

|       |         |               |                |                         |
|-------|---------|---------------|----------------|-------------------------|
| TELMA | Band 28 | Seite 131–144 | 4 Abb., 3 Tab. | Hannover, November 1998 |
|-------|---------|---------------|----------------|-------------------------|

# Anisotropie und Selbstregulierung bei Versickerungsverlusten in Hochmooren

Anisotropy and self adjustment in seepage losses from raised bogs

SAKE VAN DER SCHAAF

## Zusammenfassung

Vertikale Versickerungsverluste in zwei Hochmooren in den Irischen Midlands wurden aus dem vertikalen Gefälle des piezometrischen Niveaus und den mit dem Piezometerverfahren ermittelten Durchlässigkeitswerten berechnet. Ergänzende Durchlässigkeitswerte wurden mit einer Statistischen Beziehung mit dem Substanzvolumen bestimmt. Für die oberen Hälften der Profile wurden Versickerungswerte gefunden, die oft zu hoch und daher unerklärlich waren. Diese hohen Werte wurden einer Anisotropie zugeschrieben, die mit der horizontalen Schichtung des Torfes erklärt wurde. Werte aus den untersten 25 % in den Profilen waren viel realistischer. Dieser Unterschied wird einer Zunahme der Zersetzung der Torfe mit zunehmender Tiefe zugeschrieben.

Die gefundenen Versickerungswerte waren niedriger als die meisten in der Moorkliteratur gefundenen Daten. In einem Falle konnte dies mit dem Vorkommen eines dichten glazi-limnischen Tones unter dem Torf erklärt werden. Im anderen Falle hatte sich der Torf an der Unterseite durch die Bildung einer dichten Schicht von einigen Dezimetern Stärke abgedichtet. Eine solche Verdichtung wurde wahrscheinlich durch die Kombination eines relativ niedrigen piezometrischen Niveaus und einer relativ hohen Durchlässigkeit im mineralischen Substrat verursacht. Dieser Prozeß ist anscheinend selbstregulierend. Es könnte erklären, warum in der Moorkliteratur für unterschiedliche Hochmoore oft eine etwa gleiche Versickerung berechnet wird.

Diese Selbstregulierung scheint in Restmooren mit einer dünnen übriggebliebenen Torfschicht zerstört zu sein. In der Moorkliteratur werden für solche Gebiete oft hohe Versickerungsverlustwerte angegeben. Eine allmähliche Verschlammung am Übergang zwischen Torf und mineralischem Substrat durch die Sedimentation von z. B. sehr feinem organischen Material könnte vielleicht in solchen Gebieten die Versickerung auf lange Sicht reduzieren.

## Summary

Vertical seepage losses in two Irish Midland raised bogs were calculated from vertical hydraulic gradients and hydraulic conductivities measured with the piezometer method. Additional hydraulic

conductivity values were obtained from a statistically derived relationship with the volume fraction of solid matter. For the upper half of the profiles, unexplainably large seepage values were obtained. These results were attributed to anisotropy, caused by horizontal layering of the peat. Values obtained from the deepest quarter of the profiles were more realistic. This difference is attributed to a downward decrease of the anisotropy as a result of increasing humification.

The eventual seepage values were smaller than most values in literature on peatlands. In one case this could be explained by the occurrence of a lacustral clay below the peat. In the other case the peat appeared to have sealed itself by forming a dense layer of a few decimeters thick at its base. Such a consolidation may have been caused by the combination of a relatively low piezometric level and a relatively large hydraulic conductivity in the mineral substratum. This process seems to be self adjusting. It would explain why for raised bogs often almost the same seepage losses are reported in literature.

The process seems to have been disturbed in bog remnants with shallow remaining peat layers. Literature on the hydrology of such areas often shows extremely large losses. A gradual clogging by illuviation of organic matter at the transition between peat and mineral substratum might eventually reduce seepage losses in such areas.

## 1. Einführung

Versickerungsverluste, d.h. Anteile von im Moor gebildetem Grundwasser, die dem Moor durch Versickerung in das Substrat verloren gehen, spielen eine Rolle bei der Regeneration und dem Schutz von Hochmooren, da sie die Schwankung des Grundwasserspiegels im Moor beeinflussen. Je größer die Verluste, desto größer sind auch die Schwankungen. In lebenden Hochmooren sind die Schwankungen klein (meist weniger als 30 cm zwischen Sommer und Winter). Hochmoorbildende Vegetationen wachsen nur bei derartigen kleinen Schwankungen.

Die wenigen Daten über Versickerungsverluste in Hochmooren, die aus der Literatur bekannt sind, weisen einen auffälligen Zusammenhang auf. Tabelle 1 zeigt einige Daten von Versickerungsverlusten in nicht abgetorften Hochmooren.

In teilweise abgetorften Hochmooren sind die Verluste grösser als in der Tabelle 1 angegeben, besonders wenn die Transmissivität des mineralischen Substrates nicht allzu niedrig ist. Tabelle 2 zeigt einige Beispiele.

Bei einem Jahresniederschlag von 750–850 mm und einer Verdunstung von etwa 500 mm handelt es sich um Mengen, die einen bedeutenden Bestandteil der Wasserbilanz darstellen.

