Thüringer Landesanstalt
für Landwirtschaft

Verfahren zur Ermittlung der Schadverdichtungsrisiken auf ackerbaulich genutzten Böden

Jena, im Oktober 2004

Thüringer Ministerium
für Landwirtschaft,
Naturschutz und Umwelt

FREISTAAT THÜRINGEN

Verfahren zur Ermittlung der Schadverdichtungsrisiken auf ackerbaulich genutzten Böden

Rainer Paul, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft Jena

1. Einführung

Die Technikausstattung in den landwirtschaftlichen Betrieben wird immer leistungsstärker. Diese Entwicklung betrifft nicht nur Betriebe, die auf großen Flächen wirtschaften (Abb. 1), sondern über Maschinenringe und Dienstleistungsbetriebe wird diese Technik unabhängig von der Flächengröße zunehmend auch in kleineren Betrieben eingesetzt.

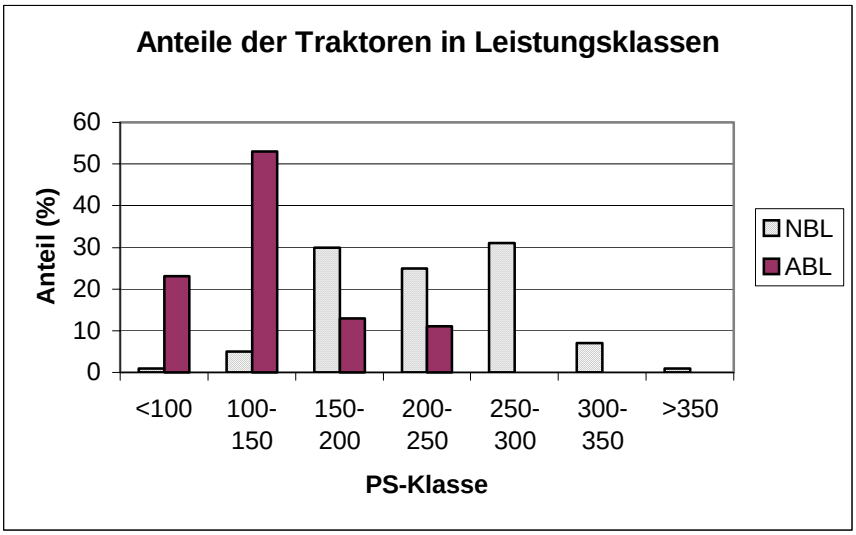


Abbildung 1: Anteile der Traktorenleistungsklassen für die Grundbodenbearbeitung . NBL = neue Bundesländer ABL = alte Bundesländer (Quelle: USL-Daten)

Die Tendenz zu immer leistungsstärkerer Technik ist ökonomisch begründet. Sie ruft aber auch Befürchtungen hervor, dass diese Technik intensive und bis in den Unterboden reichende Schadverdichtungen erzeugen kann.
Mit der Leistung ist die Masse der Technik angestiegen. Die höhere Masse kann zu einem höheren Bodendruck als bisher führen. Der Boden hat sich aber hinsichtlich seiner Stabilität und damit Druckverträglichkeit auf das bisherige Druckniveau eingestellt. Ein Anstieg des Bodendruckniveaus löst dann Gefügeveränderungen aus, bis sich ein neues Gleichgewicht zwischen Druck und Bodenstabilität eingestellt hat.
Die Gefügeveränderungen können sich nachteilig auf die Gefügefunktionen auswirken.
In der Literatur wird dazu mit sehr unterschiedlichen Ergebnissen berichtet. Beim Einsatz 6-reihiger Rübenroder mit einer maximalen Radlast um 10 t fanden EHLERS (1999; 2003) und TOBIAS (2001) tiefreichende (bis 50 bzw. 60 cm) Verdichtungen mit deutlicher Reduzierung des Gasaustauschvermögens. BRUNOTTE U.A (2000); SOMMER U.A (2001) stellten signifikante Dichtezunahmen bzw. Abnahmen des Porenvo-

lumens im Krumenbereich fest. Tieferreichende Gefügeschädigungen traten nur auf dem Vorgewende als Folge mehrfacher Überrollung ein. BRANDHUBER U.A. (2000) stellten ebenfalls signifikante Gefügeveränderungen in der Krume unterhalb 20 cm fest, während das Unterbodengefüge kaum verändert und in keinem Fall geschädigt wurde. GISI U.A. (2000) untersuchten den Rübenrodelader (11,23t Radlast) auf trockener (pF 2,7) Krume über feuchterem (pF 2,4) Unterboden. Signifikante Veränderungen der Dichte und Luftpermeabilität traten bis 15 cm auf, darunter wurden keine Veränderungen gemessen.
Diese Ergebnisse und Schlussfolgerungen insbesondere von BRANDHUBER U.A (2000), SOMMER U.A (2001) und GISI U.A. (2000) zeigen, dass man nicht ausschließlich von der Masse eines Fahrzeuges auf eine Schadwirkung schließen kann. Ebenso entscheidend sind die aktuelle Bodenfeuchte, der Gefügezustand des Bodens, seine Bearbeitung und nicht zuletzt die Fahrwerke des Fahrzeuges, speziell ihre Kontaktfläche zum Boden, die sich aus der Breite der Bereifung, ihrer Flexibilität und dem Reifeninnendruck ergibt (DÖLL U.A. 2001). Wenn es gelingt, die Aufstandsflächen der Fahrwerke progressiv zur Masseentwicklung zu erhöhen, kann leistungsstarke Technik auch bodenschonend eingesetzt werden.
Die Bodenverträglichkeit von Radlasten und Bereifungen ist standortabhängig. Eine wirksame und unter den gegebenen Bedingungen kostengünstige Auswahl erfordert dringend ein Verfahren zur Beurteilung der Druckverträglichkeit eines Standortes und der Druckbelastung als Voraussetzung für die Auswahl standortgerechter Technik und für ihren Einsatz.

2. Schadverdichtung und Parameter zum Nachweis von Schadverdichtungen

2.1 Definition einer Schadverdichtung

Der Boden ist der Standort für die Pflanze, indem er ihrem Wurzelsystem das Durchdringen des Bodens ermöglicht und die Wurzeln mit gespeichertem Wasser und darin gelösten Nährstoffen sowie mit Sauerstoff versorgt. Gleichzeitig entfernt er gasförmige Stoffwechselprodukte aus dem Wurzelraum. Darüberhinaus reinigt er mit seinen Filtereigenschaften das Bodenwasser und beeinflusst mit Durchlässigkeit und Speicherung den Gebietswasserhaushalt.
Diese Leistungen erfüllt er mit seinem Gefüge.
Das Gefüge ist definiert als Anordnung von Festsubstanz und Hohlräumen im Raum einschließlich ihrer Gestalt. Das Gefüge ist nicht konstant. Mechanische Einwirkungen beim Befahren und Bearbeiten des Bodens können es kurzfristig verändern und bei hinreichender Intensität der Einwirkung auch schädigen.
Die Gefügeschädigung ist ein Prozess, der das Gefüge eines Bodens zunehmend in einen Zustand versetzt (EHLERS 2001), in dem er eine oder mehrere seiner Funktionen nicht mehr erfüllen kann, obwohl er seiner Genese nach dazu in der Lage sein müsste.

2.2 Parameter zum Nachweis einer Bodenschadverdichtung

Parameter zum Nachweis einer Bodenschadverdichtung müssen Gefügeeigenschaften sein, die maßgeblich für die Gefügefunktionen sind und die sich unter dem Einfluss des Bodendruckes deutlich verändern können.
Diese Eigenschaften sind im Grobporensystem zu finden. Die Aufgaben des Grobporensystems im Gefüge sind die Bereitstellung von Transportwegen für den Makrostofftransport und Wachstumsbahnen für die Wurzeln. Der Makrostofftransport ist für

die Ableitung des Wassers, das von der Schwerkraft bewegt wird und den Transport von gasförmigen Stoffen, überwiegend durch Diffusion, verantwortlich. Der Sauerstoffbedarf der Wurzeln und Bodenlebewesen beträgt 2...8 l Sauerstoff pro m^2 und Tag (DREW 1992; FLÜHLER 1973; LEMON u.a. 1955; STOLZY u.a. 1964).
Die Wurzeln dringen vorzugsweise in sehr grobe Poren > 40 - 100 µm ein, aber auch die Wurzelhärchen nutzen grobe Poren > 10 µm. Ein Mangel an diesen Poren hemmt das Wurzelwachstum, wenn auch Wurzelspitzen durch hohen Eigendruck Bodenfestsubstanz verlagern können (KUNTZE U.A.1988).
Durchwurzelung und Sauerstofftransport stellen somit Anforderungen an die Luftkapazität (Luftkapazität = Volumen der Poren > 50 µm). .
Ebenso wichtig ist die Verwickeltheit und Kontinuität der Grobporen. Die Verwickeltheit der Poren bestimmt die Länge des Transportweges, die Kontinuität zeigt Transporthindernisse in Form von Porenverengungen und Sperren aus Wasser und Festsubstanz an.
Die Parameter, mit denen diese Transportleistung des Grobporensystems charakterisiert werden können, sind die Luftkapazität und ein Parameter für die Leitfähigkeit. Die notwendige Luftkapazität ergibt sich aus dem Zusammenhang zwischen Diffusion, Porenvolumen und Porengeometrie (PAUL U. WERNER 1990).
Für die Versorgung mit Sauerstoff ist ein relativer Gasdiffusionskoeffizient von 0,02 erforderlich. Das Mindestluftvolumen errechnet sich aus dem Zusammenhang zur Porenkontinuität nach folgender Gleichung (nach FLÜHLER 1973)

$D = LK^m$
$\lg LK_{krit} = (\lg 0{,}02/m)$ (m^3/m^3)

D = relativer Diffusionskoeffizient
LK= Luftkapazität (m^3/m^3)
m = Kontinuität = Zahlenwert für die Porendurchgängigkeit;
1= extrem durchgängig (Röhre); 2 = verwickelt (Krümelgefüge nach Lockerung); 3 und höher = stark verwickelt bis diskontinuierlich (Kohärentgefüge, plastisch verformte Gefüge). Natürlich entwickelte Gefüge mit röhrenförmigen Poren haben eine Kontinuität zwischen 1 und 2. Für unterschiedliche Gefügeformen ergeben sich die in der Tabelle 1 aufgeführten Mindestwerte für die Luftkapazität.

Tabelle 1: Mindestluftkapazität in Abhängigkeit von der Porenform bei einer Gasaustauschleistung von 2,5 $lm^{-2}d^{-1}$

Gefügeform	Mindestluftkapazität (%)
Krume	
Krümel, zahlreiche Gröbstporen	8,5
Feinkrümel, locker	6,5
Polyeder, gelockert	11,3
Unterboden	
Schwamm, Gröbstporen	5,7
Mittelpolyeder, Gröbstporen	5,2
Kohärent, keine Gröbstporen	9,0

Im Mittel sollte die Luftkapazität in der Krume mindestens 8 Vol.-% und im Unterboden 5 Vol.-%.betragen.

Die Luftkapazität kann im Labor durch Bestimmung von Porenvolumen und Feldkapazität (DIN ISO 11274) bestimmt, im Feld mittels Gefügediagnose geschätzt werden.
Die Porenwegsamkeit ist mit Routineverfahren nur indirekt zu bestimmen. Durch Umstellung der obigen Gleichung kann sie aus der Gasdiffusionsmessung abgeleitet werden. Die Gasdiffusionsmessung ist jedoch sehr aufwendig. ist auch dieser Parameter noch zu aufwendig. Ersatzweise können die Leitfähigkeitsparameter Luftleitfähigkeit (ka; PL) und gesättigte Wasserleitfähigkeit. (kf-Wert) verwendet werden. Diese Parameter es stimmen zwar wegen der Unterschiede zwischen den zugrunde liegenden Prozessen Strömung und Diffusion nicht überein (PAUL 1990), sie führen aber zur gleichen Aussage wie der Gasdiffusionskoeffizient.
Der Richtwert für den kf-Wert beträgt 10 cmd^{-1}. Nach der bodenkundlichen Kartieranleitung (1994) bzw. DIN 4220 kennzeichnet er den Übergang von einer geringen zur mittleren Durchlässigkeit. Ergebnisse von Thüringer Dauerbeobachtungsflächen bestätigen diese Einstufung (Tabelle 2).

