

Bodenverdichtung aus der Sicht der Bodenmechanik

Etienne DISERENS, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), CH-8356 Tänikon
 Felix BUCHER, Institut für Geotechnik, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich

Um die Bodenverdichtung als Folge von Maschinenlasten zu beurteilen, sind Grundkenntnisse aus der Bodenmechanik immer mehr gefragt. In diesem Beitrag werden gebräuchliche Begriffe und Labormethoden aus dieser Disziplin vorgestellt und erläutert. Dabei steht die Vorbelastung, welche im Odometerversuch ermittelt werden kann, als Mass für die Bodenstabilität im Vordergrund.

Mit der gegenwärtigen Revision des Umweltschutzgesetzes mit Einbezug der physikalischen Bodeneigenschaften hat das Problem der Verdichtung stark an Bedeutung gewonnen.

Aus der Studie über Verdichtungsgefährdung von Ackerböden in der Schweiz (Weisskopf *et al.* 1988) geht hervor, dass einzelne Parameter wie Bodentyp, Feinkörnigkeit, Krümelstabilität oder Gefügestruktur keine aussagekräftigen Prognosen liefern können. Die Verdichtungsgefährdung kann nur mit Hilfe eines Indexes abgeschätzt werden, der den kombinierten Einfluss von Boden und Klima berücksichtigt. Da zwischen der Bodenbelastbarkeit und den erwähnten Parametern generell keine Korrelation besteht, soll deswegen die Stabilität des Bodens als eigene Kerngrösse quantitativ erfasst werden. Dazu bedarf es der Erläuterung einiger grundlegender Prinzipien der Bodenmechanik.

Begriffe

In der Bodenmechanik sind die folgenden Begriffe gebräuchlich (Horn und Lebert 1994).

■ **Kompression** ist der Prozess, der infolge von äusseren (Maschinendurchfahrt, Vibration, Stampfen) und inneren (hydraulischer Gradient, Saugspannung) Belastungen zu einer Zunahme der Masse pro Volumeneinheit führt.

■ **Konsolidierung** ist der Kompressionsprozess infolge einer Spannungserhöhung, der in gesättigten wenig durchlässigen Böden stattfindet. Die Durchlässigkeit des Bodens spielt dabei eine zentrale Rolle.

■ **Verdichtung** ist der Kompressionsprozess, der ausschliesslich in teilweise

gesättigten Böden stattfindet. Hier ist die Bodenstruktur von ausschlaggebender Bedeutung.

Totale und effektive Druckspannungen: Die Übertragung von Druckspannungen im Boden, einem mehrphasigen und diskontinuierlichen System, ist äusserst komplex. Bei der Einwirkung einer Kraft P auf eine Fläche F ergibt sich die vertikale Druckspannung σ_z aus der Gleichung $\sigma_z = P/F$. Es handelt sich dabei um die totale Druckspannung, sofern der Boden als Ganzes und unabhängig von seiner Zusammensetzung betrachtet wird. Sind die Bodenporen zusammenhängend mit Wasser gefüllt, lässt sich der Porenwasserdruck u_w bei einer bestimmten Tiefe z eines gesättigten Profils im einfachsten Fall wie folgt bestimmen (1):

$u_w = z \cdot \gamma_w$ mit γ_w als Wasserraumgewicht (1)

Ist der Boden bis zur Bodenoberfläche gesättigt, beträgt der totale Überlagerungsdruck σ in der Tiefe z (2):

$\sigma = z \cdot \gamma_g$ mit γ_g als Raumbgewicht des gesättigten Bodens (2)

Nach Terzaghi (1925) ergibt sich die effektive Druckspannung σ' , indem man den Porenwasserdruck u_w von der totalen Druckspannung σ subtrahiert (3):

$\sigma' = \sigma - u_w$ (3)

Wenn in wenig durchlässigen gesättigten Böden bei zeitlich begrenzten Lasteinwirkungen die Wassermenge konstant bleibt, bewirkt die Zunahme der totalen Druckspannung $\Delta\sigma$ einen Anstieg des Porenwasserdruckes um Δu , wobei anfänglich die zusätzliche Last $\Delta\sigma$ ausschliesslich durch das Wasser getragen wird (4):

