

TELMA	Band 46	Seite 141 - 154	5 Abb., 1 Tab.	Hannover, November 2016
-------	---------	-----------------	----------------	-------------------------

# Übertragung der Energie fahrender Lasten auf Hangmoorböden

Transfer of work of driving loads on a sloping peat soil

VOLKER SCHWEIKLE

## Zusammenfassung

Am Hang wirkt neben Gewichtskraft und Vortriebskraft noch zusätzlich die Hangabtriebskraft. Dies bedingt im Gefälle hangab höhere Schiebung in Fahrtrichtung durch Bremsverzögerung und einer Bugwelle vor einem Rad; im Gefälle hangauf erhöhte Schiebung und Schlupf gegen die Fahrtrichtung und quer zum Gefälle asymmetrische Verformung des Bodens. Sowohl Reibung zwischen Last und Boden, als auch Verformung des Bodens nehmen die Energie einer fahrenden Last auf und bewahren sie vor dem Abrutschen. Kurven fahren am Hang bedingt neben Reibung in und gegen, auch Reibung und Bodenverformung seitlich zur Fahrtrichtung. Die Bedeutung der Art und Nutzung von Maschinen auf Böden aus Torf und auf die Vegetation im Moor wird diskutiert.

## Abstract

On slopes the forces of gravity and acceleration/braking are joined by a force acting down the slope. When moving downhill there is increased shear in the direction of travel under braking and causing a bow wave in front of a wheel; moving up hill there is increased shear against the direction of travel and travelling diagonally to a slope there is asymmetric deformation of the soil. Both friction between load and soil, as well as deformation of the soil, absorb the energy of a moving load and prevent slipping. Driving curves on a slope results in not only friction and deformation in and against, but also lateral to the direction of travel. The importance of traffic, due to the machinery and the style of driving, upon peat soils and the vegetation of mires is discussed.

## 1. Einleitung und Methodik

In der Literatur wird nur die Druckfortpflanzung (Druckzwiebel) stehender (zitiert bei HILLEL 1980) und die Energieübertragung fahrender (SCHWEIKLE 2012) Lasten (Traktoren, Pflegemaschinen usw.) für ebene Böden beschrieben, nicht jedoch beim Fahren die Bedeutung der Reibung zwischen Antriebselementen und Boden und des Einflusses von

Kurven und an Hängen auf die Bodenverformung. Die Wirkung von Reibungskräften und von Zentripetal- und Hangabtriebskraft auf die Übertragung der Energie einer fahrenden Last auf die Verformung von Böden und die Energieaufnahme durch Böden wird mit Hilfe eines Sandmodells vorgestellt. Die formale Bearbeitung folgt KUCHLING (2011).

Roll- und Luftwiderstand, bzw. Kräfte oder Energieaufwand zu ihrer Überwindung, werden im Folgenden nicht behandelt.

## 2. Ergebnisse

### 2.1 Kräfte

Die an einer fahrenden Last angreifenden Kräfte sind in Abbildung 1 als Vektoren dargestellt und werden in 2.1.1 bis 2.1.3 beschrieben.

Die Kräfte sind definiert mit  $\vec{F}_B = m_L \cdot a$ ,  $\vec{F}_H = \vec{F}_G \cdot \sin\alpha = m_L \cdot g \cdot \sin\alpha$ ,  $\vec{F}_N = m_L \cdot g \cdot \cos\alpha$ ,  $\vec{F}_R = \mu \cdot \vec{F}_N$ ,  $\vec{F}_G = m_L \cdot g$ , wobei  $m_L =$  Masse der Last/kg,  $a =$  Vortriebsbeschleunigung/ $m \cdot s^{-2}$ ,  $-a =$  Bremsverzögerung/ $m \cdot s^{-2}$ ,  $g =$  Erdbeschleunigung/ $m \cdot s^{-2}$ ,  $\alpha =$  Winkel der Hangneigung/ $^\circ$  und  $\gamma =$  Winkel zwischen  $F_B$  und  $F_H$ / $^\circ$ . Die Reibungskraft von  $F_B$  ist  $F_{RB}$  und von  $F_H$   $F_{RH}$ . In der Ebene ist  $\vec{F}_H = 0$  und  $\vec{F}_G = \vec{F}_N$ , da  $\alpha = 0^\circ$  und damit  $\cos\alpha = 1$ .

