

TELMA	Band 48	Seite 111 - 128	7 Abb., 2 Tab.	Hannover, November 2018
-------	---------	-----------------	----------------	-------------------------

Bewertung des Staueffekts von Verwallungen zur Wiedervernässung von Hochmooren in Schleswig-Holstein anhand bodenphysikalischer Kennwerte

Evaluating the water retention effect of peat dams as rewetting measure of degraded raised bogs in Schleswig-Holstein by soil physical parameters

ANNEKA MORDHORST, HEINER FLEIGE, ANGELIKA
BRETSCHNEIDER, MAREK FILIPINSKI und RAINER HORN

Zusammenfassung

In Schleswig-Holstein haben sich Verwallungen als ein vielversprechendes Konzept zur Wiedervernässung als einleitender Schritt zur Renaturierung von Hochmooren dargestellt. In dieser Studie wurde der Wasserstauereffekt der Verwallung (bestehend aus einem Torfdamm mit darunterliegender Verfüllungsgrube als „Torfspundwand“) anhand bodenphysikalischer Kennwerte an drei Hochmoorstandorten in Schleswig-Holstein überprüft. Als Prüfparameter eignen sich mit zunehmender Indikation Trockenrohdichte, Luftkapazität (Groporen > 50 µm) und gesättigte Wasserleitfähigkeit, die sensibel auf Verdichtungsprozesse – wie sie in der Verwallung durch die Baggeraktivität erzeugt werden – reagieren. Um den erwünschten Verdichtungseffekt näher zu quantifizieren, wurden vergleichbare Untersuchungen an einem jeweiligen Referenzstandort in den gleichen Bodentiefen (50 und 100 cm unter GOF) durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass in der Verfüllungsgrube die Wasserleitfähigkeit in horizontaler Richtung gegenüber der Referenzfläche abnimmt, was die seitliche Wasserbewegung aus dem Moorkörper vermindert. Dieser Stauereffekt wurde allerdings nur in 50 cm Tiefe, nicht in 100 cm Tiefe erreicht. Geringe Trockenrohdichte und hohe Luftkapazitäten in 100 cm Tiefe deuten auf eine nachlassende Wirkung der Verdichtung durch die Baggerlast mit der Tiefe. Zum anderen bedingte das Zerstören der natürlichen Torfstrukturen und die Durchmischung eine Störung der Porenfunktionalität in der Verwallung, so dass die besonders leitfähigen Groporen nicht in Zusammenhang mit einer Zunahme der horizontalen Wasserleitfähigkeit stehen. Ihr positiver Effekt auf den Wasserfluss wirkt daher nur in vertikaler, nicht in horizontaler Richtung. Die damit erzeugte Umkehr der Anisotropie von einer stärker horizontal, wie in den natürlich geschichteten Torfen der Referenz, zu einer stärker vertikal ausgeprägten Fließrichtung in der Verwallung wird daher mit als eine entscheidende Steuergröße für das Abflussregime gesehen, die die Effektivität der Wasserrückhaltung verbessert.

Abstract

The rewetting of degraded raised bogs with the help of water retaining peat dams proved to be a promising restoration strategy in Schleswig-Holstein. In this study, the water retention effect of peat dam systems (consisting of an aboveground peat dam and a belowground pit refilled with the parent peat material from the surroundings acting as “piling wall”) was analysed at three raised bog sites in Schleswig-Holstein. The evaluation based on the following soil physical test values with increasing indication power: bulk density, air capacity (coarse pores $> 50 \mu\text{m}$) and saturated hydraulic conductivity, which likely react sensitively to compaction processes during the dam construction by excavators. In order to quantify the barrier function of the belowground “piling wall” at each site, comparable analyses were conducted at the same sampling depths (50 and 100 cm below ground surface) on an adjacent, undisturbed reference site with natural peat stratification.

The results indicated a decreased saturated hydraulic conductivity in horizontal direction in the 50 cm depth of the “piling wall” compared to the reference site. In contrast, a low bulk density and a high air capacity was found in the 100 cm depth, indicating that the compaction intensity declined with depth. On the other hand, the disruption of the natural peat structure by excavators and the following mixing process reduced pore functionality in the peat dam systems. Consequently, the increase in highly conductible macropores only led to an improvement of the hydraulic conductivity in the vertical, but not in the horizontal direction. This reversal of anisotropy from a more horizontally pronounced, like in the undisturbed reference peat soil, to a more vertically pronounced flow direction in the peat dam systems might be an important control parameter for the water flow regime, improving the efficiency of water retention inside the raised bog body.

1. Einleitung

Im Rahmen der Moorrenaturierung wurden in den letzten Jahrzehnten die Kenntnisse über Voraussetzungen und Methoden zur Herrichtung haltbarer Verwallungen aus Torf zur Zurückhaltung des Oberflächenwassers vertieft und erweitert. Langjährige Erfahrungen zeigten, dass nicht jede Torfart und -qualität für Verwallungen geeignet ist und es oft nicht ausreicht, einen Damm nur auf den anstehenden Torf zu setzen. Bei Anstaumaßnahmen im Hartshoper Moor (Schleswig-Holstein) wurde die Methode der sogenannten „Torfdichtwand“ – anfangs Torfspundwand genannt – entwickelt, mit deren Hilfe eine Wasserrückhaltung auch innerhalb des Moorkörpers möglich ist. Der Staukörper zur Wasserrückhaltung besteht aus einer bis zu 2 m tiefen Verfüllungsgrube („Torfdichtwand“), die im Moorgrünland gleichzeitig als Suchgraben für die zu trennenden Dränrohre dient und nach Ausbaggern mit dem vor Ort bzw. in naher Umgebung anstehenden Torf verfüllt sowie mittels Baggerschaufel und durch mehrfaches Überfahren verdichtet wurde. Auf die Verfüllungsgrube wird in Abhängigkeit vom Standort (Wasserdruck, Torfmaterial) ein bis zu 1,30 m hoher Torfdamm aufgesetzt und durch mehrfaches Überfahren mit einem Bagger ebenfalls verdichtet. Das Verwallungssystem ist im Hinblick auf die technischen Verfahrensschritte und deren Umsetzung in Schleswig-Holstein im vorangestellten Beitrag von MORDHORST-BRETSCHNEIDER (2018) näher beschrieben.

Diese Methode zur Wiedervernässung von Hochmooren ist sehr vielversprechend. Die Dichtigkeit der Torfdämme ist dabei nicht nur für die Wasserrückhaltung innerhalb des Moorkörpers von Bedeutung, sondern es muss auch gewährleistet sein, dass die (meist landwirtschaftliche) Nutzung der benachbarten Flächen nicht durch steigende Wasserstände gefährdet wird. Im Auftrag des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR) sollte das bisher beobachtete Wasserrückhaltevermögen von Torfdichtwänden durch bodenphysikalische Untersuchungen und Messungen überprüft werden.

Eine erfolgreiche Wasserrückhaltung setzt in erster Linie eine Verringerung der Durchlässigkeit der Torfdichtwand im Vergleich zum umgebenen natürlich geschichteten Torf voraus. HORN et al. (2009) verweisen auf die gesättigte Wasserleitfähigkeit mit hoher Indikation sowie auf Trockenrohichte und Luftkapazität (Grobporen $> 50 \mu\text{m}$) mit geringer Indikation, die sensibel auf Verdichtung beim Bau des Torfdamms und der darunterliegenden Verfüllungsgrube (Torfdichtwand) durch den Bagger reagieren. Die Wasserleitfähigkeit ist besonders geeignet, weil hiermit richtungsabhängige Flüsse quantifiziert werden. Um die bodenphysikalischen Veränderungen zu erfassen, werden vergleichende Untersuchungen jeweils an einem Referenzstandort durchgeführt, der die standorttypischen hydraulischen Eigenschaften natürlich geschichteter Torfe widerspiegelt.