$\Delta\sigma = \Delta u \quad \Delta\sigma' = 0 \quad \sigma' = \text{konstant}$ (4)

Mit der Zeit baut sich der Porenwasserdruck Δu ab und $\Delta\sigma'$ wird allmählich (theoretisch nach unendlich langer Zeit) gleich $\Delta\sigma$. In diesem Falle wird die zusätzliche Last $\Delta\sigma$ zunehmend durch die Bodenaggregate getragen (5). Es handelt sich dabei um eine Konsolidierung (nur in gesättigten Böden).



Abb. 1. Von der Bodenverformung durch Fahrspuren bis zur Beurteilung der Schäden.

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' \quad \text{und} \quad \Delta u = 0 \quad (5)$$

Ein ungesättigter Boden besteht aus festen Bestandteilen, Luft und Wasser. Hier ergibt sich die totale Druckspannung σ aus der Summe der effektiven Druckspannung σ' , des Porenluftdrucks u_a und des Porenwasserdrucks u_w . Für die effektive Druckspannung σ' gilt (6):

$$\sigma' = \sigma - u_a + X(u_a - u_w) \quad (6)$$

Ist der Boden gesättigt, ist $X = 1$. Ist der Boden trocken, ist $X = 0$, und die effektive Druckspannung σ' lautet in diesem Fall (7):

$$\sigma' = \sigma - u_a \quad (7)$$

wobei u_a normalerweise gleich Null ist.

Normal- und Schubspannungen: Beim Reifenkontakt wird der Boden durch das Gewicht der Maschine beansprucht. Unterhalb der Bodenoberfläche treten dabei Normal- und Schubspannungen auf.

Um die auf einen beliebigen Punkt des Bodens wirkenden Kräfte theoretisch darzustellen, betrachtet man diesen Punkt als Würfel (Abb. 2). Dabei setzt sich die auf den Würfel wirkende Beanspruchung aus den Normaldruckspannungen σ' (σ'_x , σ'_y , σ'_z) und den tangential zu den Würfel­flächen wirkenden Schubspannungen τ (τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yx} , τ_{yz} , τ_{zx} , τ_{zy}) zusammen. Jede Komponente verläuft parallel zu einer der Achsen des Koordinatensystems Oxyz (Koolen 1994).

Da der Boden eine beschränkte Festigkeit hat, sind nicht beliebige Spannungszustände möglich. Alle zulässigen Spannungszustände sind an die Bedingung geknüpft, dass die Schubspannung kleiner oder höchstens gleich (nämlich im Bruchzustand) der Scherfestigkeit des Bodens ist. Die Scherfestigkeit ist damit eine wichtige bodenmechanische Grösse. Wird der effektive Spannungszustand betrachtet (Spannungen ausschliesslich zwischen den Bodenaggregaten) so erhält man nach der Formel von Mohr-Coulomb (8):

$$\tau_r = c' + \sigma' \cdot \tan \varphi' \quad (8)$$

Dabei bedeuten:

τ_r die Scherfestigkeit (f für Bruch, failure)

c' die effektive Kohäsion

σ' die effektive Normalspannung

φ' der effektive Reibungswinkel

c' und φ' sind wichtige Parameter und dienen zum Beispiel zur Ermittlung der Grenztragfähigkeit des Bodens (Lang und Huder 1994). Die Kohäsion c' hängt von den Bodeneigenschaften ab. Die Reibungskräfte R sind proportional zu $\tan \varphi'$ (φ' = Winkel der inneren Reibung) und zur Normalspannung σ' (9):

$$R = \sigma' \cdot \tan \varphi' \quad (9)$$

Die resultierende Coulomb-Bruchgerade, welche die Scherfestigkeit τ_r als Funktion