Bei den Unterschieden zwischen Versickerungsverlusten in ungestörten und gestörten Hochmooren spielt die Mächtigkeit des Resttorfes eine gewisse Rolle (SCHOUWEN-AARS et al. 1992a). Obwohl bekanntlich die tiefsten und am stärksten humifizierten Torfschichten in ungestörtem Zustand die niedrigsten Durchlässigkeitsbeiwerte aufweisen (z.B. BADEN & EGGELSMANN, 1963), haben diese tiefen Torfschichten im

| Autor                                      | Gebiet                             | Methode                                     | Versickerungsverluste (mm a <sup>-1</sup> ) |
|--|------------------------------------|---|---|
| ROZHDESTVENS-KAYA (1973, nach IVANOV 1981) | Lammin Suo, Karelien               | Wasserbilanz                                | 27  |
| INGRAM (1982)                              | Dun Moss, Schottland               | Wasserbilanz                                | 26  |
| STREEFKERK & CASPARIE (1989)               | Meerstalblok, Niederlande          | Wasserbilanz                                | 26  |
| EGGELSMANN (1990)                          | Mittelwert für Nordwestdeutschland | Nicht spezifiziert                          | <30   |
| SIEGEL (1992)                              | Red Lake Peatlands, Minnesota      | Durchlässigkeit mit piezometrischem Gefälle | >10   |

Tab. 1: Versickerungsverluste in mm pro Jahr in einigen nicht abgetorften Hochmooren  
Seepage losses in mm a<sup>-1</sup> of some uncut raised bogs

| Autor                          | Gebiet                           | Methode       | Versickerungsverluste (mm a <sup>-1</sup> ) |
|--------------------------------|----------------------------------|---------------|---|
| SCHOUWENAARS et al. (1992a)    | Engbertsdijkvenen, Niederlande   | Wasserbilanz  | 63, 80 und 148 (3 Gebietsteile)             |
| SCHOUWENAARS et al. (1992b)    | Lichtenmoor, Nordwestdeutschland | Modellversuch | 50–116, abhängig vom Jahre                  |
| VAN WALSUM & VELDHUIZEN (1995) | Fochteloërveen, Niederlande      | Modellversuch | 132   |

Tab. 2: Sickerungsverluste in mm pro Jahr in einigen teilweise abgetorften Hochmooren  
Seepage losses in mm a<sup>-1</sup> of some partly cutover raised bogs

Restmoor diese Eigenschaft nicht mehr. Wahrscheinlich ist, daß infolge der Entwässerung sich das Gefüge und damit die Durchlässigkeit des Torfes geändert haben und daher größere Versickerungsverluste auftreten.

Dies führt zur Frage, ob es in ungestörten Hochmooren einen Mechanismus gibt, der Versickerungswerte beschränkt auf ähnliche Werte, wie die Tabelle 1 suggeriert. Bei Untersuchungen an zwei irischen Hochmooren, Clara Bog und Raheenmore Bog, wurden tatsächlich solche Mechanismen gefunden.

## 2. Beschreibung der Moore

Die beiden Moore liegen in den Irish Midlands (Abbildung 1). Sie haben sich in glazialen Becken aus der Weichseleiszeit (in Irland mit ‚Midlandian‘ bezeichnet) gebildet.

Raheenmore Bog umfaßt etwa 125 ha und ist nur an den Rändern in geringem Umfang abgetorft. Clara Bog ist ein großes Restmoor, dessen südliche Hälfte abgetorft ist. Am nördlichen Rande sind die Abtorfungsverluste gering. Das Moor umfaßt jetzt noch etwa 500 ha. Es wird von einer Straße in eine östliche und eine westliche Hälfte geteilt, die etwa gleich groß sind. Die Feldarbeiten, die diesem Aufsatz zugrunde liegen, wurden im westlichen Teil durchgeführt.

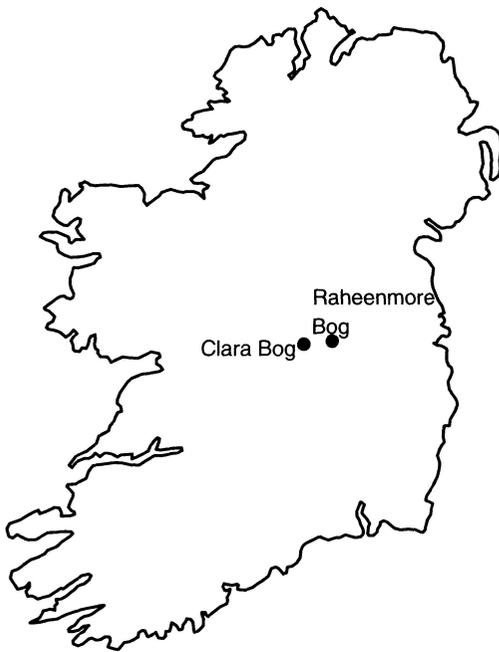


Abb. 1: Geographische Lage von Raheenmore Bog und Clara Bog  
Geographical position of Raheenmore Bog and Clara Bog

Die Torfmächtigkeit in Raheenmore Bog erreicht stellenweise mehr als 15 m (BELLAMY 1987). In Clara Bog handelt es sich um höchstens 10.50 m (BLOETJES & VAN DER MEER 1992). Der Sphagnumtorf wird überall von Niedermoortorf unterlagert. Letzterer besteht meist aus Seggen- und Schilftorf mit einigen Holzresten. Der Unterschied zwischen Schwarz- und Weißtorf ist viel weniger deutlich als in Nordwesteuropa. Auch im obersten Meter können schon Zersetzungsgrade bis 8 nach VON POST vorkommen.