Da je nach Standort unterschiedliche Torfsubstrate und -mächtigkeiten anstehen, wurden drei Torfdämme untersucht, die sich im Baualter (bis zu 3 Jahre alt) und Bausubstrat, vorwiegend Weiß- und Schwarztorgemische sowie Niedermoortorfe mit unterschiedlichem Zersetzungsgrad für die Beprobung unterscheiden.

2. Methodik

2.1 Standorte

Die Moorstandorte liegen im Naturraum Eider-Treene-Niederung im Westen Schleswig-Holsteins (Abb. 1). Die Verwallungen zur Wiedervernässung der untersuchten Moore erfolgten ab 2014, so dass Torfdämme mit Baualtern von „M1“ = Initialzustand, d.h. unmittelbar nach der Verwallungsmaßnahme, „M2“ = 2 Jahre alt und „M3“ = 3 Jahre alt untersucht wurden. Die Standorte „M1“ und „M2“ befinden sich im Dellstedter Birkwildmoor, „M3“ im Königsmoor. Der Ort der jeweiligen Beprobung wurde in unmittelbarer Nähe zu angrenzenden Grünlandflächen gewählt, für deren Nutzung ein Anstieg der Grundwasserstände durch eine wirksame Wasserrückhaltung aus dem Moorkörper verhindert werden soll.

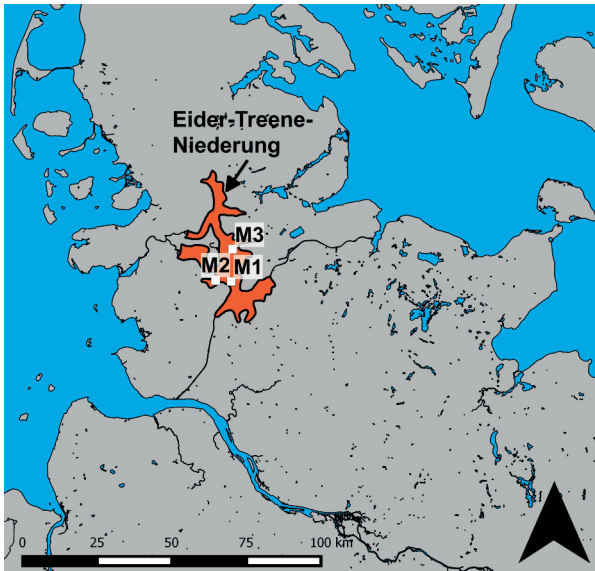


Abb. 1: Lage der untersuchten Hochmoorstandorte (M1, M2 = Dellstedter Birkwildmoor, M3 = Königsmoor) im Naturraum „Eider-Treene-Niederung“ in Schleswig-Holstein (Kartenmaterial: BKG 2010)

Location of the investigated raised bog sites (M1, M2 = Dellstedter Birkwildmoor, M3 = Königsmoor) in the natural area „Eider-Treene-Niederung“ of Schleswig-Holstein (map source: BKG 2010)

2.2 Profil-/Geländeansprache

An jedem Standort wurde auf der Referenzfläche außerhalb der Vernässungsfläche und innerhalb des Torfdammes bzw. der Verfüllungsgrube eine Schürfgrube bis mindestens 1 m unter Geländeoberfläche (GOF) angelegt. Die bodenkundliche Profilansprache (Horizontabfolge, Bodentyp, Zersetzungsgrad usw.) erfolgte nach bodenkundlicher Kartieranleitung (AD-HOC-AG BODEN 2005). An jedem Standort (M1, M2, M3) wurden gestörtes Probenmaterial und ungestörte Stechzylinderproben (100 cm³) aus jeweils 2 Tiefen („T“) aus dem aufgesetzten Torfdamm (TD, T1 = 50 cm über GOF), T2 = 0 cm, entspricht GOF) und der darunterliegenden Verfüllungsgrube (VG, T3 = 50 cm unter GOF, T4 = 100 cm unter GOF) sowie der angrenzenden Referenzgrube (Ref, T3 und T4 analog zu VG) entnommen (Abb. 2). Während die „Referenz“ am Standort M1 („Initialzustand“) den natürlichen Zustand vor Anlage der Verfüllungsgrube darstellt, dient für die übrigen Standorte (M2 und M3) mit Verwallungen älteren Baujahres eine Profilgrube außerhalb der vernässeten Moorfläche als „Referenz“. Zum Zeitpunkt der Beprobung ist diese Referenzfläche durch die Entwässerung zwar im Oberboden bereits vererdet, spiegelt aber in den beprobten Tiefen (50 und 100 cm unter GOF) einen standorttypischen Zustand mit natürlicher

Torfsschichtung wider, der mit dem wieder zu vernässenden Moorkörper vergleichbar ist. Eine Beprobung innerhalb der Wiedervernässungsfläche war aufgrund des Wasserspiegelsanstiegs (meist oberhalb GOF) nicht umsetzbar.

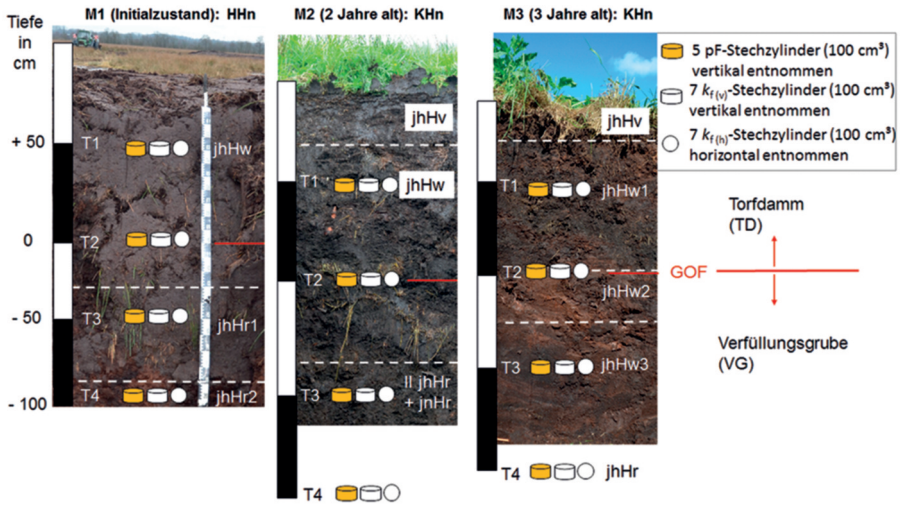


Abb. 2: Bodenkundliche Horizontabfolge und schematische Darstellung der beprobten Tiefen (T1–T4) in den untersuchten Torfdämmen mit darunterliegender Verfüllungsgrube der Moorstandorte M1, M2, M3. pF-Steckzylinder zur Ermittlung der Porengrößenverteilung mittels Matrixpotenzial-Wassergehalts-Beziehung, k_F -Steckzylinder zur Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit im Labor. HHn = Normhochmoor, KHn = Normerdhochmoor. Pedological profile description and schematic illustration of sampling depths (T1–T4) of investigated peat dams with the belowground refilled pit of the raised bog sites M1, M2, M3. pF-steel cylinder for evaluating the pore size distribution by the matric potential-water content-relation. k_F -steel cylinders for determining the saturated hydraulic conductivity under laboratory conditions. HHn and KHn correspond to Ombric Histosols according to WRB (IUSS WORKING GROUP WRB 2015).

