

Kartierung von Friedhofsböden und Bewertung ihrer Verwesungs- und Filterleistung

I. Zimmermann, H. Fleige und R. Horn

Mapping of cemetery soils and evaluation of their decomposition and filtration efficiency

1 Einleitung

In der Bundesrepublik Deutschland existieren derzeit ca. 33.000 Friedhöfe, die insgesamt eine Fläche von 361 km² (ca. 0,1 % der Fläche Deutschlands) einnehmen (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2011). Die Ruhefristen für Erdbestattungen betragen in der Regel zwischen 20 und 30 Jahren. Nach Ablauf der Ruhefrist soll eine vollständige Umsetzung von Sarg und Leichnam im Boden stattgefunden haben, sodass die Grabstelle wieder belegt werden kann. Doch nicht alle Friedhofsböden können diese Anforderung erfüllen.

Eine 1999 in Baden-Württemberg durchgeführte Umfrage (SCHMIDT, 2002) ergab, dass auf ca. 38 % der Friedhöfe Verwesungsstörungen auftreten. Bei einer Fragebogenaktion von PAGELS et al. (2004) wurde bei 26 % der Rückläufe aus den Postleitzahlenbereichen 1–5 das Vorkommen von Verwesungsstörungen bestätigt. WOURTSAKIS (2002) nimmt an, dass 30–40 % der Friedhöfe in Rheinland-Pfalz auf nicht für Erdbestattungen geeigneten Böden angelegt sind.

Wenn Friedhofsböden bodenkundlich erfasst und klassifiziert werden, werden sie im deutschsprachigen Raum überwiegend als Nekrosole oder Rigosole bezeichnet (z.B.

SUKOPP, 1993; FIEDLER, 2002; SCHMIDT, 2009; BLUME, 1982; GRENZIUS, 1987; AKS, 1996; BLUME, 1996; KAHLE, 1996), teilweise werden Übergangssubtypen (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. In englischsprachigen Publikationen werden die Bezeichnungen Necrosols (RESULOVIC, 2011; SOBOCKA, 2004; CHARZYNSKI, 2010) und nach der World Reference Base for Soil Resources (WRB, 2006) beispielsweise Gleyic Anthrosols (FIEDLER et al., 2004) verwendet.

Bei der Erstellung von Bodenkarten werden die Friedhofsflächen häufig nicht gesondert berücksichtigt, sodass keine Informationen zur Beschaffenheit der Friedhofsböden vorliegen. Den Friedhofsflächen wurden entweder keine Bodentypen zugewiesen, 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 neben der nicht eindeutigen Klassifikation durch

Summary

19 cemeteries in 7 federal states of Germany were soil mapped and evaluated with respect to their suitability for burial. The analyzed cemetery soils were classified as Rigosols according to German classification system (WRB: Anthrosols) and contained in average 2.1 % humus in the cover layers and 1.1 % humus in the coffin layers. 26 % of the areas were well drained while 54 % revealed stagnic and 20 % gleyic conditions.

Decomposition efficiency was not reduced by to low air capacity, but rather by stagnic conditions and rated low in 67 % of the areas. Filtration efficiency was reduced by groundwater contact and/or substrates with high permeability. Additionally in 30 % of the areas low pH values indicated risk of heavy metal translocation.

Key words: Cemetery soils, evaluation system, decomposition efficiency, filtration efficiency, humus.

Zusammenfassung

In 7 Bundesländern Deutschlands wurden insgesamt 19 Friedhöfe bodenkundlich kartiert und im Hinblick auf ihre Eignung für die Erdbestattung bewertet. Die untersuchten Friedhofsböden wurden als Rigosole klassifiziert und enthielten im Mittel in den Deckschichten 2,1 % Humus sowie in den Sargbereichen 1,1 % Humus. 26 % der Flächen bestanden aus Normrigosolen, auf 54 % der Flächen wurde Stauwasser- und auf 20 % Grundwassereinfluss festgestellt. Die Verwesungsleistung wurde nicht durch eine zu geringe Luftkapazität, sondern vor allem durch Stauwassereinflüsse gemindert und auf 67 % der Flächen als gering bewertet. Die Filterleistung wurde durch Grundwasserkontakt und/oder Substrate mit hoher Durchlässigkeit gemindert. Auf 30 % der Flächen wurden zudem im Bereich der Filterschichten saure pH-Werte festgestellt, so dass die Gefahr von Schwermetallausträgen besteht.

Schlagworte: Friedhofsböden, Bewertungssystem, Verwesungsleistung, Filterleistung, Humus.

die aus Pietätsgründen eingeschränkte Zugänglichkeit von noch unter Nutzung stehenden Friedhöfen für bodenkundliche Kartierungen (HELMES, 2004) bedingt. Bodenkundliche Untersuchungen von Friedhöfen werden in der Regel nur im Rahmen von geologischen Gutachten vorgenommen. Anlass für solche Gutachten auf Friedhöfen ist häufig das Auftreten von 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 & 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 jedoch keine verstärkte Umweltgefährdung durch Boden- oder Grundwasserkontamination, denn Wachsleichen verhalten sich ihrer Umgebung gegenüber praktisch inert (BÜCHI & 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. Bei geregelter Umsetzung von Sarg und Leichnam kann es hingegen unter ungünstigen Bedingungen zu Belastungen des Grundwassers kommen, da die in Leichnam und Sarg enthaltenen Stoffe durch den Abbau freigesetzt werden (SCHRAPS, 1972). Dies gilt vor allem für grundwassernahe Standorte und auf durchlässigen Böden in Verbindung mit intensiver Bewässerung (GRENZIUS, 1987). Bei entsprechend saurer Bodenreaktion kann es hier zu Austrägen von Schwermetallen kommen, die z.B. aus Sargbeschlagen freigesetzt werden (BLUME, 1982). Auch pathogene Keime, vor allem Fäkalkeime, könnten bei hohen Fließgeschwindigkeiten des Sickerwassers und/oder hoch anstehendem

Grundwasser in die Umwelt gelangen. Friedhofsabwässer sind jedoch in der Regel mit leicht verschmutzten Oberflächengewässern vergleichbar (BÜCHI & WILLIMANN, 2002).