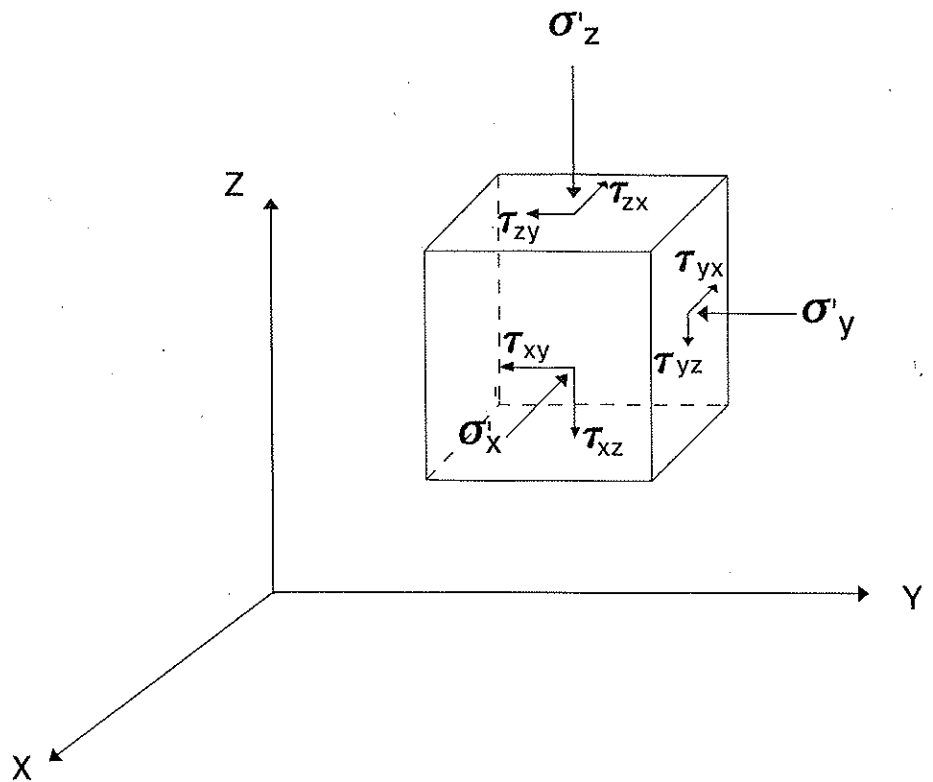


Abb. 2. Spannungsverteilung im Boden am Beispiel eines imaginären Würfels.

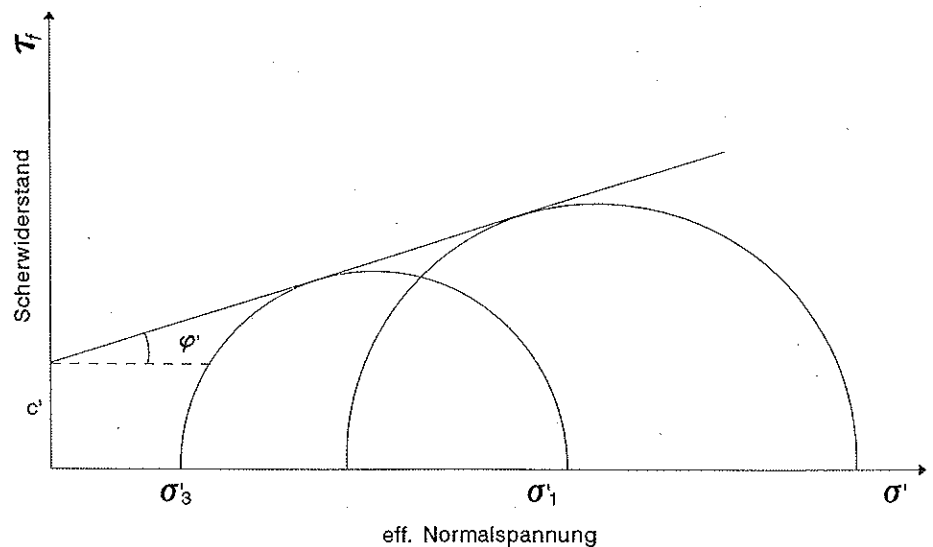


Abb. 3. Die Coulomb-Bruchgerade (Bestimmung von c' und φ' Faktoren).

der Normalspannung σ' ausdrückt, trennt die Bruchzone (Schubspannung = Scherfestigkeit) vom stabilen Bereich (Schubspannung < Scherfestigkeit) (Abb. 3). **Bodensetzung:** Jede Belastung des Bodens bewirkt Spannungen zwischen den einzelnen Bodenaggregaten. Solange die Stabilität des Bodens durch das Zusammendrücken der Bodenteilchen nicht beeinträchtigt wird, spricht man von einer elastischen Verformung (Wiederbelastungsbereich der Setzungskurve, Abb. 4). Wenn die Stabilität des Bodens

nicht mehr genügt, um einer höheren Druckspannung σ'_{v2} , gegenüber σ'_{v1} , standzuhalten, führt dies zu einem Zusammenbruch der Bodenaggregate und anschliessend zu einem neuen Kräftegleichgewicht. Nach der zweiten Entlastung erreicht der Boden eine tiefere Position als nach der ersten Entlastung. Die Kontaktflächen zwischen den Bodenteilchen nehmen irreversibel zu, so dass man von einer plastischen Verformung spricht (Erstbelastungsbereich der Setzungskurve, Abb. 4). Die Spannung σ'_v zwi-

schen dem Wiederbelastungs- und dem Erstbelastungsbereich wird als «Vorbela-stung» bezeichnet. Sie ist ein Mass für die momentane Stabilität des Bodens und sie lässt sich grafisch bestimmen (Lang und Huder 1990).

Einfluss von Spannungen auf Bodendeformation

Die Bodenmechanik kennt verschiedene Versuchsmethoden, um den Einfluss von Spannungen auf die Deformation des Bodens (Scheren, Setzung) und damit die Veränderung seiner Dichte zu untersuchen.

Triaxialscherversuch: Beim Triaxialscherversuch wird die Probe normalerweise in axialer Richtung durch σ_1 belastet. Dabei wird jedoch die radiale Deformation der Probe nicht verhindert, sondern nur durch einen während des Versuches konstant gehaltenen Seitendruck σ_3 behindert. Die axiale Normalspannung kann daher soweit gesteigert werden, bis die Bruchbedingung gegenüber dem Seitendruck erreicht und die Probe abgesichert ist. Man wiederholt den Versuch mit weiteren unterschiedlichen Seitendrücken. Die gemeinsame an die Kreise angelegte Tangente ist die Coulombgerade (Abb.3). Der Versuch liefert somit nicht nur Daten zum Deformationsverhalten, sondern besonders auch zum Scherfestigkeitsverhalten des untersuchten Probenmaterials. Man unterscheidet verschiedene Arten der Versuchsdurchführung, je nachdem wie die Probe vor dem Abscheren das Porenwasser drainieren kann oder nicht. Der Triaxialscherversuch gestattet damit, die Feldbedingungen - innerhalb gewisser Grenzen zwar - nachzubilden und die Kohäsion mit dem Winkel der inneren Reibung festzulegen. Das sind zwei wichtige Parameter für die Berechnung der Grenztragfähigkeit.

Ödometerversuch: Beim Ödometerversuch wird eine zylindrische Bodenprobe mit einer Initialhöhe h_0 in axialer Richtung stufenweise belastet. Die Probe kann sich nur in Richtung dieser Belastung durch eine Abnahme der Höhe Δh deformieren; in radialer Richtung wird die Deformation durch einen starren Stahlring verhindert. Der Versuch gestattet, bei jeder Laststufe den Zeit-Setzungsverlauf zu ermitteln. Je nach Konsolidationseigenschaften der Probe (abhängig vom Sättigungsgrad, vom Feuchtegrad und von der Körnung) kann die Endsetzung mehr oder weniger schnell erreicht werden. Aus den End-