Der Niedermoortorf wird in Clara Bog meist von 0.5–2 m Kalkmudde unterlagert. Darunter befindet sich ein glazi-limnischer Ton mit einer Mächtigkeit, die stellenweise 7 m erreicht. Die vertikale Durchlässigkeit des Tones wurde von RODGERS (1993) auf etwa  $9 \times 10^{-10} \text{ cm s}^{-1}$  bestimmt. Analysen an später entnommenen Proben bestätigten diese Größenordnung. Der Ton überlagert Geschiebelehm und Geschiebesand auf Kalkstein mit einer Gesamttransmissivität von etwa  $1,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

Der unterliegende Ton von Raheenmore Bog enthält mehr Sand als der unter Clara Bog und auch Kies. Stellenweise liegt der Torf unmittelbar auf dem Geschiebematerial. Obwohl Bestimmungen der Durchlässigkeit des mineralen Substrates fehlen, deutet diese Zusammenstellung mit Sicherheit auf viel grössere Durchlässigkeitsbeiwerte als im Ton unter Clara Bog hin.

### 3. Methoden

Die Versickerung wurde berechnet aus piezometrischen Niveaus auf unterschiedlichen Tiefen und dem vertikalen Widerstand dazwischen. Die Beziehung zwischen dem Widerstand  $c$  und der Durchlässigkeit  $k$  zwischen zwei Tiefen  $z_1$  und  $z_2$  lautet:

$$c = \int_{z_2}^{z_1} \frac{1}{k(z)} dz$$

wobei

$c$  = vertikaler Widerstand [T],

$k$  = Durchlässigkeit [ $LT^{-1}$ ],

$z$  = vertikale Position [L].

Für praktische Zwecke mit  $n$  verfügbaren Werten von  $k$  gilt:

$$c \approx \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{k_i}$$

wobei

$D$  = Dicke [L] der Schicht, wofür eine Messung von  $k$  als repräsentativ angenommen wird.

Der  $k$ -Wert wurde mit dem Piezometerverfahren nach KIRKHAM (1945) bestimmt. Dabei traten nicht-lineare Effekte auf, wobei der berechnete Durchlässigkeitsbeiwert am Anfang der Messung um einige Größenordnungen höher liegen konnte als am Ende. Solche Effekte wurden von vielen Autoren beschrieben, z. B. INGRAM et al. (1985) und HEMOND & GOLDMAN (1985). Sie wurden soweit möglich durch Berechnung der Durchlässigkeit an Hand der letzten Messungen in jedem Piezometer beseitigt, die, in Abhängigkeit des  $k$ -Wertes, zwischen etwa einer halben Stunde und einigen Tagen nach Anfang einer Messung stattfanden. Dann ist die Beziehung meist wieder nahezu linear und der berechnete Wert entspricht wahrscheinlich am besten dem wirklichen. Die Messungen wurden durchgeführt in Tiefen von 0.5, 1, 2, 3, 4, 7, 10 und 13 m (Raheenmore Bog) und 1, 2, 3.5, 5, 6.5, 8.5 und 10.5 m (Clara Bog) und am Übergang zum mineralischen Substrat, wenn dieser weniger tief war als die größte Meßtiefe. Für die Berechnung der Versickerung wurden die gefundenen Werte nach Formel (2) in den vertikalen Widerstand  $c$  umgerechnet.

Weitere  $k$ -Werte aus den zwischenliegenden Tiefen wurden mit dem Substanzvolumen  $\phi_0$  geschätzt. Letztere Werte wurden ursprünglich für Sackungsberechnungen gemessen. Ungestörte Proben wurden auf Tiefenintervallen von 0.50 m bis zu einer Tiefe von 12.50 m mit einem Eijkelkamp<sup>®</sup> Moorbohrer entnommen. Die Proben wurden während 24 Stunden bei 105 °C getrocknet. Der Wassergehalt wurde aus dem Gewichtsverlust bestimmt, das Volumen der Trockensubstanz aus dem Restgewicht und den von GALVIN (1976) veröffentlichten spezifischen Gewichten von irischem Torfmaterial. Eine stati-

stisch signifikante Beziehung zwischen  $k$  und  $\phi_0$  wurde festgestellt. Weil sowohl  $k$  als auch  $\phi_0$  einer Wahrscheinlichkeitsverteilung unterliegen, wurde nicht das übliche Regressionsverfahren, sondern das Verfahren nach KERMAK & HALDANE (1950) verwendet. Diese Methode hat den Vorteil, daß die Regression von  $y$  auf  $x$  dieselbe Beziehung ergibt wie eine Regression von  $x$  auf  $y$ . Abbildung 2 zeigt das Ergebnis für beide Moore. Obwohl die Korrelation nicht hoch ist, ist die Signifikanz (mit dem  $F$ -Test berechnet) gut.

Im Gegensatz zu vielen Berichten in der Moorkultur, wie z.B. von BADEN & EGGELSMANN (1963), IVANOV (1981) und KORPIJAAKKO (1988) über Beziehungen zwischen Zersetzungsgrad und Durchlässigkeit in Hochmooren auf dem europäischen Kontinent, konnte weder für Raheenmore Bog noch für Clara Bog eine solche Beziehung statistisch signifikant festgestellt werden. Zersetzungsgrade konnten darum nicht verwendet werden.

