

TELMA	Band 17	Seite 95—108	6 Abb., 8 Tab.	Hannover, Dezember 1987
-------	---------	--------------	----------------	-------------------------

Modellversuche zur Grabenabdichtung im Sanduntergrund wiederzuvernässender Hochmoore*)

Rewetting Cutover Peatlands —
Model-Experiments for Sealing Ditches in the Sandy Subsoil

WALTER SCHÄFER, KATJA DAVID u. HERBERT KUNTZE**)

ZUSAMMENFASSUNG

In den Sanduntergrund einschneidende Entwässerungsgräben behindern eine Wiedervernässung von teilabgetorfte Hochmooren.

In Modellversuchen wurden verschiedene Materialien (Schwarztorf, Bunkererde, Bentonit) auf ihre Eignung als Material zur Grabenabdichtung überprüft. Dabei wurden verschiedene Abdichtungsprozesse

- Verdichtung des Abdichtmaterials,
- Sekundäre Abdichtung des Sanduntergrundes durch infiltrierte Material (mechanische Filterwirkung) untersucht.

In den Modellversuchen erwiesen sich die Varianten "Schwarztorf, verdichtet" und "Sand/Bentonit-Gemisch" als praktikable Verfahren zur Grabenabdichtung.

Sekundäre Abdichtungsprozesse konnten bei einigen Materialien (Schwarztorf-Suspension; Bunkererde) beobachtet werden, sie erwiesen sich bei kurzfristiger Betrachtung (10 Jahre) jedoch als zu ineffektiv.

SUMMARY

Ditches cut into the sandy subsoil impede a rewetting of cutover peatlands. Different materials (black peat, top spit, bentonite) were tested for their suitability of sealing these ditches.

*) Vortrag gehalten auf der Arbeitstagung der Sektion IV (Chemie, Physik und Biologie) der DGMT am 7.10.1986 in Meppen

***) Anschriften der Verfasser: Dr.W.SCHÄFER, Prof.Dr.H.KUNTZE, Nieders.Landesamt für Bodenforschung - Bodentechnologisches Institut Bremen, Friedrich-Mißler-Str. 46-50, D-2800 Bremen 1; Dipl.-Ing.agr.K.DAVID, Backhausstr.13, 3400 Göttingen.

Different sealing processes were examined

- compaction of the material,
- secondary sealing of the sandy subsoil by clogging with infiltrated material.

The treatments "black peat-compacted" and "sand/bentonite-mixture" showed the best sealing properties.

Secondary sealing by mechanical filtering was also observed for some other materials ("black peat-suspension", "top spit"), however the process of mechanical filtering is too ineffective in the short-term view (~ 10 years).

1. EINLEITUNG

Eine wichtige Voraussetzung für die Entstehung der Hochmoore ist die Ausbildung eines Staukörpers. Primäre, gering wasserdurchlässige natürliche Dichtungsschichten sind Geschiebelehm oder Ortsteinhorizonte, über denen sich das Niederschlagswasser aufstaut.

Wie Untersuchungen an Hochmoorprofilen zeigen (Tab. 1), sind mit dem weiteren Hochmoorwachstum sekundäre Dichtungshorizonte aus dem basalen, stark zersetzten Hochmoortorf (Schwarztorf) und dem fossilen oberen Mineralbodenhorizont (fAh) durch aus dem Moorkörper infiltrierte organische Substanzen entstanden.

Tab. 1: Bodenphysikalische Kennwerte eines wurzelechten Hochmoores (Mittelwerte aus Profilen im nordwestdeutschen Flachland) (KUNTZE et al., 1986)
Soil physical data of a true root raised bog (mean values from profiles in the Northwestern German Plain) (according to KUNTZE et al. 1986)

Horizont	Asche Gew. %	Rohdichte _{tr.} g/l	r-Wert %	kf-Wert cm/d
Hh1 Weißtorf	1,5	90	45	200
Hh2 Schwarztorf	1,5	100	70	1
f Ahe	93	1000	-	1
f Bh	98	1500	-	40
C	99	1700	-	150

Die durch Schwarztorfbildung und Selbstabdichtung des Mineralbodens entstandene sekundäre Basisdichtung eines wurzelechten Hochmoores läßt selbst unter dem hydraulischen Druck einer mehrere Meter mächtigen Wassersäule in einem nicht entwässerten Hochmoor nur eine im Verhältnis zur klimatischen Wasserbilanz vernachlässigbare Versickerung zu (EGGELSMANN, 1960; BLANKENBURG u. KUNTZE, 1987).

Entwässerungsgräben schneiden in teilabgetorften Hochmooren bei bewegtem Relief des Sanduntergrundes zum Teil in den Sanduntergrund ein und zerstören damit diese Basisdichtungen.

Eine aus moorkundlicher Sicht wichtige Voraussetzung für die Wiedervernässung solcher Abtorfungsflächen ist die Abdichtung der in den Gräben geschaffenen "Leaks" in der natürlichen Basisdichtung.

Es stellten sich daher die Fragen:

- a) Welche Materialien sind zur Grabenabdichtung geeignet?
- b) Wie verläuft der Abdichtungsprozeß?,
die durch Modellversuche (DAVID 1986) beantwortet werden sollten.