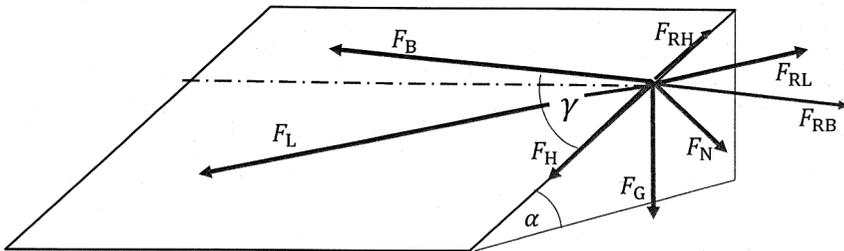


Abb. 1: An einer fahrenden Last am Hang wirkende Kräfte:  $\vec{F}_G =$  Gewichtskraft/N,  $\vec{F}_H =$  Hangabtriebskraft/N,  $\vec{F}_N =$  Normalkraft/N,  $\vec{F}_B =$  Kraft der Beschleunigung ( $+a$ ) bzw. Bremsverzögerung ( $-a$ )/N,  $\vec{F}_{RB,RH} =$  Reibkräfte/N,  $\alpha =$  Hangneigung oder Gefälle/ $^\circ$ ,  $\gamma =$  Winkel zwischen  $F_B$  und  $F_H$ / $^\circ$ ,  $\circ =$  Schwerpunkt einer Last,  $\vec{F}_L =$  Summenvektor und  $\vec{F}_{H,N,G,B,RB,RH} =$  Teilsammenvektoren einer fahrenden Last.

Forces acting on a driving load on a slope:  $\vec{F}_G =$  force of the weight/N,  $\vec{F}_H =$  force acting down the slope/N,  $\vec{F}_N = \vec{F}_G \cdot \cos\alpha$ /N,  $\vec{F}_B =$  force of acceleration or slowing down by braking/N,  $\vec{F}_R =$  force of friction/N,  $\alpha =$  slope/ $^\circ$ ,  $\gamma =$  angle between  $\vec{F}_B$  and  $\vec{F}_H$ / $^\circ$ ,  $\circ =$  point of gravity of a load,  $\vec{F}_L =$  sum of all vectors of forces acting on a load as  $\sum \vec{F}_{H,N,G,B,RB,RH}$

Die Summenvektoren werden aus den Teilvektoren (Diagonalen von Parallelogrammen oder Rechtecken) errechnet.

### 2.1.1 Kraftschluss und Schlupf (Reibung)

Fahrende Lasten sind mit dem Boden kraftschlüssig miteinander verbunden (SCHULZ et al. 1982, KUSCHEFSKI 2010).

Gummireifen von Rädern einer Last „kleben“ infolge der Haftreibung am Boden. Um sie zu bewegen, muss Energie aufgewandt werden, wobei die Räder gleichzeitig rutschen (Schlupf). Bei einem angetriebenen/gebremsten Rad ist die Radumfangsgeschwindigkeit immer höher/niedriger als die Fahrgeschwindigkeit. Ohne Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn wäre weder Beschleunigung noch Bremsen oder Kurvenfahren möglich. Neben Schiebungs- wird auch Wärmeenergie auf den Boden übertragen. Die Reibkraft beträgt in der Ebene

$$F_{\text{RB}} = \mu \cdot F_{\text{G}} = \mu \cdot m_{\text{L}} \cdot g / \text{N}$$

und am Hang in Falllinie

$$F_{\text{RB}} = \mu \cdot F_{\text{N}} = \mu \cdot F_{\text{G}} \cdot \cos\alpha = \mu \cdot m_{\text{L}} \cdot g \cdot \cos\alpha$$

mit  $\mu$  = Kraftschlussbeiwert der bei 5 bis 10 % Schlupf (dem optimalen Schlupf mit  $\mu_{\text{max}}$ ) am größten ist und dann dem Haftreibungsbeiwert entspricht. Bei zunehmendem Schlupf durch hohe Bremsverzögerung oder Vortriebsbeschleunigung sinkt der Kraftschlussbeiwert.

Tab. 1: Kraftschlussbeiwerte  $\mu_{\text{max}}$  (ZEUSCHNER 2012)  
Coefficients of friction  $\mu_{\text{max}}$

	<b>bei 10 % Schlupf</b>	<b>(SCHULZ et al.1982)</b>
	trocken	nass
Beton	0,6 bis 0,9	0,4 bis 0,7
Asphalt	0,6 bis 0,8	0,3 bis 0,7
Erdweg	0,4 bis 0,5	um 0,3
	<b>bei 20 % Schlupf</b>	<b>(KIRNICH 1978)</b>
Betonstraße		bis 1,0
guter Feldweg		0,7
trockener, festgefahrener, lehmiger Ton		0,6 bis 0,7
trockener, normaler Ackerboden		0,4 bis 0,5
Grasnarbe, Stoppel geschält		0,35 bis 0,45
sehr feuchter, sandiger Lehm, geschält		0,25 bis 0,35
feuchter, anmooriger Sand		0,23 bis 0,32
nasser, toniger Lehm		0,15 bis 0,25
feuchtes, lockeres Hochmoor		0,15 bis 0,25

wert auf die Gleitreibungszahl  $\mu_G$  und erreicht 100 % Schlupf. Sicheres Fahren ist nur möglich wenn  $\mu_G < \mu$  und der Schlupf  $< 20\%$  beträgt. Typische Kraftschlussbeiwerte für Gummireifen siehe Tabelle 1.

Kraftschlussbeiwerte sind bei Gummireifen abhängig, mit abnehmender Bedeutung, von Durchmesser eines Rades, Reifenprofil, Luftdruck in Reifen und Temperatur der Reifen und bei Böden von Konsistenz, Durchwurzelung, Bodenart, Bewuchs und der Feuchte der liegenden,  $\pm$  gemähten Vegetation.

Beim angetriebenen Rad wird auf den Boden Energie durch Schiebung und Reibung (durch Schlupf) übertragen: beim Beschleunigen gegen, beim Bremsen in Fahrtrichtung. Reibung wird vollständig in Wärme umgewandelt, die, abhängig von den jeweiligen Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazitäten von Rad und Boden, anteilig verteilt wird. Zur Leistungs- ( $P_{Bo}$ ) bzw. Energieaufnahme ( $W_{Bo}$ ) des Bodens (siehe Kap. 2.2 Gleichung 2.2(1)) muss also noch die bei Schlupf eines Rades entstehende Reibungsenergie an der Bodenoberfläche addiert werden und zwar in der Ebene

$$W_R = \vec{F}_{BR} \cdot s_R = \mu \cdot \vec{F}_G \cdot s_R = c \cdot m \cdot \Delta t$$

und am Hang

$$W_R = \vec{F}_{BR} \cdot s_R = \mu \cdot \vec{F}_N \cdot s_R = \mu \cdot \vec{F}_G \cdot \cos\alpha \cdot s_R = c \cdot m \cdot \Delta t$$

mit  $s_R$  = Wegstrecke der Reibung/m,  $c$  = spezifische Wärmekapazität von Boden und Reifen/ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ,  $m$  = Masse von Boden und Reifen/kg und  $\Delta t$  = erzeugte Temperaturdifferenz/ $^{\circ}C$  oder K.

Die Übergänge zwischen dem Bruch eines Bodenkörpers, dem Abscheren von Bodenelementen und dem Rutschen einer fahrenden Last durch Kraftwirkung sind fließend.

Die Vektorsumme der Kräfte in der Ebene ist

$$\vec{F}_L = \vec{F}_B - \vec{F}_{RB} + \vec{F}_G$$

und formal

$$\vec{F}_L = \cdot m_L \cdot \sqrt{a^2 + g^2 (\mu^2 + 1) - 2\mu \cdot a \cdot g}.$$

$\vec{F}_{RB}$  ist  $\vec{F}_B$  (Vortriebsbeschleunigung/Bremsverzögerung) immer entgegengerichtet.

Der Übertrag von Energie auf Boden beträgt

$$W_L = \vec{F}_L \cdot s_L \cdot s_R + \vec{F}_{RB} \cdot s_R$$

mit Tiefe der Fahrspur  $s_L$ /m und Wegstrecke der Reibung auf der Bodenoberfläche  $s_R$ /m.

## 2.1.2 Kurven

Beim Fahren von Kurven greift am Schwerpunkt einer Last die Zentripetalkraft an als Summe einer Vortriebs- und einer Gewichtskraft, die beide parallel zur Bodenoberfläche und senkrecht (im Winkel von  $90^\circ$ ) zueinander stehen. Entsprechend entsteht senkrecht zum Längsschlupf (in Längsrichtung der Reifen) zusätzlich Quer- oder Seitenschlupf (quer zu den Reifen) (Abb. 2).

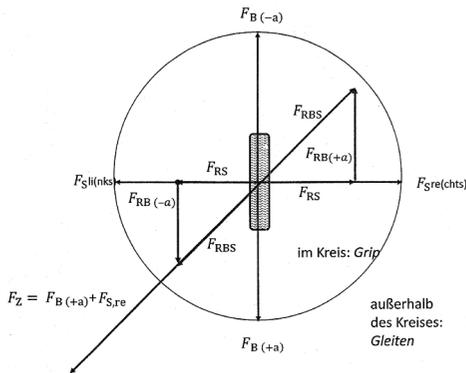


Abb. 2: Kammscher Kreis.  $F$  = Kräfte/N,  $z$  = Zentripetal-,  $B(-a)$  = Bremsverzögerungs-,  $B(+a)$  = Beschleunigungs-, ( $\vec{F}_Z = \vec{F}_{B(+a)} + \vec{F}_S$ ,  $s$  = Seiten-,  $R$  = Reibungs- Gleit- oder Haft-), links/rechts = Links-/Rechts-Kurve,

Circle of Kamm.  $F$  = forces/N,  $z$  = zentripetal-,  $B(-a)$  = - of breaking,  $B(+a)$  = - of acceleration, ( $\vec{F}_Z = \vec{F}_{B(+a)} + \vec{F}_S$ ,  $s$  = of side,  $R$  = of friction (slip or grip), links/rechts = curve to left/right

Die Vektorsumme der auf den Boden wirkenden Gesamtreibkräfte beträgt

$$\vec{F}_{RLS}^2 = \vec{F}_{RS}^2 + \vec{F}_{RL}^2/N$$

und formal

$$\vec{F}_{RLS} = m_L \cdot g \cdot \sqrt{\mu_{RL}^2 + \mu_{RS}^2}$$

mit  $\vec{F}_{RS}$  = Seitenführungskraft/N,  $\vec{F}_{RL}$  = Längsführungskraft/N und  $m_L$  = Masse der Last/kg,  $\mu$  = Reibungsbeiwert in Längs- ( $\mu_{RL}$ ) und Seiten- ( $\mu_{RS}$ ) Richtung.

