0	3.87	0.3
01.12.2004	3-4cm	0	0	4.23	0.28
01.12.2004	4-5cm	0	0	0	0.23
18.01.2005	0-1cm	0	0	2.13	0.27
18.01.2005	1-2cm	55	600	2.65	0.28
18.01.2005	2-3cm	0	60	2.76	0.26
18.01.2005	3-4cm	0	5	2.55	0.29
18.01.2005	4-5cm	0	5	3.24	0.2
12.04.2005	0-1cm	0	5	0.69	0.33
12.04.2005	1-2cm	60	120	1.41	0.26
12.04.2005	2-3cm	0	5	1.96	0.25
12.04.2005	3-4cm	0	5	2.25	0.27
12.04.2005	4-5cm	0	5	2.06	0.3
02.05.2005	0-1cm	15	600	0.56	0.27
02.05.2005	1-2cm	40	600	0.67	0.28
02.05.2005	2-3cm	40	600	1.05	0.31
02.05.2005	3-4cm	45	600	1.53	0.27
02.05.2005	4-5cm	52.5	600	2.04	0.3
14.06.2005	0-1cm	0	0	0.86	0.35
14.06.2005	1-2cm	57.5	1800	1.13	0.26
14.06.2005	2-3cm	70	2400	1.43	0.29
14.06.2005	3-4cm	20	2400	1.85	0.27
14.06.2005	4-5cm	0	0	2	0.27
21.07.2005	0-1cm	0	0	1.9	0.26
21.07.2005	1-2cm	0	0	2.02	0.35
21.07.2005	2-3cm	0	0	2.22	0.26
21.07.2005	3-4cm	0	0	2.07	0.3
21.07.2005	4-5cm	0	0	2.41	0.29
19.08.2005	0-1cm	0	5	1.36	0.23
19.08.2005	1-2cm	0	5	0.81	0.19
19.08.2005	2-3cm	0	0	0.61	0.22
19.08.2005	3-4cm	0	0	1.68	0.27
19.08.2005	4-5cm	0	0	1.71	0.28
29.09.2005	0-1cm	0	0	3.83	0.36
29.09.2005	1-2cm	45	120	2.42	0.35
29.09.2005	2-3cm	35	600	3.43	0.32
29.09.2005	3-4cm	0	120	3.75	0.33
29.09.2005	4-5cm	0	0	3.76	0.3
02.11.2005	0-1cm	0	0	3.69	0.18
02.11.2005	1-2cm	0	0	2.87	0.81
02.11.2005	2-3cm	0	0	3.75	0.74
02.11.2005	3-4cm	0	0	3.69	0.32
02.11.2005	4-5cm	0	0	3.97	0.39
09.12.2005	0-1cm	0	0	4.6	0.17
09.12.2005	2-3cm	0	0	4.95	0.1
09.12.2005	2-3cm	0	0	4.78	0.09
09.12.2005	3-4cm	0	0	4.54	0.1
09.12.2005	4-5cm	0	0	4.74	0.12

Tabelle A17: Messwerte am Punkt 2c

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]	WDPT [s]	Wassergehalt [%]	Corg [%]
01.12.2004	0-1cm	0	0	2.89	0.27
01.12.2004	1-2cm	10	60	3.02	0.29
01.12.2004	2-3cm	22.5	600	2.61	0.31
01.12.2004	3-4cm	10	60	3.73	0.39
01.12.2004	4-5cm	0	0	3.29	0.57
18.01.2005	0-1cm	0	0	4.09	0.24
18.01.2005	1-2cm	0	600	2.11	0.33
18.01.2005	2-3cm	7.5	600	1.01	0.32
18.01.2005	3-4cm	0	5	3.98	0.36
18.01.2005	4-5cm	0	0	3.18	0.29
12.04.2005	0-1cm	50	1200	0.98	0.98
12.04.2005	1-2cm	64	1200	1.04	0.46
12.04.2005	2-3cm	62.5	1800	1.71	0.48
12.04.2005	3-4cm	65.5	1800	1.97	0.52
12.04.2005	4-5cm	60	1200	2.32	0.62
02.05.2005	0-1cm	50	1200	0.54	0.38
02.05.2005	1-2cm	55	1200	0.81	0.39
02.05.2005	2-3cm	68.5	1800	1.02	0.49
02.05.2005	3-4cm	70	1800	1.6	0.76
02.05.2005	4-5cm	66	1800	1.88	0.72
14.06.2005	0-1cm	0	0	0.49	0.23
14.06.2005	1-2cm	67.5	2400	0.75	0.25
14.06.2005	2-3cm	85	3000	1.2	0.25
14.06.2005	3-4cm	69.5	3000	1.73	0.23
14.06.2005	4-5cm	76.5	3000	2.04	0.26
21.07.2005	0-1cm	17.5	600	2.66	0.32
21.07.2005	1-2cm	71.5	3600	1.84	0.27
21.07.2005	2-3cm	68.5	3600	1.7	0.3
21.07.2005	3-4cm	60	3000	1.79	0.26
21.07.2005	4-5cm	40	1200	2.25	0.25
19.08.2005	0-1cm	7.5	600	1.41	0.36
19.08.2005	1-2cm	64.5	3600	0.32	0.31
19.08.2005	2-3cm	72.5	3600	0.68	0.29
19.08.2005	3-4cm	64.5	3600	0.62	0.3
19.08.2005	4-5cm	45	3600	1.08	0.3
29.09.2005	0-1cm	0	0	6.29	0.31
29.09.2005	1-2cm	0	0	3.92	0.42
29.09.2005	2-3cm	0	0	3.32	0.38
29.09.2005	3-4cm	0	5	3.9	0.36
29.09.2005	4-5cm	0	0	4.88	0.36
02.11.2005	0-1cm	0	0	3.79	0.27
02.11.2005	1-2cm	0	60	2.17	0.31
02.11.2005	2-3cm	0	60	1.9	0.32
02.11.2005	3-4cm	12.5	600	2.28	0.25
02.11.2005	4-5cm	5	1200	2.07	0.4
09.12.2005	0-1cm	0	0	3.54	0.18
09.12.2005	2-3cm	0	0	2.12	0.14
09.12.2005	2-3cm	0	0	2.68	0.23
09.12.2005	3-4cm	0	0	2.9	0.29
09.12.2005	4-5cm	0	0	3.62	0.34

Tabelle A18: Messwerte am Punkt T1, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
22.09.2003	0-1cm	0	0	0	0	0.3	0.42
22.09.2003	1-2cm	48.5	0	600	0	0.3	0.42
22.09.2003	2-3cm	65.5	0	1200	0	0.3	0.42
22.09.2003	3-4cm	57.5	0	1800	0	0.3	0.42
22.09.2003	4-5cm	84.5	0	2400	0	0.3	0.42
10.10.2003	0-1cm	0	45	0	0	3.02	1.15
10.10.2003	1-2cm	0	30	3000	0	1.91	0.88
10.10.2003	2-3cm	0	20	3600	0	n.b.	0.57
10.10.2003	3-4cm	0	15	3600	0	1.25	0.67
10.10.2003	4-5cm	0	30	2400	0	1.45	0.8
28.10.2003	0-1cm	0	0	60	0	7.6	0.29
28.10.2003	1-2cm	0	0	60	0	6.53	0.42
28.10.2003	2-3cm	0	0	60	0	6.43	0.37
28.10.2003	3-4cm	0	0	60	0	4.43	0.33
28.10.2003	4-5cm	0	0	60	0	4.35	0.32
27.11.2003	0-1cm	0	25	0	0	4.36	0.31
27.11.2003	1-2cm	0	12.5	0	0	5.39	0.34
27.11.2003	2-3cm	0	0	0	0	3.93	0.23
27.11.2003	3-4cm	0	0	0	0	2.71	0.76
27.11.2003	4-5cm	0	0	0	0	2.77	0.33
17.12.2003	0-1cm	0	0	60	0	33.19	0.3
17.12.2003	1-2cm	0	0	60	0	25.69	0.24
17.12.2003	2-3cm	0	0	60	0	3.8	0.23
17.12.2003	3-4cm	0	0	60	0	2.19	0.38
17.12.2003	4-5cm	0	0	60	0	2.71	0.32
26.02.2004	0-1cm	0	5	0	0	4.76	0.41
26.02.2004	1-2cm	0	0	0	0	3.17	0.49
26.02.2004	2-3cm	0	5	0	0	2.08	0.36
26.02.2004	3-4cm	0	0	0	0	2.51	0.32
26.02.2004	4-5cm	0	0	0	0	6.87	0.38
08.03.2004	0-1cm	0	0	0	0	2.38	n.b.
08.03.2004	1-2cm	0	0	0	0	2.79	n.b.
08.03.2004	2-3cm	0	0	0	0	2.96	n.b.
08.03.2004	3-4cm	0	0	0	0	3.97	n.b.
08.03.2004	4-5cm	0	0	0	0	3.92	n.b.
25.03.2004	0-1cm	0	25	5	5	3.11	0.31
25.03.2004	1-2cm	0	25	60	5	3.42	0.35
25.03.2004	2-3cm	0	12.5	60	5	4.3	0.35
25.03.2004	3-4cm	0	0	60	0	7.39	0.28
25.03.2004	4-5cm	0	0	5	0	4.42	0.36
21.04.2004	0-1cm	0	27.5	600	5	0.97	0.3
21.04.2004	1-2cm	0	30	600	5	0.39	0.35
21.04.2004	2-3cm	0	35	600	5	0.38	0.35
21.04.2004	3-4cm	0	52	600	5	0.61	0.34
21.04.2004	4-5cm	0	12.5	600	5	0.98	0.28
25.05.2004	0-1cm	0	15	0	0	2.6	0.26
25.05.2004	1-2cm	0	0	5	0	2.75	0.22
25.05.2004	2-3cm	0	0	600	0	2.31	0.29
25.05.2004	3-4cm	0	5	5	0	2.43	0.28
25.05.2004	4-5cm	0	27.5	600	0	2.37	0.29

Fortsetzung Tabelle A18: Messwerte am Punkt T1

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
16.06.2004	0-1cm	0	12.5	0	0	3.13	0.33
16.06.2004	1-2cm	0	12.5	0	0	3.32	0.32
16.06.2004	2-3cm	0	0	0	0	2.6	0.39
16.06.2004	3-4cm	0	0	0	0	2.09	0.4
16.06.2004	4-5cm	0	0	0	0	2.48	0.47
08.07.2004	0-1cm	40	20	600	0	0.39	0.58
08.07.2004	1-2cm	72.5	0	2400	0	0.5	0.38
08.07.2004	2-3cm	66.5	22.5	2400	0	0.58	0.38
08.07.2004	3-4cm	55	0	2400	0	0.71	0.35
08.07.2004	4-5cm	71	10	2400	0	0.57	0.36
22.07.2004	0-1cm	0	30	0	0	0.82	0.29
22.07.2004	1-2cm	0	27.5	0	0	1.24	0.39
22.07.2004	2-3cm	0	0	5	0	2.02	0.51
22.07.2004	3-4cm	0	0	5	0	3.93	0.33
22.07.2004	4-5cm	0	0	0	0	3.26	0.41
10.08.2004	0-1cm	50	30	1200	0	0.05	0.23
10.08.2004	1-2cm	52.5	25	1200	0	0.35	0.35
10.08.2004	2-3cm	55	20	1200	0	0.53	0.36
10.08.2004	3-4cm	63	0	1200	0	0.81	0.47
10.08.2004	4-5cm	64.5	0	1200	0	0.69	0.54
31.08.2004	0-1cm	0	0	0	0	2.7	0.35
31.08.2004	1-2cm	76.5	0	3600	0	2.62	0.52
31.08.2004	2-3cm	73	10	3600	0	3.1	0.54
31.08.2004	3-4cm	50	20	1800	0	2.59	0.44
31.08.2004	4-5cm	45	0	1200	0	5.31	0.33
22.09.2004	0-1cm	0	10	0	0	1.71	0.35
22.09.2004	1-2cm	70	10	1200	0	1.42	0.39
22.09.2004	2-3cm	67.5	30	2400	0	1.2	0.32
22.09.2004	3-4cm	65	0	2400	0	1.32	0.36
22.09.2004	4-5cm	45	0	600	0	1.51	0.3
20.10.2004	0-1cm	0	17.5	0	0	1.45	0.39
20.10.2004	1-2cm	62	22.5	3600	0	1.57	0.39
20.10.2004	2-3cm	68.5	5	3600	0	1.63	0.32
20.10.2004	3-4cm	52.5	0	1800	0	1.96	0.31
20.10.2004	4-5cm	7.5	0	600	0	2.29	0.31
24.11.2004	0-1cm	0	17.5	0	0	2.38	0.36
24.11.2004	1-2cm	0	5	0	0	1.91	0.32
24.11.2004	2-3cm	0	0	0	0	1.65	0.46
24.11.2004	3-4cm	0	0	0	0	1.95	0.62
24.11.2004	4-5cm	0	0	0	0	2.15	0.44
16.12.2004	0-1cm	0	0	0	0	3.1	0.56
16.12.2004	1-2cm	0	0	0	0	3.58	0.32
16.12.2004	2-3cm	0	20	0	0	2.54	0.32
16.12.2004	3-4cm	0	0	0	0	2.55	0.32
16.12.2004	4-5cm	0	0	0	0	2.76	0.3
18.01.2005	0-1cm	22.5	0	0	0	5.38	0.28
18.01.2005	1-2cm	5	0	0	0	4.75	0.39
18.01.2005	2-3cm	5	0	0	0	2.87	0.49
18.01.2005	3-4cm	0	0	0	0	3.45	0.42
18.01.2005	4-5cm	0	0	0	0	3.07	0.42

Fortsetzung Tabelle A18: Messwerte am Punkt T1, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
22.03.2005	0-1cm	0	0	0	0	1.98	0.32
22.03.2005	1-2cm	42.5	5	600	0	0.56	0.23
22.03.2005	2-3cm	5	0	600	0	2.69	0.2
22.03.2005	3-4cm	0	5	5	0	5.11	0.25
22.03.2005	4-5cm	0	0	5	0	2.84	0.25
20.04.2005	0-1cm	0	15	5	0	0.76	0.32
20.04.2005	1-2cm	0	0	5	0	1.24	0.38
20.04.2005	2-3cm	60	0	0	0	1.57	0.43
20.04.2005	3-4cm	50	0	0	0	1.79	0.39
20.04.2005	4-5cm	50	0	0	0	1.68	0.36
07.06.2005	0-1cm	0	0	0	0	5.74	n.b.
07.06.2005	1-2cm	10	0	600	0	2.78	n.b.
07.06.2005	2-3cm	35	0	1200	0	2.2	n.b.
07.06.2005	3-4cm	0	0	5	0	2.16	n.b.
07.06.2005	4-5cm	0	0	5	0	2.29	n.b.
20.06.2005	0-1cm	0	5	1200	0	0.9	n.b.
20.06.2005	1-2cm	37.5	10	1800	0	0.78	n.b.
20.06.2005	2-3cm	61	27.5	3000	0	0.88	n.b.
20.06.2005	3-4cm	60	0	3600	0	1.24	n.b.
20.06.2005	4-5cm	42.5	0	60	0	1.69	n.b.
12.07.2005	0-1cm	0	0	5	0	0.62	n.b.
12.07.2005	1-2cm	67	0	3600	0	0.95	n.b.
12.07.2005	2-3cm	52.5	0	360	0	1.04	n.b.
12.07.2005	3-4cm	62.5	0	1800	0	1.29	n.b.
12.07.2005	4-5cm	61	0	1200	0	1.18	n.b.
19.08.2005	0-1cm	0	10	5	0	1.35	0.31
19.08.2005	1-2cm	45	12.5	3600	0	0.95	0.29
19.08.2005	2-3cm	70	0	3600	0	0.62	0.33
19.08.2005	3-4cm	73.5	10	3600	0	1.04	0.32
19.08.2005	4-5cm	67	10	3600	0	1.61	0.28
20.09.2005	0-1cm	42.5	10	60	0	0.93	0.32
20.09.2005	1-2cm	64	20	3600	0	1.26	0.4
20.09.2005	2-3cm	61	10	3600	0	1.83	0.3
20.09.2005	3-4cm	40	0	1800	0	2.04	0.26
20.09.2005	4-5cm	0	0	60	0	2.22	0.31
19.10.2005	0-1cm	0	35	0	5	1	0.35
19.10.2005	1-2cm	37.5	10	60	0	1.58	0.41
19.10.2005	2-3cm	50	12.5	600	0	1.67	0.56
19.10.2005	3-4cm	50	0	600	0	1.68	0.59
19.10.2005	4-5cm	37.5	0	600	0	1.82	0.43
09.12.2005	0-1cm	0	n.b.	0	n.b.	6.03	n.b.
09.12.2005	1-2cm	0	n.b.	0	n.b.	3.42	n.b.
09.12.2005	2-3cm	0	n.b.	0	n.b.	3.33	n.b.
09.12.2005	3-4cm	0	n.b.	0	n.b.	3.1	n.b.
09.12.2005	4-5cm	0	n.b.	0	n.b.	3.67	n.b.

