

Schriftenreihe des Instituts

Neuere vorrätige Titel

- Band 74** **Julia Krümmelbein (2007):** Influence of various grazing intensities on soil stability and water balance of a steppe soil in Inner Mongolia, P.R. China
- Band 75** **Stephan Gebhardt (2007):** Wasserhaushalt und Funktionen der Böden im Grundwasserabsenkbereich des Wasserwerkes Wacken in Schleswig-Holstein
- Band 76** **Imke Janßen (2008):** Landnutzungsabhängige Dynamik hydraulischer und mechanischer Bodenstrukturfunktionen in Nassreisböden
- Band 77** **Ying Zhao (2008):** Grazing effects on hydraulic, thermal and mechanical soil properties at multiple scales – a case study in Inner Mongolia grassland
- Band 78** **Hans-Peter Blume & Rainer Horn (Hrsg.):** Persönlichkeiten der Bodenkunde I
Vorträge der Arbeitsgruppe Geschichte der Bodenkunde im Rahmen der Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft im September 2007 in Dresden
- Band 79** **Britta Pitann (2008):** Einfluss der Plasmalemma-ATPase-Aktivität und des apoplastischen pH-Wertes auf das Blattwachstum und die Proteinexpression von salzempfindlichen und salzresistenten Maisgenotypen
- Band 80** **Peter Hartmann (2008):** Bodenphysikalische Eigenschaften, Benetzbarkeiten und Wasserhaushalt von Waldböden unter Flugascheeinfluss
- Band 81** **Kristine Bolte (2008):** Untersuchungen zur feuchteabhängigen Dynamik des bodenspezifischen Erosionswiderstandes bei Bewindung unter Windkanalbedingungen
- Band 82** **Limeng Zhang (2008):** Effect of nitrogen fertilizer on yield formation and nitrogen uptake of aerobic rice in North China
- Band 83** **Ruirui Chen (2009):** A study on apparent added nitrogen interactions and priming effects of soil organic matter using stable isotopes
- Band 84** **Alexander Zink (2009):** Bodenstabilität und Auswirkungen dynamischer Lasteinträge auf physikalische Eigenschaften von Ackerböden unter konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung
- Band 85** **Hans-Peter Blume & Rainer Horn (Hrsg.):** Persönlichkeiten der Bodenkunde II
Vorträge der Arbeitsgruppe Geschichte der Bodenkunde im Rahmen der Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft im September 2009 in Bonn
- Band 86** **Mehmet Senbayram (2010):** Greenhouse gas emission from soils of bioenergy crop production systems and regulating factors
- Band 87** **Nicole Fanselow (2010):** Soil nitrogen - plant interactions as affected by grazing and water availability in semiarid grassland of Inner Mongolia
- Band 88** **Dorothee Steinfurth (2010):** Storage protein quality, metabolite composition, and baking quality of winter wheat as affected by late sulfur fertilization
- Band 89** **Dörthe Holthusen (2010):** Fertilization induced changes in soil stability at the microscale revealed by rheometry
- Band 90** **Agnieszka Reszkowska (2010):** Grazing effects on soil mechanical strength and physical functions in Inner Mongolia, China
- Band 91** **Christoph-Martin Geilfus (2011):** Expansin expression and apoplastic pH in expanding leaves under NaCl stress
- Band 92** **Muhammad Shahzad (2012):** Growth-related changes in subcellular ion and protein patterns in maize and field bean leaves under salt stress
- Band 93** **Sajid Masood (2012):** Interaction of salt stress and boron toxicity on subcellular ion relations, antioxidative activity and soluble apoplastic protein pattern in wheat leaves
- Band 94** **Lei Gan (2012):** Effects of different grazing intensities on soil water and thermal regimes under *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* vegetation types in Inner Mongolia grassland, China
- Band 95** **Hans-Peter Blume & Rainer Horn (Hrsg.):** Persönlichkeiten der Bodenkunde III
Vorträge der Arbeitsgruppe Geschichte der Bodenkunde im Rahmen der Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft im September 2011 in Berlin.
- Band 96** **Hans-Peter Blume & Rainer Horn (Hrsg.):** Persönlichkeiten der Bodenkunde IV Die Tonverlagerung als profilprägender Prozeß in Böden aus jungpleistozänem Geschiebemergel. Faksimileausgabe der Dissertation von Hans-Peter Blume aus dem Jahre 1961

SCHRIFTENREIHE

**Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde
Universität Kiel**



Nr. 97 (2012)

Iris Zimmermann

**Entwicklung einer umweltgerechten
Erdbestattungspraxis im Hinblick auf die
Folgewirkungen auf Böden, Grundwasser und
Atmosphäre**

Herausgeber: R. Horn und K. H. Mühling

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

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

**ISSN 0933-680 X
Preis: Eur 15 (incl. Versandkosten)**

*"Ud hvor lykken vender
Regnbuerne ender
Til du endelig holder skatten
Mellem dine hænder
I en kiste fuld
Fuld af guld som hver en dåre blænder
Fuld af nattens stjerner
Fuld af alle himlens stjernesud."*

(K. T. G. Christensen, 1986)

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

Entwicklung einer umweltgerechten Erdbestattungspraxis im Hinblick auf die Folgewirkungen auf Böden, Grundwasser und Atmosphäre

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät

der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

M.Sc. Iris Maria Zimmermann

aus Eckernförde

Kiel, 2012

Dekan: Prof. Dr. Rainer Horn

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Rainer Horn

2. Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. Rainer Duttmann

Tag der mündlichen Prüfung: 07.11.2012

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Abkürzungsverzeichnis.....	X
1. Einleitung und Zielsetzung.....	1
2. Stand der Forschung.....	3
2.1 Verwesung im Erdgrab.....	3
2.2 Beeinflussungen von Boden, Grundwasser und Atmosphäre.....	3
2.2.1 Pathogene Keime.....	3
2.2.2 Belastung durch Schwermetalle und Freisetzung von anorganischen Giften.....	4
2.2.3 Akkumulation von Verwesungsprodukten in Friedhofsböden.....	6
2.3 Bei Erdbestattungen auftretende Verwesungsstörungen.....	7
2.3.1 Einfluss der Sauerstoffversorgung.....	8
2.3.2 Einfluss der Bodenreaktion (pH-Wert).....	8
2.3.3 Einfluss der Bodentemperatur.....	10
2.4 Die Bewertung der Eignung von Böden für die Erdbestattung.....	10
3. Material und Methoden.....	13
3.1 Felduntersuchungen auf Friedhöfen.....	13
3.1.1 Untersuchungsstandorte.....	13
3.1.2 Kartierung.....	16
3.1.3 Anlage und Beprobung von Leitprofilen.....	16
3.1.4 Monitoring von Matrixpotentialen, Redoxpotentialen und Bodentemperaturen in Friedhofsböden.....	17
3.1.5 Ermittlung der jährlichen Sickerwasserraten.....	18
3.2 Feldversuch auf Ackerstandort.....	18
3.2.1 Versuchsaufbau.....	19
3.3 Laboruntersuchungen.....	21
3.3.1 Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f).....	21
3.3.2 Luftleitfähigkeit (k_l) und abgeleitete Porenfunktionen.....	21
3.3.3 Wasserretentionsfunktion und Trockenrohddichte (ρ_t).....	22
3.3.4 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u).....	22

3.3.5 Gesamtkohlenstoffgehalt (C_t), Carbonatgehalt, organischer Kohlenstoffgehalt (C_{org}) und Humusgehalt	23
3.3.6 Gesamtstickstoff	23
3.3.7 Bodenreaktion (pH-Wert).....	23
3.3.8 Kationenaustauschkapazität (KAK)	23
3.3.9 Korngrößenverteilung	24
3.4 Statistische Auswertung.....	24
3.5 Ermittlung und Einstufung von Bodenkennwerten nach Ad-hoc-AG Boden 2005	25
4. Ergebnisse	27
4.1 Bodenkundliche Aufnahme und Bewertung von Friedhofsböden	27
4.2 Ergebnisse der kartierten Friedhöfe.....	34
4.2.1 Untersuchte Friedhöfe in Schleswig-Holstein.....	34
4.2.1.1 Kartierung und Bewertung	34
4.2.1.2 Bodenchemische Kennwerte	38
4.2.2 Untersuchte Friedhöfe in Niedersachsen	41
4.2.2.1 Kartierung und Bewertung	41
4.2.2.2 Chemische Kennwerte der Friedhöfe NI1-NI4.....	48
4.2.3 Untersuchte Friedhöfe in Berlin.....	50
4.2.3.1 Kartierung und Bewertung	50
4.2.3.2 Bodenchemische Kennwerte	54
4.2.4 Untersuchte Friedhöfe in Nordrhein-Westfalen	55
4.2.4.1 Kartierung und Bewertung	55
4.2.4.2 Bodenchemische Kennwerte	60
4.2.5 Untersuchte Friedhöfe in Rheinland-Pfalz	62
4.2.5.1 Kartierung und Bewertung	62
4.2.5.2 Bodenchemische Kennwerte	66
4.2.6 Untersuchte Friedhöfe in Bayern	67
4.2.6.1 Kartierung und Bewertung	67
4.2.6.2 Bodenchemische Kennwerte	72
4.2.7 Untersuchte Friedhöfe in Baden-Württemberg	74
4.2.7.1. Kartierung und Bewertung	74
4.2.7.2 Bodenchemische Kennwerte	81
4.2.8 Zusammenfassung der kartierten Friedhöfe.....	82
4.2.8.1 Bewertungsgrundlagen.....	82
4.2.8.2 Bodenmodifikationen durch die Bestattungstätigkeit	84

4.2.8.2.1 Humusgehalte	84
4.2.8.2.2 Änderung des Humusgehaltes als Funktion der Nutzungsdauer	86
4.2.8.2.3 Gesamtstickstoffgehalte (N_t)	86
4.3 Leitprofile.....	88
4.3.1 Friedhof SH1	88
4.3.1.1 Leitprofil A	88
4.3.1.2 Leitprofil B	90
4.3.2 Leitprofil C, Friedhof BE1.....	92
4.3.3 Leitprofil D, Friedhof BW3.....	94
4.3.4 Bodenphysikalische Kennwerte der Leitprofile.....	97
4.4 Monitoring auf Friedhöfen.....	106
4.4.1 Friedhof SH1	107
4.4.1.1 Monitoringstation A	107
4.4.1.2 Monitoringstation B	110
4.4.2. Monitoringstation C, Friedhof BE1.....	113
4.4.3 Monitoringstation D, Friedhof BW3.....	116
4.5 Bewertung der Leitprofilstandorte	120
4.6 Feldversuch zur Auswirkung von Grabtätigkeiten auf Bodeneigenschaften und -funktionen	124
4.6.1 Bodenphysikalische Kennwerte aus dem Feldversuch	125
4.6.2 Monitoring.....	132
4.6.2.1 Gießwassergaben	136
4.6.3 Zusammenfassung des Feldversuches.....	138
5. Diskussion	139
5.1 Klassifizierung, Kartierung und Humusgehalte von Friedhofsböden	139
5.2 Die Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung von Friedhofsböden	142
5.3 Bodenstrukturentwicklung und Wasserhaushalt in einem Erdgrab.....	149
6. Schlussbetrachtung.....	157
7. Zusammenfassung	159
8. Summary.....	161
9. Literaturverzeichnis	163
10. Anhang.....	175

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Übersicht der kartierten Friedhöfe (n=19) in den Bundesländern Schleswig-Holstein (SH1 und SH2), Niedersachsen (NI1, NI2, NI3 und NI4), Berlin (BE1 und BE2), Nordrhein-Westfalen (NW1, NW2 und NW3), Rheinland-Pfalz (RP1 und RP2), Bayern (BY1, BY2 und BY3) und Baden-Württemberg (BW1, BW2 und BW3), Leitprofile (n=6) und Monitoringstationen (n=4) mit geographischer Lage....	14
Abb. 2: Anordnung eines Messplatzes in abgelaufenen Grabreihen und vertikale Verteilung der Sonden zur Messung von Matrixpotential (ψ_m), Redoxpotential (Eh) und Bodentemperatur (Temp.)	18
Abb. 3: Übersicht Versuchsfläche und vertikale Verteilung der Sonden zur Messung von Matrixpotential (ψ_m) und Redoxpotential (Eh), Versuch auf Ackerfläche zu den Auswirkungen von Grabtätigkeiten auf Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen	20
Abb. 4: Klassifikation von Friedhofsböden nach dem Wassereinfluss.....	28
Abb. 5: Bewertung der Verwesungsleistung von Friedhofsböden nach LK und Boden(sub-)typ und (Sub-)Varietät	30
Abb. 6: Bewertung der Filterleistung von Friedhofsböden unterhalb der Grabsohle nach Gesamtfilterwirkung und Wassereinflüssen, Bewertung ausgehend von einer Mächtigkeit der Filterschicht von 70 cm und einer Sickerwassermenge von 300 mm Jahr ⁻¹	32
Abb. 7: Friedhof SH1, Friedhofsplan mit Bohrpunkten	34
Abb. 8: Friedhof SH1, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen.....	35
Abb. 9: Friedhof SH2, Friedhofsplan mit Bohrpunkten	36
Abb. 10: Friedhof SH2, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen.....	37
Abb. 11: Friedhof SH2, Detailaufnahme Sargdeckel (links) und Beckenknochen mit Adipocire (rechts)	38
Abb. 12: Friedhof SH1, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte.....	39
Abb. 13: Friedhof SH2, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte.....	40
Abb. 14: Friedhof NI1, Friedhofsplan mit Bohrpunkten.....	41
Abb. 15: Friedhof NI1, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen.....	42
Abb. 16: Friedhof NI2, Friedhofsplan mit Bohrpunkten.....	43
Abb. 17: Friedhof NI2, schematische Catena mit Bodentyp und Texturen.....	44
Abb. 18: Friedhof NI3, Friedhofsplan mit Bohrpunkten.....	45
Abb. 19: Friedhof NI3, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen.....	45
Abb. 20: Friedhof NI4, Friedhofsplan mit Bohrpunkten.....	46
Abb. 21: Friedhof NI4, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen.....	47
Abb. 22: Friedhöfe NI1, NI2 und NI3, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte	48
Abb. 23: Friedhof NI4, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte	49
Abb. 24: Friedhof BE1, Friedhofsplan mit Bohrpunkten	50
Abb. 25: Friedhof BE1, schematische Catena mit Bodentyp und Textur	51
Abb. 26: Friedhof BE2, Friedhofsplan mit Bohrpunkten	52
Abb. 27: Friedhof BE2, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen	53
Abb. 28: Friedhöfe BE1 und BE2, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte.....	54
Abb. 29: Friedhof NW1, Friedhofsplan mit Bohrpunkten	55
Abb. 30: Friedhof NW1, schematische Catena mit Bodentyp und Texturen	56
Abb. 31: Friedhof NW2, Friedhofsplan mit Bohrpunkten	57
Abb. 32: Friedhof NW2, schematische Catena mit Bodentyp und Texturen	58
Abb. 33: Friedhof NW3, Friedhofsplan mit Bohrpunkten	59

Abb. 34: Friedhof NW3, schematische Catena mit Bodentyp und Textur	60
Abb. 35: Friedhöfe NW1, NW2 und NW3, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte.....	61
Abb. 36: Friedhof RP1, Friedhofsplan mit Bohrpunkten	62
Abb. 37: Friedhof RP1, schematische Catena mit Bodentyp und Texturen	63
Abb. 38: Friedhof RP2, Friedhofsplan mit Bohrpunkten	64
Abb. 39: Friedhof RP2, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen.....	65
Abb. 40: Friedhöfe RP1 und RP2, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte	66
Abb. 41: Friedhof BY1, Friedhofsplan mit Bohrpunkten	67
Abb. 42: Friedhof BY1, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen.....	68
Abb. 43: Friedhof BY2, Friedhofsplan mit Bohrpunkten	69
Abb. 44: Friedhof BY2, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen	70
Abb. 45: Friedhof BY3, Friedhofsplan mit Bohrpunkten	71
Abb. 46: Friedhof BY3, schematische Catena mit Bodentyp und Texturen	72
Abb. 47: Friedhöfe BY1, BY2 und BY3, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte.....	73
Abb. 48: Friedhof BW1, Friedhofsplan mit Bohrpunkten.....	75
Abb. 49: Friedhof BW1, schematische Catena mit Bodentyp und Textur.....	76
Abb. 50: Friedhof BW2, Friedhofsplan mit Bohrpunkten.....	77
Abb. 51: Friedhof BW2, schematische Catena mit Bodentypen und Textur.....	78
Abb. 52: Friedhof BW3, Friedhofsplan mit Bohrpunkten.....	79
Abb. 53: Friedhof BW3, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen	80
Abb. 54: Friedhöfe BW1 und BW2, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte.....	81
Abb. 55: Friedhof BW3, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte	82
Abb. 56: Übersicht Bewertung der Verwesungsleistung (A) und Filterleistung (B) aller untersuchten Bodeneinheiten	83
Abb. 57: Leitprofil A, Friedhof SH1, Detailaufnahme aus 95-130 cm Tiefe, Sargkontur, Oberschenkelknochen, ca. 50 Jahre nach Beisetzung.....	88
Abb. 58: Leitprofil A, Friedhof SH1, Gley-Rigosol (GG-YY) aus Kolluvium über Niedermoortorf.....	89
Abb. 59: Leitprofil B, Friedhof SH1, Detailaufnahme aus 100 bis 45 cm Tiefe, Sarg, Rippenknochen, ca. 35 Jahre nach Beisetzung	90
Abb. 60: Leitprofil B, Friedhof SH1, Pseudogley-Rigosol (SS-YY) aus Geschiebe(deck-)sand über Geschiebelehm.....	91
Abb. 61: Leitprofil C, Friedhof BE1, Normrigosol (YYn) aus Flugsand	93
Abb. 62: Leitprofil D, Friedhof BW3, Detailaufnahme Wasseraustritt aus beschädigtem Sarg und reduzierter Boden	95
Abb. 63: Leitprofil D, Friedhof BW3, Pseudogley-Rigosol (SS-YY) aus Löss über Rötton	96
Abb. 64: Trockenrohdichten (ρ_t), Leitprofile A (SH1), B (SH1), C (BE1) und D (BW3), Einstufung nach KA5 (Ad-hoc-AG Boden 2005), bei signifikanten Unterschieden innerhalb eines Leitprofils Box fett umrandet und Angabe des p-Werts, Mann-Witney U-test, bei Leitprofil B kennzeichnen unterschiedliche Buchstaben signifikante Unterschiede	97
Abb. 65: Gesättigte Wasserleitfähigkeit, Leitprofile A (SH1), B (SH1), C (BE1) und D (BW3), Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005), bei signifikanten Unterschieden innerhalb eines Leitprofils Box fett umrandet und Angabe des p-Werts, Mann-Witney U-test.....	99
Abb. 66: Leitprofil A, Friedhof SH1, Wasserleitfähigkeitsfunktion von Deckschicht und Filterschicht, Symbole bei $pF \rightarrow \infty$ entsprechen der gesättigten Wasserleitfähigkeit	100

Abb. 67: Leitprofil B, Friedhof SH1, Wasserleitfähigkeitsfunktion von Deckschicht, Grabwand und Filterschicht, Symbole bei $pF -\infty$ entsprechen der gesättigten Wasserleitfähigkeit	100
Abb. 68: Leitprofil C, Friedhof BE1, Wasserleitfähigkeitsfunktion von Deckschicht /Symbole bei $pF -\infty$ entsprechen der gesättigten Wasserleitfähigkeit	101
Abb. 69: Leitprofil D, Friedhof BW3, Wasserleitfähigkeitsfunktion von Deckschicht / Filterschicht, Symbole bei $pF -\infty$ entsprechen der gesättigten Wasserleitfähigkeit	102
Abb. 70: Luftleitfähigkeit bei a: Feldkapazität (-60 hPa) und b:-300 hPa, Leitprofile A (SH1), B (SH1), C (BE1) und D (BW3), Einstufung nach DVWK Merkblatt 235/1997 (DVWK 1997)	103
Abb. 71: C_2 - und C_3 -Indices nach Groenevelt et al. (1984) in Deckschichten (D), Grabwand (W) und Filterschichten (F) der Leitprofile A (SH1), B (SH1), C (BE1) und D (BW3), bei signifikanten Unterschieden innerhalb eines Leitprofils Box fett umrandet und Angabe des p-Werts, Mann-Witney U-test.....	105
Abb. 72: Blockiertes Porenvolumen (ϵ_B), Leitprofile A (SH1), B (SH1), C (SH2), D (BE1) und E (BW3), bei signifikanten Unterschieden innerhalb eines Leitprofils Box fett umrandet und Angabe des p-Werts, Mann-Witney U-test.....	105
Abb. 73: Monitoringstation A, Friedhof SH1, Tagesniederschläge und Lufttemperatur in 2 m Höhe im Messzeitraum November 2010 bis November 2011 (Daten: DWD, Station Leuchtturm Kiel)	108
Abb. 74: Monitoringstation A, Friedhof SH1, Matrixpotentiale November 2012 bis April 2012	108
Abb. 75: Monitoringstation A, Friedhof SH1, rH-Werte bezogen auf pH 6,6 (135 cm, Sargbereich) bzw. pH 5,5 (180 cm und 220 cm, Filterschicht) und Obergrenze des geschlossenen Kapillarsaumes im Messzeitraum November 2010 bis April 2012	109
Abb. 76: Monitoringstation A, Friedhof SH1, Bodentemperaturen im Messzeitraum November 2010 bis April 2012.....	109
Abb. 77: Monitoringstation B, Friedhof SH1, Tagesniederschläge und Lufttemperatur in 2 m Höhe im Messzeitraum November 2010 bis April 2012 (Daten: DWD, Station Leuchtturm Kiel).....	111
Abb. 78: Monitoringstation B, Friedhof SH1, Matrixpotentiale in 20 bis 220 cm Tiefe, Messzeitraum November 2010 bis April 2012.....	111
Abb. 79: Monitoringstation B, Friedhof SH1, rH-Werte bezogen auf pH 6,0 (135 cm, Sargbereich) bzw. pH 7,3 (180 cm und 220 cm, Filterschicht) im Messzeitraum November 2010 bis April 2012	112
Abb. 80: Monitoringstation B, Friedhof SH1, Bodentemperaturen im Messzeitraum November 2010 bis November 2011	112
Abb. 81: Monitoringstation C, Friedhof BE1, Tagesniederschläge und Lufttemperatur in 2 m Höhe im Messzeitraum November 2010 bis April 2012 (Daten: FU Berlin, Institut für Meteorologie, Wetterstation Berlin Marzahn)	114
Abb. 82: Monitoringstation C, Friedhof BE2, Matrixpotentiale im Messzeitraum November 2010 bis April 2012	114
Abb. 83: Monitoringstation C, Friedhof BE2, rH-Werte bezogen auf pH 5,2 (135 cm, Sargbereich) bzw. pH 4,7 (180 cm und 220 cm, Filterschicht) im Messzeitraum November 2010 bis April 2012	115
Abb. 84: Monitoringstation C, Friedhof BE1, Bodentemperatur in Deckschicht, Sargbereich und Filterschicht im Messzeitraum November 2010 bis April 2012	115
Abb. 85: Monitoringstation D, Friedhof BW3, Wetter November 2010 bis April 2012 (Daten: DWD, Station Freiamt).....	117
Abb. 86: Monitoringstation D, Friedhof BW3, Matrixpotentiale in 20 bis 220 cm Tiefe, Messzeitraum November 2010 bis April 2012.....	117

Abb. 87: Monitoringstation D, Friedhof BW3, Redoxpotentiale im Messzeitraum November 2010 bis April 2012	118
Abb. 88: Monitoringstation D, Friedhof BW3, Bodentemperaturen im Messzeitraum November 2010 bis April 2012.....	118
Abb. 89: Hohenschulen, Referenzprofil, Pseudogley-Parabraunerde (SS-LL) aus Geschiebemergel .	124
Abb. 90: Standort Hohenschulen, Trockenrohdichten (ρ_t) mit Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005), Vergleich von ungestörter Referenz in 50 cm und 160 cm Tiefe mit den Varianten A und B 60 Tage nach Schüttung in 20 cm Tiefe und 195 Tage nach Schüttung in 20 cm und 50 cm Tiefe	126
Abb. 91: Standort Hohenschulen, ungestörte Referenz, gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) in vertikaler und horizontaler Richtung, mit Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005), unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede $p \leq 0,05$	128
Abb. 92: Standort Hohenschulen, gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) in vertikaler Richtung mit Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005), Vergleich von ungestörter Referenz in 50 cm und 160 cm Tiefe mit den Varianten A und B 60 Tage nach Schüttung in 20 cm Tiefe und 195 Tage nach Schüttung in 20 cm und 50 cm Tiefe, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede $p \leq 0,05$	128
Abb. 93: Standort Hohenschulen, Luftleitfähigkeit (k_l) a) bei Feldkapazität (-60 hPa) und b) bei -300 hPa, Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005), Vergleich von ungestörter Referenz in 50 cm und 160 cm Tiefe mit den Varianten A und B 60 Tage nach Schüttung in 20 cm Tiefe und 195 Tage nach Schüttung in 20 cm und 50 cm Tiefe, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede $p \leq 0,05$	130
Abb. 94: Standort Hohenschulen, C_2 - und C_3 -Indices nach Groenevelt et al. (1984), Vergleich von ungestörter Referenz in 50 cm und 160 cm Tiefe mit den Varianten A und B 60 Tage nach Schüttung in 20 cm Tiefe und 195 Tage nach Schüttung in 20 cm und 50 cm Tiefe, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede $p \leq 0,05$	131
Abb. 95: Standort Hohenschulen, blockiertes Porenvolumen nach Ball et al. (1988), Vergleich von ungestörter Referenz in 50 cm und 160 cm Tiefe mit den Varianten A und B 60 Tage nach Schüttung in 20 cm Tiefe und 195 Tage nach Schüttung in 20 cm und 50 cm Tiefe.....	132
Abb. 96: Standort Hohenschulen, Tagesniederschläge und Lufttemperatur in 2 Meter Höhe im Messzeitraum September 2011 bis Juli 2012 (Daten: Wetterstation Versuchsgut Hohenschulen, Achterwehr).....	133
Abb. 97: Standort Hohenschulen, Matrixpotentiale in 50 cm bis 130 cm Tiefe, Referenz, Variante A und Variante B im Messzeitraum September 2011 bis Juli 2012.....	133
Abb. 98: Standort Hohenschulen, rH-Werte in 50 cm Tiefe und 130 cm Tiefe, bezogen auf pH 6,6 (Referenz und Variante A) beziehungsweise pH 7,55 (Variante B) und Tagesniederschläge im Messzeitraum September 2011 bis Juli 2012.....	135
Abb. 99: Standort Hohenschulen, Variante C, ψ_m in 50 cm (schwarze Linien) und 130 cm (blaue Linien) Tiefe, Tagesniederschläge (türkise Säulen) und Gießwassergaben (hellblaue Säulen): a: einmalige Gießwassergabe von 2,2 mm, b: einmalige Gießwassergabe von 4,4 mm, c: einmalige Gießwassergabe von 8,9 mm und d: dreimalige Gießwassergabe von 8,9 mm	137
Abb. 100: Friedhof SH1, ψ_m in 20 cm, 30 cm, 50 cm und 90 cm Tiefe, Tagesniederschläge und einmalige Gießwassergabe von 8,9 mm	138

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Standortspezifische Daten der kartierten Friedhöfe: Fläche, Entstehungsjahr, Ruhefrist bei Sargbestattung, Bestattungstiefe, Grundwasserstand unter Geländeoberfläche, Stau-/Hangwassereinfluss, Verwesungsstörungen	15
Tab. 2: Zuschläge zur Verwesungsleistung durch die Bodenreaktion.....	30
Tab. 3: Zusammenfassende Bewertung der Verwesungsleistung von Friedhofsböden	30
Tab. 4: Zuschläge zur Filterleistung für die Bodenreaktion.....	33
Tab. 5: Zusammenfassende Bewertung der Filterleistung.....	33
Tab. 6: FH SH1, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung	36
Tab. 7: FH SH2, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung	38
Tab. 8: Friedhof NI1, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung.....	42
Tab. 9: Friedhof NI2, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung.....	44
Tab. 10: Friedhof NI3, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung.....	46
Tab. 11: Friedhof NI4, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung.....	47
Tab. 12: Friedhof BE1, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung	52
Tab. 13: Friedhof BE2, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung	53
Tab. 14: Friedhof NW1, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung	56
Tab. 15: Friedhof NW2, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung	58
Tab. 16: Friedhof NW3, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung	60
Tab. 17: Friedhof RP1, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung	63
Tab. 18: Friedhof RP2, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung	65
Tab. 19: Friedhof BY1, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung	69
Tab. 20: Friedhof BY2, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung	70
Tab. 21: Friedhof BY3, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung	72
Tab. 22: Friedhof BW1, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung.....	76
Tab. 23: Friedhof BW2, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung.....	78
Tab. 24: Friedhof BW3, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung.....	80
Tab. 25: Verteilung der Bodenartengruppen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) in der Verwesungszone, n=39.....	83
Tab. 26: Verteilung der Bodenartengruppen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) in der Filterzone, n=39. 83	
Tab. 27: Mittlere Humusgehalte in (mineralischen) Ah-Horizonten (0-20 cm), Deckschichten (20-90 cm), Sargbereichen (90cm – Bestattungstiefe) und Filterschichten (Bestattungstiefe + 70 cm) für alle kartierten Friedhöfe (n=19).....	84
Tab. 28: Mittelwertsvergleiche (MV) nach Tukey (1953), mittlere Differenz der mittleren Humusgehalte (MDM) in Ah-Horizonten (0-20 cm), Deckschichten (20-90 cm), Sargbereichen (90cm – Bestattungstiefe) und Filterschichten (Bestattungstiefe + 70 cm) für alle kartierten Friedhöfe (n=19)	85
Tab. 29: Mittlere N _t -Gehalte in (mineralischen) Ah-Horizonten (0-20 cm), Deckschichten (20-90 cm), Sargbereichen (90cm – Bestattungstiefe) und Filterschichten (Bestattungstiefe + 70 cm) für alle kartierten Friedhöfe (n=19).....	86
Tab. 30: Mittelwertsvergleiche (MV) nach Tukey (1953), mittlere Differenz der mittleren der N _t -Gehalte (MDM) in Ah-Horizonten (0-20 cm), Deckschichten (20-90 cm), Sargbereichen (90cm – Bestattungstiefe) und Filterschichten (Bestattungstiefe + 70 cm) für alle kartierten Friedhöfe, (n=19)	87

Tab. 31: Leitprofil A, Gley-Rigosol aus Kolluvium über Niedermoortorf, Friedhof SH1, Textur.....	89
Tab. 32: Leitprofil A, Gley-Rigosol aus Kolluvium über Niedermoortorf, Friedhof SH1, bodenchemische Kennwerte	90
Tab. 33: Leitprofil B, Pseudogley-Rigosol (SS-YY) aus Geschiebe(deck-)sand über Geschiebelehm, Friedhof SH1, Textur.....	92
Tab. 34: Leitprofil B, Pseudogley-Rigosol (SS-YY) aus Geschiebe(deck-)sand über Geschiebelehm, Friedhof SH1, bodenchemische Kennwerte.....	92
Tab. 35: Leitprofil C, Normrigosol aus Flugsand, Friedhof BE1, Textur.....	94
Tab. 36: Leitprofil C, Normrigosol auf Flugsand, Friedhof BE1, bodenchemische Kennwerte	94
Tab. 37: Leitprofil D, Pseudogley-Rigosol aus Löss über Rötton, Friedhof BW3, Textur.....	95
Tab. 38: Leitprofil D, Pseudogley-Rigosol aus Löss über Rötton, Friedhof BW3, bodenchemische Kennwerte	96
Tab. 39: Gesamtporenvolumen (GPV), Luftkapazität (LK), Feldkapazität (FK), Wassersättigungsgrad bei Feldkapazität (WSG bei FK), Anteil enger Grobporen (eGP), Mittelporenanteil (MP) und Feinporenanteil (FP), Leitprofile A (SH1), B (SH1), C (BE1) und D (BW3).....	98
Tab. 40: Spearmans Rangkorrelationskoeffizient r_s für die Parameter gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f), mittlere Luftleitfähigkeit aus Messungen nach Vorentwässerung auf -30 hPa, -60 hPa, -150 hPa, -300 hPa und -500 hPa (k_l), Gesamtporenvolumen (GPV), Luftkapazität (LK), Feldkapazität (FK) und Trockenrohdichte (ρ_t), Messwerte von Leitprofil A, B, C und D.....	106
Tab. 41: Monitoringstation A, Friedhof SH1, Übersicht Wasserhaushalt, Temperaturen und Redoxbedingungen, für 365 Tage kontinuierliche Messungen, November 2010 bis November 2011	110
Tab. 42: Monitoringstation B, Friedhof SH1, Übersicht Wasserhaushalt, Temperatur und Redoxbedingungen für 365 Tage kontinuierliche Messungen, November 2010 bis November 2011	113
Tab. 43: Monitoringstation C, Friedhof BE1, Übersicht Wasserhaushalt und Redoxbedingungen für 365 Tage kontinuierliche Daten, April 2011 bis April 2012.....	116
Tab. 44: Monitoringstation D, Friedhof BW3, Übersicht Wasserhaushalt und Redoxbedingungen 304 Tage kontinuierliche Messung, Juni 2011 bis April 2012	119
Tab. 45: Leitprofile A, B, C, und D, Bewertung der Verwesungsleistung anhand von gemessenen Werten und Abgleich mit bei Anlage der Leitprofile vorgefundenen Artefakten.....	121
Tab. 46: Leitprofile A, B, C, und D, Bewertung der Filterleistung anhand von gemessenen Werten .	123
Tab. 47: Hohenschulen, Referenzprofil Pseudogley-Parabraunerde, Textur.....	125
Tab. 48: Hohenschulen, Referenzprofil Pseudogley-Parabraunerde, bodenchemische Kennwerte..	125
Tab. 49: Standort Hohenschulen, Gesamtporenvolumen (GPV), Luftkapazität (LK), Feldkapazität (FK), Wassersättigungsgrad bei Feldkapazität (SG bei FK), enge Grobporen (eGP), Mittelporen (MP) und Feinporen (FP), Vergleich von ungestörter Referenz in 50 cm und 160 cm Tiefe mit den Varianten A und B 60 Tage nach Schüttung in 20 cm Tiefe und 195 Tage nach Schüttung in 20 cm und 50 cm Tiefe	127
Tab. 50: Standort Hohenschulen, ψ_m der Referenz und der Varianten A und B in 50 cm und 130 cm Tiefe, Anteil Messwerte unter Feldkapazität, mittleres ψ_m , mittlere absolute Abweichung der Varianten A und B von der Referenz und Anteil der Messwerte in den Varianten A und B mit niedrigeren ψ_m als die Referenz	134
Tab. 51: Standort Hohenschulen, rH-Werte der Referenz und der Varianten A und B in 50 cm und 130 cm Tiefe, Anteil Messwerte im oxischen Bereich, mittlere rH-Werte, mittlere absolute Abweichung	

der Varianten A und B von der Referenz und Anteil der Messwerte in den Varianten A und B mit höheren rH-Werten als die Referenz	136
Tab. 52: Standort Hohenschulen, Variante C, Gießwassergaben.....	136

Abkürzungsverzeichnis

α	empirischer Parameter nach Van Genuchten (1980)
CaCl ₂	Calciumchlorid
CaCO ₃	Calciumcarbonat
cm d ⁻¹	Zentimeter pro Tag
C _{org}	organischer Kohlenstoff
C _t	Gesamtkohlenstoff
C ₂	Quotient aus k _a und ϵ_a nach Groenevelt et al. (1984)
C ₃	Quotient aus k _a und $10\epsilon_a^2$ nach Groenevelt et al. (1984)
°C	Grad Celsius
D _B	Diffusionskoeffizient (scheinbarer)
Deck	Deckschicht
ϵ_a	luftgefülltes Porenvolumen
ϵ_B	blockiertes Porenvolumen
eGP	enge Grobporen
Eh	Redoxpotential
Fil	Filterschicht
FK	Feldkapazität
FP	Feinporen
Gof.	Geländeoberfläche
GPV	Gesamtporenvolumen
GW	Grundwasser
η	Viskosität der Luft
hPa	Hektopascal

k_a	Luftpermeabilität
k_f	gesättigte Wasserleitfähigkeit
Kg	Kilogramm
k_l	Luftleitfähigkeit
k_u	ungesättigte Wasserleitfähigkeit
I	empirischer Parameter nach Van Genuchten (1980)
LK	Luftkapazität
log	dekadischer Logarithmus
m	Meter / empirischer Parameter nach Van Genuchten (1980)
M	empirischer Parameter nach Ball et al. (1988)
mm	Millimeter
mV	Millivolt
MP	Mittelporen
n	empirischer Parameter nach Van Genuchten (1980)
N	empirischer Parameter nach Ball et al. (1988)
nFK	Nutzbare Feldkapazität
NS	Niederschlag
N_t	Gesamtstickstoff
\emptyset	Äquivalenzdurchmesser
pF	dekadischer Logarithmus der Wasserspannung
pH	negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionenkonzentration
ρ_l	Dichte der Luft
ρ_t	Trockenrohdichte
r_s	Spearman's Rangkorrelationskoeffizient
Temp.	Temperatur
Vol.-%	Volumenprozent
Ψ_m	Matrixpotential

1. Einleitung und Zielsetzung

In der Bundesrepublik Deutschland existieren derzeit ca. 33.000 Friedhöfe, die insgesamt eine Fläche von 361 km² einnehmen (Statistisches Bundesamt 2011). Viele dieser Friedhöfe sind von Verwesungsstörungen betroffen, so dass die Gräber nach Ablauf der Ruhefristen nicht wiederbelegt werden können.

Auf stauwassergeprägten Friedhöfen im Ruhrgebiet wurden von Schmidt-Bartelt et al. (1990) lange Liegezeiten aufgrund der geringen Bodenbelüftung beobachtet. 30-40% der Friedhöfe in Rheinland-Pfalz sind auf nicht für Erdbestattungen geeigneten Böden angelegt (Wourtsakis 2002). Eine 1999 in Baden-Württemberg durchgeführte Umfrage (Schmidt 2002) ergab, dass auf ca. 38 % der Friedhöfe Verwesungsstörungen auftreten. Bei einer großangelegten Fragebogenaktion (Postleitzahlenbereiche 1-5) von Pagels et al. (2004) wurde bei 26% der Rückläufe das Vorkommen von Verwesungsstörungen bestätigt.

Die Bodeneigenschaften, die die Entstehung von Verwesungsstörungen begünstigen, sind heute weitgehend bekannt (Fiedler et al. 2004, Forbes et al. 2005a, Ubelaker und Zarenko 2011). Schlecht durchlüftete, grund- oder stauwasserbeeinflusste Böden gelten als für die Erdbestattung ungeeignet (Wernich 1894, Müller 1914, Raissi 2008) und sollten nicht als Friedhöfe genutzt werden. Auch niedrige pH-Werte mindern die Verwesungsleistung eines Bodens, da sie die mikrobielle Aktivität einschränken (Pietri und Brookes 2009). Es gibt jedoch auch einige bodenunabhängige Faktoren, wie Gewicht und Konstitution des Leichnams, Bekleidung, sowie Material und Ausstattung des Sarges, die Einfluss auf die Entstehung von Verwesungsstörungen haben (Schmierl 1982, Albrecht 2008). Sowohl die Pietätswäsche als auch der Sarg sollten aus natürlichen, im Boden leicht zersetzbaren Materialien bestehen. Die Berücksichtigung dieser Faktoren bei Erdbestattungen könnte die Entstehung von Wachsleichen verhindern. Bisher gibt es allerdings keine bundeseinheitliche Regelung für die Auswahl von Flächen für die Friedhofsnutzung oder die Beschaffenheit von Pietätswäsche und Sargmaterialien.

Bodenchemische Kennwerte von Friedhofsböden sind beispielsweise in Publikationen von , Kahle (1996), Fiedler et al. (2004), Helmes (2004) und Charzynski (2010) dokumentiert. In einigen Studien werden zusätzlich Trockenrohdichten (ρ_t), Gesamtporenvolumina (GPV), Luftkapazitäten (LK), und nutzbare Feldkapazitäten (nFk) angegeben (Blume 1982, Aey 1990). Detailliertere bodenphysikalische Untersuchungen von Erdgräbern liegen bisher nicht vor, so dass die Bodenstrukturentwicklung in der Deckschicht eines Erdgrabes und deren Einfluss auf den für die Verwesung notwendigen Gasaustausch zwischen Verwesungszone und Atmosphäre noch weitgehend unerforscht sind. Auch kontinuierliche Messungen von Wassergehalten, Redoxbedingungen und Bodentemperaturen in Friedhofsböden wurden bisher nicht durchgeführt.

Erst durch diese können jedoch die Rahmenbedingungen für die Verwesung in unterschiedlichen Böden genau erfasst werden.

Im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsprojektes „Entwicklung einer umweltgerechten Erdbestattungspraxis im Hinblick auf die Folgewirkungen auf Böden, Grundwasser und Atmosphäre“ wurden deutschlandweit Friedhofsböden mit unterschiedlicher Eignung für Erdbestattungen bodenkundlich aufgenommen und untersucht.

Die Ziele der vorliegenden Arbeit sind:

- ❖ die Charakterisierung der besonderen Eigenschaften von Friedhofsböden und ihrer Entwicklung mit zunehmender Nutzungsdauer,
- ❖ die Dokumentation von Wasserhaushalt und Bodenstrukturentwicklung in einem Erdgrab unmittelbar nach der Beisetzung und der Wirksamkeit von einfachen Meliorationsmaßnahmen um daraus,
- ❖ die Umweltverträglichkeit von Erdbestattungen in Abhängigkeit von Bodentyp und hydrologischen Gegebenheiten in den verschiedenen Regionen der Bundesrepublik Deutschland zu bewerten, und
- ❖ auf Basis von Feld- und Laborergebnissen ein Bewertungssystem für Friedhofsböden im Hinblick auf ihre Verwesungs- und Filterleistung zu entwickeln, aus dem eine Handlungsanweisung (Merkblatt) für eine umweltverträglichere Erdbestattung ableitbar wird.

2. Stand der Forschung

Dieses Kapitel enthält eine Literaturübersicht zu den bisher bekannten Auswirkungen der Erdbestattung auf die Umwelt und der Bedeutung der Bodenverhältnisse für die Verwesung.

2.1 Verwesung im Erdgrab

Die in der Rechtsmedizin gebräuchliche Casper-Regel (Casper 1858) zur Abschätzung der Liegezeit von Leichen besagt: Zustand der Leiche nach 1 Woche an der Luft entspricht 2 Wochen im Wasser oder 8 Wochen im Erdgrab. Die aus Gründen der Pietät und Hygiene übliche Beisetzung von menschlichen Leichnamen in Erdgräbern liefert folglich nicht die optimalen Bedingungen für eine schnelle und vollständige Verwesung. Durch die Überdeckung mit mindestens 90 cm Boden und die damit verbundene Verbringung des Leichnams in einen Bereich, der mindestens 150 cm unter der Bodenoberfläche liegt, wird die Zugänglichkeit des Leichnams für Sauerstoff sowie für Mikroorganismen und Insekten stark verringert (Vass et al. 1992, Willimann 1996). Die vollständige Skelettierung eines auf der Bodenoberfläche befindlichen Leichnams kann bei 10°C bereits nach 128 Tagen abgeschlossen sein (Vass 2001). Im Erdgrab dauert dieser Prozess selbst unter bestmöglichen Bedingungen ca. acht Jahre (Schmierl 1982). Von Verwesungsstörungen betroffene Leichname können über tausend Jahre überdauern (Fiedler et al. 2009, Fleige et al. 2012).

2.2 Beeinflussungen von Boden, Grundwasser und Atmosphäre

Eine Beeinflussung von Boden, Grundwasser und Atmosphäre wäre beispielsweise durch aus dem Grab austretende Krankheitserreger, anorganische Gifte oder Gerüche denkbar. Auch eine starke Akkumulation von Abbauprodukten im Boden könnte längerfristig zu Problemen führen.

2.2.1 Pathogene Keime

Ordnungsgemäß angelegte Friedhöfe stellen nach Willimann (1996), Üçisik und Rushbrook (1998) und Urban (2002a, 2002b) keine gesundheitliche Gefährdung für die Umwelt dar. Zwar werden bei der Zersetzung einer Leiche eine große Zahl von Fäkalkeimen freigesetzt, nach Büchi und Willimann (2002) ist der Eintrag in die Umwelt aber gesamthaft vernachlässigbar und Friedhofsabwässer in Bezug auf ihren Gehalt an Fäkalkeimen mit leicht belasteten Oberflächengewässern gleichzusetzen.

Matthes (1903) stellte bei Langzeituntersuchungen des Drainagewassers eines Friedhofes keine Verunreinigungen fest und verweist auf die kurze Überlebensdauer von Krankheitserregern im Boden. Hofmann (1941) fand in Proben von einem Friedhofsboden mit hoher Verwesungsleistung hauptsächlich „Erdbazillen“, Kokken und Schimmelpilze und bezeichnet die von ihm untersuchten Bodenproben als „nicht keimreich“. Die meisten Viren und Bakterien sind an den lebenden

Organismus angepasst, können im Erdboden nur kurze Zeit überleben und sich nicht mehr vermehren. Einzig der Milzbrandvirus (Anthrax) kann im Boden dauerhaft überlebensfähige Sporen ausbilden. Er ist dazu aber nur unter aeroben Bedingungen im Stande (Willmann 1996).

Das branchenbezogene Merkblatt zur Altlastenbehandlung des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (Eckardt 1994) gibt in Teil 1:“ Friedhöfe“ folgende Überlebensfristen für Bakterien im Boden an:

- Diphtheriebakterien: 2 bis 3 Wochen
- Pyozyaneus: 5 bis 7 Wochen
- Staphylokokken: 1 bis 2 Monate
- Typhusbakterien: 3 Monate
- Tuberkelbakterien: mehrere Jahre
- Milzbranderreger: Jahrzehnte

Die meisten Krankheitserreger werden im Boden auf kurzer Strecke aus dem Sickerwasser herausgefiltert, so dass auch ihre räumliche Ausbreitung gering ist. Hierbei werden Viren generell schneller adsorbiert als Bakterien, organische und eisenhaltige Umhüllungen an Sandkörnern können jedoch auch die Rückhaltefähigkeit von Bakterien verbessern (Üçisik und Rushbrook 1998). Mit abnehmender KAK verringert sich die Adsorption von Bakterien und es wird im Zusammenhang mit starken Niederschlägen eher zu einer Mobilisierung der Bakterien im Sickerwasser kommen. Hier ist eine ausreichend mächtige Filterschicht zwischen der Grabsohle und dem geschlossenen Kapillarsaum besonders wichtig (Urban 2002b).

Im Grab entstehende Verwesungsgerüche (vor allem durch Cadaverin und Putrescin bedingt) sind für die menschliche Nase zwar äußerst unangenehm, jedoch nicht gesundheitsgefährdend (Urban 2002b). Cadaverin und Putrescin sind zudem auch in Lebensmitteln wie Käse vorhanden (Bunkova et al. 2010). Wenn der Boden oberhalb des Sarges keine großen Hohlräume oder Steine enthält, ist auch nicht mit einer Geruchsbelästigung zu rechnen.

2.2.2 Belastung durch Schwermetalle und Freisetzung von anorganischen Giften

Sargbeschläge, künstliche Gelenke oder Herzschrittmacher bestehen aus unterschiedlichen Metalllegierungen. Wenn sie im Boden verwittern werden Schwermetalle freigesetzt, wodurch es zu einer Einschränkung der mikrobiellen Aktivität kommen kann (Smejkalova et al. 2003). Wenn die Schwermetalle mit dem Sickerwasser verlagert werden, besteht außerdem die Gefahr einer Grundwasserkontamination.

Spongberg und Becks (2000) stellten in Erdgräbern erhöhte Eisen-, Blei- und Zinkgehalte fest und weisen darauf hin, dass Friedhofsböden aus diesem Grund nicht als unbelastete Referenzen für Kontaminationsstudien genutzt werden sollten. Daten über Konzentrationsänderungen mit zunehmender Entfernung zu den Gräbern werden als noch erforschungswürdig angegeben. Auch Helmes (2004) stellte im Unterboden eines Friedhofes punktuell sehr stark erhöhte Schwermetallgehalte, vor allem von Zink und Blei fest und führt dies auf einen Eintrag aus den Särgen zurück. Doch auch aus dem Leichnam selbst können Schwermetalle freigesetzt werden. Fiedler et al. (2012) fanden in den humosen Zersetzungsprodukten im Inneren von Särgen erhöhte Kupfer, Chrom und Bleigehalte. In einigen Fällen wurden hierbei die Konzentrationen die in Leichnam und Kleidung etc. zu erwarten wären sogar deutlich überschritten, was auf konservierende Behandlungen des Leichnams vor der Bestattung zurückgeführt wurde. Schwermetalle, die durch Intoxikation in der Leiche vorhanden sein können, konnten in Erdgräbern noch bis zu sechs Jahre nach Bestattung nachgewiesen werden (Urban 2002a). In der Leiche eventuell noch vorhandene Medikamente werden allerdings sehr schnell zersetzt und stellen in Kläranlagen (menschliche Ausscheidungen) ein größeres Problem dar als auf dem Friedhof (Büchi und Willimann 2002).

Eine Gefährdung des Grundwassers durch aus Erdgräbern ausgewaschene Schwermetalle schließt Urban (2002b) aus; solange der pH-Wert des Bodens über 6,5 liegt und eine ausreichende Filterschicht vorhanden ist. Mit sinkendem pH-Wert nimmt der Anteil an positiv geladenen Oberflächen im Boden zu. Deshalb werden Metallkationen wie Cadmium, Zink und Kupfer zunehmend mobil und könnten ins Grundwasser gelangen. Durch Komplexbildung mit organischen Substanzen können Schwermetalle jedoch auch bei höheren pH-Werten mobil sein. Cappuyns und Swennen (2008) stellten auch bei alkalischer Bodenreaktion für Kupfer und Nickel noch eine gewisse Mobilität fest. Die potentielle Grundwasserkontamination durch mobilisierte Schwermetalle kann vereinfacht über die Bindungsstärke des Bodens in Abhängigkeit vom Tongehalt und der Filterschichtmächtigkeit berechnet werden (Fleige et al. 2002). Das in Zahnfüllungen enthaltene Amalgam hat sich im Boden allerdings als praktisch inert erwiesen (Büchi und Willimann 2002). Dies ist darauf zurückzuführen, dass Quecksilber bei pH-Werten > 4 im Boden fest gebunden ist und es folglich nur in sehr stark sauren Böden zu einer Mobilisierung kommt.

Wurden Verstorbene vor dem Tod mit radioaktiven Substanzen behandelt, kann hiervon eine Gefährdung, vor allem für Menschen die mit der Leiche in Berührung kommen, ausgehen. Nach der Bestattung könnten radioaktive Substanzen höchstens noch in auf dem Friedhof gesammelten Speisepilzen gefährlich werden. Mit radioaktiven Substanzen belastete Leichen sind relativ selten, es besteht allerdings auch bislang noch keine Meldepflicht, so dass die Gefährdung meist unentdeckt bleibt (Urban 2002a).

2.2.3 Akkumulation von Verwesungsprodukten in Friedhofsböden

Der menschliche Körper besteht zu ca. 30% aus Kohlenstoff und zu ca. 2% aus Stickstoff. Die Elemente Calcium, Chlor und Phosphor sind mit jeweils ca. 1% enthalten. Daraus ergeben sich für einen 75 kg schweren Leichnam 22,5 kg Kohlenstoff, 1,5 kg Stickstoff und jeweils knapp 1 kg Calcium, Chlor und Phosphor, die bei der Verwesung eines erdbestatteten Leichnams im Unterboden freigesetzt werden. Hinzu kommen die Abbauprodukte des Sarges. Fleige et al. (2002) schätzen für ein Grabfeld von 1 ha Fläche mit 3000 belegten Gräbern (Leichengewicht hier 78 kg) bis zur vollständigen Verwesung eine freiwerdende Stickstoffmenge von 8 t ha^{-1} . Auf eine Ruhefrist von 20 Jahren gemittelt ergäben sich daraus Stickstoffmengen von 400 kg Jahr^{-1} die in 2 Metern Tiefe frei werden, und aufgrund der fehlenden Nährstoffaufnahmemöglichkeiten durch Pflanzenwurzeln mit dem abwärts gerichteten Wasserstrom in Richtung Grundwasser transportiert werden.

Benninger et al. (2008) untersuchten die Nährstofffreisetzung aus auf der Bodenoberfläche verwesenden Schweinen, und stellten während der ersten 40 Tage einen signifikanten Anstieg von Gesamtstickstoffgehalten und extrahierbarem Phosphor im Boden unterhalb der Kadaver fest. Die Kohlenstoffgehalte zeigten im Vergleich zum Referenzboden keinen signifikanten Anstieg. Hopkins et al. (2000) stellten im Umfeld von flach vergrabenen Schweinen (10 cm Überdeckung) nach 430 Tagen erhöhte Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte im Boden fest. Zum Zeitpunkt der Entnahme der Bodenproben waren die Kadaver bereits stark zerfallen, die Verwesung jedoch noch nicht abgeschlossen. Van Belle et al. (2009) vergruben Schweinekadaver in 40 cm Tiefe, und stellten einen deutlichen Anstieg des Ninhydrin-reaktiven Stickstoffs (freien Aminosäuren) sowohl innerhalb des Grabes als auch in den Grabwänden und unterhalb des Kadavers fest. Erst 12 Monate nach der Exhumation der Kadaver sank der Gehalt an Ninhydrin-reaktivem Stickstoff im Bereich der Grabsohlen wieder auf das Niveau des Referenzbodens. Die Bestimmung von Ninhydrin-reaktivem Stickstoff im Boden wird in der forensischen Taphonomie routinemäßig zum Nachweis von (verborgenen) Erdgräbern (Carter et al. 2008b) und zu Abschätzung des postmortalen Intervalls (Carter et al. 2011) genutzt. Es kommt während der Verwesung folglich mindestens kurzzeitig zu erhöhten Konzentrationen von Abbauprodukten im Boden.

Die oben beschriebenen Untersuchungen und Methoden beziehen sich jedoch auf ein relativ kurzes Zeitfenster nach dem Vergraben bzw. Ablegen des Leichnams und sind nicht direkt auf die Situation auf einem Friedhof übertragbar, wo durch die festgelegten Ruhezeiten deutlich längere Zeitfenster für den Abbau der Verwesungsprodukte im Boden zur Verfügung stehen.

Hofmann (1941) führte Stickstoffmessungen an Bodenproben von einem Friedhof durch und stellte fest, dass der Nitratgehalt niedrig und der Boden insgesamt arm an Verwesungsprodukten war. Blume (1982) dokumentierte auf einem Friedhof aus Talsand in 42-135 cm Tiefe 0,6 % C_{org} und 0,02 %

N_t. Bei Stadtbodenuntersuchungen in Rostock fanden Kahle (1996) im Boden eines Friedhofes (Lehmsand) C_{org}- Gehalte von 2 % in 0-30 cm Tiefe und 0,6 % in 30-130 cm Tiefe. Der Friedhofsboden enthielt in 0-30 cm Tiefe weniger C_{org} als Garten- und Parkböden und in 30-130 cm Tiefe weniger C_{org} als Gartenböden und die Böden von Wohngebieten. Helmes (2004) stellte in sandigen Friedhofsböden (4 Profile auf einem Friedhof) in ca. 100 cm Tiefe C_{org}-Gehalte von 0,47 % und N_t-Gehalte von 0,035 % fest. Charzynski (2010) fand in ebenfalls überwiegend sandigen Friedhofsböden (6 Profile auf 3 Friedhöfen) in ca. 60-110 cm Tiefe 0,50% C_{org} und 0,04% N_t. Folglich sind auf einem Friedhof allenfalls leicht erhöhte C_{org}- und N_t-Gehalte im Unterboden zu erwarten. Auf einem von Verwesungsstörungen betroffenen Friedhof stellten Fiedler et al. (2004) im Vergleich zu einem Referenzboden keine erhöhten Konzentrationen von Stickstoff oder Kohlenstoff im Boden von Erdgräbern fest, was auf die mangelnde Zersetzung zurückgeführt wurde. Allerdings wurden direkt unterhalb der Särge erhöhte Phosphorkonzentrationen festgestellt. Aufgrund seiner geringen Mobilität im Boden ist eine Anreicherung von Phosphor im Bereich eines Erdgrabes am wahrscheinlichsten. Deshalb wird die Bestimmung des Phosphorgehaltes im Boden auch in der Archäologie als Nachweis für Gräber verwendet.

2.3 Bei Erdbestattungen auftretende Verwesungsstörungen

Bei den bei Erdbestattung unter ungünstigen Bedingungen auftretenden Verwesungsstörungen handelt es sich im humiden, gemäßigten Klima Deutschlands vorwiegend um die Ausbildung des sogenannten Leichenwachses (Adipocire) (Nanikawa 1961, Takatori 2001, Ubelaker und Zarenko 2011). Die Mumifikation durch Austrocknung spielt in Deutschland nur eine untergeordnete Rolle (Pagels et al. 2004).

Das Vorliegen von Wachsleichen auf einem Friedhof bedeutet keine verstärkte Umweltgefährdung durch Boden- oder Grundwasserkontamination. Wachsleichen verhalten sich ihrer Umgebung gegenüber praktisch inert (Büchi und Willimann 2002). Verwesungsstörungen sind vielmehr ein praktisch- ästhetisches Problem, da sie eine Wiederbelegung des Grabes verhindern und eine große psychische Belastung für die Friedhofsmitarbeiter darstellen.

Das Phänomen der Wachsleichenbildung hat spätestens seit den Massengräberexhumationen auf dem „Friedhof der Unschuldigen“ in Paris (Thouret 1792) die Aufmerksamkeit der Wissenschaft auf sich gezogen. Dabei ist die Bezeichnung „Wachs“ etwas irreführend, da der entstehende weiche bis krümelig feste Panzer um die Körperteile vorwiegend aus Palmitin- und Stearinsäure und deren Salzen besteht (Takatori und Yamaoka 1977a, 1977b, Schoenen 2002). Eine ausführliche Studie über die Entstehung und Vermeidung von Verwesungsstörungen auf Friedhöfen wurde bereits 1914 von Müller veröffentlicht. Bei Exhumationen auf einem Friedhof „Hohe Promenade“ bei Zürich wurden mehrere Wachsleichen aufgefunden. Diese traten vor allem in nassen aber auch vereinzelt in

vollkommen trockenen Gräbern auf. Dass Adipocirebildung auch in trockener Umgebung stattfinden kann, wurde auch in Untersuchungen von Evans (1963) und Forbes et al. (2005a) bestätigt. Im Körper vorhandenes Wasser reicht aus, um die Triglyceride des Körperfettes in freie Fettsäuren umzuwandeln und unter anaeroben Bedingungen Leichenwachs entstehen zu lassen. In einer von Forbes (2005a) durchgeführten Untersuchung wurde festgestellt, dass ein durchlässiger Sandboden durch die schnelle Ableitung von Glycerin, gefolgt von der Hydrolyse der Triglyceride, die Adipocirebildung noch beschleunigt. Diese Beobachtung erfolgte allerdings in einem durchgehend feucht gehaltenen Sand unter Luftabschluss. Solch anaerobe Bedingungen sind in einem natürlichen, grundwasserfernen Sandboden nicht zu erwarten und die Ergebnisse können deshalb nicht direkt auf ein Erdgrab in sandigem Boden übertragen werden, es sei denn, der Sarg befände sich dauerhaft unterhalb des Grundwasserspiegels.

2.3.1 Einfluss der Sauerstoffversorgung

Aus mikrobieller Sicht ist die Bildung von Adipocire allein auf Sauerstoffmangel zurückzuführen. Eine vollständige Verwesung ist unter anaeroben Bedingungen nicht möglich (Schoenen 2002). Verläuft die Fäulnis noch überwiegend anaerob, so muss für die darauf folgende Verwesung Sauerstoff zugeführt werden. Wenn dies nicht geschieht, wird der Zersetzungsprozess gestoppt und es kann zur Entstehung von Adipocire kommen. Durch den Sarg wird ein luftgefüllter Raum um den Leichnam geschaffen. Deshalb verwesen Leichen im Sarg besser als wenn sie ohne Sarg beigesetzt würden (Forbes et al. 2005b). Da die im Sarg vorhandene Luft jedoch schnell verbraucht ist oder sogar durch eindringendes Wasser verdrängt werden kann, ist eine kontinuierliche Sauerstoffzufuhr von außen oder vielmehr ein kontinuierlicher Austausch von Sauerstoff und Kohlendioxid im Sargraum unerlässlich.

Um den Sauerstoffaustausch zwischen Sargbereich und Atmosphäre zu gewährleisten darf das Porenvolumen des Bodens oberhalb des Sarges nicht durch Grund- oder Stauwasser blockiert sein. Außerdem gilt ein hoher Anteil an Grobporen als vorteilhaft (Willmann 1996). Neben Wassergehalt und Porengrößenverteilung nehmen auch die vorherrschende Lagerungsdichte, der pH-Wert und hierfür die effektive KAK verbunden mit den redoximorphen Prozessen Einfluss auf die Belüftung eines Bodens (Pagels et al. 2003).

2.3.2 Einfluss der Bodenreaktion (pH-Wert)

Die Zusammensetzung und Aktivität der mikrobiellen Biomasse eines Bodens, und somit die Umsetzungsraten von organischer Substanz, werden von der Bodenreaktion beeinflusst (Bosch 1983, Baath und Anderson 2003, Pietri und Brookes 2009). Böden deren mikrobielle Aktivität aufgrund von zu niedrigen oder zu hohen pH-Werten eingeschränkt ist, sind aufgrund ihrer geringeren

Umsetzungseffizienz nicht im gleichen Maße für die Erdbestattung geeignet wie Böden mit annähernd neutraler Bodenreaktion. Dass allein aufgrund von ungünstigen pH-Werten Verwesungsstörungen auftreten können, wurde jedoch bisher nicht nachgewiesen.

Während der Verwesung kommt es zu einem Anstieg des pH-Wertes im umgebenden Boden (Wilson et al. 2007, Benninger et al. 2008, Carter et al. 2008a). Dies kann auf eine Akkumulation von NH_4^+ im Zuge der Ammonifikation von Proteinen, die Entstehung von anaeroben Mikrobereichen mit niedrigen Redoxpotentialen infolge starker Mineralisation von Kohlenstoff und das Freiwerden von positiv geladenen K-, Ca- und Mg-Ionen zurückgeführt werden (Carter und Tibbett 2006, Haslam und Tibbett 2009). Das Ausmaß der Änderungen des Boden-pH-Wertes während der Verwesung hängt vom Ausgangs-pH-Wert ab, der wiederum das Pufferungsvermögen und die KAK des Bodens bestimmt (Haslam und Tibbett 2009). Dieser Anstieg des pH-Wertes ist jedoch nicht von Dauer. Nach der vollständigen Zersetzung von Muskelfleisch lagen die von Haslam und Tibbett (2009) gemessenen pH-Werte im umgebenden Boden sogar leicht unter den Ausgangswerten. In Gräbern mit Adipocirevorkommen wurden von Fiedler et al. (2004) keine erhöhten pH-Werte festgestellt. Es wurde in diesem Zusammenhang davon ausgegangen, dass durch die Fettwachsbildung das Zersetzungsstadium in dem es zu einem Anstieg des pH-Wertes kommt nicht erreicht wurde.

Die Einmischung von (Brannt-)Kalk im Zuge der Beisetzung kann als bodenverbessernde Maßnahme wirken, da der pH-Wert angehoben wird und außerdem eine Verbesserung der Bodenstruktur erreicht werden kann (Hartge 1977). Eine Anhebung des pH-Wertes im Boden fördert die mikrobielle Aktivität und steigert so den Abbau von organischer Substanz (Kalbitz 1997). Das Löschen des Branntkalkes zu Kalkhydrat bei Kontakt mit (Poren-)Wasser ist eine exotherme Reaktion. Durch die Wärmeentwicklung und die Aufnahme von Wassermolekülen wird der Boden trockener. Durch die Neubildung des Kalkhydrates (1,0 g Branntkalk bildet unter Bindung von 0,32 g Wasser 1,32 g Kalkhydrat) kommt es außerdem zu einer Zunahme der Trockensubstanz (Scholz-Solbach 2004). Ein weiterer Prozess ist die puzzolanische Reaktion des Kalkhydrates mit Silikaten und Aluminaten, die zu einer Verkittung der Bodenpartikel führt (Witt 2002). Diese bewirkt eine Zunahme der Aggregatstabilität durch Steigerung der Kohäsion und der Reibungswinkel (Hartge 1977). Zu hohe Kalkzugaben können sich allerdings negativ auf die Verwesung auswirken. Nach Müller (1914) fördert Kalk im Boden die Adipocirebildung und ein Gehalt von 20% ist bereits zu hoch. Es können sich an der Leichenoberfläche Kalkkrusten bilden, die zum einen eine Barriere für Sauerstoff und Bakterien darstellen (Willimann 1996, Forbes et al. 2005c), und zum anderen durch ihren hohen pH-Wert das Überleben und die Vermehrung von Bakterien behindern (Forbes et al. 2005b). Vor allem das Bedecken von Leichnamen mit reinem Branntkalk, ohne eine Vermischung mit dem Boden, hemmt die Verwesung stark (Schotsmans et al. 2012). Bei Exhumationen wurden außerdem Kalkeinlagerungen in Adipocire nachgewiesen (Willimann 1996).

2.3.3 Einfluss der Bodentemperatur

Mit ansteigender Temperatur nimmt die Verwesungsrate zu (Willmann 1996, Carter et al. 2008a). In Mitteleuropa steigen die Bodentemperaturen in 100-200 cm Tiefe jedoch in der Regel nicht über 20°C an (Schoenen 2002).

Der Kontakt des Leichnams mit freiem Wasser begünstigt die Wärmeableitung und hemmt so die fäulnisbedingte Körpererwärmung. Dadurch sind die Wärme liebenden Fäulnisbakterien gegenüber den noch bei sehr tiefen Temperaturen aktiven fetttransformierenden Enzymen im Nachteil und die Adipocirebildung wird begünstigt (Willmann 1996). Die meisten Wachsleichenfunde stehen entweder mit im Grabraum angestautem Niederschlagswasser (Fiedler et al. 2004) oder bis in den Grabraum reichendem Grundwasser in Verbindung. Es liegt unter solchen Bedingungen wahrscheinlich ein gekoppelter Prozess aus verstärkter Wärmeableitung und Sauerstoffmangel vor, der die Entstehung von Adipocire begünstigt.

2.4 Die Bewertung der Eignung von Böden für die Erdbestattung

In den letzten Dekaden wurden mehrere Ansätze zur Bewertung und Klassifizierung der Eignung von Böden für die Erdbestattung veröffentlicht.

Keller (1966) bildet zur Bewertung der Eignung von Böden für die Erdbestattung fünf Güteklassen anhand der Bodenart und sieht Grobsand (\varnothing 0,63- 2 mm) als am besten geeignet an, da hier eine starke Durchlüftung und trockene Bedingungen zu erwarten sind. Unterhalb des Sarges wird dann, in Anlehnung an die Richtlinien von 1892 (veröffentlicht in Wernich (1894)), eine Filterschicht von 50 cm Mächtigkeit als ausreichend angesehen. Für grobkörnigere Bodenarten wird eine Verunreinigungsgefahr des Grundwassers angenommen. Für feinkörnigere Böden wird davon ausgegangen, dass die Durchlüftung zu gering ist und über den kapillaren Aufstieg ein unerwünschter Kontakt zum Grundwasser entsteht.

Schmierl (1982) klassifiziert Friedhofsböden in Anlehnung an Keller (1966) ebenfalls nach der Bodenart und stellt nach Graböffnungen für die Bodengüteklasse 1 (Grobsand, Humus mit Sand) eine gute Korrelation ($r_s=0,925$) zwischen Verwesungsgrad und Liegezeit, also eine kontinuierlich fortschreitende Verwesung fest, die mit schlechterer Bodengüteklasse schwächer wird ($r_s=0,752$ für Bodengüteklasse 5, Ton/Lehm, Lehm mit Wassereinbruch, Mergel/Kalk).

Albrecht (1996) beurteilt die Bestattungseignung anhand der FK, LK, dem k_f -Wert und der physikochemischen Filtereigenschaften. Diese werden aus den bei der Geländeuntersuchung gewonnenen Bodenmerkmalen berechnet und in Klassen eingeteilt. Grenzwerte werden nicht konkretisiert. Ein Dokumentationsbogen zur Ermittlung des Leichenzustandes (Albrecht 2002) ermöglicht eine genaue Erfassung des Verwesungsgrades und zusätzlich den Eintrag von

Bodenverhältnissen und Wassereinfluss im betrachteten Grab. Die Dokumentation der Bodenverhältnisse beschränkt sich auf die Bodenart.

Seit 2002 sind vier wesentliche Publikationen zu den bodenkundlichen Anforderungen an Friedhofsböden erschienen. Ihnen allen gemein ist die Forderung nach einer Mächtigkeit des Lockermaterials, sowie eines Mindestabstandes zwischen Geländeoberfläche und Grundwasser inklusive des geschlossenen Kapillarsaumes von 250 cm.

Wourtsakis (2002) nennt, aufbauend auf Untersuchungen und Beobachtungen an Friedhofstandorten in Rheinland-Pfalz, die folgenden Anforderungen an für die Erdbestattung geeignete Böden:

- LK: > 10-15 Vol.-% in der Deckschicht und > 8-12 Vol.-% in der Filterschicht
- k_f -Wert: 40-100 cm d⁻¹ in der Deckschicht und > 20-100 cm d⁻¹ in der Filterschicht
- pH-Wert: 6,0-7,5 in der Deckschicht und 4,0-6,5 in der Filterschicht
- KAK: gering bis mittel in der Deckschicht und mittel bis hoch in der Filterschicht (Einstufung nach Ad-hoc AG-Boden (2005))
- GesamtfILTERwirkung nach Ad-hoc-AG Boden (2005): gering bis mittel in der Deckschicht und mittel bis hoch in der Filterschicht
- Aufenthaltsdauer des Sickerwassers > 6 Monate

Fleige et al. (2002) nehmen zunächst eine Einstufung der Sauerstoffverhältnisse anhand des (natürlichen) Bodentyps vor. Bodensubtypen die Gleye- oder Pseudogleye beinhalten werden als ungeeignet eingestuft und von der weiteren Bewertung ausgeschlossen. An die übrigen Böden werden die folgenden Bedingungen gestellt:

- LK der Verwesungszone > 12 Vol.-%
- pH-Wert der Verwesungszone (in CaCl₂) 6-8
- Jahresmitteltemperatur der Luft > 8 °C
- Aufenthaltsdauer des Sickerwassers im Boden > 3 Jahre

Für ein Unter- beziehungsweise Überschreiten der genannten Bereiche werden Zuschläge vergeben, die zu einer schlechteren Bewertung führen. Die Grundwassergefährdung durch Mikroorganismen wird anhand der Aufenthaltsdauer des Sickerwassers abgeschätzt. Bei niedriger klimatischer Wasserbilanz wird von einer entsprechend höheren zusätzlichen Bewässerung durch die Grabpflege ausgegangen. Die Grundwassergefährdung durch Schwermetalle wird über den pH-Wert und die Bindungsstärke nach Tongehalt abgeschätzt.

In einer Publikation des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (Sabel 2007) werden die folgenden Parameter berücksichtigt:

- LK der Deckschicht > 10-15 Vol.-%
- LK der Grabsohle > 8 Vol.-%
- k_f -Wert der Grabsohle von > 20-40 cm d⁻¹
- k_f -Wert der Filterschicht < 100 cm d⁻¹
- FK der Filterschicht < 40 Vol.-%

Das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (Raissi 2008) gibt für die Bewertung des Eignungsgrades der Böden zur Erdbestattung die folgenden Richtwerte an:

- k_f -Wert oberhalb und innerhalb der Zersetzungszone > 10-20 cm d⁻¹
- k_f -Wert unterhalb der Grabsohle ~ < 10 cm d⁻¹
- LK oberhalb und innerhalb der Zersetzungszone 10-15 Vol.-%
- LK unterhalb der Grabsohle ca. < 5 Vol.-%
- Filtervermögen unterhalb der Grabsohle wird bestimmt durch Wasser und Luftdurchlässigkeit, Sickerwasserrate, Kationenaustausch und die Mächtigkeit des Filterkörpers (mit Verweis auf Ad-hoc-AG Boden (2005))

Neben den Eigenschaften des Bodens wird in der einschlägigen Literatur auch der Bepflanzung von Friedhöfen eine Bedeutung beigemessen. Eine Bepflanzung mit tiefwurzelnden Bäumen wird als die Verwesung fördernd angesehen, da diese mit ihren Wurzeln überflüssiges Wasser aus den Gräbern entfernen können (Müller 1914, Schmierl 1982, Willimann 1996, Büchi und Willimann 2002, Dent et al. 2004).

Die regelmäßige Bewässerung der Grabstellen durch Hinterbliebene, wie sie bei den häufig auf Gräbern eingesetzten flachwurzelnden saisonalen Pflanzen üblich ist, kann den natürlichen Wasserhaushalt des Bodens stören und zu einer zusätzlichen Vernässung des Grabraumes mit negativen Auswirkungen auf den Ablauf der Verwesung führen (Horn und Fleige 2001, Weinzierl und Waldmann 2002, Pagels et al. 2004). Die im Rahmen der Grabpflege entstehenden Gießwassermengen wurden von Blume (1981) und Fleige et al. (2002) auf ca. 50-100 mm Jahr⁻¹ geschätzt. Wourtsakis (2002) schätzt bei Annahme von nur 100 Bewässerungstagen pro Jahr und nur einer Gießkanne à 10 Liter pro Grab und Bewässerung Summen von 500 mm Jahr⁻¹ und zitiert Schätzungen von 750-1000 mm Jahr⁻¹. Weinzierl und Waldmann (2002) gehen von 500-1000 mm Jahr⁻¹, in Einzelfällen auch mehr, aus. Vor allem in den Sommermonaten sind tägliche Gießwassergaben von 5-10 mm (1-2 10 Liter fassende Gießkannen) durchaus üblich (Beirat 2012), was auf ein halbes Jahr hochgerechnet Gießwassermengen von 900-1800 mm bedeuten würde.

Bislang gibt es noch keine Untersuchungen zu den tatsächlichen Gießwassermengen, die ein Grab im Laufe eines Jahres erfährt. Auch Untersuchungen dazu, wie häufig (beziehungsweise selten) und in welchen Mengen gegossen werden darf, ohne den Wasserhaushalt des Bodens empfindlich zu stören fehlen bisher. Ein Verbot der Bewässerung von Grabstellen durch Hinterbliebene ist in der Praxis nicht möglich, so dass hier die Feststellung von Grenzwerten in unterschiedlichen Böden für eine den Wasserhaushalt des Grabes nicht störende Bewässerung hilfreich wäre.

3. Material und Methoden

3.1 Felduntersuchungen auf Friedhöfen

Um die Auswirkungen und die Wirkungskette beim Auftreten von Verwesungsstörungen zu quantifizieren und anschließend in eine Handlungsempfehlung einzuarbeiten, wurden deutschlandweit Friedhöfe bodenkundlich untersucht.

3.1.1 Untersuchungsstandorte

Auf 19 Friedhöfen in sieben Bundesländern wurden bodenkundliche Kartierungen vorgenommen (Abb. 1). Auf sechs der kartierten Friedhöfe wurden zusätzlich Leitprofile in alten Grabreihen angelegt (SH2 und NI2 im Anhang) und auf drei dieser Friedhöfe wurden außerdem Monitoringstationen zur Messung von Wasserspannungen (ψ_m), Redoxpotentialen (Eh) und Temperaturen im Boden installiert.

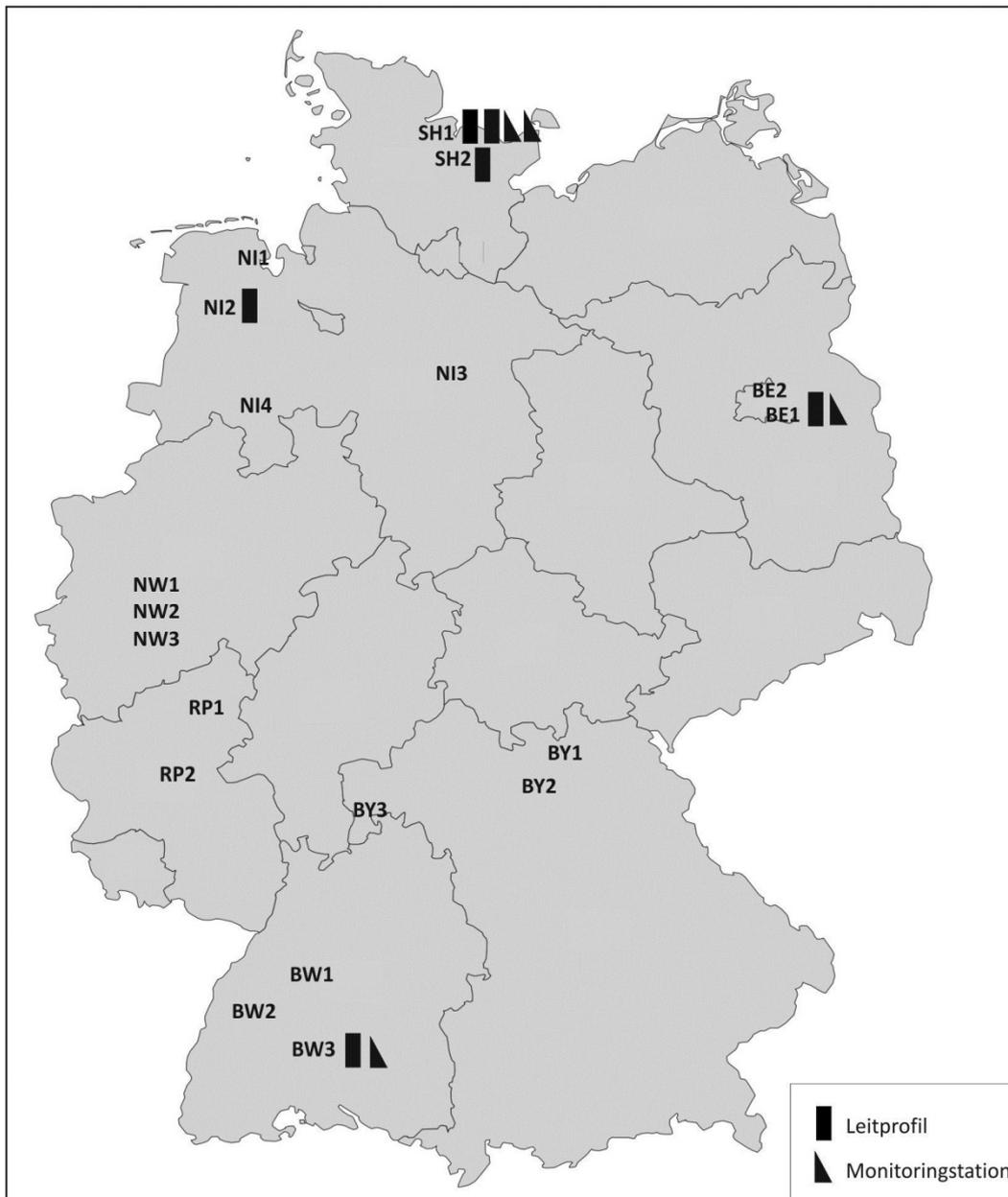


Abb. 1: Übersicht der kartierten Friedhöfe (n=19) in den Bundesländern Schleswig-Holstein (SH1 und SH2), Niedersachsen (NI1, NI2, NI3 und NI4), Berlin (BE1 und BE2), Nordrhein-Westfalen (NW1, NW2 und NW3), Rheinland-Pfalz (RP1 und RP2), Bayern (BY1, BY2 und BY3) und Baden-Württemberg (BW1, BW2 und BW3), Leitprofile (n=6) und Monitoringstationen (n=4) mit geographischer Lage

Es wurden Friedhöfe unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Flächenausdehnung untersucht (Tab. 1). Hierbei handelt es sich um Friedhöfe mit erheblichen Problemen aufgrund von Verwesungsstörungen; um Friedhöfe mit unterschiedlich gut für die Erdbestattung geeigneten Teilflächen und um Friedhöfe auf denen eine schnelle und vollständige Umsetzung stattfindet. Die Ruhefristen variieren auf den untersuchten Standorten zwischen 20 und 40 Jahren.