Die Bodeneigenschaften, die die Entstehung von Verwesungsstörungen begünstigen, sind heute weitgehend bekannt (FORBES et al., 2005; FIEDLER et al., 2004; UBELAKER & ZARENKO, 2011). Schlecht durchlüftete, grund- oder stauwasserbeeinflusste Böden gelten als für die Erdbestattung ungeeignet (WERNICH, 1894; RAISSI, 2008; MÜLLER, 1914) und sollten nicht als Friedhöfe genutzt werden. Darauf aufbauend gibt es eine Reihe von Ansätzen und Verfahren zur Einschätzung der Eignung von Böden für eine Friedhofsnutzung (KELLER, 1966; WERNICH, 1894; SCHMIERL, 1982; ALBRECHT, 1996; WOURTSAKIS, 2002; FLEIGE et al., 2002; RAISSI, 2008; SABEL, 2007).

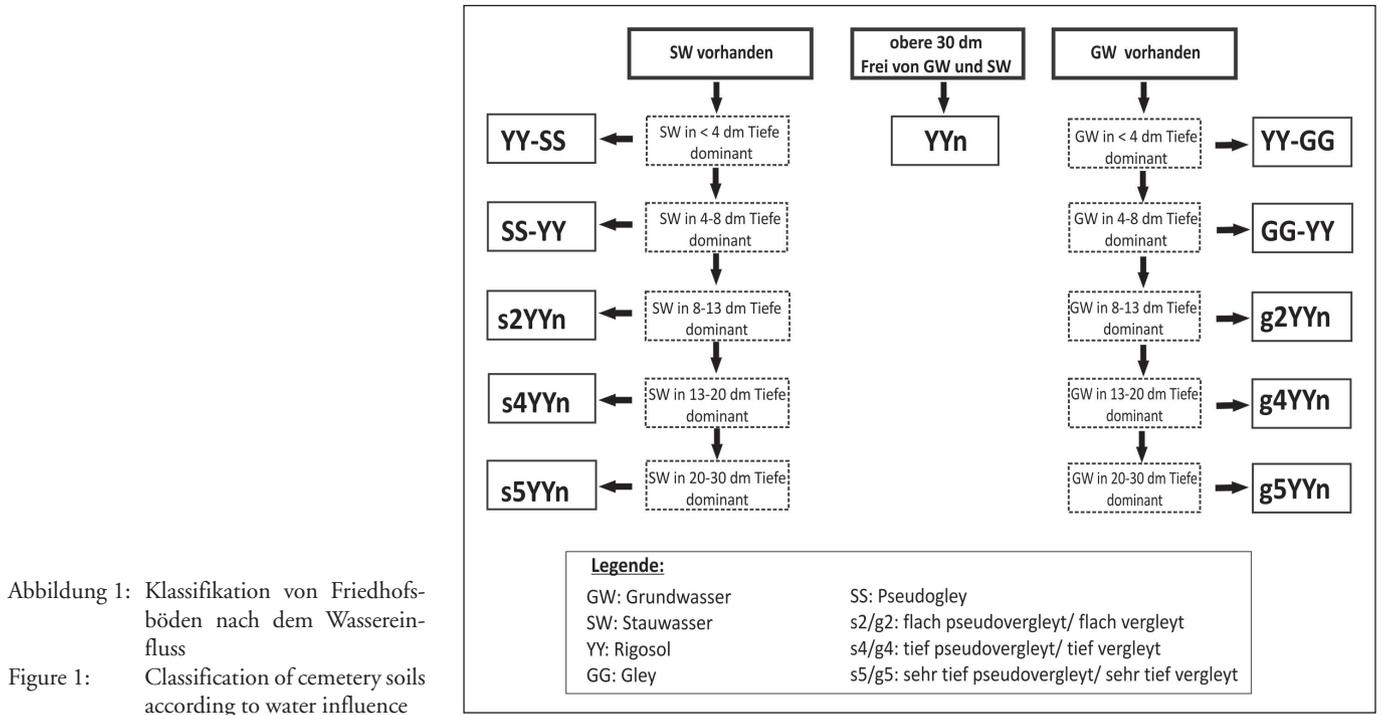
Im Folgenden werden Ergebnisse der bodenkundlichen Kartierung von Friedhöfen gezeigt und ein auf der bodenkundlichen Klassifikation aufbauendes Verfahren zur Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung von Friedhofsböden angewendet.

2 Material und Methoden

Es wurden insgesamt 19 Friedhöfe in den Bundesländern Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Berlin, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern untersucht.

2.1 Bodenkartierung

Auf den Friedhöfen wurden in einem an die örtlichen Gegebenheiten (Größe und Relief der Fläche, Anzahl abge- laufener Gräber) angepassten Raster bzw. Flächenquer-



schnitt in abgelaufenen Gräbern Bohrungen vorgenommen (n = 193). Die bodenkundliche Kartierung erfolgte nach den Richtlinien der AD-HOC-AG BODEN (2005). Die Bohrtiefe betrug allerdings jeweils 300 cm, um auch bei 180 cm Bestattungstiefe noch mindestens 70 cm der Filterschicht unterhalb der Grabsohle erfassen zu können. Anhand der Bohrstockkartierungen wurden Bodeneinheiten (n = 39) ausgewiesen und schematische Catenen erstellt, bei denen der Fokus auf Texturunterschieden zwischen den rigolten Bereichen Deckschicht und Sargbereich und dem darunter anstehenden ungestörten Boden (Filterschicht) lag.

Die Böden in abgelaufenen Erdgräbern wurden aufgrund der mit den Bestattungen einhergehenden Grabtätigkeiten als Rigosole (YY) klassifiziert (AD-HOC-AG BODEN, 2005). Da die Wasserverhältnisse für die Verwesungsleistung eines Bodens eine entscheidende Rolle spielen, erfolgte eine weitere Klassifizierung der Rigosole anhand von Grund- und Stauwassereinflüssen je nach Tiefe des Wasservorkommens in Übergangs(sub)typen und (Sub-)Varietäten (Abb. 1). 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 (s.o.), wurden zusätzlich zu den in diesem Zusammenhang möglichen (Sub-)Varietäten g2YYn, s2YYn (flach vergleyter Rigosol, flach pseudover-

gleyter Rigosol), g4YYn und s4YYn (tief vergleyter Rigosol und tief pseudovergleyter Rigosol) die (Sub-)Varietäten g5YYn und s5YYn eingeführt. Die Zahl fünf steht in diesem Fall für die Merkmalsstufe „sehr tief“ nach Tab. 3 in AD-HOC-AG BODEN (2005).

An den horizontspezifisch entnommenen Bohrkernen wurde im Feld die Textur ermittelt und anschließend im Labor Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte sowie der pH-Wert bestimmt (SCHLICHTING et al., 1995). 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, d.h. 150–180 cm), Mindestfilterschicht (Bestattungstiefe + 70 cm). Die Humusgehalte, C/N-Verhältnisse und pH-Werte werden im Folgenden als Boxplots (MCGILL et al., 1978) dargestellt und nach AD-HOC-AG BODEN (2005) klassifiziert.