2.3 Laboranalytik

Untersucht wurde an den Torfproben:

- Die Wasserretention (= pF-Kurve/Matrixpotenzial-Wassergehalts-Beziehung) zur Ermittlung der Porengrößenverteilung mittels definierter Entwässerungsstufen (Matrixpotenzial, ψ_m) von -60 und -300 hPa auf keramischen Platten und in einem Drucktopf (Überdruck +15000 hPa) an 5 ungestörten Steckzylinderproben je Standort und Entnahmetiefe (HARTGE & HORN 2009).

- Als ökologischer Kennwert die Luftkapazität (LK), die dem luftgefüllten Porenanteil im Zustand der Feldkapazität (pF 1,8) entspricht, nachdem die weiten Grobporen ($> 50 \mu m$) entwässert sind.
- Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit $k_f / cm d^{-1}$ mit einem Haubenpermeameter nach dem instationären Verfahren von HARTGE (1966) an 7 vertikal $k_{f(v)}$ und 7 horizontal entnommenen Stechzylinderproben $k_{f(h)}$ (HARTGE & HORN 2009) je Standort und Entnahmetiefe.
- Die Trockenrohddichte $\rho_t / g cm^{-3}$ des Bodens mittels Gravimetrie an 5 bei $60^\circ C$ getrockneten Stechzylinderproben je Standort und Entnahmetiefe (HARTGE & HORN 2009).
- Die spezifische Festsubstanzdichte d_F mittels Tauchwägung (Archimedisches Prinzip) an gestörtem Torfmaterial für je 3 ausgewählte Tiefen pro Standort.
- Aus ρ_t und d_F wurde das Gesamtporenvolumen [$GPV / Vol.-%$] nach HARTGE & HORN (2009) berechnet: $GPV = (1 - \frac{\rho_t}{d_F}) \cdot 100$. Das Substanzvolumen $SV / Vol.-%$ ist der Anteil an mineralischen und organischen Bestandteilen am Bodenvolumen und ist $SV = 100 - GPV / Vol.-%$.
- Die Bodenreaktion des auf 2 mm gesiebten Torfbodens in einer Suspension mit $CaCl_2$ -Lösung mittels pH-Meter (BLUME et al. 2011).
- Organischer Kohlenstoff $C_{org} / \%$ und Gesamtstickstoffgehalt $N_{ges} / \%$ mittels eines „C/N Analyzer elementar“ (trockene Verbrennung, Bestimmung mit Wärmeleitdetektor).
- Für die Bewertung der untersuchten Parameter wurde die bodenkundliche Kartieranleitung (AD-HOC-AG BODEN 2005) herangezogen.

3. Ergebnisse

3.1 Torfeigenschaften

Bei den Referenzstandorten (Ref) handelt es sich um entwässerte (Erd-)Hochmoore. Der Einfluss der Entwässerung spiegelt sich im Zersetzungsgrad (ZG) wider: Der Torf im reduzierten hHr-Horizont des Standortes M3 ist hier deutlich weniger zersetzt ($ZG = H3$) als der darüber liegende hHw-Horizont im Grundwasserschwankungsbereich ($ZG = H6$). Für die Standorte M1 und M2 nimmt der ZG in der oberen Tiefe T3 (50 cm unter GOF) nur um 1 ZG-Stufe im Vergleich zur unteren Tiefe T4 (100 cm unter GOF) zu (Tab. 1).

Tab. 1: Grundanalytische Parameter der beprobten Tiefen (T) aus dem Torfdamm (TD, T1 = 50 cm über GOF, T2 = 0 cm, GOF), der Verfüllungsgrube (VG, T3 = 50 cm unter GOF, T4 = 100 cm unter GOF) sowie der angrenzenden Referenz (Ref, T3 und T4 analog zu VG) der Moorstandorte M1, M2 und M3. C_{org} = Organischer Kohlenstoffgehalt, N_{ges} = Gesamtstickstoffgehalt, ZG = Zersetzungsgrad nach Von Post, z = Zersetzungsstufe (AD-HOC-AG BODEN, 2005)

Basic soil parameters of the sampled depths (T) of the peat dam (TD, T1 = 50 cm above ground surface (GOF), T2 = 0 cm, GOF), the belowground refilled pit (VG, T3 50 cm below GOF, T4 = 100 below GOF), and the adjacent reference soil (Ref, T3 and T4 analogously to VG) of the raised bog sites M1, M2 and M3. C_{org} = Soil organic carbon content, N_{ges} = Total nitrogen content, ZG = Degree of peat decomposition according to Von Post, z = peat decomposition level (AD-HOC-AG BODEN, 2005).

Standort	Variante	Horizont	Tiefe	pH	C_{org} %	N_{ges} %	C/N	ZG
M1	TD	jhHw	T1	3,6	44	1,4	31	H4 + (H7)
M1	TD	jhHw	T2	3,4	45	0,6	75	H4 + (H7)
M1	VG	jhHr1	T3	4,0	45	1,7	26	H7
M1	VG	jhHr2	T4	3,6	44	0,7	63	H3 + (H7)
M1	Ref	hHw	T3	3,4	47	0,8	59	H5
M1	Ref	hHr	T4	3,3	48	0,8	60	H4
M2	TD	jhHw	T1	4,2	41	1,5	27	H8
M2	TD	jhHw	T2	4,4	37	1,8	21	H8
M2	VG	II jnHr+jhHr	T3	4,7	47	2,3	20	„H6“ (z3)
M2	VG	II jnHr+jhHr	T4	4,6	46	2,2	21	„H6“ (z3)
M2	Ref	hHw	T3	4,4	46	2,4	21	H7
M2	Ref	hHr	T4	4,7	45	2,5	18	H6
M3	TD	jhHw1	T1	4,2	40	1,7	24	H7
M3	TD	jhHw2	T2	3,5	46	0,9	51	H3+(H7)
M3	VG	jhHw3	T3	3,4	48	0,9	53	H6
M3	VG	jhHr	T4	3,6	46	1,0	46	H4
M3	Ref	hHw	T3	3,8	46	0,9	51	H6
M3	Ref	hHr	T4	3,4	46	0,6	77	H3

Insgesamt variiert der ZG von „schwach“ zersetztem (H3) zu „mäßig“ zersetztem Hochmoortorf (< H7), während sich die organischen Kohlenstoffgehalte (C_{org}) in einem engen Bereich von 46 - 48 % bewegen. M2 weist mit C/N-Verhältnissen von 18 - 27 („mesotroph“ nach SUCCOW 1998) und mit pH-Werten > 4,2 („stark sauer“) weniger saure und nährstoffarme Bedingungen als M1 und M3 (pH < 3,8; „sehr stark bis extrem sauer“ und überwiegend weites C/N-Verhältnis von > 33; „oligotroph“ nach SUCCOW 1998) auf.

Bei den Verwallungen ist die anthropogene Umlagerung des Torfes über das vorangestellte „j“ im Horizontsymbol gekennzeichnet. Sowohl pH-Wert als auch der Zersetzungsgrad im Torfdamm (TD) und in der Verfüllungsgrube (VG) zeigen die unterschiedliche Durchmischung des Torfmaterials auf (Abb. 2, Tab. 1).

Durch die zusätzliche Beimengung von stärker zersetztem Material (z.B. Schwarztorf oder vererdeter Oberboden mit Grasnarbe) zeigt der TD in Tiefe T1 (50 cm über GOF) meist höhere pH-Werte (> 4) und einen höheren Zersetzungsgrad als die darunterliegenden Tiefen (T2 - T4), die i.d.R. aus einem Gemisch aus stärker (ZG = H7) und schwächer zersetztem Weißtorf (ZG = H3 - 4) bestehen. Eine Ausnahme stellt die VG von Standort M2 dar, in der zusätzlich eine Beimengung von Niedermoortorf ausgemacht wurde und dementsprechend auch höhere pH-Werte und Stickstoffgehalte (N_{ges}) in den unteren Tiefen T3 und T4 gemessen wurden.

