

TELMA	Band 46	Seite 61 - 82	6 Abb., 3 Tab.	Hannover, November 2016
-------	---------	---------------	----------------	-------------------------

# Hydraulische Eigenschaften unterschiedlicher *Sphagnum*-Torfe

Hydraulic properties of different *Sphagnum* peats

NIKO ROßKOPF, FRANK EDOM und JUTTA ZEITZ

## Zusammenfassung

Auf einer Versuchsfläche zum Anbau von Torfmoosen in Niedersachsen wurden Proben unterschiedlicher *Sphagnum*-Torfe entnommen und im Labor hinsichtlich ihrer hydraulischen Eigenschaften untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass die hydraulischen Eigenschaften der verschiedenen *Sphagnum*-Torfe je nach Genese und pflanzlicher Zusammensetzung unterschiedlich sind und dass bei geringen Humositätsgraden horizontale und vertikale Wasserleitfähigkeiten deutlich voneinander abweichen. Daraus ergeben sich Schlussfolgerungen für Wiedervernässungsvorhaben sowie zur optimalen Gestaltung von Anbauflächen für Torfmoose.

## Abstract

On an experimental site in Lower Saxony samples of various *Sphagnum* peats were collected for laboratory analyses of hydraulic properties. It turned out that the hydraulic properties of the peats are different and that at low degrees of decomposition horizontal and vertical water conductivities differ significantly. This has implications for peatland rewetting and for optimal water management of *Sphagnum* farming sites.

## 1. Einleitung und Zielstellung

Seit 2011 wird auf einer Versuchsfläche im Hankhausener Moor, einem Regenmoor in der Nähe der Ortschaft Rastede in Niedersachsen, die Möglichkeit des Anbaus von Torfmoosen untersucht. In diesem von der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe geförderten Projekt mit dem Namen „Moosgrün“ arbeiten unter der Koordination der Universität Greifswald eine Reihe von Projektpartnern. Im Teilprojekt „Hydrologie“ sollten dabei die hydrologischen und hydroklimatischen Prozesse auf einer Teilfläche intensiv studiert und modelliert werden, um hydrologische Anforderungen an eine für den Anbau von Torfmoosen geeignete Fläche zur Vernässung formulieren zu können.

Wesentlicher Parameter für das Verständnis geohydraulischer Prozesse und die Modellierung sind die gesättigte Wasserleitfähigkeit und die entwässerbare bzw. auffüllbare Porosität. Aus der Literatur liegen Werte hierfür vor (u.a. RYCROFT et al. 1975, EGGELSMANN 1981a, SCHWEIKLE 1990). Eine Bewertung dieser Ergebnisse ist zum Teil erschwert, da Torfarten, Humositätsgrade und Dichten nicht in allen Fällen differenziert betrachtet werden. Außerdem ist nicht immer die verwendete Methode hinreichend beschrieben. Daher war es ein Ziel der Untersuchung, mittels Laborbestimmungen Aussagen zu gesättigter Wasserleitfähigkeit und Porosität und damit über die spezifischen hydraulischen Eigenschaften unterschiedlicher *Sphagnum*-Torfe bei verschiedenen Humositätsgraden zu gewinnen.

Nachfolgend wird zunächst näher auf die Theorie der hydraulischen Parameter eingegangen, da der Wissensstand hierzu in letzter Zeit gewachsen ist, Definitionen abgeglichen werden müssen und den Vernässungspraktikern der Sinn der Datenbereitstellung erläutert werden soll.

## 2. Stand des Wissens zu hydraulischen Parametern von Torf

Torf verfügt über ein sehr hohes Gesamtporenvolumen, das sich maßgeblich auf weitere physikalische Eigenschaften auswirkt. In Abhängigkeit von primärer Genese (und der daraus resultierenden Torfart) und dem Grad der Pedogenese (und dem daraus resultierenden Bodenhorizont) unterscheiden sich die physikalischen Eigenschaften der Torfe mitunter sehr stark (BOELTER 1969, EGGELSMANN 1981a, SCHWEIKLE 1990, SCHÄFER 2002). Um Aussagen über die laterale und vertikale Wasserbewegung sowie die Wasserspeicherung an einem Moorstandort vornehmen zu können, ist daher eine detaillierte Betrachtung der spezifischen physikalischen Eigenschaften der jeweiligen Torfarten und Bodenhorizonte notwendig.

### 2.1 Wasserleitfähigkeit

Ein Boden wirkt durch die Eigenschaften seines Porensystems mehr oder weniger stauend auf das ihn durchfließende Wasser. Dieser Einfluss des Bodens wird durch die „Wasserleitfähigkeit“ oder „Wasserdurchlässigkeit“ charakterisiert. Sie entspricht dem Kehrwert des Fließwiderstandes (HARTGE & HORN 2009).

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit ist ein wesentlicher hydraulischer Parameter und ermöglicht, kombiniert mit anderen physikalischen Kennwerten (wie z.B. der Trockenroh-dichte), Aussagen über die Struktur des Bodens, insbesondere die Porenvolumina und Porenkontinuität (HARTGE & HORN 2009). Der Parameter „gesättigte Wasserleitfähigkeit“ ist ausschlaggebend für die vertikale Versickerungsrate und den horizontalen Abstrom und dementsprechend für das ober- und unterirdische Abflussverhalten von Moorflächen.

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit der Torfe ist daher ein elementarer Parameter zur Kennzeichnung von Moorstandorten (u.a. MITSCHERLICH 1956, BADEN & EGGELSMANN 1964).

Grundlage der Berechnung der Fließgeschwindigkeiten im porösen Medium stellt die DARCY- Gleichung dar. Sie beschreibt die Wassermenge, die je Zeiteinheit durch eine bestimmte Fläche hindurch strömt (INGRAM et al. 1974, SCHEFFER et al. 2010). Die gesättigte Wasserleitfähigkeit ist temperaturabhängig und sollte nach SCHWEIKLE (2012) daher auf 20 °C Basis angegeben werden.

Gleichung 1: Berechnung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf-Wert) nach dem Verfahren der stationären Strömung aus der Ableitung der Darcy-Gleichung und Zurückführung auf die einzelnen zu messenden Größen (DIN 19683-9 2012)

$$kf = \frac{V}{A \cdot t} * \frac{l}{\Delta h} \quad (1)$$

kf = gesättigte Wasserleitfähigkeit (cm d<sup>-1</sup>)

V = perkolierendes Wasservolumen (cm<sup>3</sup>)

A = Fließquerschnitt (cm<sup>2</sup>)

t = Zeit (d)

l = Länge der Fließstrecke (cm)

Δh = hydraulische Druckhöhendifferenz (cm)

Grundvoraussetzung für die Anwendung der DARCY- Gleichung ist laminares Fließen.

Nach MITSCHERLICH (1956), RYCROFT et al. (1975) und EGGELSMANN (1981b) ist die Wasserleitfähigkeit in Torfen abhängig von der Torfart, und innerhalb dieser beeinflussen Humositätsgrad (nach VON POST 1922), Substanzvolumen bzw. Dichte und Porengrößenverteilung den Wert.

Hinsichtlich der Torfart lässt sich feststellen, dass die Leitfähigkeit bei vergleichbaren Humositätsgraden von den eher homogenen *Sphagnum*-Torfen über die Laubmoos-, Seggen- und Schilftorfe zu den Bruchtorfen hin zunimmt (BADEN & EGGELSMANN 1963). Homogen meint in diesem Zusammenhang einen gleichförmigeren Aufbau bzw. entsprechende Lagerung. Die Matrix der beiden letztgenannten Torfe weisen beispielsweise als Torfbestandteile häufig grobe Reste wie Rhizome oder Holzstücke auf, was mitunter die Ausbildung von Makroporen begünstigt. Die *Sphagnum*-Torfe werden als vergleichsweise homogen bezeichnet, obwohl sie auch Beimengungen wie *Eriophorum* aufweisen können.

*Sphagnum*-, Laubmoos- und Seggen-Torfe sind jeweils aus unterschiedlichen Pflanzenresten innerhalb einer Gruppe zusammengesetzt. So werden z.B. *Sphagnum*-Torfe in *Cuspidata*-, *Cymbifolia*- und *Acutifolia*-Torfe gegliedert, die allein schon optisch auf unter-

schiedliche Poreneigenschaften schließen lassen. Bezüglich der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit werden sie aber in der deutschsprachigen Literatur bisher kaum unterschieden (BADEN & EGGELSMANN 1963, BURGHARDT 1976).