Tab. 1: Standortspezifische Daten der kartierten Friedhöfe: Fläche, Entstehungsjahr, Ruhefrist bei Sargbestattung, Bestattungstiefe, Grundwasserstand unter Geländeoberfläche, Stau-/Hangwassereinfluss, Verwesungsstörungen

Standort	Fläche [ha]*	Entstehungsjahr (Erweiterung)*	Ruhefrist [Jahre]*	Bestattungstiefe (Tieferlegung) [cm]*	GW-Stand u. Gof. [cm]**	Stau-/Hangwassereinfluss**	Verwesungsstörungen*
SH1	8	1909 (1946)	25	160	120- >300	+	+
SH2	4,5	1770 (1920)	40	160	> 300	++	+
N11	3,5	1920	25	160	10-150	-	++
N12	0,3	1834	30	160	250	++	++
N13	0,8	1930	25-30	160 (250)	50-250	+	+
N14	0,7	1960 (2004)	25-30	150	100-200	+	+
BE1	7,7	1902	20	180	> 300	-	-
BE2	2	1860	20	180	> 300	-	+
NW1	25	1896 (1950)	20	170 (260)	> 300	-	-
NW2	47	1896 (1950)	20	170 (260)	> 300	+	+
NW3	58	1946	20	170 (260)	> 300	-	-
RP1	0,8	1964	20-30	160 (240)	> 300	-	+
RP2	0,2	19. Jhd.	30	160	> 300	++	++
BY1	2,6	17. Jhd.	20	100-180	> 300	+	+
BY2	0,9	1933	30	180	> 300	+	+
BY3	0,3	ca. 1860	30	140-180	> 200	++	++
BW1	0,4	14. Jhd. (1980)	20	150	> 300	++	++
BW2	3,7	1845 (1868)	20	150	> 300	+	+
BW3	0,3	1854	30	160	> 300	++	++

Stau-/Hangwassereinfluss:

- nicht vorhanden

+ auf Teilflächen vorhanden

++ ganzflächig vorhanden

* Quelle: Friedhofschronik, mündliche Mitteilung

Verwesungsstörungen:

- keine

+ vereinzelt

++ häufig

** Quelle: Bewertung vor Ort bei Kartierung

3.1.2 Kartierung

Auf den untersuchten Friedhöfen wurden in einem an die örtlichen Gegebenheiten (Größe und Relief der Fläche, Anzahl abgelaufener Gräber) angepassten Raster bzw. Flächenquerschnitt in abgelaufenen Gräbern Bohrungen bis in 3 m Tiefe vorgenommen. Die Ergebnisse der Kartierung werden in Kap. 4 in schematischen Catenen dargestellt.

Bei den schematischen Catenen liegt der Fokus auf Texturunterschieden zwischen den rigolten Bereichen Deckschicht und Sargbereich und dem darunter anstehenden ungestörten Boden, der die Funktion der Filterschicht übernimmt. Außerdem werden die Wasserverhältnisse in Deckschicht und Verwesungszone besonders aufgezeigt. Die zwischen den Einzelgräbern vorliegenden nicht rigolten Bereiche konnten in den Darstellungen aus Maßstabsgründen nicht berücksichtigt werden.

An gestörtem Material aus den Bohrkernen aller durchgeführten Bohrungen wurden im Labor horizontspezifisch der Gesamtgehalt an Stickstoff (N_t), organischem Kohlenstoff (C_{org}) und der pH-Wert bestimmt (Kap. 3.3). Aus dem C_{org} -Gehalt wurde durch Multiplikation mit dem Faktor 1,72 der Humusgehalt berechnet. Aus Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt wurde das C/N-Verhältnis bestimmt und anhand dessen die Humusqualität abgeschätzt. Die Ergebnisse wurden anschließend nach der Entnahmetiefe den folgenden Bereichen zugeordnet:

- Ah- Horizont (0-20 cm)
- Deckschicht (20-90 cm)
- Sargbereich (90 cm bis Bestattungstiefe auf dem jeweiligen Friedhof (150-180 cm))
- Mindestfilterschicht (0-70 cm unterhalb des Sargbereiches)

Bei noch nicht für Erdbestattungen genutzten (Erweiterungs-) Flächen wurde, unter Berücksichtigung der üblichen Bestattungstiefe auf dem jeweiligen Standort, der Entnahmetiefe entsprechend eine Zuordnung zu den Bereichen eines Erdgrabes vorgenommen um den Vergleich von Erdgrab und ungestörtem Boden zu vereinfachen.

Die Ergebnisse werden als Boxplots (Mcgill et al. 1978) dargestellt und nach Ad-hoc-AG Boden (2005) klassifiziert.

3.1.3 Anlage und Beprobung von Leitprofilen

An den Standorten SH1 (n=2), SH2 (n=1), BE1 (n=1), NI2 (n=1) und BW3 (n=1) (Abb. 1) wurden Leitprofile in abgelaufenen Grabreihen angelegt. Die Tiefe der Gruben entsprach in allen Fällen der Bestattungstiefe (SH1: 160 cm, BE1: 180 cm, BW3 160 cm, vgl. Tab. 1).

Die Leitprofile wurden nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Ad-hoc-AG Boden 2005) klassifiziert. Aus den dokumentierten Bodenhorizonten wurden gestörte Proben für die Bestimmung von C_t -, $CaCO_3$ - und N_t -Gehalt sowie der Bodenreaktion, der KAK und der Korngrößenverteilung entnommen. Zusätzlich wurde, soweit erkennbar, der Zersetzungsgrad von vorgefundenen Leichnamen und/ oder Särgen dokumentiert. Dezidierte Graböffnungen wurden nicht vorgenommen. Zur Quantifizierung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (K_f), der Luftleitfähigkeit (K_l) der Lagerungsdichte (ρ_B) und der pF/WG-Beziehung wurden ungestörte Bodenproben mit einem Volumen von 100 cm^3 aus dem Bereich der Deckschicht (50 cm Tiefe) und dem Bereich der Filterschicht (160 - 190 cm Tiefe) entnommen. Zusätzlich wurden aus Deckschicht und Filterschicht für die Bestimmung der ungesättigten Wasserleitfähigkeit (k_u) ungestörte Proben mit einem Volumen von 470 cm^3 entnommen.

3.1.4 Monitoring von Matrixpotentialen, Redoxpotentialen und Bodentemperaturen in Friedhofsböden

Zur Dokumentation der Wassergehalte, der Redoxbedingungen sowie der Bodentemperaturen von Friedhofsböden unter in situ Bedingungen wurden auf den Standorten SH1 (n=2), BE1 (n=1) und BW3 (n=1) baugleiche Monitoringstationen zur Messung von Matrixpotentialen (ψ_m), Redoxpotentialen (Eh) und Bodentemperaturen in abgelaufenen Grabreihen installiert. Die Installation erfolgte in allen Fällen in jener Grabreihe, in der zuvor ein Leitprofil angelegt wurde. Der Abstand zwischen Monitoringstation und Leitprofil betrug jeweils ca. 3 Meter.

Die Messung der ψ_m und Bodentemperaturen erfolgte mit Tensiometern und Temperatursensoren der Firma UMS/München/Deutschland und der Firma UGT/Müncheberg/Deutschland. Die Messung der Eh erfolgte mittels Platinelektroden der Firma UGT und einer Silber-Silberchlorid-Referenzelektrode der Firma Scott. Die Messungen der ψ_m und Eh sowie der Temperaturen erfolgte im Minutentakt. Die Speicherung von Mittel-, Max- und Min-Werten erfolgte im Stundentakt. An allen installierten Monitoringstationen konnte die Referenzelektrode über ein Brunnenrohr mit einer permanent wasserführenden Schicht bzw. dem Grundwasser in Kontakt gebracht werden. Auf die Installation einer Salzbrücke konnte deshalb verzichtet werden. Die Messtiefen und Anzahl an Messparallelen sind Abb. 2 zu entnehmen.

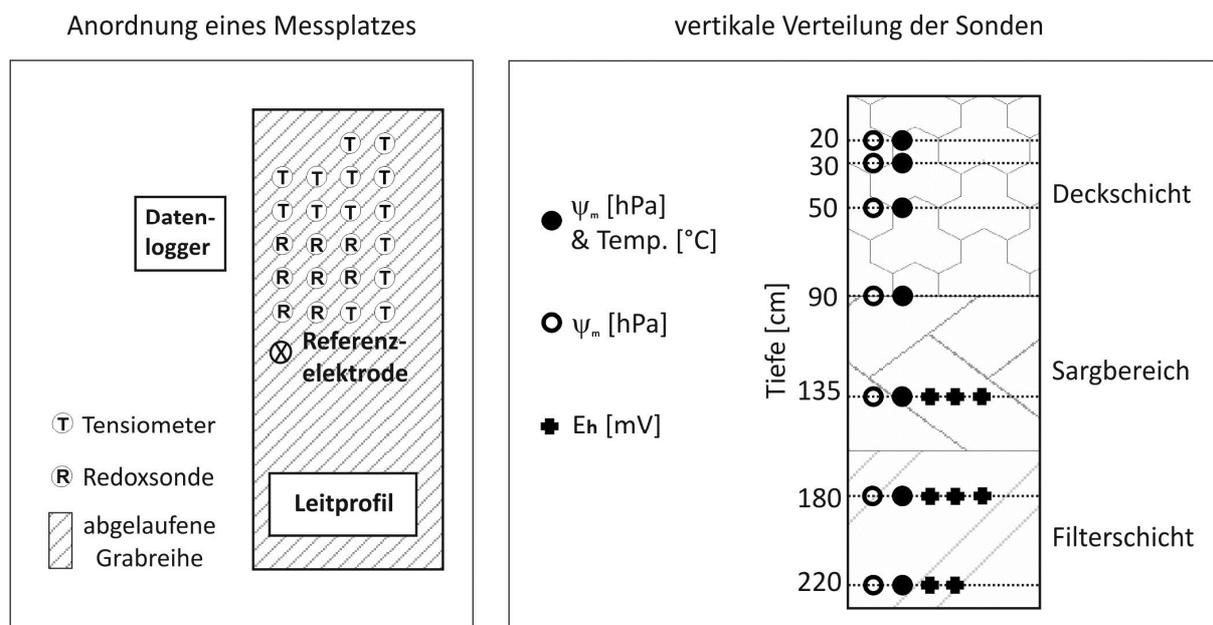


Abb. 2: Anordnung eines Messplatzes in abgelaufenen Grabreihen und vertikale Verteilung der Sonden zur Messung von Matrixpotential (ψ_m), Redoxpotential (Eh) und Bodentemperatur (Temp.)

3.1.5 Ermittlung der jährlichen Sickerwasserraten

Die Sickerwasserraten wurden nach dem TUB-BGR-Verfahren (BLA-GEO 2004) aus mittlerer jährlicher Niederschlagshöhe, mittlerer Niederschlagshöhe im Sommerhalbjahr, mittlerer jährlicher potenzieller Verdunstungshöhe und nFK im effektiven Wurzelraum berechnet.

Im Rahmen des Forschungsprojektes fanden keine Messungen von klimatischen Rahmenbedingungen statt. Daher wurden Klimadaten auf Tagesbasis von nahegelegenen Wetterstationen genutzt (Standort SH1: DWD Wetterstation Kiel Leuchtturm, Standort BE1: Wetterstation Marzahn der TU Berlin, Standort BW3: DWD Wetterstationen Freiamt-Ottoschwanden und Elzach).

3.2 Feldversuch auf Ackerstandort

Um ein besseres Verständnis der unmittelbar nach dem Ausheben und Verfüllen eines Grabes im Boden ablaufenden physikalischen Prozesse zu erlangen, wurde zusätzlich zu den bodenkundlichen Untersuchungen auf bestehenden Friedhöfen ein Feldversuch an einem nicht unter Friedhofsnutzung stehenden Standort durchgeführt. Untersucht und quantifiziert wurden die Veränderungen von Wassergehalten und Redoxbedingungen in durch Grabarbeiten gestörten Böden und der Einfluss von zusätzlichen Gießwassergaben auf diese Parameter. Zusätzlich wurde eine Meliorationsmaßnahme mit Branntkalk getestet (vgl. Kap. 2.3.3 und Kap. 3.2.1).

3.2.1 Versuchsaufbau

Für den Versuch wurden mit einem Bagger drei identische Schürfgruben ausgehoben. Die Schürfgruben hatten eine Grundfläche von 150 x 300 cm und eine Tiefe von 160 cm und wurden im Abstand von 100 cm zueinander angelegt (Abb. 3). Die Grundfläche der Gruben wurde durch den Flächenbedarf für den Einbau der Messsensoren und den Bedarf einer zusätzlichen Fläche von 15.000 cm² pro Grube für die Entnahme von Bodenproben während des Monitorings bestimmt. Sie entspricht dem 2,25 fachen der Grundfläche eines Reihen-Erdgrabes. Die Tiefe von 160 cm entspricht dem Mittel der Bestattungstiefen der im Rahmen des Forschungsprojektes untersuchten Friedhöfe (vgl. Tab. 1). Da der Fokus in diesem Versuch auf den Wasser- und Sauerstoffverhältnissen im Bereich des durch Grabarbeiten gestörten Bodens lag, wurde auf den Einbau von Messsonden in den ungestörten Bereich unterhalb von 160 cm Tiefe (entsprechend der Filterschicht eines Erdgrabes) verzichtet.

Es wurde der folgende Versuchsplan durchgeführt:

- ❖ Variante „Referenz“
 - Keine Grabarbeiten
 - Einbau von Tensiometern und Redoxsonden

- ❖ Variante „A“
 - Aushub der Schürfgrube mit Bagger
 - keine Veränderungen der Schleifschichten
 - Zuschütten der Schürfgrube
 - Einbau von Tensiometern und Redoxsonden
 - Bedeckung der Bodenoberfläche mit Blumenerde
 - Entnahme von ungestörten Bodenproben 60 Tage nach Schüttung
 - Entnahme von ungestörten Bodenproben 195 Tage nach Schüttung

- ❖ Variante „B“:
 - Aushub der Schürfgrube mit Bagger
 - Zerstörung der Schleifschichten an Boden und Wänden der Schürfgrube
 - Bestreuen von Boden und Wänden der Schürfgrube mit Branntkalk (75% CaO)
 - Einmischen von Branntkalk in den Aushub (20 Kg m⁻³)
 - Einbau von Tensiometern und Redoxsonden
 - Bedeckung der Bodenoberfläche mit Blumenerde

- Entnahme von ungestörten Bodenproben 60 Tage nach Schüttung
- Entnahme von ungestörten Bodenproben 195 Tage nach Schüttung

❖ Variante „C“ :

- Aushub der Schürfgrube mit Bagger
- Profilaufnahme
- Entnahme von ungestörten Bodenproben aus 50 cm Tiefe in vertikaler und horizontaler Richtung und aus 160 cm Tiefe in vertikaler Richtung
- Wiederherstellung der Schleifschichten mit Baggerschaufel
- Zuschütten der Schürfgrube
- Einbau von Tensiometern
- Bedeckung der Bodenoberfläche mit Blumenerde
- Gießwassergaben (2,2 mm, 4,4 mm und 8,9 mm)
- Entnahme von ungestörten Bodenproben 195 Tage nach Schüttung

Die Messungen der ψ_m und Eh erfolgte auch hier im Minutentakt. Die Speicherung von Mittel-, Max- und Min-Werten erfolgte im Stundentakt.

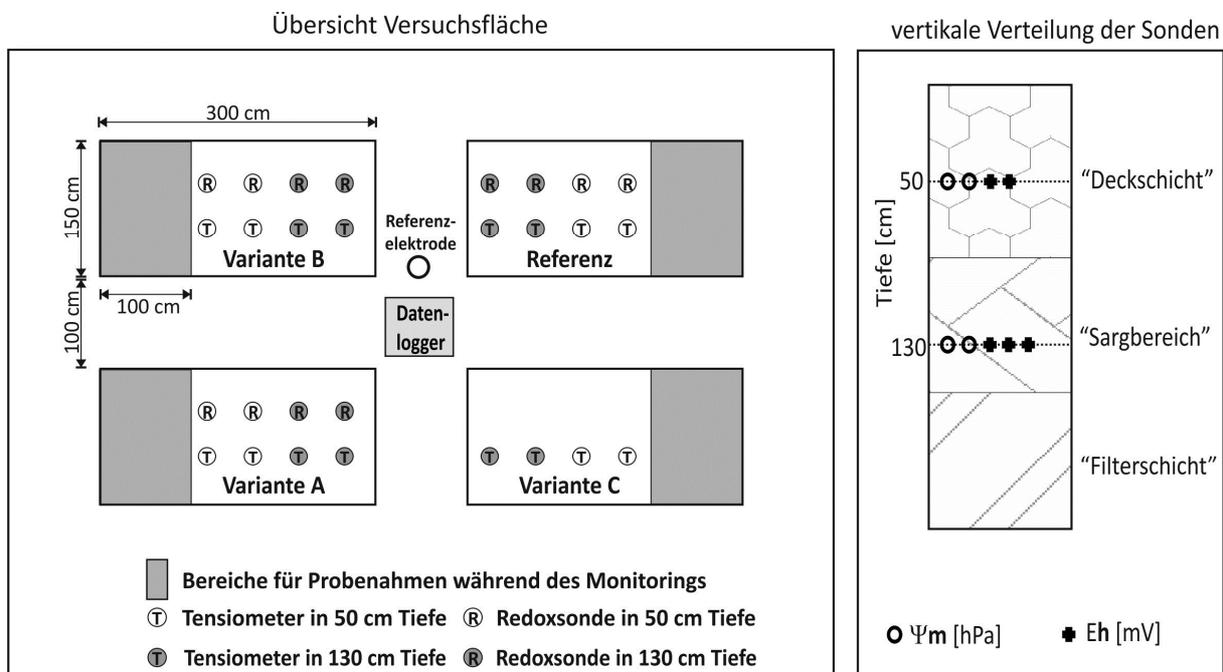


Abb. 3: Übersicht Versuchsfläche und vertikale Verteilung der Sonden zur Messung von Matrixpotential (ψ_m) und Redoxpotential (Eh), Versuch auf Ackerfläche zu den Auswirkungen von Grabtätigkeiten auf Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen

3.3 Laboruntersuchungen

3.3.1 Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f)

Die k_f wurde unter instationären Fließbedingungen mit einem Haubenpermeameter nach Hartge (1966) an ungestörten Bodenproben ($n=8$ je Horizont) mit einem Volumen von 100 cm^3 gemessen. Hierbei wurden an jeder Probe drei Parallelen gemessen und für jede Probe die Standardabweichung zwischen den Einzelmessungen ermittelt. Hohe Standardabweichungen deuten auf eine innere Erosion der Proben während der Messung hin, die vor allem bei sandigen Böden zu einer Verfälschung der Messwerte führen kann. Um diesen Effekt zu vermeiden wurde mit möglichst geringen Durchströmungsdrücken gemessen.

3.3.2 Luftleitfähigkeit (k_l) und abgeleitete Porenfunktionen

Die k_l wurde unter stationären Strömungsverhältnissen an ungestörten Proben ($n=8$ je Horizont) mit einem Volumen von 100 cm^3 gemessen. Eine detaillierte Beschreibung des Messverfahrens ist in Peth (2004) nachzulesen. Die Messungen erfolgten nach Vorentwässerung auf -30 hPa , -60 hPa , -150 hPa , -300 hPa und -500 hPa . Dieses Vorgehen ermöglichte es, die Beziehung zwischen Wassergehalt und k_l festzustellen.

Nach Gleichung 1 lässt sich anhand der k_l [cm s^{-1}] bei Kenntnis der Dichte ρ_l [kg m^{-3}] und der Viskosität der Luft η [$\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-1}$] unter Einbezug der Erdbeschleunigung g [m s^{-2}] die Luftpermeabilität (k_a) berechnen:

$$k_a = k_l \times \frac{\eta}{\rho_l \times g} \quad \text{Gleichung 1}$$

Aus der Luftpermeabilität bei unterschiedlichen Wassergehalten und den dazugehörigen luftgefüllten Porenvolumina ε_a wurde nach Ball et al. (1988) das blockierte Porenvolumen berechnet. Dazu wurden zunächst die empirischen Konstanten M und N aus der linearen Regression der $\log \log$ Beziehung von k_a zu ε_a mit einer logarithmierten Form der Gleichung von Ahuja et al. (1984) ermittelt (Gleichung 2):

$$\log(k_a) = \log M + N \log \varepsilon_a \quad \text{Gleichung 2}$$

Das blockierte Porenvolumen (ε_B) errechnet sich dann aus Gleichung 3:

$$\varepsilon_B = 10^{(-\log M)/N} \quad \text{Gleichung 3}$$

Zusätzlich wurde die Relation von k_a zu ϵ_a anhand der Indices C_2 (Gleichung 4) und C_3 (Gleichung 5) berechnet (Ball et al. (1988) verändert nach Groenevelt et al. (1984)):

$$C_2 = \frac{k_a}{\epsilon_a} \quad \text{Gleichung 4}$$

und

$$C_3 = \frac{k_a}{10 \epsilon_a^2} \quad \text{Gleichung 5}$$

Die C_2 - und C_3 -Indices wurden nach Vorentwässerung auf -30, -60, -150, -300 und -500 hPa bestimmt. Böden mit unterschiedlichen C_2 -Indices haben unterschiedliche Porengrößenverteilung und/oder Porenkontinuität. Unterschiedliche C_3 -Indices deuten auf von der Porengrößenverteilung unabhängige Unterschiede in der Porenkontinuität hin.

3.3.3. Wasserretentionsfunktion und Trockenrohdichte (ρ_t)

Die pF/WG-Beziehung wurde nach kapillarer Aufsättigung an ungestörten Proben mit einem Volumen von 100 cm³ durch schrittweise Entwässerung auf -30 hPa, -60 hPa, -150 hPa, -300 hPa und -500 hPa bestimmt. Die Entwässerung auf -30 hPa und -60 hPa erfolgte auf Sandbädern, die weitere Entwässerung auf keramischen Platten mit Hilfe einer Unterdruckapparatur. Nach der Entwässerung auf -500 hPa wurden die Proben bei 105°C getrocknet und die ρ_t mittels Gravimetrie bestimmt (Hartge und Horn 2009). Anhand der Messwerte wurden mit der Software RETC (van Genuchten 2005) die empirischen Parameter α , n und m (Van Genuchten 1980) ermittelt.

3.3.4 Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_u)

Die k_u wurde mit einer instationären Evaporationsmethode nach Plagge (1991) an ungestörten Proben ($n=4$ pro Horizont) mit einem Volumen von 470 cm³ durchgeführt. Die Matrixpotentiale und Wassergehalte im oberen und unteren Bereich der Bodenprobe wurden kontinuierlich gemessen und die k_u anhand des Gradienten, der sich durch das Austrocknen der Probenoberfläche entwickelt hatte, bestimmt.

Anhand der bei verschiedenen ψ_m ermittelten k_u -Werte wurde mit dem Programm RETC (van Genuchten et al. 1991) eine Anpassung vorgenommen und anhand der so ermittelten Parameter α und n und der gemessenen k_f -Werte nach Gleichung 6 die Wasserleitfähigkeitsfunktion bestimmt.

$$k_u(\psi) = k_f \times \frac{\left(\left((1 - (\alpha \times \psi))^{m-n} \times (1 + (\alpha \times \psi))^n \right)^{-m} \right)^2}{\left((1 + (\alpha \times \psi))^n \right)^{l \times m}}$$

Gleichung 6

mit k_u = ungesättigte Wasserleitfähigkeit, ψ = Matrixpotential, k_f = gesättigte Wasserleitfähigkeit, α , n , m und l = empirische Parameter zur Anpassung der Funktion an die Messwerte ($m=1/1-n$).

3.3.5 Gesamtkohlenstoffgehalt (C_t), Carbonatgehalt, organischer Kohlenstoffgehalt (C_{org}) und Humusgehalt

Der Gesamtkohlenstoffgehalt wurde an gemahlene Feinbodenproben ($n=3$ je Horizont) mittels coulometrischer Titration und Verbrennung in einem Ströhlein-Coulomat 702 bestimmt. Der Carbonatgehalt wurde gasvolumetrisch (Scheibler-Analyse) ermittelt und daraus der Anteil an carbonatisch gebundenen Kohlenstoff errechnet. Der Gehalt an organischem Kohlenstoff ergibt sich aus der Differenz zwischen Gesamtkohlenstoffgehalt und carbonatisch gebundenem Kohlenstoff. Der Humusgehalt wurde durch Multiplikation des C_{org} -Gehaltes mit dem Faktor 1,72 berechnet (Ad-hoc-AG Boden 2005).

3.3.6 Gesamtstickstoff

Der Gesamtstickstoffgehalt wurde an gemahlene Feinbodenproben ($n=3$ je Horizont) durch eine Kjeldahl-Analyse bestimmt.

3.3.7 Bodenreaktion (pH-Wert)

Der pH-Wert wurde an Feinbodenproben potentiometrisch in 0,01 M $CaCl_2$ gemessen.

3.3.8 Kationenaustauschkapazität (KAK)

Zur Bestimmung der KAK wurden die Konzentrationen der Elemente Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium im Feinboden atomabsorptionsspektrophotometrisch gegen Kalibrierstandards mit bekannten Konzentrationen gemessen. Die potentielle Acidität wurde titrimetrisch mit 0,05 M NaOH bestimmt. Der H-Wert nach Schachtschabel wurde nach Schlichting et al. (1995) anhand der Bodenreaktion in 0,5 M Calciumacetat ($Ca(C_2H_3O_2)_2$)-Lösung bestimmt.

Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) errechnet sich aus der Summe der austauschbaren Mengenäquivalente von Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium (S-Wert) und der potentiellen Acidität. Die potentielle Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}) errechnet sich aus der Summe von S-Wert und H-Wert nach Schachtschabel.

3.3.9 Korngrößenverteilung

Zur Bestimmung der Korngrößenverteilung wurden zunächst die organische Substanz und verkittend wirkende Bestandteile aus den Bodenproben entfernt, so dass eine vollständige Dispergierung gewährleistet war. An den so vorbehandelten Proben wurde im Anschluss durch Nasssiebung und Pipettierung die Korngrößenverteilung bestimmt.

3.4 Statistische Auswertung

Die Statistische Auswertung wurde mit der frei verfügbaren Software R, Version 2.14.1 (2011) durchgeführt.

Alle Datengruppen wurden mit dem Shapiro-Wilk-Test (Shapiro und Wilk 1965) auf Normalverteilung geprüft.

Die k_f , k_i , Porenorganisationsindices C2, C3 und das Blockierte Porenvolumen wurden, da sie nicht in allen Wertegruppen normalverteilt waren, mit dem Mann-Whitney U-test (Mann 1947) auf signifikante Unterschiede zwischen den Deck- und Filterschichten, bzw. den Grabwänden untersucht. Zur Feststellung von kausalen Zusammenhängen zwischen Wertegruppen wurde Spearmans Rangkorrelationskoeffizient r_s (Spearman 1987) bestimmt da die Wertegruppen mit Ausreißern behaftet waren.

Um festzustellen, ob es durch die Bestattungstätigkeit zu statistisch belegbaren Anreicherungen von organischem Kohlenstoff oder Gesamtstickstoff im (Unter-) Boden kommt, wurde zunächst der Einfluss der Faktoren Sand-, Schluff- und Tonanteil, Bodeneinheit und Tiefenbereich (Ah-Horizont: 0-20 cm, Deckschicht: 20-90 cm, Sargbereich: 90 cm – Bestattungstiefe, Filterschicht: Bestattungstiefe+70 cm) auf den C_{org} - bzw. N_t -Gehalt mittels einer ANCOVA ermittelt. Die Modellgüte wurde nach dem Akaike Informationskriterium AIC (Akaike 1974) überprüft. Das beste Modell wurde unter Einbeziehung von Sandanteil, Bodeneinheit und Schicht gefunden, wobei die Schicht den größten Einfluss sowohl auf die C_{org} - als auch auf die N_t -Gehalte aufwies. Die zusätzliche Berücksichtigung der Schluff- oder Tonanteile, bzw. das Ignorieren der Sandanteile führten zu einer Verschlechterung des Modells. Deshalb basieren die in Kap. 4.2.8.2 aufgeführten Mittelwertsvergleiche der Schichten auf um den Sandanteil korrigierten C_{org} - bzw. N_t -Gehalten. Vor diesem Hintergrund war die Einbeziehung der reinen Torfhorizonte an den Standorten NI2 und SH1 in diese Auswertung nicht möglich. Da nicht für alle Bodeneinheiten und Schichten ausreichend Messwerte vorlagen, konnten die Mittelwertsvergleiche nur nach Friedhöfen, nicht aber zusätzlich nach Bodeneinheiten getrennt durchgeführt werden.

3.5 Ermittlung und Einstufung von Bodenkennwerten nach Ad-hoc-AG Boden 2005

Die Ermittlung der Bodenkennwerte ρ_t , LK, k_f und KAK_{pot} konnte nur an den Untersuchungsstandorten an denen Leitprofile angelegt wurden anhand von Bodenproben erfolgen. Um eine Bewertung der ausschließlich kartierten Standorte durchführen zu können, mussten diese Werte anhand von Tabellen abgeleitet werden. Auch die Bewertung der GesamtfILTERwirkung musste anhand von Tabellenwerten vorgenommen werden. Um hierfür eine normierte Datengrundlage zu garantieren wurden alle Einstufungen und Ableitungen anhand der KA5 (Ad-hoc-AG Boden 2005) vorgenommen.

Die LK wurde, wenn keine Messdaten zur Verfügung standen, nach „Tabelle 70: Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität, Feldkapazität und Totwasser in Vol.-% in Abhängigkeit von Bodenart und Trockenrohddichte ρ_t (Ad-hoc-AG Boden 2005) abgeleitet. Es wurde in der Deckschicht von einer mittleren, in der Filterschicht von einer mittleren bis hohen ρ_t ausgegangen (vgl. Abb. 64, Kapitel 4.3.4)

Die KAK_{pot} wurde, wenn keine Messdaten vorhanden waren, in Abhängigkeit von der Feinbodenart nach „Tabelle 93: Potenzielle Kationenaustauschkapazität KAK_{pot} in Abhängigkeit von der Feinbodenart“ (Ad-hoc-AG Boden 2005) ermittelt. Die ermittelten Werte gelten für Böden mit illitreichem Tonmineralbestand (in Mitteleuropa häufig) und beruhen auf der folgenden Berechnung (Gleichung 7):

$$KAK_{pot} [\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}] = 0,5 \text{ Tongehalt} + 0,05 \text{ Schluffgehalt} \quad \text{Gleichung 7}$$

Die im Bewertungssystem vorgenommene Bestimmung der GesamtfILTERwirkung erfolgt nach den folgenden Tabellen: „Tabelle 85: Einstufung der potenziellen Kationenaustauschkapazität mitteleuropäischer Mineralböden“, „Tabelle 80: Einstufung der gesättigten Wasserleitfähigkeit, der kapillaren Aufstiegsrate und der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum“ und „Tabelle 86: GesamtfILTERwirkung einheitlicher Bodenhorizonte bzw. -schichten für kolloid und ionendisperse Stoffe in Abhängigkeit von der Luftkapazität und der potenziellen Kationenaustauschkapazität“ (Ad-hoc-AG Boden 2005).

4. Ergebnisse

In diesem Kapitel wird ein Verfahren zur bodenkundlichen Aufnahme und Bewertung von Friedhofsböden vorgestellt (Kapitel 4.1). Anschließend werden die Ergebnisse der Kartierung und Bewertung von Friedhöfen (Kapitel 4.2), der Profilaufnahme in abgelaufenen Grabreihen (Kapitel 4.3) sowie des Monitorings auf Friedhöfen (Kapitel 4.4) gezeigt und anhand der gewonnenen Daten eine detaillierte Bewertung der Leitprofil- und Monitoringstandorte durchgeführt (Kapitel 4.5). Außerdem werden die Ergebnisse des methodischen Versuches zur Auswirkung von Grabtätigkeiten auf Bodeneigenschaften und Bodenfunktionen vorgestellt (Kapitel 4.6).

4.1 Bodenkundliche Aufnahme und Bewertung von Friedhofsböden

Bodenkundliche Aufnahme von Friedhofsböden

Bei der bodenkundlichen Aufnahme von Friedhofsböden kann zur Bestimmung des Bodentyps nicht mehr auf alle diagnostischen Horizontmerkmale natürlicher Böden zurückgegriffen werden. Schon nach der ersten Bestattung sind diese durch das tiefe Umgraben des Bodens überprägt und nur noch unvollständig erkennbar.

Ein Friedhofsboden zeichnet sich vor allem durch eine 150 bis 250 cm mächtige Schicht aus umgegrabenem, durchmischtem (rigoltem) Bodenmaterial aus, in das mit steigender Anzahl der Bestattungsvorgänge eine zunehmende Einmischung von organischer Substanz (ursprünglicher Ah-Horizont, Auflage aus Blumenerde, Sargreste) erfolgt. Diese Charakteristika entsprechen nach (Ad-hoc-AG Boden 2005) dem Bodentyp Rigosol (YY). Aus diesem Grund werden Friedhofsböden in dieser Arbeit als Rigosole bezeichnet.

Da die Wasserverhältnisse für die Verwesungsleistung eines Bodens eine entscheidende Rolle spielen, erfolgte eine weitere Klassifizierung der kartierten Rigosole anhand von Grund- und Stauwassereinflüssen je nach Tiefe des Wasservorkommens in Übergangssubtypen und Subvarietäten (Abb. 4). Da im Zusammenhang mit Friedhofsböden bei entsprechend tiefer Bestattung und unter Berücksichtigung der notwendigen Mächtigkeit der Filterschicht die Erfassung von Grund- und Stauwasservorkommen in bis zu 300 cm Tiefe notwendig sein kann, wurden zusätzlich zu den in diesem Zusammenhang möglichen Subvarietäten g2YYn, s2YYn (flach vergleyter Rigosol, flach pseudovergleyter Rigosol), g4YYn und s4YYn (tief vergleyter Rigosol und tief pseudovergleyter Rigosol) die Subvarietäten g5YYn und s5YYn eingeführt. Die Zahl fünf steht in diesem Fall für die Merkmalsstufe „sehr tief“ nach Tab. 3 S. 50 in Ad-hoc-AG Boden (2005).

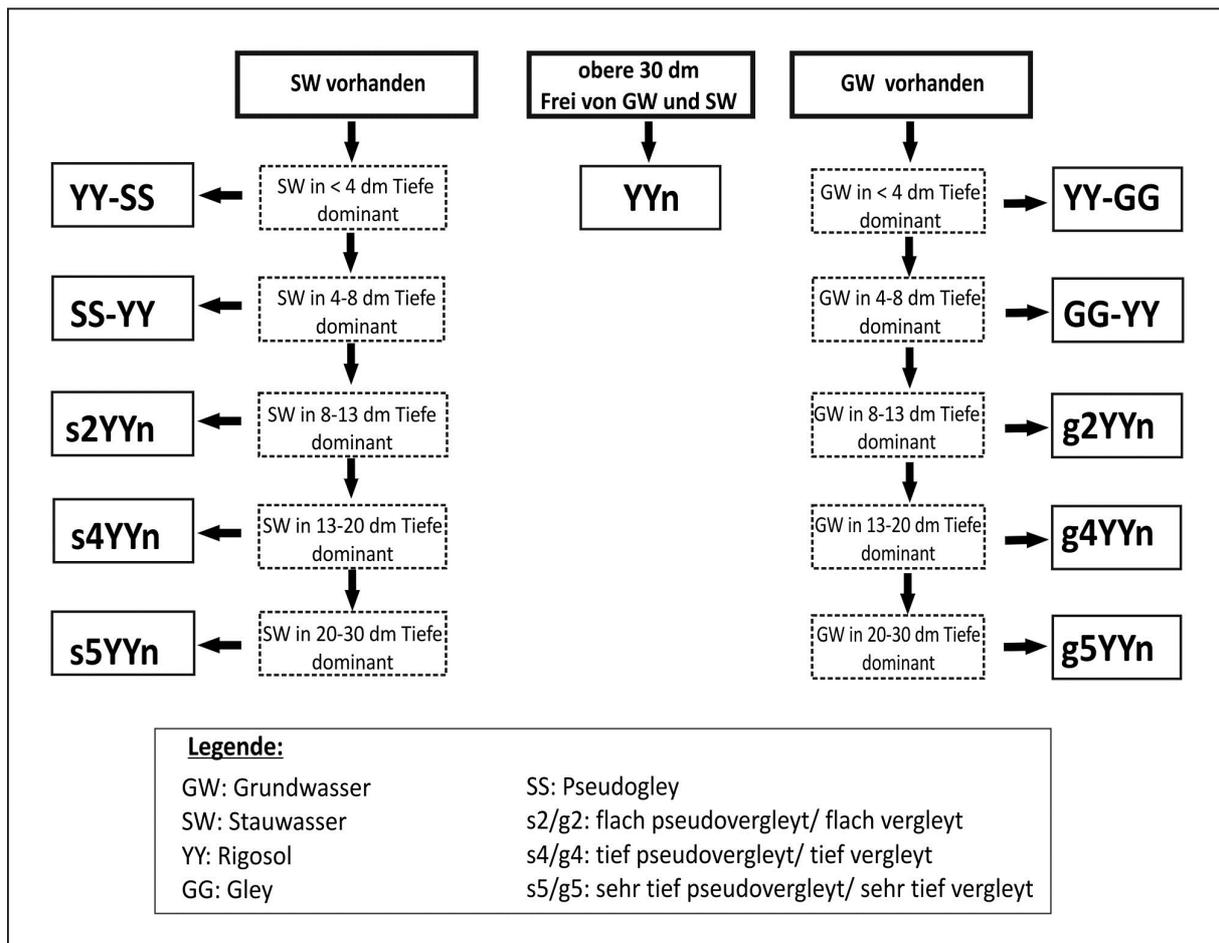


Abb. 4: Klassifikation von Friedhofsböden nach dem Wassereinfluss

Bewertung von Friedhofsböden

Friedhofsböden sind anthropogen stark veränderte Böden, die durch ihre Nutzung vor allem in ihrem Wasserhaushalt erheblich beeinflusst sein können. Die Bewertung eines Friedhofsbodens kann deshalb nicht mehr nur anhand von Eigenschaften der im Bereich des Friedhofes natürlich vorkommenden Böden erfolgen, sondern sollte vielmehr anhand von Bodeneigenschaften der funktionalen Bereiche eines Erdgrabes (vgl. Kap. 3.1.2) und unter Berücksichtigung des durch die Grabarbeiten gegebenenfalls veränderten Wasserhaushaltes innerhalb eines Grabes vorgenommen werden. Der Schwerpunkt ist hier auf die Sauerstoffversorgung des Sargbereiches durch die Deckschicht und die Filterwirkung unterhalb der Grabsohle zu legen (Wourtsakis 2002, Sabel 2007). Bei der Bewertung von Flächen zur Neuanlage oder Erweiterung von Friedhöfen kann bei Kenntnis der Bestattungstiefe eine Unterteilung des gewachsenen Bodens in die oben genannten funktionalen Bereiche erfolgen. Die zusätzlich Erfassung von Schichtung und Wasserverhältnissen in ungestörtem Zustand ist notwendig.

Zur Abschätzung der Sauerstoffversorgung in der Verwesungszone (entspricht Deckschicht + Sargbereich) werden die Luftkapazität (LK) und die Wasserverhältnisse bewertet. Die Erfassung der Wasserverhältnisse kann anhand einer bis in 3 Meter Tiefe durchgeführten Bohrstockkartierung erfolgen, vor allem an stauwassergeprägten Standorten empfiehlt sich die zusätzliche Anlage von Leitprofilen um die Wasserbewegung besser einschätzen zu können (Beirat 2012). Die Bestimmung der LK sollte wenn möglich an ungestörten Bodenproben erfolgen, um Struktureffekte berücksichtigen zu können. Wenn dies nicht möglich ist, kann die LK alternativ nach KA5 anhand der Bodenart bestimmt werden. Es ist hierbei von einer mittleren Trockenrohdichte (ρ_{t3}) auszugehen (vgl. Kap. 4.3.4, Abb. 64). Die LK wird in Anlehnung an Ad-hoc-AG Boden (2005) drei Stufen zugeordnet:

- $LK \leq 5$ (gering bis sehr gering)
- $LK 5-13$ (mittel)
- $LK \geq 13$ (hoch bis sehr hoch)

Verwesungsleistung

Die Bewertung des potentiellen Gasaustausch zwischen Verwesungszone und Atmosphäre, und somit die Ermittlung der Klasse für die Verwesungsleistung, erfolgt in Abb. 5 anhand der LK und der Wasserverhältnisse, es werden Klassen von eins bis drei vergeben.

Der Boden wird umso negativer bewertet je weniger weite Grobporen er enthält und je stärker er vernässt ist. Die LK wird hier vor den Wassereinflüssen bewertet, da ein Boden mit hoher LK durch Drainage erheblich verbessert werden kann, ein Boden mit geringer LK aber auch ohne zusätzlichen Wassereinfluss negativer bewertet werden muss. Böden mit $LK < 5$ Vol% werden ohne zusätzliche Berücksichtigung der Wasserverhältnisse als für die Erdbestattung ungeeignet eingestuft, da diese Böden auch ohne zusätzliche Grund- oder Stauwassereinflüsse nicht in der Lage sind, eine für eine vollständige Verwesung ausreichende Durchlüftung zu gewährleisten (Wourtsakis 2002).

Die Bewertung der Wassereinflüsse erfolgt nach Bodensubtyp, bzw. Subvarietät unter der Voraussetzung, dass die Grabsohle in 160 cm Tiefe liegt (mittlere Bestattungstiefe der 19 untersuchten Friedhöfe: 162 cm). Bei tieferer Lage der Grabsohle (z.B. 180 (Berlin, Bayern) oder 240 cm (Doppelbelegung)) sollte der Wassereinfluss der Lage der Grabsohle entsprechend bewertet werden. Nach erfolgreicher Drainage oder Grundwasserabsenkung wird der Boden als Y_{Yn} bewertet.

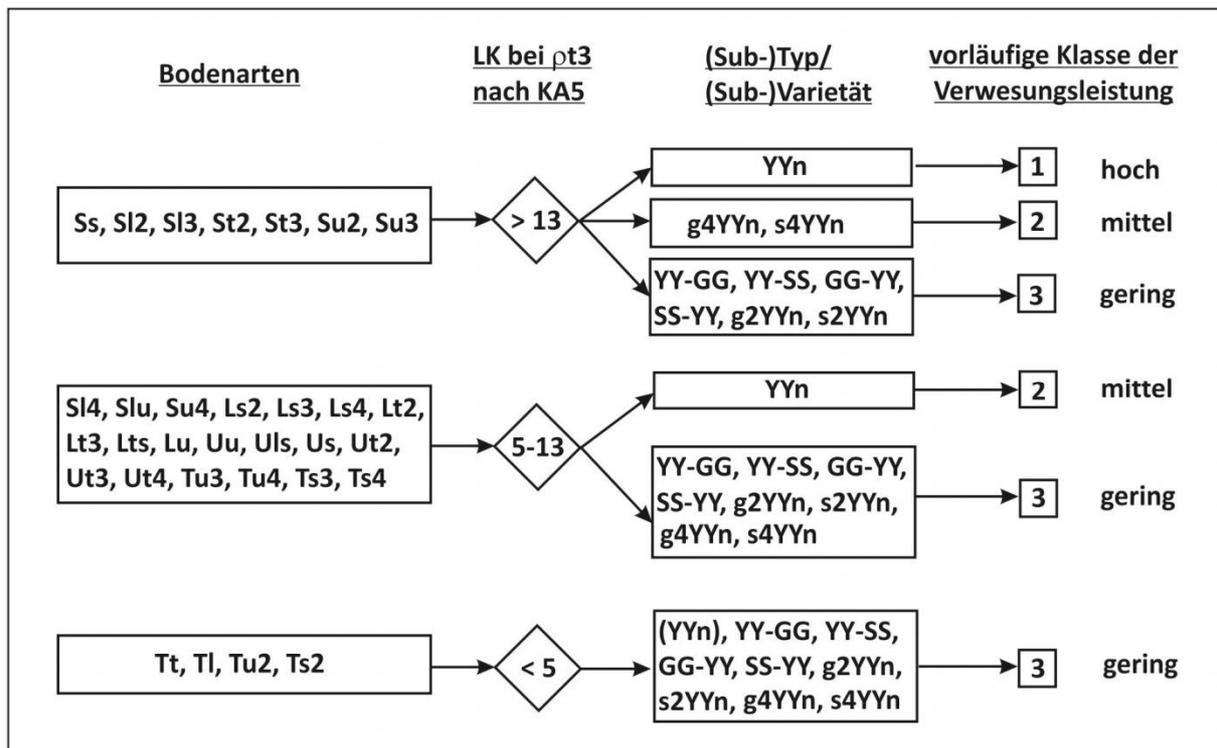


Abb. 5: Bewertung der Verwesungsleistung von Friedhofsböden nach LK und Boden(sub-)typ und (Sub-)Varietät

Aufgrund des Einflusses der Bodenreaktion auf mikrobielle Aktivität und Umsetzungsraten (vgl. Kap. 2.3.3) werden Zuschläge für die Bodenreaktion vergeben (Tab. 2).

Tab. 2: Zuschläge zur Verwesungsleistung durch die Bodenreaktion

pH-Wert	< 5	5-8	> 8
Zuschlag	+0,5	0	+0,5

Die Verwesungsleistung wird anhand von denen nach Abb. 5 und Tab. 2 ermittelten Klassen bewertet (Tab. 3). Um für eine Friedhofsnutzung geeignet zu sein, sollte ein Boden mindestens eine mittlere Verwesungsleistung erreichen. Die bei geringer Verwesungsleistung notwendigen Ruhefristen sind in der Praxis nur schwer durchsetzbar (Beirat 2012), deshalb wird die Fläche in diesem Fall als ungeeignet bewertet.

Tab. 3: Zusammenfassende Bewertung der Verwesungsleistung von Friedhofsböden

Verwesungsklasse	1	1,5-2	≥ 2,5
Verwesungsleistung	hoch	mittel	gering
Empfohlene Ruhefrist [Jahre]	10-20	20-30	Fläche ungeeignet

Filterleistung

Zusätzlich zu Bewertung der Verwesungsleistung muss eine Bewertung der Filterschicht unterhalb der Grabsohle erfolgen. Diese sollte, um Grundwasserkontaminationen zu vermeiden, grund- und stauwasserfrei sein und über eine ausreichende Filterwirkung verfügen. Für die Bewertung wird zu nächst, in Anlehnung an Empfehlungen aus der Literatur (Sabel 2007, Raissi 2008), von einer Mächtigkeit der Filterschicht von 70 cm ausgegangen. Bei Annahme einer Sickerwasserrate von 300 mm Jahr⁻¹ ist diese Mächtigkeit der Filterschicht, mit Ausnahme der Reinsande, bei allem Bodenarten ausreichend um eine Aufenthaltsdauer des Sickerwassers von 6 Monaten (vgl. Kap 2.4) in der Filterschicht zu gewährleisten.

Die Bewertung erfolgt in Anlehnung an die in Kapitel 3.5 beschriebene Bewertung der Gesamtfilterwirkung für kolloid- und ionedisperse Stoffe nach Ad-hoc-AG Boden (2005). Es werden Klassen von eins bis fünf vergeben, das Auftreten von Stauwasser oder Grundwasser wird besonders bewertet (Abb. 6). Befände sich die Filterschicht im Grundwasserschwankungsbereich, bestünde vor allen bei durchlässigen Bodenarten die Gefahr der Grundwasserkontamination.

In Hanglage können Stauwasservorkommen zu unerwünschten Stoffausträgen durch lateralen Transport führen, deshalb wird

für Böden mit Stauwassereinfluss bei Hangneigungen ab $\geq 9\%$ (5°) ein Zuschlag von +1 zur Filterleistungsklasse

vergeben. Hangneigungen von $\geq 9\%$ werden nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als mittel bis steil eingestuft und entsprechen in natürlichen Pseudogleyen dem Subtyp Hangpseudogley (SSg).

Die Filterleistung wird zuerst anhand der Gesamtfilterwirkung bewertet. Die Bewertung der Stauwassereinflüsse erfolgt erst im zweiten Schritt, da diese durch Drainage zu beseitigen sind. Nach erfolgreicher Drainage fällt die Bewertung entsprechend besser aus. Grundwasserbeeinflusste Böden werden zunächst ohne Berücksichtigung der Gesamtfilterwirkung der Bodenart der Klasse 5 zugeordnet, die Filterleistung dieser Böden kann jedoch nach Beseitigung des Grundwassereinflusses durch Absenkung des Grundwasserspiegels oder Aufschüttung des Geländes verbessert werden und würde dann entsprechend der Gesamtfilterwirkung der Bodenart eingestuft.

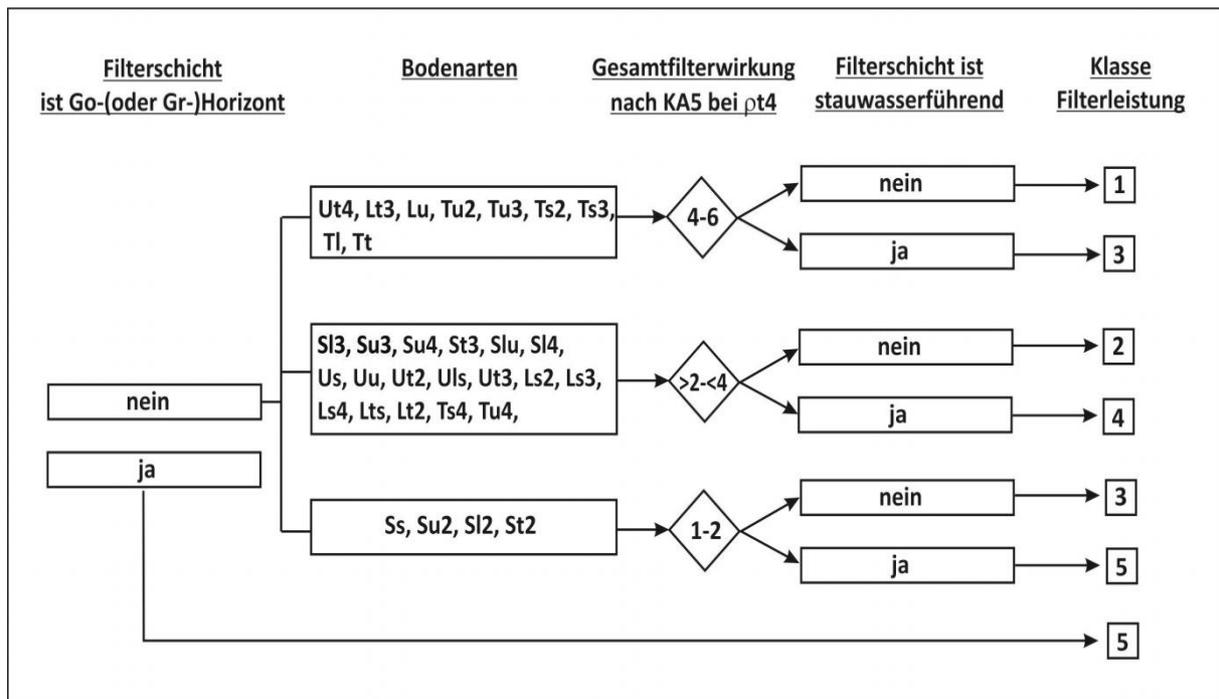


Abb. 6: Bewertung der Filterleistung von Friedhofsböden unterhalb der Grabsohle nach Gesamtfilterwirkung und Wassereinflüssen, Bewertung ausgehend von einer Mächtigkeit der Filterschicht von 70 cm und einer Sickerwassermenge von 300 mm Jahr⁻¹

Die tatsächliche Gesamtfilterwirkung auf definierter Filterstrecke wird umso geringer je kürzer die Verweildauer des Sickerwassers in der Filterschicht ist. Die Verweildauer des Sickerwassers kann nach Gleichung 8 (**DIN 19732** 1997) berechnet werden.

$$\text{Verweildauer des Sickerwassers [Jahre]} = \frac{\text{FK des Horizontes [mm]}}{\text{Sickerwassermenge [mm *Jahr}^{-1}]} \quad \text{Gleichung 8}$$

Ausgehend von der Verweildauer des Sickerwassers in einer 70 cm mächtigen Filterschicht bei einer mittleren Sickerwassermenge von 300 mm/a (vgl. Tab 99 S. 374 KA5), ist diese nur bei Reinsanden (FK = 19 Vol%) kürzer als 6 Monate. Deshalb werden Reinsande bei einer Mächtigkeit der Filterschicht von 70 cm als nicht geeignet klassifiziert (Klasse 5). Durch entsprechend mächtigere Filterschichten kann die Aufenthaltsdauer des Sickerwassers auf 6 Monate verlängert werden. Die hierfür benötigten Mächtigkeiten sind bei Sickerwasserraten von 300 mm Jahr⁻¹:

- Für fS, fSms und fSgs : 125 cm
- Für mS, mSfs und mSgs : 190 cm
- Für gS : 250 cm

Bei nachweislichem Vorhandensein einer ausreichend mächtigen Filterschicht (frei von Grund- oder Stauwasser, oberhalb des geschlossenen Kapillarsaumes) für eine Aufenthaltsdauer des Sickerwassers von 6 Monaten kann die Filterleistung auch bei Reinsanden als Klasse 3 (mittel)

bewertet werden (vgl. Abb. 6). Texturwechsel innerhalb der Filterschicht sind besonders zu berücksichtigen. Laterale Flüsse von nicht ausreichend gefiltertem Sickerwasser über einer weniger durchlässigen Schicht müssen ausgeschlossen sein um eine ausreichende Filterleistung zu gewährleisten.

Bei höheren Sickerwasserraten kann die Aufenthaltsdauer des Sickerwassers auch in weniger durchlässigen Bodenarten so hoch sein, dass eine 70 cm mächtige Filterschicht nicht mehr den Anforderungen genügt. Deshalb ist anzuraten, in der Bewertung vor Ort nach Möglichkeit die klimatischen Rahmenbedingungen inklusive der zusätzlichen Bewässerung durch Grabpflege zu berücksichtigen und die Vorgabe für die minimale Mächtigkeit der Filterschicht entsprechend anzupassen. Für Bodenarten mit hoher FK kann eine ausreichende Aufenthaltsdauer des Sickerwassers auch bei geringerer Mächtigkeit der Filterschicht erzielt werden (Wourtsakis 2002).

Um die Gefahr der Auswaschung von Schwermetallen zu berücksichtigen werden bei unterschreiten der Grenz-pH-Werte für die Mobilität von Metallionen (Ad-hoc-AG Boden 2005) Zuschläge zur Klasse der Filterleistung vergeben (Tab. 4).

Tab. 4: Zuschläge zur Filterleistung für die Bodenreaktion

pH-Wert	≥6,0	6,0-4,0	≤4,0
mobil werdende Metallionen	-	Cd, Mn, Ni, Co, Zn, Al, Cr III	Cu, Hg
Zuschlag	0	0,5	1

Aus der Summe der vorgenommenen Klassifizierungen ergibt sich die Filterleistung (Tab. 5). Es werden Klassen von 1 bis >4,5 vergeben. Ein für die Friedhofsnutzung geeigneter Boden sollte mindestens über eine mittlere Filterleistung verfügen.

Tab. 5: Zusammenfassende Bewertung der Filterleistung

Filterklasse	1	1,5-2	2,5-3	3,5-4	≥ 4,5
Filterleistung	sehr hoch	hoch	mittel	gering	sehr gering

4.2 Ergebnisse der kartierten Friedhöfe

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der 19 kartierten Friedhöfe in den Bundesländern Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Berlin, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern gezeigt. Für jeden der Friedhöfe wurde eine schematische Catena erstellt und eine Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung vorgenommen. Zusätzlich werden die Ergebnisse aus den bodenchemischen Analysen der Bohrkerns vorgestellt.

4.2.1 Untersuchte Friedhöfe in Schleswig-Holstein

Im Bundesland Schleswig-Holstein wurden zwei Friedhöfe untersucht.

4.2.1.1 Kartierung und Bewertung

Friedhof SH1

Standortbeschreibung

Der 8ha große Friedhof SH1 (Abb. 7) liegt auf 18-30 m ü. NN in der Schleswig-Holsteinischen Jungmoränenlandschaft.

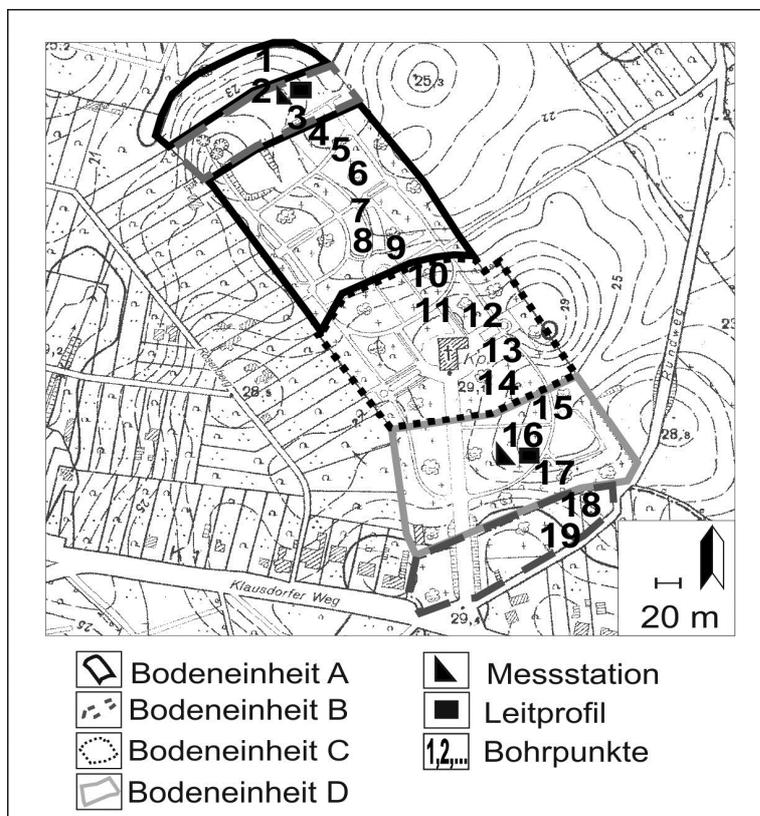


Abb. 7: Friedhof SH1, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Der Friedhof wurde 1909 angelegt und nach dem zweiten Weltkrieg in nordwestlicher Richtung erweitert. Die Ruhefrist für Erdbestattungen beträgt 25 Jahre, die Bestattungstiefe liegt bei 160 cm. Zusätzlich zur Kartierung wurden auf dem Friedhof SH1 zwei Profilgruben angelegt (Kap 4.3.1.1 und 4.3.1.2) und zwei Messanlagen installiert (Kap. 4.4.1.1 und 4.4.1.2). Auf dem Friedhof wurden in den Bodeneinheiten B und C vereinzelt und in Bodeneinheit D häufig Verwesungsstörungen beobachtet (mündl. Mitteil. d. Friedhofsmitarbeiter).

Bodenkartierung

Der Friedhof SH1 liegt auf weichseleiszeitlichen Geschiebemergeln. Das Gelände ist hügelig, in einer Senke im südöstlichen Teil des Friedhofes entstanden durch das Verlanden eines Gewässers Niedermoortorfe (Abb. 8). In Bodeneinheit A und B liegen s4YYn und SS-YY vor. In Bodeneinheit C ist der Bodensubtyp ein YY-SS. In Bodeneinheit D befinden sich die R-Horizonte im Grundwasserschwankungsbereich, Bodentyp ist hier ein YY-GG. Bodentyp ist hier ein YY-GG.

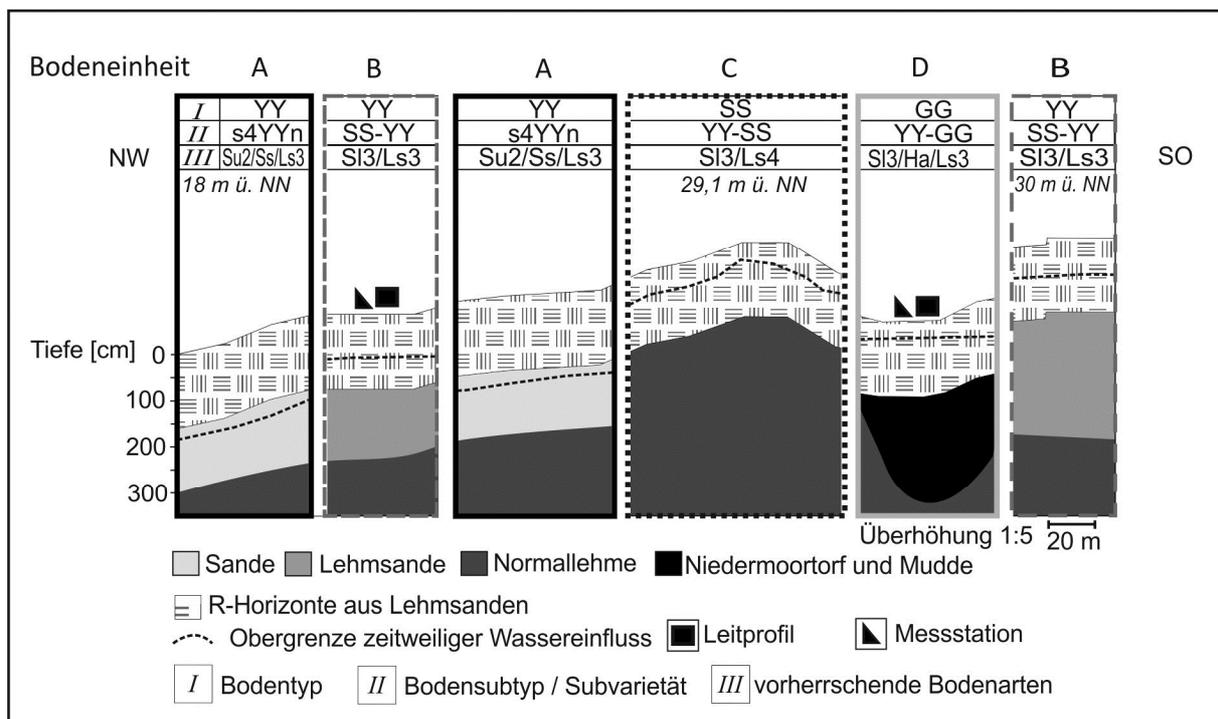


Abb. 8: Friedhof SH1, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen

Bewertung

Die Verwesungsleistung wird in Bodeneinheit A als mittel, in den Bodeneinheiten B, C und D als gering bewertet (Tab. 6). Die Filterleistung ist in Bodeneinheit B hoch, in Bodeneinheit C mittel und in Bodeneinheit A und D sehr gering. Die Bodeneinheit D wird aufgrund der mit dem Grundwassereinfluss einhergehenden schlechten Verwesung nicht mehr für Erdbestattungen genutzt.

Tab. 6: FH SH1, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Bodentyp	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung	Flächenanteil [%]
A	s4YYn	Su2/Ss/Ls3	mittel	sehr gering*	40
B	SS-YY	Sl3/Ls3	gering	hoch	15
C	YY-SS	Sl3/Ls4	gering	mittel*	30
D	YY-GG	Sl3/Ha/Ls3	gering	sehr gering	15

* Zuschlag vom +1 aufgrund der Hangneigung

Friedhof SH2

Standortbeschreibung

Der ca. 4,5ha große Friedhof SH2 (Abb. 9) liegt in der Schleswig-Holsteinischen Jungmoränenlandschaft auf ca. 30 m ü. NN. Die Fläche besteht aus einem alten Teil, der 1770 um die Kirche herum angelegt und in nordöstlicher Richtung erweitert wurde (Bodeneinheit A), und einem neueren Teil aus den 1920'er Jahren (Bodeneinheit B).

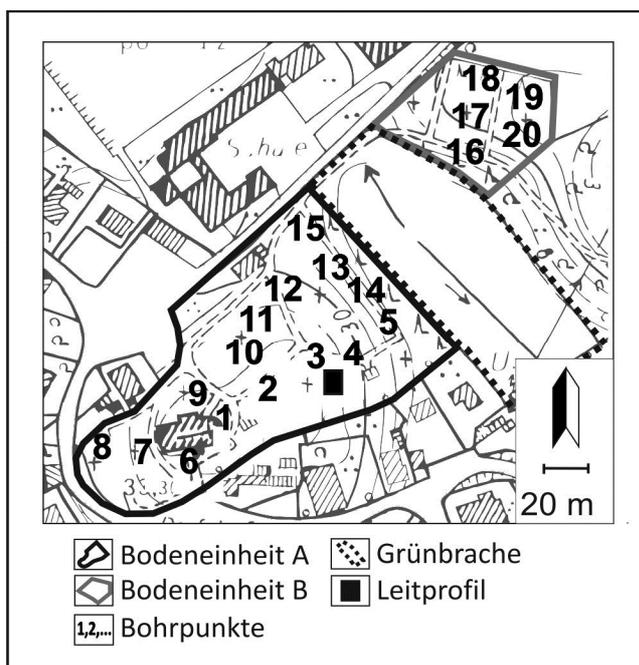


Abb. 9: Friedhof SH2, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Die Beiden Friedhofsteile sind durch eine brach liegende Senke voneinander getrennt die wiederum von einem Entwässerungsgraben durchzogen ist. Die Ruhefristen für Erdbestattungen betragen 40 Jahre, die Bestattungstiefe liegt bei 160cm. Die Ruhefristen wurden aufgrund von Verwesungsstörungen von 30 auf 40 Jahre verlängert. Zusätzlich zur Kartierung wurde auf dem Friedhof SH2 ein Leitprofil angelegt (Anhang).

Bodenkartierung

Auf dem Friedhof wurden zwei Bodeneinheiten unterschieden (Abb. 10). In der Bodeneinheit A liegen s2YYn aus Normallehmern vor, in der Bodeneinheit B ist der Bodensubtyp ein SS-YY aus Sandlehmern über Normallehmern.

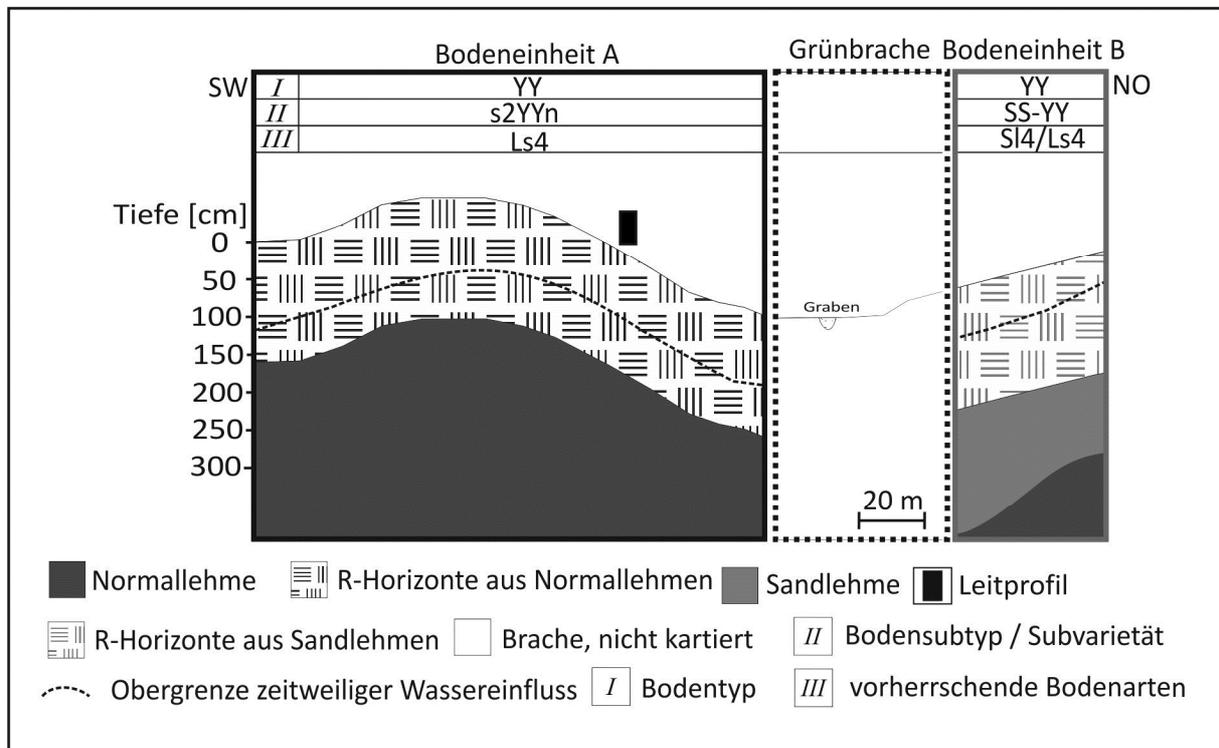


Abb. 10: Friedhof SH2, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen

Bewertung

Die Wiederbelegung von Grabstellen nach Ablauf der 30-jährigen Ruhefrist ist an diesem Standort nicht immer möglich (mündl. Mitteil. d. Friedhofsverwaltung). Bei Anlage eines Leitprofils in Bodeneinheit B, wurde die geringe Verwesungsleistung bestätigt. Bei den Grabarbeiten wurde ein gut erhaltener Sarg freigelegt. Im Sarg wurden im Abdominalbereich des fast vollständig skelettierten Leichnams Fragmente von Leichenwachs und schwarz gefärbte Zersetzungsreste vorgefunden. Dem Beckenknochen haftete eine Mischung aus Leichenwachs und schwarzgefärbten Zersetzungsprodukten an (Abb. 11).



Abb. 11: Friedhof SH2, Detailaufnahme Sargdeckel (links) und Beckenknochen mit Adipocire (rechts)

Die Verwesungsleistung wird in beiden Bodeneinheiten als gering, die Filterleistung zunächst als hoch bewertet (Tab. 7). Aufgrund der vorliegenden Hangneigung wird die Filterleistung um eine Klasse herabgestuft und als mittel bewertet.

Tab. 7: FH SH2, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Bodentyp	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung	Flächenanteil [%]
A	s2YYn	Ls4	gering	mittel*	80
B	SS-YY	Sl4/Ls4	gering	mittel*	20

* Zuschlag vom +1 aufgrund der Hangneigung

4.2.1.2 Bodenchemische Kennwerte

Die Ah-Horizonte in ehemaligen Gräbern auf dem Friedhof SH1 (Abb. 12) sind stark, die Deckschichten schwach bis mittel humos, die Sargbereiche sehr schwach bis schwach, in Bodeneinheit D aufgrund des eingemischten Niedermoortorfes sehr stark humos. Die Filterschichten sind in Bodeneinheit A, B, und C sehr schwach humos bis humusfrei, in Bodeneinheit D, wiederum aufgrund des Niedermoortorfes, sehr stark humos.

Die Humusqualität der Deckschichten wird anhand des C/N-Verhältnisses als mittel eingestuft.

Die Bodenreaktion ist in den Deckschichten und Sargbereichen sehr schwach sauer bis neutral. In Bodeneinheit D ist die Bodenreaktion der torfhaltigen Filterschicht schwach sauer und auch die Bodenreaktion in Sargbereich und Deckschicht ist saurer als in den entsprechenden Schichten der übrigen Bodeneinheiten.

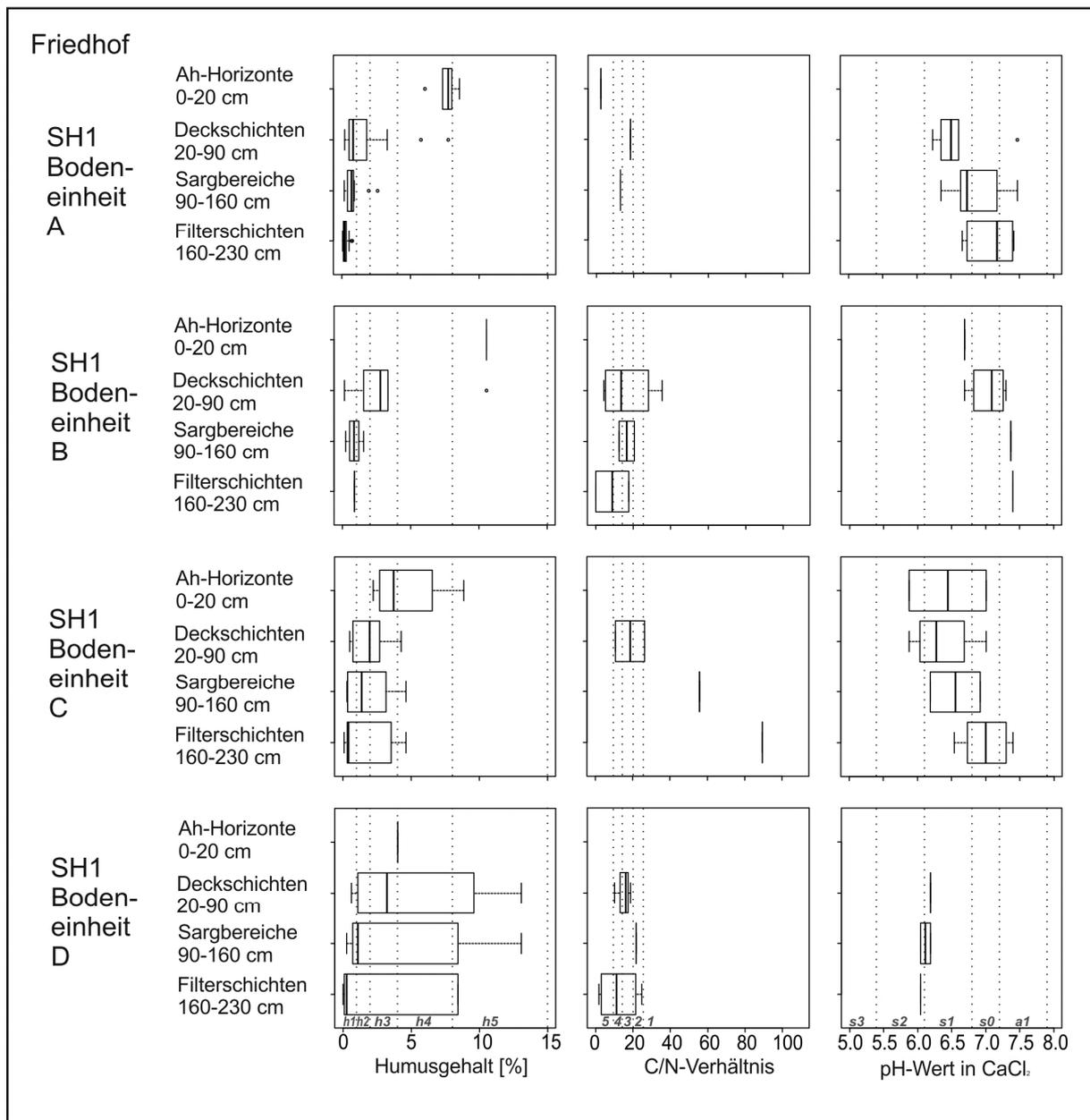


Abb. 12: Friedhof SH1, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte

Auf dem Friedhof SH2 (Abb. 13) sind die Deckschichten und Sargbereiche schwach bis sehr schwach humos.

In Bodeneinheit A, dem ältesten Teil des Friedhofes, konnten in Deckschichten und Sargbereichen leicht höhere Humusgehalte festgestellt werden als in der direkt anschließenden Bodeneinheit B. Ähnliche Werte wurden jedoch auch in den Deckschichten von Bodeneinheit C festgestellt. Die Filterschichten sind in allen Bodeneinheiten sehr schwach humos bis humusfrei.

Die Humusqualität der Deckschichten ist in Bodeneinheit A in manchen Gräbern etwas schlechter als in Bodeneinheit B und C, die Mediane der in den jeweiligen Bodeneinheiten untersuchten Deckschichten unterscheiden sich jedoch kaum und weisen auf eine hohe Humusqualität hin.

Der Boden ist an diesem Standort nur bis in ca. 100cm Tiefe entkalkt, deshalb weisen die Sargbereiche und Filterschichten aller Bodeneinheiten eine neutrale bis sehr schwach alkalische Bodenreaktion auf. Nur in einzelnen Gräbern der Bodeneinheit A und B sind die Sargbereiche (und Filterschichten) sehr schwach sauer. Die Bodenreaktion in den Deckschichten ist sehr schwach sauer, wobei davon auszugehen ist, dass der pH-Wert durch die Vermischung des kalkarmen Oberbodens mit dem Unterboden leicht angehoben wurde.

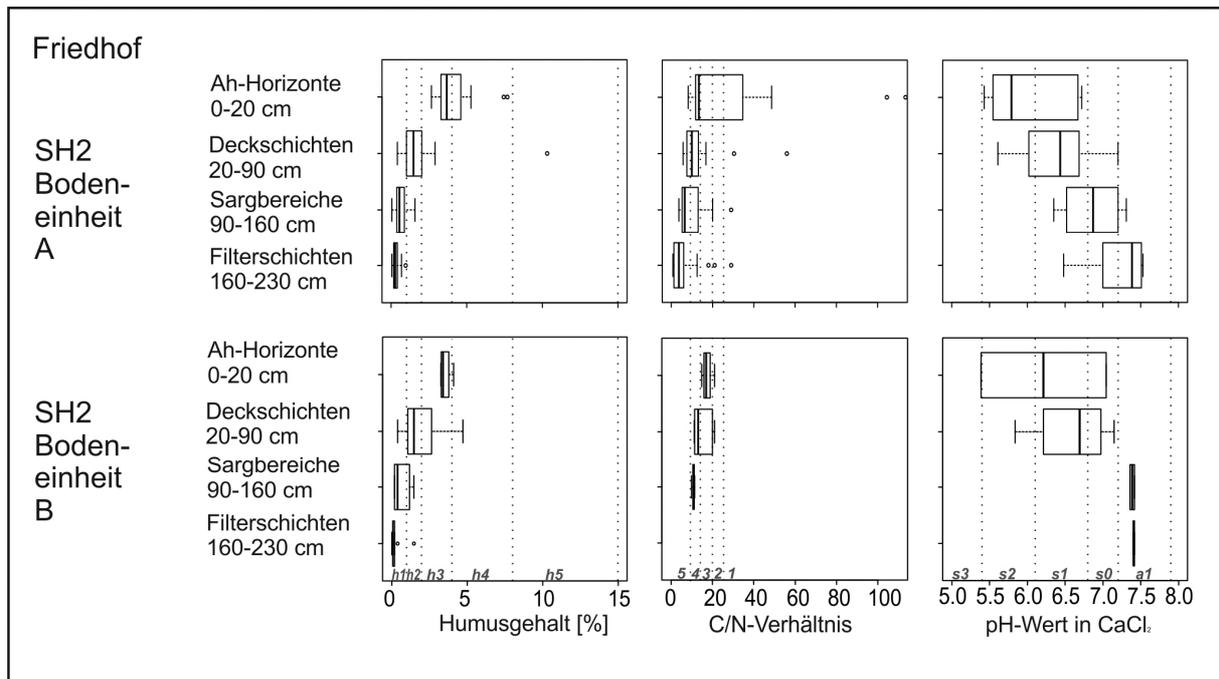


Abb. 13: Friedhof SH2, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte

4.2.2 Untersuchte Friedhöfe in Niedersachsen

Im Bundesland Niedersachsen wurden insgesamt vier Friedhöfe untersucht.

4.2.2.1 Kartierung und Bewertung

Friedhof NI1

Standortbeschreibung

Der 3,5ha große Friedhof NI1 (Abb. 14) liegt im Bereich der friesländischen Küstenmarschen. Der Friedhof wurde 1920 angelegt (Bodeneinheit B) und seitdem kontinuierlich erweitert (Bodeneinheit A). Die Bestattungstiefe liegt bei 160 cm, die Ruhefrist bei 25 Jahren. Aufgrund der homogenen Bodenverhältnisse wurden auf diesem Friedhof nur 5 Bohrungen in abgelaufenen Gräbern vorgenommen. Auf dem Friedhof kommt es häufig zu Verwesungsstörungen.

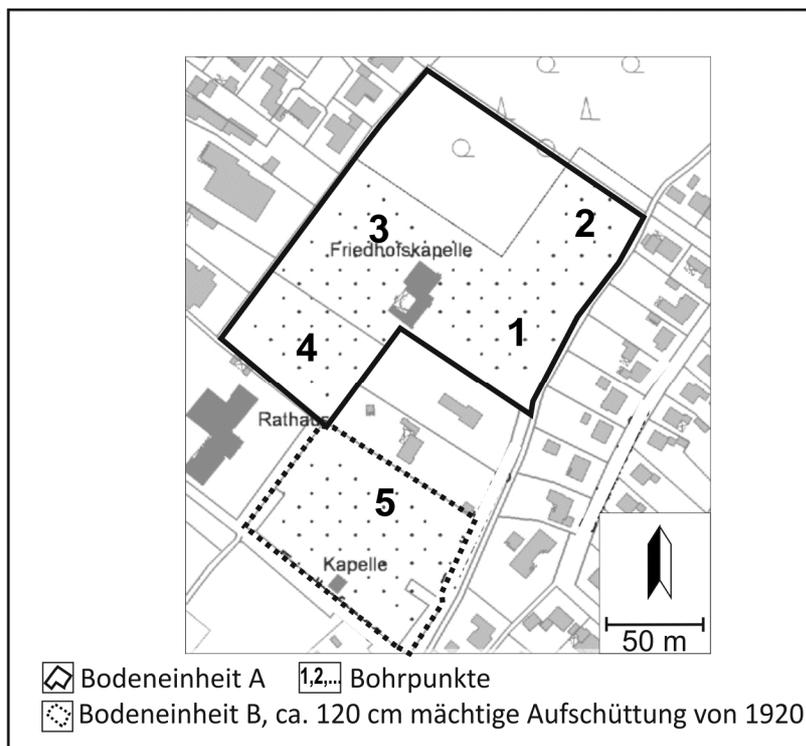


Abb. 14: Friedhof NI1, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Bodenkartierung

Der Friedhof NI1 wurde aufgrund einer teilflächigen Aufschüttung in zwei Bodeneinheiten unterteilt (Abb. 15). In Bodeneinheit A liegen YY-GG aus Normallehmen vor. In Bodeneinheit B wurde bei Anlage des ursprünglichen Friedhofes 1920 eine ca. 120 cm mächtige Sandschicht aufgetragen. Durch Vermischung mit dem darunterliegenden Lehm im Zuge von Beisetzungen ist die mittlerweile nur

noch 90 cm mächtige Aufschüttung als Lehmsand einzustufen. Da dieser höhere k_f als der darunter liegende Lehm aufweist, kommt es hier zusätzlich zum in ca. 1 Meter Tiefe beginnenden Grundwassereinfluss zu oberflächennahen Stauwassereinflüssen. Der Bodentyp ist hier ein g2YY-SS.