Tabelle A19: Messwerte am Punkt T2, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
22.09.2003	0-1cm	0	35	0	n.b.	0.3	0.29
22.09.2003	1-2cm	0	35	0	n.b.	0.3	0.29
22.09.2003	2-3cm	27.5	35	600	n.b.	0.3	0.29
22.09.2003	3-4cm	72.5	35	1200	n.b.	0.3	0.29
22.09.2003	4-5cm	60	35	1800	n.b.	0.3	0.29
10.10.2003	0-1cm	0	37.5	0	0	2.72	0.21
10.10.2003	1-2cm	0	30	0	0	7.74	0.31
10.10.2003	2-3cm	0	32.5	0	0	2.72	0.53
10.10.2003	3-4cm	0	25	0	0	3.13	0.4
10.10.2003	4-5cm	0	35	0	0	3.75	0.76
28.10.2003	0-1cm	0	0	5	0	5.81	0.24
28.10.2003	1-2cm	0	0	5	0	4.98	0.23
28.10.2003	2-3cm	0	0	60	0	3.32	0.28
28.10.2003	3-4cm	0	0	0	0	4.58	0.3
28.10.2003	4-5cm	0	0	60	0	4.48	0.32
27.11.2003	0-1cm	0	35	0	0	3.06	n.b.
27.11.2003	1-2cm	0	10	0	0	3.36	n.b.
27.11.2003	2-3cm	0	10	0	0	2.76	n.b.
27.11.2003	3-4cm	0	n.b.	0	n.b.	3.06	n.b.
27.11.2003	4-5cm	0	n.b.	0	n.b.	4.38	n.b.
17.12.2003	0-1cm	0	0	5	5	n.b.	0.28
17.12.2003	1-2cm	0	0	5	0	6.36	0.02
17.12.2003	2-3cm	0	0	60	0	4.85	0.37
17.12.2003	3-4cm	0	0	60	0	6.28	0.47
17.12.2003	4-5cm	0	0	60	0	30.33	0.32
26.02.2004	0-1cm	0	0	0	0	5.95	0.55
26.02.2004	1-2cm	0	5	0	0	6.44	1.32
26.02.2004	2-3cm	0	0	0	0	11.65	1.41
26.02.2004	3-4cm	0	5	0	0	9.15	0.34
26.02.2004	4-5cm	0	7.5	0	0	10.36	0.51
08.03.2004	0-1cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	1-2cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	2-3cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	3-4cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	4-5cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
25.03.2004	0-1cm	0	0	5	0	1.84	0.29
25.03.2004	1-2cm	0	12.5	0	5	1.63	0.14
25.03.2004	2-3cm	0	15	0	5	1.49	0.31
25.03.2004	3-4cm	0	0	5	0	3.17	0.3
25.03.2004	4-5cm	0	0	5	5	2.66	0.29
21.04.2004	0-1cm	0	22.5	600	5	0.79	0.26
21.04.2004	1-2cm	0	20	600	5	0.77	0.21
21.04.2004	2-3cm	0	25	600	5	0.56	0.17
21.04.2004	3-4cm	0	40	600	5	0.81	0.29
21.04.2004	4-5cm	0	37.5	600	5	0.74	0.23
25.05.2004	0-1cm	47.5	0	600	0	1.87	0.45
25.05.2004	1-2cm	30	12.5	600	0	3.24	0.73
25.05.2004	2-3cm	0	20	600	0	3.7	0.51
25.05.2004	3-4cm	0	15	5	0	3.91	0.24
25.05.2004	4-5cm	0	0	5	0	2.85	0.29

Fortsetzung Tabelle A19: Messwerte am Punkt T2

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
16.06.2004	0-1cm	0	30	0	0	1.13	0.38
16.06.2004	1-2cm	58.8	5	3000	5	0.88	0.34
16.06.2004	2-3cm	62.5	0	3600	5	1.36	0.34
16.06.2004	3-4cm	60.5	15	1800	5	1.17	0.27
16.06.2004	4-5cm	22.5	22.5	600	5	1.75	0.36
08.07.2004	0-1cm	0	15	60	0	0.49	0.24
08.07.2004	1-2cm	0	32.5	600	0	0.54	0.33
08.07.2004	2-3cm	61.5	30	2400	0	0.42	0.32
08.07.2004	3-4cm	81.5	22.5	2400	0	0.82	0.47
08.07.2004	4-5cm	61	12.5	2400	0	0.8	0.43
22.07.2004	0-1cm	0	0	0	0	1.16	0.29
22.07.2004	1-2cm	0	0	0	0	1.27	0.23
22.07.2004	2-3cm	0	15	0	0	1.78	0.17
22.07.2004	3-4cm	0	0	0	0	2.21	0.22
22.07.2004	4-5cm	0	0	0	0	3.64	0.27
10.08.2004	0-1cm	0	35	0	0	0.27	0.27
10.08.2004	1-2cm	0	30	0	0	0.3	0.29
10.08.2004	2-3cm	0	22.5	0	0	0.61	0.25
10.08.2004	3-4cm	12.5	25	600	0	1.64	0.5
10.08.2004	4-5cm	47.5	25	600	0	1.65	1.07
31.08.2004	0-1cm	0	0	0	0	1.74	0.23
31.08.2004	1-2cm	0	5	5	0	1.71	0.24
31.08.2004	2-3cm	0	20	5	0	2.03	0.58
31.08.2004	3-4cm	0	0	0	0	2.74	0.52
31.08.2004	4-5cm	0	0	5	0	2.22	0.42
22.09.2004	0-1cm	0	0	0	0	2.94	0.34
22.09.2004	1-2cm	17.5	30	60	0	1.65	0.38
22.09.2004	2-3cm	61	0	2400	0	1.17	0.4
22.09.2004	3-4cm	50	5	2400	0	1.08	0.29
22.09.2004	4-5cm	52.5	10	1800	0	1.25	0.53
20.10.2004	0-1cm	0	40	5	0	0.74	0.31
20.10.2004	1-2cm	64	7.5	3600	0	1.04	0.22
20.10.2004	2-3cm	50	0	1800	0	1.23	0.39
20.10.2004	3-4cm	55	0	3600	0	2.05	0.36
20.10.2004	4-5cm	35	0	600	0	2.23	0.29
24.11.2004	0-1cm	0	15	0	0	2.09	0.34
24.11.2004	1-2cm	25	5	60	0	2.63	0.18
24.11.2004	2-3cm	10	5	60	0	2.58	0.29
24.11.2004	3-4cm	0	0	60	0	2.14	0.22
24.11.2004	4-5cm	0	0	60	0	2.07	0.35
16.12.2004	0-1cm	0	0	0	0	2.13	0.28
16.12.2004	1-2cm	0	0	0	0	2.51	0.48
16.12.2004	2-3cm	0	0	0	0	2.49	0.38
16.12.2004	3-4cm	0	0	0	0	2.68	0.27
16.12.2004	4-5cm	0	0	0	0	2.44	0.4
18.01.2005	0-1cm	0	0	0	0	2.74	0.48
18.01.2005	1-2cm	12.5	0	0	0	2.26	0.44
18.01.2005	2-3cm	25	52.5	0	1800	1.83	0.42
18.01.2005	3-4cm	5	22.5	0	1800	2.04	0.38
18.01.2005	4-5cm	20	0	0	5	2.31	0.34

Fortsetzung Tabelle A19: Messwerte am Punkt T2, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
22.03.2005	0-1cm	0	12.5	0	0	1.74	0.45
22.03.2005	1-2cm	0	15	0	0	2.02	0.47
22.03.2005	2-3cm	0	0	5	0	2.57	0.45
22.03.2005	3-4cm	0	5	0	0	3.85	0.51
22.03.2005	4-5cm	0	5	5	0	3.15	0.41
20.04.2005	0-1cm	0	0	0	0	0.44	0.26
20.04.2005	1-2cm	30	0	600	0	0.84	0.28
20.04.2005	2-3cm	55	0	1200	0	1.25	0.27
20.04.2005	3-4cm	25	0	600	0	2.27	0.31
20.04.2005	4-5cm	0	0	5	0	2.83	0.37
07.06.2005	0-1cm	0	0	0	0	4.05	0.41
07.06.2005	1-2cm	0	0	5	0	1.99	0.4
07.06.2005	2-3cm	50	0	1200	0	1.9	0.38
07.06.2005	3-4cm	45	0	1200	0	2.8	0.37
07.06.2005	4-5cm	0	0	600	0	2.31	0.31
20.06.2005	0-1cm	0	0	0	0	0.26	0.24
20.06.2005	1-2cm	67	0	2400	0	0.3	0.41
20.06.2005	2-3cm	65.5	0	2400	0	0.34	0.37
20.06.2005	3-4cm	70	10	2400	0	0.72	0.26
20.06.2005	4-5cm	64	0	3000	0	0.74	0.42
12.07.2005	0-1cm	0	0	0	0	0.51	0.25
12.07.2005	1-2cm	17.5	10	600	0	0.63	0.26
12.07.2005	2-3cm	47.5	15	1200	0	0.77	0.28
12.07.2005	3-4cm	50	0	1200	0	1.17	0.3
12.07.2005	4-5cm	57.5	0	600	0	1.42	0.29
19.08.2005	0-1cm	0	20	0	0	0.72	0.25
19.08.2005	1-2cm	65	22.5	1800	0	0.57	0.24
19.08.2005	2-3cm	0	0	600	0	0.64	0.41
19.08.2005	3-4cm	0	0	5	0	1.24	0.72
19.08.2005	4-5cm	0	0	5	0	0.99	1.13
20.09.2005	0-1cm	0	0	0	0	0.47	0.34
20.09.2005	1-2cm	40	0	600	0	0.85	0.31
20.09.2005	2-3cm	60	0	3600	0	1.35	0.26
20.09.2005	3-4cm	57.5	0	3600	0	1.7	0.29
20.09.2005	4-5cm	45	0	1200	0	1.66	0.25
19.10.2005	0-1cm	0	5	0	0	1.01	0.36
19.10.2005	1-2cm	73.5	0	3600	0	1.35	0.35
19.10.2005	2-3cm	69.5	20	3600	0	1.76	0.28
19.10.2005	3-4cm	74	0	3600	0	1.56	0.31
19.10.2005	4-5cm	60	0	3600	0	1.69	0.4
09.12.2005	0-1cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	6.64	n.b.
09.12.2005	1-2cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	4.75	n.b.
09.12.2005	2-3cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	6.71	n.b.
09.12.2005	3-4cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	2.93	n.b.
09.12.2005	4-5cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	3.55	n.b.

Tabelle A20: Messwerte am Punkt NF

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
22.09.2003	0-1cm	0	32.5	0	0	8.82	0.08
22.09.2003	1-2cm	0	0	0	0	8.82	0.08
22.09.2003	2-3cm	0	17.5	0	0	8.82	0.08
22.09.2003	3-4cm	0	25	0	0	8.82	0.08
22.09.2003	4-5cm	0	0	0	0	8.82	0.08
10.10.2003	0-1cm	0	0	0	0	4.68	0.1
10.10.2003	1-2cm	0	25	0	0	6.22	0.1
10.10.2003	2-3cm	0	0	0	0	4.86	0.08
10.10.2003	3-4cm	0	0	0	0	4.41	0.08
10.10.2003	4-5cm	0	0	0	0	4.52	0.05
28.10.2003	0-1cm	0	20	0	0	2.83	0.11
28.10.2003	1-2cm	0	0	0	0	4.57	0.06
28.10.2003	2-3cm	0	20	0	0	4.14	0.07
28.10.2003	3-4cm	0	10	0	0	3.89	0.05
28.10.2003	4-5cm	0	20	0	0	4.42	0.08
27.11.2003	0-1cm	0	0	0	0	4.82	0.11
27.11.2003	1-2cm	0	15	0	0	5.59	0.07
27.11.2003	2-3cm	0	0	0	0	5.28	0.08
27.11.2003	3-4cm	0	0	0	0	5.51	0.07
27.11.2003	4-5cm	0	0	0	0	5.78	0.07
17.12.2003	0-1cm	0	0	0	0	6.39	0.15
17.12.2003	1-2cm	0	0	0	0	7.38	0.11
17.12.2003	2-3cm	0	12.5	0	0	7.76	0.08
17.12.2003	3-4cm	0	0	0	0	7.07	0.07
17.12.2003	4-5cm	0	25	0	0	6.69	0.06
26.02.2004	0-1cm	0	0	0	0	6.38	0.16
26.02.2004	1-2cm	0	0	0	0	6	0.08
26.02.2004	2-3cm	0	0	0	0	5.78	0.08
26.02.2004	3-4cm	0	0	0	0	4.71	0.07
26.02.2004	4-5cm	0	0	0	0	4.23	0.06
25.03.2004	0-1cm	0	10	0	0	3.87	0.22
25.03.2004	1-2cm	0	0	0	0	3.43	0.12
25.03.2004	2-3cm	0	0	0	0	3.94	0.13
25.03.2004	3-4cm	0	15	0	0	4.2	0.14
25.03.2004	4-5cm	0	0	0	0	4.34	0.15
21.04.2004	0-1cm	0	30	0	0	0.78	0.12
21.04.2004	1-2cm	0	0	0	0	0.61	0.17
21.04.2004	2-3cm	0	15	0	0	0.85	0.12
21.04.2004	3-4cm	0	20	0	0	0.89	0.11
21.04.2004	4-5cm	0	12.5	0	0	0.8	0.14
25.05.2004	0-1cm	0	5	0	0	4.19	0.16
25.05.2004	1-2cm	0	25	0	0	3.8	0.11
25.05.2004	2-3cm	0	15	0	0	4.16	0.1
25.05.2004	3-4cm	0	15	0	0	3.95	0.13
25.05.2004	4-5cm	0	20	0	0	4.27	0.12
16.06.2004	0-1cm	0	25	0	0	5.19	0.19
16.06.2004	1-2cm	0	10	0	0	4.77	0.16
16.06.2004	2-3cm	0	25	0	0	4.51	0.1
16.06.2004	3-4cm	0	15	0	0	4.7	0.11
16.06.2004	4-5cm	0	12.5	0	0	4.4	0.36