Je homogener die Torfe aufgebaut und gelagert sind, desto größer ist der Zusammenhang zwischen Humositätsgrad und Wasserleitfähigkeit. Dabei nimmt die Wasserleitfähigkeit mit zunehmendem Humositätsgrad ab (EGGELSMANN 1981a). Dies gilt jedoch nur, wenn keine entwässerungsbedingte Schrumpfung oder Segregierung die Struktur der Torfe überprägt (ZEITZ & TÖLLE 1996).

Generell lässt sich feststellen, dass die Spannweite der gemessenen gesättigten Wasserleitfähigkeitswerte hoch ist (PÄIVÄNEN & HÄNELL 2012). Das gilt sowohl für mineralische als auch für organische Substrate (BADEN & EGGELSMANN 1963, HARTGE & HORN 2009).

Betrachtet man die in der Literatur aufgeführten Werte differenziert nach Torfart und Humositätsgrad, so wird deutlich, dass die geringste Spannweite im Bereich der niedrigen bis mittleren Humositätsgrade (H2-4 und H5-8) zu verzeichnen sind. Ursächlich hierfür könnte sein, dass Torfe mit Humositätsgraden  $>8$  eine heterogenere Porenraumgliederung aufweisen und damit eine größere Wertestreuung begünstigen (BADEN & EGGELSMANN 1963, BURGHARDT 1976).

ZINKE & EDM (2006) geben eine Übersicht der Untersuchungen verschiedener Autoren, in denen die gesättigte Wasserleitfähigkeit in Abhängigkeit des Humositätsgrades betrachtet wurde (vgl. Abb. 1).

Daraus ist ablesbar, dass bei den betrachteten Untersuchungen eine Abnahme der Wasserleitfähigkeit mit zunehmender Zersetzung bzw. Humosität zu verzeichnen ist. Der Parameter Humositätsgrad ist somit eine Schlüsseleigenschaft, welche die hydraulischen Eigenschaften der Torfe bestimmt. Betrachtet man bei den verschiedenen Autoren die Unterschiede in den kf-Werten bei gleichem Humositätsgrad, so betragen diese zwei Zehnerpotenzen und mehr. Solche Unterschiede in den Literaturwerten sind unbefriedigend hinsichtlich einer Wasserbilanzierung, denn damit berechnete Wasserflussunterschiede betragen demnach das Hundertfache und mehr. Die drei fast parallelen Kurven bei unterschiedlichen Substanzvolumen könnten eine Ursache der Unterschiede erklären: Die Torfe für die Untersuchungen sind von den Autoren bei unterschiedlicher Dichte (Komprimierung) genommen worden. Auffällig ist, dass die Werte von BADEN & EGGELSMANN (1963) im Allgemeinen niedriger sind als die finnischer oder russischer Autoren. Das mag ein Hinweis darauf sein, dass deutsche Autoren Proben hauptsächlich in schon komprimierten Torfen (vorentwässert und entwässert sowie mit landwirtschaftlichen oder Torfabbaumaschinen befahren) genommen haben, während die russischen und finnischen Untersuchungen natürliche oder weniger komprimierte forstlich entwässerte Hochmoore in ihre Probenahme mit einbeziehen.

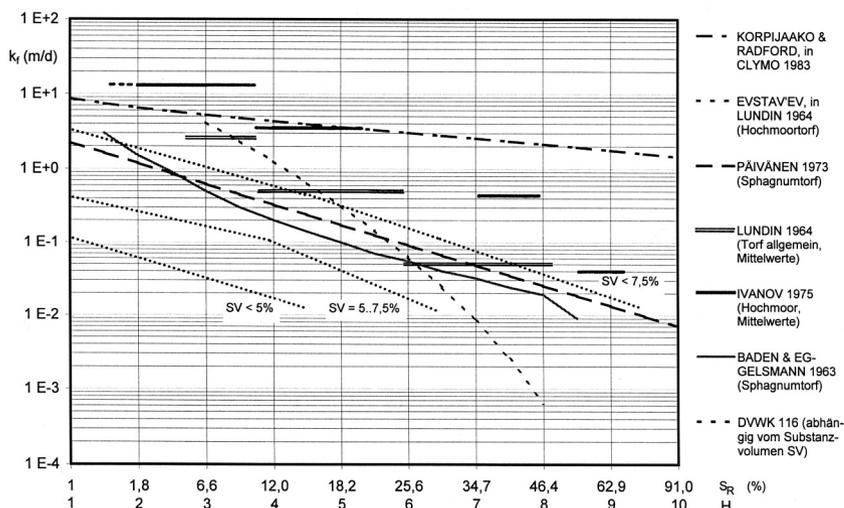


Abb. 1: Beziehung zwischen Humositätsgrad H nach von POST (1922) bzw. den russischen Zersetzungsgraden SR und gesättigter hydraulischer Leitfähigkeit ( $k_f$ ) für „Hochmoortorfe“ nach Angaben verschiedener Autoren (aus ZINKE & EDMOND 2006)  
 Relationship between the degree of decomposition H according to von POST (1922) respectively the Russian decomposition degree SR and the saturated hydraulic conductivity ( $k_f$ ) for „bog beat“ by various authors (from ZINKE & EDMOND 2006)

Da der Humositätsgrad sehr stark mit der Trockenrohddichte der Torfe korreliert (ZEITZ et al. 2008), kann angenommen werden, dass die Trockenrohddichte als objektiv messbarer Parameter ebenso Aufschluss über die Wasserleitfähigkeit gibt.

Bemerkenswert ist, dass bezüglich der Trockenrohddichte deutliche Unterschiede zwischen den Torfarten bestehen. Bruchwaldtorfe weisen bei gleicher Wasserleitfähigkeit eine höhere Trockenrohddichte auf als andere Niedermoortorfe oder gar *Sphagnum*-Torfe (BURGHARDT 1976). Dies ist durch Unterschiede im Aschegehalt und spezifischem Gewicht der Pflanzen zu erklären.

Auch die Entnahmetiefe der Torfproben hat einen indirekten Einfluss auf die Wasserleitfähigkeit. Mit zunehmender Entnahmetiefe nimmt, bedingt durch die stärkere Kompaktion infolge höherer Auflast der darüber liegenden Schichten, die Trockenrohddichte zu und damit die Wasserleitfähigkeit der untersuchten Torfe ab (BOELTER 1965, PÄIVÄNEN 1973).

MALMSTROEM (1925, zitiert in BOELTER 1968) und SARASTO (1961) stellten höhere Wasserleitfähigkeiten in horizontaler als in vertikaler Richtung fest. BOELTER (1965) selbst konnte dies zwar nicht bestätigen; doch ist bekannt, dass die hydraulische Anisotropie (=Richtungsabhängigkeit) umso geringer ist, je homogener die Torfe sind. Bei besonders heterogenen Torfen, wie sie beispielsweise in Überflutungsmooren mit häu-

figer Sedimentation von Schwebstoffen entstehen, ist die Anisotropie stark ausgeprägt. Die Wasserleitfähigkeit kann in diesen Torfen in horizontaler und vertikaler Richtung um das Zehnfache differieren (EGGELSMANN & SCHUCH 1980, SCHUCH 1980). Neben der Homogenität sind somit auch die Ablagerungsrichtung und die Richtung des Wurzelwachstums der Torfbildner sowie evtl. vorhandener Bäume entscheidende Einflussfaktoren. Bei Hochmoortorfen ist die horizontale Durchlässigkeit in Einzelfällen sogar um das 100 bis 300fache größer als die vertikale (LUNDIN 1964).

Bezüglich möglicher Wasserverluste ist die hydraulische Anisotropie sehr bedeutsam, entscheidet sie doch über die Strömungsrichtung des Wassers im Torf. In der deutschsprachigen Literatur sind kaum Angaben über die hydraulische Anisotropie in Hochmoortorfen zu finden. Diese Lücke soll die vorliegende Arbeit helfen zu schließen.

Zu beachten ist, dass auch die Untersuchungsmethodik sich auf die Genauigkeit der ermittelten Werte auswirkt. Dabei muss festgestellt werden, dass Bohrloch- und Sickerrohrmethoden unzureichend zwischen horizontalen und vertikalen  $k_f$ -Werten differenzieren können. Vielmehr wird hier eine integrale Wasserströmung im Umfeld des Gerätes gemessen, wobei der höhere Wert (horizontal oder vertikal) den größeren Einfluss ausüben dürfte.