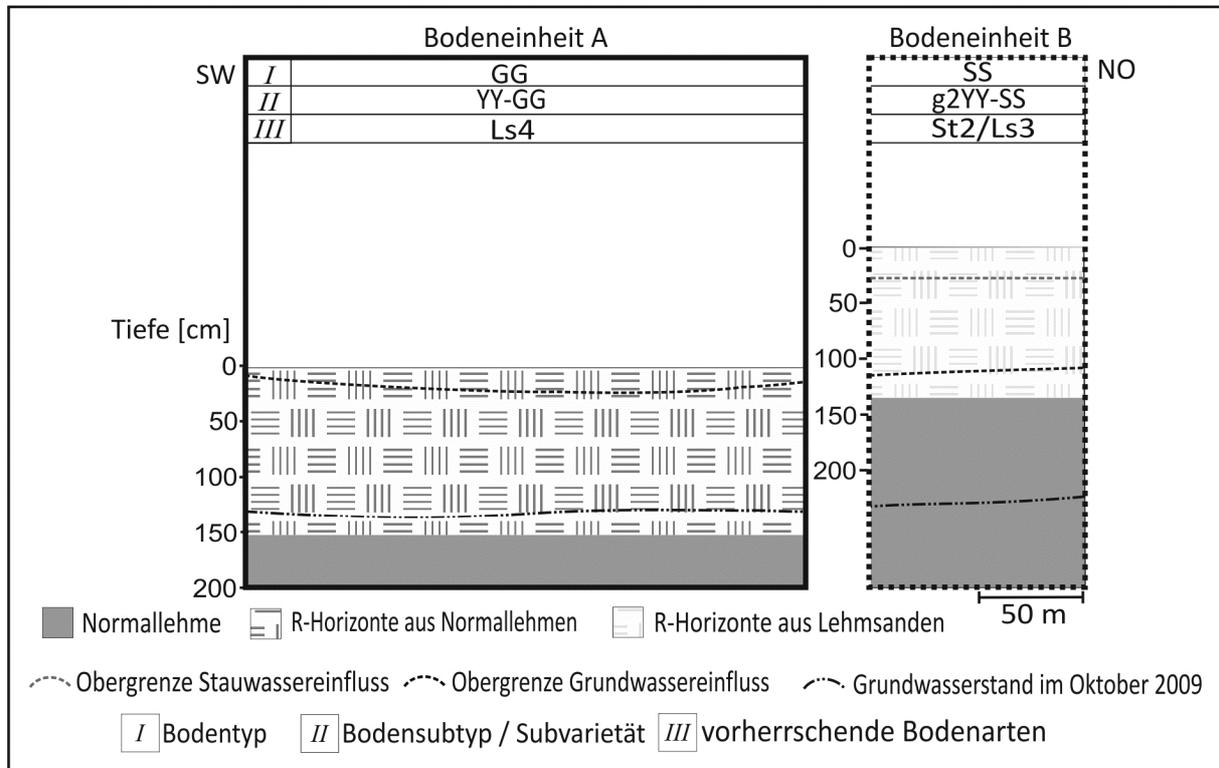


Abb. 15: Friedhof NI1, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen

Bewertung

Aufgrund des ausgeprägten Grundwassereinflusses und des in zusätzlichen Stauwassereinflusses in Bodeneinheit B wird die Verwesungsleistung des gesamten Friedhofes als gering und die Filterwirkung als sehr gering eingestuft (Tab. 8).

Tab. 8: Friedhof NI1, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Bodentyp	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung	Flächenanteil [%]
A	YY-GG	Ls4	gering	sehr gering	75
B	g2YY-SS	St2/Ls3	gering	sehr gering	25

Friedhof NI2

Standortbeschreibung

Der 0,3ha umfassende Friedhof NI2 (Abb. 16) liegt im Bereich der ostfriesischen Geest in einem Moorgebiet auf 3 m ü. NN und ist durch die Fehnkultur (Tacke 1935) geprägt. Der Friedhof wurde 1834 angelegt. Die Ruhefrist für Erdbestattungen liegt bei 30 Jahren, die Bestattungstiefe bei 160 cm. Der Friedhof ist sehr dicht belegt, eine Wiederbelegung abgelaufener Gräber ist aufgrund massiver Verwesungsstörungen in der Regel nicht möglich. Zusätzlich zur Kartierung wurde auf dem Friedhof NI2 ein Leitprofil angelegt (Anhang).

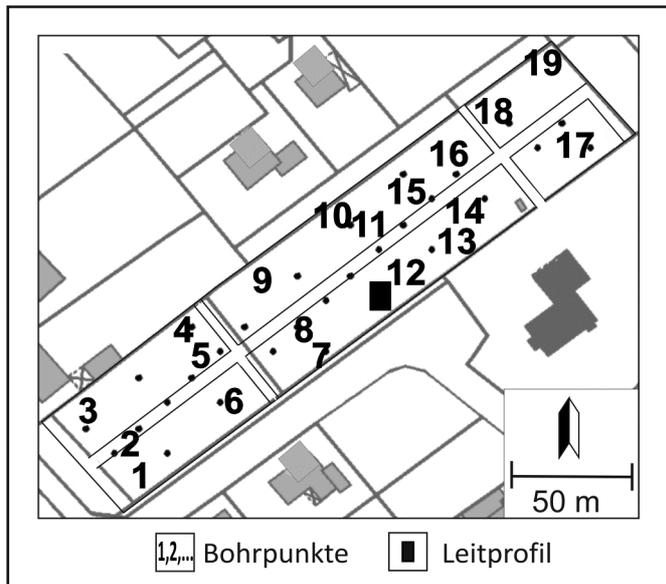


Abb. 16: Friedhof NI2, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Bodenkartierung

Der Friedhof NI2 ist eine Bodeneinheit von g5SS-YY aus anthropogenem Sandauftrag über (teilweise abgetorfte) Hochmoortorfen (Abb. 17). Bei hohen Wasserständen im an den Friedhof angrenzenden Kanal drückt das Grundwasser von dem unter der Torfschicht liegenden fossilen Podsol nach oben. Werden die Torfschicht und der darunter liegende stark verkittete fossile Bhs Horizont zu einem solchen Zeitpunkt durch Grabungsarbeiten auf dem Friedhof durchbrochen, kann es nach Aussage der Friedhofsbetreiber zu einem schnellen Aufsteigen von gespanntem Grundwasser in die Grube kommen.

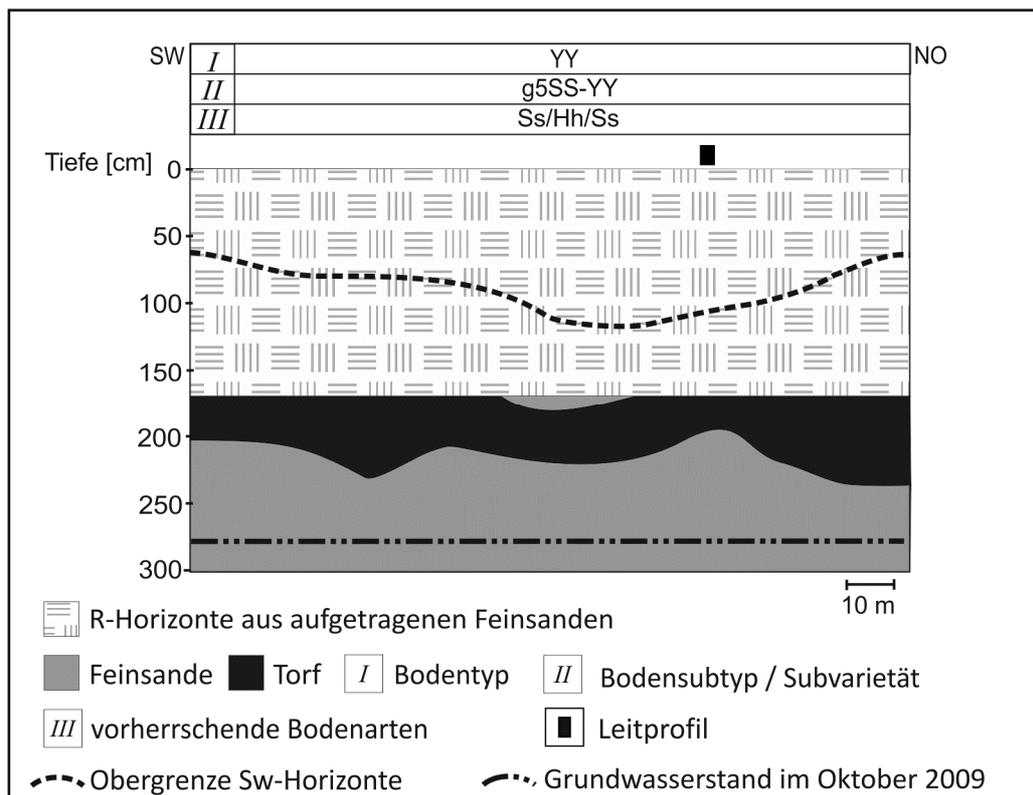


Abb. 17: Friedhof NI2, schematische Catena mit Bodentyp und Texturen

Bewertung

Die Verwesungsleistung wird als gering, die Filterleistung, unter der Voraussetzung dass die Torfschicht nicht durchbrochen wird, als hoch, bei Kontakt zum darunter liegenden grundwasserführenden Reinsand als sehr gering bewertet (Tab. 9).

Tab. 9: Friedhof NI2, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Bodentyp	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung	Flächenanteil [%]
Gesamtfläche	SS-YY	SS/Hh/SS	gering	hoch/sehr gering	100

Friedhof NI3

Standortbeschreibung

Der 0,8ha große Friedhof NI3 (Abb. 18) liegt im Bereich der niedersächsischen Geestplatten und Endmoränen auf ca. 50m ü. NN. Der Friedhof wurde 1930 angelegt und verfügt im westlichen Teil noch über unbelegte Erweiterungsflächen. Die Bestattungstiefe liegt bei 160 cm, bei Tieferlegung 250 cm. Die Ruhezeit beträgt 25-30 Jahre.

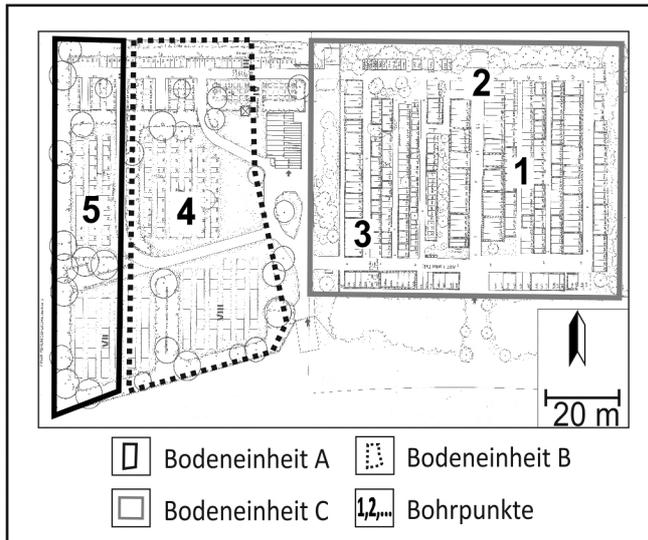


Abb. 18: Friedhof NI3, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Bodenkartierung

Der Friedhof wurde in drei Bodeneinheiten unterteilt (Abb. 19).

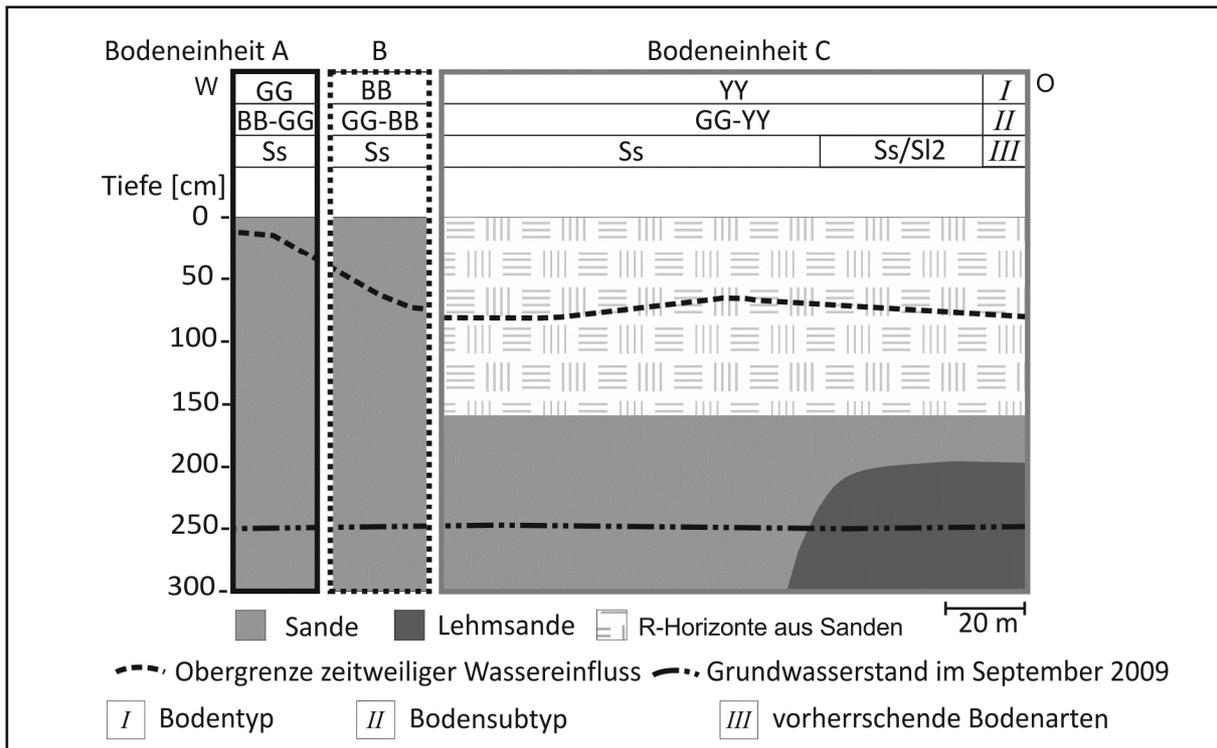


Abb. 19: Friedhof NI3, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen

In Bodeneinheit A und B liegen BB-GG bzw. GG-BB aus Reinsanden vor. In Bodeneinheit C besteht der Boden aus Reinsanden, die im östlichen Bereich der Fläche von Lehmsanden unterlagert sind. Der Bodentyp in abgelaufenen Gräbern ist hier ein GG-YY.

Bewertung

Die Verwesungsleistung wird auf dem gesamten Friedhof als gering eingestuft, die Filterleistung ist sehr gering (Tab. 10).

Tab. 10: Friedhof NI3, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Bodentyp	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung	Flächenanteil [%]
A	BB-GG	Ss	gering	sehr gering	10
B	GG-BB	Ss	gering	sehr gering	30
C	GG-YY	Ss/SI2	gering	sehr gering	60

Friedhof NI4

Standortbeschreibung

Der 0,7ha große Friedhof NI (Abb. 20) liegt im Dinklager Becken im Bereich der Talsandniederungen und Urstromtäler auf ca. 28m ü. NN. Er besteht aus einem alten Teil und einer Erweiterungsfläche, auf der schon einige Beisetzungen vorgenommen wurden. Der Friedhof wurde 1960 angelegt und 2004 erweitert. Die Bestattungstiefe liegt bei 150 cm, die Ruhefristen betragen 20-30 Jahre. Im alten Teil des Friedhofes treten gelegentlich Verwesungsstörungen auf.

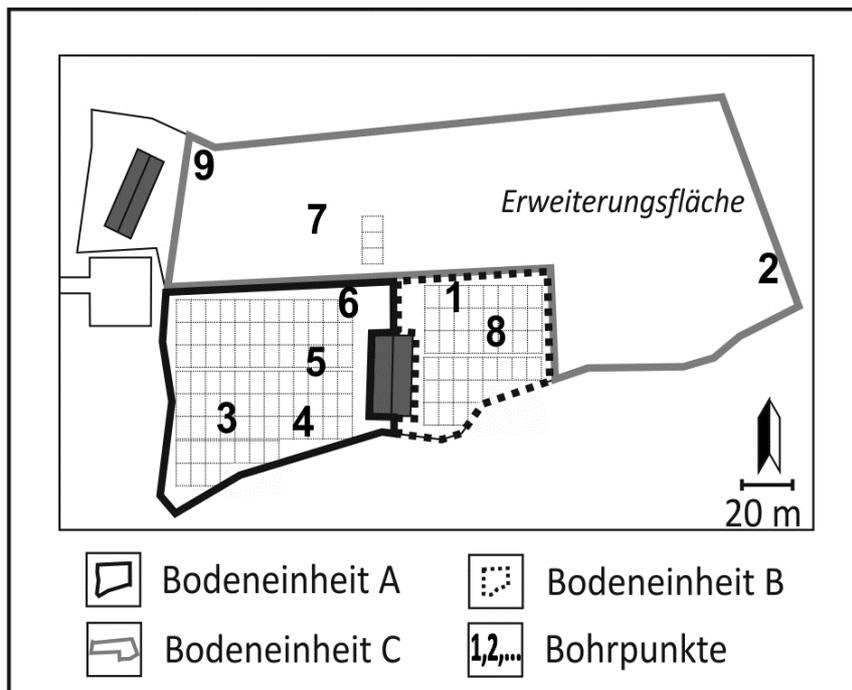


Abb. 20: Friedhof NI4, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Bodenkartierung

Der Friedhof wurde in drei Bodeneinheiten unterteilt (Abb. 21). Die Bodeneinheit In Bodeneinheit A liegen g2YYn, in Bodeneinheit B GG-YY und in Bodeneinheit C GG-YE aus Reinsanden über Schluffsanden vor.

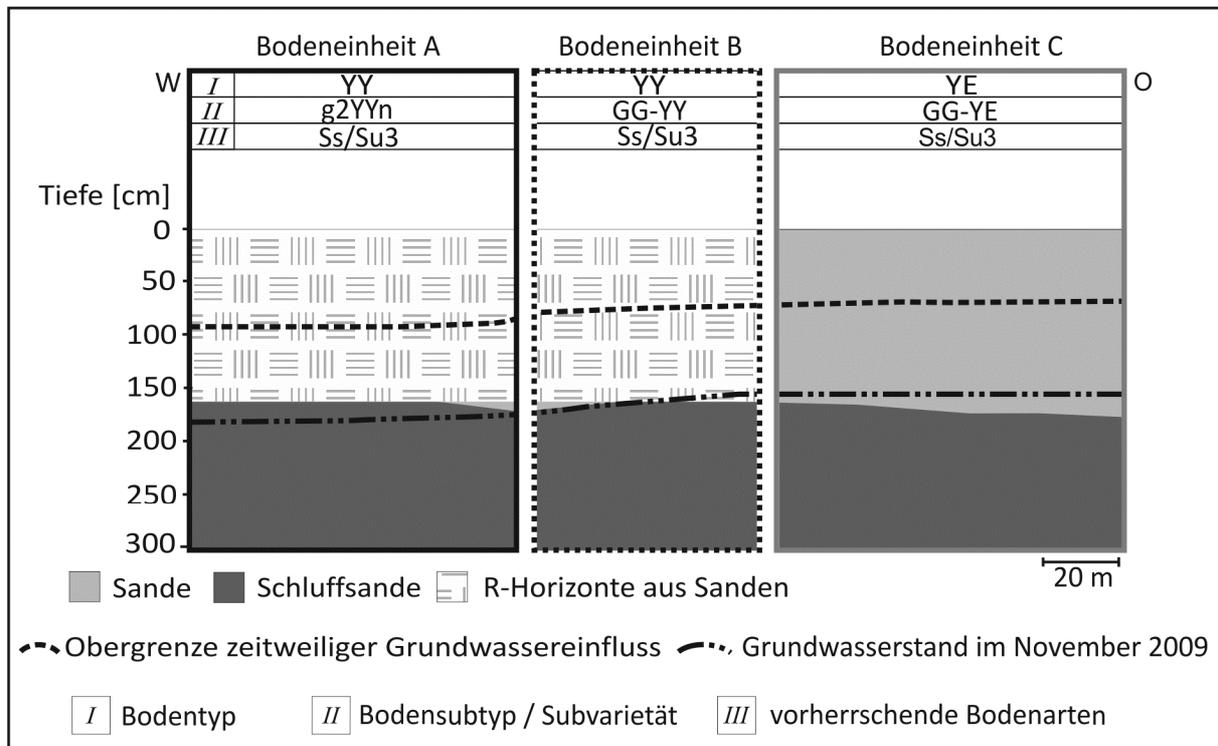


Abb. 21: Friedhof NI4, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen

Bewertung

Die Verwesungsleistung wird in allen Bodeneinheiten als gering, die Filterleistung als sehr gering bewertet (Tab. 11). Bei auf dem Friedhof durchgeführten Graböffnungen wurden in einem von vier Gräbern Verwesungsstörungen festgestellt (Albrecht 2008).

Tab. 11: Friedhof NI4, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Typ	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung	Flächenanteil [%]
A	g2YYn	Ss/Su3	gering	sehr gering	20
B	GG-YY	Ss/Su3	gering	sehr gering	10
C	GG-YE	Ss/Su3	gering	sehr gering	70

4.2.2.2 Chemische Kennwerte der Friedhöfe NI1-NI4

An den Standorten NI1, NI2 (Abb. 22) und NI4 (Abb. 23) wurden Humusgehalte festgestellt, die nicht auf die Friedhofsnutzung sondern auf pedo-geogenetische oder anthropogene Einflüsse zurückzuführen sind.

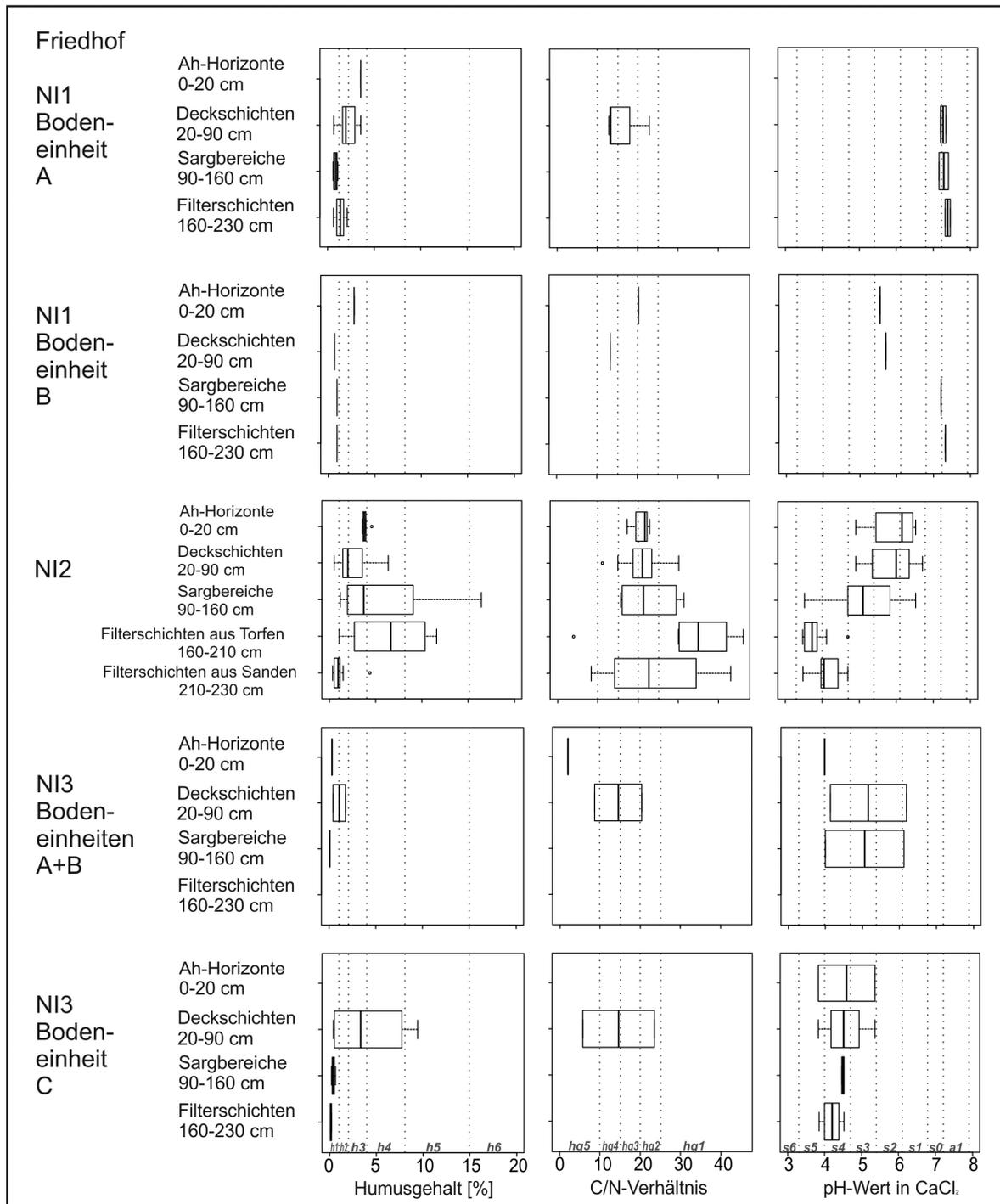


Abb. 22: Friedhöfe NI1, NI2 und NI3, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte

So ist der aus marinen Sedimenten bestehende Boden an Standort NI1 bereits aufgrund seiner Geogenese schwach humos. Am Standort NI2 stehen im Bereich der Filterschicht Hochmoortorfe an, deren Einmischung in den darüber aufgeschütteten Flusssand auch ohne eine Friedhofsnutzung im Rahmen der Fehnwirtschaft stattgefunden hätte (Tacke 1935). An Standort NI4 wurde vor Anlage des Friedhofes Plaggenwirtschaft betrieben deren Folgen sich in mittel bis stark humosen Ah-Horizonten und Deckschichten abzeichnen.

Am Standort NI3 liegt nur eine Beeinflussung der Humusgehalte durch die Friedhofsnutzung vor. Diese zeigt sich in Bodeneinheit C in stark humosen Ah-Horizonten und Deckschichten, sowie in sehr schwach humosen Sargbereichen. Die noch nicht unter Friedhofsnutzung stehenden Bodeneinheiten A und B sind in den Bereichen der Ah-Horizonte und der Deckschichten sehr schwach humos, darunter humusfrei.

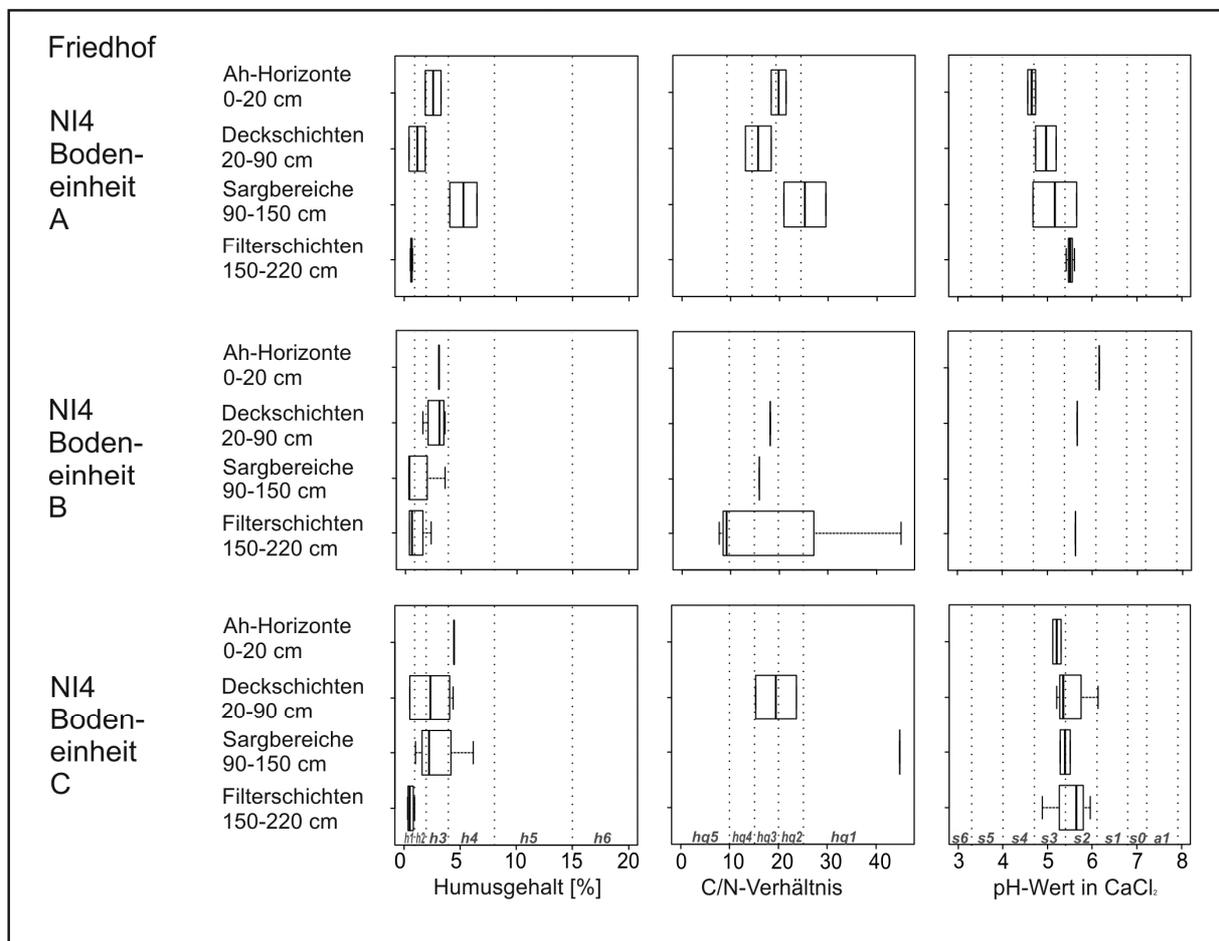


Abb. 23: Friedhof NI4, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte

Die Humusqualität der Deckschichten ist am Standort NI1 mittel bis hoch und an Standort NI2 mittel bis gering. An Standort NI3 wurden sowohl in den oberen 90 cm der noch unbelegten Bodeneinheit A als auch in den Deckschichten der Gräber in Bodeneinheit B Humusqualitäten von hoch bis gering

ermittelt. An Standort NI4 ist die Humusqualität in den Bodeneinheiten A und B in den Deckschichten hoch bis mittel, in der noch unbelegten Bodeneinheit C in den oberen 20-90 cm mittel bis gering.

Die Bodenreaktion des carbonathaltigen Bodens an Standort NI1 ist neutral bis sehr schwach alkalisch, in Bodeneinheit B sind Ah-Horizont und Deckschicht schwach sauer, was auf die Aufschüttung aus Sand zurückzuführen ist. An Standort NI2 sind Deckschicht und Sargbereich schwach bis mäßig sauer, die überwiegend aus Hochmoortorf bestehenden Filterschichten sind sehr stark sauer. An den Standorten NI3 und NI4 ist die Bodenreaktion in den Filterschichten überwiegend schwach bis mäßig sauer, an Standort NI3 in einigen Fällen stark sauer.

4.2.3 Untersuchte Friedhöfe in Berlin

Im Stadtgebiet von Berlin wurden zwei Friedhöfe untersucht.

4.2.3.1 Kartierung und Bewertung

Friedhof BE1

Beschreibung

Der 7,7ha große Friedhof BE1 (Abb. 24) liegt im östlichen Stadtgebiet von Berlin. Der Friedhof wurde 1902 angelegt. Die Ruhefristen für Erdgräber betragen 20 Jahre, die Bestattungstiefe liegt bei 180 cm. Auf dem Friedhof sind keine Verwesungsstörungen bekannt. Zusätzlich zur Kartierung wurde auf dem Friedhof BE1 ein Leitprofil angelegt (Kap 4.3.2) und eine Messanlage installiert (Kap. 4.4.2).

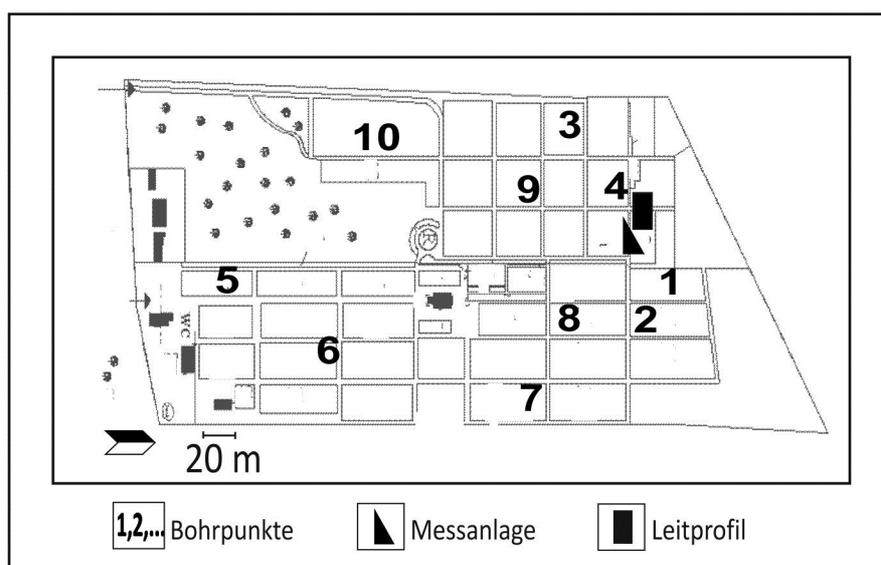


Abb. 24: Friedhof BE1, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Bodenkartierung

Der Friedhof BE1 wird als eine homogene Bodeneinheit betrachtet (Abb. 25). Der Bodentyp in den abgelaufenen Gräbern ist ein YYn aus Feinsand (Flugsand).

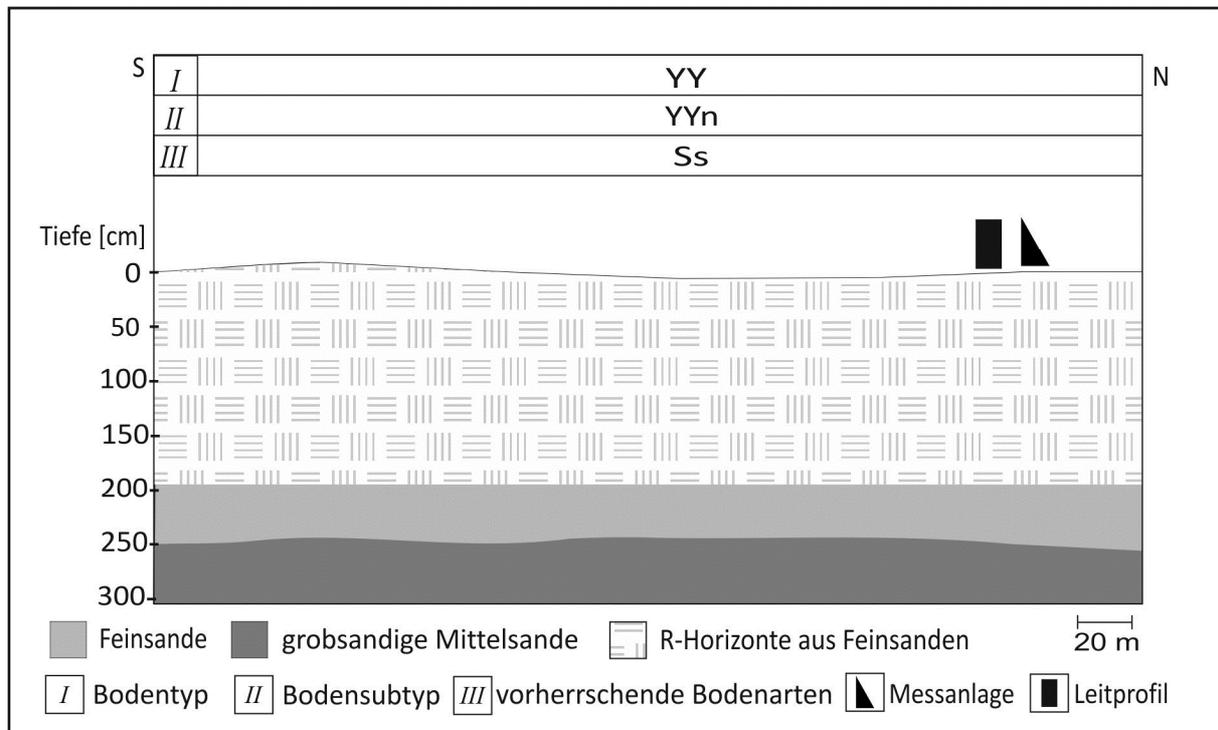


Abb. 25: Friedhof BE1, schematische Catena mit Bodentyp und Textur

In vielen Gräbern konnten ab einer Bohrtiefe von 160 cm Rostflecken festgestellt werden, die auf eine reliktsche Vergleyung hindeuten. Im Rahmen des auf dem Standort vorgenommenen Monitorings (Kap 4.4.2) konnte der fehlende Grundwassereinfluss bis in 220 cm Tiefe bestätigt und das Vorkommen von Haftwasser ausgeschlossen werden. Bei der Setzung eines Brunnenrohres wurde in 4 Meter Tiefe Grundwasserkontakt hergestellt.

Bewertung

Die vollständige Zersetzung der in den Bohrkernen aufgefundenen Holzreste und das völlige Fehlen von auf einen noch intakten Sarg hindeutenden Hohlräumen lassen darauf schließen, dass die Verwesung auf diesem Friedhof unter ausreichend aeroben Bedingungen stattfindet und schnell und vollständig abläuft. Dies wurde durch die Friedhofsmitarbeiter bestätigt. Die Verwesungsleistung wird als hoch bewertet, die Filterleistung als gering (Tab. 12).

Tab. 12: Friedhof BE1, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Bodentyp	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung	Flächenanteil [%]
gesamte Fläche	YYn	Ss	hoch	gering	100

Friedhof BE2

Beschreibung

Der 2ha große Friedhof BE2 (Abb. 26) liegt ebenfalls im östlichen Stadtgebiet von Berlin. Er wurde 1860 angelegt und verfügt im südöstlichen Teil über zwei anthropogene Terrassen (Bodeneinheit A). Die Ruhefristen für Erdgräber betragen 20 Jahre, die Bestattungstiefe liegt bei 180 cm. Auf dem Friedhof sind keine Verwesungsstörungen bekannt.

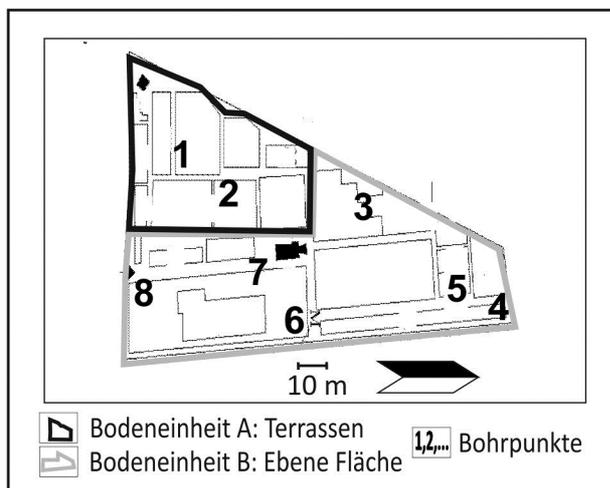


Abb. 26: Friedhof BE2, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Bodenkartierung

Der Friedhof BE2 wurde aufgrund einer teilflächigen Aufschüttung mit Sand in zwei Bodeneinheiten unterteilt (Abb. 27). In Bodeneinheit A liegen s5YYn aus Reinsanden über Lehmsanden vor. In Bodeneinheit B ist die Sandschicht über den Lehmsanden weniger mächtig, so dass hier s4YYn vorliegen. Die Lehmsande in Bodeneinheit B sind stark verdichtet, in diesem Bereich angelegte Gräber werden in der Regel nur ca. 150 cm tief ausgehoben, so dass der Übergang in die Lehmsande der Grabsohle entspricht.

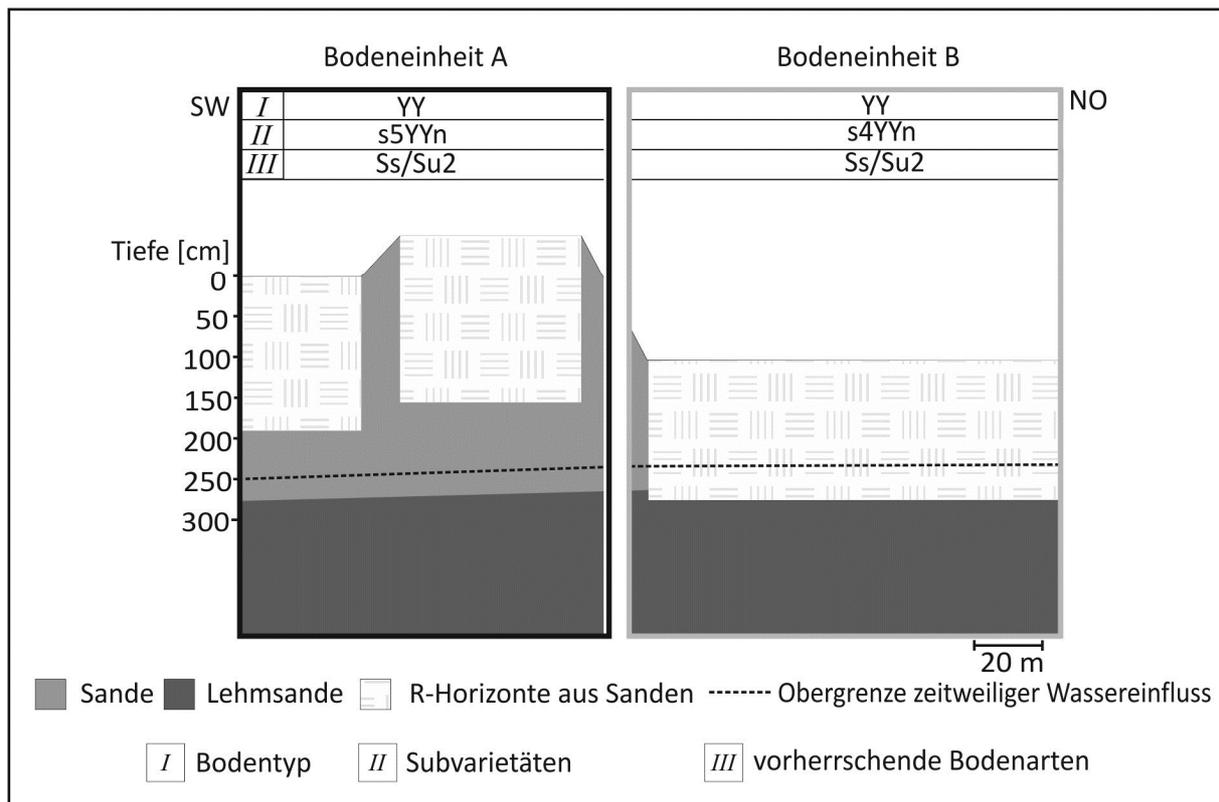


Abb. 27: Friedhof BE2, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen

Bewertung

Die Verwesungsleistung wird in Bodeneinheit A als hoch, in Bodeneinheit B als mittel bewertet Tab. 13. Die Filterleistung ist in Bodeneinheit A sehr gering und in Bodeneinheit B gering.

Tab. 13: Friedhof BE2, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Bodentyp	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung	Flächenanteil [%]
A	s5YYn	Ss/Su2	hoch	sehr gering	30
B	s4YYn	Ss/Su2	mittel	gering	70

4.2.3.2 Bodenchemische Kennwerte

Die Böden in ehemaligen Gräbern an den Standorten BE1 und BE2 sind im Bereich der Ah-Horizonte mittel und im Bereich der Deckschichten schwach humos (Abb. 28). Die Sargbereiche sind an diesen Standorten mittel bis sehr schwach humos und enthalten in einigen Fällen mehr organische Substanz als die Deckschichten. Die Filterschichten sind humusfrei bis sehr schwach humos.

Die Humusqualität der Ah-Horizonte und Deckschichten ist an Standort BE1 gering, an Standort BE2 im Bereich der Aufschüttung (Bodeneinheit A) gering und in Bodeneinheit B mittel.

Die pH-Werte sind in den sandigen Deckschichten (Standort BE1 und BE2, Bodeneinheit A) neutral bis schwach sauer, in Bodeneinheit B des Standortes BE2 sind die Deckschichten bedingt durch die Vermischung von Sanden und kalkhaltigen Lehmsanden neutral bis sehr schwach alkalisch. Die Filterschichten sind an Standort BE1 mäßig bis stark sauer, an Standort BE2 in Bodeneinheit A sehr schwach sauer und in Bodeneinheit B sehr schwach alkalisch.

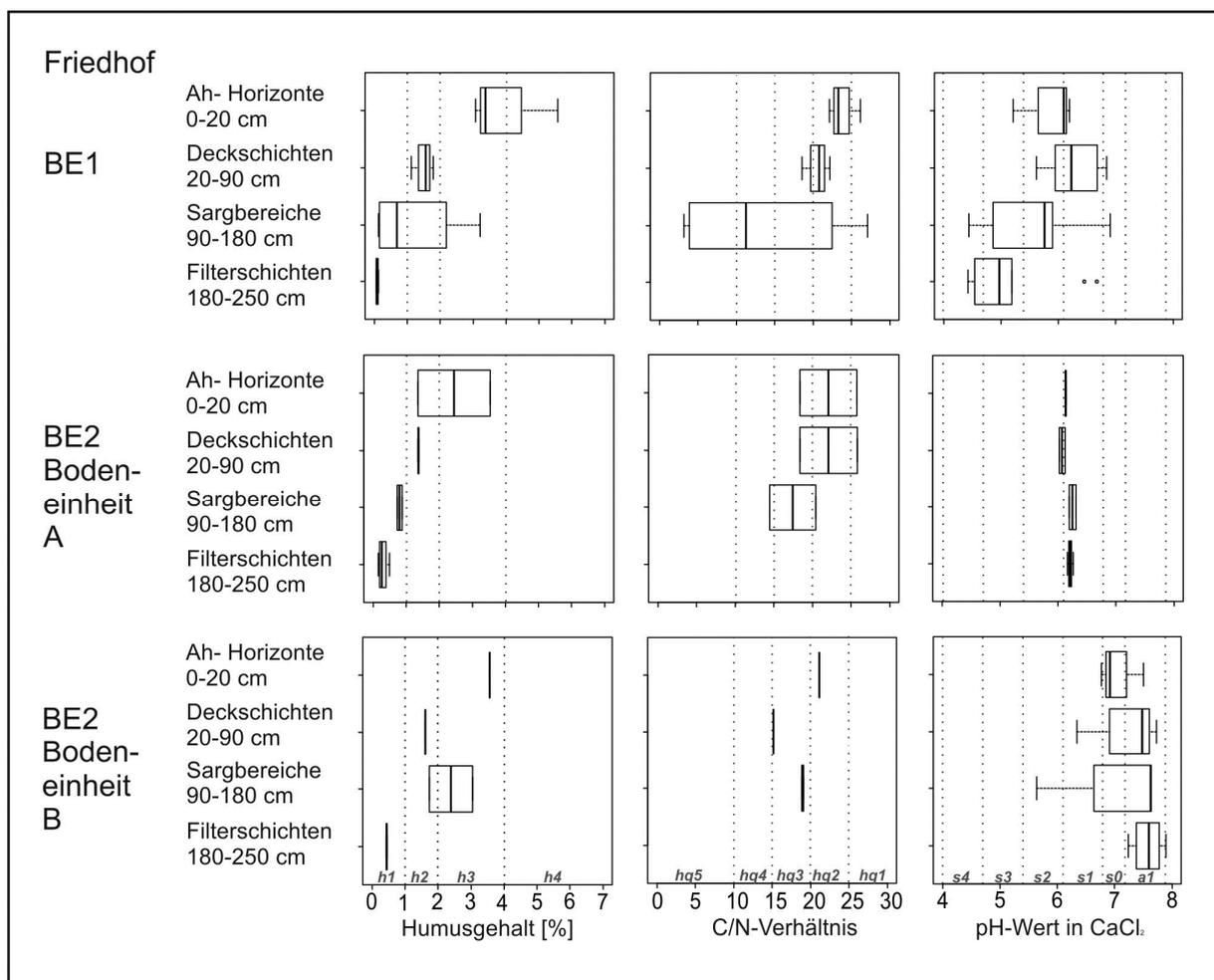


Abb. 28: Friedhöfe BE1 und BE2, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte

4.2.4 Untersuchte Friedhöfe in Nordrhein-Westfalen

Im Bundesland Nordrhein-Westfalen wurden drei Friedhöfe im Stadtgebiet von Köln untersucht.

4.2.4.1 Kartierung und Bewertung

Friedhof NW1

Standortbeschreibung

Der 25 ha große Friedhof NW1 (Abb. 29) liegt auf ca. 790m ü. NN auf Kiesen und Sanden der Rheinterrassen. Der Friedhof wurde 1896 angelegt und in den 1950'er Jahren erweitert. Die Ruhefristen für Erdbestattungen betragen 20 Jahre, die Bestattungstiefe liegt bei 170 cm, bei Tieferlegung bei 260 cm. Der Grundwasserflurabstand beträgt ca. 3 Meter, die Entfernung zum Rheinufer ca. 2000 Meter.

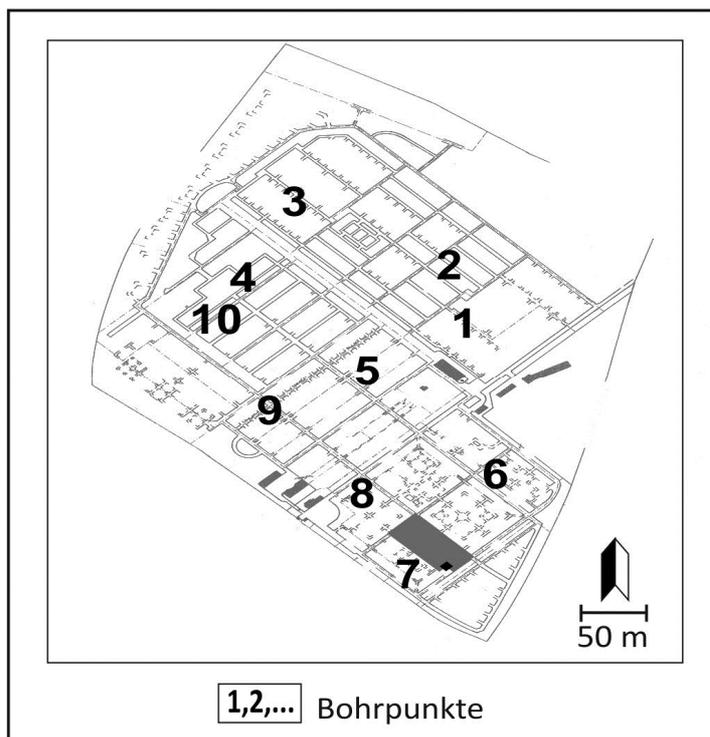


Abb. 29: Friedhof NW1, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Bodenkartierung

Auf dem Friedhof NW1 liegen YN aus Lehmsanden und Sanden vor (Abb. 30). Der nördliche Teil des Friedhofes wurde auf einer ehemaligen Kleingartenkolonie angelegt. Der Oberboden dieser reliktschen Hortisole ist daher in diesem Bereich bis in ca. 80 cm Tiefe humoser als in den anderen Bereichen des Friedhofes.

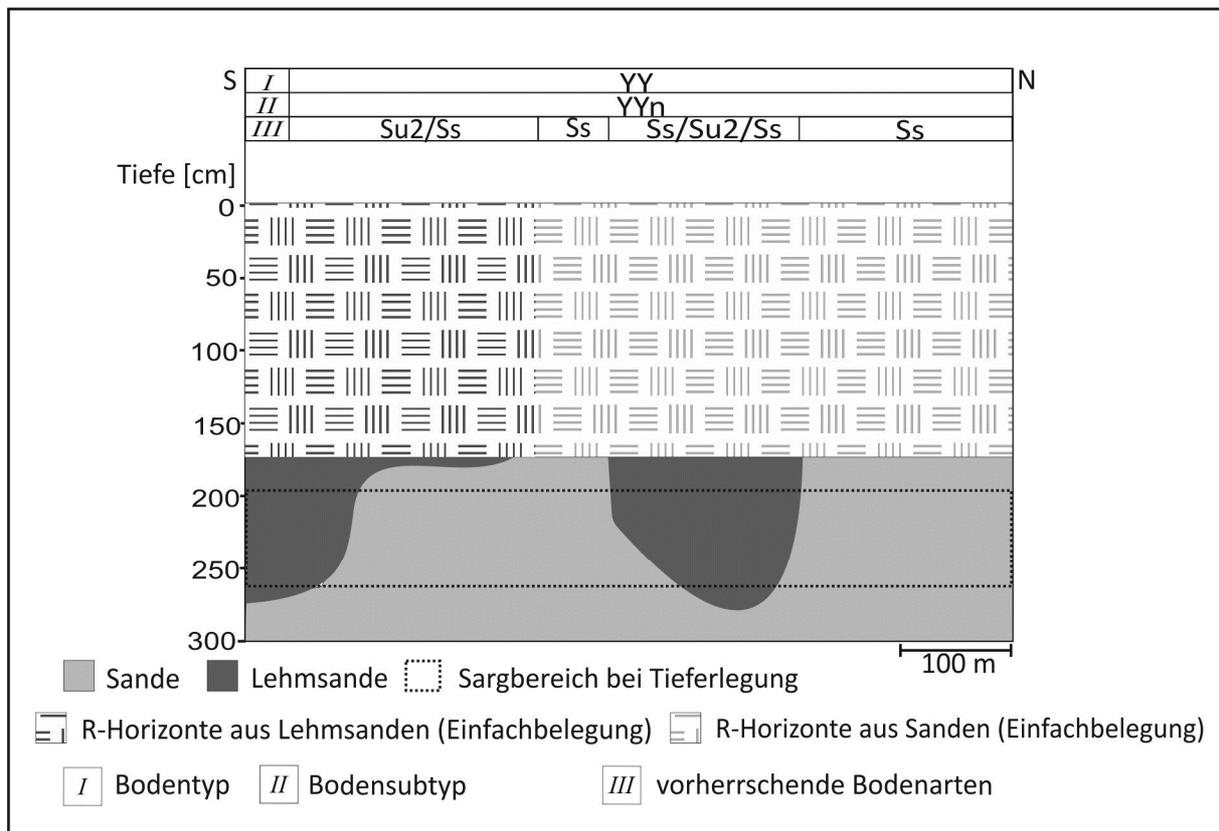


Abb. 30: Friedhof NW1, schematische Catena mit Bodentyp und Texturen

Bewertung

Die Verwesungsleistung dieses Standortes wird als hoch, die Filterleistung aufgrund des grobsandigen Substrates und der bei Annahme eines Grundwasserflurabstandes von 3 Metern zu kurzen Aufenthaltsdauer des Sickerwassers in der Filterschicht schon bei Einfachbelegung als sehr gering bewertet (Tab. 14).

Tab. 14: Friedhof NW1, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Bodentyp	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung*	Flächenanteil [%]
gesamte Fläche	YYn	Ss/Su2	hoch	sehr gering	100

* Bei Einfachbelegung

Friedhof NW2

Standortbeschreibung

Der 47ha große Friedhof NW2 (Abb. 31) liegt auf ca. 790m ü. NN auf Kiesen und Sanden der Rheinterrassen. Der Friedhof wurde 1896 angelegt und nach dem 2. Weltkrieg in nordwestlicher Richtung erweitert. Die Ruhefristen für Erdbestattungen betragen 20 Jahre, die Bestattungstiefe liegt bei 170cm, bei Doppelbelegung bei 260cm. Nach Aussage der Mitarbeiter vor Ort wurden auf dem alten Friedhofsteil und im Nordwesten des neuen Friedhofsteils gelegentlich Verwesungsstörungen festgestellt. Der Grundwasserflurabstand beträgt im Bereich des Friedhofes 3 bis 4 Meter.

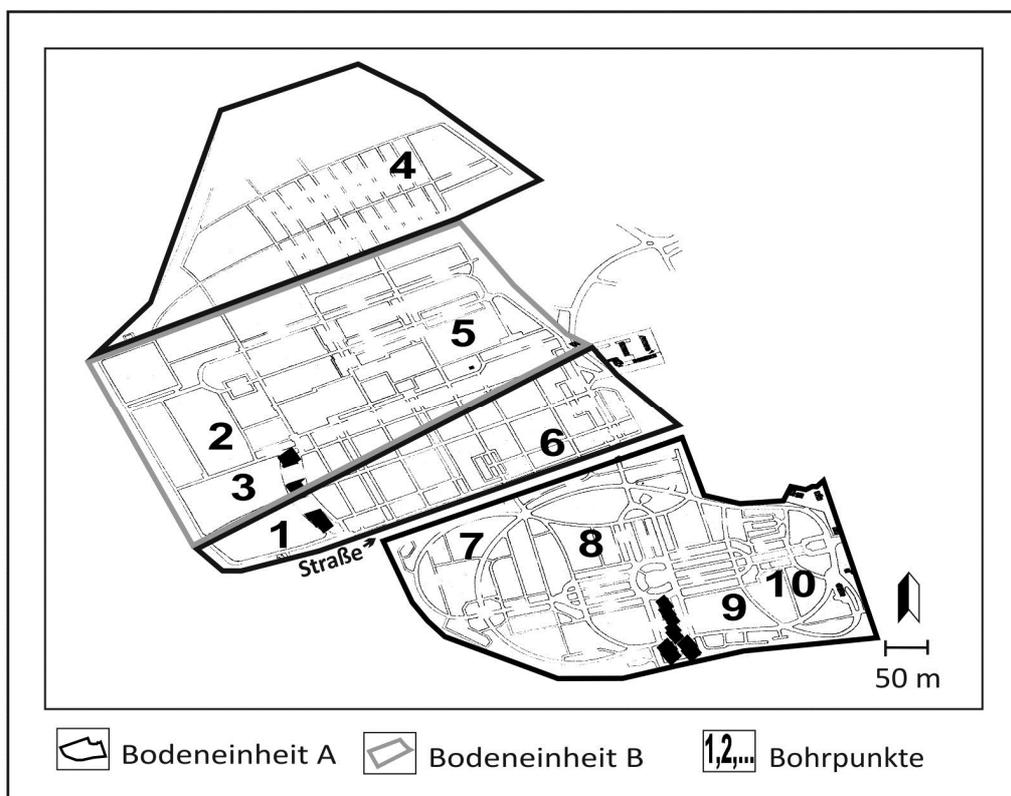


Abb. 31: Friedhof NW2, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Bodenkartierung

Auf dem Friedhof liegen YN aus Lehmsanden und Sanden vor. Aufgrund von bewertungsrelevanten Substratunterschieden wurde der Friedhof zur Bewertung in zwei Einheiten (A und B) geteilt.

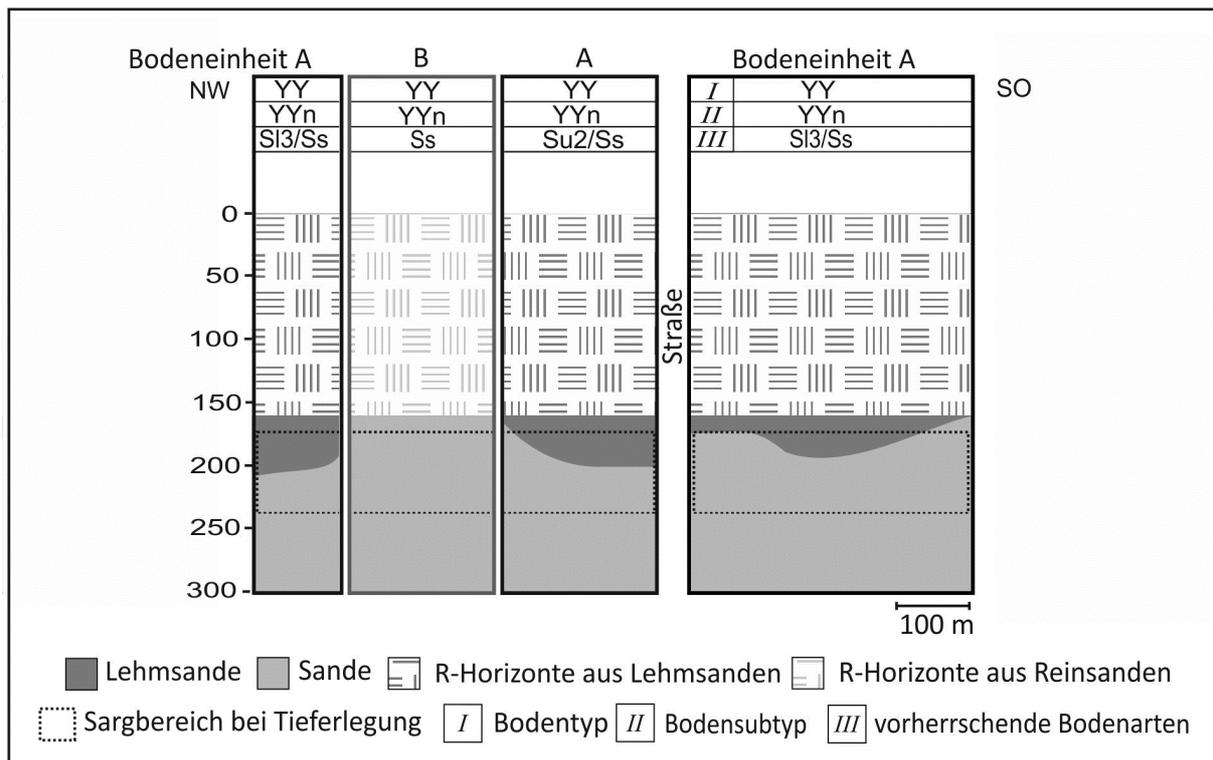


Abb. 32: Friedhof NW2, schematische Catena mit Bodentyp und Texturen

Bewertung

Sowohl in Bodeneinheit A als auch in Bodeneinheit B wird die Verwesungsleistung als hoch bewertet (Tab. 15). Die Filterleistung wird bei Einfachbestattung in Bodeneinheit A, unter der Voraussetzung dass die Lehmsande bei Anlage der Gräber nicht durchbrochen werden, als hoch bewertet. In Bodeneinheit B wird die Filterleistung als gering bewertet. Bei Tieferlegung wird die Filterleistung aufgrund des sandigen Substrates und des dann geringen Abstandes zum Grundwasser als sehr gering bewertet. Die vereinzelt beobachteten Verwesungsstörungen können an diesem Standort nicht anhand der Bodenverhältnisse erklärt werden. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass einzelgrabsspezifische Einflüsse wie Bekleidung und Gewicht des Leichnams, Sargmaterial und/oder Sargauskleidung zu den Verwesungsstörungen führten.

Tab. 15: Friedhof NW2, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Bodentyp	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung*	Flächenanteil [%]
A	YYn	Sl3/Ss	hoch	hoch	70
B	YYn	Ss	hoch	gering	30

*bei Einfachbelegung

Friedhof NW3

Standortbeschreibung

Der ca. 58 umfassende Friedhof NW3 (Abb. 33) liegt auf ca. 790 m ü. NN auf Terrassenschottern des Rheins. Der Friedhof wurde 1946 angelegt, und bis heute wird nur ein geringer Anteil der Friedhofsfläche für Beisetzungen genutzt. Zwischen den verstreuten Grabfeldern liegt kaum bewirtschafteter Nadelwald. Die Ruhefristen für Erdbestattungen betragen 20 Jahre, die Bestattungstiefe liegt bei 170cm, bei Doppelbelegung bei 260cm.

Der Grundwasserflurabstand beträgt über 4 Meter.

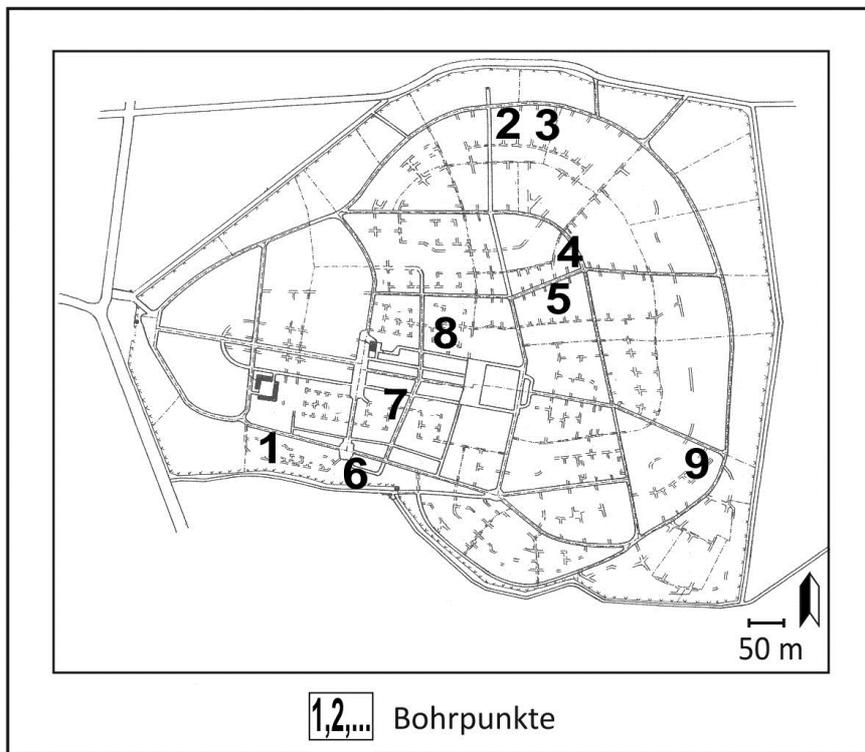


Abb. 33: Friedhof NW3, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Bodenkartierung

Der Boden des Friedhofes NW3 besteht aus Reinsanden (Abb. 34). Bereits im ersten Meter steht Terrassenschotter aus dem Rhein an. Der Sargbereich liegt meist im Terrassenschotter. Der Bodentyp in den Grabfeldern ist ein YYn.

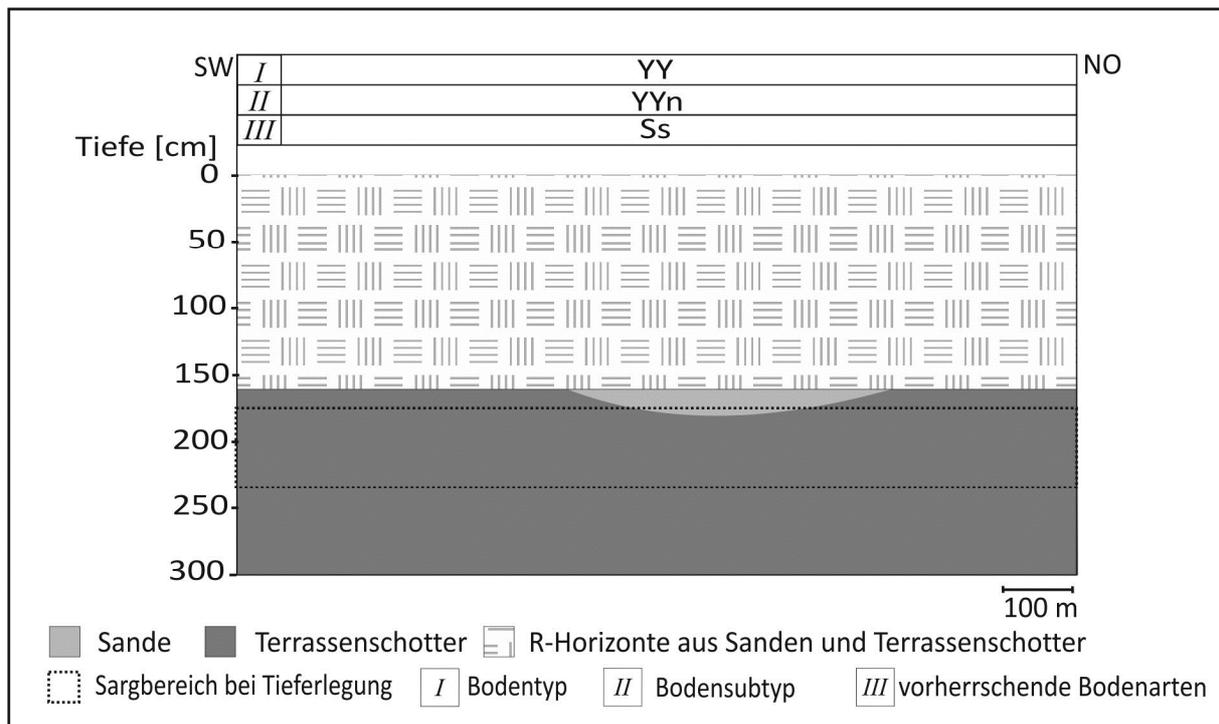


Abb. 34: Friedhof NW3, schematische Catena mit Bodentyp und Textur

Bewertung

Die Verwesungsleistung des Standortes wird als hoch, die Filterleistung aufgrund des sehr grobkörnigen Substrates als sehr gering bewertet (Tab. 16).

Tab. 16: Friedhof NW3, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Bodentyp	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung	Flächenanteil [%]
Grabfelder	YYn	Ss	hoch	sehr gering	100

4.2.4.2 Bodenchemische Kennwerte

An den Standorten NW1-3 sind die Ah-Horizonte in ehemaligen Gräbern mittel bis stark, die Deckschichten mittel bis schwach und die Sargbereiche sowie die Filterschichten sehr schwach humos bis humusfrei (Abb. 35).

Die Humusqualität der Deckschichten ist gering bis mittel, an Standort NW1 gering bis hoch.

Die Bodenreaktion ist an Standort NW1 und NW2 im neutralen bis schwach alkalischen Bereich, am Standort NW3 in den Deckschichten mäßig bis stark, in Sargbereichen und Filterschichten stark sauer.

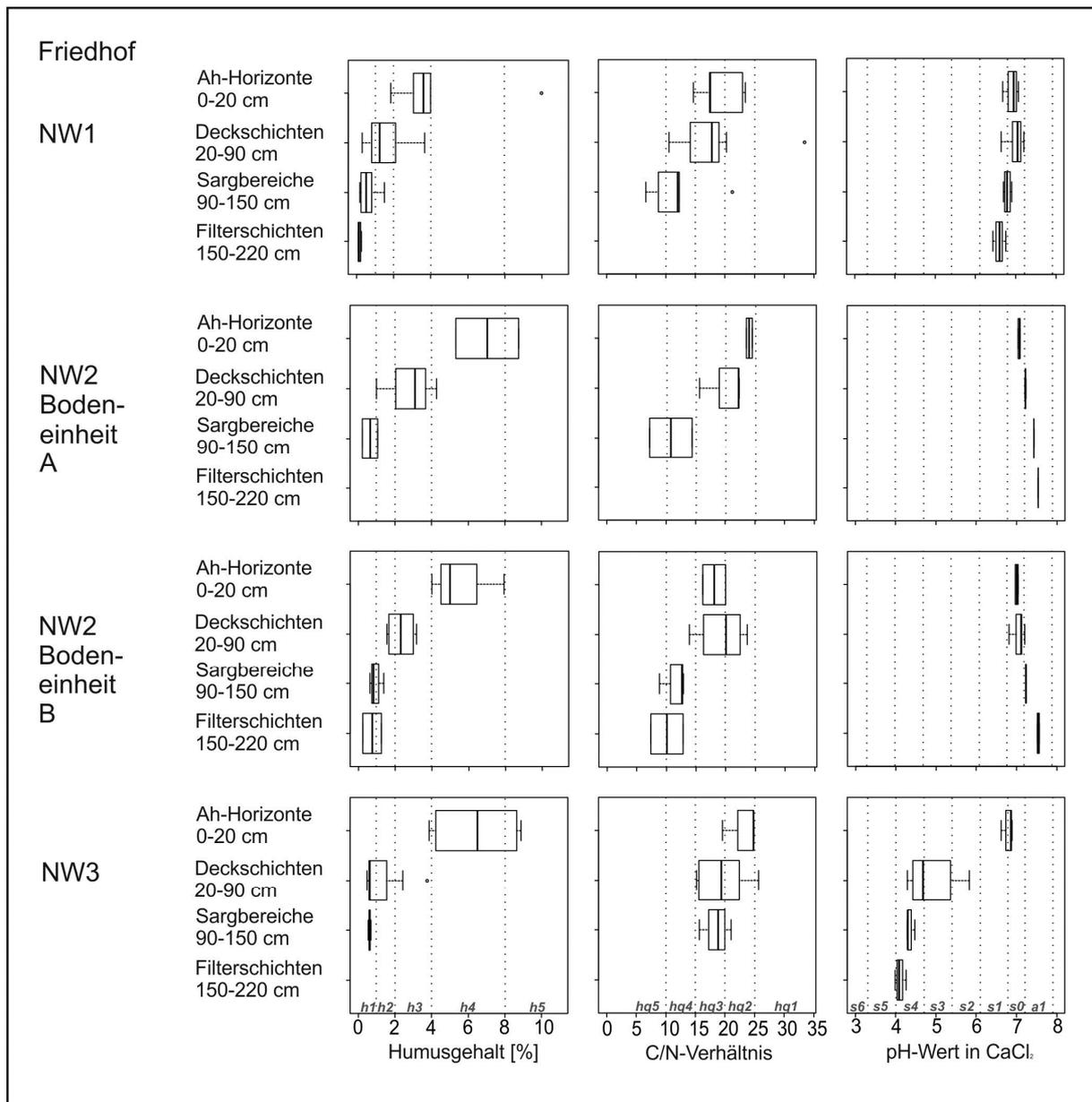


Abb. 35: Friedhöfe NW1, NW2 und NW3, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte

4.2.5 Untersuchte Friedhöfe in Rheinland-Pfalz

Im Bundesland Rheinland-Pfalz wurden zwei Friedhöfe untersucht.

4.2.5.1 Kartierung und Bewertung

Friedhof RP1

Standortbeschreibung

Der 0,8ha große Friedhof RP1 (Abb. 36) liegt in der Bodengroßlandschaft der Lösslandschaften des Berglandes auf ca. 250 m ü. NN östlich des Rheins. Der Friedhof wurde 1964 angelegt. Die Ruhefristen für Erdbestattungen betragen 30 Jahre, die Bestattungstiefe liegt bei 160 cm, bei Doppelbelegung 240 cm. Auf dem Friedhof wurde nach Ablauf einer Ruhefrist von 20 Jahren unvollständige Verwesung beobachtet, deshalb wurde die Ruhefrist auf 30 Jahre verlängert. Bei allen im Rahmen dieser Kartierung untersuchten Erdgräbern handelt es sich um Erstbestattungen.

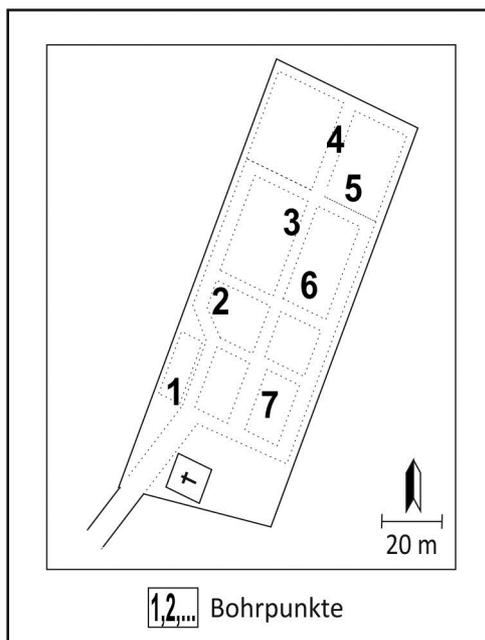


Abb. 36: Friedhof RP1, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Bodenkartierung

Der Boden des Standortes RP1 besteht überwiegend aus Lösslehm (Abb. 37). In der südwestlichen Hälfte der Fläche liegen Schluffssande vor, die in einer Mächtigkeit von ca. 50 cm Tonschluffe und Lehmschluffe überlagern, im mittleren Bereich fehlt die Überlagerung mit Schluffssanden und im nordöstlichen Ende stehen die Lehmschluffe bis an die Bodenoberfläche an. Da der Bodentyp

durchgängig ein YYn ist und keine für die Bewertung relevanten Unterschiede in der Textur vorliegen, wurde keine weitere Unterteilung des Friedhofes in Bodeneinheiten vorgenommen.

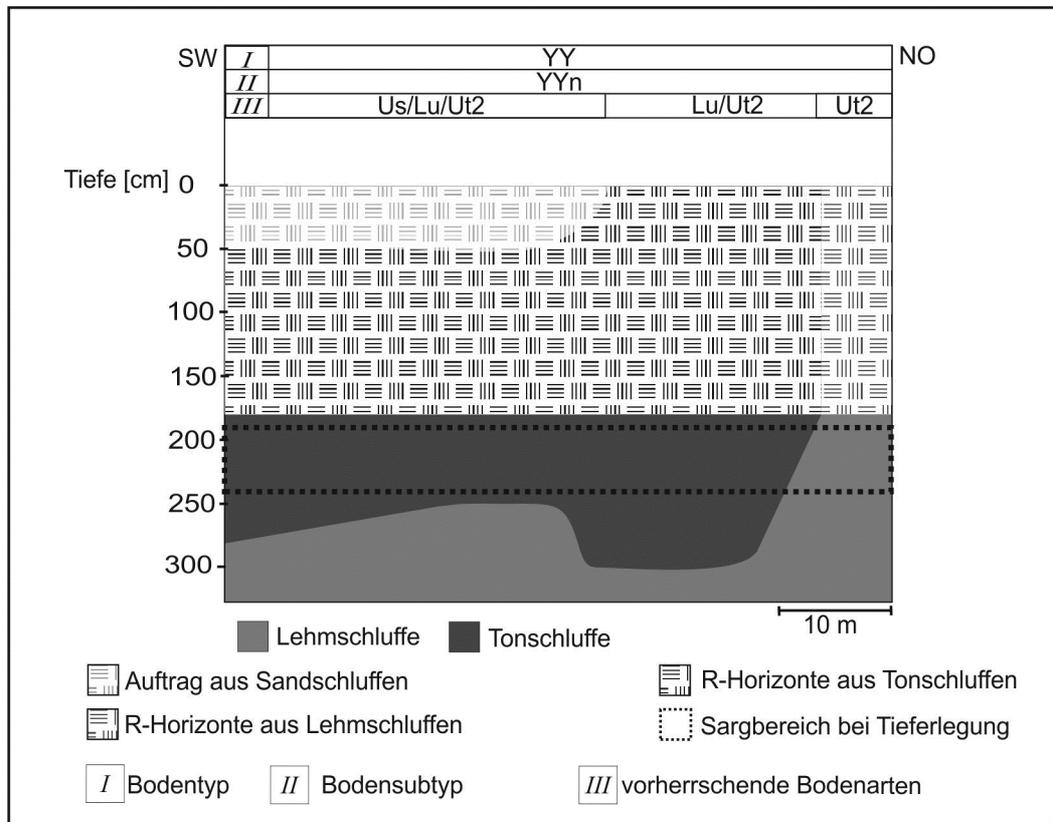


Abb. 37: Friedhof RP1, schematische Catena mit Bodentyp und Texturen

Bewertung

Die Verwesungsleistung dieses Standortes wird als mittel, die Filterleistung als hoch bewertet (Tab. 17). Die relativ geringe LK der Tonschluffe, die in den Deckschichten der meisten Gräber (außer Bohrpunkt 4) vorgefunden wurden, mindert an diesem Standort die Verwesungsleistung.

Tab. 17: Friedhof RP1, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Bodentyp	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung	Flächenanteil [%]
Gesamtfläche	YYn	Us/Lu/Ut2	mittel	hoch	100

Friedhof RP2

Standortbeschreibung

Der ca. 0,2 ha umfassende Friedhof RP2 (Abb. 38) liegt in der Bodenregion der Berg- und Hügelländer an einem nordexponierten Hang aus Fließerden über Tonstein (Rotliegend) auf ca. 300m ü. NN. Der Friedhof wurde Ende des 19. Jahrhunderts angelegt. Die Ruhefrist für Erdbestattungen beträgt seit 2000 30 Jahre, davor betrug sie 40 Jahre. Die Bestattungstiefe liegt bei 160 cm. Es gibt eine noch unbelegte Erweiterungsfläche (Bodeneinheit B), die sich leicht erhöht im Osten an das Friedhofsgelände anschließt. Auf dem Friedhof treten bedingt durch das Volllaufen der Gräber mit Wasser Verwesungsstörungen auf.