Fortsetzung Tabelle A20: Messwerte am Punkt NF, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
08.07.2004	0-1cm	0	25	0	0	0.31	1.17
08.07.2004	1-2cm	0	15	0	0	0.27	0.12
08.07.2004	2-3cm	0	15	0	0	0.28	0.12
08.07.2004	3-4cm	0	0	0	0	0.65	0.1
08.07.2004	4-5cm	0	0	0	0	1.41	0.09
22.07.2004	0-1cm	0	0	0	0	1.06	0.17
22.07.2004	1-2cm	0	20	0	0	1.57	0.09
22.07.2004	2-3cm	0	0	0	0	2.4	0.07
22.07.2004	3-4cm	0	5	0	0	2.79	0.05
22.07.2004	4-5cm	0	15	0	0	3.18	0.1
10.08.2004	0-1cm	0	10	0	0	0.28	0.16
10.08.2004	1-2cm	0	0	0	0	0.15	0.17
10.08.2004	2-3cm	0	15	0	0	0.28	0.17
10.08.2004	3-4cm	0	25	0	0	0.33	0.12
10.08.2004	4-5cm	0	5	0	0	0.38	0.1
31.08.2004	0-1cm	0	0	0	0	6.03	0.17
31.08.2004	1-2cm	0	17.5	0	0	4.62	0.12
31.08.2004	2-3cm	0	0	0	0	4.57	0.09
31.08.2004	3-4cm	0	7.5	0	0	4.79	0.11
31.08.2004	4-5cm	0	15	0	0	4.46	0.1
22.09.2004	0-1cm	0	17.5	0	0	7.33	0.17
22.09.2004	1-2cm	0	10	0	0	6.37	0.1
22.09.2004	2-3cm	0	20	0	0	4.57	0.14
22.09.2004	3-4cm	0	20	0	0	4.89	0.11
22.09.2004	4-5cm	0	12.5	0	0	5.37	0.11
20.10.2004	0-1cm	0	5	0	0	3.19	0.16
20.10.2004	1-2cm	0	12.5	0	0	2.75	0.08
20.10.2004	2-3cm	0	20	0	0	5.7	0.05
20.10.2004	3-4cm	0	0	0	0	3.77	0.06
20.10.2004	4-5cm	0	0	0	0	3.84	0.06
24.11.2004	0-1cm	0	5	0	0	9.87	0.21
24.11.2004	1-2cm	0	0	0	0	7.93	0.16
24.11.2004	2-3cm	0	5	0	0	6.68	0.1
24.11.2004	3-4cm	0	0	0	0	6.32	0.09
24.11.2004	4-5cm	0	0	0	0	6.25	0.12
16.12.2004	0-1cm	0	12.5	0	0	3.27	0.34
16.12.2004	1-2cm	0	0	0	0	2.68	0.2
16.12.2004	2-3cm	0	0	0	0	3.37	0.17
16.12.2004	3-4cm	0	0	0	0	3.75	0.13
16.12.2004	4-5cm	0	0	0	0	3.66	0.16
18.01.2005	0-1cm	15	0	0	0	2.78	0.27
18.01.2005	1-2cm	15	17.5	0	0	3.65	0.13
18.01.2005	2-3cm	15	5	0	0	3.91	0.1
18.01.2005	3-4cm	5	0	0	0	4.21	0.09
18.01.2005	4-5cm	15	15	0	0	4.18	0.12
22.03.2005	0-1cm	n.b.	40	n.b.	0	1.53	0.28
22.03.2005	1-2cm	0	0	0	0	2.52	0.24
22.03.2005	2-3cm	0	15	0	0	3.6	0.2
22.03.2005	3-4cm	0	17.5	0	0	3.83	0.18
22.03.2005	4-5cm	0	0	0	0	3.36	0.11

Fortsetzung Tabelle A20: Messwerte am Punkt NF

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
20.04.2005	0-1cm	0	32.5	5	0	0.45	0.22
20.04.2005	1-2cm	0	22.5	0	0	0.51	0.15
20.04.2005	2-3cm	0	0	0	0	0.67	0.11
20.04.2005	3-4cm	0	15	0	0	1.24	0.12
20.04.2005	4-5cm	0	10	0	0	1.51	0.14
07.06.2005	0-1cm	0	10	0	0	7.55	0.21
07.06.2005	1-2cm	0	22.5	0	0	6.01	0.12
07.06.2005	2-3cm	0	25	0	0	6.02	0.16
07.06.2005	3-4cm	0	5	0	0	5.5	0.1
07.06.2005	4-5cm	0	15	0	0	5.46	0.09
12.07.2005	0-1cm	0	0	0	0	1.58	0.3
12.07.2005	1-2cm	0	15	0	0	4.35	0.16
12.07.2005	2-3cm	0	17.5	0	0	3.13	0.1
12.07.2005	3-4cm	0	0	0	0	3.68	0.12
12.07.2005	4-5cm	0	10	0	0	4.31	0.09
19.08.2005	0-1cm	0	22.5	5	0	0.58	0.17
19.08.2005	1-2cm	0	0	5	0	0.62	0.12
19.08.2005	2-3cm	0	5	0	0	0.79	0.09
19.08.2005	3-4cm	0	10	0	0	1.99	0.1
19.08.2005	4-5cm	0	20	0	0	2.19	0.14
20.09.2005	0-1cm	0	17.5	0	0	1.44	0.16
20.09.2005	1-2cm	0	15	0	0	3.08	0.11
20.09.2005	2-3cm	0	15	0	0	3.46	0.11
20.09.2005	3-4cm	0	15	0	0	3.79	0.11
20.09.2005	4-5cm	0	12.5	0	0	3.6	0.12
19.10.2005	0-1cm	0	10	0	0	0.64	0.2
19.10.2005	1-2cm	0	10	5	0	1	0.12
19.10.2005	2-3cm	0	125.5	0	0	1.58	0.15
19.10.2005	3-4cm	0	5	0	0	2.11	0.14
19.10.2005	4-5cm	0	10	0	0	2.35	0.14
09.12.2005	0-1cm	0	15	0	0	8.15	0.31
09.12.2005	1-2cm	0	12.5	0	0	4.74	0.09
09.12.2005	2-3cm	0	5	0	0	4.8	0.08
09.12.2005	3-4cm	0	10	0	0	5.21	0.09
09.12.2005	4-5cm	0	20	0	0	5.12	0.09

Tabelle A21: Messwerte am Punkt Q1, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
22.09.2003	0-1cm	0	27.5	0	5	1.29	0.09
22.09.2003	1-2cm	0	35	0	5	1.29	0.09
22.09.2003	2-3cm	0	30	0	5	1.29	0.09
22.09.2003	3-4cm	0	22.5	0	5	1.29	0.09
22.09.2003	4-5cm	0	0	0	0	1.29	0.09
10.10.2003	0-1cm	0	0	0	0	6.27	0.16
10.10.2003	1-2cm	0	0	0	0	5.72	0.15
10.10.2003	2-3cm	0	17.5	0	0	4.94	0.1
10.10.2003	3-4cm	0	0	0	0	4.44	0.08
10.10.2003	4-5cm	0	40	0	5	5.24	0.08
28.10.2003	0-1cm	0	20	0	0	2.94	0.14
28.10.2003	1-2cm	0	10	0	0	2.34	0.1
28.10.2003	2-3cm	0	0	0	0	1.03	0.08
28.10.2003	3-4cm	0	0	0	0	1.35	0.08
28.10.2003	4-5cm	0	0	0	0	0.73	0.07
27.11.2003	0-1cm	0	0	0	0	5.5	0.16
27.11.2003	1-2cm	0	0	0	0	7.13	0.06
27.11.2003	2-3cm	0	0	0	0	6.41	0.08
27.11.2003	3-4cm	0	0	0	0	6.01	0.06
27.11.2003	4-5cm	0	10	0	0	1.36	0.05
17.12.2003	0-1cm	0	20	0	0	9.31	0.12
17.12.2003	1-2cm	0	10	0	0	8.18	0.11
17.12.2003	2-3cm	0	0	0	0	8.46	0.08
17.12.2003	3-4cm	0	10	0	0	8.35	0.09
17.12.2003	4-5cm	0	0	0	0	7.94	0.07
26.02.2004	0-1cm	0	0	0	0	7.49	0.16
26.02.2004	1-2cm	0	0	0	0	6.5	0.12
26.02.2004	2-3cm	0	15	0	0	5.19	0.08
26.02.2004	3-4cm	0	0	0	0	5.97	0.09
26.02.2004	4-5cm	0	7.5	0	0	4.14	0.09
08.03.2004	0-1cm	n.b.	0	n.b.	0	n.b.	n.b.
08.03.2004	1-2cm	n.b.	20	n.b.	0	n.b.	n.b.
08.03.2004	2-3cm	n.b.	15	n.b.	0	n.b.	n.b.
08.03.2004	3-4cm	n.b.	7.5	n.b.	0	n.b.	n.b.
08.03.2004	4-5cm	n.b.	0	n.b.	0	n.b.	n.b.
25.03.2004	0-1cm	0	20	0	0	5.19	0.16
25.03.2004	1-2cm	0	18	0	0	4.86	0.16
25.03.2004	2-3cm	0	20	0	0	3.88	0.11
25.03.2004	3-4cm	0	0	0	0	4.59	0.09
25.03.2004	4-5cm	0	10	0	0	4.5	0.08
21.04.2004	0-1cm	0	25	0	0	0	0.12
21.04.2004	1-2cm	0	20	0	0	0.41	0.07
21.04.2004	2-3cm	0	0	0	0	0.32	0.06
21.04.2004	3-4cm	0	0	0	0	0.51	0.06
21.04.2004	4-5cm	0	10	0	0	0.56	0.07
25.05.2004	0-1cm	0	0	0	0	4.2	0.18
25.05.2004	1-2cm	0	0	0	0	4.41	0.09
25.05.2004	2-3cm	0	22.5	0	0	3.47	0.07
25.05.2004	3-4cm	0	0	0	0	3.99	0.07
25.05.2004	4-5cm	0	0	0	0	3.82	0.07

Fortsetzung Tabelle A21: Messwerte am Punkt Q1

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
16.06.2004	0-1cm	0	25	0	0	12.68	0.14
16.06.2004	1-2cm	0	20	0	0	3.15	0.08
16.06.2004	2-3cm	0	0	0	0	3.54	0.06
16.06.2004	3-4cm	0	15	0	0	4.21	0.05
16.06.2004	4-5cm	0	5	0	0	3.94	0.05
08.07.2004	0-1cm	0	12.5	5	0	0.4	0.22
08.07.2004	1-2cm	0	12.5	0	0	0.89	0.15
08.07.2004	2-3cm	0	25	0	0	0.39	0.12
08.07.2004	3-4cm	0	5	0	0	1.02	0.1
08.07.2004	4-5cm	0	10	0	0	1.42	0.07
22.07.2004	0-1cm	0	15	0	0	1.57	0.21
22.07.2004	1-2cm	0	15	0	0	1.84	0.14
22.07.2004	2-3cm	0	0	0	0	2.89	0.1
22.07.2004	3-4cm	0	15	0	0	4.49	0.11
22.07.2004	4-5cm	0	15	0	0	4.77	0.07
10.08.2004	0-1cm	0	0	0	0	0.48	0.13
10.08.2004	1-2cm	0	0	0	0	0.48	0.09
10.08.2004	2-3cm	0	15	0	0	0.31	0.09
10.08.2004	3-4cm	0	0	0	0	0.5	0.08
10.08.2004	4-5cm	0	5	0	0	0.39	0.1
31.08.2004	0-1cm	0	0	0	0	6.19	0.18
31.08.2004	1-2cm	0	0	0	0	8.71	0.16
31.08.2004	2-3cm	0	0	0	0	4.54	0.15
31.08.2004	3-4cm	0	0	0	0	4.48	0.09
31.08.2004	4-5cm	0	0	0	0	4.68	0.07
22.09.2004	0-1cm	0	35	0	0	6.45	0.25
22.09.2004	1-2cm	0	0	0	0	5.08	0.15
22.09.2004	2-3cm	0	0	0	0	4.72	0.14
22.09.2004	3-4cm	0	0	0	0	4.64	0.11
22.09.2004	4-5cm	0	0	0	0	4.69	0.09
20.10.2004	0-1cm	0	0	0	0	4.03	0.15
20.10.2004	1-2cm	0	0	0	0	5.31	0.09
20.10.2004	2-3cm	0	0	0	0	4.58	0.07
20.10.2004	3-4cm	0	0	0	0	4.7	0.06
20.10.2004	4-5cm	0	10	0	0	4.63	0.07
24.11.2004	0-1cm	0	0	0	0	7.32	0.16
24.11.2004	1-2cm	0	15	0	0	6.05	0.17
24.11.2004	2-3cm	0	0	0	0	5.48	0.13
24.11.2004	3-4cm	0	0	0	0	5.65	0.11
24.11.2004	4-5cm	0	20	0	0	5.48	0.09
16.12.2004	0-1cm	0	0	0	0	3.25	0.19
16.12.2004	1-2cm	0	0	0	0	3.34	0.11
16.12.2004	2-3cm	0	10	0	0	3.8	0.09
16.12.2004	3-4cm	0	0	0	0	4.1	0.06
16.12.2004	4-5cm	0	0	0	0	3.7	0.07
18.01.2005	0-1cm	10	17.5	0	0	6.55	0.25
18.01.2005	1-2cm	10	10	0	0	5.36	0.14
18.01.2005	2-3cm	10	20	0	0	4.68	0.09
18.01.2005	3-4cm	12.5	12.5	0	0	4.99	0.1
18.01.2005	4-5cm	10	5	0	0	4.67	0.16

Fortsetzung Tabelle A21: Messwerte am Punkt Q1, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
22.03.2005	0-1cm	0	30	0	0	1.98	0.33
22.03.2005	1-2cm	0	30	0	0	3.71	0.14
22.03.2005	2-3cm	0	0	0	0	3.55	0.09
22.03.2005	3-4cm	0	15	0	0	4.14	0.07
22.03.2005	4-5cm	0	15	0	0	3.65	0.13
20.04.2005	0-1cm	0	0	0	0	0.46	0.2
20.04.2005	1-2cm	0	15	5	0	0.55	0.19
20.04.2005	2-3cm	0	15	0	0	0.63	0.14
20.04.2005	3-4cm	0	20	0	0	1.2	0.1
20.04.2005	4-5cm	0	0	0	0	2.04	0.08
07.06.2005	0-1cm	0	17.5	0	0	6.77	0.16
07.06.2005	1-2cm	0	17.5	0	0	6.2	0.11
07.06.2005	2-3cm	0	12.5	0	0	5.2	0.1
07.06.2005	3-4cm	0	15	0	0	5.27	0.08
07.06.2005	4-5cm	0	12.5	0	0	5.06	0.11
20.06.2005	0-1cm	0	0	5	0	0.85	0.22
20.06.2005	1-2cm	0	0	5	0	0.72	0.12
20.06.2005	2-3cm	0	20	0	0	0.81	0.08
20.06.2005	3-4cm	0	15	0	0	1.16	0.09
20.06.2005	4-5cm	0	12.5	0	0	1.58	0.08
12.07.2005	0-1cm	0	27.5	0	0	1.76	0.15
12.07.2005	1-2cm	0	27.5	0	0	2.61	0.14
12.07.2005	2-3cm	0	10	0	0	2.93	0.11
12.07.2005	3-4cm	0	10	0	0	3.1	0.09
12.07.2005	4-5cm	0	0	0	0	3.14	0.1
19.08.2005	0-1cm	0	40	0	0	2.27	0.17
19.08.2005	1-2cm	0	17.5	5	0	3.91	0.17
19.08.2005	2-3cm	0	20	0	0	4.7	0.14
19.08.2005	3-4cm	0	15	0	0	5.95	0.14
19.08.2005	4-5cm	n.b.	0	n.b.	0	4.36	n.b.
20.09.2005	0-1cm	0	30	5	0	1.79	0.13
20.09.2005	1-2cm	0	25	0	0	2.97	0.18
20.09.2005	2-3cm	0	10	0	0	3.59	0.11
20.09.2005	3-4cm	0	5	0	0	3.92	0.1
20.09.2005	4-5cm	0	0	0	0	3.85	0.09
19.10.2005	0-1cm	0	0	5	0	0.8	0.21
19.10.2005	1-2cm	0		5		1.35	0.17
19.10.2005	2-3cm	0		0		1.98	0.14
19.10.2005	3-4cm	0		0		2.64	0.14
19.10.2005	4-5cm	0		0		2.93	0.13
09.12.2005	0-1cm	0		0		5.44	0.27
09.12.2005	1-2cm	0		0		7.91	0.15
09.12.2005	2-3cm	0		0		7.71	0.24
09.12.2005	3-4cm	0		0		7.54	0.4
09.12.2005	4-5cm	0		0		7.12	0.23

