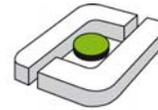




Umweltplanung & IT



Fachhochschule Osnabrück
University of Applied Sciences

Abschlussbericht zum DBU-Projekt:

„Entwicklung eines Softwaremoduls zur Prognose von Ruhezeiten für Erdbestattungen unter Berücksichtigung pedologischer, klimatischer und standortspezifischer Parameter (RuheSoft)“

Aktenzeichen: 27821-23

Projektbeginn: 03.07.2009

Projektlaufzeit: 12 Monate

Dr. Michael Albrecht

Prof. Dr. Rüdiger Anlauf

Prof. Dr. Heinz-Christian Fründ

Dipl.-Ing. (FH) Anika Meyer

Hannover und Osnabrück, den 22. Dezember 2010

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	27821-23	Referat	Fördersumme	64.841,00
----	-----------------	---------	-------------	------------------

Antragstitel **Entwicklung eines Softwaremoduls zur Prognose von Ruhezeiten für Erdbestattungen unter Berücksichtigung pedologischer, klimatischer und standortspezifischer Parameter**

Stichworte

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
12 Monate	03.07.2009		

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	entera Ingenieurgesellschaft für Planung und Informationstechnologie	Tel	0511/16789-11
	Herr Dr. Michael Albrecht	Fax	0511/16789-99
	Fischerstr. 3 30167 Hannover	Projektleitung	Dr. Michael Albrecht
		Bearbeiter	Meyer, Schmidt, Fründ, Anlauf, Blohm, Albrecht

Kooperationspartner FH Osnabrück
Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur
Prof. Dr. Rüdiger Anlauf / Herr Prof. Dr. Heinz-Christian Fründ
Postfach 1940
49009 Osnabrück

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Zur Planung und kosteneffizienten Nutzung von Friedhofsflächen ist eine konkrete Festlegung von Ruhezeiten für Erdbestattungen und eine Vermeidung von Verwesungsstörungen unabdinglich. Ziel des Projektes ist die Erarbeitung eines Softwaretools, das in Abhängigkeit klimatischer, pedologischer und standortspezifischer Einflussparameter individuelle Ruhezeiten für Friedhofsstandorte berechnet. Das Werkzeug soll zur Visualisierung der Ergebnisse an die GIS-Komponente für Friedhofsverwaltungssysteme angebunden werden. Unter Vorgabe der o.a. Einflussparameter wird vom Programm die Ruhefrist für einen Leichnam berechnet. Bestattungstechnisches Fehlverhalten sowie Veränderungen der natürlichen Abbauraten sollen im EDV-Tool nicht integriert werden, da davon ausgegangen werden kann, dass in der zukünftigen Friedhofsnutzung durch die Anwendung der Grundsätze der guten fachlichen Praxis Fehler der Vergangenheit vermieden werden.

Das Softwaretool soll so ausgelegt werden, dass es mit leicht zugänglichen und kostengünstigen Daten einsetzbar ist.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Zu Beginn erfolgt die Vereinfachung vorhandener Modellberechnungen auf die wesentlichen Parameter. Hierzu werden die pedologischen Einflussfaktoren (Textur, luftgefülltes Porenvolumen bzw. Diffusionskoeffizient) sowie deren Einfluss auf die Ruhezeit mathematisch beschrieben. Anschließend muss der Einfluss klimatischer Faktoren (Bodentemperatur, Bodenwassergehalt sowie Niederschlagsmengen und -verteilung) auf die Verwesung und damit auf die Ruhezeiten in die Berechnungen integriert werden. Des Weiteren erfolgt die Quantifizierung des Einflusses von Grabpflege und -gestaltung (Versiegelung, Vegetation, Bewässerung) auf die Verwesung und Ruhezeit. Aus den erarbeiteten mathematischen Zusammenhängen erfolgt die Programmierung einer Software-Anwendung, aufgeteilt in die Erarbeitung des Softwarekerns, die Nutzeroberfläche und die Anbindung in die GIS-Komponente.

Weiterführend soll das erarbeitete Modul anhand konkreter Friedhofssituationen bzw. anhand vorhandener Daten zu Friedhöfen überprüft werden. Anschließend erfolgen die Veröffentlichung der Projektergebnisse und die Markteinführung des Softwaremoduls.

Ergebnisse und Diskussion

Die mathematische Modellierung wurde im Rahmen einer Java-Programmierung in die Software-Anwendung RuheSoft umgesetzt, die der Bestimmung der erforderlichen Ruhefrist für die Leichenumsetzung dient.

RuheSoft kann in 2 Anwendungsformen genutzt werden:

1. RuheSoft bietet als Stand-alone-Anwendung die Möglichkeit, die Ruhefrist für eine Fläche (Friedhof oder eine Teilfläche davon) zu berechnen. Weiterhin können beliebige Variationen von Einzelparametern vorgenommen werden.
2. RuheSoft als Plugin kann für das GIS OpenJump und DGF4 (RuheSoft OpenJump) verwendet werden, um so neben der Modellierung und Ergebnisdarstellung auch eine räumliche Visualisierung der Ergebnisse zu ermöglichen.

Zu vereinfachenden Anwendung sind als Minimaldaten nur Bodeninformation (Bodenartengruppe) und Klimadaten (Klimatische Wasserbilanz) einzugeben, während andere Parameter wie Gewicht der Leiche, Gewicht des Sarges, Tiefe des Grabes, Zusatzbewässerung, Sargholz und Grababdeckung als Standardwerte vorgeschlagen werden, aber veränderbar sind.

Im Rahmen der mathematischen Modellierung stellte sich heraus, dass speziell für den Bereich Friedhof und die damit verbundene Betrachtung des Untergrundes bis in 2 m Tiefe oder in Einzelfällen sogar darüber hinaus nahezu keine bodenkundlichen Grundlagenuntersuchungen zu Fragen der Diffusion vorliegen.

Auch bei der Frage nach der biologischen Umsetzung von Sargholz im Boden liegen keine ausreichenden Untersuchungen vor, so dass hier zunächst nur mit einem kalorimetrischen Ansatz gearbeitet wird. Bei der besonderen Betrachtung von Grababdeckungen kann der Anwender zwar die Flächenabdeckung variieren, es musste hier aber mit einem vereinfachten Ansatz gearbeitet werden, weil keine experimentellen Kenntnisse über die Sauerstoffversorgung bei Grabdeckungen vorliegen.

Hierzu wäre es im Rahmen einer weitergehenden Entwicklung des Modells und einer Verfeinerung der Aussagen wünschenswert, wenn die spezielle Frage von Umsetzungsbedingungen im Untergrund bearbeitet werden könnte.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Im Rahmen verschiedener Veranstaltungen wurden Friedhofsverwaltungen über die Entwicklung und Anwendung von RuheSoft informiert:

1. Frühjahrstagung des Verbandes der Friedhofsverwalter Deutschlands-VFD in Essen (21. bis 22. 1.2010)
2. Sommer-Fortbildungsseminar des VFD am Seddiner See (16. bis 18. August)
3. Friedhofskulturelle Tagung in Bad Nauheim (10. und 11.9.2010)

Weiterhin wurde an der Akademie für öffentliches Gesundheitswesen in Düsseldorf (15.9.2010) die Software-Anwendung RuheSoft auch in der speziellen Anwendung für Aufsichts- und Genehmigungsbehörden des öffentlichen Gesundheitswesens präsentiert.

Veröffentlichungen

In Heft 10/2010 der FRIEDHOFSKULTUR erschien unter dem Titel *RuheSoft zur Ermittlung der Ruhefrist* der erste Teil eines umfassenden Fachbeitrages über RuheSoft. Der 2. Teil ist für Februar 2011 geplant. Weiterhin soll im Heft 1/2011 Der Hygieneinspektor eine umfassende Darstellung zu RuheSoft erscheinen.

Fazit

Die Anwendung RuheSoft stellt erstmals eine einfach zu bedienende Softwareanwendung dar, die es im Rahmen einer Simulation erlaubt, den Leichenabbau zeitlich dimensioniert darzustellen.

Durch die Möglichkeit der Variation einzelnen Parameter wie Gewicht der Leiche, Gewicht des Sarges, Tiefe des Grabes, Zusatzbewässerung, Sargholz und Grababdeckung können an einem Standard bei gleichbleibender Bodenart und Klimabedingungen die Auswirkungen auf den Leichenabbau simuliert werden.

Der Anwender erhält Einblick in Möglichkeiten und Grenzen, im Rahmen eines gezielten Flächenmanagement, den Verwesungsprozess zu steuern und auch die Ruhefrist zu variieren.

Für großflächige Planung kann zudem mit dem Modul RuheSoft OpenJump eine GIS-gestützte Auswertung durchgeführt werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, RuheSoft als Planungswerkzeug für die Friedhofsverwaltungssysteme HADES und FIM einzusetzen.

INHALTSVERZEICHNIS

Inhalt

1.	Problemstellung.....	1
2.	Grundlagen des Gasaustausches im Boden.....	2
2.1	Konvektion und Diffusion.....	2
2.2	Diffusionskoeffizient.....	3
2.3	Klimatische Randbedingungen und bodenhydraulische Eigenschaften.....	3
3.	Einflussfaktoren auf die Sauerstoffzehrung in (Friedhofs-) Böden.....	5
3.1	Bodentemperatur.....	5
3.2	Bodenatmung.....	7
3.3	Leichnam und Sarg.....	10
3.3.1	Leichenabbau.....	10
3.3.2	Sargabbau.....	13
4.	Berechnung der Sauerstoffdiffusion in den Boden.....	17
4.1	Luftgefülltes Porenvolumen.....	17
4.2	Klimatische Randbedingungen und bodenhydrologische Eigenschaften.....	17
4.3	Bewässerung.....	20
4.4	Sauerstoffkonzentration im Boden.....	21
4.5	Grababdeckung.....	22
4.5.1	Technische Anforderungen zur Vermeidung der Verlängerung der Verwesung durch Abdeckung.....	22
4.5.2	Wenn-Dann-Analyse von Grababdeckungen.....	25
5.	Aufbau des Softwaremoduls.....	28
5.1	Softwarekern.....	28
5.2	Programmoberfläche und GIS-Anbindung.....	30
5.3	Ergebnisbewertung.....	31
6.	Überprüfung des Moduls.....	33
7.	Szenarienrechnung.....	34
7.1	Einfluss der Bodenartenhauptgruppe.....	34
7.2	Einfluss der klimatischen Randbedingungen.....	35
7.3	Einfluss des Leichengewichtes.....	36
7.4	Einfluss des Sarggewichtes und -holzes.....	37

7.5	Einfluss der Bestattungstiefe	37
7.6	Einfluss der Bewässerung.....	38
7.7	Minimalanforderungen und Auswirkungen von Grababdeckungen	39
7.7.1	Technische Anforderungen an Grababdeckungen	40
7.7.2	Auswirkungen von Grababdeckungen auf die Verwesungszeit.....	41
8.	Grenzen der Anwendung und offene Fragen	43
9.	Umsetzung in die Praxis.....	45
9.1	Erstellung eines Handbuches.....	45
9.2	Weitere Aktivitäten (Seminare, Veröffentlichungen etc.).....	45
10.	Literaturverzeichnis.....	47
11.	Anhang	50
11.1	Anhang 1: Literaturwerte zur Bodenatmung	50
11.2	Anhang 2: mittlerer jährlicher Verlauf von Niederschlag und potentieller Evapotranspiration	53
11.3	Anhang 3: vanGenuchten-Parameter der Bodenartenhauptgruppen.....	55
11.4	Anhang 4: Interview veröffentlicht im Buxtehuder und Stader Tageblatt	57
11.5	Anhang 5: Veröffentlichung in der FRIEDHOFSKULTUR 10/2010.....	59

1. Problemstellung

In vielen Friedhofsgesetzen, -verordnungen und -satzungen werden Ruhefristen festgelegt, die eine ordnungsgemäße, sprich möglichst vollständige Verwesung eines Leichnams ohne Beeinträchtigung anderer Umweltmedien gewährleisten sollte (z. B.: §10 Abs. 1 BestG Bay, §3 Abs. 1 BestattG Saar, §22 Abs. 2 BestattG LSA, §19 BestattG SH). Hierbei wird häufig die Anforderung gestellt, dass Ruhefristen in Abhängigkeit von Standort- und bodenspezifischen Eigenschaften eines Friedhofs festgelegt werden sollen. Eine Verlängerung oder in seltenen Fällen auch eine Verringerung der Ruhefrist ist in einigen Gesetzen und Verordnungen vorgesehen (z. B.: §14 BestattG Nds, §5 BestattG Saar).

Des Weiteren treten immer wieder Fragestellungen auf, wie sich Veränderungen in der Bewirtschaftung eines Friedhofes (Bewässerung, Bestattungstiefe) oder in der Gestaltung (Grababdeckung) auf die Verwesungszeit auswirken:

Kann z. B. die Bewässerung von pflegefreien Grabstätten durch den Friedhofsträger auf einem sehr trockenen Standort negative Effekte auf die Verwesung haben? Und falls dies der Fall ist, ab welcher Bewässerungsmenge treten diese Effekte auf? Hat eine Grababdeckung aus rein bodenphysikalischer theoretischer Berechnung einen Einfluss auf die Verwesungszeit? Welche Rolle spielen hierbei die Standortbestimmenden Faktoren Boden und Klima? Und welche technischen Eigenschaften müsste eine Grababdeckung bieten, damit ein Einfluss auf die Verwesungszeit unwahrscheinlich wird?

Ziel dieses Projektes ist es daher, einen ersten Ansatz zur Prognose von Verwesungszeiten in Abhängigkeit der natürlichen Umgebungsfaktoren (Boden und Klima) zu erarbeiten. Auch sollen erste theoretische Analyse zur Auswirkung von gestalterischen und bewirtschaftungstechnischen Maßnahmen durchgeführt werden. Ergebnis des Projektes soll hierbei ein Softwaremodul sein, das diese Prognosen in Verbindung mit einer gegebenen GIS-gebundenen Friedhofsverwaltungssoftware berechnen kann.

2. Grundlagen des Gasaustausches im Boden

Im Folgenden werden die Grundlagen der Diffusion von Gasen im Boden kurz erläutert. Die Einflussparameter auf die Sauerstoffdiffusion im Boden werden vorgestellt und die klimatischen wie bodenhydraulischen Randbedingungen der Diffusion in den Boden aufgeführt.

2.1 Konvektion und Diffusion

Der Austausch von Gasen zwischen der Atmosphäre und dem Boden kann über zwei Prozesse erfolgen: Konvektion und Diffusion.

Hierbei wird Konvektion (auch Massenfluss genannt) durch Druckunterschiede aufgrund von Luftdruck- oder Temperaturunterschieden oder Windböen verursacht. Auch die Infiltration von Wasser oder Grundwasserschwankungen können solche Druckunterschiede zwischen zwei Tiefen im Bodenprofil verursachen. Gemeinhin wird der Anteil der Konvektion am Gasaustausch des Boden als eher gering eingestuft (HILLEL, 1998).

Der für den Gasaustausch wichtigere Prozess im Hinblick auf den Boden ist die Diffusion. Diese wird durch die Konzentrationsunterschiede von Gasen im Profil verursacht und kann nach Gleichung 1 berechnet werden:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_S \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \pm S(z, t) \quad \text{Gleichung 1}$$

mit c: Konzentration [$\text{m}^3 \text{ Gas m}^{-3} \text{ Luft}$]
t: Zeit [s]
 D_S : scheinbarer Diffusionskoeffizient des betreffenden Gases [$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$]
z: Tiefe [m]
S: Senken-/Quellenterm [$\text{m}^{-2} \text{ Gas s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ Luft}$]

Hierbei ist S der tiefen- und zeitabhängige Quellen- und Senkenterm, der die Bodenatmung und/oder die Verwesung umfasst. Weitere standortvariable Größe ist neben dem Quellen- und Senkenterm S der Diffusionskoeffizienten D_S . Dieser ist von der Bodenart, dem Gesamtporenvolumen, der Dichte, der Porenverteilung und dem Wassergehalt bzw. dem luftgefüllten Porenvolumen abhängig.

2.2 Diffusionskoeffizient

Bestimmt werden kann der Diffusionskoeffizient eines Bodens durch Messung nach ROLSTON (1986) oder durch Berechnung nach MOLDRUP (1997). Bei der Berechnung wird Gleichung 2 angewandt:

$$D_S = D_A \cdot 0.66 \cdot f \cdot \left(\frac{\varepsilon}{f} \right)^{\frac{12-m}{3}} \quad \text{Gleichung 2}$$

- mit D_S : scheinbarer Diffusionskoeffizient des betreffenden Gases im Boden [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
 D_A : Diffusionskoeffizient des betreffenden Gases in Luft [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
 f : Porosität [=Gesamtporenvolumen; $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]
 ε : Luftgehalt [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]
 $m=3$: ungestörtes natürliches Porensystem
 $m=6$: gestörtes Porensystem gepackter Proben

Hierbei berechnet sich das luftgefüllte Porenvolumen aus dem volumetrischen Wassergehalt nach Gleichung 3:

$$\varepsilon = \text{GPV} - \theta \quad \text{Gleichung 3}$$

- mit ε : luftgefülltes Porenvolumen [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]
GPV: Gesamtporenvolumen [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]
 θ : volumetrischer Wassergehalt [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$]

Literaturwerte für Diffusionskoeffizienten für Sauerstoff in Luft (D_A) schwanken zwischen $1,78 \cdot 10^{-5}$ und $1,98 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (LAL UND SHUKLA 2004, HILLEL 1998). Die Angaben von Diffusionskoeffizienten in Böden (D_S) schwanken je nach Bodenart, Wassergehalt, Dichte u. a. sehr stark. Daher werden hier nur einige Werte zur Orientierung angegeben: $1,36$ und $3,96 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (BERTRAND UND KOHNKE 1957), FLÜHLER (1972) maß bei einem luftgefüllten Porenvolumen von ~30 Vol% bei einer Lagerungsdichte von $1,44 \text{ g cm}^{-3}$ $5,99 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ und bei $1,66 \text{ g cm}^{-3}$ $1,98 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

2.3 Klimatische Randbedingungen und bodenhydraulische Eigenschaften

Durch den Wassergehalt eines Bodens, in Zusammenspiel von Klima und hydraulischen Eigenschaften, wird antagonistisch das luftgefüllte Porenvolumen beeinflusst (vgl. Kapitel 2.2). Daher müssen die klimatischen Randbedingungen eines Standortes zur Berechnung der Diffu-

sion berücksichtigt werden, wobei Niederschlag und potentielle Evapotranspiration die Schlüsselparameter für den Bodenwasserhaushalt sind.

3. Einflussfaktoren auf die Sauerstoffzehrung in (Friedhofs-) Böden

Der aerobe Abbau organischer Substanz im Boden wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Die wichtigsten sind Bodentemperatur, -wassergehalt, der Gehalt an organischer Substanz und die Sauerstoffkonzentration.

3.1 Bodentemperatur

Die Bodentemperatur muss als Einflussfaktor der Abbauprozesse und damit des Sauerstoffverbrauchs im Boden sowohl durch Bodenatmung als auch Verwesung in die Berechnungen eingehen.

Es stellt sich die Frage nach der Temperaturspannweite in Böden.

Hierbei muss die Tages- und Jahresvarianz unterschieden werden. Die Abb. 1 bis 3 liefern hier einen Eindruck zur Schwankungsbreite in unterschiedlichen Bodentiefen.

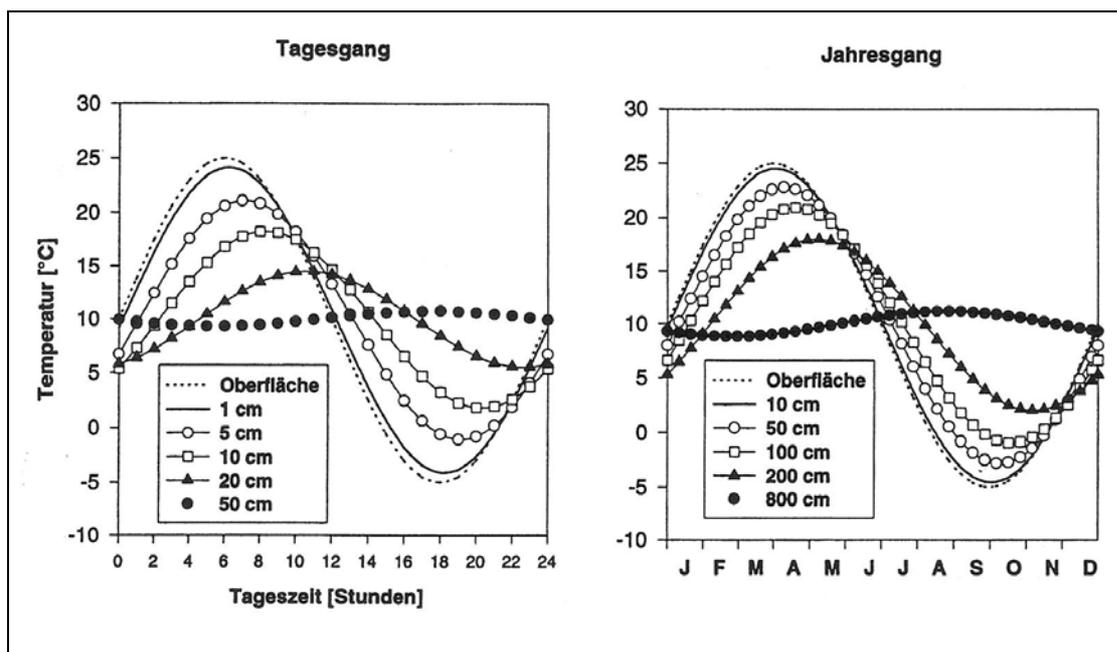


Abb. 1: Tages- und Jahresgang der Temperatur in unterschiedlichen Bodentiefen (Blume et al. 2009, berechnet für einen homogenen Boden mit konstanten thermischen Eigenschaften)

BLUME ET AL. (2009) ermittelten, dass sich die Tagesschwankungen der Bodentemperatur ab einer Tiefe von 50 cm kaum noch bemerkbar machen. Sie können für die Verwesung also vernachlässigt werden. Die Schwankungen im Jahresverlauf machen dagegen bis 200 cm eine Amplitude von ca. 2 bis 18 °C (BLUME ET AL. 2009) aus.

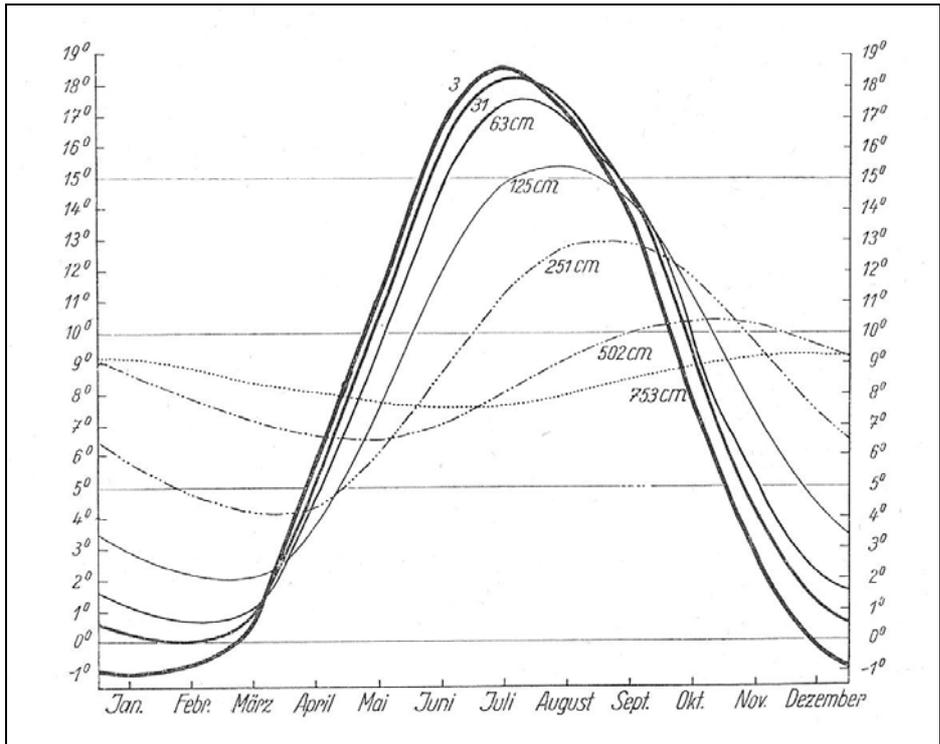


Abb. 2: Jahresgang der Bodentemperatur in unterschiedlichen Tiefen für Königsberg (Geiger 1961)

Eine ähnliche Amplitude ist nach Messung aus GEIGER (1961) aus Königsberg in 200 cm zu erwarten. Hier schwankt die Bodentemperatur in 125 cm von ca. 3 bis 16 °C und in 251 cm von ca. 6 bis 13 °C.

Die gemessene Amplitude in Quedlinburg (Abb. 3) liegt in 100 cm Bodentiefe zwischen ca. 4 bis 16 °C.

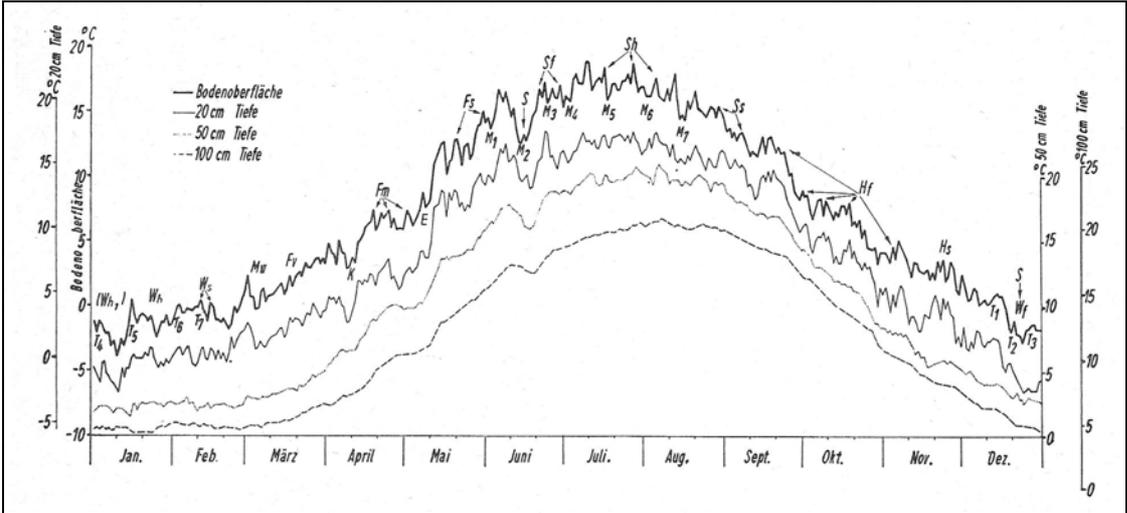


Abb. 3: Jahresgang der Bodentemperatur in unterschiedlichen Bodentiefen für Quedlinburg (Geiger 1961)

Die gemessenen Maximalwerte für 100, 125 bzw. 251 cm liegen im Juli bzw. August und die berechneten im Mai/Juni (200cm Tiefe). Die entsprechenden Minima liegen gemessen im Januar und gemessen im Oktober.

Mit der Bodentiefe nimmt die jährliche Temperaturamplitude also ab. In 10 cm Bodentiefe ist diese unwesentlich geringer als die Oberflächentemperaturamplitude (ca. -5 bis 25°C). In 100 cm Tiefe schwankt die Bodentemperatur im Jahresverlauf noch zwischen ca. 0 bis 20°C und in 200 cm zwischen 2 und 16°C.

Da die Bodentemperatur aber in diesen Tiefen nicht konstant ist, muss sie für die Verwesung und die Bodenatmung berücksichtigt werden. Zwar hat die Bodentemperatur keinen direkten Einfluss auf die physikalische Sauerstoffdiffusion, jedoch sind die sauerstoff-verbrauchenden biologischen Prozesse im Boden von der Temperatur abhängig. Je niedriger die Temperatur, desto langsamer der biologische Abbau. Die Temperatur muss in den Berechnungen des Sauerstoffverbrauchs im Boden also berücksichtigt werden.

3.2 Bodenatmung

Die Bodenatmung setzt sich zusammen aus mikrobieller und Wurzelatmung. Bei diesen beiden Prozessen wird Sauerstoff verbraucht und Kohlenstoffdioxid produziert. Je höher die Bodenatmung ist, desto mehr Sauerstoff wird verbraucht, der nicht in den Unterboden diffundieren kann und somit für die Verwesung nicht zur Verfügung steht. Hier stellt sich also die Frage nach der Größenordnung der Bodenatmung unter verschiedenen Bedingungen. In Anhang 11.1 sind zur Einordnung einige Literaturdaten zur Bodenatmung aufgeführt.

HIBBARD ET AL (2005) geben für die sommergrünen Laubwälder der gemäßigtem Breiten einen Jahresmittelwert der Bodenatmung von 103,7 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹ (276,6 mg O₂ m⁻² h⁻¹) an, der zwar sehr verallgemeinert jedoch zu Orientierung der Größenordnung der Bodenatmung dienen kann.

Die maximale in der Literatur angegebene Bodenatmung beträgt 567,5 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹ (1513,3 mg O₂ m⁻² h⁻¹) nach FEHER (1934), die minimale liegt bei 5,8 mg CO₂-C m⁻² h⁻¹ (15,5 mg O₂ m⁻² h⁻¹) nach ADAM-SCHUMM (2004) (siehe Anhang 11.1).

Für die Berechnung von Verwesungszeiten ist allerdings eine Berechnung der Bodenatmung aus anderen Standortfaktoren praktischer als eine Messung der Bodenatmung am Standort, da diese sehr zeit- und kostenintensiv ist:

Eine Möglichkeit zur Berechnung der Bodenatmung aus Umgebungsfaktoren ist die Abschätzung nach LLOYD UND TAYLOR (1994) aus der Bodentemperatur. Hierbei wird aus der Bodenatmung bei 10°C (R_{10}) die Bodenatmung bei jeder anderen Bodentemperatur nach Gleichung 4 berechnet:

$$R = R_{10} e^{E_0 \left(\frac{1}{283.15 - T_0} - \frac{1}{T - T_0} \right)} = R_{10} e^{308.56 \left(\frac{1}{56.02} - \frac{1}{T - 227.13} \right)}$$

Gleichung 4

mit R: Bodenatmung gemessen bei T [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
 R_{10} : Bodenatmung bei 10°C [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
 E_0 : Konstante [hier: 308,56 K]
T: Temperatur [K]
 T_0 : Konstante Temperatur [hier: 227,13 K]

Je nach R_{10} -Respiration ergeben sich unterschiedliche Temperaturabhängigkeiten. In Tab. 1 sind einige R_{10} -Literaturwerte und die sich ergebende Temperaturabhängigkeit der Respiration aufgeführt.

Tab. 1: Berechnung der Bodenatmung aus R_{10} -Literaturwerten

T	T	R10	R	R	Bemerkung
°C	K	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\text{mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	
0	273	1.16	0.35	40.53	Mittelwert nach Beyer (1991) <i>Acker</i>
5	278	1.16	0.68	78.18	
10	283	1.16	1.16	134.13	
15	288	1.16	1.83	210.64	
20	293	1.16	2.68	308.94	
25	298	1.16	3.73	429.31	
0	273	6.45	1.95	224.53	Jahresdurchschnitt (~10°C) Sopron nach Feher (1934) <i>Wald</i>
5	278	6.45	3.76	433.15	
10	283	6.45	6.45	743.13	
15	288	6.45	10.13	1167.02	
20	293	6.45	14.86	1711.58	
25	298	6.45	20.65	2378.48	
0	273	2.40	0.73	83.55	Jahresdurchschnitt der gemäßigten Breiten für sommergrüne <i>Laubwälder</i> nach Hibbard (2005)
5	278	2.40	1.40	161.18	
10	283	2.40	2.40	276.53	
15	288	2.40	3.77	434.27	

20	293	2.40	5.53	636.91	Mittelwert Kolluvisol OHG (Oberweiler) aus Min und Max nach Adam-Schumm (1994) <i>Grünland</i>
25	298	2.40	7.68	885.08	
0	273	5.27	1.59	183.38	
5	278	5.27	3.07	353.76	
10	283	5.27	5.27	606.93	
15	288	5.27	8.27	953.13	
20	293	5.27	12.13	1397.89	
25	298	5.27	16.86	1942.56	

Die Respirationswerte (Tab. 1) berechnet aus Literaturdaten nach LLOYD UND TAYLOR (1997) schwanken zwischen 40,5...224,5 mg O₂ m⁻² h⁻¹ bei 0°C und zwischen 429,3...2378,5 mg O₂ m⁻² h⁻¹.

Nach Ergebnissen von FANG UND MONCRIEFF (2005) wurde ermittelt, dass auf 0-10 cm ~60% der Bodenatmung entfallen, auf 10-20 cm ~25% und auf 20-30 cm ~15%. Entsprechend diesen Werten ergeben sich folgende Verteilungen für die maximale, minimale, mittlere und mediane Respiration über 30 cm Tiefen (vgl. Tab. 2):

Tab. 2: Aus Tab. 1 berechnete Tiefenverteilung der Respiration für Überprüfung des Einflusses der Bodenatmung im Modell

	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm	Summe
	mg O ₂ m ⁻² h ⁻¹ cm ⁻¹	mg O ₂ m ⁻² h ⁻¹ cm ⁻¹	mg O ₂ m ⁻² h ⁻¹ cm ⁻¹	mg O ₂ m ⁻² h ⁻¹ cm ⁻¹
arithmetisches Mittel	13.15	5.48	3.29	21.91
Median	8.62	3.59	2.16	14.37
Minimum	0.81	0.34	0.20	1.35
Maximum	47.57	19.82	11.89	79.28

Die Respirationdaten aus Tab. 2 wurden beispielhaft für verschiedene Bodenarten im Modell verwendet, um den Einfluss der Bodenatmung auf die Verwesungszeit zu prüfen. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tab. 3 aufgeführt.

Tab. 3: Verwesungsdauern bei minimaler und maximaler Respiration (vgl. Tab. 2) mit KWBa 3, einem 70 kg Leichnam und ohne Sarg und Bewässerung

KWBa	Bodenarten- hauptgruppe	Verwesungsdauer (Jahre) bei R = Minimum	Verwesungsdauer (Jahre) bei R = Maximum	Spannweite
3	Reinsande (ss)	3,8	3,8	0
3	Lehmsande (ls)	4,6	4,6	0
3	Schluffsannde (us)	5,4	5,5	0,1

3	Sandlehme (sl)	17,5	18,3	0,8
3	Lehme (ll)	9,2	9,5	0,3
3	Tonlehme (tl)	9,2	10,0	0,8
3	Sandschluffe (su)	7,0	7,2	0,2
3	Lehmschluffe (lu)	7,0	7,2	0,2
3	Tonschluffe (tu)	7,1	7,3	0,2
3	Schlufftone (ut)	13,6	14,3	0,6
3	Lehmtone (lt)	277,4	347,9	70,5

Hier wird deutlich, dass die Respiration nur in wenigen Fällen einen starken Einfluss auf die Verwesungsdauer hat. Die Spannweite der Verwesungsdauer beträgt nur in einem Fall >1 Jahr. In diesem Fall handelt es sich jedoch um die Bodenartenhauptgruppe der Lehmtone, bei der die Verwesungsdauer im Minimum >100 Jahre ist. Daher kann die mögliche Variabilität der Bodenatmung im Modell vernachlässigt werden.

Für das Modell wird also die mittlere Respiration der oben angegebenen Literaturwerte gewählt und in 0-10 cm mit $13,15 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ cm}^{-1}$, in 10-20 cm mit $5,48 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ und in 20-30 cm mit $3,29 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ Sauerstoffverbrauch festgesetzt.

3.3 Leichnam und Sarg

Der Abbau organischer Substanz ist v. a. von der Temperatur abhängig (CARTER & TIBBETT 2006, BEKKU ET AL. 2003). Somit wird auch der Abbau eines Leichnams und des Sarges maßgeblich von der Umgebungstemperatur beeinflusst.

3.3.1 Leichenabbau

TIBBETT & CARTER (2008) beschreiben die Dauer des Leichenabbaus aus forensischen Untersuchungen durch accumulated degree days (ADDs). Die ADDs dienen der Kompensation von Temperaturunterschieden während eines Verwesungsprozesses, so dass verschiedene Verwesungsprozesse vergleichbar werden. ADD entspricht der Summe der Tagesmitteltemperatur während eines Verwesungsprozesses. Hierbei gilt, dass ein 68 kg Mensch nach 1285 ADDs bis auf einen Rest von 5 Gew% abgebaut sei. Nach Gleichung 5 beträgt die Verwesungsdauer eines 68 kg schweren Leichnams bis zu einer Restmasse von 5 Gew.% bei einer Durchschnittstemperatur von 20 °C ca. 64 Tage, bei 2 °C ca. 1,8 Jahre.

$$t_{\text{Verwesung}} = \frac{ADD}{T}$$

Gleichung 5

mit $t_{\text{Verwesung}}$: Verwesungszeit [d]
 ADD: accumulated degree days [°C] (1285 bis zu einer Restmasse von 5 Gew%)
 T: Temperatur [°C d⁻¹]

Nach RODRIGUEZ (1997) verlangsamt sich bei einer Erdbestattung dieser Prozess um den Faktor 8. Aus diesen Annahmen nach TIBBETT UND CARTER (2008) resultiert die temperaturabhängige maximale Abbaurrate in Tab. 4.

Tab. 4: Temperaturabhängigkeit der maximalen Abbaurrate (berechnet aus TIBBETT UND CARTER, 2008)

T	Dauer	Abbaurrate	max. Abbau
°C	Tage	mg O₂ d⁻¹	mg O₂ m⁻² Sarg h⁻¹ cm⁻¹
20	514	92298	64.1
19	541	87676	60.9
18	571	83070	57.7
17	605	78454	54.5
16	643	73839	51.3
15	685	69227	48.1
14	734	64608	44.9
13	791	59992	41.7
12	857	55377	38.5
11	935	50767	35.3
10	1028	46149	32.0
9	1142	41535	28.8
8	1285	36919	25.6
7	1469	32304	22.4
6	1713	27690	19.2
5	2056	23075	16.0
4	2570	18460	12.8
3	3427	13845	9.6
2	5140	9230	6.4

Daraus ergibt sich die Verteilung des maximalen Abbaus im Jahresverlauf entsprechend Tab. 5 mit Temperaturwerten in 200 cm Bodentiefe aus BLUME ET AL. (2009).

Tab. 5: Jahresverlauf der maximalen Abbaurrate in einem Grab bei 200 cm Bodentiefe

Monat	T in 200 cm Tiefe	max. Abbau
	°C	mg O₂ m⁻² Sarg h⁻¹ cm⁻¹
Jan	5	16.0
Feb	9	28.8
Mar	13	41.7
Apr	15	48.1
May	16	51.3
Jun	15	48.1
Jul	13	41.7
Aug	10	32.0
Sep	7	22.4
Oct	4	12.8

Nov	2	6.4
Dec	4	12.8

Die Umrechnung des Abbaus von Leichengewicht in den Sauerstoffbedarf in kg erfolgt mittels indirekter Kalorimetrie:

Hierbei dient der Sauerstoffverbrauch, der zum Umsatz von je 1 g Kohlenhydrat, Proteine oder Fett notwendig ist (vgl. Tab. 6), als Grundlage.

Tab. 6: Indirekte Kalorimetrie (verändert nach MÜLLER & FRINGS 2007)

oxidierte Substanz	O ₂ -Verbrauch in L g ⁻¹	mittlerer Nährwert in kJ g ⁻¹
1 g Kohlenhydrat	0,83	17
1 g Fett	2,01	40
1 g Protein	0,96	19

Da Wasser und Mineralstoffe nicht zur Energiegewinnung der Mikroorganismen beim Abbau organischer Substanz beitragen, werden sie bei der Berechnung des O₂-Bedarfs nicht berücksichtigt. Die prozentuale Verteilung von Wasser, Mineralstoffe, Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen in einem Leichnam (Tab. 7) ergibt sich als Mittelwert aus Daten von SCHLIEPER (1992) und BIESALSKI et al. (1995):

Tab. 7: prozentuale Zusammensetzung eines menschlichen Körpers (Mittelwerte aus SCHLIEPER (1992) und BIESALSKI et al. (1995))

	%
Kohlenhydrate	0,8
Fette	14,5
Proteine	17,5
Mineralstoffe	4,7
Wasser	62,5
SUMME	100,0

Der Sauerstoffbedarf pro kg Leichnam ergibt sich wie folgt:

1 kg Leichnam besteht aus den energiegewinnungsrelevanten Bestandteilen von 8g Kohlenhydraten, 145 g Fetten und 175 g Proteinen. Daraus ergibt sich durch Multiplikation mit dem Sauerstoffverbrauch in L g⁻¹ nach Tab. 6 ein Sauerstoffverbrauch von ca. 7 L für die enthaltenen Kohlenhydrate, ca. 292 L für die Fette und ca. 168 L für die Proteine. In der Summe werden pro kg Leichnam also 467 L O₂ benötigt, das entspricht 667 g O₂ also 0,67 kg O₂.

Je nach Gewicht des Leichnams schwanken hierbei der Sauerstoffbedarf und die Abbaurrate. Abb. 4 zeigt hier den Zusammenhang zwischen Leichengewicht und Abbaurrate bei 16°C.

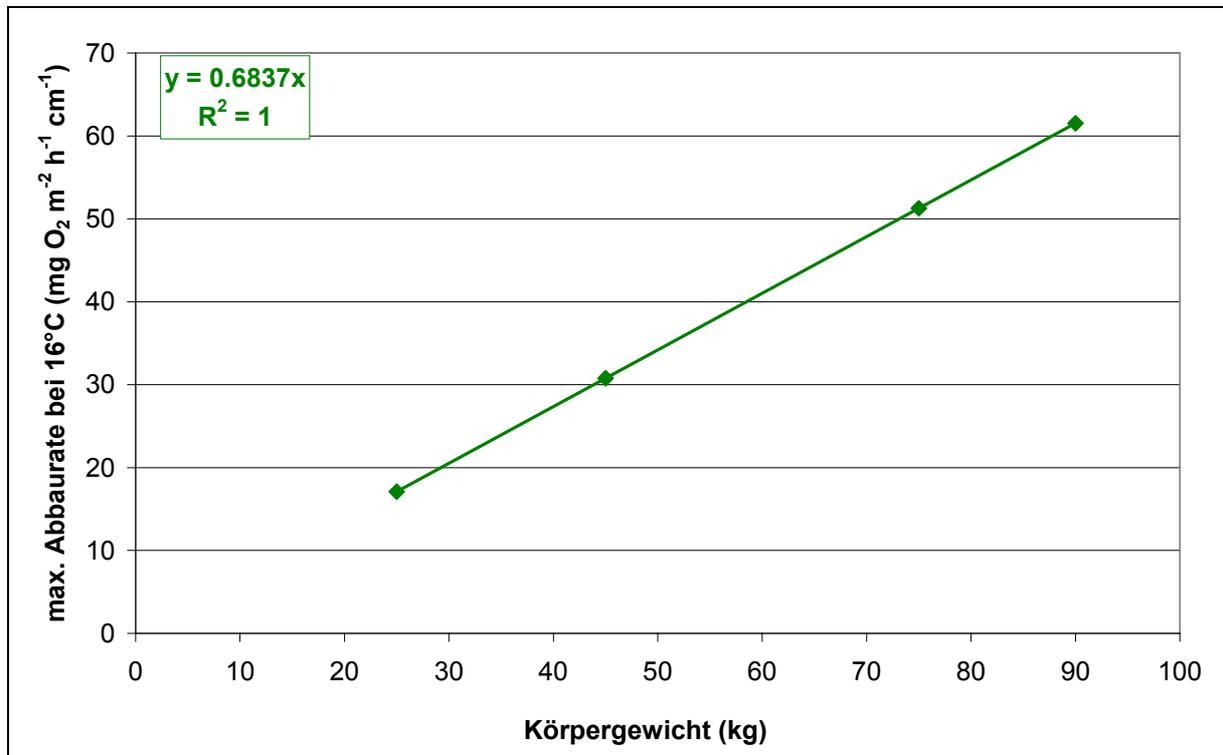


Abb. 4: Abhängigkeit der Abbaurrate eines Leichnams in Abhängigkeit vom Gewicht des Leichnams (EIGENE DARSTELLUNG)

3.3.2 Sargabbau

Der Abbau eines Sarges ist in der Literatur bisher nicht dokumentiert. Da jedoch die meisten Bestattungsgesetze und -verordnungen der Bundesländer (z. B. § 11 BestattG Nds 2005, §39 BestattG BW) Holzsärge für Erdbestattungen vorschreiben, kann aus gemessenen Abbauraten, relativem Abbau und Dauerhaftigkeitsklassifizierungen von Holz eine Abbaurrate für Särge abgeschätzt werden: SWIFT ET AL. (1979) fanden z. B. einen mittleren Masseverlust für verschiedene *Pinus*-Arten von 13,43 % in 12 Wochen. In Tab. 8 sind beispielhaft Masseverluste verschiedener Hölzer, gemessen bei 20 °C an verschiedenen Instituten, gesammelt durch VAN ACKER ET AL. (2003), aufgeführt.

Die aufgeführten Werte ermitteln den Holzabbau im Labor durch Monokulturen holzabbauernder Pilze. Inwieweit diese Ergebnisse auf den Abbau von Holz im Erdkontakt übertragbar sind, wird immer wieder diskutiert. So finden verschiedene Quellen (AUGUSTA 2007, BRISCHKE, ROLF-KIEL 2009) einen deutlich schnelleren Abbau von Eichenholz und eine geringere Dauerhaftigkeit in Freilandversuchen mit Erdkontakt. So klassifiziert z. B. AUGUSTA (2007)

Eichenholz im Laborversuch in Dauerhaftigkeitsklasse 1-2 nach DIN EN 350-2 während im Freiland eine Einordnung in Klasse 2-3 erfolgt.

Tab. 8: Mittelwerte der Massenverluste (%) verschiedener Hölzer nach 16 Wochen durch verschiedene Pilze nach Prüfung durch verschiedene Institute nach EN 350-1 und EN113 (verändert nach VAN ACKER et al., 2003)

	Lärche	Kiefer	Fichte	Europäische Eiche	Buche
<i>Coniophora puteana</i>					
RUG	28	29	54	2	56
CTBA	24	12	40	16	49
BRE	17	34	27	-1	27
WAU	17	-	57	1	56
BFH	20	10	42	1	42
<i>Gloeophyllum trabeum</i>					
RUG	10	6	14	1	29
CTBA	15	2	33	5	34
BRE	16	15	31	-2	38
WAU	9	-	27	1	28
BFH	8	1	19	1	31
<i>Serpula lacrymans</i>					
RUG	22	20	37	1	27
BRE	30	25	47	-1	44
<i>Poria placenta</i>					
RUG	15	21	22	-	-
CTBA	13	18	18	4	18
BRE	19	24	23	-	-
WAU	12	-	27	-	-
BFH	15	19	23	-	-
<i>Coriolus versicolor</i>					
RUG	-	-	-	6	33
CTBA	3	8	9	14	26
BRE	-	-	-	1	33
WAU	-	-	-	2	32
BFH	-	-	-	5	32
<i>Pycnoporus sanguineus</i>					
BFH	-	-	-	2,2	34
<i>Alle</i>					
Mittelwert	16	16.4	30.6	2.4	35.4
Stdabw.	7.0	9.6	13.6	3.9	10.3

Institute RUG: Ghent University/ Lab. Of Wood Technology, Belgien; CTBA: Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, Bordeaux, Frankreich; BRE: Building Research Establishment Ltd, Watford, UK; WAU: Wageningen Agricultural University, Niederlande; BFH: Bundesforschungsanstalt für Frost- und Holzwirtschaft, Hamburg, Deutschland

Insgesamt erfolgt in der Literatur eine grobe Einteilung der Holzarten in drei Klassen von Hölzern beim Abbaustest mit Pilzmonokulturen nach DIN EN 350-1:

Eichenholz wird demnach langsamer als Kiefer- und Lärcheholz abgebaut und diese werden langsamer als Fichten- und Buchenholz abgebaut.

Der Abbau von Särgen wird für die genannten Hölzer in den drei Abbauklassen aus den mittleren Masseverlusten nach Tab. 8 berechnet. Die Berechnung wird mit den Laborwerten durchgeführt, da für den Abbau von Holz im Erdkontakt nicht ausreichend zuverlässige und vergleichbare Daten zur Verfügung stehen. Hierbei wird in Anlehnung an § 9 Abs. 1 der Verordnung über das Leichenwesen der Stadt Nürnberg (Quelle, Jahr) ein Gewicht der Säрге von 60 kg angenommen und die Sargmaße werden auf 200 x 65 x 65 cm³ festgesetzt. Diese Daten können als „worst case“ betrachtet werden, da bei maximalem Gewicht und maximaler Größe von der größtmöglichen Konkurrenz zwischen Sarg und Leichnam um den eindiffundierenden Sauerstoff ausgegangen werden kann.

Der Sargabbau aus den Daten der Tab. 8 wird in Anlehnung an die Berechnung des Leichenabbaus durchgeführt, wobei der Wassergehalt des Holzes zum Zeitpunkt der Bestattung mit 15 Gew. % festgesetzt wird und 100 % des Trockengewichts des Holzes als aus Kohlenhydraten bestehend angenommen werden. Der Sauerstoffbedarf wird hierbei mittels indirekter Kalorimetrie berechnet (vgl. Kapitel 3.3.1) und beträgt für das gesetzte Sarggewicht 71 kg O₂. Daraus ergibt sich der Sargabbau in Tab. 9.

Tab. 9: Maximaler Sargabbau berechnet aus Daten der Tab. 8 in drei Klassen für 20 °C

	Lärche/Kiefer	Fichte/Buche	Europäische Eiche
mg O₂ m⁻² Sarg h⁻¹ cm⁻¹	36.81	74.74	5.50

Der Abbau der Leiche liegt nach Tab. 4 für 20 °C bei 69,8 mg O₂ m⁻² h⁻¹ cm⁻¹. Damit würde der Abbau des Sarges 107 %, 53 % und 8 % vom Abbau der Leiche betragen, je nach Abbaubarkeit des Holzes.

Da jedoch wie oben erläutert Eichenholz im Erdkontakt häufig deutlich schneller abgebaut wird, wird der Abbau von Eichensärgen mit dem von Lärche und Kiefer gleichgesetzt.

Hierbei kann die Temperaturabhängigkeit des Abbaus des Sarges nach Ergebnissen von BRISCHKE & RAPP (2008) nach der van't Hoff'scher Regel angenommen werden, also analog dem Zusammenhang beim Sarg. Wie auch schon bei der Leiche variiert die Sargabbaurate mit dem Ausgangsgewicht des Sarges. Abb. 5 stellt diesen Zusammenhang dar.

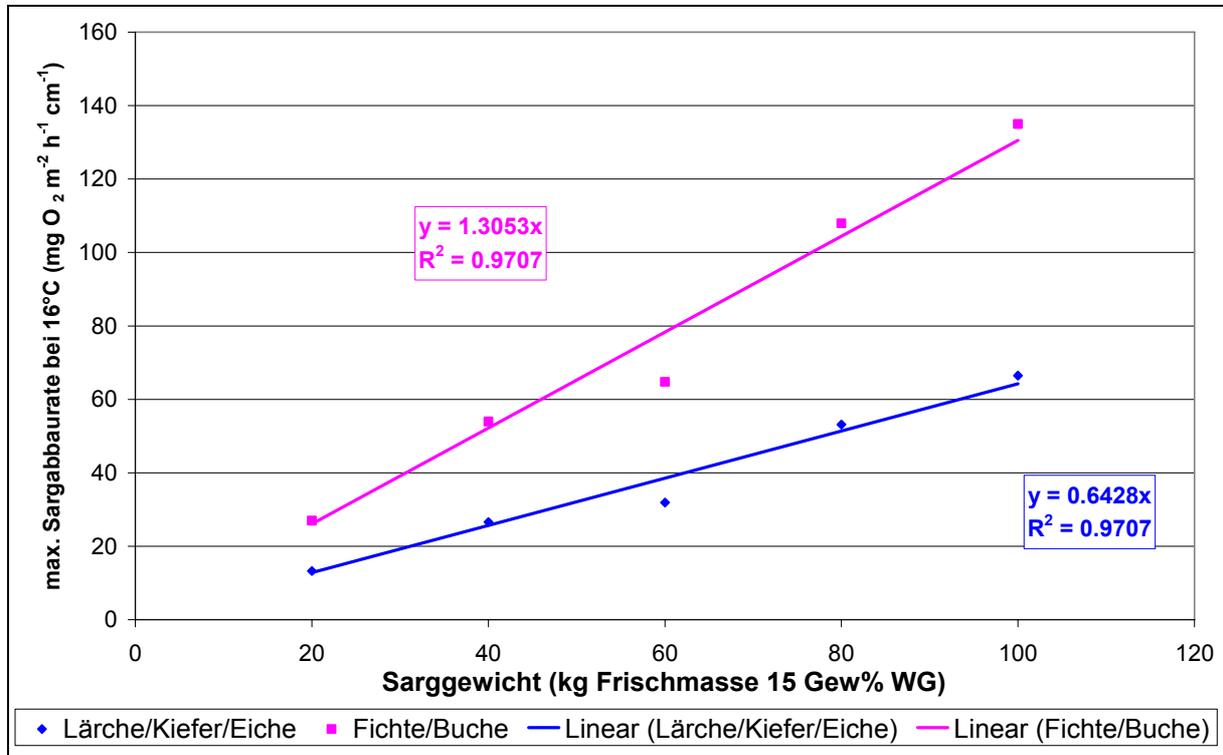


Abb. 5: Abhängigkeit der Abbaurates eines Sarges in Abhängigkeit vom Gewicht des Sarges (EIGENE DARSTELLUNG)

4. Berechnung der Sauerstoffdiffusion in den Boden

4.1 Luftgefülltes Porenvolumen

MOLDRUP ET AL. untersuchten 1997 die Einflussparameter auf die Gasdiffusion in Böden. Sie fanden einen sehr starken Zusammenhang zwischen dem luftgefüllten Porenvolumen ε und dem Diffusionskoeffizienten D_s . Berechnet werden kann nach den Ergebnissen von MOLDRUP ET AL. (1997) der Diffusionskoeffizient für Sauerstoff im Boden nach Gleichung 2 (vgl. Kapitel 3

Da der einzige variable Parameter in einem Bodenporensystem das luftgefüllte Porenvolumen ist, ist D_s direkt von diesem abhängig. Je kleiner das luftgefüllte Porenvolumen ε wird, umso geringer ist der Diffusionskoeffizient, umso weniger Gas kann in den Boden diffundiert.

ε ergibt sich hierbei aus dem Gesamtporenvolumen und dem volumetrischen Wassergehalt θ des Bodens nach Gleichung 3 (vgl. Kapitel 2.2, Seite 3).

4.2 Klimatische Randbedingungen und bodenhydrologische Eigenschaften

Für das Softwaremodul „Ruhesoft“ werden die klimatischen Randbedingungen hierbei nach AD HOC AG BODEN (2005) in sieben Klassen der mittleren jährlichen klimatischen Wasserbilanz (KWBa) aufgeteilt. Die Klasseneinteilung erfolgt nach Tab. 10.

Tab. 10: Einstufung der mittleren jährlichen klimatischen Wasserbilanz KWBa (verändert nach Ad Hoc AG Boden, 2005 Tab. 99 S.374)

KWBa in mm	Kurzzeichen	Bezeichnung
<0	KWBa0	extrem gering
0 bis <100	KWBa1	sehr gering
100 bis <200	KWBa2	gering
200 bis <300	KWBa3	mittel
300 bis <400	KWBa4	hoch
400 bis <600	KWBa5	sehr hoch
≥ 600	KWBa6	extrem hoch

Die mittlere jährliche klimatische Wasserbilanz wird aus der Differenz der mittleren Jahressummen des Niederschlags und der mittleren potentiellen Evapotranspiration eines Jahres berechnet.

Für das Modell wurden aus 80 Datensätzen (DWD 2010, FAO 2006, METEOROLOGISCHER DIENST DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK 1984, METEOROLOGISCHER DIENST DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK 1987) der langjährigen Monatsmittel des Niederschlags und der potentiellen Evapotranspiration der Stationen mittlere monatliche Verteilungen für Niederschlag und Evapotranspiration für die Klassen der KWBa berechnet. Abb. 6 zeigt die Niederschlagsverteilung und Abb. 7 die Verteilung der potentiellen Evapotranspiration für die Klassen der KWBa. Die genauen Werte sind in Anhang 11.2 zu finden.

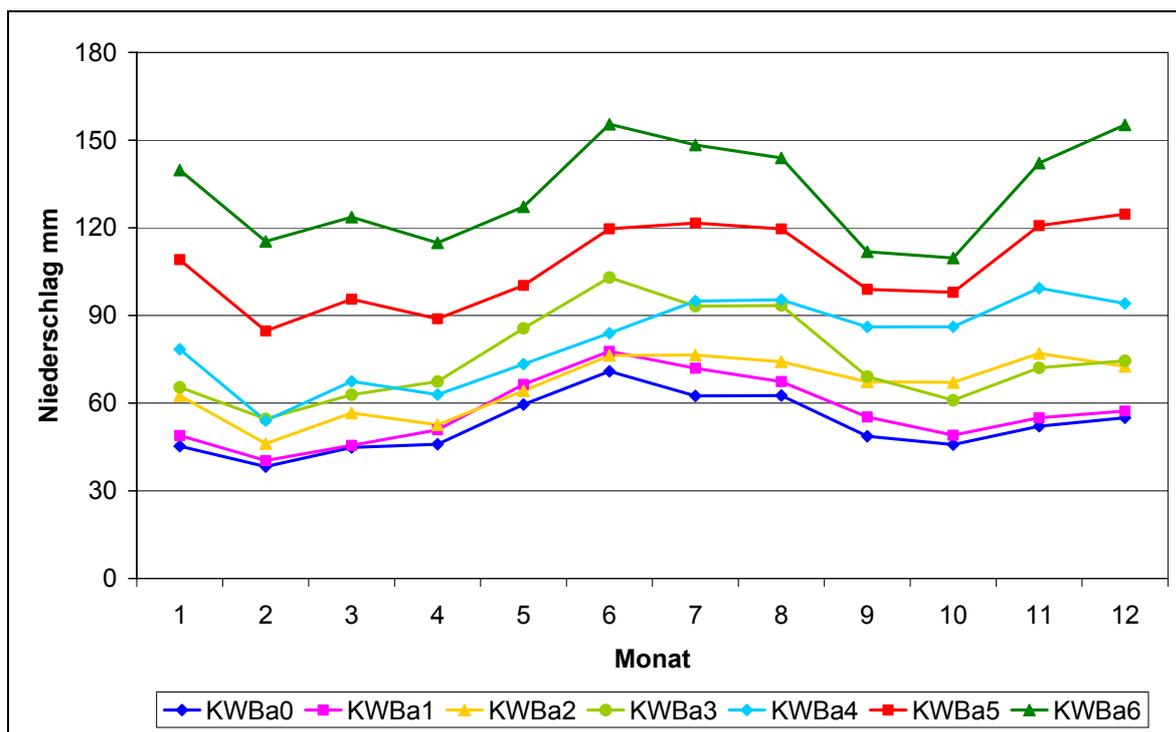


Abb. 6: mittlerer Jahresgang des Niederschlags in mm für die Klassen KWBa0 bis 6 (berechnet aus Daten nach DWD 2010, FAO 2006, METEOROLOGISCHER DIENST DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK 1984 und 1987)

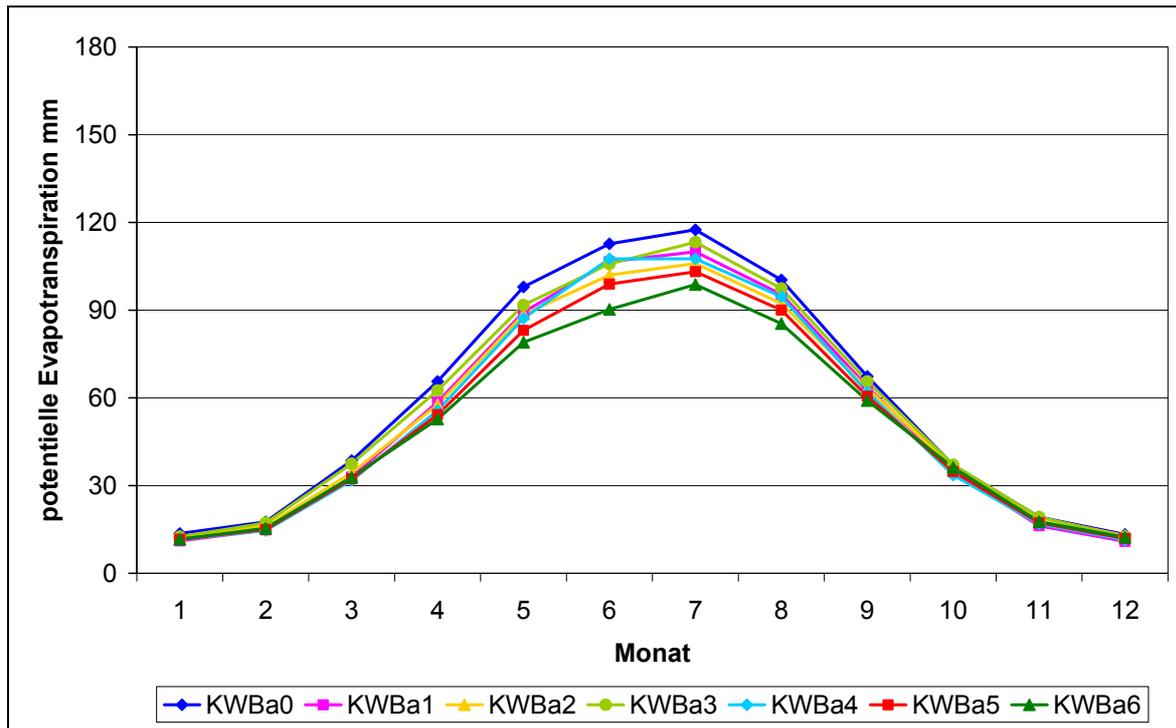


Abb. 7: mittlerer Jahresgang der potentiellen Evapotranspiration in mm für die Klassen KWBa0 bis 6 (berechnet aus Daten nach DWD 2010, FAO 2006, METEOROLOGISCHER DIENST DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK 1984 und 1987)

Da für auf die Klasse KWBa5 keine Datensätze vorhanden sind, wurden die Jahresgänge von Niederschlag und potentieller Evapotranspiration aus den Daten der KWBa4 und 6 gemittelt. Mittels der Verteilungen von Niederschlag und potentieller Evapotranspiration wurden für verschiedene Bodenarten mittels des Simulationsmodells HYDRUS 1D (QUELLE jahr) die mittleren Jahresgänge der Bodenwassergehalte berechnet. Diese werden als Eingangsparameter zur Berechnung des luftgefüllten Porenvolumens (vgl. Gleichung 3) für das Programm RuheSoft benötigt.

Für die Berechnung des mittleren Jahresverlaufs des Bodenwassergehaltes mit HYDRUS 1D werden neben den oben erläuterten klimatischen Daten bodenhydrologische Daten, d. h. die vanGenuchten-Parameter (θ_s , θ_r , α , n), benötigt. Diese beschreiben den Verlauf der Wasserspannungskurve eines Bodens nach Gleichung 6 und sind abhängig von Bodenart, Trockenrohddichte und Gehalt an organischer Substanz.

$$\theta_{\Psi} = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha \Psi|^n\right]^m} \quad \text{Gleichung 6}$$

mit θ_{Ψ} : Wassergehalt bei Matrixpotential [m^3 Wasser m^{-3} Boden]
 Ψ : Matrixpotential [hPa]

- θ_r : residualer Wassergehalt [m^3 Wasser m^{-3} Boden]
- θ_s : Sättigungswassergehalt [m^3 Wasser m^{-3} Boden] = Gesamtporenvolumen
- α : Parameter, der die Form der Funktion bestimmt [-]
- n : Parameter, der die Form der Funktion bestimmt [-]
- m : $1 - \frac{1}{n}$; Parameter, der die Form der Funktion bestimmt [-]

Für das Modell wurden nicht die Bodenarten sondern die Bodenartenhauptgruppen nach AD HOC AG BODEN (2005, Tab. 30 S. 144ff) als Berechnungsgrundlage gewählt. Die vanGenuchten-Parameter können dann aus Daten zur Wasserspannungskurve nach AD HOC AG BODEN (2005, Tab. 70, 711 72 S. 344ff) als Mittelwerte aus den Bodenarten für die Bodenartenhauptgruppen parametrisiert werden.

Für das Programm wurde ein Standardprofil für Friedhöfe erarbeitet: Aus allen Profildaten nach ALBRECHT (2008) wurden Mittelwerte für die Parameter Trockenrohdichte und Humusgehalt in Tiefenschritten von 10 cm berechnet. Anschließend wurden Tiefenschritte mit gleichen Eigenschaften zu Materialien zusammengefasst. Daraus ergab sich das Standardprofil nach Tab. 11:

Tab. 11: Standardprofil berechnet aus Daten von ALBRECHT (2008) mit h = Humusklasse und Ld = Trockendichteklasse nach AD HOC AG BODEN (2005)

Material	Tiefe (cm)	h	Ld
1	bis 10	4	2
2	bis 30	3	2
3	bis 50	2	3
4	bis 140	1	3
5	bis 300	0	3

Anschließend wurden mit diesen Vorgaben für alle Bodenartenhauptgruppen mittlere Wasserspannungskurven und die zugehörigen vanGenuchten-Parameter berechnet (vgl. Anhang 11.3). Diese Daten gehen in die Berechnung der jährlichen Wassergehaltsverläufe mittels HYDRUS 1D als Eingangsdaten für die jeweilige Bodenartenhauptgruppe ein.

4.3 Bewässerung

Wie in Kapitel 2.2 gezeigt, hängt das luftgefüllte Porenvolumen ε und damit der Diffusionskoeffizient D_s direkt vom volumetrischen Wassergehalt θ eines Boden ab (vgl. Gleichung 1 und 3). Wird eine Grab, ein Boden, also bewässert, verringert sich sein luftgefülltes Porenvolumen und damit nimmt die Diffusion von Gasen in den Boden ab. Im Fall eines Grabes be-

deutet dies, dass weniger Sauerstoff in den Boden nachgeliefert wird und damit die Verwesung verlangsamt wird.

Entscheidend ist hierbei die Frage, wie groß die Menge an zugegebenem Wasser in welchen Zeitraum ist. Da hierzu keine direkten Messungen vorhanden sind, müssen Schätzungen durchgeführt werden. Hierbei wurden zwei Herangehensweisen gewählt:

Zum einen wurden in der Literatur verschiedene Angaben recherchiert. So legt VIEHWEG (1995) 15-25 l je Gießgang und Grab zugrunde. Er nimmt weiter 15 Gießgängen im Jahr an, so dass sich 225-375 l je Grab ergeben, was bei 2 m² Grab 113-188 l m⁻² im Sommerhalbjahr entspricht. In anderen Quellen (SYNCO GMBH SYNERGIE CONSULTING 2007) lassen sich Angaben von 900 l m⁻² im Sommerhalbjahr finden. WOURTZAKIS (2002) fand Angaben von 50, 100, 500 bis 1000 l m⁻² a⁻¹ für die Bewässerung von Gräbern im Sommerhalbjahr. Aus einem Energiekonzept-Gutachten für den Hauptfriedhof der Stadt Frankfurt am Main (EBERT-INGENIEURE MÜNCHEN 2003) ergibt sich eine Bewässerungsmenge von 290 l m⁻² a⁻¹.

Zum anderen stellte die Abteilung Friedhöfe und Bestattung des OsnabrückerServiceBetriebs der Stadt Osnabrück Daten zur Verfügung, die den Wasserverbrauch eines Friedhofes der Stadt in den Jahren 2008 und 2009 wiedergeben (GÜSE 2010). Aus den Daten ergeben sich Bewässerungsmengen von 74 bzw. 100 l m⁻² a⁻¹. Da davon auszugehen ist, dass auch Laien nicht im Winter bewässern, werden diese Daten auf das Sommerhalbjahr (April – September) bezogen, womit sich im Mittel 87 l m⁻² ½ a⁻¹, also 0,048 cm d⁻¹, Bewässerungswasser ergeben. Unter der Annahme, dass nur jedes dritte Grab bewässert wird, ergäbe sich eine Bewässerungsmenge von 261 l m⁻² ½ a⁻¹, also 0,14 cm d⁻¹. Die Bewässerung erfolgt in den Monaten April bis September zusätzlich zum Niederschlag (vgl. Kapitel 2.3).

Im Modell wurden drei Bewässerungsklassen gewählt:

Die erste Klasse ist ohne zusätzliche Bewässerung und daher ausschließlich von der klimatischen Wasserbilanz abhängig. Die zweite Klasse umfasst 250 mm Bewässerung zusätzlich zum Niederschlag im Sommerhalbjahr, also 1,4 mm d⁻¹ und wird als mittlere Bewässerung bezeichnet. In der dritten Klasse werden zusätzlich zum Niederschlag 1000 mm im Sommerhalbjahr bewässert, also 5,5 mm d⁻¹. Die Klasse wird als hohe Bewässerung bezeichnet.

4.4 Sauerstoffkonzentration im Boden

Zum einen ist die Sauerstoffkonzentration im Boden mitbestimmend für den diffusiven Nachstrom von Sauerstoff, da dieser vom Gradienten der O₂-Konzentration bestimmt wird (vgl.

Gleichung 1). Zum anderen ist auch der Einfluss der Sauerstoffnachlieferung auf den Abbau von organischer Substanz zu berücksichtigen. Hierbei gilt, je geringer die Sauerstoffnachlieferung ist, desto langsamer ist die Abbaugeschwindigkeit (vgl. auch SIERRA UND RENAULT 1995, KROECKL UND STOLP 1985). Dieser Zusammenhang gilt dabei für alle biologisch abbaubaren Materialien in einem (Friedhofs-) Boden. Mit abnehmender Sauerstoffnachlieferung verlängert sich daher die Ruhezeit eines Leichnams, da bei zu geringer Sauerstoffnachlieferung nicht das volle Potential der Verwesung ausgeschöpft werden kann. Das bedeutet, dass weniger organische Substanz abgebaut wird als möglich, da nicht ausreichend Sauerstoff nachgeliefert wird.

4.5 Grababdeckung

Der Faktor der Grababdeckung wird in den Berechnungen von zwei Seiten betrachtet. Zum einen wird betrachtet, unter welchen technischen Voraussetzungen (Ausmaß der Undichtigkeit) eine Grababdeckung voraussichtlich keine negativen Auswirkungen auf den Verwesungsprozess hat. Zum anderen wird betrachtet, wie sich die potentielle Einschränkungen des Sauerstoffflusses durch eine Grababdeckung auf die Verwesungszeit an einem Standort auswirken würde. Dies geschieht jeweils als Wenn-Dann-Analyse. Die Ergebnisse sind in diesem Sinne wie folgt zu verstehen: Falls ein Standort die Eigenschaften X aufweist und falls eine Grababdeckung den Sauerstofffluss in den Boden um Y % einschränkt, dann würde sich eine Verwesungszeit von Z Jahren ergeben.

4.5.1 Technische Anforderungen zur Vermeidung der Verlängerung der Verwesung durch Abdeckung

Die vollständige Abdeckung eines Grabes stellt eine Versiegelung der Oberfläche dar. Es wird hierbei davon ausgegangen, dass eine Grababdeckung gasundurchlässig ist. Sauerstoff kann also nur durch gewollte oder herstellungsabhängige Undichtigkeiten unter die Abdeckung diffundieren (z. B. eine Fuge zwischen der aufliegenden Grabplatte und der Grabeinfassung). Weiter wird davon ausgegangen, dass unter der Grababdeckung ein Hohlraum vorhanden ist, in dem sich der durch die Abdeckung diffundierende Sauerstoff gleichmäßig über die gesamte Grabfläche verteilen kann. Ein direktes Aufliegen der Abdeckung auf dem Boden wird also nicht berücksichtigt.

Da keine Messungen vorliegen und auch keine Literatur existiert, kann an dieser Stelle die Einschränkung des Flusses durch eine Grababdeckung nur abgeschätzt werden:

Hierzu wird angenommen, dass ein Grab eine Fläche von 2 m x 1 m (2m²) umfasst und die Grababdeckung das Grab zu 100 % bedeckt. Des Weiteren wird eine umlaufende Fuge zwischen Grabeinfassung und Grabplatte angenommen. Weiter beträgt die Sauerstoffkonzentration der Atmosphäre 21 Vol % O₂ (0,21 m³ O₂ m⁻³ Luft) und die Sauerstoffkonzentration direkt unter der Grabplatte wird mit 10 Vol% O₂ (0,10 m³ O₂ m⁻³ Luft) angenommen. Die Konzentrationsdifferenz beträgt also 11 Vol % O₂. Die Breite der Grabeinfassung wird nach TA GRABMAL (Jahr) mit min. 4 und max. 10 cm festgelegt, sie entspricht der Diffusionsstrecke Δz. Mit diesen Annahmen kann nach Gleichung 7 der mögliche O₂-Fluss durch Lücken in der Grababdeckung berechnet werden.

$$q(O_2)_G = D_L \cdot \frac{(c_{\text{au\ss}en} - c_{\text{innen}})}{\Delta z} \quad \text{Gleichung 7}$$

mit $q(O_2)_G$: möglicher O₂-Fluss [mg O₂ cm⁻² h⁻¹] durch Lücken in der Grababdeckung
 D_L : Diffusionskoeffizient von O₂ in Luft [712,8 cm² h⁻¹ nach HILLEL, 1998]
 $c_{\text{au\ss}en}$: Luftsauerstoffkonzentration [21 Vol% O₂ ⇔ 161,28 mg O₂ cm⁻³]
 c_{innen} : O₂-Konzentration direkt unter der Grababdeckung [10 Vol% O₂ ⇔ 76,8 mg O₂ cm⁻³]
 Δz : Diffusionsstrecke bzw. Dicke der Grabeinfassung [cm]

Dieser Fluss muss dann zu dem Fluss in Bezug gesetzt werden, der ohne Grababdeckung an einem Standort möglich ist. Die Berechnung erfolgt intern in RuheSoft. Das Jahresmittel des berechneten Sauerstoffflusses muss hierbei auf die Grabfläche bezogen werden, so dass Q(O₂) (vgl. Gleichung 8) berechnet wird.

$$Q(O_2) = q(O_2) \cdot A_{\text{Grab}} \quad \text{Gleichung 8}$$

mit $Q(O_2)$: berechnete O₂-Menge [mg O₂ h⁻¹], Jahresmittel
 $q(O_2)$: berechneter O₂-Fluss [mg O₂ m⁻² h⁻¹]; Jahresmittel aus RuheSoft
 A_{Grab} : Grabfläche [m²]

Aus dem Quotienten der in den Gleichungen 7 und 8 berechneten Werten $q(O_2)_G$ und $Q(O_2)$ (vgl. Gleichung 9) ergibt sich die Fläche der Grababdeckung, die diffusionsoffen sein muss, damit rechnerisch eine Beeinflussung des Verwesungsprozesses ausgeschlossen werden kann.

$$A_D = \frac{Q(O_2)}{q(O_2)_G} \quad \text{Gleichung 9}$$

mit A_D : Fläche der Grababdeckung, die diffusions-offen ist [cm²]: Loch-, Fugenfläche
 $Q(O_2)$: berechnete O₂-Menge [mg O₂ h⁻¹]; Jahresmittel
 $q(O_2)_G$: möglicher O₂-Fluss [mg O₂ cm⁻² h⁻¹]

Aus dem Quotienten von A_D und dem Umfang des Grabes ergibt sich dann die Breite des notwendigen Belüftungsspalt.

In Tab. 12 sind einige Beispiele für die Abschätzung des notwendigen Belüftungsspalt, den eine Grababdeckung haben müsste, für verschiedene Standorteigenschaften (Bodenart, KWBA) aufgeführt.

Tab. 12: Einfluss von Bodenart und KWBA auf die notwendige Spaltbreite bei Grababdeckungen (Beispiele)

Bodenart	KWBA	Ruheklasse	mm Spalt bei 10 cm Breite der Grababdeckung
ss	KWBA0	2	7.6
ss	KWBA3	2	7.1
ss	KWBA6	2	5.5
ll	KWBA0	4	2.4
ll	KWBA3	4	2.1
ll	KWBA6	7	1.1
ut	KWBA0	5	1.7
ut	KWBA3	6	1.3
ut	KWBA6	8	0.6
lt	KWBA0	8	0.1
lt	KWBA3	8	0.1
lt	KWBA6	8	0.1

Hier zeigt sich, dass der notwendige Spalt mit zunehmend feinerer Textur kleiner wird. Die Einschränkung der Diffusion hat bei leichteren Böden und in trockeneren Klimabereichen also stärker Auswirkungen auf die Sauerstoffversorgung für die Verwesung als bei schwereren Böden und feuchteren Klimabereichen, da hier die Standorteigenschaften an sich schon teilweise stärkste Einschränkungen der Diffusion nach sich ziehen.

In weiteren abschätzenden Berechnungen mit RuheSoft wurde ermittelt, dass ab etwa 80 bis 90 % Einschränkung des Sauerstoffflusses in den Boden eine Auswirkung der geringeren Sauerstoffanlieferung auf den Verwesungsprozess zu erwarten ist.

Insgesamt wurde festgestellt, dass eine standortbezogene Einschätzung der Auswirkung von Grabplatten unverzichtbar ist, da je nach Gegebenheiten die Auswirkungen stark variieren können.

In erster Annäherung wird Einteilung in Grababdeckungsgefährdungsklassen vorgeschlagen: Hierbei wird zugrunde gelegt, dass eine Spaltgröße von < 0.2 mm vernachlässigbar ist, da diese aufgrund der natürlichen Mess- und Verabreitungstoleranz immer vorhanden sein müsste. Des Weiteren wird angenommen, dass die Gefährdung mit zunehmender notwendiger Spaltgröße steigt und dass in Ruheklasse 1 und 2 (< 10 Jahre) eine Grababdeckung keine Rolle spielt, da das Abbauverhalten hier optimal ist und auch stärkste Einschränkungen der Diffusion immer noch gute Resultate in der Ruhezeit ergeben. Ebenso kann die Gefährdung der Verwesung in den Ruheklassen 7 und 8 (> 30 Jahre) vernachlässigt werden, da eine Grababdeckung hier zu keine wesentliche Verschlechterung führt, da das Abbauverhalten aufgrund der natürlichen Gegebenheiten an solchen Standorten schon extrem schlecht ist.

In Tab. 13 wird eine Einstufung der zusätzlichen Gefährdung einer ordnungsgemäßen Verwesung durch eine Grababdeckung vorgeschlagen.

Tab. 13: Zusätzliche Gefährdung einer ordnungsgemäßen Verwesung durch eine Grababdeckung (0: keine zusätzliche Gefährdung; 3: hohe zusätzliche Gefährdung)

Ruheklasse	1	2	3	4	5	6	7	8
notwendige Spaltbreite	< 5 Jahre	5 - 10 Jahre	10 - 15 Jahre	15 - 20 Jahre	20 - 25 Jahre	25 - 30 Jahre	30 - 50 Jahre	> 50 Jahre
< 0.2 mm	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2 - 1 mm	0	0	0	1	1	1	0	0
1 - 2 mm	0	0	1	2	2	2	1	0
2 - 4 mm	0	1	2	3	3	3	1	0
4 - 6 mm	0	1	3	3	3	3	2	0
> 6 mm	0	1	3	3	3	3	2	0

In Tab. 13 erfolgt die Einstufung der Gefährdung wie folgt:

0 bedeutet keine zusätzliche Gefährdung, 1 geringe zusätzliche Gefährdung, 2 mittlere zusätzliche Gefährdung und schließlich 3 hohe zusätzliche Gefährdung.

4.5.2 Wenn-Dann-Analyse von Grababdeckungen

Bei der Wenn-Dann-Analyse der Auswirkungen von Grababdeckungen auf die Verwesungszeit eines spezifischen Standortes wird wie folgt vorgegangen:

Grundlegend für die Berechnungen ist hier die Annahme, dass eine Grababdeckung den Sauerstofffluss in den Boden einschränkt. Da hierzu keine Messergebnisse existieren wird von Einschränkungen des Flusses durch die Bodenoberfläche zwischen 50 und 99 % des Flusses ausgegangen.

Eventuelle Veränderungen der Bodenatmung, der Bodenwassergehalt, der Trockenrohdichte (durch die Verdichtung des Bodens für eine ausreichende Standfestigkeit der Abdeckung) und weitere denkbare Veränderungen der Bestattungsfaktoren werden nicht berücksichtigt. Insgesamt kann die Berechnung also Anhaltspunkte für die Auswirkung von Grababdeckung auf die Verwesungszeit geben, sie kann jedoch eine standortspezifische bodenkundliche Einschätzung nicht ersetzen.

Zum besseren Verständnis folgen hier zwei Beispiele:

Beispiel I:

Falls für einen Friedhofsstandort folgende Rahmenbedingungen gelten:

- KWBA 1
- Lehmsande
- 70 kg Leiche
- 50 kg Sarg (Fichte/ Buche)
- ohne Bewässerung

, dann würde eine Einschränkung des O₂-Flusses in den Boden von 80 % zu einer Verlängerung der Verwesungszeit von 0,5 Jahren (gleiche Ruheklasse) im Vergleich zum vollständigen Fluss führen. Eine Einschränkung des Flusses von 99 % würde in einer Verlängerung um 8 Jahre (Steigerung um 2 Ruheklassen) resultieren.

Beispiel II:

Falls für einen Friedhofsstandort folgende Rahmenbedingungen gelten:

- KWBA 3
- Lehme
- 70 kg Leiche
- 50 kg Sarg (Fichte/ Buche)
- ohne Bewässerung

, dann würde eine Einschränkung des O₂-Flusses in den Boden von 80 % zu einer Verlängerung der Verwesungszeit von 1,5 Jahren (gleiche Ruheklasse) im Vergleich zum vollständigen Fluss führen. Eine Einschränkung des Flusses von 99 % würde in einer Verlängerung um 16 Jahre (Steigerung um 3 Ruheklassen) resultieren.

5. Aufbau des Softwaremoduls

Nachstehend wird der Softwarekerns uns seine Komponenten erläutert. Die Anbindung an ein vorhandenes Friedhofverwaltung-GIS-System wird beschrieben und die Ergebnisbewertung allgemein ausgeführt.

5.1 Softwarekern

Mit dem Modell wird die eindimensionale O₂-Diffusion durch den Boden zum Sarg nachgebildet. Im Bereich des Sarges wird eine bestimmte temperaturabhängige maximale O₂-Verbrauchsrate angenommen, der nach TIBETT UND CARTER (2008) berechnet wurde (vgl. Kapitel 3.3); in den obersten 30 cm wird ein O₂-Verbrauch durch die Vegetation angenommen (vgl. Kapitel 3.2).

Der Gasfluss I bezogen auf das Bodenvolumen beträgt

$$I_B = -D_S \cdot \frac{dc}{dz} \quad \text{Gleichung 10}$$

mit	I _B :	Gasfluss [m ³ O ₂ m ⁻² Bo s ⁻¹]
	D _S :	scheinbarer Diffusionskoeffizient ¹ (auf das Luftvolumen bezogen) [m ³ Luft m ⁻² Boden s ⁻¹] = [m ² Luft s ⁻¹]
	c:	Gaskonzentration (auf das Luftvolumen bezogen) [m ³ O ₂ m ⁻³ Luft]
	z:	Tiefe [m]

Die lokale Bilanz für den Gasfluss ist

$$\frac{dc_B}{dt} = -\frac{dI_B}{dz} + P(z, t) = \frac{d(D_S \cdot \frac{dc}{dz})}{dz} + P(z, t) \quad \text{Gleichung 11}$$

mit	c _B :	Gaskonzentration (auf das Bodenvolumen bezogen) [m ³ O ₂ m ⁻³ Bo]
	t:	Zeit [s]
	I _B :	Gasfluss [m ³ O ₂ m ⁻² Bo s ⁻¹]
	z:	Tiefe [m]
	P:	Produktion oder Verbrauch des Gases [m ³ O ₂ m ⁻² Bo s ⁻¹ m ⁻¹ Bo]
	D _S :	scheinbarer Diffusionskoeffizient (auf das Luftvolumen bezogen) [m ² Luft s ⁻¹]
	c:	Gaskonzentration (auf das Luftvolumen bezogen) [m ³ O ₂ m ⁻³ Luft]

¹ Zur Einheit von D_S: die Einheit von D_S ist [cm³Luft · cm⁻¹Bo s⁻¹]. Da unter der Annahme senkrecht verlaufender Poren 1 cm Boden in der Tiefe 1 cm Luft in der Tiefe entspricht, gilt als übliche Einheit von D_S [cm²Luft s⁻¹]

Das Differenzial dc_B/dt kann geschrieben werden als

$$\frac{dc_B}{dt} = \frac{d(\varepsilon \cdot c)}{dt} \approx \frac{\varepsilon \cdot dc + c \cdot d\varepsilon}{dt} \quad \text{Gleichung 12}$$

mit ε : luftgefülltes Porenvolumen [$\text{m}^3\text{Luft m}^{-3}\text{Bo}$]

Falls der Luftgehalt ε sich mit der Zeit nicht ändert gilt $d\varepsilon/dt = 0$ und damit

$$\frac{dc_B}{dt} \approx \varepsilon \cdot \frac{dc}{dt} \quad \text{Gleichung 13}$$

Einsetzen in die lokale Bilanz ergibt

$$\varepsilon \cdot \frac{dc}{dt} = \frac{d(D_S \cdot dc/dz)}{dz} + P(z, t) \quad \text{Gleichung 14}$$

Diese Differentialgleichung wird für ein explizites numerisches Lösungsverfahren diskretisiert (vgl. FRÜND et al. 2010).

Für die numerische Lösung werden Anfangs- und Randbedingungen benötigt:

- Anfangsbedingungen: bekannte Konzentrationen für alle Tiefen, bekannte ε - und D_S -Werte für alle Tiefen
- obere Randbedingung: Konzentration der angrenzenden Atmosphäre ($c = \text{const} = 0.21 \text{ cm}^3\text{O}_2 \text{ cm}^{-3} \text{ Luft} = 21 \text{ Vol\% O}_2$) oder Einschränkung des Flusses in den Boden durch eine Grababdeckung ($x \%$ von I_B).
- untere Randbedingung: Konzentration an Sauerstoff in 400 cm Tiefe ist 0 Vol % O_2 .

Beschreibung der Abhängigkeit für D_S von ε

Der scheinbare Diffusionskoeffizient D_S ist abhängig von der Bodenstruktur (Tortuosität des Porensystems) und vor allem auch von den Luftgehalten im Boden. Im Modell wird die Formulierung von MOLDRUP (1997) verwendet aus Gleichung 2 (vgl. Kapitel 2.2).

Die Beschreibung der Abhängigkeit von D_s von ε zusammen mit Messungen für einen Sand (Friedhof Eversburg) und einen Lösslehm (Melle) ist in Abb. 8 in der Formulierung von MOLDRUP (1997) dargestellt. Diese Formulierung wird auch im Modell verwendet.

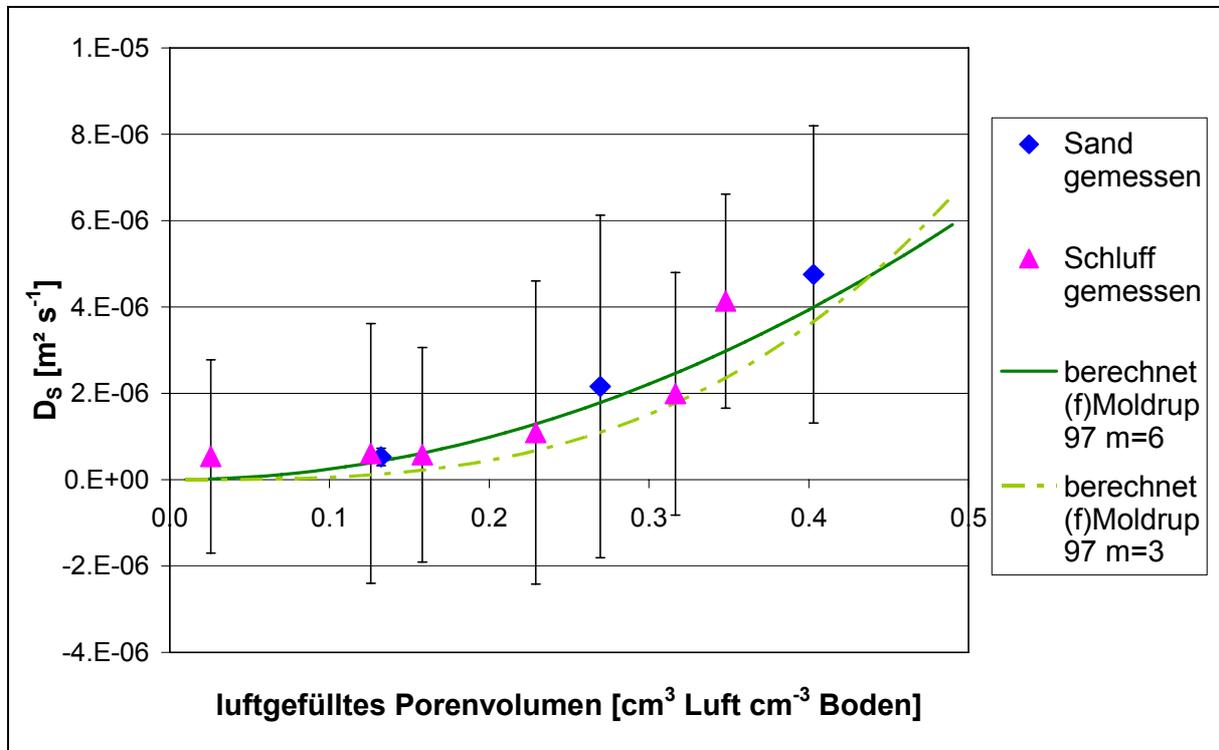


Abb. 8: Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten für O_2 vom Luftgehalt im Boden in der Formulierung von MOLDRUP (1997) (vgl. FRÜND et al. 2010)

Das Bestimmtheitsmaß der Anpassung nach MOLDRUP (1997) mit $m=6$ beträgt 0,9187, das mit $m=3$ 0,9396. Beide Gleichungen zeigen also eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten. Für die Berechnungen wird trotz des etwas niedrigeren Bestimmtheitsmaßes die Funktion nach MOLDRUP (1997) mit $m=6$ gewählt, da diese für Böden mit gestörtem Porensystem bzw. gepackte Proben ausgewiesen ist. Da es sich bei Gräbern in der Regel um gestörte Bodenprofile handelt, entspricht diese Gleichung den realen Gegebenheiten besser als die mit $m=3$.

5.2 Programmoberfläche und GIS-Anbindung

Entera

5.3 Ergebnisbewertung

Das Programm gibt zum einen die vor der Berechnung vom Nutzer definierten Eingangsdaten aus:

- Klimabereich in dem der Standort liegt
- Bodenart (hier synonym mit Bodenartenhauptgruppe)
- Gewicht des Leichnams in kg
- Sarggewicht in kg und Sargholz
- Bestattungstiefe
- Verwendung einer Grababdeckung und Einschränkung des Sauerstoffflusses durch die Grababdeckung (in %)

Des Weiteren liefert das Programmmodul folgende Ergebnisdaten:

- mittlerer Wassergehalt als Jahresmittel
- mittlerer Luftgehalt als Jahresmittel
- mittlerer Sauerstoffanlieferung als Jahresmittel
- die berechnete Ruhefrist für den Standort
- die Ruheklasse
- notwendige Belüftungsfläche, die eine Grabplatte aufweisen muss, damit keine Beeinträchtigung einer ordnungsgemäßen Verwesung zu erwarten ist; sowie die Umsetzung der Belüftungsfläche in die Höhe einer umlaufenden, diffusionsoffenen Fuge
- Grafiken ??? (entera)

Die mittleren Wassergehalte, Luftgehalte und die mittlere Sauerstoffanlieferung sollen hierbei eine Einschätzung und Überprüfung der Rahmenbedingungen erlauben. Die berechneten Ruhefristen sind Anhaltspunkt für die Festlegung und Differenzierung von Ruhefristen auf einer Friedhofsfläche.

Um einen schnelleren Vergleich von Ruhefristen untereinander zu erlauben, wurden die Ruhefristen nach Maßgabe von Praktikern wie folgt eingeteilt:

Ruheklasse 1	≤ 5 Jahre
Ruheklasse 2	> 5-10 Jahre
Ruheklasse 3	> 10-15 Jahre
Ruheklasse 4	> 15-20 Jahre
Ruheklasse 5	> 20-25 Jahre

Ruheklasse 6	> 25-30 Jahre
Ruheklasse 7	> 30-50 Jahre
Ruheklasse 8	> 50 Jahre

Die Einteilung in Ruheklassen ermöglicht bei Berechnungen, die die Auswirkungen von Bewässerung oder Grababdeckung überprüfen sollen, einen einfachen und schnellen Vergleich, ob die Veränderung der Verwesungszeit als wesentlich betrachtet werden muss oder nicht.

Die Angabe der notwendigen Belüftungsfläche bzw. der notwendigen diffusionsoffenen Fuge zur Vermeidung nicht ordnungsgemäßer Verwesung kann zur Anpassung der technischen Anforderung an Grababdeckungen sowie zur Risikoabschätzung bei Verwendung von Grababdeckungen genutzt werden.

6. Überprüfung des Moduls

Die Überprüfung des Modells erfolgt anhand von Daten von 54 Friedhofsstandorten, mit 224 Graböffnungen. Ein Großteil dieser Daten ist in ALBRECHT (2008) dargestellt. Es wurden zudem aber auch Untersuchungen von Friedhöfen berücksichtigt, die in der Zwischenzeit bis September 2010 stattfanden.

Hierzu wurden im Rahmen der Graböffnungen der Leichenzersetzungsstatus ermittelt und anhand einer Dokumentation von Leichen und Sarg eine möglichst genaue Bestandsaufnahme der einzelnen Körperteile und auch des Verwesungsstatus vorzunehmen. Besonders Augenmerk wurde dabei auf Verwesungsstörungen und den sogenannten Wachsleichen gelegt.

Die detaillierte Erfassung der Leichen hat auch dazu geführt, dass neben der Bewertung des Sargzustandes auch der Erfassung der Leichenbekleidung und der Sargausstattung zum Zeitpunkt der Graböffnung eine besondere Bedeutung beigemessen wurde.

Für alle Standorte wird die Berechnung der Verwesungszeit durchgeführt und mit den vor Ort erhobenen Ergebnissen verglichen.

Für die Überprüfung von RuheSoft mit den Ergebnissen der Graböffnungen war es insbesondere wichtig, Störfaktoren des Leichenabbauprozesses zu identifizieren.

Als wesentliche Aspekte von in der Praxis vorkommenden Verwesungsstörungen sind neben der Bekleidung der Leichen auch der Sarg und insbesondere die Sargauskleidung mit Folie anzuführen.

Vielfach war auch nach mehr als 30 Jahren die als Auslaufschutz verwendete Folie im Sargboden vollständig erhalten und trug zur Wannbildung im Sarg bei; das im Boden versickernde Wasser sammelte sich in dieser Wanne und die Leichewar von Wasser umgeben.

Diese typischen Fälle wurden bei der Verifizierung von RuheSoft ausgegrenzt.

7. Szenarienrechnung

In den folgenden beispielhaften Szenarienberechnungen wurde immer von einer Standard-einstellung des Modells ausgegangen, die dann entsprechend der Fragestellung variiert wurde.

Als Standard wurden folgende Faktoren gewählt:

- KWBa-Klasse 3
- Bodenartenhauptgruppe der Normallehme
- Gewicht Leichnam 70 kg
- Gewicht Sarg 50 kg
- Sargoberkante in 90 cm Tiefe
- Sargholz Fichte/Buche
- Keine Bewässerung
- Keine Grababdeckung

7.1 Einfluss der Bodenartenhauptgruppe

Der Einfluss der Bodenartenhauptgruppe auf die Verwesungszeit und die Abbauzeit des Sarges wurde durch Variation der Bodenartenhauptgruppe bei der Berechnung erreicht. Die Ergebnisse für Lehmsande, Normallehme und Schlufftone sind in Abb. 9 vergleichend dargestellt.

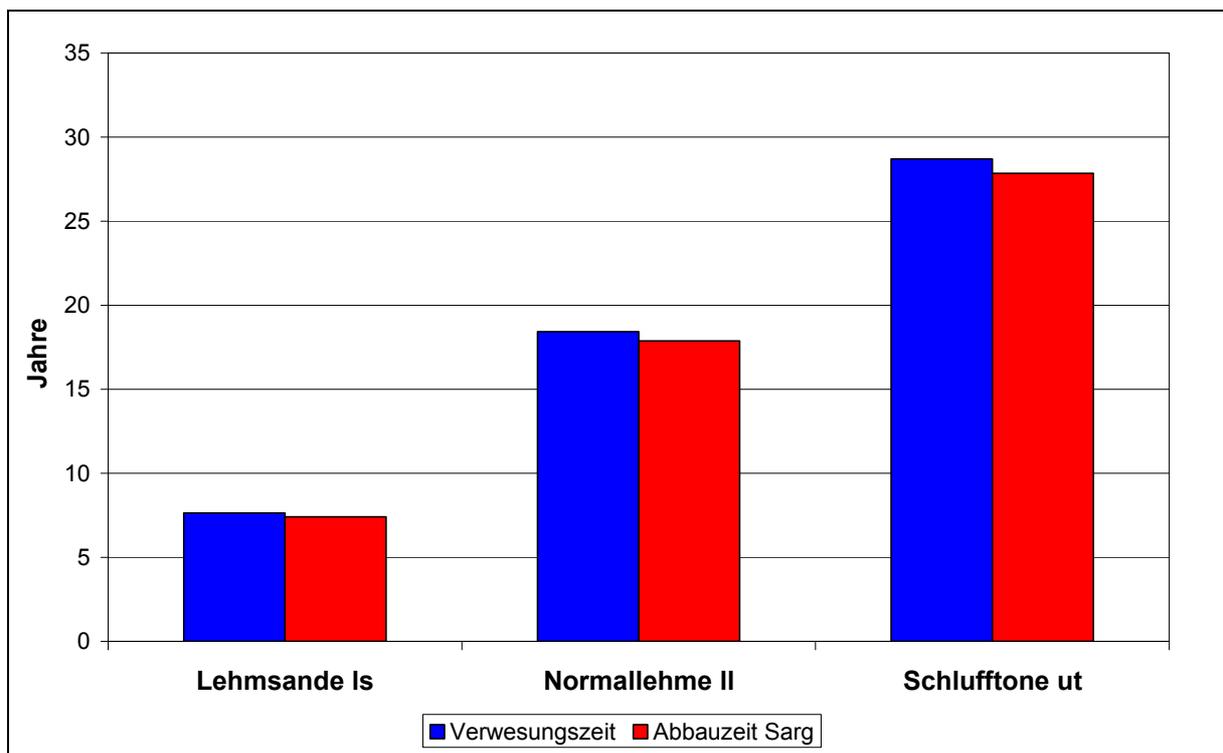


Abb. 9: Abhängigkeit der Verwesungszeit und der Abbauzeit eines Sarges von der Bodenartenhauptgruppe

Aufgetragen sind die Verwesungszeit bzw. Abbauzeit des Sarges in Jahren gegen die Bodenartenhauptgruppe. Zu erkennen ist, dass die Abbauzeiten mit zunehmendem Tonanteil der Textur länger werden. Die Abbauzeit des Sarges liegt hierbei immer unter der des Leichnams.

7.2 Einfluss der klimatischen Randbedingungen

Zur Charakterisierung des Einflusses der klimatischen Umgebungsbedingungen wurden die Verwesungszeiten und Sargabbauzeiten für Boden der Bodenartenhauptgruppe der Normallehme für 3 Klasse der jährlichen klimatischen Wasserbilanz (KWBa) verglichen. Die Ergebnisse zeigt Abb. 10. Es wurden die niedrigste, die höchste und eine mittlere KWBa (0, 3 und 6) gewählt und die zugehörigen Verwesungszeiten bzw. die Abbauzeiten der Särge in Jahren dargestellt.

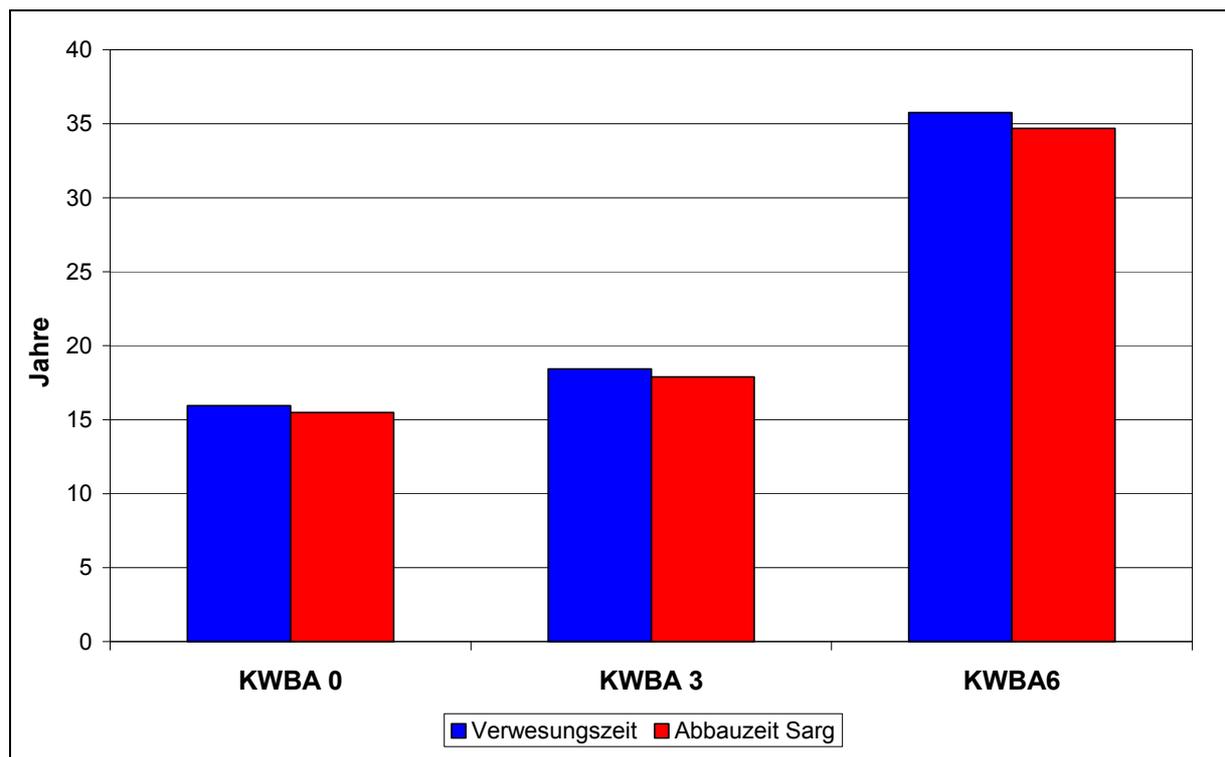


Abb. 10: Abhängigkeit der Verwesungszeit und der Abbauzeit eines Sarges von der Klasse der KWBa

Die Zunahme der Abbauzeiten von KWBa 0 zu KWBa 3 ist hierbei nur gering ausgeprägt. Im Gegensatz dazu ist die Abbauzeit von KWBa 3 zu KWBa 6 um fast doppelt so lang. Es ist kann also festgehalten werden, dass sich die Abbauzeiten in feuchterem Klima verlängern.

Der Einfluss der KWBa ist hierbei ähnlich groß einzuschätzen wie der der vorliegenden Textur (vgl. Kapitel 7.1).

7.3 Einfluss des Leichengewichtes

Der Einfluss des Leichengewichtes auf die Verwesung wurde untersucht, indem das Leichengewicht zum Zeitpunkt der Bestattung vom Standard von 70 kg um ± 20 kg variiert wurde. Die Gewichte wurden gegen die sich ergebenden Verwesungs- und Abbaueiten dargestellt. Das Ergebnis zeigt Abb. 11.

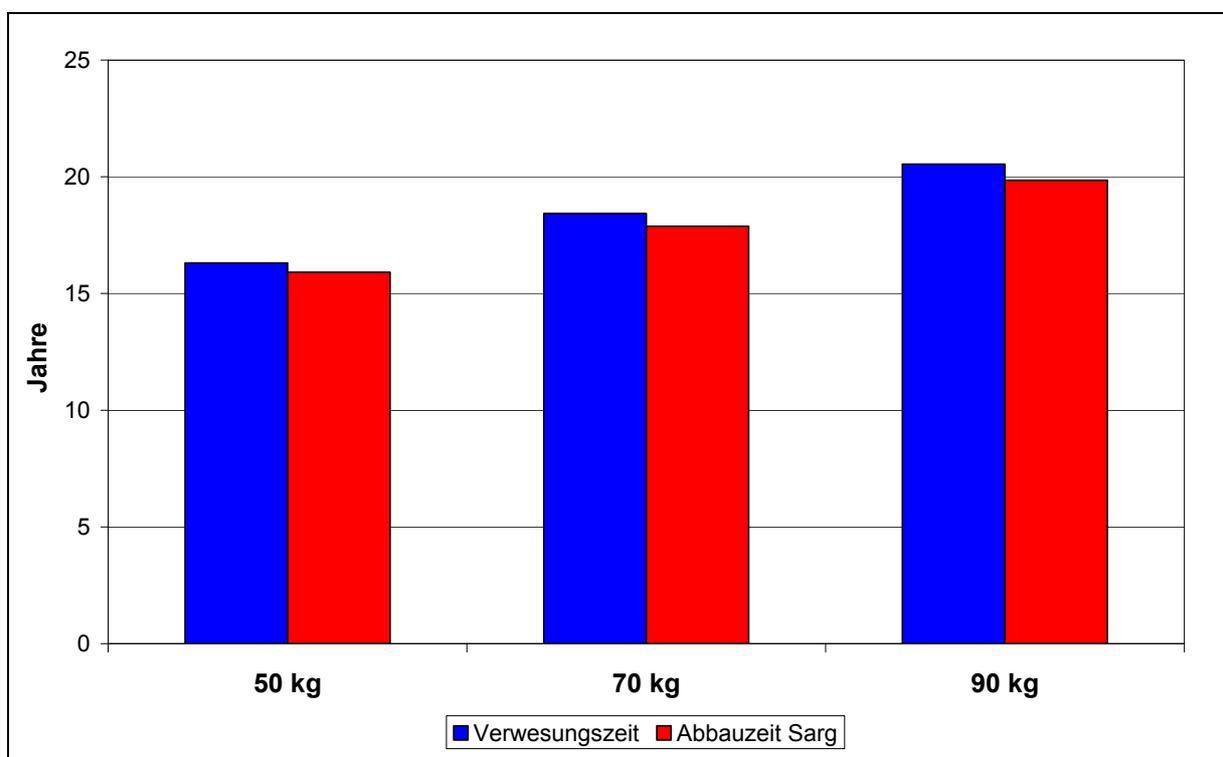


Abb. 11: Abhängigkeit der Verwesungszeit und der Abbauezeit eines Sarges von dem Gewicht des Leichnams zum Zeitpunkt der Bestattung

Hier wird deutlich, dass auch eine Steigerung des Leichengewichtes bei gleich bleibendem Sarggewicht die Abbaueiten von Leichnam und Sarg verlängert. Da jedoch eine Steigerung des Leichengewichtes um 40 kg lediglich eine Verlängerung der Verwesungszeit um ca. 5 Jahre nach sich zieht, kann der Einfluss von KWBa und Bodenart (vgl. Kapitel 7.2 und 7.1) als prägnanter eingestuft werden.

7.4 Einfluss des Sarggewichtes und -holzes

Der Einfluss des Sargholzes auf die Verwesung wurde geprüft, in dem die zwei ausgewiesenen Holzarten (vgl. Kapitel 3.3.2) gegeneinander geprüft wurden. Hierbei wurde ebenso der Einfluss des Sarggewichtes auf die Abbaudauer und Verwesungszeit geprüft, indem die Verwesungszeit ohne Sarg sowie mit 30, 50 und 70 kg schweren Särgen berechnet wurde. Die Ergebnisse sind in Abb. 12 dargestellt. Gezeigt wird die Verwesungs- bzw. Abbauzeit in Abhängigkeit von Sargholz und -gewicht.

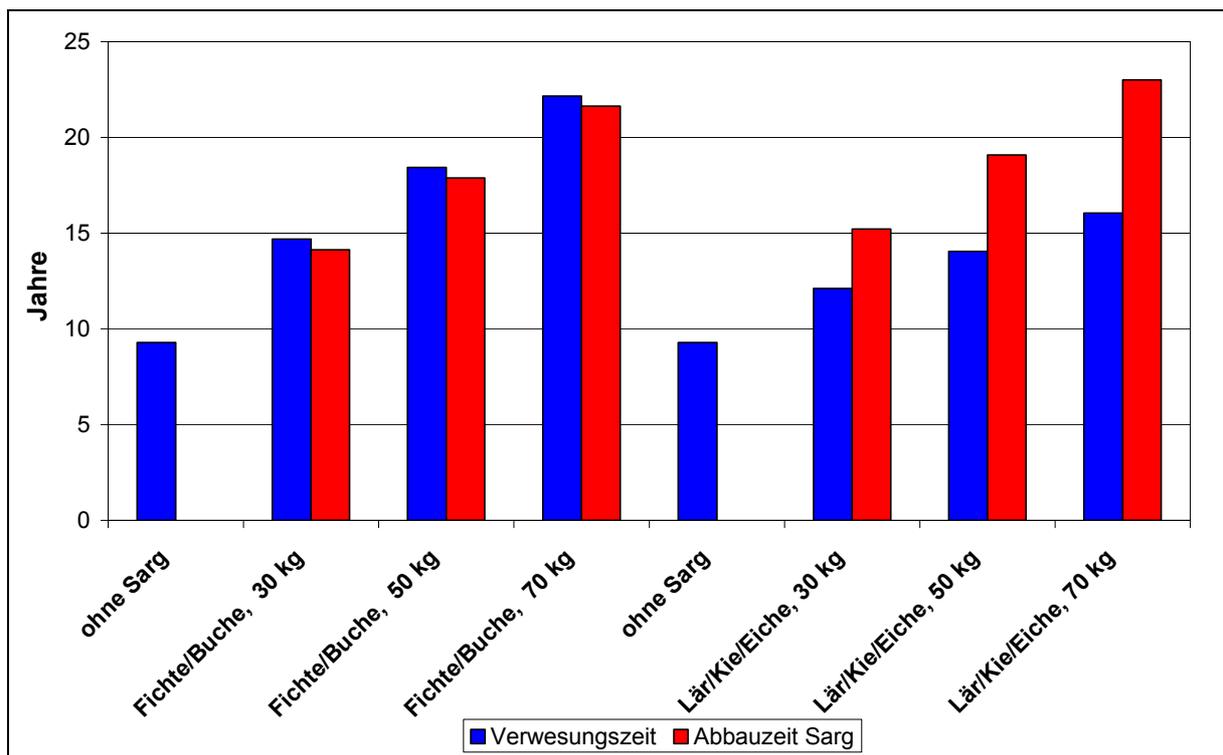


Abb. 12: Abhängigkeit der Verwesungszeit und der Abbauzeit eines Sarges von Gewicht des Sarges zum Zeitpunkt der Bestattung und dem Sargholz

7.5 Einfluss der Bestattungstiefe

Der Einfluss der Bestattungstiefe auf die Verwesungszeit und die Abbauzeit des Sarges ist in Abb. 13 dargestellt. Die Sargüberdeckung wurde mit 60, 90 und 120 cm als Varianten gewählt, wobei 90 cm als Standard der Mindestüberdeckung (vgl. PUNKT 2.2 HYGIENERICHTLINIEN NRW 2003) zu betrachten ist. Die Varianten der Sargoberkante (= Sargüberdeckung) sind gegen die berechneten Verwesungszeiten und Sargabbauzeiten aufgezeichnet.

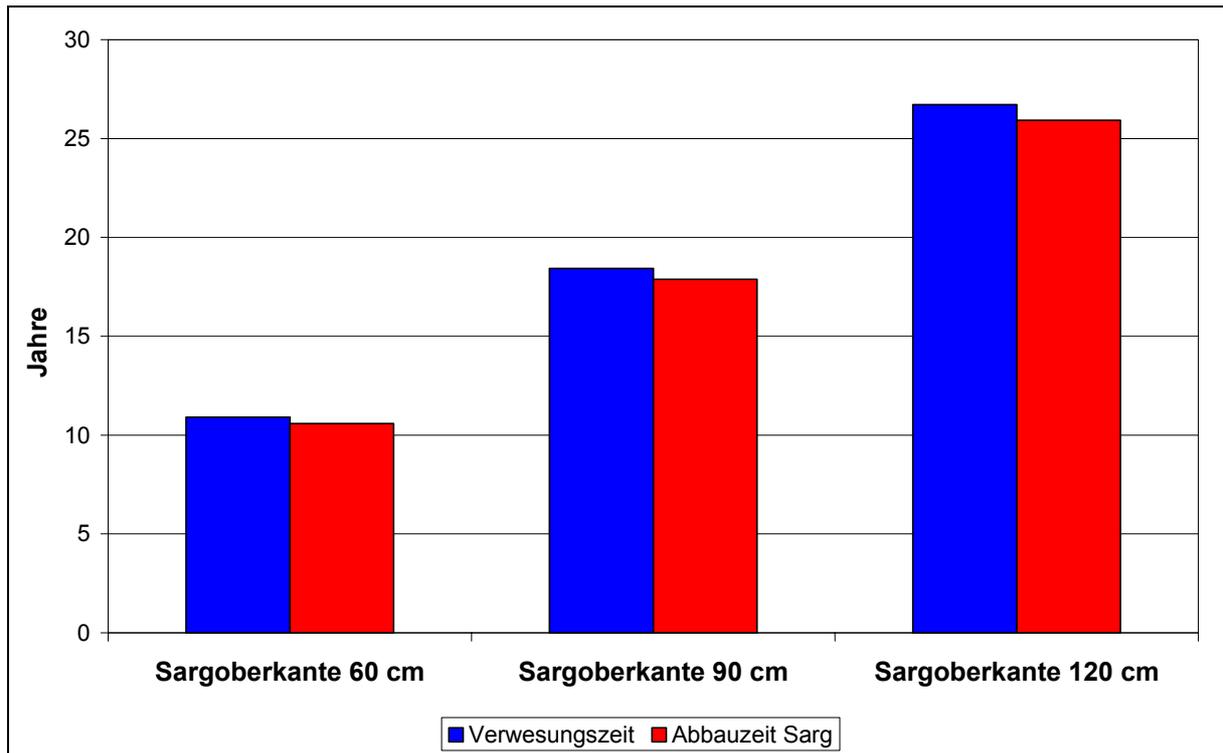


Abb. 13: Abhängigkeit der Verwesungszeit und der Abbauzeit eines Sarges von der Bestattungstiefe

Abb. 13 zeigt deutlich, dass eine Reduzierung der Sargüberdeckung mit Bodenmaterial zu einer deutlichen Reduzierung der Verwesungszeit führt und dass eine Bestattung in größerer Bodentiefe die Verwesungszeit verlängert. Die Verkürzung der Verwesungszeit bei einer Bestattung mit 60 cm Sargüberdeckung beträgt im Beispiel gegenüber 90 cm ca. 8 Jahre und gegenüber 120 cm ca. 15 Jahre.

Begründet liegt dies in der längeren Diffusionstrecke, die der Sauerstoff durch den Boden transportiert werden muss. Meistens verringert sich zusätzlich mit zunehmender Bodentiefe der Diffusionskoeffizient eines Bodens, u. a. da die Dichte meist ansteigt, wodurch die Diffusion zusätzlich verlangsamt wird.

Eine Verringerung der Mindeststärke der Sargüberdeckung erscheint daher empfehlenswert.

7.6 Einfluss der Bewässerung

Abb. 14 verdeutlicht den Einfluss einer Bewässerung auf die Verwesungszeit eines Standortes. Dargestellt sind die drei im Modell wählbaren Bewässerungsstufen für die gewählten Standardbedingungen für drei Bodenartenhauptgruppen (Lehmsande, (Normal-)Lehme und Schlufftone). Diese Parameter sind gegen die berechnete Verwesungszeit abgebildet.

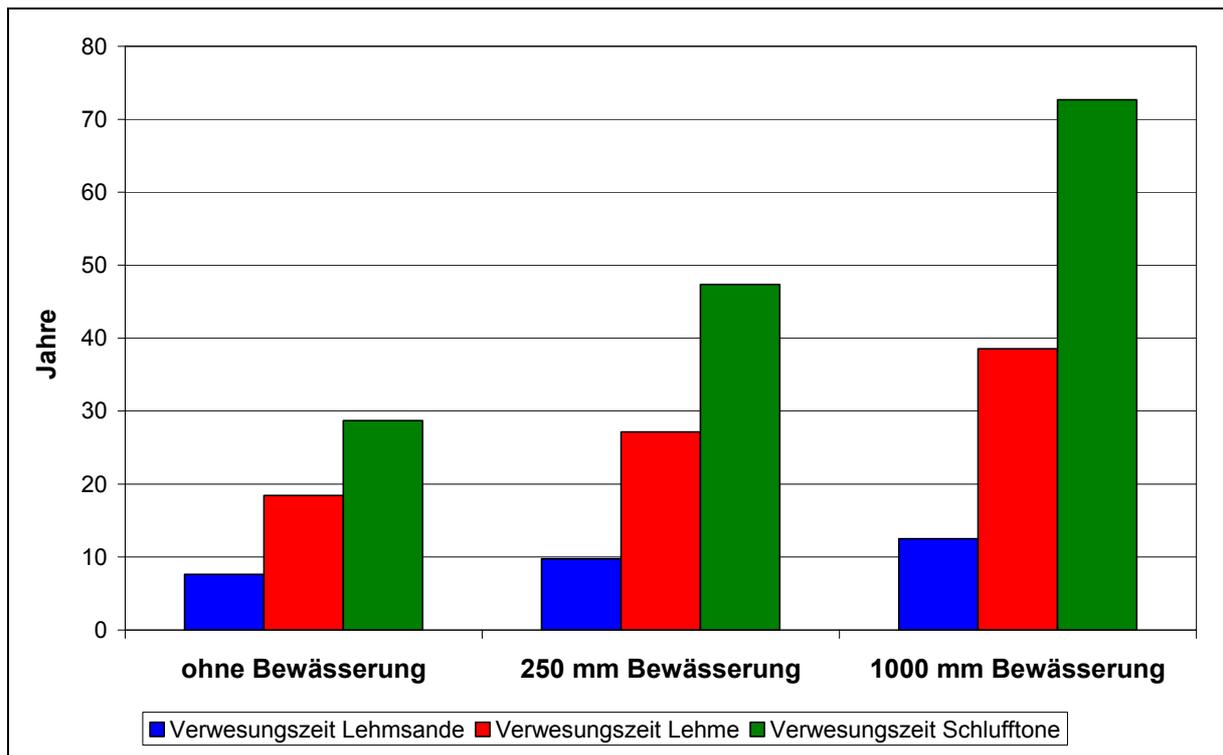


Abb. 14: Abhängigkeit der Verwesungszeit und der Abbauzzeit eines Sarges von der Bewässerungsintensität

In Abb. 14 zeigt sich hierbei deutlich, dass sich eine Erhöhung des Bodenwassergehaltes verlängernd auf die Verwesungszeit auswirkt. Hierbei ist festzustellen, dass sich eine Bewässerung bei feinerer Textur des Bodens stärker auswirkt als bei gröber: Steigert eine Bewässerung von 1000 mm im Sommerhalbjahr die Verwesungsdauer bei Lehmsanden um ca. 5 Jahre, führt die gleiche Bewässerung bei (Normal-)Lehmen zu einer Steigerung um ca. 20 Jahre und bei Schlufftone sogar um ca. 40 Jahre.

Da Niederschlag und Evapotranspiration bei Bewässerung eines Standortes gleich bleiben, steigt der Bodenwassergehalt des Standortes an. Das luftgefüllte Porenvolumen nimmt ab und damit auch der Diffusionskoeffizient. Die Sauerstoffnachlieferung in den Boden nimmt ab. Je stärker ein Standort bewässert wird, desto größer ist die Verlängerung der Verwesungszeit. Bei stark überhöhter Bewässerung könnte auch eine Verwesungsstörung in Form von Wachsleichen die Folge sein.

Bei feinen Texturen ist von einer Bewässerung des Standortes also abzuraten.

7.7 Minimalanforderungen und Auswirkungen von Grababdeckungen

Zum einen werden Beispiele für die technischen Minimalanforderungen, die eine Grabplatte zur Vermeidung negativer Einflüsse auf die Verwesungszeit haben muss, vorgestellt. Zum

anderen werden die Auswirkungen der Einschränkung des O₂-Flusses durch eine Grababdeckung beispielhaft berechnet.

7.7.1 Technische Anforderungen an Grababdeckungen

In Tab. 14 sind beispielhafte Berechnungen zur Diffusionsoffenheit einer Grababdeckung aufgeführt, die gegeben sein müsste, damit eine Verlängerung der Verwesungszeit unwahrscheinlich wäre. Hierbei wird der oben definierte Standard unter Variation von Bodenartenhauptgruppe und KWBA verwendet.

Tab. 14: Beispiele für die berechneten Abmessungen (Belüftungsfläche bzw. umlaufende Fuge), die zur Vermeidung negativer Veränderungen der Verwesungszeit durch Grababdeckungen notwendig wären

KWBA	Bodenartenhauptgruppe	Verwesungszeit [Jahre]	Ruheklasse	Belüftungsfläche [cm ²]		umlaufende Fuge [mm]	
				4 cm ¹	10 cm ²	4 cm	10 cm
0	ll	16.0	4	58	146	1.0	2.4
3	ll	18.4	4	50	126	0.8	2.1
6	ll	35.7	7	26	65	0.4	1.1
3	ls	7.6	2	121	305	2.0	5.1
3	ll	18.4	4	50	126	0.8	2.1
3	ut	28.7	6	32	81	0.5	1.3

¹min. Breite der Grabeinfassung nach TA Grabmal; ²max. Breite der Grabeinfassung nach TA Grabmal

Ein für die Verwesung gut geeigneter Lehmsand würde hier nach bei einer Grabeinfassungsbreite von 4 cm (Grababdeckung von 2 x 1 m²) eine diffusionsoffene Fläche in der Grababdeckung von 121 cm² bzw. eine umlaufende Fuge von 2,0 mm Höhe benötigen, damit der Sauerstofffluss in den Boden das gleiche Niveau erreicht wie ohne Abdeckung. Unter sonst gleichen Bedingungen würde ein Normallehm 50 cm² diffusionsoffene Fläche (0,8 mm umlaufende Fuge) benötigen und ein Schluffton 32 cm² diffusionsoffene Fläche (0,5 mm umlaufende Fuge).

Insgesamt wird also deutlich, dass je besser ein Boden für die Verwesung geeignet ist, je luftdurchlässiger er ist, desto diffusionsoffener muss eine Grababdeckung gestaltet werden, um eine Verlängerung der Verwesungszeit zu verhindern.

7.7.2 Auswirkungen von Grababdeckungen auf die Verwesungszeit

Für den Einfluss der Abdeckung eines Grabes auf die Verwesung existieren nur sehr wenige und unzusammenhängende bzw. unsystematische Untersuchungen bzw. Erfahrungswerte. Daher wird im Modell von einer Wenn-Dann-Analyse ausgegangen:

Falls eine vollständige Grababdeckung den Sauerstofffluss in den Boden um x % einschränken würde, dann ergäbe sich eine Verwesungszeit von y Jahren.

Ergebnisse einer solchen Wenn-Dann-Analyse für die gewählten Standortbedingungen sind in Abb. 15 dargestellt. Der Sauerstofffluss in den Boden wurde hierbei durch eine Grababdeckung um 0% (ohne Abdeckung), 50, 80, 90, 95, 97 und 99 % eingeschränkt und die Verwesungs- sowie die Sargabbauzeiten wurde berechnet.

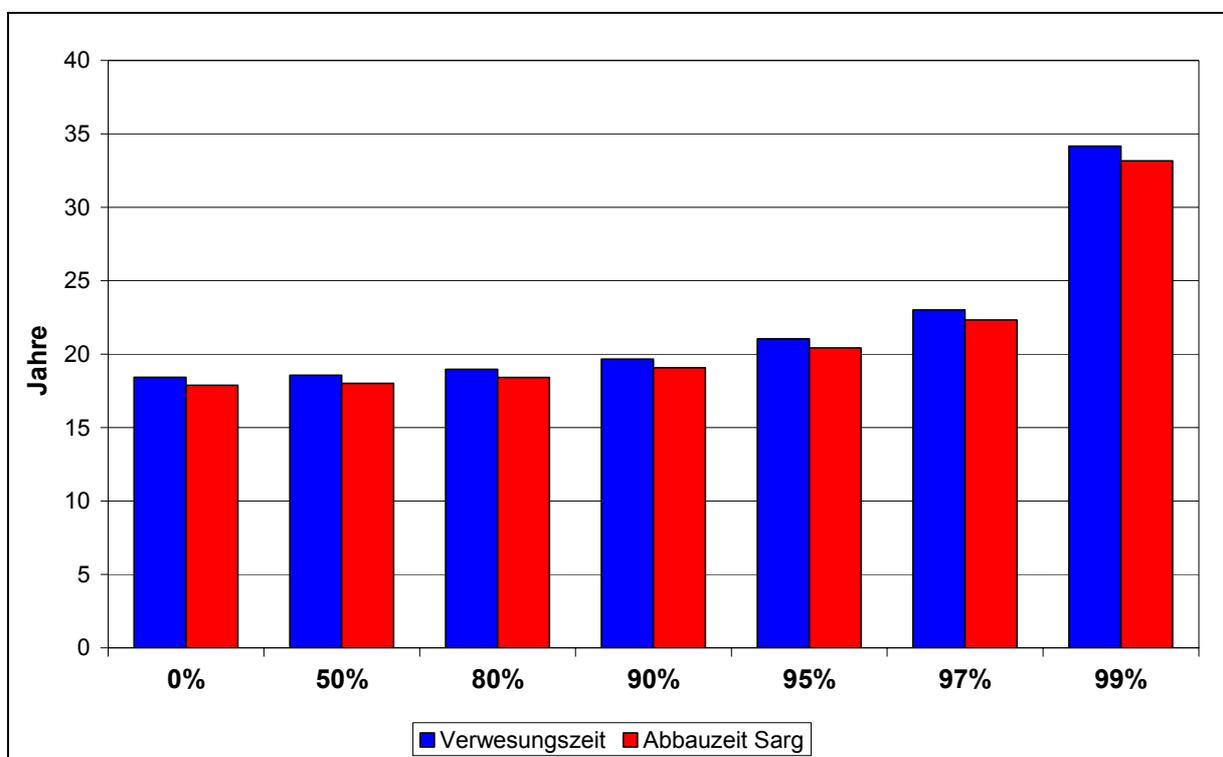


Abb. 15: Abhängigkeit der Verwesungszeit und der Abbaupzeit eines Sarges von der Einschränkung des Flusses durch eine Grababdeckung (KWBa3, Normallehme).

Im Beispiel zeigt sich, dass für die Bedingungen dieses Standortes die Verwesungszeit erst bei einer Einschränkung des Sauerstoffflusses durch die Grababdeckung von 95% maßgeblich ansteigen würde. Unter maßgeblich wird hierbei ein Wechsel der Ruheklasse verstanden. Starke Auswirkungen der Grababdeckung auf die Verwesungszeit zeigen sich im Beispiel erst ab 99 % Einschränkung des Sauerstoffflusses.

In Abb. 16 ist der gleiche Zusammenhang wie in Abb. 15 dargestellt, jedoch für die Bodenartenhauptgruppe der Tonschluffe bei KWBa 5. Der Wechsel der Ruheklasse zeigt sich hier schon bei 95 % Einschränkung des O₂-Flusses und die Verwesungszeit des Leichnams steigert sich im Vergleich von 99 % Einschränkung mit 0 % Einschränkung (keine Abdeckung) um das Dreifache. Hier wird nochmals deutlich, dass die Stärke der Auswirkungen eines Bestattungsfaktors je nach Umgebungsumständen anders sein kann.

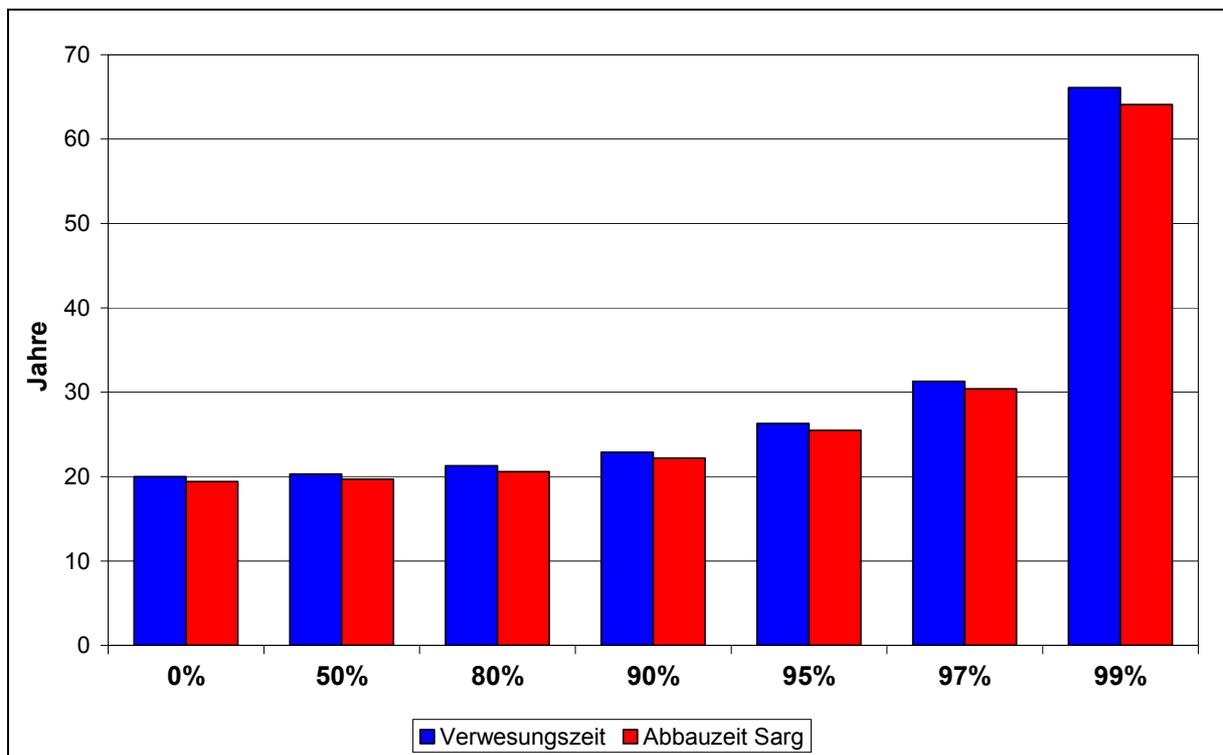


Abb. 16: Abhängigkeit der Verwesungszeit und der Abbaupzeit eines Sarges von der Einschränkung des Flusses durch eine Grababdeckung (KWBa 5, Tonschluffe).

In den Beispielen wird deutlich, dass die Einflüsse von Grababdeckungen ebenso wie bei allen anderen variablen Faktoren stark vom Standort abhängig sind.

Die Ergebnisse können weder eine Zulassung noch ein generelles Verbot von Grabplatten begründen, da keinerlei gesicherte Daten über den Einfluss von Grababdeckungen auf den Sauerstofffluss und damit auf Diffusion und Verwesung vorliegen. Weiter sind Grababdeckung in den verschiedensten Varianten denkbar (Steinplatte, Kiesbeet, Teilabdeckungen etc.), daher muss auch hier im Einzelfall entschieden werden und die Erhebung von systematischen Untersuchungen scheint vordringlich.

8. Grenzen der Anwendung und offene Fragen

In der Anwendung der Software sollte beachtet werden, dass das Programm für einige Standortsituationen nicht ausgelegt ist. Hier werden also die Grenzen des Modells erörtert:

Zu ersten ist hier zu nennen, dass eine Berechnung der Verwesungszeit nur für grundwasserunbeeinflusste Standorte möglich ist. Die Berechnung der Beeinflussung durch Grundwasser muss immer standortgebunden erfolgen, da viele Randbedingungen wie z. B. der mittlere Grundwasserstand oder der kapillare Aufstieg vom jeweiligen Standort abhängig sind. Eine durchschnittliche Berechnung z. B. eines mittleren GW-Standes ist also nicht möglich. Da das Modell kein internes Wasserhaushaltsmodell o. ä. besitzt, können diese Berechnungen nicht ohne weiteres durchgeführt werden. Denkbar ist allerdings eine externe Berechnung der Jahresgänge des Bodenwassergehaltes (z. B. durch HYDRUS 1D) und eine nachfolgende Einspeisung der gewonnenen Daten in das Modell zur Berechnung einer standortspezifischen Verwesungsdauer.

Wie oben schon erwähnt, ist das Programm ohne integriertes Modell zur Berechnung des Jahresgangs des Bodenwassergehaltes programmiert. Daher ist bei An- und Auswertung des Modells bzw. der Ergebnisse zu beachten, dass die verwendeten Basisdaten Mittelwerte für klimatische und pedologische Randbedingungen sind. Es muss also die Übertragbarkeit der Daten auf den zu überprüfenden Standort beachtet werden.

Des Weiteren arbeitet das Programm mit einem Standardprofil (vgl. Kapitel 4.2), daher muss auch hier die Übertragbarkeit der Daten überprüft werden. Sollten z. B. stark abweichende Werte für Trockenrohdichte und Humusgehalt vorliegen, muss dies bei der Auswertung der berechneten Daten beachtet werden. Eventuell ist hier im Einzelfall über eine externe Berechnung der Bodenwassergehaltsverläufe nachzudenken.

Ebenso sind besondere Bewirtschaftungen bzw. technische Maßnahmen nicht im Modell berücksichtigt. Sollte z. B. bei Verfüllen des Grabes ein Austausch des Bodenmaterial stattfinden, so dass innerhalb des Grabes eine gröbere Textur vorliegt als außerhalb, so kann dies nicht berechnet werden. Für diese speziellen Fragestellungen wäre die Verwendung eines zwei- bzw. dreidimensionalen Modells notwendig.

Neben den Grenzen des Programms ergaben sich im Laufe des Projektes einige offene Fragen, die teilweise nur durch systematische Labor- und Felduntersuchungen in weiteren Forschungen zu klären sind:

Fraglich ist zum ersten, ob in sehr tonreichen Böden die Schrumpfung der Tonminerale bei Austrocknung im Sommer zu Rissen, Spalten oder Klüften führt, die eine verstärkte Sauerstoffnachlieferung zur Folge hätten.

Weiter wäre zu ermitteln, welchen Einfluss die Vegetation eines Standortes durch die Veränderung der Evapotranspirationsleistung auf die Sauerstoffnachlieferung hätte. Könnte z. B. die Anpflanzung einzelner Bäume auf einem Friedhof dauerhaft die Sauerstoffversorgung verbessern?

Problematisch ist auch die Frage, in wie weit ein Sarg eine zusätzlich Diffusionsbarriere darstellt. Im Modell wird davon ausgegangen, dass die Verwesung von Sarg und Leichnam parallel nebeneinander abläuft. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass ein Vollholzsarg sich durch Quellung des Holzes bei Einwirkung von Feuchtigkeit im Boden zur Diffusionsbarriere für Sauerstoff ausbilden könnte. Diese Frage kann jedoch hier nicht geklärt werden.

Ebenso sind die verwendeten Abbaufunktionen für die Verwesung von Leichnam und Sarg aus Literaturdaten abgeschätzt, was in einer hohen Unsicherheit hinsichtlich ihres tatsächlichen Verlaufes resultiert. Genauer Untersuchungen zur Abbaugeschwindigkeit und zum Abbauverlauf von Leichnamen in Friedhöfen sowie zum Abbau von Särgen wären wünschenswert. Im Fall der Säрге sollte auch der Einfluss einer Behandlung des Sargholzes mit Beizen, Lacken o. ä. auf den Abbau untersucht werden.

Das hier vorliegende Modell ist eindimensional, wodurch eine starke Vereinfachung der Realität geschieht. Fraglich ist der Einfluss der Zwei- und Dreidimensionalität der berechneten Prozesse. Besonders im Fall von Grababdeckungen wäre eine Berücksichtigung lateraler Sauerstoffnachlieferung wünschenswert.

9. Umsetzung in die Praxis

9.1 Erstellung eines Handbuchs

Für das Programm wurde ein erläuterndes Handbuch erstellt (RuheSoft- Ermittlung der Ruhefristen auf dem Friedhof).

Im Handbuch werden die technischen Voraussetzungen und Grundlagen des Programms erläutert. Die Programmführung und Anwendung wird erklärt. Die Grundlagendaten und Grenzen des Programms werden vorgestellt und Beispielberechnungen werden durchgeführt.

Es erfolgt eine Einführung in die Ergebnisauswertung.

9.2 Weitere Aktivitäten (Seminare, Veröffentlichungen etc.)

Frühjahrstagung VFD (21. bis 22. 1.2010)

Bereits im Januar 2010 wurden auf der Frühjahrstagung der Friedhofsverwalter Deutschlands (VFD) im Gartenbauzentrum in Essen durch Dr. Albrecht die Grundzüge von RuheSoft präsentiert.

Projektgruppe trifft Praktiker (15. 6 2010)

Am 15. Juni fand in der Fachhochschule ein Treffen der Projektgruppe (Frau Meyer, Herr Prof. Fründ, Herr Dr. Albrecht) mit einem Vertreter der Stadt Osnabrück (Frau Güse) und der Landeskirche Oldenburg (Herr Poloczek) statt. Hierzu wurden Anforderungen aus der Praxis der Friedhofsverwaltungen diskutiert.

Sommer-Fortbildungsseminar des VFD (16. bis 18. August)

Auf dem Sommer-Fortbildungsseminar des VFD am Seddiner See präsentierte Herr Dr. Albrecht erstmals die Software-Anwendung RuheSoft.

Zeitungsinterview mit dem Buxtehuder Tageblatt /veröffentlicht 6.11.2010)

Im Nachgang zur Veranstaltung am Seddiner See fragte die Redaktion nach einer Darstellung von RuheSoft und der Relevanz von Verwesungsstörungen auf Friedhöfen.

Der Artikel erschien am 6.11.2010 sowohl im Buxtehuder als auch im Stader Tageblatt und liegt in Anhang 4 bei.

Friedhofskulturelle Tagung in Bad Nauheim (10. und 11.9.2010)

Auf der Friedhofskulturellen Tagung in Bad Nauheim bestand die Möglichkeit Friedhofsverwalter aus dem ganzen Bundesgebiet über RuheSoft zu informieren.

Akademie für öffentliches Gesundheitswesen in Düsseldorf (15.9.2010)

Im Rahmen der Ausbildung der Gesundheitsaufseher präsentierte Herr Dr. Albrecht die Software-Anwendung RuheSoft auch in der speziellen Anwendung für Aufsichts- und Genehmigungsbehörden des öffentlichen Gesundheitswesens.

Frühjahrstagung VFD (20. bis 21.1.2010)

Hierzu ist ein Vortrag von Dr. Albrecht über Anwendungsbeispiele mit RuheSoft angemeldet und im Veranstaltungsprogramm aufgenommen.

Veröffentlichungen

In Heft 10 der FRIEDHOFSKULTUR erschien unter dem Titel *RuheSoft zur Ermittlung der Ruhefrist* der erste Teil eines umfassenden Fachbeitrages über RuheSoft.

Der Beitrag ist in Anhang 5 beigefügt.

Der 2. Teil des Beitrages wird wahrscheinlich im Februar-Heft 2011 der FRIEDHOFSKULTUR erscheinen.

10. Literaturverzeichnis

- ADAM-SCHUMM K, 2004: Bodenatmung im regionalen Zusammenhang am Beispiel des Westallgäuer Hügellands : Erfassung, Steuerung und Bewertung. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 71
- AD HOC AG BODEN, 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung. Hannover, Schweizerbarth
- ALBRECHT MC 2008: Bodenkundlich-hygienische Untersuchung von Friedhofsflächen. Verwesungsstörungen auf dem Friedhof. Dokumentation und Ursachenermittlung. Hannover
- AUGUSTA U, 2007: Untersuchung der natürlichen Dauerhaftigkeit wirtschaftlich bedeutender Holzarten bei verschiedener Beanspruchung im Außenbereich, Hamburg
- BEKKU YS, NAKATSUBO T, KUME A, ADACHI M, KOIZUMI H. 2003: Effect of warming on the temperature dependence of soil respiration rate in arctic, temperate and tropical soils. *Applied Soil Ecology* 22: 205-210.
- BERTRAND AR, KOHNKE H, 1957: Subsoil conditions and their effect on oxygen supply and growth of corn roots. *Proceedings Soil Sciences Society of America* 21: 135-140.
- BIESALSKI HK, FÜRST P, KASPER H, KLUTHE R, PÖLERT W, PUCHSTEIN C, STÄHELIN HB, 1995: ERNÄHRUNGSMEDIZIN. NEW YORK, GEORG THIEME VERLAG STUTTGART
- BLUME HP, BRÜMMER GW, HRON R, KANDELER E, KÖGEL-KNABNER I, KRETZSCHMAR R, STAHR K, WILKE BM., 2010: Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Aufl. Heidelberg: Spektrum
- BRISCHKE, C; RAPP, AO (2008): Dose-response relationships between wood moisture content, wood temperature and fungal decay determined for 23 European field test sites. IN: *Wood Sciences Technology* 42; 507-518
- BRISCHKE C, ROLF-KIEL H, 2009: Durability of European oak (*Quercus* spp.) in ground contact- A case study on fence post in service. *Eur. J. Wood Prod.* 68: 129-137
- CARTER DO, TIBBETT M, 2006: Microbial decomposition of skeletal muscle tissue (*ovis aris*) in a sandy loam soil at different temperatures. *Soil Biology and Biochemistry* 38: 1139-1145
- FANG C, MONCRIEFF JB, 2005: The variation of soil microbial respiration with depth in relation to soil carbon composition. *Plant and Soil* 268: 243-253.
- FÉHER D, 1934: Untersuchungen zur Schwankung der Bodenatmung. *Archives of Microbiology* 5 (1)

- FLÜHLER H, 1972: Sauerstofftransport im Boden. Dissertation ETH Zürich
- FRÜND HC, ANLAUF R, MEYER A, 2010: Entwicklung eines Verfahrens zur Abschätzung der Sauerstoffversorgung des Unterbodens als Kenngröße für die Bewertung des Stoffumsetzungspotenzials. Schlussbericht FH³ Forschungsprojekt, FKZ 1747X05
- GÜSE 2010: PERSÖNLICHE MITTEILUNGEN
- HIBBARD KA, LAW BE, REICHSTEIN M, SULZMAN J, 2005: An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems. *Biogeochemistry* 73: 29-70.
- HILLEL D, 1998: Environmental soil physics. San Diego, Academic Press
- HYGIENERICHTLINIEN NRW (2003): Hygiene-Richtlinien für die Anlage und Erweiterung von Begräbnisplätzen. RdErl. d. Ministers für Arbeit, Gesundheit und Soziales v. 21.8.1979 - V C 2 - 0265.2 (am 1.1.2003 MGSFF)
- KROECKEL L, STOLP H, 1985: Influence of oxygen on denitrification and aerobic respiration in soil. *Biology and Fertility of Soils* 1: 189-193
- LAL R, SHUKLA MK (2004): Principles of soil physics. Ohio, New York USA, Marcel Dekker Inc.
- LLOYD J, TALYOR JA, 1994: On the temperature dependency of soil respiration. *Functional Ecology* 8: 315-323
- METEOROLOGISCHER DIENST DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK 1984 , Klimadaten der Deutschen Demokratischen Republik - Ein Handbuch für die Praxis - Reihe B Band 6 "Verdunstung". Potsdam
- METEOROLOGISCHER DIENST DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK 1987: Klimadaten der Deutschen Demokratischen Republik - Ein Handbuch für die Praxis - Reihe B Band 14 "Klimatologische Normalwerte 1951/80". Potsdam
- MOLDRUP P, OLESEN T, ROLSTON DE, YAMAGUCHI T, 1997: Modeling diffusion and reaction in soils: VII. predicting gas and ion diffusivity in undisturbed and sieved soils. *Soil Science* 162: 632-640
- ROLSTON DE, 1986: Gas Flux. In: *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Agronomy Monograph no. 9. Ed. A. Klute. S. 1103-1119. Am. Soc. Agron., Madison, WI
- SCHLIEPER, CA, 1992: Grundfragen der Ernährung. Hamburg, Dr. Felix Büchner-Handwerk und Technik

- SIERRA J, RENAULT P, 1995: Oxygen consumption by soil microorganisms as affected by oxygen and carbon dioxide levels. *Applied Soil Ecology* 2: 175-184
- SWIFT MJ, HEAL OW, ANDERSON JM, 1979: *Decomposition in terrestrial ecosystems*. Oxford/Edinburgh: Blackwell Publishing Ltd
- TA GRABMAL, 2009: *Technische Anleitung zur Standsicherheit von Grabmalanlagen*. Deutsche Naturstein Akademie e.V.
- TIBBET M, CARTER DO, 2008: *Soil analysis in forensic taphonomy*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group
- VAN ACKER J, STEVENS M, CAREY J, SIERRA-ALVES R, MILITZ H, LE BAYON I, KLEIST G, PEEK RD, 2003: Biological durability of wood in relation to end-use. *Holz als Roh- und Werkstoff* 61: 35-45
- VIEHWEG FJ, 1995: Gießarbeit auf Friedhöfen - Technik und Kostenstruktur. *Taspo Gartenbaumagazin* 6/1995: 8-10.
- WOURTSAKIS, A, 2002: Bodenkundliche und hydrogeologische Anforderungen für die Erdbestattung. *Konfliktfeld Friedhof - Verwesungsproblematik Umweltrisiko Sanierung*. Mainz: Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz

11. Anhang

11.1 Anhang 1: Literaturwerte zur Bodenatmung

Bodenatmung	Boden	Quelle	Bemerkung
mg CO ₂ -C m ⁻² h ⁻¹			
44.3	Luvisol Buche und Eiche	Beyer (1991)	Temperaturkorrigierte Bodenatmung (10°C)
43.2	Luvisol konventioneller Acker	Beyer (1991)	Temperaturkorrigierte Bodenatmung (10°C)
59.1	Luvisol ökologischer Acker	Beyer (1991)	Temperaturkorrigierte Bodenatmung (10°C)
36.4	Podzol Buche und Eiche	Beyer (1991)	Temperaturkorrigierte Bodenatmung (10°C)
52.3	Podzol konventioneller Acker	Beyer (1991)	Temperaturkorrigierte Bodenatmung (10°C)
46.6	Podzol ökologischer Acker	Beyer (1991)	Temperaturkorrigierte Bodenatmung (10°C)
388.4	toniger Lehm mit Futterkohl	Currie (1970)	17 °C Temperatur in 30 cm Bodentiefe
178.6	toniger Lehm Brache	Currie (1970)	17 °C Temperatur in 30 cm Bodentiefe
33.48	toniger Lehm mit Futterkohl	Currie (1970)	3 °C Temperatur in 30 cm Bodentiefe
13.39	toniger Lehm Brache	Currie (1970)	3 °C Temperatur in 30 cm Bodentiefe
334.4	Braunerde (Piceea excelsa, Pinus nigra)	Feher (1934)	Jahresdurchschnitt 1932 Sopron
210.3	Braunerde (Piceea excelsa, Pinus nigra)	Feher (1934)	Jahresdurchschnitt 1933 Sopron
289.9	Braunerde (Quercus robur)	Feher (1934)	Jahresdurchschnitt 1932 Sopron
280.1	Braunerde (Quercus robur)	Feher (1934)	Jahresdurchschnitt 1933 Sopron
234.0	Braunerde (Brache)	Feher (1934)	Jahresdurchschnitt 1932 Sopron
201.3	Braunerde (Brache)	Feher (1934)	Jahresdurchschnitt 1933 Sopron
521.2	Braunerde (Piceea excelsa, Pinus nigra)	Feher (1934)	Jahresmaximum 1932 Sopron
446.7	Braunerde (Piceea excelsa, Pinus nigra)	Feher (1934)	Jahresmaximum 1933 Sopron
621.8	Braunerde (Quercus robur)	Feher (1934)	Jahresmaximum 1932 Sopron
565.6	Braunerde (Quercus robur)	Feher (1934)	Jahresmaximum 1933 Sopron

567.5	Braunerde (Brache)	Feher (1934)	Jahresmaximum 1932 Sopron
459.0	Braunerde (Brache)	Feher (1934)	Jahresmaximum 1933 Sopron
241.5	Belgien	Hibbard et al (2005)	Maximum
177.6	Hessen	Hibbard et al (2005)	Maximum
103.7	sommergrüner Laubwald (gemäßigtes Klima)	Hibbard et al (2005)	Jahres- und Standortmittelwert
48.5	Weideland (CC)	Kellman et al. (2007)	Kanada
32.1	Wald (CC)	Kellman et al. (2007)	Kanada
51.9	Weideland (P)	Kellman et al. (2007)	Kanada
26.9	Wald (P)	Kellman et al. (2007)	Kanada
25.1	cambic podzol (Fichtelgebirge, Bayern)	Subke et al. (2003)	16.11.99
160.7	cambic podzol (Fichtelgebirge, Bayern)	Subke et al. (2003)	26.07.99
319.3	Kulluvisol KK(Baden-Württemberg)	Kleber (1997)	Maximum 1993-1995 Grünland
25.0	Kulluvisol KK(Baden-Württemberg)	Kleber (1997)	Minimum 1993-1995 Grünland
292.0	Braunerde-Hangglely HMV (Baden-Württemberg)	Kleber (1997)	Maximum 1993-1995 Grünland
27.3	Braunerde-Hangglely HMV (Baden-Württemberg)	Kleber (1997)	Minimum 1993-1995 Grünland
287.5	Gley-Pseudogley HMN (Baden-Württemberg)	Kleber (1997)	Maximum 1993-1995 Grünland
30.7	Gley-Pseudogley HMN (Baden-Württemberg)	Kleber (1997)	Minimum 1993-1995 Grünland
276.1	Gley-Kolluvisol HFV (Baden-Württemberg)	Kleber (1997)	Maximum 1993-1995 Grünland
27.3	Gley-Kolluvisol HFV (Baden-Württemberg)	Kleber (1997)	Minimum 1993-1995 Grünland
290.9	Gley-Kolluvisol HFN (Baden-Württemberg)	Kleber (1997)	Maximum 1993-1995 Grünland
26.1	Gley-Kolluvisol HFN (Baden-Württemberg)	Kleber (1997)	Minimum 1993-1995 Grünland
328.4	Anmoorgley SR (Baden-Württemberg)	Kleber (1997)	Maximum 1993-1995 Grünland
8.0	Anmoorgley SR (Baden-Württemberg)	Kleber (1997)	Minimum 1993-1995 Grünland
410.2	Kolluvisol HFV (Siggen)	Adam-Schumm (2004)	Maximum 1996-1998 Grünland

22.7	Kolluvisol HFV (Siggen)	Adam-Schumm (2004)	Minimum 1996-1998 Grünland
421.7	Kolluvisol OHG (Oberweiler)	Adam-Schumm (2004)	Maximum 1996-1998 Grünland
33.5	Kolluvisol OHG (Oberweiler)	Adam-Schumm (2004)	Minimum 1996-1998 Grünland
380.7	Braunerde AGI (Artisberg)	Adam-Schumm (2004)	Maximum 1996-1998 Grünland
21.6	Braunerde AGI (Artisberg)	Adam-Schumm (2004)	Minimum 1996-1998 Grünland
398.9	Braunerde AGE (Artisberg)	Adam-Schumm (2004)	Maximum 1996-1998 Grünland
12.5	Braunerde AGE (Artisberg)	Adam-Schumm (2004)	Minimum 1996-1998 Grünland
410.2	Auengley AGA (Aichstetten)	Adam-Schumm (2004)	Maximum 1996-1998 Grünland
23.9	Auengley AGA (Aichstetten)	Adam-Schumm (2004)	Minimum 1996-1998 Grünland
364.8	Nassgley AGF (Aichstetten)	Adam-Schumm (2004)	Maximum 1996-1998 Grünland
19.3	Nassgley AGF (Aichstetten)	Adam-Schumm (2004)	Minimum 1996-1998 Grünland
338.6	Niedermoor WNI (Wangen)	Adam-Schumm (2004)	Maximum 1996-1998 Grünland
13.6	Niedermoor WNI (Wangen)	Adam-Schumm (2004)	Minimum 1996-1998 Grünland
206.8	Niedermoor WNE (Wangen)	Adam-Schumm (2004)	Maximum 1996-1998 Grünland
5.7	Niedermoor WNE (Wangen)	Adam-Schumm (2004)	Minimum 1996-1998 Grünland
168.2	Braunerde OWA (Oberweiler)	Adam-Schumm (2004)	Maximum 1996-1998 Wald
23.9	Braunerde OWA (Oberweiler)	Adam-Schumm (2004)	Minimum 1996-1998 Wald
134.1	Braunerde OWJ (Oberweiler)	Adam-Schumm (2004)	Maximum 1996-1998 Wald
9.1	Braunerde OWJ (Oberweiler)	Adam-Schumm (2004)	Minimum 1996-1998 Wald
208.0	Niedermoor SSW (Siggen)	Adam-Schumm (2004)	Maximum 1996-1998 Wald
33.0	Niedermoor SSW (Siggen)	Adam-Schumm (2004)	Minimum 1996-1998 Wald

11.2 Anhang 2: mittlerer jährlicher Verlauf von Niederschlag und potentieller Evapotranspiration

KWBa	n	NS Jan (mm)	NS Feb (mm)	NS Mrz (mm)	NS Apr (mm)	NS Mai (mm)	NS Jun (mm)	NS Jul (mm)	NS Aug (mm)	NS Sep (mm)	NS Okt (mm)	NS Nov (mm)	NS Dez (mm)	NS Jahr (mm)
0		45	38	45	46	60	71	62	63	49	46	52	55	632
±	21	9	7	9	5	7	8	7	5	6	6	9	11	67
1		49	40	46	51	66	78	72	67	55	49	55	57	689
±	18	9	9	11	7	11	13	8	19	6	6	9	13	80
2		63	46	57	53	64	76	76	74	67	67	77	73	793
±	22	6	8	7	9	15	15	10	10	9	12	11	7	50
3		65	55	63	67	86	103	93	93	69	61	72	74	902
±	11	12	4	7	8	15	18	15	17	10	5	8	13	70
4		78	54	67	63	73	84	95	95	86	86	99	94	976
±	3	4	9	10	18	20	27	13	7	4	5	10	8	93
5		109	85	96	89	100	120	122	120	99	98	121	125	1282
±	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
6		140	115	124	115	127	155	148	144	112	110	142	155	1587
±	6	33	29	25	21	30	35	44	47	19	23	34	37	260
alle		62	50	57	58	71	85	80	78	64	61	71	72	810
±	80	27	22	23	20	23	27	26	27	19	20	27	29	261

NS: Niederschlag, ET0: potentielle Evapotranspiration, n. d.: nicht definiert, nach Daten von DWD 2010, FAO 2006, METEOROLOGISCHER DIENST DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK 1984, METEOROLOGISCHER DIENST DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK 1987

KWBa	n	ET0 Jan (mm)	ET0 Feb (mm)	ET0 Mrz (mm)	ET0 Apr (mm)	ET0 Mai (mm)	ET0 Jun (mm)	ET0 Jul (mm)	ET0 Aug (mm)	ET0 Sep (mm)	ET0 Okt (mm)	ET0 Nov (mm)	ET0 Dez (mm)	ET0 Jahr (mm)
0	21	14	18	39	66	98	113	118	100	67	37	19	13	698
±		3	4	8	8	9	6	9	7	5	5	4	3	64
1	18	11	15	33	59	89	107	110	95	64	35	16	11	643
±		3	5	11	10	10	7	11	8	7	6	5	3	79
2	22	13	16	34	58	89	102	106	92	63	36	19	13	639
±		2	2	5	7	8	8	9	6	5	3	2	2	48
3	11	12	17	37	63	92	106	113	97	66	37	19	12	669
±		3	4	8	9	10	9	12	9	7	5	5	3	78
4	3	12	15	32	56	87	108	108	95	62	34	17	11	631
±		3	3	8	10	5	8	16	13	12	10	3	3	90
5	n. d.	12	15	32	54	83	99	103	90	61	35	17	12	610
±		n. d.												
6	6	12	15	33	53	79	90	99	85	59	36	18	12	589
±		4	2	5	8	11	12	12	10	7	5	4	5	58
alle	80	12	16	35	60	91	106	110	95	64	36	18	12	655
±		3	3	8	9	10	10	11	9	6	5	4	3	71

NS: Niederschlag, ET0: potentielle Evapotranspiration, n. d.: nicht definiert, nach Daten von DWD 2010, FAO 2006, METEOROLOGISCHER DIENST DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK 1984, METEOROLOGISCHER DIENST DER DEUTSCHEN DEMOKRATISCHEN REPUBLIK 1987

11.3 Anhang 3: vanGenuchten-Parameter der Bodenartenhauptgruppen

Bodenarten- hauptgruppe	Material	θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	α	n	Ks (cm d^{-1})	l
II	1	0.2000	0.6900	0.0151	3.4250	68	0.5
	2	0.2000	0.6250	0.0161	2.9344	68	0.5
	3	0.1824	0.4800	0.0166	2.3720	26	0.5
	4	0.1822	0.4275	0.0186	2.1630	26	0.5
	5	0.1821	0.4275	0.0187	2.1529	26	0.5
Is	1	0.0674	0.5350	0.0189	2.4304	136	0.5
	2	0.0673	0.4950	0.0206	2.3404	136	0.5
	3	0.0573	0.3875	0.0189	2.3281	77	0.5
	4	0.0573	0.3500	0.0217	2.2155	77	0.5
	5	0.0574	0.3500	0.0208	2.3213	77	0.5
It	1	0.3425	0.7575	0.0137	3.6170	28	0.5
	2	0.3422	0.7025	0.0147	2.3137	28	0.5
	3	0.2722	0.5775	0.0200	1.3219	7	0.5
	4	0.2709	0.5150	0.0250	1.2680	7	0.5
	5	0.2709	0.5150	0.0250	1.2680	7	0.5
Iu	1	0.1200	0.5667	0.0133	3.1506	39	0.5
	2	0.1183	0.5133	0.0145	1.9994	39	0.5
	3	0.1199	0.4267	0.0111	2.5997	11	0.5
	4	0.1200	0.3800	0.0099	2.7837	11	0.5
	5	0.1200	0.3800	0.0099	2.7837	11	0.5
IsI	1	0.1533	0.6600	0.0164	3.0812	97	0.5
	2	0.1533	0.6100	0.0176	2.7379	97	0.5
	3	0.1300	0.4700	0.0172	2.7428	37	0.5
	4	0.0944	0.4300	0.0517	1.3330	37	0.5
	5	0.0948	0.4300	0.0518	1.3350	37	0.5
Iss	1	0.0400	0.5200	0.0292	2.6079	372	0.5
	2	0.0399	0.4800	0.0411	2.2113	372	0.5
	3	0.0299	0.4000	0.0470	2.1584	270	0.5
	4	0.0300	0.3700	0.0522	2.2954	270	0.5
	5	0.0300	0.3700	0.0522	2.2954	270	0.5
Isu	1	0.1100	0.5700	0.0137	3.0740	31	0.5
	2	0.1099	0.5150	0.0136	2.6311	31	0.5
	3	0.1099	0.4100	0.0110	2.5702	9	0.5
	4	0.1099	0.3700	0.0096	2.6857	9	0.5
	5	0.1099	0.3700	0.0096	2.6857	9	0.5
ItI	1	0.2827	0.7600	0.0179	2.1821	71	0.5
	2	0.2760	0.6867	0.0262	1.6672	71	0.5
	3	0.2631	0.6033	0.0187	2.2546	23	0.5
	4	0.2633	0.5333	0.0156	3.7095	23	0.5
	5	0.2633	0.5333	0.0156	3.7095	23	0.5
Itu	1	0.1794	0.6900	0.0173	2.2109	51	0.5
	2	0.1800	0.6200	0.0156	2.8444	51	0.5
	3	0.1749	0.5050	0.0136	2.6312	17	0.5
	4	0.1750	0.4350	0.0134	3.1683	17	0.5
	5	0.1750	0.4350	0.0134	3.1683	17	0.5

Bodenarten- hauptgruppe	Material	θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	α	n	Ks (cm d^{-1})	l
us	1	0.0850	0.5400	0.0153	2.8509	72	0.5
	2	0.0849	0.5000	0.0162	2.4779	72	0.5
	3	0.0649	0.3950	0.0153	2.4117	33	0.5
	4	0.0639	0.3600	0.0163	2.0029	33	0.5
	5	0.0640	0.3600	0.0163	2.0167	33	0.5
ut	1	0.2633	0.7200	0.0140	3.6315	33	0.5
	2	0.2632	0.6633	0.0150	2.4270	33	0.5
	3	0.2563	0.5667	0.0152	2.2362	15	0.5
	4	0.2563	0.5000	0.0164	2.1889	15	0.5
	5	0.2563	0.5000	0.0164	2.1914	15	0.5

11.4 Anhang 4: Interview veröffentlicht im Buxtehuder und Stader Tageblatt

Wenn nach 25 Jahren die Gräber nicht leer sind

Studie der Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Laut einer Studie der Deutschen Bundesstiftung Umwelt hat heute jeder vierte von über 40000 deutschen Friedhöfen Probleme mit dem Verwesungsprozess der Leichen. Wenn nach dem Ablauf der Ruhefrist - meist 25 Jahre - eine Wiederbelegung vorgesehen ist, dann sind viele Gräber nicht wie erhofft leer. Die Diskussion über menschliche Überreste, die durch Umwelteinflüsse aber auch Hightech-Materialien nicht natürlich abgebaut werden, wurde lange als überflüssig und pietätslos empfunden. Bis sich verschiedene Hochschulen dem Problem wissenschaftlich näherten. Einer der Forscher: Der Steinkirchener Dr. Michael Carl Albrecht. Das Interview führte TAGEBLATT-Redakteurin Miriam Fehlbus.

TAGEBLATT: Sie haben ein Computerprogramm mitentwickelt, das den Namen RuheSoft trägt. Darin vereinen sich die Begriffe Ruhefrist und Software. Für alle, die sich naturgemäß ungerne mit dem Thema Friedhof und Verwesungszeiträume beschäftigen, klingt das eigenartig. Warum müssen oder sollten sich moderne Friedhofsverwaltungen Gedanken über die Ruhefristen auf Friedhöfen machen?

Dr. Albrecht: Anders als etwa in den USA oder England, wo das ewige Ruherecht gilt, gibt es in Deutschland auf den Friedhöfen eine Wiederbelegungsregelung. Das heißt, die Ruhefrist bis zu dem Zeitpunkt der Wiederbelegung des Erdgrabs muss so bemessen sein, dass die Leichenzersetzung vollständig abgeschlossen ist. Dabei ist der Gewebeabbau abgeschlossen, und es sind dann noch Großknochen wie Schädel, Becken und Oberschenkelknochen vorhanden. Häufig wird auch von den Grabnutzern eine kürzere Nutzungsdauer gewünscht. Nicht zuletzt wegen des finanziellen Aspekts. Mit Hilfe des Programms RuheSoft können anhand der örtlichen Gegebenheiten wie Klima, Feuchte, Boden durch eine Simulation Prognosen über die voraussichtliche Dauer des Leichenabbaus und somit über die nötige Liegezeit gestellt werden.

TAGEBLATT: Im Kreis Stade gibt es auf den Friedhöfen auch unterschiedlich lange Ruhefristen. In Drochtersen-Hüll liegt die festgeschriebene Nutzungsdauer sogar bei 40 Jahren. Ist das eine normale Verlängerung der Frist bei problematischen Voraussetzungen, wie in diesem Fall durch den nassen, schweren Boden?

Dr. Albrecht: Wichtig für jeden Verwesungsprozess ist Sauerstoff. Wenn bei schweren Marschböden oder durch hochstehendes Grundwasser zu wenig Sauerstoff im Grab vorhanden ist, kann der Prozess der Zersetzung gestört werden. Aus der Erfahrung unserer Studie heraus würde ich sagen, dass in Hüll nach Ablauf der Ruhefrist die Leichenumsetzung nicht vollständig ist. Was nach 20 Jahren nicht weg ist, wird auch nach 40 Jahren nicht verschwunden sein. Die Weichen für die Zersetzung werden in den ersten Jahren gestellt. Über Graböffnungen könnte man feststellen, ob der Platz überhaupt als Friedhof geeignet ist. Natürlich können bei solch einer Graböffnung auch schaurige Dinge zu Tage treten, aber keine aktuelle Friedhofsverwaltung trägt die Verantwortung für das, was vor Jahrzehnten beschlossen wurde.

TAGEBLATT: An was für schaurige Dinge denken Sie?

Dr. Albrecht: Im ungünstigen Fall kann eine sogenannte Wachsleiche entstehen, der Zustand des Unverwesten bleibt dann mehr als 100 Jahre erhalten.

TAGEBLATT: Es gibt Mumien im heißen Ägypten, sind die "Unverwesten" im nassen Norddeutschland - Wachsleichen - so etwas wie Moorleichen?

Dr. Albrecht: Nein. Eine Moorleiche ist ganz etwas anderes. Da wird durch den Säuregehalt des Moores die Haut gegerbt und die Knochen zersetzt. Bei der Wachsleiche steht am Anfang durch die äußeren Verhältnisse eine Umlagerung von Körperfetten. Palmitinsäure und Stearinsäure sind gesättigte, weiß aussehende Fette, die sich dabei an der Außenseite der Haut ablagern. Man geht davon aus, dass sich dieser Zustand in den ersten zwei Jahren nach der Beerdigung entwickelt. Danach kann kein Sauerstoff mehr an die damit konservierten Körperteile kommen, es findet keine Verwesung mehr statt. Wachsleichen kommen in Norddeutschland immer mal wieder vor.

TAGEBLATT: Es heißt, die Böden auf Friedhöfen seien heute verwesungsmüde. Sind nicht mehr ausreichend Mikroorganismen, Pilze oder Kleinstlebewesen im Boden vorhanden?

Dr. Albrecht: Die Behauptung, der Boden sei verwesungsmüde geistert immer wieder als Begründung für schlechte Friedhofsböden durch die Friedhofsverwaltungen. Leichenzersetzung hat aber überhaupt nichts mit Würmern zu tun, das ist ein riesiger Irrtum. Alles, was für die natürlichste Sache der Welt, die Zersetzung eines Körpers, nötig ist, hat jeder Mensch in sich. Die Natur hat dafür gesorgt, dass alles sozusagen "on board" ist. Sie müssen nichts mehr hinzutun. Sofort bei Herzstillstand entwickeln die im Körper enthaltenen Enzyme eine ganz andere Wirkung als die, die sie während des Lebens hatten. Die natürliche Schutzbarriere gegen Magensäure oder Darmbakterien ist dann weg. Der Zersetzungsprozess beginnt von innen.

TAGEBLATT: Dann können Grabbeigaben wie im Internet beworbene "rote Pilze" das Problem nicht lösen?

Dr. Albrecht: Was sollen die bewirken? Das ist nichts als ein Gag von der Industrie. Wenn Sie die Rahmenbedingungen optimieren, löst die Natur alles von alleine.

Dr. Albrecht: In Knoxville-Tennessee (USA) gibt es die sogenannte Body Farm, wo die Verwesungsprozesse von Menschen wissenschaftlich nachvollzogen werden. In einem abgegrenzten Waldstück werden zum Beispiel sterbliche Überreste an der Oberfläche liegen gelassen oder in 30 Zentimetern Tiefe eingegraben. Man beobachtet dann, was passiert. Wie und wo Fliegenmaden vorkommen und was unter gewissen Umständen passiert. Auch

Laboruntersuchungen zeigen interessante Ansätze.

Nach meinen Untersuchungen ist gar nicht der Boden Schuld an Verwesungsstörungen auf dem Friedhof. In 75 Prozent der Problemfälle liegt es an den

Materialien, die bei der Bestattung benutzt werden. Zum Beispiel ist es wichtig, dass der Verstorbene in biologisch abbaubarer Kleidung bestattet wird. Auch

die Sargweise ist wichtig, es darf nirgends eine Kunststoffolie benutzt werden. Und gar nicht selten kommt es im Nachhinein durch die Grabpflege zu einer

Versiegelung. Eine Grabplatte oder Kies sind zwar pflegeleicht, können aber immense Nachteile im Erdreich nach sich ziehen.

TAGEBLATT: Es gibt Menschen, die sich aus Angst vor fehlgeschlagenen Verwesungsprozessen lieber einäschern lassen wollen. Was sagen Sie dazu?

Dr. Albrecht: Die Verbrennung in einem Krematorium ist nicht ganz unproblematisch und auch nicht die umweltfreundlichste Lösung. Dabei können Dioxine,

Furane und Schwermetalle in der Asche enthalten sein..

TAGEBLATT: Wie würden Sie selbst denn bestattet werden wollen?

Dr. Albrecht: Nur in der Erde, das ist klar. So hat es die Natur vorgesehen. Das Feuer in einem Krematorium ist im Vergleich zum langsamen Verwesungsprozess ja fast ein Gewaltakt und mit der Himmelfahrt aus meiner Sicht schwer vereinbar. (mf)

Der Experte für Friedhofsfragen

Michael Carl Albrecht (49) kommt aus Steinkirchen. Er machte zunächst auf einem landwirtschaftlichen Betrieb in Deinste eine Landwirtschaftslehre, bevor er

Agrarwissenschaften studierte. Seit 20 Jahren betreibt er ein Ingenieurbüro in Hannover (entera) und berät Friedhofsverwaltungen, auch aus dem Kreis Stade.

Weil bei der Neuanlage und Erweiterung von Friedhöfen immer auch das Wissen über Bodengüte gefragt war, lag der Weg zum vereidigten Sachverständigen

für die Bewertung von Friedhofsböden nicht so fern, wie es auf den ersten Blick scheint. Vor zwei Jahren promovierte Albrecht zum Thema Verwesungsstörungen und Ursachenermittlung. Von rund 400 Graböffnungen in Deutschland wurden die Ergebnisse dokumentiert und ausgewertet.

Fazit: Ein Großteil der Verwesungsstörungen auf Friedhöfen lässt sich auf Verwendung von Foliensargauskleidung und nicht-biologisch abbaubarer Pietätswäsche zurückführen. Regional vorhandene feuchte und schwere Böden verlangen gezielte Maßnahmen für eine Friedhofsnutzung.

Quelle: <http://tageblatt.de/db/Druckvorschau.cfm?DID=1898190>

Forschung

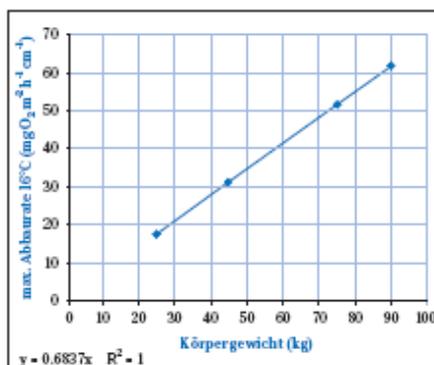
RuheSoft zur Ermittlung der Ruhefrist

Die Ruhefrist ist ein wichtiger Einflussfaktor für den erfolgreichen Betrieb eines Friedhofes. Lange Ruhefristen bedeuten schwer kalkulierbare Risiken für den Wirtschaftsbetrieb Friedhof. Von Seiten der Nutzungsberechtigten wird immer öfter der Wunsch nach einer Verkürzung des Nutzungsrechtes geäußert.

Je nach Bundesland sind unterschiedliche Mindestruhezeiten möglich. Für Friedhöfe ohne Erweiterungsmöglichkeit bietet eine Reduzierung der Ruhefrist die Möglichkeit, den Friedhofsbetrieb fortzuführen. In allen Fällen stellt sich hier die Frage, wie sich eine angemessene Ruhefrist bestimmen lässt.

Ruhefrist allgemein

Auf dem Friedhof soll innerhalb einer festgelegten Ruhefrist eine geordnete Bestattung mit einer ungehinderten Leichenverwesung stattfinden (Gaedke, 1997). Der als Ruhefrist bezeichnete Zeitraum soll so bemessen werden, dass die Leichenverwesung garantiert und eine Trauerbewältigung möglich ist. Innerhalb der Ruhefrist darf ein Grab nicht erneut belegt werden. Als Genehmigungsbehörde für die Ruhefristen ist in den meisten Fällen das Gesundheitsamt zuständig (Albrecht, 2004).



Hier steht einen kurze BU

(Quelle:)

Prognose der Ruhefristen

RuheSoft ist eine Fachanwendung zur Prognose über die voraussichtliche Dauer des Leichenabbaus unter definierten Rahmenbedingungen und dient somit der Berechnung der Ruhefristen von Sarg-Erdgräbern auf Friedhöfen. Diese Anwendung wurde von der Fachhochschule Osnabrück und der Ingenieurgesellschaft entera gemeinsam entwickelt. Finanziell unterstützte die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) das Projekt. Ziel war, einen ersten Ansatz zur Prognose von Verwesungszeiten in Abhängigkeit der natürlichen Umgebungsfaktoren (Boden und Klima) zu entwickeln. Auch sollten gestalterische und bewirtschaftungstechnische Maßnahmen berücksichtigt werden.

Das daraus entwickelte Modul basiert auf einem mathematischen Modell, in dem der Abbau eines Leichnams unter variablen Bedingungen simuliert wird. Grundlage des Modells sind Untersuchungen, die im Rahmen des FH3-Forschungsvorhabens „Entwicklung eines Verfahrens zur Abschätzung der Sauerstoffversorgung des Unterbodens als Kenngröße für die Bewertung des Stoffumsetzungspotenzials“ (Fründ, H.-C.; Anlauf, R.; Meyer, A., 2010) durchgeführt wurden. Eine Validierung des Modells erfolgte anhand von dokumentierten Graböffnungen (Albrecht, 2008).

Leichenumsetzung im Boden

Die Leichenverwesung ist ein mikrobieller Prozess, der wesentlich von der Sauerstoffversorgung abhängig ist (Schoenen, 2003). Bei der Erdbestattung werden Leichnam und Sarg im Erdboden versenkt und unterliegen somit den dort herrschenden Umweltbedingungen. Maßgeblich bestimmen die dort vorkommende Bodenart und die Bodenstruktur den Wasser- und Lufthaushalt und somit auch die Verwesungsdauer (Schützenmeister, 1972; Steensberg, 1972). Unter optimalen Bedingungen einer ausreichenden Sauerstoffversorgung verwest der Leichnam innerhalb von drei bis sechs Jahren, so dass

anschließend nur noch die Großknochen zu finden sind.

Das Modellierungskonzept

Der Austausch von Gasen zwischen der Atmosphäre und dem Boden kann über zwei Prozesse erfolgen: Konvektion und Diffusion. Hierbei wird Konvektion (auch Massenfluss genannt) durch Druckunterschiede aufgrund von Luftdruck- oder Temperaturunterschieden oder Windböen verursacht. Auch die Infiltration von Wasser oder Grundwasserschwan- kungen können solche Druckunterschiede zwischen zwei Tiefen im Bodenprofil verursachen. Gemeinhin wird der Anteil der Konvektion am Gasaustausch des Boden als eher gering eingestuft (Hillel, 1998).

Der für den Gasaustausch wichtigere Prozess im Hinblick auf den Boden ist die Diffusion. Das RuheSoft zugrunde liegende Modell bildet eindimensional die Sauerstoff-Diffusion durch den Boden zum Sarg nach. Im Bereich des Sarges wird hierzu ein temperaturabhängiger maximaler Sauerstoffverbrauch angenommen (Tibbett & Carter, 2008). Als Sauerstoffverbraucher zählt neben der Leiche auch der Holzarg. Zusätzlich relevant sind die Bekleidung und alle anderen Stoffe, die biologisch abbaubar sind. Allein für den mikrobiellen Abbau eines 75 Kilogramm schweren Leichnam mit rund 35 Prozent organischer Substanz, entsprechend 26,25 Kilogramm, werden 39 bis 65 Kilogramm reiner Sauerstoff benötigt. Dies entspricht 130 bis 220 Kubikmeter Luftvolumen (Schoenen, 2003).

Folgende Rahmenbedingungen gelten demnach für die Leichenumsetzung: Die O₂-Diffusion zum Sarg ist im Wesentlichen vom Verbrauch und den Diffusionskoeffizienten im Boden abhängig. Die Luftgehalte wurden aus den Wassergehalten und den Gesamtporenvolumina im Boden berechnet. Dabei wurden die Wassergehalte als Monatsmittelwerte aus Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes (Jahr) und der FAO (Jahr) berechnet. Der Gesamtverbrauch für die Verwesung eines 70 Kilogramm schweren Leichnams wurde mit durchschnittlich 50 Kilogramm O₂ angenommen.

Grabbewässerung führt zu einer Erhöhung des Wassergehalts und somit zur Reduzierung des Diffusionskoeffizienten.

Standorte mit Grund- und Stauwasser-einfluss im Grabbereich werden von der Betrachtung ausgenommen. Für Grab-abdeckungen werden Mindestanfor-derungen (notwendige diffusionsoffene Fläche) an einem berechneten Standort gegeben.

Gültigkeit von RuheSoft

Als Voraussetzung für die Modellierung mit RuheSoft wird eine Standard-Sargbet-setzung unterstellt, bei der alle Maßnah-men darauf abzielen, dass eine zügige Leichenumsetzung mit bestmöglicher Sauerstoffversorgung in den Boden statt-finden kann. Folgende Rahmenbedingun-gen sind dabei zu berücksichtigen:

- ◆ **Sargmaterial:** Der Sarg muss biolo-gisch abbaubar sein. Dies schließt beispielsweise wasserdichte Behältnissen wie Zinksärge aus (Schoenen, 2003). Auch eine Sargauskleidung mit Folien kann sich derart negativ auswirken, dass trotz guter bodenkundlicher Be-dingungen Wachsleichen auftreten, wenn Folien im Sarg zu einer Wann-enbildung für Niederschlags- und Gieß-wasser führen. Folienauskleidungen, die den Austritt von Gewebeflüssig-keit vermeiden sollen, sind daher gänzlich abzulehnen.
- ◆ **Bekleidung:** Die verstorbene Person erhält eine biologisch abbaubare Be-kleidung.
- ◆ **Grabebnbau:** Verdichtungen während des Wiederverfüllens des Grabes so-wie Einschlämmen mit Wasser kön-nen zu negativen Auswirkungen hin-sichtlich der Verwesung führen.
- ◆ **Grababdeckung und Grabpflege:** Für die Verwesung hat der freie Gasaus-tausch, das heißt die Sauerstoffver-sorgung, oberste Priorität. Daher sind alle Verfahren abzulehnen, die die Sauerstoffversorgung hemmen kön-nen oder sogar völlig unterbinden. Der Einsatz von Gießwasser im Rah-men der Grabpflege führt bei verdich-teten Böden zum Vernässen und so-mit auch zu einer eingeschränkten Sauerstoffversorgung.

Mit dem Festlegen der Ruhefrist wird also zunächst ein Zeitrahmen prognosti-ziert, der unter den oben genannten Be-dingungen als ausreichend für eine Ver-wesung angesehen wird. Eine optimierte Verwesung fordert günstige Bedingun-gen, um eine prognostizierte Wiederbe-legungszahl zu realisieren. Diese Anfor-derungen sollten auch Eingang in die Friedhofssatzung finden.

RuheSoft als Anwendung

RuheSoft kann in verschiedenen Anwen-dungen genutzt werden:

- ◆ als Stand-alone-Anwendung zur nume-rischen Simulation (Java),
- ◆ als Plugin für das GIS OpenJump für eine räumliche Visualisierung der Er-gebnisse und
- ◆ als Plugin für das Friedhofskataster DGF4 für eine räumliche Visualisie-rung der Ergebnisse und Anbindung an die Verwaltungssysteme HADES und FIM.

Dr. Michael C. Albrecht, Hannover

Literatur:

- Albrecht, M. C., 2008: Bodenkundlich-hygie-nische Untersuchung von Friedhofsflä-chen. Verwesungsstörungen auf dem Fried-hof. Dokumentation und Ursachenermitt-lung. Promotion an der Naturwissenschaft-lichen Naturwissenschaftlichen Fakultät der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover., Horizonte, Band 22. Der andere Verlag. ISBN: 978-3-89959-825-4
- Albrecht, M. C. 2004: Die Neufestlegung von Ruhefristen. Was ist zu beachten bei Graböffnungen und den Rückschlüssen für die Neubestimmung der Ruhefrist?, Der Hygieneinspektor, S. 39-43. Zeitschrift des Bundesverbandes der Hygieneinspektoren, 6. Jg., Nr. 2.
- Fründ, H.-C. ; Anlauf, R.; Meyer, A., 2010: Entwicklung eines Verfahrens zur Abschät-zung der Sauerstoffversorgung des Unter-bodens als Kenngröße für die Bewertung des Stoffumsetzungspotenzials. Schluss-bericht zum FH3-Forschungsprojekt, Osna-brück
- Gaedke, J., 1997: Handbuch des Friedhofs-und Bestattungsrechts. Carl Heymanns Verlag.
- Schoenen, D. & M. C. Albrecht, 2003: Die Verwesung aus hygienischer und boden-kundlicher Sicht. Schriftenreihe des Ver-eins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, Band 113.
- Schützenmeister, W., 1972: Die geologi-schen Bedingungen für Friedhofsstand-orte, Zeitschrift f. die gesamte Hygiene und deren Grenzgebiete, Band Jg. 18, H2, S. 87-90, Berlin
- Seensberg, J., 1972: Hygienische Forderun-gen an Friedhöfe, Bundesgesundheitsblatt, Band 15, Jg. 17, S. 241-248, Berlin.
- Tibbett & Carter, 2008: