

Tagungsbeitrag zu: Kommission I der DBG
Kommission I der DBG, 3.–9. September, Berlin
& Potsdam
Berichte der DBG (nicht begutachtete
online Publikation)
<http://www.dbges.de>

Sebastian K. Pagenkemper*, Stephan Peth, Rainer Horn, Heiner Fleige & Stephan Gebhardt

„Quantifizierung der Porenraumdynamik von organischen Substraten mit Hilfe der Mikro-Computertomographie“

Zusammenfassung Böden sind durch ein dynamisches und heterogenes Porensystem charakterisiert. Die Veränderung von Fließpfaden und damit die Zugänglichkeit von Oberflächen ist eine Funktion von hydraulischen (Schrumpfen-Quellen) und mechanischen Kräften, die intern (z. B. Wurzeln, Regenwürmer) oder extern (Auflasten) zu Porenverteilungen führen. Dahin gehend variieren Intensitäts- und Kapazitäts-Kenngrößen, die für Transport- und Speichervorgänge im System Boden-Pflanze-Atmosphäre von Bedeutung sind. Die Mikro-Computertomographie (XMCT) ist eine Methode zur nicht-invasiven Untersuchung von Böden, mit der sich morphologische und topologische Eigenschaften des Porenraumes mit Hilfe quantitativer Bildauswerteverfahren erfassen und mit physikalischen Funktionen in Beziehungen setzen lassen. An ungestörten organischen Proben eines Standortes in Schleswig-Holstein (Wacken) wurden mit der XMCT-Methode wassergehaltsabhängige Veränderungen von Porenräumen durch Schrumpfung analysiert.

Schlüsselwörter: Mikro-Computertomographie, Porenraumdynamik, organische Substrate

Einleitung Von den ca. 115.000 ha Fläche der Niedermoorböden in Schleswig-Holstein sind etwa 87.000 ha durch landwirtschaftliche Eingriffe, meist Grünland- oder Torfstichstandorte, geprägt (LANUSH, 2002). Oftmals werden diese Flächen, die in ausgedehnten Niederungsbereichen liegen, Entwässerungsmaßnahmen unterzogen um eine bessere Befahrbarkeit der Böden und Trittfestigkeit der Narbe zu gewährleisten. Dieser Eingriff in die vorherrschende Grundwassersituation bzw. den natürlichen Zustand des Moores, generiert eine Aufeinanderfolge von Prozessen die sich als Sackung, Setzung, Schrumpfung und Gefügebildung charakterisieren lassen, und bringen eine Umstrukturierung des komplexen Porensystems des Torfkörpers hervor. Die Nachwirkungen äußern sich in einer Belüftung des Torfkörpers und somit einer einsetzenden Mineralisierung und sekundären Zersetzungsprozessen der organischen Substanz sowie benetzungshemmenden Effekten (GEBHARDT, 2007). Folglich können präferenzielle Flüsse von Gas und Wasser entlang der durch Schrumpfung bedingten Makrostrukturen entstehen, was die Bedeutung der Interaktionen zwischen Inter- und Intraagregat Porenräumen für Transportprozesse verdeutlicht.

Fragestellung & Zielsetzung Die Frage nach einer Charakterisierung und einem möglichen Hochskalieren von Präferentiellen Flüssen in Torfen für die Modellierung von Transportprozessen, macht eine Beschreibung spezifischer Eigenschaften von Porenraumarchitekturen erforderlich. Wir haben mit der XMCT eine nicht-

*s.pagenkemper@soils.uni-kiel.de

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde
C.A.U. zu Kiel, Hermann-Rodewald-Str. 2, 24118 Kiel

invasive und räumliche Methode angewendet, um mit einer angeknüpften Bildauswertung Schrumpfungsprozesse und darüber hinaus den komplexen Porenraum zu quantifizieren.

Material & Methoden Das Untersuchungsgebiet liegt bei Wacken (Schleswig-Holstein und ist durch ein maritimes Klima ($7,8\text{ °C}$ \varnothing -Jahresstemperatur; $998\text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ \varnothing -Jahresniederschlag) geprägt. Der Standort liegt ca. 2,89 m ü. NN in einem ebenen Relief und hat eine geschlossene Vegetationsdecke, die der Nutzungsart Grünland entspricht. Der Bodentyp wird als Norm-Erdniedermoor (KVn) mit der Horizontabfolge nHv (0–15 cm) / nHw (16–70 cm) / nHr (> 70 cm) definiert. Charakteristisch für diesen Bodentyp, zeigt der zeitweise durch Grundwasser beeinflusste nHw-Horizont bereits erste Merkmale einer Degradation ($C_{\text{org}} = 22,5\%$) was sich in einer vorhandenen Strukturschrumpfung widerspiegelt und sich auch durch extrovertierte Eisenausscheidungen (Ferrihydrit) im Profil dargestellt hat. Entsprechend zeigt der ständig durch Grundwasser beeinflusste nHr-Horizont ($C_{\text{org}} = 40,2\%$) keine Merkmale einer Degradation (Normalschrumpfung). Aus dem nHw und nHr-Horizont wurden jeweils drei ungestörte Bodenproben (PVC-Steckzylinder; $\sim 100\text{ cm}^3$) entnommen. Die Proben wurden im nahe gesättigten sowie bei -300 hPa entwässerten Zustand im CT untersucht.

Das physikalische Prinzip der CT basiert auf dem Beer–Lambert Gesetz, mit dem eine Abschwächung der Initialen Röntgenstrahlungsintensität in Abhängigkeit der Materialdicke und des Absorptionskoeffizienten ermittelt wird. Als Resultat wird die räumliche Verteilung der lokalen Materialdichten als Grauwerte ausgegeben. Bedingt durch die Voxel-Auflösung

ließen sich in den untersuchten Torfproben Strukturen und Poren ab einer Größe von $103,16\text{ }\mu\text{m}$ darstellen (Abb. 1).

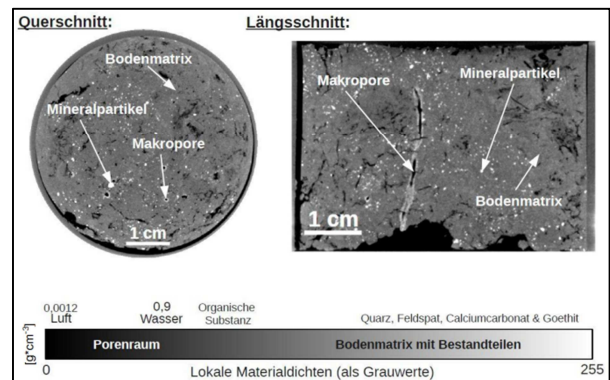


Abbildung 1: Quer- und Längsschnitt durch eine nHw-Probe (-300 hPa vorentwässert). Bodenmatrix, Makropore (mit Eisenablagerung \rightarrow helle Bereiche) und Mineralpartikel sind in Abhängigkeit der Grauwerte abgebildet.

Für die Segmentierung wurde ein lokales Thresholding-Verfahren verwendet. Dabei werden zwei lokale Grenzwerte in einem Histogramm bestimmt, die jeweils einen unteren (T0) bzw. oberen (T1) Bereich markieren. Abhängig von der Grauwertzahl werden Voxel mit Grauwerten $<T0$ sicher als Porenraum (dunkle Grauwerte) und Voxel mit Grauwerten $>T1$ sicher als Bodenmatrix identifiziert (helle Grauwerte). Der Bereich zwischen beiden Grenzwerten markiert die als unsicher identifizierten Voxel, die durch Indikator Kriging einer der beiden Populationen zugeordnet werden (OH & LINDQUIST, 1999). Der segmentierte Datensatz bildet die Grundlage für die Rekonstruktion der Poren-Oberflächen, mit denen durch einen Burn-Algorithmus das Porenskelett (Mediale Achsen) rekonstruiert wird (LINDQUIST et al., 1995). Daraus lassen sich morphologische und topologische Parameter (Breite, Länge & Tortuosität) des Fließnetzwerkes ableiten. Durch die nicht-invasive Analyse des Porenraumes im gesättigten und entwässerten Zustand lassen sich so Veränderungen der Bodenstruktur als Folge der Entwässerung beschreiben.

Ergebnisse & Diskussion Erwartungsgemäß hat sich bei allen Proben ($n=3$) nach der Entwässerung eine Erhöhung der Makroporosität (MP) sowie eine Zunahme der zugänglichen Oberflächen (A_z) gezeigt. Der bereits im Zuge der Genese durch eine Entwässerung beeinflusste nHw-Horizont hat verglichen mit dem nHr eine geringere MP (1,3 % vs. 2,0 %) und nach Entwässerung eine geringere Porositätszunahme (3,8 % vs. 29 %) nach der Entwässerung. Die initiale Strukturschrumpfung beim nHr mit vorhandenen Schrumpfrissen spiegelt sich auch in A_z wider wobei die zugängliche Oberfläche mit $81 \text{ cm}^2\text{cm}^{-3}$ deutlich höher war als beim nHr ($32 \text{ cm}^2\text{cm}^{-3}$). Nach Entwässerung zeigte sich eine weitere Zunahme von A_z , beim nHw ($+11 \text{ cm}^2\text{cm}^{-3}$) und beim nHr ($+6 \text{ cm}^2\text{cm}^{-3}$). Die initial größere A_z kann auf die komplexeren Strukturen des nHw-Horizontes deuten, da dieser bereits mehrere Be- und Entwässerungs-Zyklen durchlaufen hat und dadurch feinere Strukturen mit größeren zugänglichen Oberflächen gebildet hat.

Die Veränderung des Porenraumes durch Schrumpfung wird in den Porengrößenverteilungen für beide Horizonte dargestellt (Abb. 2a & 2b). Der nHw-Horizont zeigt einen geringen Anstieg der vorhandenen Einzelporen (nicht verbundene Porenvolumina) von 4948 zu 7142 nach der Entwässerung gegenüber dem nHr-Horizont mit 43 zu 6232 Einzelporen. Das größte verbundene Porenvolumen hat beim nHw einen Anteil an der Makroporosität von 28 (vor Entwässerung) und 79 % (nach Entwässerung) bzw. beim nHr 31 und 98 %. So kann für den nHw festgehalten werden, dass nach einer Entwässerung bei -300 hPa trotz vorhandener Merkmale einer Strukturschrumpfung noch immer ein Potenzial zur Schrump-

fung vorhanden ist.

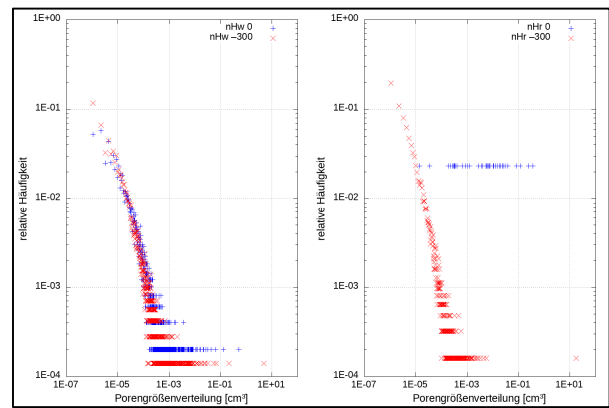


Abbildung 2: Porengrößenverteilung des (a) nHw- und (b) nHr-Horizontes ($n=3$).

Besonders beim nHr (2b) fällt die Umverteilung einzelner Porengrößen nach der Entwässerung auf, während beim nHw (2a) kaum Veränderungen vorliegen.

Entsprechend kann davon ausgegangen werden, dass sich durch die Entwässerung beim nHr lediglich ein großer zusammenhängender Schrumpfriss gebildet hat. Die komplexen Strukturen des Torfes (nHr) zeigen starke strukturelle Veränderungen bei Änderung des Wassergehaltes (Normalschrumpfung) durch die im Vergleich zum nHw weniger stark ausgeprägte Stabilität des Porensystems.

Die angedeutete Entwicklungsabfolge eines degradierten Niedermoors wird deutlicher wenn die Breite der Fließpfade hinzugezogen wird (Abb. 3). Beim nHw, der aus einem nHr hervorgegangen ist, lassen sich Merkmale einer Strukturschrumpfung erkennen. Nach der Entwässerung hat sich überwiegend eine Verringerung der Fließpfad Breite gezeigt, die jedoch nicht so ausgeprägt ist wie beim nHr. Diese fehlende Strukturstabilität beim nHr führt zu einer durch Schrumpfungsprozesse eingeleitete Entstehung von Rissen mit größeren Fließpfad Breiten, die sich dann über die Entwicklungsfolge wiederum mit Material verfüllen und ein komplexeres Porennetzwerk bilden.

