

# Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen

Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz

---

**Stand des Wissens**

**Vorschläge für Richt- und Prüfwerte zur Definition von Bodenschadverdichtungen**

**Resultate ausgewählter Forschungsarbeiten**

---

**BGS Dokument • Document SSP**

**13**

# BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT DER SCHWEIZ

## SOCIÉTÉ SUISSE DE PÉDOLOGIE

**Adresse:** Geographisches Institut der Universität Zürich (GIUZ)  
Winterthurerstrasse 190  
CH-8057 Zürich

**Telefon** 01 635 51 22 oder 01 635 51 21 (Sekretariat) **Fax** 01 635 59 06

**E-Mail** fitze@geo.unizh.ch

**Internet** http://www.soil.ch

**Postcheck-Konto:** BGS Bern 30-22131-0 Bern

### Vorstand / Comité 2004

Präsident / Président:	M. Achermann, Luzern	041 228 64 58	matthias.achermann@lu.ch
Vizepräsidentin / Vice-présidente:	S. Tobias, Birmensdorf	01 739 2349	silvia.tobias@wsl.ch
Beisitzerin / Assesseuse:	C. Strehler, Yverdon	024 425 18 88	c.strehler@grande-caricaie.ch
Sekretär / Secrétaire:	P. Fitze, Zürich	01 635 51 22	fitze@geo.unizh.ch
Rechnungsführer / Comptable:	M. Jozic, Root	041 450 26 57	mj@agrolab.ch
Redaktor / Rédacteur	M. Müller, Zollikofen	031 910 21 24	moritz.mueller@shl.bfh.ch

### Geschäftsstelle / Bureau exécutif

Leiterin / Responsable Nicole Näf  
BABU GmbH, Rautistrasse 13, 8047 Zürich

Telefon 043 311 10 47 Fax 043 311 10 41 E-Mail nicole.naef@babu.ch

### Dokumentationsstelle / Service des documents

Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale LmZ, Länggasse 79, 3052 Zollikofen

Telefon 031 911 06 68 Fax 031 911 49 25

E-Mail lmz@edition-lmz.ch Internet http://www.edition-lmz.ch

### Vorsitzende der Arbeitsgruppen / Président(e)s des groupes de travail

Klassifikation und Nomenklatur:	J. Presler, Zürich	01 388 20 42	j.presler@babu.ch
Bodenschutz und Werthaltung:	M. Kaufmann, Zürich	01 632 79 35	manfred.kaufmann@agrl.ethz.ch
Bodenkartierung:	M. Knecht, Zürich	01 383 70 71	ambio@bluewin.ch
Reflexion/Strategie	P. Germann, Bern	031 631 38 54	germann@giub.unibe.ch

### Redaktion / Rédaction

M. Müller  
Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft, 3052 Zollikofen

Telefon 031 910 21 24/11 Fax 031 910 22 99/96 E-Mail moritz.mueller@shl.bfh.ch

### Redaktionskomitee / Comité de rédaction

M. Egli, Zürich	megli@geo.unizh.ch
C. Keller, Lausanne	catherine.keller@epfl.ch
J.-A. Neyroud, Nyon	jean-auguste.neyroud@rac.admin.ch
H. Sticher, Zug	hans.sticher@bluewin.ch
S. Zimmermann, Birmensdorf	stefan.zimmermann@wsl.ch

BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT DER SCHWEIZ  
SOCIÉTÉ SUISSE DE PÉDOLOGIE

DOKUMENT 13

## **Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen**

**Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz**

- Teil 1**    **Stand des Wissens**
- Teil 2**    **Vorschläge für Richt- und Prüfwerte zur Definition von Bodenschadverdichtungen**
- Anhang** **Resultate ausgewählter Forschungsarbeiten**

ISBN 3-03888-073-6

Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale  
Zollikofen 2004

### **Autorin und Autoren**

**BERNHARD BUCHTER**

Alberta GmbH, Bertastrasse 18a, CH-8003 Zürich

**STEPHAN HÄUSLER**

Angewandte Erdwissenschaften, Ginsterweg 2, CH-3006 Bern

**RAINER SCHULIN**

Institut für terrestrische Ökologie, Grabenstrasse 11a, CH-8952 Schlieren

**PETER WEISSKOPF**

Agroscope FAL Reckenholz, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau,  
CH-8046 Zürich

**SILVIA TOBIAS (Projektleiterin)**

Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf

mit Beiträgen weiterer Mitglieder der BGS-Plattform Bodenschutz

**Druck und Verlag:** LmZ, Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale, 3052 Zollikofen

**ISBN 3-03888-073-6**

**Copyright: 2004** Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	5
Einleitung .....	6
<b>Teil 1: Stand des Wissens.....</b>	<b>7</b>
1.1 Ausgangslage .....	7
1.2 Auftrag .....	8
1.3 Thesen zur Konkretisierung von Bodenschadverdichtungen .....	9
1.4 Überblick über den Stand der Forschung in der Schweiz .....	10
1.5 Weiterer Untersuchungs- und Forschungsbedarf .....	12
1.6 Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes .....	13
<b>Teil 2: Vorschläge für Richt- und Prüfwerte zur Definition von Bodenschad- verdichtungen .....</b>	<b>17</b>
2.1 Zusammenstellung bekannter Messmethoden zur Erfassung von Bodenverdichtungen und Verdichtungsempfindlichkeit.....	17
2.1.1 Tabellarische Zusammenstellung bodenphysikalischer Methoden .....	18
2.2 Vorschläge zu Richt- und Prüfwerten für den Vollzug im physikalischen Bodenschutz .....	28
2.2.1 Geltungsbereich und Begriffe .....	28
2.2.2 Messgrößen, empfohlene Methoden, Richt- und Prüfwerte .....	29
2.2.3 Weiteres Vorgehen .....	30
2.2.4 Quellen .....	30
2.3 Empfohlene Feld- und Labormethoden.....	31
2.3.1 Feldmethode zur Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (Bohrlochmethode) ...	31
2.3.2 Labormethode zur Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit .....	31
2.3.3 Labormethode zur Bestimmung der Lagerungsdichte.....	32
2.3.4 Feldmethode zur Bestimmung der Lagerungsdichte (Membran-Densitometer/Ballon- methode).....	33
2.3.5 Labormethode zur Bestimmung des Grobporenvolumens (Drucktopfmethode).....	33
2.3.6 Labormethode zur Bestimmung des Grobporenvolumens (Methode Hängende Wassersäule).....	34
2.3.7 Feldmethode zur Bestimmung des Eindringwiderstandes (PANDA-Sonde).....	35
<b>Anhang: Resultate ausgewählter Forschungsarbeiten.....</b>	<b>37</b>
BERLI, M., P. WEISSKOPF, and R SCHULIN, (1999): Subsoil compaction of agricultural soils – a review of research in Switzerland. In: VAN DEN AKKER, J.J.H., J. ARVIDSSON, and R. HORN, (eds.) (1999): Proceedings of the first workshop of the concerted action „Experience with the impact of subsoil compaction on soil, crop growth and environment and ways to prevent subsoil compaction“. DLO-Staring Centre, Wageningen, The Nether- lands: 56-63 .....	37
TOBIAS, S., (2004): Deriving threshold values for soil compaction from expert judgement. Proceedings Eurosoil Conference, Freiburg, Germany, Sept. 4-12, 2004. <a href="http://kuk.uni-freiburg.de/hosted/eurosoil2004/full_papers/id63_Tobias_full.pdf">http://kuk.uni-freiburg.de/hosted/eurosoil2004/full_papers/id63_Tobias_full.pdf</a> .....	48



## Vorwort

Die Bodenschutzpraxis braucht Messlatten, anhand derer sie Bodenbelastungen beurteilen kann. Ihre konkreten Fragen lauten: Was ist tragbar, und ab wo sind Schutzmassnahmen notwendig? Solche Bewertungskriterien gibt es bereits für chemische Verunreinigungen des Bodens und für die Bodenerosion. Sie fehlen aber noch für schädliche Bodenverdichtungen. Nach wie vor gehen national und international die Meinungen auseinander, welche Parameter am aussagekräftigsten sind, wie diese erhoben werden sollen und wo die Grenze zwischen akzeptierbaren und schädlichen Bodenverdichtungen liegt.

Das BUWAL hat deshalb die Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz (BGS) beauftragt, das heutige Wissen zusammenzutragen und konkrete Empfehlungen für praxistaugliche Parameter, Messmethoden und Normwerte zu formulieren.

Das vorliegende BGS-Dokument ist das Ergebnis dieses Mandates. Es enthält Vorschläge, die nun im Bodenschutzalltag erprobt werden müssen, damit sie dereinst allenfalls in die Bodenschutzgesetzgebung aufgenommen werden können.

Ich danke den Autoren und vor allem auch der Leiterin der BGS-Plattform Bodenschutz, Frau Dr. Silvia Tobias, für diese wertvolle Arbeit und bin überzeugt, dass damit ein weiterer Schritt hin zu einem langfristigen Schutz unserer Lebensgrundlage Boden geleistet worden ist.

Bundesamt für Umwelt,  
Wald und Landschaft  
Sektion Boden und  
allgemeine Biologie

Jürg Zihler

## Einleitung

Art. 33, Abs. 2 des Umweltschutzgesetzes und Art. 6, Abs. 1 der Verordnung über Belastungen des Bodens wollen Verdichtungen des Bodens vermeiden, die dessen Fruchtbarkeit langfristig beeinträchtigen. Derartige Bodenverdichtungen werden im vorliegenden Dokument der Bodenkundlichen Gesellschaft (BGS) als „Bodenschadverdichtungen“ bezeichnet. Verschiedene Richtlinien und Merkblätter von Behörden und Fachvereinigungen beschreiben den sachgerechten Umgang mit Boden beim Bau von Transitgasleitungen, auf Grossbaustellen im Hochbau und bei Rekultivierungen. Auch die BGS hat Grundsätze für die Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes in einem umfassenden Konzept dargelegt (BGS Dokument 9). Dennoch blieb es bis heute eine reine Ermessensfrage, ab wann die Bodenfruchtbarkeit durch Verdichtung langfristig beeinträchtigt ist. Diese Tatsache ist für den Vollzug des physikalischen Bodenschutzes, insbesondere in Streitfällen, sehr unbefriedigend.

Dieses Dokument ist das Resultat der Arbeiten der Plattform Bodenschutz zur Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. Im ersten Teil werden Thesen aufgestellt, die den konzeptionellen Rahmen dieser Arbeiten darlegen. Es folgt ein Überblick über den aktuellen Stand des Wissens in Forschung und Praxis und die bestehenden Forschungslücken. Den Kern der Arbeiten bilden im zweiten Teil konkrete Vorschläge für Richt- und Prüfwerte für Bodenschadverdichtungen. Dieser Teil wurde innerhalb der BGS ausführlich diskutiert und entspricht einem von vielen Fachleuten getragenen Konsens. Schliesslich werden im dritten Teil die Ergebnisse spezifischer Forschungsarbeiten zum Thema – zum Teil in Nachdrucken – wiedergegeben.

Die BGS will mit diesem Dokument einerseits die Vollzugspraxis im physikalischen Bodenschutz unterstützen, andererseits die Stossrichtung für künftige Forschungsarbeiten im physikalischen Bodenschutz aufzeigen.

## Teil 1: Stand des Wissens

*Silvia Tobias, Rainer Schulin, Peter Weisskopf*

### 1.1 Ausgangslage

Mit zunehmender Mechanisierung der Landwirtschaft war es auf der einen Seite möglich, die Ertragsfähigkeit von Ackerböden durch tiefgründigere Bearbeitung stark zu erhöhen (Krumenvertiefung), auf der anderen Seite nahm aber auch das Risiko von Bodenverdichtungen und anderen mechanischen Beeinträchtigungen der Bodenqualität zu. Diese Problematik wurde bereits in den 1950er Jahren erkannt und in der landwirtschaftlichen Forschung wissenschaftlich untersucht. In der Schweiz waren es die Forschungsanstalten Reckenholz und Tänikon, die die Auswirkungen von Maschinensystemen auf die physikalischen Eigenschaften und die Ertragsfähigkeit von Böden untersuchten. In einem Projekt des Nationalen Forschungsprogramms Boden wurde die Verdichtungsgefährdung von Ackerböden in der Schweiz untersucht. Im Bericht wurde besonders auf das Problem von Unterbodenverdichtungen aufmerksam gemacht.

In den 1990er Jahren erfuhr das Thema Bodenverdichtung in der Schweiz mit dem Ausbau des Erdgastransportleitungsnetzes einen plötzlichen Aktualitätsboom. Bei diesen Bauprojekten wurden insgesamt über mehrere Hundert Kilometer grosskalibrige Rohrleitungen unterirdisch durch Kulturland verlegt. Der Boden wurde dabei auf zweierlei Weise in Mitleidenschaft gezogen; a) durch die Störungen im Profilaufbau und in der Bodenstruktur, die durch den Aushub, die Zwischenlagerung und den Wiedereinbau des Bodens im Bereich der Gräben, in die die Rohre verlegt wurden, verursacht wurden; b) durch die Benutzung des Bodens neben den Gräben als Baupisten und Installationsplätze. Wegen der hohen Gewichte, die zu heben waren, kamen insbesondere beim Absenken der Rohre entsprechend schwere Baumaschinen zum Einsatz, was die Gefahr von massiven Verdichtungen des Porenraums bis in den Unterboden beinhaltete.

Um Schäden vorzubeugen und Beeinträchtigungen zu minimieren, wurden unter Federführung des Bundesamtes für Energiewirtschaft, der zuständigen Konzessionsbehörde, zwischen Vertretern des Bodenschutzes und der Bauherrschaft Richtlinien zum Schutz des Bodens beim Verlegen unterirdischer Rohrlei-

tungen ausgehandelt, die sich mangels direkt auf die Situation des Gasleitungsbaus übertragbarer wissenschaftlicher Grundlagen primär auf gutachtliche Einschätzungen und empirische Erfahrungen der beteiligten Experten abstützten.

Diese Richtlinien, die 1993 in Kraft gesetzt und auf der Grundlage der bis dahin mit ihrer Anwendung gewonnenen Erfahrungen in den folgenden Jahren noch ergänzt und verbessert wurden, haben vor allem den Schutz des Unterbodens vor bleibenden Verdichtungen zum Ziel. Unterbodenverdichtungen müssen nach dem Stand der Kenntnisse als kaum reparierbar angesehen werden. Die Wirkung natürlicher Regenerationsprozesse nimmt mit der Tiefe rasch ab. Im Unterboden ist praktisch nur mit Hilfe technischer Massnahmen eine Wiederauflockerung des Bodens innert absehbarer Zeiträume zu erreichen. Nach mechanischer Lockerung ist das Bodengefüge aber grundsätzlich destabilisiert und damit sehr anfällig für erneute, noch gravierendere Verdichtungen (Sekundärverdichtungen).

Die Kontroversen um die Richtlinien lösten eine Reihe von wissenschaftlichen Untersuchungen zu den dabei aufgeworfenen Fragen aus. Diese beschränkten sich nicht darauf, die Problematik der Verdichtungsgefährdung von Böden im Zusammenhang mit ihrer vorübergehenden Benutzung als Piste für schwere Baumaschinen zu studieren, sondern griffen das Thema Bodenverdichtung auch unter der Perspektive einer ungebremst zunehmenden mechanischen Beanspruchung von Böden durch Maschineneinsatz in der Land- und Forstwirtschaft auf. Zuckerrübensvollernter weisen heute Gewichte und vor allem Kontaktflächendrücke auf, die den beim Verlegen von Erdgastransportleitungen eingesetzten Baumaschinen nicht mehr nachstehen. Zudem fällt ihr Einsatz in eine Jahreszeit, in der die Böden häufig nass und damit besonders verdichtungsempfindlich sind. Die durch Räumungsarbeiten auf Lothar-Sturmschadensflächen verursachten Bodenverdichtungen waren Anlass, die Problematik von Bodenverdichtungen durch Einsatz schwerer Maschinen im Wald genauer zu betrachten.

## 1.2 Auftrag

Die Plattform Bodenschutz der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz (BGS) hat 1999 ein generelles Konzept herausgegeben, wie die rechtlichen Vorgaben aus dem Umweltschutzgesetz (USG) und der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) im physikalischen Bodenschutz umgesetzt werden sollen<sup>1</sup>. Die im Konzept vorgeschlagenen Massnahmen sind nun zu realisieren. Hierzu sind insbesondere konkrete Richtwerte und Messmethoden zur Erfassung und Beobachtung von Bodenverdichtungen und ihren Auswirkungen auf die Bodenfunktionen zu definieren. Die Sektion Boden und allgemeine Biologie des BUWAL hat der Plattform Bodenschutz ein Mandat erteilt, diesen Fragen nachzugehen. Ziel dieses Mandats ist die Erarbeitung einer *konkreten und einheitlichen Vorgehensweise zur Definition und Erfassung* von Bodenschadverdichtungen

- *Abgrenzung*: Was ist eine Bodenschadverdichtung? Es geht um die Ableitung von Richtwerten zur Quantifizierung von „dauerhaften Beeinträchtigungen lebenswichtiger Bodenfunktionen“.
- *Erfassung*: wie lässt sich das Ausmass einer Bodenschadverdichtung messen? Es sollen zuverlässige Mess- und Bewertungsmethoden entwickelt und geprüft werden.

In einem ersten Schritt sollte ein Positionspapier zum aktuellen Stand des Wissens erarbeitet werden. Die Plattform Bodenschutz hat hierzu zwei Aufgaben formuliert, die in kleinen Gruppen von Mitgliedern der Plattformgruppe bearbeitet wurden:

### a) Strategien für die Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes

*Aufgaben:*

- Standortbestimmung
- Feststellen des weiteren Handlungsbedarfs
- Setzen von Prioritäten für Forschung, Vollzug und Praxis

*Verantwortlicher: Rainer Schulin*

### b) Richtwerte für Bodenverdichtungen

*Aufgaben:*

- Aufarbeiten des Kenntnisstandes
- Vorschläge für Richtwerte zur Diskussion in der Plattform Bodenschutz
- Evaluation von Bestimmungsmethoden

*Verantwortlicher: Stephan Häusler*

### Positionspapier

Das vorliegende Positionspapier der Plattform Bodenschutz der BGS umfasst die folgenden Inhalte:

- Ausgangslage und Auftrag
- Thesen für die Konkretisierung von Bodenschadverdichtung
- Summarische Synthese des Stands der Forschung in der Schweiz
- Zusammenstellung bisheriger Erfahrungen mit verschiedenen Messmethoden
- Ausblick auf offene Fragen für die Forschung und die Methodenentwicklung
- Festlegen von Prioritäten für das weitere Vorgehen in der Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes in der Praxis

---

<sup>1</sup> TOBIAS, S., R. SCHULIN, D. SCHAUB, P. WEISSKOPF, B. BUCHTER, S. ZIMMERMANN, F. BORER und U. VÖKT, (1999): Physikalischer Bodenschutz - Konzept zur Umsetzung der rechtlichen Vorgaben im Umweltschutzgesetz (USG) und in der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo). Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Dokument 9

## 1.3 Thesen zur Konkretisierung von Bodenschadverdichtungen

### Definition

Unter dem Begriff „Bodenschadverdichtung“ werden alle Strukturveränderungen zusammengefasst, die infolge Veränderung der Porengrössenverteilung oder Störung der Porenkontinuität zu dauerhaften Schäden an den Bodenfunktionen führen (vgl. Kap. 4.1.2 des Konzepts zur praktischen Realisierung des physikalischen Bodenschutzes; BGS-Dokument 9). Mit anderen Worten sind dies Verdichtungen, von denen sich der Boden innert

tolerabler Zeitspannen nicht mehr regenerieren kann.

Zu dieser Definition wurden vier Thesen aufgestellt. Diese Thesen wurden an der Sitzung der Plattform Bodenschutz vom 28. Oktober 2002 diskutiert. Einzelne Mitglieder der Plattformgruppe haben zudem schriftlich Stellung genommen. Die nachfolgenden Formulierungen berücksichtigen alle eingegangenen Voten.

#### **These 1: Zwei Sichtweisen: ökosystembezogen und nutzungsbezogen**

Für die konkrete Definition von Bodenschadverdichtungen ist von zwei verschiedenen Perspektiven auszugehen: einer ökosystembezogenen und einer nutzungsbezogenen Perspektive. Das bedeutet für das Verständnis von:

##### **Bodenfunktionen**

- sind Ökosystembeziehungen, d.h. sie erklären das Funktionieren des Ökosystems Boden;
- sind Dienstleistungen des Bodens, von denen der Mensch profitieren kann.

##### **Langfristige („irreversible“) Beeinträchtigungen**

- führen zum Kippen des Ökosystems Boden;
- führen zu Einbussen im Hinblick auf eine standorttypische Nutzung des Bodens.

##### **„Richtwerte“ zur Eingrenzung von Schadverdichtungen**

- müssen sich auf die standorttypische Bodenfruchtbarkeit beziehen
- müssen absolute Minimalbedingungen für die ökologische Funktionstüchtigkeit berücksichtigen
- müssen absolute Minimalbedingungen für die aktuelle oder eine mögliche künftige Nutzung berücksichtigen.

#### **These 2: Merkmale von Schadverdichtungen**

Schädliche Veränderungen der Bodenstruktur sind durch eines oder mehrere der folgenden Phänomene gekennzeichnet:

##### **Erhöhung des Verdichtungsgrades**

- Annäherung an ökologische Minimalbedingungen

##### **Schädliche Strukturveränderungen**

- Erhöhung der Verdichtungsempfindlichkeit durch land- und forstwirtschaftliche Bewirtschaftung sowie Bautätigkeit/Rekultivierung (Überlockerung; Herabsetzung der mechanischen Belastbarkeit)

##### **Herabsetzen des Regenerationsvermögens**

- Erhöhung der Regenerationszeit auf ein Mass, in dem die Regeneration im vorgesehenen Bewirtschaftungszyklus nicht mehr möglich ist
- Herabsetzen des Regenerationsausmasses.

#### **These 3: Indikatoren von Schadverdichtungen**

Indikatoren und Richtgrössen von Bodenschadverdichtungen sind auf die folgenden Bodeneigenschaften zu beziehen:

##### **Verdichtungsgrad**

Matrizeigenschaften inkl. Speicherkapazität und Leitfähigkeit für Wasser und Luft;

##### **Verdichtungsempfindlichkeit**

mechanische Widerstandsfähigkeit (Belastbarkeit) des Bodens;

##### **Regenerationsvermögen**

Kenngrossen zur Bodenart, Klima, Bodenbiologie.

#### **These 4: Datengrundlagen zur Bestimmung von Schadverdichtungen**

Die Datengrundlagen zur Bestimmung und Abgrenzung von Bodenschadverdichtungen sind für die verschiedenen Aspekte sehr unterschiedlich:

##### **Verdichtungsgrad**

- für nutzungsbezogene Minimalbedingungen ist der Kenntnisstand relativ hoch (pflanzenbauliche Studien)
- für ökosystembezogene „Normalwerte“ (standorttypische Bodenfruchtbarkeit) ist der Kenntnisstand verbessert worden, aber noch nicht hinreichend (Bodenbeobachtungsprogramme)

##### **Verdichtungsempfindlichkeit**

- für einzelne Bodenarten ist der Kenntnisstand verbessert worden, aber noch nicht hinreichend (Untersuchungen von ItÖ, FAT)
- für die meisten Bodenarten ist der Kenntnisstand ungenügend, es laufen aber erste Studien (Studie zur Verdichtungsempfindlichkeit Baselbieter Böden; sn 640 582)

##### **Regenerationsvermögen**

- für die Regeneration von Verdichtung ist der Kenntnisstand ungenügend
- für die Regeneration von Überlockerung ist der Kenntnisstand ungenügend, es laufen aber erste Studien (laufende Arbeit am IRL, ETHZ)

## **1.4 Überblick über den Stand der Forschung in der Schweiz**

Die in der Schweiz in den letzten Jahren zur Thematik der Bodenverdichtung durchgeführten Untersuchungen konzentrierten sich vor allem auf die folgenden Fragestellungen:

a) Bodenmechanische Charakterisierung der Verdichtungsgefährdung durch den Parameter der mechanischen Vorbelastung: Dieser Parameter gibt vom Konzept her die Belastungsgrenze zwischen reversibler (elastischer) und irreversibler (plastischer) Verformung an. Er wird mittels der Methode von Casagrande aus der Drucksetzungskurve eines Ödometerversuchs bestimmt. Diese Methode wurde empirisch aus Versuchen mit Tonen entwickelt, bei denen die Grenze zwischen den beiden Verformungsbereichen durch einen Knick in der semi-logarithmischen Drucksetzungskurve relativ scharf definiert ist. Bei realen Böden erfolgt der Übergang in der Regel allmählich. Die operationell bestimmte Vorbelastung liegt in einem Bereich, in dem die Verformung bereits teilweise plastisch ist, aber noch nicht so stark wie im Bereich der reinen Erstverdichtung.

b) Vorhersage von Bodenverdichtungen mit Hilfe numerischer bodenmechanischer Modelle: Es wurden die beiden bodenmechanischen Modelle SAGE-CRISP und PLAXIS verwendet, um die Spannungsausbreitung und Bodenverformung unter schweren Raupenbaggern bzw. Zuckerrübenvollernern numerisch zu simulieren. Die von den Modellen benötigten bodenmechanischen Parameterwerte wurden teilweise an Proben im Labor, teilweise durch Abschätzung mittels Analogieschluss auf Grund von Literaturdaten bestimmt. Als grösster Unsicherheitsfaktor stellte sich die Spannungsverteilung in der Kontaktfläche zwischen Raupe bzw. Reifen und Bodenoberfläche heraus. Die

experimentell beobachteten Effekte lagen innerhalb des sich daraus ergebenden Unsicherheitsbereichs der Simulationen. Für die betrachteten Lastfälle haben sich die numerischen Modelle im Rahmen der möglichen Überprüfbarkeit also als tauglich erwiesen, die Verdichtung von ungesättigten Landwirtschafts- und Waldböden richtig zu beschreiben und innerhalb der möglichen Genauigkeitsgrenzen zuverlässig vorherzusagen.

c) Auswirkungen von plastischen Verformungen auf bodenphysikalische Eigenschaften: Untersucht wurde hier insbesondere die Infiltration von Farb- und Fluoreszenztracer-Lösungen vor und nach Überfahung von Böden durch schwere Maschinen unter Feldbedingungen. In einer Semesterarbeit wurde auch die Veränderung der Luftdurchlässigkeit von Feldbodenproben nach ödometrischer Kompression bestimmt und zur Drucksetzungskurve in Beziehung gesetzt. Es ergab sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den beiden Kurven, d.h. bleibende Verminderungen der Luftdurchlässigkeit waren sehr eng mit der plastischen Verformung korreliert.