Die Literaturlauswertung zeigte, dass die Berechnung der gesättigten Wasserleitfähigkeit mittels DARCY-Gleichung bei pedogen veränderten Torfen sehr problematisch ist (HEMOND & GOLDMAN 1985). Bei sinkendem Wasserstand, d.h. zeitweiliger oder ständiger Belüftung, verändert sich die Matrix des organischen Gerüsts. Es können Gefüge entstehen, in denen die Grundvoraussetzung des laminaren Fließens nicht mehr gegeben ist (SCHWEIKLE 1990, HÖLTING & COLDEWEY 2009). Bei großen Poren und entsprechenden Fließgefällen entsteht turbulentes Fließen (postlinearer und turbulenter Bereich des DARCY-Gesetzes, siehe BUSCH et al. 1993) mit anderen Widerstandsgesetzen; bei sehr kleinen Poren (prälinearer Bereich) wird für Torfe die Anwendung elastischer (druckabhängiger)  $k_f$ -Werte vorgeschlagen (HEMOND & GOLDMAN 1985).

## 2.2 Entwässerbare Porosität

Die entwässerbare  $n_e$  bzw. die auffüllbare Porosität  $n_a$  sind diejenigen Größen einer Schicht oder eines Horizontes der Tiefe  $z$ , welche die Wasserspiegelschwankungen  $z$  in dieser Tiefe im Zeitraum  $\Delta t$  bei Wasserbilanzunterschieden  $\Delta WB$  maßgeblich bestimmt (Gleichung 2):

$$\Delta z = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \frac{\Delta WB}{n_{e/a}(z)} dt \quad (2)$$

Je kleiner die entwässerbare bzw. auffüllbare Porosität bei Wasserständen einer bestimmten Tiefe ist, desto größer sind die Wasserspiegelschwankungen am Standort bei gleichen

Wasserbilanzunterschieden. Deswegen sind zur Berechnung bzw. Modellierung von Wasserstandsschwankungen Kenntnisse über die standörtlichen Porositätsparameter wesentlich.

Die entwässerbare Porosität  $n_e$  wird in Hydrologie und Hydrogeologie auch Speicherkoeffizient genannt (z.B. BUSCH et al. 1993, JORDAN & WEDER 1995) und wird in der Literatur vor allem anhand einer gravitativen Entleerung der Poren erklärt.

Da es in der Natur neben der Gravitation noch weitere Entleerungsvorgänge der Poren gibt, z.B. über Evaporation und Transpiration bis zum Extremfall einer feuerbedingten Evaporation, wären weitere Typen einer „entwässerbaren“ Porosität definierbar. Die auffüllbare Porosität  $n_a$  entspricht dem zu Beginn des Auffüllvorganges erreichten Entwässerungsstadium der Poren und dürfte meistens der gravitativ entwässerbaren Porosität plus der bis dahin durch Verdunstung erreichten Entleerung des Haftwassers entsprechen.

### 2.2.1 Hydrologische Bestimmung der entwässerbaren Porosität in Moorböden

Die verschiedenen Moorböden weisen eine größere räumliche Diversität und zeitliche Veränderlichkeit als mineralische Böden auf (ZEITZ 1988, STEGMANN et al. 2001, STEGMANN & ZEITZ 2001, EDMOND et al. 2009b). Horizontal führt dies zu einem Nebeneinander verschiedener Ökotoptypen und Bodentypen, vertikal in jedem Typ zur Ausbildung einer Zonierung hydraulischer Parameter. Die vertikale Zonierung wird in der Literatur durch Tiefenfunktionen hydraulischer Parameter (IVANOV 1975, IVANOV & NOVIKOV 1976, VAN DER SCHAAF 1999, EDMOND 2001, FRAHM 2007, NOVIKOV 2009, EDMOND et al. 2011) oder durch physikalische Kennzeichnung von Substrat-Horizontgruppen (ZEITZ 1988, 2001) ausgedrückt.

Setzt man Formel (2) voraus, ergibt sich daraus eine übliche Bestimmung der entwässerbaren und auffüllbaren Porositäten im Feld. In einer Phase exakt bilanzierbarer Wasserbilanzänderungen  $WB$ , z.B. einer Regen- oder Verdunstungsperiode, wird anhand kurzzeitig gemessener Wasserspiegeländerungen in den entsprechenden Tiefen die entwässerbare oder auffüllbare Porosität in den entsprechenden Tiefen bestimmt (IVANOVA et al. 1990, VAN DER SCHAAF 1999, FRAHM 2007). Es ergeben sich Tiefenfunktionen der entwässerbaren Porosität aus der sogenannten „Monolithmethode“, bei denen 80 bis 100 cm tiefe ausgestochene Torfmonolithen mit 500 bis 700 cm<sup>2</sup> Grundfläche im Labor einer schichtweisen gravitativen Entwässerung unter Ausschluss der Verdunstung unterzogen werden (IVANOVA et al. 1990).

### 2.2.2 Bestimmung der Wasserretentionskurve

Eine weitere Methode zur Bestimmung tiefenabhängiger Poreneigenschaften ist die Ermittlung der Wasserretentionskurve, aus der auch die entwässerbare Porosität abgeleitet werden kann. Die Wasserretentionskurve, auch Wassergehaltskurve, pF-Kurve oder Bo-

denwassercharakteristik genannt, gibt an, welches Potential (negativer Druck, Spannung) bei verschiedenen Wassergehalten im (ungesättigten) Boden herrscht (HARTGE & HORN 2009). Da es sich bei den beteiligten Potentialen neben Adsorptions- vor allem um Kapillarkräfte handelt, kann aus der Wasserretentionskurve auch die Porengrößenverteilung im Boden berechnet werden, sofern für die Poren eine zylindrische Gestalt angenommen wird und infolgedessen ein Äquivalenzdurchmesser zugeordnet werden kann (HARTGE & HORN 1999).

Bei Torfen ist die Berechnung der Porengrößenverteilung aus der Wasserretentionskurve mit Schwierigkeiten verbunden, da die torfbildenden Pflanzen einerseits selbst Poren enthalten und andererseits auch Poren bilden (SCHWEIKLE 1990). Diese Intra- und Interporen lassen sich mit der angewandten Labormethode nicht getrennt ausweisen. Die Intraporen werden messmethodisch im Bereich der Feinporen ermittelt. Eine genauere Beschreibung der Feinstrukturen der Torfe könnte mittels Dünnschliffen und Computertomographie erfolgen.

Das Gesamtporenvolumen (GPV) ist der Anteil aller Hohlräume im Boden. Dieser kann mit Wasser oder Gasen gefüllt sein. In ihm spielen sich alle Wasserbewegungen und der Gasaustausch ab. Das GPV unterteilt sich in drei Porengrößenklassen. Die Grobporen (Äquivalenzdurchmesser  $>10 \mu\text{m}$ ) sind entscheidend für die Gas- und Wasserbewegung im Substrat. Der Anteil der Grobporen kann als Maß für die gravitativ entwässerbare Porosität  $n_{e-g}$  genutzt werden (zum Teil wird diese auch nur „entwässerbare Porosität“ genannt, s. oben). Es entspricht zahlenmäßig gemäß KRETSCHMER & BOHNE (1981) sowie DYCK & PESCHKE (1995) der Luftkapazität LK (FK = Feldkapazität):

$$n_{e-g} = LK = GPV - FK \quad (3)$$

Für die Luftkapazität gibt es in der Literatur unterschiedliche Angaben. Abweichend von KRETSCHMER & BOHNE (1981) sowie DYCK & PESCHKE (1995) wird nach AG BODEN (2005) sowie BLUME et al. (2011) die Luftkapazität den schnell dränenden Grobporen gleichgestellt (Äquivalenzdurchmesser  $>50 \mu\text{m}$ ;  $pF < 1,8$ ). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird diese Definition der Luftkapazität verwendet.