Tabelle A22: Messwerte am Punkt Q2, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
22.09.2003	0-1cm	0	25	0	0	1.09	0.08
22.09.2003	1-2cm	0	22.5	0	0	1.09	0.08
22.09.2003	2-3cm	0	0	0	0	1.09	0.08
22.09.2003	3-4cm	0	0	0	0	1.09	0.08
22.09.2003	4-5cm	0	0	0	0	1.09	0.08
10.10.2003	0-1cm	0	22.5	0	0	4.98	0.07
10.10.2003	1-2cm	0	0	0	0	5.3	0.09
10.10.2003	2-3cm	0	30	0	0	5.89	0.08
10.10.2003	3-4cm	0	37.5	0	0	6.03	0.07
10.10.2003	4-5cm	0	20	0	0	6.15	0.09
28.10.2003	0-1cm	0	0	0	0	1.49	0.06
28.10.2003	1-2cm	0	0	0	0	3.01	0.15
28.10.2003	2-3cm	0	0	0	0	3.38	0.12
28.10.2003	3-4cm	0	0	0	0	2.39	0.08
28.10.2003	4-5cm	0	0	0	0	2.08	0.07
27.11.2003	0-1cm	0	0	0	0	7.02	0.12
27.11.2003	1-2cm	0	0	0	0	6.04	0.11
27.11.2003	2-3cm	0	0	0	0	5.97	0.1
27.11.2003	3-4cm	0	0	0	0	5.97	0.09
27.11.2003	4-5cm	0	0	0	0	6.8	0.1
17.12.2003	0-1cm	0	0	0	0	8.58	0.09
17.12.2003	1-2cm	0	12.5	0	0	7.54	0.11
17.12.2003	2-3cm	0	0	0	0	6.66	0.11
17.12.2003	3-4cm	0	0	0	0	6.72	0.09
17.12.2003	4-5cm	0	0	0	0	7.25	0.1
26.02.2004	0-1cm	0	0	0	0	15.46	0.13
26.02.2004	1-2cm	0	0	0	0	14.08	0.09
26.02.2004	2-3cm	0	0	0	0	13.86	0.12
26.02.2004	3-4cm	0	n.b.	0	n.b.	n.b.	n.b.
26.02.2004	4-5cm	0	n.b.	0	n.b.	n.b.	n.b.
25.03.2004	0-1cm	0	40	0	5	8.33	0.16
25.03.2004	1-2cm	0	0	0	0	6.75	0.08
25.03.2004	2-3cm	0	0	0	0	6.8	0.08
25.03.2004	3-4cm	0	0	0	0	6.71	0.1
25.03.2004	4-5cm	0	0	0	0	6.42	0.1
21.04.2004	0-1cm	0	25	5	0	2.42	0.17
21.04.2004	1-2cm	0	20	0	0	2.99	0.11
21.04.2004	2-3cm	0	0	0	0	3.92	0.08
21.04.2004	3-4cm	0	0	0	0	4.04	0.08
21.04.2004	4-5cm	0	0	0	0	3.56	0.09
25.05.2004	0-1cm	0	27.5	0	0	1.75	0.19
25.05.2004	1-2cm	0	10	0	0	3.22	0.14
25.05.2004	2-3cm	0	17.5	0	0	3.79	0.11
25.05.2004	3-4cm	0	15	0	0	5.24	0.08
25.05.2004	4-5cm	0	0	0	0	5.12	0.07
16.06.2004	0-1cm	0	30	0	0	3.7	0.15
16.06.2004	1-2cm	0	15	0	0	5.08	0.15
16.06.2004	2-3cm	0	0	0	0	5.18	0.12
16.06.2004	3-4cm	0	0	0	0	5.7	0.1
16.06.2004	4-5cm	0	0	0	0	5.72	0.09

Fortsetzung Tabelle A22: Messwerte am Punkt Q2, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
08.07.2004	0-1cm	0	50	0	0	0.59	0.14
08.07.2004	1-2cm	0	35	0	0	0.81	0.11
08.07.2004	2-3cm	0	20	0	0	1.59	0.09
08.07.2004	3-4cm	0	5	0	0	2.68	0.09
08.07.2004	4-5cm	0	15	0	0	2.27	0.09
10.08.2004	0-1cm	0	10	0	0	0.4	0.2
10.08.2004	1-2cm	0	0	0	0	0.26	0.15
10.08.2004	2-3cm	0	32.5	0	0	0.26	0.11
10.08.2004	3-4cm	0	30	0	0	0.36	0.1
10.08.2004	4-5cm	0	22.5	0	0	0.49	0.09
31.08.2004	0-1cm	0	20	0	0	5.44	0.12
31.08.2004	1-2cm	0	0	0	0	4.95	0.11
31.08.2004	2-3cm	0	20	0	0	4.63	0.09
31.08.2004	3-4cm	0	15	0	0	4.95	0.09
31.08.2004	4-5cm	0	20	0	0	5.46	0.07
22.09.2004	0-1cm	0	12.5	0	0	3.93	0.15
22.09.2004	1-2cm	0	0	0	0	5.14	0.1
22.09.2004	2-3cm	0	12.5	0	0	5.01	0.09
22.09.2004	3-4cm	0	15	0	0	5.63	0.08
22.09.2004	4-5cm	0	0	0	0	5.01	0.1
20.10.2004	0-1cm	0	5	0	0	4.64	0.12
20.10.2004	1-2cm	0	0	0	0	4.48	0.13
20.10.2004	2-3cm	0	20	0	0	5.2	0.12
20.10.2004	3-4cm	0	5	0	0	5.3	0.07
20.10.2004	4-5cm	0	15	0	0	5.29	0.1
24.11.2004	0-1cm	0	20	0	0	12.77	0.12
24.11.2004	1-2cm	0	10	0	0	9.64	0.08
24.11.2004	2-3cm	0	0	0	0	10.86	0.07
24.11.2004	3-4cm	0	0	0	0	11.95	0.09
24.11.2004	4-5cm	0	0	0	0	12.25	0.11
16.12.2004	0-1cm	0	0	0	0	13.67	0.2
16.12.2004	1-2cm	0	0	0	0	10.95	0.12
16.12.2004	2-3cm	0	5	0	0	10.73	0.11
16.12.2004	3-4cm	0	n.b.	0	n.b.	n.b.	n.b.
16.12.2004	4-5cm	0	0	0	0	n.b.	n.b.
18.01.2005	0-1cm	15	17.5	0	0	13.99	0.22
18.01.2005	1-2cm	10	12.5	0	0	11.85	0.17
18.01.2005	2-3cm	10	0	0	0	12.12	0.14
18.01.2005	3-4cm	10	0	0	0	12.93	0.1
18.01.2005	4-5cm	5	0	0	0	12.84	0.09
22.03.2005	0-1cm	0	10	0	0	10.37	0.21
22.03.2005	1-2cm	0	0	0	0	9.16	0.13
22.03.2005	2-3cm	0	10	0	0	9.31	0.12
22.03.2005	3-4cm	0	0	0	0	10.72	0.09
22.03.2005	4-5cm	0	10	0	0	10.74	0.07
20.04.2005	0-1cm	0	12.5	5	0	3.82	0.11
20.04.2005	1-2cm	0	30	0	0	4.62	0.11
20.04.2005	2-3cm	0	5	0	0	5.29	0.1
20.04.2005	3-4cm	0	10	0	0	5.29	0.09
20.04.2005	4-5cm	0	5	0	0	4.99	0.08

Fortsetzung Tabelle A22: Messwerte am Punkt Q2, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
07.06.2005	0-1cm	0	10	0	0	6.77	0.14
07.06.2005	1-2cm	0	25	0	0	4.97	0.19
07.06.2005	2-3cm	0	22.5	0	0	5.72	0.14
07.06.2005	3-4cm	0	17.5	0	0	4.61	0.32
07.06.2005	4-5cm	0	10	0	0	6.21	0.13
20.06.2005	0-1cm	0	35	0	0	1.7	0.18
20.06.2005	1-2cm	0	10	0	0	2.24	0.11
20.06.2005	2-3cm	0	15	0	0	2.24	0.1
20.06.2005	3-4cm	0	12.5	0	0	2.82	0.1
20.06.2005	4-5cm	0	12.5	0	0	3.27	0.08
12.07.2005	0-1cm	0	30	5	0	2.18	0.19
12.07.2005	1-2cm	0	10	0	0	3.26	0.15
12.07.2005	2-3cm	0	20	0	0	4.36	0.12
12.07.2005	3-4cm	0	20	0	0	5.22	n.b.
12.07.2005	4-5cm	0	15	0	0	4.61	0.08
19.08.2005	0-1cm	0	15	5	0	1.08	0.29
19.08.2005	1-2cm	0	10	5	0	2.36	0.17
19.08.2005	2-3cm	0	10	0	0	3.93	0.13
19.08.2005	3-4cm	0	12.5	0	0	4.41	0.17
19.08.2005	4-5cm	0	15	0	0	4.47	0.13
20.09.2005	0-1cm	0	55	0	60	1.85	0.16
20.09.2005	1-2cm	0	25	0	0	4.13	0.12
20.09.2005	2-3cm	0	5	0	0	5.36	0.1
20.09.2005	3-4cm	0	5	0	0	5.05	0.1
20.09.2005	4-5cm	0	12.5	0	0	4.58	0.11
19.10.2005	0-1cm	0	0	60	0	2.2	0.29
19.10.2005	1-2cm	0	0	0	0	3.68	0.42
19.10.2005	2-3cm	0	35	0	0	3.63	0.38
19.10.2005	3-4cm	0	20	0	0	3.79	0.25
19.10.2005	4-5cm	0	17.5	0	0	3.73	0.16
09.12.2005	0-1cm	0	0	0	0	10.63	n.b.
09.12.2005	1-2cm	0	0	0	0	7.67	n.b.
09.12.2005	2-3cm	0	0	0	0	8.05	n.b.
09.12.2005	3-4cm	n.b.	0	0	0	8.39	n.b.
09.12.2005	4-5cm	n.b.	0	0	0	8.01	n.b.
22.09.2003	0-1cm	0		0		1.09	0.08
22.09.2003	1-2cm	0		0		1.09	0.08
22.09.2003	2-3cm	0		0		1.09	0.08
22.09.2003	3-4cm	0		0		1.09	0.08
22.09.2003	4-5cm	0		0		1.09	0.08
10.10.2003	0-1cm	0		0		4.98	0.07
10.10.2003	1-2cm	0		0		5.3	0.09
10.10.2003	2-3cm	0		0		5.89	0.08
10.10.2003	3-4cm	0		0		6.03	0.07
10.10.2003	4-5cm	0		0		6.15	0.09

Tabelle A23: Messwerte am Punkt K1, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
21.08.2003	0-1cm	0	35	60	5	0.8	0.32
21.08.2003	1-2cm	0	65.5	60	5	5	0.85
21.08.2003	2-3cm	0	57	60	5	0.4	0.83
21.08.2003	3-4cm	0	55	60	5	0	0.69
21.08.2003	4-5cm	0	45	60	5	4	0.67
22.09.2003	0-1cm	0	92	0	5	5.1	2.31
22.09.2003	1-2cm	44.5	92	600	5	10.6	2.54
22.09.2003	2-3cm	0	92	600	5	0	2.54
22.09.2003	3-4cm	0	92	0	5	0	2.54
22.09.2003	4-5cm	0	92	0	5	0	2.54
10.10.2003	0-1cm	0	40	0	5	14.79	0.85
10.10.2003	1-2cm	0	50	0	5	15.36	0.91
10.10.2003	2-3cm	0	45	0	5	12.53	0.92
10.10.2003	3-4cm	0	47.5	0	5	13.82	1.16
10.10.2003	4-5cm	0	40	0	5	9.96	1.23
28.10.2003	0-1cm	0	35	0	5	11.66	1.25
28.10.2003	1-2cm	0	30	0	5	16.53	1.3
28.10.2003	2-3cm	0	25	0	5	11.23	1.11
28.10.2003	3-4cm	0	30	0	5	9.11	0.84
28.10.2003	4-5cm	0	20	0	5	9.21	0.73
27.11.2003	0-1cm	0	52.5	0	60	12.31	1.07
27.11.2003	1-2cm	0	40	0	60	14.27	1.39
27.11.2003	2-3cm	0	45	0	60	n.b.	1.3
27.11.2003	3-4cm	0	45	0	60	11.86	0.97
27.11.2003	4-5cm	0	50	0	60	24.35	0.98
17.12.2003	0-1cm	0	0	0	0	11.17	0.86
17.12.2003	1-2cm	0	0	0	5	10.34	0.88
17.12.2003	2-3cm	0	0	0	0	13.84	0.85
17.12.2003	3-4cm	0	0	0	0	14.39	0.52
17.12.2003	4-5cm	0	0	0	0	9.69	0.46
26.02.2004	0-1cm	0	22.5	0	0	9.95	0.37
26.02.2004	1-2cm	0	25	0	0	8.72	0.87
26.02.2004	2-3cm	0	45	0	5	8.95	1.78
26.02.2004	3-4cm	0	47.5	0	5	9.87	1.28
26.02.2004	4-5cm	0	42.5	0	5	14.16	1.19
08.03.2004	0-1cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	1-2cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	2-3cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	3-4cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	4-5cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
25.03.2004	0-1cm	0	22.5	5	5	8.88	1.3
25.03.2004	1-2cm	0	35	0	5	9.11	2.07
25.03.2004	2-3cm	0	50	0	5	9.91	2.58
25.03.2004	3-4cm	0	40	0	5	9.84	1.48
25.03.2004	4-5cm	0	30	0	5	8.36	0.61
16.04.2004	0-1cm	0	60	60	60	5.31	3.57
16.04.2004	1-2cm	0	66	60	60	3.98	1.72
16.04.2004	2-3cm	0	55	60	60	5.78	1.65
16.04.2004	3-4cm	0	63	5	60	6.22	1.22
16.04.2004	4-5cm	0	55	5	60	4	1.2
21.04.2004	0-1cm	0	40	0	5	14.15	1.94
21.04.2004	1-2cm	0	32.5	0	5	14.38	1.59
21.04.2004	2-3cm	0	42.5	0	5	11.56	1.01
21.04.2004	3-4cm	0	35	0	5	8.08	1.19
21.04.2004	4-5cm	0	25	0	5	9.06	1.24