2. MATERIAL UND METHODEN

2.1 Untersuchungsmethoden

Es wurden folgende Untersuchungen nach den nachstehend angegebenen Verfahren bzw. DIN-Vorschriften durchgeführt:

Korngrößenverteilung - Sieb- und Schlämmanalyse nach DIN 19683, Bl. 2,

Rohdichte - in Stechzylindern nach DIN 19683, Bl. 12,

gesättigte Wasserdurchlässigkeit (kf) - in Stechzylindern mittels Haubenpermeameter nach HARTGE (1966),

Asche-Gehalt - Veraschung bei 550°C nach DIN 19684, Bl. 32,

Kohlenstoff-Gehalt - konduktometrisch nach trockener Verbrennung im O₂-Strom (SCHLICHTING u. BLUME 1966),

r-Wert in 72%iger H₂SO₄ nicht hydrolysierbare aschefreie organische Substanz nach DIN 11542, Bl. 5.

2.2 Abdichtungsmaterial

Die Abdichtungsmaterialien sollten folgende Bedingungen erfüllen:

- a) Geringe Kosten für Beschaffung und Transport,
- b) möglichst naturnahes Material,
- c) keine Eutrophierung der Hochmoore.

In teilabgetorften Hochmooren werden diese Bedingungen vom vorhandenen Schwarztorf und von der Bunkerde erfüllt.

Eine weitere relativ kostengünstige und technisch realisierbare Möglichkeit der Abdichtung wurde in der Verwendung von Bentonit als Abdichtungsmaterial gesehen. Neben diesen drei Materialien sollten gleichzeitig zwei verschiedene Einbaumethoden getestet werden.

Methode I: Das Abdichtungsmaterial wird bereits beim Einbau so stark verdichtet, daß sofort eine geringe gesättigte Wasserdurchlässigkeit erreicht wird:

Methode II: Sie setzt mehr auf die natürlichen Abdichtungsprozesse durch Ablagerung von überwiegend organischen Feinteilen auf der Sandoberfläche (Kaffeefilter-Effekt) und Infiltration von organischen Substanzen in den Mineralboden. Die Stoffverlagerung wird verstärkt, wenn das Abdichtungsmaterial als Suspension in die Gräben eingebracht wird.

Es wurden folgende Varianten geprüft:

- | | |
|-------------------------------|--|
| a) Schwarztorf | - verdichtet (Methode I) |
| | - Suspension (Methode II) |
| b) Bunkerde, schwach zersetzt | - verdichtet (Methode I) |
| c) Bunkerde, stark zersetzt | - verdichtet (Methode I) |
| d) Bentonit | - Sand/Bentonit-Gemisch
(Methode I) |

In den Tabellen 2 - 4 sind die Kenndaten der verwendeten Abdichtungsmaterialien dargestellt.

Tab. 2: Kenndaten des verwendeten Abdichtungsmaterials aus Torf Characteristics of the peat sealing materials			
Abdichtungsmaterial	Asche	Kohlenstoff- Gehalt	r-Wert
	Gew. %	Gew. %	Gew. %
Schwarztorf-Suspension	1,9	52	72
Schwarztorf - verdichtet	1,9	52	72
Bunkerde, schwach zersetzt	1,9	44	53
Bunkerde, stark zersetzt	6,5	48	71

Tab. 3: Kenndaten des verwendeten Sandes (als Sanduntergrund) Characteristics of the sand used as subsoil			
Asche	(Gew. %):	99,6	
Kohlenstoff- Gehalt	(Gew. %):	0,2	
Fe _d	(ppm)	94	
Körnung (in % des humusfreien Feinbodens)			
	: gS	2	- 0,6 mm : 0
	: mS	0,6	- 0,2 mm : 3
	: fS	0,2	- 0,1 mm : 49
	: ffs	0,1	- 0,06 mm : 41
	: U	0,06	- 0,002 mm : 6
	: T	<0,002	mm : 1

Tab. 4: Kenndaten des verwendeten Bentonits (Ca-Bentonit) (nach Angaben des Herstellers) Characteristics of the used Ca-bentonite (according to the declaration of the provider)	
Glühverlust	: 7,2 Gew. %
Trockenmasse	: 92 %
pH-Wert	: 10,0
Schüttdichte (gerüttelt)	: 980 g/l
Enslin-Wert (nach 8 Std.)	: ca. 550 %
Körnung: < 60µm	: 85 - 90 %
Fließgrenze	: 360 %
Ausrollgrenze	: 35 %
Korndichte	: 2,476 g/cm ³

2.3 Versuchsaufbau

Zur Durchführung der Modellversuche wurde in Plexiglaszylindern (50 cm Länge und 10,5 cm Durchmesser) zunächst Feinsand ($\hat{=}$ Sanduntergrund) eingebaut und mit dem jeweiligen Abdichtungsmaterial überschichtet. Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

Der Feinsand wurde mit einer Rohdichte von $1,7 \text{ g/cm}^3$ in einer 15 cm mächtigen Schicht eingebaut. Diese Lagerungsdichte entspricht weitgehend den natürlichen Lagerungsverhältnissen des C-Horizontes im Liegenden der wurzelechten Hochmoore (vgl. Tab. 1).

Die Abdichtmaterialien wurden in der in Tabelle 5 aufgeführten Weise eingebaut.

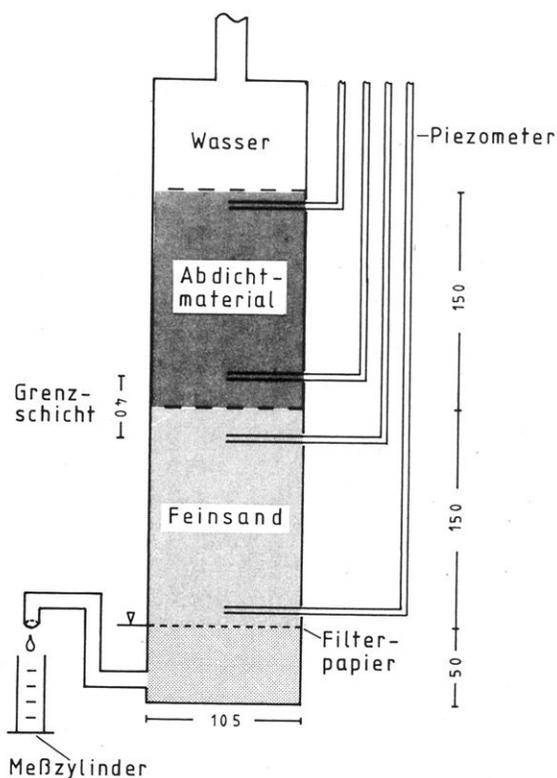


Abb. 1

Schematische Darstellung des Versuchsaufbaues (Modellsäule)
Scheme of the percolation columns

Tab. 5: Aufbau der Perkolationsssäulen Specification of the percolation columns						
Funktion	Vari- anten	Material	Schicht- mächtigk. i.d.Mo- dellsäule (cm)	Roh- dichte tr. g/l	Anzahl d.Wie- derho- lungen	Abkürzun- gen d. Va- rianten
Ab- dicht- mate- rial	1	Schwarztorf- suspension 1 Teil Torf + 3 Teile H ₂ O	15	43	4	ST. susp.
	2	Schwarztorf verdichtet	15	107	4	ST verd.
	3	Bunkerde, schwach zer- setzt (H4-5)	15	244	4	Bunk, H 5
	4	Bunkerde, stark zer- setzt (H7-8)	15	257	4	Bunk, H 8
	5	Bentonit, (5 Gew.%) + Sand	15	1428	4	Bent.+ S.
Sandunter- grund		Feinsand	15	1700		Sand

Gemessen wurde die durch die Säulen perkolierende Wassermenge in Abhängigkeit von der hydraulischen Druckhöhe (bis 150 cm Wassersäule) und der Zeit.

Mit Hilfe von Piezometern (s.Abb.1) war es möglich, gleichzeitig das hydraulische Potential sowohl in der Dichtungsschicht als auch in der Feinsandschicht zu messen. Dieses Vorgehen erlaubt die Berechnung der kf-Werte der verschiedenen Schichten (vgl. Abb. 1) mit Hilfe der DARCY-Gleichung:

$$k_f = \frac{Q \cdot l}{F \cdot \Delta h} \text{ (cm/d)}$$

wobei:

- kf = Wasserdurchlässigkeit (cm/d)
- Q = Abfluß (cm³/d) (\cong Au)
- Δh = hydraulische Druckhöhe (cm)
- l = Schichtmächtigkeit (cm)

Die Durchflußmengen (cm³) und -raten (cm³/d bzw. mm/a) wurden bei drei verschiedenen hydraulischen Druckhöhen gemessen:

1. 45 cm WS - 10 Tage Perkolationsdauer
2. 100 cm WS - 10 Tage Perkolationsdauer
3. 150 cm WS - 150 Tage Perkolationsdauer

Die Druckhöhen von 45 cm WS und 100 cm WS wurden jeweils so lange beibehalten, bis die eingebauten Piezometer konstante Werte anzeigten.

Um einen unterirdischen Abfluß (Au) von mehreren Jahren im Zeitrafferverfahren zu simulieren, wurden die Perkolationsversuche über einen Zeitraum von 150 Tagen bei einer Druckhöhe von 150 cm WS durchgeführt.

3. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

In Abbildung 2 sind die bei verschiedenen Druckhöhen (cm WS) gemessenen Perkolationsraten (mm/a) für die verschiedenen Materialien dargestellt.

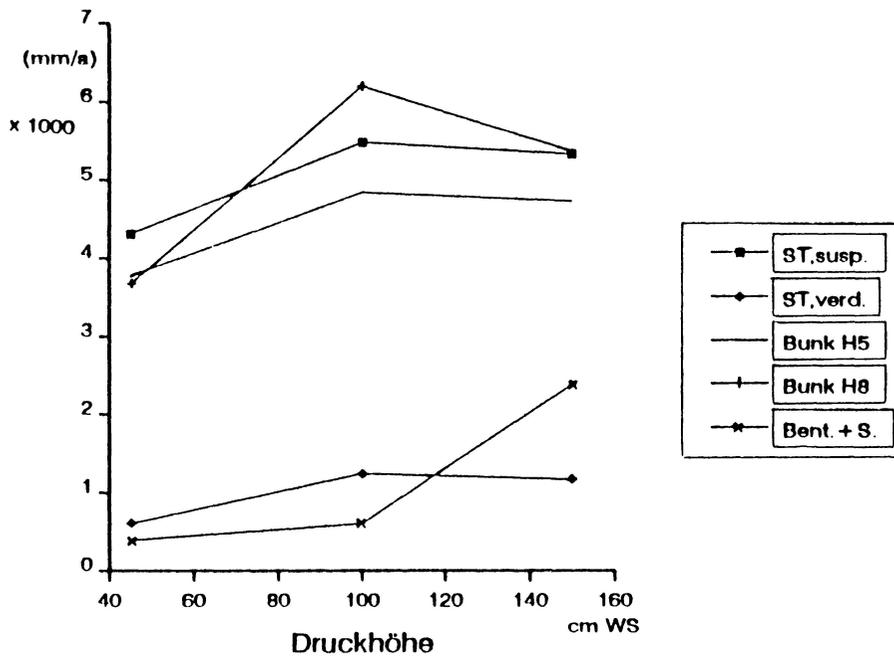


Abb. 2

Perkolationsrate (mm/a) der Modellsäulen in Abhängigkeit von der hydraulischen Druckhöhe (cm WS)

Percolation rate (mm/a) in the columns at various hydraulic heads

Man kann die geprüften Abdichtmaterialien und -verfahren hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Perkolationsraten in zwei Gruppen einteilen. Die geringsten Perkolationsraten wurden mit den Varianten "Schwarztorf, verdichtet" und "Sand/Bentonit-Gemisch" erzielt. Zu der Gruppe mit deutlich höheren Perkolationsraten sind die Variante "Schwarztorf-Suspension" und die beiden Bunkererdevarianten zu zählen.

Selbst die geringsten Perkolationsraten in diesem Modellversuch liegen mit ca. 500 mm/a noch weit über dem für eine Wiedervernässung tolerierbaren unterirdischen Abfluß (Au) von 50 mm/a (küstenfern) bis 100 mm/a (küstennah) (BLANKENBURG u. KUNTZE, 1987).

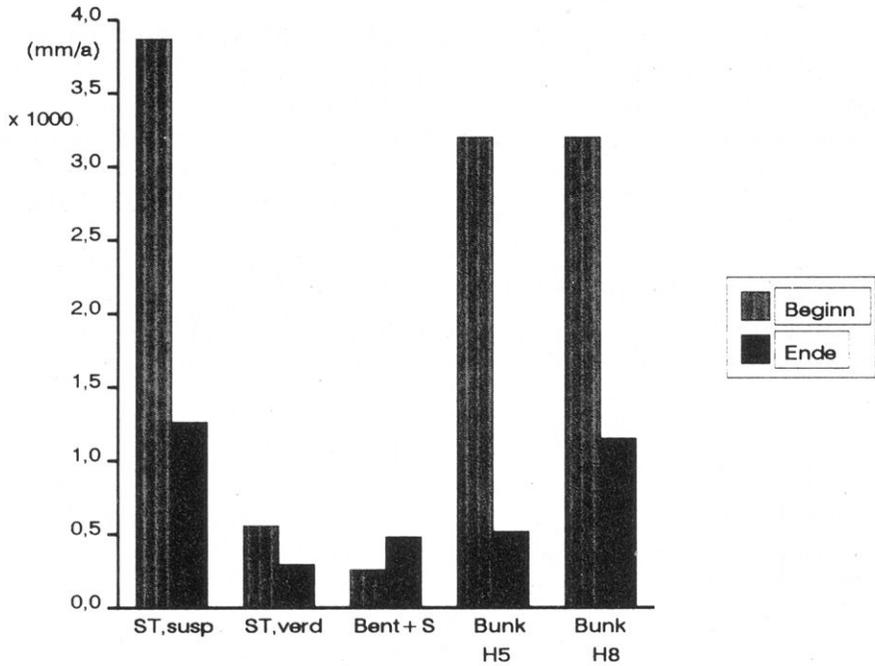


Abb. 3

Perkolationsrate (mm/a) bei 45 cm WS Druckhöhe zu Beginn und am Ende der Perkolationsperiode (150 Tage)

Percolation rate (mm/a) at a hydraulic head of 45 cm water table at the beginning and the end of the percolation period (150 days)

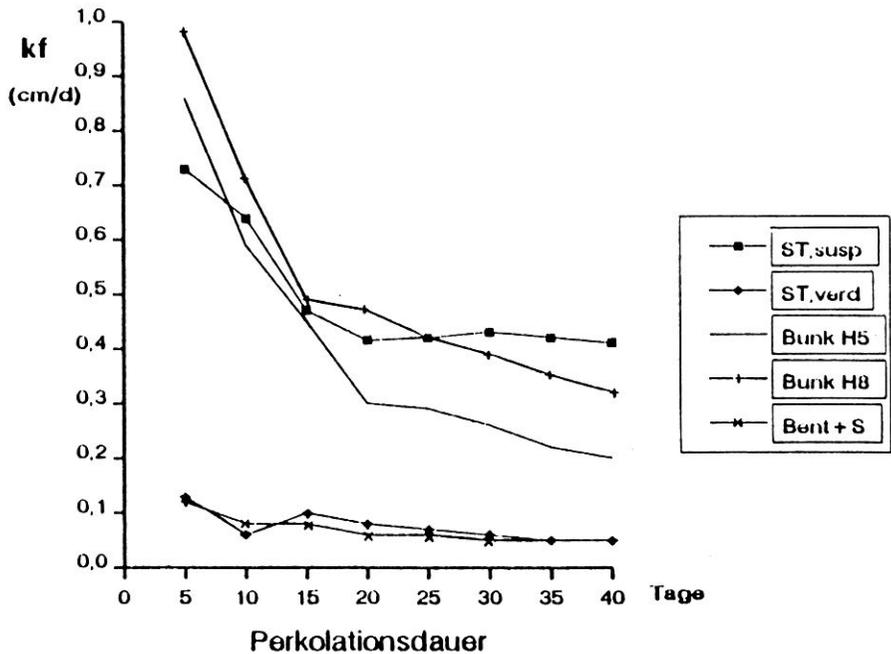


Abb. 4

Mittlere gesättigte Wasserdurchlässigkeit (cm/d) der gesamten Bodensäule in Abhängigkeit von der Perkolationsdauer

Saturated hydraulic conductivity (cm/d) of the total soil column as a function of percolation time

Die hohen Perkolationsraten sind trotz der zum Teil geringen k_f -Werte der Abdichtschichten (vgl. Abb. 6) mit der geringen Schichtdicke (15 cm) der Abdichtungen zu erklären (s. Punkt 4).

Abbildung 2 zeigt auch, daß mit steigender Druckhöhe von 45 cm auf 100 cm WS die Perkolationsrate entsprechend dem DARCY-Gesetz zunimmt. Bei weiterer Steigerung der hydraulischen Druckhöhe auf 150 cm WS bleibt jedoch bis auf die Variante "Sand + Bentonit" die Perkolationsrate konstant bzw. nimmt sogar ab. Da zum Zeitpunkt dieser Messungen bereits 20 Tage Perkolationszeit vergangen waren, ist dieses vom DARCY-Gesetz abweichende Perkolationsverhalten mit Selbstabdichtung zu erklären.

Abbildung 3 macht die Dimension dieses Selbstabdichtungseffektes bei den einzelnen Varianten deutlich. So sind bei den Varianten mit den geringsten Perkolationsraten ("Schwarztorf, verdichtet" und "Sand/Bentonit-Gemisch") keine wesentlichen Selbstabdichtungen zu erkennen, während die anderen Varianten sehr deutliche Effekte zeigen.

Der Prozeß und der Ort der Selbstabdichtung konnte mit Hilfe der in den Modellsäulen installierten Piezometern (vgl. Abb. 1) erfaßt werden.

Abbildung 4 zeigt sehr deutlich, wie bei den Varianten mit starker Selbstabdichtung der mittlere k_f -Wert der gesamten Bodensäule innerhalb von 40 Tagen Perkolationsdauer von k_f 0,8 - 1,0 cm/d auf k_f 0,2 - 0,45 cm/d verringert wird. Bei den beiden Varianten ohne Selbstabdichtung bleibt der k_f -Wert nahezu konstant bei ca. 0,1 cm/d.

Um den Ort dieser Selbstabdichtungsprozesse zu bestimmen, muß man die k_f -Werte der einzelnen Schichten in den Bodensäulen näher betrachten.

In Abbildung 5 sind zunächst die k_f -Werte der Abdichtmaterialien in Abhängigkeit von der Perkolationsdauer dargestellt. Die beiden Bunkerde-Varianten zeigen innerhalb 40 Tagen Perkolationsdauer eine deutliche Verringerung des k_f -Wertes von ca. 0,4 cm/d auf 0,1 cm/d, wobei sich die k_f -Werte hier bereits dem Wert 0,1 cm/d asymptotisch angenähert haben. Dies zeigt, daß in diesen beiden Varianten trotz Verdichtung beim Einbau noch Materialverlagerungen bzw. Setzungen stattfinden, welche den k_f -Wert herabsetzen.

Der nahezu konstante k_f -Wert von 0,05 cm/d der beiden Varianten "Bentonit + Sand" und "Schwarztorf, verdichtet" zeigt, daß in diesen Abdichtmaterialien kurzfristig keine Verlagerungs- bzw. Setzungsprozesse stattfinden. Wegen der flüssigen Konsistenz des Abdichtmaterials der Variante "Schwarztorf, Suspension" können für diese Variante keine k_f -Werte für die Abdichtschicht angegeben werden.

Die Grenzschicht zwischen Abdichtmaterial und Sanduntergrund erfaßt eine Schicht von 2 cm Abdichtmaterial und 2 cm Sanduntergrund (vgl. Abb. 1). An dieser Grenzschicht nehmen die k_f -Werte aller Varianten mit zunehmender Perkolationsdauer

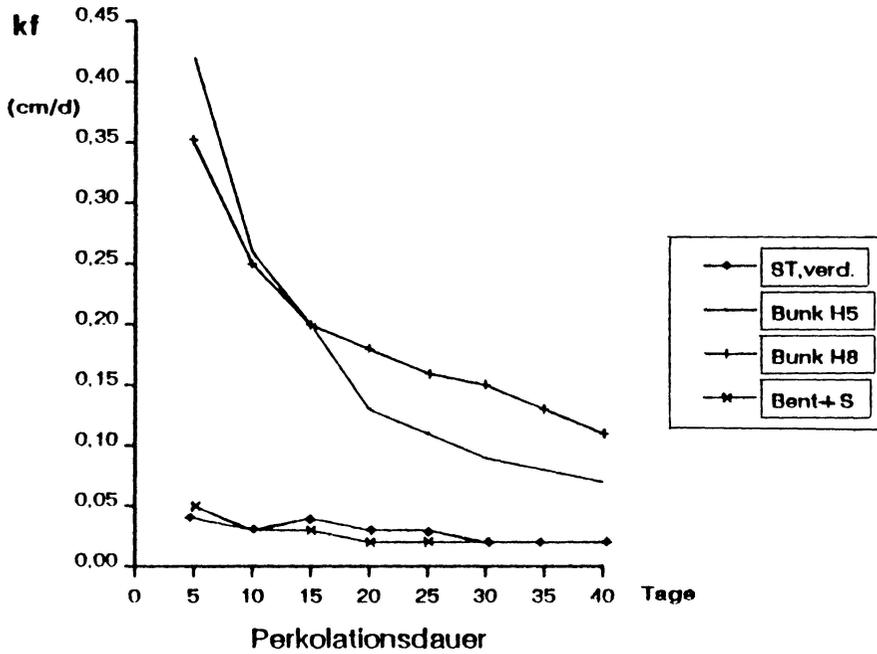


Abb. 5
 Gesättigte Wasserdurchlässigkeit (cm/d) des Abdichtmaterials in Abhängigkeit von der Perkolationsdauer
 Saturated hydraulic conductivity (cm/d) of the sealing materials as a function of the percolation period

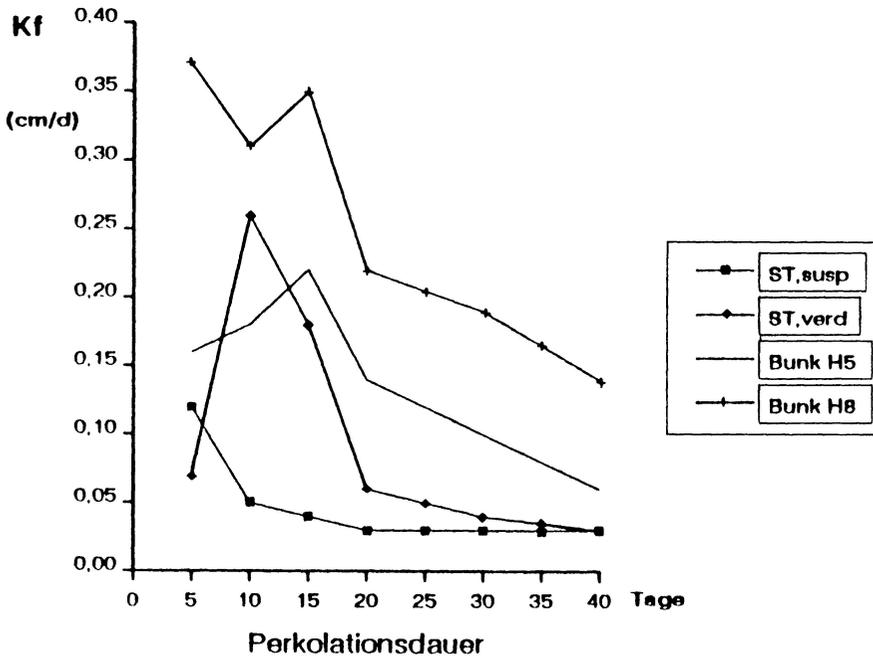


Abb. 6
 Gesättigte Wasserdurchlässigkeit (cm/d) der Grenzschicht Abdichtmaterial/Sanduntergrund in Abhängigkeit von der Perkolationsdauer
 Saturated hydraulic conductivity (cm/d) at the interface between the sealing material and the sandy subsol as a function of the percolation period

ab. Dieser Prozeß ist mit der Ablagerung von Feinteilen auf der Feinsandoberfläche wie auf einem Filter zu erklären (Kaffeefilter-Effekt), wobei sich eine dünne, sehr gering wasserdurchlässige Schicht ausbildet.

Die Abbildungen 5 und 6 zeigen sehr deutlich, daß bei den Varianten "Schwarztorf, verdichtet" und "Sand/Bentonit-Gemisch" der größte Abdichtungseffekt durch die Abdichtschicht selbst hervorgerufen wird. Die auch hier in geringem Maße vorhandene Selbstabdichtung (vgl. Abb. 6) trägt in dem betrachteten Zeitraum nicht wesentlich zu einer weiteren Verringerung der k_f -Werte bei.