Die Mittelporen ( $0,2-10 \mu\text{m}$ ) und die langsam dränenden Grobporen ( $10-50 \mu\text{m}$ ) beinhalten das Wasser, das gegen die Gravitation längere Zeit gehalten wird, aber noch pflanzenverfügbar ist (= nutzbare Feldkapazität  $n_{FK}$ ). Die Mittel- und die Feinporen ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ) beinhalten das Haftwasser. In den Feinporen ist dieses so fest gebunden, dass es nicht pflanzenverfügbar ist (unterhalb des Welkepunktes WP). Man spricht daher auch vom Totwasser. Zum Totwasser oder hydrodynamisch inaktiven Raum gehören neben den Feinporen auch große, blind endende Poren. Die Blindporen werden experimentell im Bereich der Feinporen erfasst (LOXHAM & BURGHARD 1986).

$$WP = FK - nFK \quad (4)$$

Das Substanzvolumen (SV) ist der Anteil an mineralischer und organischer Substanz eines bestimmten Bodenvolumens (HARTGE & HORN 2009):

$$SV = 100 \text{ Vol-\%} - GPV \quad (5)$$

Die auffüllbare Porosität  $n_a$  ist der momentan wasserfreie Porengehalt und setzt sich aus der gravitativ entwässerbaren Porosität und der transpirativ entwässerbaren Porosität zusammen:

$$\max(n_a) = n_{e-g} + n_{e-t} = GPV - FK + nFK = GPV - WP \quad (6)$$

Die Wasserretentionskurve dient als Hilfsmittel bei der Beurteilung des Wasserhaushaltes, der Wasserbewegung und der Wasserspeicherung des Bodens. Durch das Anlegen charakteristischer definierter Saugspannungen (bzw. pF-Werte) lassen sich nun die genannten Porencharakteristika, so auch die entwässerbare Porosität, ermitteln. Dies ist nur näherungsweise möglich, weil die angenommene zylindrische Porengestalt insbesondere in Moorböden kaum zu finden ist und deswegen gravitativ andere als die definierten Potenziale wirken (vgl. DYCK & PESCHKE 1995). Im Weiteren sind die durch Pflanzen erzeugten Spannungen pflanzenartenspezifisch (LARCHER 2003) und für Moorpflanzen bisher nur wenig bekannt. Daher kann noch nicht abgeschätzt werden, inwieweit unterschiedliche Moor-Pflanzenarten die unterschiedlichen Porenräume des Bodens durch ihre Transpiration entleeren können.

### 3. Methoden

#### **Bodenansprache und Probenahme**

Mittels *Eijkelkamp*-Moorklappsonde wurden Standorte vorsondiert, um Punkte zu finden, welche über ein repräsentatives Torfschichteninventar verfügen. Ziel war, möglichst alle Grundtypen von Torfmoostorfen unterschiedlicher Humositätsgrade (H nach VON POST 1922) der Versuchsfläche Hankhausen beproben zu können. An den ausgewählten Standorten wurden Bodengruben ausgehoben, an denen eine Beschreibung nach Vorgaben der Bodenkundlichen Kartieranleitung (AG BODEN 2005) erfolgte. Nach Profilansprache wurden in den Gruben schichtweise Bodenproben entnommen. Insgesamt wurden vier Bodengruben untersucht, an denen die folgenden *Sphagnum*-Torfe entnommen wurden:

- Sektion *Cymbifolia* (Hhsy mit H3 und H5),
- Sektion *Cuspidata* (Hhsu mit H7),
- Sektion *Acutifolia* (Hhsa mit H7).

Es wurden sowohl Mischproben (für die Bestimmung im Drucktopf) als auch volumetrisch definierte Proben mittels 100 cm<sup>3</sup> Stechzylinder entnommen (für kf-Haubenpermeametermessung und zur pF-Bestimmung mittels Sand- und Kaolinplatten). Zur Klärung der richtungsabhängigen Unterschiede der Wasserleitfähigkeit und der Verteilung von Grob- und Feinstrukturen wurden je Schicht jeweils zehn Stechzylinder in horizontaler (aus der Profilgrube von vorne) und vertikaler (aus der Profilgrube von oben) Richtung entnommen. Die Stechzylinder wurden im Labor zuerst zur kf-Bestimmung und anschließend zur Ermittlung der Wasserretentionseigenschaften verwendet.

Tab. 1: Labormethoden  
Laboratory methods

Parameter	Methode	Einheit	Norm
Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf)	Messung an 100 cm <sup>3</sup> Stechzylinder mittels Haubenpermeameter nach HARTGE (1966)	cm d <sup>-1</sup>	DIN 19683-9
Gesamtporenvolumen (GPV) Luftkapazität (LK) Nutzbare Feldkapazität (nFK)	stufenweise Entwässerung nasser Volumenproben mittels Sand und Kaolin-Druckplatten (Unterdruckmethode) bzw. ab >pF <sub>2,7</sub> mittels Drucktopf (Überdruckmethode)	Vol.-%	DIN EN ISO 11274
Permanenter Welkepunkt (PWP)	LK= GVP-pF <sub>1,8</sub> nFK= pF <sub>1,8</sub> -pF <sub>4,2</sub> PWP=pF <sub>4,2</sub>		
Trockenrohddichte (TRD)	Trocknung bei 105 °C	g cm <sup>3</sup>	DIN ISO 11272

## 4. Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Ergebnisse der Geländeuntersuchungen

Bei den im Gelände angesprochenen Profilen handelt es sich gemäß KA5 (AG Boden 2005) um Normerdhochmoore. Der vererdete Oberboden weist im Gegensatz zu den geringer degradierten Unterbodenhorizonten ein krümeliges Gefüge auf. Als Torfart ließ sich in diesem durch Humifizierung und Mineralisierung pedogenetisch veränderten Oberboden amorpher Torf ausweisen. Im Gegensatz zu den darunter folgenden Bodenhorizonten konnte hier somit kein Rückschluss auf den Torfbildner vorgenommen werden. Eine nähere hydraulische Betrachtung der Oberböden war nicht notwendig, da der degradierte Oberboden zur Einrichtung der Torfmoosversuchsfläche ohnehin abgeschoben wird.

Die Unterbodenhorizonte und tieferen Torfschichten weisen nahezu keine pedogenetischen Überprägungen in Form von Segregierung oder Schrumpfung auf. Sie befinden sich im Grundwasserschwankungsbereich oder im durch dauerhafte Wassersättigung gekennzeichneten Teil des Torfkörpers. Als Substratarten dominieren *Sphagnum*-Torfe der Sektio-

nen *Acutifolia*, *Cymbifolia* und *Cuspidata*. Darüber hinaus sind Wollgräser (*Eriophorum*) und Blasenbinsen (*Scheuchzeria*) häufig als Beimengung in den Torfen enthalten.

#### 4.2 Ergebnisse der Wasserleitfähigkeitsmessungen

HARTGE & HORN (2009) empfehlen bei nicht vorhandener Normalverteilung der Messergebnisse die Verwendung von geometrischen Mittelwerten oder Medianen. Abweichend vom allgemein üblichen Verfahren, das Ergebnis mehrerer Parallelmessungen durch das arithmetische Mittel auszudrücken, wurde daher der Median als aussagekräftiger Wert angesehen. Die Ergebnistabelle enthält auch die arithmetischen Mittelwerte (Tab. 2).

Die generell höchsten Wasserleitfähigkeiten mit einem Median von 148 cm d<sup>-1</sup> konnten bei den gering zersetzten *Cymbifolia*-Torfen (Hhsy) festgestellt werden (Tab. 2).

Die Mediane der Wasserleitfähigkeit der untersuchten Torfarten wurden mittels Kruskal-Wallis-Test bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  hinsichtlich ihrer Signifikanz getestet (KRUSKAL & WALLIS 1952). Danach zeigten alle untersuchten Torfsubstratgruppen signifikante Unterschiede im Median der Wasserleitfähigkeit.

Die geringste Wasserleitfähigkeit mit einem Median von 6 cm d<sup>-1</sup> wurde in den *Cuspidata*-Torfen (Hhsu) bei Humositätsgrad (H) 7 festgestellt. Die *Acutifolia*-Torfe (Hhsa) und die stärker humifizierte *Cymbifolia*-Torfe (Hhsy, H7) weisen mittlere Leitfähigkeiten zwischen 17 und 33 cm d<sup>-1</sup> auf.

