

Tagungsbeitrag zu:

- Jahrestagung der DBG, Kommission I
- **Titel der Tagung:**
- Horizonte des Bodens
- **Veranstalter:**
- DBG
- **Termin und Ort der Tagung:**
- 02. – 07. September 2017, Göttingen
- Berichte der DBG (nicht begutachtete online Publikation)

<http://www.dbges.de>

Verformung von Böden beim Fahren in der Ebene, von Kurven und am Hang

VOLKER SCHWEIKLE

Zusammenfassung: Vorgestellt wird ein Modell der Verformung \pm Verdichtung von Böden einschließlich der Übertragung von Energie durch fahrende Lasten (Fahrzeuge).

Schlüsselwörter: Bodenverdichtung, Bodenverformung, Energieübertragung bei Bodenverformung, Kurvenfahren, Fahren am Hang.

1 Einleitung

In der Literatur werden nur Drücke stehender Lasten und deren Beziehung zur Bodenverdichtung beschrieben, nicht jedoch zur Bodenverformung und die

Ebertstr. 12a D-69190 Walldorf

volker.schweikle@gmail.com

Energieübertragung wirkender Kräfte. Im Folgenden wird gezeigt, dass Verdichtung von Boden nur ein Aspekt von Bodenverformung, was mit dem dabei entstehenden Energietransfer beschrieben wird.

2 Oberflächennaher Energietransfer

2.1 Schlupf

Eine fahrende Last besitzt eine Gewichtskraft $\vec{F}_G = m_L \cdot g / \text{N}$ und eine Vortriebskraft $\vec{F}_B = m_L \cdot a / \text{N}$ deren Summenvektor $\vec{F}_L = m \sqrt{g^2 + a^2} / \text{N}$ beträgt und die zur Waagerechten

unter dem Winkel $\sin \alpha = \frac{g}{\sqrt{g^2 + a^2}}$ in

Fahrtrichtung wirkt; mit der Masse m_L / kg , der Erdbeschleunigung $g / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ und der Vortriebsbeschleunigung $a / \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Ohne Schlupf kein Hupf, d.h. Reibung bzw. Kraftschluss, fährt keine Last. Die Reibkraft beträgt in der Ebene

$$\vec{F}_{RL} = \mu \cdot \vec{F}_L = \mu m_L \cdot g / \text{N}$$

und am Hang in Falllinie

$$F_{RL} = \mu \vec{F}_L \cdot \cos \alpha = \mu m_L \cdot g \cdot \cos \alpha$$

mit μ = Kraftschlussbeiwert der bei 5 bis 10 % Schlupf (dem optimalen Schlupf mit μ_{\max}) am größten ist und dann dem Haftreibungsbeiwert entspricht. Bei zunehmendem Schlupf durch hohe Bremsverzögerung oder Vortriebsbeschleunigung sinkt der Kraftschlussbeiwert auf die Gleitreibungszahl μ_L und erreicht 100 %

Schlupf. Sicheres Fahren ist nur möglich wenn $\mu_L < \mu$ und der Schlupf $< 20\%$ beträgt. Die Reibungsenergie des Schlupfes beträgt $W_{RL} = F_{RL} \cdot s/J$, mit der Fahrstrecke s/m . Die Reibungsenergie wird in Wärme umgewandelt und auf Last und Boden nach Maßgabe ihrer Wärmeleitfähigkeit und -kapazität verteilt.

2.2 Schiebung

Bei plastischem Material wird ein Bodenquader durch Reibung/Schlupf einer fahrenden Last an der Bodenoberfläche zu einem Prisma mit dem Querschnitt eines Parallelogramms verzerrt: bei Beschleunigung gegen, bei Bremsverzögerung in Fahrtrichtung. Die Verschiebungsenergie

$$W_S = m_{Bo} \cdot g \cdot \Delta s_{Bo} / J$$

mit der Masse des geschobenen Bodens m_{Bo}/kg (die Masse des Bodens ist im Artikel immer die Frischmasse), der Erdbeschleunigung $g/m \cdot s^{-2}$ und der Strecke Δs_{Bo} der Verschiebung des Schwerpunktes des geschobenen Bodens. Durch die Verschiebung entsteht im Boden Reibung mit der Energie

$$W_{S\mu} = \mu \cdot m_{Bo} \cdot g \cdot \Delta s_{Bo} / J.$$

Damit beträgt die Gesamtenergie der Schiebung

$$W_{ST} = m_{Bo} \cdot g \cdot \Delta s_{Bo} (\mu + 1) / J.$$

2.3 Energieübertrag in die Tiefe

Die gesamte Energie einer Last die auf den tieferen Boden übertragen wird ist:

$$W_L = m_L \cdot g \cdot s_T / J,$$

mit der Tiefe der Fahrspur s_L/m . Dabei nimmt der Boden Energie auf durch Verdichtung, Hebung und Reibung zwischen den Partikeln (Abb. 1).

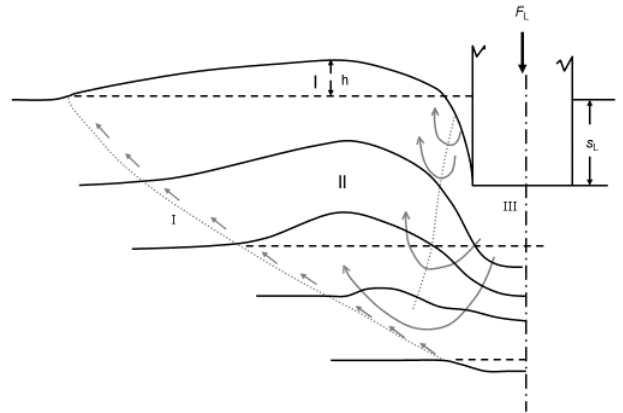


Abb. 1: Symmetrische Verformung des Bodens durch Belastung in der Ebene (nur eine Seite dargestellt): I = Hebungszone, II = Reibung der Partikel durch Verformung (enthält auch I und III), III = Verdichtungszone, s_L = Tiefe der Fahrspur, F_L = Last

Wenn seitlich Boden hochgequetscht wird, entsteht beim Fahren eine „Bugwelle“ in Fahrtrichtung vor dem Rad.

Die jeweilige Energieaufnahme des Bodens W_{Bo} beträgt für

$$W_{BoH} = A_{(I)} \cdot \rho_{Bo} \cdot g \cdot \Delta s_{BoH} \cdot s' / J$$

$$W_{BoK} = A_{(II)} \cdot \Delta \rho_{Bo} \cdot g \cdot \Delta s_{BoK} \cdot s' / J$$

$$W_{Bo\mu} = A_{(III)} \cdot \Delta \rho_{Bo} \cdot g \cdot \Delta s_{Bo\mu} \cdot s' / J$$

mit Hebung h , Kompression κ , Reibung μ , Dichte ρ , Differenz vor und nach der Energieübertragung Δ , Erdbeschleunigung g , Schwerpunktverschiebung Δs_{Bo}

und Länge des Bodenbalkens s' . I bis III beziehen sich auf die in Abbildung 1 indizierten Flächen, wobei I und III eindeutig begrenzt sind, die Grenzen von II durch Messung der Dichten vor und nach Verdichtung zu bestimmen wären. Da $W_{Bo\mu}$ vollständig in Wärmeenergie umgesetzt wird gilt

$$\Delta T = \frac{\mu \cdot \dot{g} \cdot \Delta s'}{c} / K$$

mit Temperatur T/K , Reibung μ , Erdbeschleunigung $g/m \cdot s^{-2}$ und spezifischer Wärmekapazität $c/J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

W_{BoH} , W_{BoK} , $W_{Bo\mu}$, W_S und W_{ST} sind voneinander unabhängige Größen und hängen ab von Eigenschaften von Böden und fahrenden Lasten und sind unabhängig von der Topografie

2.4 Verformung von Böden

Boden wird, abhängig von den auf ihn wirkenden Kräften, verformt.