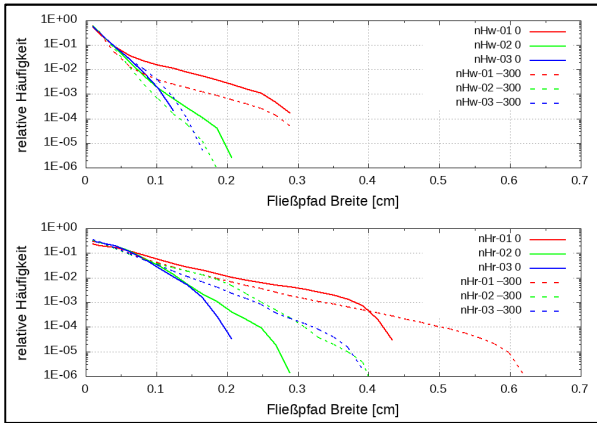


Abbildung 3: Fließpfadbreiten [cm] für den nHw- (oben) und nHr-Horizont (unten); mit $n = 3$.

Zusätzlich wurde eine Veränderung der Tortuosität der vertikal verlaufenden Pfade beobachtet (Abb. 4). Durch die Strukturschrumpfung beim nHr entstehen gering tortuose Pfade, die bei weiteren Schrumpfungs- und Quellungszyklen zu einer Umstrukturierung des Porennetzwerks (nHw) und der Bildung tortuoserer Fließpfade führt.

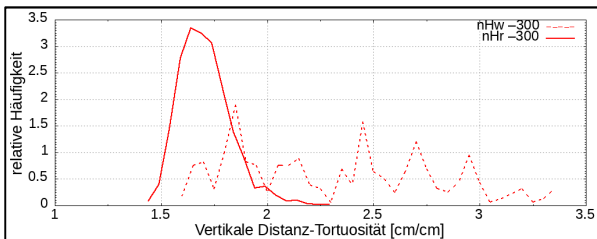


Abbildung 4: Vertikale Distanz-Tortuosität für nHw- und nHr-Horizont nach Entwässerung.

Eine Folge daraus sind veränderte Eigenschaften des Torfes für Transportprozesse, wie z.B. Gasdiffusion. Durch die entwässerungsbedingte Schrumpfung entstehen breitere Distanz Fließpfade und eine höherer Konnektivität sowie ein geringe Tortuosität des Porensystems. Durch eine damit verbundene Erhöhung der Durchlüftung des Bodens können sich der Abbau der organischen Substanz und folglich auch die Degradation des Torfkörpers beschleunigen.

Schlussfolgerung Mit der XMCT konnten die Dynamik von Strukturveränderungen als Funktion des Matrixpotenzials

untersucht werden. Die Ergebnisse zeigen sehr deutlich, dass Böden in Abhängigkeit ihrer Vorgeschichte (nHr vs. nHw) nur bis zu einem definierten Zustand ein starres Porensystem aufweisen. Nach einer ersten Entwässerung des nHr wurden durch Normalschrumpfung breitere und längere Fließpfade mit geringer Tortuosität gebildet. Bei einer fortgeschrittenen Bodenentwicklung (Quellung und Schrumpfung nach Einstellen eines neuen Grundwasser-Spiegels) ist wie im Falle des nHw eine weniger ausgeprägte Veränderung der Porenraumgeometrie festzustellen.

Literatur

Gebhardt, S., 2007. Wasserhaushalt und Funktionen der Böden im Grundwasserschwankungsbereich des Wasserwerkes Wacken in Schleswig-Holstein. Dissertation, In Horn R. & Mühlhng K. (Hrsg.): Schriftenreihe Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel. Nr. 75

LANU - Landesamt für Natur- und Umwelt Schleswig Holstein, 2002, Programm zur Wiedervernässung von Niedermooren

Lindquist, W.B., Lee, S.-M., Coker, D.A., Jones, K.W. & Spanne, P., 1995. Medial Axis Analysis of Three Dimensional Tomographic Images of Drill Core Samples. SUNY-Stony Brook technical report SUNYSB-AMS-95-01.

Oh, W. & Lindquist, W.B., 1999. Image Thresholding by Indicator Kriging. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 21, 590-602.