Tab. 2: Gesättigte Wasserleitfähigkeiten (cm d<sup>-1</sup>); (H = Humositätsgrad nach VON POST (1922); SD = Standardabweichung, MW = Mittelwert; Hhsa = *Acutifolia*, Hhsu = *Cuspidata*, Hhsy = *Cymbifolia*)  
Saturated water conductivity (cm d<sup>-1</sup>); (H = degree of decomposition according to VON POST (1922); SD = standard deviation; MW = mean value; Hhsa = *Acutifolia*, Hhsu = *Cuspidata*, Hhsy = *Cymbifolia*)

Torfart	H	horizontal=h; vertikal = v	Entnahmetiefe in cm	n	Max.	Min.	SD	Median	MW
Hhsa	7	v+h	80-120	20	132	14	27	26	33
Hhsa	7	h	80-120	13	132	14	33	26	39
Hhsa	7	v	80-120	7	32	17	5	25	25
Hhsu	7	v+h	70-80	20	20	3	4	6	6
Hhsu	7	h	70-80	10	10	5	153	7	7
Hhsu	7	v	70-80	10	20	3	6	6	6
Hhsy	3	v+h	40-60	25	512	12	130	148	175
Hhsy	3	h	40-60	10	512	84	153	236	236
Hhsy	3	v	40-60	15	283	12	90	113	113
Hhsy	5	v+h	50-60	20	94	5	23	17	18
Hhsy	5	h	50-60	10	43	13	11	19	19
Hhsy	5	v	50-60	10	94	5	31	16	16

Vergleicht man die Leitfähigkeiten unterschiedlicher Torfarten bei gleicher Humosität, so lässt sich feststellen, dass die *Cuspidata*-Torfe deutlich geringere Leitfähigkeiten aufweisen als *Acutifolia*-Torfe. Dementsprechend können *Acutifolia*-Torfe im gesättigten Zustand von etwa viermal so viel Wasser durchflossen werden als *Cuspidata*-Torfe. Diese substratartenabhängigen Unterschiede in den Leitfähigkeiten resultieren aus der spezifischen Torfgenese. Die Torfmoose der Sektion *Cuspidata* bevorzugen häufig flutende oder untergetauchte Standorte (GROSSE-BRAUCKMANN 1990). Hauptlebensraum bilden damit die Schlenken der Regenmoore oder andere sehr nasse Bereiche, in denen zusätzlich auch Algen sowie Detritus sedimentieren können (EDOM et al. 2009a). Durch diese flutende Lebensweise und die speziellen Prozesse von Zersetzung und Komprimierung kommt es bei den Torfmoosen der Sektion *Cuspidata* zur Ausbildung eines Porensystems, das sich von dem anderer *Sphagnum*-Torfe unterscheidet (PÄIVÄNEN 1973, GROSSE-BRAUCKMANN 1990).

Berücksichtigt man zusätzlich noch die Gesamtporenvolumina des *Cuspidata*-Torfes (94,0 %) und des *Cymbifolia*-Torfes (90,6%) (vgl. Tab. 3), so zeigt sich, dass bei höherem Gesamtporenvolumen der *Cuspidata*-Torf über eine geringere Wasserleitfähigkeit verfügt als der *Cymbifolia*-Torf. Hier wird deutlich, dass die Wasserdurchlässigkeit weniger eine Funktion der Porenraumgliederung als vielmehr der Ausformung der einzelnen Poren ist. Das hatte bereits BURGHARDT (1976) mit seinen Untersuchungen zeigen können.

Wichtig ist die Erkenntnis, dass die kf-Werte der verschiedenen *Sphagnum*-Sektionen sich unterscheiden. Selbst bei hohen Humositätsgraden können sie um das Vierfache differieren. Das zeigt, dass die bisher in der Literatur (u.a. BOELTER 1968) angegebenen kf-Werte für *Sphagnum*-Torf allgemein bzw. Hochmoortorf nicht genau genug sind. Dies konnte für die untersuchten Standorte im Hankhäusener Moor belegt werden.

Die nach Entnahmerichtung differenzierten Ergebnisse der Wasserleitfähigkeiten zeigen nicht die nach der Literaturrecherche erwartete Anisotropie für die *Acutifolia*-Torfe bei H7. Es sind keine signifikanten Unterschiede der Mediane der Wasserleitfähigkeit zu verzeichnen (vgl. Abb. 2).

Da nur *Acutifolia*-Torfe mit H 7 untersucht wurden, sollten die Leitfähigkeitsuntersuchungen noch mit Proben anderer Humositätsgrade durchgeführt werden, um generellere Aussagen vornehmen zu können. Es lässt sich feststellen, dass die Streuung der Messergebnisse bei horizontaler Probenentnahme größer ist als bei der vertikalen Entnahme. Ursächlich hierfür könnten die spezifischen Lagerungserscheinungen der *Acutifolia*-Torfe sein (GROSSE-BRAUCKMANN 1990).

Die Wasserleitfähigkeit der *Cuspidata*-Torfe mit Werten im Median zwischen 6 und 7 cm d<sup>-1</sup> liegt bei allen Entnahmevarianten im gering leitenden Bereich. Die Streuungen der Einzelergebnisse sind recht gering, bei den horizontalen Probenahmen noch geringer als bei

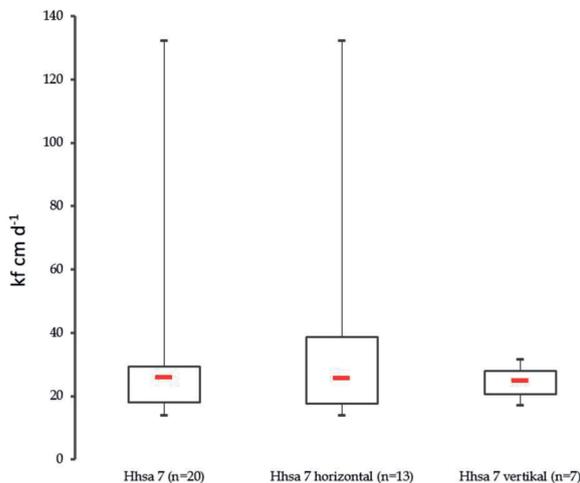


Abb. 2: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der *Acutifolia*-Torfe in Abhängigkeit der Probenahmerichtung (roter Strich = Median)  
Saturated hydraulic conductivity (kf) for *Acutifolia* peat depending on the sampling direction

vertikal entnommenen Proben (vgl. Abb. 3). Auch hier wurde aufgrund der spezifischen Lagerungseigenschaften der *Cuspidata*-Torfe eine richtungsabhängige größere Wertestreuung nach horizontalen Probenahmen erwartet.

Ursächlich hierfür könnte die Homogenität der untersuchten Torfe bei H7 sein. Dies hat möglicherweise die spezifischen Lagerungseigenschaften der *Cuspidata*-Torfe überprägt.

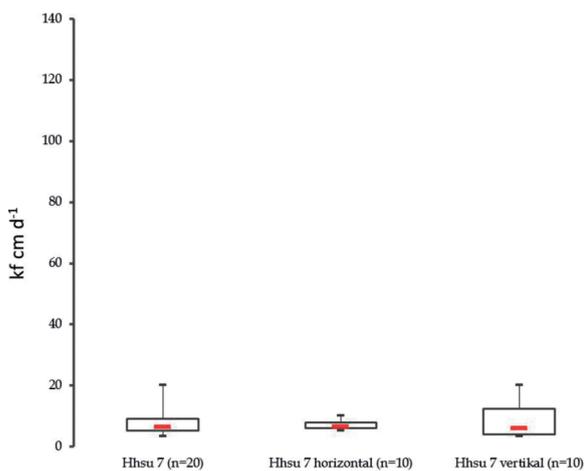


Abb. 3: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der *Cuspidata*-Torfe in Abhängigkeit der Probenahmerichtung (roter Strich = Median)  
Saturated hydraulic conductivity (kf) for *Cuspidata* peat depending on the sampling direction

Für die gering humifizierte Torfe der Sektion *Cymbifolia* (Hhsy bei H3) lässt sich hingegen ein richtungsabhängiger Unterschied in der gesättigten Wasserleitfähigkeit feststellen (Abb. 4). Die kf-Werte der horizontalen Probenahmen weisen im Median mit  $236 \text{ cm d}^{-1}$  mehr als doppelt so hohe Werte auf als die der entsprechenden Torfe bei vertikaler Probenahme. Das bedeutet, dass innerhalb der *Cymbifolia*-Torfe der horizontale Wasserstrom eine größere Rolle spielt als der vertikale. In den etwas stärker zersetzten Proben der *Cymbifolia*-Sektion mit H5 kann kein richtungsabhängiger Leitfähigkeitsunterschied mehr festgestellt werden.