Fortsetzung Tabelle A23: Messwerte am Punkt K1, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
25.05.2004	0-1cm	0	40	0	60	9	1.4
25.05.2004	1-2cm	0	52.5	5	60	10.17	2.36
25.05.2004	2-3cm	0	42.5	5	60	24.64	2.6
25.05.2004	3-4cm	0	42.5	0	60	28.97	1.13
25.05.2004	4-5cm	0	30	0	60	24.33	0.85
16.06.2004	0-1cm	92.5	60	600	60	2.97	1.75
16.06.2004	1-2cm	83.5	55	600	60	4.1	2.07
16.06.2004	2-3cm	0	84.5	60	60	4.28	1.95
16.06.2004	3-4cm	0	60	5	60	12.98	2.32
16.06.2004	4-5cm	0	63.5	5	60	13.15	2.75
08.07.2004	0-1cm	0	45	5	5	5.08	1.45
08.07.2004	1-2cm	0	42.5	0	5	4.44	1.71
08.07.2004	2-3cm	0	63	0	5	7.32	2.46
08.07.2004	3-4cm	0	64.5	0	5	10.36	1.97
08.07.2004	4-5cm	0	63	0	60	9.87	2.64
22.07.2004	0-1cm	60	50	60	60	0.9	0.66
22.07.2004	1-2cm	77.5	60.5	60	60	0.9	1.32
22.07.2004	2-3cm	61.5	47.5	60	60	1.06	1.27
22.07.2004	3-4cm	60	55	60	60	1.55	n.b.
22.07.2004	4-5cm	25	45	60	60	2.27	1.05
10.08.2004	0-1cm	0	35	0	5	8.41	0.85
10.08.2004	1-2cm	0	35	0	5	8.06	0.75
10.08.2004	2-3cm	0	32.5	5	5	8.38	0.73
10.08.2004	3-4cm	0	40	5	5	8.29	0.99
10.08.2004	4-5cm	0	47.5	0	5	10.05	1.09
31.08.2004	0-1cm	0	32.5	0	5	4.57	0.82
31.08.2004	1-2cm	0	37.5	0	5	5.06	0.11
31.08.2004	2-3cm	0	50	0	5	5.61	1.26
31.08.2004	3-4cm	0	52.5	0	60	9.54	1.02
31.08.2004	4-5cm	0	50	0	60	9.63	1.23
22.09.2004	0-1cm	0	52.5	0	5	7.35	0.65
22.09.2004	1-2cm	0	20	0	5	8.53	0.53
22.09.2004	2-3cm	0	40	0	5	6.79	0.66
22.09.2004	3-4cm	0	32.5	0	5	6.93	0.62
22.09.2004	4-5cm	0	40	0	5	9.9	0.65
20.10.2004	0-1cm	0	5	0	0	19.54	0.45
20.10.2004	1-2cm	0	0	0	0	19.56	0.29
20.10.2004	2-3cm	0	20	0	0	17.51	0.24
20.10.2004	3-4cm	0	25	0	0	15.99	0.24
20.10.2004	4-5cm	0	25	0	0	16.64	0.74
24.11.2004	0-1cm	0	37.5	0	5	10.26	1.64
24.11.2004	1-2cm	0	45	0	5	10.36	1.2
24.11.2004	2-3cm	0	47.5	0	5	11.98	1.27
24.11.2004	3-4cm	0	47.5	0	5	13.36	1
24.11.2004	4-5cm	0	45	0	5	11.75	1.36
16.12.2004	0-1cm	57.5	0	60	0	15.39	1.1
16.12.2004	1-2cm	40	0	60	0	10.73	1.27
16.12.2004	2-3cm	61	0	60	0	12.84	1.33
16.12.2004	3-4cm	52.5	0	60	0	14.16	1.41
16.12.2004	4-5cm	52.5	0	60	0	12.86	1.44
18.01.2005	0-1cm	0	40	60	5	4.53	0.78
18.01.2005	1-2cm	0	15	0	5	6.97	0.76
18.01.2005	2-3cm	0	35	0	5	8.5	0.77
18.01.2005	3-4cm	0	40	0	5	8.48	1.21
18.01.2005	4-5cm	0	35	0	5	10.76	1.17

Fortsetzung Tabelle A23: Messwerte am Punkt K1, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
22.03.2005	0-1cm	0	57.5	5	60	1.67	1.15
22.03.2005	1-2cm	72	55	600	600	1.16	1.67
22.03.2005	2-3cm	80	61.5	600	600	1.99	1.82
22.03.2005	3-4cm	0	55	5	600	4.64	1.9
22.03.2005	4-5cm	0	45	5	600	4.17	2.01
20.04.2005	0-1cm	0	0	0	0	11.46	0.33
20.04.2005	1-2cm	0	20	0	0	9.79	0.23
20.04.2005	2-3cm	0	30	0	0	9.82	0.7
20.04.2005	3-4cm	0	40	0	0	7.75	1.22
20.04.2005	4-5cm	0	50	0	0	8.54	1.43
07.06.2005	0-1cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	1-2cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	2-3cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	3-4cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	4-5cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
12.07.2005	0-1cm	0	35	60	5	3.56	0.55
12.07.2005	1-2cm	0	20	5	5	5.57	0.52
12.07.2005	2-3cm	0	32.5	0	5	6.43	0.68
12.07.2005	3-4cm	0	40	0	5	6.46	0.93
12.07.2005	4-5cm	0	50	0	5	6.48	1.21
19.08.2005	0-1cm	0	35	60	5	1.63	1.27
19.08.2005	1-2cm	0	27.5	5	5	0.87	0.84
19.08.2005	2-3cm	0	37.5	0	5	1.64	1.01
19.08.2005	3-4cm	0	32.5	0	5	4.05	1.05
19.08.2005	4-5cm	0	42.5	0	5	5.56	1.5
20.09.2005	0-1cm	0	35	60	5	7.73	1.07
20.09.2005	1-2cm	0	37.5	0	5	7.65	0.71
20.09.2005	2-3cm	0	27.5	0	5	8.94	0.75
20.09.2005	3-4cm	0	15	0	5	8.35	1.35
20.09.2005	4-5cm	0	25	0	5	8.15	1.18
19.10.2005	0-1cm	74.5	60.5	600	60	3.82	1.64
19.10.2005	1-2cm	0	50	60	60	4.84	1.27
19.10.2005	2-3cm	0	45	5	60	6.7	1.47
19.10.2005	3-4cm	0	35	5	60	6.99	1.36
19.10.2005	4-5cm	0	45	0	60	5.15	1.28
09.12.2005	0-1cm	0	n.b.	0	n.b.	12.03	0.84
09.12.2005	1-2cm	0	n.b.	0	n.b.	10.06	1.01
09.12.2005	2-3cm	0	n.b.	0	n.b.	10.89	1.45
09.12.2005	3-4cm	0	n.b.	0	n.b.	12.32	1.22
09.12.2005	4-5cm	0	n.b.	0	n.b.	10.84	1.07

Tabelle A24: Messwerte am Punkt K3, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
21.08.2003	0-1cm	0	70.5	60	5	2.4	2.04
21.08.2003	1-2cm	0	61.5	60	5	0.8	2.14
21.08.2003	2-3cm	0	75	60	5	0	1.73
21.08.2003	3-4cm	0	71.5	60	5	4.2	1.72
21.08.2003	4-5cm	0	67.5	60	5	0.8	1.76
22.09.2003	0-1cm	105.5	95.5	600	5	3.95	5.01
22.09.2003	1-2cm	0	108	0	5	8.25	4.5
22.09.2003	2-3cm	102.5	81	600	5	8.02	2.43
22.09.2003	3-4cm	0	56	0	5	4	2.43
22.09.2003	4-5cm	0	56	0	5	0	0.56
10.10.2003	0-1cm	0	57	0	60	24.13	4.1
10.10.2003	1-2cm	0	66.5	0	60	19.93	4.86
10.10.2003	2-3cm	0	69	0	60	28.17	4.3
10.10.2003	3-4cm	0	73.5	0	60	24.65	7.5
10.10.2003	4-5cm	0	66.5	0	60	24.59	7.61
28.10.2003	0-1cm	0	62	0	60	28.01	4.12
28.10.2003	1-2cm	0	55	0	60	26.86	3.92
28.10.2003	2-3cm	0	50	0	60	23.66	4.14
28.10.2003	3-4cm	0	50	0	60	22.23	3.53
28.10.2003	4-5cm	0	50	0	60	25	2.96
27.11.2003	0-1cm	0	71	0	60	35.06	4.89
27.11.2003	1-2cm	0	57.5	0	60	38.37	3.86
27.11.2003	2-3cm	0	57.5	0	60	34.49	3.14
27.11.2003	3-4cm	0	63.5	0	60	29.5	3.11
27.11.2003	4-5cm	0	60	0	60	31.05	2.59
17.12.2003	0-1cm	0	0	0	5	21.88	3.6
17.12.2003	1-2cm	0	0	0	5	28.04	1.92
17.12.2003	2-3cm	0	0	0	5	31.22	2.28
17.12.2003	3-4cm	0	0	0	5	26.95	2.25
17.12.2003	4-5cm	0	0	0	5	17.32	1.51
26.02.2004	0-1cm	0	35	0	60	20.02	1.94
26.02.2004	1-2cm	0	35	0	60	23.55	2.08
26.02.2004	2-3cm	0	45	0	60	23.02	2.72
26.02.2004	3-4cm	0	42.5	0	60	24.9	3.14
26.02.2004	4-5cm	0	45	0	60	24.14	2.88
08.03.2004	0-1cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	1-2cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	2-3cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	3-4cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	4-5cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
25.03.2004	0-1cm	0	40	60	5	20.98	1.94
25.03.2004	1-2cm	0	50	5	5	27.65	1.72
25.03.2004	2-3cm	0	40	5	5	36.48	2.74
25.03.2004	3-4cm	0	63.5	60	5	32.74	3.85
25.03.2004	4-5cm	0	55	60	5	24.46	2.95
16.04.2004	0-1cm	0	101	600	600	12.37	6.45
16.04.2004	1-2cm	0	113	60	600	16.85	5.95
16.04.2004	2-3cm	0	104	5	600	27.88	7.84
16.04.2004	3-4cm	0	110.5	5	600	34.26	5.2
16.04.2004	4-5cm	0	102.5	5	600	28.72	9.51

Fortsetzung Tabelle A24: Messwerte am Punkt K3

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
21.04.2004	0-1cm	0	50	0	60	16.42	3.44
21.04.2004	1-2cm	0	60	0	60	14.68	4.15
21.04.2004	2-3cm	0	64	0	60	12.96	5.14
21.04.2004	3-4cm	0	68	0	60	12.86	5.71
21.04.2004	4-5cm	0	69.5	0	60	14.96	4.05
25.05.2004	0-1cm	0	45	0	5	7.87	1.5
25.05.2004	1-2cm	0	47.5	0	5	9.91	1.51
25.05.2004	2-3cm	0	37.5	0	5	9.51	2.11
25.05.2004	3-4cm	0	40	0	5	10.65	2.02
25.05.2004	4-5cm	0	42.5	0	60	10.49	2.18
16.06.2004	0-1cm	27.5	64	60	600	3.28	2.46
16.06.2004	1-2cm	89	62.5	1200	600	2.66	2.3
16.06.2004	2-3cm	77.5	66	600	600	5.21	2.59
16.06.2004	3-4cm	0	55	60	60	12.58	2.79
16.06.2004	4-5cm	0	60	5	60	15.98	2.31
08.07.2004	0-1cm	0	47.5	60	60	12.02	3.29
08.07.2004	1-2cm	0	40	5	60	13.94	2.26
08.07.2004	2-3cm	0	40	0	60	19.19	2.46
08.07.2004	3-4cm	0	50	0	60	21.69	3.1
08.07.2004	4-5cm	0	50	0	60	15.65	1.87
22.07.2004	0-1cm	88.5	67	600	600	2.04	5.64
22.07.2004	1-2cm	88.5	78	600	600	1.6	3.71
22.07.2004	2-3cm	77.5	82.5	600	600	1.88	3.38
22.07.2004	3-4cm	91	91	600	600	3.17	3.49
22.07.2004	4-5cm	98.5	75	600	600	6.01	3.86
10.08.2004	0-1cm	0	62.5	0	60	12.19	2.66
10.08.2004	1-2cm	0	60	5	60	9.67	4.53
10.08.2004	2-3cm	0	50	5	60	7.22	3.14
10.08.2004	3-4cm	0	60	0	60	7.53	2.08
10.08.2004	4-5cm	0	45	0	60	7.19	1.83
31.08.2004	0-1cm	0	47.5	0	60	18.98	2.31
31.08.2004	1-2cm	0	42.5	0	60	20.2	2.19
31.08.2004	2-3cm	0	57.5	0	60	21.82	3.47
31.08.2004	3-4cm	0	55	0	60	20.96	1.84
31.08.2004	4-5cm	0	62.5	0	60	18.66	1.99
22.09.2004	0-1cm	0	55	0	600	23.42	2.54
22.09.2004	1-2cm	0	57.5	0	600	24.43	5.77
22.09.2004	2-3cm	0	78.5	0	600	27.22	4.68
22.09.2004	3-4cm	0	66.5	0	600	25.48	4.47
22.09.2004	4-5cm	0	76.5	0	600	19.45	3.58
20.10.2004	0-1cm	0	27.5	0	5	23.42	1.95
20.10.2004	1-2cm	0	27.5	0	5	25	1.34
20.10.2004	2-3cm	0	22.5	0	5	19.24	1.85
20.10.2004	3-4cm	0	30	0	5	14.68	1.04
20.10.2004	4-5cm	0	30	0	5	12.17	0.94
24.11.2004	0-1cm	0	75	0	600	20.21	3.47
24.11.2004	1-2cm	0	53	0	600	23.17	3.68
24.11.2004	2-3cm	0	75	0	600	22.83	4.35
24.11.2004	3-4cm	0	64	0	600	24.59	3.28
24.11.2004	4-5cm	0	74	0	600	21.17	3