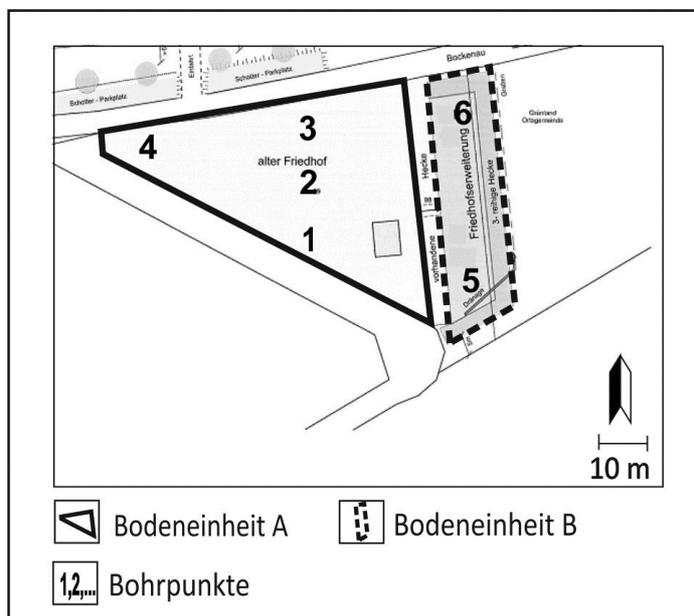


Abb. 38: Friedhof RP2, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Bodenkartierung

Sowohl der Friedhofsbereich (Bodeneinheit A) als auch die Erweiterungsfläche (Bodeneinheit B) bestehen aus Tonschluffen, die von einer bis zu 1,5 Meter mächtigen Solifluktuionsdecke aus Normallehmen überlagert sind (Abb. 39). Im Friedhofsbereich liegen in abgelaufenen Gräbern YY-SS vor. In der Erweiterungsfläche liegen am Oberhang s2BBn und am Unterhang SS-BB vor. Auf eine Unterteilung der Bodeneinheiten nach dem Bodensubtyp, beziehungsweise der Subvarietät wurde in diesem Fall verzichtet, da die leicht unterschiedliche Ausprägung des Stauwassereinflusses in diesem Fall für die Bewertung von Verwesungs- und Filterleistung unerheblich ist. Der im Vergleich zur Erweiterungsfläche (Bodeneinheit B) am Oberhang stärkere Stauwassereinfluss in Bodeneinheit A wird zum einen durch ein Volllaufen der Gräber hervorgerufen, zum anderen liegt der

Friedhofsbereich etwas tiefer als die angrenzende Erweiterungsfläche wird von dieser zusätzlich mit lateral abfließendem Wasser versorgt.

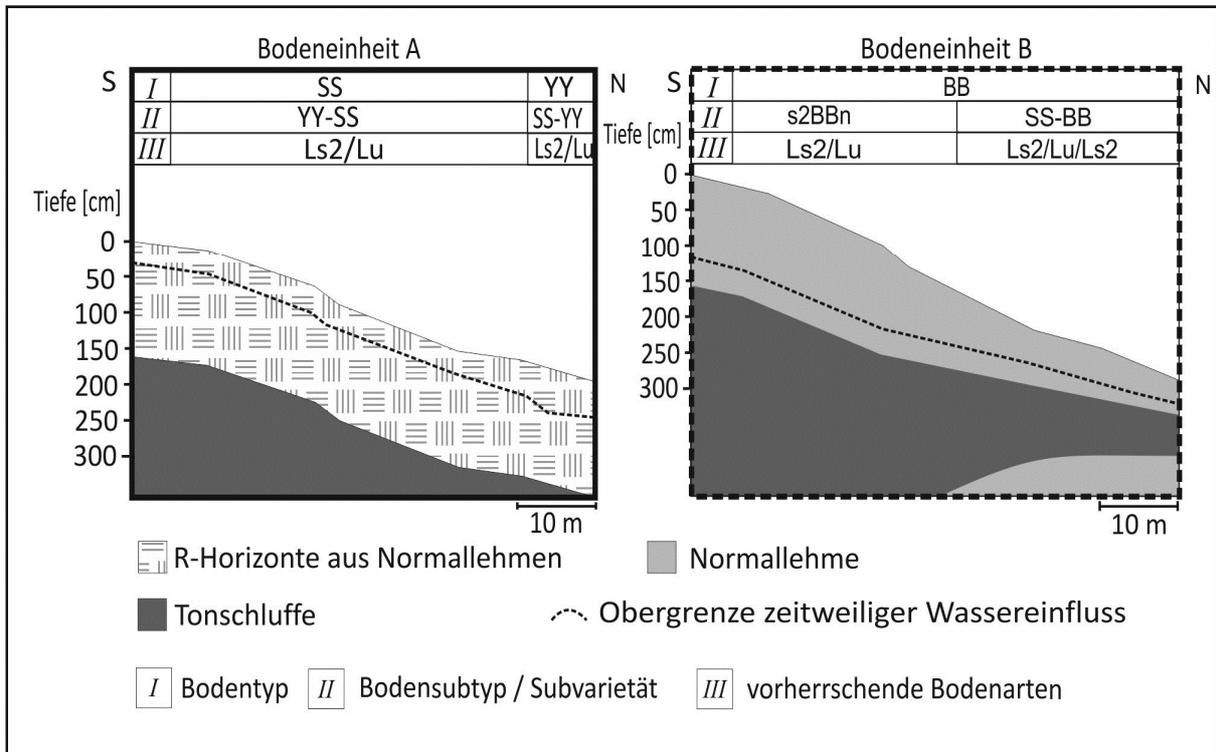


Abb. 39: Friedhof RP2, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen

Bewertung

An diesem Standort wird sowohl auf dem Friedhofsgelände als auch auf der Erweiterungsfläche die Verwesungsleistung als gering und die Filterleistung anhand der Bodenart zunächst als hoch bewertet, dann aber aufgrund der Hanglage um eine Klasse herabgestuft (Tab. 18).

Tab. 18: Friedhof RP2, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Typ	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung	Flächenanteil [%]
A	YY-SS		gering	mittel*	70
B	s2BBn, SS-BB		gering	mittel*	30

* Zuschlag vom +1 aufgrund der Hangneigung

4.2.5.2 Bodenchemische Kennwerte

An den Standorten RP1 und RP2 sind in ehemaligen Gräbern die Ah-Horizonte mittel, die Deckschichten mittel bis schwach, die Sargbereiche schwach bis sehr schwach und die Filterschichten sehr schwach humos. Die noch unbelegte Erweiterungsfläche an Standort RP 2 ist im Unterschied zum Friedhof im Sargbereich nur sehr schwach humos (Abb. 40).

Die Humusqualität der oberen 20 cm (Ah) ist an den Standorten RP1 und RP2 in abgelaufenen Gräbern deutlich schlechter als auf der noch unbelegten Erweiterungsfläche an Standort RP2, was auf die Vermischung mit torfhaltiger Blumenerde zurückzuführen ist. In den Deckschichten der Gräber und in 20-90 cm Tiefe der Erweiterungsfläche ist die Humusqualität hoch bis sehr hoch.

Die Bodenreaktion ist an Standort RP1 neutral bis sehr schwach alkalisch. An Standort RP2 sind die pH-Werte im Friedhofsbereich schwach bis sehr schwach sauer und somit um ein bis zwei Klassen höher als in der Erweiterungsfläche.

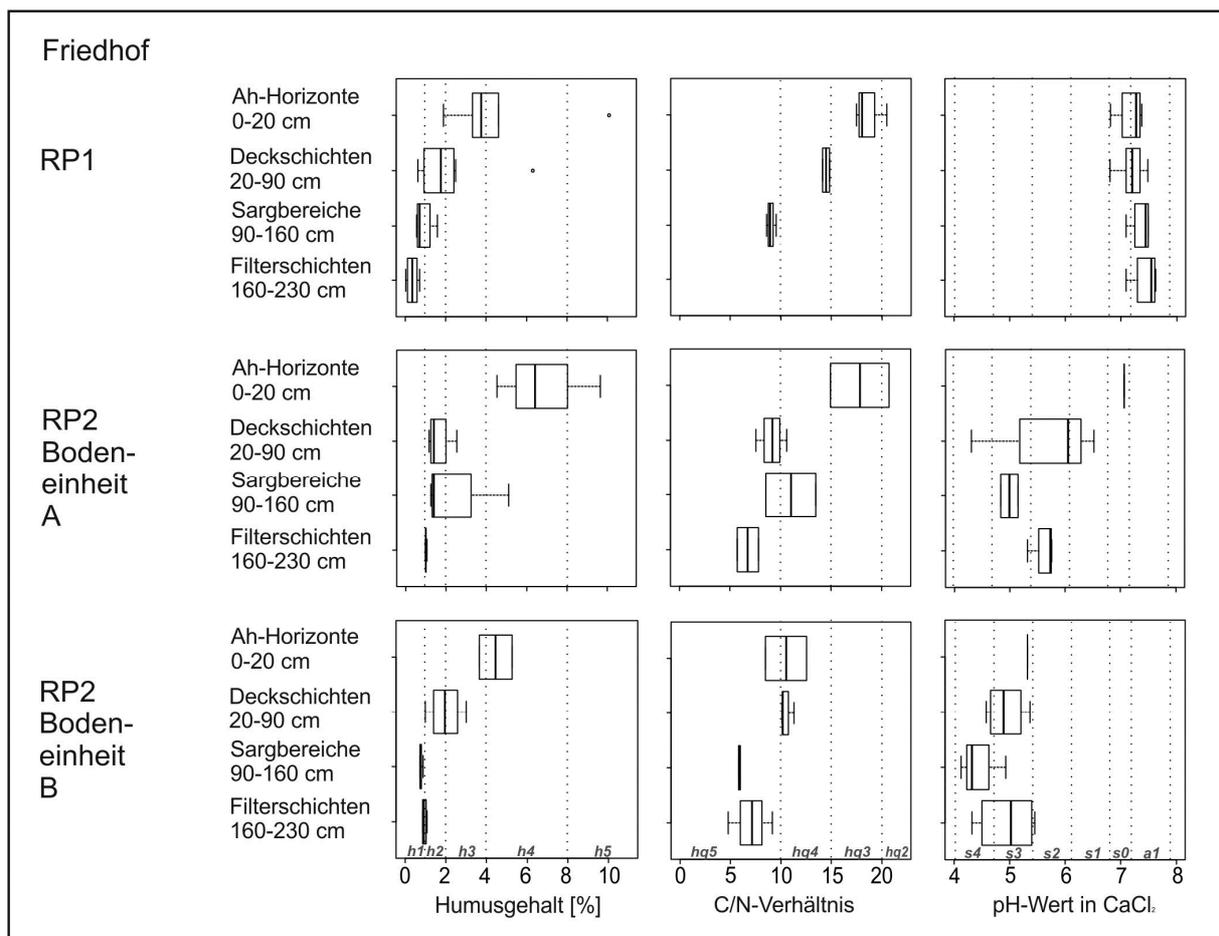


Abb. 40: Friedhöfe RP1 und RP2, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte

4.2.6 Untersuchte Friedhöfe in Bayern

Im Freistaat Bayern wurden drei Friedhöfe in Oberfranken untersucht.

4.2.6.1 Kartierung und Bewertung

Friedhof BY1

Standortbeschreibung

Der ca. 2,6ha große Friedhof BY1 (Abb. 41) liegt auf 306m ü. NN an einem südwestexponierten Hang aus mittlerem Burgsandstein am Main. Er ist in einen alten, eine flache Terrasse bildenden Teil und einen neueren Teil in Hanglage unterteilt. Die beiden Friedhofsgebiete sind durch eine ca. 2 Meter hohe Böschung voneinander getrennt. Der Friedhof wurde im 17. Jahrhundert angelegt. Die Ruhefristen liegen bei 20 Jahren, die Bestattungstiefe zwischen 140 und 190cm. Auf dem Friedhof treten im Hangbereich Verwesungsstörungen auf (mündl. Mitteil. d. Friedhofsmitarbeiter).

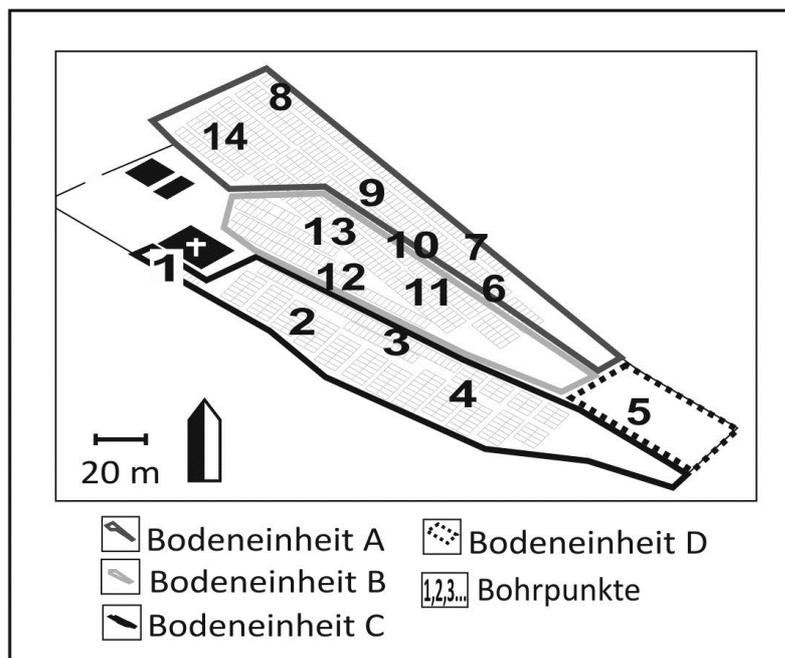


Abb. 41: Friedhof BY1, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Bodenkartierung

Der Friedhof BY1 wurde in vier Bodeneinheiten unterteilt (Abb. 42). Im nordöstlichen Teil des Friedhofes liegt eine Schichtung von Normallehmen über Lehmtönen vor. Die Normallehmen haben eine Mächtigkeit von 50 bis 145cm und sind mit wasserführenden Schichten aus Sandlehmen durchsetzt. Durch die Anlage von Gräbern, die bis in die Lehmtöne gegraben werden

(Bestattungstiefe bei dritter Belegung: 190 cm), entstehen Senken sowohl für Sickerwasser aus Niederschlägen und Gießwassergaben als auch für aus dem Oberhang lateral zutretendes Hangwasser/Schichtwasser. Diese Faktoren führen in Bodeneinheit B zu Stauwasservorkommen bis in die Deckschichten der Gräber. Bei Wiederbelegung von Grabstellen in diesem Bereich wurden mehrfach Wachsleichen aufgefunden, bei Beisetzungen muss Wasserhaltung betrieben werden. Im alten Friedhofsteil ermöglicht der durchlässigere Unterboden das Abfließen von Wasser. Hier treten keine Probleme auf. Bei Bodeneinheit D handelt es sich um eine noch unbelegte Erweiterungsfläche, der Bodentyp ist hier eine BBn aus Lehmsanden.

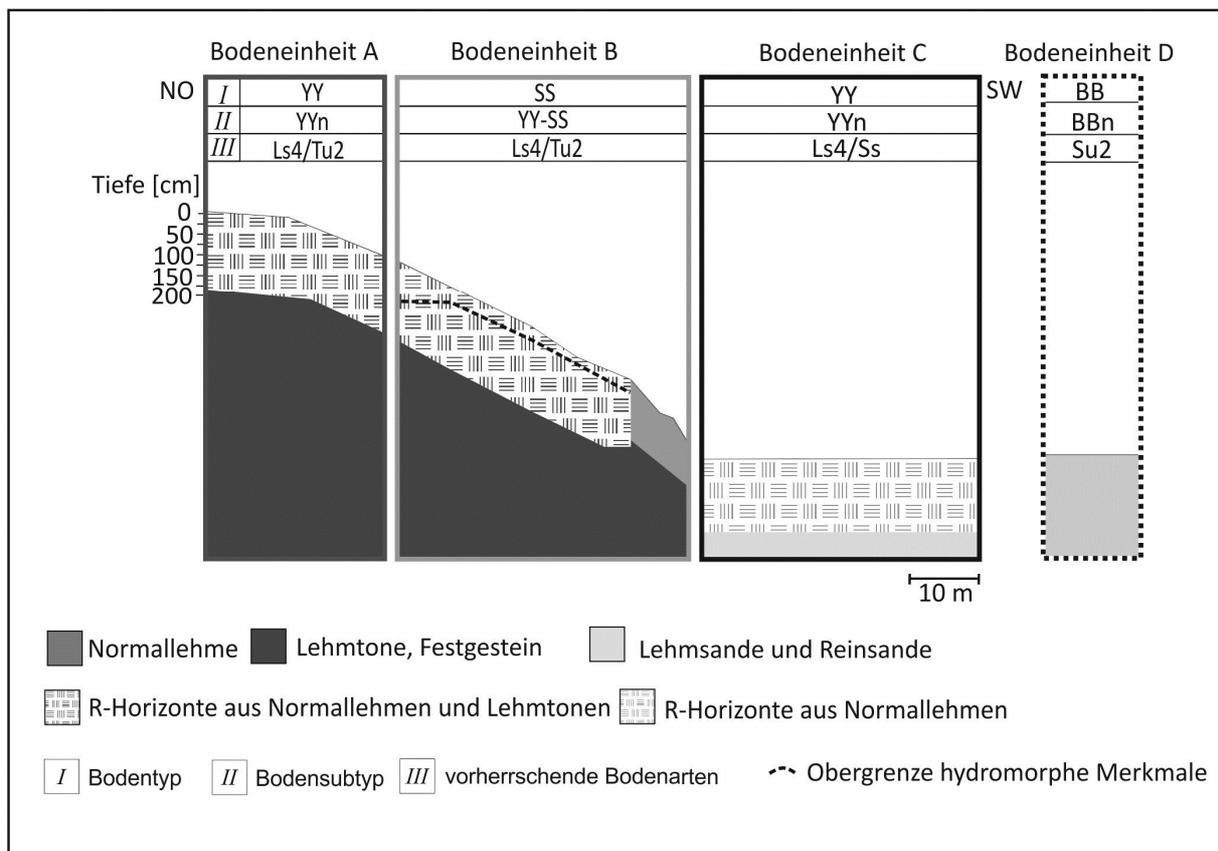


Abb. 42: Friedhof BY1, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen

Bewertung

Die Verwesungsleistung wird in den Bodeneinheiten A und C als mittel, in Bodeneinheit B als gering und in Bodeneinheit D als hoch bewertet (Tab. 19). Die Filterleistung ist in Bodeneinheit C und D gering, in Bodeneinheit A und B wird sie zunächst als sehr hoch eingestuft, aufgrund der Hanglage und des Stauwassereinflusses in Bodeneinheit B kann die tatsächliche Filterwirkung jedoch geringer ausfallen und die Filterleistung wird hier deshalb um eine Klasse herabgestuft.

Tab. 19: Friedhof BY1, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Bodentyp	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung	Flächenanteil [%]
A	YYn	Ls4/Tu2	mittel	hoch	30
B	YY-SS	Ls4/Tu2	gering	mittel*	25
C	YYn	Ls4/Ss	mittel	gering	35
D	BBn	Su2	hoch	gering	10

* Zuschlag vom +1 aufgrund der Hangneigung

Friedhof BY2

Standortbeschreibung

Der ca. 0,9ha große Friedhof BY2 (Abb. 43) liegt auf 300m ü. NN in der Fränkischen Schweiz. Er gliedert sich in einen Hangbereich und eine ebene Fläche. Der Friedhof wurde 1933 angelegt und bis 1985 insgesamt drei Mal erweitert. Die Ruhefrist für Erdgräber beträgt 30 Jahre, die Bestattungstiefe liegt bei 180 cm. Auf dem Friedhof treten im Hangbereich Verwesungsstörungen auf.

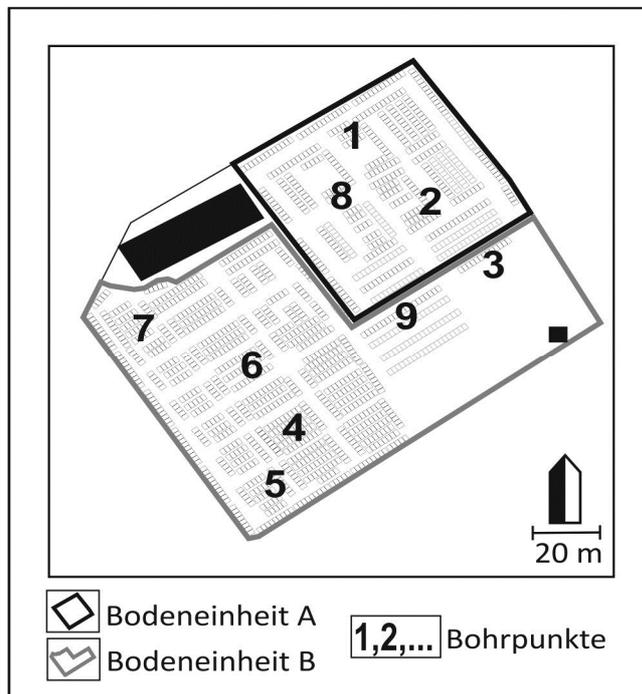


Abb. 43: Friedhof BY2, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Bodenkartierung

Der Friedhof BY2 wurde in zwei Bodeneinheiten unterteilt (Abb. 44). Die Bodeneinheit A (Hanglage) zeigt vor allem im oberen Teil starken Wassereinfluss im Sargbereich, ab 150 cm Tiefe wurden

ausgeprägte Reduktionsmerkmale vorgefunden. Das Wasser stammt von Quellen im Oberhang außerhalb des Friedhofes und ist somit trotz der Hanglage als Grundwasser anzusehen. Der Bodentyp ist ein GG-YY.

Der flach gelegenen Friedhofsteil (Bodeneinheit B) besteht aus Lehmsanden. Der Bodentyp ist ein g2YYn.

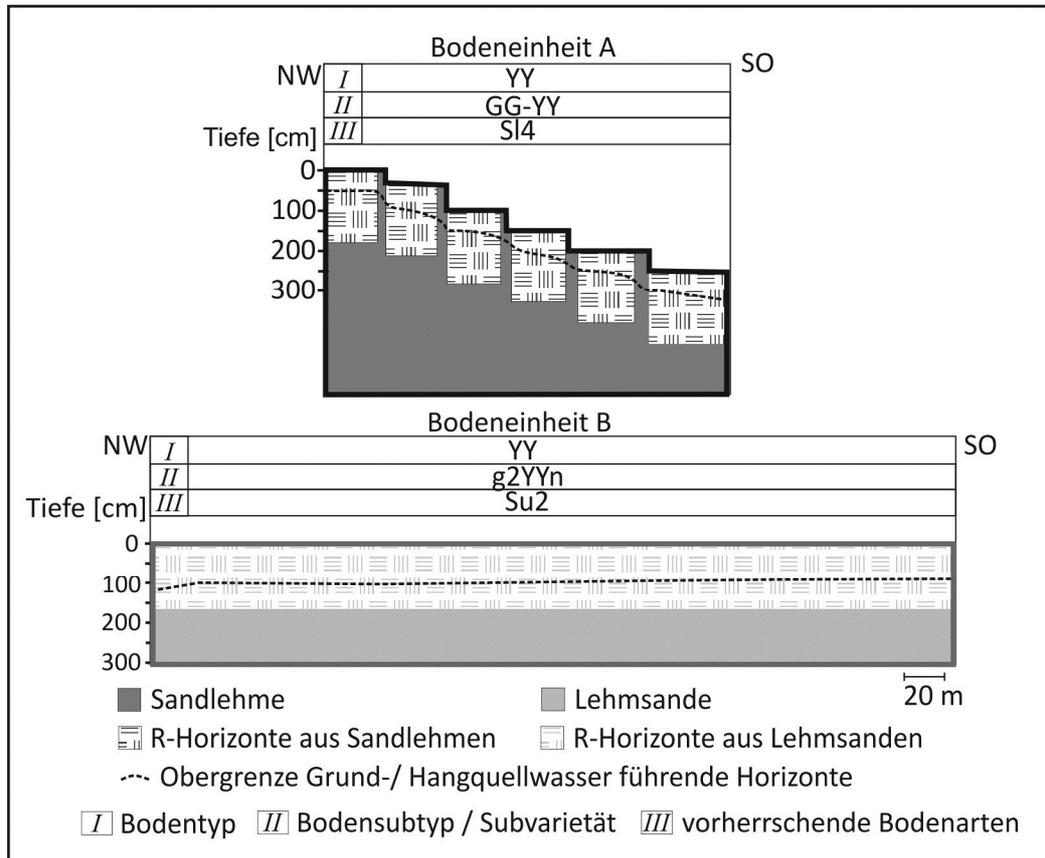


Abb. 44: Friedhof BY2, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen

Bewertung

Die Verwesungsleistung wird aufgrund des Wassereinflusses im Sargbereich in beiden Bodeneinheiten als gering bewertet (Tab. 20). Die Filterleistung wird, bedingt durch den Grundwassereinfluss, als sehr gering bewertet.

Tab. 20: Friedhof BY2, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Bodentyp	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung	Flächenanteil [%]
A	GG-YY	SI4	gering	sehr gering	30
B	g2YYn	Su2	gering	sehr gering	70

Friedhof BY3

Standortbeschreibung

Der 0,3ha große Friedhof BY3 (Abb. 45) liegt am Ufer des Mains zwischen Spessart und Odenwald auf 128 m ü. NN. An den nordwestlichen Rand des Friedhofes grenzt ein Wasserlauf, der bis zu seiner Einfassung mit Beton für hoch anstehendes Grundwasser auf dem Friedhof verantwortlich war. Seitdem der Wasserlauf einbetoniert ist, ist auf dem Friedhof in den oberen 3 Metern kein Grundwassereinfluss mehr vorhanden. Der Friedhof wurde ca. 1860 angelegt. Die Ruhefrist für Erdgräber beträgt 30 Jahre, die Bestattungstiefe liegt bei 140-180cm.

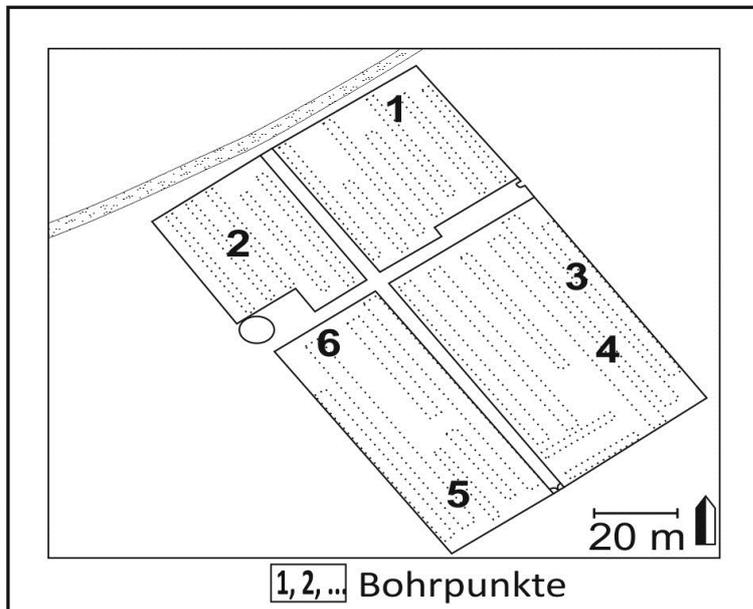


Abb. 45: Friedhof BY3, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Bodenkartierung

Der Boden des Friedhofes BY3 besteht aus Sandlehmen über grobsandigen Verwitterungsprodukten des unteren Buntsandsteins (Abb. 46). Diese Schichtung stimmt Großteils mit der Mächtigkeit der R-Horizonte von 140 cm überein. Trotz der sehr durchlässigen Bodenart kommt es hier zu Stauwasservorkommen im Bereich der Deckschicht und der Verwesungszone. Der Grund hierfür ist wahrscheinlich eine Kapillarsperre zwischen den sehr feinkörnigen Sandlehmen (fluviale Sedimente aus dem Main mit hohen Feinsandanteilen in der Sandfraktion) und dem darunter anstehenden überwiegend mittel- bis grobsandigen Substrat. Bodentyp ist SS-YY und s2YYn.

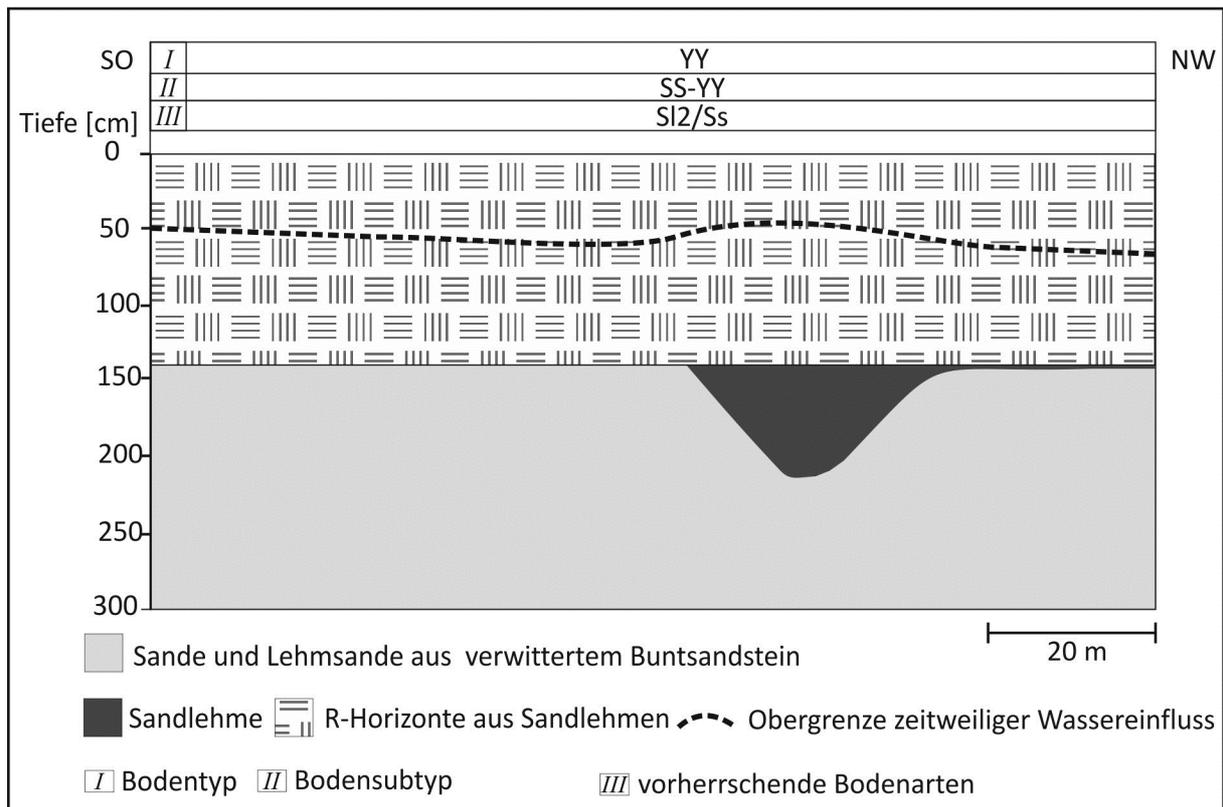


Abb. 46: Friedhof BY3, schematische Catena mit Bodentyp und Texturen

Bewertung

Aufgrund des starken Stauwassereinflusses wird die Verwesungsleistung dieses Friedhofes als gering bewertet. Die Filterleistung unterhalb der Grabsohlen ist sehr gering (Tab. 21).

Tab. 21: Friedhof BY3, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Bodentyp	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung	Flächenanteil [%]
gesamte Fläche	SS-YY	S12/Ss	gering	sehr gering	100

4.2.6.2 Bodenchemische Kennwerte

Auf dem Friedhof BY1 (Abb. 47) in Bodeneinheit B sind die Ah-Horizonte schwach und die Deckschichten sehr schwach humos. In Bodeneinheit C, dem älteren Friedhofsbereich sind die Ah-Horizonte stark und die Deckschichten schwach humos. Die noch unbelegte Bodeneinheit D am Standort BY1 ist im Bereich des Ah-Horizontes mittel, darunter sehr schwach humos. Die Sargbereiche und Filterschichten sind in Bodeneinheit A, B und C sehr schwach humos.

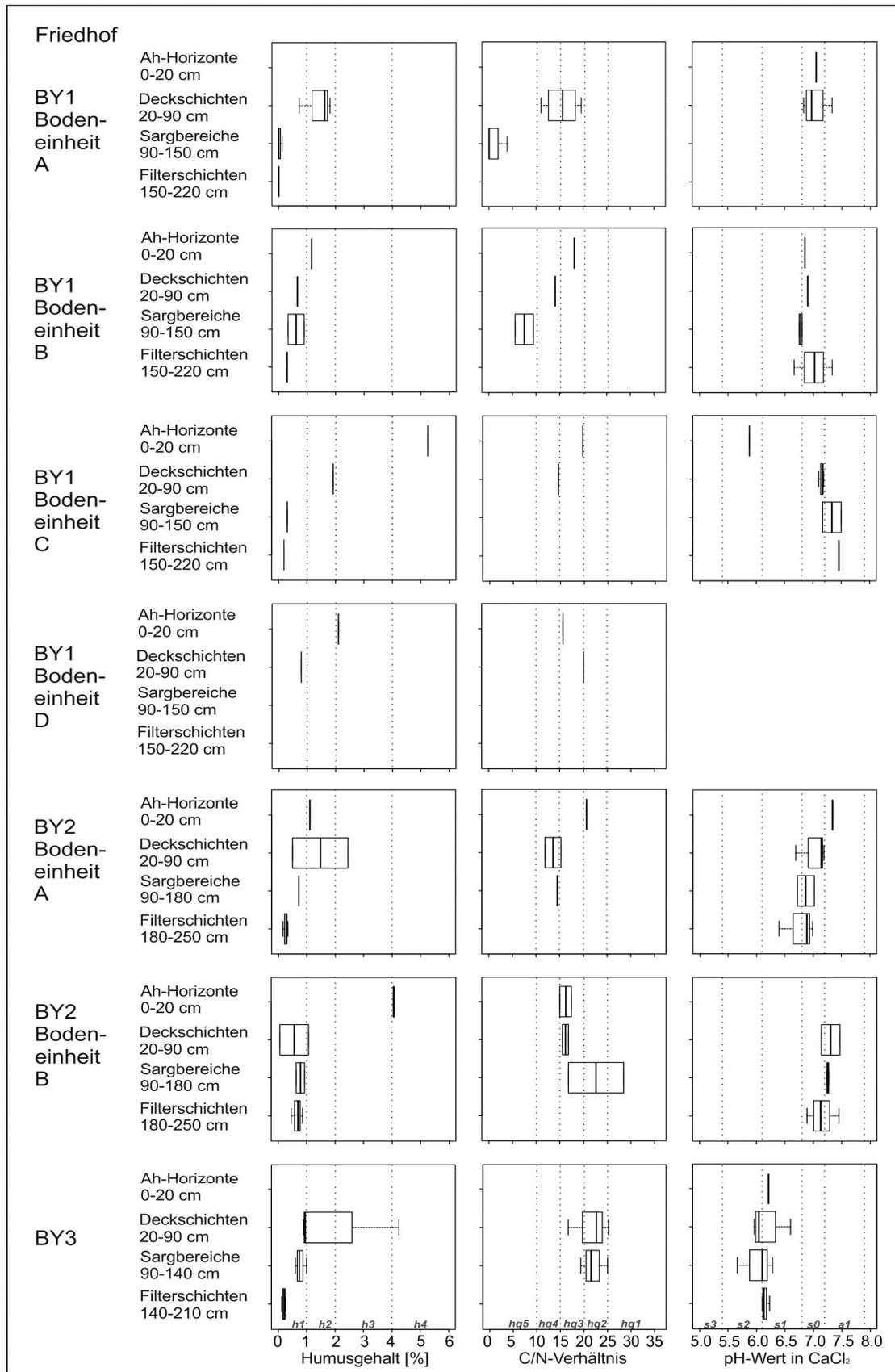


Abb. 47: Friedhöfe BY1, BY2 und BY3, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte

Auf dem Friedhof BY2 sind die Ah-Horizonte in Bodeneinheit A schwach und in Bodeneinheit B stark humos, während die Deckschichten in Bodeneinheit A sehr schwach bis mittel und in Bodeneinheit B sehr schwach humos sind. Die Sargbereiche und Filterschichten sind in beiden Bodeneinheiten sehr schwach humos.

Auf dem Friedhof BY3 sind die Deckschichten schwach bis mittel humos, die Sargbereiche und Filterschichten sehr schwach humos.

Die Humusqualität der Ah-Horizonte und Deckschichten ist auf dem Friedhof BY1 mittel, auf dem Friedhof BY2 mittel bis hoch und auf dem Friedhof BY3 gering. Die Humusqualität in der Tiefe 20-90 cm (Deckschicht) ist auf der Erweiterungsfläche des Friedhofes BY1 besser als in den Deckschichten der Gräber.

Die pH-Werte liegen an den Standorten BY1 und BY2 im neutralen Bereich, am Standort BY3 ist die Bodenreaktion sehr schwach bis schwach sauer.

4.2.7 Untersuchte Friedhöfe in Baden-Württemberg

Im Bundesland Baden-Württemberg wurden drei Friedhöfe untersucht.

4.2.7.1. Kartierung und Bewertung

Friedhof BW1

Standortbeschreibung

Der ca. 0,4 ha umfassende Friedhof BW1 (Abb. 48) liegt auf 328 m ü. NN im Verbreitungsgebiet des mittleren Buntsandsteins westlich der Nagold an einem südostexponierten sechsfach terrassierten Hang aus Fließerden über Buntsandstein. Der Friedhof wurde im 14. Jahrhundert angelegt und 1980 erweitert. Die Ruhefrist für Erdgräber beträgt 20 Jahre, die Bestattungstiefe liegt bei 155cm. Auf der obersten Terrasse des Friedhofes befinden sich Grabkammern, deshalb wurde dieser Bereich bei der Kartierung nicht berücksichtigt.

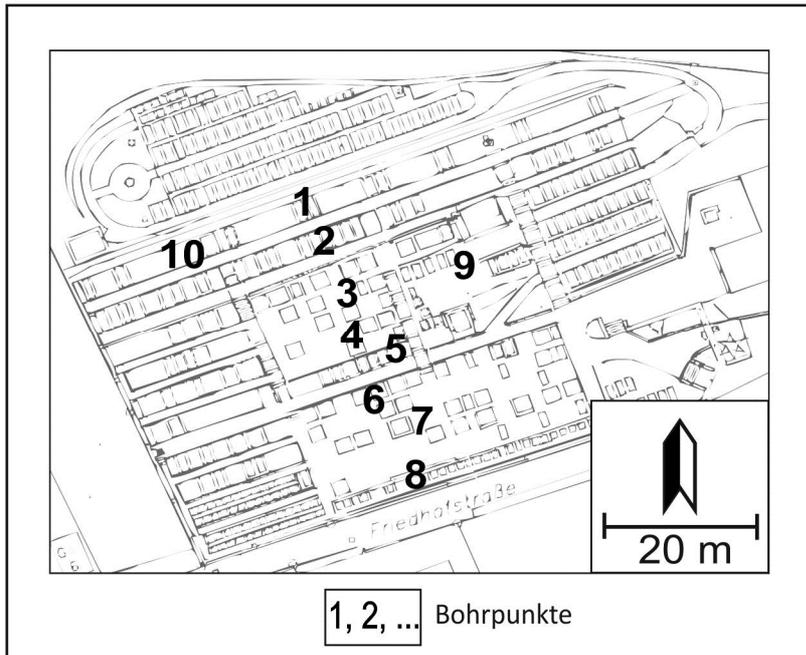


Abb. 48: Friedhof BW1, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Aus einem Bodengutachten des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg aus dem Jahre 1992 (Opitz 1992) geht hervor, dass in dem nun mit Grabkammern ausgestatteten Bereich ein Volllaufen der Gräber mit Hangwasser stattfand. Bei Anlage eines Leitprofils in diesem Bereich in Verbindung mit dem Gutachten von 1992 wurde eine unvollständig verwesene Leiche in einem mit Wasser gefüllten Sarg vorgefunden. Bei der Kartierung im Rahmen des Forschungsprojektes im Jahre 2009 wurden auch in den tiefer liegenden Terrassen bereits in 30 cm Tiefe ausgeprägte hydromorphe Merkmale festgestellt. Folglich ist auch in diesem Bereich mit einer mindestens zeitweiligen Behinderung des Gasaustausches zwischen Sargbereich und Atmosphäre durch Stauwasser zu rechnen. Für diesen Friedhof ist eine weitere Sanierung vorgesehen.

Bodenkartierung

Der Friedhof BW1 bildet eine Bodeneinheit (Abb. 49). Der Bodentyp in den abgelaufenen Gräbern ist ein YY-SS aus mittel tonigem Lehm. 20-30 cm unterhalb der Grabsohle steht bereits der mittlere Buntsandstein an.

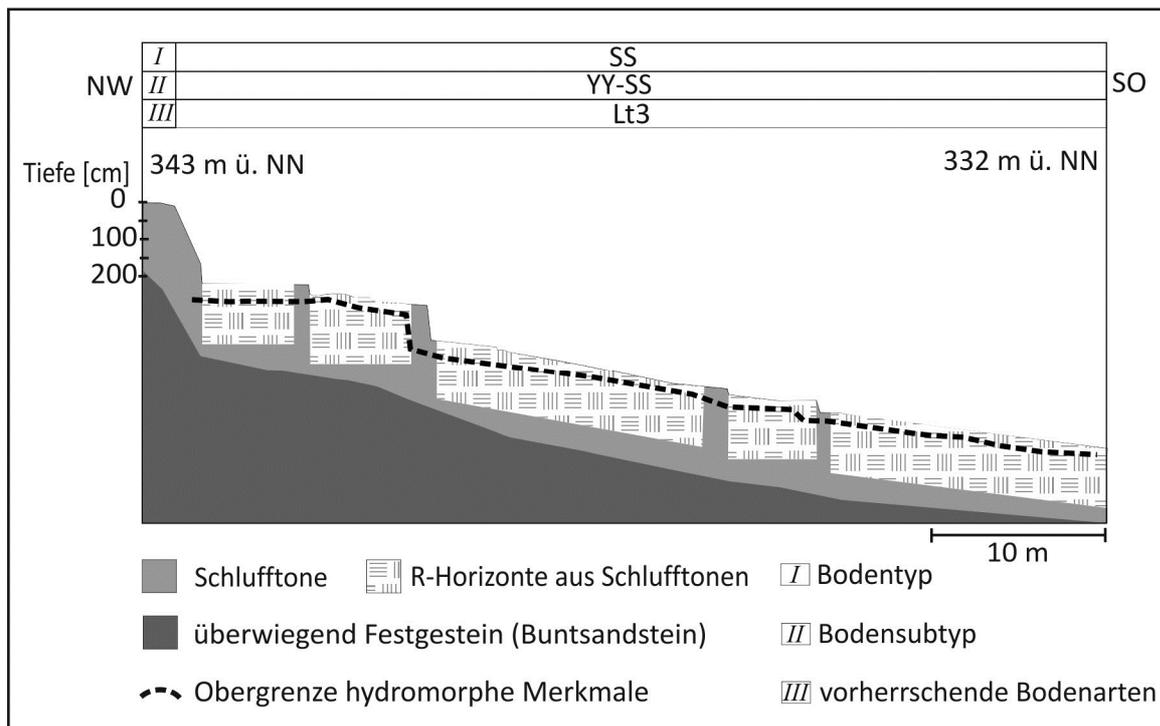


Abb. 49: Friedhof BW1, schematische Catena mit Bodentyp und Textur

Bewertung

Die Verwesungsleistung dieses Friedhofsbodens wird als gering bewertet (Tab. 22), die Filterleistung anhand von Gesamtfilterwirkung und Wasserverhältnissen als hoch. Die auch unterhalb der Grabsohle anstehenden Schlufftone verfügen zwar über eine hohe Gesamtfilterwirkung, sind aber von geringer Mächtigkeit über dem Festgestein und wirken gleichzeitig stark wasserstauend. Aufgrund des Stauwassereinflusses und der Hanglage wird die Filterleistung an diesem Standort um eine Klasse herabgesetzt und als mittel eingestuft.

Tab. 22: Friedhof BW1, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Bodentyp	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung	Flächenanteil [%]
Gesamtfläche	YY-SS	Lt3	gering	mittel*	100

* Zuschlag vom +1 aufgrund der Hangneigung

Friedhof BW 2

Standortbeschreibung

Der ca. 3,7 ha umfassende Friedhof BW2 (Abb. 50) liegt auf 145m ü. NN zwischen dem nördlichem Schwarzwald und dem Rhein auf quartären Lösssedimenten. Der Friedhof wurde 1845 angelegt und 1868 in östlicher Richtung erweitert. Die Ruhefrist für Erdgräber beträgt 20 Jahre, die

Bestattungstiefe liegt bei 155cm. Auf dem Friedhof treten vereinzelt Verwesungsstörungen auf (mündl. Mitteil. d. Friedhofsbetreibers).

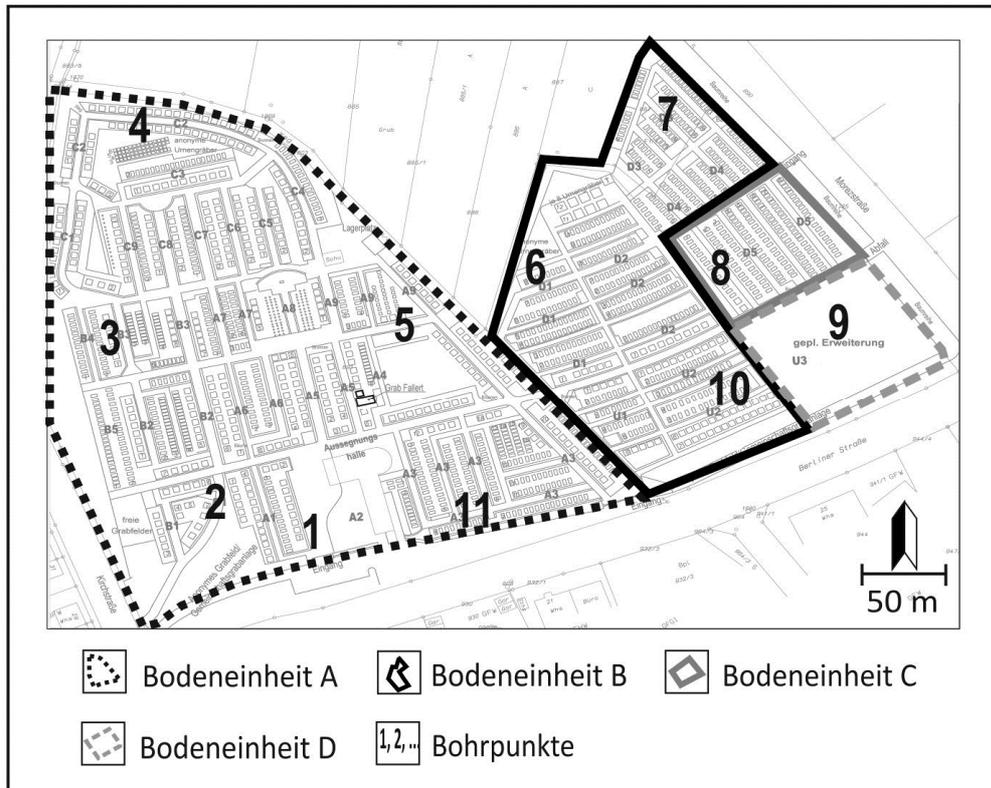


Abb. 50: Friedhof BW2, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Bodenkartierung

Der Friedhof BW2 wurde in vier Bodeneinheiten unterteilt (Abb. 51). In Bodeneinheit A liegen in abgelaufenen Gräbern s4YYn aus schwach tonigen Schluffen über schluffigen Schluffen vor. In Bodeneinheit B liegen in abgelaufenen Gräbern YYn aus schluffigen Schluffen vor. In Bodeneinheit C liegen in abgelaufenen Gräbern YY-SS aus schluffigen Schluffen über mittel tonigen Schluffen vor. Die Erweiterungsfläche (Bodeneinheit D) ist eine anthropogene Aufschüttung, die in den oberen 80 cm aus „Mutterboden“ besteht und bei Anlage maschinell stark verdichtet wurde. Als Folge der Verdichtung findet hier trotz der eigentlich durchlässigen Bodenart eine Aufstauung des Sickerwassers statt. Bei Begehung der Fläche im Herbst 2009 stand das Stauwasser bis an die Bodenoberfläche. Es liegt hier ein SSn aus schluffigen Schluffen über mittel lehmigen Sanden vor.

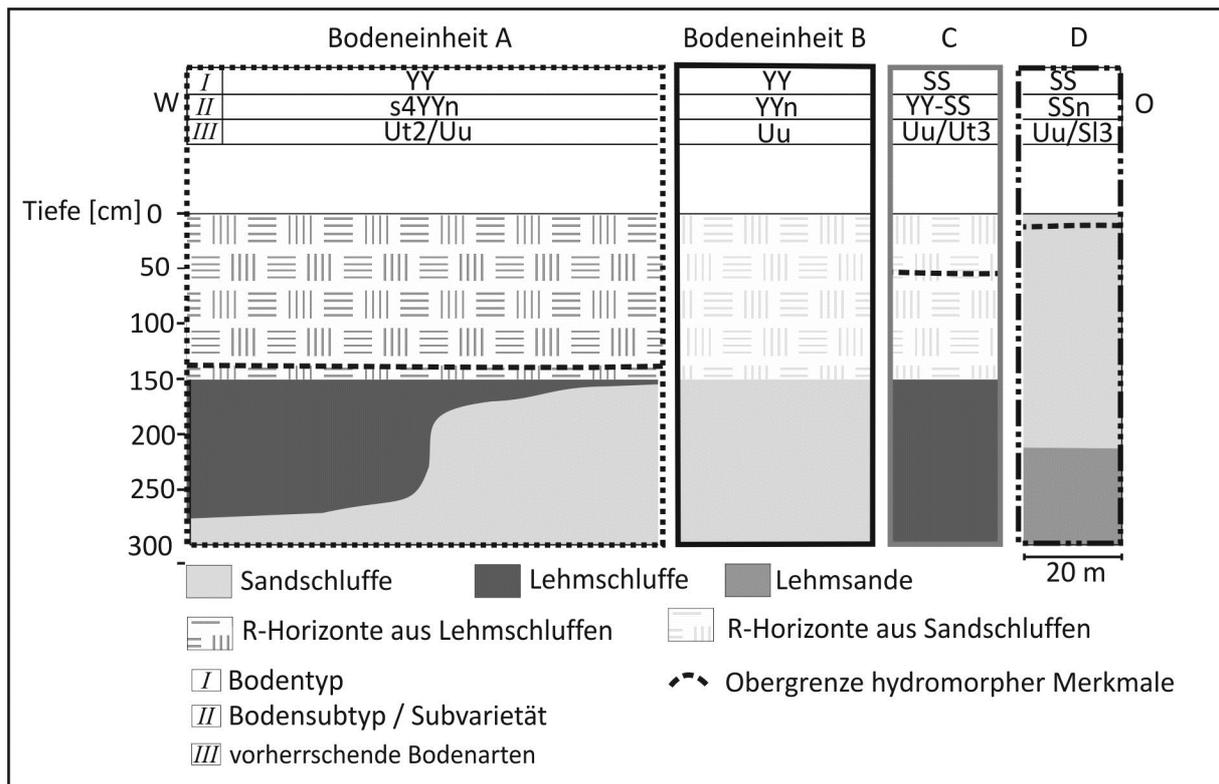


Abb. 51: Friedhof BW2, schematische Catena mit Bodentypen und Textur

Bewertung

Die Verwesungsleistung der Bodeneinheiten A und B wird als gering, bzw. mittel, die Filterleistung in beiden Bodeneinheiten als hoch bewertet (Tab. 23). In Bodeneinheit C und D wird die Verwesungsleistung als gering bewertet, die Filterleistung in Bodeneinheit C als hoch und in Bodeneinheit D als gering.

Tab. 23: Friedhof BW2, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Bodentyp	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung	Flächenanteil [%]
A	s4YYn	Ut2/Uu	gering	hoch	60
B	YYn	Uu	mittel	hoch	30
C	YY-SS	Uu/Ut3	gering	hoch	5
D	SSn	Uu/SI3	gering	gering	5

Friedhof BW3

Standortbeschreibung

Der ca. 0,3 ha große Friedhof BW3 (Abb. 52) liegt auf 322 m ü. NN im Verbreitungsgebiet des oberen Buntsandsteins an einem nordostexponierten Hang aus Lösslehm. Der Friedhof wurde 1854 angelegt und 2008 teilsaniert. Die Ruhefrist für Erdbestattungen beträgt 30 Jahre, die Bestattungstiefe liegt bei 160 cm. Die Fläche ist stark durch laterale Wasserflüsse beeinflusst, die zu einem Volllauf der Särge mit Wasser führen, und es treten häufig Verwesungsstörungen auf. Auf diesem Friedhof wurde im Anschluss an die Kartierung ein Leitprofil angelegt (Kap. 4.3.3) und eine Messanlage installiert (Kap. 4.4.3).

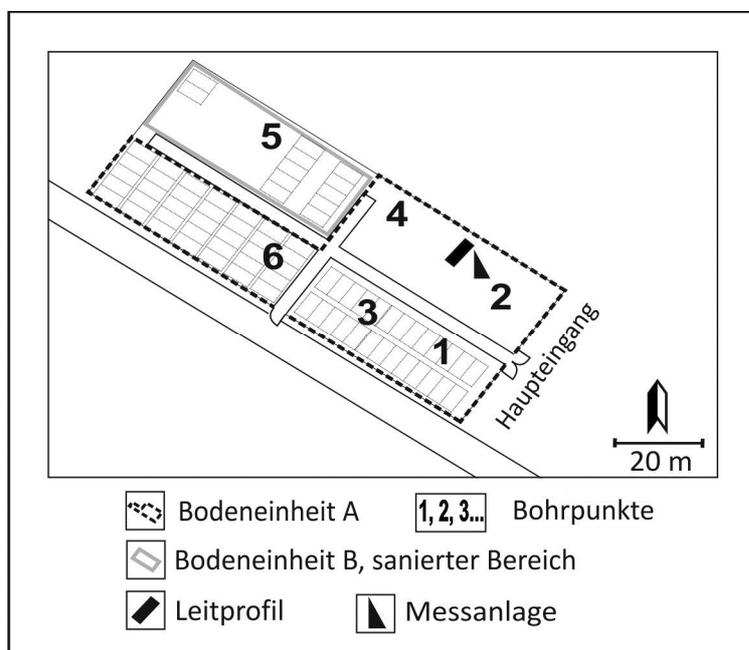


Abb. 52: Friedhof BW3, Friedhofsplan mit Bohrpunkten

Bodenkartierung

Der Friedhof BW3 wurde aufgrund der durch die Teilsanierung veränderten Wassereinflüsse in zwei Bodeneinheiten unterteilt (Abb. 53). In Bodeneinheit A liegen in abgelaufenen Gräbern SS-YY aus stark tonigen Schluffen über schwach schluffigen Tonen vor.

In Bodeneinheit B (saniertes Bereich) liegen YYn aus mit Kies und Rindenmulch vermischten stark tonigen Schluffen vor.

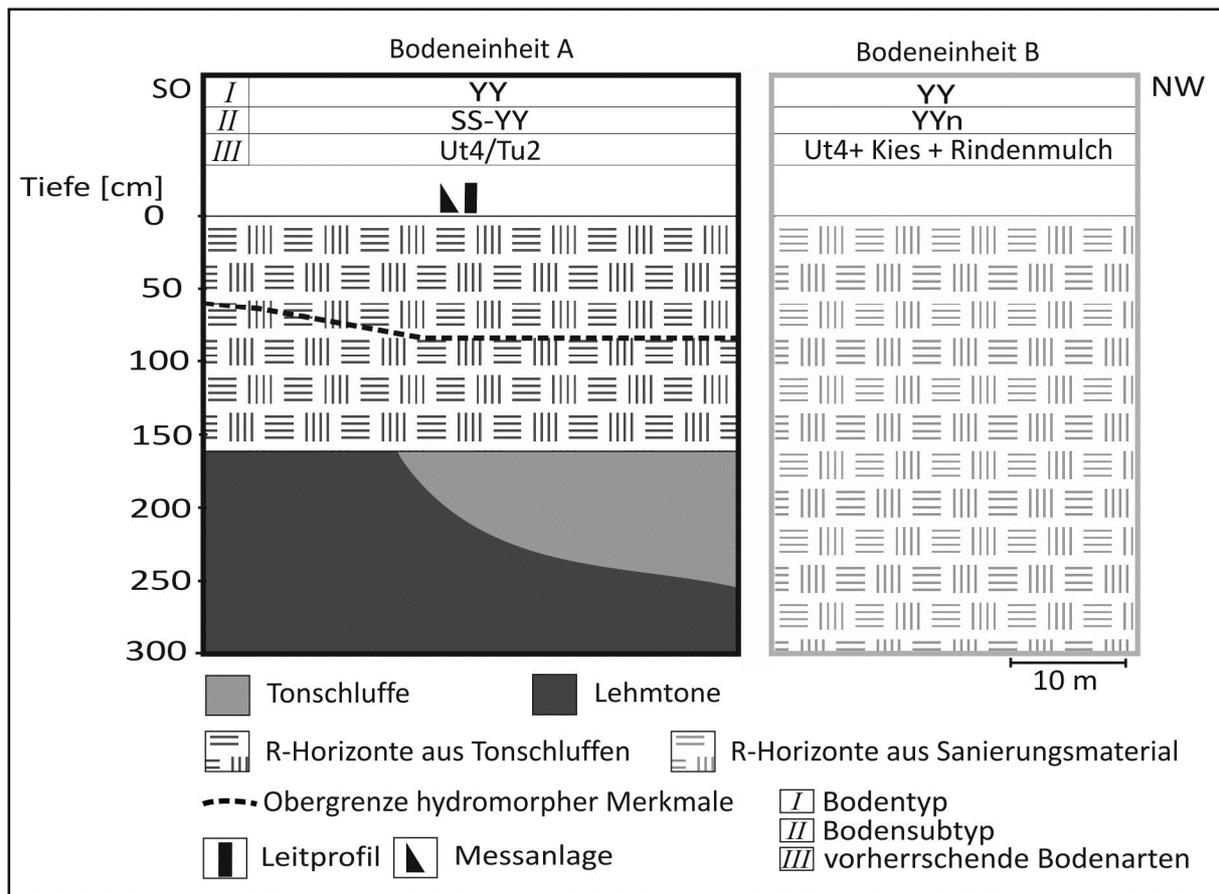


Abb. 53: Friedhof BW3, schematische Catena mit Bodentypen und Texturen

Bewertung

Die Verwesungsleistung des Friedhofes BW3 wurde als gering bewertet (Tab. 24), die Filterleistung zunächst als hoch. Aufgrund der Hanglage ist ein laterales Austreten von nicht ausreichend gefiltertem Sickerwasser möglich, so dass die Filterleistung um eine Klasse herabgestuft wird. Der sanierte Bereich wurde nicht bewertet.

Tab. 24: Friedhof BW3, Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung

Bodeneinheit	Typ	Bodenart	Verwesungsleistung	Filterleistung	Flächenanteil [%]
A, SS-YY	SS-	Ut4/Tu2	gering	mittel*	80
	YY				
B, YYn	YYn	Ut4+ Sanierungs- material	-	-	20

* Zuschlag vom +1 aufgrund der Hangneigung

4.2.7.2 Bodenchemische Kennwerte

Die Böden ehemaliger Gräber auf den Friedhöfen BW1-3 (Abb. 54 und Abb. 55) sind im Bereich der Ah-Horizonte schwach bis mittel humos, im Bereich der Deckschichten sehr schwach bis mittel humos und in den Sargbereichen und den Filterschichten sehr schwach humos. Die noch nicht unter Friedhofnutzung stehende Bodeneinheit D auf Friedhof BW2 ist bedingt durch den 80 cm mächtigen Auftrag von „Mutterboden“ bis in 90 cm Tiefe mittel humos, darunter sehr schwach humos.

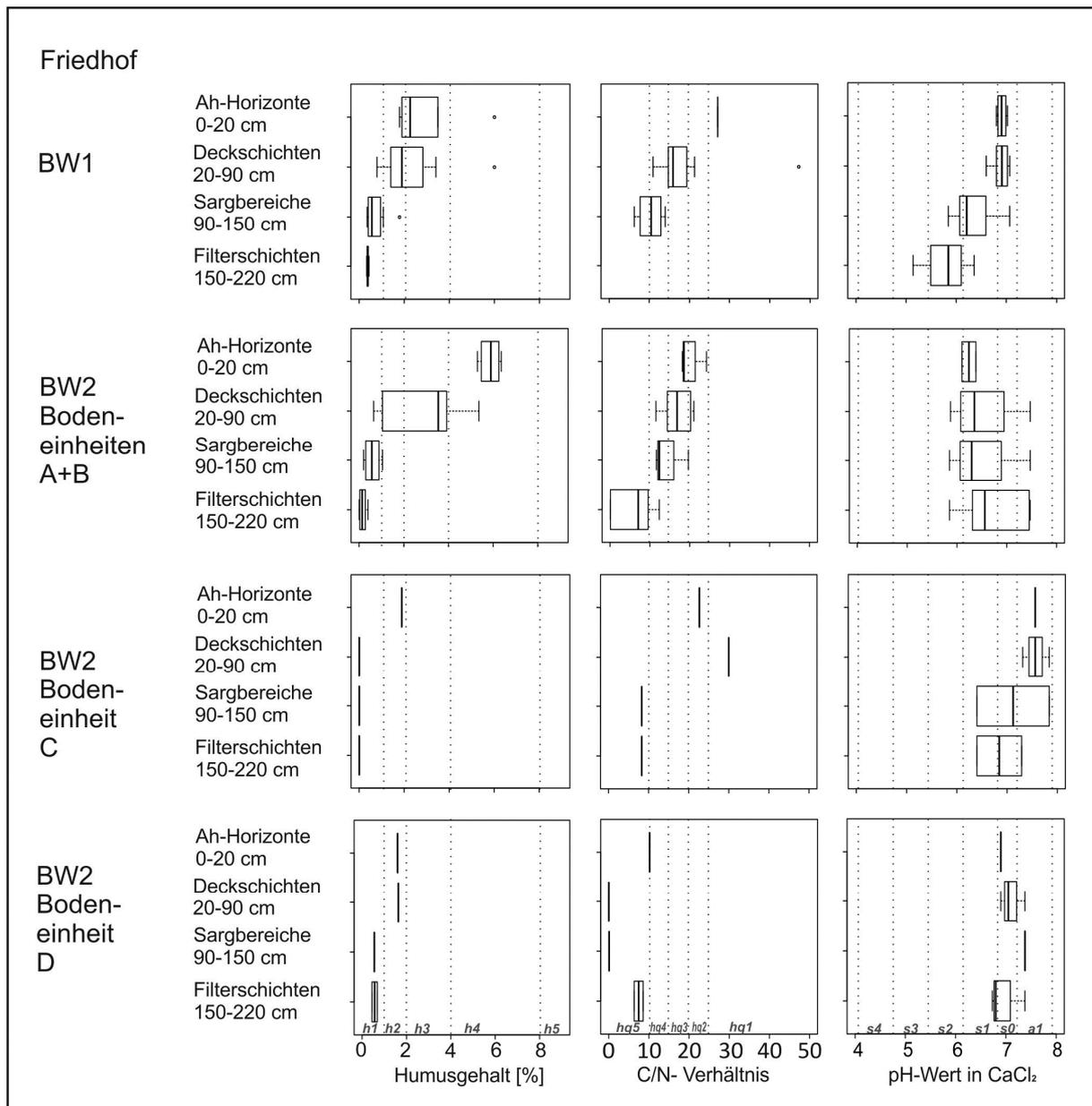


Abb. 54: Friedhöfe BW1 und BW2, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte

Die anhand der C/N- Verhältnisse abgeleitete Humusqualität der Ah-Horizonte und Deckschichten auf dem Friedhof BW1 und BW2, Bodeneinheiten A-C ist mittel bis gering. In Bodeneinheit D auf dem Friedhof BW2 und im nicht sanierten Bereich des Friedhofes BW3 ist die Humusqualität mittel bis hoch.

Die pH-Werte liegen auf Friedhof BW1 im neutralen bis schwach sauren Bereich und auf Friedhof BW2 im sehr schwach sauren bis sehr schwach alkalischen Bereich. Auf Friedhof BW3 sinken die pH-Werte im nicht sanierten Teil mit zunehmender Tiefe bis in den stark sauren Bereich. Der Boden der sanierten Fläche auf Friedhof BW3 ist stark humos, die pH-Werte sind neutral.

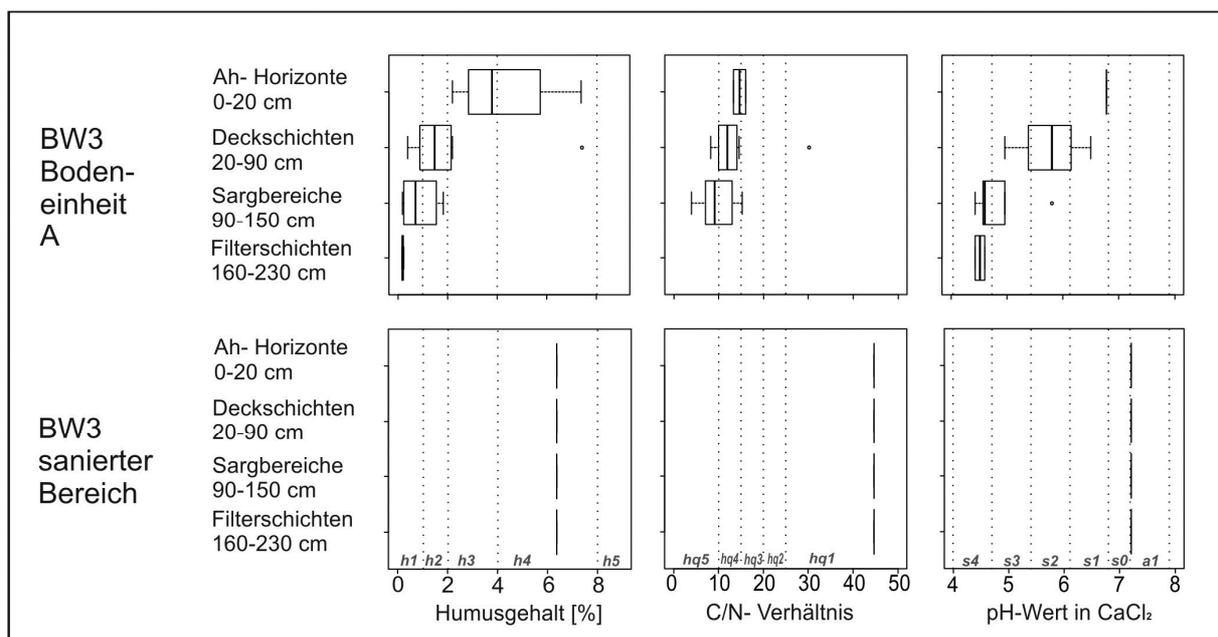


Abb. 55: Friedhof BW3, Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte

4.2.8 Zusammenfassung der kartierten Friedhöfe

4.2.8.1 Bewertungsgrundlagen

Die Auswahl der Untersuchungsstandorte erfolgte mit der Absicht, die bodenkundlichen Ursachen für Verwesungsstörungen zu untersuchen. Deshalb wurden vornehmlich Standorte, auf denen schon Verwesungsstörungen beobachtet wurden, ausgewählt. Es wurden 39 Bodeneinheiten auf 19 Friedhöfen untersucht und bewertet. In 70 % der untersuchten Bodeneinheiten war das Auftreten von Verwesungsstörungen im Vorfeld bekannt.

Zur Bewertung der Verwesungsleistung wurde zunächst die Bodenart im Bereich der Verwesungszone dokumentiert. Diese bestand in den untersuchten Erdgräbern überwiegend aus Reinsanden und Lehmsanden (Tab. 25).

Tab. 25: Verteilung der Bodenartengruppen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) in der Verwesungszone, n=39

Bodenartengruppe	ss	ls	us	sl	ll	su	lu	tu
Anteil [%]	31	26	2	2	18	8	3	10

Die Filterschichten der untersuchten Erdgräber bestanden überwiegend aus Sanden und Normallehmen, gefolgt von Lehmsanden und Schluffsanden.

Tab. 26: Verteilung der Bodenartengruppen nach Ad-hoc-AG Boden (2005) in der Filterzone, n=39

Bodenartengruppe	ss	ls	us	sl	ll	lu	tu	ut	lt	Torf
Anteil [%]	27	17	12	3	18	5	5	8	3	2

Die aus der Bodenart abgeleiteten LK der Verwesungszone wurden zu 30% als sehr hoch 40 % als hoch und zu 30 % als mittel klassifiziert. Für 10 % der untersuchten Bodeneinheiten wurden im Bereich der Verwesungszone Zuschläge für den pH-Wert vergeben, da dieser unter 5 lag. Von diesen 4 Bodeneinheiten waren 3 grund- oder stauwasserbeeinflusst und von Verwesungsstörungen betroffen. Die vierte der Bodeneinheiten war grund- und stauwasserfrei und ohne Verwesungsstörungen.

Bis in die Verwesungszone reichendes Wasser (70% davon Stauwasser und 30 % Grundwasser) führte in 70 % der untersuchten Bodeneinheiten zu einer schlechten Bewertung der Verwesungsleistung.

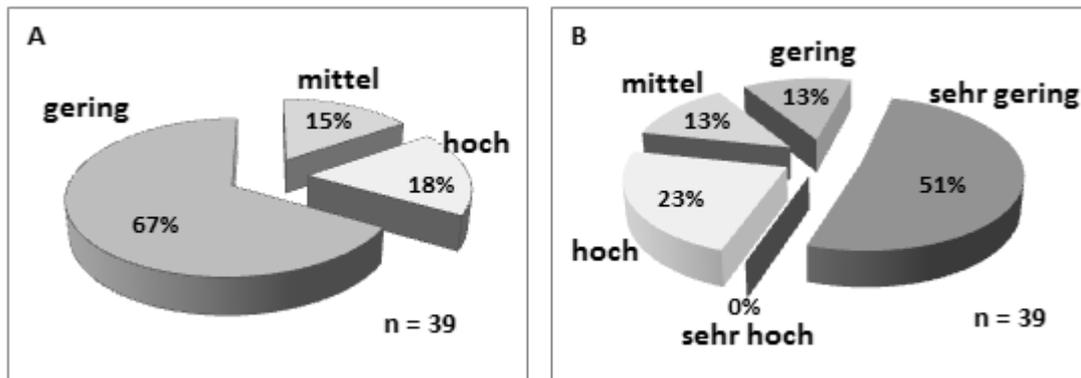


Abb. 56: Übersicht Bewertung der Verwesungsleistung (A) und Filterleistung (B) aller untersuchten Bodeneinheiten

Die Verwesungsleistung wurde in 67 % der Bodeneinheiten als gering, in 18 % als mittel und in 15% als hoch bewertet. Die Filterleistung wurde zu 51 % als sehr gering und zu 23 % als hoch bewertet (Abb. 56).

4.2.8.2 Bodenmodifikationen durch die Bestattungstätigkeit

Mit jeder Bestattung werden auf einem Friedhof mit Sarg und Leichnam sehr unterschiedlich gut zersetzbare Materialien in den Unterboden verbracht, die dort abgebaut werden müssen. Bei mehrfacher Nutzung eines Grabes findet außerdem eine immer weiter fortschreitende Vermischung des mineralischen Unterbodens mit Blumenerde und möglicherweise noch im Sargbereich vorhandenen Abbauprodukten, vor allem des Sargholzes, statt.

Anhand der im Rahmen der Kartierung gewonnenen Daten wurde überprüft, inwieweit es infolge der Friedhofsnutzung zu statistisch belegbaren Unterschieden in den C_{org} - und N_t -Gehalten von Ah-Horizonten, Deckschichten, Sargbereichen und Filterschichten kommt, aus denen sich eine Anreicherung von organischer Substanz im Unterboden ableiten ließe.

Außerdem wurden für die Friedhöfe NI3, NI4, BW2 und BY1 die Humusgehalte von Friedhofsbereich und Erweiterungsfläche verglichen.

Alle Vergleiche wurden ausschließlich innerhalb eines Friedhofes vorgenommen um Unterschiede, die allein durch unterschiedliche Texturen und Pedo- und Geogenese bedingt sind, auszuschließen.

4.2.8.2.1 Humusgehalte

Die mittleren Humusgehalte aller kartierten Friedhöfe zeigen einen deutlichen Tiefengradienten (Tab. 27). Die Ah-Horizonte sind stark humos, die Deckschichten und Sargbereiche schwach humos und die Filterschichten sehr schwach humos.

Tab. 27: Mittlere Humusgehalte in (mineralischen) Ah-Horizonten (0-20 cm), Deckschichten (20-90 cm), Sargbereichen (90cm – Bestattungstiefe) und Filterschichten (Bestattungstiefe + 70 cm) für alle kartierten Friedhöfe (n=19)

Entnahmebereich	Ah-Horizonte	Deckschichten	Sargbereiche	Filterschichten
mittlerer Humusgehalt [%]	4,48	2,11	1,09	0,54
maximaler Humusgehalt [%]	10,11	10,57	13,09	8,43
minimaler Humusgehalt [%]	0,29	0,21	0,00	0,00

Die Ah-Horizonte weisen auf 44% der untersuchten Friedhöfe signifikant höhere Humusgehalte auf als die Deckschichten, auf 56% der untersuchten Friedhöfe signifikant höhere Humusgehalte als der Sargbereich und auf 67% der untersuchten Friedhöfe signifikant höhere Humusgehalte auf als die Filterschicht (Tab. 28).

Die Deckschichten weisen auf 5% der untersuchten Friedhöfe signifikant höhere Humusgehalte als der Sargbereich und auf 22% der untersuchten Friedhöfe signifikant höhere Humusgehalte als die Filterschicht auf.

Auf 83% der untersuchten Friedhöfen wiesen die Sargbereiche im Mittel höhere Humusgehalte auf als die darunter liegenden Filterschichten. Dieser Unterschied ist jedoch auf keinem Friedhof signifikant.

Die detaillierten Mittelwertsvergleiche der Humusgehalte befinden sich in Anhang.

Tab. 28: Mittelwertsvergleiche (MV) nach Tukey (1953), mittlere Differenz der mittleren Humusgehalte (MDM) in Ah-Horizonten (0-20 cm), Deckschichten (20-90 cm), Sargbereichen (90cm – Bestattungstiefe) und Filterschichten (Bestattungstiefe + 70 cm) für alle kartierten Friedhöfe (n=19)

Mittelwerts- vergleich (MV)	mittlere Differenz der mittleren Humusgehalte (MDM)	Gesamtanteil MDM am MV [%]	Anteil [%] der verglichenen MDM nach Signifikanzniveau		
			p < 0,05	0,05 < p < 0,1	p > 0,1
Ah-Horizonte - Deckschichten	positiv	100	44	12	44
	negativ	0	0	0	0
Ah- Horizonte - Sargbereiche	positiv	94	56	13	25
	negativ	6	0	0	6
Ah-Horizonte - Filterschichten	positiv	93	67	6	20
	negativ	7	0	0	7
Deckschichten - Sargbereiche	positiv	89	5	10	74
	negativ	11	0	0	11
Deckschichten- Filterschichten	positiv	94	22	16	56
	negativ	6	0	0	6
Sargbereiche - Filterschichten	positiv	83	0	0	83
	negativ	17	0	0	17

4.2.8.2.2 Änderung des Humusgehaltes als Funktion der Nutzungsdauer

Durch Vergleiche von Friedhöfen unterschiedlichen Alters und von noch unbelegten Erweiterungsflächen mit Grabfeldern innerhalb eines Friedhofes wurde überprüft, ob es mit zunehmender Nutzungsdauer (Belegungsanzahl) insgesamt zu einer Humusanreicherung im Boden kommt. Zunächst wurde ein allgemeiner Zusammenhang zwischen dem Alter der Gesamtfläche (=Zeitraum seit der ersten Bestattung auf dem Friedhof) überprüft.

Die Überprüfung eines linearen Zusammenhanges ergibt: Humusgehalt = 2,03 + 0,0006 x Friedhofsalter, mit einer Produkt-Moment-Korrelation nach Pearsons von $R^2 = 0,01$. Die Ermittlung von Spearmans Rangkorrelationskoeffizient ergibt: $r_s = -0,02$. Somit ist auch bei Annahme einer nicht-linearen Korrelation in den vorliegenden Daten kein Zusammenhang zwischen Humusgehalt und Friedhofsalter festzustellen.

4.2.8.2.3 Gesamtstickstoffgehalte (N_t)

Die mittleren N_t -Gehalte nehmen mit der Tiefe kontinuierlich ab (Tab. 29). Die Ah-Horizonte enthalten im Mittel 0,14%, die Filterschichte im Mittel 0,03%.

Tab. 29: Mittlere N_t -Gehalte in (mineralischen) Ah-Horizonten (0-20 cm), Deckschichten (20-90 cm), Sargbereichen (90cm – Bestattungstiefe) und Filterschichten (Bestattungstiefe + 70 cm) für alle kartierten Friedhöfe (n=19)

Entnahmebereich	Ah-Horizonte	Deckschichten	Sargbereiche	Filterschichten
mittlerer N_t -Gehalt [%]	0,14	0,07	0,05	0,03
maximaler N_t -Gehalt [%]	0,37	0,24	0,22	0,12
minimaler N_t -Gehalt [%]	0,01	0,01	0,01	0,00

Die Ah-Horizonte weisen auf 94% der untersuchten Friedhöfe im Mittel höhere N_t -Gehalte auf als die Deckschichten, in 38% der Fälle ist der Unterschied signifikant (Tab. 30). Auf 94% der untersuchten Friedhöfe sind die mittleren N_t -Gehalte der Deckschichten höher als die der Sargbereiche, auf 38% der Friedhöfe ist dieser Unterschied signifikant. Die mittleren N_t -Gehalte der Deckschichten sind auf 11% der Friedhöfe signifikant höher als die der Sargbereiche und auf 22% der Friedhöfe signifikant höher als die der Filterschichten. Die Unterschiede zwischen den mittleren N_t -Gehalten der Sargbereiche und der Filterschichten sind auf keinem Friedhof signifikant. Auf 56% der Friedhöfe sind die mittleren N_t -Gehalte der Sargbereiche höher als die der Filterschichten, auf 44% sind sie niedriger.

Die detaillierten Mittelwertsvergleiche der N_t -Gehalte befinden sich in Anhang.

Tab. 30: Mittelwertsvergleiche (MV) nach Tukey (1953), mittlere Differenz der mittleren der N_t - Gehalte (MDM) in Ah-Horizonten (0-20 cm), Deckschichten (20-90 cm), Sargbereichen (90cm – Bestattungstiefe) und Filterschichten (Bestattungstiefe + 70 cm) für alle kartierten Friedhöfe, (n=19)

Mittelwerts- vergleich (MV)	mittlere Differenz der mittleren N_t -Gehalte (MDM)	Gesamtanteil MDM am MV [%]	Anteil [%] der verglichenen MDM nach Signifikanzniveau		
			$p < 0,05$	$0,05 < p < 0,1$	$p > 0,1$
Ah-Horizonte - Deckschichten	positiv	94	38	6	50
	negativ	6	0	0	6
Ah- Horizonte - Sargbereiche	positiv	94	38	25	31
	negativ	6	0	0	6
Ah-Horizonte - Filterschichten	positiv	100	67	0	33
	negativ	0	0	0	0
Deckschichten - Sargbereiche	positiv	83	11	0	73
	negativ	17	0	0	17
Deckschichten- Filterschichten	positiv	100	22	0	78
	negativ	0	0	0	0
Sargbereiche - Filterschichten	positiv	56	0	0	56
	negativ	44	0	0	44

4.3 Leitprofile

Es folgt nun die Beschreibung und bodenkundliche Klassifikation der Leitprofile auf den Friedhöfen SH1, BE1 und BW3 mit Angaben zu Textur und chemischen Kennwerten.

4.3.1 Friedhof SH1

Auf dem Friedhof SH1 wurden aufgrund der heterogenen Bodenverhältnisse zwei Leitprofile (Leitprofil A und B) angelegt.

4.3.1.1 Leitprofil A

Beschreibung

Das Leitprofil A wurde im alten Teil des Friedhofes von 1909 am Rande einer Senke (Toteisloch) angelegt (vgl. Abb. 7 und Abb. 8, Bodeneinheit D). In diesem Bereich des Friedhofes werden aufgrund von wiederholt auftretenden Verwesungsstörungen keine neuen Gräber mehr angelegt. Die letzte Beisetzung liegt hier ca. 50 Jahre zurück.

Beim Ausheben der Profilgrube wurden bereits in 20 cm Tiefe schwarzgefärbte Knochen aufgefunden, in 120 cm Tiefe befand sich in der Seitenwand der Grube ein auf eine Höhe von 20 cm zusammengedrückter Sarg (Abb. 57).

