

Tagungsbeitrag zu:

Jahrestagung der DBG, Kommission VI

Titel der Tagung: Erd-Reich und Boden-Landschaften**Veranstalter:** DBG / BGS**Termin und Ort:** 24-29. 8. 2019, Bern**Berichte der DBG** (nicht begutachtete online Publikation), <http://www.dbges.de>**Bodenphysikalische Untersuchungen von Torfdämmen zur Wiedervernässung von Hochmooren**A. Mordhorst¹, H. Fleige¹, A. Bretschneider², M. Filipinski², R. Horn¹**Zusammenfassung**

Im Auftrag des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR) wurde der Wasserstauereffekt von Verwallungen, die zur Wiedervernässung in degradierten Hochmooren errichtet wurden, anhand der bodenphysikalischen Kennwerte: gesättigte Wasserleitfähigkeit, Trockenrohdichte und Luftkapazität (weite Grobporen > 50 µm) auf vier Hochmoorflächen in der Eider-Treene-Sorge Niederung Schleswig-Holsteins überprüft. Um den erwünschten Verdichtungseffekt in der Verwallung (bestehend aus einem Torfdamm mit darunterliegender Verfüllungsgrube als „Torfdichtwand“) näher zu quantifizieren, wurden ver-

gleichbare 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 im Mittel allerdings nur in 50 cm, nicht in 100 cm Tiefe erreicht. Geringe Trockenrohdichten und hohen Luftkapazitäten in 100 cm Tiefe deuten auf eine nachlassende Wirkung der Verdichtung durch die Baggerlast mit der Tiefe.

Allerdings bewirkte das Zerstören der natürlichen Torfstrukturen und die Durchmischung eine Abnahme der Porenfunktionalität in der Verwallung, so dass die besonders leitfähigen Grobporen nicht in Zusammenhang mit einer Zunahme der horizontalen Wasserleitfähigkeit stehen. Ihr positiver Effekt auf den Wasserfluss wirkt daher nur in vertikaler, nicht mehr 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.

¹ Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Hermann-Rode-wald-Str.2, 24118 Kiel. [*a.mordhorst@soils.uni-kiel.de](mailto:a.mordhorst@soils.uni-kiel.de)

² Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR), Hamburger Chaussee 25, 24220 Flintbek.

Schlüsselworte: Moorrenaturierung, gesättigte Wasserleitfähigkeit, Luftkapazität, Porenfunktionalität, Anisotropie

Einleitung

In Schleswig-Holstein haben sich Verwaltungen als ein vielversprechendes Konzept zur Wiedervernässung als einleitender Schritt zur Renaturierung von degradierten Hochmooren dargestellt. Der Staukörper zur Wasserrückhaltung besteht hier 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 (für weitere methodische Details siehe MORDHORST-BRETSCHNEIDER 2018).

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 (k_f) mit hoher Indikation sowie auf Trockenrohdichte (ρ_t) und Luftkapazität (LK, Grobporen $> 50 \mu\text{m}$) mit geringer Indikation als Parameter, die sensibel auf Verdichtung reagieren. Anhand der k_f -Untersuchung können zudem 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.

Die im Folgenden dargestellten Untersuchungen wurden 2017/2018 an 4 Verwaltungen unterschiedlichen Baualters (1 – 4 Jahre) und unterschiedlicher Zusammensetzung des Bausubstrats (variiender Zersetzungsgrad des verfüllten Weiß-/Schwarztorfgemisches) im Auftrag des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR) durchgeführt.

Material und Methoden

Die untersuchten Hochmoorflächen (M1–M4) befinden sich im Naturraum Eider-Treene-Niederung im Westen Schleswig-Holsteins (Abb. 1).