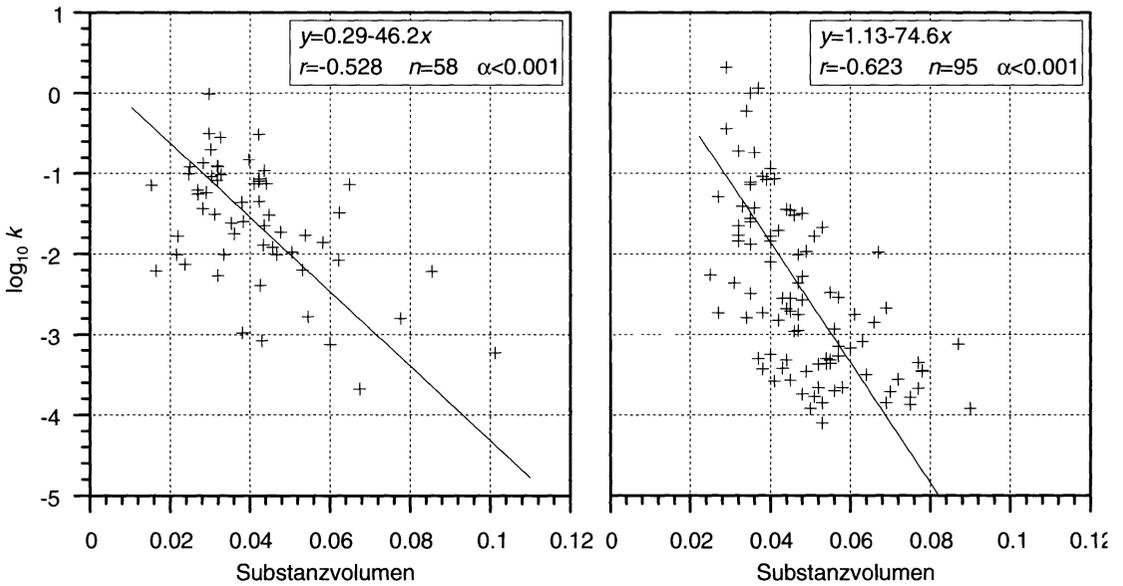


Abb. 2: Statistische Beziehungen zwischen der Durchlässigkeit  $k$  (ausgedrückt wie  $\log_{10}k$ ,  $k$  in m pro Tag) und dem Substanzvolumen  $\phi_0$   
 Statistical relationships of hydraulic conductivity  $k$  (expressed as  $\log_{10}k$ ,  $k$  in  $\text{m d}^{-1}$ ) and the volume fraction of solid matter  $\phi_0$

Aus Raheenmore Bog standen 12 Profile zur Verfügung, an denen piezometrische Niveaus,  $k$  und  $\phi_0$  gemessen wurden, aus Clara Bog 28.

## 4. Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Berechnete Versickerungswerte

Die ersten Berechnungen in den oberen Teilen der Profile ergaben zum Teil Versickerungsverlustwerte, die so hoch waren, daß sie mit der Wasserbilanz nicht erklärt werden konnten. Die für die tiefsten Teile der Profile berechneten Versickerungswerte waren dagegen viel kleiner und mit der Wasserbilanz leicht zu erklären. Tabelle 3 faßt die meisten Daten zusammen und zeigt sowohl die für 30–50 % der Profiltiefe berechneten Werte als auch die für 75 % oder tiefer.

|  | Raheenmore Bog            |                          | Clara Bog                 |                          |
|--|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
|  | 30–50 %<br>d. Profiltiefe | ≥ 75 %<br>d. Profiltiefe | 30–50 %<br>d. Profiltiefe | ≥ 75 %<br>d. Profiltiefe |
| Anzahl der Profile                                 | 12                        | 12                       | 22                        | 27                       |
| Höchster u. niedrigster Wert (mm a <sup>-1</sup> ) | 330 und 2                 | 43 und 1                 | 270 und 3                 | 67 und < 0.1             |
| Arithmetischer Mittelwert (mm a <sup>-1</sup> )    | 97                        | 19                       | 73                        | 12                       |
| Standardfehler (SEM, mm a <sup>-1</sup> )          | 32                        | 4                        | 15                        | 3                        |
| Geometrischer Mittelwert (mm a <sup>-1</sup> )     | 42                        | 12                       | 43                        | 6                        |

Tab. 3: Arithmetische und geometrische Mittelwerte der berechneten Versickerungsverluste mit Standardfehler in mm pro Jahr auf zwei Tiefen in den Moorprofilen  
Arithmetic and geometric means of the calculated vertical seepage losses with standard error in mm a<sup>-1</sup> at two depths in the bog profiles

Der große Unterschied zwischen den in den oberen und unteren Profiltteilen gefundenen Durchlässigkeitswerten kann wie folgt erklärt werden.

Mit dem Piezometerverfahren werden grundsätzlich horizontale Werte gemessen. Falls eine Anisotropie besteht, wobei die vertikale Durchlässigkeit (viel) kleiner ist als die horizontale, werden die Versickerungswerte überschätzt. Bei einer horizontalen Schichtung, die an allen Torfstichprofilen in beiden Mooren beobachtet werden kann, ist eine Anisotropie allerdings zu erwarten. Bei einer mit der Tiefe zunehmenden Zersetzung ist zu erwarten, daß die Anisotropie mit zunehmender Tiefe abnimmt. Damit können die scheinbar niedrigeren Versickerungswerte auf größeren Tiefen erklärt werden. Vielleicht spielen Unterschiede in Eigenschaften von Sphagnumtorf und Niedermoortorf hier auch eine Rolle. Dies konnte aber mit den verfügbaren Daten nicht festgestellt werden. Aufgrund obiger Argumentation können die in den größeren Tiefen gemessenen Werte als die zuverlässigeren angenommen werden. Die jeweiligen arithmetischen Mittelwerte für die zwei Moore liegen um etwa zweimal den Standardfehler auseinander und lassen

deswegen mit ziemlich großer Sicherheit unterschiedliche Versickerungsverlustraten erkennen.

Die berechneten Versickerungen enthalten einige sehr große Werte. Darum und weil auch zwischen 75 % und 100 % der Profiltiefe noch eine bestimmte Anisotropie bestehen könnte, ist der arithmetische Mittelwert als Schätzung für die Versickerung des ganzen Moores wahrscheinlich etwas zu hoch. Weil der Einfluß hoher Werte auf den geometrischen Mittelwert geringer ist als auf den arithmetischen, ist der geometrische Mittelwert wahrscheinlich die bessere Annäherung. In Tabelle 3 wird darum auch der geometrische Mittelwert gezeigt. Die Versickerung in Raheenmore Bog könnte also auf 10 bis 15 mm pro Jahr und in Clara Bog auf 5 bis 10 mm pro Jahr angenommen werden.

#### 4.2 Mögliche Ursachen der Unterschiede zwischen den berechneten Werten und denen aus der Moorkliteratur

Die berechneten Versickerungsverlustwerte sind kleiner als die meisten in Tabelle 1 angegebenen Werte. Die große Mächtigkeit des Torfkörpers in beiden Mooren ist dafür aber keine gute Erklärung. Im Falle Clara Bog ist der fast undurchlässige Ton unter dem Moorkörper die Hauptursache. Damit wird erklärt, warum trotz der größeren Moormächtigkeit in Raheenmore Bog die Versickerung größer ist als in Clara Bog.

Eine Eigentümlichkeit von Raheenmore Bog ist, daß in der Mitte des Moores im unterliegenden Geschiebmaterial die piezometrischen Niveaus etwa 3 m unter der Moorkoberfläche liegen. Dies wurde an zwei etwa 200 m voneinander entfernten Piezometergruppen festgestellt. Im Torf wurden nur piezometrischen Niveaus gemessen, die, in Abhängigkeit der Tiefe, um 0.01 bis 1 m unter der Grundwasseroberfläche im Moor lagen. Aufgrund der kleinen berechneten Versickerungsverluste muß also an der Unterseite des Torfes eine fast undurchlässige Schicht vorkommen. In zwei Fällen wurde tatsächlich an der Torfbasis eine Durchlässigkeit von fast gleich 0 gemessen. Während der Messungen, in der Zeit, in welcher die tiefen piezometrischen Niveaus uns noch nicht bekannt waren, wurden die bezogenen Piezometer als fehlerhaft bezeichnet und nicht weiter gemessen. Als später die Substanzvolumina  $\phi_0$  analysiert wurden, wurde klar, daß  $\phi_0$  in der untersten Torfschicht von Raheenmore Bog bedeutend größer war als in Clara Bog. In der Abbildung 3 werden einige Profile aus Raheenmore Bog gezeigt, in der Abbildung 4 einige aus Clara Bog.

In den Profilen von Clara Bog fehlt die starke Zunahme von  $\phi_0$  bis 0.10–0.12 in den tiefsten Dezimeter wie im Raheenmore Bog. Die Ausnahme ist Meßstelle N4 (Abb. 4). Sie ist weniger als 50 m vom Moorrande entfernt und der Torf liegt unmittelbar auf dem Geschiebmaterial. Die Stellen L9 und 99 vertreten etwa die extremsten Zunahmen in Clara Bog. Die meisten Meßstellen auf Clara Bog wiesen ein Bild auf, das den Diagrammen von N8 und 98 ähnlicher war.

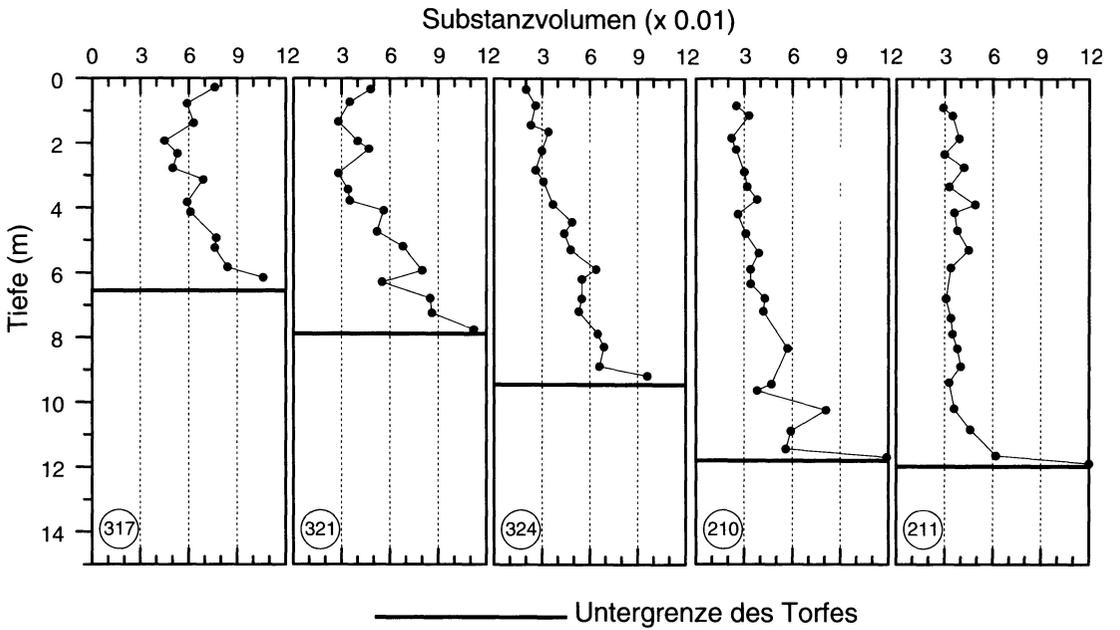


Abb. 3: Profile des Substanzvolumens  $\phi_0$  in Raheenmore Bog vom Rande (317) zur Mitte (211)  
 Profiles of the volume fraction of solid matter  $\phi_0$  in Raheenmore Bog from margin (317) to centre (211)

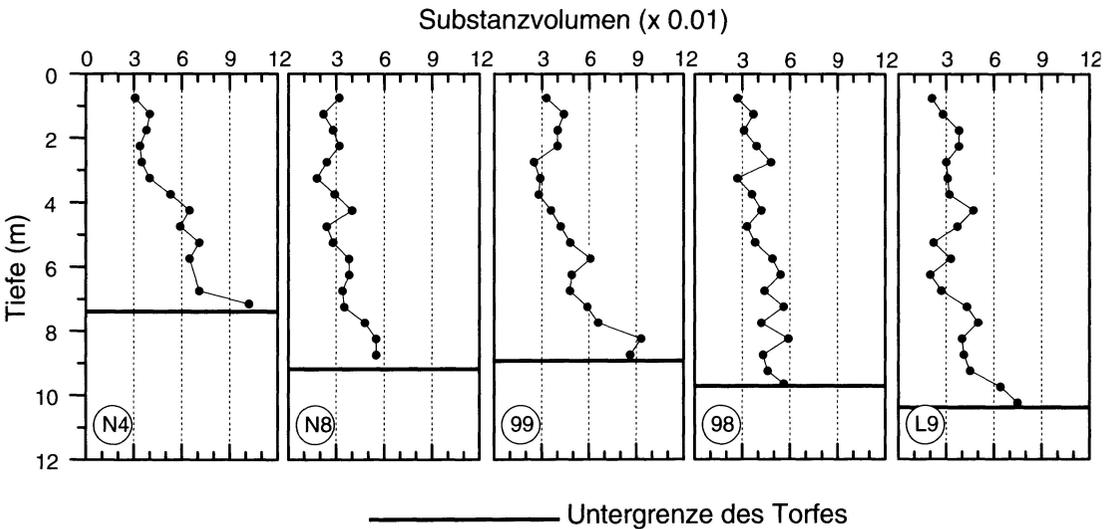


Abb. 4: Profile des Substanzvolumens  $\phi_0$  in Clara Bog vom Rande (N4) zur Mitte (L9)  
 Profiles of the volume fraction of solid matter  $\phi_0$  in Clara Bog from margin (N4) to centre (L9)

Jetzt ist zu fragen, wie dieser augenscheinliche Zusammenhang zwischen der Zunahme von  $\phi_0$  in den unteren Dezimetern eines Torfprofils und der Beschaffenheit des mineralischen Substrates erklärt werden kann. Dies wird dem nachfolgenden Prozeß zugeschrieben.

Die wichtigste Kraft die das Gefüge eines Torfprofils aufrecht erhält, ist der Wasserdruck in den Poren, weil das Material kaum eine eigene Steifheit besitzt. Wenn der Wasserdruck auf einer bestimmten Tiefe durch irgendeine Ursache verringert wird, wird der Torf vom Gewicht des darüberliegenden Materials zusammengedrückt. Dieser Prozeß ist bekanntlich die Ursache der Moorsackung, die nach Entwässerung auftritt. Bei Entwässerung, die normalerweise im obersten Meter stattfindet, werden die obersten Torfschichten am stärksten zusammengedrückt, wie z. B. von UHDEN (1960) beschrieben wurde. Wenn an der Unterseite eines Torfprofils der Wasserdruck verringert wird, darf man denselben Prozeß an der Unterseite des Torfes erwarten. Weil in Raheenmore Bog die piezometrischen Niveaus, wie oben erwähnt, im unterliegenden Geschiebematerial relativ niedrig sind und dessen Durchlässigkeit vermutlich relativ hoch ist, ist eine Zusammendrückung des untersten Torfes zu erwarten. Dieser Prozeß ist nicht notwendigerweise anthropogen bestimmt (z. B. durch Entwässerung in der Umgebung), sondern kann auch durch natürliche Ursachen entstehen. Raheenmore Bog ist ein stark gewölbtes Hochmoor. Die Mooroberfläche am höchsten Punkt liegt etwa 3.50 m über dem Rande, der selbst meist 1 bis 3 m über dem angrenzenden Gebiet liegt. Deswegen muß angenommen werden, daß das Moor allmählich so hoch gewachsen ist, daß der piezometrische Niveauunterschied zwischen dem mineralischen Substrat und dem Grundwasserspiegel im Moor immer größer geworden ist. Das dürfte auf die unterste Torfschicht dieselbe Auswirkung haben wie eine Senkung des piezometrischen Niveaus im mineralischen Substrat.

#### 4.3 Selbstregulierung der Versickerungsverluste in Hochmooren?

Dieser Prozeß führt zu einer Hypothese über eine mögliche Selbstregulierung der Versickerung in Hochmoorsystemen. Zentral ist dabei die Beziehung zwischen der Durchlässigkeit  $k$  und dem Substanzvolumen  $\phi_0$ , wie sie in der Abbildung 2 dargestellt wurde. Wichtige Rollen spielen sowohl das piezometrische Niveau im mineralischen Substrat als auch die Durchlässigkeit des Substrates. Bei einem durchlässigen Substrat kann der Versickerungsverlust nur auf niedrige Werte, wie sie in Tabelle 1 gezeigt wurden, beschränkt werden, wenn  $k$  des unteren Torfes sehr niedrig ist. Wie oben erwähnt, entsteht eine solche geringe Durchlässigkeit, wenn der untere Torf vom Substrat „entwässert“ wird.

Wenn der Torf von einem dichten Ton unterlagert wird wie im Falle Clara Bog, kann dieser Prozeß nicht auftreten, und der Torf bleibt bis zur Unterseite relativ locker. Kurzgefaßt: Die Durchlässigkeit des untersten Torfes paßt sich den hydrologischen Verhältnissen im Substrat und im Torfkörper an.

Eine derartige Selbstregulierung könnte auch erklären, warum die Werte in Tabelle 1 so ähnlich sind. Die Hypothese erklärt allerdings nicht unmittelbar die überaus kleinen Versickerungswerte in Raheenmore Bog. Mit der ziemlich extremen Mächtigkeit des Torfkörpers allein kann dies kaum erklärt werden; eher durch das sehr große piezometrische Gefälle in den unteren Dezimetern des Torfkörpers. Wie erwähnt, ist das Moor um mehrere Meter über seine Umgebung hinausgewachsen. Das könnte den unter dem Moore gemessenen relativen Unterdruck erklären. Die Abbildung 2 zeigt, daß ein relativ kleiner Anstieg des Substanzvolumens eine große Auswirkung auf den  $k$ -Wert des Torfes haben kann. Man könnte sich vorstellen, daß dieser bodenmechanische Prozeß eine solche Verringerung des  $k$ -Wertes verursacht, so daß bei einem abnehmenden piezometrischen Niveau im mineralischen Substrat kein Anstieg sondern eine Verringerung der Versickerung erfolgt. Solches berichten GALVIN & HANRAHAN (1967) in ihrer Beschreibung einiger Entwässerungsexperimente in Moorböden in der damaligen Versuchsstation Glenamoy in Irland. Eine Verkleinerung des Dränabflusses trat auf, als das piezometrische Niveau in tiefen Dränrohren von 0.9 m bis auf 1.50 und 2.10 m Tiefe vergrößert wurde. Obwohl die Autoren das Phänomen einer Bildung im Boden eingeschlossener Luft zuschrieben, fanden sie, daß sich die reduzierte Durchlässigkeit nach einem halben Jahr, während dessen die Dränung unwirksam war, nicht geändert hatte. Dies weist eher auf eine unumkehrbare Änderung im Torf hin als auf etwas Vorübergehendes wie Lufteinschluß. Obwohl es sich hier um einen kurzfristigen Prozeß handelte, zeigt es, daß eine Verringerung der Wasserströmung durch den Torf bei zunehmendem piezometrischen Gefälle möglich ist.

#### 4.4 Versickerung in Hochmoorresten

Obwohl in teilweise abgetorfte Hochmooren oft die unterste und undurchlässigste Torfschicht übrigblieb, ist im allgemeinen der Versickerungsverlust hoch. Er ist niedriger bei dickeren Resttorfschichten (SCHOUWENAARS et al. 1992a). Dies deutet darauf hin, daß in geringmächtigen Resttorfen, die während längerer Zeit entwässert wurden, eine mögliche Selbstregulierung der Versickerung unwirksam bzw. noch nicht wieder wirksam geworden ist. Das lassen auch die Daten in Tabelle 2 vermuten.

In solchen Fällen bewirkt eine größere Versickerung in das Substrat eine größere Schwankung des Grundwasserspiegels im Moor. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen.

Bei einem Jahreswert des Versickerungsverlustes von 100 mm wird der Wert für ein Sommerhalbjahr etwa 50 mm sein. Bei einem Speicherkoeffizienten von 0.15 bis 0.2 (typisch für ein degradiertes Hochmoor) bedeutet dieser Wert einen Beitrag zum Gesamtwert der Schwankung des Wasserspiegels von 25 bis 35 cm. Zusammen mit einem Niederschlagsdefizit von z. B. 100 mm führt dies zu einer Saisonschwankung von etwa 75 cm. Bei einem solchen Wert wird ein Acrotelm sich nicht entwickeln.

Der einzige Mechanismus, der unter solchen Umständen die Versickerungsverluste beschränken könnte, ist eine allmähliche Verschlammung durch sehr feines organisches

Material am Übergang zwischen dem Resttorf und dem durchlässigen Substrat. Laut Mitteilung der niederländischen Forstverwaltung (J. G. STREEFKERK, mündliche Mitteilung) tritt dieser Prozeß in Regenerationsgebieten tatsächlich auf. Ob dies die versickerungshemmende Wirkung eines natürlichen Moores ersetzen kann, ist bis jetzt nicht klar.

## 5. Schlußfolgerungen

Die berechneten Versickerungsverluste betragen für Clara Bog 5–10 mm pro Jahr und für Raheenmore Bog 10–15 mm pro Jahr. Im Raheenmore Bog wird die Versickerung von einer dünnen Schicht ziemlich stark komprimierten Torfes beschränkt. Diese ist wahrscheinlich der Effekt eines bodenmechanischen Prozesses, der sich unter dem Einfluß eines relativ niedrigen piezometrischen Niveaus im mineralischen Substrat vollzogen hat. Das große piezometrische Gefälle zwischen dem untersten Teil des Torfes und dem Substrat wurde wahrscheinlich zum größten Teil vom Wachstum des stark gewölbten Moores bestimmt. Ein solcher Prozeß ist in Clara Bog nicht aufgetreten, weil dort die Versickerung von einem fast undurchlässigen glazi-limnischen Ton beschränkt wurde, wodurch ein starkes piezometrisches Gefälle in der untersten Torfschicht nie aufgetreten ist.

Der Prozeß der Selbstregulierung der Versickerungsverluste in Raheenmore Bog kann mit der Beziehung zwischen Substanzvolumen und Durchlässigkeit erklärt werden, wobei eine Zunahme des Substanzvolumens um 0.015 bis 0.020 eine mittlere Verringerung der Durchlässigkeit des Torfes von etwa einer Größenordnung bewirkt. Dieses könnte vielleicht erklären, warum oft Versickerungsverlustwerte in unterschiedlichen Hochmooren etwa gleich groß sind. Mit ihren niedrigen Versickerungsverlustwerten scheinen sowohl Clara Bog wie Raheenmore Bog besondere Fälle darzustellen. Beide sind aber, wie gezeigt, erklärbar.