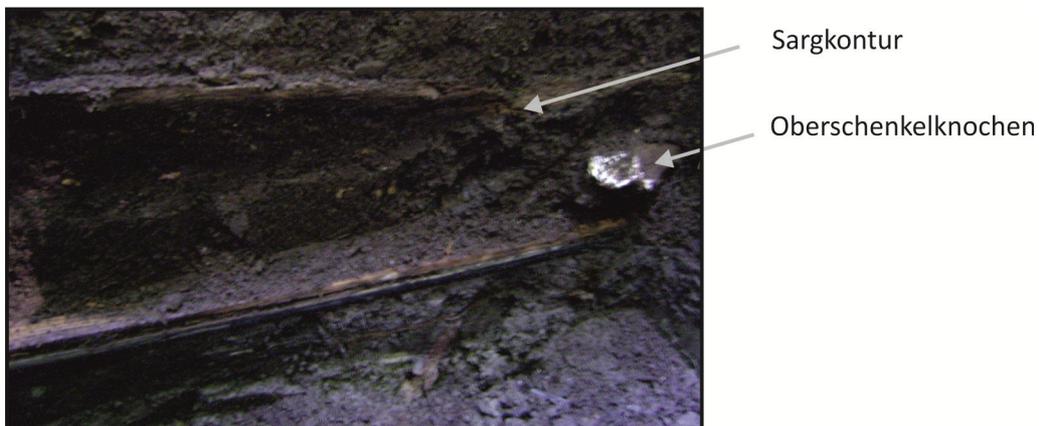


Abb. 57: Leitprofil A, Friedhof SH1, Detailaufnahme aus 95-130 cm Tiefe, Sargkontur, Oberschenkelknochen, ca. 50 Jahre nach Beisetzung

Das Sargholz war kaum zersetzt und wassergesättigt, der Lack noch vorhanden. Der aus dem Sarg herausragende Oberschenkelknochen wies eine weiße Beschichtung auf, bei der es sich um Reste von Leichenwachs oder Spuren der Demineralisation des Knochens handelt. Direkt unterhalb des Sarges liegt eine ca. 10 cm mächtige, deutlich durch Reduktionsmerkmale geprägte mineralische Bodenschicht, darunter steht stark zersetzter Niedermoortorf an. Die auf dem Friedhof SH1 übliche

Bestattungstiefe von 160 cm wurde an dieser Stelle aufgrund des hoch anstehenden Grundwassers (im Mittel 100 cm unter der Geländeoberflächen, vgl. Abb. 75) nicht eingehalten.

Bodenklassifikation und Textur

Leitprofil A (Abb. 58) ist ein Gley-Rigosol aus Kolluvium über Niedermoortorf.

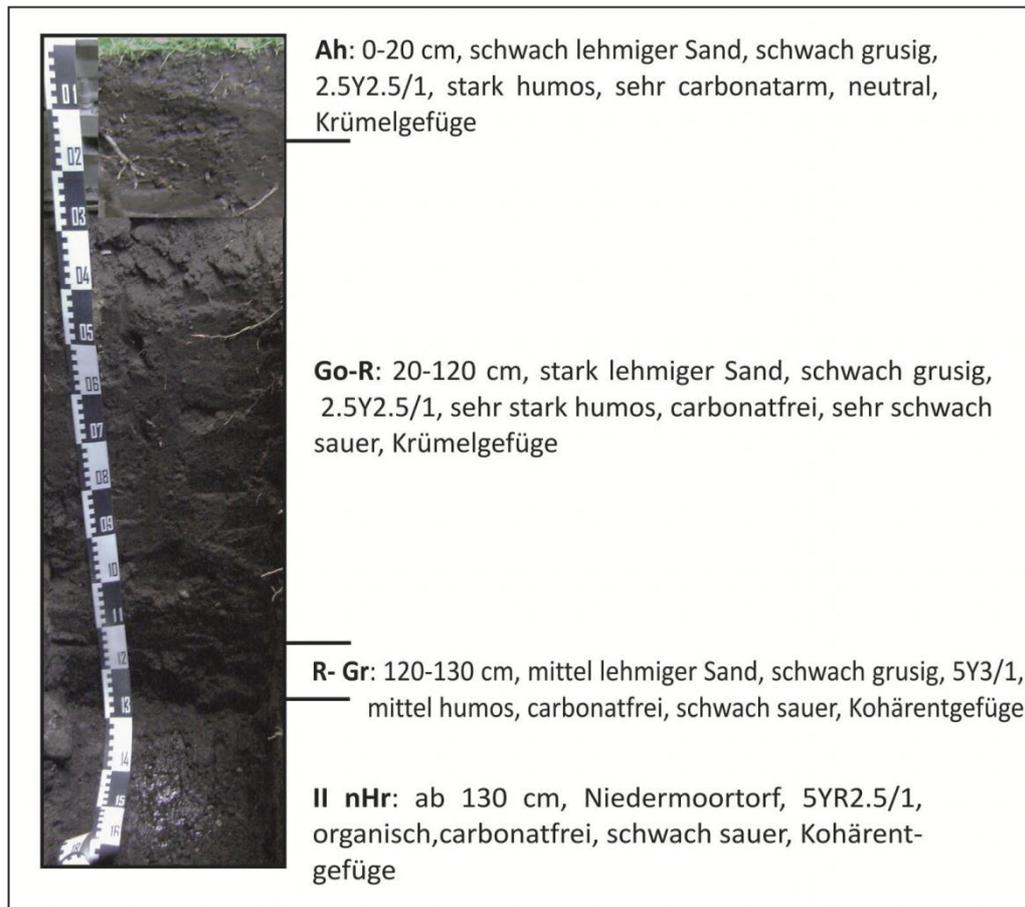


Abb. 58: Leitprofil A, Friedhof SH1, Gley-Rigosol (GG-YY) aus Kolluvium über Niedermoortorf

Die Textur ist ein lehmiger Sand über Niedermoortorf (Tab. 31).

Tab. 31: Leitprofil A, Gley-Rigosol aus Kolluvium über Niedermoortorf, Friedhof SH1, Textur

Horizont	Bodenart	gS [%]	mS [%]	fS [%]	gU [%]	mU [%]	fU [%]	T [%]
Ah	SI2	14	41	26	8	4	2	5
Go-R (Deckschicht)	SI4	9	28	24	11	7	6	15
R-Gr (Filterschicht)	SI3	14	34	25	9	5	3	10
II nHr (Filterschicht)	Ha	-	-	-	-	-	-	-

Bodenchemische Kennwerte

Die Bodenreaktion ist in der Deckschicht (Go-R) sehr schwach sauer und in der Filterschicht (II nHr) schwach sauer. Die Deckschicht ist an diesem Standort stark humos, dies ist auf eine Vermischung des Kolluviums mit dem in 120 cm Tiefe anstehenden Niedermoortorf im Zuge von Grabtätigkeiten zurückzuführen. Der Boden verfügt im Bereich der Filterschicht über eine extrem hohe KAK_{pot} , die maßgeblich auf den hohen Gehalt an austauschbarem Calcium zurückzuführen ist.

Tab. 32: Leitprofil A, Gley-Rigosol aus Kolluvium über Niedermoortorf, Friedhof SH1, bodenchemische Kennwerte

Horizont	pH-Wert (in CaCl ₂)	CaCO ₃ [%]	C _{org} [%]	N _t [%]	KAK _{pot} [cmol _c kg ⁻¹]	austauschbare Kationen [cmol _c kg ⁻¹]					
						H ⁺	Al ³⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Ah	6,8	0,3	4,3	0,3	21,7	-	-	0,13	0,06	20,5	1,01
Go-R	6,6	0	6,3	0,5	35,7	-	-	0,09	0,25	34,5	0,83
R-Gr	5,8	0	2,0	0,2	10,3	-	-	0,07	0,13	9,8	0,25
II nHr	5,6	0	20,8	3,2	69,7	-	-	0,05	0,85	67,2	1,59

4.3.1.2 Leitprofil B

Beschreibung

Das zweite Leitprofil auf dem Standort SH1 wurde am nordwestlichen Ende des Friedhofes in dem ab 1945 genutzten Friedhofsteil auf einem sehr schwach (ca. 2%) nach Nordwest geneigten Hang angelegt (vgl. Abb. 7 und Abb. 8, Bodeneinheit B). Die Anlage des Leitprofils erfolgte in einer Grabreihe, die vor ca. 10 Jahren nach nur einmaliger Nutzung für Erdbestattungen stillgelegt wurde.

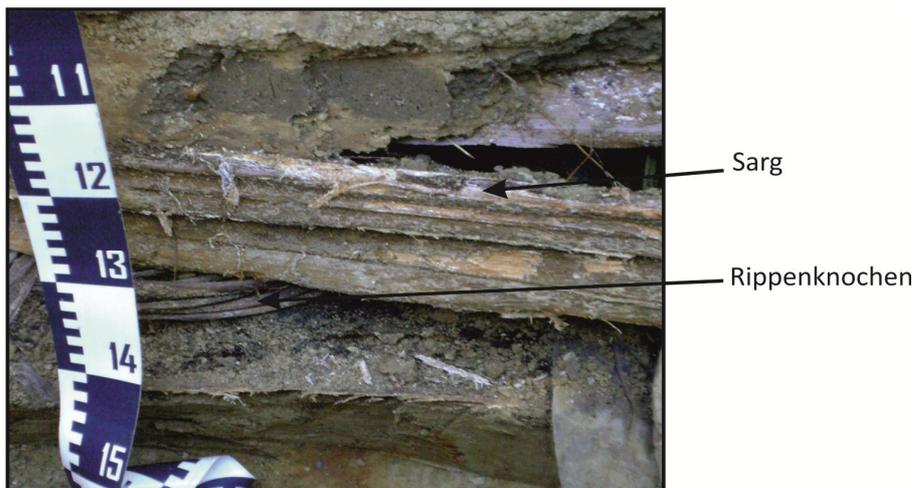


Abb. 59: Leitprofil B, Friedhof SH1, Detailaufnahme aus 100 bis 45 cm Tiefe, Sarg, Rippenknochen, ca. 35 Jahre nach Beisetzung

Bei Anlage des Leitprofils wurde ein Sarg freigelegt. Holz, Lack und Auskleidung des Sarges waren noch sehr gut erhalten, der Leichnam vollständig skelettiert (Abb. 59). Die Beisetzung in dem untersuchten Grab hat vor ca. 35 Jahren stattgefunden. Eine erneute Nutzung der Fläche für Erdbestattungen ist nicht ausgeschlossen. Da es sich bei dem untersuchten Grab um eine Erstbelegung handelt, konnte an diesem Standort ein direkter Vergleich von ungestörter Grabwand und Deckschicht des Grabes vorgenommen werden.

Bodenklassifikation und Textur

Leitprofil B (Abb. 60) ist ein Pseudogley-Rigosol aus Geschiebe(deck-)sand über Geschiebelehm.

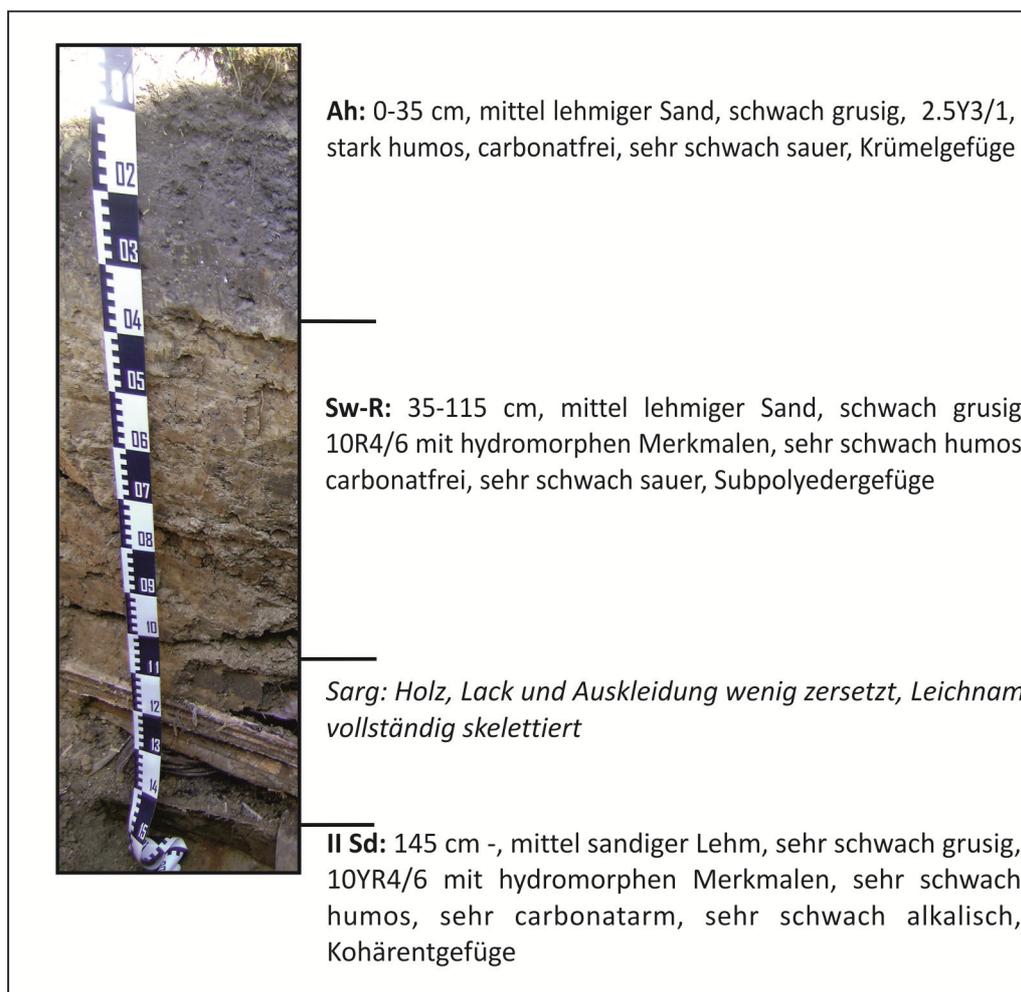


Abb. 60: Leitprofil B, Friedhof SH1, Pseudogley-Rigosol (SS-YY) aus Geschiebe(deck-)sand über Geschiebelehm

Die Grabwand besteht aus schwach schluffigem Sand, die Filterschicht aus mittel sandigem Lehm (Tab. 33). Durch die Vermischung von Ober- und Unterboden im Zuge der Wiederverfüllung des Grabes wurden der Ton- und Schluffgehalt des Oberbodens im Bereich der Deckschicht und dem darüber liegenden Ah-Horizont erhöht, so dass die Bodenart hier ein mittel lehmiger Sand ist.

Tab. 33: Leitprofil B, Pseudogley-Rigosol (SS-YY) aus Geschiebe(deck-)sand über Geschiebelehm, Friedhof SH1, Textur

Horizont	Bodenart	gS [%]	mS [%]	fS [%]	gU [%]	mU [%]	fU [%]	T [%]
Ah	Sl3	11	28	31	11	6	2	11
Sw (Grabwand)	Su2	5	27	44	15	4	1	5
Sw-R (Deckschicht)	Sl3	5	22	33	24	6	1	9
II Sd (Filterschicht)	Ls3	6	15	27	15	9	8	21

Bodenchemische Kennwerte

Die Bodenreaktion ist im Bereich der Deckschicht (Sw-R) sehr schwach sauer, im Bereich der Filterschicht sehr schwach alkalisch. Deckschicht und Filterschicht sind an diesem Standort sehr schwach humos. Die Filterschicht (II Sd) verfügt über eine hohe KAK_{pot} .

Tab. 34: Leitprofil B, Pseudogley-Rigosol (SS-YY) aus Geschiebe(deck-)sand über Geschiebelehm, Friedhof SH1, bodenchemische Kennwerte

Horizont	pH-Wert (in CaCl ₂)	CaCO ₃ [%]	C _{org} [%]	N _t [%]	KAK _{pot} [cmol _c kg ⁻¹]	austauschb. Kationen [cmol _c kg ⁻¹]					
						H ⁺	Al ³⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Ah	6,6	0	3,9	0,3	16,3	-	-	0,2	0,06	15,4	0,7
Sw (Grabwand)	6,4	0	0,1	0,03	2,4	-	-	0,1	0,02	2,1	0,1
Sw-R (Deckschicht)	6,5	0	0,2	0,03	4,1	-	-	0,2	0,03	3,6	0,3
II Sd (Filterschicht)	7,3	0,1	0,03	0,05	13,0	-	-	0,1	0,06	12,1	0,7

4.3.2 Leitprofil C, Friedhof BE1

Beschreibung

Das Leitprofil C wurde im nordöstlichen Teil des 1902 angelegten Friedhofes in ebenem Gelände in einer ehemaligen Grabreihe angelegt (vgl. Abb. 24 und Abb. 25). Bei der Fläche handelt es sich um eine Überhangsfläche, die vor ca. 15 Jahren aus der Nutzung genommen wurde. Die Fläche war zum Zeitpunkt der Probenahme mit Quercus und Betula bestanden, der Boden war überwiegend mit Aegopodium podagraria bewachsen. Bei Anlage des Leitprofils wurden keine Hinweise auf

vorhergehende Erdbestattungen gefunden, obwohl in der Grabreihe nach Aussage der Friedhofsbetreiber mehrfach bestattet wurde.

Bodenklassifikation und Textur

Das Leitprofil C (Abb. 61) ist ein Normrigosol aus Flugsand. Die ab 95 cm Tiefe sichtbaren hydromorphen Merkmale sind auf einen reliktschen Grundwassereinfluss zurückzuführen, der Grundwasserstand lag zum Zeitpunkt der Probenahme bei ca. 400 cm unter der Geländeoberfläche. Ein Haftwassereinfluss ist aufgrund des geringen Anteils an Mittel- und Feinporen (Tab. 39) auszuschließen.

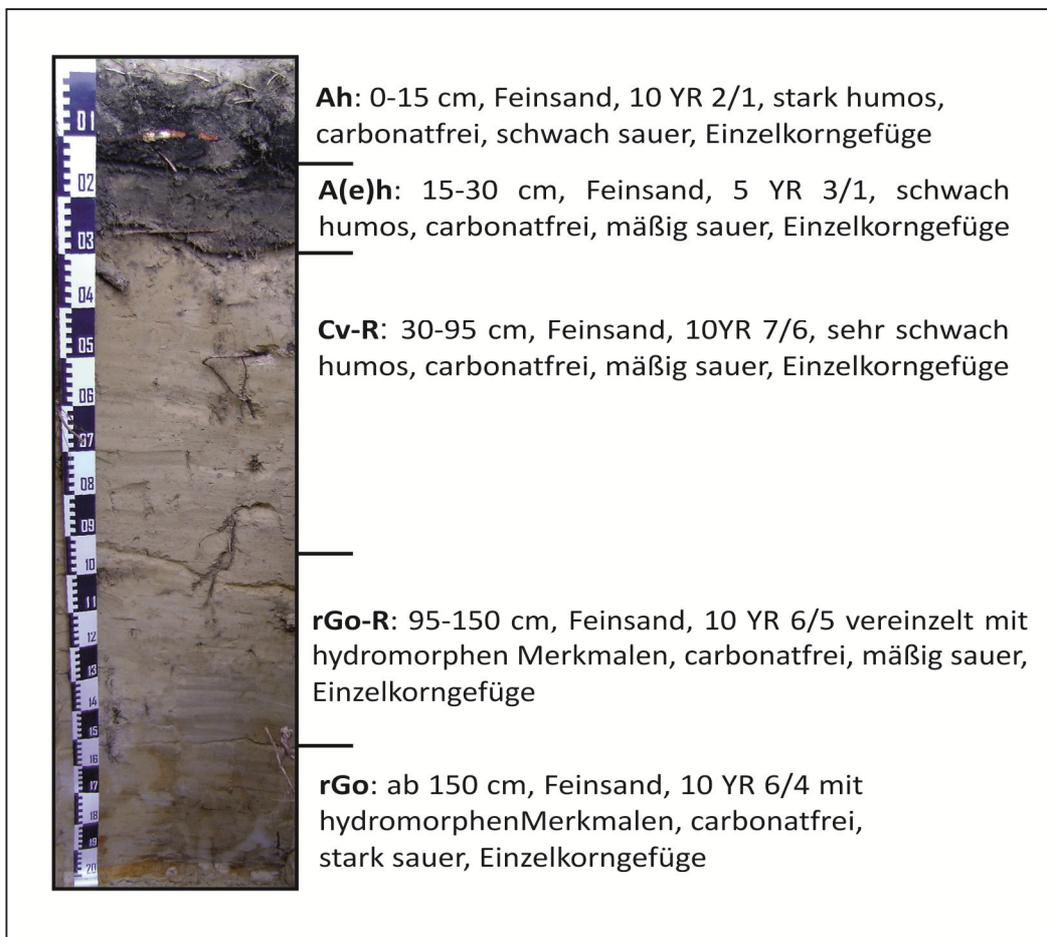


Abb. 61: Leitprofil C, Friedhof BE1, Normrigosol (YYn) aus Flugsand

Die Textur in Leitprofil C (Tab. 35) ist in allen untersuchten Horizonten ein Reinsand mit sehr hohem Feinsandanteil.

Tab. 35: Leitprofil C, Normrigosol aus Flugsand, Friedhof BE1, Textur

Horizont	Bodenart	gS [%]	mS [%]	fS [%]	gU [%]	mU [%]	fU [%]	T [%]
Ah	Ss	1	20	78	0	-	-	-
A(e)h	Ss	1	24	71	5	-	-	-
Cv-R	Ss	2	23	73	2	-	-	-
rGo-R	Ss	0	15	81	4	-	-	-
rGo	Ss	1	16	79	5	-	-	-

Bodenchemische Kennwerte

Die Bodenreaktion (Tab. 36) ist im Bereich der Deckschicht (Cv-R) mäßig sauer. Die Filterschicht (rGo) verfügt nur über eine geringe KAK_{pot} . Der Boden ist im Bereich der Deckschicht und der Filterschicht sehr schwach humos.

Tab. 36: Leitprofil C, Normrigosol auf Flugsand, Friedhof BE1, bodenchemische Kennwerte

Horizont	pH-Wert (in $CaCl_2$)	$CaCO_3$ [%]	C_{org} [%]	N_t [%]	KAK_{pot} [$cmol_c\ kg^{-1}$]	austauschbare Kationen [$cmol_c\ kg^{-1}$]					
						H^+	Al^{3+}	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
						Ah	5,5	0	3,7	0,14	11,4
A(e)h	4,9	0	0,9	0,04	5,0	0,1	0,2	0,0	0,0	1,3	0,1
Cv-R	5,2	0	0,1	0,01	1,8	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4	0,1
rGo-R	5,2	0	0,1	0,01	1,7	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5	0,1
rGo	4,6	0	0,0	0,01	1,6	0,1	0,3	0,0	0,0	0,4	0,0

4.3.3 Leitprofil D, Friedhof BW3

Beschreibung

Leitprofil D wurde im nicht sanierten Teil des 1854 angelegten Friedhofes in einer ehemaligen Grabreihe angelegt, die zum Zeitpunkt der Probenahme unter Rasen lag. Die Fläche weist eine mittlere Neigung nach Nordost auf. Der Bereich wird nicht mehr für Erdbestattungen genutzt, da auf diesem Friedhof aufgrund der schlechten Verwesungsleistung seit 2008 neue Gräber nur noch in dem sanierten Bereich angelegt werden (vgl. Abb. 53). Die letzte Beisetzung in diesem Bereich liegt etwa 40 Jahre zurück. Bei Anlage des Leitprofils wurden insgesamt drei an die Grube angrenzende Säрге

beschädigt. Aus diesen traten größere Mengen Wasser aus, was zu einem Volllaufen der Grube führte. Das Sargholz war nur wenig zersetzt und vollständig wassergesättigt. Der in den Hohlräumen aufgefundene Boden wies eine ausgeprägte Graufärbung auf, die auf stark reduzierende Bedingungen hindeutet (Abb. 62 und Abb. 87). In einem der Hohlkörper konnten Reste von Textilien ausgemacht werden, Skeletteile oder Leichenwachs waren nicht zu sehen.



Wasseraustritt aus beschädigtem Sarg und reduzierter Boden

Abb. 62: Leitprofil D, Friedhof BW3, Detailaufnahme Wasseraustritt aus beschädigtem Sarg und reduzierter Boden

Bodenklassifikation und Textur

Leitprofil D ist ein Pseudogley-Rigosol aus Löss über Rötton. Der Standort ist von lateralen Wasserflüssen geprägt, wobei die Särge die wasserführende Schicht bilden. Der Ah-Horizont wurde nach Ablauf der Ruhefristen aufgetragen um eine Begrünung der Fläche zu ermöglichen. Während der Ruhefristen wird die Bodenoberfläche auf diesem Friedhof mit Grus bedeckt. Der jSw-R-Horizont wurde nicht beprobt, da er überwiegend aus eingemischter Blumenerde und Grus aus der Bodenbedeckung des Friedhofes besteht.

An Leitprofil D bestehen der aufgetragene Ah-Horizont und die Deckschicht (Sw-R) aus stark tonigem Schluff. Die Filterschicht (II Sd) besteht aus schwach schluffigem Ton (Tab. 37).

Tab. 37: Leitprofil D, Pseudogley-Rigosol aus Löss über Rötton, Friedhof BW3, Textur

Horizont	Bodenart	gS [%]	mS [%]	fS [%]	gU [%]	mU [%]	fU [%]	T [%]
jAh	Ut4	1	2	4	37	21	10	25
Sw-R	Ut4	1	1	2	37	25	9	24
II Sd	Tu2	0	0	1	21	16	14	47

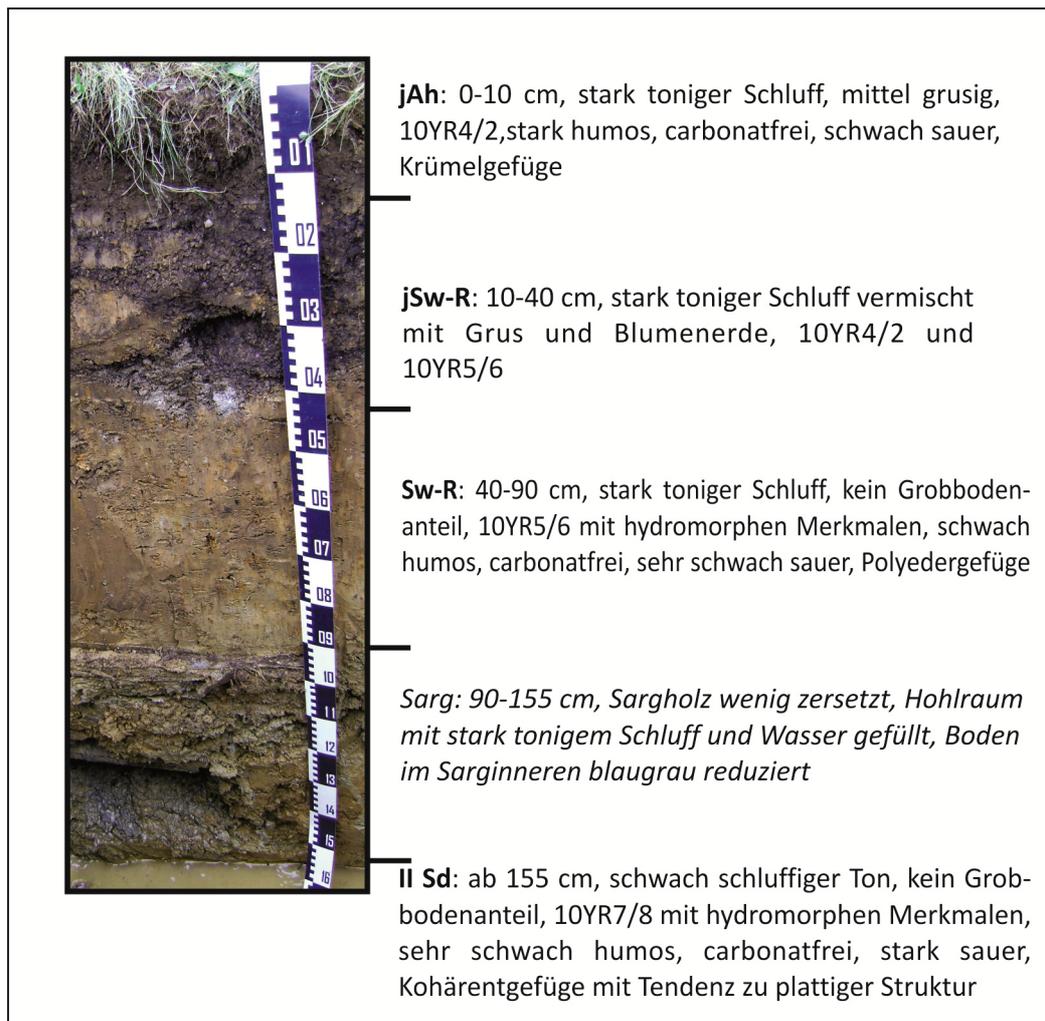


Abb. 63: Leitprofil D, Friedhof BW3, Pseudogley-Rigosol (SS-YY) aus Löss über Rötton

Bodenchemische Kennwerte

Die Bodenreaktion in der Deckschicht ist sehr schwach sauer. Die Deckschicht schwach und die Filterschicht sehr schwach humos. Die KAK_{pot} der Filterschicht (IISd) ist hoch.

Tab. 38: Leitprofil D, Pseudogley-Rigosol aus Löss über Rötton, Friedhof BW3, bodenchemische Kennwerte

Horizont	pH-Wert (in $CaCl_2$)	$CaCO_3$ [%]	C_{org} [%]	N_t [%]	KAK_{pot} [$cmol_c\ kg^{-1}$]	austauschbare Kationen [$cmol_c\ kg^{-1}$]					
						H^+	Al^{3+}	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
jAh	6,0	-	2,9	0,22	17,2	0,01	0,03	0,1	0,1	6,6	0,9
Sw-R	6,5	-	0,6	0,06	9,4	0,01	0,02	0,1	0,1	3,9	0,8
II Sd	4,3	-	0,2	0,04	17,5	0,01	2,7	0,3	0,2	3,8	3,5

4.3.4 Bodenphysikalische Kennwerte der Leitprofile

An der bei Anlage der Leitprofile aus Grabwänden, Deckschichten und Filterschichten entnommenen ungestörten Bodenproben wurden ρ_t , Porengrößenverteilung, k_f und k_l gemessen sowie die ungesättigte Wasserleitfähigkeitsfunktion bestimmt. Aus den gemessenen k_f -Werten und dem ε_a bei unterschiedlicher Vorentwässerung wurden C_2 - und C_3 -Indices sowie das blockierte Porenvolumen bestimmt.

Trockenrohdichte (ρ_t)

Die ρ_t der untersuchten Deckschichten sind mittel bis gering, die Grabwände und Filterschichten weisen mittlere bis hohe ρ_t auf (Abb. 64).

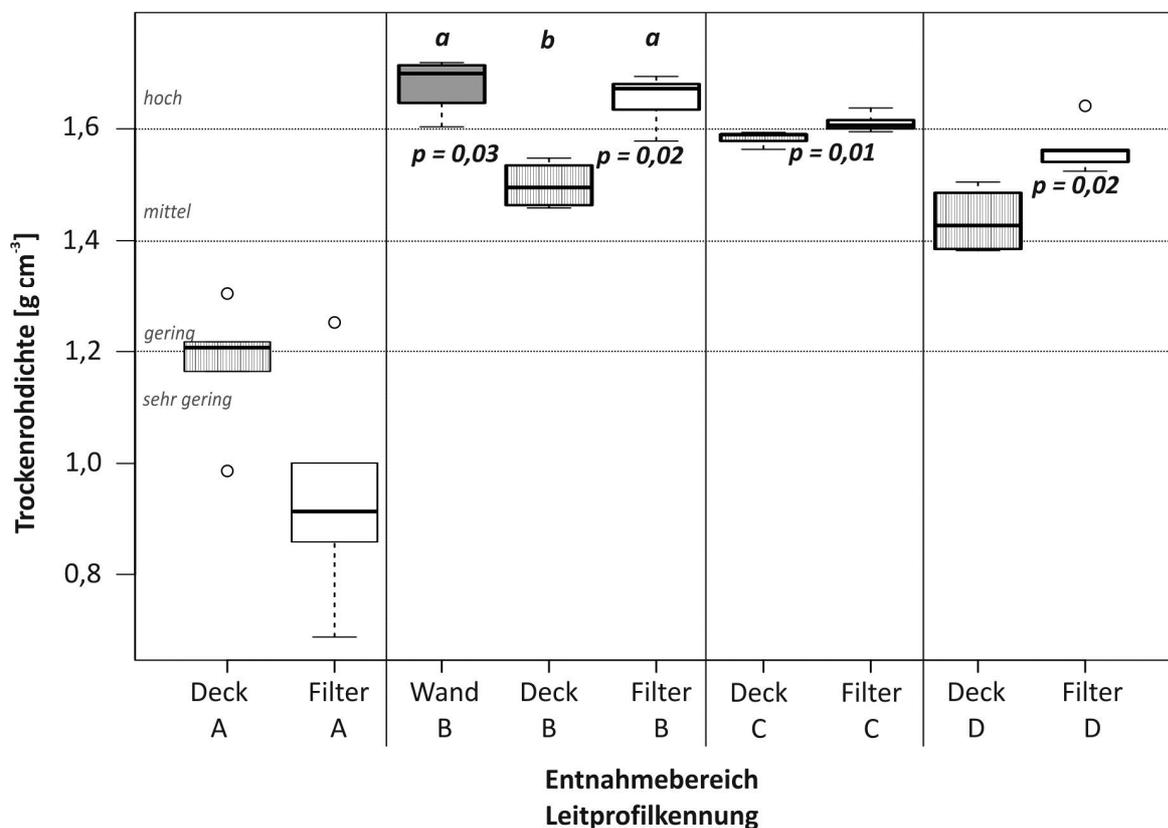


Abb. 64: Trockenrohdichten (ρ_t), Leitprofile A (SH1), B (SH1), C (BE1) und D (BW3), Einstufung nach KA5 (Ad-hoc-AG Boden 2005), bei signifikanten Unterschieden innerhalb eines Leitprofils Box fett umrandet und Angabe des p-Werts, Mann-Witney U-test, bei Leitprofil B kennzeichnen unterschiedliche Buchstaben signifikante Unterschiede

Bei den Leitprofilen B, C und D sind die ρ_t der Deckschichten signifikant niedriger als die der Filterschichten. Bei Leitprofil B ist die ρ_t der Grabwand niedriger als die der Filterschicht, dieser Unterschied ist jedoch nur sehr gering. Einzig in der aus Niedermoortorf bestehenden Filterschicht in Leitprofil A ist die ρ_t sehr gering und somit niedriger als die der Deckschicht.

Porengrößenverteilung

Leitprofil A verfügt über ein sehr hohes GPV und eine hohe LK (Tab. 39). Die FK der Deckschicht ist hoch und entspricht einem Wassersättigungsgrad (WSG) von 69% des GPV. In Leitprofil B ist das GPV in Grabwand und Filterschicht gering, in der Deckschicht mittel. Die Deckschicht verfügt im Vergleich zur Grabwand über eine höhere LK und FK. In Leitprofil C ist das GPV in Deckschicht und Filterschicht mittel, die LK ist sehr hoch, die Anteile der Mittelporen (MP) und Feinporen (FP) sind gering. Deckschicht und Filterschicht in Leitprofil D weisen hohe FP-Anteile auf, die GPV sind mittel, die LK sehr gering. Bei FK beträgt der WSG der Deckschicht hier noch 95% des Gesamtporenvolumens.

Tab. 39: Gesamtporenvolumen (GPV), Luftkapazität (LK), Feldkapazität (FK), Wassersättigungsgrad bei Feldkapazität (WSG bei FK), Anteil enger Grobporen (eGP), Mittelporenanteil (MP) und Feinporenanteil (FP), Leitprofile A (SH1), B (SH1), C (BE1) und D (BW3)

Leitprofil	Entnahmebereich	GPV [Vol-%]	LK [Vol-%]	FK [Vol-%]	WSG bei FK [% von Θ_s]	eGP [Vol-%]	MP [Vol-%]	FP [Vol-%]
A	Deckschicht	56	17	39	69	9	4	26
A	Filterschicht	62	20	42	67	5	4	33
B	Grabwand	36	10	26	72	12	10	4
B	Deckschicht	44	17	27	61	9	11	7
B	Filterschicht	38	4	34	90	6	23	5
C	Deckschicht	40	30	10	24	4	2	4
C	Filterschicht	39	27	12	33	6	2	4
D	Deckschicht	43	2	41	95	2	10	29
D	Filterschicht	45	1	44	97	1	9	34

Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f)

In Leitprofil A ist die k_f der Deckschicht sehr hoch und die der Filterschicht gering, der Unterschied ist signifikant. In Leitprofil B ist die k_f der Deckschicht mittel, die der Grabwand mittel bis gering und die der Filterschicht gering. In Leitprofil C ist die k_f extrem hoch. In Leitprofil D ist die k_f in Deck- und Filterschicht sehr gering.

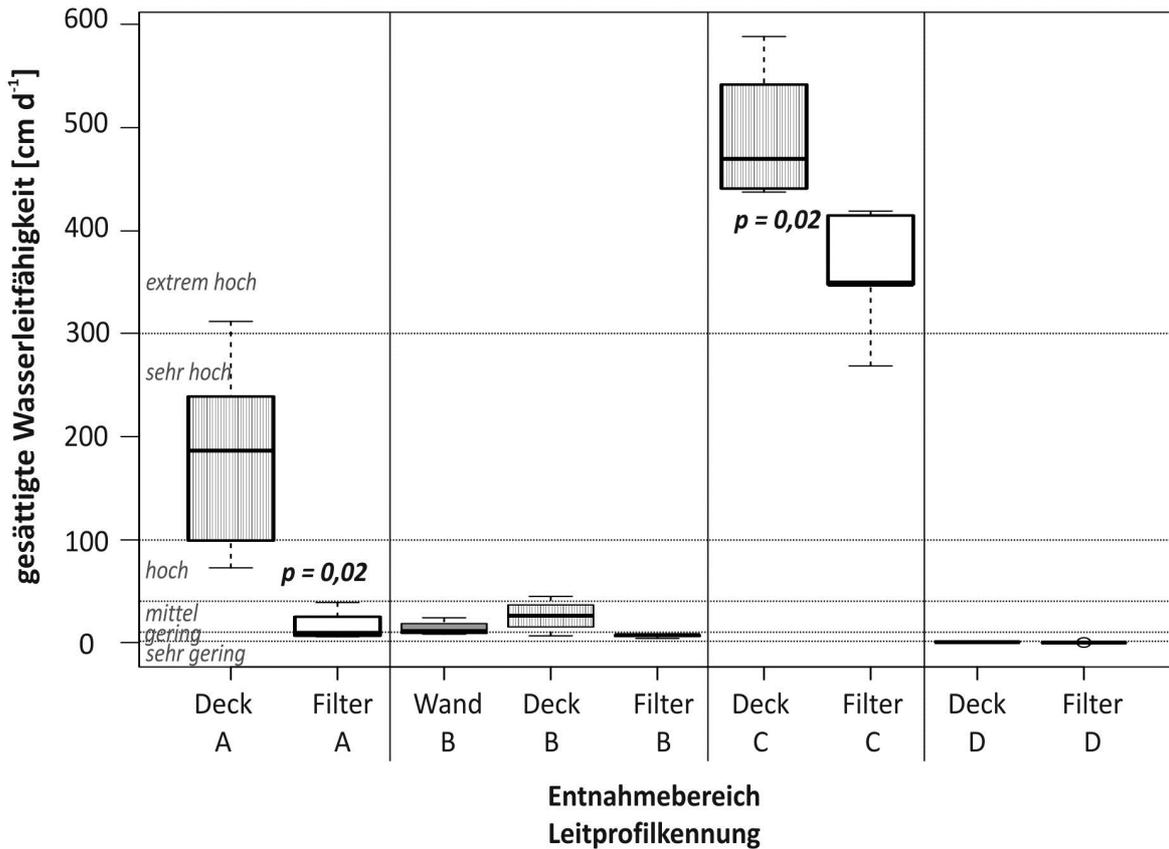


Abb. 65: Gesättigte Wasserleitfähigkeit, Leitprofile A (SH1), B (SH1), C (BE1) und D (BW3), Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005), bei signifikanten Unterschieden innerhalb eines Leitprofils Box fett umrandet und Angabe des p-Werts, Mann-Witney U-test

Ungesättigte Wasserleitfähigkeit (k_w)

Die k - ψ - Beziehungen werden zur besseren Übersicht für jedes Leitprofil gesondert aufgeführt.

In Leitprofil A zeigen die Wasserleitfähigkeitsfunktionen (Abb. 66) der Deckschicht und der Filterschicht einen relativ flachen Kurvenverlauf, wobei die Wasserleitfähigkeit der Filterschicht ab pF 2,2 langsamer sinkt als die der Deckschicht. In diesem Profil bleiben mit zunehmender Austrocknung folglich in Deckschicht und Filterschicht noch relativ lange wasserleitfähige Fließwege erhalten.

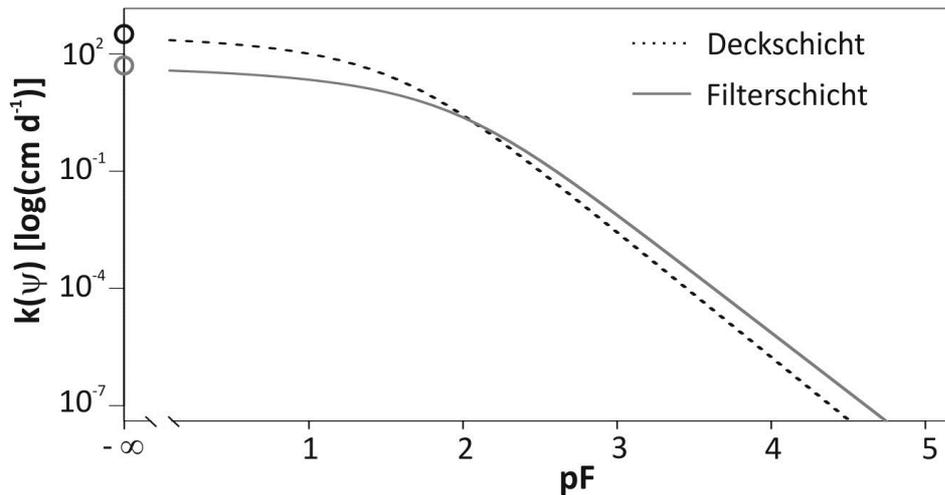


Abb. 66: Leitprofil A, Friedhof SH1, Wasserleitfähigkeitsfunktion von Deckschicht und Filterschicht, Symbole bei $pF = -\infty$ entsprechen der gesättigten Wasserleitfähigkeit

In Leitprofil B bleibt die Wasserleitfähigkeit (Abb. 67) der Grabwand bis $pF 2,5$ relativ konstant und nimmt dann schnell ab. In der Filterschicht nimmt die Wasserleitfähigkeit erst ab ca. $pF 3$ ab. Die Wasserleitfähigkeit der Deckschicht, die bei Wassersättigung höher als die der Grabwand ist, nimmt schon ab $pF 0,1$ kontinuierlich ab, nimmt aber mit zunehmender Austrocknung insgesamt deutlich langsamer ab als in Grabwand und Filterschicht. In der Deckschicht dieses Erdgrabes bleiben mit zunehmender Austrocknung deutlich länger wasserleitfähige Fließwege erhalten als in der Grabwand in gleicher Tiefe. Das Freiwerden von kontinuierlich wasserfreien Fließwegen für Sauerstoff erscheint in der Deckschicht somit im Vergleich zur Grabwand verzögert zu sein.

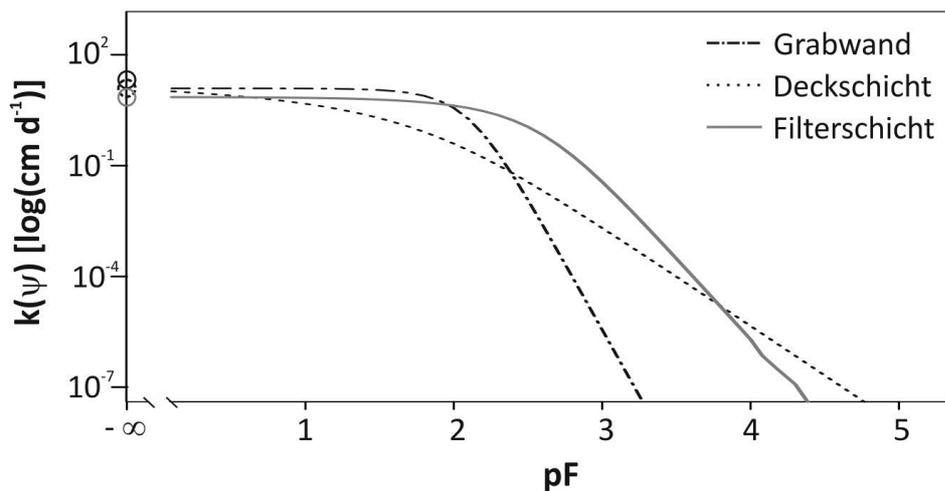


Abb. 67: Leitprofil B, Friedhof SH1, Wasserleitfähigkeitsfunktion von Deckschicht, Grabwand und Filterschicht, Symbole bei $pF = -\infty$ entsprechen der gesättigten Wasserleitfähigkeit

In Leitprofil C sinkt die Wasserleitfähigkeit (Abb. 68) der Deckschicht schon bei beginnender Entwässerung leicht, mit zunehmender Entwässerung wird der Kurvenverlauf steiler. Die Wasserleitfähigkeit der Filterschicht bleibt bis ca. pF 1,5 relativ konstant und sinkt dann bei zunehmender Austrocknung schnell ab. Im Bereich der Deckschicht bleiben mit zunehmender Austrocknung länger wasserleitfähige Fließwege erhalten als in der Filterschicht.

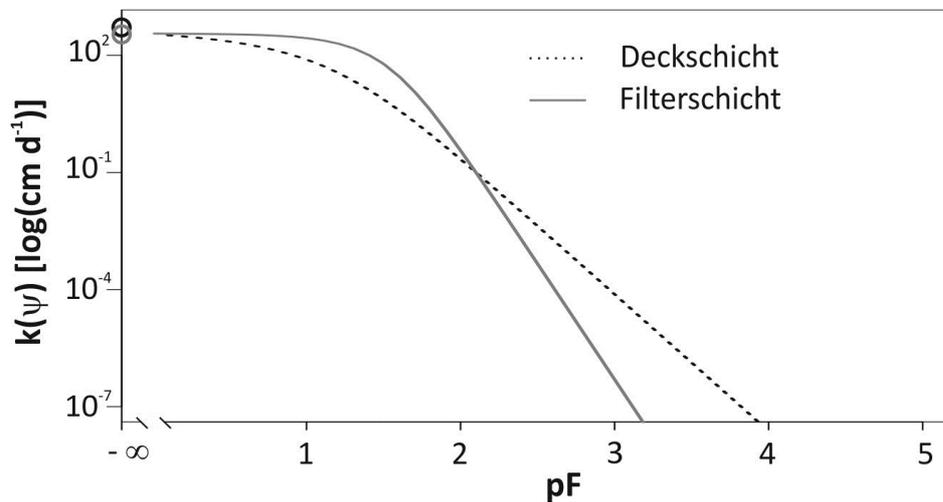


Abb. 68: Leitprofil C, Friedhof BE1, Wasserleitfähigkeitsfunktion von Deckschicht /Symbole bei $pF -\infty$ entsprechen der gesättigten Wasserleitfähigkeit

In Leitprofil D ist die Wasserleitfähigkeit (Abb. 69) der Deckschicht bei Wassersättigung höher als die der Filterschicht, nimmt aber schon bei beginnender Austrocknung leicht ab. Ab $pF 1,8$ wird die Kurve steiler, ist aber insgesamt flacher als die der Filterschicht. Die Wasserleitfähigkeit der Filterschicht bleibt bis ca. $pF 2,5$ relativ konstant und fällt danach stark ab. Die Anzahl der kontinuierlichen Fließwege für Wasser nimmt folglich in der Deckschicht früher ab, es bleiben aber mit zunehmender Austrocknung länger wasserleitfähige Fließwege erhalten als in der Filterschicht.

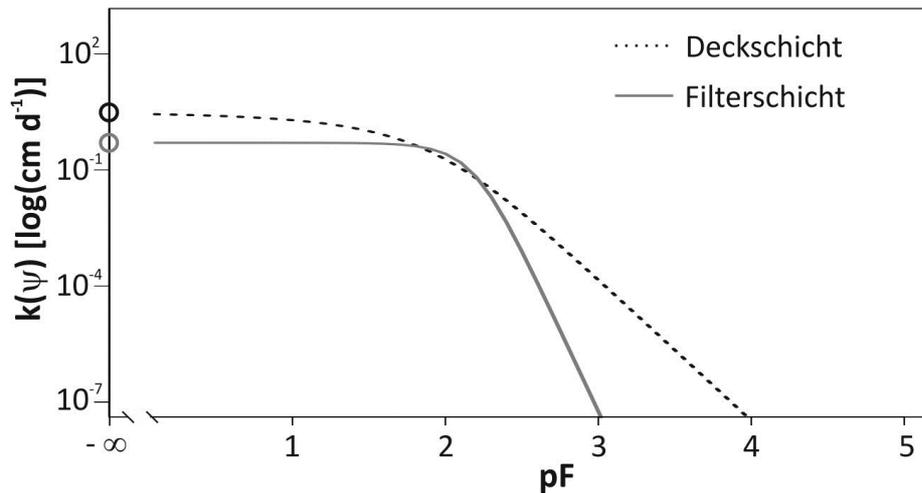


Abb. 69: Leitprofil D, Friedhof BW3, Wasserleitfähigkeitsfunktion von Deckschicht / Filterschicht, Symbole bei pF $-\infty$ entsprechen der gesättigten Wasserleitfähigkeit

Luftleitfähigkeit (k_l)

Die k_l , gemessen nach Vorentwässerung auf -60 hPa, ist in den Leitprofilen B, C und D sehr gering, in Leitprofil A in der Deckschicht mittel und in der Filterschicht gering (Abb. 70, a). Zur Verdeutlichung der Werte von Leitprofil B, C und D sind diese nochmals separat mit angepasster Skalierung aufgeführt (Abb. 70, a, grauer Kasten). In Leitprofil B weist die Deckschicht höhere k_l auf als die Grabwand und die Filterschicht. In Leitprofil C ist die k_l der Deckschicht im Median etwas geringer als die der Filterschicht, die Streuung der Messwerte ist allerdings hoch. Die Deckschicht von Leitprofil D weist geringfügig höhere k_l auf als die Filterschicht, die bei -60 hPa über keine messbare k_l verfügt. Die Unterschiede zwischen den k_l der unterschiedlichen Entnahmebereiche innerhalb eines Leitprofils sind in keinem Fall statistisch signifikant und somit lediglich als Trends anzusehen.

Nach Vorentwässerung auf -300 hPa (Abb. 70, b) ist die k_l an Leitprofil A in der Deckschicht trotz einer leichten Zunahme mittel. Die k_l von Leitprofil B und D ist die k_l (im Median) auch nach Vorentwässerung auf -300 hPa sehr gering. In Leitprofil B ist die k_l in der Grabwand um 7 cm d⁻¹ und in der Deckschicht um 12 cm d⁻¹ gestiegen. In Leitprofil C ist die k_l in der Filterschicht gering und in der Deckschicht mittel.

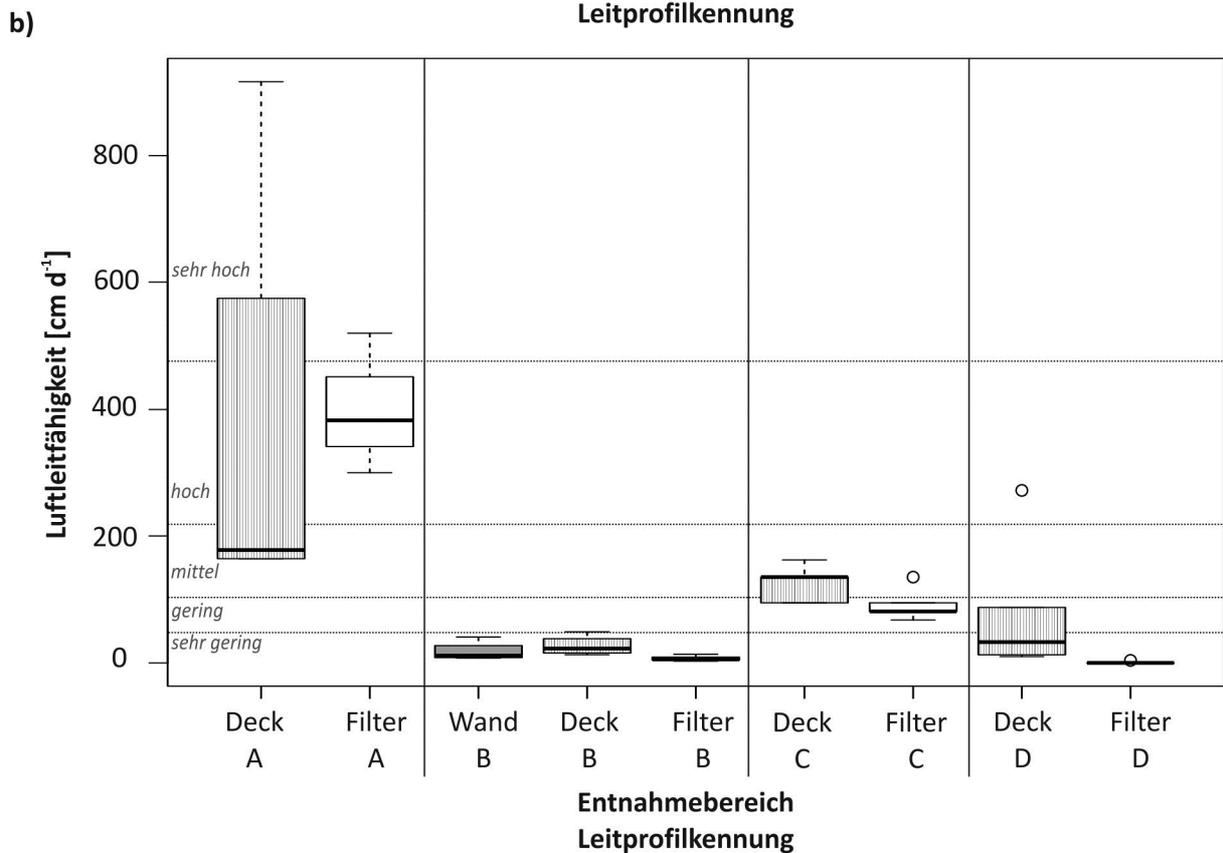
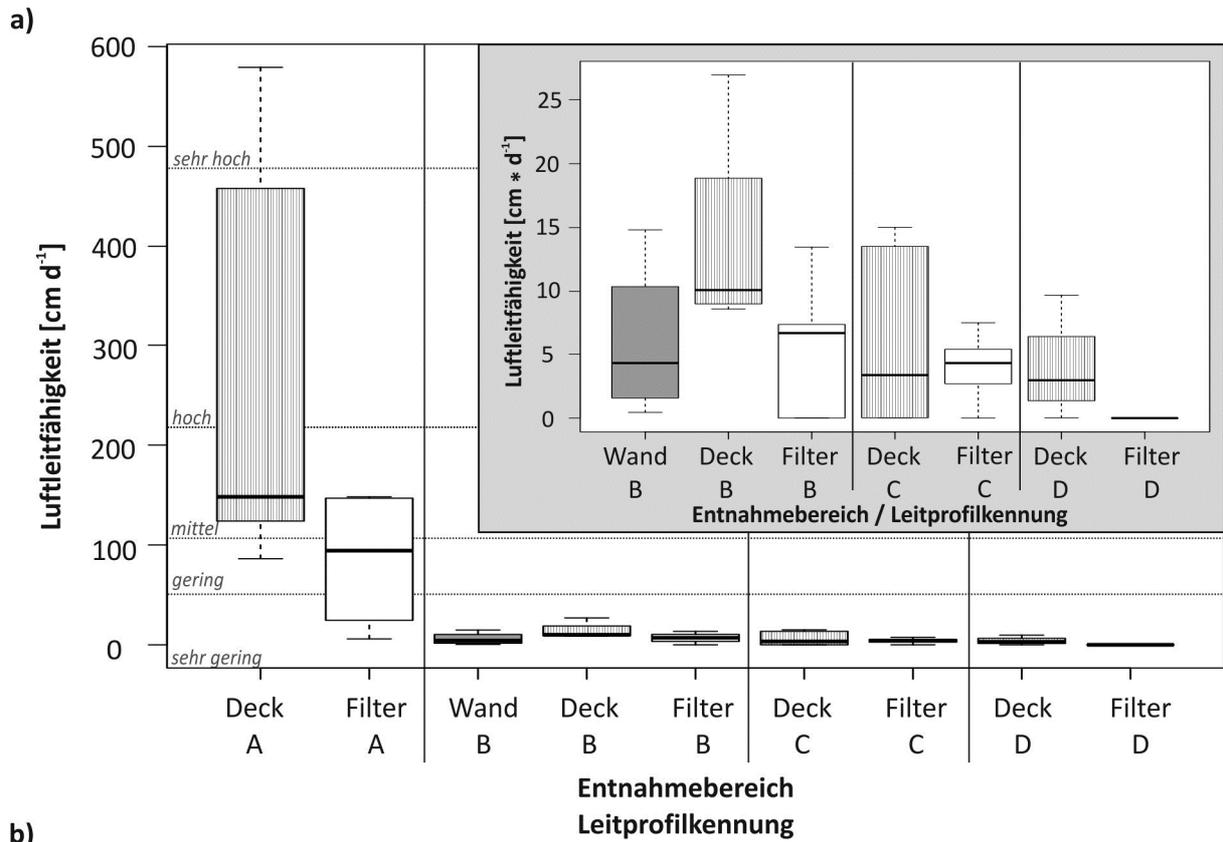


Abb. 70: Luftleitfähigkeit bei a: Feldkapazität (-60 hPa) und b: -300 hPa, Leitprofile A (SH1), B (SH1), C (BE1) und D (BW3), Einstufung nach DVWK Merkblatt 235/1997 (DVWK 1997)

Porenorganisation

In Leitprofil A sind sowohl die C_2 - als auch die C_3 - Indices (Abb. 71) der Deckschicht höher als die der Filterschicht. Da dies trotz der in der Filterschicht für den Gastransport günstigeren Porengrößenverteilung (höheres GPV, höhere LK, vgl. Tab. 39) der Fall ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Porenorganisation in der Deckschicht für den Gasaustausch günstiger ist. In Übereinstimmung mit den höheren C_3 -Indices, ist das blockierte Porenvolumen (Abb. 72) in der Deckschicht signifikant geringer als in der Filterschicht.

In Leitprofil B sind die C_2 -Indices der Deckschicht minimal höher als die der Grabwand und Filterschicht, was durch die für den Gasaustausch günstigere Porengrößenverteilung der Deckschicht bedingt ist. Die C_3 - Indices der Deckschicht und Grabwand sind im Median gleich, so dass anhand dieser Werte in dem gestörten Material der Deckschicht im Vergleich zur Grabwand keine nachteiligere Porenorganisation nachgewiesen werden kann. Das ϵ_B in der Deckschicht ist jedoch etwa 5 % höher als in Grabwand und Filterschicht, die Streuung der Messwerte ist allerdings hoch und die Unterschiede sind nur als Trends zu sehen. Die C_3 -Indices der Filterschicht sind höher als die von Grabwand und Deckschicht. Das Material der Filterschicht ist tonreicher (vgl. Tab. 33). Deshalb tritt hier bei fortschreitender Entwässerung mehr Schrumpfung und Rissbildung auf, und das Porensystem kann effektiver zum Gastransport beitragen.

In Leitprofil C unterschieden sich die C_2 - und C_3 - Indices von Deckschicht und Filterschicht kaum, lediglich bei den C_2 - Indices konnten in der Filterschicht geringfügig höhere Werte festgestellt werden. Das ϵ_B ist in der Filterschicht etwas höher als in der Deckschicht. Dies kann durch eine partielle Verkittung von Sandpartikeln mit den in der Filterschicht vorhandenen Eisenoxiden bedingt sein (vgl. Abb. 61). In Leitprofil D weist die Deckschicht höhere C_2 -Indices auf als die Filterschicht, dieser Unterschied ist bei den C_3 - Indices noch stärker ausgeprägt. Dies spiegelt zum einen die leicht günstigere Porengrößenverteilung der Deckschicht wieder, deutet aber auch auf eine bessere Porenorganisation in der Deckschicht hin. Das ϵ_B ist in der Deckschicht im Median geringfügig höher als in der Filterschicht. Die Streuung der Messwerte zeigt jedoch, dass dieser Unterschied nur als schwacher Trend zu sehen ist.

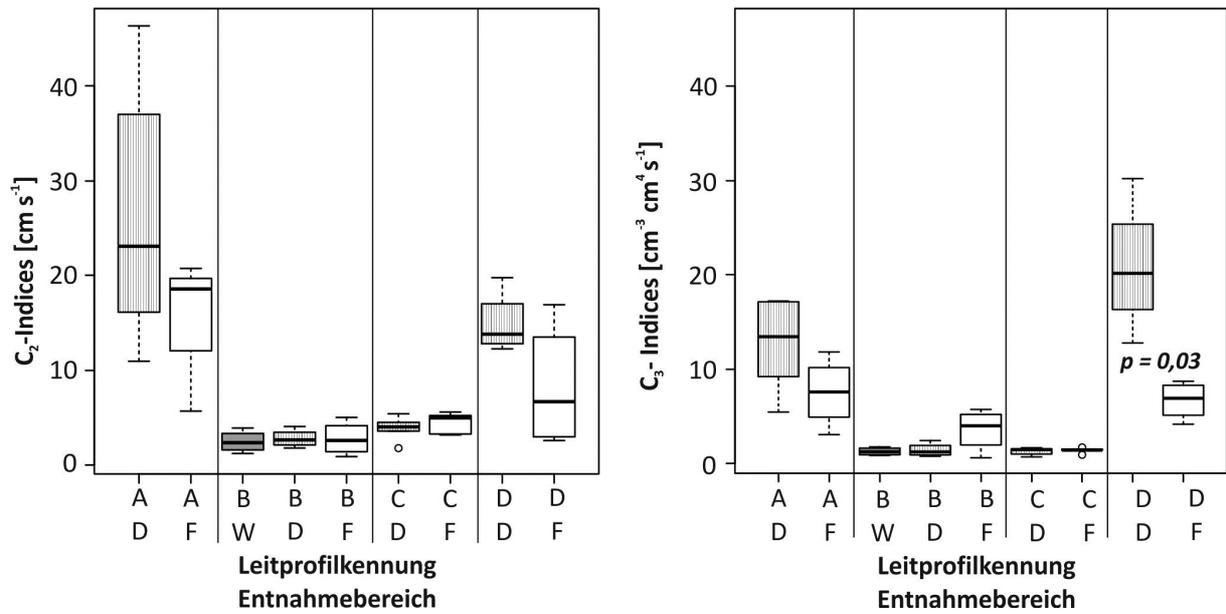


Abb. 71: C_2 - und C_3 -Indices nach Groenevelt et al. (1984) in Deckschichten (D), Grabwand (W) und Filterschichten (F) der Leitprofile A (SH1), B (SH1), C (BE1) und D (BW3), bei signifikanten Unterschieden innerhalb eines Leitprofils Box fett umrandet und Angabe des p-Werts, Mann-Witney U-test

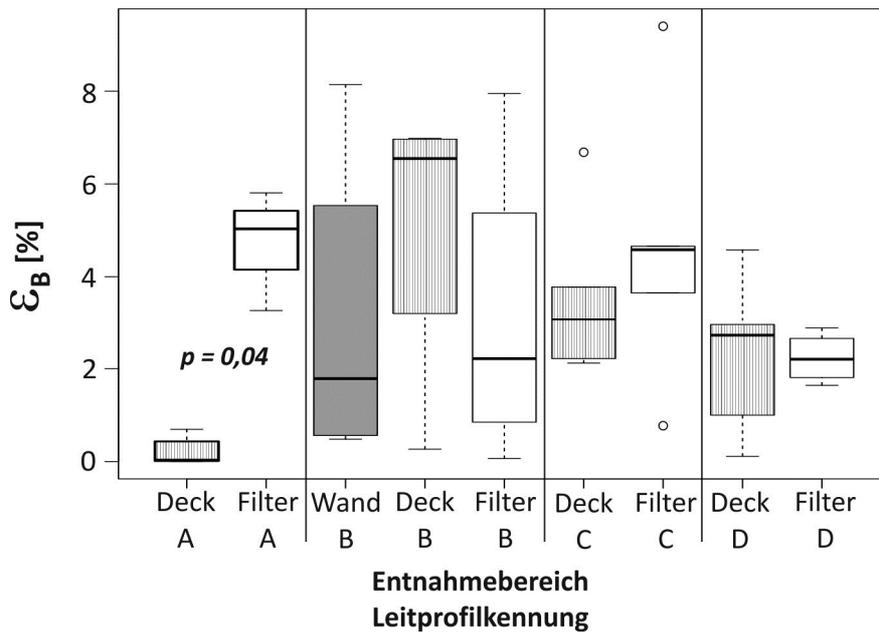


Abb. 72: Blockiertes Porenvolumen (ϵ_B), Leitprofile A (SH1), B (SH1), C (SH2), D (BE1) und E (BW3), bei signifikanten Unterschieden innerhalb eines Leitprofils Box fett umrandet und Angabe des p-Werts, Mann-Witney U-test

Kausale Zusammenhänge zwischen den bodenphysikalischen Kennwerten

Die k_i ist umso höher, je höher k_f , GPV und LK sind und sinkt mit zunehmender ρ_t (Tab. 40). Die ρ_t beeinflusst außerdem k_f , GPV, LK und FK negativ, wobei der Einfluss auf das Gesamtporenvolumen am stärksten ist.

Tab. 40: Spearmans Rangkorrelationskoeffizient r_s für die Parameter gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f), mittlere Luftleitfähigkeit aus Messungen nach Vorentwässerung auf -30 hPa, -60 hPa, -150 hPa, -300 hPa und -500 hPa (k_i), Gesamtporenvolumen (GPV), Luftkapazität (LK), Feldkapazität (FK) und Trockenrohdichte (ρ_t), Messwerte von Leitprofil A, B, C und D

r_s	k_f					
k_i	0,65	k_i				
GPV	0,18	0,46	GPV			
LK	0,86	0,56	0,17	LK		
FK	-0,55	-0,01	0,60	-0,58	FK	
ρ_t	-0,24	-0,58	-0,95	-0,24	-0,52	ρ_t

4.4 Monitoring auf Friedhöfen

Auf den Standorten SH1 (n=2), BE1 (n=1) und BW3 (n=1) wurden insgesamt vier baugleiche Monitoringstationen installiert. Die Monitoringstationen werden entsprechend der dazugehörigen Leitprofile (Vgl. Kapitel 4.3) als Station A, B, C und D bezeichnet. Die detaillierte Beschreibung der Installationen erfolgte in Kap. 3.1.3.

Für die Darstellung der ψ_m wurde in eine lineare Interpolation zwischen den Messtiefen vorgenommen. Für die Darstellung der aus den Eh und den pH-Werten errechneten rH-Werte ist eine Interpolation zwischen den Messtiefen nicht sinnvoll, da die Eh im Boden sehr starken räumlichen Variationen unterliegen (zum Beispiel bei Messung in Interaggregat- oder Intraaggregatraum) und die vorliegenden Messwerte jeweils nur einen räumlich eng begrenzten Bodenbereich repräsentieren.

4.4.1 Friedhof SH1

Auf dem Friedhof Sh1 wurden zwei Monitoringstationen installiert.

4.4.1.1 Monitoringstation A

Die Monitoringstation A wurde in ca. 3 Meter Abstand zu Leitprofil A (GG-YY) installiert. Die hohen k_f der Deckschicht (vgl. Abb. 65) und der flache Verlauf der k - ψ -Kurve (vgl. Abb. 66) spiegeln sich in der schnellen und deutlichen Reaktion auf Niederschlagsereignisse, vor allem in feuchtem Zustand ($\psi_m > -60$ hPa) wider (Abb. 73 und Abb. 74). Die Deckschicht trocknet im April und Mai 2011 unter FK aus, ist aber bei 28% der Messwerte wassergesättigt (Tab. 41). Der Standort ist grundwasserbeeinflusst, der Sargbereich befindet sich im Grundwasserschwankungsbereich und zeigt im Jahresverlauf bei 87% der Messwerte vollständige Wassersättigung während die Filterschicht permanent wassergesättigt ist.

Entsprechend sind 56% bzw. 100% der rH-Werte im anoxischen Bereich (Abb. 75, Tab. 41). Die Obergrenze des geschlossenen Kapillarsaumes (Abb. 75) wurde aus den gemessenen Wasserdrücken (positiven ψ_m) unter Berücksichtigung der Messtiefe berechnet. Es konnte eine gute Übereinstimmung der anhand von Messwerten in 220 cm, 180 cm und 135 cm Tiefe abgeleiteten Obergrenzen des geschlossenen Kapillarsaumes festgestellt werden (root-mean-square-error: 5,3 cm). Vor diesem Hintergrund und um Sickerwassereinflüsse so weit wie möglich auszuschließen, wurde die in Abb. 75 dargestellte Obergrenze des geschlossenen Kapillarsaumes allein anhand der in 220 cm Tiefe gemessenen ψ_m berechnet. Der Zusammenhang zwischen dem Anstieg des Grundwasserspiegels und somit des geschlossenen Kapillarsaumes und dem schnellen Absinken der rH-Werte in den von der zunehmenden Wassersättigung betroffenen Messtiefen ist vor allem im September 2010 und Dezember 2010 bis Januar 2011 deutlich zu erkennen.

Die Bodentemperatur (Abb. 76, Tab. 41) liegt im Mittel bei 11 bzw. 10°C, die Temperaturamplitude sinkt mit zunehmender Tiefe von 17 °C auf 8 °C. Aufgrund der permanenten Wassersättigung ist die Temperaturamplitude ($T_{\max} - T_{\min}$) der Filterschicht an diesem Standort relativ gering.

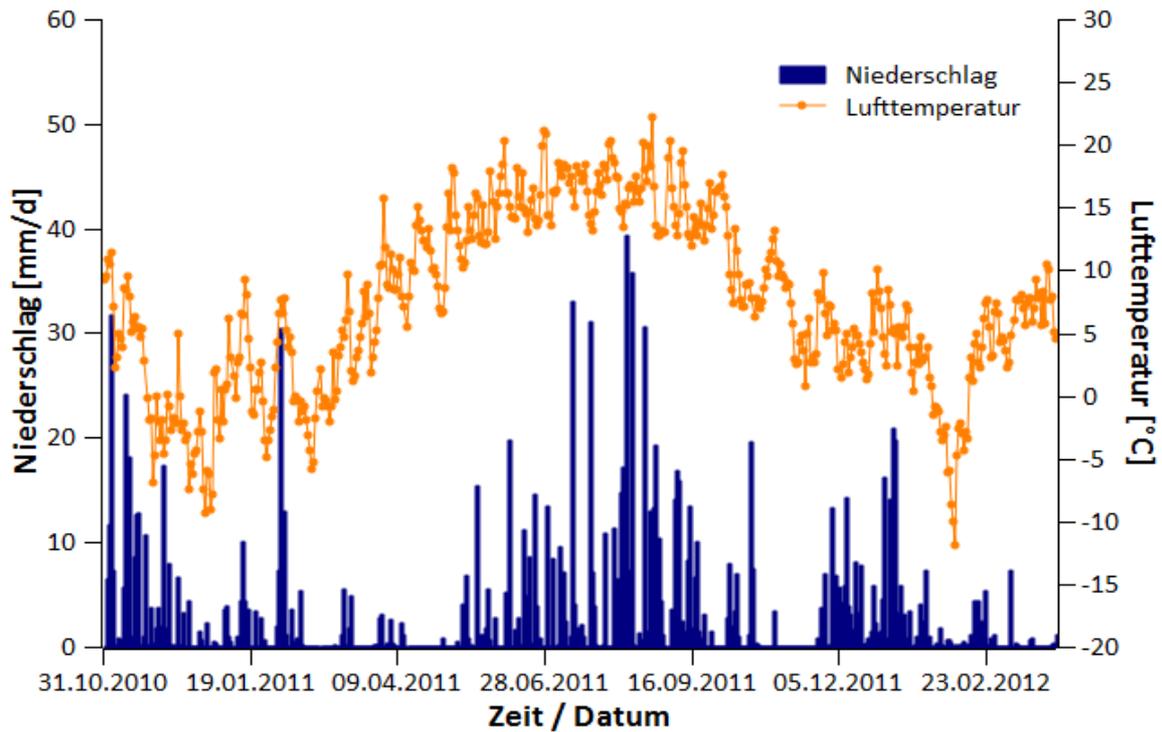


Abb. 73: Monitoringstation A, Friedhof SH1, Tagesniederschläge und Lufttemperatur in 2 m Höhe im Messzeitraum November 2010 bis November 2011 (Daten: DWD, Station Leuchtturm Kiel)

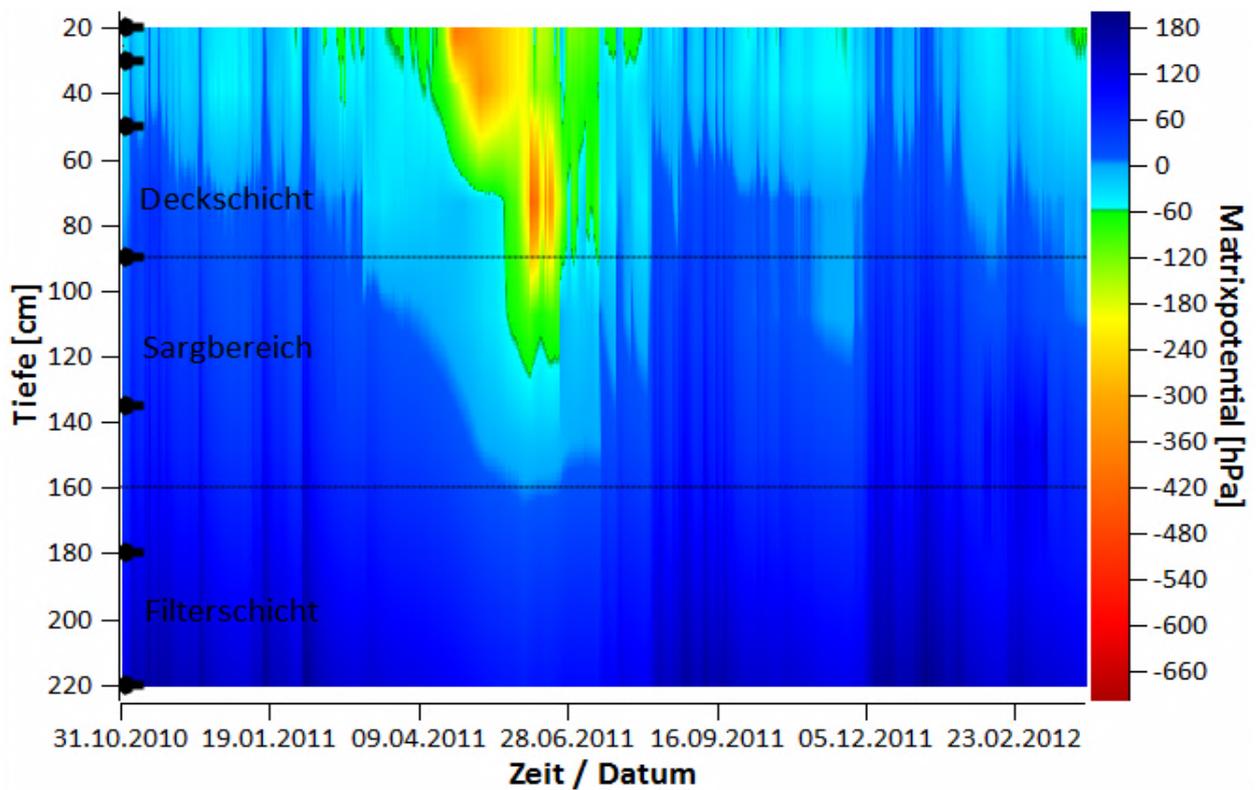


Abb. 74: Monitoringstation A, Friedhof SH1, Matrixpotentiale November 2012 bis April 2012

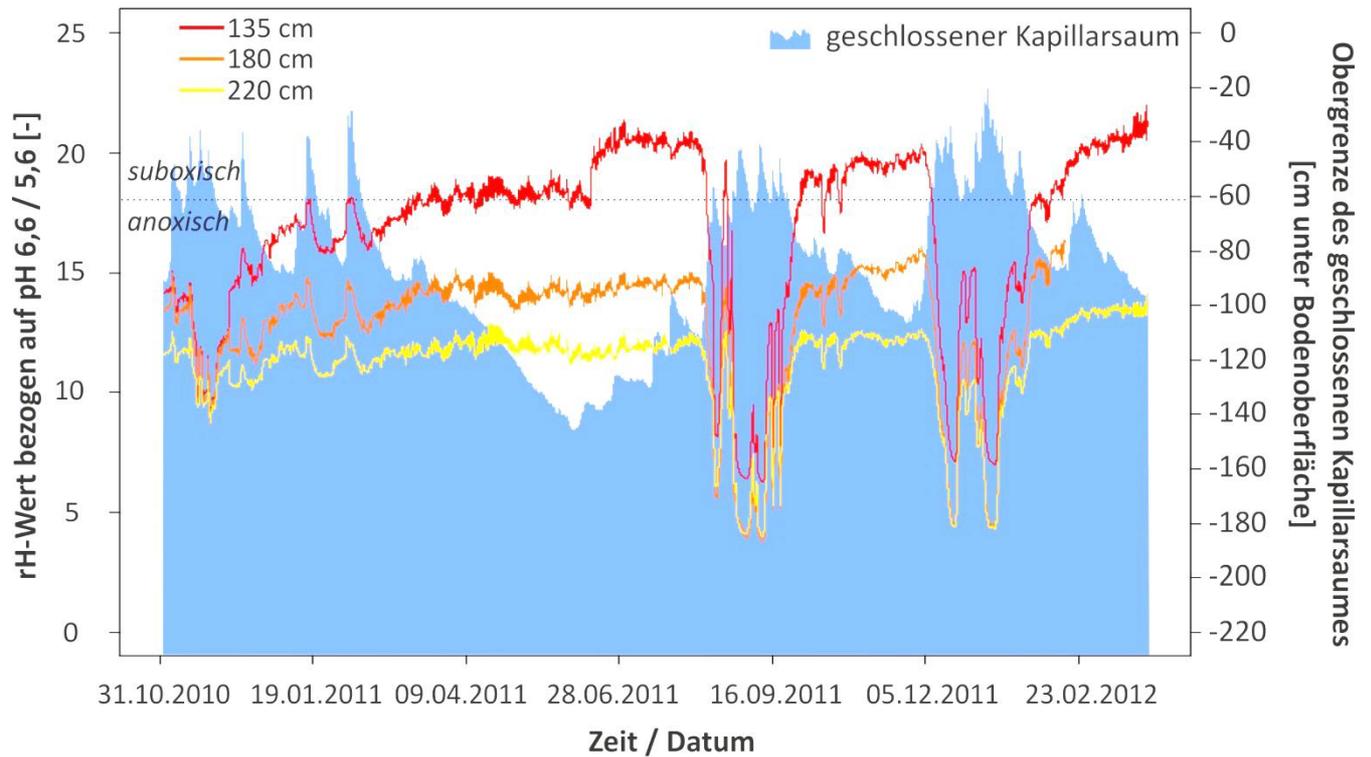


Abb. 75: Monitoringstation A, Friedhof SH1, rH-Werte bezogen auf pH 6,6 (135 cm, Sargbereich) bzw. pH 5,5 (180 cm und 220 cm, Filterschicht) und Obergrenze des geschlossenen Kapillarsaumes im Messzeitraum November 2010 bis April 2012

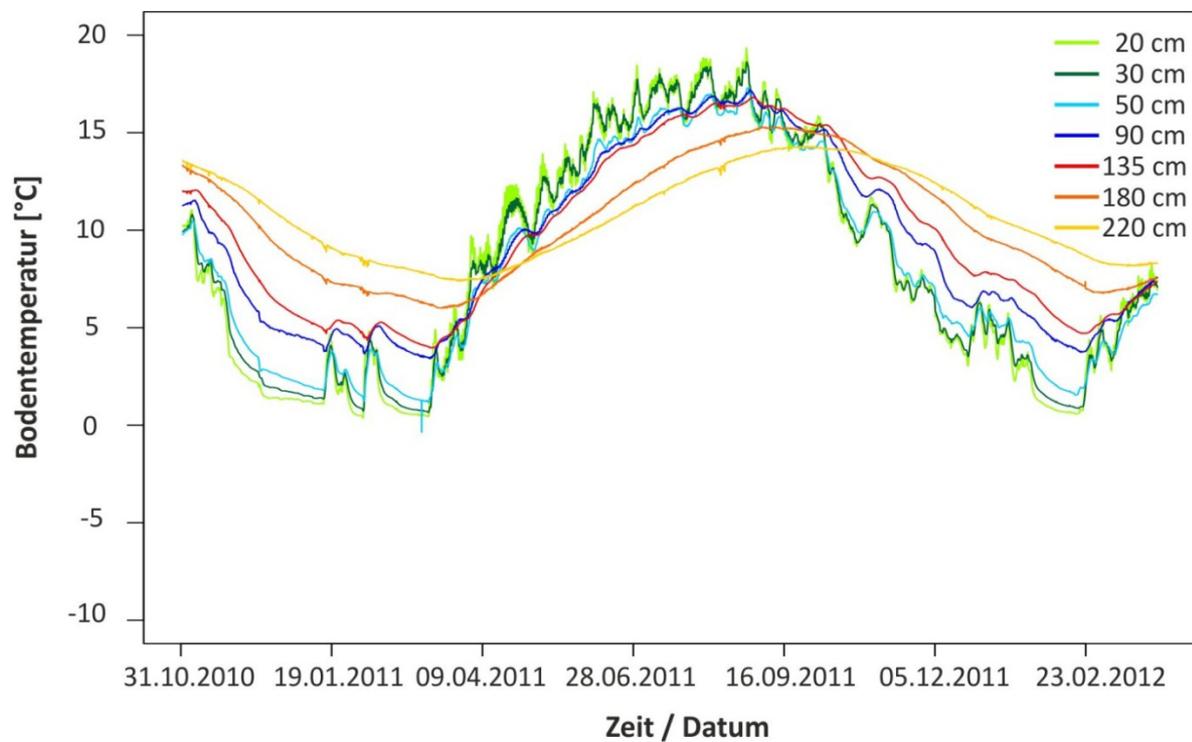


Abb. 76: Monitoringstation A, Friedhof SH1, Bodentemperaturen im Messzeitraum November 2010 bis April 2012

Tab. 41: Monitoringstation A, Friedhof SH1, Übersicht Wasserhaushalt, Temperaturen und Redoxbedingungen, für 365 Tage kontinuierliche Messungen, November 2010 bis November 2011

Schicht (Messtiefen)	Matrixpotential		rH-Wert		Bodentemperatur	
	<-60 hPa [%]	≥ 0 hPa [%]	>28 [%]	<18 [%]	Mittel [°C]	T _{max} - T _{min} [°C]
Deckschicht (20cm, 30 cm, 50 cm und 90 cm)	22	28	-	-	10	17
Sargbereich (135 cm)	0	87	0	56	11	13
Filterschicht (180 cm und 220 cm)	0	100	0	100	11	8

4.3.1.2 Monitoringstation B

Monitoringstation B wurde mit ca. 4 Meter Abstand in derselben Grabreihe installiert, in der das Leitprofil B (SS-YY) angelegt wurde. Die Austrocknung im niederschlagsarmen April und Mai 2011 (Abb. 77) führt an diesem Standort mangels Grundwassereinfluss zu einer deutlich stärkeren Austrocknung als an Monitoringstation A auf demselben Friedhof. Bis in die Filterschicht konnten hier bei 17% der Messwerte Austrocknungen bis unter FK festgestellt werden, so dass die LK für die O₂-Versorgung von Deckschicht und Sargbereich voll ausgenutzt werden konnte (Abb. 78, Grün- Gelb- und Rottöne). Im übrigen Messzeitraum überwiegen in allen drei Schichten ψ_m über -60 hPa, was das Vorhandensein von Stauwasser bestätigt (vgl. Abb. 60). Die Messtiefen 180 cm und 220 cm liegen im Sd-Horizont. Vollständige Wassersättigung tritt an diesem Standort nur sehr vereinzelt und nur in der Deckschicht auf (Tab. 42). Eine längerfristig wassergesättigte Zone wie in dem Pseudogley-Rigosol an Standort BW3 (Leitprofil und Monitoringstation D) ist hier im Messzeitraum nicht vorhanden.

Trotz der relativ feuchten Bedingungen liegen die rH-Werte an diesem Standort sowohl im Sargbereich als auch in der Filterschicht durchweg im oxischen Bereich (Abb. 79, Tab. 42). In den Messtiefen 180 cm und 220 cm steigen die rH-Werte ab Mitte November 2011 auf über 42. Ein rH-Wert von 41,6 entspricht bei pH 7 reinem Sauerstoffgas und sollte in einem feuchten Boden nicht auftreten (vgl. Kap. 5). Im Mai und Juni (Daten nicht gezeigt) sanken die rH-Werte in den Messtiefen 180 cm und 220 cm und erreichten im Juli 2012 wieder das Niveau vom Juli 2011.

Die Bodentemperatur (Abb. 80, Tab. 42) liegt im Mittel bei 9°C bzw. 11°C, die Temperaturamplitude nimmt mit zunehmender Tiefe von 17°C auf 10°C ab.

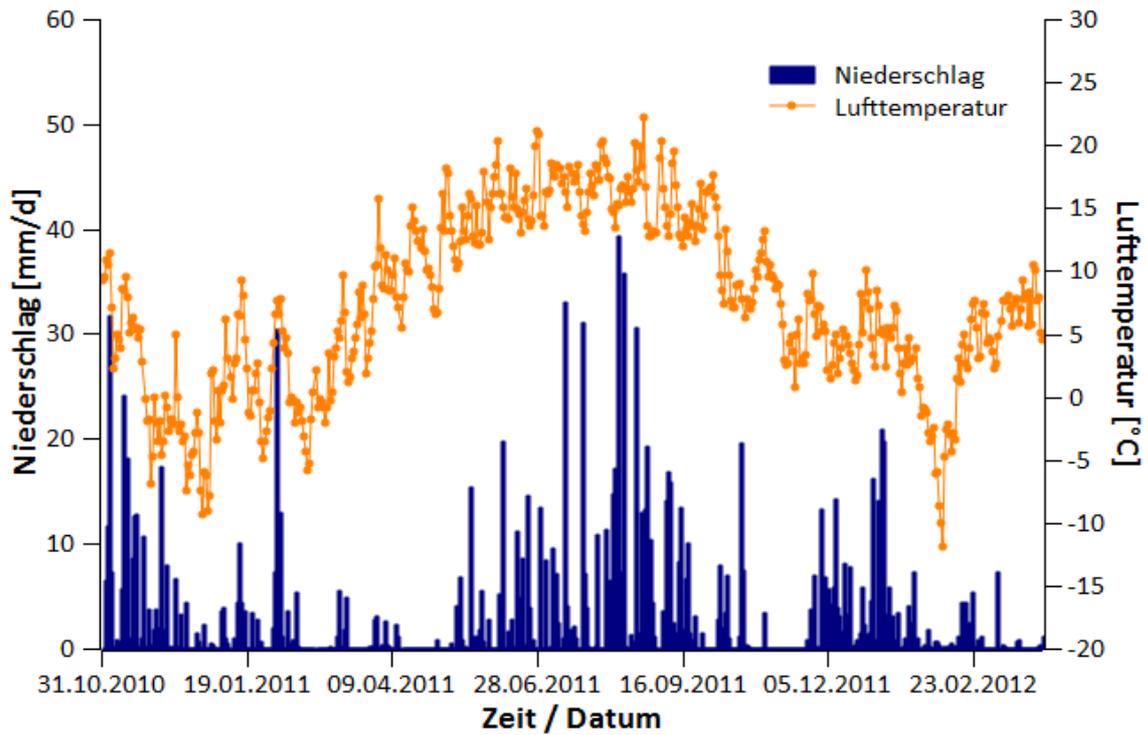


Abb. 77: Monitoringstation B, Friedhof SH1, Tagesniederschläge und Lufttemperatur in 2 m Höhe im Messzeitraum November 2010 bis April 2012 (Daten: DWD, Station Leuchtturm Kiel)

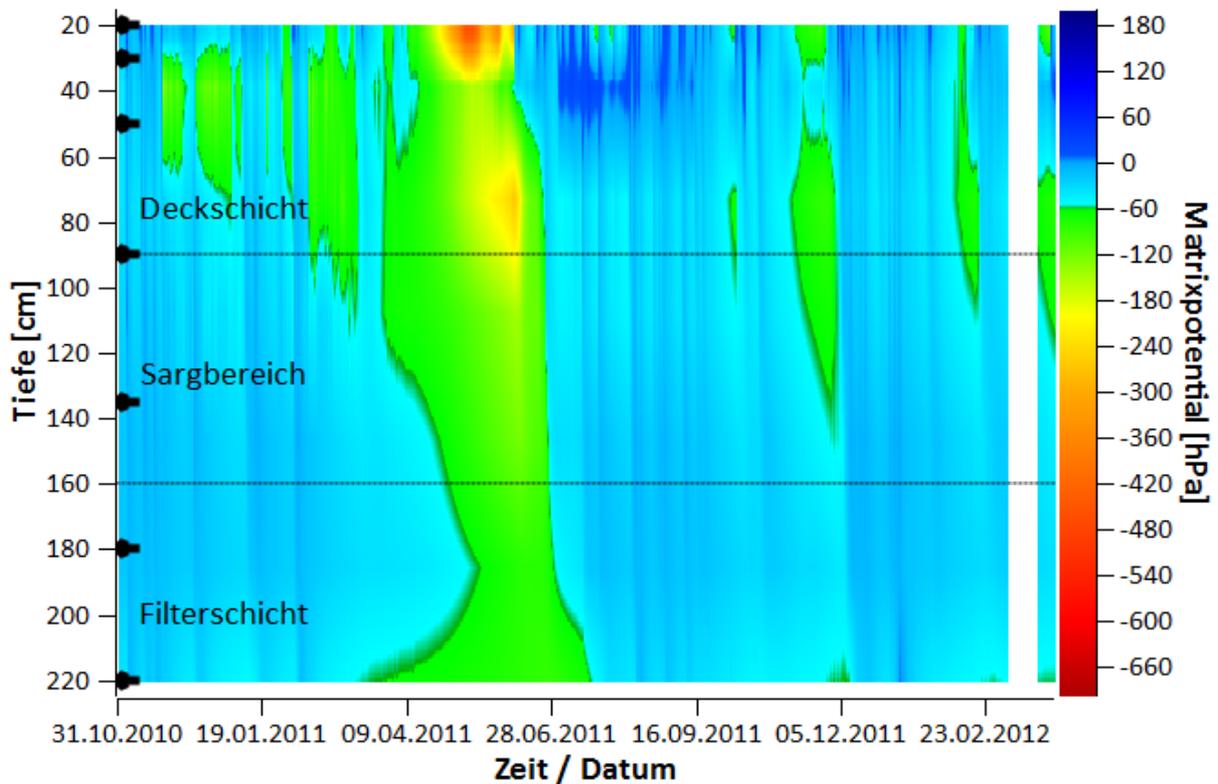


Abb. 78: Monitoringstation B, Friedhof SH1, Matrixpotentiale in 20 bis 220 cm Tiefe, Messzeitraum November 2010 bis April 2012

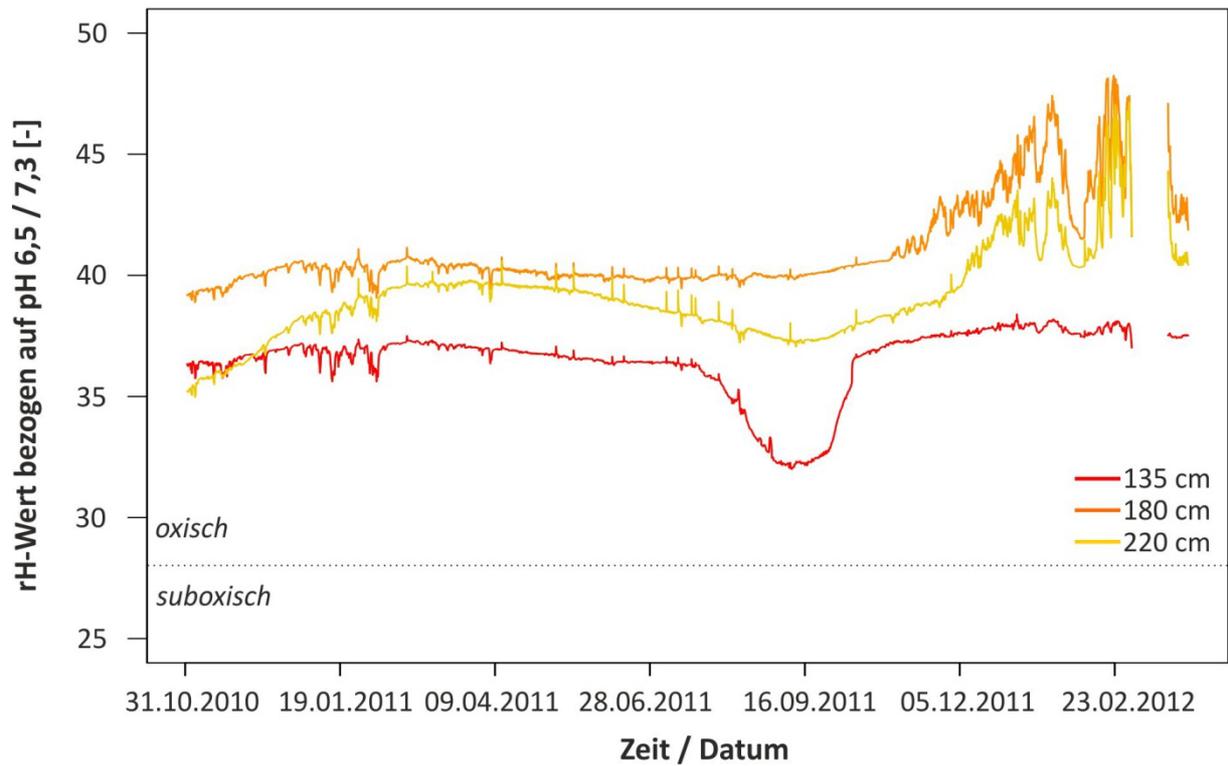


Abb. 79: Monitoringstation B, Friedhof SH1, rH-Werte bezogen auf pH 6,0 (135 cm, Sargbereich) bzw. pH 7,3 (180 cm und 220 cm, Filterschicht) im Messzeitraum November 2010 bis April 2012

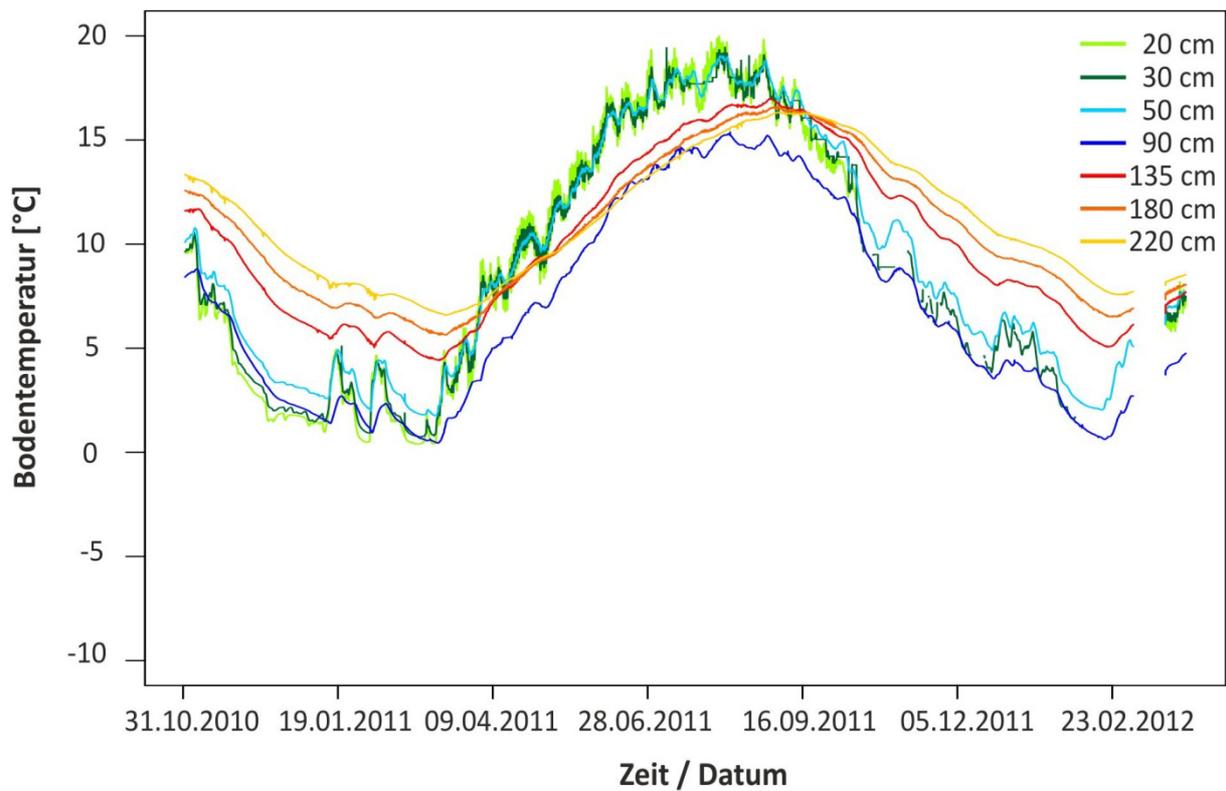


Abb. 80: Monitoringstation B, Friedhof SH1, Bodentemperaturen im Messzeitraum November 2010 bis November 2011

Tab. 42: Monitoringstation B, Friedhof SH1, Übersicht Wasserhaushalt, Temperatur und Redoxbedingungen für 365 Tage kontinuierliche Messungen, November 2010 bis November 2011

Schicht (Messtiefen)	Matrixpotential		rH-Wert		Bodentemperatur	
	<-60 hPa [%]	≥ 0 hPa [%]	>28 [%]	<18 [%]	Mittel [°C]	T _{max} - T _{min} [°C]
Deckschicht (20cm, 30 cm, 50 cm und 90 cm)	28	1	-	-	9	17
Sargbereich (135 cm)	16	0	100	0	11	13
Filterschicht (180 cm und 220 cm)	17	0	100	0	11	10

4.4.2. Monitoringstation C, Friedhof BE1

Die Monitoringstation C wurde ca. 2 Meter neben dem Leitprofil C (YYn) angelegt. Der Friedhof BE1 wurde auf einem aus Flugsand entstandenen Boden angelegt. Bei Niederschlagsereignissen auftretendes Sickerwasser wird schnell in den Untergrund abgeleitet, so dass der Boden schnell wieder austrocknen kann. Kleinere Niederschlagsereignisse bis ca. 25 mm d⁻¹ (Abb. 81) verursachen im Sommerhalbjahr nur in den oberen 40 cm kurzzeitig ψ_m unter FK, im Winterhalbjahr wird der Boden bis in 220 cm Tiefe befeuchtet, wobei ψ_m nahe Null erreicht werden, jedoch fast nie (<1 % in der Filterschicht) vollständige Wassersättigung auftritt (Abb. 82, blaue Farbgebung). Im Messzeitraum waren in Deckschicht, Sargbereich und Filterschicht zwischen 63% und 86% der Messwerte unter FK (Tab. 43). Die hohe LK des Bodens (vgl. Kap 4.3.5, Tab. 39) kann folglich an mindestens 230 Tagen des Jahres in vollem Umfang zum Gastransport und somit zur Sauerstoffversorgung des Sargbereiches beitragen und ist nur äußerst selten durch Wasser eingeschränkt oder blockiert. Entsprechend sind die rH-Werte in Sargbereich und Filterschicht zu 100% höher als 28 und somit im oxischen Bereich und zeigen im Jahresverlauf im Vergleich zu den übrigen Monitoringstationen (gleiche Skala) nur sehr geringe Schwankungen (Abb. 83, Tab. 43). Die mittleren Bodentemperaturen der drei Schichten liegen bei 10 bzw. 11°C, die Temperaturamplitude eines Jahres nimmt mit zunehmender Tiefe von 21°C auf 10°C ab (Abb. 84, Tab. 43). Im Vergleich zum grundwasserbeeinflussten Standort SH1, Monitoringstation A ist an diesem trockenen Standort die Temperaturamplitude in der Filterschicht nur geringfügig höher, während die mittlere Temperatur gleich ist.

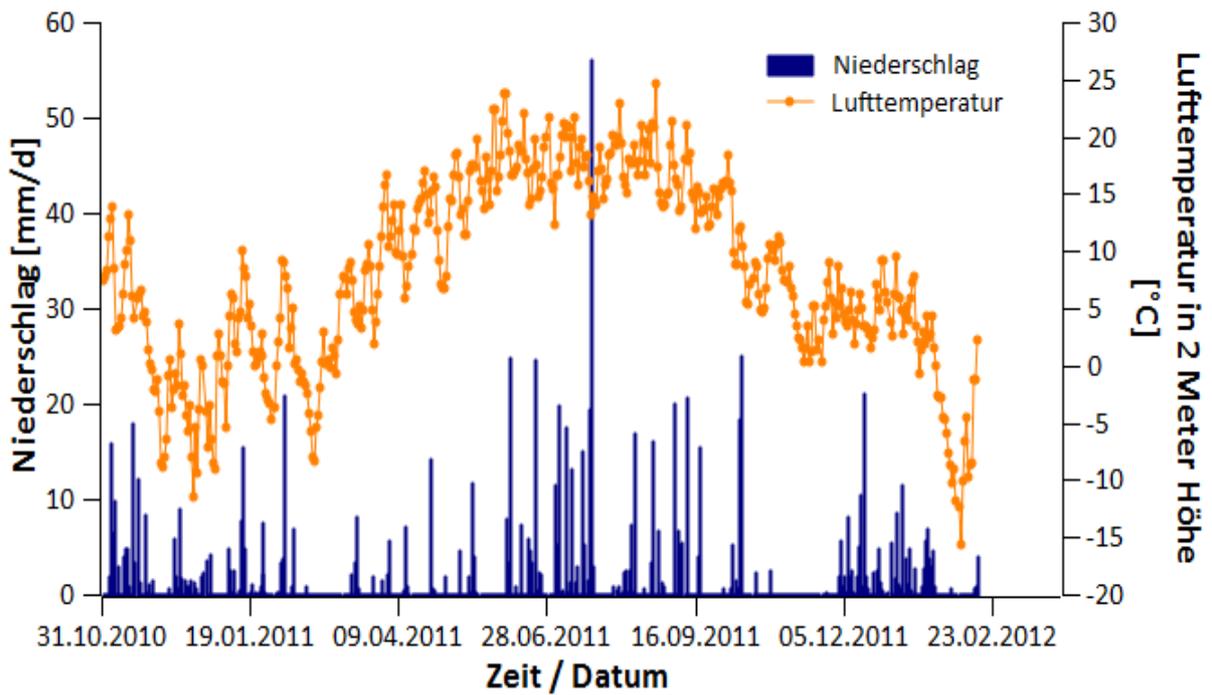


Abb. 81: Monitoringstation C, Friedhof BE1, Tagesniederschläge und Lufttemperatur in 2 m Höhe im Messzeitraum November 2010 bis April 2012 (Daten: FU Berlin, Institut für Meteorologie, Wetterstation Berlin Marzahn)

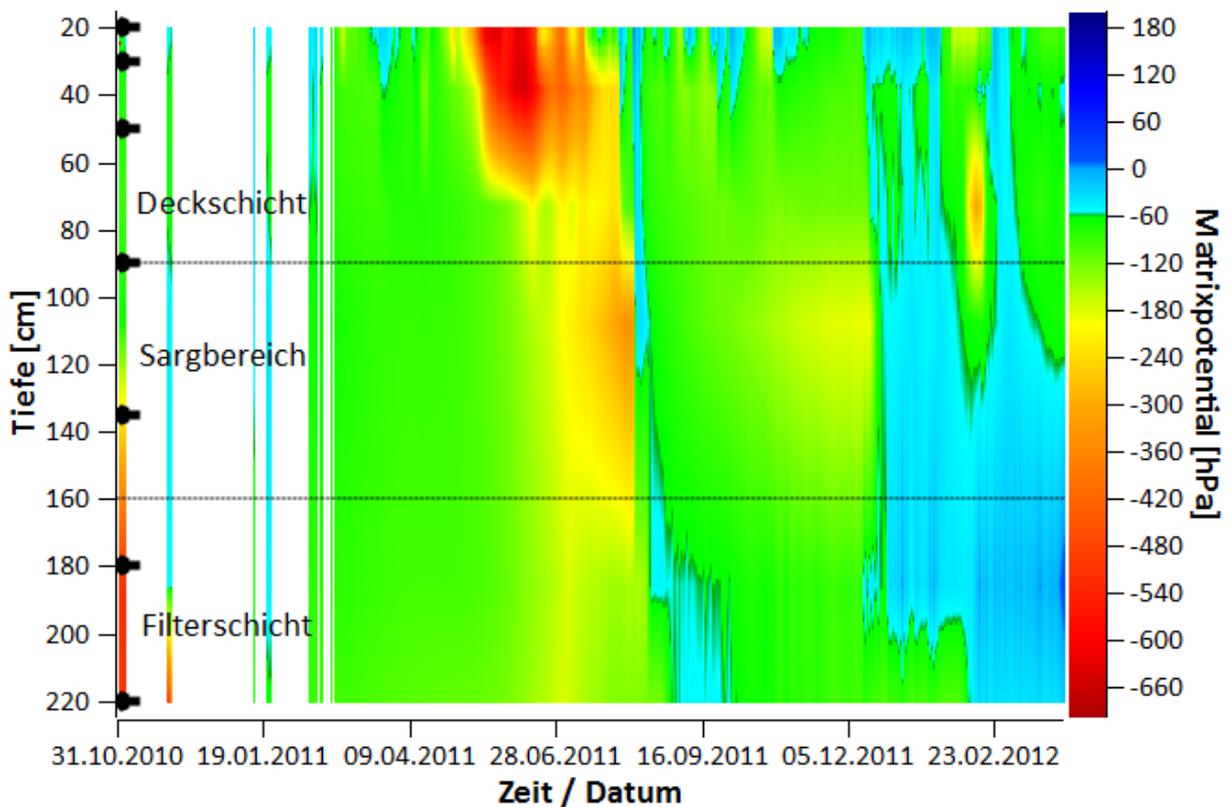


Abb. 82: Monitoringstation C, Friedhof BE2, Matrixpotentiale im Messzeitraum November 2010 bis April 2012

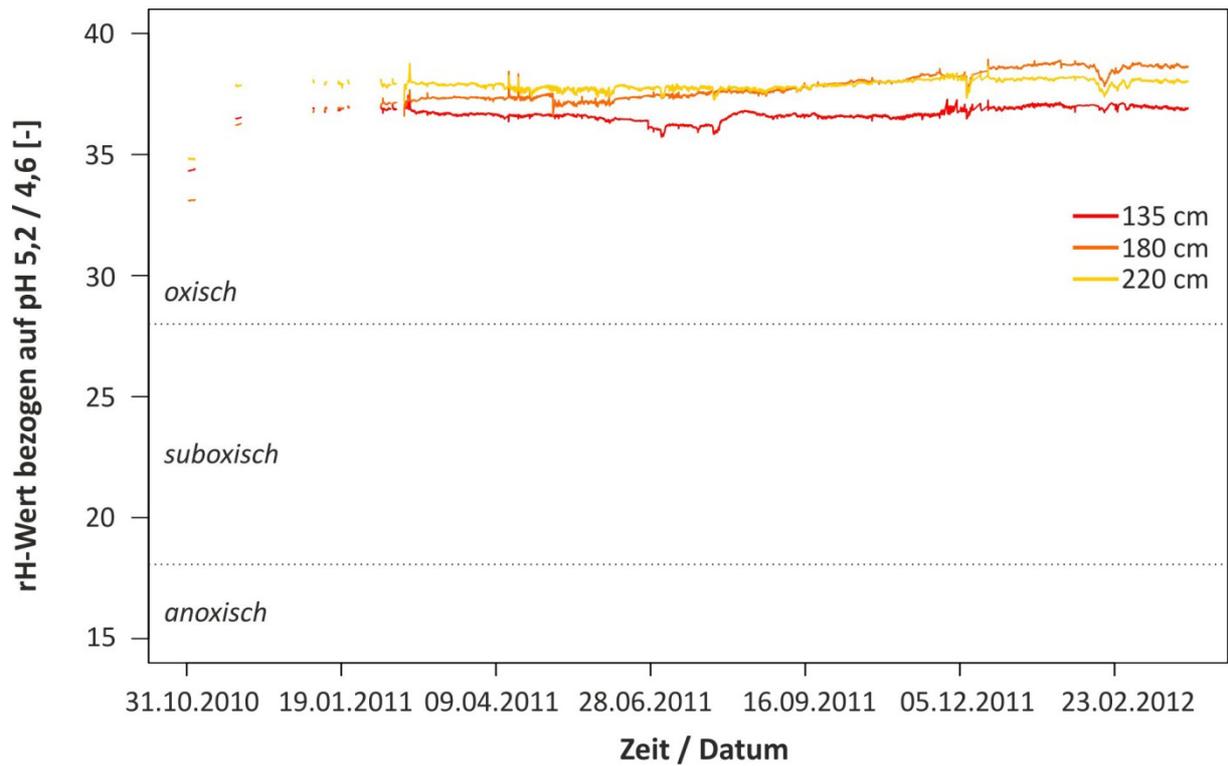


Abb. 83: Monitoringstation C, Friedhof BE2, rH-Werte bezogen auf pH 5,2 (135 cm, Sargbereich) bzw. pH 4,7 (180 cm und 220 cm, Filterschicht) im Messzeitraum November 2010 bis April 2012

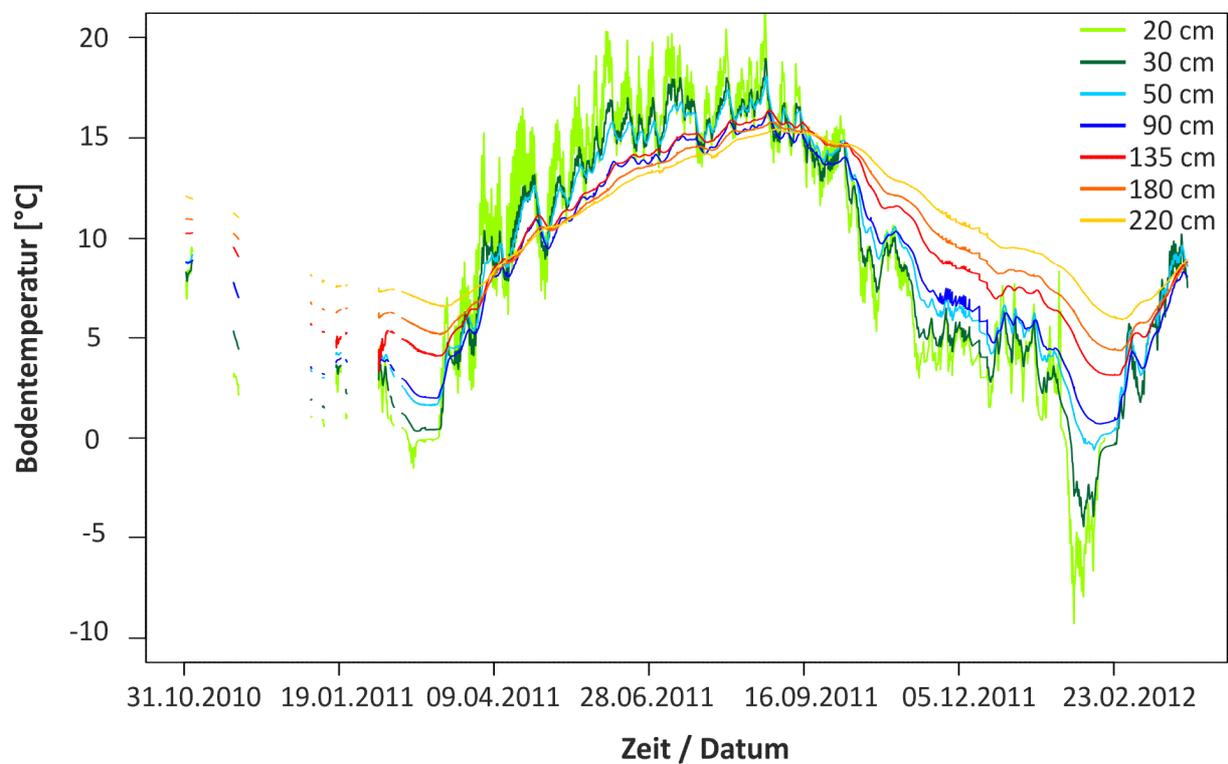


Abb. 84: Monitoringstation C, Friedhof BE1, Bodentemperatur in Deckschicht, Sargbereich und Filterschicht im Messzeitraum November 2010 bis April 2012

Tab. 43: Monitoringstation C, Friedhof BE1, Übersicht Wasserhaushalt und Redoxbedingungen für 365 Tage kontinuierliche Daten, April 2011 bis April 2012

Schicht (Messtiefen)	Matrixpotential		rH-Wert		Bodentemperatur	
	<-60 hPa [%]	≥ 0 hPa [%]	>28 [%]	<18 [%]	Mittel [°C]	T _{max} - T _{min} [°C]
Deckschicht (20cm, 30 cm, 50 cm und 90 cm)	86	0	-	-	10	21
Sargbereich (135 cm)	63	0	100	0	11	13
Filterschicht (180 cm und 220 cm)	73	<1	100	0	11	10

4.4.3 Monitoringstation D, Friedhof BW3

An Standort BW3 kam es Ende April 2011 und Anfang April 2012 zu Ausfällen der Monitoringstation. Deshalb liegen sowohl für 2011 und 2012 keine Daten für die Monate April und Mai vor, und es muss bei Betrachtung der Daten in Tab. 44 darauf hingewiesen werden, dass nur ein kontinuierlicher Messzeitraum von 304 Tagen ausgewertet wurde und eine mögliche Austrocknung im Frühjahr 2011 (Abb. 85) nicht berücksichtigt werden konnte. Die scheinbare Austrocknung des Oberbodens im Februar 2012 ist darauf zurückzuführen, dass die Tensiometer im Oberboden in diesem Zeitraum aufgrund von Bodenfrost nicht korrekt messen konnten (vgl. Lufttemperatur (Abb. 85) und Bodentemperatur (Abb. 88)).

Der Standort BW3 ist durch starken (Hang-)Stauwassereinfluss geprägt (Abb. 86). Während des Messzeitraumes waren im Bereich der Deckschicht nur 17% der Messwerte unter FK, in 135 cm Tiefe trocknete der Boden im Messzeitraum nie unter FK aus. Bei linearer Interpolation kann jedoch bis in ca. 130 cm Tiefe vereinzelt von Werten unter FK ausgegangen werden (Abb. 86). In der Filterschicht herrschte im Messzeitraum permanent Wassersättigung.

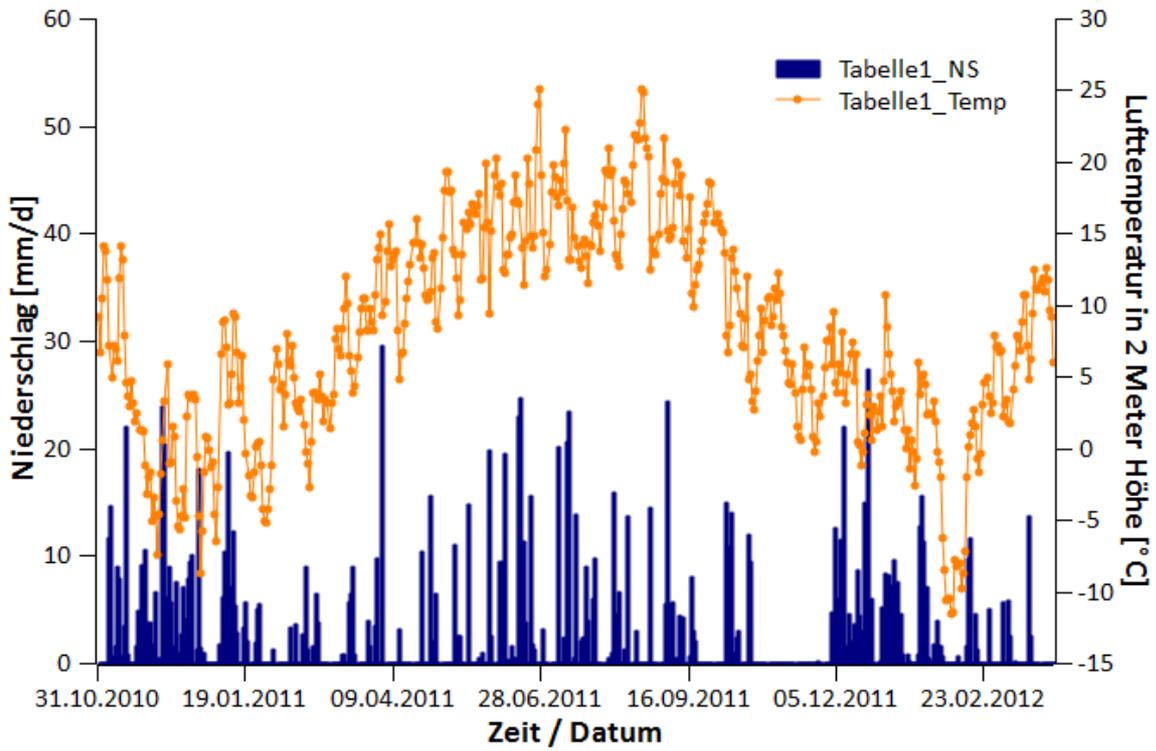


Abb. 85: Monitoringstation D, Friedhof BW3, Wetter November 2010 bis April 2012 (Daten: DWD, Station Freiamt)

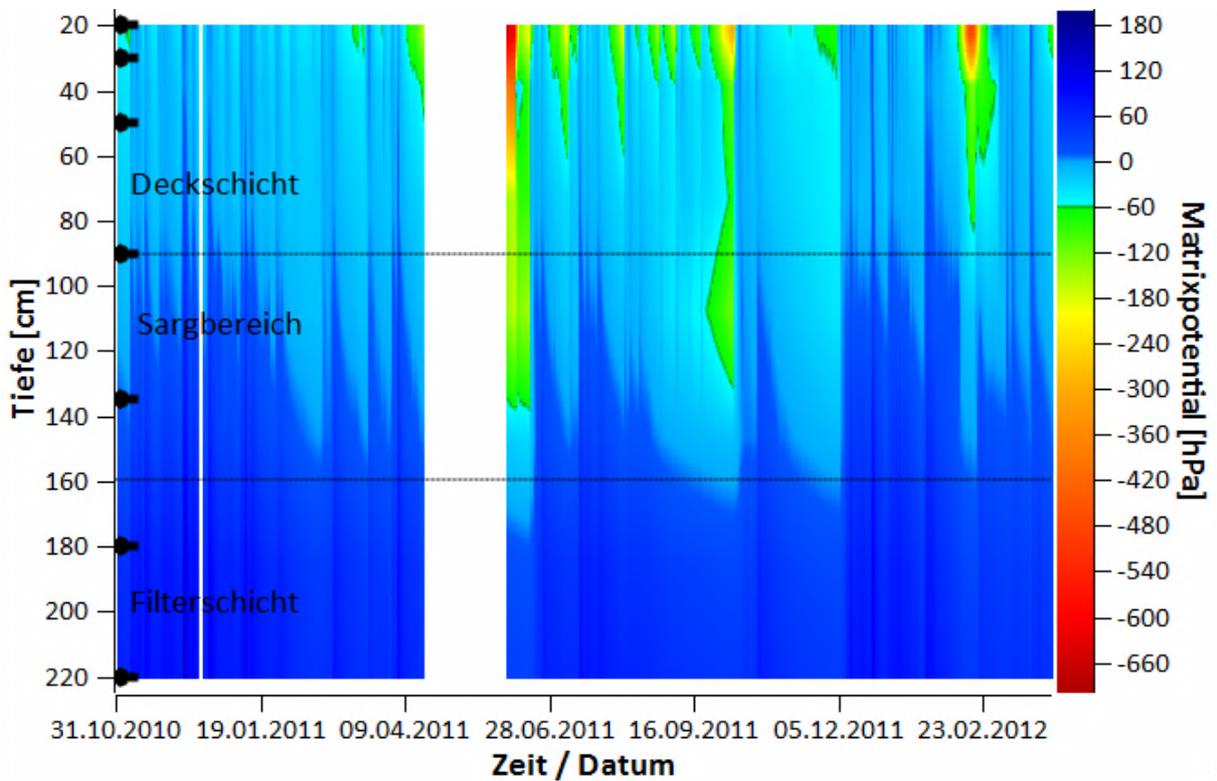


Abb. 86: Monitoringstation D, Friedhof BW3, Matrixpotentiale in 20 bis 220 cm Tiefe, Messzeitraum November 2010 bis April 2012

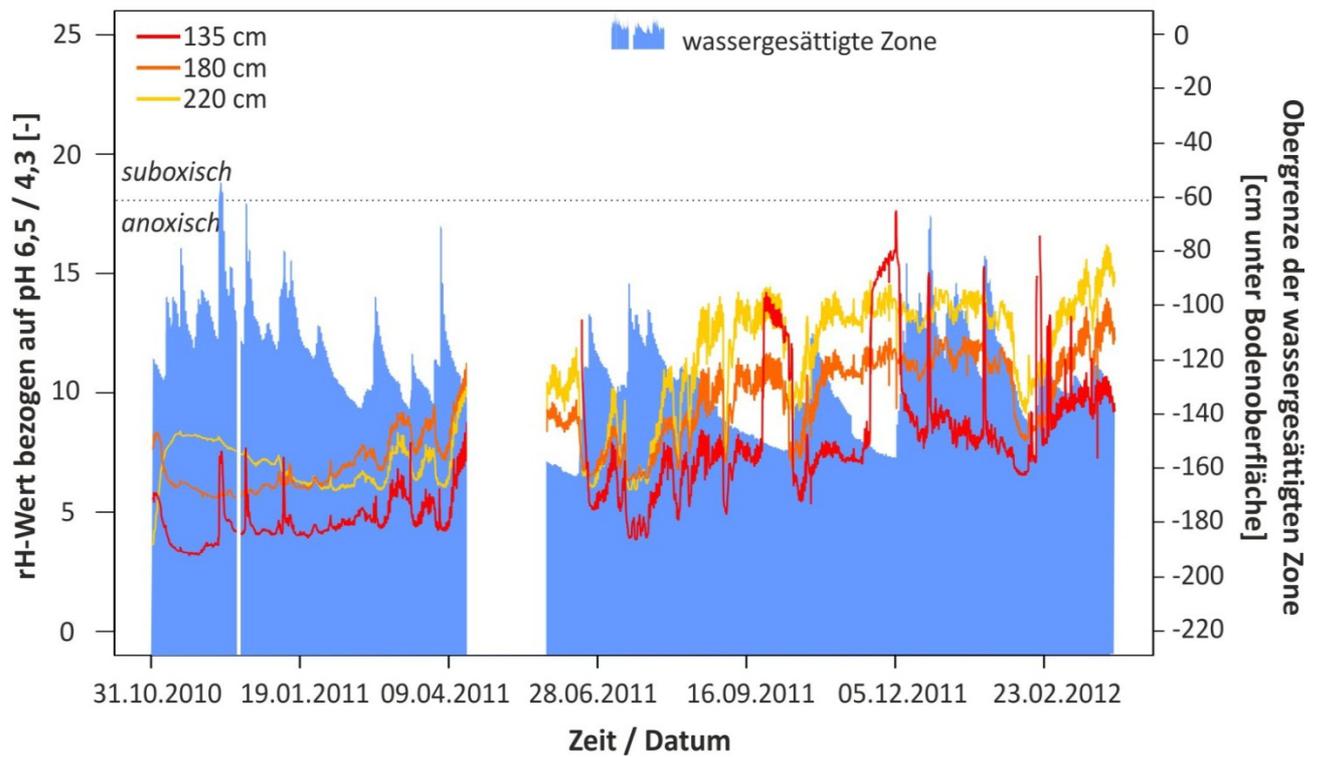


Abb. 87: Monitoringstation D, Friedhof BW3, Redoxpotentiale im Messzeitraum November 2010 bis April 2012

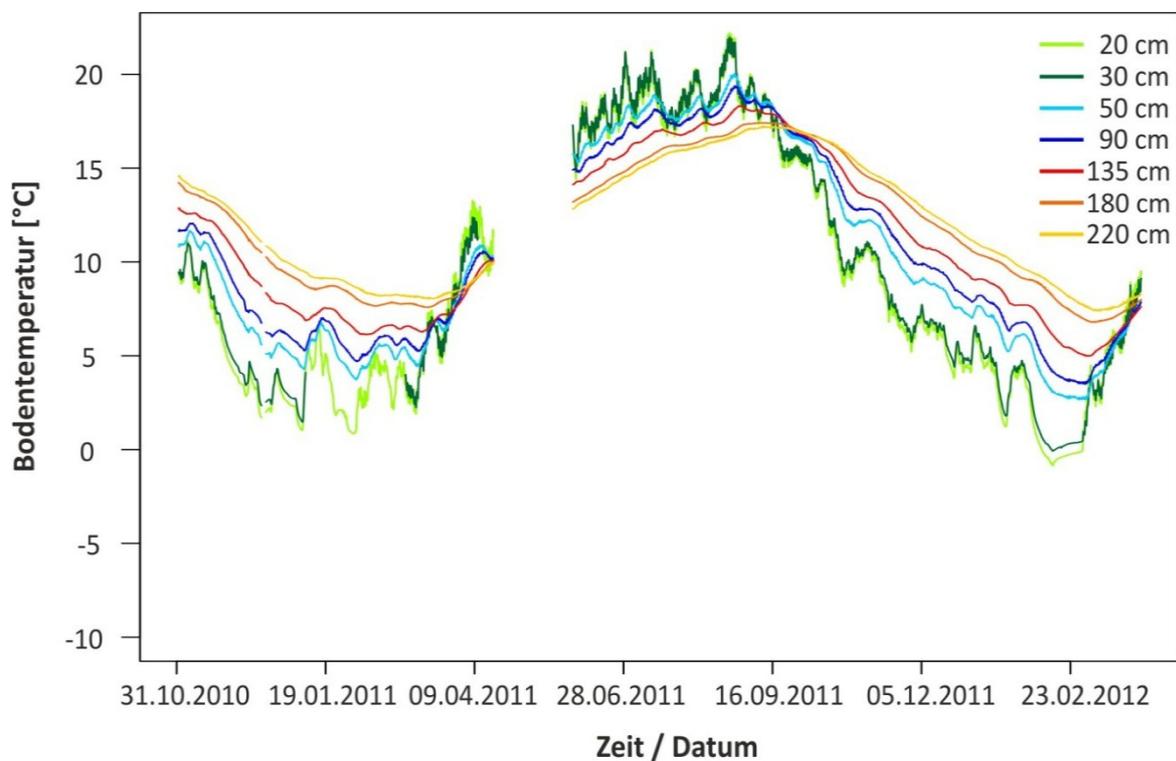


Abb. 88: Monitoringstation D, Friedhof BW3, Bodentemperaturen im Messzeitraum November 2010 bis April 2012

Entsprechend der häufigen Wassersättigung sind auch die rH-Werte in Sargbereich (135 cm) und Filterschicht (180 cm und 220 cm) zu 100% unter 18 (Abb. 87, Tab. 44), es herrschen folglich durchweg reduzierende Bedingungen. Die aus den ψ_m in 135 cm, 180 cm und 220 cm Messtiefe berechneten Obergrenzen der wassergesättigten Zone im Profil weisen einen root-mean-square error von 28,6 cm auf, der Verlauf ist jedoch in allen drei Messtiefen annähernd parallel. Der hohe Haftwasseranteil des Bodens in den Messtiefen 180 cm und 220 cm (Tab. 39, Leitprofil D, Filterschicht) bewirkt, dass auch bei Wassersättigung ein relativ großer Anteil des Wassers gegen die Schwerkraft gebunden ist und die auf die Tensiometer wirkenden Wasserdrücke um diesen Anteil reduziert sind. Dadurch würde die Obergrenze der wassergesättigten Zone, wenn sie anhand der Messwerte aus 220 cm Tiefe berechnet würde, unterschätzt. Die in Abb. 87 gezeigten Obergrenzen der wassergesättigten Zonen entsprechen deshalb dem Mittel der aus 135 cm und 180 cm Tiefe berechneten Werte. Auch an diesem Standort kann das Ansteigen der rH-Werte infolge des Absinkens der wassergesättigten Zone beobachtet werden. Dieser ist im Messbereich 135 cm am deutlichsten, da in 135 cm Tiefe auch kurze Zeiträume mit nicht vollständig wassergesättigten Bedingungen auftreten, die Werte bleiben dennoch durchweg im anoxischen Bereich. Bei Wassersättigung sind die rH-Werte in 135 cm Tiefe niedriger als in 180 cm und 220 cm Tiefe, obwohl der pH-Wert höher ist.

Die Temperaturen betragen im Mittel zwischen 12°C und 13°C, die Temperaturamplitude liegt bei 21°C in der Deckschicht und 10 °C in der Filterschicht (Abb. 88, Tab. 44).

Tab. 44: Monitoringstation D, Friedhof BW3, Übersicht Wasserhaushalt und Redoxbedingungen 304 Tage kontinuierliche Messung, Juni 2011 bis April 2012

Schicht (Messtiefen)	ψ_m		rH-Wert		Bodentemperatur	
	<-60 hPa [%]	≥ 0 hPa [%]	>28 [%]	<18 [%]	Mittel [°C]	$T_{\max} - T_{\min}$ [°C]
Deckschicht (20cm, 30 cm, 50 cm und 90 cm)	17	11	-	-	12	21
Sargbereich (135 cm)	0	73	0	100	13	13
Filterschicht (180 cm und 220 cm)	0	100	0	100	13	10

4.5 Bewertung der Leitprofilstandorte

Verwesungsleistung

Es folgt nun die Bewertung der Leitprofilstandorte anhand von gemessenen Werten. Die an ungestörten Bodenproben gemessenen LK werden mit aus der Bodenart und der ρ_t abgeleiteten LK verglichen. Die Bewertung der Verwesungsleistung wird der vor Ort festgestellten Situation im Hinblick auf den Abbau von Sarg und Leichnam gegenübergestellt.

Die LK der Deckschicht ist in Leitprofil A und B (Friedhof SH1) hoch. Durch bis in die Deckschicht reichenden Grund- beziehungsweise Stauwassereinfluss wird die Verwesungsleistung jedoch der Klasse 3 zugeordnet (Tab. 45). Die Bodenreaktion ist in den Deckschichten beider Leitprofile sehr schwach sauer. Dies zieht keinen Zuschlag für die Bodenreaktion nach sich. Die Verwesungsleistung wird an beiden Leitprofilen als gering eingestuft, woraufhin keine Empfehlung für die Ruhefrist gegeben wird da die notwendige Ruhefrist 30 Jahre überschreiten würde. Die bei Anlage der Leitprofile vorgefundenen Artefakte bestätigen die geringe Verwesungsleistung. Die Bedingungen in Leitprofil B scheinen etwas günstiger zu sein, da hier kein Grundwassereinfluss besteht, der Boden im Sommerhalbjahr deutlich stärker austrocknet als an Leitprofil A und der Sargbereich zu keinem Zeitpunkt wassergesättigt war (vgl. Abb. 74 und Abb. 78). Der Erhaltungsgrad von Sarg und Leichnam ist an beiden Leitprofilen nach 50 bzw. 35 Jahren noch so gut, dass eine Wiederbelegung nach nur 30 Jahren Ruhezeit als unrealistisch angesehen wird.

Die LK der Deckschicht an Leitprofil C (Friedhof BE1) ist sehr hoch und die Deckschicht ist frei von Grund- oder Stauwassereinfluss. Die Bodenreaktion ist sehr schwach sauer und wird nicht mit Zuschlägen bedacht. Die Verwesungsleistung wird als hoch eingestuft und Ruhefristen von 10-20 Jahren werden als für eine vollständige Verwesung ausreichend angesehen. Das Monitoring an diesem Standort bestätigt mit niedrigen ψ_m (63% der Messwerte unter FK) und durchweg oxidativen Bedingungen die gute Durchlüftung des Bodens. Nach Aussage der Friedhofsmitarbeiter werden auf diesem Friedhof bei Wiederbelegungen nach Ablauf der Ruhefrist von 20 Jahren höchstens einzelne Knochen oder Holzreste vorgefunden.

Die Deckschicht an Leitprofil D (Friedhof BW3) verfügt nur über eine geringe LK (gemessene LK hier eine Klasse geringer als abgeleitete LK) und ist stauwasserbeeinflusst. Deshalb wird die Verwesungsleistung der Klasse 3 zugeordnet. Weitere Zuschläge aufgrund der Bodenreaktion werden nicht vergeben. Die Verwesungsleistung wird als gering eingestuft. Der untersuchte Friedhofsbereich wird aufgrund von Verwesungsstörungen nicht mehr für Erdbestattungen genutzt. Die nach ca. 40 Jahren noch gut erhaltenen Säрге waren wassergefüllt, und anhand des Monitorings an diesem Standort konnten durchweg reduzierende Bedingungen im Sargbereich dokumentiert werden.

Tab. 45: Leitprofile A, B, C, und D, Bewertung der Verwesungsleistung anhand von gemessenen Werten und Abgleich mit bei Anlage der Leitprofile vorgefundenen Artefakten

Leitprofilkennung	A	B	C	D
gemessene LK der Verwesungszone [Vol-%]	17	17	30	2
nach Bodenart und ρ_t abgeleitete LK [Vol-%]	18	15	31	6
Bodensubtyp	GG-YY	SS-YY	YYn	SS-YY
Klasse der Verwesungsleistung	3	3	1	3
pH-Wert (in CaCl ₂)	6,6	6,0	5,2	6,5
Zuschlag für Bodenreaktion	-	-	-	-
Verwesungsklasse	3	3	1	3
Bewertung der Verwesungsleistung	gering, Fläche ungeeignet	gering, Fläche ungeeignet	hoch	gering, Fläche ungeeignet
empfohlene Ruhefrist [Jahre]	-	-	10-20	-
Zeitraum seit letzter Beisetzung in dem untersuchten Bereich	ca. 50 Jahre	ca. 35 Jahre	ca. 35 Jahre	ca. 40 Jahre
vorgefundene Artefakte	Sarg: konserviert, Leichnam: schwarzgefärbte Knochen	Sarg: konserviert, Auskleidung noch vorhanden Leichnam: vollständig skelettiert	keine Spuren der Erdbestattung	Sarg: konserviert und wassergefüllt, Auskleidung noch vorhanden Leichnam: nicht sichtbar
Grund für das Auflassen des Grabfeldes	Verwesungsstörungen	Überhangfläche	Überhangfläche	Verwesungsstörungen

Filterleistung

Die Filterleistung (Tab. 46) von Leitprofil A wird aufgrund des direkten Grundwasserkontaktes von Sargbereich und Filterschicht der Klasse 3 zugeordnet. Ohne Grundwassereinfluss würde die Filterleistung aufgrund der extrem hohen KAK_{pot} der Klasse 1 zugeordnet. Da der pH-Wert in der Filterschicht unter 6 liegt wird ein Zuschlag von 0,5 für die Bodenreaktion vergeben. Insgesamt wird die Filterleistung an diesem Leitprofil als gering bewertet.

An Leitprofil B wird die Filterleistung aufgrund der hohen KAK_{pot} und der geringen LK der Klasse 1 zugeordnet. Zuschläge für Bodenreaktion oder Hangneigung werden nicht vergeben. Die Aufenthaltsdauer des Sickerwassers in der Filterschicht ist mit ca. 28 Monaten ausreichend lang. Die Filterleistung wird insgesamt als hoch bewertet.

Die Filterschicht an Leitprofil C besteht aus reinem Sand mit einer sehr geringen KAK_{pot} und einer sehr hohen LK. Grund-oder Stauwassereinfluss besteht nicht. Die Filterleistung wird deshalb zunächst der Klasse 3 zugewiesen. Für die Bodenreaktion wird ein Zuschlag von 0,5 vergeben. Die Mächtigkeit der Filterschicht reicht aus, um bei gegebener Sickerwasserrate eine Aufenthaltsdauer des Sickerwassers von über 6 Monaten gewährleisten zu können. Die Filterleistung wird jedoch aufgrund des Zuschlages für die Bodenreaktion als gering bewertet.

An Leitprofil D wird die Filterleistung aufgrund der hohen KAK_{pot} und der sehr geringen LK zunächst der Klasse 1 zugewiesen. Aufgrund der stark sauren Bodenreaktion wird ein Zuschlag von 0,5 vergeben. Für die Hangneigung wird ein Zuschlag von +1 vergeben. Insgesamt wird die Filterleistung als mittel bewertet.

Tab. 46: Leitprofile A, B, C, und D, Bewertung der Filterleistung anhand von gemessenen Werten

Leitprofilkennung	A	B	C	D
Bodentyp	GG-YY	SS-YY	YYn	SS-YY
LK [Vol-%]	20	4	27	1
KAK_{pot} [cmol_c]	70	13	2	18
GesamtfILTERleistung nach KA5 (Klasse)	4	4	1	4-5
Filterschicht ist Go- oder Gr-Horizont	ja	nein	nein	nein
Filterschicht ist Sw-Horizont	nein	nein	nein	nein
Filterleistungsklasse	5	1	3	1
pH-Wert (in CaCl₂)	5,6	7,3	4,6	4,3
Zuschlag für Bodenreaktion	+0,5	-	+0,5	+0,5
FK [Vol%]	42	34	12	44
Niederschlagssumme Nov 2010 bis Nov 2011 [mm]	1017	1017	755	993
Sickerwasserrate von Nov 2010 bis Nov 2011 [mm]*	-	436	243	393
verfügbare Filterschicht oberhalb des geschlossenen Kapillarsaumes [cm]	0	300	220	>70
Aufenthaltsdauer des Sickerwassers in der Filterschicht [Monate]	0	28	13	>9
Zuschlag für Hangneigung	-	-	-	+1
Filterklasse	5	1	3,5	2,5
Bewertung der Filterleistung	sehr gering	hoch	gering	mittel

* Ermittelt nach dem TUB-BGR-Verfahren (BLA-GEO, 2004)

4.6 Feldversuch zur Auswirkung von Grabtätigkeiten auf Bodeneigenschaften und -funktionen

Es folgen nun die Ergebnisse des Feldversuches zur Untersuchung der Auswirkungen von Grabtätigkeiten auf Bodeneigenschaften und -funktionen. Die Beschreibung des Versuchsaufbaus erfolgte in Kapitel 3.2.1.

Beschreibung des Standortes

Der Versuch wurde im Bereich des Vorgewendes auf einer ackerbaulich genutzten Fläche des Versuchsgutes der CAU Kiel, Hohenschulen, in der Jungmoränenlandschaft Schleswig-Holsteins durchgeführt. Die auf der Fläche vorherrschenden Bodentypen sind Braunerden, Parabraunerden und Pseudogleye aus Geschiebemergel.

Bodenklassifikation und Textur des Referenzprofiles

Der Bodentyp im Bereich des Versuchsaufbaus ist eine Pseudogley-Parabraunerde unter Ackernutzung (Abb. 89).

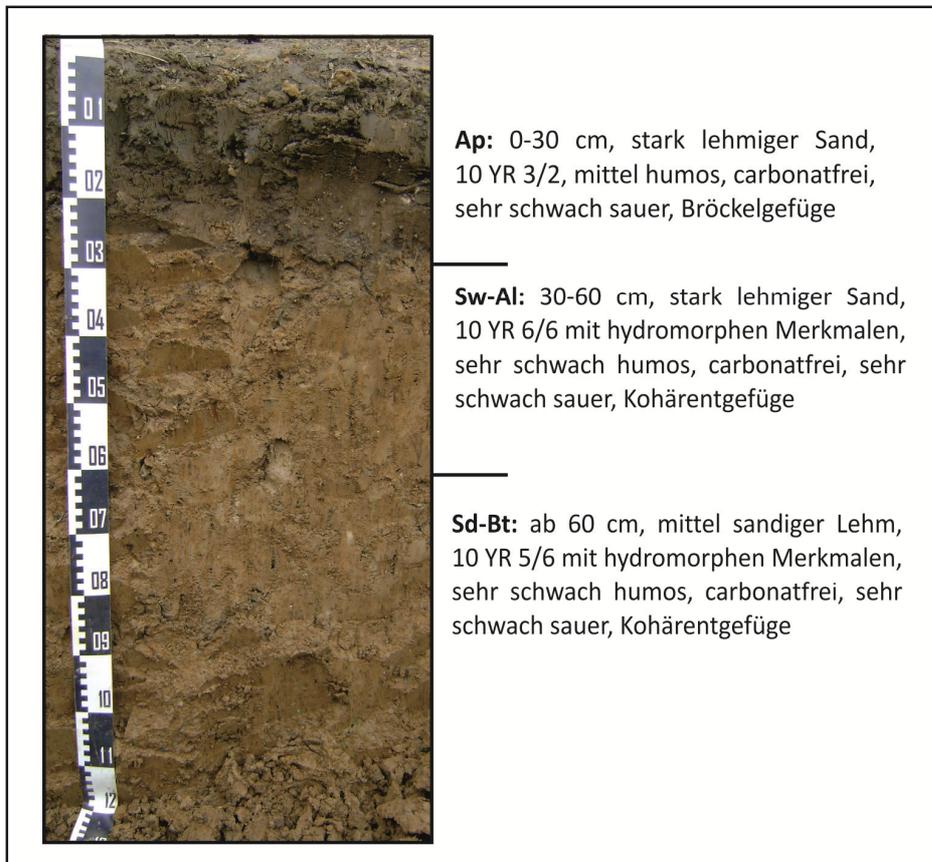


Abb. 89: Hohenschulen, Referenzprofil, Pseudogley-Parabraunerde (SS-LL) aus Geschiebemergel

Der Ap- und der Sw-Al- Horizont bestehen aus stark lehmigem Sand, der Sd-Bt-Horizont besteht aus mittel sandigem Lehm (Tab. 47).

Tab. 47: Hohenschulen, Referenzprofil Pseudogley-Parabraunerde, Textur

Horizont (Tiefe [cm])	Bodenart	gS [%]	mS [%]	fS [%]	gU [%]	mU [%]	fU [%]	T [%]
Ap (0-30)	Sl4	5	20	30	16	11	5	13
Sw-Al (30-60)	Sl4	6	17	28	14	10	9	16
Sd-Bt (60-)	Ls3	6	17	27	14	9	7	20

Bodenchemische Kennwerte des Referenzprofiles

Die Bodenreaktion ist in allen untersuchten Bodenhorizonten sehr schwach sauer (Tab. 48). Der Ap-Horizont ist mittel humos und carbonatfrei. Sw-Al- und Sd-Bt-Horizont sind sehr schwach humos und carbonatfrei. Die KAK_{pot} ist in allen untersuchten Horizonten mittel.

Tab. 48: Hohenschulen, Referenzprofil Pseudogley-Parabraunerde, bodenchemische Kennwerte

Horizont (Tiefe [cm])	pH-Wert in $CaCl_2$	$CaCO_3$ [%]	C_{org} [%]	N_t [%]	KAK_{pot} [$cmol_c$ kg^{-1}]	austauschbare Kationen [$cmol_c$ kg^{-1}]					
						H^+	Al^{3+}	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
Ap (0-30)	6,7	0	1,2	0,21	9,6	-	-	0,4	0,0	7,8	1,5
Sw-Al (30-60)	6,6	0	0,2	0,01	9,9	-	-	0,2	0,0	8,6	1,1
Sd-Bt (60-)	6,5	0	0,1	0,00	9,4	-	-	0,1	0,0	8,2	1,0

4.6.1 Bodenphysikalische Kennwerte aus dem Feldversuch

Bei Aushub der Schürfgaben wurden ungestörte Bodenproben aus 50 cm und 160 cm Tiefe entnommen (vgl. Kap. 3.2.1), diese werden im Folgenden als „Referenz“ bezeichnet. Weitere Entnahmen von ungestörten Bodenproben erfolgten in den Varianten A (geschütteter Boden) und B (geschütteter Boden mit Branntkalk-Zugabe) jeweils 60 Tage nach Schüttung aus 20 cm Tiefe und 195 Tage nach Schüttung aus 20 cm und 50 cm Tiefe. Vorgestellt werden die ermittelten ρ_t , Porengrößenverteilungen, k_f , k_i , C_2 -Indices, C_3 -Indices und ϵ_B . Es werden sowohl Effekte der Schüttung als auch die zeitliche Entwicklung des geschütteten Bodens gezeigt.

Trockenrohdichten (ρ_t)

Die ρ_t des Referenzbodens ist sowohl in 50 cm als auch in 160 cm Tiefe hoch (Abb. 90). Die Varianten A und B weisen tendenziell niedrigere ρ_t auf als der Referenzboden, die Unterschiede sind jedoch nicht signifikant und die ρ_t wird auch im geschütteten Boden fast allen Varianten als hoch eingestuft. In Variante A nimmt die ρ_t in 20 cm Tiefe im Vergleich 60 Tage zu 195 Tage leicht zu, in Variante B nimmt sie ab und wird nach 195 Tagen als mittel klassifiziert. Die ρ_t ist nach 195 Tagen in der Variante A in 50 cm Tiefe geringer als in 20 cm Tiefe und in Variante B in 50 cm Tiefe höher als in 20 cm Tiefe.

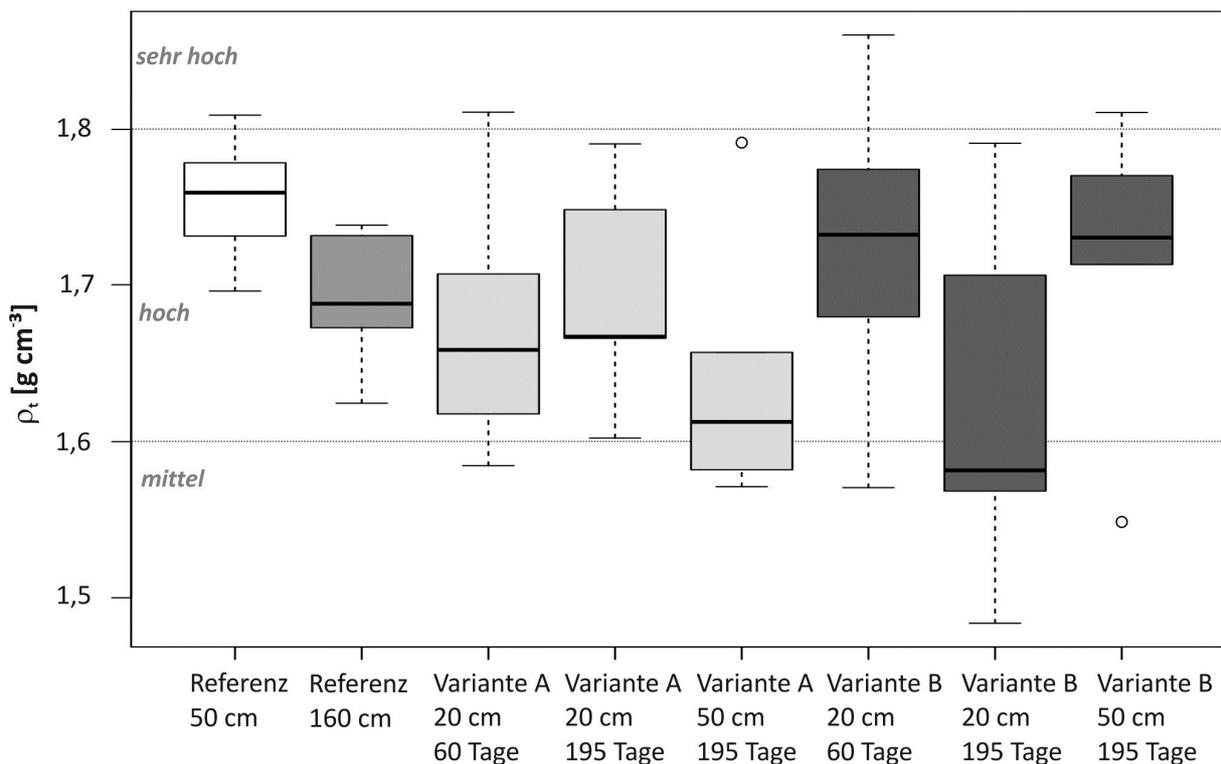


Abb. 90: Standort Hohenschulen, Trockenrohdichten (ρ_t) mit Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005), Vergleich von ungestörter Referenz in 50 cm und 160 cm Tiefe mit den Varianten A und B 60 Tage nach Schüttung in 20 cm Tiefe und 195 Tage nach Schüttung in 20 cm und 50 cm Tiefe

Porengrößenverteilung (PGV)

Die ungestörte Referenz verfügt in 50 cm und 160 cm Tiefe über ein geringes GPV, eine sehr geringe LK und eine mittlere FK (Tab. 49). Die Schüttung des Bodens erhöht die LK. Dies ist einerseits durch eine Zunahme des GPV, andererseits durch eine Abnahme der FK bedingt. Die Abnahme der FK wird vor allem durch eine Abnahme der Mittelporen (MP)-Anteile hervorgerufen, während der Anteil an engen Grobporen (eGP) fast unverändert bleibt.

Die Variante A verfügt 60 Tage nach Schüttung über ein mittleres GPV und eine mittlere LK. Die FK ist, etwas geringer als in der Referenz, als mittel einzustufen. Entsprechend ist der SG bei FK mit 83 % geringer als in der Referenz (97 %). Nach 195 Tagen sind GPV und LK in der Variante A etwas gesunken, jedoch noch immer höher als in der Referenz.

In der Variante B ist das GPV 60 Tage nach Schüttung auf dem Niveau der Referenz geblieben, die LK ist von sehr gering auf gering gestiegen die FK und der SG bei FK sind entsprechend leicht gesunken. Nach 195 Tagen konnten in der Variante B in 20 cm Tiefe, passend zu der verringerten ρ_t (Abb. 90) ein höheres GPV und eine höhere LK festgestellt werden als nach 60 Tagen.

Tab. 49: Standort Hohenschulen, Gesamtporenvolumen (GPV), Luftkapazität (LK), Feldkapazität (FK), Wassersättigungsgrad bei Feldkapazität (SG bei FK), enge Grobporen (eGP), Mittelporen (MP) und Feinporen (FP), Vergleich von ungestörter Referenz in 50 cm und 160 cm Tiefe mit den Varianten A und B 60 Tage nach Schüttung in 20 cm Tiefe und 195 Tage nach Schüttung in 20 cm und 50 cm Tiefe

Variante	Tag	Tiefe [cm]	GPV [Vol-%]	LK [Vol-%]	FK [Vol-%]	SG bei FK [% von Θ_s]	eGP [Vol-%]	MP [Vol-%]	FP [Vol-%]
Referenz	0	50	35	1	34	97	2	8	24
Referenz	0	160	37	2	35	94	3	7	25
A	60	20	40	7	33	83	3	6	24
A	195	20	36	5	31	86	3	6	22
A	195	50	38	6	32	84	3	5	24
B	60	20	36	5	31	86	2	5	24
B	195	20	39	11	28	72	3	2	23
B	195	50	35	7	28	80	3	4	21

Gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f)

Die k_f der Referenz ist sehr gering bis gering und weist in 50 cm Tiefe eine Anisotropierate von 39,4 auf (Abb. 91). Die k_f -Werte in vertikaler und horizontaler Richtung unterschieden sich hier signifikant.

Die Grabarbeiten führen zu einem signifikanten Anstieg der k_f in den Varianten A und B im Vergleich zur Referenz in 50 cm Tiefe (Abb. 92). Die k_f der Referenz ist in 50 cm Tiefe als sehr gering einzustufen. 60 Tage nach Schüttung sind die k_f -Werte der Varianten A und B hoch bis mittel. Nach 195 Tagen sind die k_f -Werte der Variante A sehr gering, aber noch signifikant höher als die der Referenz. Auch in Variante B sind die k_f -Werte nach 195 Tagen in 20 cm Tiefe von mittel auf sehr gering gesunken und unterschieden sich nicht mehr von den Werten der Variante A. In der Variante A unterschieden sich die k_f -Werte nach 195 Tagen in 20 cm und 50 cm Tiefe nicht. In der Variante B

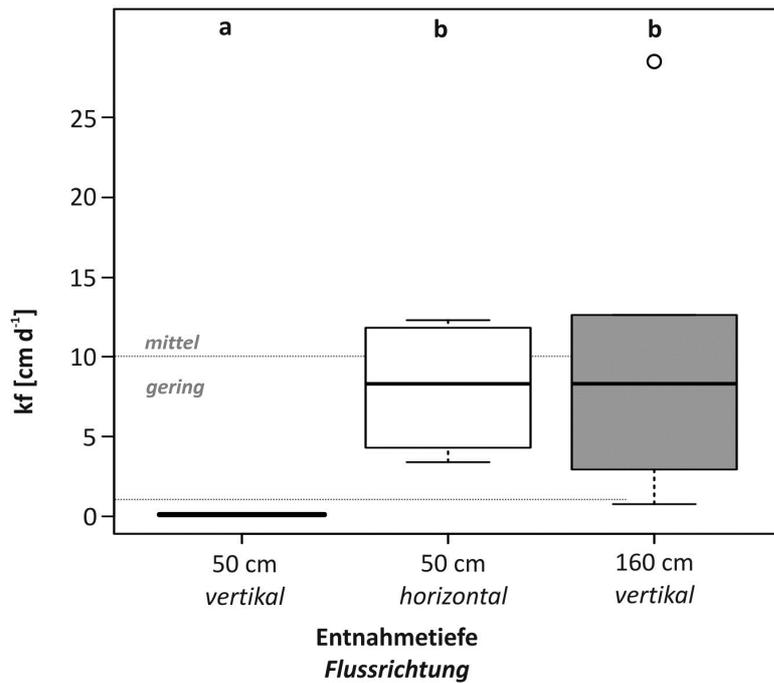


Abb. 91: Standort Hohenschulen, ungestörte Referenz, gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) in vertikaler und horizontaler Richtung, mit Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005), unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede $p \leq 0,05$

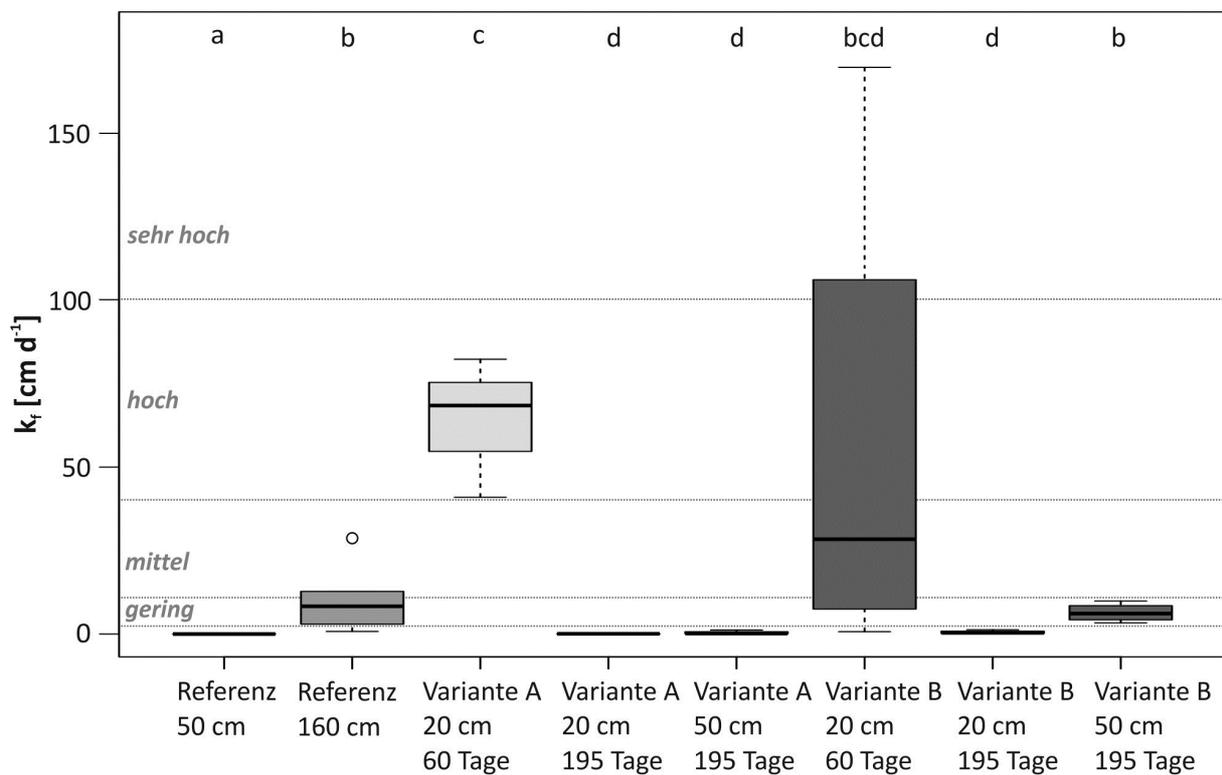


Abb. 92: Standort Hohenschulen, gesättigte Wasserleitfähigkeit (k_f) in vertikaler Richtung mit Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005), Vergleich von ungestörter Referenz in 50 cm und 160 cm Tiefe mit den Varianten A und B 60 Tage nach Schüttung in 20 cm Tiefe und 195 Tage nach Schüttung in 20 cm und 50 cm Tiefe, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede $p \leq 0,05$

sind die k_f -Werte nach 195 Tagen in 50 cm Tiefe um eine Klasse höher als in 20 cm Tiefe und entsprechen der k_f der Referenz in 160 cm Tiefe, dieser Unterschied ist signifikant.

Der Wasserhaushalt von in diesem Boden angelegten Erdgruben wird somit nicht allein durch den großen Unterschied der k_f von ungestörtem und geschütteten Boden in vertikaler Richtung (Abb. 92), sondern möglicherweise aufgrund von präferentiellen Flüssen zusätzlich durch lateral eindringendes Sickerwasser aus den Grubenwänden beeinflusst (Abb. 91). Die Bedeutung dieser lateralen Zuflüsse ist an diesem Standort jedoch wahrscheinlich nicht sehr groß, da die Fläche nur eine sehr schwache (ca. 2%) Hangneigung aufweist, und die k_f auch in horizontaler Richtung gering ist.

Luftleitfähigkeit

Die k_l bei FK unterscheidet sich in der ungestörten Referenz nicht signifikant von den geschütteten Varianten und auch die Varianten A und B unterscheiden sich nicht signifikant (Abb. 93 a). Die k_l sind im Median in fast allen Varianten als sehr gering einzustufen. Nur in der Variante B in 50 cm Tiefe ist die k_l im Median gering.

In der Referenz ist die k_l in 50 cm Tiefe etwas geringer als in 160 cm Tiefe. Der Vergleich k_l der Varianten A und B 60 beziehungsweise 195 Tage nach Schüttung zeigt im Unterschied zur k_f nur in Variante A eine tendenzielle Abnahme. In Variante B wurden nach 195 Tagen in 20 cm und 50 cm Tiefe höhere k_l festgestellt als nach 60 Tagen.

Nach Vorentwässerung auf -300 hPa (Abb. 93 b) ist die k_l in der Referenz gering. In Variante A ist die k_l bei Entnahme 60 Tage nach Schüttung sehr hoch und bei Entnahme nach 195 Tagen hoch. Diese Werte sind signifikant höher als die der Referenz. In Variante B ist die k_l sowohl 60 Tage als auch 195 Tage nach Schüttung mittel.

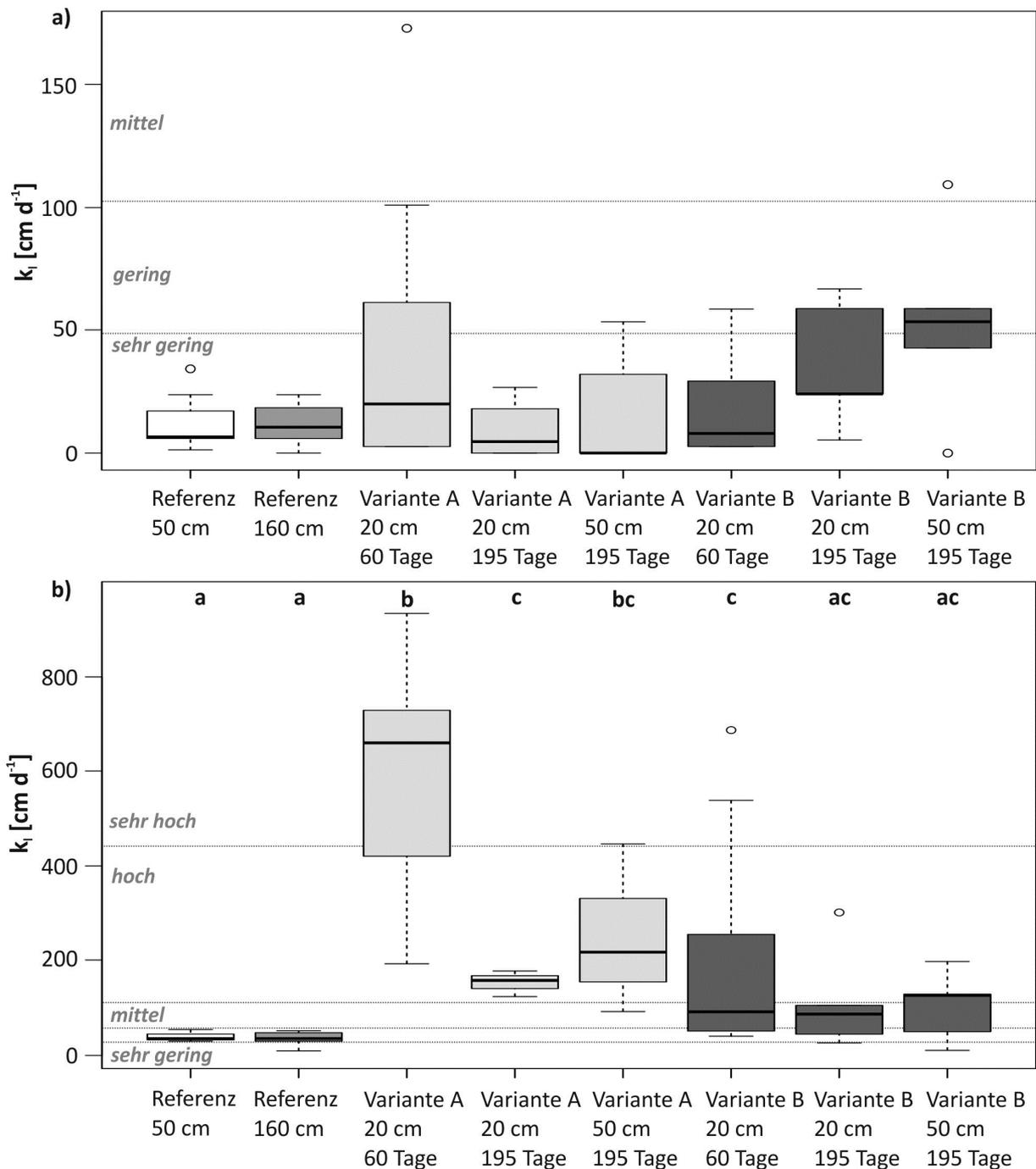


Abb. 93: Standort Hohenschulen, Luftleitfähigkeit (k_f) a) bei Feldkapazität (-60 hPa) und b) bei -300 hPa, Einstufung nach Ad-hoc-AG Boden (2005), Vergleich von ungestörter Referenz in 50 cm und 160 cm Tiefe mit den Varianten A und B 60 Tage nach Schüttung in 20 cm Tiefe und 195 Tage nach Schüttung in 20 cm und 50 cm Tiefe, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede $p \leq 0,05$

Porenorganisation

Die geschütteten Varianten A und B weisen (signifikant) höhere C_2 - und C_3 -Indices auf als die Referenz (Abb. 94). Die C_2 -Indices der Variante A sind im Trend bei jeder Probenahme höher als die der Variante B, wobei sich die C_2 -Indices der beiden Varianten in 50 cm Tiefe am wenigsten unterscheiden.

