

TELMA	Band 43	Seite 163 - 168	2 Tab.	Hannover, November 2013
-------	---------	-----------------	--------	-------------------------

Die Bedeutung rauer Böden aus Torf für deren Verdichtung

The importance of roughness of peat soil for his compaction

VOLKER SCHWEIKLE

Zusammenfassung

Auf rauer Torfbodenoberfläche übertragen fahrende Lasten Leistung nicht stetig auf Böden, was zu hoher Variabilität von Verdichtung im Oberboden führt. Die Standortansprüche von Pflanzen an das Bodengefüge sind abhängig von der Pflanzenart, wobei die für Pflanzen wichtigen Gefügemerkmale zusätzlich auch vom Klima abhängig sind. Allgemeine, für das Pflanzenwachstum sinnvolle, Zielgrößen für Verdichtung aus der Übertragung von Leistung als Einflussgröße können also nicht allgemein definiert werden.

Abstract

Moving loads crossing rough ground surfaces of peat soil do not transfer power continuously to the ground, resulting in large variations in topsoil compaction. The local site requirements of plants on the soil structure vary according to plant species, whereby the key structural characteristics required by the plants are also climate-dependent. Overall, however, it is not possible to precisely define objective compaction criteria arising from the transfer of power as an influential variable beneficial to plant growth.

1. Einleitung und Methode

Die Leistungsabgabe fahrender Lasten an Böden beträgt

$$P_L = \frac{W_L}{t} = \frac{F_L s_L}{t} \quad (1a) \quad \text{mit} \quad F_L = m_L \sqrt{g^2 + 0,25 a^2} \quad (1b)$$

und mit W_L = Energie der Last/J, t = Zeit/s, s_L = Spurtiefe/m, m_L = Masse der Last/kg, g = Gravitationsbeschleunigung/m · s⁻², a = Vortriebs-Beschleunigung der Last/m · s⁻². Die Leistungsaufnahme des Bodens beträgt

$$P_{bo} = \frac{W_{bo}}{t} = \frac{F_{bo} \cdot \Delta s_{bo}}{t} = \frac{m_{bo} \cdot g \cdot \Delta s_{bo}}{t} = \frac{A_{bo} \cdot s' \cdot \rho_{bo} \cdot g \cdot \Delta s_{bo}}{t} = P_L \quad (2)$$

mit A_{bo} = Fläche/m², s' = Tiefe der Fläche A_{bo} /m (entspricht der in der Zeit t von der Last zurückgelegten Strecke), Δs_{bo} = Strecke der vertikalen Verschiebung des Schwerpunktes der zu $A_{bo} \cdot s'$ gehörenden Masse/m und ρ_{bo} = Dichte/kg · m⁻³ des feuchten Bodens der Leistung aufnimmt. bo steht für die Teilleistungen s = Scherung, p = Hebung, r = Reibung und k = Kompression (SCHWEIKLE 2012).

Dieses Modell gilt nur

- für eine völlig ebene Torfbodenoberfläche,
- unter der Oberfläche mit gleichförmiger Raumbgewichtsverteilung des feuchten Bodens in der Horizontalen und Vertikalen und
- mit konstanter Masse m_L und Beschleunigung a_L der Last,

was aber erfahrungsgemäß z.B. für meliorierte Torfböden (planiert, dräniert, sandbedeckt, tiefgepflügt) nicht zutrifft.

Deshalb wurde untersucht, wie rauer Boden (Oberfläche und Suboberfläche) Energie/Leistung fahrender Lasten aufnimmt (KUCHLING 2007, WALKER 2000).

2. Ergebnisse und Diskussion

Zulässige Drücke

Zulässige Drücke auf Böden, die die Haftreibung im Boden (SCHULZE & LANGE 1976) nicht überschreiten, sind in Tabelle 1 dargestellt. Sie wurden aus Daten für tiefere Bodenschichten extrapoliert und sind wahrscheinlich eher zu hoch, beziehen sich nur auf dauerhaft stehende Lasten wie Hoch- und Tiefbauten und nicht auf fahrende die nur Sekunden auf Böden wirken, allerdings mehrfach pro Nutzungsintervall und auch dies häufig. Die Eigenlast von Mineralböden in 0,3 m Tiefe beträgt 0,03 bis 0,35 MPa und in 0,5 m 0,55 bis 0,75 MPa (für Torfböden können zurzeit keine Eigenlasten berechnet werden, weil Dichten nur für trockene Torfe verfügbar sind). Die Last einer Fichte/Tanne (Alter 120 a, Fläche des Wurzeltellers ca. 16 m², Masse 5 Mg) beträgt ca. 0,003 MPa und steigt bei Sturm (Stampfen des Wurzeltellers und Abstützen auf 1/3 des Wurzeltellers) auf 0,01 MPa. Die Last von Vegetation ist gering im Vergleich zur Eigenlast von Böden und diese wiederum niedriger als anthropogene Lasten.

Tab. 1: Zulässige Bodendrücke bei setzungsunempfindlichen Hoch- und Tiefbauten in MPa
 Acceptable stress in MPa on soil for building constructions and civil engineering works, insensitive for settling

Material	Druck/MPa	Material	Druck/MPa
Schluff, halbfest	0,06	toniger Schluff, steif	0,08
gemischtkörnig	0,1	„ „ , halbfest	0,1
Mergel/Lehm, halbfest	0,15	„ „ , fest	0,2
„ „ , fest	0,22		
Ton, steif	0,06	steif = schwer knetbar, ausrollbar zu 3 mm-Walze	
„ , halbfest	0,08	halbfest = bröckelt beim Ausrollen zu 3 mm-Walze	
„ , fest	0,15	fest = trocken, zerbricht zu Scherben	
Torfe	keine Daten verfügbar		

Übertrag von Leistung stehender Lasten

Nach (1b) übertragen fahrende Lasten ($a > 0$) in der Zeiteinheit größere Leistungen auf Böden als stehende Lasten ($a = 0$). Auch für letztere gilt, dass $s_L = f(t)$, also zeitabhängig, ist, was beim Messen des Eindringwiderstandes (z.B. mit einem Penetrometer) zu berücksichtigen wäre. Zu beachten ist auch, dass sich stehende Lasten, infolge orthogonal lagerner Gefügeelemente, auf verzerrte Kreis- oder Ellipsoidkegel stützen (SCHWEIKLE 2011), die vermutlich ortsfest bleiben (d.h. beim Fahren wechseln die Bodenvolumina, auf welche sich eine Last nach vorn und hinten stützt, nicht die Seiten).

Übertrag von Leistung fahrender Lasten

Die Kraft F_L wirkt bei fahrenden Lasten in Fahrtrichtung schräg nach unten und der Winkel zwischen Bodenoberfläche und Richtung der Kraft/Leistungsübertragung ist abhängig von Fahrgeschwindigkeit und Gefüge. Die Leistungsübertragung wandert entsprechend der Richtung von F_L in einem Bodenvolumen von $\alpha \pm \text{ca. } 30^\circ$ (je 30° nach oben und unten) der Last voraus; d.h. dargestellte senkrechte Druckzwiebeln fahrender Lasten sind eine Projektion realer aber schief im Boden liegender Druckzwiebeln. Das bedeutet aber auch, dass die Verformung des Unterbodens der des Oberbodens vorausseilt.

Nach SÖHNE (i.c. EICHHORN 1999) sind Druckzwiebeln feuchter Böden gegenüber trockenen in der Vertikalen gestreckt. Dies kann erklärt werden durch unterschiedliche Übertragung von Leistung für Verdichtung und Hebung bei geringer Reibung: Im feuchten (trockenen) Boden ist der Reibungsbeiwert μ gering (hoch), es wird mehr (weniger) Leistung der Last auf Verdichtung und weniger (mehr) auf Hebung und Reibung übertragen.

Einheiten

Übertrag von Energie via Aufstandsfläche	$/J \cdot m^{-2}$ oder $kg \cdot s^{-2}$
„ „ Leistung „ „	$/W \cdot m^{-2}$ oder $kg \cdot s^{-3}$
Aufnahme von Energie vom Bodenvolumen	$/J \cdot m^{-3}$ oder $kg \cdot s^{-2} \cdot m^{-1}$ oder Pa
„ „ Leistung „ „	$/W \cdot m^{-3}$ oder $kg \cdot s^{-3} \cdot m^{-1}$ oder Pa $\cdot s^{-1}$

(Die Energiedichte wird in der Bodenmechanik als Spannung bezeichnet der die Einheit Pa zugeordnet ist.)

Scherwinkel

Der Abstrahlwinkel der Kraft nach unten gegen die Vertikale beträgt bei nicht verdichtbarem Material in orthogonaler Lagerung und polyedrischem Gefüge 30° (plattig $> 30^\circ$, säulig/prismatisch $< 30^\circ$) und bei vollständig verdichtbarem Material 0° . Der Scherwinkel zwischen verformbarem und nicht verformbarem Boden direkt unter der Last im Unterboden gegen die Horizontale beträgt bei $P_k = 0$ ca. 30° und bei $P_p = 0$ ca. 90° ; je nach dem Verhältnis zwischen P_k und P_p liegt der Scherwinkel also zwischen 30° und 90° .

Rauer Boden

Wird in Gleichung (1b) a durch $\frac{v}{t}$ ersetzt, d.h. $v = f(t)$, wird $P_L = \frac{m_L \cdot s_L}{t} \cdot 2\sqrt{g^2 + 0,25 \frac{v^2}{t^2}}$.

Jede Änderung der Geschwindigkeit verändert die Übertragung von Leistung fahrender Lasten auf Böden, was sich in der Spurtiefe s_L widerspiegelt. Ursachen von Geschwindigkeitsänderungen sind Bodeneigenschaften wie Hindernisse (Horste von Pflanzen, Bodenschollen, Bodenwellen \pm mit Lockermaterial vom Eggen verfüllt u.ä.) und unterschiedliche Verformbarkeit, bedingt durch Elastizität, Plastizität, Kompression oder Bruch (WALKER 2000). Prallt eine fahrende Last auf ein Hindernis und springt hoch, dann wird ein Teil der Leistung P_L übertragen auf

- den Ort des Anpralls mit $P'_L = \frac{F_L \cdot s'_L}{t} = P'_{bo} = \frac{m_{bo} \cdot \Delta s'_{bo} \cdot g}{t}$,
- den Ort des Aufpralls mit $P''_L = \frac{F_L \cdot s''_L}{t} = P''_{bo} = \frac{m_{bo} \cdot \Delta s''_{bo} \cdot g}{t}$ und
- die Last P'''_L (Verformung von Reifen, Federn etc., letztlich in Wärme!; siehe hierzu UPPENKAMP (2007) und EICHHORN (1999)),

wobei $P'_L + P''_L + P'''_L$ die Teilleistungen von P_L vor dem Anprall sind und für P''''_{bo} jeweils die verzerrten Kreis-/Ellipsoidkegel im Boden zu berücksichtigen wären.

Wurfweite, -höhe und -winkel hängen ab von der Geschwindigkeit des Anpralls, dem Anprallwinkel und von Eigenschaften von Boden und Last. Berührt eine Last beim Wurf noch den Boden, dann muss für diese Strecke eine vierte Teilleistung berücksichtigt werden; wenn nicht, wird auf dieser Strecke keine Leistung übertragen.

Beim Aufprall erzeugt eine Last eine Delle, die bei einem zweiten Überfahren als An-/Abprallort eine dritte Delle erzeugt usw. So entsteht schließlich eine Reihe hintereinander liegender Schlaglöcher, die die Last zum Schwingen bringen; was z. B. zu „Riffelpisten“ auf Erdwegen im semiariden Klima führt.

Verdichtung ist im Oberboden uneinheitlich und im Unterboden einheitlich, weil die Leistung quasi kegelförmig überlappend in den Unterboden abgegeben wird.