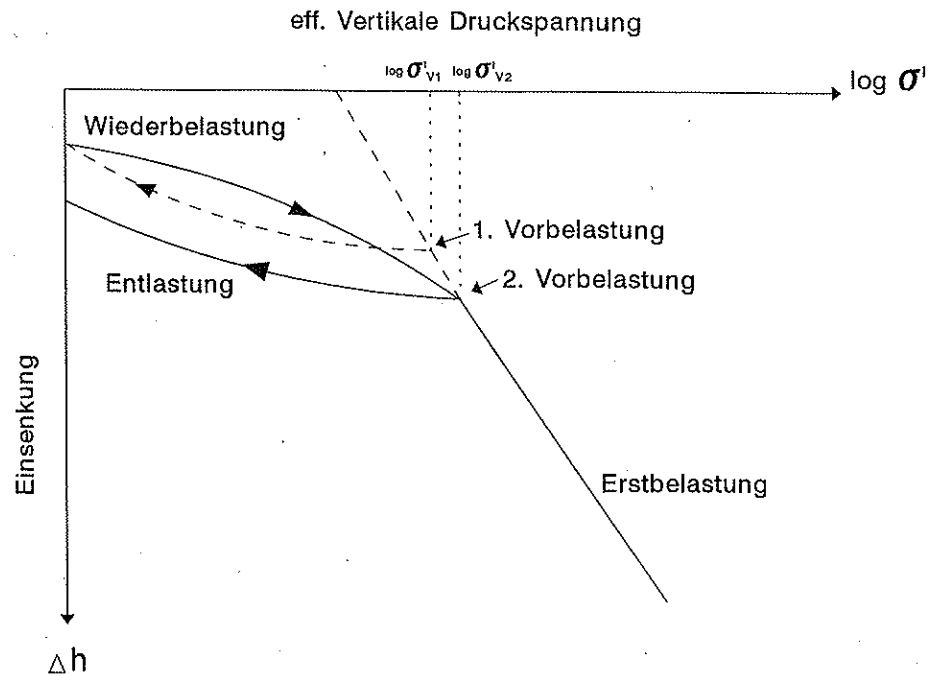


Abb. 4. Die Setzungskurve.

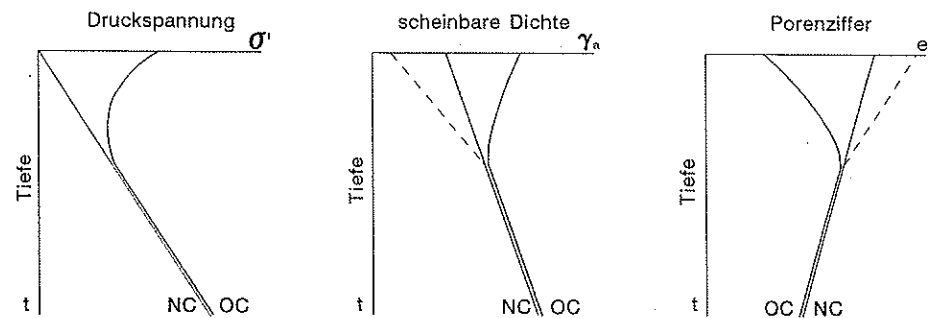


Abb. 5. Verdichtungsgrad im Profil, «NC» normalverdichtet, «OC» überverdichtet, Druckspannungen, scheinbare Dichte und Porenziffer.

setzungen, die bei den verschiedenen Laststufen erreicht werden, lässt sich dann der Zusammenhang zwischen Setzung und Spannung ermitteln (Abb. 4). Aus dieser Kurve kann man besonders angeben, wie gross die Vorbela-stung auf die Probe war. Bei der Übertragung der Versuchsergebnisse auf praktische Anwendungsfälle ist aber immer zu bedenken, dass beim Ödometerversuch eine vollständige seitliche Stützung der Probe vorhanden und die Setzung daher immer eindimensional ist.

Bodenverdichtung

Beurteilung des Verdichtungsgrads: Mit zunehmender Tiefe erhöht sich infolge des Eigengewichtes der Druck, wodurch die scheinbare Dichte zu- und die Porosität abnimmt. Diesen natürlichen Prozess verstärkt eine Entwässerung noch. Der Meniskuszug (Oberflächen-

spannung des Wassers) führt dabei zu einer Ansammlung und Komprimierung der Bodenteilchen.