Bei der Variante "Schwarztorf-Suspension" und den Bunkerde-Varianten erfolgt die Abdichtung in erster Linie durch Ablagerung von Feinteilen auf der Feinsandoberfläche. Neben den bereits dargestellten Abdichtungsmechanismen können auch in den eigentlichen Sandkörper infiltrierte feine Partikel bzw. Huminstoffe einen weiteren Abdichtungseffekt hervorrufen. Auch dieser Abdichtungseffekt im Sanduntergrund wurde gemessen und ist in Tabelle 6 anhand der k_f -Werte vor und nach den Perkolationsversuchen dargestellt.

Tab. 6: Wasserdurchlässigkeit des Sanduntergrundes der Modellsäulen zu Beginn und am Ende der Perkolationsversuche
Hydraulic conductivity of the sandy subsoil at the beginning and at the end of the percolation

Abdichtmaterial	Gesätt. Wasserdurchlässigkeit (cm/d) des Sanduntergrundes	
	zu Beginn	am Ende
	der Perkolationsversuche	
Schwarztorf-Suspension	258	0,4
Schwarztorf, verdichtet	267	165
Bunkerde, schwach zers.	200	100
Bunkerde, stark zersetzt	238	103

Es zeigt sich bei allen vier so getesteten Varianten eine Abnahme der Wasserdurchlässigkeit. Der deutlichste Abdichtungseffekt im Sanduntergrund war bei der Variante "Schwarztorf, Suspension" zu beobachten. Der k_f -Wert des Sandes wird hier von 258 cm/d auf 0,4 cm/d verringert.

Untersuchungen über die Verteilung der infiltrierte Substanzen im Sanduntergrund zeigen, daß sich der größte Teil auf einem Papierfilter an der Basis der Feinsandschicht abgelagert hatte. Dieser Papierfilter simuliert gleichsam eine natürliche, feinkörnigere Filterschicht im Sandkörper, von der die einge-waschenen Humusstoffe zurückgehalten werden.

Dieses Ergebnis zeigt, daß nur beim Einbringen einer Schwarztorfsuspension von einer deutlichen Stoff-Infiltration in den Sanduntergrund ausgegangen werden kann. Der dadurch hervorgerufene Abdichtungseffekt ist besonders groß, wenn sich die in-

filtrierten Stoffe auf natürlich vorgegebenen Schichtgrenzen (Filtern) ablagern und dichte Humusbänder ausbilden, wie man sie auch im Unterboden von Podsolen beobachtet (LASSONCZYK u. WIECHMANN, 1985).

4. SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DIE BEMESSUNG DER ABDECKSCHICHT

Der unterirdische Abfluß (Au) wird nicht nur vom kf-Wert der Dichtungsschicht, sondern auch von der Schichtdicke beeinflusst (vgl. DARCY-Gleichung).

In Tabelle 7 ist die theoretisch erforderliche Schichtmächtigkeit einer Abdichtung, berechnet mit Hilfe der DARCY-Gleichung, für verschiedene tolerierbare unterirdische Abflüsse bei einer hydraulischen Druckhöhe von 45 cm Wassersäule aufgeführt.

Tab. 7: Gesättigte Wasserdurchlässigkeit (kf) der Abdichtungsschichten am Ende der Perkolationsperiode (150 Tage) und erforderliche Schichtmächtigkeiten der Abdichtungsschichten, berechnet für verschiedene Abflußhöhen (bei einer Druckdifferenz von 45 cm WS) Saturated hydraulic conductivity (kf) of the sealing material at the end of the percolation period (150 days); necessary thickness of the sealing layer, calculated for different values of seepage (at a hydraulic head of 45 mm water column)						
Variante	gesätt. Wasserdurchlässigkeit (kf)		Δh cm WS	Erforderliche Schichtmächtigkeiten (cm) bei einem Abfluß von		
	cm/d	m/s		200 mm/a	100 mm/a	50 mm/a
Schwarztorf, verdichtet	0,02	$2,3 \cdot 10^{-9}$	45	16	33	66
Bunkerde, schwach zersetzt	0,07	$8,1 \cdot 10^{-9}$	45	57	117	225
Bunkerde, stark zersetzt	0,11	$1,3 \cdot 10^{-8}$	45	90	183	354
Bentonit/Sand-Gemisch	0,02	$2,3 \cdot 10^{-9}$	45	16	33	66

Unter den oben genannten Annahmen errechnet sich für die schwach zersetzte Bunkerde eine Schichtmächtigkeit von 57 cm (200 mm Abfluß) bis 225 cm (50 mm Abfluß). Bei einem tolerierbaren Abfluß von max. 100 mm/a sind die bei Verwendung von Bunkerde erforderlichen Schichtmächtigkeiten als unrealistisch anzusehen. Praktikable Schichtmächtigkeiten bis zu 66 cm ergeben sich unter Zugrundelegung der in den Modellversuchen ermittelten kf-Werte für die Varianten "Schwarztorf, verdichtet" und das "Sand/Bentonit-Gemisch".