2.2 Verwesungsleistung

Die Bewertung des potentiellen Gasaustausches zwischen Verwesungszone und Atmosphäre, und somit die Ermittlung der Klasse für die Verwesungsleistung, erfolgt in Abbildung 2 zunächst anhand der Luftkapazität (LK) und der Wasserverhältnisse.

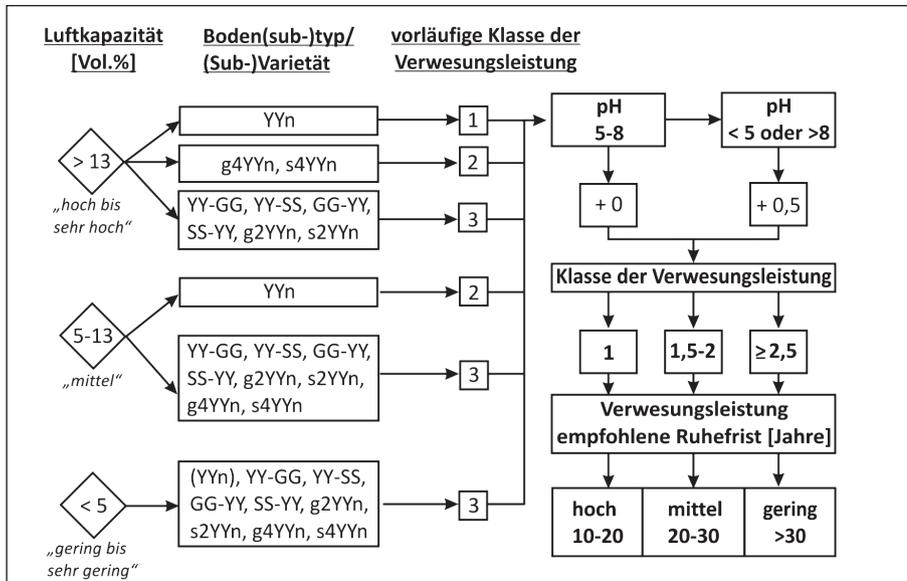


Abbildung 2: Bewertung der Verwesungsleistung von Friedhofsböden nach Luftkapazität (LK) und Boden(sub)typ und (Sub-)Varietät
 Figure 2: Evaluation of the decomposition efficiency of cemetery soils by air capacity and soil type

Böden mit LK < 5 Vol% werden ohne zusätzliche Berücksichtigung der Wasserverhältnisse als für die Erdbestattung ungeeignet eingestuft (Klasse 3), 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). Aufgrund des Einflusses der Bodenreaktion auf mikrobielle Aktivität und Umsetzungsraten (BAATH & ANDERSON, 2003; PIETRI & BROOKES, 2009; BOSCH, 1983) wird ein Zuschlag von 0,5 für die Bodenreaktion vergeben, wenn der pH-Wert < 5 oder > 8 ist.

Die Verwesungsleistung wird anhand von den nach Abbildung 2 ermittelten Klassen bewertet. Um für eine Friedhofsnutzung geeignet zu sein, sollte ein Boden mindestens eine mittlere Verwesungsleistung erreichen.

2.3 Filterleistung

Zusätzlich zu Bewertung der Verwesungsleistung erfolgt eine Bewertung der Filterleistung des Bodens unterhalb der Grabsohle (Abb. 3).

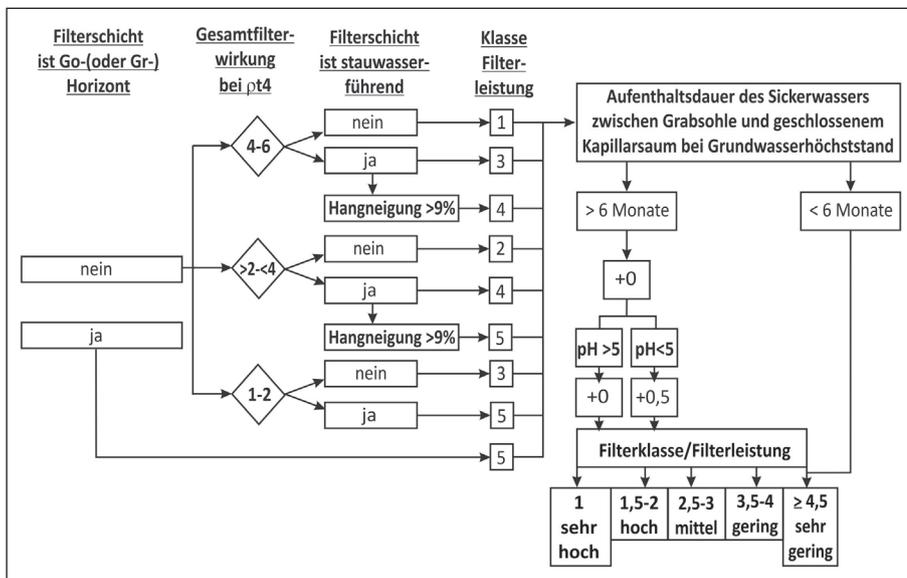


Abbildung 3: Bewertung der Filterleistung von Friedhofsböden unterhalb der Grabsohle nach Gesamtfilterwirkung und Wassereinflüssen, Bewertung ausgehend von einer Mächtigkeit der Filterschicht von 70 cm und einer Sickerwassermenge von 300 mm Jahr⁻¹
 Figure 3: Evaluation of filtration efficiency of cemetery soils beneath the gravebed according to total filtration efficiency and water impacts, evaluation based on 70 cm filtration layer and a seepage water rate of 300 mm year⁻¹

Die Filterleistung von grundwasserbeeinflussten Böden (Filterschicht ist Go- oder Gr-Horizont) wird als sehr gering eingestuft denn vor allem bei durchlässigen Bodenarten bestünde hier die Gefahr einer Grundwasserkontamination. Die Bewertung grundwasserferner Böden erfolgt zunächst in Anlehnung an die Bewertung der Gesamtfiterwirkung für kolloid- und ionendisperse Stoffe nach AD-HOC-AG BODEN (2005). In Hanglage können Stauwasservorkommen zu unerwünschten Stoffausträgen durch lateralen Transport führen, deshalb wird für Böden mit Stauwasser-einfluss bei Hangneigungen ab $\geq 9\%$ zusätzlich 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 Abweichungssubtyp Hangpseudogley. Nach erfolgreicher Beseitigung von Grund- oder Stauwassereinflüssen, beispielsweise durch Drainage, Grundwasserabsenkung oder Bodenaufschüttung, fällt die Bewertung entsprechend besser aus. Um ein Absterben von pathogenen Keimen im Boden vor Erreichen des Grundwassers zu gewährleisten, sollte die Verweildauer des Sickerwassers in der Filterschicht mindestens 6 Monate betragen (WOURTSAKIS, 2002). Diese wird nach DIN 19732 (1997) berechnet.