Die organischen Kohlenstoffgehalte (C_{org}) sind mit Werten von 37 und 48 % im Vergleich zur Referenzgrube nur geringfügig niedriger.

3.2 Porosität und Lagerungsdichte

Für natürlich abgelagerte Torfe (Referenz) spiegeln die Parameter den für Moorböden lockeren Lagerungszustand mit „sehr geringer“ Trockenrohddichte ($\rho_t \approx 0,11 \text{ g cm}^{-3}$) und „sehr hoher“ Gesamtporosität ($GPV > 89 \text{ Vol.-%}$) wider (Tab. 2).

Das Substanzvolumen SV deutet einen „mäßig bis stark“ entwässerten Zustand der Referenz-Hochmoorflächen an. Die Referenz von M1 (Initialzustand) weist dabei eine lockere Torfschichtung auf ($\rho_t < 0,1 \text{ g cm}^{-3}$) als M2 und M3 ($\rho_t > 0,14 \text{ g cm}^{-3}$ in 50 cm Tiefe). ρ_t und SV nehmen mit der Tiefe tendenziell zu bzw. das GPV ab, was mit der bereits weiter fortgeschrittenen Mineralisierung in den obersten Torfschichten in Verbindung gebracht und durch höhere ZG in 50 cm (T3) als in 100 cm (T4) belegt ist.

In der VG und im TD zeigen sich durch das Verdichten des Baggers überwiegend höhere ρ_t / geringere GPV im Vergleich zur Referenz. Die Dichtlagerung ist dabei im TD höher als in der VG. Hier werden erhöhte ρ_t bis zu $0,26 \text{ g cm}^{-3}$ und ein höheres SV von 4 + 5 in der Tiefe T1 in den älteren TD (M2 und M3) festgestellt. Während in der Tiefe T3 gleiche bis leicht höhere ρ_t erzielt werden, ist in der untersten Tiefe T4 kein Verdichtungseffekt durch eine höhere ρ_t auszumachen.

Im Hinblick auf die Porengrößenverteilung (Abb. 3) weisen Torfproben aus der VG und im TD im Vergleich zur Referenz im Mittel ein gröberes Porensystem auf, das sich durch eine Zunahme der Grobporen und Abnahme der Mittelporen ausdrückt und demnach nicht den angestrebten Verdichtungseffekt anzeigt. Die Zunahme der Luftkapazität LK ist mit $> 27 \text{ Vol.-%}$ „sehr hoch“ und im frisch erstellten Torfdamm (M1, Initialzustand) dabei noch am größten, während die älteren Dämme bereits LK -Werte $< 16 \text{ Vol.-%}$ im „mittleren“ bis „hohen“ Bereich aufzeigen, die sich nach Sackung im aufgeschütteten Torfdamm der Referenz wieder angenähert haben (M2 und M3). In der VG verbleibt die LK in der Tiefe T4 hingegen im „hohen“ Bereich, so dass in dieser Tiefe an allen 3 Standorten das größte Porensystem mit dem höchsten Anteil an weiten und engen Grobporen vorliegt.

Tab. 2: Trockenrohddichten (ρ_t), Gesamtporenvolumen GPV und Substanzvolumen SV der beprobten Tiefen „(T)“ des Torfdammes (TD, T1 = 50 cm über GOF, T2 = 0 cm, GOF) und darunterliegender Verfüllungsgrube (VG, T3 = 50 unter GOF, T4 = 100 cm unter GOF) sowie angrenzender Referenz (Ref, T3 und T4 analog zu VG) der Moorstandorte M1, M2 und M3 (n = 5). Einstufung (SV Stufe) erfolgte nach AD-HOC-AG BODEN (2005). MW = arithmetischer Mittelwert, +/- = Standardabweichung.

Bulk densities (ρ_t), total soil porosity GPV and substance volume SV of the sampled depths of the peat dam (TD, T1 = 50 cm above ground surface (GOF), T2 = 0 cm, GOF), the belowground refilled pit (VG, T3 50 cm below GOF, T4 = 100 below GOF), and the adjacent reference soil (Ref, T3 and T4 analogously to VG) of the raised bog sites M1, M2 and M3 (n = 5). SV classification after AD-HOC-AG BODEN (2005). MW = arithmetic mean, +/- = standard deviation.

Standort	Variante	Tiefe	ρ_t		GPV	SV	SV Stufe
			g cm ⁻³		Vol.-%	Vol.-%	
			MW	+/-	MW	MW	
M1 (Initial)	TD	T1	0,12	0,01	93,6	6,4	SV3
	TD	T2	0,10	0,01	94,0	6,0	SV3
	VG	T3	0,11	0,05	92,1	7,9	SV4
	VG	T4	0,07	0,01	93,0	7,0	SV3
	Ref	T3	0,09	0,01	91,9	8,1	SV4
	Ref	T4	0,08	0,01	94,8	5,2	SV3
M2 (2 Jahre)	TD	T1	0,14	0,03	88,4	11,6	SV4
	TD	T2	0,18	0,03	91,6	8,4	SV4
	VG	T3	0,15	0,01	90,4	9,6	SV4
	VG	T4	0,12	0,01	87,6	12,4	SV4
	Ref	T3	0,16	0,02	88,8	11,2	SV4
	Ref	T4	0,11	0,04	91,6	8,4	SV4
M3 (3 Jahre)	TD	T1	0,26	0,11	82,2	17,8	SV5
	TD	T2	0,14	0,05	90,3	9,7	SV4
	VG	T3	0,14	0,01	89,8	10,2	SV4
	VG	T4	0,09	0,05	93,8	6,2	SV3
	Ref	T3	0,14	0,03	90,1	9,9	SV4
	Ref	T4	0,14	0,03	89,8	10,2	SV4

3.3. Gesättigte Wasserleitfähigkeit

Die in Abbildung 4 (Torfdamm) und Abbildung 5 (Verfüllungsgrube und Referenz) dargestellten Werte der gesättigten Wasserleitfähigkeiten zeigen die für Weißtorfe erwartungsgemäß erhöhte Durchlässigkeit, die allerdings sowohl in horizontaler ($k_{f(h)}$) als auch in vertikaler Richtung ($k_{f(v)}$) eine hohe Streubreite aufweist, so dass überwiegend k_f -Werte im „mittleren“ bis „extrem hohen“ Bereich zu finden sind.

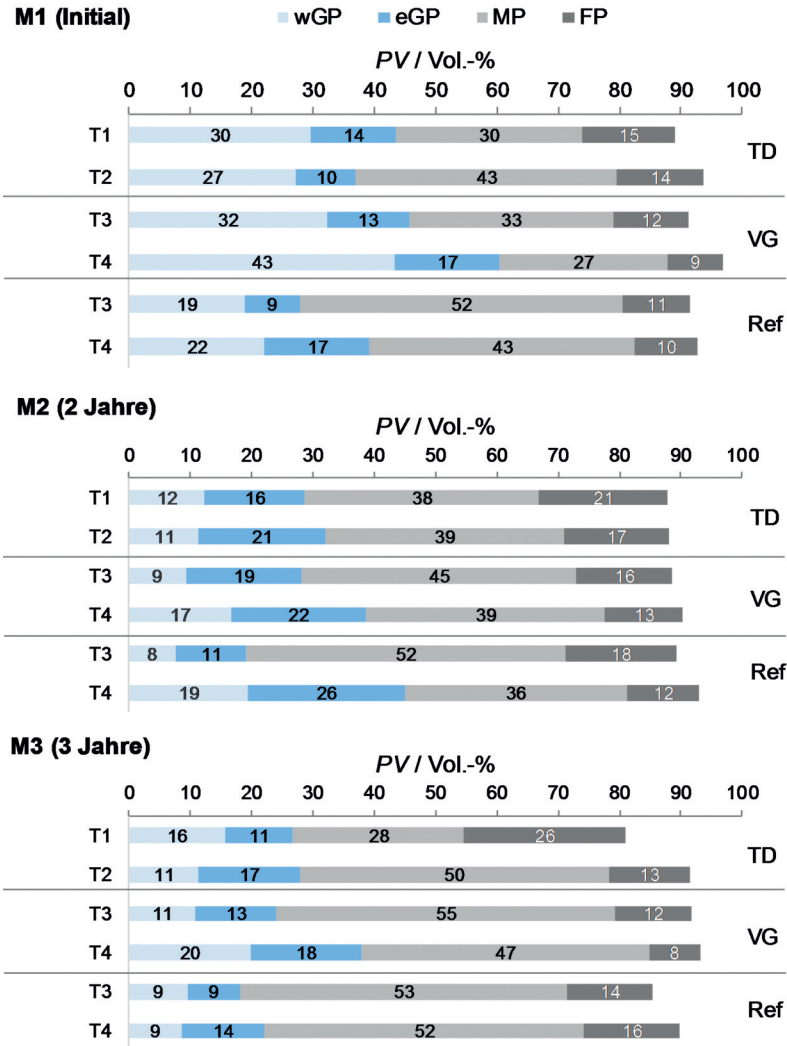


Abb. 3: Porengrößenverteilung der beprobten Tiefen (T) des Torfdammes (TD, T1 = 50 cm über GOF, T2 = 0 cm, GOF) und darunterliegender Verfüllungsgrube (VG, T3 = 50 cm unter GOF, T4 = 100 cm unter GOF) sowie angrenzender Referenz (Ref, T3 und T4 analog zu VG) der Moorstandorte M1, M2, M3 (n = 5). *PV / Vol.-%* = Porenvolumen, wGP = weite Grobporen (> 50 µm, = LK), eGP = enge Grobporen (10 - 50 µm), MP = Mittelporen (0,2 - 10 µm), FP = Feinporen (< 0,2 µm). Pore size distribution of the sampled depths of the peat dam (TD, T1 = 50 cm above ground surface (GOF), T2 = 0 cm, GOF), the belowground refilled pit (VG, T3 50 cm below GOF, T4 = 100 below GOF), and the adjacent reference soil (Ref, T3 and T4 analogously to VG) of the raised bog sites M1, M2 and M3 (n = 5). wGP = wide coarse pores (> 50 µm), eGP = narrow coarse pores (10 - 50 µm), MP = middle pores (0,2 - 10 µm), FP = fine pores (< 0,2 µm).

Die höchsten k_f -Werte werden in der obersten Tiefe T1 im aufgesetzten Torfdamm in vertikaler Richtung ermittelt (Abb. 4). In allen Torfdämmen, mit Ausnahme der GOK (T2) des Initialzustands (M1), sind außerdem die vertikalen Leitfähigkeiten stets höher als die horizontalen.

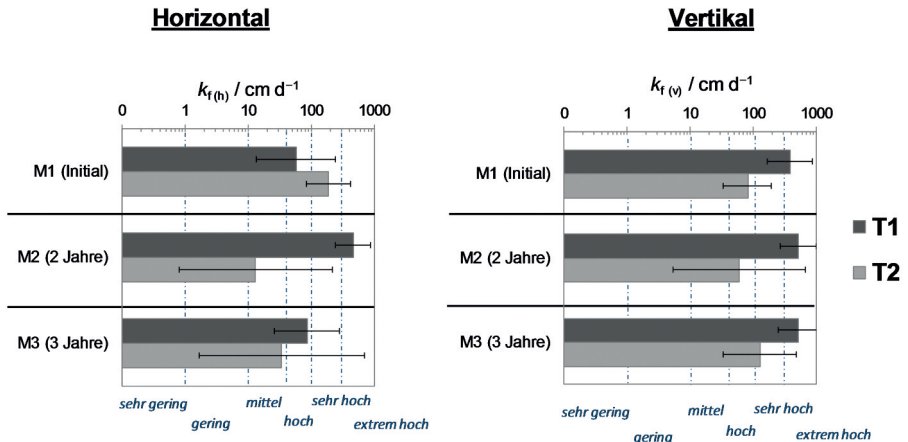


Abb. 4: Gesättigte Wasserleitfähigkeit von horizontal ($k_{f(h)}$) und vertikal ($k_{f(v)}$) entnommenen Torfproben ($n = 7$) aus 2 Tiefen (T1 = 50 cm über GOF, T2 = 0 cm, GOF) der untersuchten Torfdämme unterschiedlichen Baualters der Moorstandorte M1, M2 und M3. k_f -Einstufung nach AD-HOC-AG BODEN (2005).

Saturated hydraulic conductivity of horizontally ($k_{f(h)}$) and vertically ($k_{f(v)}$) taken peat samples ($n = 7$) from 2 depths (TD, T1 = 50 cm above ground surface (GOF), T2 = 0 cm, GOF) of investigated peat dams of different construction ages at the raised bog sites M1, M2 and M3. k_f -classification after AD-HOC-AG BODEN (2005).

Über den tiefengetreuen Vergleich der gesättigten horizontalen Wasserleitfähigkeit in der VG mit der jeweiligen Referenz ist die Wirksamkeit des Wasserrückstaus der Torfdichtwand (VG) direkt ableitbar (Abb. 5). In der Tiefe T3 weisen die VG der drei Moorstandorte eine Reduzierung der $k_{f(h)}$ -Werte auf. Die stärkste Minderung der k_f -Werte ist dabei am Standort M2 zu verzeichnen, bei dem ein Gemisch aus Hoch- und Niedermoortorf in der Verfüllungsgrube verbaut wurde. In der Tiefe T4 kann eine solche Reduzierung der Durchlässigkeit nur im „Initialzustand“ nachgewiesen werden, während die älteren Dämme gleiche (M3) bis höhere k_f -Werte in der VG aufweisen (M2). Zudem zeigt sich wie bereits im TD auch in der VG eine Zunahme der $k_{f(v)}$ gegenüber der $k_{f(h)}$ -Werte, während die natürlich geschichteten Torfe aus der Referenz eine höhere Durchlässigkeit in horizontaler als in vertikaler besitzen. Demzufolge hat sich die bevorzugte Fließrichtung durch die Verwallungsmaßnahme von einer stärker horizontalen zu einer stärker vertikal gerichteten umgekehrt. Dies spiegelt der berechnete Anisotropiefaktor (AF) wider, der im Mittel von Werten < 1 (vertikal anisotrop) in der Referenz auf Werte zwischen 3 und 4 (horizontal anisotrop) im TD und in der VG ansteigt (Abb. 6).

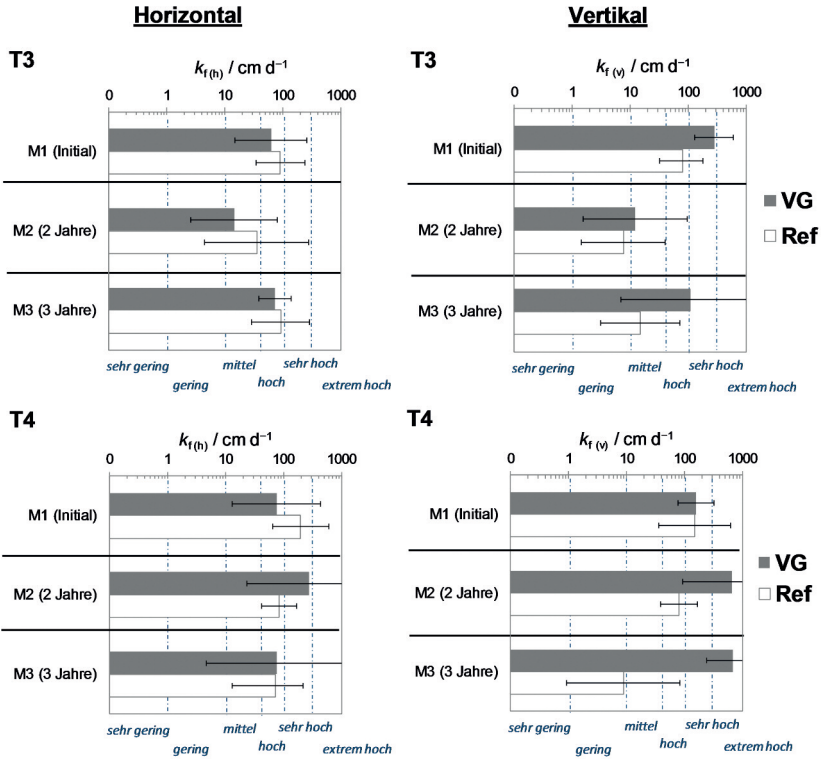


Abb. 5: Gesättigte Wasserleitfähigkeit von horizontal ($k_{f(h)}$) und vertikal ($k_{f(v)}$) entnommenen Torfproben ($n = 7$) aus 2 Tiefen (T3 = 50 cm unter GOF, T4 = 100 cm unter GOF) in der Verfüllungsgrube (VG) unterhalb der Torfdämme unterschiedlichen Baualters und der Referenz (Ref) der Moorstandorte M1, M2 und M3. Einstufung nach AD-HOC-AG BODEN (2005). Saturated hydraulic conductivity of horizontally ($k_{f(h)}$) and vertically ($k_{f(v)}$) taken peat samples ($n = 7$) from 2 depths (VG, T3 = 50 cm below GOF, T4 = 100 below GOF) of the refilled pits below the investigated peat dams of different construction ages at the raised bog sites M1, M2 and M3. k_f -classification after AD-HOC-AG BODEN (2005).

Zwar konnten in der Verwallung die Menge an weiten Grobporen durch die Verdichtungsmaßnahmen nicht vermindert werden, doch zeigt sich, dass diese zusätzlich geschaffenen Makroporen im Gegensatz zu denen in der Referenz keine hohe Leitfunktion (k_f) mehr in horizontaler Richtung besitzen und somit nicht am Wassertransport teilnehmen (Abb. 7). Der Zusammenhang zwischen k_f und LK (positive Korrelation) als auch ρ_t (negative Korrelation) wurde demnach durch das Aufbrechen der Torfstrukturen beim Ausbaggern, Mischen und Wiederverfüllen aufgehoben ($R^2 < 0,03$).

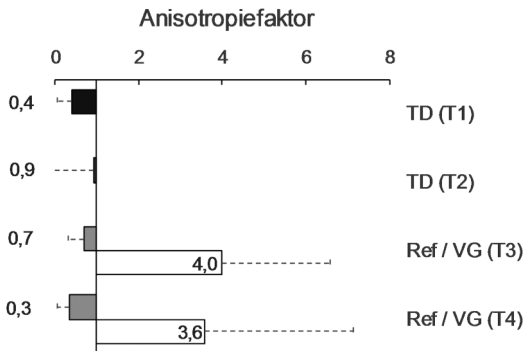


Abb. 6: Richtungsabhängigkeit in der gesättigten Wasserleitfähigkeit (Anisotropiefaktor = $k_f(h)/k_f(v)$) in den beprobten Tiefen (T) des Torfdamms (TD, T1 = 50 cm über GOF, T2 = 0 cm, GOF), der Verfüllungsgrube (VG, T3 = 50 cm unter GOF, T4 = 100 cm unter GOF) und in der angrenzenden Referenz (REF, T3 und T4) über die Standorte M1, M2 und M3 gemittelt (n = 28, Gesamtanzahl = 84).

Directional dependency of the saturated hydraulic conductivity (factor of anisotropy = $k_f(h)/k_f(v)$) of the sampled depths (T) of the peat dam (TD, T1 = 50 cm above ground surface (GOF), T2 = 0 cm, GOF), the belowground refilled pit (VG, T3 50 cm below GOF, T4 = 100 below GOF), and the adjacent reference soil (Ref, T3 and T4 analogously to VG) for the raised bog sites M1, M2 and M3 (n = 28, total number = 84).

4. Diskussion

4.1 Physikalische Eigenschaften der natürlichen Torfe (Referenz)

Die untersuchten Referenzprofile stellen den jeweiligen natürlichen Zustand in den beprobten Tiefen (50 und 100 cm) dar, der die naturgemäße Ablagerung/Schichtung und damit auch die Strukturierung der Torfe widerspiegelt. Aus bodenphysikalischer Sicht werden Torfböden nicht nur als hoch porös ($GPV > 88$ Vol.-%, siehe Tab. 2), sondern auch als heterogene und anisotrope Matrix charakterisiert (REZANEZHAD et al. 2016). Damit gilt die hydraulische Leitfähigkeit als hoch variabel sowohl innerhalb der Porenmatrix (z.B. durch kleinräumige Schichtungswechsel oder tiefenspezifische Heterogenität) als auch in Abhängigkeit von der Fließrichtung (BECKWITH et al. 2003). Wie auch in Studien von BECKWITH et al. (2003) oder ROSSKOPF et al. (2016) zeigen die untersuchten natürlichen Hochmoortorfe (Referenz) eine höhere hydraulische Leitfähigkeit sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung, die in Verbindung mit der horizontalen Ablagerung der torfbildenden Pflanzen und der daraus resultierenden horizontalen Porenorientierung in der Torfmatrix in Verbindung steht. Dabei wurde häufig festgestellt, dass der Anisotropieeffekt mit zunehmender Zersetzung des Torfes und so auch über die Tiefe abnimmt (BECKWITH et al. 2003, ROSSKOPF et al. 2016). Während häufig auch eine Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit mit der Tiefe (wie BOELTER 1965, BRANHAM & STRACK 2014,

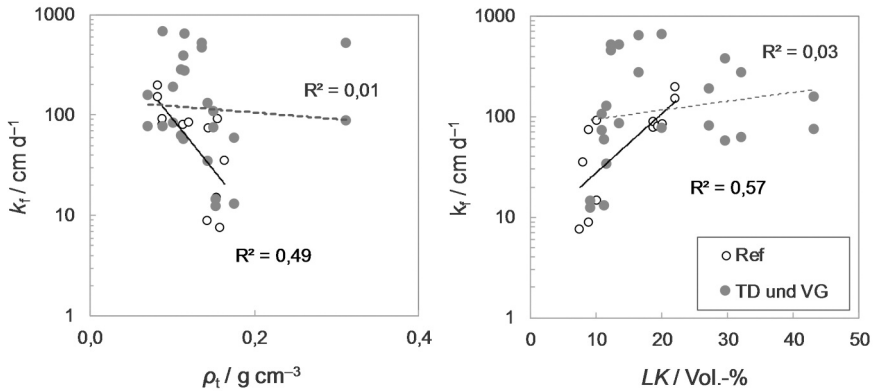


Abb. 7: Zusammenhang zwischen der geometrisch gemittelten gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_f) beider Entnahmerichtungen (horizontal und vertikal) und der gemittelten Trockenrohdichte (ρ_t) sowie der gemittelten Luftkapazität (LK) aller beprobten Tiefen des Torfdammes (TD) und der Verfüllungsgrube (VG) ($n = 24$ Wertepaare) im Vergleich zur Referenz (Ref) ($n = 12$ Wertepaare) von den 3 Moorstandorten.