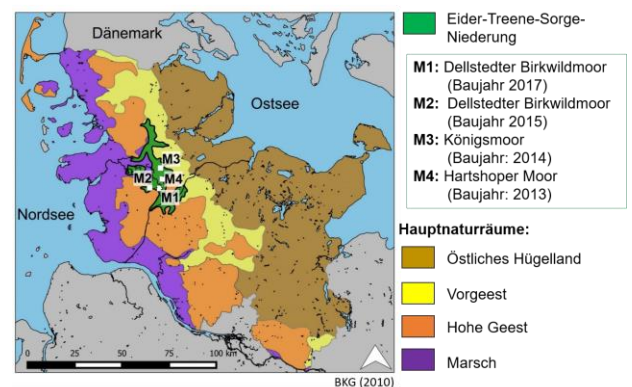


Abbildung 1: Lage der untersuchten Wiedervernässungsmoore

a) Untersuchungen von Profilgruben (statische Untersuchungen)

An jedem Standort wurde innerhalb des Torfdammes bzw. der Verfüllungsgrube sowie auf der angrenzenden Referenzfläche innerhalb (nur unter trockenen Bedingungen möglich) bzw. außerhalb der Wiedervernässungsfläche eine Profilgrube bis mindestens 1 m unter Geländeoberkante (GOF) angelegt (Abb. 2).

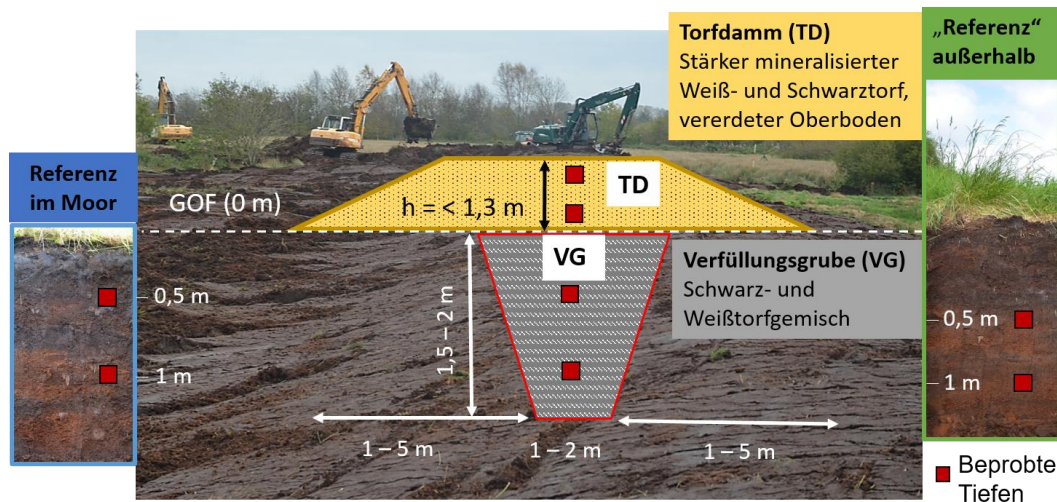
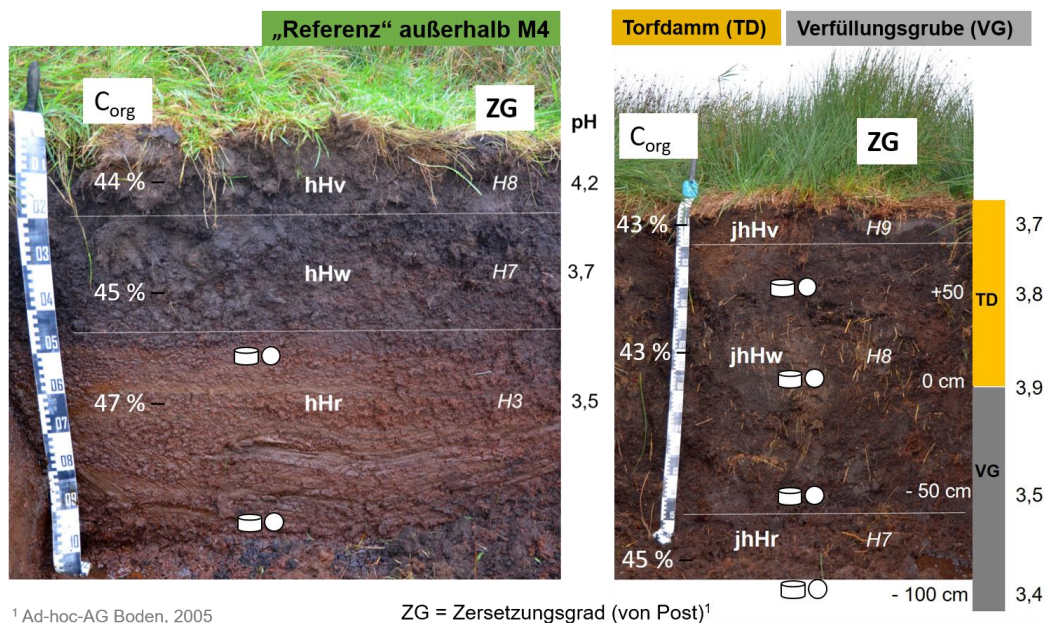


Abb. 2: Verwallungskonzept und Lage der angelegten Profilgruben zur Entnahme von gestörten und ungestörten Torfproben aus der wiederzuvernässenden „Referenz im Moor“ (blau) und einer angrenzenden „Referenz außerhalb“ (grün) sowie der Verfüllungsgrube (grau) mit aufgesetztem Torfdamm (gelb). Kartengrundlage: verändert nach Torfwerk Ehlers/Planungsbüro Mordhorst-Bretschneider GmbH).

Die bodenkundliche Profilsprache (Horizontabfolge, Bodentyp, Zersetzungsgrad usw.) erfolgte nach bodenkundlicher Kartieranleitung (AD-HOC-AG BODEN 2005) und ist in Abb. 3 exemplarisch für den Standort M4 (Hartshoper Moor) dargestellt. Generell wurden alle untersuchten Profile als Erdhochmoore (KHn) angesprochen. Durch die fortschreitende Mineralisation der Torfe nach vorheriger Entwässerung dieser

Hochmoorflächen sind die oberen 50 cm (hHv und hHw-Hoizonte) meist stärker zersetzt als der darunterliegende Bereich (hHr-Hoizonte). Die pH-Werte bewegen sich in dem für Hochmoortorfe typisch geringem Bereich („stark“ bis „sehr stark sauer“, Ad-hoc-AG Boden, 2005).



¹ Ad-hoc-AG Boden, 2005

ZG = Zersetzungsgrad (von Post)¹

Abb. 3: Bodenkundliche Profilsprache und schematische Darstellung der beprobten Tiefen der Referenzgrube außerhalb des Hartshoper Moores (M4) (links) und der Verfüllungsgrube mit aufgesetztem Torfdamm (rechts)

An jedem Standort wurden sowohl gestörtes Bodenmaterial als auch ungestörte Stechzylinderproben (100 cm³) aus jeweils 2 Tiefen aus dem aufgesetzten Torfdamm (TD, 50 cm über Geländeoberfläche (GOF) und 0 cm = GOF) und der darunterliegenden Verfüllungsgrube (VG, 50 cm und 100 cm unter GOF) sowie der angrenzenden Referenzgrube (Ref, 50 und 100 cm, analog zu VG) entnommen.

Im Labor wurden die entnommenen Stechzylinderproben nach folgender Methodik (siehe HARTGE & HORN 2009) untersucht:

- Wasserretentionsverhalten (= pF-Kurve, $n = 5$) 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)
- **Trockenrohdichte** ρ_t des Bodens ($n = 5$) mittels Gravimetrie nach Gleichgewichtskonstanz bei Trocknung
- **Gesättigte Wasserleitfähigkeit** k_f mit einem Haubenpermeameter nach dem instationären Verfahren von HARTGE (1966) an 7 vertikal ($k_f(v)$) und 7 horizontal entnommenen Proben ($k_f(h)$) zur Erfassung der Richtungsabhängigkeit der Wasserbewegung, Anisotropiefaktor = $k_f(h) / k_f(v)$

Am gestörten Bodenmaterial wurde der **pH-Wert** in CaCl₂ mittels pH-Meter sowie der **organische Kohlenstoff-** (C_{org})/Gesamtstickstoffgehalt (N) mittels trockener Verbrennung und Wärmeleitfähigkeitsdetektor (C/N Analyzer Vario MICRO Cube, Elementar Analysensysteme) ermittelt (BLUME et al. 2011).

b) *Dynamische Untersuchungen im Feld*

Darüber hinaus wurden **Wassergehalte im Zeitverlauf** von Juli bis Dezember 2018 unter Feldbedingungen bestimmt. Hierzu wurde gestörtes Bodenmaterial aus den definierten Tiefen (analog zu den Stechzylinderproben) aus der Verwallung und Referenzfläche mittels Pürckhauer-Bohrer im 14-tägigen Beprobungsrhythmus an zwei Verwallungen im Harsthooper Moor entnommen. Im Labor erfolgte die Bestimmung des gravimetrischen Wassergehalts (θ_g in Gewichtsprozent, Gew.-%) über eine Wägung der feldfeuchten und der im Anschluss im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrockneten Probe sowie die des volumetrischen Wassergehalts (θ_v in Volumenprozent, Vol.-%) über Multiplikation mit der tiefenspezifischen ρ_t (HARTGE & HORN 2009).

Anhand der ermittelten Porengrößenverteilung der zu untersuchenden Tiefen ist eine dynamische Betrachtung von Porenkenngrößen (luft- und wassergefüllter Porenanteil) im Zeitverlauf möglich. Der wassergefüllte Porenanteil (Porenwassersättigung) steht funktional in Beziehung mit dem **Matrixpotenzial**, das mathematisch über die Van-Genuchten-Funktion (VAN GENUCHTEN, 1980) ableitbar ist. Die Parametrisierung der Kurvenparameter α , n und m erfolgte auf Basis der im Labor ermittelten pF-Kurve mit der Software RETC (VAN GENUCHTEN ET AL. 1991).

Ergebnisse

a) Statistische Untersuchungen

Die Abb. 4 – 6 zeigen jeweils die über die 4 Standorte gemittelten Unterschiede der ρ_t , LK und k_f zwischen der VG und der Referenzgrube in 50 und 100 cm Tiefe (weitere Ergebnisse siehe MORDHORST et al., 2018). Das Verdichten des wiederverfüllten Torfmaterials in der VG führt jedoch nur zu einer geringen Zunahme der ρ_t , während durch das Aufbrechen der natürlichen Torfstrukturen beim Ausbaggern, Mischen und Wiederverfüllen vergleichsweise mehr Makroporen (Zunahme der weiten Grobporen $> 50 \mu\text{m}$) im Torfgemisch geschaffen worden sind (Abb. 4).

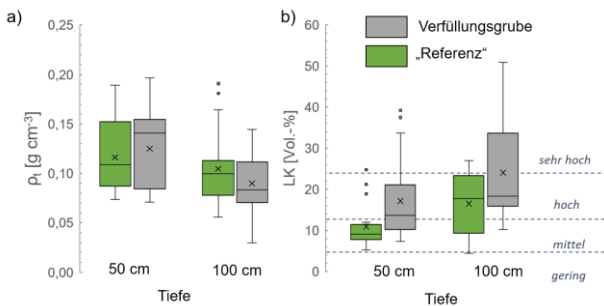


Abb. 4: Mittlere Trockenrohdichte ρ_t (a) und Luftkapazität LK (b) in der angrenzenden Referenz und Verfüllungsgrube der untersuchten Wiedervernässungsmoore (n = 20). Klassifizierung nach AD-HOC-AG BODEN, 2005.

Allerdings stehen diese nicht in Zusammenhang mit einer verbesserten Wasserleitfähigkeit in horizontaler Richtung $k_f(h)$, die im Vergleich zur Referenz ($k_f(h)$ im „hohen“ Bereich) in der VG auf „mittlere“ $k_f(h)$ -Werte reduziert ist (Abb. 5). Eine Verminderung der $k_f(h)$ konnte im Mittel jedoch nur in 50 cm, nicht in 100 cm Tiefe festgestellt werden.

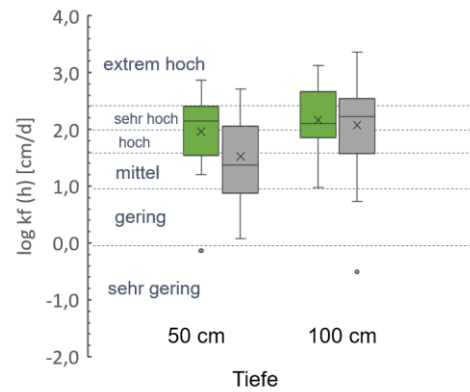


Abb. 5: Mittlere gesättigte Wasserleitfähigkeit $k_f(h)$ (a) in der angrenzenden Referenz und Verfüllungsgrube der untersuchten Wiedervernässungsmoore (n = 28). Klassifizierung nach AD-HOC-AG BODEN, 2005.

Zudem lässt sich eine Änderung der Richtungsabhängigkeit der k_f -Werte zwischen der Verwallung und der Referenz ausmachen. Während natürlich geschichtete Torfprofile (Referenz) eine bevorzugte Fließrichtung in horizontaler Richtung aufweisen, verdeutlicht Abb. 6, dass diese horizontale Anisotropie (Anisotropiefaktor $AF > 3$) nach der stattgefundenen Strukturzerstörung des wiederverfüllten Torfgemisches in der Verwallung (TD und VG) verloren geht bzw. sich tendenziell in eine stärker vertikal gerichtete Fließrichtung umkehrt ($AF < 1$).

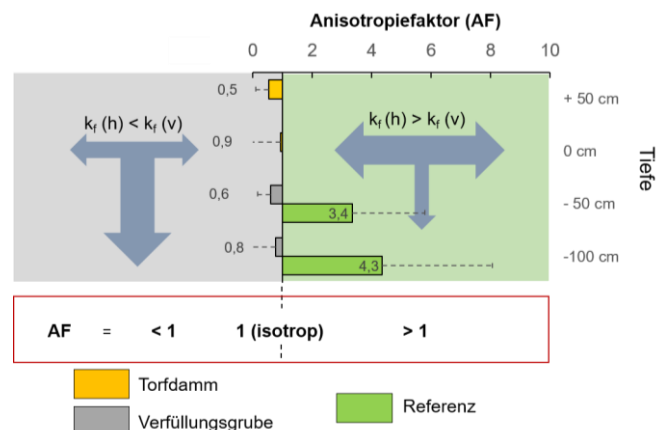


Abb. 6: Verhältnis zwischen der gesättigten Wasserleitfähigkeit in horizontaler $k_f(h)$ zu der in vertikaler Richtung $k_f(v)$ in der angrenzenden Referenz und Verwallung der untersuchten Wiedervernässungsmoore. Anisotropiefaktor (AF) > 1 : $k_f(h) > k_f(v)$; $AF < 1$: $k_f(v) > k_f(h)$; $AF = 1$: $k_f(v) = k_f(h)$.

b) Dynamische Untersuchungen

Die aus den Wassergehalten und der parametrisierten pF-Kurve berechneten Matrixpotenziale im Feld variieren zwischen +100 hPa (gesättigte Bedingungen innerhalb des Wiedervernässungsmoores in 100 cm Tiefe) und -500 hPa in der VG in 50 cm Tiefe (Abb. 7). Aufgrund der Vergrößerung des Porensystems im wiederverfüllten Torfgemisch sind z.T. trockenere Bedingungen, d.h. geringere Matrixpotenziale, in der VG im Vergleich zur angrenzenden Referenz außerhalb des Wiedervernässungsmoores zu verzeichnen. Die über den Untersuchungszeitraum konstant geringeren Matrixpotenziale in der VG und angrenzenden Referenz belegen damit eine wirksame Wiedervernässung innerhalb des Moorkörpers (Referenz im Moor) mit konstant positiven Matrixpotenzialen.

