

TELMA	Band 42	Seite 71 - 76	2 Abb.	Hannover, November 2012
-------	---------	---------------	--------	-------------------------

# Übertrag von Energie und Leistung fahrender Lasten auf Torfböden

Transfer of work and power of moving load on peat soil

VOLKER SCHWEIKLE

## Zusammenfassung

Es wird gezeigt wie Energie und Leistung stehender und fahrender Lasten auf Böden aus Torf übertragen und berechnet werden.

## Abstract

It is shown, how energy and power of standing and moving load on peat soil are transferred and calculated.

## 1. Einleitung

In einer Arbeit von SCHWEIKLE (2011) wurde die Berechnung der durch Drücke auf Torfböden übertragenen Energie und Leistung nur angedeutet, weshalb in Anlehnung an KUCHLING (1996) detailliertere Verfahren vorgestellt werden.

## 2. Ergebnis und Diskussion

Erst wird die auf Böden übertragene Energie stehender, anschließend fahrender Lasten abgehandelt.

### 2.1 Stehende Lasten

In Abbildung 1 sieht man wie Boden unter Last verformt wird und welche Boden-Kompartimente Energie/Leistung aufnehmen. (Beachte, dass jeweils nur eine Symmetriefläche dargestellt ist!).

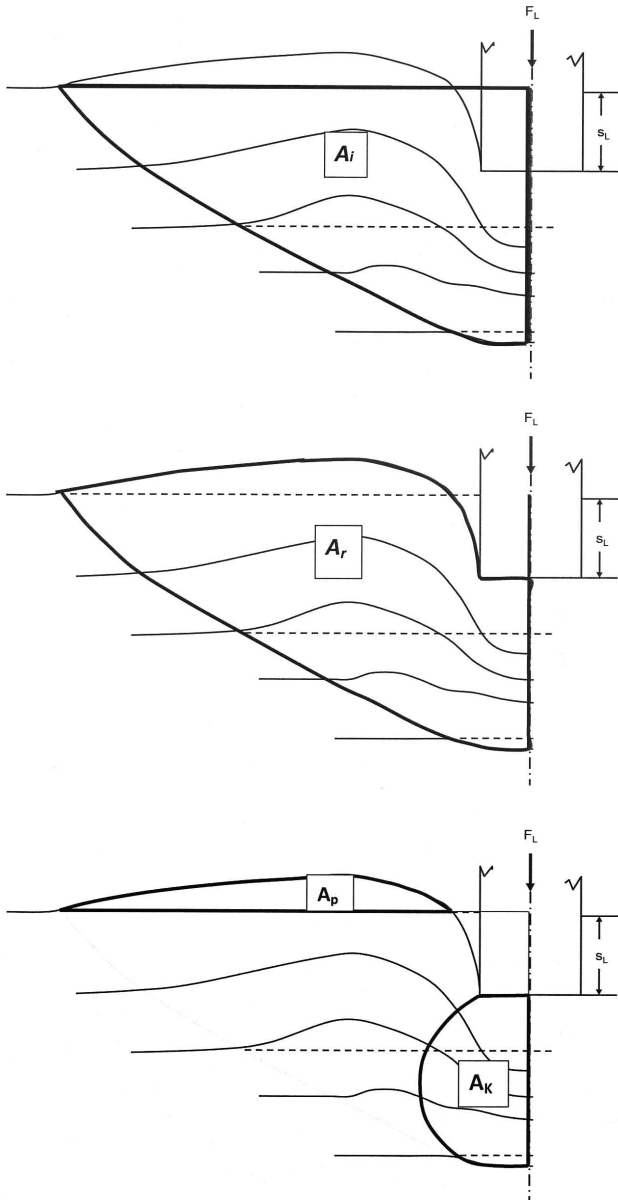


Abb. 1: Darstellung der Flächenelemente  $A$  in den Gleichungen, mit  $i$  = Anfangs-,  $p$  = Potential-,  $k$  = Kompressions- und  $r$  = Reibungs-Fläche. Nur eine Symmetriefläche ist dargestellt!

Description of areas  $A$  in the equations, with  $i$  = initial,  $p$  = potential,  $k$  = compression and  $r$  = friction area. Just one area of symmetry is presented!

Die von der Last auf den Boden übertragene Energie beträgt

$$W_L = m_L \cdot g \cdot s_L / \text{J},$$

mit  $m_L$  = Masse der Last/kg,  $g$  = Gravitationskonstante/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$  und  $s_L$  = Tiefe der Fahrspur/m.

Die vom Boden aufgenommene Energie wird durch die Flächen  $A_p$ ,  $A_r$  und  $A_k$  dargestellt, wobei die zugehörigen Bodenmassen

$$m_p = A_p \cdot s' \cdot \rho_p / \text{kg},$$

$$m_r = A_r \cdot s' \cdot \rho_r / \text{kg} \quad \text{und}$$

$$m_k = A_k \cdot s' \cdot \rho_k / \text{kg} \quad \text{betragen,}$$

mit  $s'$  = Einheitstiefe zur Fläche  $A/\text{m}$  (d.h. sie ist frei wählbar),  $\rho$  = Feuchtraumgewicht/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $_p$  = Potential-,  $_r$  = Reibungs-,  $_k$  = Lockerungs- und Kompressions-Indices.

Die zugehörigen Energien betragen

$$\text{für die potentielle Energie zu } A_p: \quad W_p = m_p \cdot g \cdot \Delta s_p / \text{J},$$

$$\text{für die Reibungsenergie zu } A_r: \quad W_r = \mu \cdot m_r \cdot g \cdot \Delta s_r / \text{J} \quad \text{und}$$

$$\text{für die Kompressionsenergie zu } A_k: \quad W_k = m_k \cdot g \cdot \Delta s_k / \text{J},$$

mit  $\Delta s_p$  = Schwerpunkt von  $A_p$  über dem Ausgangsniveau/m,  $\Delta s_r$  = Strecke zwischen den Schwerpunkten der Flächen  $A_i$  (ungestörter Boden) und  $A_r$ ,  $\Delta s_k$  = Strecke der Schwerpunktverschiebung im Bereich des komprimierten Bodenkompartiments und  $\mu$  = Reibungszahl.

Die Energie der Last  $W_L$  wird im Boden auf die o.a. Teilenergien  $W_L = W_p + W_r + W_k$  übertragen.

Ist  $W_k = 0$  wird  $\rho_p = \rho_r$  und  $m_p$  und  $m_r$  sind proportional den zugehörigen Flächen. Auch die Schwerpunkte bzw. die Schwerpunktveränderungen lassen sich aus den Flächen ermitteln. Damit kann  $\mu$  aus der Energiebilanz bestimmt werden zu

$$\mu = \frac{W_L - W_p}{m_r \cdot \Delta s_r \cdot g}.$$

$\mu$  ist eine Materialkonstante und auch an Materialproben bestimmbar.

Da  $W_r$  vollständig in Wärmeenergie  $Q$  umgesetzt wird, gilt  
 $W_r = \mu \cdot m_r \cdot g \cdot s_r = Q = c \cdot m_r \cdot \Delta T$  oder  $\Delta T = \frac{\mu}{c} g \cdot \Delta s_r$ ,

mit  $c$  = spezifische Wärmekapazität/ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$  und  $\Delta T$  = Temperaturänderung/ $K$ .

Damit lassen sich  $W_r$ ,  $\mu$  und  $\Delta s_r$  auch über eine Temperaturänderung in der Probe prüfen. Erhöht man die Kraft  $F_L$  allmählich und misst sie kontinuierlich sind Haftreibungs- und Gleitreibungszahl ermittelbar.

Die Verdichtungsenergie ergibt sich zu

$$W_k = W_L - W_r - W_p = \rho_i \cdot \Delta A \cdot s' \cdot g \cdot \Delta s_k = \frac{m_i}{A_i} \cdot \Delta A \cdot g \cdot \Delta s_k / J$$

mit  $\rho_i$  = Feuchtraumgewicht/ $kg \cdot m^{-3}$ ,  $\Delta A = A_i - A_r$  und  $i$  = Ausgangszustand.

Ist  $\rho_p \neq \rho_r$ , d.h.  $A_i < A_r$ , bzw.  $A_i > A_r$ , wird Boden gelockert, bzw. verdichtet und ist  $A_i = A_r$  wird  $W_k = 0$ .

Hinweis:  $m_r$  umfasst immer die gesamte von der Last  $m_L \cdot g$  beeinflusste Bodenmasse  $m_i$ , d.h. Bezugsfläche für die Reibungsenergie ist  $A_i$  oder, wenn  $A_r > A_i$  ist  $A_r$ .

## 2.2 Fahrende Lasten

Sie übertragen mit der Kraft  $F_L/J$  in der Zeit  $t/s$ , abhängig von der Fahrgeschwindigkeit, auf der Strecke  $s'/m$  Energie auf Torfboden, d.h. eine Leistung

$$P_L = \frac{W_L}{t} = \frac{F_L \cdot \Delta s_L}{t} / W.$$

Die Kraft  $F_L$  ist zusammengesetzt aus einer Gewichtskraft  $F_G = m_L \cdot g$  und einer Beschleunigungskraft  $F_B = m_L \cdot a$ ,

mit  $a$  = Beschleunigung der fahrenden Last/ $m \cdot s^{-2}$  (Abb. 2).

In der Vektorsumme und bei einer Anfangsgeschwindigkeit von Null wird in der Horizontalen

$$F_L = m_L \sqrt{g^2 + 0,25a^2} / N$$

und damit  $W_L = F_L \cdot s'$ , wobei  $s' = \frac{v_L}{t}$  mit  $v_L$  = Fahrgeschwindigkeit der Last/ $m \cdot s^{-1}$ .