Ausgehend von den Kurven, welche die scheinbare Dichte beziehungsweise die Porenziffer (V_p/V_f , V_p = Porenvolumen und V_f = Volumen des Festmaterials) als Funktion der Tiefe angeben, kann der Verdichtungsgrad eines homogenen Bodenprofils beurteilt werden. Nimmt die Dichte mit der Tiefe zu, beziehungsweise nimmt die Porenziffer mit der Tiefe ab, wird der Boden als «normalverdichtet» bezeichnet. Soll dagegen im oberen Teil des Bodens die Dichte mit der Tiefe konstant sein oder abnehmen (mit erhöhter Porenziffer als Folge), dann wird der Boden als «überverdichtet» beurteilt (Abb. 5). Die Erklärung dazu liefert Abbildung 5, welche den Verlauf der Druckspannung mit der Tiefe zeigt. Im «normalverdichteten» Fall nimmt die Druckspannung mit der Tiefe mehr oder weniger

linear zu, im «überverdichteten» Fall haben im oberen Teil des Bodens erhöhte Spannungen (als Folge der Maschinenlast) gewirkt.

Diese Kurven stellen den Verdichtungsverlauf für ein homogenes Profil dar. Im Falle eines heterogenen Profils wird jede einzelne Schicht, die als homogen betrachtet wird, analog untersucht. Bei der Berechnung der Bodenspannung kommt die bis zur Oberfläche reichende «Bodensäule» in Betracht. Falls der Boden zusätzlich auf natürliche Weise gelockert wird (Dauerwiesen), kann die Steigung der Kurve als Mass für die Pedoturbationintensität (natürliche Strukturregenerierung) herangezogen werden (Hartge 1993) (gestrichelte Linie, Abb. 5).

Bodenverdichtung und Vorhersagen:

Bei der Beurteilung der Verdichtungsgefahr durch landwirtschaftliche Maschinen stützt man sich auf die zwei folgenden, bereits beschriebenen Begriffe: die Vorbelastung und die Normalspannung.

Die Normalspannung wird für eine bestimmte Tiefe z durch Rad- beziehungsweise Bodeneigenlast ausgelöst. Bei einer sandigen Braunerde beträgt der Anteil der Bodenlast an der gesamten Vorbelastung in 52 cm Tiefe bis zirka 11 % (Tab. 1).

Mit Hilfe von Drucksensoren, Sonden (Bakker *et al.* 1995; Bolling 1987; Johner 1988) können im Felde in der gewünschten Tiefe die durch die Radlast erzeugten Druckspannungen gemessen werden. Ist die Druckspannung in der betrachteten Tiefe kleiner als die Vorbelastung abzüglich der Bodenlast, ist die Verdichtungsgefahr gering. Ist sie hingegen grösser, besteht eine hohe Verdichtungsgefahr. Die maximale Druckspannung in der Tiefe z ohne Verdichtungsgefahr lässt sich wie folgt berechnen (10):

$$\sigma'_m = P_v - \Sigma(\gamma \cdot \Delta z) \quad (10)$$

σ'_m : maximale Druckspannung infolge Radlast in einer Tiefe z

P_v : Vorbelastung in der Tiefe z

γ : Raumgewicht feucht der einzelnen Schichten

Δz : Mächtigkeit der einzelnen Schichten

Tab. 1. Vorbelastung P_v , Bodenlast σ_z (pF : 1,8 Feldkapazität) und Porenziffer e bei unterschiedlicher Tiefe für eine sandige Braunerde (Lebert 1989)

Bodentiefe cm	Struktur	P_v kPa	σ_z kPa	σ_z/P_v %	e %
10-14	Einzelkorn	60	1,9	3,2	81
24-28	Einzelkorn	80	4,2	5,2	69
30-34	Einzelkorn	170	5,2	3,1	64
50-54	Einzelkorn	80	8,6	10,8	79

Folgerungen

Die dargestellten Grundprinzipien der Bodenmechanik ergeben für die Verdichtung folgende Aussagen:

■ Die Kräfte zwischen den einzelnen Bodenaggregaten werden als effektive Druckspannungen bezeichnet. In einem schwerdurchlässigen, gesättigten Boden wird eine kurzzeitig zugeführte Last vollständig durch den Porenwasserdruck getragen. Dabei entsteht im Boden zwischen den Aggregaten kaum eine Erhöhung der effektiven Normalspannungen. Unter solchen Bodenverhältnissen würde aber beim Befahren infolge des schwachen Scherwiderstandes Radschlupf (bzw. das Abscheren von Erde) entstehen.