Fortsetzung Tabelle A24: Messwerte am Punkt K3, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
16.12.2004	0-1cm	58	0	600	0	19.95	4.8
16.12.2004	1-2cm	65	0	600	0	22.48	5.6
16.12.2004	2-3cm	84	0	600	0	23.89	6.16
16.12.2004	3-4cm	55	0	600	0	26.04	3.64
16.12.2004	4-5cm	60.5	0	600	0	28.24	3.6
18.01.2005	0-1cm	0	55	0	600	16.99	4.11
18.01.2005	1-2cm	0	68	0	600	25.62	4.47
18.01.2005	2-3cm	0	57.5	0	600	26.71	6.66
18.01.2005	3-4cm	0	67	0	600	26.13	5.55
18.01.2005	4-5cm	0	67.5	0	600	24.34	5.9
22.03.2005	0-1cm	0	66.5	5	600	2.98	3.81
22.03.2005	1-2cm	63	55	600	600	3.55	3.48
22.03.2005	2-3cm	68.5	64	600	600	4.44	3.44
22.03.2005	3-4cm	76.5	75	600	600	4.63	3.06
22.03.2005	4-5cm	60.5	62.5	600	600	6.69	2.52
20.04.2005	0-1cm	0	63	0	60	18.13	2.69
20.04.2005	1-2cm	0	40	0	60	13.03	2.29
20.04.2005	2-3cm	0	32.5	0	60	10.16	1.31
20.04.2005	3-4cm	0	30	0	60	9.29	0.79
20.04.2005	4-5cm	0	35	0	60	8.1	0.64
07.06.2005	0-1cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	1-2cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	2-3cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	3-4cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	4-5cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
12.07.2005	0-1cm	9.5	82.5	60	1200	11.93	7.15
12.07.2005	1-2cm	0	68	60	1200	15.61	10.75
12.07.2005	2-3cm	0	78.5	5	1200	21.15	5.91
12.07.2005	3-4cm	0	77	5	1200	22.29	6.35
12.07.2005	4-5cm	0	86	60	1200	17.74	5.62
19.08.2005	0-1cm	0	83	60	600	1.67	5.91
19.08.2005	1-2cm	86	80	1200	600	4.12	5.07
19.08.2005	2-3cm	55	79.5	600	600	4.81	4.96
19.08.2005	3-4cm	0	72	5	600	7.14	3.78
19.08.2005	4-5cm	0	62	5	600	10.84	2.95
20.09.2005	0-1cm	75.5	62	1800	60	8.57	3.43
20.09.2005	1-2cm	0	55	60	60	14.5	4.47
20.09.2005	2-3cm	0	65.5	60	60	14.05	5.1
20.09.2005	3-4cm	69.5	85.5	3600	60	9.64	5.61
20.09.2005	4-5cm	87	90.5	3600	60	11.2	3.76
19.10.2005	0-1cm	0	74.5	60	600	2.75	2.7
19.10.2005	1-2cm	0	55	60	60	4.23	2.55
19.10.2005	2-3cm	0	47.5	5	60	6.98	2.05
19.10.2005	3-4cm	0	52.5	5	60	8.13	3
19.10.2005	4-5cm	0	50	5	60	9.2	2.45
09.12.2005	0-1cm	0	n.b.	0	n.b.	28.85	3.87
09.12.2005	1-2cm	0	n.b.	0	n.b.	29.89	5.06
09.12.2005	2-3cm	0	n.b.	0	n.b.	27.93	5.76
09.12.2005	3-4cm	0	n.b.	0	n.b.	22.51	6.07
09.12.2005	4-5cm	0	n.b.	0	n.b.	14.9	4.3

Tabelle A25: Messwerte am Punkt W01, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
21.08.2003	0-1cm	0	50.5	5	0	1.2	1.63
21.08.2003	1-2cm	0	35	5	0	1.6	2.09
21.08.2003	2-3cm	0	35	60	0	1	1.31
21.08.2003	3-4cm	0	45	60	0	3.2	2.09
21.08.2003	4-5cm	0	52	60	0	1.2	2.07
22.09.2003	0-1cm	0	10	0	0	1	0.91
22.09.2003	1-2cm	0	17.5	0	0	0.8	1.55
22.09.2003	2-3cm	0	32.2	600	0	2.18	2.43
22.09.2003	3-4cm	51.5	40	600	0	9.79	1.85
22.09.2003	4-5cm	0	42.5	0	0	3.5	1.22
10.10.2003	0-1cm	0	40	0	5	8.46	1.53
10.10.2003	1-2cm	0	40	0	5	5.05	1.25
10.10.2003	2-3cm	0	45	0	5	12.12	2.29
10.10.2003	3-4cm	0	58	0	5	14.85	3.52
10.10.2003	4-5cm	0	37.5	0	5	19.45	1.71
28.10.2003	0-1cm	0	17.5	0	0	5.24	1
28.10.2003	1-2cm	0	10	0	0	6.59	2.03
28.10.2003	2-3cm	0	12.5	0	0	5.26	0.75
28.10.2003	3-4cm	0	10	0	0	5.66	0.82
28.10.2003	4-5cm	0	0	0	0	5.6	0.48
27.11.2003	0-1cm	0	35	0	0	7.9	1.28
27.11.2003	1-2cm	0	32.5	0	0	7.82	0.79
27.11.2003	2-3cm	0	30	0	0	8.32	1.4
27.11.2003	3-4cm	0	20	0	0	9.9	1.38
27.11.2003	4-5cm	0	10	0	0	9.41	1.14
17.12.2003	0-1cm	0	0	0	0	10.65	0.94
17.12.2003	1-2cm	0	0	0	5	6.54	0.89
17.12.2003	2-3cm	0	0	0	0	6.82	0.51
17.12.2003	3-4cm	0	0	0	0	7.23	0.49
17.12.2003	4-5cm	0	0	0	0	6.76	0.36
26.02.2004	0-1cm	0	25	0	0	8.56	0.75
26.02.2004	1-2cm	0	30	0	0	8.26	1.06
26.02.2004	2-3cm	0	30	0	0	7.36	0.43
26.02.2004	3-4cm	0	25	0	0	7.01	0.44
26.02.2004	4-5cm	0	22.5	0	0	6.61	0.32
08.03.2004	0-1cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	1-2cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	2-3cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	3-4cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	4-5cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
25.03.2004	0-1cm	0	7.5	0	0	4.22	0.8
25.03.2004	1-2cm	0	27.5	0	5	7.19	0.9
25.03.2004	2-3cm	0	7.5	0	5	6.47	0.9
25.03.2004	3-4cm	0	10	0	5	7.06	1.12
25.03.2004	4-5cm	0	5	0	0	5.93	0.7
16.04.2004	0-1cm	0	32.5	5	5	1.68	0.78
16.04.2004	1-2cm	0	45	5	5	1.69	0.94
16.04.2004	2-3cm	0	30	5	5	2.76	1.72
16.04.2004	3-4cm	0	30	5	5	8.44	1.39
16.04.2004	4-5cm	0	30	5	5	4.78	1.17

Fortsetzung Tabelle A25: Messwerte am Punkt W01

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
21.04.2004	0-1cm	0	20	600	0	3.52	0.7
21.04.2004	1-2cm	0	20	3600	0	3.54	0.94
21.04.2004	2-3cm	0	25	600	0	4.7	1.33
21.04.2004	3-4cm	0	22.5	0	5	6.98	2
21.04.2004	4-5cm	0	20	0	5	6.39	2.16
25.05.2004	0-1cm	0	35	5	5	5.24	4.44
25.05.2004	1-2cm	12.5	35	600	5	5.98	2.45
25.05.2004	2-3cm	0	20	600	5	8.31	1.76
25.05.2004	3-4cm	0	22.5	0	5	9.8	1.76
25.05.2004	4-5cm	0	15	0	5	8.28	1.55
16.06.2004	0-1cm	92.5	35	3000	5	0.67	1.07
16.06.2004	1-2cm	0	32.5	60	5	1.1	1.47
16.06.2004	2-3cm	0	20	5	5	2.65	1.18
16.06.2004	3-4cm	0	25	5	5	4.15	1.61
16.06.2004	4-5cm	0	15	0	5	4.63	1.56
08.07.2004	0-1cm	0	30	0	5	1.86	0.96
08.07.2004	1-2cm	52.5	22.5	600	5	1.67	0.88
08.07.2004	2-3cm	0	27.5	5	5	1.66	1.45
08.07.2004	3-4cm	0	27.5	0	5	2	1.34
08.07.2004	4-5cm	0	25	0	5	2.39	1.07
22.07.2004	0-1cm	0	40	0	0	1.32	0.86
22.07.2004	1-2cm	0	32.5	0	0	1.5	0.69
22.07.2004	2-3cm	0	30	0	0	2.38	0.81
22.07.2004	3-4cm	0	30	0	0	3.28	0.96
22.07.2004	4-5cm	0	27.5	0	0	3.16	1.05
10.08.2004	0-1cm	0	27.5	0	5	7.64	1.3
10.08.2004	1-2cm	0	17.5	0	5	8.47	2.02
10.08.2004	2-3cm	0	20	0	5	8.3	1.53
10.08.2004	3-4cm	0	30	0	5	8.94	1.72
10.08.2004	4-5cm	0	27.5	0	5	10.05	1.65
31.08.2004	0-1cm	0	35	1200	60	4.26	1.33
31.08.2004	1-2cm	81.5	50	2400	60	3.04	1.34
31.08.2004	2-3cm	88.5	55	3000	1200	3.85	1.29
31.08.2004	3-4cm	85	50	3000	1200	5.68	0.87
31.08.2004	4-5cm	76.5	50	3000	60	6.96	1.15
22.09.2004	0-1cm	0	30	0	0	3.13	0.62
22.09.2004	1-2cm	0	15	0	0	4.19	0.78
22.09.2004	2-3cm	0	25	0	0	5.99	0.78
22.09.2004	3-4cm	0	5	0	0	6.36	0.78
22.09.2004	4-5cm	0	20	0	0	6.96	0.61
20.10.2004	0-1cm	0	20	0	0	8.61	0.78
20.10.2004	1-2cm	0	12.5	0	0	5.91	0.69
20.10.2004	2-3cm	0	15	0	0	4.35	0.81
20.10.2004	3-4cm	0	12.5	0	0	4.74	0.79
20.10.2004	4-5cm	0	15	0	0	4.97	0.73
24.11.2004	0-1cm	0	40	0	0	3.33	1.05
24.11.2004	1-2cm	0	22.5	0	0	4.25	0.99
24.11.2004	2-3cm	0	17.5	0	0	4.41	0.94
24.11.2004	3-4cm	0	15	0	0	5.15	1.37
24.11.2004	4-5cm	0	20	0	0	5.94	1.59

Fortsetzung Tabelle A25: Messwerte am Punkt W01, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
16.12.2004	0-1cm	20	0	0	0	3.96	0.76
16.12.2004	1-2cm	15	0	0	0	2.95	0.69
16.12.2004	2-3cm	10	0	0	0	4.3	0.63
16.12.2004	3-4cm	20	0	0	0	5.15	0.89
16.12.2004	4-5cm	25	0	0	0	6.39	0.97
18.01.2005	0-1cm	0	15	5	0	3.74	1.57
18.01.2005	1-2cm	0	20	0	0	6.67	1.69
18.01.2005	2-3cm	0	20	5	5	7.33	2.05
18.01.2005	3-4cm	0	22.5	5	5	9.79	1.22
18.01.2005	4-5cm	0	35	0	5	9.66	0.16
22.03.2005	0-1cm	0	25	5	0	0.84	1.49
22.03.2005	1-2cm	0	17.5	5	0	1.16	1.29
22.03.2005	2-3cm	0	15	5	0	1.83	1.48
22.03.2005	3-4cm	0	22.5	0	0	3.56	1.57
22.03.2005	4-5cm	0	20	0	0	4.1	0.9
20.04.2005	0-1cm	0	17.5	0	5	13.05	3.73
20.04.2005	1-2cm	0	22.5	0	5	7.9	2.85
20.04.2005	2-3cm	0	20	0	5	7.04	3.1
20.04.2005	3-4cm	0	15	0	5	6.58	3.94
20.04.2005	4-5cm	0	17.5	0	5	5.67	1.44
07.06.2005	0-1cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	1-2cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	2-3cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	3-4cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	4-5cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
12.07.2005	0-1cm	0	25	0	0	1.54	0.86
12.07.2005	1-2cm	0	30	60	0	3.09	1.03
12.07.2005	2-3cm	0	15	5	0	4.43	1.48
12.07.2005	3-4cm	0	15	0	0	5.18	0.85
12.07.2005	4-5cm	0	25	0	0	4.63	0.76
19.08.2005	0-1cm	0	32.5	5	5	1.16	1.21
19.08.2005	1-2cm	84.5	30	3600	5	1.27	1.32
19.08.2005	2-3cm	66.5	40	3000	5	2.18	1.31
19.08.2005	3-4cm	30	25	600	5	4.17	1.3
19.08.2005	4-5cm	0	25	5	5	6.29	1.45
20.09.2005	0-1cm	0	25	5	5	4.55	1.21
20.09.2005	1-2cm	0	20	5	5	6.89	1.45
20.09.2005	2-3cm	0	10	5	5	9.4	1.77
20.09.2005	3-4cm	0	12.5	0	5	7.9	1.98
20.09.2005	4-5cm	0	20	0	5	8.3	2.44
19.10.2005	0-1cm	0	40	5	5	2.01	1.33
19.10.2005	1-2cm	80.5	42.5	2400	5	4.41	1.86
19.10.2005	2-3cm	57.5	30	600	5	6.3	1.82
19.10.2005	3-4cm	0	17.5	0	5	6.34	2.33
19.10.2005	4-5cm	0	20	5	5	7.88	2.98
09.12.2005	0-1cm	0	n.b.	0	n.b.	11.36	2.62
09.12.2005	1-2cm	0	n.b.	0	n.b.	13.32	7.2
09.12.2005	2-3cm	0	n.b.	0	n.b.	15.16	7.49
09.12.2005	3-4cm	0	n.b.	0	n.b.	15.07	3.72
09.12.2005	4-5cm	0	n.b.	0	n.b.	12.57	3.1

Tabelle A26: Messwerte am Punkt W03, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
21.08.2003	0-1cm	0	35	0	0	2.6	1.18
21.08.2003	1-2cm	0	45	0	0	0.2	1.37
21.08.2003	2-3cm	0	50	5	0	1.2	1.9
21.08.2003	3-4cm	0	50	600	0	2.6	1.58
21.08.2003	4-5cm	0	40	600	0	0.8	1.64
22.09.2003	0-1cm	81	65	600	0	4.74	3.09
22.09.2003	1-2cm	73	47.5	600	0	5.55	2.21
22.09.2003	2-3cm	0	35	600	0	8.96	3.37
22.09.2003	3-4cm	0	50	0	0	9.12	2.82
22.09.2003	4-5cm	0	45	0	0	5.74	3.12
10.10.2003	0-1cm	0	42.5	0	5	4.94	2.03
10.10.2003	1-2cm	0	32.5	0	5	8.58	1.32
10.10.2003	2-3cm	0	52.5	0	5	4.44	1.72
10.10.2003	3-4cm	0	40	3600	5	9.43	1.53
10.10.2003	4-5cm	0	35	3600	5	56.07	1.74
28.10.2003	0-1cm	0	20	0	5	10.8	3.84
28.10.2003	1-2cm	0	30	0	5	18.3	5.94
28.10.2003	2-3cm	0	40	0	5	15.43	4.84
28.10.2003	3-4cm	0	30	0	5	16.58	3.88
28.10.2003	4-5cm	0	25	0	5	10.68	3.13
27.11.2003	0-1cm	0	37.5	0	5	14.37	3.72
27.11.2003	1-2cm	0	30	0	5	13.88	1.25
27.11.2003	2-3cm	0	20	0	5	16.24	1.61
27.11.2003	3-4cm	0	37.5	0	5	20.15	2.83
27.11.2003	4-5cm	0	25	0	5	24.61	3.65
17.12.2003	0-1cm	0	0	0	5	8.07	2.86
17.12.2003	1-2cm	0	0	0	5	6.47	2.47
17.12.2003	2-3cm	0	0	0	0	6.26	3.76
17.12.2003	3-4cm	0	0	0	0	6.94	2.19
17.12.2003	4-5cm	0	0	0	0	6.79	1.69
26.02.2004	0-1cm	0	25	0	5	15.33	2.81
26.02.2004	1-2cm	0	25	0	5	13.61	3.34
26.02.2004	2-3cm	0	20	0	5	10.43	2.83
26.02.2004	3-4cm	0	30	0	5	9.7	3.72
26.02.2004	4-5cm	0	22.5	0	5	10.94	2.4
08.03.2004	0-1cm	0	0	0	0	5.1	n.b.
08.03.2004	1-2cm	0	0	0	0	11.25	n.b.
08.03.2004	2-3cm	0	0	0	0	10.34	n.b.
08.03.2004	3-4cm	0	0	0	0	11.46	n.b.
08.03.2004	4-5cm	0	0	0	0	10.05	n.b.
25.03.2004	0-1cm	0	32.5	0	5	12.79	3.81
25.03.2004	1-2cm	0	25	0	5	14.54	4.14
25.03.2004	2-3cm	0	27.5	0	5	10.94	4.99
25.03.2004	3-4cm	0	22.5	0	5	7.9	2.36
25.03.2004	4-5cm	0	20	0	5	9.95	1.53
16.04.2004	0-1cm	0	50	60	60	13.12	4.63
16.04.2004	1-2cm	0	58	60	60	6.51	4.75
16.04.2004	2-3cm	0	45	600	5	10.53	2.64
16.04.2004	3-4cm	0	50	60	5	18.02	3.46
16.04.2004	4-5cm	0	47.5	60	5	12.81	2.95