Prognosen zur Verdichtung

Sie erfordert zwischen fahrender Last als Einflussgröße und zulässiger, d.h. für Pflanzenwachstum unschädlicher Veränderung der Porung als Zielgröße (hinreichend großer Querschnitt für die Sauerstoffdiffusion zu Wurzeln und Entsorgung von CO₂; genügend Poren in die Feinwurzeln eindringen können und von denen aus Saugwurzeln Bodenwasser nutzen) Daten, die auf landbaulich genutzten Flächen sehr stark variieren, bzw. messtechnisch nicht exakt (Bodenrauigkeit, Tiefe von Fahrspuren) zu erfassen sind. Hinzu kommt, dass Pflanzenarten sehr unterschiedliche Wurzelsysteme und Strategien der Nutzung des Bodenwassers besitzen, was eine erhebliche Variabilität des Bodenwassergehaltes im Bodenprofil, bei gleichem Gefüge, bedingt (WALTER 1960) und dass der Bodenwasserhaushalt, ebenfalls bei gleichem Gefüge, vom Klima abhängig ist. Insofern sind Zielgrößen nicht generell, sondern nur unter erheblichen Einschränkungen definierbar. Eine Bewertung von Verdichtung die sich am „Kunden“ sprich an den Standortsansprüchen der auf einem Boden und dem zugehörigen Klima/Witterung wachsenden Pflanzen orientiert ist also nicht ohne weiteres möglich.

Verlangt man eine mindestens ausreichende Prognose einer Einfluss- auf eine Zielgröße, sollte das Bestimmtheitsmaß $B = r^2$ (r = Korrelationskoeffizient) mindestens 0,86 bzw. 0,14 (Note 4 = ausreichend) (SHANNON & WEAVER 1949) betragen. Dies wird in Tabelle 2 dargestellt.

Tab. 2: Informationsgehalt und Bewertung von Bestimmtheitsmaß B und Korrelationskoeffizient r
Content of information and mark of the coefficient of determination B and coefficient of correlation r

B = r ² (±r)	1 ¹⁾ (1)	0,97 (0,98)	0,93 (0,96)	0,86 (0,93)	0,75 (0,87)	0,5 (0,7)
	0 ¹⁾ (0)	0,03 (0,17)	0,07 (0,26)	0,14 (0,37)	0,25 (0,5)	0,5 (0,7)
Informationsgehalt	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0
Note ²⁾	1	2	3	4	5	6

¹⁾ Kann eine Frage eindeutig mit ja oder nein beantwortet werden, dann ist der Informationsgehalt gleich hoch. Alle Ziffern, außer den Noten, besitzen keine Einheit. ²⁾ Notengebung nach üblichen ja-nein-Tests (1 = sehr gut; 6 = ungenügend)

3. Literaturverzeichnis

EICHHORN, H. (1999): Landtechnik; Stuttgart (Ulmer).

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

SCHULZE, W.E. & LANGE, J. (1976): Kleine Baustatik; Stuttgart (Teubner).

SCHWEIKLE, V. (2011): Theorie der Belastbarkeit von Böden aus Torf. – Telma **41**: 125-136; Hannover.

SCHWEIKLE, V. (2012): Übertrag von Energie und Leistung fahrender Lasten auf Torfböden. – Telma **42**: 71-76; Hannover.

SHANNON, C.E. & WEAVER, W. (1949): The mathematical theory of communication; Champaign, IL (Univ. of Illinois Press).

UPPENKAMP, N. (2007): Reifenwahl – was bringen moderne Reifenkonzepte; Münster (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen).

WALKER, J. (2000): Der fliegende Zirkus der Physik. Punkt 2.59; München (Oldenbourg).

WALTER, H. (1960): Einführung in die Phytologie, Band III: Grundlagen der Pflanzenverbreitung, I. Teil: Standortslehre; Stuttgart (Ulmer).

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. V. Schweikle
Mayerstraße 11
D-69207 Sandhausen
E-Mail: volker.schweikle@gmail.com