Da bei der Wiedervernässung von Hochmooren ein ganzjähriger Stauwasserstand direkt an der Geländeoberfläche (GOF) angestrebt wird, entspricht die hydraulische Druckhöhe (Δh) bis zum hochdurchlässigen Sanduntergrund der Mächtigkeit der Stauschicht (l).

Aus der DARCY-Gleichung geht hervor, daß in diesem Fall ($\Delta h = l$) der unterirdische Abfluß (Au) allein vom kf-Wert der Dichtungsschicht abhängt.

$$Au = kf \cdot \frac{\Delta h}{l} \quad ; \quad \text{wenn } \Delta h = l, \text{ dann ist } Au = kf$$

In Tabelle 8 sind für die Annahme, daß der Stauwasserstand im Hochmoor das ganze Jahr an der Geländeoberfläche steht, die für verschiedene tolerierbare Abflußhöhen erforderlichen maximalen kf-Werte errechnet.

Tab. 8: Zulässige Höchstdurchlässigkeit (kf) einer Abdichtungsschicht, berechnet für unterschiedliche Abflußhöhen (mm/a) bei einem Stauwasserstand konstant an GOF (n. DARCY)		
Maximum permissible hydraulic conductivity (kf) of a sealing layer, calculated for different values of seepage (mm/a) and perched groundwater permanently at the surface (according to DARCY)		
Abfluß mm/a	kf	
	cm/d	m/s
200	0,05	$6,3 \cdot 10^{-9}$
100	0,02	$3,1 \cdot 10^{-9}$
50	0,01	$1,6 \cdot 10^{-9}$

Es zeigt sich, daß eine Wasserdurchlässigkeit von $2,3 \cdot 10^{-9}$ m/s erreicht werden muß, um den genannten Anforderungen zu genügen. Dieser Soll-Wert wurde in den Modellversuchen lediglich mit den Varianten "Schwarztorf, verdichtet" und "Sand/Bentonit-Gemisch" erreicht.

Die durch Humusinfiltration aufgebauten Dichtungsschichten an der Grenzschicht zum Sanduntergrund erreichen bei der Variante "Schwarztorf-Suspension" ebenfalls den oben genannten Soll-Wert der Wasserdurchlässigkeit (vgl. Abb. 6), die kurzfristig (~ 10 Jahre) erreichbare Staukörpermächtigkeit ist jedoch noch zu gering, um den Abfluß unter der tolerierbaren Abflußhöhe zu halten.

Das in den Modellversuchen verwendete Sand/Bentonit-Gemisch stellt nur eine der möglichen Bentonit-Varianten dar. Die in diesen Modellversuchen durchgeführten Untersuchungen erlauben daher keine Aussagen über die optimale Zusammensetzung einer Dichtungsschicht aus Bentonit. Weiterhin wurde auch nicht der Einfluß des sauren, huminsäurereichen Perkolationswassers auf die langfristigen Abdichtungseigenschaften des Bentonits untersucht.

5. LITERATUR

- BLANKENBURG, J. u. KUNTZE, H. (1987): Moorkundlich-hydrologische Voraussetzungen der Wiedervernässung von Hochmooren.- TELMA 17:51-58, 3 Abb., 1 Tab., Hannover.
- DAVID, K. (1986): Abdichtung von Sand zur Wiedervernässung von (teil-)abgetorften Hochmooren - Modellversuche.- Diplomarbeit, Göttingen.
- DIN 11542 (1978): Torf für Gartenbau und Landwirtschaft - Eigenschaften, Prüfverfahren.- Beuth Verlag GmbH, Berlin - Köln.
- DIN 19683 (1973): Bodenuntersuchungsverfahren im landwirtschaftlichen Wasserbau - Physikalische Laboruntersuchungen.- Beuth Verlag GmbH, Berlin - Köln.
- DIN 19684 (1977): Bodenuntersuchungsverfahren im landwirtschaftlichen Wasserbau - Chemische Laboruntersuchungen.- Beuth Verlag GmbH, Berlin - Köln.
- EGGELSMANN, R. (1960): Über den unterirdischen Abfluß aus Mooren.- Wasserwirtschaft, 50: 149-154, 11 Abb., 2 Tab.; Stuttgart.
- HARTGE, K.H. (1966): Ein Haubenpermeameter zum schnellen Durchmessen zahlreicher Stechzylinderproben.- Z.f.Kulturtechnik u. Flurbereinigung, 7: 155-163, Hamburg - Berlin.
- KUNTZE, H., SCHÄFER, W. u. SCHWAAR, J. (1986): Cultivation and Conservation of Raised Bogs in North-West-Germany.- Exkursionsführer XIII. Congress of the ISSS, Hamburg 1986.
- LASSONCZYK, B. u. WIECHMANN, H. (1985): Untersuchungen zur Verlagerung und Immobilisierung löslicher organischer Stoffe in Sandböden.- Mitt. Dtsch.Bodenkd.Ges. 43/II: 771-776, Göttingen.
- SCHLICHTING, E. u. BLUME, H.P. (1966): Bodenkundliches Praktikum.- Verlag P.Parey, Berlin.

Manuskript eingegangen am 31.Juli 1987