Fortsetzung Tabelle A26: Messwerte am Punkt W03

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
21.04.2004	0-1cm	0	40	5	5	9.48	5.61
21.04.2004	1-2cm	57.5	35	600	5	8.66	4.96
21.04.2004	2-3cm	0	10	5	5	9.91	4.13
21.04.2004	3-4cm	0	35	0	5	17.39	4.82
21.04.2004	4-5cm	0	32.5	0	5	16.99	6.68
25.05.2004	0-1cm	40	30	3600	5	27.99	5.82
25.05.2004	1-2cm	75.5	50	3600	5	39.38	6.87
25.05.2004	2-3cm	0	25	600	5	34.63	8.91
25.05.2004	3-4cm	0	40	0	5	36.93	5.74
25.05.2004	4-5cm	0	35	0	5	29.43	3.93
16.06.2004	0-1cm	79.5	50	1800	60	9	5.91
16.06.2004	1-2cm	40	45	1200	60	4.75	7.16
16.06.2004	2-3cm	55	37.5	600	60	4.19	8.53
16.06.2004	3-4cm	0	37.5	600	60	8.97	6.8
16.06.2004	4-5cm	0	35	60	60	7.29	6.31
08.07.2004	0-1cm	71	35	1200	60	1.93	4.46
08.07.2004	1-2cm	25	45	600	60	1.98	3.93
08.07.2004	2-3cm	0	35	600	60	2.14	2.6
08.07.2004	3-4cm	0	25	600	60	2.28	4.54
08.07.2004	4-5cm	0	30	0	60	5.88	4.41
22.07.2004	0-1cm	86	47.5	1800	5	3.23	4.61
22.07.2004	1-2cm	83	40	1800	5	2.31	4.05
22.07.2004	2-3cm	80	40	1200	5	3.89	5.42
22.07.2004	3-4cm	80	40	1200	5	9.07	3.71
22.07.2004	4-5cm	82.5	32.5	1200	5	13.62	9.86
10.08.2004	0-1cm	0	35	0	5	10.33	1.96
10.08.2004	1-2cm	17.5	22.5	60	5	17.65	1.64
10.08.2004	2-3cm	0	30	5	5	15.5	1.68
10.08.2004	3-4cm	0	27.5	5	5	20.31	0
10.08.2004	4-5cm	0	30	0	5	13.68	0
31.08.2004	0-1cm	81.5	45	2400	600	14.45	4.29
31.08.2004	1-2cm	102	61.5	2400	600	14.78	4.08
31.08.2004	2-3cm	79	68.5	3000	1200	20.44	4.6
31.08.2004	3-4cm	82	58	3000	600	23.41	4.89
31.08.2004	4-5cm	37	30	3000	5	19.95	1.35
22.09.2004	0-1cm	0	35	0	0	8.19	0.64
22.09.2004	1-2cm	0	30	0	0	7.46	0.73
22.09.2004	2-3cm	0	25	0	0	9.08	0.55
22.09.2004	3-4cm	0	27.5	0	0	9.39	0.8
22.09.2004	4-5cm	0	15	0	0	7.78	0.37
20.10.2004	0-1cm	0	40	0	5	11.16	3.24
20.10.2004	1-2cm	0	20	0	5	16.14	3.73
20.10.2004	2-3cm	0	37.5	5	5	22.55	5.56
20.10.2004	3-4cm	0	47.5	5	60	28.54	7.6
20.10.2004	4-5cm	0	40	5	60	31.27	5.12
24.11.2004	0-1cm	0	35	0	5	5.84	5.48
24.11.2004	1-2cm	0	32.5	0	5	8.92	3.93
24.11.2004	2-3cm	0	50	0	5	10.31	4.68
24.11.2004	3-4cm	0	50	0	5	8.16	4.8
24.11.2004	4-5cm	0	30	60	5	14.18	3.65

Fortsetzung Tabelle A26: Messwerte am Punkt W03, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
16.12.2004	0-1cm	25	0	5	0	7.16	1.71
16.12.2004	1-2cm	10	0	5	0	8.34	2.26
16.12.2004	2-3cm	30	0	5	0	8.7	1.88
16.12.2004	3-4cm	25	0	5	0	10.46	2.91
16.12.2004	4-5cm	22.8	0	5	0	13.06	3.12
18.01.2005	0-1cm	0	20	5	5	14.63	6.01
18.01.2005	1-2cm	0	15	60	5	21.6	5.79
18.01.2005	2-3cm	0	12.5	0	5	16.7	6.61
18.01.2005	3-4cm	0	15	0	5	12.7	3.21
18.01.2005	4-5cm	0	17.5	0	5	7.42	3.67
22.03.2005	0-1cm	73.5	22.5	600	5	2.59	7.85
22.03.2005	1-2cm	0	25	5	5	5.33	6.89
22.03.2005	2-3cm	0	25	5	5	11.26	6.37
22.03.2005	3-4cm	0	20	0	5	16.5	5.58
22.03.2005	4-5cm	0	27.5	0	5	12.84	4.13
20.04.2005	0-1cm	0	20	0	0	10.67	0.84
20.04.2005	1-2cm	0	15	0	0	6.87	0.67
20.04.2005	2-3cm	0	10	0	0	5.79	0.59
20.04.2005	3-4cm	0	25	0	0	7.44	0.58
20.04.2005	4-5cm	0	10	0	0	8.71	0.23
07.06.2005	0-1cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	1-2cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	2-3cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	3-4cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	4-5cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
12.07.2005	0-1cm	0	27.5	5	5	9.02	6.44
12.07.2005	1-2cm	0	17.5	600	5	14.13	6.08
12.07.2005	2-3cm	0	15	0	5	20.76	3.93
12.07.2005	3-4cm	0	25	0	5	25.95	n.b.
12.07.2005	4-5cm	0	22.5	0	5	19.75	n.b.
19.08.2005	0-1cm	0	50	5	60	2.59	9.11
19.08.2005	1-2cm	77.5	45	600	60	5.14	8.41
19.08.2005	2-3cm	0	35	5	60	11.39	8.55
19.08.2005	3-4cm	0	30	5	60	23.84	4.95
19.08.2005	4-5cm	0	35	5	60	20.08	3.42
20.09.2005	0-1cm	0	25	5	5	4.92	8.73
20.09.2005	1-2cm	0	35	5	5	9.84	6
20.09.2005	2-3cm	0	30	5	5	8.69	5.91
20.09.2005	3-4cm	0	15	60	5	9.23	4.85
20.09.2005	4-5cm	0	25	0	5	9.06	2.56
19.10.2005	0-1cm	0	50	0	60	3.4	4.47
19.10.2005	1-2cm	73.5	25	1800	60	5.64	6.38
19.10.2005	2-3cm	0	27.5	60	60	8.55	5.86
19.10.2005	3-4cm	0	20	0	60	10.54	9.46
19.10.2005	4-5cm	0	30	5	60	9.47	8.07
09.12.2005	0-1cm	0	n.b.	0	n.b.	15.94	5.21
09.12.2005	1-2cm	0	n.b.	0	n.b.	14.21	9.27
09.12.2005	2-3cm	0	n.b.	0	n.b.	15.62	3.81
09.12.2005	3-4cm	0	n.b.	0	n.b.	17.99	3.9
09.12.2005	4-5cm	0	n.b.	0	n.b.	19.47	6.7

Tabelle A27: Messwerte am Punkt W31, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
21.08.2003	0-1cm	0	75	0	0	19.4	8.38
21.08.2003	1-2cm	0	85	0	0	13	8.42
21.08.2003	2-3cm	0	53	0	0	7.09	0.75
21.08.2003	3-4cm	0	55	0	0	5	2.84
21.08.2003	4-5cm	0	35	0	0	4.8	3.39
22.09.2003	0-1cm	0	25	600	0	3.96	2.52
22.09.2003	1-2cm	0	32.5	600	0	3.74	1.68
22.09.2003	2-3cm	0	n.b.	0	0	6.8	4.28
22.09.2003	3-4cm	0	57	0	0	11.73	6.59
22.09.2003	4-5cm	75.5	66	1200	0	15.43	7.26
10.10.2003	0-1cm	0	27.5	0	5	5.34	0.79
10.10.2003	1-2cm	0	40	0	5	4.94	1.31
10.10.2003	2-3cm	0	32.5	600	5	6.26	4.14
10.10.2003	3-4cm	0	45	0	5	4.68	0.95
10.10.2003	4-5cm	0	37.5	0	5	6.11	1.01
28.10.2003	0-1cm	0	10	0	0	3.26	0.9
28.10.2003	1-2cm	0	10	0	0	5.59	0.71
28.10.2003	2-3cm	0	10	0	0	4.88	1.21
28.10.2003	3-4cm	0	10	0	0	4.96	0.54
28.10.2003	4-5cm	0	10	0	0	4.96	0.47
27.11.2003	0-1cm	0	20	0	0	7.34	1.02
27.11.2003	1-2cm	0	20	0	0	6.77	1.04
27.11.2003	2-3cm	0	20	0	0	4.78	0.83
27.11.2003	3-4cm	0	25	0	0	5.96	0.54
27.11.2003	4-5cm	0	15	0	0	5.35	0.52
17.12.2003	0-1cm	0	0	0	0	8.07	0.83
17.12.2003	1-2cm	0	0	0	0	7.95	0.65
17.12.2003	2-3cm	0	0	0	0	7.4	0.92
17.12.2003	3-4cm	0	0	0	0	7.91	0.25
17.12.2003	4-5cm	0	0	0	0	7.37	0.2
26.02.2004	0-1cm	0	20	0	0	7.47	0.5
26.02.2004	1-2cm	0	10	0	0	6.47	0.62
26.02.2004	2-3cm	0	20	0	0	7.44	0.51
26.02.2004	3-4cm	0	20	0	0	7.16	0.53
26.02.2004	4-5cm	0	20	0	0	6.51	0.49
08.03.2004	0-1cm	0	n.b.	0	n.b.	4.49	0.77
08.03.2004	1-2cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	2-3cm	0	n.b.	0	n.b.	7.44	0.68
08.03.2004	3-4cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	4-5cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
25.03.2004	0-1cm	0	20	5	0	0.77	0.37
25.03.2004	1-2cm	0	20	0	0	5.41	1.16
25.03.2004	2-3cm	0	25	0	0	5.78	1.51
25.03.2004	3-4cm	0	15	0	0	5.58	0.71
25.03.2004	4-5cm	0	22.5	0	0	6.06	0.42
16.04.2004	0-1cm	0	40	0	0	3.82	0.77
16.04.2004	1-2cm	0	23	5	0	0.9	0.52
16.04.2004	2-3cm	0	25	5	0	0.89	0.41
16.04.2004	3-4cm	0	20	5	0	1.26	0.27
16.04.2004	4-5cm	0	20	5	0	1.39	0.6

Fortsetzung Tabelle A27: Messwerte am Punkt W31

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
21.04.2004	0-1cm	0	10	0	0	5.43	2.42
21.04.2004	1-2cm	0	12.5	0	0	4.7	0.65
21.04.2004	2-3cm	0	20	0	0	6.11	0.7
21.04.2004	3-4cm	0	15	0	0	7.31	0.35
21.04.2004	4-5cm	0	10	0	0	5.92	0.27
25.05.2004	0-1cm	0	27.5	5	5	1.19	0.94
25.05.2004	1-2cm	36	40	1800	5	4.86	4.07
25.05.2004	2-3cm	0	27.5	600	5	4.08	5.07
25.05.2004	3-4cm	0	0	0	5	4.32	2.56
25.05.2004	4-5cm	0	0	0	0	4.65	1.42
16.06.2004	0-1cm	0	32.5	0	0	1.69	0.28
16.06.2004	1-2cm	58	32.5	60	0	1.09	0.79
16.06.2004	2-3cm	0	20	60	0	1.22	0.78
16.06.2004	3-4cm	0	20	60	0	1.69	1.06
16.06.2004	4-5cm	0	20	0	0	1.42	0.62
08.07.2004	0-1cm	0	27.5	0	0	0.5	0.24
08.07.2004	1-2cm	0	12.5	0	0	2.71	0.27
08.07.2004	2-3cm	0	10	0	0	3.35	0.31
08.07.2004	3-4cm	0	10	0	0	4.04	0.2
08.07.2004	4-5cm	0	20	0	0	4.3	0.16
22.07.2004	0-1cm	0	30	0	0	5.39	0.92
22.07.2004	1-2cm	0	17.5	0	0	0.9	0.26
22.07.2004	2-3cm	0	25	0	0	0.95	0.31
22.07.2004	3-4cm	0	20	5	0	1.46	0.32
22.07.2004	4-5cm	0	17.5	5	0	1.95	0.39
10.08.2004	0-1cm	0	20	0	5	5.41	1.5
10.08.2004	1-2cm	0	30	5	5	4.1	0.93
10.08.2004	2-3cm	7.5	27	600	5	4.41	0.85
10.08.2004	3-4cm	0	25	5	5	4.72	0.48
10.08.2004	4-5cm	0	20	0	5	5.22	0.4
31.08.2004	0-1cm	0	25	0	0	8.19	0.64
31.08.2004	1-2cm	17.5	45	600	5	4.64	1.82
31.08.2004	2-3cm	60	40	600	5	5.21	1.14
31.08.2004	3-4cm	0	27.5	60	5	5.89	1.19
31.08.2004	4-5cm	0	30	0	5	6.27	1.32
22.09.2004	0-1cm	0	45	5	60	2.72	2.51
22.09.2004	1-2cm	0	40	0	60	7.46	0.73
22.09.2004	2-3cm	0	47.5	0	60	9.08	0.55
22.09.2004	3-4cm	0	45	0	60	9.39	0.8
22.09.2004	4-5cm	0	50	0	60	7.78	0.37
20.10.2004	0-1cm	0	15	0	0	9.27	1.59
20.10.2004	1-2cm	55	35	600	0	2.51	2.4
20.10.2004	2-3cm	64	35	600	0	2.14	2.27
20.10.2004	3-4cm	0	20	600	0	1.74	2.98
20.10.2004	4-5cm	0	25	5	0	2.01	2.79
24.11.2004	0-1cm	0	22.5	0	0	7.26	1.47
24.11.2004	1-2cm	0	30	5	0	7.27	1.74
24.11.2004	2-3cm	0	15	5	0	8.42	2.53
24.11.2004	3-4cm	0	15	5	0	8.44	2.53
24.11.2004	4-5cm	0	15	5	0	9.14	1.57

