

Tagungsbeitrag zu: Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft „Böden - eine endliche Ressource“, 05.-13.09.2009 Bonn  
 Kommission VIII, Thema: Spezielle Bodenschutzprobleme  
 Berichte der DBG (nicht begutachtete online Publikation)  
<http://www.dbges.de>

## **Aspekte der Sauerstoffversorgung bei Verwesungsprozessen im Unterboden**

Albrecht, M. C.<sup>1</sup>; Fründ, H.-C.<sup>2</sup>; Anlauf, R.<sup>2</sup>; Blohm, R.<sup>2</sup>; Meyer, A.<sup>2</sup>

### **Zusammenfassung**

Mittels eines Sauerstoff zehrenden Prozesses wurde in Säulenversuchen der Einfluss des Bodens auf Verwesungsprozesse im Unterboden untersucht. Aus den gewonnenen Daten wurden Modelle zur Prognose der Verwesungszeiten und der Sauerstoffkonzentrationen im Tiefenprofil von Böden erstellt.

**Schlüsselwörter:** Sauerstoff, Diffusion, Modell

### **Einleitung**

Ein auf deutschen Friedhöfen häufig auftretendes Problem ist die Bildung so genannter Wachsleichen. Diese entstehen durch Sauerstoffmangel während der Verwesung. Die hier vorliegenden Untersuchungen dienen der Entwicklung eines Basismodells zur Prognose von Ruhezeiten und zur Untersuchung des Einflusses bestimmter Standortbedingungen (z. B. Bewässerung oder die Verwendung von Steinplatten als Grababdeckung) auf die Verwesungszeiten.

### **Dekomposition und Sauerstoffzehrung**

<sup>1</sup> entera Ingenieurgesellschaft, Fischerstr. 3  
 30167 Hannover, albrecht@entera.de

<sup>2</sup> Fachhochschule Osnabrück, Fakultät A&L, Postfach 1940, 49009 Osnabrück,  
 hc.fruend@fh-osnabrueck.de

Der vollständige Abbau organischer Substanz ist immer mit Sauerstoffverbrauch verbunden. Sauerstoff bewegt sich jedoch in Flüssigkeiten 10<sup>4</sup>-mal langsamer als in Luft. Durch den Verbrauch von O<sub>2</sub> in Flüssigkeiten oder Körpern werden diese im Inneren anaerob und nur eine dünne Grenzschicht bleibt aerob.

Wird auch diese Grenzschicht anaerob, entsteht bei Kadavern Leichenwachs (Adipocire). Adipocire kann bei Sauerstoffzutritt unter bestimmten Bedingungen wieder abgebaut werden (FRÜND UND SCHOENEN, 2009). Bei ungenügender Sauerstoffversorgung kommt es dagegen zu flächigen Auflagen (Wachsleichen) und erheblich verlängerten Verwesungszeiten bis hin zur dauerhaften Konservierung (PFEIFFER ET AL. 1998).

### **Entwicklung eines sauerstoffzehrenden Modellprozesses**

Die pedologischen Einflussparameter der Verwesung wurden mit einem standardisierten sauerstoffzehrenden Modellprozess untersucht. Hierfür wurde eine mikrobielle Nährbouillon mit 25 g Trypticase-Soja-Bouillon l<sup>-1</sup> (TSB) angesetzt, mit Schweinegülle angeimpft und anschließend vorinkubiert. Die Sauerstoffzehrung der Bouillon wurde mittels Differenzbildung des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) gemessen und berechnet. Da in der Bouillon aerobe und anaerobe Prozesse parallel ablaufen, war eine Korrektur des CSB um den anaeroben Anteil notwendig. Hierzu wurde unter verschiedenen Versuchsbedingungen das Verhältnis von Sauerstoffverbrauch und CSB-Abnahme ermittelt (Tab. 1) und ein Korrekturfaktor berechnet

Tab. 1: Verhältnis von O<sub>2</sub>-Aufnahme zur CSB-Abnahme ( $\Delta$ CSB) in TSB bei verschiedenen Versuchsbedingungen

<b><u>Versuchsbedingungen</u></b>	<b><u>O<sub>2</sub>-Abnahme/<math>\Delta</math>CSB</u></b>
4 g TSB l <sup>-1</sup> durch Kanüle begrenzte Luftzufuhr	0,267
25 g TSB l <sup>-1</sup> durch Kanüle begrenzte Luftzufuhr	0,477
25 g TSB l <sup>-1</sup> geschlossener Topf	0,368

### **Versuche mit Bodensäulen**

Die verwendeten Bodensäulen (Abb. 1) sind 185 cm hoch und haben einen Durchmesser von 30 cm. Sie wurden mit 150 cm Boden (gestört) gefüllt. In 20, 50, 80, 110 und 140 cm Bodentiefe sowie oberhalb der TSB sind elektrochemische Sauerstoffsensoren installiert, die kontinuierlich die O<sub>2</sub>-Konzentration aufzeichnen (MEYER ET AL, 2007). Des Weiteren wurden Tensionen und Redoxpotential der Böden kontinuierlich gemessen. Die Sauerstoff zehrende Bouillon (25 g l<sup>-1</sup> TSB, 3500 ml) befindet sich in einem Edelstahltopf, der an den Diffusionsraum am unteren Ende der Säule angeschlossen wird. Boden und Diffusionsraum sind durch eine hydrophobe, diffusionsoffene Platte von einander getrennt.

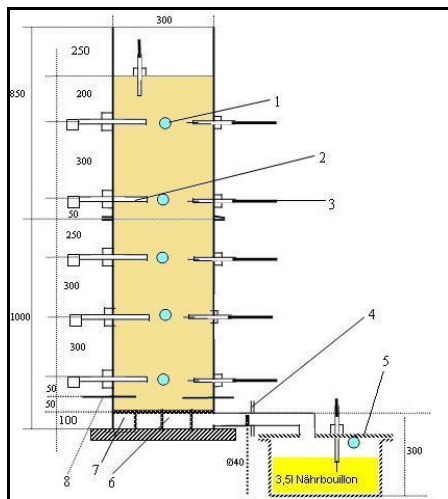


Abb. 1: Skizze der Säulenversuchsanlage mit  
1: Sauerstoffsonde; 2: Tensiometer; 3: Redoxsonde;  
4: Anschluss; 5: Topf; 6 : diffusionsoffene Platte;  
7: Diffusionsraum; 8: Saugkerzen

In den Versuchen wurden ein Sand (Ss) und ein toniger Schluff (Ut2) in verschiedenen Versuchsvarianten untersucht. Die Böden wurden in lufttrockenem Zustand sowie in 2 Bewässerungsstufen auf ihre Diffusionseigenschaften getestet. Des Weiteren wurden die Auswirkungen einer konkurrierenden O<sub>2</sub>-Zehrung im Oberboden auf die Verwesung untersucht. Ein Beispiel für den O<sub>2</sub>-Konzentrationsverlauf über die Tiefe nach fünf Tagen in Versuchen mit trockenem (U<sub>t</sub>), feuchten (U<sub>f</sub>; pF 1,8 in 140 cm) und einem nassen (U<sub>n</sub>; pF 1,8 in 80 cm) Schluff ist in Abb. 2 zu finden.

Die Unterschiede der Versuchsvarianten sind im Sauerstoffkonzentrationsprofil deut-

lich zu erkennen. Dies bestätigt sich auch in der Untersuchung der Abbaugeschwindigkeit der TSB in den Versuchen (Tab. 2).

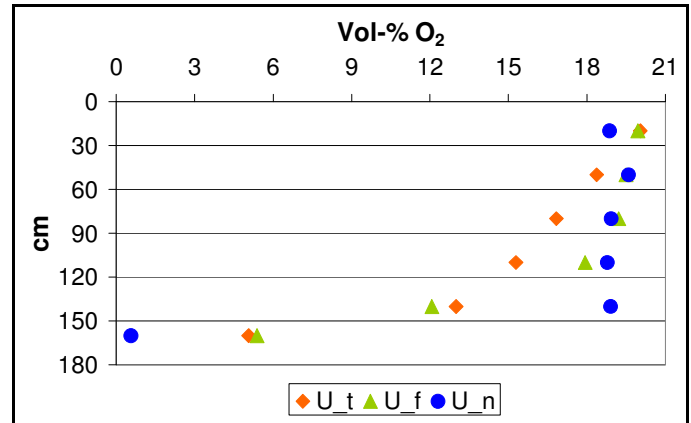


Abb. 2: Tiefenverlauf der O<sub>2</sub>-Konzentration für U<sub>t</sub>, U<sub>f</sub> und U<sub>n</sub> nach fünf Tagen

Tab. 2: Versuchszeit, ΔCSB und Abbaukoeffizient nach Kinetik erster Ordnung für die Versuche aus Abb. 2

Versuch	t (d)	ΔCSB (mg CSB)	Abbaukoeffizient (d <sup>-1</sup> )
U <sub>t</sub>	13,7	46467 ± 1361	6,48 10 <sup>-2</sup> ± 3,01 10 <sup>-3</sup>
U <sub>f</sub>	13,9	24280 ± 3327	2,56 10 <sup>-2</sup> ± 4,19 10 <sup>-3</sup>
U <sub>n</sub>	14,0	18188 ± 876	1,8 10 <sup>-2</sup> ± 9,96 10 <sup>-4</sup>

U<sub>t</sub>: lufttrockener Schluff; U<sub>f</sub>: Schluff mit pF 1,8 in 140 cm Tiefe; U<sub>n</sub>: Schluff mit pF 1,8 in 80 cm Tiefe

### Berechnung von Verwesungszeiten

Aus den in den Säulenversuchen gewonnenen Daten wurde ein eindimensionales Basismodell zur Berechnung von Verwesungszeiten programmiert. Es beruht auf der Gleichung zur Berechnung des Gasflusses im Boden:

$$\varepsilon \cdot \frac{dc}{dt} = \frac{d(D_s \cdot \frac{dc}{dz})}{dz} + P(z, t)$$

mit  $\varepsilon$ : luftgefülltes Porenvolumen (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>)  
D<sub>s</sub>: scheinbarer Diffusionskoeffizient  
c: Gaskonzentration  
z: Tiefe  
P: Quellen- bzw. Senkenterm

Abb. 3 zeigt die Übereinstimmung der gemessenen Sauerstoffkonzentrationen aus dem Säulenversuch mit nassem Sand mit den im

Modell berechneten Sauerstoffkonzentrationen im Boden.

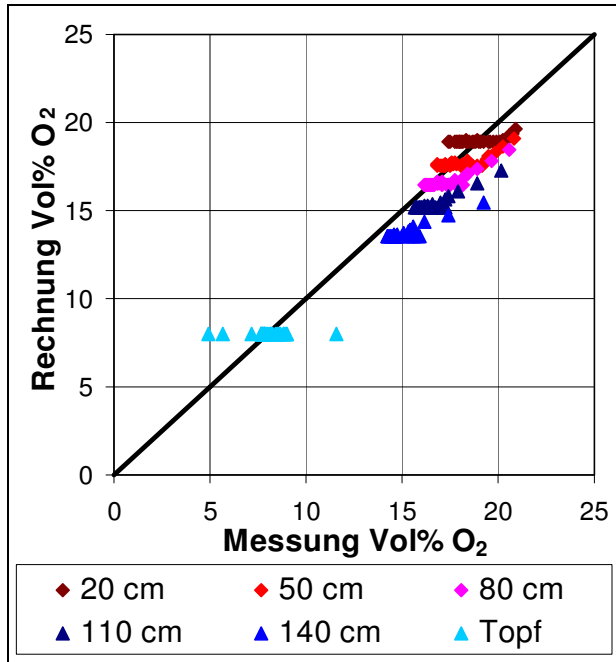


Abb. 3: Übereinstimmung von gemessenen und berechneten (Rechnung)  $O_2$ -Konzentrationen für einen Säulenversuch mit nassen Sand ( $pF$  1,8 in 80 cm) in Säule Nr. 2

Die berechneten Sauerstoffkonzentrationen resultieren aus einem  $O_2$ -Fluss durch den Boden, aus dem anschließend die Verwesungszeit für die eingegebenen Randbedingungen berechnet wird.

Mit dem Modell wurden verschiedene Szenarien berechnet:

1. **Normalsituation:** Hier wurde die „normale“ Friedhofsituation angenommen, wobei der Bodenwassergehalt (WG) in Winter und Frühjahr der Feldkapazität (FK) entspricht, im Sommer ist  $WG = 50\%$  FK und im Herbst  $WG = 75\%$  Feldkapazität. Hieraus wurde nach MOLDRUP (1997) über das luftgefüllte Porenvolumen der Diffusionskoeffizient berechnet.
2. **Gießwasser/Bewässerung:** Für das wiederholte Ausbringen von Gießwasser auf Gräber wurden die Randbedingungen wie in der Normalsituation angenommen, wobei jedoch im Sommer  $WG = 75\%$  FK gilt.
3. **Versiegelung:** Für die Verwendung von Grabplatten auf Friedhöfen wurden die Randbedingungen wie in der Normalsituation angenommen, jedoch wird eine

Einschränkung des Diffusionskoeffizienten an der Oberfläche von 95% angegeben.

In den obersten 3 Bodenabschnitten (jeweils 1 dm mächtig) wurde eine Sauerstoffzehrung durch Basal- und Wurzelatmung von 14, 10 und 8  $mg\ O_2\ m^{-2}\ h^{-2}\ cm^{-1}$  angenommen. Nach TIBBET UND CARTER (2008) wurde eine Sauerstoffzehrungsrate durch den Leichnam von 15  $g\ O_2\ m^{-2}\ h^{-1}\ cm^{-1}$  bei 50 kg  $O_2$ -Bedarf zur Dekomposition des Leichnams von 75 kg und einer Sarghöhe von 50 cm berechnet.

Zwischen den drei Szenarien zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Bodenarten (Abb. 4).

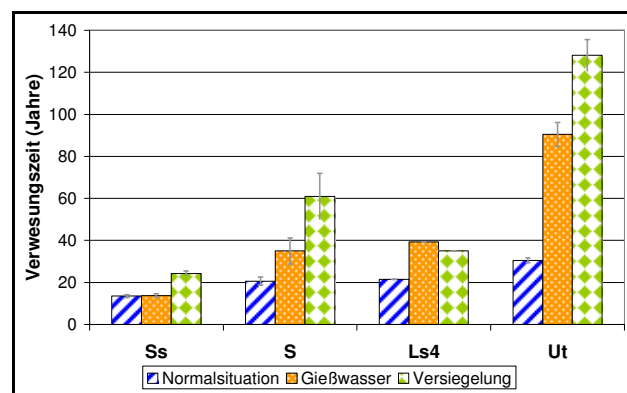


Abb. 4: berechnete Verwesungszeiten für die untersuchten Bodenarten in verschiedenen Szenarien (S umfasst S12, S1u und S2)

Bei dem untersuchten Sand zeigte die Bewässerung des Grabes keine Wirkung wogegen die Abdeckung mit einer Grabplatte zu einer Verlängerung der Verwesungszeit um zehn Jahre führt. Handelt es sich um einen Sand mit lehmigen oder schluffigen Anteilen, so ist schon im „Normzustand“ die Verwesungszeit (20,6 Jahre) länger als beim reinen Sand (13,5 Jahre). Bewässerung des Grabes führt hier zu einer Verlängerung der Verwesungszeit um 14 Jahre, bei Versiegelung sogar 40 Jahre länger. Am deutlichste ist für Standorte mit tonigem Schluff ausgeprägt:

Die „normale“ Verwesungszeit beträgt dann 31 Jahre, mit Bewässerung 90 Jahre und mit Grabplatte (95% Reduktion des Luftaustausches) 130 Jahre.

Für eine differenzierte Betrachtungsweise wurde ein zweidimensionales Modells von SCHACK-KIRCHNER (1997) zur Prognose von Sauerstoffgehalten im Boden für die Begräb-

nissituation auf einem Friedhof angepasst. Hierbei können für die Grabsituation und den umgebenden Boden unterschiedliche Diffusionskoeffizienten und Zehrungsraten angegeben werden. Auch Bestattungstiefe und Grababstand sind variabel.

Abb. 5 zeigt ein Beispiel zur zweidimensionalen Modellierung. Die Daten und Randbedingungen wurden hier von MENGEDE UND BURGHARDT (2003) übernommen.

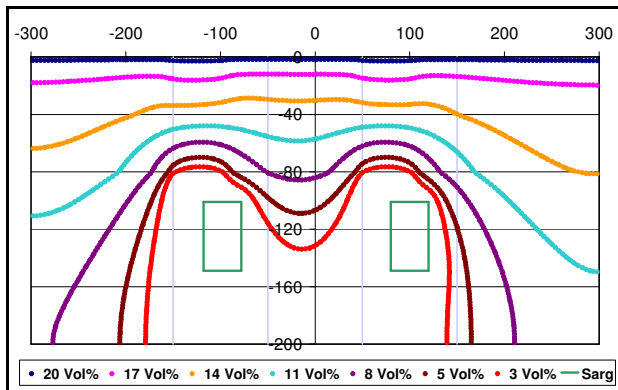


Abb. 5: Zweidimensionale Berechnung der Sauerstoffkonzentration (modifiziert nach SCHACK-KIRCHNER, 1994) mit den Isolinien der Sauerstoffkonzentration

Die Randbedingungen der Modellierung aus Abb. 5 sind in Tab. 3 niedergelegt.

Tab. 3: Randbedingungen der Modellberechnungen zu Abb. 5 (Diffusionskoeffizienten und Horizontierung übernommen von MENGEDE UND BURGHARDT 2003)

Tiefe cm	$D_s$ ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ )		$O_2$ -Produktion ( $\text{cm}^3 O_2 \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ )	
	Grab	Neben Grab	Grab	Neben Grab
0-10	0,0184	0,0090	$-1,35 \cdot 10^{-6}$	$-1,35 \cdot 10^{-6}$
10-25	0,0161	0,0097	$-4,58 \cdot 10^{-7}$	$-4,58 \cdot 10^{-7}$
25-40	0,0184	0,0184	$-2,30 \cdot 10^{-7}$	$-2,30 \cdot 10^{-7}$
40-80	0,0098	0,0094	$-4,32 \cdot 10^{-8}$	$-4,32 \cdot 10^{-8}$
80-96	0,0041	0,0044	$-3,10 \cdot 10^{-8}$	$-3,10 \cdot 10^{-8}$
96-200 (Sarg)	0,0044	0,0044	$-1,00 \cdot 10^{-12}$	$-1,00 \cdot 10^{-12}$
100-150 (Sarg)	0,207	0,0044	-0,0015	$-1,00 \cdot 10^{-12}$

### Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Verwesung eines Leichnams konnte im Projekt modellhaft durch den Abbau einer Trypticase-Soja-Bouillon ( $25 \text{ g TSB l}^{-1}$ ) beschrieben werden.

Das entwickelte Basismodell weist gute Übereinstimmungen mit den Säulenversuchen auf und kann daher zur Berechnung von Verweungszeiten verwendet werden.

Die bisher durchgeführten Berechnungen zeigen deutliche Einflüsse der Bodenart auf die Verweungszeiten. Die Bewässerung von Gräbern kann bei Böden schluffig-toniger Bodenart durch die Reduzierung der luftgefüllten Porenvolumens zu einer deutlichen Verlängerung der Verweungszeit führen. In sandigen Böden ist der Effekt als geringfügig anzusehen. Die vollständige Versiegelung eines Grabes durch eine Grabplatte hat bei allen untersuchten Böden eine Verlängerung der Verweungszeiten zur Folge.

Weiterführend wird die grundlegende Modellierung zur Berechnung von Verweungszeiten auf eine klima- und bodenartenabhängige Prognose erweitert werden. Auch die Auswirkungen von Grababdeckungen und Gießwasser sollen detaillierter betrachtet und berechnet werden.

### Literatur

- FRÜND H.-C., SCHOENEN, D. 2009: Quantification of adipocere degradation with and without access to oxygen and to the living soil. *Forensic Science International* 188: 18-22.
- MENGEDE, R.; BURGHARDT, W. 2003: Zur Störung der Gasdiffusion in Friedhofsböden. *Mitteilungen der DBG* 102: 529-530
- MEYER ET AL. 2007: Modellhafte Untersuchung eines Verwesungsprozesses im Unterboden. *Mitteilungen der DBG* 110/1: 371-372
- MOLDRUP, P. 1997: Modelling diffusion and reaction in soils: VII. Predicting gas and ion diffusivity in undisturbed and sieved soils. *Soil Sciences* 162 632-640
- PFEIFFER, S., MILNE, S., STEVENSON, R.M. 1998: The natural decomposition of adipocere. *Journal of Forensic Sciences* 43: 368-370.
- SCHACK-KIRCHNER H. 1994: *Struktur und Gashaushalt von Waldböden*. Göttingen
- TIBBETT M., CARTER D. O. 2008: *Soil analysis in forensic taphonomy*. CRC Press, Boca Raton