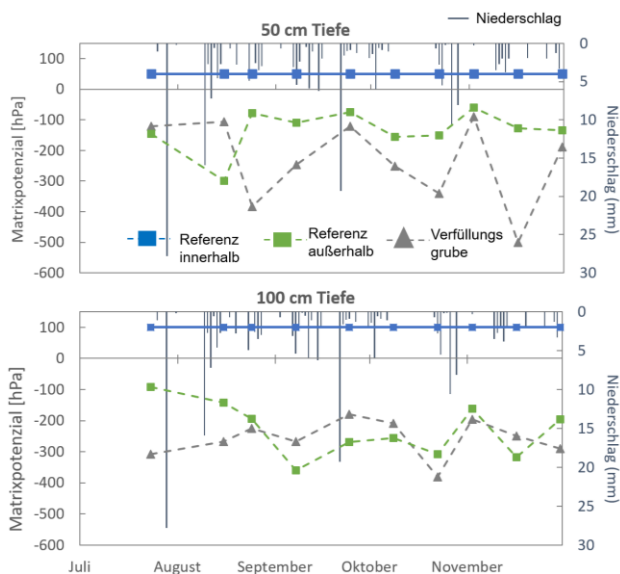


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der Matrixpotenziale in der Referenz innerhalb und außerhalb des Wiedervernässungsmoores sowie in der Verfüllungsgrube am Standort M4 (Hartshoper Moor) von Juli bis Dezember 2018.

Diskussion

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

Die pt-Werte zeigen, dass nur in 50 cm Tiefe eine leicht höhere Dichtlagerung der verbauten Torfgemische im Vergleich zur Referenz auszumachen ist (geringe Zunahme der pt). Die nachlassende Wirksamkeit der Verdichtung in der untersten Tiefe (100 cm) 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 wirksame, 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). Eine nicht ausreichend schnelle Ableitung des Bodenwassers und die hohe Elastizität der Torfe können entsprechend dazu beigetragen haben, dass in der VG nur eine geringe Dichtlagerung (geringe Erhöhung der p_t) nachweisbar ist.

Außerdem lässt die ermittelte Verschlechterung der $k_f(h)$ trotz Erhöhung des wasserleitenden Porenanteils (weite Grobporen) auf eine veränderte Porengeometrie im Torfgemisch der Verwallung im Vergleich zu natürlich geschichteten Torfen (Referenzgrube) schließen. Durch das Ausbaggern, Mischen und Wiederverfüllen wurde nicht nur die Porenfunktionalität (Abnahme der horizontalen Wasserleitfähigkeit) in den Torfgemischen vermindert, sondern auch die horizontale Anisotropie (Richtungsabhängigkeit der Fließbewegung) aufgehoben bzw. in eine tendenziell stärker vertikale Fließrichtung umgekehrt. Diese funktionalen Veränderungen im Torfgemisch scheinen damit einen noch stärkeren Einfluss auf die Stauwirkung der VG zu besitzen als die Porositätsänderungen durch die zusätzliche Verdichtung.

Literatur

- AD-HOC-AG BODEN (2005). Bodenkundliche Kartieranleitung. KA5. Hrsg. von Ad hoc Arbeitsgruppe Boden. Stuttgart, Germany: Schweizerbart Science Publishers.
- 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. Spektrum, Akademischer Verlag Heidelberg.
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (BKG) (2010): Vektordaten des digitalen Landschaftsmodells 1:250.000.
- FOX, P.J. & EDIL, T.B. (1996): Effects of stress and temperature on secondary compression of peat. - Can. Geotech. J. Vol. 33: 405-415.
- 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. Auflage, 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.
- 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, A. FLEIGE, H., BRETSCHEIDER, A., FILIPINSKI, M., HORN, R. (2018): Bewertung des Staueffekts von Verwallungen zur Wiedervernässung von Hochmooren in Schleswig-Holstein anhand bodenphysikalischer Kennwerte. Telma 48, 111–128, Hannover, doi:org/10.23689/figeo-3295
- MORDHORST-BRETSCHEIDER, 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.
- VAN GENUCHTEN, M. TH. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. SOC. Am. J. 44,
- VAN GENUCHTEN, M.T., LEIJ, F.J., YATES, S.R. (1991). The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. EPA Rep. 6002-91065 US Salin. Lab. USDA ARS, Riverside Calif.
- 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.
- 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

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.earsci-rev.2008.11.001.