Die C_3 -Indices sind in der Variante B in 20 cm Tiefe 90 Tage nach Schüttung im Median geringfügig höher als die der Variante A, nach 195 Tagen sind sie jedoch in 20 cm und 50 cm Tiefe im Median geringer als die der Variante A.

Die Porenorganisation ist folglich in den Varianten A und B besser als in der Referenz und in der Variante A (zumindest 195 Tage nach Schüttung) besser als in der Variante B, und diese Unterschiede sind nicht allein durch eine günstigere Porengrößenverteilung, sondern auch durch eine bessere Porenorganisation bedingt.

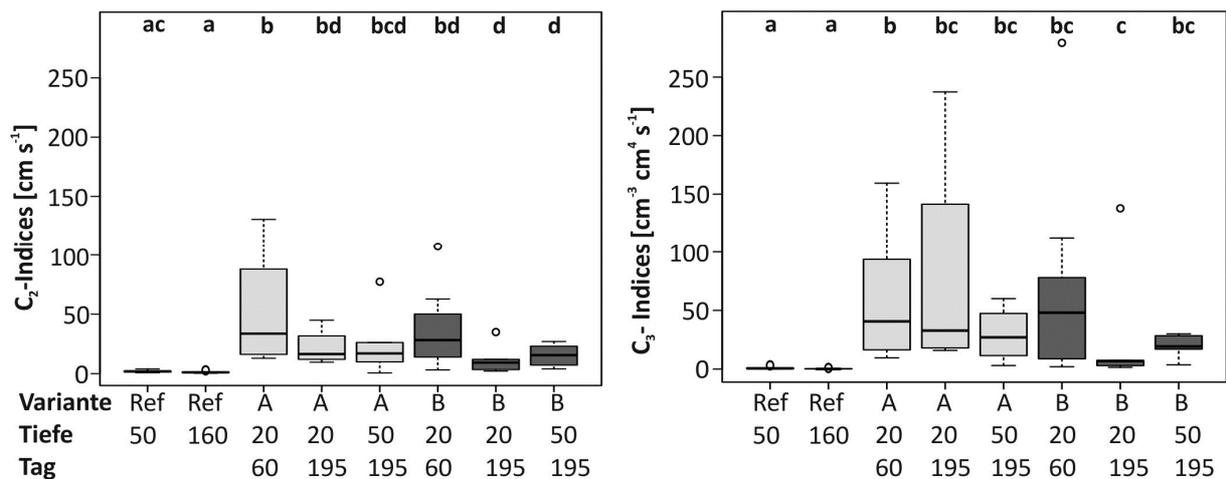


Abb. 94: Standort Hohenschulen, C_2 - und C_3 -Indices nach Groenevelt et al. (1984), Vergleich von ungestörter Referenz in 50 cm und 160 cm Tiefe mit den Varianten A und B 60 Tage nach Schüttung in 20 cm Tiefe und 195 Tage nach Schüttung in 20 cm und 50 cm Tiefe, unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede $p \leq 0,05$

Durch die Schüttung des Bodens wird das blockierte Porenvolumen (ϵ_B) in Variante A im Vergleich zur Referenz leicht erhöht (Abb. 95). In Variante B ist es etwas geringer, die Unterschiede sind jedoch in keinem Fall signifikant. In der Referenz sind in 50 cm Tiefe 1,4% des Porenvolumens blockiert. In 160 cm Tiefe ist ϵ_B gleich Null. 60 Tage nach Schüttung ist in der Variante A 2 % des Porenvolumens blockiert, in der Variante B sind es 0,5 %. Nach 195 Tagen ist der Anteil von ϵ_B in Variante A in 20 cm Tiefe auf 1% gesunken, in 50 cm Tiefe sind 4,6% des Porenvolumens blockiert. In der Variante B ist ϵ_B nach 195 Tagen in 20 cm Tiefe auf 5 % angestiegen, in 50 cm Tiefe sind 0,4 % des Porenvolumens blockiert. Die Streuung der Messwerte ist vor allem in den Varianten A und B in 20 cm Tiefe relativ hoch. In allen Varianten wurden auch ϵ_B nahe Null ermittelt.

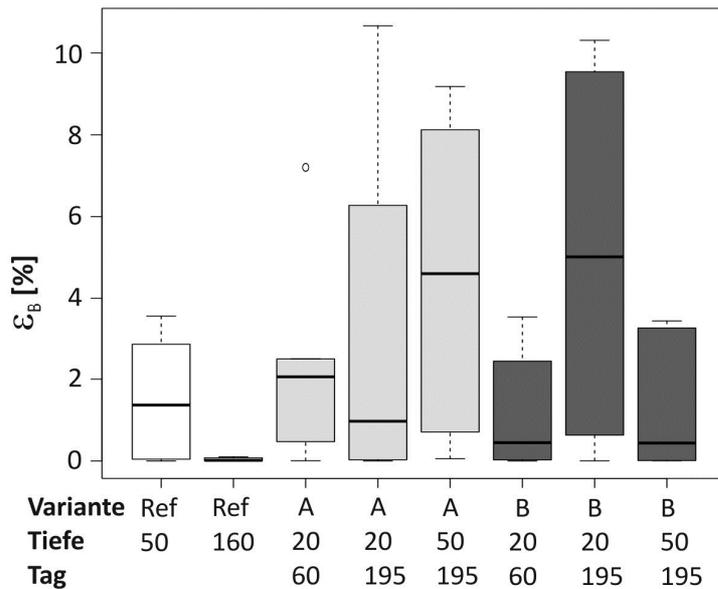


Abb. 95: Standort Hohenschulen, blockiertes Porenvolumen nach Ball et al. (1988), Vergleich von ungestörter Referenz in 50 cm und 160 cm Tiefe mit den Varianten A und B 60 Tage nach Schüttung in 20 cm Tiefe und 195 Tage nach Schüttung in 20 cm und 50 cm Tiefe

4.6.2 Monitoring

Die Installation der Monitoringstation auf dem Standort Hohenschulen erfolgte Anfang September 2011, unmittelbar nach dem Wiederverfüllen der Gruben.

Wetter und Matrixpotentiale

Im Messzeitraum gab es relativ trockene Perioden im November 2011, März 2012 und Ende Juli 2012. Der relativ milde Winter 2011/2012 war niederschlagsreich, und auch im Mai und Juni fielen relativ große Niederschlagsmengen (Abb. 96). Entsprechend zeigen die im Referenzboden (SS-LL) gemessenen ψ_m (Abb. 97, oben) im Oktober 2011 und vor allem von Dezember 2011 bis Anfang Februar häufige und langanhaltende Wassersättigung im Messbereich von 50 cm bis 130 cm Tiefe. Ende Mai 2012 trocknet der Boden in der Referenz erstmalig im Messzeitraum bis unter FK aus. Insgesamt bleibt der Boden ab Ende Mai 2012 in 50 cm Tiefe 70 Tage und in 130 cm Tiefe 16 Tage durchgehend unter FK. Erst am 18.07. nach einem Tagesniederschlag von 30 mm wird hier wieder Wassersättigung erreicht.

Der Boden der Variante A (Abb. 97, Mitte) reagiert deutlich sensibler auf Niederschlagsereignisse als der ungestörte Referenzboden. Die Wassersättigung tritt hier schneller ein und hält länger an. Erst in der dritten Juniwoche 2012 trocknet der Boden in 50 cm Tiefe für 6 Tage bis unter FK aus,

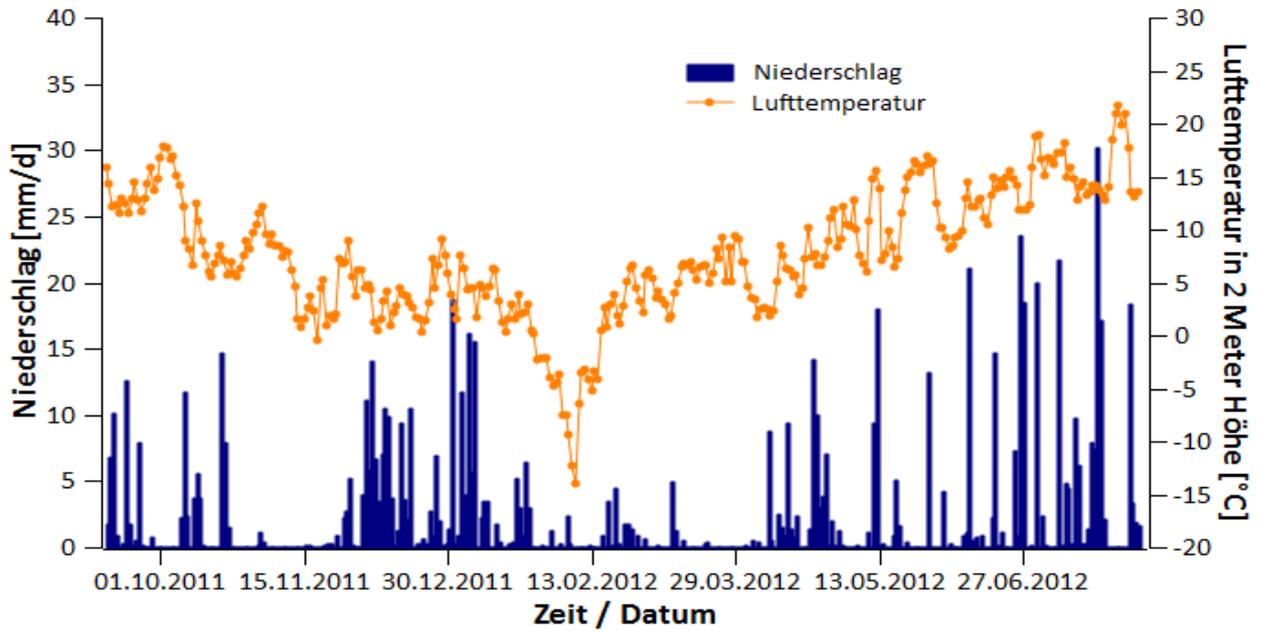


Abb. 96: Standort Hohenschulen, Tagesniederschläge und Lufttemperatur in 2 Meter Höhe im Messzeitraum September 2011 bis Juli 2012 (Daten: Wetterstation Versuchsgut Hohenschulen, Achterwehr)

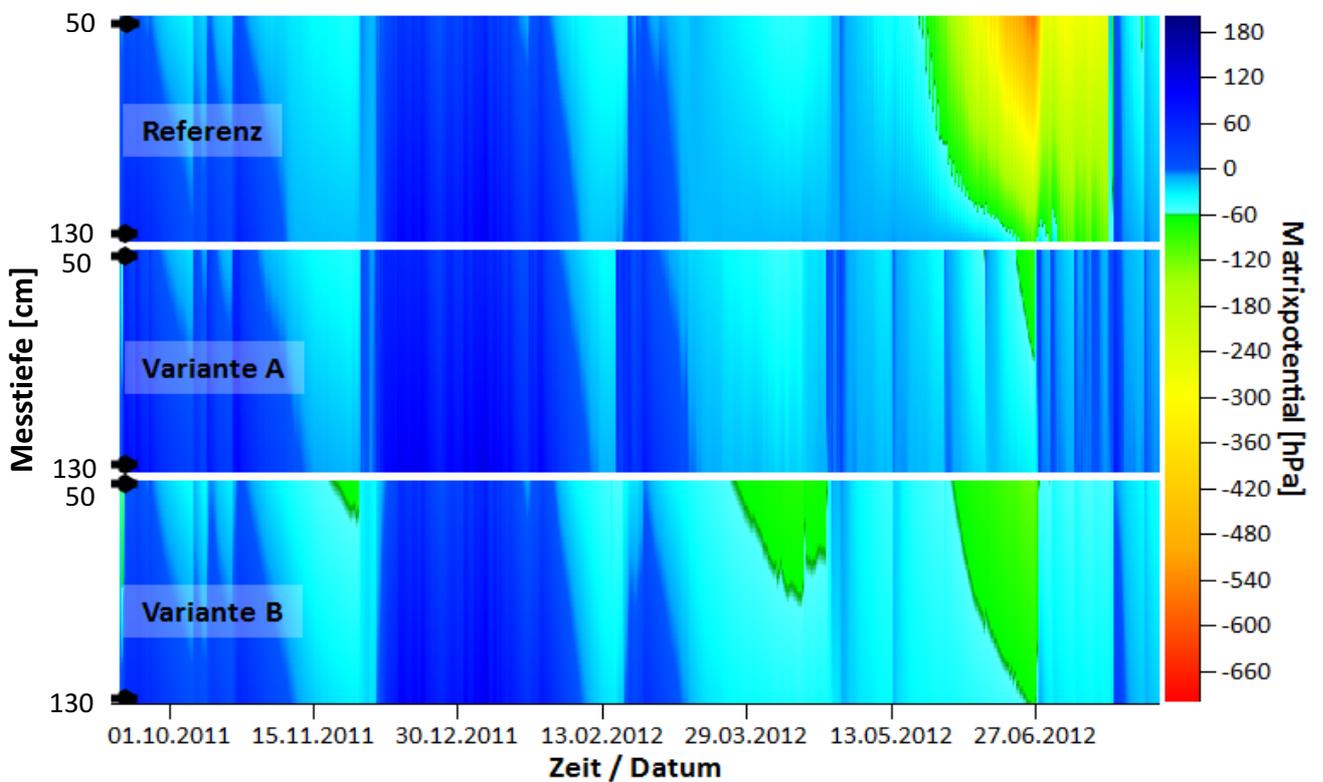


Abb. 97: Standort Hohenschulen, Matrixpotentiale in 50 cm bis 130 cm Tiefe, Referenz, Variante A und Variante B im Messzeitraum September 2011 bis Juli 2012

und Tagesniederschläge von 24 mm und 19 mm am 24.06. und 25.06. verursachen wieder einen sprunghaften Anstieg der ψ_m hin zu wassergesättigten Bedingungen.

Der Boden der Variante B (Abb. 97, unten) zeigt sich weniger sensibel gegenüber Niederschlagsereignissen als die Variante A und trocknet in niederschlagsfreien Perioden in 50 cm Tiefe schneller und im November 2011 und März 2012 auch stärker aus als die Referenz. Die Austrocknung Ende Mai 2012 erreicht etwa eine Woche später als in der Referenz Werte unter FK und hält in 50 cm Tiefe 27 Tage, in 130 cm Tiefe jedoch nur 2 Tage an. Niederschläge von 24 mm und 19 mm am 24.06. und 25.06. lassen die ψ_m auch in dieser Variante sprunghaft ansteigen. Der Boden erreicht hier allerdings im Unterschied zu Variante A erst 23 Tage später, am 18.07. nach einem Tagesniederschlag von 30 mm wieder Wassersättigung.

Im Referenzboden lagen im Messzeitraum in 50 cm Tiefe 18% der Messwerte und in 130 cm Tiefe 7 % der Messwerte unter FK (Tab. 50). Das mittlere ψ_m lag in 50 cm Tiefe bei -65 hPa und in 130 cm Tiefe bei 5 hPa. Insgesamt zeigt die Variante B eine geringere mittlere absolute Abweichung der gemessenen Ψ_m von der Referenz und ist im Vergleich zu Variante A häufiger trockener als die Referenz. Es werden in der Variante B außerdem häufiger Werte unter FK erreicht und der Boden ist insgesamt trockener als in der Variante A.

Tab. 50: Standort Hohenschulen, Ψ_m der Referenz und der Varianten A und B in 50 cm und 130 cm Tiefe, Anteil Messwerte unter Feldkapazität, mittleres Ψ_m , mittlere absolute Abweichung der Varianten A und B von der Referenz und Anteil der Messwerte in den Varianten A und B mit niedrigeren Ψ_m als die Referenz

Variante	Referenz	Referenz	A	A	B	B
Messtiefe [cm]	50	130	50	130	50	130
Anteil Messwerte unter FK (-60 hPa) [%]	18	7	2	0	20	1
Mittleres ψ_m [hPa]	-65	5	-7	21	-33	2
mittlere absolute Abweichung von Referenz [hPa]	-	-	-58	-16	-31	4
Messwerte niedriger als Referenz [%]	-	-	18	18	56	60

Redoxbedingungen

Das Einmischen von Branntkalk führte in der Variante B zu einem Anstieg des pH-Wertes von 6,6 auf 7,55. Dieser höhere pH-Wert bedingt eine leichte Erhöhung der rH-Werte.

Die rH-Werte (Abb. 99) der Referenz und der Variante B steigen im Messzeitraum vom anoxischen bis in den oxischen Bereich. Die rH-Werte der Variante A sind deutlich niedriger und bleiben in der Messtiefe 130 cm, trotz eines leichten Anstieges im Frühjahr 2012, während des gesamten Messzeitraumes deutlich im anoxischen Bereich. In 50 cm Tiefe ist auch in Variante A ein Anstieg der rH-Werte im Messzeitraum zu erkennen, dieser reicht jedoch bis auf wenige Ausnahmen nur bis in

den suboxischen Bereich. In den Varianten A und B kommt es in 50 cm Tiefe im niederschlagsreichen Dezember 2011 und Januar 2012 zu einem Absinken der rH-Werte, dieses Absinken ist in der Referenz nicht festzustellen. In der Referenz sinken die rH-Werte im Mai 2012 in 50 cm Tiefe in den suboxischen Bereich und sind in diesem Zeitraum niedriger als die rH-Werte in 50 cm Tiefe in den Varianten A und B.

Niederschlagsereignisse führen zunächst zu einem leichten Anstieg der rH-Werte, da durch das eindringende Wasser eine Umverteilung der Bodenluft stattfindet, gefolgt von einem Absinken der rH-Werte im Zuge der zunehmenden Wassersättigung des Porensystems. Die Schwankungsamplitude der rH-Werte ist in der Variante A in 50 cm Tiefe am größten, da hier die stärkste Reaktion auf Niederschlagsereignisse stattfindet. Die Schwankungsamplituden der Messwerte sind in der Variante B in 50 cm Tiefe geringer und in der Referenz am geringsten. Die Schwankungsamplitude der rH-Werte ist in allen Varianten in 130 cm Tiefe geringer als in 50 cm Tiefe.

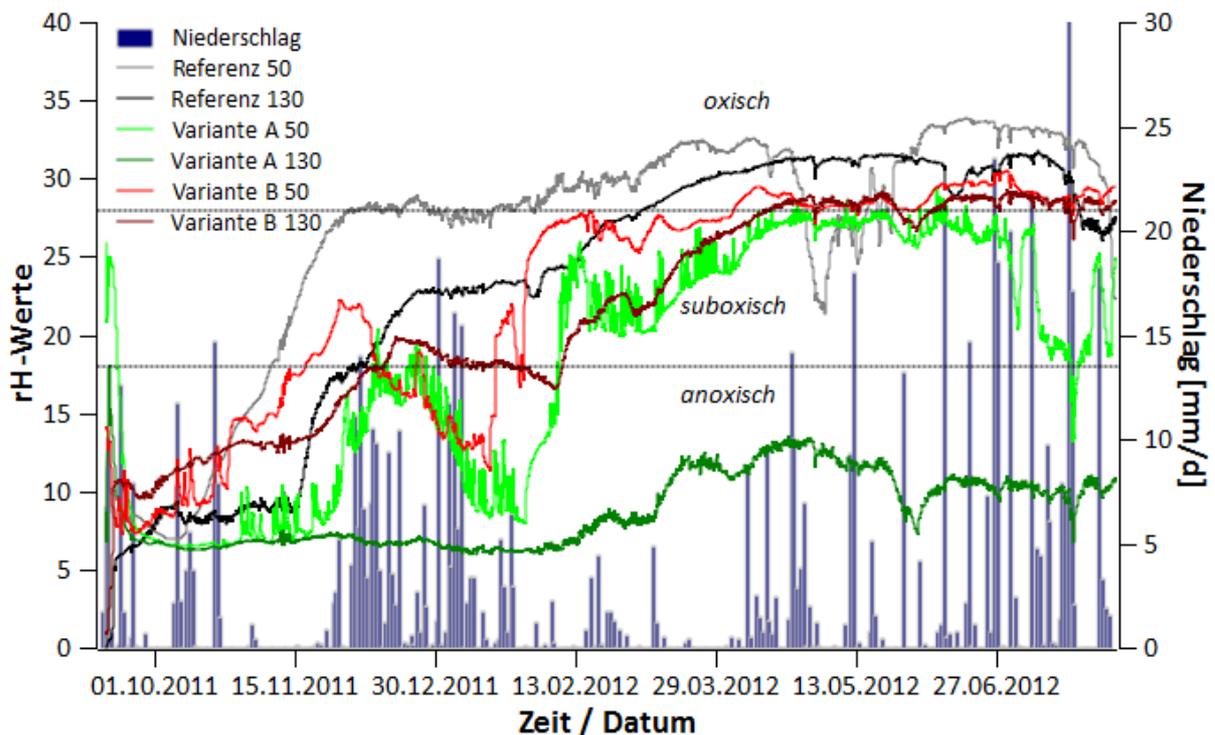


Abb. 98: Standort Hohenschulen, rH-Werte in 50 cm Tiefe und 130 cm Tiefe, bezogen auf pH 6,6 (Referenz und Variante A) beziehungsweise pH 7,55 (Variante B) und Tagesniederschläge im Messzeitraum September 2011 bis Juli 2012

Im der Referenz sind 62 %, beziehungsweise 44 % der rH-Werte im oxischen Bereich (Tab. 51). Die mittleren rH-Werte liegen in 50 cm Tiefe im Mittel bei 26 und in 130 cm Tiefe im Mittel bei 23 und somit im suboxischen Bereich. Die rH-Werte der Variante B sind im Mittel niedriger als in der Referenz, liegen jedoch noch im suboxischen Bereich. Die rH-Werte in Variante A sind deutlich niedriger als die der Referenz und der Variante B und liegen in 50 cm Tiefe im Mittel bei 18 und in

130 cm Tiefe im Mittel bei 9 und somit an der Grenze zwischen suboxischem und anoxischem Bereich, beziehungsweise im anoxischen Bereich.

Tab. 51: Standort Hohenschulen, rH-Werte der Referenz und der Varianten A und B in 50 cm und 130 cm Tiefe, Anteil Messwerte im oxischen Bereich, mittlere rH-Werte, mittlere absolute Abweichung der Varianten A und B von der Referenz und Anteil der Messwerte in den Varianten A und B mit höheren rH-Werten als die Referenz

Variante	Referenz	Referenz	A	A	B	B
Messtiefe [cm]	50	160	50	130	50	130
Anteil Messwerte im oxischen Bereich [%]	62	44	1	0	37	30
Mittlere rH-Werte [-]	26	23	18	9	23	21
mittlere absolute Abweichung von Referenz [-]	-	-	8	14	4	2
Messwerte höher als Referenz [%]	-	-	9	4	6	18

4.6.2.1 Gießwassergaben

Die bodenphysikalischen Kennwerte der Variante C entsprechen zum Zeitpunkt der Gießwassergaben denen in Variante B.

Es wurden in der Variante C vier unterschiedliche Gießwasserversuche durchgeführt. Die Gießwassermengen wurden so gewählt, dass sie in der Friedhofspraxis realistischen Gießwassergaben im Rahmen der Grabpflege entsprechen. Es wurden die folgenden Gießwassergaben durchgeführt (Tab. 52):

Tab. 52: Standort Hohenschulen, Variante C, Gießwassergaben

Gießvolumen auf Parzelle [Liter]	Gießvolumen auf Parzelle [mm]	entsprechende Grabpflege auf Einzelgrab (2m ²) [Anzahl 10 Liter Gießkannen]
10	2,2	0,5
20	4,4	1
4	8,9	2

Die Reaktionen der ψ_m in 50 cm und 130 cm Tiefe auf die Gießwassergaben sind in Abb. 99 aufgeführt. Die zeitlich verzögerte Reaktion der ψ_m auf Niederschlagsereignisse (und Gießwassergaben) ist durch die Einbautiefe der Tensiometer von 50 cm beziehungsweise 130 cm Tiefe und die relativ geringe k_f des Bodens bedingt.

Erst das wiederholte Begießen mit 8,9 mm Wasser verursachte einen deutlichen Anstieg der ψ_m in 50 cm und 130 cm Tiefe (Abb. 99, d). Die erste Gießwassergabe am Abend des 24.07. führte, wie auch

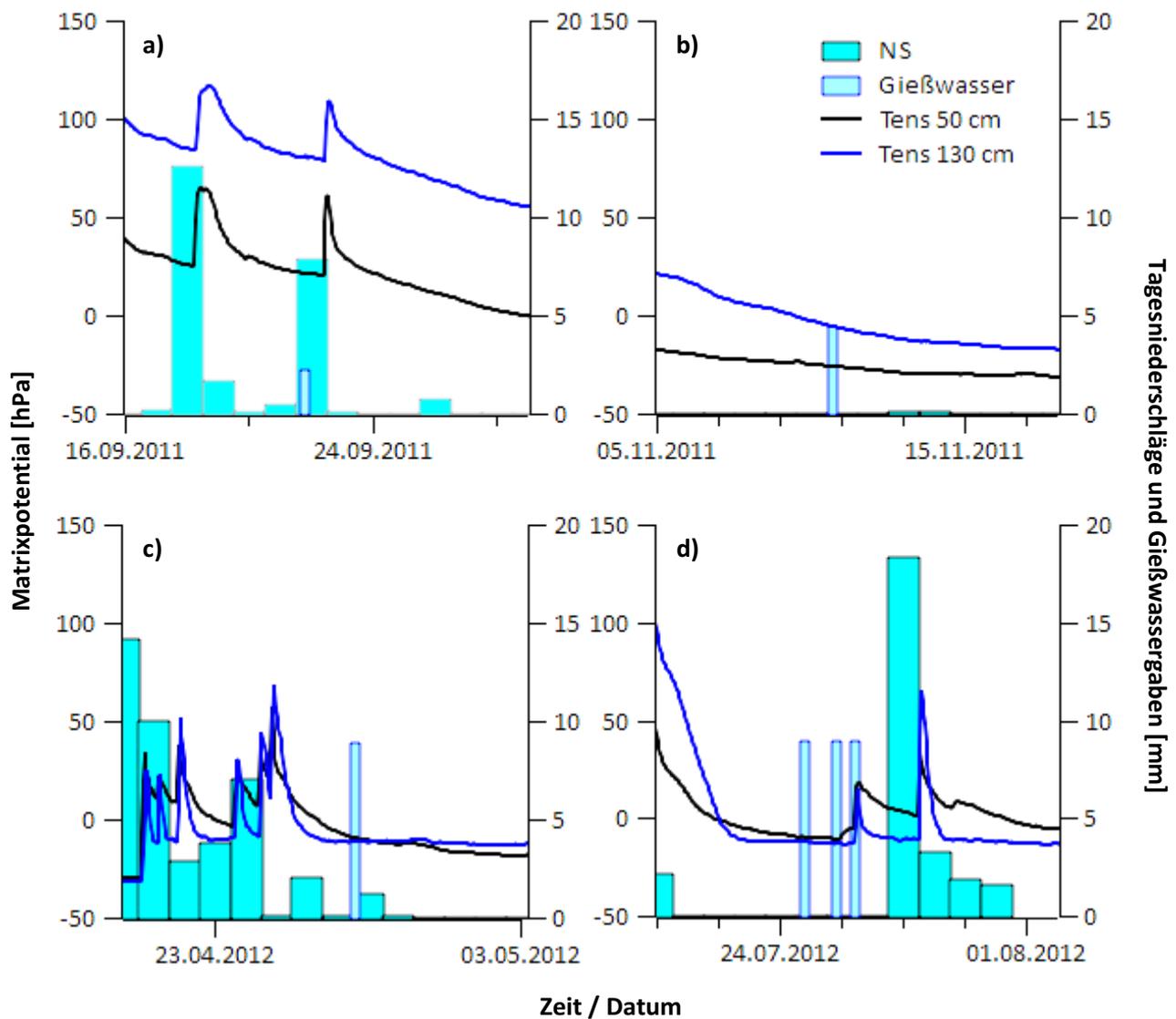


Abb. 99: Standort Hohenschulen, Variante C, ψ_m in 50 cm (schwarze Linien) und 130 cm (blaue Linien) Tiefe, Tagesniederschläge (türkise Säulen) und Gießwassergaben (hellblaue Säulen): a: einmalige Gießwassergabe von 2,2 mm, b: einmalige Gießwassergabe von 4,4 mm, c: einmalige Gießwassergabe von 8,9 mm und d: dreimalige Gießwassergabe von 8,9 mm

schon bei der Gießwassergabe am 27.04. (Abb. 99, c) zu keinem messbaren Anstieg der ψ_m . Nach einer weiteren Gießwassergabe von 8,9 mm 25 Stunden später konnte in 50 cm Tiefe ein Anstieg der ψ_m um 6 hPa und in 130 cm Tiefe ein Anstieg um 30 hPa festgestellt werden. In 130 cm Tiefe ist der Boden nach dieser Gießwassergabe wassergesättigt. Mit der dritten Gießwassergabe, 13 Stunden später stiegen die ψ_m sowohl in 50 cm Tiefe als auch in 130 cm Tiefe bis auf positive Werte und erreichten somit Wassersättigung. Nach den Gießwassergaben sanken die ψ_m in 50 cm Tiefe leicht, ohne dabei jedoch wieder negative Werte zu erreichen, während sie in 130 cm Tiefe sehr schnell wieder auf negative Werte absanken. 50 Stunden nach der letzten Gießwassergabe erfolgte ein Niederschlagsereignis, so dass keine weitere Austrocknung stattfand.

Um eine bessere Auflösung der tiefenabhängigen Wasserbewegung zu erhalten wurde eine Gießwassergabe von 8,9 mm zusätzlich an Monitoringstation B auf dem Friedhof SH1 durchgeführt (Abb. 100). Der Boden ist hier im Vergleich zum Feldversuch in Hohenschulen weniger tonreich (vgl. Tab. 33), die k_f ist mittel (vgl. Abb. 65) und somit etwas höher als in der Variante C des Feldversuches (k_f hier 195 Tage nach Schüttung gering).

In 20 cm Tiefe konnte als Reaktion auf die Gießwassergabe ein deutliches Ansteigen der ψ_m bis zu positiven Werten festgestellt werden. Unmittelbar nach der Gießwassergabe sinken die ψ_m jedoch wieder kontinuierlich ab. Auch in 30 cm Tiefe steigen die ψ_m an, hier ist der Anstieg jedoch zeitlich verzögert und insgesamt geringer als in 20 cm Tiefe. Die ψ_m verbleiben hier allerdings noch Tage nach der Gießwassergabe im positiven Bereich. In 50 cm Tiefe kann, analog zu den Ergebnissen des Feldversuches (Abb. 99, c) keine Reaktion der ψ_m festgestellt werden.

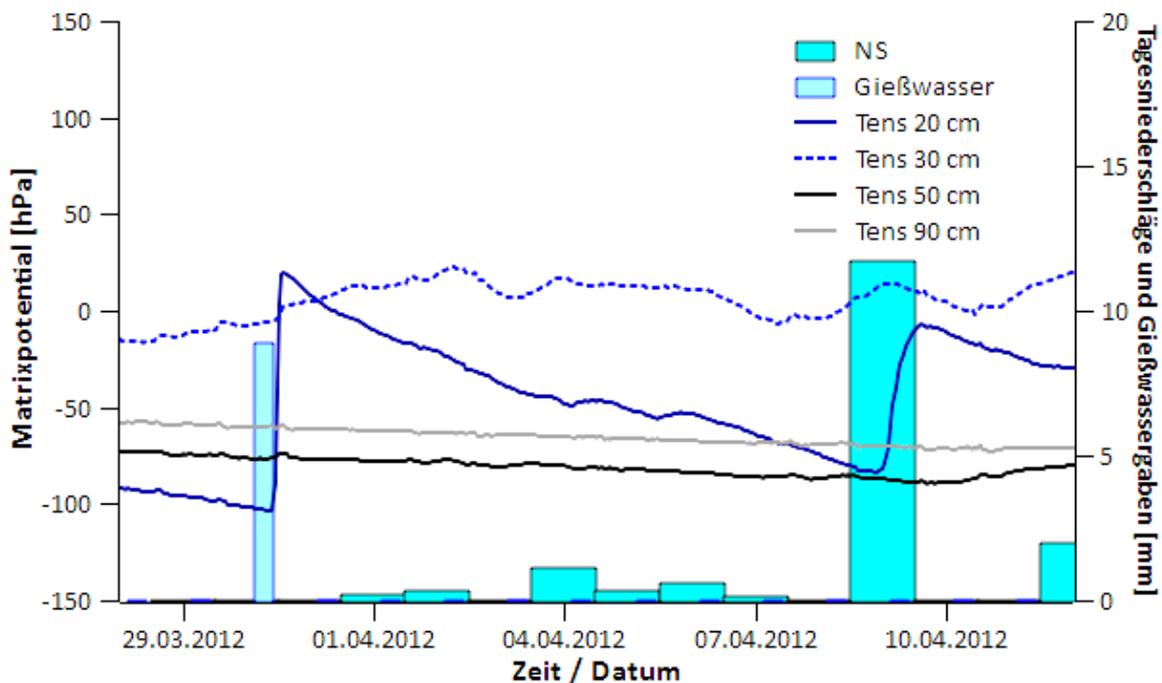


Abb. 100: Friedhof SH1, ψ_m in 20 cm, 30 cm, 50 cm und 90 cm Tiefe, Tagesniederschläge und einmalige Gießwassergabe von 8,9 mm

4.6.3 Zusammenfassung des Feldversuches

Im Feldversuch konnten erstmals Daten zu Porengrößenverteilung, Porenorganisation, k_i und k_f , sowie der Strukturdynamik in frisch verfüllten Erdgräbern gewonnen werden. Durch das Monitoring von ψ_m und Eh wurden die Auswirkungen der Schüttung auf den Wasserhaushalt und die Sauerstoffverhältnisse dokumentiert. Durch die Einmischung von Branntkalk konnten trockenere Bedingungen geschaffen werden. Die Gießwasserversuche liefern erste Anhaltspunkte für den Rahmen, in dem Grabbewässerung ohne negative Auswirkungen auf den Verwesungsprozess möglich ist.

5. Diskussion

5.1 Klassifizierung, Kartierung und Humusgehalte von Friedhofsböden

Bodenkundliche Klassifizierung und Kartierung

Für die bodenkundliche Klassifizierung von Friedhofsböden gibt es bislang keine einheitliche Regelung. Bei der Erstellung von Bodenkarten wurden die Friedhofsflächen früher nicht gesondert berücksichtigt. Es wurden ihnen keine Bodentypen zugewiesen (z.B. Wittmann (1975), Schrader (1978), Benne (1981)), oder sie wurden allgemein als „Böden der Friedhöfe“ bezeichnet (Reinirkens (1991), zit. in Kasielke (2011)). Auch wurde der Bodentyp der angrenzenden Flächen übernommen (Herberhold 1973). Dies ist vor allem durch die eingeschränkte Zugänglichkeit dieser Areale für bodenkundliche Kartierungen bedingt (Helmes 2004). Die Kartierung von 19 Friedhöfen hat gezeigt, dass die Merkmale der vor der Friedhofsnutzung vorliegenden Bodentypen flächenhaft überprägt wurden. Dies hat zur Folge, dass diese insbesondere in alten Friedhöfen nur noch außerhalb der Grabfelder zu finden sind. Vor diesem Hintergrund erscheint eine Klassifizierung von Friedhofsböden anhand der in der Peripherie des Friedhofs vorkommenden natürlichen Böden nicht ausreichend.

Wenn Friedhofsböden bodenkundlich erfasst und klassifiziert werden, werden sie im deutschsprachigen Raum überwiegend als Nekrosole oder Rigosole bezeichnet (z. B. Blume (1982), Grenzius (1987), Sukopp (1993), AKS (1996), Blume (1996), Kahle (1996), Fiedler (2002), (Schmidt 2009)), teilweise werden Subtypen (Hortisol-Nekrosol, Nekrosol-Regosol) gebildet (Helmes 2004, Albrecht et al. 2005). Der Bodentyp Nekrosol ist jedoch bisher, im Unterschied zu anderen anthropogenen Böden wie Kolluvisolen (YK), Plaggeneschen (YE), Hortisolen (YO), Rigosolen (YY) und Treposolen (YU), nicht in die bodenkundliche Kartieranleitung der Ad-hoc-AG Boden (2005) aufgenommen. Fleige et al. (2002) bezeichnen Nekrosole als „die Rigosole der Friedhöfe“. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde für die Klassifizierung von Friedhofsböden ebenfalls der Bodentyp Rigosol verwendet, da es sich hierbei um anthropogene Böden handelt die ein turnusmäßiges tiefes Umgraben (Rigolen) erfahren (vgl. Ad-hoc-AG Boden (2005)). Nach der World Reference Base for Soil Resources (WRB 2006) werden Rigosole, wenn die rigolten Horizonte > 5 dm mächtig sind, als Regic Anthrosols bezeichnet. In englischsprachigen Publikationen werden außerdem die Bezeichnungen Necrosols (Sobocka 2004, Charzynski 2010, Resulovic 2011) und in Verbindung mit Wassereinflüssen Gleyic Anthrosols (Fiedler et al. 2004) verwendet.

Die durchgeführten Untersuchungen verdeutlichen die starke Veränderung natürlicher Böden durch die Friedhofsnutzung. Pedogenetische Prozesse wie beispielsweise die Tonverlagerung werden durch eine Vermischung der verarmten Horizonte mit den Anreicherungshorizonten überprägt. In jungen Friedhöfen liegt zunächst eine Vergesellschaftung von Rigosolen mit natürlichen oder bereits durch andere anthropogene Einflüsse geprägten Bodentypen vor. Mit zunehmendem Alter des Friedhofes

erfolgt eine fortschreitende Homogenisierung in der Fläche, bis (zumindest innerhalb der Grabfelder) nur noch Rigosole vorliegen. Die beispielsweise für eine Jungmoränenlandschaft typische (quasi-) natürliche Heterogenität der Bodentypen (Richter et al. 2007) wird deshalb durch die Friedhofsnutzung verringert (vgl. Friedhöfe SH1, Abb. 8: 8 ha, 4 Bodeneinheiten und SH2, Abb. 10: 4,5 ha, 2 Bodeneinheiten). Innerhalb eines Friedhofsareals können, bedingt durch Grund- und Stauwassereinflüsse und verschiedene Texturen, erhebliche Unterschiede in der Eignung der Böden für die Erdbestattung auftreten. Deshalb ist die Durchführung einer Bohrstockkartierung bis in 3 Meter Tiefe zur gesamthaften Erfassung und bodenkundlichen Klassifizierung eines Friedhofsareals notwendig.

Die Einstufung der Rigosole in Subtypen, Varietäten und Subvarietäten ermöglicht sowohl eine eindeutige Klassifizierung als auch, über die Beschreibung von Grund- und Stauwassereinflüssen, eine erste Einschätzung der Sauerstoffversorgung im Erdgrab und der Filterleistung des Bodens unterhalb der Grabsohle. So kann unter Berücksichtigung der Bestattungstiefe bereits anhand des Bodensubtyps, beziehungsweise der (Sub-) Varietät, die Gefahr von durch wassergefüllte Poren gehemmtem Gasaustausch zwischen Sargbereich und Atmosphäre sowie einer vermehrten Ableitung von fäulnisbedingter Wärme als Folge von direktem Kontakt des Leichnams mit Wasser (Willmann 1996) eingeschätzt werden. Die zusätzliche Einbeziehung der Subvarietäten g5YYn und s5YYn ermöglicht die Dokumentation von Grund- und Stauwassereinflüssen in 230-300 cm Tiefe, so dass auch bei Bestattungstiefen bis zu 230 cm Tiefe die Berücksichtigung von Wasserverhältnissen, die die Filterleistung des Bodens unterhalb der Grabsohle mindern, gegeben ist.

Die zusätzliche Anlage von einer an die Flächenausdehnung und Heterogenität des Friedhofs angepassten Anzahl Leitprofile vervollständigt die Erfassung der Bodenverhältnisse. Vor allem Stauwasservorkommen können am besten bewertet werden wenn die Leitprofile über einige Stunden offen gelassen werden, so dass eventuelle Wasseraustritte aus den Profilwänden sichtbar werden (Beirat 2012).

Bei Anlage und Erweiterung der untersuchten Friedhöfe wurden teilweise Aufschüttungen vorgenommen. Diese dienen zum einen gestalterischen Zwecken wie der Einebnung der Fläche, beinhalten aber auch häufig den Versuch, den Sargbereich dem Einfluss von lehmigen oder schwer grabbaren Böden (vgl. Friedhof BE2, Abb. 27), Grund- oder Stauwasser (vgl. Friedhöfe NI 1 und NI2, Abb. 15 und Abb. 17) zu entziehen. Schmidt-Bartelt et al. (1990) stellten anthropogene Bodenaufträge von im Mittel 50-70 cm Mächtigkeit (in Muldenpositionen bis zu mehreren Metern Mächtigkeit) auf von Verwesungsstörungen betroffenen, stauwassergeprägten Friedhöfen in Bochum fest. Diese Auftragsböden bestanden zumeist aus natürlichem Substrat, enthielten jedoch auch Kohle, Drähte, Aschen, Schlacken und Bauschutt, waren teilweise stark verdichtet und verfügten nur über eine geringe LK. Auch auf dem Friedhof BW2 (Abb. 51, Bodeneinheit D) wurde der zur

Erweiterung des Friedhofes aufgetragene Boden sehr stark verdichtet. Die so entstandene Fläche ist stauwassergeprägt.

Organische Substanz

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde anhand der Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte in Deckschicht, Sargbereich und Filterschicht abgelaufener Gräber überprüft, ob und in welchem Umfang es in Erdgräbern zu Anreicherungen von organischer Substanz kommt.

Die Deckschichten (20-90 cm Tiefe) und Sargbereiche (90 cm Tiefe bis Bestattungstiefe) der untersuchten Gräber waren nach Ad-hoc-AG Boden (2005) als mittel, beziehungsweise schwach humos einzustufen (Deckschichten: 2,11 % Humus, Sargbereiche: 1,09 % Humus). Blume (1982), Aey (1990), Kahle (1996), Helmes (2005) und Charzynski (2010) stellten im Unterboden von Friedhöfen ähnliche Humusgehalte (0,81-2,58 %) fest.

Auf 83 % der untersuchten Friedhöfe wiesen die Sargbereiche im Mittel höhere Kohlenstoffgehalte auf als die Filterschichten (Tab. 28), und auf 56 % der untersuchten Friedhöfe wiesen die Sargbereiche im Mittel höhere Stickstoffgehalte auf als die Filterschichten (Tab. 30). Keiner dieser Unterschiede war statistisch signifikant. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass es sich um gemittelte Werte von Friedhöfen aus unterschiedlichen Bodenlandschaften und bei einigen der untersuchten Gräber um Erstbelegungen handelt. Nach Erstbelegung stellten Albrecht et al. (2005) in Friedhofsböden keine Zunahme der Humusgehalte durch die Nutzung als Begräbnisstätte fest und beschreiben den untersuchten Friedhof als insgesamt sehr kohlenstoff- und stickstoffarm. Zusätzlich waren 70% der untersuchten Friedhöfe von Verwesungsstörungen betroffen, so dass die Umsetzung von Sarg und Leichnam und infolge dessen die Humusbildung nur schleppend voranging. Analog dazu stellten Fiedler et al. (2012) bei Exhumationen auf einem von Verwesungsstörungen betroffenen Friedhof im Boden unterhalb der Särge leicht erhöhte Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte fest, aber auch hier waren die Unterschiede nicht signifikant.

Durch die Einmischung von humosem Oberboden und Blumenerde aus der Grababdeckung können die Deckschichten von Erdgräbern Anreicherungen von organischer Substanz aufweisen. Auch die Flächennutzung vor Anlage des Friedhofes spielt eine Rolle. Auf den Friedhöfen NW1 (Abb. 30) und NI4 (Abb. 21) war der Boden schon vor der Friedhofsnutzung durch Kleingartennutzung, beziehungsweise Plaggenwirtschaft tief humos. Auch die Vermischung von Auftragsböden oder Kolluvien mit darunter anstehenden Torfen (vgl. Friedhof NI2, Abb. 17, und Friedhof SH1, Leitprofil A, Abb. 58) kann zu erhöhten Humusgehalten der R-Horizonte führen. Nur auf den Friedhöfen BE1 und BE2, die über eine hohe Verwesungsleistung verfügen, konnten in den Sargbereichen höhere Humusgehalte als in den Deckschichten festgestellt werden (vgl. Abb. 28).

Die mittleren N_t -Gehalte der untersuchten Friedhöfe liegen mit 0,5-0,7% in den R-Horizonten (Deckschichten und Sargbereiche) im selben Bereich wie die N_t -Gehalte der von Blume (1982) und Aey (1990) untersuchten Friedhöfe. Carter et al. (2007) weisen darauf hin, dass das Einbringen von Material mit weiten C/N-Verhältnis (z.B. Sargholz) in den Boden zunächst zu einer Abnahme der anorganischen Stickstoffgehalte führt, da der verfügbare anorganische Stickstoff von Mikroorganismen aufgenommen und so fixiert wird. Die weitere Zersetzung des Leichnams lässt das C/N-Verhältnis wieder enger werden und es wird vermehrt anorganischer Stickstoff frei. In ca. 160 cm Tiefe freiwerdender Stickstoff unterliegt einer hohen Auswaschungsgefahr, da in dieser Bodentiefe nur wenig Pflanzenwurzeln vorhanden sind, die den Stickstoff aufnehmen können. Im Zusammenhang mit den auf Friedhöfen durch die Grabpflege erhöhten Sickerwasserraten wird die Auswaschungsgefahr zusätzlich erhöht (Fleige et al. 2002).

5.2 Die Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung von Friedhofsböden

Verwesungsleistung

Da die Verfügbarkeit von Sauerstoff für die Verwesung eines Leichnams von entscheidender Bedeutung ist (Schoenen 2002, Dent et al. 2004, Forbes et al. 2005b), wird die Eignung eines Bodens für die Erdbestattung maßgeblich von seiner Fähigkeit den Gasaustausch zwischen Sargbereich und Atmosphäre zu gewährleisten bestimmt.

Der Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre findet zum einen durch Diffusionsprozesse entlang von Konzentrationskoeffizienten im luftgefüllten Inter- und Intraaggregatporenvolumen des Bodens und zum anderen durch Konvektion (Massenfluss) entlang von Druckgradienten statt, wobei der Anteil der Diffusion als kontinuierlich und großflächig stattfindender Prozess überwiegt. Die Größe des durch Diffusion und Konvektion je Zeiteinheit bewegten Gasvolumens hängt, neben dem luftgefüllten Porenvolumen (ϵ_a) als Funktion von Gesamtporenvolumen (GPV) und Wassergehalt (Θ) (Buckingham 1904, Penman 1940), von strukturellen Parametern wie der Porengrößenverteilung und der Tortuosität (Moldrup et al. 2001) und Konnektivität (Resurreccion et al. 2008) des Porensystems ab. Hierbei hängt die Konvektion stärker von Durchmesser, Länge und Kontinuität der Poren ab als die Diffusion (Arthur et al. 2012).

In dem hier vorgestellten Bewertungssystem wird die Luftkapazität (LK) als gängige Kenngröße zur Bewertung der Durchlüftung eines Bodens (Chang und Lindwall 1990, Cramer 2006, Reynolds et al. 2007, Arthur et al. 2011) für die Bewertung des potenziellen Gasaustausches zwischen Verwesungszone und Atmosphäre eingesetzt. Dieser Parameter wird auch in den in Kapitel 2.4 vorgestellten Bewertungssystemen von Fleige et al. (2002), Wourtsakis (2002), Sabel (2007) und Raissi (2008) zur Bewertung der Sauerstoffversorgung verwendet. Im Bewertungssystem werden LK

von > 13 Vol.-% (dies entspricht der Stufe 4, „hoch“ nach Ad-hoc-AG Boden (2005)) als optimal angesehen. In den in Kapitel 2.4 vorgestellten Bewertungssystemen werden mit > 12 Vol.-%, beziehungsweise > 10-15 Vol.-% sehr ähnliche Werte genannt. Für die untersuchten Leitprofile auf Friedhöfen konnte eine positive Korrelation zwischen LK und k_f von $\rho = 0,56$ ermittelt werden (Tab. 40). Die LK der untersuchten Friedhofsböden korreliert auch positiv mit der k_f ($\rho = 0,86$) und somit begünstigt eine hohe LK auch das schnelle Ableiten von Sickerwasser aus der Verwesungszone in tiefere Bodenschichten und das Freiwerden von ε_a für den Gastransport. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine freie Drainage des Sickerwassers durch die Filterschicht, so dass kein Wasserstau entstehen kann. Eine positive Korrelation zwischen LK und k_f wurde auch von Peth (2004) und Gebhardt et al. (2009) für nicht unter Friedhofsnutzung stehende Böden festgestellt. Vor diesem Hintergrund wird auf die zusätzliche Bewertung der k_f -Werte in der Verwesungszone, wie sie von Wourtsakis (2002), Sabel (2007) und Raissi (2008) vorgeschlagen wird, im Bewertungssystem verzichtet, zumal möglicher Stauwassereinfluss bereits anhand der bodenkundlichen Klassifizierung bis auf das Niveau der Subvarietät definiert und in der Bewertung berücksichtigt wird.

Die Bedeutung der LK für die Sauerstoffversorgung, selbst unter starkem Wassereinfluss, wird beim Vergleich der Eh an Monitoringstation A und D deutlich. An Monitoringstation D (Friedhof BW3, Bodentyp: SS-YY) verfügt der Boden nur über eine geringe LK und ist stauwassergeprägt. Hier liegen die rH-Werte im Messzeitraum durchweg deutlich im anoxischen Bereich (vgl. Abb. 87). An Leitprofil A (Friedhof SH1, Bodentyp: SS-YY) wurden bei hoher LK, trotz Grundwassereinfluss und zeitweilig bis in die Deckschicht vordringender Obergrenze des geschlossenen Kapillarsaumes, im Sargbereich höhere Eh gemessen als an Monitoringstation D. Diese liegen zwar ebenfalls überwiegend im anoxischen Bereich, steigen vereinzelt aber auch bis in den suboxischen Bereich an. Da die anoxischen Bedingungen die Diversität und Aktivität der Mikroorganismen verringern (Song et al. 2008), führen sie jedoch, trotz der etwas höheren rH-Werte auf Friedhof SH1, auf beiden Friedhöfen zu Verwesungsstörungen.

Ogleich es sich bei der LK um einen reinen Kapazitätsparameter handelt, der im Unterschied zu dynamischen Parametern wie D_B , k_i und k_a keine direkten Informationen über die Funktionalität des Porensystems liefert (Horn und Kutilek 2009), erscheint die Berücksichtigung der LK im Rahmen des Bewertungssystems angemessen zu sein. Die Bestimmung der LK ist einfach, sie kann alternativ auch anhand von Bodenart und ρ_t abgeleitet werden und ist eindeutig zu klassifizieren.

Neben LK und Wassereinflüssen wird zur Bewertung der Verwesungsleistung von Friedhofsböden die Bodenreaktion im Bereich der Verwesungszone hinzugezogen, da sie die Artenzusammensetzung und Aktivität der bodenbewohnenden Mikroorganismen beeinflusst. Die Empfehlungen zu in der Verwesungszone eines Erdgrabes optimalen pH-Werten sind: 6-8 (Fleige et al. 2002), beziehungsweise 6,0-7,5 (Wourtsakis 2002). In sauren (pH 3-5,5) Böden dominieren beim Abbau

organischer Substanz die Pilze, in Böden mit annähernd neutraler Reaktion (pH 5,5-7,5) herrschen für Bakterien optimale Bedingungen (Haslam und Tibbett 2009). Ab pH-Werten von $\leq 4,5$ kann es zu Toxiditäten durch mobil werdendes Aluminium kommen, wodurch die mikrobielle Aktivität zusätzlich gehemmt wird (Rousk et al. 2009). Der bei der Zersetzung eines Leichnams durch die Protolyse von Proteinen frei werdende Stickstoff wird im Boden unter aeroben Bedingungen hauptsächlich von den gram-negativen Bakterien Nitrosomas und Nitrobacter abgebaut. Auch diese Bakterien reagieren sensitiv auf den pH-Wert des Bodens. Die optimalen pH-Werte für die Aktivität von Nitrosomas liegen zwischen 7 und 9, für Nitrobacter liegen sie zwischen 5 und 8 (Dent et al. 2004). Aufgrund dieser Einflüsse der Bodenreaktion auf mikrobielle Aktivität und Umsetzungsraten im Boden wurden in dem Bewertungssystem pH-Werte von 5-8 als optimal angesehen und für pH-Werte außerhalb diese Spanne Zuschläge auf die Verwesungsleistung vergeben. Eine schlechtere Bewertung der Verwesungsleistung aufgrund von Zuschlägen für nicht im Optimalbereich liegenden pH-Werten wurde bei 10 % der untersuchten Bodeneinheiten vorgenommen (z. B. Friedhof NI2 (Abb. 22) und NW3 (Abb. 35)). Auf dem Städtischen Friedhof Berlin-Tegel (Rigosol aus Talsand) stellte Blume (1982) im Bereich der R-Horizonte pH-Werte von 6,6 in 15-42 cm Tiefe und 6,2 in 42-135 cm Tiefe fest. Aey (1990) untersuchte zwei Friedhöfe in Lübeck (Rigosol aus Talsand und Rigosol aus Beckenschluff) und stellte in den R-Horizonten pH-Werte von 6,5-7,4 (Talsand) und 5,6-6,7 (Beckenschluff) fest. Für diese Friedhöfe würde es im Bewertungssystem keine Zuschläge für die Bodenreaktion geben. Fiedler et al. (2004) stellten in von Verwesungsstörungen betroffenen Erdgräbern im Bereich des Sarges pH-Werte von 5,4-4,4 fest, was im Bewertungssystem zu einem Zuschlag für die Bodenreaktion und damit einer schlechteren Bewertung der Verwesungsleistung führen würde.

Die Wechselwirkungen zwischen den Redoxbedingungen im Boden und der mikrobiellen Aktivität (Farooqi und Demooy 1983, Douterelo et al. 2009, DeAngelis et al. 2010) und daraus ableitbare Auswirkungen auf die Verwesungsleistung eines Bodens werden im Bewertungssystem nicht gesondert berücksichtigt. In einem Boden, dem anhand der LK und der Wasserverhältnisse eine gute Sauerstoffversorgung zugesprochen wird, sind auch überwiegend oxische Bedingungen zu erwarten. Hohe Umsetzungsraten von organischer Substanz im Boden können die Eh aufgrund des hohen Sauerstoffverbrauchs der Mikroorganismen senken. Reichart et al. (2007) zeigten, dass starkes bakterielles Wachstum in Laborkulturen zu einem Absinken der Eh führt und sowohl die Bakterienspezies als auch die Bakteriendichte aus der Änderung der Redoxpotentiale im Zeitverlauf abgeleitet werden können. Zausig und Horn (1992) untersuchten den Wasserhaushalt und Belüftungszustand einzelner Bodenaggregate eines Pelosol-Gleyes und stellten fest, dass die Eh unter Wassersättigung in Bodenaggragaten aus dem Oberboden mit höherer mikrobieller Aktivität sowie höheren Anteilen an umsetzbarer organischer Substanz stärker absanken als in Aggregaten aus dem Unterboden mit geringerer mikrobieller Aktivität.

Da Oxidationsprozesse in der Regel mit dem Freiwerden von Protonen verbunden sind, bewirken sie ein Absinken des pH-Wertes wodurch die Mobilität von Schwermetallen erhöht werden kann. Frohne et al. (2011) stellten in mäßig bis stark sauren Auenböden in Phasen mit oxidierenden Bedingungen eine erhöhte Mobilität von Cd, Cu, Mn, Ni und Zn fest, die auf eine Auflösung von Sulfiden und damit freiwerdende Metalle zurückgeführt wurde. Die Löslichkeit von Fe hingegen wurde durch die Bildung von Eisen (hydr)oxiden eingeschränkt.

Die im Rahmen des Monitorings gemessenen Bodentemperaturen liegen in den Sargbereichen im Mittel bei 11 °C (Monitoringstationen A, B und C), beziehungsweise 13 °C (Monitoringstation D). Die Temperaturamplituden in den Sargbereichen betragen an allen Monitoringstationen unabhängig vom Wassereinfluss 13 °C. Die Bodentemperaturen im Sargbereich schwanken folglich im Jahresverlauf zwischen 17,5 und 4,5 °C, beziehungsweise 19,5 und 6,5 °C an Monitoringstation D. Diese Bodentemperaturen sind für mikrobielle Umsetzungsprozesse nicht zu niedrig (Schoenen 2002, Ottow 2011). Eine verstärkte Ableitung von fäulnisbedingter Wärme durch den Kontakt von Leichnam und Wasser (Willmann 1996) ist jedoch an Leitprofil A und D wahrscheinlich.

Möglichkeiten zur Verbesserung der Verwesungsleistung

Zu Verbesserung der Sauerstoffversorgung im Sargbereich ist eine ausreichend mächtige Aufschüttung mit geeigneten Substraten oder, bei stauwassergeprägten Böden, eine Drainage anzuraten. Dies sind in der Praxis auch häufig angewandte, beziehungsweise in Friedhofsgutachten empfohlene Schritte (Büdinger 1989, Gartiser 2000, Milbert 2002, Maier 2007). Die Aufschüttungen auf den untersuchten Friedhöfen NI1 (Abb. 15, Bodeneinheit B), NI2 (Abb. 17) und BE2 (Abb. 27, Bodeneinheit A) führen jedoch, da sie nicht mächtig genug sind, zu einem Sickerwasserstau im Bereich der Verwesungszone (Friedhöfe NI1 und NI2), beziehungsweise der Filterschicht (Friedhof BE2). Diese Beispiele zeigen, dass die Verwesungs- beziehungsweise die Filterleistung der Böden durch eine zu geringmächtige Aufschüttung gemindert werden kann.

Vor allem in Böden mit hoher LK, die von wasserstauenden Horizonten unterlagert sind, kann die Beseitigung von Stauwassereinflüssen zu einer erheblichen Verbesserung der Verwesungsleistung führen. Analog dazu würde die Verwesungsleistung (beziehungsweise die Filterleistung) der stauwasserbeeinflussten Friedhöfe SH1 (Abb. 8, Bodeneinheiten A, B und C), SH2 (Abb. 10), BE2 (Abb. 27, Bodeneinheit A), RP2 (Abb. 39), BY1 (Abb. 42, Bodeneinheit B), BY3 (Abb. 46), BW1 (Abb. 49), BW2 (Abb. 51, Bodeneinheiten A, C und D) und BW3 (Abb. 53) im Bewertungssystem nach erfolgreicher Drainage entsprechend etwas besser bewertet.

In Hanglage (vgl. Friedhöfe SH2 (Abb. 10), RP2 (Abb. 39), BW1 (Abb. 49)) könnte auch eine Fangdrainage oberhalb des Friedhofsbereiches Abhilfe schaffen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass

die Drainage entsprechend der Bestattungstiefe und der Lage der Sw-Horizonte ausreichend tief eingebaut wird.

Eine weitere Maßnahme zur Verbesserung der Sauerstoffversorgung in der Verwesungszone wäre eine Verringerung der Bestattungstiefe. Bestattungstiefen von 100-120 cm könnten die Sauerstoffversorgung deutlich verbessern, ohne dass eine Geruchsbelästigung oder das Eindringen von Wirbeltieren zu befürchten wäre (Willimann 1996). In der Schweiz sind Bestattungstiefen von 120-150 cm üblich und bewährt (Beirat 2012). Die in den meisten Friedhofssatzungen aufgeführte Mindestüberdeckung eines Sarges mit 90 cm Boden ist nicht wissenschaftlich auf ihre Notwendigkeit überprüft. Untersuchungen zu den geruchsfILTERnden Eigenschaften unterschiedlicher Bodenarten könnten hier Aufschluss geben, wie von Pagels et al. (2003) empfohlen wurde. Eine weniger tiefe Bestattung würde zudem den Leichnam in einen Bereich verlegen, in dem die sommerliche Erwärmung des Bodens stärker ist, Insekten besser Zugang haben und überschüssiges Wasser besser durch Pflanzenwurzeln entzogen werden kann als bei tieferer Bestattung (Willimann 1996).

Auch die Unterlassung von Mehrfachbelegungen im Schichtverfahren innerhalb eines Grabes (Tiefgrab) würde die Sauerstoffversorgung verbessern. Die Mehrfachbelegung eines Grabes macht einerseits eine große Bestattungstiefe notwendig (Willimann 1996), die den Leichnam dem Grundwasser näher und der Atmosphäre ferner sein lässt, und schafft außerdem durch die übereinander liegenden Särge aufgrund der Kapillarsperreneffekte Sauerstoffbarrieren im Boden. Hierdurch wird die Entstehung von Verwesungsstörungen begünstigt. Diesem Umstand wird von manchen Friedhofbetreibern durch verlängerte Ruhefristen für den zuerst bestatteten Leichnam Rechnung getragen (Mögglingen 2011, Böblingen 2012). Zudem bedeutet, wenn die Verwesung nicht durch Sauerstoffmangel zum Erliegen kommt, die Mehrfachbelegung eine erhöhte Konzentration von Verwesungsprodukten, was wiederum erhöhte Ansprüche an die Filterleistung des Bodens stellt.

Im Rahmen des Forschungsprojektes konnten zusätzlich zur bodenkundlichen Untersuchung von Friedhöfen, bei Exhumationen im Rahmen einer Friedhofsanierung in Bayern Beobachtungen zu den Auswirkungen von Mehrfachbelegungen und Tiefbestattungen gemacht werden. Auf einem auf Lehm- und Tonschluffen angelegten Friedhof wurden in derselben Grabreihe und nach annähernd gleicher Liegezeit und Bestattungstiefe in einem Einzelgrab ein vollständig skelettierter Leichnam und in einem nur drei Meter entfernten Grab mit dreifacher Belegung (zwei weitere Beisetzungen über dem betroffenen Leichnam) ein vollständig konservierter Leichnam exhumiert. In diesem Grab war auch der als zweites bestattete Leichnam bei der Exhumierung ca. fünf Jahre nach der Beisetzung noch vollständig erhalten.

Neben den genannten Maßnahmen kann auf eine Reihe von technischen Lösungen zur Verbesserung der Verwesungsleistung zurückgegriffen werden (Bodenaustausch, Grabhüllen, Grabkammern, etc.)

auf die hier nicht im Einzelnen eingegangen werden soll. Eine umfangreiche Übersicht über die angebotenen Systeme liefert Faidt (2009).

Filterleistung

Für die Bewertung der Filterleistung wird im Bewertungssystem die Gesamtfilterwirkung nach Ad-hoc-AG Boden (2005) hinzugezogen. Da diese aus der LK und der KAK_{pot} abgeleitet wird, wird auf eine zusätzliche Einstufung nach LK und KAK, wie sie von Wourtsakis (2002) und Raissi (2008) empfohlen wird, verzichtet. Auch eine zusätzliche Bewertung der k_f -Werte wurde nicht vorgenommen, da diese mit der LK korrelieren (s. o.) und die LK in diesem Zusammenhang als für die Einschätzung der physikalischen Filterwirkung ausreichend angesehen wird.

Die Berücksichtigung der Verweildauer des Sickerwassers für die Ermittlung der notwendigen Mächtigkeit der Filterschicht wurde zur Abschätzung der Grundwassergefährdung durch pathogene Darmbakterien und Keime in das hier vorgestellte Bewertungssystem einbezogen. Auch Fleige et al. (2002) bewerten die Grundwassergefährdung durch Mikroorganismen anhand der Verweildauer des Sickerwassers. Da die meisten dieser Krankheitserreger nur ca. 3 Monate im Boden überleben (Eckardt 1994), wird im Bewertungssystem in Übereinstimmung mit Wourtsakis (2002) eine Verweildauer von mindestens 6 Monaten als ausreichend angesehen. Die Verweildauer wird anhand der Sickerwasserraten und der nFK in der Filterschicht berechnet (DIN 19732). Die Einschätzung der Sickerwasserraten erfolgte nach dem TUB-BGR-Verfahren (Wessolek 2003, BLA-GEO 2004). Dieses ist eine Weiterentwicklung des Verfahrens von Renger (1990). Gebhardt (2007) verwendete neben HYDRUS-1D (Simunek 2008) den Ansatz von (Renger 1990) zur Abschätzung von Sickerwasserraten und weist darauf hin, dass dieser Ansatz für langjährige Betrachtungen besser geeignet ist als für kürzere Zeiträume. Die Modellierung des Wasserhaushaltes mit HYDRUS-1D würde eine höhere zeitliche Auflösung und eine genauere Berücksichtigung der Bodenverhältnisse ermöglichen. Es werden hierfür jedoch relativ komplexe Datensätze benötigt. Das TUB-BGR-Verfahren ist hingegen einfach und mit wenigen Eingangsdaten umzusetzen (Grossmann 2006). Für die Ermittlung eines Jahressummenparameters wie der Sickerwasserrate ist es dennoch ausreichend genau. Deshalb erscheint es für die Nutzung im Rahmen des Bewertungssystems geeignet.

Um einen Kontakt der Filterschicht mit dem Grundwasser auszuschließen wird überprüft, ob die Filterschicht als Go- oder Gr-Horizont anzusprechen ist. Wenn dies der Fall ist, wird die Filterleistung als gering eingestuft. Durch diese Vorgehensweise kann nach der Feststellung der für eine ausreichend lange Verweildauer des Sickerwassers in der Filterschicht notwendigen Mächtigkeit derselben und unter Berücksichtigung der sich aus der Bestattungstiefe ergebenden Lage der Grabsohle die Gefahr des Kontaktes der Filterschicht zum Grundwasser genau abgeschätzt werden.

Auch das mögliche Auftreten von Stau- oder Hangwasser im Bereich der Filterschicht, eine häufige Folge von Aufschüttungen aus durchlässigem Material, wird in dem hier vorgestellten Bewertungssystem berücksichtigt. So werden stauwasserführende Filterschichten jeweils um 2 Klassen schlechter bewertet als stauwasserfreie Filterschichten. Zusätzlich wird für stauwassergepögte Friedhofsböden durch Zuschläge zur Filterleistungsklasse für Hangneigungen $> 5^\circ$ (9 %) die Gefahr des lateralen Transports von nicht ausreichend gefiltertem Wasser berücksichtigt (vgl. Friedhof BW1, Tab. 22 und Friedhof RP2, Tab. 18).

Die von Wourtsakis (2002) für den Bereich der Filterschicht angegebene Spanne der Bodenreaktion von pH 4,0-6,5 erscheint etwas niedrig, da bei pH-Werten unter 6 eine zunehmende Mobilisierung von Schwermetallen auftritt und zudem eine mittlere bis hohe Bindungsstärke für Schwermetalle in der Filterschicht gefordert wird. In einer späteren Publikation des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz (RLP 2004) wird dieser Wert offenbar korrigiert und als pH > 6 angegeben. Die im hier vorgestellten Bewertungssystem gestellte Forderung von pH-Werten > 6 in der Filterschicht und die Vergabe von Zuschlägen zur Filterleistung für niedrigere pH-Werte trägt diesem Umstand Rechnung.

Empfohlene Ruhefristen

Auf dem Friedhof SH2 wurden die Ruhefristen aufgrund der unzureichenden Verwesung nach 30 Jahren Ruhezeit auf 40 Jahre verlängert, dies wurde jedoch von den Inhabern der Grabnutzungsrechte nur ungern akzeptiert (mündl. Mitteil. d. Friedhofsbetreibers). Erfahrungen aus der Friedhofsverwaltungspraxis zeigen, dass Ruhefristen von mehr als 30 Jahren aufgrund der damit verbundenen Kosten und des Pflegeaufwandes häufig nur schwer durchsetzbar sind (Beirat 2012). Deshalb werden Flächen, bei denen eine Ruhefrist von mehr als 30 Jahren anzuraten wäre, im Bewertungssystem als für die Erdbestattung ungeeignet eingestuft. Die an Standort SH1 (Leitprofil B, Abb. 59) und SH2 (Abb. 11) untersuchten Gräber zeigen, dass auch in Böden, die vor diesem Hintergrund als für die Erdbestattung ungeeignet eingestuft wurden, noch eine gewisse Zersetzung stattfinden kann, auch wenn diese stark verlangsamt ist. In den untersuchten Gräbern wurden ca. 35-40 Jahre nach der Beisetzung noch sehr gut erhaltene Säрге vorgefunden. Die Leichname waren jedoch fast vollständig skelettiert. In Leitprofil B ist die Verwesung aufgrund der ungünstigen Bodenverhältnisse gehemmt, kommt jedoch offenbar nicht vollständig zum Erliegen, so dass nach Ablauf eines deutlich über umsetzbare Ruhefristen hinausgehenden Zeitraumes eine Wiederbelegung der Grabstelle möglich wäre.

In der Praxis könnte jedoch die Feststellung des dafür notwendigen Zeitraumes sowie die Nutzung und Pflege der Fläche zwischen dem Ende der Ruhefrist und der erneuten Nutzbarkeit zum Problem werden. Am Standort SH2 wurde Leichenwachs im Beckenbereich festgestellt, das jedoch mit

schwarzgefärbten Verwesungsprodukten durchsetzt war (Abb. 11). Nach Fiedler et al. (2012) deutet dies auf einen möglichen in situ Abbau des Leichenwachses hin, der durch eine Verbesserung des Gasaustausches im Verlauf der Ruhefrist bedingt ist. Dass ein Abbau von Leichenwachs infolge veränderter Bodenverhältnisse möglich ist, wurde auch von (Aeschlimann 2008, 2011) festgestellt. Anders verhält es sich an Standort NI2 (Abb. 17), an dem zusätzlich zu dem starken, andauernden Stauwassereinfluss die mäßig bis stark saure Bodenreaktion den mikrobiellen Abbau hemmt. Hier findet eine vollständige Konservierung statt, die den Leichnam in einer Form erhält die eine Wiederbelegung ausschließt. Unter gleichbleibenden Bedingungen kann Leichenwachs Jahrtausende überdauern. Fiedler et al. (2009) berichten von einem auf Grundwasserniveau (290 cm Tiefe) bestatteten und nach 1600 Jahren Liegezeit noch ungewöhnlich gut erhaltenen Skelett, das teilweise mit Leichenwachs bedeckt war. Bei der Untersuchung eines bronzezeitlichen Hügelgrabes in Schleswig-Holstein wurden, selbst nach 3500 Jahren in dem überwiegend reduzierenden Milieu der von einer Eisenkruste umgebenen Grabkammer, noch Sarg- und Leichenreste gefunden (Fleige et al. 2012).

Für LK von 5-13 Vol.-% wird im Bewertungssystem bei Abwesenheit von Grund- und Stauwassereinflüssen und optimalen pH-Werten von einer mittleren Verwesungsleistung ausgegangen und daraus Ruhefristen von 20-30 Jahren abgeleitet. Anhand von Erfahrungswerten aus Rheinland-Pfalz schätzt Wourtsakis (2002) für LK > 5-10 Vol.-% Ruhefristen von 25-40 Jahren und bewertet, wie in dem hier vorgestellten Bewertungssystem, Böden mit einer LK < 5 Vol.-% als für die Erdbestattung ungeeignet. Bei hoher Verwesungsleistung werden Ruhefristen von 10-20 Jahren empfohlen. Die Mindestruhefrist richtet sich nach den gesetzlichen Vorgaben des jeweiligen Bundeslandes (Albrecht 2002, Beirat 2012).

5.3 Bodenstrukturentwicklung und Wasserhaushalt in einem Erdgrab

Anhand der an den Leitprofilen A (Bodentyp: GG-YY, Abb. 58), B (Bodentyp: SS-YY, Abb. 60), C (Bodentyp: YYn, Abb. 61) und D (Bodentyp: SS-YY, Abb. 63) aus Deckschicht, Grabwand (nur Profil B) und Filterschicht entnommenen ungestörten Bodenproben und den im Feldversuch Hohenschulen (Bodentyp: SS-LL, vgl. Kap. 3.2 und Kap. 4.6) entnommenen Proben aus der ungestörten Referenz, sowie den Varianten A (geschütteter Boden, Probenahme 60 Tage und 195 Tage nach Schüttung) und B (geschütteter Boden vermischt mit 20 kg m⁻³ Branntkalk, Probenahme 60 Tage und 195 Tage nach Schüttung), werden nun die Auswirkungen der Grabtätigkeit auf die Bodenstruktur und den Wasserhaushalt in Erdgräbern diskutiert.

Die Strukturentwicklung in der Deckschicht

In der Deckschicht eines Grabes liegt, insbesondere im für die Einleitung einer vollständigen Verwesung wichtigen ersten Jahr nach der Beisetzung, infolge der Grabarbeiten in der Regel ein Bröckel- und Klumpengefüge (Ad-hoc-AG Boden 2005) ähnlich dem in frisch gepflügtem Boden vor. Die bei Grabarbeiten entstehenden Gefügefragmente weisen sehr unterschiedliche Größen auf, da sie sowohl aus Aggregatverbänden als auch aus Einzelaggregaten bestehen (Duncan und Bransden 1986). In rein sandigen Böden dominiert, wie an Leitprofil C auf dem Friedhof BE1 (Abb. 61), infolge der Schüttung ein Einzelkorngefüge.

Die Ausprägung des Bröckel- und Klumpengefüges bei Wiederverfüllung des Grabes und damit der Anteil an für Diffusions- und Konvektionsprozesse nutzbaren Poren wird vor allem durch die Persistenz der durch die Grabarbeiten entstandenen Gefügefragmente und somit letztendlich durch die Aggregierung des (noch ungestörten) Bodens und die Aggregatstabilität bestimmt. Faktoren, die die Aggregatstabilität in diesen Zusammenhang beeinflussen, sind neben Aggregatlagerungsdichte (Horn und Dexter 1989), Anzahl, Dauer und Intensität der Schrumpfungs- und Quellungszyklen (Horn 1990), Gehalt und Art der organischen Substanz (Piccolo und Mbagwu 1999, Annabi et al. 2011) und Carbonatgehalt (Chan und Heenan 1999), vor allem der Schluff- und Tonanteil (Mamedov et al. 2007, Kodesova et al. 2009) und das ψ_m (Francis und Cruse 1983, Baumgartl und Horn 1991). Bei hohen Wassergehalten wird die Eigenstabilität der Aggregate zu gering um der mechanischen Belastung durch den während der Wiederverfüllung entstehenden Überlagerungsdruck und eventuelle zusätzliche Lastaufbringungen durch die Baggerschaufel standzuhalten (Duncan und Bransden 1986). Die damit einhergehende plastische Verformung und Aggregatverschmelzung führt zu einer graduellen Homogenisierung der Bodenmatrix und damit zu einer Verringerung von Volumen und Konnektivität der Poren und einer Zunahme der ρ_t (Ghezzehei und Or 2000). Für ton- und schluffhaltiges Material gilt: je stärker es im Zuge der Grabarbeiten homogenisiert wird, desto negativer und länger anhaltend sind die Auswirkungen auf den Gasaustausch. Schjonning et al. (1999) zeigten, dass homogenisierte, ton- und schluffreiche Böden auch nach 17-monatiger Regeneration unter Feldbedingungen mit mehreren Quellungs- und Schrumpfungszyklen noch ein weniger kontinuierliches und tortuoseres Porensystem aufweisen als ungestörte Proben aus demselben Material, und außerdem über eine geringere Strukturstabilität verfügen.

Auf dem Friedhof BW3 (Leitprofil D, Textur: Ut4) weist die Deckschicht des untersuchten Erdgrabes trotz der Auflockerung im Zuge der Grabarbeiten bei mittlerer ρ_t nur eine geringe LK und sehr geringe k_t und k_f auf. Schmidt-Bartelt et al. (1990) stellten bei der Untersuchung eines stauwasserbeeinflussten Friedhofsbodens aus tonig-sandigem Schluff oberhalb der Bestattungstiefe bei mittleren ρ_t ebenfalls nur geringe LK fest, und geben an, dass der bei Anlage des Friedhofs

aufgetragene Boden verdichtet wurde. Angaben zu k_l und k_f liegen nicht vor. Der Bereich des Friedhofes BW3, in dem das Leitprofil angelegt wurde, wurde im Zuge der Teilsanierung des Friedhofes im Jahre 2008 mit Baustellenfahrzeugen überfahren, da der Bereich die direkteste Verbindung zwischen dem Haupttor des Friedhofes und der sanierten Fläche bildet (vgl. Abb. 52). Da geschüttete Böden aufgrund ihrer geringen Eigenstabilität sehr verdichtungsanfällig sind (Kaufmann et al. 2009) kann das Überfahren hier als die Hauptursache für die geringen LK und k_f dieses Bodens angesehen werden (Schaffer et al. 2007). Auf diesem Friedhof unterschreiten LK und k_f in der Deckschicht des untersuchten Erdgrabes die Maßnahmenwerte für schadhafte Bodenverdichtungen im Unterboden nach Zink et al. (2011), obwohl die ρ_t mittel ist.

Zusätzlich ist auf dem Friedhof BW3 aufgrund des ausgeprägten Stauwassereinflusses (vgl. Abb. 86) bei der letzten Beisetzung eine Schüttung des Bodens bei Wassergehalten nahe Sättigung wahrscheinlich. Durch hohe Wassergehalte des tonreichen Bodens wird die Stabilität der Gefügefragmente im geschütteten Boden stark verringert und die Verdichtungsanfälligkeit des Bodens erhöht (Duncan und Bransden 1986), so dass der Boden wahrscheinlich schon bei der Schüttung eine ausgeprägte Homogenisierung erfahren hat. Die Bildung von Sekundärporen im weiteren Verlauf der Ruhefrist wurde an diesem Standort durch die ohnehin hohen Wassergehalte des Bodens und wahrscheinliche zusätzliche Bewässerung im Rahmen der Grabpflege gehemmt.

In dem relativ zu Leitprofil D sandigeren und weniger schluff- und tonreichen Boden des Feldversuches auf Hohenschulen (vgl. Tab. 47) fällt die Homogenisierung und Aggregatzerstörung in Variante A nicht so stark aus, obwohl auch dieser Boden bei der Schüttung sehr nass war. Das etwas grobkörnigere Substrat vermindert durch eine höhere Wasserleitfähigkeit der Aggregate den Anstieg der ψ_m im Inneren der Aggregate bei Belastung, so dass sie stabiler bleiben. Auch die hohe ρ_t des ungestörten Bodens in Hohenschulen (vgl. Abb. 90) kann eine höhere Aggregatstabilität und somit eine weniger ausgeprägte Homogenisierung des Materials verursacht haben (Horn und Dexter 1989). Für den Erhalt von Aggregaten in dem geschütteten Boden spricht auch die trotz der immer noch hohen ρ_t hohe k_f des Bodens in Variante A 60 Tage nach Schüttung. Die hier entnommenen Zylinderproben enthalten Aggregate mit hoher ρ_t zwischen denen noch relativ große Hohlräume bestehen, wodurch die k_f erhöht wird. In einem frisch geschütteten Boden ist die Strukturdynamik jedoch sehr hoch (Kaufmann et al. 2009). Dies wurde in der deutlichen Abnahme von k_f , k_l , GPV und LK in der Variante A bei der Probenahme 195 Tage nach Schüttung im Vergleich zur Probenahme 60 Tage nach Schüttung deutlich. Vor diesem Hintergrund ist bei vergleichender Betrachtung der Daten von Leitprofil D und dem Feldversuch zu berücksichtigen, dass die Schüttung des Materials in Leitprofil D ca. 40 Jahre zurück liegt und im Feldversuch die Setzung und Konsolidierung des geschütteten Bodens noch nicht vollständig abgeschlossen ist.

Die in reinen Sandböden im Zusammenhang mit der Wiederverfüllung entstehende Homogenisierung ist weniger problematisch, da der geringe Ungleichförmigkeitsgrad des Bodens eine zu starke Einregelung der Partikel verhindert und so noch ein ausreichend kontinuierliches (Primär-) Porensystem erhalten bleibt. Ein Sandboden ist auch weniger anfällig für Setzung und Verdichtung (Gebhardt et al. 2009). Der geringe Ungleichförmigkeitsgrad verringert außerdem die Gefahr der Verschlämmung vorhandener Poren, beispielsweise durch exzessives Gießen der Grabbepflanzung (Keller 1966). Analog dazu konnte in Leitprofil C trotz des Einzelkorngefüges im Bereich der Deckschicht eine sehr hohe LK gemessen werden. Die k_i bei FK ist in diesem Leitprofil jedoch sehr gering und bei -300 hPa mittel. Dies ist auf die mangelnde Aggregation und die deshalb kaum vorhandenen effektiven Fließwege für konvektiven Transport zurückzuführen (Mccarthy und Brown 1992). Auch die C_2 - und C_3 -Indices (Porenorganisation und Porenkonnektivität, vgl. Abb. 71) sind im Vergleich zu den anderen Leitprofilstandorten gering. Dennoch findet an diesem Standort eine schnelle und vollständige Umsetzung von Sarg und Leichnam statt. Offenbar bietet der Boden durch seine hohe LK ausreichend luftgefülltes Porenvolumen für kontinuierliche Diffusionsprozesse, was für eine vollständige Verwesung ausreichend ist, auch wenn das Porensystem nur relativ wenig konvektiven Gasfluss zulässt. Dies unterstreicht die Dominanz von Diffusionsprozessen beim Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre.