Tabelle 2: Typische kf-Werte Thüringer Dauerbeobachtungsflächen

Bodentyp	Horizont	Gefüge	Bodenart	kf-Wert
Braunerde-Tschernosem	Ap	Krümel	Lu	100
	Ah (Krumenbasis)	Platten mit Bioporen	Lu	40
	Ah	Schwamm, Bioporen	Lu	100
Pelosol	Ap	Bröckel	Tu 2	64
	Cv (Krumenbasis)	Platten, dicht	Tu 2	5
	Cv	Kohärent	Tu2	3
Braunerde	Ap	Feinkoagulat	Sl3	150
	Bv (Krumenbasis)	Einzelkorn, verdichtet	Sl3	70
	Bv	Einzelkorn, dicht	Sl3	21
Pseudogley	Ap	Krümel	Lu	130
	Sw (Krumenbasis)	Platten, dicht	Lu	8
	Sd	Feinpolyeder, natürlich dicht	Lu	6

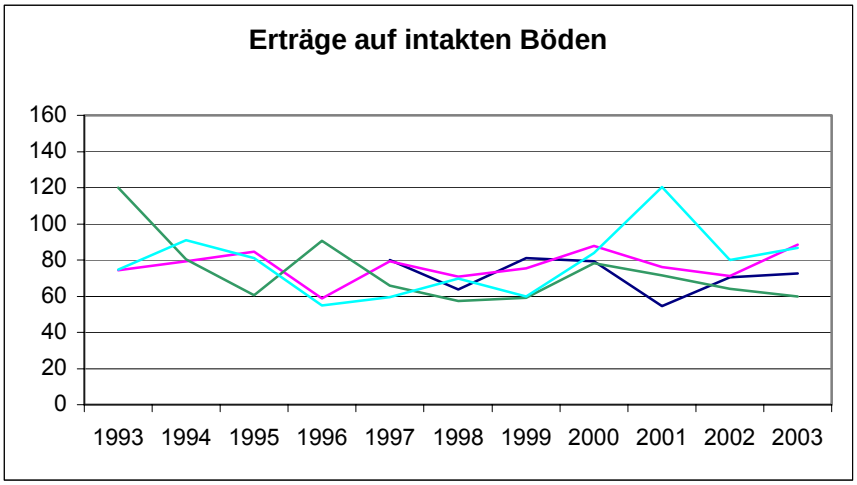
Soll die Luftleitfähigkeit (DIN 4220) gemessen werden, ist zu beachten, ob sich die Angaben auf die pneumatische Druckhöhe beziehen. Um Vergleichbarkeit zum kf-Wert herzustellen, ist der pneumatische Leitfähigkeitswert auf die hydraulische Druckhöhe nach der Beziehung
$k_{Lhyd} = k_{Lpneu} * 820$ (siehe Bedienanleitung Luftleitfähigkeits-Meßgerät PL –300) umzurechnen.

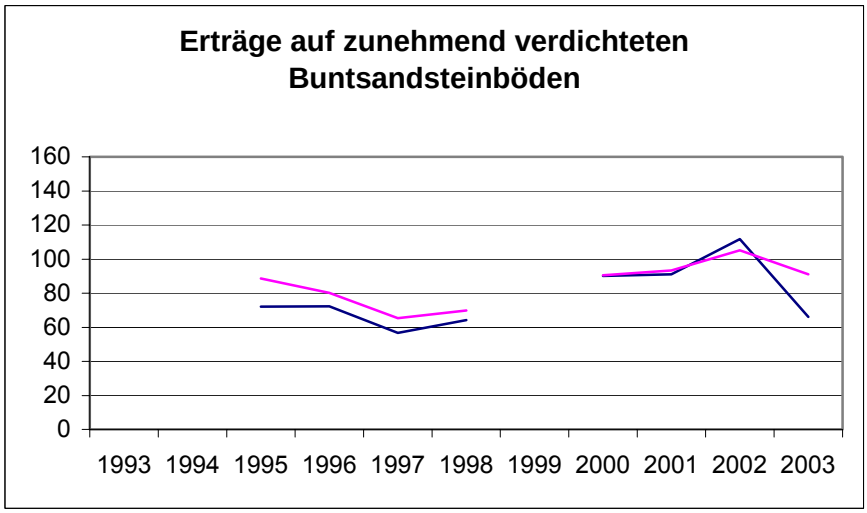
2.3 Ökologisches Idealgefüge oder Gefüge mit Mindestfunktion?

Ein Gefüge mit den obigen Eigenschaften ermöglicht noch eine ausreichende Versorgung- und Durchwurzelung der Pflanzen. Darüber hinaus bietet es ein Optimum an Stabilität gegenüber Druckbelastungen. Die Aggregate sind in diesem Zustand so gepackt, dass sie sich über eine hohe Anzahl an Stützstellen gegenseitig abstützen.
Die Funktionsfähigkeit eines solchen Gefüges zeigt sich in einer höheren Ertragssicherheit gegenüber Böden mit Schadgefügen, wie der Ertragsverlauf dreier Standorte (Bodendauerbeobachtungsflächen in Thüringen) mit unterschiedlichen Gefügeeigenschaften (Tab: 3) zeigt (Abb. 2).

Tabelle 3: Luftkapazität und Leitfähigkeit dreier BDF

Standort	Horizont	Luftkapazität (Vol.-%)	kf-Wert (cmd^{-1})
Intaktes Gefüge (3 Standorte)	Krume	13,8	100,1
	Krumenbasis	9,5	29,8
	Unterboden	9,4	55,5
Schadgefüge an Krumenbasis u. Unterboden (3 Standorte)	Krume	10,9	30,8
	Krumenbasis	3,9	1,5
	Unterboden	1,6	0,8
Schadgefüge in Unterkrume bis Unterboden (2 Standorte)	Krume	6,2	14,0
	Krumenbasis	2,8	0,1
	Unterboden	2,7	0,2





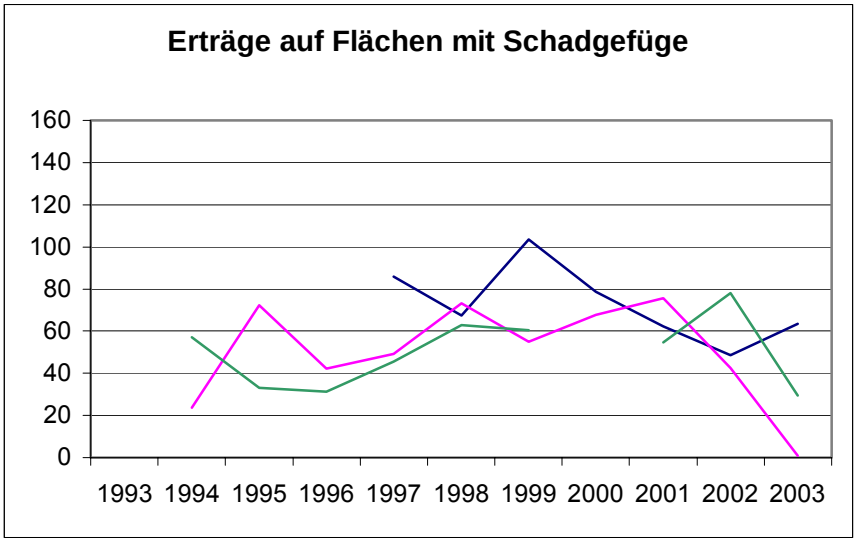


Abbildung 2: Erträge auf den Bodendauerbeobachtungsflächen in Abhängigkeit vom Gefügezustand (Farben kennzeichnen verschiedene Standorte)
Erträge bezogen auf Winterweizenerträge
Schlüssel: mittlere Erträge Stat.JB Thür. Im Verhältnis zu mittlerem Winterweizenertrag

Wintergerste	= 1,04	Körnermais	= 0,8
Sommergerste	=1,37	Ackergras TM	= 0,85
Triticale	= 1,13	Winterraps	= 1,97

Die Böden mit ausreichender Luftkapazität und Leitfähigkeit erzeugen die höheren Erträge mit der größten Sicherheit. Wesentlich unsicherer sind die Böden mit Luftmangel (bei Feldkapazität). So sind die Buntsandsteinböden in der unteren Krume zunehmend verdichtet worden. Diese Verdichtung hat sich zunächst nicht auf den Ertrag ausgewirkt, nach einer Brache im Jahr 1999 stiegen die Erträge sogar noch an. Im trockenen Jahr 2003 ging der Ertrag wieder erheblich zurück.
Auf den Standorten mit Schadgefüge sind seit Beobachtungsbeginn deutliche Schwankungen von Jahr zu Jahr zu sehen.
Die gleiche Tendenz zeigen auch die Erträge zweier benachbarter Landkreise, die sich klimatisch nicht, hinsichtlich der Bodenausstattung aber deutlich unterscheiden. Der Kreis Sömmerda besitzt einen höheren Anteil schlecht durchlüfteter Pelosole, der Kreis Weimarer Land enthält einen höheren Anteil an Schwarzerden mit wesentlich günstigerem Gefüge. Bei allgemein niedrigerem Ertragsniveau des Kreises Sömmerda zeigt der Winterraps deutlich, dass er nasse Jahre auf diesen Böden nicht verträgt (Abb. 3), während Getreide solche Witterungsunterschiede weitgehend ausgleichen kann (Abb. 4).

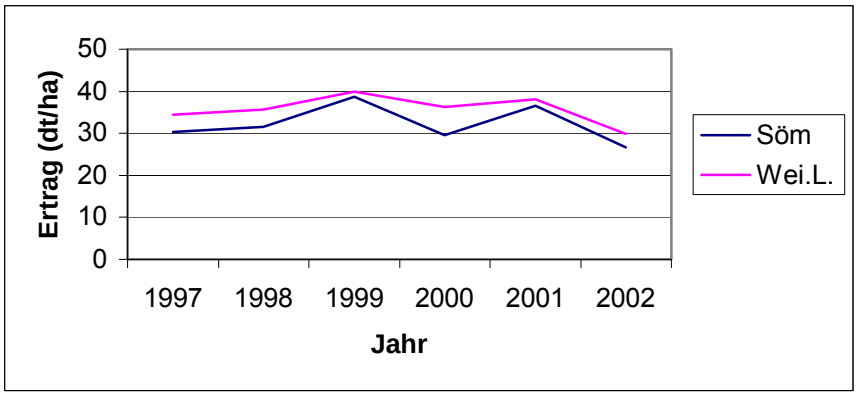


Abbildung 3: Winterrapserträge in den Kreisen Sömmerda und Weimarer Land (Stat. Jahrb. Thüringen)

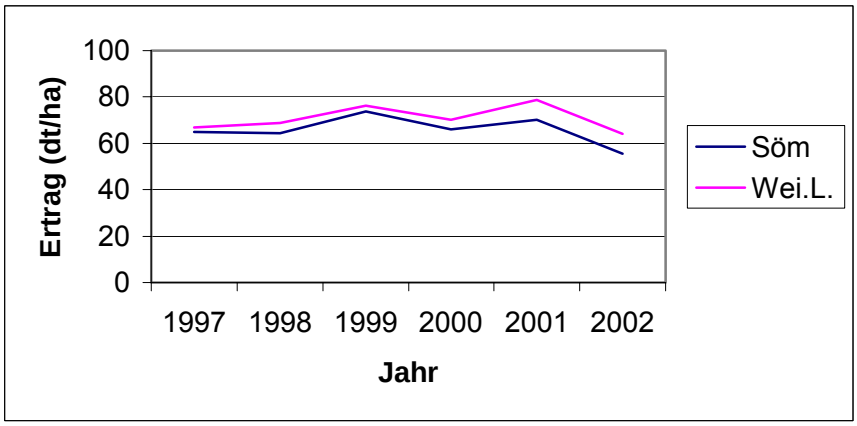


Abbildung 4: Winterweizenerträge in den Kreisen Sömmerda und Weimarer Land (Stat. Jahrb. Thüringen)

Die bessere Ertragssicherheit bestätigt damit die gewählten Orientierungswerte für das Gefüge. Darüber hinausgehende Eigenschaften (größerer Anteil an Grobporen, höhere Durchlässigkeit) wirken sich offensichtlich nicht auf den Ertrag aus.
Neben der Ertragsfunktion erfüllt das Gefüge weitere ökologischen Aufgaben ausreichend, die Durchlässigkeit ist dank kontinuierlicher Vertikalporen hoch genug, um Niederschlagswasser abzuführen. Dabei erzeugt es einen höheren Widerstand gegen die Transportkraft des Wassers und hemmt so die Erosion. Das Zielgefüge ist also das Gefüge, das die ökologischen Mindestforderungen erfüllt und das technologische Optimum bietet.

3. Einschätzung der Schadverdichtungsgefährdung – Prinzip

Das Verfahren zur Einschätzung der Schadverdichtungsgefährdung konzentriert sich auf die Verhinderung von druckbedingten Gefügeschädigungen vorrangig durch Einstellung des Bodendruckes der Technik auf die Druckverträglichkeit des Bodens. Mit berücksichtigt wird die Verbesserung der Druckverträglichkeit durch ackerbauliche Maßnahmen.

3.1 Einschätzung der Druckverträglichkeit der Böden

Ein Boden kann in Abhängigkeit vom Material, der Bodenfeuchte und dem Gefüge Scher- und Kompressionswiderstände entwickeln, mit denen er im Gegensatz zu einem unverdichteten Haufwerk begrenzten Druck- und Scherbeanspruchungen widersteht.
Diese Eigenschaften wurden im Modellversuch an ungestörten Bodenproben untersucht. Die Proben erfuhren eine Belastung mit gestaffelten Drücken, wobei jeder Druck kurzzeitig wirkte und der nächsthöhere Druck nach vollendeter Rückdehnung der Probe aufgebracht wurde. Es zeigte sich, dass mehrere Gefügeeigenschaften das Verdichtungsverhalten deutlich beeinflussten.

3.2 Einflüsse auf die Drucksetzung von Böden

Trockenrohdichte: Die Trockenrohdichte wirkt deutlich auf das Setzungsverhalten, bestimmt es jedoch nicht ausschließlich (Abb. 5).

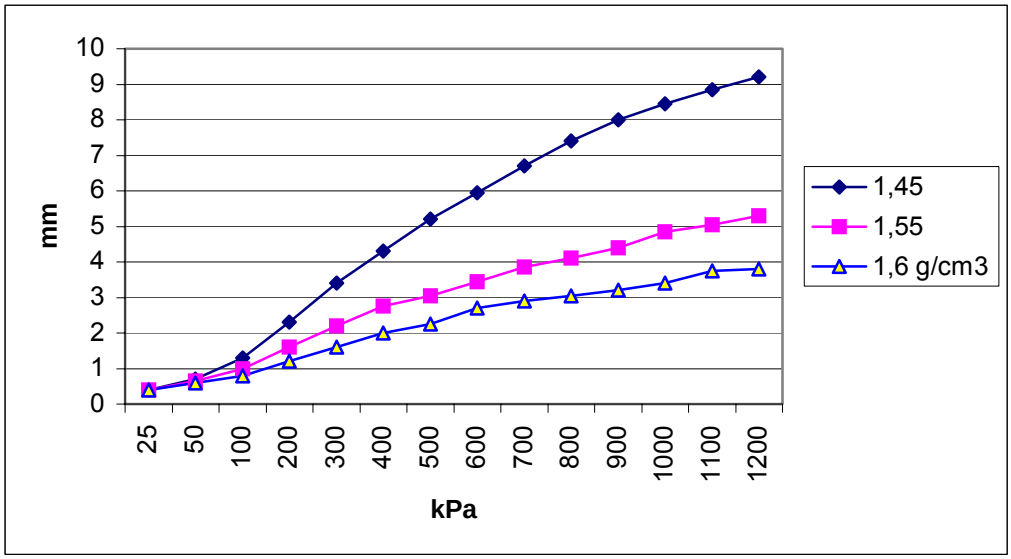


Abbildung 5 : Einfluss der Trockenrohdichte auf die Drucksetzung

Bodenfeuchte: Die Bodenfeuchte beeinflusst den Scherwiderstand und damit die Verdichtbarkeit eines Bodens (Abb. 6). Der Kurvenverlauf für die Setzung bei pF 1,8 zeigt jedoch ein Abknicken der Kurve ab etwa 100 kPa Druck. Dieses Verflachen der Setzung ist auf das Erreichen der Wassersättigung der komprimierten Probe zurückzuführen. Es entsteht Porenwasserdruck, der der Setzung entgegenwirkt. Allerdings wirkt der Druck im Boden weiter und orientiert das Gefüge um, insbesondere den Grobporenanteil und die Grobporenkontinuität mit der Folge einer nachlassenden Porenwegsamkeit.

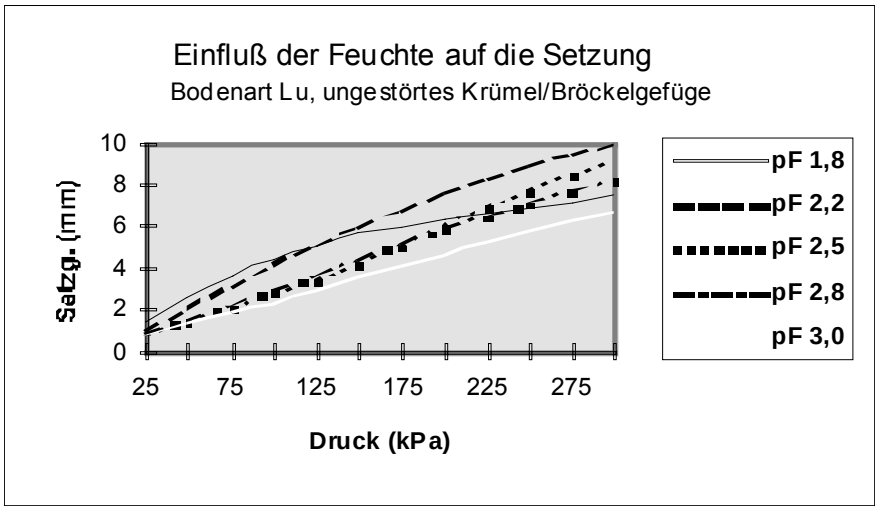


Abbildung 6: Einfluss der Bodenfeuchte auf die Setzung

Gefüge: Das Gefüge entwickelt Kräfte innerhalb (Inneraggregatwiderstand) und zwischen den Aggregaten (Interaggregatwiderstand). Zunächst wird der Interaggregatwiderstand beansprucht. Er ergibt sich aus Stützkräften an und Scherwiderständen zwischen den Aggregatoberflächen (Abb. 7).

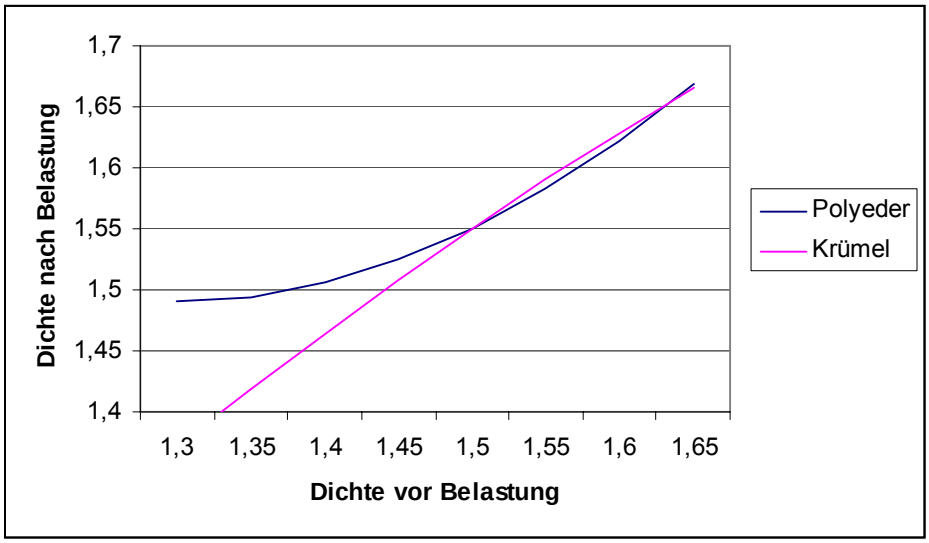


Abbildung 7: Einfluss des Gefüges auf den Setzungsverlauf am Beispiel von zwei von ungestörten Bodenproben gleicher Bodenart und Bodenfeuchte (pF 2,8) bei Belastung mit 300 kPa Druck

Humus: Der Humusanteil beeinflusst das Setzungsverhalten in zwei Richtungen; positiv durch seinen gefügestabilisierenden Einfluss, negativ durch seine Wasserbindung und im feuchten Zustand geringen Scherwiderstand.

3.3 Vorbelastung

Die Vorbelastung ist das Ergebnis der erfahrenen Belastungen, mechanischer und natürlicher Auflockerungen wie auch Verfestigungen durch Saugspannungen. In ihr widerspiegelt sich die Gesamtheit der bodeneigenen Kräfte und Einflussfaktoren.

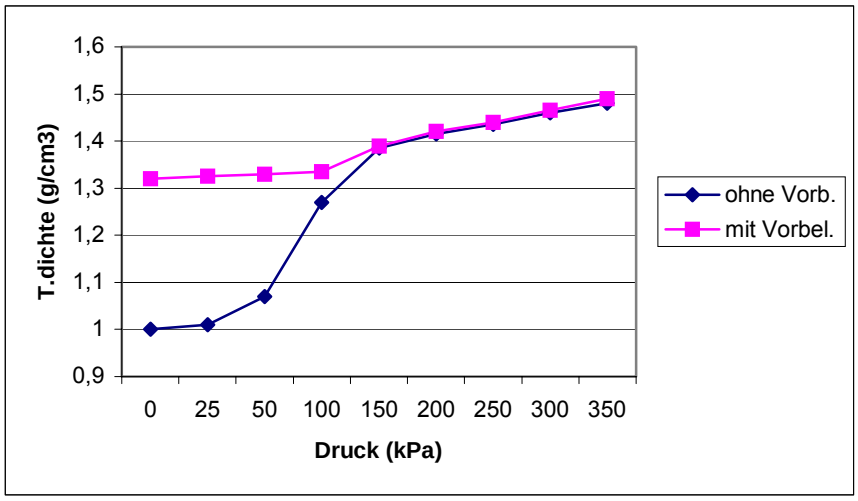


Abbildung 8: Setzung eines unverdichteten Bodens im Vergleich zu einem vorverdichteten Boden (Bodenart Lu, pF 2,5, gestörte Proben)

Ein vorbelasteter Boden kann höhere Druckbelastungen abstützen als ein nicht vorbelasteter (Abb. 8). Die Vorbelastung wird aus dem Druck-Setzungsverhalten des Bodens abgeleitet. Im Versuch mit gestaffeltem Druck zeigt die Setzung ein dreiphasiges Verhalten .(Abb. 9). In der ersten Phase erfolgt keine bzw. eine minimale Setzung. Diese Phase ist die Vorbelastungsphase, d.h. die Drücke übersteigen nicht die durch frühere Belastungen und Eigensetzungen erworbenen Widerstandskräfte des Bodens.

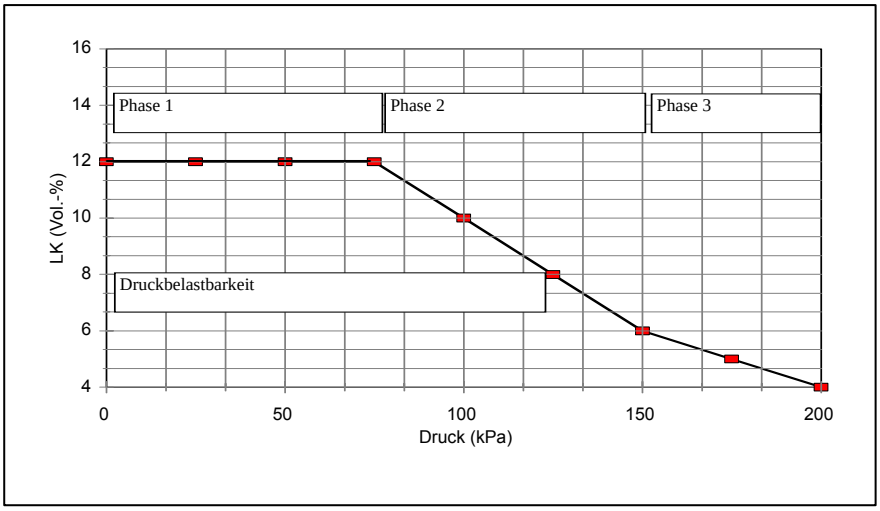


Abbildung 9: Phasen der Drucksetzung von Böden und Ableitung der Druckbelastbarkeit

In der zweiten Phase setzt eine deutliche Setzung ein. Es beginnt die Erstbelastungsphase mit einem linearen Abschnitt.
Diese Linearität ist auf die Kompression der Grobporen I zurückzuführen. Die dritte Phase ist vom Abflachen der Setzungskurve gekennzeichnet. Sie resultiert aus der Kompression der engeren Grobporen II und es beginnt die Kompression der Mittelporen. In dieser Phase treten Unterschiede zwischen Kurzzeit- und Dauerbelastung auf.
Bei Belastung entstehen Porenwasserdrücke, die den Boden bei Entlastung zurückdehnen, d.h. eine elastische Verformung verursachen und die das Porenvolumen weitgehend stabilisieren. Bei Kurzeitbelastung reicht die Zeit nicht zum Abbau des Porenwasserdruckes aus. Bei Dauerbelastung bauen sich die Porenwasserdrücke unter Kompression der Poren allmählich ab (Abb. 10).

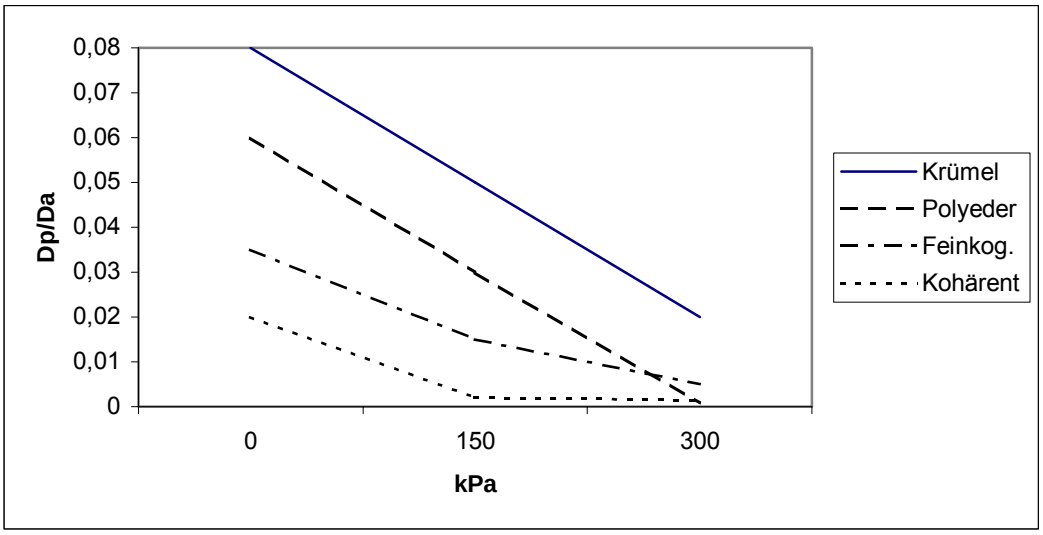


Abbildung 10: Veränderung der Diffusionsleistung der Grobporen unterschiedlicher Gefüge nach Druckbelastung (ökol. Mindestforderung rel. Diff.koeff. 0,02)

Der Porenwasserdruck verhindert zwar eine Volumenabnahme, nicht aber eine Umorganisation des Gefüges (Knetung). Im Ergebnis der Knetung vermindert sich die Kontinuität der Poren mit der Folge geringerer Durchlässigkeit.
Die Knetung setzt bei hohem Bodenwassergehalt bereits bei sehr geringem Bodendruck ein. Bei Böden mit geringer Gefügeentwicklung, typisch sind Tonböden, bleibt die Knetungsgefahr sogar bei anteiliger Abtrocknung bestehen.
Bei Dauerbelastung bauen sich die Porenwasserdrücke ab und komprimieren die wassergefüllten Grobporen und einen Teil der Mittelporen.
Aus diesem Setzungsverhalten werden unterschiedliche Strategien zum Schutz des Bodens vor Schadverdichtung abgeleitet. Das Vorbelastungsverfahren (DVWK-Merkblatt 234; 1995) orientiert auf die Begrenzung des Bodendruckes auf den Vorbelastungsbereich. Damit zielt das Verfahren auf den Erhalt des gegebenen Gefüges ab.
Diese Zielstellung ist unter bestimmten Gefügebedingungen nachteilig. Die Vorbelastung lockerer Gefüge kann sehr niedrig sein. Der Erhalt eines solchen Gefüges wäre nur mit hohem Aufwand möglich, ohne dass damit ein wirtschaftlicher und wie zuvor dargestellt, auch kein ökologischer Vorteil verbunden wäre. Andererseits sollte ein bereits schadverdichteter Boden, der eine entsprechend hohe Vorbelastung besitzt, nicht mit gleichem Druck belastet werden, weil Regenerationsvorgänge unterbrochen werden könnten. So ist zu beobachten, dass auf entsprechenden Böden Vertikalpo-

ren zwar angelegt, aber mit den folgenden Belastungen wieder zerstört (zerschert) werden (PAUL 2002).
Deshalb wurde das Vorbelastungskonzept so abgewandelt, dass lockere Böden begrenzt verdichtet werden können, wobei der für die Funktionsfähigkeit notwendige Grobporenanteil erhalten bleibt. Schadverdichtete Böden werden dagegen nicht mit dem nach der Vorbelastung möglichen, sondern nur mit dem Druck entsprechend der Druckbelastbarkeit im intakten Zustand. Die Druckbelastbarkeit wird innerhalb der Phase 1 an dem Punkt im linearen Verformungsabschnitt abgeleitet, der den Erhalt der Mindestfunktionen sichert.
Das ermöglicht die Nutzung der Gleichungen für die Bestimmung der Vorbelastung nach LEBERT (1989) (siehe auch DVWK-MERKBLATT 234, 1995), wobei der Vorbelastungsabschnitt in den linearen Abschnitt der Setzungskurve verschoben wird. Die Verschiebung wird erreicht, indem nicht mit dem Messwert für die Eingangsparameter, sondern dem Wert, den das Zielgefüge hätte, gerechnet wird.
Die mit diesen Formeln berechneten Ergebnisse stimmen gut mit Drucksetzungsmessungen (Messung mit fünfmaliger Kurzzeitbelastung mit allmählicher Be- und Entlastung an ungestörten Thüringer Böden) überein (Tab. 4)

Tabelle 4 : Schätzwerte der Vorbelastung im Vergleich zu Messwerten im uniaxialen Druckversuch

Bodenform/Standort	Bodentiefe (cm)	Vorbelastung (kPa)	
		Schätzung	Messung
Braunerde-Tschernosem	30...40	160	141
Fahlerde aus Löß	0...30	130	125
	30...40	205	175
Braunerde aus Buntsandstein	0...30	90	90
	30...40	127	130
Pelosol aus Buntsandstein	0...25	75	70

Die Formeln sind für zwei Saugspannungen, pF 1,8 und 2,5, erstellt worden. Die Eingangsparameter für die Formeln sind in der Tabelle 5 zusammengestellt. Für trockenere Bedingungen wird die Berechnung mit den Formeln für pF 2,5 vorgenommen unter entsprechender Abänderung der Werte für die Luftkapazität und die nutzbare Feldkapazität.
Die Druckbelastbarkeit kann so für die gebietstypischen Bodenwassergehalte zum Zeitpunkt der Arbeiten eingeschätzt werden. Damit ist das Verfahren sowohl zur Abschätzung der potentiellen Belastbarkeit wie auch der aktuellen Befahrbarkeit geeignet.

Tabelle 5: Parameter zur Berechnung der Vorbelastung

Symbol	Parameter	Eingabegröße	Norm
PV	Vorbelastung	kPa	
ρ_t	Trockenrohdichte	gcm^{-3}	DIN ISO 11272
nFK	nutzbare Feldkapazität	Vol.-%	DIN ISO 11274, MB VDLUFA Bd. 1 C.4.3.1
org.S.	Organische Substanz	Masse-%	DIN ISO 10694
kf	Wasserleitfähigkeit, gesättigt	md^{-1}	DIN 19683-9, MB VDLUFA Bd 1 C5.1.1

WP	Äquivalentwelkepunkt	Vol.-%	DIN ISO 11274, MB VDLUFA Bd.1 C4.3.2
c	Kohäsion	kPa	Scherversuch BA Pero 1994 bzw. Tab.
ϕ	Winkel der inneren Reibung	°	Scherversuch BA Pero 1994 bzw. Tab.

Die zur Berechnung der Druckbelastbarkeit erforderlichen Parameterwerte ergeben sich durch Umrechnung des Messwertes der Trockenrohdichte nach folgender Formel:
ρ_t = (100-LK_{krit})/(WM+100/Substanzdichte) und mit dieser Trockenrohdichte das Porenvolumen und die entsprechenden Saugspannungs-Bodenwasserverhältnisse.

3.3 Formeln zur Schätzung der Vorbelastung (LEBERT 1989; DVWK-MERKBLATT 234; 1995)

Boden bei pF 1,8

Bodenart S, Su, Slu, Sl, St2:
$PV = 438{,}1*\rho_t - 0{,}0008\ (\phi)^3 - 3{,}14*WP - 0{,}11*(nFK)^2 - 465{,}60$

Bodenart St3, Ls:
$PV = 169{,}30*\rho_t - 29{,}03*\sqrt{org.S.} + 6{,}45*kf + 32{,}18*\lg c - 9{,}44*\phi + 27{,}25*\sin WP + 119{,}74*\lg nFK + 19{,}51$

Bodenart U, Us, Uls, Ul2, Ul3:
$PV = 374{,}15*\rho_t - 4{,}10*org.S. + 3{,}38 * LK - 1{,}58*(\sqrt{kf})^{-1} + 1{,}79*c + 1{,}09*WP - 6{,}37*\phi^{2/3} + 0{,}088*(nFK)^2 - 472{,}77$

Bodenart Lu, Ul4, Lt2, Ts4:
$\lg PV = 0{,}843*\rho_t - 0{,}544*kf^{1/2} - 0{,}022*WP - 7{,}03*c^{-1} + 0{,}024*\phi - 0{,}015*nFK + 0{,}725$

Bodenart Lt3, Ltu, Lts, Ts2, Ts3, Tl, T:
$PV = 4{,}59*\rho_t - 1{,}02*org.S. - 16{,}43 * kf^{1/3} + 0{,}31*WP - 1{,}57*nFK + 3{,}55*c + 1{,}18*\phi - 18{,}03$

Boden bei pF 2,5

Bodenart S, Su, Slu, Sl, St2:
$PV = 410{,}75*\rho_t - 0{,}0007\ (\phi)^3 - 3{,}41*WP - 0{,}35*(nFK)^2 - 384{,}71$

Bodenart St3, Ls:
$PV = 89{,}50*\rho_t - 23{,}99*\sqrt{org.S.} - 2{,}89*kf + 125{,}76*\lg c - 1{,}14*\phi + 26{,}90*\sin WP - 51{,}46*\lg nFK - 77{,}25$

Bodenart U, Us, Uls, Ul2, Ul3:
$PV = 460{,}71*\rho_t - 20{,}33*org.S. + 9{,}08 * LK - 2{,}38*(\sqrt{kf})^{-1} + 2{,}86*c + 4{,}50*WP - 20{,}96*\phi^{2/3} + 0{,}304*(nFK)^2 - 610{,}62$

Bodenart Lu, Ul4, Lt2, Ts4:
$\lg PV = 0{,}844*\rho_t - 0{,}456*kf^{1/2} - 0{,}026*WP + 12{,}88*c^{-1} + 0{,}003*\phi - 0{,}016*nFK + 1{,}419$

Bodenart Lt3, Ltu, Lts, Ts2, Ts3, Tl, T:
$PV = 70{,}65*\rho_t - 0{,}55*org.S. - 7{,}01 * kf^{1/3} + 1{,}32*WP - 1{,}08*nFK + 1{,}72*c + 1{,}05*\phi - 100{,}94$

3.4 Bestimmung der Parameter ϕ und c

Die Werte für ϕ können aus der Tabelle 6 und 7 (Zuordnung der Dichteklassen), die für c aus den Abbildungen 11 und 12 (Grundlage sind Messungen der Aggregatstabilität bei entsprechendem Wassergehalt) für den anzunehmenden Bodenfeuchtegehalt und Gefügeformen abgeleitet werden.

Tabelle 6: Werte für den Parameter ϕ (aus LEBERT 1989)

Textur	pF	Gefügeform	Dichteklasse	ϕ	Standardabw.
S	1,8			31,6	2,64
	2,5			33,8	2,29
Sl2; Sl3	1,8			39,0	1,97
	2,5			42,9	1,50
Sl4	1,8			37,0	2,21
	2,5			39,6	2,70
Ls	1,8	Polyeder	2 – 4	35,2	1,21
	2,5	Polyeder	2 – 4	36,8	1,55
	1,8	Subpolyeder	2 – 4	37,2	0,97
	2,5	Subpolyeder	2 – 4	39,1	1,42
Ut4	1,8 + 2,5			41,1	1,32
Ul3, Ul4	1,8 + 2,5			33,3	2,70
Lt2, Ts4	1,8 + 2,5	Polyeder	2 – 3	27,9	3,64
	1,8 + 2,5	Polyeder	4	29,1	2,96
	1,8 + 2,5	Subpolyeder	1 – 2	27,5	3,13
	1,8 + 2,5	Subpolyeder	3 – 4	33,7	1,96
	1,8 + 2,5	Polyeder	3 - 4	35,6	3,34
Lt3, Ltu, Lts, Ts2, Ts3, Tl, T	1,8 + 2,5	Kohärent	2	11,7	2,30
	1,8 + 2,5	Prismen	3	17,5	1,98
	1,8 + 2,5	Polyeder	1 – 3	24,3	2,55
	1,8 + 2,5	Polyeder	4	29,2	2,39
	1,8 + 2,5	Subpolyeder	1 – 2	22,0	0,67
	1,8 + 2,5	Subpolyeder	3	29,5	2,21
	1,8 + 2,5	Subpolyeder	4	35,0	1,83
	1,8 + 2,5	Krümel	1	25,5	1,78

Tabelle 7: Zuordnung der Trockenrohdichten zu den Dichteklassen (Quelle: AG Boden, Bodenkundliche Kartieranleitung 1994)

Dichteklasse	Stufe	Trockenrohdichte (gcm^{-3})
1	Sehr gering	<1,25
2	Gering	1,25 – 1,45
3	Mittel	1,45 – 1,65
4	Hoch	1,65 – 1,85
5	Sehr hoch	> 1,85

Für Saugspannungen entsprechend pF 1,8 sind die Werte für Kohäsion und Winkel der inneren Reibung der Tabelle 2 der Vornorm DIN V 19688 „Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit aus der Vorbelastung“ zu entnehmen.

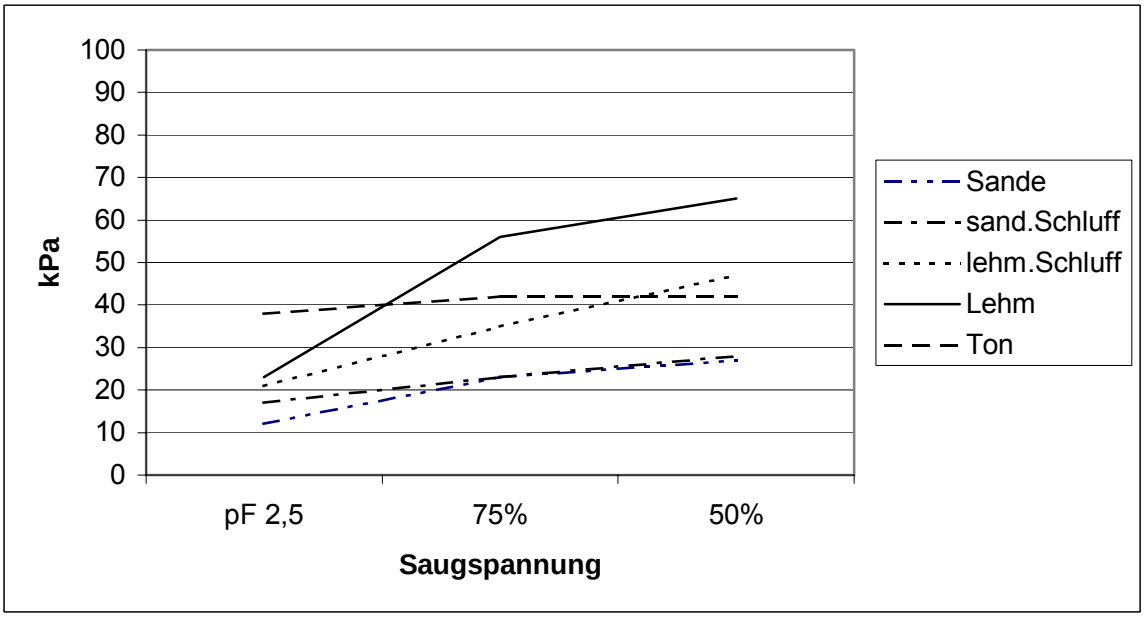


Abbildung 11: Parameter c für unterschiedliche Saugspannungen der Gefügeformen Einzelkorn, Kohärent, Polyeder

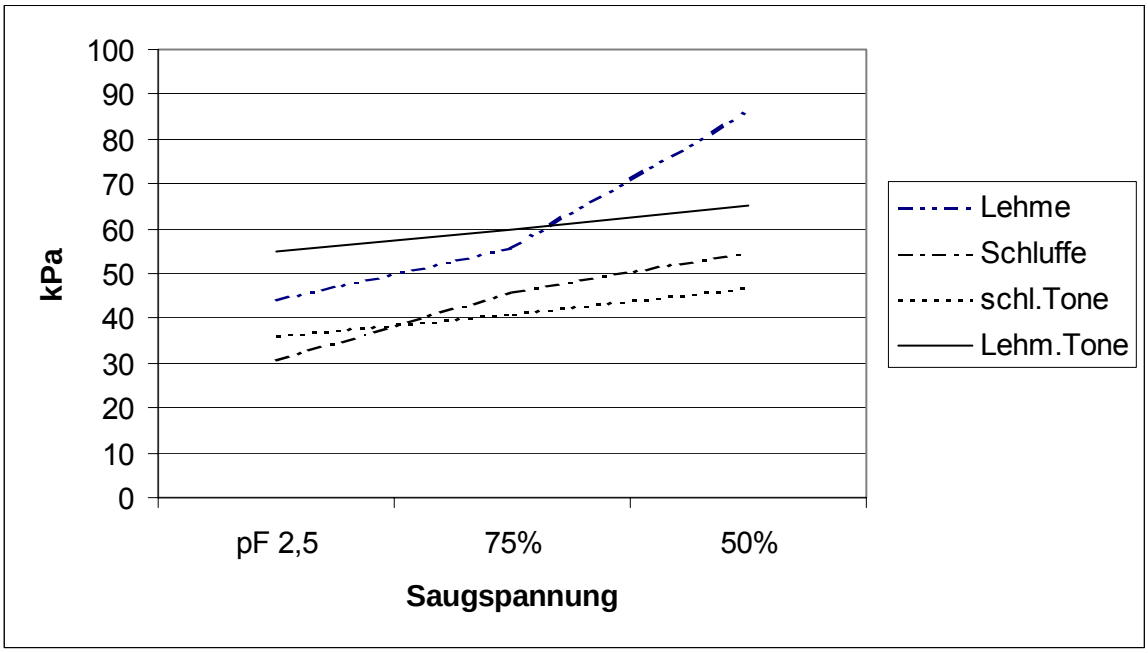


Abbildung 12: Parameter c für unterschiedliche Saugspannungen der Gefügefomen Krümel, Schwamm, Bröckel

3.5 Einstufung der Druckbelastbarkeit

Die DIN V 19688 sieht eine Einstufung der Vorbelastung in 5 Klassen vor. Angepasst an die Druckbelastbarkeit bei pF 2,5 ergibt sich folgende Einschätzung (Tab.8).

Tabelle 8: Einstufung der Druckbelastbarkeit (DIN V 19688)

Stufe	Benennung	Vorbelastung in kPa
1	sehr gering	unter 90
2	gering	90 bis unter 110
3	mittel	110 bis unter 130
4	hoch	130 bis unter 150
5	sehr hoch	größer gleich 150

3.6 Verfahrensspezifische Einschränkungen (siehe auch o.g. Vornorm)

Die so bestimmte Druckverträglichkeit beurteilt vorrangig das Setzungsverhalten. Das Scherverhalten wird mit dem Druckversuch wegen der behinderten Seitendehnung nicht erfasst. Mit Berücksichtigung des Mindestluftvolumens werden aber die Eingangsparameter für Böden und Bodenzustände mit geringem Scherwiderstand so gestaltet, dass das Schätzverfahren Druckbelastbarkeit die hohe Empfindlichkeit dieser Böden nachvollzieht. Damit unterscheidet es sich wesentlich von den Verdichtungsgefährdungsklassen (PETELKAU 2003), die sich nur auf die Bodenart und ihre Volumenänderung beziehen und Gefügewirkungen und Scherfolgen nicht berücksichtigen. Die Verdichtungsgefährdungsklassen weisen deshalb eine zunehmende Stabilität mit dem Tongehalt aus. Mindestens für Tonböden im bearbeitungsfähigen Zustand widerspricht das den praktischen Erfahrungen.
Das Verfahren gilt nur für Mineralböden mit weniger als 15 Masse-% Humus (VORNORM DIN 19688)
Es gilt nicht für skelettreiche Böden. Steine erhöhen die Druckstabilität. Für skelettreiche Böden sind analog der Vorschläge der DIN V 19688 Zuschläge zu den Schätzwerten der Druckbelastbarkeit vorzunehmen (Tab. 9):

Tabelle 9: Zuschläge zur Druckbelastbarkeit steinhaltiger Böden

Skelettgehalt Volumenanteile in %	Zuschlag kPa
10 bis unter 25	20
25 bis unter 50	40
50 bis unter 75	60
größer gleich 75	80

3.7 Beispiel für die Berechnung der Druckbelastbarkeit aus der Vorbelastung

Für die Berechnung der Druckbelastbarkeit werden alle von der für die Bodenart und das Gefüge zutreffenden Formel geforderten Daten für den Zustand bei Feldkapazität (pF 1,8) ermittelt bzw. diversen Unterlagen entnommen. Die gegebene Trockenrohdichte wird auf den möglichen Wert bei einer Luftkapazität von 8 bzw. 5% umgerechnet und daraus das Porenvolumen und in Abhängigkeit davon die Eingangsparameter nFK und WP abgeleitet.