Fortsetzung Tabelle A27: Messwerte am Punkt W31, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
16.12.2004	0-1cm	20	0	0	0	4.85	0.9
16.12.2004	1-2cm	0	0	0	0	4.4	1.21
16.12.2004	2-3cm	0	0	0	0	5.21	0.74
16.12.2004	3-4cm	0	0	0	0	5.32	0.82
16.12.2004	4-5cm	0	0	0	0	4.72	0.54
18.01.2005	0-1cm	0	0	5	0	2.2	1.08
18.01.2005	1-2cm	20	0	0	0	4.81	1.17
18.01.2005	2-3cm	20	0	0	0	4.26	0.85
18.01.2005	3-4cm	15	0	0	0	4.9	0.43
18.01.2005	4-5cm	10	0	0	0	4.63	0.48
22.03.2005	0-1cm	0	20	5	0	2.14	0.58
22.03.2005	1-2cm	0	20	0	0	4.09	0.85
22.03.2005	2-3cm	0	20	0	0	6.14	0.51
22.03.2005	3-4cm	0	10	0	0	6.49	0.33
22.03.2005	4-5cm	0	10	0	0	3.91	1.06
20.04.2005	0-1cm	0	40	0	5	10.49	0.45
20.04.2005	1-2cm	0	35	5	5	2.08	0.7
20.04.2005	2-3cm	0	32.5	5	5	3.2	0.61
20.04.2005	3-4cm	0	20	0	5	3.62	0.86
20.04.2005	4-5cm	0	15	0	5	3.08	1.19
07.06.2005	0-1cm	n.b.	25	n.b.	0	n.b.	n.b.
07.06.2005	1-2cm	0	5	0	0	5.3	0.29
07.06.2005	2-3cm	0	15	0	0	3.56	0.63
07.06.2005	3-4cm	0	12.5	0	0	2.92	0.67
07.06.2005	4-5cm	0	15	0	0	3.85	0.44
12.07.2005	0-1cm	0	15	5	0	1.22	0.75
12.07.2005	1-2cm	n.b.	25	n.b.	0	n.b.	n.b.
12.07.2005	2-3cm	0	10	0	0	3.6	0.36
12.07.2005	3-4cm	0	20	0	0	3.74	0.69
12.07.2005	4-5cm	0	20	0	0	3.93	0.45
19.08.2005	0-1cm	0	32.5	0	0	1.73	0.9
19.08.2005	1-2cm	0	25	0	0	2.45	0.75
19.08.2005	2-3cm	0	15	5	0	1.62	0.64
19.08.2005	3-4cm	0	17.5	0	0	3.65	0.53
19.08.2005	4-5cm	0	10	0	0	4.48	0.42
20.09.2005	0-1cm	0	27.5	60	5	2.96	1.58
20.09.2005	1-2cm	0	32.5	5	5	1.41	1.08
20.09.2005	2-3cm	60	35	3600	5	4.81	1.33
20.09.2005	3-4cm	55	35	600	5	6.06	1.47
20.09.2005	4-5cm	0	30	0	5	5.71	1.43
19.10.2005	0-1cm	0	40	60	5	1.42	0.91
19.10.2005	1-2cm	61	25	3600	5	4.09	1.77
19.10.2005	2-3cm	0	15	5	5	2.48	0.52
19.10.2005	3-4cm	0	25	0	5	3	0.71
19.10.2005	4-5cm	0	20	0	5	3.88	1.07
09.12.2005	0-1cm	0	n.b.	0	n.b.	15.14	0.83
09.12.2005	1-2cm	50	n.b.	600	n.b.	1.91	0.57
09.12.2005	2-3cm	0	n.b.	0	n.b.	7.11	0.94
09.12.2005	3-4cm	0	n.b.	0	n.b.	6.25	0.94
09.12.2005	4-5cm	0	n.b.	0	n.b.	7.23	1.77

Tabelle A28: Messwerte am Punkt W33, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
21.08.2003	0-1cm	0	30	0	0	1.4	0.17
21.08.2003	1-2cm	0	30	0	0	0.4	0.4
21.08.2003	2-3cm	0	40	0	0	0.4	0.76
21.08.2003	3-4cm	0	30	0	0	0.6	0.94
21.08.2003	4-5cm	0	35	0	0	0.4	0.81
22.09.2003	0-1cm	0	22.5	0	0	6.57	2.19
22.09.2003	1-2cm	0	42.5	0	0	3.99	1.93
22.09.2003	2-3cm	0	42.5	0	0	4.02	1.46
22.09.2003	3-4cm	0	35	0	0	4.71	1.26
22.09.2003	4-5cm	0	25	0	0	4.6	1.56
10.10.2003	0-1cm	0	40	0	5	13.78	1.67
10.10.2003	1-2cm	0	42.5	600	5	14.59	1.29
10.10.2003	2-3cm	0	40	600	5	10.39	1.19
10.10.2003	3-4cm	0	45	60	5	10.26	1.68
10.10.2003	4-5cm	0	37.5	0	5	7.54	1.65
28.10.2003	0-1cm	0	27.5	0	5	14.5	3.89
28.10.2003	1-2cm	0	30	0	5	18.47	4.2
28.10.2003	2-3cm	0	22.5	0	5	17.85	5.07
28.10.2003	3-4cm	0	30	0	5	16.29	4.68
28.10.2003	4-5cm	0	20	0	5	15.65	3.2
27.11.2003	0-1cm	0	30	0	5	17.34	3.37
27.11.2003	1-2cm	0	32.5	0	5	16.49	3.83
27.11.2003	2-3cm	0	32.5	0	5	17.59	3.59
27.11.2003	3-4cm	0	20	0	5	19.41	1.44
27.11.2003	4-5cm	0	20	0	5	12.43	1.34
17.12.2003	0-1cm	0	0	0	5	17.35	2
17.12.2003	1-2cm	0	0	0	0	21.29	1.16
17.12.2003	2-3cm	0	0	0	0	25.4	0.98
17.12.2003	3-4cm	0	0	0	0	22.38	0.64
17.12.2003	4-5cm	0	0	0	0	12.91	1.28
26.02.2004	0-1cm	0	12.5	0	5	9.35	4.23
26.02.2004	1-2cm	0	27.5	0	5	9.82	4.34
26.02.2004	2-3cm	0	30	0	5	10.81	2.46
26.02.2004	3-4cm	0	25	0	5	10.05	3.99
26.02.2004	4-5cm	0	22.5	0	5	12.02	1.96
08.03.2004	0-1cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	1-2cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	2-3cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	3-4cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
08.03.2004	4-5cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
25.03.2004	0-1cm	0	37.5	5	5	14.07	2.44
25.03.2004	1-2cm	0	30	5	5	21.45	2.5
25.03.2004	2-3cm	0	25	5	5	29.81	3.89
25.03.2004	3-4cm	0	32.5	0	5	35.4	3.84
25.03.2004	4-5cm	0	30	0	5	31.42	4.87
16.04.2004	0-1cm	0	37.5	60	5	6.54	1.86
16.04.2004	1-2cm	0	45	60	5	5.92	2.91
16.04.2004	2-3cm	0	45	60	5	5.33	1.92
16.04.2004	3-4cm	0	25	60	5	8.96	1.91
16.04.2004	4-5cm	0	35	5	5	7.08	1.4

Fortsetzung Tabelle A28: Messwerte am Punkt W33

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
21.04.2004	0-1cm	0	45	0	5	4.32	3.31
21.04.2004	1-2cm	0	35	0	5	6.49	3.8
21.04.2004	2-3cm	0	20	600	5	9.4	3.29
21.04.2004	3-4cm	0	25	0	5	11.56	2.5
21.04.2004	4-5cm	0	30	0	5	9.69	2.22
25.05.2004	0-1cm	94	60.5	3600	600	17.11	7.21
25.05.2004	1-2cm	71	42.5	1800	60	9.29	6.71
25.05.2004	2-3cm	70	42.5	600	60	12.42	2.97
25.05.2004	3-4cm	0	45	1800	60	18.46	3.92
25.05.2004	4-5cm	0	37.5	1200	60	15.34	2.49
16.06.2004	0-1cm	.	45	3600	60	8.09	5.62
16.06.2004	1-2cm	.	52.5	3600	60	4.3	4.28
16.06.2004	2-3cm	69.5	40	600	60	5.06	3.97
16.06.2004	3-4cm	0	45	600	60	6.44	3.4
16.06.2004	4-5cm	0	35	5	60	9.28	2.03
08.07.2004	0-1cm	.	55	2400	60	12.31	3.43
08.07.2004	1-2cm	76.5	59.5	2400	60	6.82	6.81
08.07.2004	2-3cm	93.5	47.5	1800	60	6.09	3.23
08.07.2004	3-4cm	88.5	47.5	1200	60	7.98	3.69
08.07.2004	4-5cm	0	50	600	60	7.02	3.29
22.07.2004	0-1cm	0	40	60	5	4.09	1.02
22.07.2004	1-2cm	0	37.5	600	5	2.98	1.59
22.07.2004	2-3cm	0	35	60	5	4.29	1.05
22.07.2004	3-4cm	52.5	37.5	600	5	7.28	1.27
22.07.2004	4-5cm	0	35	60	5	7.75	0.97
10.08.2004	0-1cm	62	27.5	5	5	8.06	0.94
10.08.2004	1-2cm	64.5	45	1800	5	7.22	1.1
10.08.2004	2-3cm	61.5	40	2400	5	7.45	1.61
10.08.2004	3-4cm	0	40	60	5	9.84	0.85
10.08.2004	4-5cm	0	40	0	5	7.89	1.68
31.08.2004	0-1cm	0	30	0	0	8.29	1.71
31.08.2004	1-2cm	0	32.5	600	5	6.74	2.14
31.08.2004	2-3cm	66.5	40	600	5	6.44	1.58
31.08.2004	3-4cm	60	40	600	5	5.37	1.28
31.08.2004	4-5cm	0	40	0	0	6.25	2.23
22.09.2004	0-1cm	0	45	5	5	8.78	1.52
22.09.2004	1-2cm	0	50	600	5	16.65	1.49
22.09.2004	2-3cm	0	35	600	5	25.73	1.21
22.09.2004	3-4cm	0	37.5	5	5	27.69	1.26
22.09.2004	4-5cm	0	25	5	5	24.1	1.96
20.10.2004	0-1cm	0	30	0	0	8.3	0.93
20.10.2004	1-2cm	0	15	0	0	9.4	1.77
20.10.2004	2-3cm	0	32.5	0	0	9.64	1.48
20.10.2004	3-4cm	0	20	0	0	10.22	1.47
20.10.2004	4-5cm	0	7.5	0	0	8.54	0.7
24.11.2004	0-1cm	0	30	0	5	9.17	3.83
24.11.2004	1-2cm	0	35	0	5	9.03	2.85
24.11.2004	2-3cm	0	27.5	0	5	8.36	1.84
24.11.2004	3-4cm	0	27.5	0	5	8.69	2.07
24.11.2004	4-5cm	0	20	0	5	12.34	1.83

Fortsetzung Tabelle A28: Messwerte am Punkt W33, (n.b.- nicht bestimmt)

Probenahmedatum	Tiefenstufe	Kontaktwinkel [°]		WDPT [s]		Wassergehalt [%]	Corg [%]
		akt	pot	akt	pot		
16.12.2004	0-1cm	30	0	0	0	7.1	1.28
16.12.2004	1-2cm	22.5	0	0	0	8.42	1.03
16.12.2004	2-3cm	25	0	0	0	9.04	0.96
16.12.2004	3-4cm	20	0	0	0	7.95	0.6
16.12.2004	4-5cm	20	0	0	0	8.1	0.77
18.01.2005	0-1cm	0	20	5	5	14.42	3.23
18.01.2005	1-2cm	0	27.5	5	5	20.92	5.39
18.01.2005	2-3cm	0	25	0	5	26.57	8.06
18.01.2005	3-4cm	0	20	0	5	37.84	5.88
18.01.2005	4-5cm	0	20	0	5	30.51	6.15
22.03.2005	0-1cm	0	40	5	5	3	2.57
22.03.2005	1-2cm	0	32.5	0	5	3.52	3.3
22.03.2005	2-3cm	0	40	0	5	3.22	1.85
22.03.2005	3-4cm	0	25	0	5	5.74	3.05
22.03.2005	4-5cm	0	25	0	5	8.5	1.48
20.04.2005	0-1cm	0	40	0	5	15.43	1.88
20.04.2005	1-2cm	64	42.5	1200	5	9.8	2.62
20.04.2005	2-3cm	60	42.5	1200	5	9.03	1.71
20.04.2005	3-4cm	0	40	5	5	9.37	1.25
20.04.2005	4-5cm	0	22.5	0	5	8.01	1.24
07.06.2005	0-1cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	1-2cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	2-3cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	3-4cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
07.06.2005	4-5cm	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
12.07.2005	0-1cm	58.5	50	1200	600	5.09	4.07
12.07.2005	1-2cm	68	47.5	1800	600	4.62	5.59
12.07.2005	2-3cm	72.5	55	2400	600	5.16	4.94
12.07.2005	3-4cm	22.5	57.5	600	600	5.71	7.94
12.07.2005	4-5cm	50	40	600	600	8.03	4.23
19.08.2005	0-1cm	0	35	5	60	13.18	3.11
19.08.2005	1-2cm	67	50	600	60	8.42	5.81
19.08.2005	2-3cm	0	55	5	60	6.21	10.8
19.08.2005	3-4cm	0	42.5	5	60	7.39	6.89
19.08.2005	4-5cm	0	35	5	60	11.32	5.87
20.09.2005	0-1cm	0	40	1200	60	5.91	4.92
20.09.2005	1-2cm	65.5	35	1800	60	7.98	4.49
20.09.2005	2-3cm	60.5	45	1800	60	8.6	6.35
20.09.2005	3-4cm	20	40	600	60	9.41	4.31
20.09.2005	4-5cm	0	27.5	5	60	9.57	3.94
19.10.2005	0-1cm	0	52.5	0	5	3.84	3.63
19.10.2005	1-2cm	63.5	40	1200	5	4.67	2.84
19.10.2005	2-3cm	80.5	40	1200	5	6.99	2.46
19.10.2005	3-4cm	20	37.5	1200	5	11.24	2.69
19.10.2005	4-5cm	0	22.5	0	5	17.41	3.32
09.12.2005	0-1cm	0	n.b.	0	n.b.	13.5	10.94
09.12.2005	1-2cm	0	n.b.	0	n.b.	10.63	11.97
09.12.2005	2-3cm	0	n.b.	0	n.b.	10.59	6.14
09.12.2005	3-4cm	0	n.b.	0	n.b.	9.08	4.29
09.12.2005	4-5cm	0	n.b.	0	n.b.	11.98	5.27

Danksagung

An dieser Stelle danke ich im besonderen Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Reinhard F. Hüttl, Wissenschaftlicher Vorstand des Deutschen GeoForschungsZentrum Potsdam und Inhaber des Lehrstuhls für Bodenschutz und Rekultivierung für die Möglichkeit der Promotion, die Bereitstellung des interessanten Themas, die vielseitige Unterstützung sowie die Übernahme des Erstgutachtens.

Herrn Prof. Dr. Thomas Raab, Inhaber des Lehrstuhls Geopedologie und Landschaftsentwicklung danke ich sehr herzlich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Herrn Dr. Oliver Bens möchte ich für die kritischen Diskussionen, das Engagement und die Unterstützung danken, ohne die diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

Für das gute Arbeitsklima und die Unterstützung danke ich meinen Projektmitstreitern Dr. Matthias Kuhnert und Dr. Sören Haubrock, den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Bodenschutz und Rekultivierung der BTU Cottbus und des ZAL, sowie Herrn Prof. Dr. Bruno Merz, Dr. Andreas Güntner (Deutsches GeoForschungs-Zentrum Potsdam, Sektion 5.4) und Frau Dr. Sabine Chabrilat (GFZ, Sektion 1.4).

Herrn Thomas Neumann (Vattenfall GmbH) und Herrn Reinhard Reißmann (BEAK Consultants GmbH) danke ich für die konstruktive Zusammenarbeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt all denjenigen, die durch kritische Diskussionen des Manuskripts, konstruktive Kritik, Anregungen und Beharrlichkeit zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben.