ISSN 0340-4927

T E L M A

Berichte der Deutschen Gesellschaft für Moor- und Torfkunde

2022

T E L M A	Band **52**	Seite 1 - 280	Hannover, November 2022

Deutsche Gesellschaft für Moor- und Torfkunde (DGMT) e.V.

Stilleweg 2, 30655 Hannover (Alfred-Bentz-Haus)
www.dgmtev.de
IBAN: DE90 2501 0030 0303 2003 01, BIC: PBNKDEFF

TELMA	Band 52	Seite 51 - 62	1 Tab.	Hannover, November 2022

Diskussion von Gesetzen zur Wasserleitfähigkeit in Torfböden

Discussion of laws of the water conductivity of peat soils

VOLKER SCHWEIKLE

Schlüsselwörter: Hagen-Poiseuille & Darcy vs. Galilei & Newton; Wasserströmung nach Fallgesetz
Keywords: Hagen-Poiseuille & Darcy vs. Galilei & Newton; flow of water due to the law of fall

Zusammenfassung

Gezeigt wird, dass die üblichen Strömungsgesetze, basierend auf Druck- und Geschwindigkeitsgradienten nach Darcy und Hagen-Poiseuille, zur Beschreibung der Strömung von Wasser in Porensystemen von Torfböden physikalischen und mathematischen Grundsätzen nicht (bzw. nur sehr eingeschränkt) genügen. Deshalb wird das Fallgesetz nach Galilei und Newton als Strömungsgesetz, beruhend auf Energiehöhen und quadratischen Geschwindigkeiten, vorgeschlagen und diskutiert.

Abstract

It is shown that the common laws of flow based upon gradients of pressure and velocity according to Darcy and Hagen-Poiseuille do not properly describe the real flow of water in pore systems of peat soils according to physical and mathematical principles. Instead, the law of fall of bodies by Galilei and Newton based upon the height of energy and quadratic velocities are discussed.

1. Einführung

Bachmann et al. (2014) präsentieren die Strömungsgleichung $q = k_{f,s} \cdot \frac{\psi}{s}$ mit der Strömungsrate $q / \frac{m^3}{s \cdot m^2}$; der Wasserleitfähigkeit $k_{f,s} / \frac{m}{s}$ und dem Potenzialgradienten = spezifischen Energiegradienten $\cdot \frac{\psi}{s} = \frac{m \cdot g \cdot h_w}{V \cdot s} / \frac{kg \cdot 10\ m \cdot m}{s^2 \cdot m^3 \cdot m}$.

Bilanzieren und umstellen der Einheiten ergibt kg = $10^{-1}\cdot m^2\cdot s^2$, bzw. die Aussage, dass die Masse eine Funktion von Fläche und Zeit (m = $f(10^{-1}\cdot s^2\cdot t^2)$ sei; was physikalisch falsch ist. Wird $m = V \cdot \rho$ / $\frac{m^3 \cdot 10^3 \cdot kg}{m^3}$ mit $V = \alpha_{x,y,z}$; $h_w = n \cdot \alpha_z$ und $k_{f,s}$ / $\frac{m^3 \cdot s}{10^4 kg}$ gesetzt, entfallen alle Einheiten; jedoch ergibt sich $1 = \pm\, n \cdot \sin\alpha$, was mathematisch falsch ist. Deshalb werden im Folgenden Gesetze zur Strömung von Wasser in Torfböden vorgestellt und diskutiert, die physikalisch/mathematischen Grundsätzen genügen.

2. Gesetze zur Wasserströmung

2.1 Wasserströmung durch einen Druckgradienten nach Hagen-Poiseuille und Darcy

Beide wurden von SCHWEIKLE (1977, 2016) hinreichend beschrieben, weshalb sie nur noch der Vollständigkeit halber erwähnt und durch neuere Überlegungen ergänzt werden.