2.4.1 In der Ebene

Hier wirkt nur die Kraft F_L (siehe Abb.1). Sie verformt Boden seitlich symmetrisch und, abhängig von der Fahrgeschwindigkeit, in Fahrtrichtung asymmetrisch.

2.4.2 Am Hang

Am Hang wird die Gewichtskraft F_G aufgeteilt in Normalkraft F_N (steht senkrecht zur Bodenoberfläche) und Hangabtriebskraft F_H (wirkt im Gefälle). $\vec{F}_L = \vec{F}_B + \vec{F}_H + \vec{F}_N$. Diesen Kräften entsprechen Reibungskräfte „Schlupf“, indiziert mit \vec{F}_R (Abb. 2).

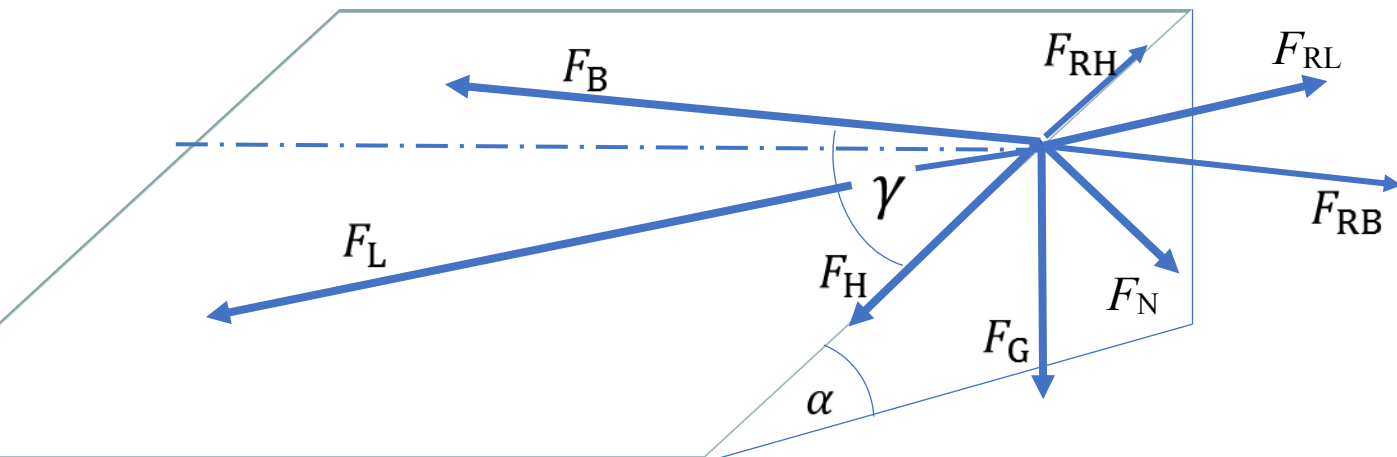


Abb. 2: Vektordiagramm der Kräfte am Hang, die auf eine Last wirken: Kraft F für den Hangabtrieb H , das Gewicht G , die Normal N und die Beschleunigung B ; Gefälle α und Winkel γ von F_B und F_H .

Es gibt also Schlupf durch die Beschleunigungskraft in Fahrtrichtung und einen Seitenschlupf durch die Hangabtriebskraft, die je nach

Fahrtrichtung, addiert oder subtrahiert werden muss: $\vec{F}_{RL} = \vec{F}_{RB} \pm \vec{F}_{RH}$. Schiebung erfolgt beim Fahren im Gefälle hangab in Fahrtrichtung und hangauf

entgegen der Fahrtrichtung. Fahren auf einer Höhenlinie bedingt asymmetrische Verformung (Abb. 3 c) und 3 e)).

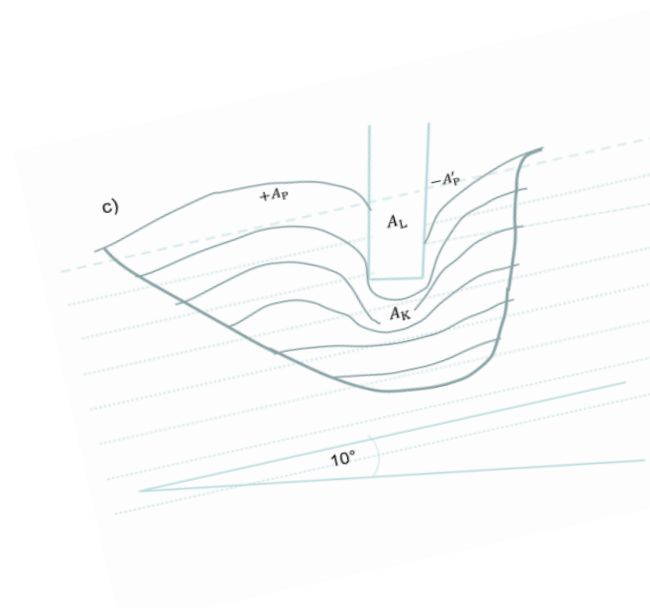


Abb. 3 c): Verformung am Hang in Richtung der Gewichtskraft

Bewegt sich eine Last mit ihrem Schwerpunkt wie in Abbildung 3 c) (der Schwerpunkt liegt über dem Latsch = Reifenaufstandsfläche) wird sie durch Verformung und Verdichtung am Hang gehalten. Fährt sie aber wie in Abbildung 3 e) (der Schwerpunkt liegt außerhalb des Latsches) überwiegt die Verformung durch hohen Seitenschlupf, was zum Abrutschen der Last hangab und/oder zum Schleudern führen kann, schlimmstenfalls zum Kippen

2.4.3 In Kurven

Wie in der Ebene wirkt im Schwerpunkt der Last eine Kraft F_B in Fahrtrichtung und beim Fahren einer Kurve seitlich nach unten eine Gewichtskraft $F_G \sin \alpha$. Im Schwerpunkt der Last setzt eine nach

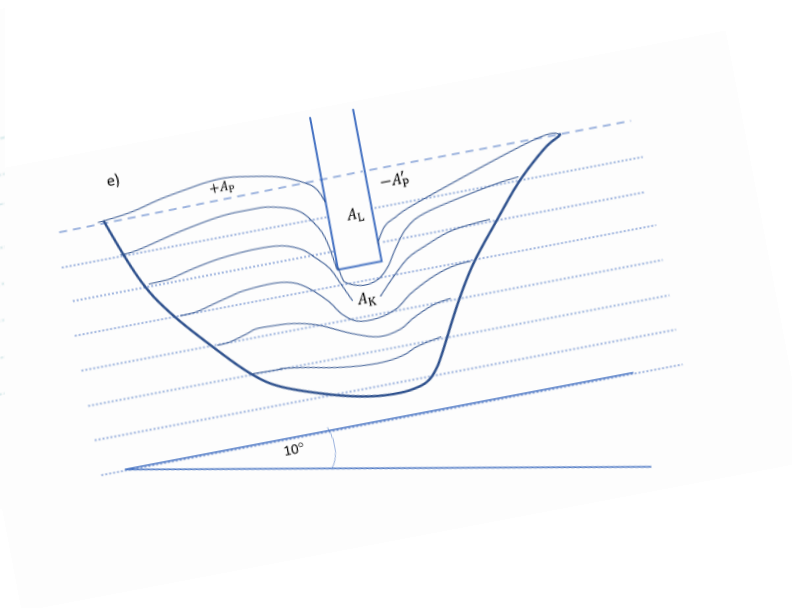


Abb. 3 e): Verformung am Hang in Richtung der Normalkraft

außen wirkende Kraft F_z an. Der Summenvektor beider Kräfte muss vom Schwerpunkt zum Latsch verlaufen, damit die Last nicht umfällt. Diese Bedingung zeigt Abbildung 3 c), wenn die Grafik, hier um 10° gekippt wird und nicht erfüllt, wenn die Grafik in Abbildung 3 e) um 10° gekippt wird. Kurvenfahren und Fahren am Hang auf einer Höhenlinie ergibt also analoge Verformung eines Bodens.