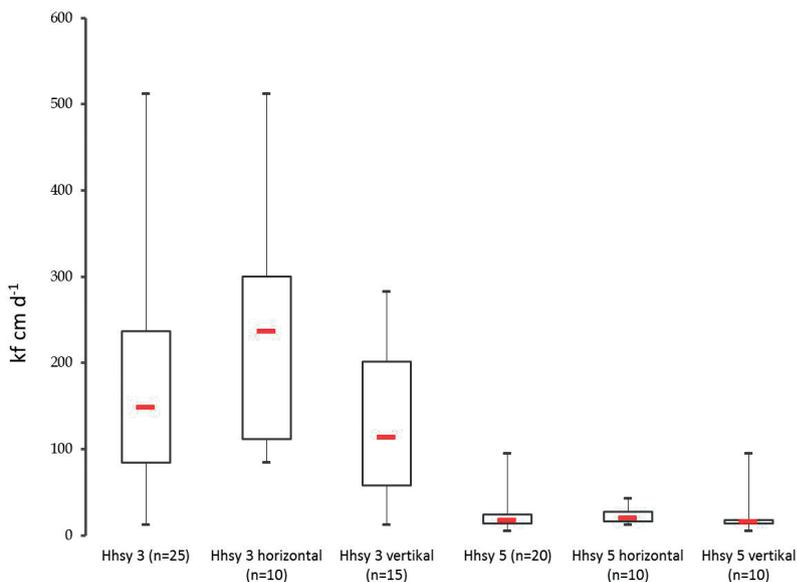


Abb. 4: Gesättigte Wasserleitfähigkeit (kf) der *Cymbifolia*-Torfe in Abhängigkeit der Probenahmeart und des Humositätsgrades (roter Strich = Median)  
Saturated hydraulic conductivity (kf) for *Cymbifolia* peat depending on the sampling direction and the degree of decomposition

Innerhalb einer Torfart nimmt mit zunehmendem Humositätsgrad die Wasserleitfähigkeit ab (Abb. 4). Die Leitfähigkeit der gering zersetzten *Cymbifolia*-Torfe (H3) im Median mit  $148 \text{ cm d}^{-1}$  ist im Vergleich zu stärker zersetzten *Cymbifolia*-Torfen (H5) mit kf-Werten im Median von  $17 \text{ cm d}^{-1}$  mehr als achtmal so hoch.

Betrachtet man die Wasserleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Humositätsgrad, so lässt sich bezogen auf alle untersuchten Torfe feststellen, dass mit zunehmendem Humositätsgrad eine Abnahme der Leitfähigkeit zu verzeichnen ist (Abb. 5).

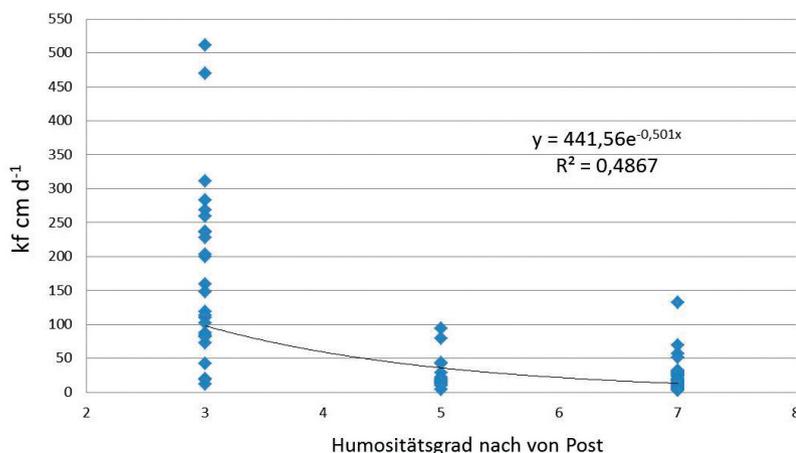


Abb. 5: Zusammenhang zwischen der gesättigten Wasserleitfähigkeit (kf) und dem Humositätsgrad nach VON POST 1922, n = 80)  
 Relationship between the saturated hydraulic conductivity (kf) and the degree of decomposition according VON POST 1922, n = 80)

Dieser Zusammenhang ist bereits in anderen Untersuchungen gezeigt worden (u.a. PÄIVÄNEN 1973). Da sich die kf-Werte der einzelnen *Sphagnum*-Sektionen jedoch grundsätzlich unterscheiden, müssen in Zukunft Daten erfasst werden, die diesen Zusammenhang für jede einzelne Torfart offenlegen. Hierdurch würde die Korrelation signifikanter werden.

#### 4.2.2 Ergebnisse der Wasserretentionsuntersuchungen

Ein Vergleich der Wasserretentionskurven der untersuchten Hochmoortorfe ergibt für alle Torfe ein vergleichbares Gesamtporenvolumen (Tab. 3 und Abb. 6). Die gering humifizierten *Cymbifolia*-Torfe (Hhsy 3) verfügen mit 90,6 Vol.-% über das geringste Gesamtporenvolumen. Der Literatur können Werte auf diesem Niveau entnommen werden (u.a. PÄIVÄNEN 1973). Dennoch muss angemerkt werden, dass das aus der Wasserretentionskurve abgeleitete Gesamtporenvolumen tendenziell zu hoch ausfällt (das Substanzvolumen im Umkehrschluss zu niedrig), da bei der Trocknung der Proben bei 105 °C nicht zwischen Zell- und Porenwasser unterschieden wird (siehe auch Abschnitt 2.2.2 und SCHWEIKLE 1990).

Den größten Mittelporenanteil weisen mit 57,7 Vol.-% die Torfe der Sektion *Cuspidata* auf. Das bestätigt die Hypothese, dass Grobporen in dem zellulosearmen *Cuspidata*-Torf weitgehend zusammengepresst werden und somit der Gehalt an Mittelporen zunimmt. Die geringsten Anteile an Mittelporen sind im gering zersetzten *Cymbifolia*-Torf (Hhsy 3) enthalten (Tab. 3 und Abb. 6).

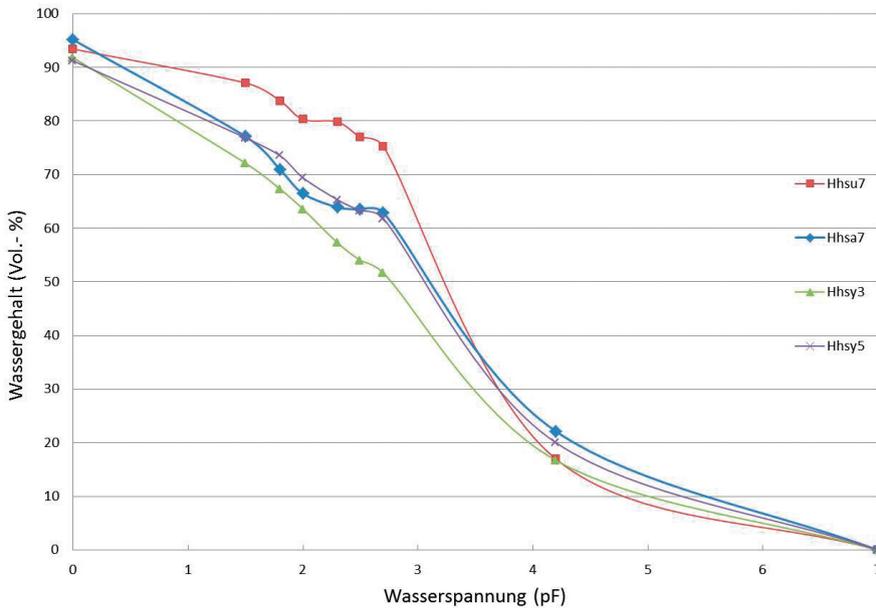


Abb. 6: Wasserretentionskurven der untersuchten Torfe (Hhsa = *Acutifolia*, Hhsu = *Cuspidata*, Hhsy = *Cymbifolia*; die Zahl gibt den Humositätsgrad an) (jeweils n = 20; Mittelwerte)  
 Water retention curves for different peat types (Hhsa = *Acutifolia*, Hhsu = *Cuspidata*, Hhsy = *Cymbifolia*; plus degree of decomposition) (n = 20; arithmetic mean)

Tab. 3: Porenklassenanteil (Vol.-%) der untersuchten Torfe (MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung; SV = Substanzvolumen; GPV = Gesamtporenvolumen; GP = Grobporen; MP = Mittelporen; FP = Feinporen; TRD = Trockenrohddichte, Hhsa = *Acutifolia*, Hhsu = *Cuspidata*, Hhsy = *Cymbifolia*)

Pore volume shares (Vol.-%) of different peats (MW = arithmetic mean; SD = standard deviation; SV = substance volume; GPV = total pore volume; GP = coarse pores; MP = medium pores; FP = fine pores; TRD = dry bulk density; Hhsa = *Acutifolia*, Hhsu = *Cuspidata*, Hhsy = *Cymbifolia*)

Torfart/ Humositäts- grad	n	Statistik	SV	GPV	weite GP	enge GP	MP	FP	TRD
			Vol.-%	Vol.-%	pF 0-1,8 Vol.-%	pF 1,8-2,5 Vol.-%	pF 2,5-4,2 Vol.-%	pF >4,2 Vol.-%	(g/cm <sup>3</sup> )
Hhsa7	20	MW	5,1	94,9	23,4	8,3	41,5	21,8	0,09
		SD	1,1	1,1	5,7	3,7	9,2	3,5	0,01
Hhsu7	20	MW	6,0	94,0	9,2	7,9	57,7	19,2	0,11
		SD	1,2	1,2	2,9	2,1	5,7	4,4	0,01
Hhsy3	20	MW	9,4	90,6	23,3	13,6	36,6	17,1	0,09
		SD	3,2	3,2	3,6	1,4	3,0	1,7	0,01
Hhsy5	20	MW	8,5	91,5	17,3	9,8	45,0	19,5	0,11
		SD	2,0	2,0	2,6	2,5	5,3	1,8	0,01

Die Substanzvolumina liegen zwischen 5,1 Vol.-% für die *Acutifolia*-Torfe und 9,4 Vol % für die *Cymbifolia*-Torfe. Sie lassen sich daher als ziemlich locker gelagert bezeichnen (vgl. SCHWEIKLE 1990). Die Trockenrohddichten der Torfe unterscheiden sich kaum und sind mit durchschnittlich  $0,1 \text{ g/cm}^3$  durchweg gering.