Es gilt $v = k_{Do} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \sin\alpha \cdot \rho \cdot g$ für starre Matrices mit $k_{Do} \cdot \eta^{-1} = k_{f,s} = k_{DV}$; mit
Fließgeschwindigkeit v/m·s^{-1}
Permeabilität k_{Do}/m^2
Viskosität η/mPa·s 1,792 mPa·s (bei 0 °C) und 1,002 mPa·s (bei 20 °C)
Porenradius r/m; Porenquerschnitt A/m^2
Gefälle sin α/-
Dichte von Wasser ρ/0,9982 kg·m^{-3} (bei 20 °C)
Erdbeschleunigung g/9,81 m·s^{-2} (≈10 m·s^{-2})
Zeit t/s

Dies bedeutet, dass $v \sim k_{Do} = \frac{r^2}{8}$, da der Druckgradient · sin $\alpha \cdot \rho \cdot g$ und die Fluidität $\frac{1}{\eta}$ bei konstanter Temperatur und konstantem Gefälle über die gesamte Strömungsstrecke konstant bleiben; was auch für den Wasserdurchsatz bei konstantem Querschnitt A gilt (Messung nach Hanus & Kmoch; l. c. SCHLICHTING & BLUME, 1966) [1][2]. Schrumpft die Matrix, bleibt aber wassergesättigt, ist $v \sim f(\Delta\, k_{k0(geschrumpft)})$, weil sich beim Schrumpfen die Matrix proportional zum Wassergehalt verändert. Quillt eine wassergesättigte Matrix, gilt $v \sim f(\Delta\, k_{D0} = f(t))$, weil eine Veränderung des Gefüges beim Quellen auch zeitabhängig ist. Ein reibungsbedingter Druckabfall (eigentlich Energieverbrauch durch Reibung) und ein laminares, resp. turbulentes Strömungsmuster ist aus den o.a. Gesetzen nicht ableitbar und der Kapillarhub wird nicht berücksichtigt.

Die Mittelwerte der Wasserleitfähigkeit betragen in einem homogenen Torfbodenhorizont $\bar{k}_l = \Sigma_{i=1}^{n} k_i$, entsprechen der elektrischen Parallelschaltung, und über mehrere Horizonte hinweg $\bar{k}_i^{-1} = \Sigma_{i=1}^{n} \frac{1}{k_i}$ der Reihenschaltung der elektrischen Leitfähigkeit.

2.2 Wasserströmung in Torfen durch einen Energiegradienten beim Fallgesetz

Beim Fallgesetz geht durch Gefälle, innere und äußere Reibung des Wassers und Kapillarhub Energie verloren, so dass dieser Verlust beim Fallen berücksichtigt werden muss, was in SCHWEIKLE (2021) vorgestellt wird.

Die Strömungsgeschwindigkeit

$$v = \sqrt{(\underbrace{+2 \cdot g \cdot s}_{(a)} - \underbrace{\frac{4\sigma}{\rho \cdot r}}_{(b)})(1 - \cos \alpha)(1- \mu_f)(1- \mu_m)} \qquad \text{(Gl. 1(a) und (b))}$$

(a) Fallgesetz
(b) Kapillarhub
Strömungsstrecke (Gefälle) s/m
Fallhöhe/Energiehöhe h_w/m mit $h_w = s' \cdot \cos \alpha$ mit $s' \equiv \approx s$
Gefällewinkel α/−
innere Reibung des Fluids (Viskosität) μ_f/ −
äußere Reibung des Fluids an der Matrix μ_m/ −
Radius von Poren r /m
Dichte von Wasser $\sigma/10^3$ kg m^{-3}
Oberflächenenergiedichte σ/kg·s^{-2}

Die Reibungsbeiwerte μ_f und μ_m werden nicht mehr wie im hagen-poiseuilleschen Gesetz gemeinsam als Bruch dargestellt, wie in vorhergehenden Veröffentlichungen, sondern getrennt, da sie verschiedene Reibungsursachen und -orte repräsentieren.

Hinweis: Messung der Fallhöhe von Wasser mit Haubenpermeametern nach HARTGE & HORN (2009), wird von den Autoren als Druckabfall interpretiert, repräsentiert aber tatsächlich einen Energieverlust durch, im Wesentlichen, Reibung.

Ist $\cos \alpha = 0$, entspricht die Strömungsstrecke s der Energiehöhe h_w. Die Masse des Wassers m bleibt unberücksichtigt, weil sie i.d.R. in Torfen und Moorgewässern konstant bleibt. Bei Gewässern, die Mineralisches im Strömungsverlauf erodieren und sedimentieren, trifft diese Bedingung nicht zu. Dort ist die Dichte von Wasser abhängig vom Schwebstoffgehalt, dessen Konzentration von der Strömungsgeschwindigkeit abhängt; was in mineralisch geprägten Landschaften situationsabhängig zu berücksichtigen wäre.

v^2 ist proportional der Energie(Fall-)höhe h_w und der Reibung an der Matrix μ_m, die allerdings mit zunehmendem Porenradius immer unbedeutender wird; v^2 hängt aber auch ab von der Erdbeschleunigung, der Viskosität μ_f (innere Reibung des Fluids), der Oberflächenenergiedichte und der Dichte des Wassers (wobei letztere 3 Parameter auch temperaturabhängig sind). Sind Fallhöhe und Kapillarhub gleich wird in der der

Gleichung (a) = (b). Ist (a) < (b), fließt Wasser im Torf nach oben. Um irrationale Zahlen zu vermeiden, werden die Gleichungsteile (a) negativ und (b) positiv gesetzt. (Hinweis: Das Gesetz entspricht dann dem senkrechten/schrägen Wurf nach oben!).

Tab.1: Kapillardurchmesser mit zugehörigem Kapillarhub und Porenklassen.
Capillary diameter with associated capillary lift and pore classes.

Kapillardurchmesser[1)] (mm)	2000	200	20	2	0,2	0,02	>	0,05	0,01	0,0002	<
Kapillarhub[1)] (mm)	0,014	0,14	1,4	14	140	1400					
Porenklassen[2)] Durchmesser (mm)							grob	weit	eng	mittel	fein

[1)] [3] de.wikipedia.org/wiki/Kapillarität, [2)] [4] portal.uni-freiburg.de/objekte/blickphys

Mit kleiner werdendem $h_w = s \cdot (1 - \cos \alpha)$ nimmt die Strömungsgeschwindigkeit mit v^2 ab, weshalb der Gleichgewichtswassergehalt (Feldkapazität = FK) anfangs sehr schnell und gegen $v^2 \rightarrow <<$ („sehr langsam“) erreicht wird. Letztlich ist die Feldkapazität laut obiger Strömungsgleichung für Torfbodenprofile nicht exakt fassbar.

Messungen im Gelände mit Doppelringinfiltrometern und im Labor mit Stechringen erfassen nur die Nettoströmung des Wassers, d.h. die gravitative Strömung (druck- und/ oder energiebasiert) ohne den Kapillarhub zu berücksichtigen, wobei letzterer immer wichtiger wird, je feinporiger ein Substrat wie stark zersetzte Torfe. Unwesentlich ist die Berücksichtigung des Kapillarhubs nicht, denn beim Bau eines Gartenteiches wird standortsabhängig immer eine Kapillarsperre im Uferwall über dem maximalen Wasserspiegel eingebaut, um durch Kapillarhub verursachte Wasserverluste auszuschließen. (Hinweis: In ariden Klimaten wie u. A. in der Mongolei, in Burkina Faso und Mali wird Salz aus Gewässern via Grundwasser und Kapillarhub in den torfig/ mineralischen Uferbereich an die Bodenoberfläche transportiert und fällt dort aus, bedingt durch Wasserverdunstung durch Sonneneinstrahlung, so dass zum Kapillarhub ein osmotischer Saugdruck aufgebaut wird, der den ufernahen Wassertransport zur Landoberfläche zusätzlich fördert.

Auf ein Perpetuum mobile kann beim Kreislauf „Versickerung-Kapillarhub“ nicht geschlossen werden, weil durch Reibung Energie verbraucht wird, was diesen Prozess irgendwann beendet.

Messungen im Gelände mit Tensiometern mit Quecksilbermanometern bestimmen die Bindungsenergie des Wassers in feinporigen Matrices, wie Torf, gerätebedingt nur bei Porenradien von ungefähr 0,7 bis 0,07 mm.

Hinweis: Mit einem Tensiometer wird keine Tension (Zug- oder Druckkraft), geschweige denn eine Spannung, sondern eine Energiedichte gemessen. Die Messgenauigkeit ist bei r = ≈ 0,7 mm gering, weil Energiedifferenzen durch geringe Höhendifferenzen der Quecksilbersäule nicht exakt messbar sind. Auch wirkt der Kapillarhub der Poren der Keramikzelle der Energiehöhe der Quecksilbersäule entgegen, was beim Ablesen von Messwerten zu berücksichtigen wäre. Die Messung ist temperaturabhängig und es gilt Gleichung 1, so dass Gasdurchbrüche an der Keramikzelle nicht unbedingt angenommen werden müssen. Zugehörige Bindungsenergien des Wassers in Torfböden sind einer Energiedichte(ψ)-/Wassergehalts(θ)-Kurve zu entnehmen.

2.3 Strömungsmuster beim Fallgesetz

Nach Froude (Froudezahl =1) ist die Strömung bei $v^2 > 1$ turbulent und hyperboloid und bei $v^2 < 1$ laminar und paraboloid (bei immer quadratischen Gleichungen). Die Zahl 1 beschreibt also den Bereich des Übergangs von laminarer zu turbulenter Strömung und auch den Gültigkeitsbereich der Gesetze von Hagen-Poiseuille/Darcy. Sie charakterisiert eine äußerst labile Energie der Lage, bei der sowohl laminare als auch turbulente Strömung und ohne erkennbare Ursache in unregelmäßigem Wechsel auftreten können.

Innerhalb einer Bodenprobe können also turbulente und laminare Strömung sowohl parallel als auch zeitversetzt vorkommen. Ist die Froude-Zahl <1 und die Strömungsgeschwindigkeit $v^2 \sim h_w$ (siehe Kap.2.2) dann gilt grundsätzlich das Fallgesetz (unabhängig vom Strömungsmuster) und die Strömungsrate nimmt mit v^2 ab. D. h. laminare Strömung bedeutet nicht zwangsläufig, dass das Fallgesetz nicht gilt und durch ein druckbasiertes Gesetz (Darcy/Hagen; Poiseuille) ersetzt werden kann.

2.4 Übergangswiderstände

Vorgestellt wird die Strömung von Wasser in Torfböden, beeinflusst durch Übergangswiderstände an Grenzschichten und durch Fließwiderstände in Schichten/Horizonten.

2.4.1 Kolmation

Sie beschreibt den Eindringwiderstand von Wasser in poröse Matrices wie Torfböden und wird verursacht:
- von lebenden Organismen auf einer Gerinnesohle (biotisch), die allerdings durch Hochwasser (oft nur lokal) erodiert werden oder
- feindisperse, biogene oder minerogene Partikel, die die Poren der Matrix an der Oberfläche mechanisch verstopfen. Sie können dabei die Wasserdurchlässigkeit zusätzlich vermindern durch Quellen oder Hydrophobie nach Austrocknung. Die durch eine Grenzfläche strömende Wassermenge ist abhängig von der Porengrößenverteilung, z.T. modifiziert durch den Quellungszustand, und einer zeit-, temperatur- und stoffabhängigen Hydrophobie, die selbst in ein energie-geschwindigkeits-basiertes Gesetz, wie das Fallgesetz, nur bezüglich der Temperatur eingefügt werden kann. Für die Zeit- und

Stoffabhängigkeit müssten Platzhalter für „Neben"-Gesetze erstellt werden, von denen bedarfsgerecht Proportionskoeffizienten abzugreifen wären. Diese mehrdimensionale Struktur ist in druck-geschwindigkeits-basierten Gesetzen, wie dem darcyschen und dem hagen-poiseuilleschen, nicht realisiert.
- Wasserströmung in den Boden kann also sehr stark eingeschränkt sein und ist oft nur möglich durch zufällige (nicht vorhersehbare) punktuelle Erosion der Bodenoberfläche mit punktuellem Wassereintritt in Boden und Torf.

2.4.2 Tropfen (Brezesinski & Mögel (1993) und Gordon (1989))

Sie entstehen an einer Grenzfläche unterhalb einer wasserhaltigen, porösen Schicht über Hohlräumen. Ein Wassertropfen muss ca. 0,25 Milliliter enthalten, damit er abreißt. Entscheidend ist nun aber nicht das Volumen, sondern die Masse eines Tropfens mit $m = V \cdot \rho$ und da $\rho = f(\theta)$ ist, variiert das Volumen temperaturabhängig. Die kritische Länge L eines Tropfens, bei der die Bruchenergie die Dehnungsenergie erreicht und ein Tropfen abreißt, liegt ungefähr bei $L = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{4 \cdot \gamma \cdot E}{\sigma_{max}}$ /m für Wasser, mit:

Länge L / m
Masse m / kg
Volumen V / m^3
Dichte ρ /$kg \cdot m^{-3}$
Temperatur $\theta \equiv T \equiv t$ / (K oder °C).
Bruchenergie γ / $J \cdot m^{-2}$
Elastizitätsmodul E / $J \cdot m^{-3}$
Dehnungsenergie σ_{max} / $J \cdot m^{-3}$.

Dabei entsteht eine intermittierende Strömung (tropfenweises Strömen), wobei die Menge an Tropfen je Flächen- und Zeiteinheit abhängt vom nachlieferbaren Wasser aus dem auflagernden Porensystem und dessen lokaler Energiehöhe. So wurden z. B. Torfe (H 8-10) des Schmiechener Sees (TK 25 Nr. 7624; 9° 46' E und 48° 22' N; 535 m ü NN; Niederschlaghöhe 755 mm/a) auf schluffig-lehmigen Sedimenten über Donauschottern des Riss-Würm (oder Mindel-Riß?)-Interglazials gebildet, in denen der Grundwasserspiegel in 6-8,5 m Tiefe liegt. Oberflächenabfluss aus dem See gibt es nicht. Also strömt Sickerwasser, tropfend und/oder an der Matrixoberfläche, vom hängenden Stauwasser im auflagernden Material zum Grundwasser im unterliegenden Horizont aus Schottern, in dem das Wasser abfließt (Roweck & Schweikle 1995). Ähnliches ist auch vorstellbar unter vermoorten Poljen über Hohlräumen über dem Grundwasserspiegel im Karst. Bei deutlichen Veränderungen der Porendurchmesser in der Strömungsrichtung, wie Wechsellagerung unterschiedlich zersetzter, entwässerter Torfe, treten Übergangswiderstände immer auf (Wasserhahneffekt!).

2.4.3 Gradienten und Fließwiderstände in Schichten/Horizonten

Ist der Wasserkörper über dem Torf durch ein Loch (Durchmesser ca. 1-2 cm) im Torf mit dem abströmenden Wasserkörper (z.B. einem Kieslager) unter dem Torf verbunden, strömt das Wasser, dem Fallgesetz folgend, gegebenenfalls turbulent ab, erkennbar an einer Eindellung der Wasseroberfläche und üblicherweise rechtsdrehendem Abstrom im Loch, bedingt durch die Corioliskraft (linksdrehend erfordert auf der Nordhalbkugel der Erde ein spezifisches Relief der Torfoberfläche).

Zur Erinnerung sei Gleichung 1 wiederholt:

$$v = \sqrt{(+2 \cdot g \cdot s - \frac{4\sigma}{\rho \cdot \mathrm{r}})(1 - \cos \alpha)(1- \mu_f)(1- \mu_m)} \quad \text{(Gl. 1)}$$

$v^2 \sim h_w$ (siehe Kap. 2.2) und da die Energie h_w in einer Torfschicht, bzw. einem Torfbodenhorizont, bei der Strömung von Wasser durch Reibung und Kapillarhub verbraucht wird, bedeutet eine variierende Porengrößenverteilung in einer Matrix auch variierende Energieverluste; was sowohl für gesättigte als auch ungesättigte Wasserströmung gilt (ungesättigt $\theta = f(\varphi)$ mit φ = Bindungsenergie des Wassers); d.h. die Energiehöhe h_w in einer Schicht/einem Horizont variiert. Aus einer mittleren Energiehöhe $\overline{h}_w$ kann die mittlere Strömungsgeschwindigkeit v^2, die das strömende Wasservolumen definiert, nicht berechnet werden, wenn die algebraische Funktion zwischen v^2 und $\overline{h}_w$ unbekannt ist; was die Regel sein dürfte. Das gesamte durch eine Schicht/einen Horizont strömende Wasservolumen ist damit nur gegeben durch die Summe aller Wasservolumina einzelner Stechringe, aus denen ein mittleres Strömungsvolumen je Flächeneinheit errechnet werden kann.

Der Gleichung 1 zu entnehmen ist auch, dass beim Entwässern einer wassergesättigten Torfbodenschicht erst große Poren, in der Folge dann die mittleren und zuletzt die feinen Poren leerlaufen; aber auch, dass je nach Porengröße Wasser mit v^2 abfließt; in groben Poren also sehr schnell sehr viel, in feinen sehr langsam sehr wenig. Insofern missachtet die Bildung eines geometrischen Mittelwertes der Wasserleitfähigkeit das Fallgesetz.

2.5 Strömung an Wärmegradienten

Wasserströmung an Gradienten der Wärmeenergie mit Eisbildung bei Frosthub, Frostschub und Kammeis wird von Weise (1983) ausführlich beschrieben und deshalb hier nicht behandelt.

3. Diskussion

Fraglich ist, ob in sehr feinen Poren die brownsche Bewegung wegen Bindungskräften der Porenwand verringert wird und diese so weit in den Porenraum hineinwirken, dass Wassermoleküle miteinander lockere Strukturen bilden (verklumpen), die die Viskosität verringern (PEREZ et al. 2012).

Gemäß Kapitel 2.1 gilt für Hagen-Poiseuille und Darcy $\upsilon = k_{Do} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \sin\alpha \cdot \rho \cdot g$, wobei, $\upsilon \sim k_{Do} \cdot \frac{1}{\eta}$ weil der Druckgradient $\sin\alpha \cdot \rho \cdot g$ über die Strömungsstrecke konstant bleibt, was auch für $\frac{1}{\eta}$ zutrifft.

Der Proportionskoeffizient k_{Do} / m² wurde gewählt, um die Zahl 8 zu eliminieren, deren Herkunft unbekannt ist. Wird aber $\upsilon \sim k_{Do} = \frac{r^2}{8} = \frac{\pi r^2}{\pi 8} = \frac{A}{25{,}132}$ gesetzt, wäre $\upsilon \sim A$ und müsste den Einflussgrößen $\sin\alpha \cdot \rho \cdot g$ zugeordnet werden. Dafür entfiele der Reibungsbeiwert k_{Do} (normalerweise direkt an der Porenwand = ∞) zwischen Wasser und Porenoberfläche bei den Proportionskoeffizienten vollständig, wodurch dann das paraboloide Strömungsmuster in Poren nicht mehr erklärbar wäre [3][4]. D. h. durch eine simple Erweiterung des Gesetzes wie oben dargestellt wird es uneindeutig und falsch, was bei einem robusten Gesetz nicht der Fall ist.

Das Strömungsgesetz (Gl. 1(a) und (b)) bedingt, dass $1 = f(s \sim (r, \mu_m)^{-1})$, und damit muss mit zu-(ab-)nehmendem s die Porung feiner (grober) werden, womit auch die notwendigen Voraussetzungen definiert sind, um Hagen-Poiseuille und Darcy gegebenenfalls anwenden zu dürfen; was im Einzelfall überprüft und dokumentiert werden muss. Bei kurzen Messstrecken ist nicht unbedingt zu erkennen, dass $\upsilon^2 \sim s$ ist, weshalb in der gängigen Literatur (BACHMANN et al. 2014) $\upsilon \sim s$ gesetzt wird, was über längere Messstrecken (Schichten/Horizonte/Profile) meist falsch ist.

Ist in Gleichung 1 b) > a) wird die Zahl unter der Wurzel negativ, was durch Ersetzen von g durch −g in Gleichung 1 a) korrigiert werden kann, wobei man aber immer daran denken sollte, dass das Wasser in diesem Fall nach oben fließt (obwohl positiv indiziert) oder man betrachtet das Minus unter der Wurzel als Richtungsangabe und nicht als mathematischen Operator (wie in der Trigonometrie möglich!) der einen imaginären Ausdruck repräsentiert, sondern die Strömungsrichtung des Wassers.

Das darcysche Gesetz ist eine π-mal-Daumen-Regel; die für die Berechnung der Dimensionierung von Sandfiltern zur Grundwasserreinigung hinreichend genau sein mag. Das Gesetz von Hagen-Poiseuille entspricht dem darcyschen, differenziert allerdings bei den Proportionskoeffizienten in die Materialkoeffizienten „innere Reibung“ eines Fluids (η^{-1}; Viskosität)“ und ($r^2 \cdot 8^{-1}$); die nur die Reibung an der Porenwand beschreibt (siehe oben). Damit ist es das weitergehende Gesetz und deshalb dem darcyschen vorrangig.

Variable und deren Abhängigkeiten:

- Die Energiehöhe h_w wird üblicherweise auf den Grundwasserstand als Referenz bezogen. Doch den Kapiteln 2.2.3.1/2 zu entnehmen ist, dass h_w abhängig ist von z. B. Kapillarhub und Übergangswiderständen und keine eindeutig definierte, sondern ist eine variable, unbekannte und faktisch in Böden, besonders mit Aggregatgefüge, eine nicht messbare Größe.
- Die Strömungsstrecke s beinhaltet eine Tortuosität (Gewundenheit von Poren) von maximal ± 20 % von s, unabhängig von der Strömungsrichtung $\alpha/°$
- Schrumpft die Matrix, bleibt aber wassergesättigt, ist $v \sim f(\mu_{f,m(\text{geschrumpft})})$, weil sich beim Schrumpfen die Matrix verändert (Schweikle, 1982) und quillt eine wassergesättigte Matrix gilt $v \sim f(\mu_{f,m} = f_{(t)})$, weil eine Veränderung des Gefüges beim Quellen auch zeitabhängig ist.
- μ_f ist abhängig von der Temperatur und dem Porenradius, wegen evtl. Clusterbildung des Wassers in sehr feinen Poren und damit höherer innerer Reibung des Wassers.
- μ_m ist abhängig vom Porenquerschnitt (je kleiner/größer umso wichtiger/unwichtiger) und den elektrostatischen Eigenschaften der Porenwand.
- ρ ist geringfügig temperaturabhängig.
- σ ist abhängig von Temperatur, Porendurchmesser und der chemischen Wasserqualität.

Daraus folgt, dass die Strömung nach Fallgesetz 6- bis 8-dimensional ist und damit kaum messbar, auch bei bekannter Porengrößenverteilung, wobei ja nie bekannt, inwiefern Poren über verschiedene Horizonte/Schichten hinweg kommunizieren oder nicht. Damit bleibt als einzige Messmethode zur Bestimmung der Wasserströmung in organischen und mineralischen Porensystemen der Einsatz von Lysimetern, die die Natur und mögliche Fragen an sie am besten zu beantworten in der Lage sind. Ähnlich verfahren Gewässerhydrologen, die i. W. „nur“ die Wasserabflüsse an Wehren messen und statistisch verarbeiten, ohne deren Ursachen im Einzelnen zu kennen.

Das Fallgesetz ist ein Geschwindigkeits-Energie-basiertes Gesetz, in dem Druckkräfte nicht vorgesehen sind. Auf die Gleichungen von Navier-Stokes wird deshalb nicht Bezug genommen, weil sie Geschwindigkeits-Druck-basiert sind, was in der Natur eher nicht vorkommt. In Einzelfällen ist ihre Verwendung möglich; z. B. wenn bei einer quadratischen Gleichung (Fallgesetz!) die Steigung eines Parabelarms über eine kurze Distanz als linear angenommen wird; worauf allerdings immer hingewiesen werden und was auch bewiesen werden muss.

4. Nachwort

Meine Aussagen in den Veröffentlichungen zur Wasserbewegung in Torfen haben sich im Laufe der Zeit verändert (Schweikle 2017, 2020). Dies gilt insbesondere bzgl. der Bewertung der linearen Strömungsgleichungen von Darcy und Hagen-Poiseuille, deren

Gültigkeitsbereich so stark eingeschränkt wird, dass sie nur noch bedingt gelten (wenn denn überhaupt ?!?!).

Es war nicht einfach, sich von etablierten Vorstellungen der Bodenphysik zu lösen. Sie ließen sich nur mühselig, wegen anfänglicher, eigener Vorurteile, ausräumen.

5. Literaturverzeichnis

Bachmann J., Horn R. & Peth S. (2014, 4. Auflage): Einführung in die Bodenphysik; Schweizerbart (Stuttgart).