■ Eine Spur als Folge einer Radlast ist das Produkt von Normal- und Scherspannung. Ist die Normalspannung grösser als die Bodentragfähigkeit, setzt sich der Boden. Erreicht die Scherspannung den Scherwiderstand, bricht der Boden (beim Befahren entsteht dadurch auch Schlupf).

■ Wird ein Boden mit zunehmender Last (Bodeneigenlast und zugeführte Last) beansprucht, verhält er sich bis zu einem bestimmten Wert - der sogenannten «Vorbelastung» - weitgehend elastisch, darüber dann eher plastisch mit irreversiblen Verformungen. Die Vorbelastung ist eine Folge der Entstehungs- und Spannungsvorgeschichte des Bodens.

LITERATUR

Bakker D.M., Harris H.D. and Wong K.Y., 1995. Measurement of Stress Paths under Agricultural Vehicles and their Interpretation in Critical State Space. *J. agric. Eng. Res.* **16**, 247-260.

Bolling I., 1987. Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen. Neue Mess- und Rechenmethoden. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG) 133. 274 S.

Hartge K.-H., 1993. Mechanisch-physikalische Prozesse in aggregierten ungesättigten Böden. *Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch.* **71**, 45-52.

Horn R. und Lebert M., 1994. Soil compactability and Compressibility. In: Soil Compaction in Crop Production. Developments in Agricultural Engineering 11. (Ed. B.D. Soane, C.van Ouwerkerk). Elsevier Amsterdam, London, New York, London, Tokyo, 45-69.

Johner F., 1992. Bodendruck und Druckfortpflanzung beim Mähdrusch. Institut für Pflanzenwissenschaften, ETH-Zürich, Diplomarbeit. 99 S.

Koolen A.J., 1994. Mechanics of Soil Compaction In: Soil Compaction in Crop Production. Developments in Agricultural Engineering 11. (Ed. B.D. Soane, C.van Ouwerkerk). Elsevier Amsterdam, London, New York, London, Tokyo, 23-44.

Lang H.-J. und Huder J., 1990. Bodenmechanik und Grundbau. 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London. 226 S.

Lebert M., 1989. Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Bayreuther Bodenkundliche Berichte, Band 12. 131 S.

Weisskopf P., Schwab P., Jäggli F., Kramer E., Peyer K. und Studer R., 1988. Die Verdichtungsgefährdung schweizerischer Ackerböden. Nationales Forschungsprogramm Nutzung des Bodens in der Schweiz, Heft 20, 128 S.

Terzaghi K.v., 1925. Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. Verlag Franz Deuticke, Leipzig, Wien.

RÉSUMÉ

Critères d'évaluation du tassement du sol

Des connaissances de base en mécanique du sol sont de plus en plus sollicitées pour l'examen du tassement du sol agricole suite aux passages des machines.

Certains termes-clés de mécanique liés au compactage du sol sont présentés sous forme théorique et méthodologique. Le point de préconsolidation associé au test en cellule oedométrique occupent une place prépondérante dans l'approche mécanique de l'étude.

SUMMARY

Soil compaction and evaluation criteria

Basic knowledge of soil mechanics is gaining importance in judging the soil compaction caused by agricultural machines. Some important current terms and laboratory methods used within this field are presented and explained in the following. Precompaction stress as a measure of soil stability is one of the most important soil parameters and is obtained by the oedometer method.

KEY WORDS: soil strength, soil cohesion, normal stress, shear stress, effective stress, pore water pressure, precompaction