## 5. Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie konnte zeigen, dass hinsichtlich hydraulischer Eigenschaften von *Sphagnum*-Torfen Unterschiede vorliegen. Dabei sind sowohl die Torfart nach der vorherrschenden *Sphagnum*-Sektion als auch der Humositätsgrad von entscheidender Bedeutung. Es konnten Aussagen über die spezifische Porosität, die Wasserleitfähigkeit und die Dichte der Torfe vorgenommen werden.

Die Relevanz von torfartenspezifischen Untersuchungen wird besonders deutlich anhand der Messungen der gesättigten Wasserleitfähigkeit bei *Sphagnum*-Torfen der Sektion *Cuspidata* im Vergleich zu Torfen der Sektion *Acutifolia*. Die *Cuspidata*-Torfe weisen dabei sehr viel geringere Leitfähigkeiten auf.

Der Einfluss des Humositätsgrades konnte durch den Vergleich unterschiedlich stark humifizierter *Sphagnum*-Torfe der Sektion *Cymbifolia* gezeigt werden. Die stärker humifizierten *Cymbifolia*-Torfe sind durch eine geringere gesättigte Wasserleitfähigkeit charakterisiert. Diese Torfe weisen bei vergleichbarem Gesamtporenvolumen einen geringeren Grobporenanteil und einen größeren Mittelporenanteil auf.

Es konnte weiter gezeigt werden, dass die in der Literatur vorzufindende Spezifizierung in „*Sphagnum*-Torf“ oder „Hochmoortorf“ hinsichtlich der untersuchten Parameter für die Frage einer Wiedervernässung nicht ausreicht, da Unterschiede zwischen den *Sphagnum*-Sektionen vorliegen.

Die hydraulische Anisotropie der verschiedenen *Sphagnum*-Torfe ist unterschiedlich und nimmt offenbar mit dem Humositätsgrad ab. Die Anisotropie bedingt ein grundsätzlich anderes horizontales wie vertikales Fließverhalten. Das ist für Wasserregulierungen sowie Revitalisierungen wesentlich.

Die in Deutschland vorhandene Datengrundlage über hydraulische Eigenschaften von Hochmoortorfen für ortskonkrete Planungen ist bislang nicht ausreichend. Daher sind weitere Detailuntersuchungen zu torfartspezifischen hydraulischen Eigenschaften zu wünschen.

## 6. Literaturverzeichnis

- AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Aufl.- 438 S.; Hannover.
- BADEN, W. & EGGELSMANN, R. (1963): Zur Durchlässigkeit der Moorböden. – Zeitschrift für Kulturtechnik 4: 226-254; Berlin und Hamburg (Parey).
- BADEN, W. & EGGELSMANN, R. (1964): Der Wasserkreislauf eines Nordwestdeutschen Hochmoores. – 156 S.; Hamburg.
- BLUME, H.P., STAHR, K. & LEINWEBER, P. (2011): Bodenkundliches Praktikum, 3. neubearbeitete Aufl.– 255 S.; Heidelberg.
- BOELTER, D. H. (1965): Hydraulic conductivity of peats. – Soil Science **100** (4): 227-231.
- BOELTER, D. H. (1968): Important Physical Properties of Peat Materials. – In: Proceedings, Third International Peat Congress: 150-154; Natl. Res. Counc. of Canada; Canada (Ottawa).
- BOELTER, D. H. (1969): Physical properties of peat as related to degree of decomposition. – Soil Science **33** (4): 606-609.
- BURGHARDT, W. (1976): Das Wasser in Niedrungsböden. – In: Geologisches Jahrbuch, Reihe **F4**: 79-103; Hannover (Schweizerbart).
- BUSCH, K.-F., LUCKNER, L. & TIEMER, K. (1993): Geohydraulik, 3. Aufl.: – 497 S.; Berlin (Borntreager).
- DIN EN ISO 11272 (2014): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung der Trockenrohddichte.
- DIN EN ISO 11274 (2014): Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens.
- DIN 19683-9 (2012): Bodenbeschaffenheit – Physikalische Laboruntersuchungen – Teil 9: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in wassergesättigten Stechzylinderproben.
- DYCK, S. & PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie, 3. Aufl.: – 536 S.; Berlin (Verlag für Bauwesen).
- EDOM, F. (2001): Moorlandschaften aus hydrologischer Sicht. – In: SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (2001): Landschaftsökologische Moorkunde. – 2. Aufl.: 185-228; Stuttgart (Schweizerbart).
- EDOM, F., MICHAELIS, D., STEGMANN, H., KESSLER, K., SCHLÖFFEL, M., DIENEMANN, H. & DITTRICH, I. (2009a): Torfschichtung im Ostteil der Großen Säure als Grundlage für das wasserchemische Monitoring und das FFH-Management. – Im Auftrag des RP (heute Landesdirektion) Chemnitz. HYDROTELM Frank Edom Dresden & Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH Bannewitz.- 48 S. & 9 Anl.
- EDOM, F., STEGMANN, H., DITTRICH, I., KESSLER, K., & SCHUA, K. (2009b): Geoökologische und hydrologische Prinzipien eines möglichen Huminstoffrückhalts in sauren Mooren – Erkenntnisstand und Versuch einer Synthese. – Im Auftrag des RP (heute Landesdirektion) Chemnitz. Dr. Dittrich & Partner Hydro-Consult GmbH Bannewitz & HYDROTELM Frank Edom Dresden. – 37 S. & 5 Anl.

- EDOM, F., DITTRICH, I., KESSLER, K., MÜNCH, A., PETERS, R., THEUERKAUF, M. & WENDEL, D. (2011): Klimatische Stabilität von Mittelgebirgsmooren. Auswirkungen des Klimawandels auf wasserabhängige Ökosysteme – Teilprojekt Erzgebirge.- Schriftenreihe des LfULG, Heft 1/2011: 81 S.
- EGGELSMANN, R. & SCHUCH, M. (1980): Moorhydrologie. – In: GÖTTLICH, K. H. (Hrsg.): Moor- und Torfkunde, 2. Aufl.: 210-224; Stuttgart (Schweitzerbart).
- EGGELSMANN, R. (1981a): Dränanleitung für Landbau, Ingenieurbau und Landschaftsbau, 2. Aufl.- 268 S.; Berlin (Parey).
- EGGELSMANN, R. (1981b): Ökohydrologische Aspekte von anthropogen beeinflussten und unbeeinflussten Mooren Norddeutschlands. Dissertation.- 175 S.; Univ. Oldenburg.
- FRAHM, E. (2007): Bestimmung der realen Evapotranspiration für Weide und Schilf in einem nordost-deutschen Flusstalmoor. Dissertation.- 202 S.; Univ. Rostock.
- GROSSE-BRAUCKMANN, G. (1990): Ablagerungen der Moore. – In: GÖTTLICH, K. H. (Hrsg.): Moor- und Torfkunde, 3. Aufl.:175-230; Stuttgart (Schweitzerbart).
- HARTGE, K.H. (1966): Ein Haubenpermeameter zum schnellen Durchmessen zahlreicher Stechzylinderproben. – Zeitschrift für Kulturtechnik und Flurbereinigung 7: 155-163.
- HARTGE, K. H. & HORN, R. (1999): Einführung in die Bodenphysik, 3. Aufl.- 283 S.; Stuttgart (Enke).
- HARTGE, K. H. & HORN, R. (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden, 4. Aufl.- 178 S.; Stuttgart (Schweitzerbart).
- HEMOND, H. F. & GOLDMAN, J. C. (1985): On non-darcian water flow in peat. – Journal of Ecology 73: 579-584.
- HÖLTING, B. & COLDEWEY, W. G. (2009): Hydrogeologie, 7. Aufl.- 383 S.; Heidelberg.
- INGRAM, H. A. P., RYCROFT, D. W. & WILLIAMS, D. J. A. (1974): Anomalous transmission of water through certain peats. – Journal of Hydrology 22(3): 213-218.
- IVANOVA, A.B. et al. (1990): Nastavlenie gidrometeorologi eskim stancijam i postam. vyp. 8: Gidrometeorologi eskie nabljudenija na bolotach (Instruktion zur Betreuung hydrometeorologischer Stationen und Pegel. Teil 8: Hydrometeorologische Beobachtungen in Mooren), Gidrometeoizdat.- 360S; Leningrad.
- IVANOV, K. E. (1975): Vodoobmen v bolotnych landšaftach (Wasseraustausch in Moorlandschaften). Gidrometeoizdat; Leningrad.
- IVANOV, K.E. & NOVIKOV, S.M. (1976): Bolota Zapadnoj Sibiri, ich stroenie i gidrologi eskij režim. (Moore Westsibiriens, ihr Aufbau und ihr hydrologisches Regime.) Gidrometeoizdat; Leningrad.
- JORDAN, H. & WEDER, H.-J. (1995): Hydrogeologie. Grundlagen und Methoden, 2. Aufl.- 603 S.; Stuttgart (Enke).
- KRETSCHMER, H. & BOHNE, K. (1981): Leitfaden der Meliorationsbodenkunde 1. Heft 1 und 2. Wilhelm-Pieck-Univ.- 146 S.; Rostock,