Brezesinski, G. & Mögel, H.-J. (1993): Grenzflächen und Kolloide; – Spektrum (Heidelberg).

Gordon, J. E. (1989): Strukturen unter Stress: Mechanische Belastbarkeit in Natur und Technik, S. 89 ff.; –Spektrum (Heidelberg).

Hartge K.H. & Horn R. (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden; – Schweizerbart (Stuttgart).

Kuchling, H. (2021, 21. Auflage): Taschenbuch der Physik; – Fachbuch/Hanser (Leipzig/München).

Pérez C., Muckle M. T., Zalesk D.P., Seifert N.A., Temelso B., Shields G.C., Zbigniew K. and Brooks H. P. (2012): Structures of Cage, Prism, and Book Isomers of Water Hexamer from Broadband Rotational Spectroscopy. Science 18 **(336)**, 897-901, DOI: 10.1126/science.1220574.

Roweck, H. & Schweikle, V. (1995): Böden und Vegetation im Wassereinzugsgebiet des Schmiechener Sees; – *In* Hölzinger, J. & Schmid, G. (Hrsg): Der Schmiechener See. Naturkunde eines Naturschutzgebietes auf der Schwäbischen Alb. – Beih. Veröff. Naturschutz & Landschaftspflege Bad.-Württ. **78,** 121-158; – LUBW (Karlsruhe).

Schlichting E. & Blume H.-P. (1966): Bodenkundliches Praktikum; – Parey (Hamburg und Berlin).

Schweikle, V. (1977): Überlegungen zur Mittelwertbildung beim Proportionalitätskoeffizienten $k_{f,s}$ in der Darcy-Gleichung. – Mittlg. dt. bodenk. Gesellsch. **25**, 67-72 (Hannover).

Schweikle, V. (1982): Gefügeeigenschaften von Tonböden; – Ulmer (Stuttgart).

Schweikle, V. (2016): Diskussion des Mittelwerts der Wasserleitfähigkeit k_f in Torfen. – Telma **46**, 213-216; Hannover.

Schweikle, V. (2017): Grundlagen zur Wasserbewegung in Moor und Torf. – Telma **47**, 129-138; Hannover.

Schweikle, V. (2020): Ergänzende Vermerke in Bezug auf meinen Artikel in der Telma 47 über „Grundlagen zur Wasserbewegung nach Darcy in Moor und Torf“. – Telma **50**, 87-92; Hannover.

SCHWEIKLE, V. (2021): The law of the flow of water by Darcy is a special case in the law of fall. – 16th IPC Proceedings, poster presentation, p. 52-55; Tallinn, Estonia.

WEISE, O.R. (1983): Das Periglazial; – Borntraeger (Berlin und Stuttgart).
(abgerufen am 04.12.2021).

[1] https://de.wikipedia.org>wiki>Gesetz_von_Hagen-Poiseuille (abgerufen am 04.12.2021).

[2] https://www.tec-science.com/de/mechanik/gase-und-fluessigkeiten/hagen-poiseuille-gesetz-fur-rohrstromungen-mit-reibung/ (abgerufen am 04.12.2021).

[3] de.wikipedia.org/wiki/Kapillarität (abgerufen am 04.11.2021).

[4] portal.uni-freiburg.de/objekte/blockphys (abgerufen am 04.12.2021).

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. V. Schweikle
Ebertstraße 12a
D-69190 Walldorf
E-Mail: volker.schweikle@gmail.com

Manuskript eingegangen am 31.01.2022

Persönliche Mitglieder zahlen einen Jahresbeitrag von 40,- Euro, korporative einen von 150,- Euro, Studenten und Auszubildende auf Antrag 10,- Euro. Der Jahresbeitrag ist bis zum 1. März des betreffenden Jahres auf das DGMT-Postbankkonto IBAN: DE90 2501 0030 0303 2003 01, BIC: PBNKDEFF zu überweisen.

Mitglieder erhalten die alljährlich herausgegebenen Bände der TELMA sowie die Beihefte zur TELMA gegen ihren Mitgliedsbeitrag.

Anträge auf Mitgliedschaft richten Sie bitte per E-Mail an info@dgmtev.de.