Relation between the geometric mean values of the saturated hydraulic conductivity (k_f) of both sampling directions (horizontal and vertical) and mean values of bulk density (ρ_t) and air capacity (LK) of all sampling depths of the peat dam (TD) and the belowground refilled pit (VG) ($n = 24$ value pairs) compared to the reference soil (Ref) ($n = 12$ value pairs) of the three raised bog sites.

REZANEZHAD et al 2016) ermittelt wurde, die mit einer zunehmenden komprimierenden Wirkung der aufliegenden Torfschichten und Erhöhung der Lagerungsdichte erklärt wird, weisen die Referenzstandorte den umgekehrten Effekt auf. Sowohl die Leitfähigkeiten (insbesondere $k_{f(h)}$) als auch die Anzahl an Grobporen ist bei gleichzeitiger Zunahme der ρ_t in der Tiefe T4 (50 cm) gegenüber der Tiefe T3 (100 cm) reduziert. Die bereits als Folge der Entwässerung der Standorte fortgeschrittene Mineralisation im oberen Profilbereich (< 50 cm Tiefe) hat demzufolge zu einer Porenverfeinerung geführt, die die Leitfähigkeit des Porensystems herabsetzt (siehe auch PRICE et al. 2005). Die funktionale Bedeutung von Makroporen (LK) für die hydraulische Leitfähigkeit in den natürlich abgelagerten Torfen (Referenz) belegt Abbildung 7.

4.2 Physikalische Eigenschaften der wiederverfüllten Torfgemische in den Verwallungen

Durch das Einfüllen von Torfgemischen (z.B. Weiß- mit Schwarztorf, schwach und stark zersetzter Weißtorf) ergeben sich zunächst höhere Streuungen in den Messwerten, da sowohl die Ausgangs-Trockenrohdichte als auch die Verdichtbarkeit der Torfe von der Torfart (Schwarz-, Weiß-, Niedermoortorf) sowie vom Zersetzungsgrad (PRICE et al. 2005, REZANEZHAD et al. 2016) abhängt, der selbst am gleichem Standort und in gleicher Tiefe durch die Durchmischung variieren kann. Das Aufbrechen der natürlichen Torfstrukturen

beim Ausbaggern, Mischen und Wiederverfüllen im Zuge der Verwallung führt zu einer deutlichen Veränderung der Poreneigenschaften. Zwar wurden bei diesem Eingriff vergleichsweise mehr Makroporen (Zunahme der weiten und engen Grobporen zu Lasten der Mittelporen) im Torfgemisch geschaffen, doch stehen diese nicht in Zusammenhang mit einer verbesserten Leitfähigkeit in horizontaler Richtung. Es muss demnach auch eine Änderung der Porengeometrie im Torfgemisch im TD und in der VG stattgefunden haben, die mit einer Störung der Porenfunktionalität für den Wasserfluss einhergeht. Die hydraulische Leitfähigkeit ist dabei nur in vertikaler, nicht aber in horizontaler Richtung im Vergleich zur Referenz erhöht worden. Eine stauende Wirkung des verfüllten Torfmaterials ist auf diese Weise in der Tiefe T3 der untersuchten Verfüllungsgruben nachweisbar. In der darunterliegenden Tiefe T4 hingegen ist der Stauereffekt nicht zu beobachten. Aufgrund der geringeren Trockenrohdichten in dieser Tiefe ist davon auszugehen, dass eine zusätzlich nachträgliche mechanische Verdichtung des verfüllten Materials durch den Bagger in der unteren Tiefe T4 nicht zu der gewünschten dichteren Lagerung geführt hat, weil die Inkompressibilität des Wassers bei der gegebenen Wasserleitfähigkeit keine unmittelbare Ableitung des Bodenwassers als Voraussetzung für die intensivere Verdichtung ermöglichte. Nur in der oberen Tiefe T3 (50 cm) ist eine leicht höhere Dichtlagerung der verbauten Torfgemische im Vergleich zur Referenz auszumachen (Zunahme der ρ_t). Die nachlassende Wirksamkeit der Verdichtung in der untersten Tiefe ist dahingehend auch nachvollziehbar, da das verfüllte Torfmaterial hier vorwiegend mittels Baggerschaufel komprimiert wird und weniger stark den vertikalen Druckspannungen beim Überfahren des Baggers ausgesetzt ist, dessen Druckausbreitung über die Tiefe abnimmt (vgl. ZINK et al. 2010).

Zwar gelten Torfe als hoch kompressibel gegenüber mechanischen Belastungen (JOHARI et al. 2016, WONG et al. 2009), doch können durch die kurzen Auflastzeiten, die beim mehrfachen Überfahren der Torfdämme mit dem Bagger generiert werden, weder die Sofortsetzung (die auf den mit Luft gefüllten und somit vernachlässigenden Makroporenanteil begrenzt ist), noch die primäre (Konsolidierung) und die für Torfe besonders wirksamen, aber nur langfristig ablaufende sekundäre Setzung vollständig abgeschlossen sein (FOX & EDIL 1996). Durch den hohen Wassergehalt der Torfe spielt folglich insbesondere die zeitabhängige Umverteilung des Porenwassers unter Auflast eine entscheidende Rolle für die Verdichtbarkeit, d.h. die plastische Verformung durch Primärsetzung (VAN ASSELEN et al. 2009). Dies könnte dazu beigetragen haben, dass in der VG nur eine geringe Dichtlagerung (geringe Erhöhung der ρ_t) festzustellen ist.

Da die untersuchten physikalischen Kennwerte zur Porosität (GPV, LK) keine eindeutigen Hinweise auf eine für die Wasserrückhaltung relevante erhöhte Dichtigkeit der VG geben, ist die Hauptursache des augenscheinlich erfolgreichen Wasserstaus in der VG („Torfdichtwand“) deutlicher in der verminderten Porenfunktionalität des verfüllten Torfgemisches zu sehen. Der durch das Ausbaggern, Mischen und Wiederverfüllen hervorgerufene Verlust der Porenfunktionalität (Abnahme der horizontalen Wasserleitfähigkeit) in den Torfgemischen, die mit einer sich umkehrenden Anisotropie (Richtungsabhäng-

igkeit der Fließbewegung) einhergeht, scheint dabei einen höheren Einfluss auf den Wasserstauereffekt zu besitzen als die Porenänderungen durch die zusätzliche Verdichtung des Torfes. Die Änderung der präferenziellen Fließrichtung, von einer stärker horizontal, wie in den natürlich geschichteten Torfen der Referenz, zu einer stärker vertikal ausgeprägten im Torfgemisch (TD und VG), kann daher mit als eine entscheidende Steuergröße für das Abflussregime gesehen werden, die die Effektivität der Wasserrückhaltung verbessert.