Bei nachweislichem Vorhandensein einer ausreichend mächtigen Filterschicht (frei von Grund- oder Stauwasser, oberhalb des geschlossenen Kapillarsaumes) für eine Aufenthaltsdauer des Sickerwassers in der Filterschicht von > 6 Monaten, wird im nächsten Schritt der pH-Wert im Bereich der Filterschicht überprüft. Dieser sollte, um der Auswaschung von Schwermetallen vorzubeugen, > 5 sein. Für pH-Werte < 5 wird ein Zuschlag von 0,5 zur Filterleistung vergeben.

Aus der Summe der vorgenommenen Klassifizierungen ergibt sich die Filterleistung. Ein für die Friedhofsnutzung geeigneter Boden sollte mindestens über eine mittlere Filterleistung verfügen.

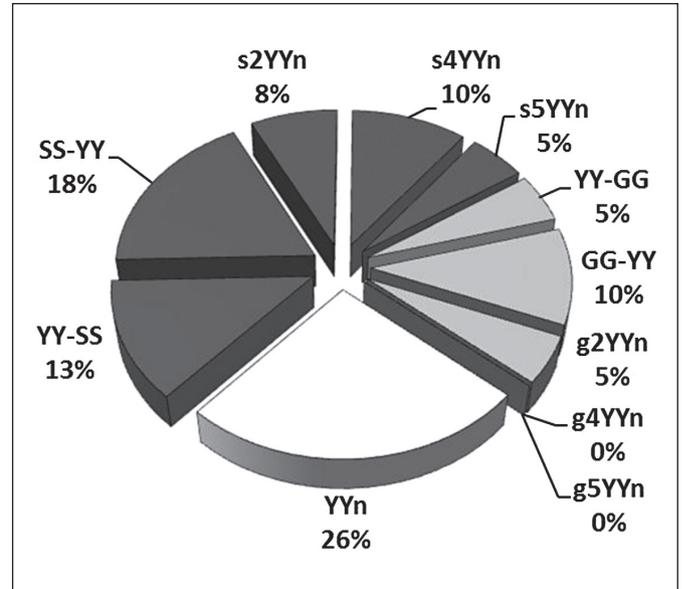


Abbildung 4: Prozentuale Verteilung der Bodentypen in den untersuchten Friedhöfen

Figure 4: Percentage distribution of soil types on the analyzed cemeteries

3 Ergebnisse

3.1 Bodenkartierung

Bodentypen: Anhand der bodenkundlichen Kartierung wurden auf den 19 untersuchten Friedhöfen insgesamt 39 Bodeneinheiten ausgemacht. 26 % der untersuchten Bodeneinheiten bestanden aus Normrigosolen, während insgesamt 54 % der Bodeneinheiten in unterschiedlicher Ausprägung von Stauwasser und insgesamt 20 % der Bodeneinheiten von Grundwasser geprägt waren (Abb. 4).

Textur: Zur Bewertung der Verwesungsleistung wurde zunächst die Bodenart im Bereich der Deckschichten dokumentiert (Tab. 1). Diese bestand in den untersuchten Erd-

Bodenartengruppe	ss	ls	us	sl	ll	su	lu	tu	ut	lt	Torf
Deckschicht [%]	31	26	2	2	18	8	3	10	-	-	-
Filterschicht [%]	27	17	12	3	18	-	5	5	8	3	2

Tabelle 1: Verteilung der Bodenartengruppen nach AD-HOC-AG BODEN (2005) in Deckschichten und Filterzonen der untersuchten Friedhöfe
 Table 1: Distribution of soil textures according to AD-HOC-AG BODEN (2005) in the decomposition and filtration zones of the analyzed cemeteries

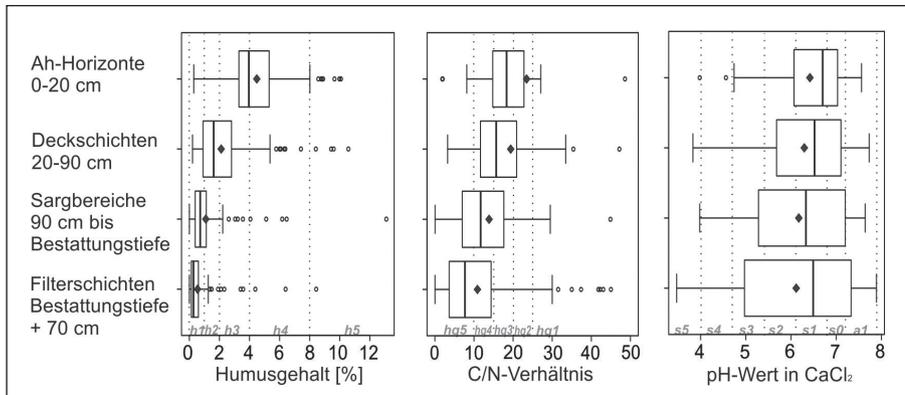


Abbildung 5: Humusgehalte (n = 447), C/N-Verhältnisse (n = 447) und pH-Werte (n = 370) von mineralischen Bodenproben aus den Ah-Horizonten (0–20 cm), Deckschichten (20–90 cm), Sargbereichen (90 cm – Bestattungstiefe) und Filterschichten (Bestattungstiefe + 70 cm) von 19 Friedhöfen, Rauten kennzeichnen arithmetische Mittelwerte

Figure 5: Humus content (n = 447), C:N ratio (n = 447) and pH-values (n = 370) of mineral soil samples from topsoil (0–20 cm), cover layers (29–90 cm), coffin layers (90 cm – burial depth) and filtration layers (burial depth + 70 cm) of 19 cemeteries, diamonds represent arithmetic means

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

Chemische Parameter: Die untersuchten mineralischen Friedhofsböden enthielten im Oberboden im Mittel 4,48 % Humus (Abb. 5). Die Deckschichten enthielten im Mittel 2,11 % Humus, die Sargbereiche 1,09 % Humus und die Filterschichten im Mittel 0,54 % Humus.