Für die Einzelkräfte ist in der Ebene mit

$$\vec{F}_N = \vec{F}_G \quad \vec{F}_{RLS} = \mu_{RLS} \cdot F_G = \mu_{RLS} \cdot m_L \cdot g/N.$$

Die auf den Boden übertragene Energie nur des Schlupfs beträgt

$$W_{\text{RLS}} = \vec{F}_{\text{RLS}} \cdot s_{\text{RLS}}$$

mit  $s_{\text{RLS}}$  = Wegstrecke der Reibung des Latschs auf Boden/m.

Die auf Boden übertragene Gesamtenergie in der Ebene beträgt

$$\begin{aligned} W_{\text{LZ}} &= s_{\text{RLS}} \cdot s_{\text{L}} \cdot F_{\text{L}} + s_{\text{RLS}} \cdot F_{\text{RLS}} \\ &= m_{\text{L}} s_{\text{RLS}} \cdot (s_{\text{L}} \cdot \sqrt{\omega^4 r^2 + g^2 \cdot \cos^2 \alpha} + g \cdot \sqrt{\mu_{\text{RL}}^2 + \mu_{\text{RS}}^2}) / W \end{aligned}$$

mit

$$\vec{F}_{\text{L}} = \vec{F}_{\text{Z}} + \vec{F}_{\text{N}},$$

mit Kreisradius  $r/m$ , Winkelgeschwindigkeit  $\omega/s^{-1}$ , Zentripetalkraft  $\vec{F}_{\text{Z}}/N$  und Tiefe der Radspur  $s_{\text{L}}/m$ .

Die Verformung des Bodens beim Fahren von Kurven wird in Kapitel 2.2 vorgestellt.

### 2.1.3 Hang

Am Hang wirken reliefbedingt Hangabtriebskraft  $\vec{F}_{\text{H}}$  und Normalkraft  $\vec{F}_{\text{N}}$ , deren Summe die Gewichtskraft  $\vec{F}_{\text{G}}$  ist. Lastbedingt ist die Vortriebskraft  $\vec{F}_{\text{B}}$ . Die Reibungskräfte  $F_{\text{RB}}$  und  $F_{\text{RH}}$  beschreiben die Interaktion zwischen Boden und Last. Der Winkel  $\gamma$  zwischen den Vektoren  $\vec{F}_{\text{B}}$  und  $\vec{F}_{\text{H}}$  variiert zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  ( $360^\circ$ ). Die Summe der Vektoren beträgt

$$\vec{F}_{\text{L}} = (\vec{F}_{\text{B}} - F_{\text{RB}}) + (\vec{F}_{\text{H}} - F_{\text{RH}}) + \vec{F}_{\text{N}}$$

und umgestellt

$$\vec{F}_{\text{L}} = (\vec{F}_{\text{B}} + \vec{F}_{\text{H}}) - (F_{\text{RB}} + F_{\text{RH}}) + \vec{F}_{\text{N}}. \quad 2.1.3(1)$$

Formal gilt dann

$$F_{\text{L}}^2 = m_{\text{L}}^2 (a^2 + g^2 \sin^2 \alpha + 2ag \cdot \sin \alpha \cdot \cos \gamma - \mu^2 (a^2 + g^2 \cos^2 \alpha + 2ag \cdot \cos^2 \alpha \cdot \cos \gamma) + g^2 \cos^2 \alpha).$$

Im Gefälle hangab ist  $\gamma = 0^\circ$  und  $\cos \gamma = 1$ , quer zum Hang ist  $\gamma = 90^\circ$  und  $\cos \gamma = 0$  und im Gefälle hangauf ist  $\gamma = 180^\circ$  und  $\cos \gamma = -1$ . Entsprechend wechseln die Vorzeichen in obiger Gleichung.

+  $\vec{F}_H$  wechselt zu  $-\vec{F}_H$ , wenn  $\vec{F}_L$  über die Projektion der Höhenlinie (auf der sich die Last in der Zeit  $t_0$  befindet) auf der Grundfläche wandert, was abhängig ist von  $g \cdot \sin \alpha$  und der Vortriebsbeschleunigung  $a$  und erfolgt erst, wenn die Last schräg hangauf fährt.