Am Hang in Falllinie wird  $F_L = m_L \sqrt{(g - g \cdot \cos \alpha)^2 + 0,25 (a + g \cdot \sin \alpha)^2}$ ,

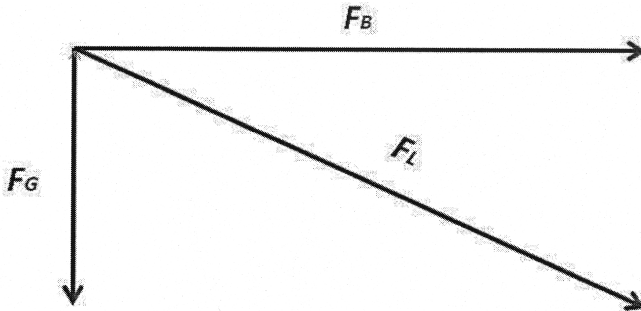


Abb. 2: Komponenten der Kräfte einer fahrenden Last mit  $F_B$  = Beschleunigungskraft,  $F_G$  = Gewichtskraft und  $F_L$  = Vektorsumme von  $F_B$  und  $F_G$   
 Components of forces of a moving load with  $F_B$  = force of acceleration,  $F_L$  = force of load and  $F_L$  = sum of the vectors of  $F_B$  and  $F_G$

mit  $\alpha$  = Gefälle des Hanges<sup>0</sup>. Hangauf wird aus „-  $g \cdot \cos \alpha$ “, +  $g \cdot \cos \alpha$ “ und aus „ $g \cdot \sin \alpha$ “, -  $g \cdot \sin \alpha$ “.

Zu berücksichtigen wäre noch der Schlupf der Antriebsräder, der Scherung im Torfboden gegen die Fahrtrichtung erzeugt, der mit

$$P_s = \frac{W_s}{t} = \frac{1}{2t} \cdot a \cdot b \cdot s' \cdot \rho_s \cdot g,$$

mit  $s$  = Index für Scherung,  $t$  = Zeit/s,  $g$  = Gravitationskonstante/ $m \cdot s^{-2}$ ,  $\rho_s$  = Dichte der verschobenen, feuchten Bodenmasse/ $kg \cdot m^{-3}$  beschrieben wird. Für den verschobenen Boden ist  $a$  = Verschiebestrecke/m,  $b$  = dessen Breite/m und  $s'$  = dessen Verschiebelänge in der Zeit t/m,

in der Leistungsbilanz zu berücksichtigen.

Im Gegensatz zur stehenden Last bei der  $s'$  innerhalb der Aufstandslänge, z. B. eines Rades, frei wählbar ist, wird  $s'$  bei frei wählbarer Zeit  $t$  durch die Fahrgeschwindigkeit vorgegeben. Damit können die in 2.1 vorgestellten Energiebilanzen verwendet werden. Die Leistungen  $P_{L,r,p,k}$  sind auch als spezifische Leistung  $\frac{P}{s'}$  darstellbar.

### 3. Diskussion

Da die Fahrbahn auf land- und forstbaulichen Flächen uneben ist „ruckelt“ eine fahrende Last und überträgt Kraftstöße, letztlich Energie auf den Boden, deren Betrag abhängig ist von  $m_L$ ,  $v_L^2$  und der Stoßzahl  $k$  die wiederum vom Material (Bodeneigenschaften und Bodenwassergehalt) und  $v_L$  abhängt. Auch diese Impuls/Kraftstoß bedingte Energie wird im Boden in Reibungs- und potentielle Energie, analog zu der fahrender Lasten, umgewandelt. Inwiefern Vibrationen, d.h. regelmäßige Impulse/Kraftstöße, des Motors von Lasten auf Boden übertragen werden ist nicht untersucht.

$W_k$  kann, wenn als pauschale Größe erfasst, nicht innerhalb eines verformten Bodensegments ohne Kenntnis der Bodendrucke lokalisiert werden.  $s_k$  ergäbe sich lokalisiert nur aus Druck-Setzungs-Beziehungen bei zu messender Druckverteilung (Druckzwibel) im Boden und bekanntem materialabhängigem (Bodeneigenschaften und Wassergehalt) Kompressionsmodul  $K$ .  $W_k$  kann auch nicht, oder nicht vollständig, erfasst werden, wenn in einem verformten Bodensegment gleichzeitig gelockerte und verdichtete Zonen auftreten, wenn sich also die Dichteverteilung im Boden ändert.

### 4. Literaturverzeichnis

KUCHLING, H. (1996): Taschenbuch der Physik; Leipzig (Fachbuchverlag).

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

Anschrift des Verfassers:

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

Manuskript eingegangen am 15. Januar 2012