2.4.4 Verformung vor und hinter Reifen

Bei hexagonaler Lagerung kornförmiger Gefügeelemente und Einzelkorngefüge stützen sich Räder nach vorn und hinten auf unterschiedliche Bodenvolumina ab, was eine Scherbruchfläche mittig unter dem Reifen senkrecht nach unten in und gegen die Fahrtrichtung bedingt.

Möglicherweise ist dies Ursache des mittigen von Fahrspuren beim Trocknen.

2.4.5 Verformung beim Kurvenfahren am Hang

Wie schon vorne erwähnt ist die Verformung am Hang beim Fahren im Gefälle symmetrisch und quer zum Hang asymmetrisch nach unten. Kurven/Kreise fahren am Hang bedingt asymmetrische Verformung nach außen. Im oberen Kreisbereich kippt die Verformung von asymmetrisch nach unten/innen über symmetrisch zu asymmetrisch nach außen, abhängig von der Winkelgeschwindigkeit des Fahrzeugs.

2.4.6 Bezugsgrößen

Die übertragenen Energien können auf Volumen $J/m^3 = kg/m \cdot s^2$ (gesetzlich nicht zulässig ist Pa, weil das Pascal Drücken vorbehalten ist und nicht Energiedichten!!! Ein in der Bodenphysik leider weitverbreitetes Missverständnis, das durch die Nomenklatur, wie Spannung und entsprechende Begriffe, leider noch gefördert wird) oder Masse $J/kg = m^2/s^2$ bezogen werden. Ist der Querschnitt der Fahrspur größer als die Fläche der Hebung wurde der Boden verdichtet und dann muss als Bezugsgröße die Masse gewählt werden, um nicht gegen das Gesetz von der Erhaltung der Energie zu verstoßen.

Bei der Übertragung von Energie ist es unerheblich auf welche Fahrstrecke sie bezogen wird, nicht jedoch bei der Berechnung der übertragenen Leistung. Hier wird die Fahrstrecke durch die Fahrgeschwindigkeit vorgegeben.

3 Schlussbemerkungen

Rheologie, thixotrope und elastische (bei Tonen und Torfen z. B.) Eigenschaften des Bodens wurden nicht berücksichtigt.

Reibung und Verformung halten eine Last am Hang und in Kurven und ohne Reibung ist Fahren unmöglich. Die Energien von Hebung und Verdichtung sind voneinander unabhängig; Reibung fällt zwangsweise an, doch Beiwerte der inneren Reibung von Bodenmaterial sind nicht verfügbar.

Verformung von Böden ist abhängig von der Bauart von Lasten sowie stabilen und variierenden Materialeigenschaften (z. B. Wassergehalt, Frost, Temperatur) von Böden.

Die hier beschriebenen Modelle beschreiben das Verhalten von Böden unter fahrenden Lasten und bieten durch die Möglichkeit der Bilanzierung der Energien eine Kontrolle bei Messungen. Jedoch ist es vermutlich sinnvoller zu prüfen, ob ein Boden die Mindestanforderungen von Pflanzen an die Porosität eines Bodens erfüllen, die ja auch witterungsbedingt variieren.

Die beschriebenen Modelle lassen sich auf alle sich auf Boden bewegenden Objekte anwenden, wären also universell anwendbar.

4 Literaturverzeichnis

In der Literatur zur Bodenverdichtung ist das Fahren/Laufen von Lasten (Traktoren, Sportlern, Tieren u. Ä.) nicht vorgesehen, weshalb sie nicht zitiert wird. Zum Verständnis der zugehörigen Mathematik lesenswert:

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.

Schweikle, V. (2013): Die Bedeutung rauer Böden aus Torf für deren Verdichtung.–Telma **43**: 125-136; Hannover.

Schweikle, V. (2016): Übertragung der Energie fahrender Lasten auf Hangmoorböden.–Telma **46**: 125-136; Hannover.