Tabelle 10 :Beispiel für die Berechnung der Druckbelastbarkeit eines Braunerde-Tschernosem (Bodenart Lu)

Druckbelastbarkeit Krume				Druckbelastbarkeit Unterboden		
	Wert bei Wassergehalt					
	pF 2,5	75%	50%	pF 2,5	75%	50%
Mess- bzw. Schätzwerte						
FK M.-%	23,6	23,6	23,6	24,5	24,5	24,5
Subst.dichte	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
WP V%	18	18	18	22,7	22,7	22,7
Tr.rohdichte	1,39	1,39	1,39	1,46	1,46	1,46
Org. Subst.	1,9	1,9	1,9	1	1	1
kf	1	1	1	0,3	0,3	0,3
C	27	27	31	27	27	31
Φ	36	38	39	37	37	37
Berechnete Werte für ökol. Funktionsgefüge (LK 8 bzw. 5% bei pF 1,8 und kf 10 cm/d)						
PV gesamt	43,40	43,40	43,40	42,40	42,40	42,40
FK V.-%	35,40	26,55	17,70	37,40	28,05	18,70
LV	8,00	16,85	25,70	5,00	14,35	23,70
Tr.rohd.	1,50	1,50	1,50	1,53	1,53	1,53
WP	19,42	19,42	19,42	23,73	23,73	23,73
NFK	14,38	6,41	-1,55	12,30	3,88	-4,53
Ergebnis						
Belastbarkeit	**108**	**130**	**206**	**108**	**151**	**249**

4. Einschätzung der Druckbelastung

Die Auslösung einer Verdichtung erfolgt vom Bodendruck der den Boden belastenden Fahrwerke und zwar dann, wenn dieser Druck die bodeneigenen Kräfte, d.h. die Druckbelastbarkeit, übersteigt.
Der Bodendruck entsteht zunächst an der Kontaktfläche Fahrwerk/Boden. Der Kontaktflächendruck wird nach der Gleichung Druck = Kraft/Fläche aus der Radlast dividiert durch die Aufstandsfläche der Reifen bzw. Gleisbänder berechnet.
Die Radlast ergibt sich für Anhängefahrzeuge und selbst fahrende Erntemaschinen aus der Gesamtmasse, ggf. abzüglich der Stützlast, multipliziert mit der Lastverteilung auf die Achsen dividiert durch die Anzahl der Räder pro Achse.
Bei Traktoren entstehen zuzüglich zur Eigenmasse Belastungen der Treibachse durch Anbaugeräte, die Stützlast von Aufsattelgeräten und vertikale Kraftvektoren durch gezogene Geräte, die aus dem entstehen. Einfluss auf die Hinterachskraft Fh haben Masse des Traktors, Lage des Schwerpunktes, Größe und Richtung der Zugkraft, Größe des Fahrwiderstandes und Neigung der Fahrbahn (BLUMENTHAL, 1978).

$$Fh = \frac{m_T ga + F_{Zz} * (l + d)}{l} \quad [N]$$

$m_T g$ = Gewichtskraft des Traktors [N]
F_{Zz} = Kraftvektor aus dem Zugwiderstand in Richtung Boden [N]
a = Abstand der Vorderachse zum Schwerpunkt [m]
l = Achsabstand [m]
d = Schwerpunktverschiebung beim Aufbäumen des Traktors [m]

Die Belastung der Treibachse nimmt mit dem Zugwiderstand zu. Für die Kalkulation kann vereinfachend Belastung und Zugwiderstand gleichgesetzt werden. Sie berechnet sich dann für das Pflügen als

F_{Zz} = k*b*t (kN)
k = spezifischer Zugwiderstand ($kN*m^{-2}$)
b = Arbeitsbreite (m)
t = Arbeitstiefe (m)

Der spezifische Zugwiderstand ist bodenabhängig

Sand und lehmiger Sand	20 - 30
Sandiger Lehm	40 - 50
Lehm	60 - 80
Schwerer Lehm und Ton	90 - 150

Für die Arbeit mit nicht wendenden Werkzeugen werden 66 % der Zugwiderstandswertes für das Pflügen eingesetzt (HEYDE U.A. 1963).
Die Belastung der Treibachse durch Anbaugeräte ergibt sich aus der Masse der Anbaugeräte einschließlich Beladung und einem Betrag aus der Verlagerung des Traktorschwerpunktes. Dieser Betrag ist vom Abstand des Anbaugerätes vom Traktorschwerpunkt abhängig. Für die Schätzung reicht ein Zuschlag von 30% der Masse des gefüllten Gerätes aus.
Für die Berechnung der Aufstandsfläche existieren mehrere Verfahren. GISI UND GRUNDER (1999) leiten eine Beziehung zwischen Reifeninnendruck und Kontaktfläche aus Spannungsmessungen mit der Bollingsonde ab. Bei Anwendung der Formel ergeben sich jedoch kaum Einflüsse der Reifenabmessungen.
Eine Formel unter Einbeziehung von Reifenbreite und Umfang ergibt für Traktorreifen nahezu eine Kreisfläche, für Geräte- und Anhängerreifen wird damit eine sehr kleine Fläche ausgewiesen (Abb. 13).

Empfohlen wird auch die Gleichsetzung des Reifeninnendruckes zuzüglich eines anteiligen Zuschlages für die Karkassensteifigkeit als Kontaktflächendruck (KÖLLER 1989). Bei Anwendung dieser Berechnung ist zu beachten, dass der Zuschlag mit Abnahme des Reifeninnendruckes ansteigen muss, um die physikalische begründete Bedingung Druck = Kraft dividiert durch Fläche zu erfüllen (BLUMENTHAL 1978).
Für Schätzzwecke bewährt sich die Berechnung der Aufstandsfläche als Kreis mit der Reifenbreite als Durchmesser (HAMMEL, 1997; KOOLEN; KUIPERS 1989).

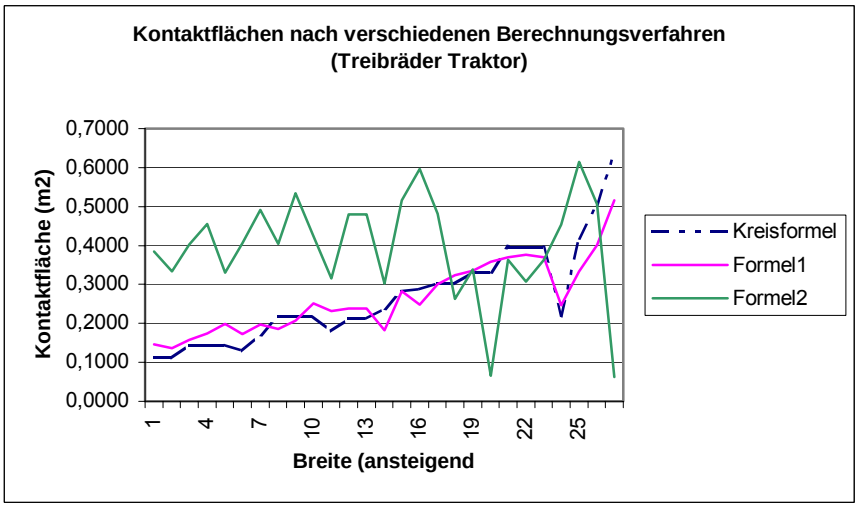


Abbildung 13: Kontaktflächen nach unterschiedlichen Berechnungsverfahren (Formel 1: F= 0,27*Durchmessewr*Breite, Formel 2 = Regression aus Innendruck und Bollingsondenmessung

Die Kreisfläche stellt eine gute Näherung dar. Sie ergibt sich aus den Angaben der Reifenhersteller für den vorgeschriebenen Innendruck bei Ausnutzung der Tragfähigkeit Abb. 14), wobei sich für Reifen eines Herstellers eine Standardabweichung von 5 kPa und für Reifen verschiedener Hersteller eine von 20 kPa ergibt.

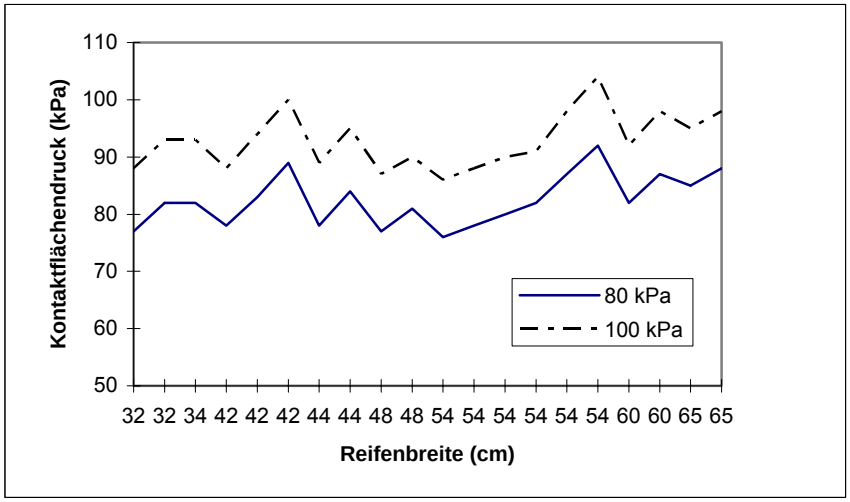


Abbildung 14: Kontaktflächendruck der Radial AS-Breitreifen der 70er Serie (Pirelli TM 700) bei einem Innendruck von 80 bzw. 100 kPa und Auslastung der Tragfähigkeit

Bei nicht an die Tragfähigkeit angepasstem Reifeninnendruck werden die Kontaktflächendrücke höher. Zu hoher wie zu niedriger Druck wölben den Reifen und verringern so die Aufstandsfläche (KOOLEN, KUIPERS 1989, DVWK 2002) .
Bei Gleisbändern wird die Fläche aus der Breite des Bandes und dem Abstand zwischen den äußeren Stützrädern berechnet. Da bei der Zugarbeit einzelne Gleisbandanteile stärker belastet werden, sind bei Vollketten von der berechneten Fläche 30% abzuziehen.

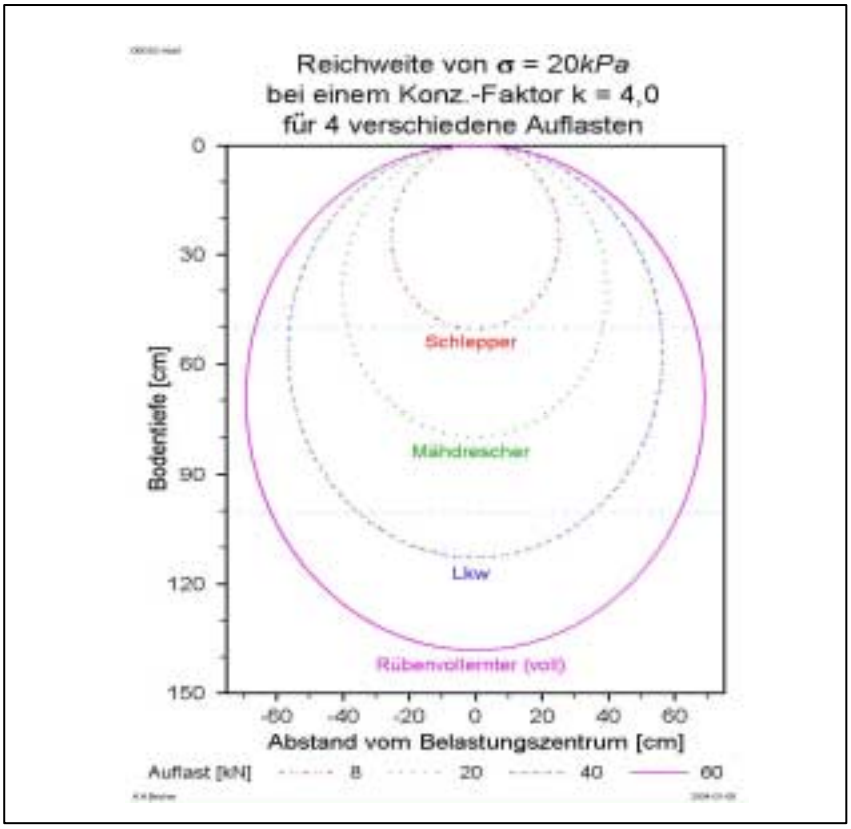


Abbildung 15: Verteilung der Bodenspannung unter landwirtschaftlichen Geräten (aus Horn 2004)

Der Druck wird im Boden räumlich verteilt, indem er die Körner bzw. Aggregate beaufschlagt und über vorhandene bzw. nach deren Umlagerung geschaffene Kontakte in tiefere Bodenschichten verteilt wird. Dabei beeinflusst der Bodenzustand diese Verteilung indem er die Spannungen mehr oder weniger eng um die Lastachse als vertikale Fortsetzung der Kontaktfläche konzentriert. Die Spannungsverteilung entspricht nach dem überwiegend angenommenen Modell nach NEWMARK (zit. in DVWK 1999) dem Bild einer Zwiebel (Abb. 15).
Die Spannung in einer bestimmten Bodentiefe wird aus dem Kontaktflächendruck mit der Formel ((HORN 1994):

$$\sigma_z = \sigma_0 * \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\langle\langle R/Z\rangle^2 + 1\rangle^{vk}}}\right) \quad [\text{kPa}]$$

σ_z = Bodendruck in kPa in der gewählten Bodentiefe z in cm
σ_0 = Druck der Reifenkontaktfläche (kPa)
R = Radius der Reifenkontaktfläche (berechnet als Reifenbreite:2) (cm)
Z = Bodentiefe (cm)
vk = Konzentrationsfaktor (Faktor für die Konzentration der Spannung um die Lastachse; 3 für trockene, feste Böden, 4 für feste Böden um Feldkapazität, 5 für nasse und lockere Böden) berechnet.