Das Fahren von Kurven am Hang wird beschrieben, wenn in Gleichung 2.1.3(1)  $\vec{F}_B$  durch  $\vec{F}_Z$  und  $F_{RB}$  durch  $F_{RLS}$  ersetzt wird. Der Kammsche Kreis gilt natürlich auch am Hang, allerdings kann der Winkel  $\gamma$ , je nach Richtung von  $\vec{F}_B$  und  $F_{RH}$ , 0 bis  $180^\circ$  betragen, ist also nicht konstant  $90^\circ$ .

## 2.2 Verformung von Böden

Fährt eine Last quer zum Hang werden Böden nicht wie in der Ebene seitlich zur Fahrtrichtung symmetrisch (Abb. 3 a) (SCHWEIKLE 2012), sondern asymmetrisch verformt (Abb.3 b)-e)). Mit zunehmender Reifenbreite nimmt das Verhältnis von lateraler zu vertikaler Bodenverformung zu (Abb. 3b)-d)).

Tiefe und Muster der Verformung von Böden sind, bei gleichem Bodenmaterial, abhängig von der Stellung von Reifen zur Bodenoberfläche (Abb. 3 c) und e)). Am Hang zur Bodenoberfläche senkrecht in Richtung der Normalkraft stehende Reifen verformen Böden stärker als Reifen, die in Richtung der Gewichtskraft stehen.

Die Bodenmasse  $m_{Bo} = A_{P,K,R} \cdot \rho_{Bo} \cdot s'$  mit

$\rho_{Bo}$  = Dichte des feuchten Bodens/kg  $\cdot$  m<sup>-3</sup>,  $A_{P,K,R}$  = Flächen und Flächenanteile/m<sup>2</sup> (Abb. 3) und  $s'$  = Länge eines Bodenbalkens hinter einer Fläche  $A$ /m. Versuchsbedingt gab es keine Aufwölbungen in und gegen die Fahrtrichtung, so dass gilt:

- keine Verdichtung, wenn  $A_L + A'_P = A_P$ ,
- Verdichtung, wenn  $A_L + A'_P > A_P$  und
- Lockerung, wenn  $A_L + A'_P < A_P$ .

Die Energie-/Leistungsarten bleiben gleich:

$$P_L = \frac{W_L}{t} = \frac{F_L \cdot s \cdot s_L}{t} + \frac{F_R \cdot s_{RLS}}{t} = P_{Bo} = \frac{W_{Bo}}{t} + \frac{F_{Bo} \cdot s}{t} / W \quad 2.2(1)$$

mit  $P$  = Leistung/W,  $W$  = Energie/J,  $L$  = Last,  $Bo$  = Boden mit Energieaufnahme,  $t$  = Zeit/s,  $s_L$  = Tiefe einer Fahrspur/m,  $s$  = Weg der Verschiebung des Schwerpunktes von Bodenmasse oder Fahrstrecke einer Last /m (verursacht durch  $s_K$  = Verdichtung,  $s_S$  Scherung/Schiebung,  $s_P$  = Hebung,  $s_R$  = innere Reibung und  $s_{RLS}$  = Weg der Reibung durch Schlupf).

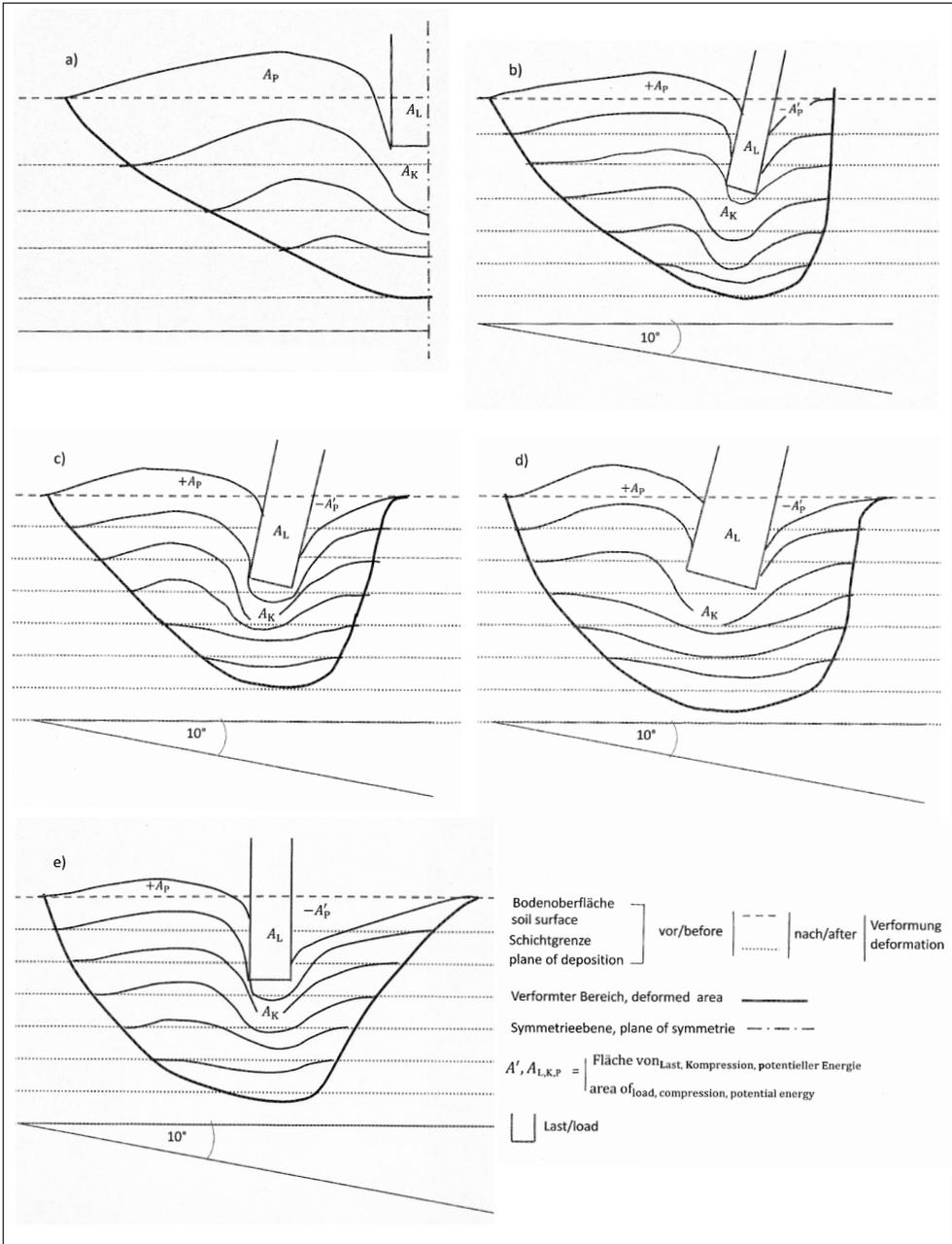


Abb. 3: Bodenverformung durch eine fahrende Last – a) symmetrisch in der Ebene, b) - d) asymmetrisch auf einer Höhenlinie,  $\vec{F}_L \hat{=} \vec{F}_G$ , e) asymmetrisch auf einer Höhenlinie,  $\vec{F}_L \hat{=} \vec{F}_N$   
 Deformation of soil by a driving load – a) symmetric on an even level, b) - d) asymmetric upon a contour line  $\vec{F}_L \hat{=} \vec{F}_G$ , e) asymmetric upon a contour line,  $\vec{F}_L \hat{=} \vec{F}_N$

### 3. Diskussion

#### 3.1 Übertrag von Energie am Hang

Gegenüber der Übertragung von Energie einer Last in der Ebene entsteht beim Fahren am Hang, abhängig von der Fahrtrichtung:

- hangauf Schiebung und Schlupf gegen die Fahrtrichtung; Verformung des Bodens lateral zur Fahrtrichtung symmetrisch.
- hangab durch Bremsverzögerung Schiebung und Schlupf in Fahrtrichtung; Verformung des Bodens lateral zur Fahrtrichtung symmetrisch.
- quer zum Hang Wechsel der Richtung von Schiebung und Schlupf zur Fahrtrichtung, wenn  $+\vec{F}_H$  zu  $-\vec{F}_H$  wechselt. Verformung des Bodens asymmetrisch mit Massenverlagerung des Bodens hangab und gleitendem Übergang zu symmetrischer Bodenverformung und Energieübertragung je näher eine Last in Falllinie, hangauf oder hangab, fährt.

Eine hangab oder sehr schnell fahrende Last erzeugt eine „Bugwelle“ die als selbstinduzierte Oberflächenrauigkeit auch zur Riffelbildung führen kann.

#### 3.2 Übertrag von Energie am Hang beim Fahren von Kurven

Fährt eine Last im Kreis am Hang wird mit zunehmender Winkelgeschwindigkeit, bzw. zunehmendem Impuls, Boden verformt und Energie übertragen (zur Orientierung siehe Abb. 4):

- links und rechts: aus symmetrisch wird asymmetrisch
- unten: asymmetrisch wird verstärkt
- oben: aus asymmetrisch nach unten wird über lateral symmetrisch asymmetrisch nach oben

Beim Fahren hangauf wird ein Teil der Vortriebsenergie (angenommen die Beschleunigung  $a$  bleibt konstant) für potentielle Energie (die Last wird gehoben) aufgewandt; die Last fährt auch langsamer. Beim Fahren hangab wird diese potentielle Energie (zusätzlich zur Vortriebsenergie) in kinetische Energie

$$W_H = F_H \cdot s = F_G \cdot \sin a \cdot s = m \cdot v^2 \cdot \sin a \quad \text{mit } s/m = (\text{Fall-})\text{Höhe und } v/m \cdot s^{-1} = \text{Fahr-} \\ \text{geschwindigkeit}$$

umgewandelt. Die Last fährt folglich schneller und erreicht deshalb den Punkt 2 u(nten) usw. Sie wird also bei dauerndem Fahren im Kreis spiral-oder schraubenförmig (Abb. 5) (helikoidal; wickelt man den Mantel dieses Helikoids ab, dann wird auf dem Mantel eine Kipp- oder Sägezahnschwingung abgebildet) hangab getrieben. Will ein Fahrer dies vermeiden, muss er hangauf „links“ Gas geben und hangab „rechts“ bremsen, was allerdings jeweils Schlupf und Schiebung erhöht.

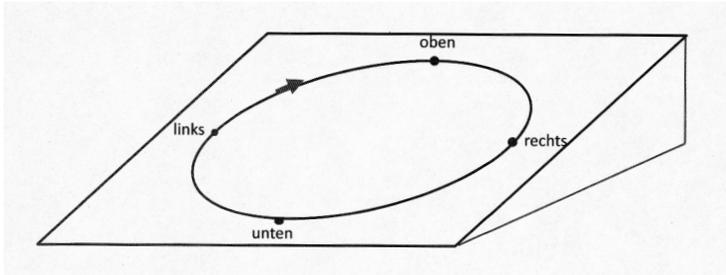


Abb. 4: Skizze typischer Positionen beim Fahren am Hang; → = Fahrtrichtung  
 Sketch of typical positions driving on a slope; → = direction of drive

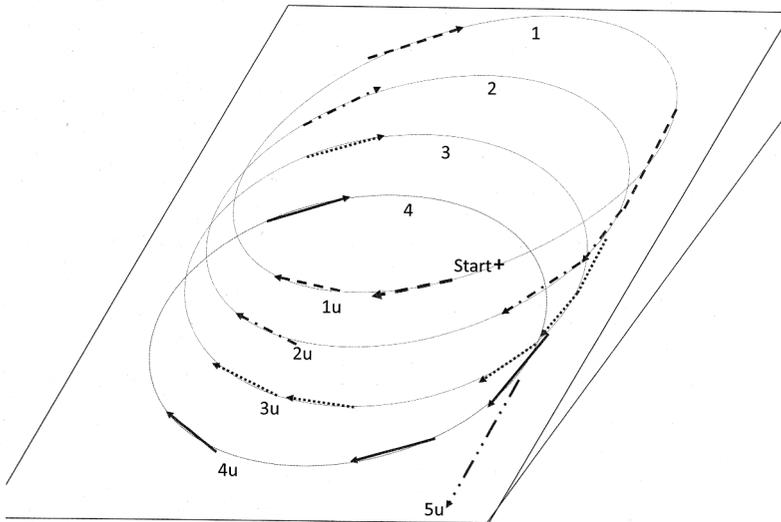


Abb. 5: Drift hangab einer Kreise fahrenden Last durch die Hangabtriebskraft  
 Downslope drift of a load due to the force acting down the slope

### 3.3 Bezugsgrößen

Auf den Boden wird Energie  $W_L$  über den Latsch einer Last (Reifen- oder Ketten-Aufstandsfläche) übertragen:

$$\frac{W_L}{A} \text{ /J m}^{-2}$$

mit Latsch =  $A/\text{m}^2$  (oder einem Vielfachen davon).

Im Boden wird (im Hinblick auf Strömung von Fluiden) der Energietransfer auf das Bodenvolumen bezogen. Bei quell-schrumpfender und verdichtbarer Matrix (Böden aus Torf oder mit hohem Tongehalt) bleibt das Volumen nicht konstant was zu scheinbaren Energieänderungen führt, die, durch Bezug auf Masse, korrigiert werden müssen. Bodenvolumen und Bodenmasse sind zwei sich ergänzende Referenzgrößen:

- auf Masse bezogene Energie:  $\frac{W}{m} / \frac{\text{J}}{\text{kg}} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$
- auf Volumen bezogene Energie:  $\frac{W}{V} / \frac{\text{J}}{\text{m}^3} = \frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{m}^3} = \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}^2}$

Es ist nicht zulässig von einer zufälligen Einheitenkombination auf die Eigenschaft einer definierten Kombination der physikalischen Größen zu schließen. Allein durch eine gedankliche Zuordnung von Energie zu Masse oder Volumen wird ein Boden sich weder bewegen, noch werden in ihm Drücke, Spannungen oder Tensionen aufgebaut.

### 3.4 Ein- und Aussichten

#### 3.4.1 Bewertung der Energiebilanz Last ( $W_L$ ): Boden ( $W_{Bo}$ )

Sinn der Bilanz  $W_L = W_{Bo}$  ist ein Abgleich der Energieübertragung zur gegenseitigen Kontrolle. Betrachtet man nun die Einflussgrößen zur Bestimmung der auf einen Boden wirkenden Kraft einer Last, wie in den vorigen Kapiteln beschrieben, dann ist erkennbar, dass deren Zahl groß und deshalb zu vermuten, dass deren Variabilität ebenfalls groß ist und Messfehler akkumuliert werden. Auch das Messen der Tiefe einer Fahrspur, um die Energie einer Last zu berechnen, ist reichlich mit Messfehlern behaftet. In der Ebene ist die Zahl der Einflussgrößen deutlich geringer und damit sind auch die Messfehler überschaubar. Nicht berücksichtigt wurden die unter Last/Schiebung auftretenden Effekte wie Thixotropie (Boden wird unter Last flüssiger) und Rheopektie (Boden wird unter Last fester).