Die C/N-Verhältnisse lagen in den Ah-Horizonten im Mittel bei 24, was auf eine geringe Humusqualität hindeutet. Darunter lagen sie im Mittel unter 20, sodass hier mindestens von einer mittleren Humusqualität ausgegangen werden kann.

Die pH-Werte lagen in allen Tiefenbereichen im Mittel im sehr schwach sauren Bereich, vor allem im Bereich der Filterschichten wurden jedoch auch mäßig bis sehr stark saure pH-Werte festgestellt.

3.2 Verwesungs- und Filterleistung

Auf Basis der bodenkundlichen Klassifikation (Abb. 1) wurde eine Bewertung der Bodeneinheiten in Hinblick auf ihre Verwesungsleistung (nach Abb. 2) und ihre Filterleistung (nach Abb. 3) durchgeführt.

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 < 5 war.

Bis in die Verwesungszone reichendes Grund- oder Stauwasser führte in 70 % der untersuchten Bodeneinheiten zu einer schlechten Bewertung der Verwesungsleistung. Die Verwesungsleistung wurde in 67 % der Bodeneinheiten als gering, in 15 % als mittel und in 18 % als hoch bewertet (Abb. 6). Die Filterleistung wurde zu 51 % als sehr gering und zu 23 % als hoch bewertet.

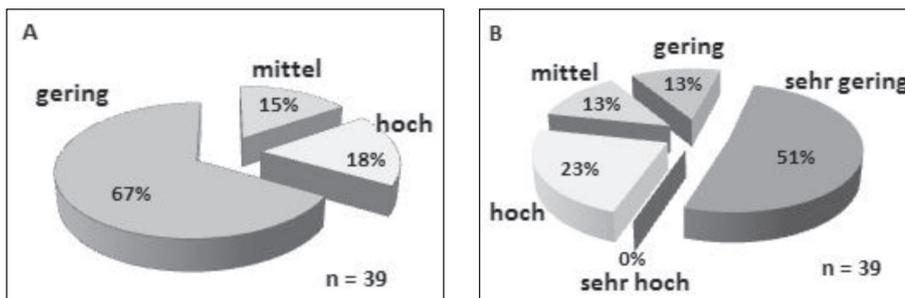


Abbildung 6: Bewertung der Verwesungsleistung (A) und Filterleistung (B) der untersuchten Bodeneinheiten

Figure 6: Evaluation of decomposition efficiency (A) and filtration efficiency (B) of the analyzed soil units

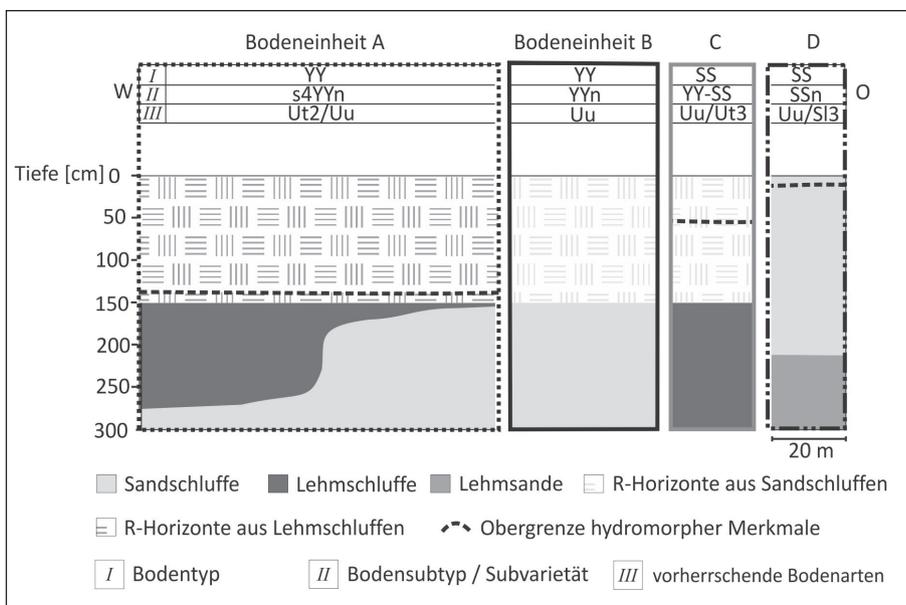


Abbildung 7: Schematische Catena eines Friedhofes auf quartären Lösssedimenten

Figure 7: Schematic catena of a cemetery on quaternary loess sediments

3.3 Beispiele für Kartierung und Bewertung

Anhand von zwei der untersuchten Friedhöfe werden im Folgenden exemplarisch Ergebnisse der Bodenkartierung und die Ableitung der Verwesungs- und Filterleistung von Friedhofsböden gezeigt.

Beispiel 1: Friedhof auf Lösssedimenten zwischen Rhein und Schwarzwald

Standortbeschreibung: Der ca. 3,7 ha umfassende Friedhof liegt auf 145 m ü. NN zwischen dem nördlichen 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 155 cm. Auf dem Friedhof treten vereinzelt Verwesungsstörungen auf (mündl. Mitteil. d. Friedhofsbetreibers).

Bodenkartierung: Der Friedhof wurde in vier Bodeneinheiten unterteilt (Abb. 7). 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 noch unbelegte Erweiterungsfläche (Bodeneinheit D) besteht in den oberen 80 cm aus aufgetragenem „Mutterboden“, der bei Anlage der Fläche 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.

Bewertung: Die Verwesungsleistung der Bodeneinheiten A und B wird als gering bzw. mittel, die Filterleistung in beiden Bodeneinheiten als hoch bewertet (Tab. 2). In Bodeneinheit C und D wird die Verwesungsleistung als gering bewertet, die Filterleistung in Bodeneinheit C als hoch und in Bodeneinheit D als gering.

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/Sl3	gering	gering	5

Tabelle 2: Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung eines Friedhofes auf quartären Lösssedimenten

Table 2: Evaluation of decomposition and filtration efficiency of a cemetery on quaternary loess sediments

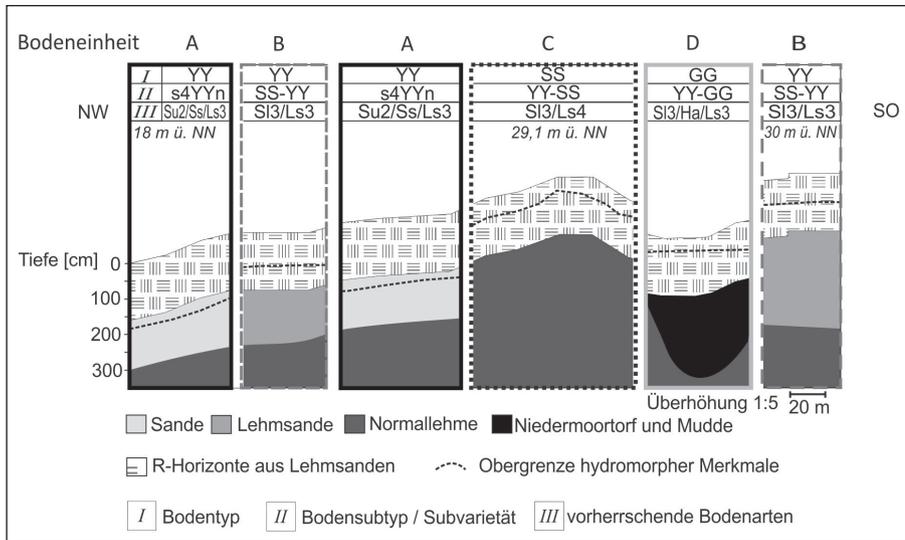


Abbildung 8: Schematische Catena eines Friedhofes in der Jungmoränenlandschaft Schleswig-Holsteins

Figure 8: Schematic catena of a cemetery in the Weichselian moraine landscape of Schleswig-Holstein

Meliorationsempfehlung: Durch eine Drainage kann die Verwesungsleistung in Bodeneinheit A auf das Niveau der Bodeneinheit B angehoben, und so auf 90 % der Fläche eine mittlere Verwesungsleistung erreicht werden. In Bodeneinheit C ist der Stauwassereinfluss stärker, auch diese Fläche könnte jedoch mittels einer Drainage verbessert werden. In Bodeneinheit D lohnt sich eine Drainage nicht, da auch die Filterleistung gering ist und es sich zudem nur um eine kleine Teilfläche handelt.

Beispiel 2: Friedhof in der Jungmoränenlandschaft Schleswig-Holsteins

Standortbeschreibung: Der 8 ha große Friedhof liegt auf 18–30 m ü. NN in der Schleswig-Holsteinischen Jungmoränenlandschaft. 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. 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 liegt auf weichseleiszeitlichen Geschiebemergeln. Das Gelände ist hügelig, in einer Senke (Toteisloch) im südöstlichen Teil des Friedhofes entstanden durch das Verlanden eines Gewässers Niedermoor- und Mudden (Abb. 8). In Bodeneinheit A und B liegen s4YYn und SS-YY vor. In Bodeneinheit C ist der Boden(sub)typ ein YY-SS. In Bodeneinheit D befinden sich die R-Horizonte im Grundwasserschwankungsbereich, Bodentyp ist hier ein YY-GG

Bewertung: Die Verwesungsleistung wird in Bodeneinheit A als mittel, und in den Bodeneinheiten B, C und D als gering bewertet (Tab. 3). 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 einhergehend gestörten Verwesung nur noch eingeschränkt für Erdbestattungen genutzt.

Meliorationsempfehlung: In Bodeneinheit A ist im Bereich der stauwasserführenden Filterschicht eine Drainage und aufgrund der relativ geringen Filterwirkung des sandigen Substrates zusätzlich eine regelmäßige Kontrolle des Drai-

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 von +1 aufgrund der Hangneigung

Tabelle 3: Bewertung der Verwesungs- und Filterleistung eines Friedhofes in der Jungmoränenlandschaft Schleswig-Holsteins

Table 3: Evaluation of decomposition and filtration efficiency of a cemetery in the Weichselian moraine landscape of Schleswig-Holstein

nagewassers zu empfehlen. In Bodeneinheit B und C kann die Verwesungsleistung durch eine Drainage verbessert werden, die Filterleistung ist hier nach Beseitigung des Stauwassereinflusses auch in Hanglage ausreichend. Bodeneinheit C wird auf diesem Friedhof aufgrund des Grundwassereinflusses nicht mehr für Erdbestattungen genutzt.

4 Diskussion

4.1 Bodeneigenschaften

Die Friedhofsnutzung führt in natürlichen Böden zu tiefgreifenden Veränderungen. 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. Innerhalb eines Friedhofsareals können dennoch, 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 zur gesamthaften Erfassung eines Friedhofsareals unumgänglich. Aufbauend auf der bodenkundlichen Klassifikation kann dann eine differenzierte Bewertung von Teilflächen im Hinblick auf ihre Eignung für die Erdbestattung vorgenommen werden.

Die untersuchten Friedhofsböden erwiesen sich als tief humos. 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 bzw. schwach humos einzustufen (Deckschichten: 2,11 % Humus, Sargbereiche: 1,09 % Humus). BLUME (1982), AEY (1990), KAHLE (1996), HELMES (2004) und CHARZYNSKI (2010) ermittelten im Unterboden von Friedhöfen ähnliche Humusgehalte (0,81–2,58 %). Nach Erstbelegung stellten ALBRECHT et al. (2005) in Friedhofsböden keine Zunahme der Humusgehalte durch die Nutzung als Begräbnisstätte fest und beschreiben den untersuchten Friedhofsboden als insgesamt sehr kohlenstoff- und stickstoffarm.

Erhöhte Humusgehalte in den Deckschichten von Erdgräbern entstehen vor allem durch die wiederholte Einmi-

schung von Blumenerde und aufgefülltem humosen Oberboden bei Neuebelegung der Grabstellen. Der Einfluss der torfhaltigen Blumenerde spiegelt sich auch in der geringen Humusqualität im Oberboden der untersuchten Böden wider.

4.2 Bewertung

Auf 67 % der untersuchten Bodeneinheiten wurde die Verwesungsleistung als gering bewertet. Laut Umfragen von SCHMIDT (2002) und PAGELS et al. (2004) sind jedoch nur ca. ein Drittel der deutschen Friedhöfe von Verwesungsstörungen betroffen. Die Ursache für diese scheinbare Diskrepanz ist die gezielte Vorauswahl der untersuchten Friedhöfe. In zwei Drittel der untersuchten Bodeneinheiten war das Auftreten von Verwesungsstörungen im Vorfeld bekannt. Für die untersuchten Friedhöfe gilt, dass eine zu geringe Durchlüftung des Bodens und damit einhergehende Verwesungsstörungen weniger auf eine zu geringe LK des Bodens, sondern in den meisten Fällen auf freies Wasser (vor allem aufgestautes Sickerwasser) im Grabraum zurückzuführen sind. Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass die Verwesungsleistung durch die Beseitigung des freien Wassers im Grabraum (Drainage) deutlich verbessert werden könnte. Das Auftreten von Stauwasser in Erdgräbern wird durch eine infolge der Lockerung veränderte Porenkontinuität im Bereich der Deckschichten (ZIMMERMANN, 2012), die Ausbildung von Schleifschichten an Grabwänden und Grabsohle im Zuge der Grabarbeiten (WILLIMANN, 1996) sowie eine durch die Grabpflege unter Umständen deutlich gesteigerte Wasserzufuhr (WOURTSAKIS, 2002; WEINZIERL & WALDMANN, 2002; BLUME, 1996) begünstigt.