Wenn im Boden bei Wiederverfüllung des Grabes ausreichend stabile Aggregate erhalten bleiben, wird sich eine mit der Störung der Bodenstruktur einhergehende Auflockerung jedoch positiv auf den Gashaushalt auswirken. Die in der Literatur vorliegenden bodenphysikalischen Untersuchungen von gestörten Böden beziehen sich in der Regel auf gepflügte Ackerböden, detaillierte physikalische Untersuchungen von Friedhofsböden liegen nicht vor. Auch Untersuchungen von Rekultivierungsflächen nach Tagebau oder Baumaßnahmen beinhalten in der Regel eine Ackernutzung (Schaffer et al. 2007, Kaufmann et al. 2009, Krummelbein et al. 2010). Der Vergleich der 90 cm mächtigen Deckschicht eines Erdgrabes mit einem 30 cm mächtigen Ap-Horizont ist nur unter Berücksichtigung des geringeren Überlagerungsdruckes und der damit verbunden geringeren Konsolidationssetzung in einem Ap-Horizont möglich. Zudem ist in Ap-Horizonten von einer etwas geringeren Aggregatgröße auszugehen, da hier im Zuge der Saatbettbereitung (Sekundärbodenbearbeitung) noch eine weitere Homogenisierung des Bodens stattfindet und im Boden vorhandene Strukturen stärker zerstört werden (Krummelbein et al. 2010).

Untersuchungen von konventionell und konservierend bearbeiteten schluff- und tonhaltigen Oberböden ergaben für die gepflügten Varianten durchweg die höheren GPV, D_b und k_a (Ball und Robertson 1994, Schjonning und Rasmussen 2000). Analog dazu wies die Deckschicht des an Standort SH1 untersuchten Erdgrabes (Leitprofil B) auch über 30 Jahre nach der Beisetzung (= Schüttung des Bodens) noch eine geringere ρ_t , sowie ein höheres GPV, eine höhere LK und k_i auf als die Grabwand.

Der positive Effekt der Lockerung kann demnach trotz Setzungsprozessen über mehrere Jahre Bestand haben. Die Fähigkeit des Bodens Sauerstoff zu transportieren ist hier durch die Störung der Bodenstruktur nicht verschlechtert worden und nicht der Auslöser für die nur langsam fortschreitende Zersetzung von Sarg und Leichnam.

Ball (1981) stellte im gepflügtem Boden bei gleichem ψ_m anhand der C_2 - und C_3 -Indices höhere Porenkontinuitäten fest als in ungepflügtem. Diese Ergebnisse wurden von Rodrigues et al. (2011) bestätigt. Auch im Feldversuch Hohenschulen konnten im geschütteten Boden höhere C_2 - und C_3 -Indices festgestellt werden als in der Referenz, der Unterschied ist jedoch, bedingt durch die Setzung, schon nach 195 Tagen geringer als nach 60 Tagen. Die sich kaum unterscheidenden C_2 und C_3 - Indices von Deckschicht und Grabwand in Leitprofil B deuten 30 Jahre nach Schüttung auf eine sehr ähnliche Porenorganisation in dem gestörten und dem ungestörten Boden hin. Anhand der etwas höheren blockierten Porenvolumina in der Deckschicht, sowie dem im Vergleich zur Grabwand etwas flacheren Verlauf der K_u -Kurve kann hier jedoch eine Tendenz zu langsamerer Austrocknung und einer gewissen Verzögerung der Wasserableitung erwartet werden. Dadurch wird das Freiwerden von ϵ_a für Diffusionsprozesse verzögert.

Die Auflockerung und Erhöhung der k_f im Bereich der Deckschicht wird sich außerdem immer negativ auf die Sauerstoffversorgung des Grabes auswirken, wenn die k_f der Grabwände und vor allem der Grabsohle deutlich geringer ist, so dass im Bereich der Auflockerung oberflächlich schnell eindringendes Sickerwasser vertikal und lateral nur langsam abgeleitet werden kann und sich folglich im Grabraum aufstaut (vgl. Leitprofil B, Abb. 65). Das Aufstauen von Sickerwasser wird durch die Grabpflege in Form von Gießwassergaben, und erhöhte Lagerungsdichten in der Grabumgebung durch Befahren im Zuge der Grabarbeiten sowie Trittvverdichtung verstärkt. Dieser „Badewanneneffekt“ konnte im Feldversuch gezeigt werden (vgl. Abb. 97, Variante A), spiegelt sich in den wassergefüllten Särgen auf den Friedhöfen RP2 und BW3 wider und wird auch von Fiedler et al. (2004) und Braun (2004) im Zusammenhang mit dem Auftreten von Verwesungsstörungen beschrieben.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die gestörte Bodenstruktur in der Deckschicht eines Erdgrabes nur unter bestimmten Bedingungen (Schüttung von schluff- und tonreichem Substrat bei hohen Wassergehalten und daraus resultierende teilweise Homogenisierung des Bodens) die Sauerstoffversorgung im Erdgrab negativ beeinflusst. Die Fähigkeit des luftgefüllten Porenvolumens Gas zu transportieren nimmt nicht zwangsläufig ab. An allen untersuchten Leitprofilen aus mineralischen Böden waren die LK der Deckschichten höher als die der Filterschichten bzw. der Grabwände. Im methodischen Versuch auf dem Versuchsgut Hohenschulen konnte eine hohe Setzung festgestellt werden, im Zuge derer die LK und k_f des gestörten Materials sich im Zeitverlauf

wieder an die des ungestörten Bodens angeschlossen. Es konnte aber auch hier keine Verschlechterung der für den Gasaustausch maßgeblichen physikalischen Parameter im Vergleich zum nicht durch Grabarbeiten gestörten Boden festgestellt werden. Durch die im Vergleich zu Grabwänden und Grabsohle erhöhte k_f wird jedoch ein Wasserstau im Grabraum begünstigt und somit wird der Gasaustausch eher durch mit Wasser blockierte Poren als durch eine generelle Abnahme der strukturellen Funktionalität im gestörten Boden behindert.

Die Verwendung von Branntkalk zur Struktur-Melioration

Im Rahmen des Feldversuches auf dem Versuchsgut Hohenschulen in der Schleswig-Holsteinischen Jungmoränenlandschaft (vgl. Kap. 4.6) wurde ein Verfahren zur Struktur-Melioration von Friedhofsböden getestet.

Bei der Vermischung von Branntkalk mit (feuchtem) Boden finden vier wesentliche Prozesse statt (Witt 2002):

1. Das Löschen als exotherme, wasserbindende Sofortreaktion
2. Das Gelstadium (Hydratation): Silikate und Aluminate werden aus Tonmineralen gelöst und reagieren mit Calcium zu neuen Hydratphasen die gelartig den Porenraum ausfüllen
3. Das Neolithstadium (puzzolanische Reaktion): Das Gel kristallisiert aus und führt zu einer Verkittung der Bodenpartikel. Die puzzolanischen Reaktionen dauern je nach Bodenbeschaffenheit 1-5 Jahre an
4. Die Carbonatisierung: Kalkhydrat reagiert bei Luftkontakt mit Kohlendioxid

Die Übergänge zwischen den genannten Prozessen sind fließend. Das Ausmaß der Verkittung von Bodenpartikeln ist stark von Zusammensetzung und Anteil der Tonfraktion im Boden abhängig.

Die Vermischung des Bodenaushubs mit 20 kg m^{-3} Branntkalk (Variante B) führte im Feldversuch zunächst im Zuge der Lösch-Reaktion zu einer kurzzeitigen Austrocknung des fast wassergesättigten Bodens auf -150 hPa . Im gesamten Messzeitraum zeigte die Variante B weniger Wasserstau an der „Grabsohle“ und ein schnelleres Austrocknen des Bodens (vor allem in 50 cm Tiefe) in niederschlagsfreien Perioden als in der Variante A (geschütteter Boden ohne Branntkalk). Bei über 50% der stündlich gespeicherten Messungen war der Boden in Variante B trockener als der ungestörte Referenzboden. Auch Ellies et al. (1978) dokumentierten an mit 5% Branntkalk angereicherten Bodensäulen im Vergleich zu nicht mit Branntkalk angereichertem Boden eine schnellere Austrocknung im oberflächennahen Bereich. Hartge (1976), (1977) stellt in mit Branntkalk angereichertem Verfüllmaterial ($30-40\%$ Ton) von Dränggräben nach $2 \frac{1}{2}$ Jahren höhere Infiltrationsraten und eine bessere Erhaltung des ursprünglichen grobporigen, aggregierten Zustandes fest als in nicht mit Branntkalk vermischtem Boden.

Im Feldversuch Hohenschulen war die Abnahme der ρ_t infolge der Schüttung in Variante B nach 60 Tagen schwächer ausgeprägt als in Variante A. Dies ist auf die Kontraktion der Bodenmatrix infolge der mit der Löschreaktion einhergehenden Austrocknung zurückzuführen. In Variante A wurde nach 195 Tagen im Vergleich zur Probenentnahme nach 60 Tagen eine Abnahme des GPV, der LK, der k_i und der k_f festgestellt werden. In Variante A hatte zu diesem Zeitpunkt eine deutliche Setzung stattgefunden, die sich auch im leichten Wiederanstieg der ρ_t abzeichnet. In Variante B hatte nach 195 Tagen keine ausgeprägte Setzung stattgefunden, sondern vielmehr eine Zunahme der Trockenmasse durch die Bildung von Kalkhydrat (1,0 g CaO bildet unter Bindung von 0,32 g H₂O 1,32 g Ca(OH)₂ (Scholz-Solbach 2004)), sowie eine leichte Volumenausdehnung und als Folge dessen eine Zunahme von GPV und LK, begleitet von einer Abnahme der ρ_t . Dennoch nahm die k_f nach 195 Tagen auch in der Variante B stark ab. Dieser scheinbare Widerspruch kann dadurch bedingt sein, dass die Poren im mit Branntkalk angereicherten Boden in wassergesättigtem Zustand mit gelförmigen Hydraten „verstopft“ waren, beziehungsweise der Boden durch zwischen den Partikeln eingelagerte Gele sehr quellfähig war.

Die Zugabe von Branntkalk in den geschütteten Boden führte, relativ zum geschütteten Boden ohne Branntkalk (Variante A), zu einem schwächer ausgeprägten Anstieg von Porosität und Wasserleitfähigkeit im Vergleich zu den ungestörten Randbereichen der Gruben. Es konnten relativ zu Variante A trockenere Bedingungen erreicht werden, da ein Wasserstau am Boden der Grube weniger begünstigt wurde. Außerdem konnte anhand der rH-Werte im Vergleich zu Variante A auch eine gewisse Verbesserung der Sauerstoffverfügbarkeit festgestellt werden. Die rH-Werte blieben in Variante B jedoch unter denen der Referenz. Es bleibt zu überprüfen, ob die in Variante B nach 195 Tagen sehr geringen k_f -Werte nach Beendigung des Gelstadiums und nach einem weiteren Fortschritt der puzzolanischen Reaktionen wieder ansteigen, so dass analog zu den Ergebnissen von Hartge (1976) nach 2 ½ Jahren höhere Infiltrationsraten gemessen werden können.

Einfluss der Bewässerung im Rahmen der Grabpflege

Durch die im Rahmen der Grabpflege stattfindende Bewässerung von Erdgräbern wird der Wasserhaushalt des Bodens verändert und die Entstehung von Verwesungsstörungen gefördert (Horn und Fleige 2001, Pagels et al. 2004). Bislang gibt es noch keine Untersuchungen zu den tatsächlichen Gießwassermengen, die auf einer Grabfläche im Laufe eines Jahres appliziert werden. Die individuellen Gießwassergaben für einzelne Gräber können bereits innerhalb eines Grabfeldes je nach Pflegeintensität stark variieren. Schätzwerte zu jährlichen Gießwassermengen reichen von 50 - 1000 mm Jahr⁻¹ (Blume 1981, Fleige et al. 2002, Weinzierl und Waldmann 2002, Wourtsakis 2002), was 10-200 Gießwassergaben à 10 Liter pro Jahr und Einzelgrab (2 m²) entspräche. Vor allem in den Sommermonaten sind tägliche Gießwassergaben von 5-10 mm (1-2 Gießkannen à 10 Liter) durchaus

üblich (Beirat 2012), was auf ein halbes Jahr hochgerechnet Gießwassermengen von 900-1800 mm bedeuten würde. Die individuelle Grabpflegeintensität kann schon von Grab zu Grab sehr stark variieren. Allgemeingültige Aussagen über die jährlich anfallenden Gießwassermengen auf Friedhöfen sind deshalb nur schwer zu treffen.

Die Gießwasserversuche am Standort Hohenschulen zeigten, dass einmalige Gießwassergaben von 2,2 mm, 4,4 mm und 8,9 mm in dem hier vorliegenden Normallehm nicht zu einem messbaren Anstieg der ψ_m in 50 cm oder 130 cm Tiefe führten (Abb. 99). Eine einmalige Gießwassergabe von 8,9 mm an der Monitoringstation B auf dem Friedhof SH1 (Abb. 100, Textur: Lehmsand) führte zu einem Ansteigen der ψ_m in 20 cm und 30 cm Tiefe. In 50 cm Tiefe konnte jedoch auch hier kein Anstieg festgestellt werden. Die ψ_m im 30 cm Tiefe verblieben jedoch bis zum nächsten Niederschlagsereignis im positiven Bereich. Dies deutet auf ein gesteigertes Wasserspeichervermögen des an diesem Standort 35 cm mächtigen, lockereren humusangereicherten Oberbodens ab (vgl. Abb. 60), wie es auch von Sukopp (1993) und (Blume 1996) für Friedhofsböden angenommen wird.

Deutlich stärker ist der Effekt von kumulativen Gießwassergaben innerhalb eines kurzen Zeitraumes. Bei drei Gießwassergaben von jeweils 8,9 mm in 38 Stunden (Abb. 99, Grafik d) konnte bereits nach der zweiten Bewässerung der Wassergehalt des Bodens im 50 cm Tiefe, und nach der dritten Bewässerung auch in 130 cm Tiefe, messbar erhöht werden. Der Anstieg der ψ_m in 130 cm Tiefe war allerdings nur von kurzer Dauer.

Daraus ist zu schließen, dass gelegentliches Gießen in an die Wasseraufnahmefähigkeit der Pflanzen angepassten Mengen (max. eine Gießkanne à 10 Liter auf 2m²) sich in einem lehmigen Boden nicht dauerhaft schädlich auf die Durchlüftung auswirkt. Die Befeuchtungsfront dringt nicht weit in den Boden vor und das Wasser wird durch die Pflanzen wieder aufgenommen. Häufiges (tägliches) Gießen hingegen kann sukzessive die gesamte Deckschicht bis über die effektive Durchwurzelungstiefe hinaus durchfeuchten. In dem feuchten Boden ist die k_f erhöht und das Gießwasser wird bis in den Unterboden transportiert, was einen Wasserstau im Grabraum begünstigt.

6. Schlussbetrachtung

Die bodenkundliche Untersuchung, verbunden mit einer Bewertung der Fläche im Hinblick auf ihre Eignung für die Erdbestattung, muss eine wesentliche Voraussetzung für die Neuanlage oder Erweiterung von Friedhofsarealen sein. Auch auf bereits bestehenden Friedhöfen können hierdurch wichtige Informationen zu notwendigen Meliorations- beziehungsweise Sanierungsmaßnahmen gewonnen werden.

Für die Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung eines Friedhofsbodens muss zunächst im Rahmen einer Bohrstockkartierung die räumliche Variabilität der Bodenverhältnisse auf der betroffenen Fläche festgestellt werden. Hierbei ist besonders auf Grund- und Stauwassereinflüsse zu achten, deren Ausprägungen im Rahmen der bodenkundlichen Klassifikation anhand von Subtypen und (Sub-)Varietäten angegeben werden können (vgl. Abb. 4). An den bei der Kartierung entnommenen Bohrkernen können Textur, pH-Wert und KAK_{pot} bestimmt werden. Die zusätzliche Anlage von Leitprofilen ermöglicht die Entnahme von ungestörten Bodenproben zur Messung der LK. Die kartierten Bodeneinheiten sind im Anschluss einzeln im Hinblick auf ihre Verwesungs- und Filterleistung zu bewerten.

Um mindestens eine mittlere Verwesungsleistung und somit eine vollständige Umsetzung innerhalb von Ruhefristen < 30 Jahren zu erreichen muss ein Boden die folgenden Eigenschaften aufweisen:

- Der Boden ist bis zur Bestattungstiefe frei von Grund- und Stauwassereinflüssen
- Die LK ist > 5 Vol.-%, optimal wären > 13 Vol.-%
- Der pH-Wert liegt zwischen 5 und 8

Nach Beseitigung von Grund- und Stauwassereinflüssen kann die Verwesungsleistung entsprechend der LK und des pH-Wertes bewertet werden.

Zusätzlich sind die folgenden Empfehlungen für eine Verbesserung der Verwesungsleistung zu beachten:

- Die Mächtigkeit der Deckschicht oberhalb des Sarges sollte 90 cm nicht überschreiten, Tiefgräber und Doppelbelegungen fördern die Entstehung von Verwesungsstörungen
- Pietätswäsche und Sargmaterialien müssen aus natürlichen, leicht zersetzbaren Materialien bestehen und möglichst wenig Metall enthalten
- die natürliche Setzung des geschütteten Bodens sollte nicht beschleunigt werden, damit das Porenvolumen möglichst hoch bleibt (Grabfläche nicht betreten, keine Trittsteine u. Ä. verlegen)

- Bei der Grabbepflanzung sind Stauden, Sträucher und Dauergrün flachwurzelnden Saisonpflanzen vorzuziehen da sie dem Boden mehr Wasser entziehen und keine zusätzliche Bewässerung benötigen. Ein direktes Verbot von Gießwassergaben wäre dem Verwesungsprozess zuträglich, ist jedoch in der Praxis nicht durchsetzbar
- Die teilweise oder ganzheitliche Abdeckung des Grabes mit Steinplatten oder Folien stoppt den Gasaustausch und ist deshalb zu unterlassen
- Bei nassen Bodenverhältnissen kann in tonreichen Böden durch die Zugabe von Branntkalk die Bodenstruktur verbessert werden.
 - Der Branntkalk ist gut mit dem Bodenaushub zu vermischen, damit kein direkter Kontakt zwischen Leichnam und Branntkalk entstehen kann.
 - Die benötigte Menge richtet sich nach dem Tongehalt des Bodens, für eine Austrocknung und erste Aggregation des Bodens im Zuge der Löschreaktion ist eine Zugabe von 2-3 % CaO ausreichend (Witt 2002).

Neben der Verwesungsleistung muss ein Friedhofsboden auch über eine ausreichende Filterleistung verfügen um Grundwasserkontaminationen zu vermeiden. Um eine ausreichende Filterleistung des Bodens unterhalb der Grabsohle zu gewährleisten, müssen die folgenden Kriterien erfüllt sein:

- Die Filterschicht muss aus Lockergestein bestehen und
- ausreichend mächtig sein um eine Aufenthaltsdauer des Sickerwassers von > 6 Monaten in der ungesättigten Zone oberhalb des geschlossenen Kapillarsaumes bei Grundwasserhöchststand zu gewährleisten.
- In dieser Filterschicht darf kein Stauwasserleiter vorliegen.
- Die aus der LK und der KAK_{pot} des Bodens abgeleitete GesamtfILTERWIRKUNG des Bodens muss mindestens der Stufe 3 nach Ad-hoc-AG Boden (2005) entsprechen.
- Der pH-Wert des Bodens sollte ≥ 6 sein um einer Verlagerung von Schwermetallen ins Grundwasser vorzubeugen.

7. Zusammenfassung

Im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsprojektes „Entwicklung einer umweltgerechten Erdbestattungspraxis im Hinblick auf die Folgewirkungen auf Böden, Grundwasser und Atmosphäre“ wurden deutschlandweit 19 Friedhöfe untersucht. Auf den Friedhöfen wurden Bohrstockkartierungen vorgenommen (insgesamt 193 Bohrungen bis in 3 m Tiefe, Entnahme von gestörten Bodenproben zur Messung von Gesamtkohlenstoff (C_t), Gesamtstickstoff (N_t) und pH-Werten), Leitprofile angelegt ($n=6$, Entnahme von gestörten und ungestörten Bodenproben zur Messung von Textur, pH-Wert, C_t , N_t , potentieller Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}), gesättigter Wasserleitfähigkeit (k_f), ungesättigter Wasserleitfähigkeit (k_u), Luftleitfähigkeit (k_l) und Bestimmung der pF-WG-Beziehung) und Monitoringstationen installiert ($n=4$, Messung von Matrixpotentialen (ψ_m), Redoxpotentialen (Eh) und Bodentemperaturen). Zusätzlich wurden auf einem Ackerstandort künstliche Gräber angelegt ($n=3$), in denen ein Monitoring von ψ_m und Eh vorgenommen wurde. Aus dem wieder eingefüllten Boden wurden 60 und 195 Tage nach Schüttung ungestörte Bodenproben entnommen um die Entwicklung der Bodenstruktur in frisch angelegten Erdgräbern zu untersuchen und mit der ungestörten Referenz (SS-LL) zu vergleichen. In einem der künstlichen Gräber wurde der Bodenaushub mit 20 kg m^{-3} Branntkalk (CaO) vermischt, und die Auswirkungen auf Bodenstrukturentwicklung und Wasserhaushalt untersucht. Des Weiteren wurden Bewässerungsversuche mit 2,2 mm, 4,4 mm und 8,9 mm Gießwasser durchgeführt und die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt dokumentiert.

Die untersuchten Friedhofsböden wurden als Rigosole (YY) klassifiziert, Grund- und/oder Stauwassereinflüsse wurden über die Bildung von Subtypen (z.B. SS-YY) und (Sub-)Varietäten (z.B. g2YYn) berücksichtigt. Zur ganzheitlichen Erfassung der Wassereinflüsse bis in 300 cm Tiefe wurden die Subvarietäten g5YYn und s5YYn eingeführt, die Grund- beziehungsweise Stauwassereinflüsse in 200-300 cm Tiefe kennzeichnen.

Anhand der Bohrstockkartierung konnten auf den Friedhöfen Bodeneinheiten abgegrenzt werden. In jungen Friedhöfen liegt zunächst eine Vergesellschaftung von Rigosolen mit natürlichen bzw. in städtischen Verdichtungsräumen häufig bereits anthropogen überprägten Bodentypen vor. Mit zunehmendem Alter des Friedhofes erfolgt eine fortschreitende Homogenisierung der Fläche bis nur noch Rigosole vorliegen, die sich im Wesentlichen durch Grund- und Stauwassereinflüsse unterscheiden.

Die Bodeneinheiten wurden im Hinblick auf ihre Verwesungs- und Filterleistung bewertet. Die Verwesungsleistung wird aus LK, Bodensubtyp, beziehungsweise (Sub-)Varietät und pH-Wert abgeleitet. Anhand der Verwesungsleistung werden Empfehlungen für die benötigten Ruhefristen

gegeben. Die Filterleistung wird nach LK, KAK_{pot} , pH-Wert, Wasserverhältnissen (Grund- oder Stauwasser) und der Verweildauer des Sickerwassers in der ungesättigten Bodenzone unterhalb der Grabsohle bewertet. Zur Verbesserung der Verwesungsleistung werden die Beseitigung von Grund- oder Stauwassereinflüssen, eine Verringerung der Bestattungstiefe und die Unterlassung von Doppelbelegungen empfohlen. Die Verwesungsleistung wurde in 67 % der untersuchten Bodeneinheiten als gering, in 18 % als mittel und in 15% als hoch bewertet. Die Filterleistung wurde zu 51 % als sehr gering bewertet.

Die untersuchten Friedhofsböden waren in den meisten Fällen tief humos und enthielten im Mittel in den Deckschichten (20-90 cm Tiefe) 2,11% und in den Sargbereichen (90 cm Tiefe bis Bestattungstiefe) im Mittel 1,09 % Humus. Die Humusanreicherung im Unterboden ist hauptsächlich durch die Einmischung von humosem Oberboden und Blumenerde bedingt, und deshalb häufig in den Deckschichten der Gräber stärker ausgeprägt als in den Sargbereichen. Doch auch die Flächennutzung vor Anlage des Friedhofes beeinflusst die Humusgehalte im Unterboden von Friedhöfen (z. B. Gartennutzung (YO), Ackernutzung (YK in Senken) oder Plaggenwirtschaft (YE)).

Die physikalischen Untersuchungen von ungestörten Bodenproben aus Erdgräbern zeigten, dass die Fähigkeit des luftgefüllten Porenvolumens Gas zu transportieren durch eine Schüttung des Bodens und die damit einhergehende Strukturzerstörung nicht zwangsläufig abnimmt. An allen untersuchten Leitprofilen aus mineralischen Böden waren die LK und k_i der Deckschichten bei mittlerer ρ_t höher als die der Filterschichten bzw. der Grabwände. Die Deckschichten verfügten auch über höhere k_f als der umgebende Boden, wodurch ein Wasserstau im Grabraum begünstigt wurde. Somit wird der Gasaustausch stärker durch mit Wasser blockierte Poren als durch eine generelle Abnahme der strukturellen Funktionalität des gestörten Bodens behindert. Der bei Wassersättigung entstehende Sauerstoffmangel konnte anhand der kontinuierlich gemessenen ψ_m und Eh dokumentiert werden.

Im Feldversuch wurden Daten zu Porengrößenverteilung, Porenorganisation, k_i und k_f sowie der Strukturentwicklung in frisch verfüllten Erdgräbern gewonnen. Im frisch geschütteten Boden konnte, bedingt durch Setzungsprozesse, eine hohe Strukturdynamik nachgewiesen werden. Es konnte aber auch hier keine Verschlechterung der für den Gasaustausch maßgeblichen physikalischen Parameter LK und k_i im Vergleich zum nicht durch Grabarbeiten gestörten Boden festgestellt werden. Auch nach deutlicher Setzung waren diese Kennwerte im geschütteten Boden noch höher als in der ungestörten Referenz. Durch das Monitoring von ψ_m und Eh wurden die Auswirkungen der Schüttung auf den Wasserhaushalt und die Sauerstoffverhältnisse dokumentiert. Es wurden ein deutlicher Wasserstau und niedrige Eh am Grund der Gruben festgestellt. Durch die Vermischung des Bodenaushubs mit Branntkalk konnten hier trockenere Bedingungen erreicht werden. Einmalige Gießwassergaben von 8,9 mm hatten in dem untersuchten Boden keinen Einfluss auf die ψ_m in 50 und 130 cm Tiefe, während kumulative Gießwassergaben derselben Höhe zu einem deutlichen Anstieg der ψ_m führten.

8. Summary

Nineteen Cemeteries in different locations in Germany were studied in the project titled “Development of an environmentally sound burial practice considering the impact on soils, groundwater and the atmosphere”, founded by the Deutsche Bundesstiftung Umwelt.

Soil mapping was performed on the cemeteries (193 boreholes down to 3 meters depth, soil sampling for laboratory measurement of total carbon (C_t), total nitrogen (N_t) and pH-values), soil profiles were dug ($n=6$, disturbed and undisturbed soil sampling for laboratory measurement of texture, pH-value, C_t , N_t , potential cation exchange capacity (CEC_{pot}), saturated hydraulic conductivity (k_f), unsaturated hydraulic conductivity (k_u), air conductivity (k_i) and water retention function) and monitoring stations were installed ($n=4$, measurement of matric potential (ψ_m), redox potential (Eh) and temperature). Additionally artificial graves ($n=3$) were constructed on farmland, and a monitoring of ψ_m and Eh was operated in the refilled pits. Undisturbed soil samples were taken from the refilled soil 60 and 195 days after excavation to investigate soil structure development in newly constructed earth graves and compare the results with an undisturbed reference soil (Stagnic Luvisol). In one of the artificial graves, the soil backfill was mixed with 20 kg m^{-3} quicklime (CaO), to investigate the effect on soil structure development and water balance in the artificial graves. Furthermore irrigation experiments were performed with 2.2 mm, 4.4 mm and 8.9 mm Water and the effect on the soil water balance was documented.

Cemetery soils are classified as Rigosols according to German classification system. Stagnic or gleyic conditions are considered down to three meters depth.

The soil mapping allowed the differentiation of soil units on the analyzed cemeteries. Young cemeteries firstly contain an association of Rigosols and natural soils or, in urban areas, other types of anthropogenic soils. With increasing age of the cemetery, a gradually homogenization of the area takes place until only Rigosols are left. These differ mainly in terms of stagnic or gleyic conditions.

The soil units were rated according to their decomposition and filtration efficiency. The decomposition efficiency is evaluated by the air capacity, the soil type and the pH-Value. From the decomposition efficiency, recommended resting times are derived. The filtration efficiency is assessed by air capacity, CEC_{pot} , pH-value, water impact and detention period of the seepage water in the unsaturated zone. For melioration of the decomposition efficiency, drainage, shallower burial and the omission of double burials in one grave are recommended.

The decomposition efficiency was rated low in 67 %, medium in 18 % and high in 15 % of the soil units. The filtration efficiency was rated very low in 51 % of the soil units.

The probed cemetery soils were often deeply humous, and contained on average 2.11 % humus above the coffins (20-90 cm depth) and 1.09 % humus in the coffin layers (90 cm – burial depth). The

humus accumulation is mainly caused by the mixing of humous surface soil and potting soil with the subsoil, and is therefore often more pronounced in the upper 90 cm than in the coffin layer. But also the land use before the dedication of the cemetery has an influence on the humus contents of cemetery soils.

Soil physical analysis of undisturbed samples from earth graves showed, that the gas transport efficiency of the air filled porosity does not necessary decline because of soil refilling and the accompanying soil structure disruption. In all studied mineral soil profiles air capacity and k_i was higher above the coffin than below the coffin or in the grave walls. The soil above the coffins also revealed higher k_f than the surrounding soil. This promotes water ponding in the grave. Therefore the gas exchange is blocked rather by water filled pores than by a general decrease in soil structural functionality. The lack of oxygen, which occurs from the water saturation, was also documented in the continuously measured ψ_m and Eh.

In the field experiment, data on pore size distribution, pore organization, k_i and k_f , as well as the structural development in newly refilled earth graves were obtained. The refilled soil exhibited a dynamic structure, mainly due to soil settlement. A deterioration of soil functions concerning the major physical parameters related to gas transport (air capacity and k_i) was not found. These parameters remained higher in the refilled soil compared with the reference, also after distinct settlement. By the monitoring of ψ_m and Eh, the effect of the excavation and backfill on the water balance and the aeration were documented. In the pits distinct water retention and low Eh were measured. The application of quicklime stabilized the soil structure and led to dryer conditions in the artificial grave. In the field experiment single irrigation events with amounts of 8.9 mm did not lead to an increase of ψ_m in 50 or 130 cm depth, while cumulated irrigation events with 8.9 mm lead to an increase in ψ_m in 50 and 130 cm depth following already the second irrigation event.

9. Literaturverzeichnis

- Ad-hoc-AG Boden.** 2005. *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 5 ed. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung.
- Aeschlimann, E.** 2008. Untersuchung zum Abbauprozess von Fettwachsleichen. *Friedhofskultur* (Oktober 2008).
- Aeschlimann, E.** 2011. Zweite Verwesungsstudie durchgeführt. *Friedhofskultur* (August 2011).
- Aey, W.** 1990. Historisch-Ökologische Untersuchungen an Stadtökotypen Lübecks. *Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Geobotanik Schleswig-Holstein* 41.
- Ahuja, L. R., Naney, J. W., Green, R. E. und Nielsen, D. R.** 1984. Macroporosity to Characterize Spatial Variability of Hydraulic Conductivity and Effects of Land Management. *Soil Science Society of America Journal* 48 (4):699-702.
- Akaike, H.** 1974. New Look at Statistical-Model Identification. *Ieee Transactions on Automatic Control* Ac19 (6):716-723.
- AKS.** 1996. Kartieranleitung für Stadtböden 3. Entwurf.
- Albrecht, M.C.** 2002. Aktuelle Planungsfragen aus den Friedhofsverwaltungen - Bewertung aus bodenkundlich-hygienischer Sicht. Paper read at Konfliktfeld Friedhof, at Mainz.
- Albrecht, M.C.** 2008. Bodenkundlich-hygienische Untersuchung von Friedhofsflächen Verwesungsstörungen auf dem Friedhof Dokumentation und Ursachenermittlung, Naturwissenschaftliche Fakultät, Gottfried Wilhelm Leibnitz Universität Hannover, Hannover.
- Albrecht, M.C., Fründ, H. C. und Westphal, A.** 2005. Bodenkundlich- hygienische Untersuchungen zur Ermittlung der Verwesung auf einem Friedhof unter besonderer Berücksichtigung durchgeführter technischer Verbesserungsmaßnahmen. *Mitteilungen der DBG* Tagungsband Marburg 2005.
- Albrecht, M.C., Schulze-Wolf, T.** 1996. Die Bodenkundliche Untersuchung von Friedhofsflächen. *DFK* 8.
- Annabi, M., Le Bissonnais, Y., Le Villio-Poitrenaud, M. und Houot, S.** 2011. Improvement of soil aggregate stability by repeated applications of organic amendments to a cultivated silty loam soil. *Agriculture Ecosystems & Environment* 144 (1):382-389.
- Arthur, E., Cornelis, W. M., Vermang, J. und De Rocker, E.** 2011. Amending a loamy sand with three compost types: impact on soil quality. *Soil Use and Management* 27 (1):116-123.
- Arthur, E., Moldrup, P., Schjonning, P. und de Jonge, L. W.** 2012. Linking Particle and Pore Size Distribution Parameters to Soil Gas Transport Properties. *Soil Science Society of America Journal* 76 (1):18-27.

- Baath, E. und Anderson, T. H.** 2003. Comparison of soil fungal/bacterial ratios in a pH gradient using physiological and PLFA-based techniques. *Soil Biology & Biochemistry* 35 (7):955-963.
- Ball, B. C.** 1981. Pore Characteristics of Soils from 2-Cultivation Experiments as Shown by Gas Diffusivities and Permeabilities and Air-Filled Porosities. *Journal of Soil Science* 32 (4):483-498.
- Ball, B. C., Osullivan, M. F. und Hunter, R.** 1988. Gas-Diffusion, Fluid-Flow and Derived Pore Continuity Indexes in Relation to Vehicle Traffic and Tillage. *Journal of Soil Science* 39 (3):327-339.
- Ball, B. C. und Robertson, E. A. G.** 1994. Effects of Uniaxial Compaction on Aeration and Structure of Plowed or Direct Drilled Soils. *Soil & Tillage Research* 31 (2-3):135-148.
- Baumgartl, T. und Horn, R.** 1991. Effect of Aggregate Stability on Soil Compaction. *Soil & Tillage Research* 19 (2-3):203-213.
- Beirat, mündliche Mitteilung.** 2012.
- Benne, J.** 1981. 2321 Himmelpforten. In *Bodenkarte von Niedersachsen 1:25000*. Hannover.
- Benninger, L. A., Carter, D. O. und Forbes, S. L.** 2008. The biochemical alteration of soil beneath a decomposing carcass. *Forensic Science International* 180 (2-3):70-75.
- BLA-GEO.** 2004. UAG Sickerwasserprognose der Ad-hoc-AG Hydrogeologie und der Ad-hoc-AG Boden, Empfehlungen für die Charakterisierung und Parametrisierung des Transportpfades Boden-Grundwasser als Grundlage für die Sickerwasserprognose, ed. B.-L.-A. Bodenforschung.
- Blume, H. -P.** 1996. Böden städtisch-industrieller Verdichtungsräume. In *Handbuch der Bodenkunde*, ed. H.-P. F.-H. Blume, P.; Fischer, W. R.; Frede, H.-G.; Horn, R.; Stahr, K. Landsberg: ecomed.
- Blume, H. P.** 1981. Exkursionsführer zur Jahrestagung der DBG und eines Internationalen Symposiums über bodenkundliche Probleme städtischer Verdichtungsräume in Berlin (West). *Mitteilungen der DBG* Bd.31.
- Blume, H. P.** 1982. Böden des Verdichtungsraumes Berlin. *Mitteilungen der DBG* 33.
- Böblingen.** 2012. Friedhofssatzung, ed. S. Böblingen.
- Bosch, M.** 1983. Einfluss langjähriger Düngung mit verschiedenen N-Formen auf pH-Wert, Humusfraktionen, biologische Aktivität und Stickstoffdynamik einer Acker-Braunerde. *Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde* 146.
- Braun, R.** 2004. Friedhofssysteme in der Praxis. In *Fachtagung: Friedhofssysteme - dem Menschen und der Umwelt zuliebe Schutz für Boden und Wasser*, ed. G. e. V. Berlin.
- Büchi, H. und Willmann, I.** 2002. Verdachtsfläche Friedhof: Umweltgefährdung durch Leichenzersetzung? *Wasser und Boden* 54 (11):20-24.

- Buckingham, E.** 1904. Contributions to our knowledge of the aeration of soils. *U.S.D.A. Bureau of Soils Bul.* 25.
- Büdinge, H., Fein, W., Welling, M.** . 1989. Hydrogeologisches Gutachten über die Untergrundverhältnisse im Bereich des Friedhofes von ***, ed. B. f. Geotechnik. Mainz.
- Bunkova, L., Bunka, F., Mantlova, G., Cablova, A., Sedlacek, I., Svec, P., Pachlova, V. und Kracmar, S.** 2010. The effect of ripening and storage conditions on the distribution of tyramine, putrescine and cadaverine in Edam-cheese. *Food Microbiology* 27 (7):880-888.
- Cappuyns, V. und Swennen, R.** 2008. The use of leaching tests to study the potential mobilization of heavy metals from soils and sediments: A comparison. *Water Air and Soil Pollution* 191 (1-4):95-111.
- Carter, D. O., Spicka, A., Johnson, R., Bushing, J. und Higley, L. G.** 2011. Carcass mass can influence rate of decomposition and release of ninhydrin-reactive nitrogen into gravesoil. *Forensic Science International* 209 (1-3):80-85.
- Carter, D. O. und Tibbett, M.** 2006. Microbial decomposition of skeletal muscle tissue (*Ovis aries*) in a sandy loam soil at different temperatures. *Soil Biology & Biochemistry* 38 (5):1139-1145.
- Carter, D. O., Yellowlees, D. und Tibbett, M.** 2007. Cadaver decomposition in terrestrial ecosystems. *Naturwissenschaften* 94 (1):12-24.
- Carter, D. O., Yellowlees, D. und Tibbett, M.** 2008a. Temperature affects microbial decomposition of cadavers (*Rattus rattus*) in contrasting soils. *Applied Soil Ecology* 40 (1):129-137.
- Carter, D. O., Yellowlees, D. und Tibbett, M.** 2008b. Using ninhydrin to detect gravesoil. *Journal of Forensic Sciences* 53 (2):397-400.
- Casper, J.L.** 1858. Handbuch der Gerichtlichen Medizin, Thanatologischer Teil. Berlin: Hirschwald.
- Chan, K. Y. und Heenan, D. P.** 1999. Lime-induced loss of soil organic carbon and effect on aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 63 (6):1841-1844.
- Chang, C. und Lindwall, C. W.** 1990. Comparison of the Effect of Long-Term Tillage and Crop-Rotation on Physical-Properties of a Soil. *Canadian Agricultural Engineering* 32 (1):53-55.
- Charzynski, P. ; Bednarek, R. ; Zolnowska, B.** 2010. Characteristics of the soils of Torun cemeteries. In *19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World*. Brisbane, Australia: Published on DVD.
- Cramer, B.** 2006. Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerböden in Nordrhein-Westfalen, Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.

- DeAngelis, K. M., Silver, W. L., Thompson, A. W. und Firestone, M. K.** 2010. Microbial communities acclimate to recurring changes in soil redox potential status. *Environmental Microbiology* 12 (12):3137-3149.
- Dent, B. B., Forbes, S. L. und Stuart, B. H.** 2004. Review of human decomposition processes in soil. *Environmental Geology* 45 (4):576-585.
- DIN 19732.**
- Douterelo, I., Goulder, R. und Lillie, M.** 2009. Response of the microbial community to water table variation and nutrient addition and its implications for in situ preservation of organic archaeological remains in wetland soils. *International Biodeterioration & Biodegradation* 63 (6):795-805.
- Duncan, N. A. und Bransden, B. E.** 1986. The Effects on a Restored Soil Caused by Soil Moving under Different Moisture Contents. *Applied Geography* 6 (3):267-273.
- DVWK.** 1997. Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden In *Teil II: Auflastabhängige Veränderungen von bodenphysikalischen Kennwerten*. Bonn: Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft gas und Wasser mbH.
- Eckardt, A.** 1994. Branchenbezogene Merkblätter zu Altlastenbehandlung 1: Friedhöfe, ed. R. Altlasten. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- Ellies, A., Hartge, K. H. und Nissen, J.** 1978. Effect of Burnt Lime on Water Regime of a Soil Formed on Volcanic Ashes in Southern Chile (Trumao). *Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde* 141 (5):597-606.
- Evans, W. E.** 1963. Adipocere Formation in a Relatively Dry Environment. *Med Sci Law* 3:145.158.
- Faidt, L.** 2009. Erdbestattung und Grabkammersysteme Einfluss auf den Wasser- und Bodenhaushalt von Friedhöfen, 150. Düsseldorf: Fachverlag des Deutschen Bestattungsgewerbes.
- Farooqi, M. A. R. und Demooy, C. J.** 1983. Effect of Soil Saturation on Redox Potential and Microbial Activity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 14 (3):185-197.
- Fiedler, S., Breuer, J., Pusch, C. M., Holley, S., Wahl, J., Ingwersen, J. und Graw, M.** 2012. Graveyards - Special landfills. *Science of the Total Environment* 419:90-97.
- Fiedler, S., Buegger, F., Klaubert, B., Zipp, K., Dohrmann, R., Witteyer, M., Zarei, M. und Graw, M.** 2009. Adipocere withstands 1600 years of fluctuating groundwater levels in soil. *Journal of Archaeological Science* 36 (7):1328-1333.
- Fiedler, S., Schneckenberger, K. und Graw, M.** 2004. Characterization of soils containing adipocere. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 47 (4):561-568.
- Fiedler, S., Schneckenberger, K., Graw, M., Schweinsberg, F., Stahr, K.** 2002. Bildung so genannter Fettwachsleichen in redoximorphen Nekrosolen - Beispiel St. Georgen. *Wasser und Boden* 54 (11).

- Fleige, H. , Hartmann, P. und Horn, R.** 2012. Bodenphysikalische und -chemische Eigenschaften eines hydromorphen, bronzezeitlichen Hügelgrabes bei Hüsby in der Schleswiger Vorgeest. *OFFA Sonderdruck*.
- Fleige, H., Horn, R., Blume, H.-P. und Wetzel, H.** 2002. Bodenkundliches Bewertungsverfahren zur Bestimmung des Eignungsgrades von Friedhöfen. *Wasser und Boden* 54 (11):31- 39.
- Forbes, S. L., Dent, B. B. und Stuart, B. H.** 2005a. The effect of soil type on adipocere formation. *Forensic Science International* 154 (1):35-43.
- Forbes, S. L., Stuart, B. H. und Dent, B. B.** 2005b. The effect of the burial environment on adipocere formation. *Forensic Science International* 154 (1):24-34.
- Forbes, S. L., Stuart, B. H. und Dent, B. B.** 2005c. The effect of the method of burial on adipocere formation. *Forensic Science International* 154 (1):44-52.
- Francis, P. B. und Cruse, R. M.** 1983. Soil-Water Matric Potential Effects on Aggregate Stability. *Soil Science Society of America Journal* 47 (3):578-581.
- Frohne, T., Rinklebe, J., Diaz-Bone, R. A. und Du Laing, G.** 2011. Controlled variation of redox conditions in a floodplain soil: Impact on metal mobilization and biomethylation of arsenic and antimony. *Geoderma* 160 (3-4):414-424.
- Gartiser, A.** 2000. Hydrogeologische Untersuchungen Friedhof ***, ed. I. f. H. u. U. G. Gartiser & Piewak. Bamberg.
- Gebhardt, S.** 2007. Wasserhaushalt und Funktionen der Böden im Grundwasserabsenkungsbereich des Wasserwerkes Wacken in Schleswig-Holstein, Agrar- und Ernährungswissenschaftliche Fakultät Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel.
- Gebhardt, S., Fleige, H. und Horn, R.** 2009. Effect of compaction on pore functions of soils in a Saalean moraine landscape in North Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde* 172 (5):688-695.
- Ghezzehei, T. A. und Or, D.** 2000. Dynamics of soil aggregate coalescence governed by capillary and rheological processes. *Water Resources Research* 36 (2):367-379.
- Grenzius, R.** 1987. Die Böden Berlins (West), Klassifizierung, Vergesellschaftung, ökologische Eigenschaften, Fachbereich 14 Landschaftsentwicklung, Technische Universität Berlin, Berlin.
- Groenevelt, P. H., Kay, B. D. und Grant, C. D.** 1984. Physical Assessment of a Soil with Respect to Rooting Potential. *Geoderma* 34 (2):101-114.
- Grossmann, J.** 2006. Anwendung und Optimierung des TUB-BGR-Verfahrens zur Berechnung der Grundwasserbeubildung. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 50 (4).
- Hartge, K. H.** 1966. Ein Haubenpermeameter zum schnellen Durchmessen zahlreicher Stechzylinderproben. *Z. f. Kulturtechn. u. Flurber.* 7:155-163.

- Hartge, K. H. und Horn, R.** 2009. *Die physikalische Untersuchung von Böden: Praxis Messmethoden Auswertung*. Vol. 4. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Hartge, K. H.; Ellies, A.** 1976. Über die Wirkung von Branntkalk als Stabilisator von Verfüllungsmaterial in Drängräben. *Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung* 17 (5).
- Hartge, K. H.; Ellies, A.** 1977. Mechanismen der Aggregatstabilisierung in einem Tonboden mittels Branntkalk. *Geoderma* 17:47-55.
- Haslam, T. C. F. und Tibbett, M.** 2009. Soils of Contrasting pH Affect the Decomposition of Buried Mammalian (*Ovis aries*) Skeletal Muscle Tissue. *Journal of Forensic Sciences* 54 (4):900-904.
- Helmes, T.** 2004. Urbane Böden - Genese, Eigenschaften und räumliche Verteilungsmuster - Eine Untersuchung im Stadtgebiet Saarbrücken, Philosophische Fakultäten der Universität des Saarlandes, Saarbrücken.
- Herberhold, R.** 1973. 4107 Borken. In *Bodenkarte Nordrhein-Westfalen 1:25000*.
- Hofmann, P., May, J.** 1941. Hygienische Untersuchung eines Friedhofsbodens.
- Hopkins, D. W., Wiltshire, P. E. J. und Turner, B. D.** 2000. Microbial characteristics of soils from graves: an investigation at the interface of soil microbiology and forensic science. *Applied Soil Ecology* 14 (3):283-288.
- Horn, R.** 1990. Aggregate Characterization as Compared to Soil Bulk Properties. *Soil & Tillage Research* 17 (3-4):265-289.
- Horn, R. und Dexter, A. R.** 1989. Dynamics of Soil Aggregation in an Irrigated Desert Loess. *Soil & Tillage Research* 13 (3):253-266.
- Horn, R. und Fleige, H.** 2001. Bodenkundliche Anforderungen für die Erdbestattung. Paper read at Friedhofsysteme - dem Menschen und der Umwelt zuliebe Schutz für Boden und Wasser, at Berlin.
- Horn, R. und Kutilek, M.** 2009. The intensity-capacity concept-How far is it possible to predict intensity values with capacity parameters. *Soil & Tillage Research* 103 (1):1-3.
- Kahle, P., Coburger, E.** 1996. Eigenschaften von Böden unterschiedlicher Nutzung im Stadtgebiet von Rostock *Zeitschrift Für Pflanzenernahrung Und Bodenkunde* 159:637-642.
- Kalbitz, K., Knappe, S.** 1997. Einfluß der Bodeneigenschaften auf die Freisetzung der gelösten organischen Substanz (DOM) aus dem Oberboden. *Zeitschrift Für Pflanzenernahrung Und Bodenkunde* 160.
- Kasielke, T. ; Buch, C.** 2011. Urbane Böden im Ruhrgebiet. In *Online-Veröffentlichungen Bochumer Botanischer Verein*. Bochum.
- Kaufmann, M., Tobias, S. und Schulin, R.** 2009. Development of the mechanical stability of a restored soil during the first 3 years of re-cultivation. *Soil & Tillage Research* 103 (1):127-136.

- Keller, G.** 1966. Über die Eignung nordwestdeutscher Böden für die Erdbestattung. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* (115):606-616.
- Kodesova, R., Rohoskova, M. und Zigova, A.** 2009. Comparison of aggregate stability within six soil profiles under conventional tillage using various laboratory tests. *Biologia* 64 (3):550-554.
- Krummelbein, J., Horn, R., Raab, T., Bens, O. und Huttli, R. F.** 2010. Soil physical parameters of a recently established agricultural recultivation site after brown coal mining in Eastern Germany. *Soil & Tillage Research* 111 (1):19-25.
- Maier, M.** 2007. Baugrunduntersuchung Hydrogeologische Verhältnisse Friedhof in ***, ed. G. P. Ingenieurgeologie. Erlangen.
- Mamedov, A. I., Beckmann, S., Huang, C. und Levy, G. J.** 2007. Aggregate stability as affected by polyacrylamide molecular weight, soil texture, and water quality. *Soil Science Society of America Journal* 71 (6):1909-1918.
- Mann, H. B., Whitney, D. R.** 1947. On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *Annals of Mathematical Statistics* 18 (1):50-60.
- Matthes, Dr.** 1903. Zur Frage der Erdbestattung vom Standpunkt der öffentlichen Gesundheitspflege. *Medical Microbiology and Immunology* 44 (1):439-468.
- Mccarthy, K. P. und Brown, K. W.** 1992. Soil Gas-Permeability as Influenced by Soil Gas-Filled Porosity. *Soil Science Society of America Journal* 56 (4):997-1003.
- Mcgill, R., Tukey, J. W. und Larsen, W. A.** 1978. Variations of Box Plots. *American Statistician* 32 (1):12-16.
- Milbert, G.** 2002. Geologische-bodenkundliche Gutachten zur Neuanlage und Erweiterung von Begräbnisplätzen - Vorgehensweise und Vorschläge für Herrichtungsmaßnahmen. Paper read at Konfliktfeld Friedhof, at Mainz.
- Mögglingen, Gemeinde.** 2011. Friedhofssatzung.
- Moldrup, P., Olesen, T., Komatsu, T., Schjonning, P. und Rolston, D. E.** 2001. Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases. *Soil Science Society of America Journal* 65 (3):613-623.
- Müller, W.** 1914. Physikalisch-chemische Bestimmungen über die Entstehung und Vermeidung des Leichenwachses auf Friedhöfen. Das Prinzip der künstlichen Sargventilation. *Archiv für Hygiene* 83:286-326.
- Nanikawa, R.; Tawa, N.; Saito, K.** 1961. Chemical Studies on adipocere formation. Re-evaluation of the saponification theory. *Japanese Journal of legal Medicine* 15:258-268.
- Opitz, O.** 1992. Bodenkundliches Gutachten zur Erweiterung des Friedhofes im Teilort *** der Gemeinde *** und zur Festlegung der Ruhezeiten auf dem Friedhof ***: Geologisches Landesamt Baden-Württemberg.

Ottow, Johannes C. G. 2011. Böden als Lebensräume

Mikrobiologie von Böden, 1-28: Springer Berlin Heidelberg.

Pagels, B., Baumgartl, T., Fleige, H. und Horn, R. 2003. Überprüfung der Gaszügigkeit zweier Aktivkohlefilter für Grabkammersysteme. *Wasser und Boden* 55 (1+2):20-23.

Pagels, B., Fleige, H. und Horn, R. 2004. Endbericht zur Studie: Bodenbeschaffenheit und Zersetzungsproblematik auf Friedhöfen: Zentralverband deutsches Baugewerbe.

Penman, H.L. . 1940. Gas and vapor movements in soil: The diffusion of vapors through porous solids. *J. Agric. Sci.* 30 (437-462).

Peth, S. 2004. Bodenphysikalische Untersuchungen zur Trittbelastung von Böden bei der Rentierweidewirtschaft an borealen Wald- und subarctisch-alpinen Tundrenstandorten, Agrar- und Ernährungswissenschaftliche Fakultät, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel.

Piccolo, A. und Mbagwu, J. S. C. 1999. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 63 (6):1801-1810.

Pietri, J. C. A. und Brookes, P. C. 2009. Substrate inputs and pH as factors controlling microbial biomass, activity and community structure in an arable soil. *Soil Biology & Biochemistry* 41 (7):1396-1405.

Plagge, R. 1991. Bestimmung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit im Boden, Technische Universität Berlin, Berlin.

Raissi, F.; Müller, U. 2008. Bodenkundliche Anforderungen an Anträge zur Erdbestattung. *GeoFakten* 4.

Reichart, O. , Szakmár, K. , Jozwiak, Á., Felföldi, J. und Baranyai, . 2007. Redox potential measurement as a rapid method for microbiological testing and its validation for coliform determination. *International Journal of Food Microbiology* (114):143-148.

Renger, M. ; Wessolek, G. 1990. Auswirkungen von Grundwasserabsenkungen auf die Grundwasserneubildung. *Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen* 386.

Resulovic, H. ; Custovic, H. 2011. Properties of Technogenous Substrates an Assessment of their Suitability for Recultivation - Technosol Development Projection. *Agriculturae Conspectus Scientificus* 76 (1):81-86.

Resurreccion, A. C., Moldrup, P., Kawamoto, K., Yoshikawa, S., Rolston, D. E. und Komatsu, T. 2008. Variable pore connectivity factor model for gas diffusivity in unsaturated, aggregated soil. *Vadose Zone Journal* 7 (2):397-405.

Reynolds, W. D., Drury, C. F., Yang, X. M., Fox, C. A., Tan, C. S. und Zhang, T. Q. 2007. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil & Tillage Research* 96 (1-2):316-330.

- Richter, F. H., Fleige, H., Blume, H. P. und Horn, R.** 2007. Soil associations of different geomorphological units of a younger-moraine area in Schleswig-Holstein (NW Germany) considering matter fluxes. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde* 170 (5):682-692.
- RLP, LGB.** 2004. Bodenkundliche Anforderungen an Neuanlagen oder Erweiterungen von Friedhöfen.
- Rodrigues, S., da Silva, A. P., Giarola, N. F. B. und Rosa, J. A.** 2011. Soil Air Permeability in a Rhodic Hapludox under Different Tillage Systems. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo* 35 (1):105-114.
- Rousk, J., Brookes, P. C. und Baath, E.** 2009. Contrasting Soil pH Effects on Fungal and Bacterial Growth Suggest Functional Redundancy in Carbon Mineralization. *Applied and Environmental Microbiology* 75 (6):1589-1596.
- Sabel, K.-J., ed.** 2007. *Bodenkundliche Anforderungen an das Anlegen und Erweitern von Friedhöfen.* Vol. 8. Wiesbaden.
- Schaffer, B., Stauber, M., Muller, R. und Schulin, R.** 2007. Changes in the macro-pore structure of restored soil caused by compaction beneath heavy agricultural machinery: a morphometric study. *European Journal of Soil Science* 58 (5):1062-1073.
- Scheffer, F. und Schachtschabel, P.** 2002. *Lehrbuch der Bodenkunde.* Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Schjonning, P. und Rasmussen, K. J.** 2000. Soil strength and soil pore characteristics for direct drilled and ploughed soils. *Soil & Tillage Research* 57 (1-2):69-82.
- Schjonning, P., Thomsen, I. K., Moberg, J. P., de Jonge, H., Kristensen, K. und Christensen, B. T.** 1999. Turnover of organic matter in differently textured soils - I. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils. *Geoderma* 89 (3-4):177-198.
- Schlichting, E., Blume, H. - P. und Stahr, K.** 1995. *Bodenkundliches Praktikum.* Berlin: Blackwell Wissenschafts-Verlag.
- Schmidt-Bartelt, D., Behnke, R. und Burghardt, W.** 1990. Friedhöfe auf Löß und urban-industriell überprägten Substraten im Ruhrgebiet - Bodenmerkmale, Probleme und Lösungsansätze. *Mitteilungen der DBG* 61:131-134.
- Schmidt, M.** 2009. Die Leichenlipidbildung auf Friedhöfen - Maßnahmen zur Prophylaxe und Sanierung, Medizinische Fakultät, Eberhard Karls Universität, Tübingen.
- Schmidt, M.; Graw, M.** 2002. Forschungsprojekt zur Problematik der Verwesung läuft im Schwarzwald *Friedhofskultur* 92 (2):20-21.
- Schmierl, G.** 1982. Die Leichenzersetzung im Erdgrab aus verwaltungsrechtlicher, hygienischer, geologischer und rechtsmedizinischer Sicht, Medizinische Fakultät, Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen-Nürnberg.

- Schoenen, D.** 2002. Wachsleichenbildung - ein mikrobielles Problem. *Wasser und Boden* 54 (11):12-15.
- Scholz-Solbach, K.** 2004. Thermische Effekte der tiefgründigen Bodenstabilisierung mit Branntkalk-Boden-Säulen, Fakultät Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar.
- Schotsmans, E. M. J., Denton, J., Dekeirsschieter, J., Ivaneanu, T., Leentjes, S., Janaway, R. C. und Wilson, A. S.** 2012. Effects of hydrated lime and quicklime on the decay of buried human remains using pig cadavers as human body analogues. *Forensic Science International* 217 (1-3):50-59.
- Schrader, L.** 1978. 1978 Wiesbaden. In *Bodenkarte von Hessen 1:25000*, ed. H. L. f. Bodenforschung. Wiesbaden.
- Shapiro, S. S. und Wilk, M. B.** 1965. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika* 52:591-&.
- Hydrus-1D, version 4.14, Code for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Porous Media.**
- Smejkalova, M., Mikanova, O. und Boruvka, L.** 2003. Effects of heavy metal concentrations on biological activity of soil micro-organisms. *Plant Soil and Environment* 49 (7):321-326.
- Sobočka, J.** 2004. Necrosol as a new anthropogenic soil type. Paper read at Soil Anthropization VIII, at Bratislava, Slovakia.
- Song, Y., Deng, S. P., Acosta-Martinez, V. und Katsalirou, E.** 2008. Characterization of redox-related soil microbial communities along a river floodplain continuum by fatty acid methyl ester (FAME) and 16S rRNA genes. *Applied Soil Ecology* 40 (3):499-509.
- Spearman, C.** 1987. The Proof and Measurement of Association between 2 Things (Reprinted from Amer J Psychology, Vol 15, Pg 72-101, 1904). *American Journal of Psychology* 100 (3-4):441-471.
- Spongberg, A. L. und Becks, P. M.** 2000. Inorganic soil contamination from cemetery leachate. *Water Air and Soil Pollution* 117 (1-4):313-327.
- Statistisches Bundesamt, D.** 2012. *Flächennutzung* 2011 [cited 2012]. Available from <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltoekonomieGesamtrechnungen/Flaechennutzung/Tabellen/SiedlungsVerkehrsflaecheNutzung.html>.
- Sukopp, H., Witting, R.** 1993. *Stadtökologie*. Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm: Gustav Fischer.
- Tacke.** 1935. Über die Möglichkeit der Gewinnung von Kulturland in Deutschland. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde* 37 (3-4):222-229.
- Takatori, T.** 2001. The mechanism of human adipocere formation. *Legal Medicine* 3:193-204.

- Takatori, T. und Yamaoka, A.** 1977a. Mechanism of Adipocere Formation .1. Identification and Chemical Properties of Hydroxy Fatty-Acids in Adipocere. *Forensic Science* 9 (1):63-73.
- Takatori, T. und Yamaoka, A.** 1977b. Mechanism of Adipocere Formation .2. Separation and Identification of Oxo Fatty-Acids in Adipocere. *Forensic Science* 10 (2):117-125.
- R: A language and environment for statistical computing** 2.14.1, Wien.
- Thouret.** 1792. Bericht über die Leichen, die aus dem Kirchhof und der Kirche der unschuldigen Märtyrer ausgegraben wurden. *Chemische Annalen* 2:464-474.
- Tukey, J. W.** 1953. *The problem of mutible comparisons, Unpublished manuscript*. Vol. VIII.
- Ubelaker, D. H. und Zarenko, K. M.** 2011. Adipocere: What is known after over two centuries of research. *Forensic Science International* 208 (1-3):167-172.
- Üçisik, A. S. und Rushbrook, P.** 1998. The Impact Of Cemeteries On The Environment And Public Health. Copenhagen: WHO.
- Urban, R.** 2002a. Bodenkontamination durch Leichengifte? Paper read at Konfliktfeld Friedhof, at Mainz.
- Urban, R.** 2002b. Umweltbelastung, Bodenkontamination und Gesundheitsgefährdung bei Erdbestattungen. *Wasser und Boden* 54 (11):25-30.
- Van Belle, L. E., Carter, D. O. und Forbes, S. L.** 2009. Measurement of ninhydrin reactive nitrogen influx into gravesoil during aboveground and belowground carcass (*Sus domesticus*) decomposition. *Forensic Science International* 193 (1-3):37-41.
- Van Genuchten, M. Th.** 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44 (5):892-898.
- van Genuchten, M. Th., Leij, F. J. und Yates, S. R.** 1991. *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils*. Oklahoma: Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory.
- Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils.**
- Vass, A.** 2001. Beyond the grave – understanding human decomposition. *Microbiology Today* 28:190-192.
- Vass, A. A., Bass, W. M., Wolt, J. D., Foss, J. E. und Ammons, J. T.** 1992. Time since Death Determinations of Human Cadavers Using Soil Solution. *Journal of Forensic Sciences* 37 (5):1236-1253.
- Weinzierl, W. und Waldmann, F.** 2002. Karte der Potenziellen Problemstandorte für Erdbestattungen in Baden-Württemberg. *Wasser und Boden* 54 (11):4-7.
- Wernich, A.** 1894. Beschlüsse der Königlichen wissenschaftlichen Deputation für das Medizinalwesen vom 1. November 1890 betr. Projekte für Anlage und Erweiterung von Begräbnisplätzen und Entwürfe von Begräbnisplatz-Ordnungen. In *Zusammenstellung der*

- gültigen Medizinalgesetze Preußens*, ed. U.-u. M. preussisches Ministerium der geistlichen. Berlin.
- Wessolek, G. ; Duijnsveld, W.H.M. ; Trinks, S.** 2003. Teil III: Hydro-Pedotransferfunktionen zur Berechnung der Sickerwasserrate aus dem Boden: das TUB-BGR-Verfahren. In *Bodenökologie und Bodengenese*, ed. M. Facklam. Berlin: Technische Universität Berlin.
- Willmann, I.** 1996. Leichenzersetzung im Erdgrab, Institut für terrestrische Ökologie, EHT Zürich, Zürich.
- Wilson, A. S., Janaway, R. C., Holland, A. D., Dodson, H. I., Baran, E., Pollard, A. M. und Tobin, D. J.** 2007. Modelling the buried human body environment in upland climates using three contrasting field sites. *Forensic Science International* 169 (1):6-18.
- Witt, K. J.** 2002. Zement - Kalk - Stabilisierung von Böden. *Schriftenreihe Geotechnik Weimar* Heft 7.
- Wittmann, O.** 1975. 6938 Regensburg. In *Bodenkarte von Bayern 1:25000*, ed. B. G. Landesamt. München.
- Wourtsakis, A.** 2002. Bodenkundliche und hydrogeologische Anforderungen für die Erdbestattung. Paper read at Konfliktfeld Friedhof, at Mainz.
- WRB, IUSS Working Group.** 2006. World reference base for soil resources 2006, ed. F. a. A. O. o. t. U. Nations.
- Zausig, J. und Horn, R.** 1992. Soil-Water Relations and Aeration Status of Single Soil Aggregates, Taken from a Gleyic Vertisol. *Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde* 155 (3):237-245.
- Zink, A., Fleige, H. und Horn, R.** 2011. Verification of harmful subsoil compaction in loess soils. *Soil & Tillage Research* 114 (2):127-134.

10. Anhang

Tab. A 1: Mittelwertsvergleiche nach Tukey (1953), mittlere Differenz der mittleren Humusgehalte (MDM C_{org}-Gehalt) in Ah-Horizont (0-20 cm), Deckschicht (20-90 cm), Sargbereich (90cm – Bestattungstiefe) und Filterschicht (Bestattungstiefe + 70 cm) mit Angabe der Signifikanzcodes: p-Wert 0 (***) p-Wert 0,001 (**) p-Wert 0,01 (*) p-Wert 0,05 (.) p-Wert 0,1 () p-Wert 1 für alle kartierten Friedhöfe, (n=19)

Schichtvergleich	MDM Humusgehalt	FH	Schichtvergleich	MMD Humusgehalt	FH
Ah-Deck	6,16 ***	SH1	Ah-Fil	4,19 ***	BW2
	2,38 ***	SH2		7,69 ***	SH1
	3,62 **	NW2		6,10 ***	NW2
	3,09 **	NW1		4,23 ***	RP1
	2,40 **	BW2		3,91 ***	SH2
	2,48 *	RP2		3,82 ***	BE1
	2,42 *	BE1		3,86 **	NW1
	1,80 .	BY2		3,06 **	BY1
	1,68 .	BY1		2,41 *	BY2
	3,63	NW3		2,22 *	BE2
	1,99	RP1		4,32 .	RP2
	1,55	NI2		3,09	BW3
	1,37	BE2		2,30	BW1
	0,88	BW3		2,21	NI2
	0,41	BW1		-2,60	NI4
	0,33	NI4			
Ah-Sarg	4,08 ***	BW2	Deck-Sarg	1,19 ***	SH2
	6,25 ***	SH1		1,68 .	BW2
	5,36 ***	NW2		1,11 .	BY1
	3,57 ***	SH2		3,72	NI3
	3,61 **	NW1		1,75	RP1
	2,94 **	BE1		1,75	NW2
	2,79 **	BY1		1,54	NW3
	3,73 *	RP1		1,48	BW1
	2,38 *	BY2		1,46	BW3
	5,17 .	NW3		1,26	BY3
	1,37 .	BE2		1,00	NI1
	2,75	RP2		0,89	NI2
	2,44	NI2		0,58	BY2
	2,34	BW3		0,52	BE1
	1,89	BW1		0,51	NW1
	-1,48	NI4		0,10	SH1
		0,00	BE2		
		-1,53	RP2		
		-1,81	NI4		

Deck-Fil			Sarg-Fil		
	1,54 ***	SH2		1,58	RP2
	1,79 *	BW2		1,44	SH1
	1,54 *	SH1		0,89	BE1
	1,38 *	BY1		0,85	Be2
	2,24 .	RP1		0,75	BW3
	1,89 .	BW1		0,74	NW2
	3,97	NI3		0,52	BY3
	2,48	NW2		0,49	RP1
	2,20	BW3		0,41	BW1
	1,79	BY3		0,34	SH2
	1,41	BE1		0,28	BY1
	0,85	Be2		0,26	NI3
	0,77	NW1		0,25	NW1
	0,66	NI2		0,11	BW2
	0,61	BY2		0,03	BY2
	0,58	NI1		-0,23	NI2
	0,05	RP2		-0,42	NI1
	-2,93	NI4		-1,12	NI4

Tab. A 2: Mittelwertsvergleiche nach Tukey (1953), mittlere Differenz der mittleren der N_t - Gehalte (MDM N_t -Gehalt) in Ah-Horizont (0-20 cm), Deckschicht (20-90 cm), Sargbereich (90cm – Bestattungstiefe) und Filterschicht (Bestattungstiefe + 70 cm) mit Angabe der Signifikanzcodes: p-Wert 0 (***) p-Wert 0,001 (**) p-Wert 0,01 (*) p-Wert 0,05 (.) p-Wert 0,1 () p-Wert 1 für alle kartierten Friedhöfe, (n=18)

Schichtvergleich	MDM N_t -Gehalt	FH	Schichtvergleich	MMD N_t -Gehalt	FH
Ah-Deck	0,092 ***	NW2	Ah-Fil	0,121 ***	BW2
	0,088 ***	NW1		0,120 ***	SH2
	0,072 ***	BW2		0,114 ***	NW1
	0,061 ***	SH2		0,078 ***	NI2
	0,051 **	NI2		0,075 ***	BE1
	0,055 *	BE1		0,125 **	NW2
	0,071 .	BW3		0,103 *	BW3
	0,173	SH1		0,085 *	BY2
	0,091	RP2		0,071 *	BY1
	0,088	NW3		0,040 *	BE2
	0,067	RP1		0,141	SH1
	0,055	BY2		0,123	RP1
	0,038	BY1		0,087	RP2
	0,028	Be2		0,073	NI4
	0,020	NI4		0,035	BW1
	-0,004	BW1			

Ah-Sarg	0,123 ***	NW2	Deck- Sarg	0,045 *	BW2
	0,117 ***	BW2		0,042 *	SH2
	0,103 ***	SH2		0,065	RP1
	0,099 ***	NW1		0,036	NW3
	0,069 **	NI2		0,033	BY2
	0,062 **	BE1		0,031	NW2
	0,124 .	NW3		0,030	BY3
	0,088 .	BY2		0,026	BY1
	0,085 .	BW3		0,023	BW1
	0,064 .	BY1		0,019	NI2
	0,151	SH1		0,014	BW3
	0,132	RP1		0,011	NW1
	0,029	BE2		0,008	NI1
	0,019	BW1		0,007	BE1
	0,019	RP2		0,000	BE2
	-0,047	NI4		-0,022	SH1
		-0,067	NI4		
		-0,073	RP2		
Deck-Fil	0,059 ***	SH2	Sarg-Fil	0,016	BW1
	0,049 **	BW2		0,015	NW1
	0,039 **	BW1		0,014	BE1
	0,027 *	NI2		0,013	BY3
	0,120	NI4		0,012	BE2
	0,069	RP2		0,008	NI2
	0,056	RP1		0,008	BY1
	0,053	NI4		0,004	BW2
	0,044	BY3		0,002	NW2
	0,034	NW2		-0,002	BY2
	0,034	BY1		-0,004	RP2
	0,032	BW3		-0,009	RP1
	0,030	BY2		-0,010	SH1
	0,026	NW1		-0,016	NI1
	0,021	BE1		-0,024	NI1
	0,018	BW3		-0,032	SH1
	0,017	SH2			
	0,012	BE2			

Leitprofil Friedhof SH2

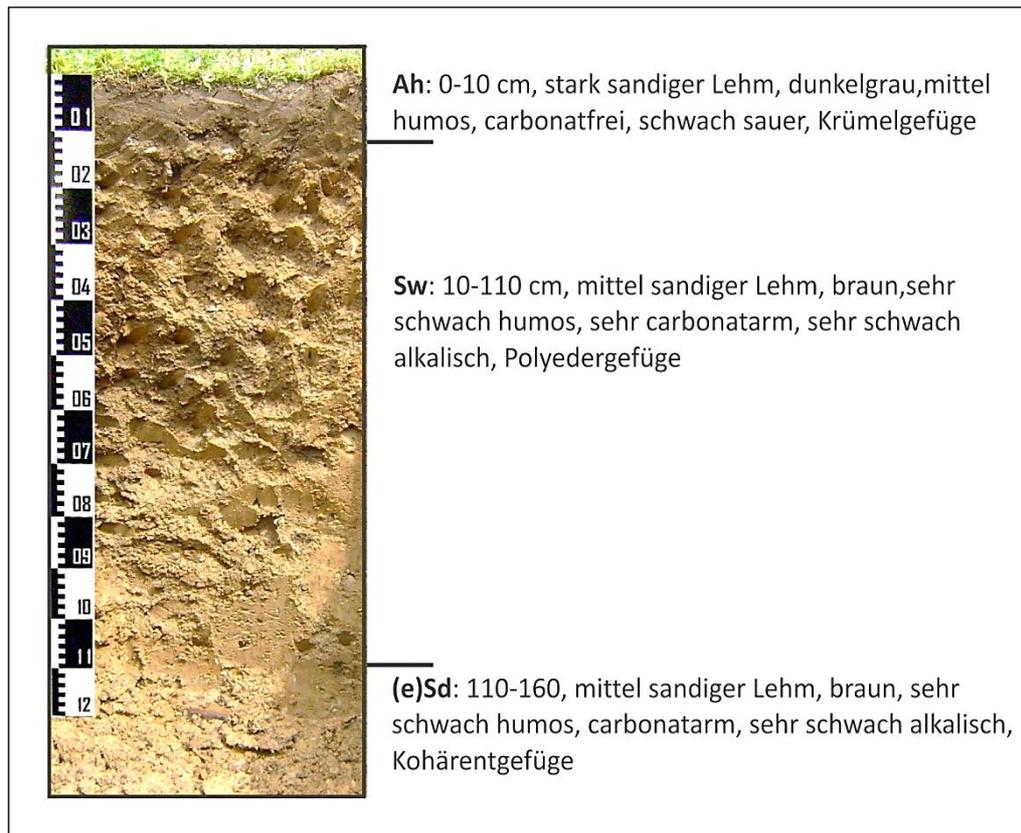


Abb. A 1: Leitprofil Friedhof SH2, Pseudogley (SSn) aus Geschiebemergel (Ansicht Grabwand)

Tab. A 3: Leitprofil Friedhof SH2, Pseudogley, Textur

Horizont	Bodenart	gS [%]	mS [%]	fS [%]	gU [%]	mU [%]	fU [%]	T [%]
Ah	Ls4	7	23	24	10	8	6	21
Sdw	Ls3	4	14	23	13	12	9	25
(e) Sd	Ls3	4	16	24	10	11	17	18

Tab. A 4: Leitprofil Friedhof SH2, bodenchemische Kennwerte

Horizont	pH-Wert (in CaCl ₂)	CaCO ₃ [%]	C _{org} [%]	N _t [%]	KAK _{pot} [cmol _c /kg]	austauschbare [cmol _c /kg]				Kationen	
						H ⁺	Al ³⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Ah	5,9	0,0	2,2	0,29	14,55	-	-	0,2	0,1	1,4	0,5
Sdw	7,4	0,2	0,1	0,05	13,97	-	-	0,2	0,0	1,3	0,5
(e) Sd	7,5	2,0	0,2	0,06	12,64	-	-	0,2	0,0	1,2	0,5

Leitprofil Friedhof NI2

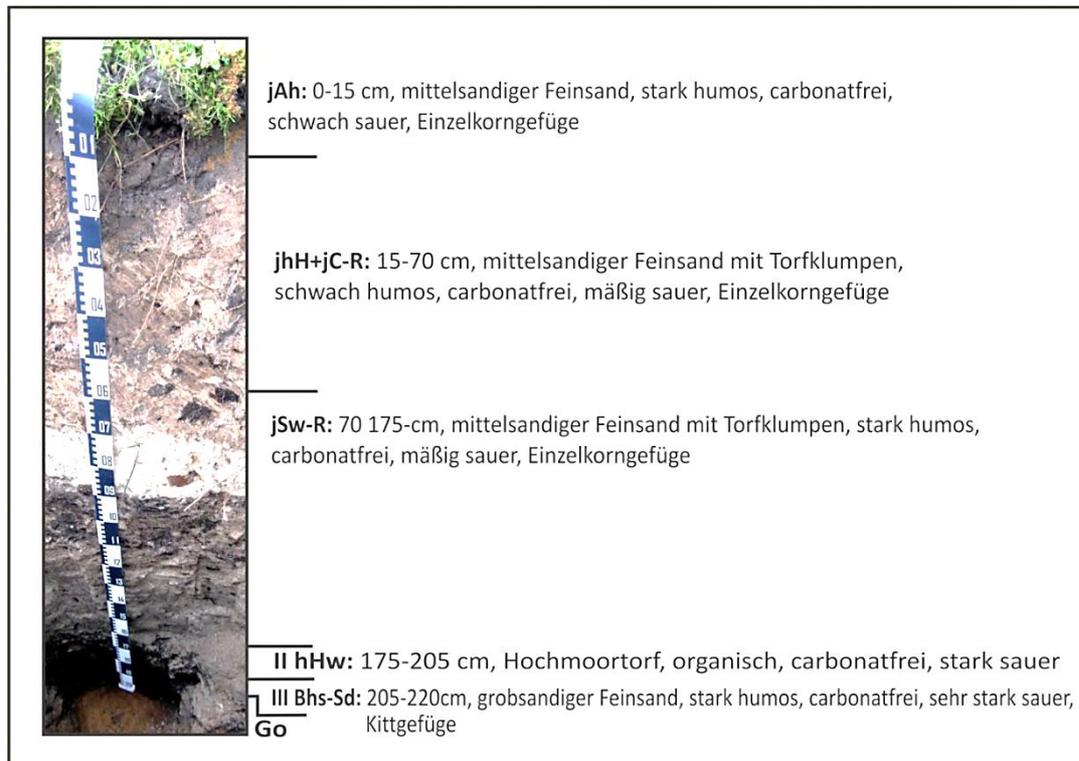


Abb. A 2: Leitprofil Friedhof NI2, Pseudogley-Rigosol (SS-YY) aus Sandauftrag über Hochmoortorf

Tab. A 5: Leitprofil Friedhof NI2, Pseudogley-Rigosol, Textur

Horizont	Bodenart	gS [%]	mS [%]	fS [%]	gU [%]	mU [%]	fU [%]	T [%]
Ah	fSms	0	17	77	4	0	1	1
jhH+jC-R	fSms	0	15	78	6	0	1	0
jSw-R	fSms	1	16	71	4	3	2	3
II hHw	H	-	-	-	-	-	-	-
III Bhs-Sd	fSgs	1	31	59	5	1	0	3

Tab. A 6: Leitprofil Friedhof SH2, bodenchemische Kennwerte

Horizont	pH-Wert (in CaCl ₂)	CaCO ₃ [%]	C _{org} [%]	N _t [%]	KAK _{pot} [cmol _c /kg]	austauschbare [cmol _c /kg]				Kationen	
						H ⁺	Al ³⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Ah	5,8	-	3,64	0,02	-	-	-	-	-	-	-
jhH+jC-R	5,2	-	0,91	0,06	5,49	0,1	0,0	0,1	0,0	1,9	0,1
jSw-R	4,4	-	3,59	0,06	15,15	0,3	0,3	0,2	0,2	6,8	1,2
II hHw	4,0	-	45,15	0,17	54,23	1,2	0,6	1,0	2,0	10,8	11,4
III Bhs-Sd	4,7	-	3,27	0,03	23,00	0,8	6,1	0,1	0,1	0,3	0,4

Danksagung

An erster Stelle danke ich Herrn Prof. Dr. Horn für die Überlassung dieses speziellen Forschungsthemas und für die sehr motivierende Unterstützung während des Projektes.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Heiner Fleige, der viel Zeit für fachliche Diskussionen aufgebracht hat und mich nie das Ziel aus den Augen verlieren ließ.

Ich danke der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Finanzierung des Forschungsprojektes.

Herrn Heinrich Kettler danke ich für das Interesse am Forschungsprojekt und die Vermittlung von Kontakten in der Friedhofsbranche.

Ein herzliches Dankeschön geht auch an den projektbegleitenden Beirat für eine Vielzahl interessanter Beiträge aus der Friedhofspraxis.

Ich danke allen Mitarbeitern und HiWis des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde, die mir bei Probenahmen und Labormessungen geholfen haben. Besonders hervorheben möchte ich Frau Sandra Kolls und Herrn Andreas Kirchheim, die mit ihrem Einsatz im Labor und im Feld wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Allen Kollegen am Institut danke ich für ein angenehmes Arbeitsumfeld und manch interessante Diskussion.

Meinem Lebensgefährten Thomas Neugebauer danke ich für großartige und tatkräftige Unterstützung sowohl bei Feldarbeiten als auch im privaten Alltag.

Herzlichen Dank auch an meine Mutter Klara Zimmermann, die mir das Studium ermöglicht und mir auch während der Fertigstellung meiner Dissertation stets den Rücken gestärkt hat.

Lebenslauf

Name: Iris Maria Zimmermann
Geburtsdatum: 28.03.1982
Geburtsort: Eckernförde, Schleswig-Holstein
Nationalität: deutsch
Familienstand: ledig

Berufliche Tätigkeiten:

07/2009-07/2012 Anstellung als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel im Rahmen des DBU-geförderten Projektes „Entwicklung einer umweltgerechten Erdbestattungspraxis im Hinblick auf die Folgewirkungen auf Böden, Grundwasser und Atmosphäre“

Studium:

04/2002-09/2008 Studium der Agrarwissenschaften an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Fachrichtung: Umweltwissenschaften der Agrarlandschaften
Abschluss: Master of Science

Studienbegleitende Tätigkeiten:

08/2005-10/2005 Praktikum auf landwirtschaftlichem Betrieb (Ackerbau, Milchviehhaltung, Schweinezucht)
04/2006-08/2006 Wissenschaftliche Hilfskraft am Ökologie-Zentrum der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
08/2006-10/2006 Praktikum auf landwirtschaftlichem Betrieb (Ackerbau, Getreideverarbeitung, Bioland)
03/2007-07/2008 Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Schulausbildung:

07/1994-06/2001 Duborg-Skolen, Privates dänisches Gymnasium Flensburg: Allgemeine Hochschulreife