5. Schadverdichtungsgefährdung

Die Bodenspannung wird mit der Druckbelastbarkeit verglichen. Dazu wird ein Quotient aus dem Bodendruck (Divisor) und der Druckbelastbarkeit (Dividend) gebildet. Der Vergleich sollte für die untere Krume und den Unterboden vorgenommen werden. Beide Schichten sind wichtig für die Durchwurzelung und die Versorgung des Pflanzenbestandes und werden im Falle der unteren Krume in der Vegetationszeit und bei pflugloser Bewirtschaftung auch dauerhaft und im Falle des Unterbodens auch mit Pflugwirtschaft nicht mechanisch gelockert (Tieflockerung ist nur bei extremer Verdichtung zu empfehlen, weil der Aufbruch der Verdichtungsschicht die Verdichtungsempfindlichkeit (siehe Kurve Polyeder in Abb. 7) erhöht und das verdichtete Gefüge ungünstigere Eigenschaften (siehe Abb. 10) erzeugt. Ein Schadverdichtungsrisiko besteht, wenn der Quotient einen Wert >1 erreicht. Für die untere Krume kann eine Überschreitung um 25% wegen der möglichen Regenerierungsvorgänge zugelassen werden.

6. Anwendungsergebnisse des Verfahrens

6.1 Karte der Druckbelastbarkeit der Böden Thüringens

Die Basis der Karte sind die Bodenübersichtskarte von Thüringen 1: 200 000 (Thüringer Landesanstalt für Geologie, 1997) und Profiluntersuchungen der entsprechenden Bodentypen bzw. –formen (insgesamt 150). Für jedes der Profile wurde die Druckbelastbarkeit für die untere Krume und den Unterboden aus den physikalischen Daten für drei Bodenfeuchtegehalte (entsprechend pF 2,5 sowie 75% und 50% dieses Bodenfeuchtegehaltes berechnet. Die Ergebnisse sind bodenformbezogen in tabellarischer Form zusammengefasst. Für die Verarbeitung in einer Karte wurden 9 Druckbelastbarkeitsklassen gebildet und diese den kartierten Bodentypen zugeordnet (Abb.16).
Die Karte liefert damit Übersichtsinformationen für ein großes Gebiet. Eine Vergrößerung des Maßstabes verbessert nicht die Genauigkeit. Für die Anwendung im Rahmen eines Betriebes ist der Zweck entscheidend. Für die Beschaffung bodenschonender Technik ist die Übersicht ausreichend, für feldkonkrete Anwendungen sollte der Bodentyp aus großmaßstäbigen Karten oder durch Feldansprache ermittelt und die Druckbelastbarkeit der Tabelle entnommen werden.

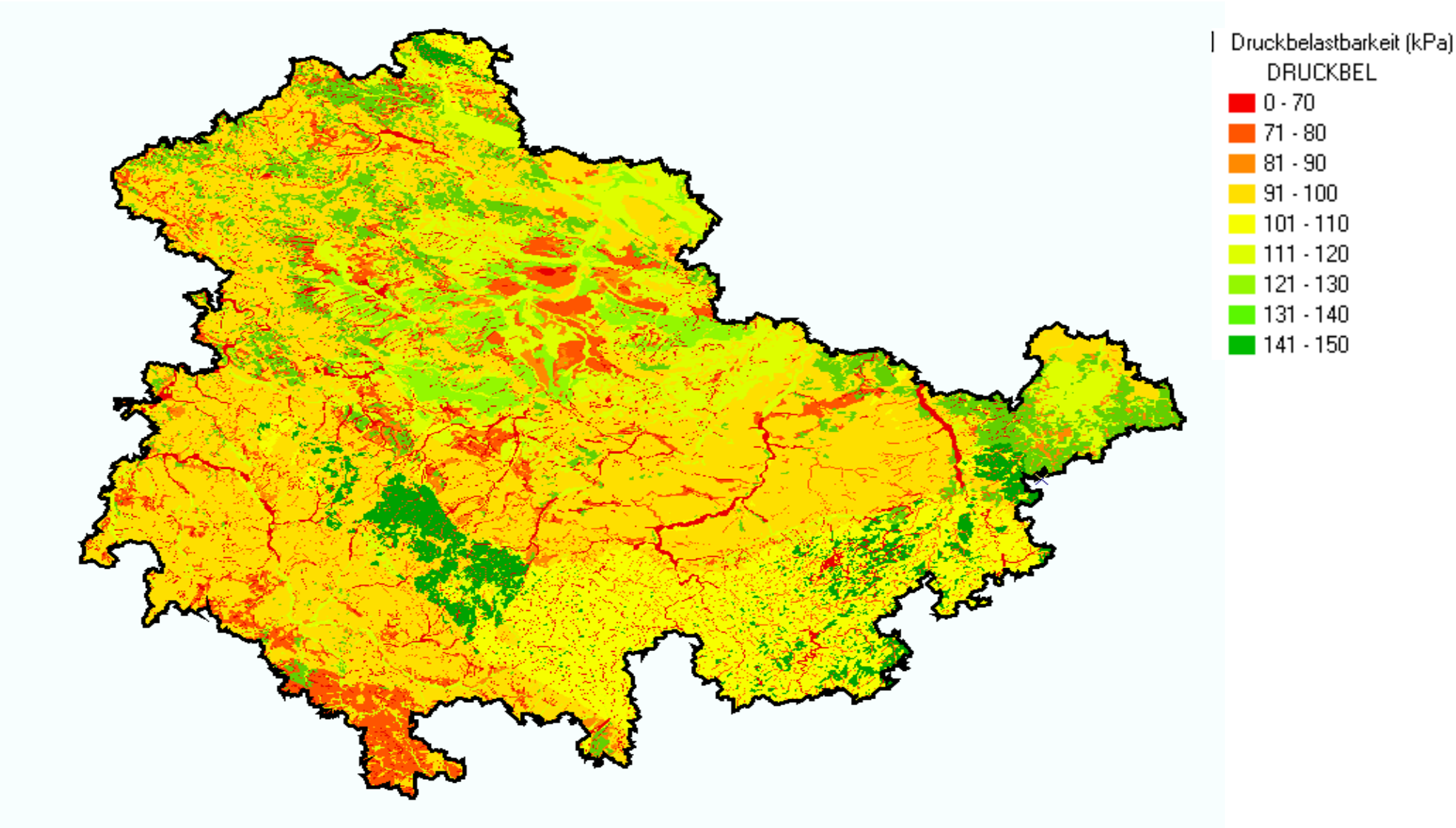


Abbildung 16: Karte der Druckbelastbarkeit der Böden Thüringens (Bodenfeuchtegehalt bei pF 2,5)

6.2 Test des Verfahrens im Bodenmonitoring

Die Bodendauerbeobachtung wurde im Jahre 1992 begonnen. Die Gefügebeobachtung erfolgt auf 10 Dauerbeobachtungsflächen unter Acker und 4 unter extensiv bewirtschaftetem Grünland.

Auf den Flächen werden im 2-jährigen Abstand in vier um die Fläche rotierenden Profilen Volumenproben in der oberen Krume (4-10 cm), der unteren Krume (15-21 cm), der Krumenbasis (28-34 cm) und dem krumennahen Unterboden (45-51 cm) entnommen und im Labor die genannten Parameter bestimmt.

Für die Ackerstandorte wurde die Druckbelastbarkeit (aus der Karte der Druckbelastbarkeit) mit der Druckbelastung durch die Technik der bewirtschaftenden Betriebe verglichen. Es ergaben sich unterschiedliche Gefährdungen (Tabelle 11).

Tabelle 11: Schadverdichtungsgefährdung der Bodendauerbeobachtungsflächen

Standort	Mittlerer Quotient	Urteil
Brauner Auenboden	1,2	gering gefährdet
Braunerde-Tschernosem	1,2	gering gefährdet
Braunerde-Pseudogley (Schiefer)	1,1	gering gefährdet
Pseudogley (Schiefer)	1,1	gering gefährdet
Tonmergelrendzina (ob. Muschelkalk)	1,4	kritisch
Pelosol (u. Keuper)	1,7	gefährdet
Gley	2,0	gefährdet
Parabraunerde-Tschernosem	1,51	kritisch
Braunerde (u. Buntsandstein)	1,8	gefährdet
Pseudogley (u. Buntsandstein)	2,7	gefährdet

Die Gefügeentwicklung in 10 Jahren entsprach den Gefährdungseinschätzungen. Die gefügestabileren Böden erhielten sich ihren günstigen Gefügezustand. Darüber hinaus zeigte sich im Unterboden eine Tendenz der Zunahme an Grobporen. Die gleichzeitig verbesserte Durchlässigkeit dieser Schichten lässt darauf schließen, dass es sich um kontinuierliche Röhren handelt, wie sie von Bodentieren und tiefwurzelnden Pflanzen geschaffen werden. Auf dem Braunerde-Tschernosem ist pfluglos bearbeitet worden, auf gepflügten Standorten Braunerde auf Schiefer, Brauner Auenboden ist diese Tendenz abgeschwächt zu erkennen. Der Pseudogley mit Pflugwirtschaft blieb unverändert Tabelle 12).

Tabelle 12: Gefügeentwicklung auf druckstabilen Böden (schluffig lehmige Böden, Braunerde-Tschernosem, Pseudogley, Braunerde-Pseudogley, Brauner Auenboden)

Horizont [1)]	Tiefe (cm)	Beginn	nach 2	nach 4	nach 6	nach 8	nach 10 Jahren	Trend +/-	B.maß
Luftkapazität (Vol.-%)									
OK	0 - 15	15,6	13,0	14,2	16,2	15,6	19,0	+	0,50
UK	15 - 30	14,4	11,1	12,0	13,2	11,8	13,9	-	0,01
KB	30 - 40	7,6	8,0	6,9	6,7	9,4	9,3	+	0,33
UB	> 45	6,6	8,7	7,1	6,7	11,6	9,5	+	0,38
Wasserleitfähigkeit (cm/d)									
OK	0 - 15	77	52	122	524	40	199	+	0,08
UK	15 - 30	58	56	74	241	16	81	+	0,01
KB	30 - 40	25	18	10	26	26	46	+	0,42
UB	> 45	20	12	12	46	29	68	+	0,62

1) OK= regelmäßig bearbeitete obere Krume, UK = periodisch bearbeitete untere Krume, KB= Krumenbasis, UB = Unterboden

Die tonreichen Böden wiesen bereits zu Beginn der Bodenbeobachtung sehr niedrige Werte für die Luftkapazität und die Leitfähigkeit in allen Horizonten auf. Dieser ungünstige Zustand blieb erhalten. Nur zeitweilig verbesserte sich die Durchlässigkeit an der Krumenbasis und im Unterboden nach dem Anbau tiefwurzelnder Pflanzen (Raps). Die nachfolgenden Druckbelastungen führten die Böden aber wieder auf den ungünstigen Ausgangszustand zurück (Tabelle 13)..

Tabelle 13: Gefügeentwicklung auf instabilen Böden (schwachschluffig tonige Böden, Pelosol, Rendzina aus steinreichem Tonschutt des Muschelkalkes, Auengley, Parabraunerde-Tschernosem)

Horizont	Tiefe (cm)	Beginn	nach 2	nach 4	nach 6	nach 8	nach 10 Jahren	Trend +/-	B.maß
Luftkapazität (Vol.-%)									
OK	0 - 15	13,3	16,6	22,6	10,6	17,4	13,3	-	0,01
UK	15 - 30	8,4	13,6	9,6	6,2	11,2	7,1	-	0,11
KB	30 - 40	6,9	6,4	4,0	5,1	6,5	3,8	-	0,31
UB	> 45	4,9	4,1	2,5	3,4	4,2	3,1	-	0,23
Wasserleitfähigkeit (cm/d)									
OK	0 - 15	164	711	273	76	348	25	-	0,18
UK	15 - 30	9	166	50	17	59	7	-	0,11
KB	30 - 40	2	22	7	17	22	1	-	0,01
UB	> 45	1	40	8	5	1	1	-	0,18

Tabelle 14: Gefügeentwicklung auf instabilen Böden mit Einzelkorngefüge (sandig lehmige Böden, Braunerde, Pseudogley)

Horizont	Tiefe (cm)	Beginn	nach 2	nach 4	nach 6	nach 8 Jahren [1)]	Trend +/-	B.maß
Luftkapazität (Vol.-%)								
OK	0 - 15	17,8	15,7	15,7	8,2	9,8	-	0,46
UK	15 - 30	14,2	14,0	8,9	5,6	4,9	-	0,66
KB	30 - 40	8,2	7,8	6,2	4,3	4,4	-	0,43
UB	> 45	8,4	7,4	5,9	4,0	4,8	-	0,32
Wasserleitfähigkeit (cm/d)								
OK	0 - 15	184	163	137	163	90	-	0,67
UK	15 - 30	35	129	57	96	5	-	0,06
KB	30 - 40	18	51	26	61	3	+	0,03
UB	> 45	9	1193	10	74	2	-	0,06

1) Die Ergebnisse nach 10-jähriger Untersuchung liegen ab Juni 2004 vor.