Neben der Beseitigung von Grund- oder Stauwassereinflüssen kann die Verwesungsleistung eines Friedhofsbodens durch weitere Maßnahmen verbessert werden. Hierzu zählen der Verzicht auf luftundurchlässige Grababdeckungen, die Unterlassung von zusätzlicher Bewässerung, eine Verringerung der Bestattungstiefe auf ca. 100–120 cm (WILLIMANN, 1996) und der Verzicht auf Doppelbelegungen und Tiefgräber. Der Gasaustausch im Erdgrab kann zudem durch Beisetzungen in ausreichend mächtigen Aufschüttungen aus geeigneten Substraten sowie (bei tonhaltigen Böden) die strukturverbessernde Einmischung von Branntkalk in den Bodenaushub verbessert werden. Neben den genannten Maßnahmen kann auf eine Reihe von technischen Lösungen zur Verbesserung der Verwesungsleistung

zurückgegriffen werden (Grabhüllen, Grabkammern etc.), auf die hier nicht im Einzelnen eingegangen werden soll. Eine umfangreiche Übersicht über die angebotenen Systeme liefert FAIDT (2009).

Ordnungsgemäß angelegte Friedhöfe stellen nach WILLIMANN (1996), ÜÇİSİK & RUSHBROOK (1998) und URBAN (2002a, 2002b) keine gesundheitliche Gefährdung für die Umwelt dar. Um die Gefahr von Grundwasserkontaminationen durch Abbauprodukte aus dem Grabbereich einschätzen zu können, sollte dennoch auch die Filterleistung des Bodens unterhalb der Grabsohle bei der Bewertung eines Friedhofsbodens Beachtung finden. In Erdgräbern kann es im Zuge des Abbaus von Sarg und Leichnam zur Freisetzung und Anreicherung von Schwermetallen kommen (HELMES, 2004; URBAN, 2002b; SPONGBERG & BECKS, 2000; FIEDLER et al., 2012). Bei niedrigen pH-Werten sind die freigesetzten Schwermetalle mobil und können mit dem Sickerwasser ins Grundwasser verlagert werden. In 30 % der untersuchten Bodeneinheiten wurden im Bereich der Filterschichten schwach bis stark saure pH-Werte festgestellt, sodass hier mindestens eine potentielle Gefährdung des Grundwassers durch mobil werdende Schwermetalle besteht. Vor allem bei direktem Kontakt der Grabsohle mit wasserführenden Bodenhorizonten oder sehr durchlässigen Substraten, in denen hohe Fließgeschwindigkeiten des Sickerwassers auftreten, besteht die Gefahr von unerwünschten Stoffeinträgen in das Grundwasser, da die natürliche Filterwirkung des Bodens außer Kraft gesetzt wird. Auf den untersuchten Friedhöfen wurde die Filterleistung anhand dieser Kriterien in 51 % der Bodeneinheiten als sehr gering eingestuft.

5 Schlussfolgerung

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.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die Finanzierung sowie dem Projektpartner

Cemterra GmbH und dem projektbegleitenden Beirat für die fachliche Unterstützung des Forschungsprojekts.

Literatur

- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Auflage. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung.
- AEY, W. (1990): Historisch-Ökologische Untersuchungen an Stadttökotypen Lübecks. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Geobotanik Schleswig-Holstein 41.
- AKS (1996): Kartieranleitung für Stadtböden 3. Entwurf.
- ALBRECHT, M.C., H.C. FRÜND & A. WESTPHAL (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. & T. SCHULZE-WOLF (1996): Die Bodenkundliche Untersuchung von Friedhofsflächen. DFK 8.
- BAATH, E. & T.H. ANDERSON (2003): Comparison of soil fungal/bacterial ratios in a pH gradient using physiological and PLFA-based techniques. *Soil Biology & Biochemistry* 35 (7): 955–963.
- BLUME, H.P. (1996): Böden städtisch-industrieller Verdichtungsräume. In: BLUME, H.P., W.R. FISCHER, H.G. FREDE, R. HORN & K. STAHR: *Handbuch der Bodenkunde*. Landsberg: ecomed.
- BLUME, H.P. (1982): Böden des Verdichtungsraumes Berlin. Mitteilungen der DBG 33.
- BOSCH, M. (1983): Einfluss langjähriger Düngung mit verschiedenen N-Formen auf pH-Wert, Humusfraktionen, biologische Aktivität und Stickstoffdynamik einer Ackerbraunerde. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 146.
- BÜCHI, H. & I. WILLIMANN (2002): Verdachtsfläche Friedhof: Umweltgefährdung durch Leichenzersetzung? *Wasser und Boden* 54 (11): 20–24.
- CHARZYNSKI, P., R. BEDNAREK & B. ZOLNOWSKA (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.
- DIN 19732: Bestimmung des standörtlichen Verlagerungspotentials von nichtsorbiebaren Stoffen, Gremium NA 119-01-02-03 UA „Standortbeurteilung“ im DIN.

- FAIDT, L. (2009): Erdbestattung und Grabkammersysteme. Einfluss auf den Wasser- und Bodenhaushalt von Friedhöfen, 150. Düsseldorf: Fachverlag des Deutschen Bestattungsgewerbes.
- FIEDLER, S., J. BREUER, C.M. PUSCH, S. HOLLEY, J. WAHL, J. INGWERSEN & M. GRAW (2012): Graveyards – Special landfills. *Science of the Total Environment* 419: 90–97.
- FIEDLER, S., K. SCHNECKENBERGER & M. GRAW (2004): Characterization of soils containing adipocere. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 47 (4): 561–568.
- FIEDLER, S., K. SCHNECKENBERGER, M. GRAW, F. SCHWEINBERG & K. STAHR (2002): Bildung so genannter Fettwachsleichen in redoximorphen Nekrosolen – Beispiel St. Georgen. *Wasser und Boden* 54 (11).
- FLEIGE, H., R. HORN, H.P. BLUME & H. WETZEL (2002): Bodenkundliches Bewertungsverfahren zur Bestimmung des Eignungsgrades von Friedhöfen. *Wasser und Boden* 54 (11): 31–39.
- FORBES, S.L., B.B. DENT & B.H. STUART (2005): The effect of soil type on adipocere formation. *Forensic Science International* 154 (1): 35–43.
- GRENZIUS, R. (1987): Die Böden Berlins (West), Klassifizierung, Vergesellschaftung, ökologische Eigenschaften. Dissertation, Fachbereich 14 Landschaftsentwicklung, Technische Universität Berlin.
- HELMES, T. (2004): Urbane Böden – Genese, Eigenschaften und räumliche Verteilungsmuster. Eine Untersuchung im Stadtgebiet Saarbrücken. Dissertation, Philosophische Fakultäten der Universität des Saarlandes, Saarbrücken.
- HERBERHOLD, R. (1973): 4107 Borken. In: *Bodenkarte Nordrhein-Westfalen 1:25000*.
- KAHLE, P. & E. COBURGER (1996): Eigenschaften von Böden unterschiedlicher Nutzung im Stadtgebiet von Rostock. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 159:637–642.
- KASIELKE, T. & C. BUCH (2011): Urbane Böden im Ruhrgebiet. In *Online-Veröffentlichungen Bochumer Botanischer Verein*. Bochum.
- KELLER, G. (1966): Über die Eignung nordwestdeutscher Böden für die Erdbestattung. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* (115):606–616.
- MCGILL, R., J.W. TUKEY & W.A. LARSEN (1978): Variations of Box Plots. *American Statistician* 32 (1): 12–16.
- 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., N. TAWA & K. SAITO (1961): Chemical Studies on adipocere formation. Re-evaluation of the saponification theory. *Japanese Journal of legal Medicine* 15:258–268.
- PAGELS, B., H. FLEIGE & R. HORN (2004): Endbericht zur Studie: Bodenbeschaffenheit und Zersetzungsproblematik auf Friedhöfen: Zentralverband deutsches Baugewerbe.
- PIETRI, J.C.A. & P.C. BROOKES (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.
- RAISSI, F. & U. MÜLLER (2008): Bodenkundliche Anforderungen an Anträge zur Erdbestattung. *GeoFakten* 4.
- RESULOVIC, H. & H. CUSTOVIC (2011): Properties of Technogenous Substrates an Assessment of their Suitability for Recultivation – Technosol Development Projection. *Agriculturae Conspectus Scientificus* 76 (1):81–86.
- RICHTER, F.H., H. FLEIGE, H.P. BLUME & R. HORN (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 für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 170 (5):682–692.
- SABEL, K.J. (Hrsg.) (2007): Bodenkundliche Anforderungen an das Anlegen und Erweitern von Friedhöfen. Vol. 8. Wiesbaden.
- SCHLICHTING, E., H.P. BLUME & K. STAHR (1995): Bodenkundliches Praktikum. Berlin: Blackwell Wissenschaft.
- SCHMIDT, M. (2009): Die Leichenlipidbildung auf Friedhöfen – Maßnahmen zur Prophylaxe und Sanierung. Dissertation, Medizinische Fakultät, Eberhard Karls Universität, Tübingen.
- SCHMIDT, M. & M. GRAW (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. Dissertation, Medizinische Fakultät, Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen-Nürnberg.
- SCHRAPS, W.G. (1972): Die Bedeutung der Filtereigenschaften des Bodens für die Anlage von Friedhöfen. *Mitteilungen der DBG* 16:225–229.
- SOBOCKA, J. (2004): Necrosol as a new anthropogenic soil type. Vortrag „Soil Anthropization VIII“, Bratislava, Slovakia.

- SPONGBERG, A.L. & P.M. BECKS (2000): Inorganic soil contamination from cemetery leachate. *Water Air and Soil Pollution* 117 (1–4):313–327.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2012): Flächennutzung 2011 [Zitiert 2012]. Deutschland. URL: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/Flaechennutzung/Tabellen/SiedlungsVerkehrsflaecheNutzung.html>.
- SUKOPP, H. & R. WITTING (1993): *Stadtökologie*. Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm: Gustav Fischer.
- TAKATORI, T. (2001): The mechanism of human adipocere formation. *Legal Medicine* 3:193–204.
- UBELAKER, D.H. & K.M. ZARENKO (2011): Adipocere: What is known after over two centuries of research. *Forensic Science International* 208 (1–3):167–172.
- ÜÇİSİK, A.S. & P. RUSHBROOK (1998): The Impact of Cemeteries on the environment and public health. Copenhagen: WHO.
- URBAN, R. (2002a): Bodenkontamination durch Leichengifte? In: EHSES, H.: *Konfliktfeld Friedhof*. Mainz: Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz.
- URBAN, R. (2002b): Umweltbelastung, Bodenkontamination und Gesundheitsgefährdung bei Erdbestattungen. *Wasser und Boden* 54 (11):25–30.
- WEINZIERL, W. & F. WALDMANN (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: PREUSSISCHES MINISTERIUM DER GEISTLICHEN, UNTERRICHTS- UND MEDIZINALANGELEGENHEITEN (Hrsg.): *Zusammenstellung der gültigen Medizinalgesetze Preußens*. Berlin.
- WILLIMANN, I. (1996): *Leichenzersetzung im Erdgrab*. Diplomarbeit, Institut für terrestrische Ökologie, ETH Zürich.
- WOURTSAKIS, A. (2002): Bodenkundliche und hydrogeologische Anforderungen für die Erdbestattung. Vortrag auf der Tagung „Konfliktfeld Friedhof“, Mainz.
- WRB, IUSS WORKING GROUP (2006): *World reference base for soil resources 2006*, F. a. A. O. o. t. U.
- ZIMMERMANN, I. (2012): Entwicklung einer umweltgerechten Erdbestattungspraxis im Hinblick auf die Folgewirkungen auf Böden, Grundwasser und Atmosphäre. Schriftenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde Nr. 97, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Anschrift der Autoren

Dr. Iris Zimmermann, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Hermann-Rodewald-Straße 2, 24118 Kiel
Dr. Heiner Fleige, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Hermann-Rodewald-Straße 2, 24118 Kiel
Prof. Dr. Dr. h.c. Rainer Horn, Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Hermann-Rodewald-Straße 2, 24118 Kiel

Eingelangt: 31. Januar 2013
 Angenommen: 20. September 2013