In Moorresten mit einer dünnen Resttorfschicht ist der beschriebene Mechanismus, der die Versickerung hemmen kann, oft nicht mehr wirksam. Das zeigen die Versickerungsdaten aus solchen Gebieten. Nur eine allmähliche Verschlammung am Übergang zwischen Torf und mineralischem Substrat könnte hier auf lange Sicht doch noch wirksam werden und die Moorregeneration begünstigen.

## 6. Literaturverzeichnis

- BADEN, W. & EGGELSMANN, R. (1963): Zur Durchlässigkeit der Moorböden. – Z. Kulturtechn. u. Flurber. 4 (4): 226–254, 13 Abb., 10 Tab.; Hamburg.
- BELLAMY, D. (1987): The Wild Boglands. – 178 S., 60 Abb.; Facts on File Publications. New York.

- BLOETJES, O. A. J. & MEER, J. J. M. VAN DER (1992): A preliminary stratigraphical description of peat development on Clara Bog. – 121 S., 35 Abb., 98 Tab.; Irish-Dutch Peatland Study. Fysisch Geografisch en Bodemkundig Laboratorium, Universiteit van Amsterdam.
- EGGELSMANN, R. (1990): Moor und Wasser. – In: GÖTTLICH, Kh.: Moor- und Torfkunde. – 3. Aufl., S. 288–320, 23 Abb., 13 Tab.; Stuttgart.
- GALVIN, L. F. (1976): Physical properties of Irish peats. – Irish J. Agric. Res. **15**: 207–221, 8 Abb., 2 Tab.; Dublin.
- GALVIN, L. F. & HANRAHAN, E. T. (1967): Steady State Drainage Flow in Peat. – Highway Res. Rec. **203**: 77–90, 9 Abb., 3 Tab.; Highway Research Board, Nat. Ac. of Sci., Washington D. C.
- HEMOND, H. F. & GOLDMAN, J. C. (1985): On non-Darcyan flow in peat. – J. Ecol. **73**: 579–584, 1 Abb.; Oxford.
- INGRAM, H. A. P., (1982): Size and shape in raised mire ecosystems: a geophysical model. – Nature **297**: 300–303, 5 Abb., 1 Tab.; London.
- INGRAM, H. A. P., FOJT, W. & SMART, P. J. (1985): Die Durchlässigkeitsmerkmale des Niedermoortorfes im Upton Fen. – Telma **15**: 67–74, 2 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- IVANOV, K. E. (1981): Water Movement in Mirelands. – 276 S., 38 Abb., 20 Tab.; London.
- KERMACK, K. A. & HALDANE, J. B. S. (1950): Organic correlation and allometry. – Biometrika **37**: 30–41, 6 Tab.; Oxford.
- KIRKHAM, D. (1945): Proposed method for field measurement of permeability of soil below the water table. – Proc. SSSA **10**: 58–68, 7 Abb.; Madison WI, USA.
- KORPIJAAKKO, M. (1988): Consideration of the factors affecting the hydraulic conductivity of peat as ground of both laboratory and field tests. – Proc. VIII. Int. Peat Congress, Leningrad 1988. Vol. **III**: 127–136, 17 Abb., 1 Tab.; Leningrad.
- RODGERS, M. (1993): Final Report. Preliminary site investigation. Clara Bog, Co. Offaly. – 47 S., 35 Abb., 1 Tab.; Soil Mechanics Laboratory, University College, Galway.
- SCHOUWENAARS, J. M., AMERONGEN, F. VAN & BOOLTINK, M. (1992a): Hydraulic resistance of peat layers and downward seepage in bog relicts. – Int. Peat J. **4**: 65–76, 1 Abb., 3 Tab.; Jyväskylä, Finland.
- SCHOUWENAARS, J. M., BLANKENBURG, J. & STERK, G. (1992b): Hydrologische Feld- und Modellversuche in Hochmoor-Regenerationsflächen. – Telma **22**: 37–52, 10 Abb., 2 Tab.; Hannover.
- SIEGEL, D. I. (1992): Groundwater Hydrology. – In: WRIGHT, H. E., B. A. COFFIN & N. E. AASENG (eds.): The Patterned Peatlands of Minnesota. – 163–172, 10 Abb.; Minneapolis MN, USA.
- STREEFKERK, J. G. & CASPARIE, W. A. (1989): The hydrology of bog ecosystems. – 125 S., 44 Abb., 21 Tab.; Utrecht.
- UHDEN, O. (1960): Das Grosse Moor bei Ostenholz. – Schr.-R. Kuratorium Kulturbauwesen **9**: 159 S., 44 Abb., 32 Tab., 18 Anl.; Hamburg.
- WALSUM, P. E. V. VAN & VELDHUIZEN, A. A. (1995): Modelstudie waterhuishouding Fochteloërveen en omgeving: simulatie van scenario's voor het waterbeheer met SIMGRO. – DLO-Staring Centrum Wageningen, **399**: 179 S., 108 Abb., 11 Tab.; Wageningen.

Anschrift des Verfassers:

S. van der Schaaf  
Landbouwniversiteit  
Departement Omgevingswetenschappen  
Sectie Waterhuishouding  
Nieuwe Kanaal 11  
NL-6709PA Wageningen  
email: Sake.vanderschaaf@users@whh.wau.nl

Manuskript eingegangen am 12. Juni 1998