- KRUSKAL, W. H. & WALLIS, W. A. (1952): Use of ranks in one-criterion variance analysis. – In: *Journal of the American Statistical Association* **47**: 583-621.
- LARCHER, W. (2003): *Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups*. – 514 S.; Berlin.
- LOXHAM, M. & BURGHARDT, W. (1986): Saturated and Unsaturated Permeabilities of North German Peats. – In: FUCHSMANN, C.H. (Hrsg.): *Peat and Water*: 37-59; New York (Elsevier).
- LUNDIN, K.P. (1964): Vodnye svoistva torfjanoi zalezhi. (Wassereigenschaften der Torflagerstätte.); Urožaj, Minsk.
- MALMSTROEM, C. (1925): Some Pointers for the Drainage of peat soils. Noorland. *Skogglia Ron* 4 (in: BOELTER 1968, Original nicht gesehen).
- MITSCHERLICH, E.A. (1956): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit beim gewachsenen Boden. – *Plant and Soil* VIII, no. 1.: 10-16.
- NOVIKOV, S. M. (2009): Hidrologija zabolo ennych territorii zony mnogoletnyj merzloty Zapadnoj Sibiri. (Hydrologie der vermoorten Territorien der Permafrostzone West-Sibiriens.) VVM.- 536 S.; Sankt Peterburg.
- PÄIVÄNEN, J. (1973): Hydraulic conductivity and water retention in peat soils. – *Acta Forestalia Fennica* **129**: 70 S.; Helsinki.
- PÄIVÄNEN, J. & HÄNELL, B. (2012): *PEATLAND ECOLOGY AND FORESTRY – A SOUND APPROACH*. – UNIVERSITY OF Helsinki, Department of Forest Sciences Publications 3: 267 S.; Helsinki.
- RYCROFT, D.W., WILLIAMS, D.J.A. & INGRAM, H.A.P. (1975): The transmission of water through peat. – *Journal of Ecology* **63**: 535-568.
- SARASTO, J. (1961) Tutkimuksia rahka- ja saraturpeiden vedenläpäisevyydestä. Suo 2, Summery: Experiments on the permeability of peat. S. 24-25.
- SCHÄFER, W. (2002): Bodenphysikalische Eigenschaften von Torfen niedersächsischer Moorböden unter Berücksichtigung der Pedogenese. – In: SCHEFFER, B. (Hrsg.): *125 Jahre Moor- und Bodenforschung in Bremen. Arbeitshefte Boden*, 2002/3: 59-75; Hannover (Schweizerbart).
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H.-P., BRÜMMER, G.W., HORN, R., KANDELER, E., KÖGEL-KNABNER, I., KRETSCHMAR, R., STAHR, K. & WILKE, B.-M. (2010): *Lehrbuch der Bodenkunde*, 16. Aufl.: 569 S.; Heidelberg.
- SCHUCH, M. (1980): Physik des Torfes und der Moorböden. – In: GÖTTLICH, K. H. (Hrsg.): *Moor- und Torfkunde*, 2. Aufl.: 205-210; Stuttgart (Schweizerbart).
- SCHWEIKLE, V. (2012): Der Einfluss der Temperatur auf k im Strömungsgesetz von Darcy. – *Telma* **42**: 77-80; Hannover.
- SCHWEIKLE, V. (1990): Physik des Torfes und der Moorböden. – In: GÖTTLICH, K. H. (Hrsg.): *Moor- und Torfkunde*, 3. Aufl.: 272-283; Stuttgart (Schweizerbart).

- STEGMANN, H., EDMOND, F. & KOSKA, I. (2001): Bodenbildende Prozesse wachsender Moore. – In: SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (2001): Landschaftsökologische Moorkunde, 2. stark überarbeitete und erweiterte Aufl.: 42-47; Stuttgart (Schweitzerbart).
- STEGMANN, H. & ZEITZ, J. (2001): Bodenbildende Prozesse entwässerter Moore. – In: SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (2001): Landschaftsökologische Moorkunde, 2. stark überarbeitete und erweiterte Aufl.: 47-57; Stuttgart (Schweitzerbart).
- SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (2001): Landschaftsökologische Moorkunde, 2. stark überarbeitete und erweiterte Aufl.: 622 S.; Stuttgart (Schweitzerbart).
- VAN DER SCHAAF, S. (1999): Analysis of the hydrology of raised bogs in the Irish Midlands. – Proefschrift Landbouuniversiteit Wageningen.- 337 S.; Wageningen.
- VON POST, L., (1922): Sveriges Geologiska Undersöknings torvinventering och några av dess hittills vunna resultat. – Svenska mosskulturföreningens tidskrift **37**: 1-27.
- ZEITZ, J. (1988): Untersuchungen zu ausgewählten bodenphysikalischen Kennwerten in Niedermooren im Hinblick auf Melioration und Bewirtschaftung. – Dissertation B, Humboldt-Universität Berlin.- 116 S. & Anl.
- ZEITZ, J. (2001): Physikalisch-hydrologische Kennzeichnung. - In: SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (2001): Landschaftsökologische Moorkunde, 2. stark überarbeitete und erweiterte Aufl.: 85-92; Stuttgart (Schweitzerbart).
- ZEITZ, J. (2003): Bodenphysikalische Veränderungen nach intensiver Nutzung sowie nach Wiedervernäsung. – In: LUNG MV: Stoffausträge aus wiedervernässten Niedermooren, Heft 1/2003: 28-37; Materialien zur Umwelt. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie M-V.
- ZEITZ, J. & TÖLLE, R. (1996): Soil properties of genetically originated peat horizons in drained fens. – Proc. IPS Bremen: 198-206.
- ZEITZ, J., ZAUF, M. & ROSSKOPF, N. (2008): Use of stratigraphic and pedogenetic information for the evaluation of carbon turnover in peatlands. – Proc. IPS Tullamore: 653-655.
- ZINKE, P. & EDMOND, F. (2006): Hydraulische und hydrologische Erklärungen von Ökotopstrukturen am Regenmoor Kriegswiese im mittleren Erzgebirge. – Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung: 43-60.

Anschriften der Verfasser:

N. Roßkopf  
Dezernat Bodengeologie  
Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg  
Inselstraße 26  
D-03046 Cottbus  
E-Mail: niko.rosskopf@lbgr.brandenburg.de

F. Edom  
HYDROTELM-Dresden  
Naundorfer Straße 18  
D-01139 Dresden  
E-Mail: frank.edom@t-online.de

Prof. Dr. J. Zeitz  
Humboldt-Universität zu Berlin  
Lebenswissenschaftliche Fakultät  
FG Bodenkunde und Standortlehre  
Albrecht-Thaer-Weg 2  
D-14195 Berlin  
E-Mail: jutta.zeitz@agr.ar.hu-berlin.de

Manuskript eingegangen am 21. April 2016