5. Schlussfolgerung

In dieser Studie wurde die Effektivität von Torfdämmen mit einer Verfüllungsgrube („Torfdichtwand“) zur Wasserrückhaltung mittels bodenphysikalischer Kennwerte an drei Verwallungen unterschiedlichen Baualters überprüft. Ein Vergleich relevanter bodenphysikalischer Kennwerte, wie die hydraulische Leitfähigkeit (k_f) und deren Anisotropie (Richtungsabhängigkeit) sowie die Trockenrohdichte (ρ_t) und Luftkapazität (LK), zwischen Torfdamm mit Verfüllungsgrube und „Referenz“ zeigt dabei wesentliche Unterschiede in den hydraulischen Eigenschaften der Torfe in beiden Vergleichstiefen (50 cm, T3 und 100 cm, T4), die für den augenscheinlich wirksamen Stauereffekt der Verfüllungsgrube verantwortlich sein können. Um die seitliche Wasserbewegung aus dem Moorkörper zu reduzieren, wurde in der Verfüllungsgrube gegenüber der Referenzfläche eine Abnahme der horizontalen Wasserleitfähigkeit erzielt. Der durch die Baggararbeiten hervorgerufene verdichtungsbedingte Stauereffekt beschränkt sich jedoch auf die obere Untersuchungstiefe von 50 cm unter GOF. Entgegen den Erwartungen hat das mechanische Verdichten des Torfmaterials trotz leichter Zunahme der Trockenrohdichte allerdings zu keiner Abnahme der Grobporenstruktur der Torfe (LK) geführt. Dennoch bedingte das Aufreißen der natürlichen Torfstrukturen beim Ausbaggern, Mischen und Wiederverfüllen eine Störung der Porenfunktionalität, so dass die besonders leitfähigen Grobporen nicht in Zusammenhang mit einer Zunahme der horizontalen Wasserleitfähigkeit stehen.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass sich die untersuchten Torfeigenschaften auf gesättigte Bedingungen beziehen. Mit zunehmendem Alter der Torfdämme und anhaltendem Wasserrückstau ist davon auszugehen, dass der hydraulische Gradient innerhalb (Erhöhung des Wasserspiegels) und außerhalb (Absenken des Wasserspiegels) zunimmt und sich der Bereich der ungesättigten Zone im Torfdamm und in der Verfüllungsgrube nach unten vergrößert. Dies bedeutet gleichzeitig, dass der hohe Makroporenanteil (LK) zusätzlich als Kapillarsperre dienen kann, wenn diese potenziell leitfähigen, aber bei zunehmender Austrocknung wasserfreien Poren, nicht mehr von Wasser durchströmt werden.

6. Literaturverzeichnis

- AD-HOC-AG BODEN (2005): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. – 5 Auflage, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- BECKWITH, C.W., BAIRD, A.J. & HEATHWAITE, A.L. (2003): Anisotropy and depth-related heterogeneity of hydraulic conductivity in a bog peat. I: laboratory measurements. – *Hydrol. Process.* **17**: 89-101; DOI: 10.1002/hyp.1116
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (BKG) (2010): *Vektordaten des digitalen Landschaftsmodells 1:250.000*.
- BLUME, H.P., STAHR, K. & LEINWEBER, P. (2011): *Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler*. – 3. neu bearbeitete Aufl.; Heidelberg (Spektrum, Akademischer Verlag).
- BOELTER, D.H. (1965): Hydraulic conductivities of peats. *Soil Sci.* **100**: 227-231.
- BRANHAM, J.E. & STRACK, M. (2014): Saturated hydraulic conductivity in Sphagnum-dominated peatlands: do microforms matter? – *Hydrol. Process.* **28**: 4352-4362; DOI: 10.1002/hyp.10228 DOI: 10.1002/hyp.10228.
- FOX, P.J. & EDIL, T.B. (1996): Effects of stress and temperature on secondary compression of peat. – *Can. Geotech. J. Vol.* **33**: 405-415.
- GNATOWSKI, T., SZATYŁOWICZ, J., BRANDYK, T. & KECHAVARZI, C. (2010): Hydraulic properties of fen peat soils in Poland. – *Geoderma Vol.* **154**: 188-195.
- HARTGE, K.H. 1966: Ein Haubenpermeameter zum schnellen Durchmessen zahlreicher Stechzylinderproben. – *Z. Kulturtechnik u. Flurbereinigung* **7**: 155-163
- HARTGE, K.H. & HORN, R. (2009): *Die physikalische Untersuchung von Böden. Praxis Messmethoden Auswertung*. – 4. Aufl., Schweizerbart.
- HORN, R., FLEIGE, H. & PETH, S. (2009): Gute fachliche Praxis aus der Sicht der Bodenkunde – Vorsorge- und Maßnahmenwerte als Grundlage für die Bewertung der Verdichtungsgefährdung von Boden in der Landwirtschaft. – *Bodenschutz* **3**: 80-85.
- IUSS WORKING GROUP WRB (2015): *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.*-World Soil Resources Reports No. **106**, FAO, Rome.
- JOHARI, N.N., BAKAR, I., RAZALI, S.N.M. & WAHAB, N. (2016): Fiber Effects on Compressibility of Peat. – *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* **136**; doi:10.1088/1757-899X/136/1/012036.
- MORDHORST-BRETSCHNEIDER, H. (2018): *Methode der Torfdichtwand zur Wasserrückhaltung in degenerierten Hochmooren*. – *Telma* **48**: 101 - 110; Hannover
- PRICE, J.S., CAGAMPAN, J. & KELLNER, E. (2005): Assessment of peat compressibility: is there an easy way? – *Hydrol. Process.* **19**: 3469-3475; DOI: 10.1002/hyp.6068.

- REZANEZHAD, F., PRICE, J.S., QUINTON, W.L., LENNARTZ, B., MILOJEVIC, T. & VAN CAPPELLEN, P. (2016): Structure of peat soils and implications for water storage, flow and solute transport: A review update for geochemists. – *Chemical Geology* **429**: 75-84.
- ROSSKOPF, N., EDOM, F. & ZEITZ, J. (2016): Hydraulische Eigenschaften unterschiedlicher *Sphagnum*-Torfe. – *Telma* **46**: 61-82; Hannover.
- SAUERBREY, R. & ZEITZ, J. (2016): Böden als Teile der Landschaften: Moore. – In: BLUME, H.P., FELIX-HENNINGSSEN, P., FREDE, H.-G., GUGGENBERGER, G., HORN, R., STAHR, K. (eds.): *Handbuch der Bodenkunde* **6**, Kapitel 3. Erg. Lfg. 7/99.
- SUCCOW, M. (1988): *Landschaftsökologische Moorkunde*. – 1. Aufl., VEB Gustav Fischer Verlag, Jena.
- VAN ASSELEN, S. E. STOUTHAMER, TH. & VAN ASCH, W.J. (2009): Effects of peat compaction on delta evolution: A review on processes, responses, measuring and modeling.– *Earth-Science Reviews* **92**: 35-51; doi:10.1016/j.earscirev.2008.11.001.
- WONG, L.S., HASHIM, R. & ALI, F.H. (2009): A review on hydraulic conductivity and compressibility of peat. – *Journal of Applied Sciences* **9** (18): 3207-3218; ISSN 1812-2654.
- ZINKE, P. & EDOM, F. (2006): Hydraulische und hydrologische Erklärung von Ökotoptstrukturen am Regenmoor Kriegswiese im mittleren Erzgebirge. – *Arch. Naturschutz Landschaftsforsch.* **45** (2): 43-60.
- ZINK, A., FLEIGE, H. & HORN, R. (2010): Load risks of subsoil compaction and depths of stress propagation in arable Luvisols. – *Soil Science Society of America Journal* **74**: 1733-1742.

Anschriften der Verfasser:

Dr. A. Mordhorst
 Dr. H. Fleige
 Prof. Dr. R. Horn
 Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde,
 Christian-Albrechts-Universität Kiel,
 Hermann Rodewaldstraße 2,
 D-24118 Kiel
 E-Mail: a.mordhorst@soils.uni-kiel.de

A. Bretschneider
 Dr. M. Filipinski
 Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche
 Räume Schleswig-Holstein (LLUR),
 Hamburger Chaussee 25,
 D-24220 Flintbek