Auf den Buntsandsteinböden (Tab.14) entwickelte sich das zu Beobachtungsbeginn gut durchlüftete und leitfähige Gefüge nachteilig. Vor allem im unteren Krumenraum trat eine signifikante Abnahme der Luftkapazität ein. Die Ursache ist in der über längere Zeit praktizierten flachen Bodenbearbeitung mit Pflugverzicht zu sehen, der ohne deutliche Reduzierung des Bodendruckes erfolgte. Als Folge trat auf diesen Böden eine Verdichtung des unteren Krumenraumes ein, die in der Tendenz auch tiefere Bodenschichten erfasste.

7. Zusammenfassung

Es wird ein Verfahren zur Einschätzung der Schadverdichtungsgefährdung vorgestellt. Es beruht auf dem Drucksetzungsverhalten der Böden in Abhängigkeit von ihren Material- und Gefügeeigenschaften sowie dem Bodenwassergehalt, dem der Bodendruck und seiner Verteilung im Boden gegenübergestellt wird. Das Verfahren stellt damit eine praktische Umsetzung in Thüringen des im DVWK-Merkblatt 234 (1995) beschriebenen Verfahrens dar. Es ist im langjährigen Praxisversuch überprüft worden. Die Gefügeentwicklung hat die Einschätzung der Verdichtungsgefährdung bestätigt. Das Verfahren ist somit für die Vorsorgeberatung landwirtschaftlicher Betriebe geeignet.

Anhang: Tabelle der Druckbelastbarkeit der Böden

Bodenlandschaft	Nr:	Bodentypen	Eff Wurzelt. cm	N Bod.w. mm	Bodenart	Pflugwi-derst.	Druckbelastbarkeit der Krume (kPa) bei Wassergehalt		
Böden der Küstenre-gion und Moore						kp/dm^2	pF 2,5	davon 75 %	davon 50 %
	1	Podsol aus lockeren Sanden (Podsol, Sand)	45	47	Ss	20	70	145	200
							260	300	330
	3	Kalkmarsch aus marinen Ablagerungen (Seemarsch, schluffiger Lehm)	65	123	Sl2	20	110	125	195
							120	135	195
	4	Kleimarsch aus brackigen und fluvatilen Ablagerungen (Marsch, sandig-lehmiger Schluff)	100	283	Uls	40	100	110	190
							120	135	195
	5	Niedermoor	25	129	Sl2	25	100	125	195
							85	115	140
Flusslandschaften und Niederungen	7	Gley aus lehmigen und tonigen Ablagerungen (Gley, lehmiger Ton)	65	127	Tu2	120	55	75	110
							50	75	95
	8	Gley aus lehmig-schluffigen Ablagerungen (Gley, lehmiger Schluff)	50	106	Ut4	80	120	130	170
							125	150	190
	9	Gley der sandigen Urstromtäler und Niederungen (Gley, lehmiger Sand)	45	129	Sl3, Sl4, St2	40	80	145	185
							110	170	205
	10	Pararendzina aus sandig-lehmigen Ablagerunge (Auenpararendzina, sandiger Lehm)	70	147	Ls2, Ls3, Lt3	60	100	130	165
							100	130	165
	11	Brauner Auenboden/Parabraunerde aus schschluffig-lehmigen Ablagerungen (Brauner Auenboden, schluffiger Lehm)	90	168	Lu	70	115	135	190
							120	145	195
	12	Brauner Auenboden/ Parabraunerde aus schluffig-tonigem Material (Brauner Auenboden, schluffiger Ton)	65	127	Ut4; Tu4	120	115	135	190
							120	145	195
	13	Podsol-Braunerde aus sandigen Flußablagerung (Podsol-Braunerde, Sand)		129	Ss	20	70	145	200
							260	300	330

	14	Podsol/ Gley-Podsol aus sandigen Flussablagerungen Gley-Podsol, schluffiger-lehmiger Sand)	50	94	Su2; Sl2	30	95	165	210
							145	210	250
Böden der Glazial-landschaften ein-schließlich der Terti-ärhügelländer im Alpenvorland	15	Braunerde aus lößvermischten Tertiärablagerun Gen (Braunerde, schluffig lehmiger Sand)	90	168	Sl4, Slu	50	85	145	170
							120	165	200
	16	Parabraunerde, Fahlerde, Pseudogley aus Geschiebelehm Parabraunerde (sandiger Lehm)	40	65	Ls2, Ls3	70	90	120	155
							115	155	220
	17	Braunerde aus lehmig-sandigen Ablagerungen (Braunerde, lehmiger-toniger Sand)	70	114	Sl3, Sl4,St3	50	90	150	190
							105	170	200
	18	Pseudogley aus sandigen Ablagerungen (Pseudogley, lehmiger Sand)	70	55	Slu, Ls3	60	40	90	120
							90	145	220
	19	Pseudogley aus lehmig-sandigem Geschiebemergel (Pseudogley, sandiger Lehm)	65	106	Ls3	40	110	165	210
							115	160	195
	20	Podsol-Parabraunerde, Podsol-Fahlerde aus Sanden (Podsol, Sand)	50	94	Ss	20	95	165	210
							145	210	250
	21	Fahlerde, Braunerde, Pseudogley aus sandigen Deckschichten (Pseudogley, lehmiger Sand)	45	45	Sl3; Sl4	40	90	150	190
							125	165	200
	22	Pararendzina aus sand. bis lehm. Bildungen der End-moränen (Pararendzina, sandiger Lehm)	40	65	Ls3	45	90	120	155
							115	155	220
Böden der Lößgebiete	23	Pseudogley-Braunerde aus Geschiebedecksand über Geschiebelehm (Pseudogley, lehmiger Sand)	70	55	Sl2	30	40	90	120
							90	145	220
	24	Braunerde, Pseudogley aus lehmig-sandigen lößver-mischten Ablagerungen (Braunerde, schluffiger Lehm)	75	139	Uls, Lu	70	95	165	210
							145	210	250
	25	Podsol-Braunerde , Humus-Podsol aus Sanden Podsol, lehmiger Sand)	50	94	Sl2; Sl3	40	100	140	185
							150	160	185
	26	Braunerde aus nährstoffreichen Sanden (Braunerde, lehmiger Sand)	70	144	Sl2; Sl3	40	90	145	185
							120	165	200

	27	Humus-Podsol (Podsol, Sand)	42	104	Ss	20	95	165	210
							145	210	250
	28	Lockersysrosem (Gesteinsrohboden, toniger Sand)	45	47	St2	25	90	145	190
							105	165	200
	29	Pararendzina /Braunerde aus Löß (Pararendzina aus Löß, sandig-lehmiger Schluff)	90	168	Uls	60	120	135	175
							145	180	225
	30	Tschernosem aus Löß (Tschernosem, schluffiger Lehm bis toniger Schluff)	100	216	Lu, Ut4	70	120	145	220
							145	170	250
	31	Tschernosem aus Löß und lößähnlichen Ablagerungen (Tschernosem, schluffiger Lehm bis toniger Schluff)	100	216	Lu; Ut4	70	120	155	220
							120	165	240
	32	Parabraunerde aus Löß (Parabraunerde, toniger Schluff)	115	189	Ut3, Ut4, Lu	70	140	160	200
							150	165	220
	33	Parabraunerde aus sandigen Lößdecken (Parabraunerde, sandiger Lehm)	90	168	Ls2	40	115	145	220
							145	170	250
	34	Parabraunerde aus Löß/Lößlehm über verschiedenar-tigen Gesteinen (Parabraunerde, toniger Schluff)	100	187	Ut3	75	125	145	230
							215	230	290
	35	Parabraunerde-Pseudogley aus Lößlehm (Parabraunerde, schluffiger Lehm)	70	121	Uls; Lu	70	115	145	220
							145	170	250
	36	Parabraunerde/Fahlerde aus Sandlöß (Parabraunerde, sandiger Schluff)	100	196	Uls; Us	60	90	120	160
							100	170	215
	37	Pseudogley aus Löß (Pseudogley, lehmiger Schluff)	70	121	Uls	80	140	160	225
							140	180	280
	38	Pseudogley aus basaltgrushaltigem Lößlehm (Pseudogley, lehmiger Schluff)	70	121	Uls	50	135	160	200
							150	165	220
	39	Pseudogley aus Löß (Pseudogley, toniger Schluff)	70	121	Ut3; Ut4; Lu	80	140	160	225
							140	180	280

Böden der Berg- und Hügelländer aus Festgesteinen, deren Verwitterungsmateri-al und Umlagerungs-decken	40	Rendzina (Rendzina, Tonschwarzerde schluffiger Ton)	70	75	Tu2, Tu3	150	100	110	115
							145	145	145
	41	Braunerde-terra fusca aus Umlagerungsprodukten von Kalksteinen (Braunerde, Terra fusca schluffiger Ton)	70	75	Tu2	150	75	90	95
							125	130	135
	42	Pelosol-Braunerde aus Mergel und Tonsteinen (Pelosol , stark schluffiger Ton)	90	102	Tu3	100	95	105	105
							144	210	255
	43	Braunerde aus Mergel (Braunerde aus Kalkmergel, toniger Lehm)	85	119	Lt3; Tu3; Tu4	130	105	115	115
							130	165	190
	44	Braunerde aus basischen magmatischen Gestei Nen (Braunerde aus Basalt, schluffiger Lehm)	80	106	Lu, Uls	70	145	150	190
							170	195	235
	45	Braunerde aus sauren magmatischen Gesteinen (Braunerde aus Gneis, lehmiger Sand)	50	82	Ss, Sl2, St2	30	95	165	210
							145	210	250
	46	Braunerde aus lößvermischten Verwitterungsprodukten (Braunerde aus Lößlehm, toniger Lehm)	90	168	Tu3, Lt2, Lt3	90	100	120	140
							115	145	175
	47	Podsol-Braunerde aus sauren magmatischen und me-tamorphen Gesteinen (Braunerde aus Granit, lehmiger Sand)	60	75	Sl4	30	95	110	130
							105	125	170
	48	Braunerde aus Schluff- und Tonsteinen (Braunerde aus Buntsandstein, toniger Lehm)	70	109	Lt3	90	95	110	130
							95	130	150
	49	Braunerde aus Ton- und Schluffschiefer (Braunerde aus Grauwacke und Schiefer, sandiger Lehm)	70	109	Ls2	70	100	130	165
							95	130	145
	50	Podsol-Braunerde aus harten Ton- und Schluffschie-fern (Braunerde aus Schiefer, lehmiger Sand)	50	82	Sl3	50	95	110	130
							105	125	170
	51	Braunerden aus sandigem Material (Braunerde aus sandigem Keuper, lehmiger Sand)	45	47	Ss, Sl2, St2	30	95	165	210
							145	200	250

	52	Rendzina, Braunerde-Rendzina aus schluffig-tonigen Umlagerungen (Rendzina aus tonigem Schluff)	50	80	Tu3, Ut4	90	100	125	175
							120	140	195
	53	Braunerde-Podsol aus basenarmen Sandsteinen (Podsol aus Buntsandstein, lehmiger Sand)	60	97	Sl2	30	95	165	210
							145	200	250
	54	Pseudogley aus schluffigem Material Pseudogley aus Schiefer mit Lößeinfluß, schluffiger Lehm bis lehmiger Schluff)	75	124	Lu, Uls	70	145	150	190
							170	195	235
	55	Parabraunerde, Fahlerde aus schluffigem Mate rial (Parabraunerde, lehmiger Schluff)	75	139	Lu, Uls	70	135	150	185
							175	200	240
	56	Rendzina, Ranker aus Kalk-, sand-, Schluff- u. Ton-steinen in engräumigem Wechsel (Rendzina, schluffiger Ton)	45	81	Tu2	120	100	110	115
							145	145	145

Grundlagen :
Auswahl der Leitbodentypen
Hydrogeologischer Atlas von Deutschland 2001; Kapitel 1.3 Böden: Bodengesellschaften mit Leitbodentypen und ihren Ausgangsgesteinen
Schätzung der Druckbelastbarkeit
Physikalische Daten aus 140 Profilen