

TELMA	Band 41	Seite 125 - 136	5 Abb.	Hannover, November 2011
-------	---------	-----------------	--------	-------------------------

# Theorie der Belastbarkeit von Böden aus Torf

## Theory of the carrying capacity of peat

VOLKER SCHWEIKLE

### Zusammenfassung

Die Druckverteilung unter Last in Torfböden hängt vom Bodengefüge ab. Rollende Lasten erzeugen Scherung mittig sowie vor und hinter Rädern. Gezeigt wird die Massenbewegung von Torfböden bei Auflast und die dabei wirkenden Kräfte. Nasse Torfe werden nur verdichtet, wenn das Porenwasser verschoben wird. Lasten wirken auf Torfbodenvolumina und in der Zeit. Deshalb müssen Vektorbetrachtungen durch Leistungs-/Energiebilanzen ersetzt werden. Kraftstöße übertragen ähnliche Leistungen auf Torfböden wie Lasten. Die Verdichtung von Torfböden muss am Standortsanspruch der jeweiligen Vegetation bewertet werden; d.h. nach Durchwurzelbarkeit, nach Bodenmächtigkeit und -volumen und nach pflanzenverfügbarem Bodenwassergehalt in der Vegetationszeit.

### Abstract

The distribution of pressures under load in peat soil depends on the soil structure. Rolling loads produce shear in the middle and in front and behind wheels. The movement of mass of peat soil under load by the responsible forces is presented. Wet peat will be compressed only if the water in the pores will shift. Loads are effective on peat soil volumes and in time. Therefore the use of vectors has to be replaced by balances of the specific energy/power. Impacts transmit similar amounts of power, as loads do. The compression of peat soil has to be valued by the requirements of the prevailing vegetation; that means due to the penetrability of roots in depth and volume of peat soil and the plant available water content in time of growth of plants.

## 1. Einleitung

Die Fortpflanzung von Drücken im Boden wird von ZELENIN, SÖHNE & VAN DEN BERG (in HILLEL 1980) für kugelförmige Gefügeelemente (Einzelkorn, Krümel, Subpolyeder und Polyeder) in orthogonaler Lagerung beschrieben. Nicht vorgestellt wird von ihnen

- die Druckfortpflanzung in Böden
  - mit plattigem (Torfe  $\leq H4$ ) und mit säulig/prismatischem (Torfe  $\geq H6$ ) Gefüge und
  - in und gegen die Bewegungsrichtung der Antriebselemente,
- die Bedeutung der Wasserleitfähigkeit auf das Fließverhalten von Torfböden bei Auflast und
- die Wirkung von Kraftstößen einer fahrenden Last,

was durch eigene Modelle ergänzt wird.

## 2. Methodik

Auswertung von Literatur laut Zitaten im Text und Formeln nach KUCHLING (2007).

## 3. Ergebnisse

Nach der Druckfortpflanzung in Böden unter Last (z. B. Maschinen) wird erst die zeitabhängige Druckbelastung und dann die Wirkung des Impulses vorgestellt.

### 3.1 Gefüge abhängige Druckfortpflanzung in Torfböden

Die Linien gleicher Drücke im Boden unter Last heißen Isobaren und ihre Gesamtheit nennt man Druckzwiebel. Bei konstanter Aufstandsfläche und zunehmender Last sowie bei zunehmender Aufstandsfläche und zunehmender Last (d.h. konstantem Bodendruck), wirken die Drücke tiefer in den Boden. Die Form der Druckzwiebel ist dargestellt für

- kugelförmiges Gefüge in Abbildung 1a) - zur Erinnerung - (in HILLEL 1980),
- plattiges Gefüge in Abbildung 1b). Sie ist in der Vertikalen gestaucht. Die Last wird auf eine größere Fläche verteilt, wie in wenig zersetzten Torfen oder durch Wurzelfilz im Oberboden und
- prismatisches Gefüge in Abbildung 1c). Sie ist in der Horizontalen gestaucht. Die Last ruht auf einer kleineren Fläche, wie in stark zersetzten, trockeneren Torfen. Die Prismen unterliegen einer, senkrecht zur Hochachse, nach außen wirkenden Knickung bzw. einer ca.  $20^\circ$  zur Horizontalen wirkenden Scherung (LORENZ & LORENZ 2007).

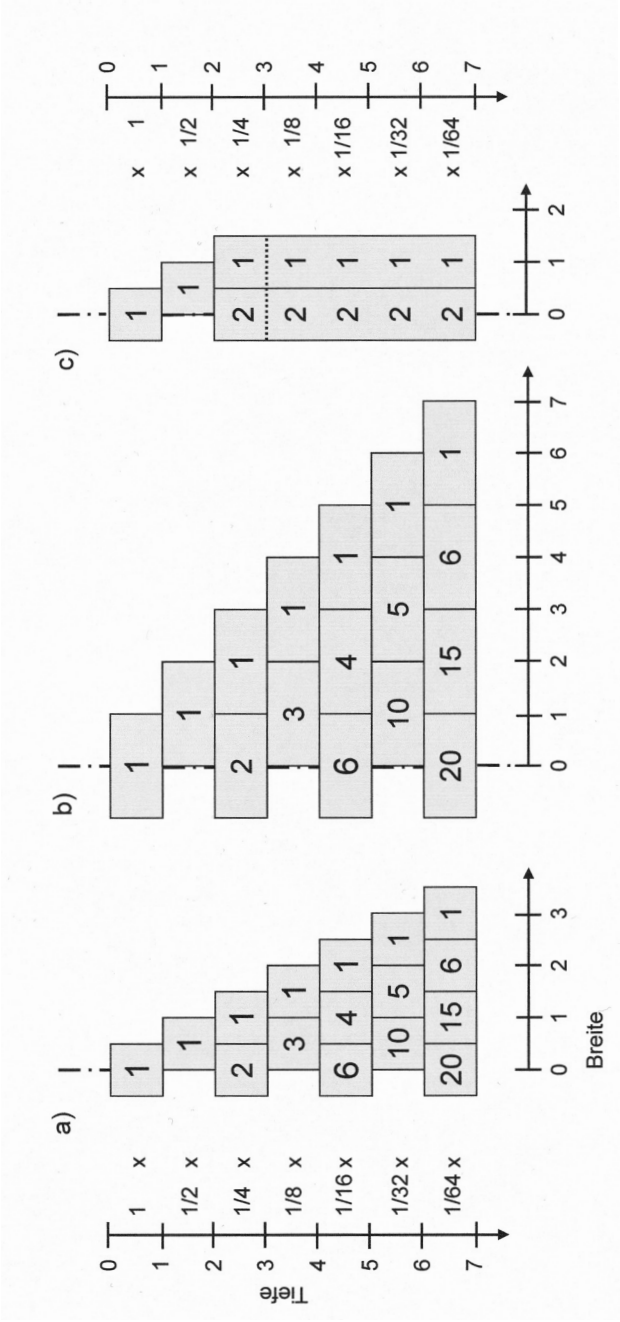


Abb. 1 a): Druckverteilung in Böden mit kugelig, orthogonalem Gefüge  
 Pressure distribution in soils with spheroidal, orthogonal structure  
 b): Druckverteilung in Böden mit plattigem Gefüge  
 Pressure distribution in soils with platy structure  
 c): Druckverteilung in Böden mit prismatisch/säuligem Gefüge  
 Pressure distribution in soils with prismatic/columnar structure

- die Bewegungsrichtung. Die Drücke werden vom Boden packungs- (orthogonal) und formbedingt (Höhe:Durchmesser = 1:1,5), in und gegen die Bewegungsrichtung (nicht seitlich) links mit  $130^\circ$  (Parallelogramm a) und rechts mit  $110^\circ$  (Dreieck b), jeweils bezogen auf „Boden“oberfläche, in den Boden abgeleitet (Abb. 2). Wie die Drücke a und b vorne, bzw. hinten, zwischen links und rechts, zufällig, periodisch oder nie, und vorne und hinten, gleichsinnig oder voneinander unabhängig, wechseln wurde nicht geprüft; auch nicht ein wahrscheinlicher Einfluss auf die Fahreigenschaften einer fahrenden Last.

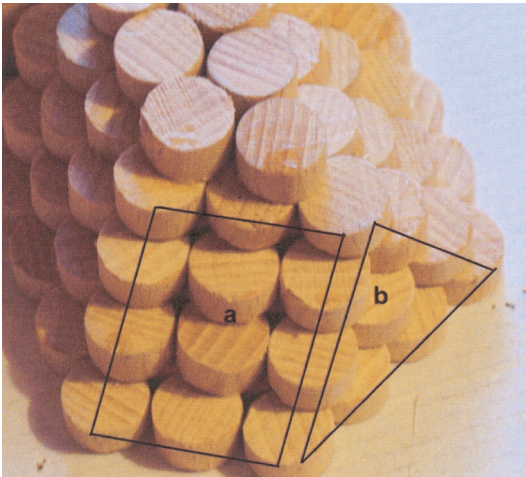


Abb. 2: Druckverteilung vor und hinter Antriebs-elementen  
Pressure distribution in front of and behind elements of propulsion

### 3.2 Zeitabhängige Drücke

Lasten (Fahrzeuge) bewegen sich über den Boden und üben, zeitlich begrenzt, einen sporadischen bis periodischen Druck auf den Untergrund aus.

Ein stehendes Fahrzeug drückt mit  $\frac{F}{A} = \frac{m_L \cdot g}{A}$  /Pa,

mit  $F$  = Kraft/N,  $m_L$  = Masse/kg,  $g$  = Beschleunigung/ $m \cdot s^{-2}$  und  $A$  = Aufstandsfläche/ $m^2$  auf den Boden.

Fährt es, wird die vom Fahrzeug erzeugte Leistung aufgeteilt zwischen dem

- Fahrzeug - in Verformungsenergie von Reifen und Federn, letztlich Wärme, und  
- in Abrieb und Verschleiß und dem

- b) Boden - in Verformungsenergie (parallel (Scherung) und horizontal (Stauchung) zur Fahrtrichtung) und Verdichtung und  
- in Reibungsenergie, letztlich Wärme.

Wobei die auf den Untergrund wirkende Leistung je Fläche

$$\frac{P}{A} = \frac{W}{A \cdot t} = \frac{F_L}{A} \cdot \frac{s_L}{t} = p \cdot v / \text{Wm}^2,$$

mit  $W$  = Energie/J,  $A$  = Fläche/m<sup>2</sup>,  $t$  = Zeit/s,  $F_L$  = Kraft/N,  $s_L$  = Weg der Last/m,  $v$  = Geschwindigkeit/m·s<sup>-1</sup> und  $P$  = Druck/Pa, beträgt.

### 3.3 Massenbewegung

Auflast bedingt eine Verformung der Bodenmasse (Abb. 3). Elastische, wenig zersetzte Torfe werden durch geringe Lasten verformt und federn nach Druckentlastung wieder in ihre ursprüngliche Lage und Form zurück. Hohe Lasten bedingen Massenbewegung und ggfls. Verdichtung.

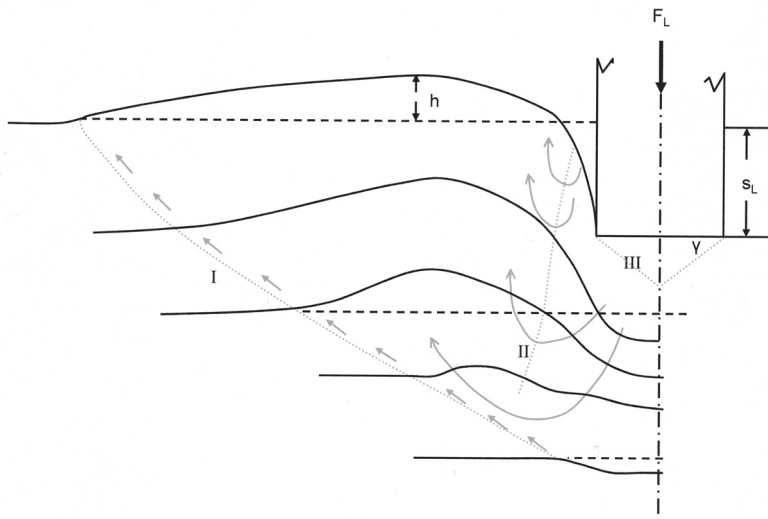


Abb. 3: Massenbewegung wassergesättigten Bodens unter Last

Mass flow of water saturated soil under load

(I, II, III = Scherebenen/shear planes; → = Richtung der Massenbewegung/direction of mass flow;  $\bar{h}$  = mittlere Hubhöhe des Bodens/mean uplift of soil;

$s_L$  = Weg der Last/segment of load;  $F_L$  = Last/ load;  $\gamma$  = Scherwinkel/ angle of shear, - - - - = Symmetrieebene/ plane of symmetry; Isohyeten der Bodenmasse vor - - und nach — Verformung/ isohyets of the soil mass before — and after — deformation)

### 3.3.1 Elastisches Verhalten

Wenig zersetzte, plattig lagernde Torfe (z.T. auch humose Horizonte von Mineralböden) verhalten sich, innerhalb der Elastizitätsgrenzen des Materials, bei Auflast von Maschinen elastisch.

Die bei Belastung mit Verformung aufgenommene potentielle Energie

$$W_F = \pi \cdot r^2 \cdot E \frac{\Delta l}{l} / J,$$

mit  $\pi \cdot r^2 =$  Querschnitt/m<sup>2</sup>,  $E =$  Elastizitätsmodul/N · m<sup>-2</sup>,  $\Delta l =$  Längenänderung/m und  $l =$  ursprüngliche Länge von Pflanzen und Pflanzenfasern/m,

wird bei Entlastung aufgewandt für die Rückfederung in die Ausgangsform.

Elastizitätsmodule für Torfe und Tone betragen 0,1 bis 0,6 MPa, für Holz 10 bis 13 GPa, für Geschiebelehm 10 bis 20 MPa und für Mergel des Keupers ≈150 MPa (Quelle: <http://environment.uwe.ac.uk/geocal/SoilMech/basic/stiffness.htm>, 26.10.2010).

### 3.3.2 Plastisches Verhalten

Nicht faseriger, stärker zersetzter, orthogonal lagernder Torf mit kohärenter (≡ Einzelkorngefüge), isodiametrischer Körnung oder wenn in wassergesättigtem Material die Verschiebung  $\Delta s$  des Wassers in Poren

$$\Delta s = k \cdot t \cdot \frac{\Delta p}{l} \cong 0/\text{m} \quad \text{beträgt,}$$

mit  $k =$  Proportionalitätskoeffizient/m · s<sup>-1</sup>,  $t =$  Zeit/s und  $\frac{\Delta p}{l} =$  von einer Last erzeugter Druckgradient/Pa · m<sup>-1</sup>,

wird Torf ohne Volumenverlust verformt (Abb. 3).

#### 3.3.2.1 Massenströmung

Drückt eine Last (einem rechteckigen Stempel analog) vertikal auf Torf mit den in 3.3.2 beschriebenen Eigenschaften, bildet sich unter dem Stempel ein Prisma aus Bodenmaterial mit einem Seitenwinkel  $\gamma \leq 45^\circ$ , welches beim Eindringen in den Untergrund mitgenommen wird (Abb. 3). Darunter liegender Torf weicht nach unten und seitlich aus und nimmt infolge Kohäsion das seitlich vom Stempel lagernde Material mit (zwischen Stempel und Scherfläche II), wobei sich sogar ein Randspalt bildet; vorausgesetzt der Stempel schmiert nicht seitlich ab. Torf zwischen den Scherflächen I und II steigt auf. Die Masse strömt senkrecht zu den Isobaren und wird durch den Widerstand des Anstehenden abgelenkt.

### 3.3.2.2 Kräfte, Energien und Leistungen bei Massenströmung

#### Scherung

In Abbildung 3 sind die Scherflächen I, II und III deutlich erkennbar, wobei man die Bodenkörper zwischen den Scherflächen als aus unendlich vielen Scherbrüchen bestehend (Staffelbrüchen gleichend) betrachten kann. Eine formale Beschreibung ist aufwendig, weil die Scherungen Wirbelströmungen ähneln (Pfeile in Abb. 3).

Beim Schlupf von Antriebsrädern ist die formale Darstellung eindeutiger (Abb. 4) und wird beschrieben als Schubspannung

$$\tau = \frac{F_s}{A} = G \cdot \frac{a}{d} = G \cdot \tan \gamma$$

mit  $F_s$  = Kraft/N die an der Fläche  $A/\text{m}^2$  angreift,  $G$  = Schubmodul/Pa,  $a$  und  $d$  = Längenmaße/m und  $\gamma$  = Schubwinkel.

$\gamma$  ist messbar und damit auch das Schubmodul.

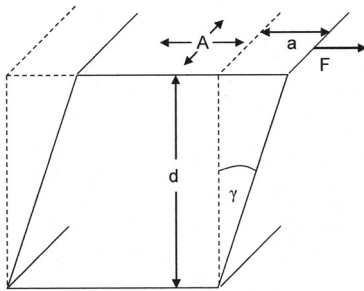


Abb. 4: Schermodell  
Model of shear

( $A$  = Fläche/ $\text{m}^2$  an der die Kraft  $F/\text{N}$  angreift,  $a$  = Scherstrecke/m,  $d$  = Schertiefe/m,  $\gamma$  = Scherwinkel/ $^\circ$ )

Wird die Scherreibungskraft  $F_s = \mu F_L$ ,

mit  $\mu$  = Haftreibungszahl und  $F_L$  = Normalkraft/N, überschritten, rutschen Antriebsräder durch.

## Reibung

Die Massenbewegung (Abb. 3) ist einfacher durch die Reibung darstellbar. Bei einer Last oder Kraft wird die Energie

$$W_L = F_L \cdot s_L / J,$$

mit  $F_L$  = Kraft oder Last/N und  $s_L$  = Weg der Last/m, auf den Boden übertragen.

Ein Teil wird in potentielle Energie (aufgewölbtes Material)

$$W_p = G \cdot \bar{h} / J,$$

mit  $G$  = Gewicht der aufgewölbten Bodenmasse/N und  $\bar{h}$  = mittlere Höhe derselben und ein weiterer Teil in Reibungsenergie

$$W_r = F_R \cdot s_b = \mu \cdot F_L \cdot s_b / J,$$

mit  $F_R$  = Scherreibungskraft/N,  $\bar{s}_b$  = mittlere Hubhöhe des verdrängten Bodens/m,  $\mu$  = Reibungskoeffizient des Bodens und  $F_L$  = Last/N, umgewandelt.

Zusammengefasst ist

$$W_L = W_p + W_r \quad \text{oder} \quad F_L \cdot s_L = 2(G \cdot \bar{h} + \mu \cdot F_L \cdot s_b),$$

wobei  $W_r$  vollständig in Wärmeenergie umgewandelt wird, die in den umgebenden Torf strömt.

Die Massenbewegung lässt sich mit dieser Energiebilanz gut darstellen, beschreibt allerdings, weil nur statisch, die Wirkung einer fahrenden Last nicht.

## Kompression

Bisher wurde inkompressibles Material beschrieben. Ist jedoch das Porenvolumen teilweise luftefüllt oder kann Wasser bei Auflast abströmen, kann Torfboden verdichtet werden (Abb. 5). Der Energieverlust beträgt durch Verdichten

$$\Delta W_p = 0,5 \cdot (m_b \cdot g \cdot h_1 - m_b \cdot g \cdot h_2) / J,$$

mit  $m_b$  = Bodenmasse/kg,  $g$  = Gravitationskonstante/m · s<sup>-2</sup>, Höhe der Bodensäule/m mit  $h_1$  vor und  $h_2$  nach dem Stauchen mit  $h_1 - h_2 = \Delta h/m$ ,



und die Energiezufuhr durch eine Last

$$W_L = m_L \cdot g \cdot 0,5 \cdot \Delta h / J.$$

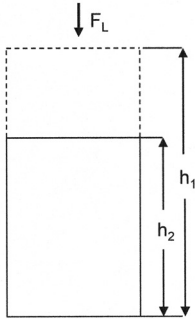


Abb. 5: Verdichtungsmodell  
 Model of compression  
 ( $F_L = \text{Last/N}$ ,  $h_1 - h_2 = \Delta h = \text{Höhenverlust/m}$ )

Bilanziert ist

$$W_L = \Delta W_p + W_r \quad \text{oder} \quad m_L \cdot g \cdot 0,5 \cdot \Delta h = m_b \cdot g \cdot 0,5 \cdot \Delta h + \mu \cdot m_L \cdot g \cdot \Delta h.$$

Die innere Reibung ist abhängig von Körnung, Mineralbestand (Menge und Art von Mineralen und organischer Substanz), Gefüge und Wassergehalt und wird in Wärmeenergie umgewandelt.

### Impuls

Alle sich auf Boden bewegendes Lasten übertragen Leistung senkrecht nach unten und waagrecht in Fahrtrichtung. Sie fahren auf unebener, unbefestigter Oberfläche und „fallen in Senken und stoßen gegen Hügel“, die unter Lockermaterial versteckt sind. Sie erzeugen auf den Boden wirkende, gerichtete Kraftstöße

$$\Delta \vec{p} = m_L \cdot a \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v} / N \cdot s,$$

mit  $m_L = \text{Masse der Last/kg}$ ,  $a = \text{Beschleunigung einer Last/m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,  $\Delta t = \text{Zeit in der eine Last } m_L \text{ wirkt/s}$  und  $\Delta \vec{v} = \text{Änderung der Geschwindigkeit/m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,

wobei  $\Delta \vec{p}$  die Vektorsumme senkrechter und waagerechter Kräfte ist, die schräg nach vorne und unten wirken. Die Leistungsübertragung beträgt

$$P_L = \frac{m_L}{2t} \cdot \sqrt{g^2 \cdot \tan^2 \gamma + a^2}$$

mit  $t$  = Zeit/s,  $m_L$  = Masse einer Last/kg,  $a$  = Beschleunigung von  $m_L/m \cdot s^{-2}$ ,  $g$  = Erdbeschleunigung/ $m \cdot s^{-2}$  und  $\gamma$  = Einfallswinkel gegen die Waagerechte.

Der Einfallswinkel ist, bezogen auf die Bodenoberfläche, flach bei hoher und steil bei niedriger Fahrgeschwindigkeit. Und unebener Boden bedingt kurzfristig sehr unterschiedliche Einfallswinkel des Summenvektors, abhängig von der Bauart der fahrenden Last und den o.a. Eigenschaften des Bodens zzgl. seiner Oberflächenrauigkeit; wobei die Geschwindigkeit von größerer Bedeutung ist als die Masse.

### Sonstiges

Die Druckfortpflanzung im Boden vor und hinter einem Rad ist asymmetrisch (Abb. 2). Torfboden wird also dort wo die Drücke steiler in den Untergrund einfallen, eher einer Last ausweichen, als dort wo sie flacher einfallen und von einer größeren Fläche gehalten wird, mit der Folge, dass diese Auflast beim Einsinken seitlich abrutscht.

Eine Verlagerung des Schwerpunktes des Bodens muss berücksichtigt werden, wenn große Risse mit abgeschertem Material aufgefüllt werden, ohne dass der Boden mechanisch verdichtet wurde.

In der Praxis müssen Energien und Leistungen auf das Bodenvolumen bezogen werden, d.h. auf zweidimensionale, räumliche Körper worauf hier, der Verständlichkeit halber, verzichtet wurde.

## 4. Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, welche Energie bzw. Leistung von bewegten Lasten auf Torfboden übertragen wird und welche Kräfte sie verursachen. Wichtig ist, dass bewegte Lasten

- trockene Böden nicht verdichten und nur wenig Verformungs-Energie oder -Leistung auf Boden übertragen;
- Böden mit wassererfülltem Porenvolumen zwar verformen, aber nicht verdichten;
- bei Scherung die Porenquerschnitte durch Streckung verringern, nicht jedoch das Porenvolumen;
- nur feuchte bis frische Böden verdichten;

- Böden mit dem Quadrat der Fahrgeschwindigkeit verdichten und die Verdichtung, bzw. Massenbewegung der Masse proportional ist;
- die auf Böden übertragene Energie bzw. Leistung überwiegend in Reibung, und damit in Wärme, und nur ein geringer Teil in Verdichtung, umwandeln und
- deren Wirkung auf Boden besser mit Energie-/Leistungsbilanzen beschrieben werden sollte, denn mit Isobaren.

Die hier beschriebenen Modelle sind wichtig zum Verständnis des Verhaltens von Böden unter bewegter Last, jedoch nicht geeignet zur Prognose von Verdichtung, weil der Anteil der Energie-/Leistungsübertragung auf Boden für Verdichtung sehr gering ist (Skalenproblem). Deshalb halte ich es für sinnvoller, direkt zu prüfen ob ein Standort die Mindestanforderungen von Pflanzen an Boden (STRASBURGER 2002) einhält:

- Die Porendurchmesser müssen für Feinwurzeln  $\approx 0,3 \text{ mm}$ , für Saugwurzeln  $11 \pm 6 \text{ }\mu\text{m}$  und für Mykorrhiza  $\approx 2 \text{ }\mu\text{m}$  betragen, zuzüglich eines Zuschlags für nicht durchwurzelten Porenquerschnitt für die Sauerstoffversorgung der Wurzeln. Es sei denn Sauerstoff kann über ein Aerenchym in der Pflanze zu Wurzeln diffundieren.
- Der Diffusionsquerschnitt und die Porenkontinuität müssen ausreichen, damit genügend Sauerstoff zu den Wurzeln und Kohlendioxid schnell genug zur Atmosphäre diffundieren können (SCHWEIKLE 2002), was auch eine hinreichende Drainage von Böden voraussetzt.

Sporadische bzw. periodische Verdichtung stark zersetzter Torfe wird (entsprechend Smektit reicher Tonböden) durch Quell-Schrumpf- und/oder Tauen-Frieren-Zyklen (FEUERSTACK 1959) und/oder aggressive Wurzeln (z. B. Bambuswurzeln, die auch Kunststofffolien bis  $<2 \text{ mm}$  Dicke, bei guter Sauerstoffversorgung, durchbohren) wieder aufgehoben. Fehlen hierfür klimatisch bedingt hohe Feuchte- oder Temperaturschwankungen (letztere über den Gefrierpunkt hinweg), werden diese im Boden gepuffert und es bleibt der Wurzeldruck bis  $1 \text{ MPa}$  (Quelle: [www.bau.htw-dresden.de](http://www.bau.htw-dresden.de); 17.X.2010), der aber nur wirkt, wenn genügend Porenvolumen mit für Feinwurzeln durchwurzelbaren Poren vorhanden ist. Porenvolumina  $V_p$  in Torfen sind zurzeit allerdings nicht bestimmbar, weil intrazelluläre und in Pflanzen und -teilen enthaltene Volumina von Gasen  $V_g$  und wässrigen Lösungen  $V_w$  methodisch nicht erfasst werden.

## 5. Danksagung

All denen die mich durch unbefangenes Fragen gezwungen haben, scheinbar selbstverständliches Wissen auf Plausibilität zu prüfen und in bodenkundlichen Lehrbüchern reichlich vorhandene, tradierte Vorurteile zu revidieren.

## 6. Literaturverzeichnis

FEUERSTACK, W. (1959): Bodenkundliche Kennzeichnung schwerer Böden zum Zwecke der Beurteilung ihrer Bewirtschaftungsunterschiede. – Unveröff. Dissertation; Stuttgart-Hohenheim.

HILLEL, D. (1980): Fundamentals of soil physics. – New York (Academic Press).

KUCHLING, H. (2007): Taschenbuch der Physik. – München (Hanser).

LORENZ, J & LORENZ, M. (2007): Baustellenhandbuch für den Tiefbau. – Merching (Forum-Verlag Herkert).

SCHWEIKLE, V. (2002): Anwendung von Grenzwerten der Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung für Böden aus Torf. – Telma **32**: 243 - 254; Hannover.

STRASBURGER, E. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. – Heidelberg (Spektrum).

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. V. Schweikle  
Wilflingerstraße 46/3  
D-72355 Schömberg  
E-Mail: volker.schweikle@googlemail.com

Manuskript eingegangen am 9. Februar 2011