Betrachtet man Verformung und ggf. Verdichtung von Böden nicht als Druck-, sondern als Energieübertragung, d.h. als Wirkung von Kraftvektoren, die Schwerpunkte verschieben, dann fügen sich die o.a. Überlegungen in die wissenschaftlichen Arbeiten von Ingenieuren (Bau von Straßen und Runways, Fahrsicherheit von Fahrzeugen usw.) problemlos ein.

#### 3.4.2 Nutzen von Bodenverformung und -reibung

Die vom Torf durch Verformung aufgenommene Energie und auch kraftschlüssige (reibende) Verbindungen halten eine fahrende Last am Hang. Wird die von einer Last auf den Boden übertragene Energie  $W_L$  größer als die Energie  $W_{Bo}$  die ein Torfboden aufnehmen kann, rutscht die Last, ggf. mit dem Torf zusammen, ab. Die Scherfestigkeit des Torfmateri- als wird von der Haftfestigkeit der Gemengeteilchen untereinander und der Durchwurzelung bestimmt.

### 3.4.3 Moor und Torf gerechte Maschinen und angemessener Fahrstil

Es sollte nicht übersehen werden, dass aus Fahrspuren mit abgescherter Vegetation Dränaugen für Oberflächenwasser mit Erosion des Torfes folgen kann und hochgepresster Torf trockener und damit leichter zersetzt wird. Verformung macht die Nutzung von Torfen als Archiv der Vegetations-, Besiedlungs- und Klimageschichte schwieriger, wenn nicht unmöglich.

Und weil nasse Torfe leicht verform- und abscherbar sind und die Vegetation nicht tiefgründig, wenn überhaupt, im Substrat verankert ist, weshalb sie bei Schlupf, bzw. Durchdrehen der Antriebs Elemente, leicht abgesichert wird muss folgendes beachtet werden:

- Fahrende Lasten wie Traktoren, Pflegemaschinen u .ä. sollten leicht sein und einen großen Latsch besitzen, d.h. breite Reifen, ggf. beidseitig Doppelreifen auf Vorder- und Hinterachse.
- Sinnvoll ist Allradantrieb (ggf. mit Knicklenkung; nicht die Vorderräder werden bewegt, sondern der Vorbau eines Schleppers wird in Fahrtrichtung um eine Horizontalachse gedreht), um zu vermeiden, dass beim Fahren a) von Kurven die Vorderräder (als Laufräder) geradeaus geschoben werden und b) am Hang mit den Vorderrädern gegen die Hangabtrift gesteuert werden muss. Beides bedingt erhebliche Verformung des Torfs.
- Schlupf kann minimiert werden durch große Reifendurchmesser und form-schlüssige Antriebs Elemente die nicht schlupfen wie Reifen mit Spikes oder Stollen oder Gitterrädern.
- Langsames Fahren vermindert die auf den Untergrund wirkende Gesamtlast, die um 41 % steigt, wenn die Vortriebsbeschleunigung der Erdbeschleunigung gleich ist. Kurven sollten langsam und mit großem Radius gefahren werden.
- Ideal wäre auch, wenn die Antriebs Elemente beim Fahren immer in Richtung der Gewichtskraft stünden (Hochachse steht Richtung Erdmittelpunkt, siehe Abbildungen 3 b) bis d)), um den Seitenschlupf (siehe Abbildung 3 e)) gering zu halten.

## 4. Danksagung

Dank schulde ich der Lektorin Frau Kohagen für Ihre sorgfältige Kontrolle der Arbeit, insbesondere der Indices bei physikalischen Größen.

## 5. Literaturverzeichnis

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

KIRNICH, G. (1979): Traktor Lexikon; Würzburg.

KUCHLING, H. (2011): Taschenbuch der Physik; München (Hanser).

KUSCHEFSKI, A. (2010): Grip. – IFZ-Institut für Zweiradsicherheit, 27 Seiten (www.ifz.de).  
<http://ifz.de/tipps%20und%20Tricks/Grip.pdf>

SCHULZ, H., BERGMANN, D., BUCHMANN, R., DREISSIG, M., HELMHOLZ, W., IDEL, H., GOEDECKE, L.,  
PFLÜGER, W., ROTHE, J. & UHLEMANN, F. (1982): Landwirtschaftliche Fahrzeuge und Krane; Berlin  
(VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag).

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

ZEUSCHNER, H.D. (2012): Kraftschluss, ein Nobody in Kfz-Lehrbüchern; <http://www.kfztech.de/gast/zeuschner/kraftschluss.htm>

Anschrift des Verfassers:

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

Manuskript eingegangen am 15. Januar 2016