d) Setzung von Ackerböden während und nach Befahrung mit schweren Maschinen: Setzungsmessungen mit LAS-Meter, die bei den schon erwähnten Feldversuchen mit schweren Landwirtschafts- und Baumaschinen durchgeführt wurden, zeigten weit in den Unterboden reichende Setzungen an, die nach der Überfahung teilweise unmittelbar wieder zurückgingen, also elastisch waren, teilweise aber auch zwei Wochen später noch vorhanden waren. Wie weit die gebliebene Setzung effektiv plastisch war und nicht nur eine elastische Verformung, deren Rückkehr in den Ausgangs-

zustand durch Viskositäts-Effekte zeitlich verzögert war, konnte aus technischen Gründen nicht weiter verfolgt werden.

e) Entwicklung der Festigkeit von rekultivierten Böden: Felduntersuchungen zeigen, dass die mechanische Vorbelastung auch als Parameter verwendet werden kann, um die Entwicklung der Strukturstabilität von Rekultivierungs-Böden zu charakterisieren.

f) Evaluation feldbodenkundlicher Merkmale als praxistaugliche Indikatoren zur Beurteilung von Verdichtungsgefährdung und Verdichtungsschäden: Bodenmechanische Parameter haben den Nachteil, dass ihre Messung relativ aufwendig ist. Für praktische Anwendungen wäre es vorteilhaft, wenn sie mittels einfach zu erhebender Merkmale eines Bodenprofils über Pedotransfer-Funktionen vorhergesagt werden könnten. Dies setzt einen statistisch genügend gut abgestützten Datensatz für eine Auswahl an Referenzböden voraus, an dem beide Parameter-Gruppen erhoben werden. Eine Grundlage für einen solchen Datensatz wurde im Rahmen von Standortsuntersuchungen entlang der projektierten Erdgastransportleitungen durch die detaillierte Untersuchung von über 20 Bodenprofilen geschaffen. Als bester Indikator erwies sich von den erfassten Merkmalen die Lagerungsdichte des Bodens, während Textur und Humusgehalt nur einen sehr schwachen Zusammenhang mit der mechanischen Vorbelastung zeigten.

### **Was wurde erreicht?**

- Bodenverdichtung ist heute ein in weiten Kreisen anerkanntes Bodenschutz-Problem.
- Das Konzept der mechanischen Vorbelastung hat sich als geeignet erwiesen, die Verdichtungsempfindlichkeit von landwirtschaftlich genutzten Böden unter quasistatischen Bedingungen zu charakterisieren.
- Die Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden gemäss BfE-Bodenschutzrichtlinien hat sich bewährt, kann aber noch weiter verbessert und auch vereinfacht werden.
- Numerische bodenmechanische Modelle wie SAGE-CRISP oder PLAXIS können zumindest für die Abschätzung von relativen Effekten wie z. B. die relative Wirksam-

keit von lastverteilenden Massnahmen in vorgegebenen Belastungsszenarien eingesetzt werden.

- Fließmuster von Farb- und Fluoreszenz-Tracern in Böden lassen sich als empfindliche Indikatoren von Veränderungen in der Porenraumstruktur nutzen.

### **Offene Fragen**

*Wie irreversibel sind Verdichtungen wirklich?*

Es fehlen Untersuchungen, in denen verdichtete Böden unter kontrollierten Bedingungen (insbesondere Anfangsbedingungen) über längere Zeit beobachtet und die Veränderung ihrer mechanischen und physikalischen Eigenschaften verfolgt wurde oder wird.

*Welche Parameter sind in der Praxis geeignet, die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden zu erfassen und vorherzusagen?*

Bisher wurde keine systematische Auswertung der einschlägigen Literatur vorgenommen. Es fehlt teilweise auch an konzeptioneller Klarheit (z.B. Unterscheidung zwischen Verdichtungsempfindlichkeit, -gefährdung und -risiko, Unterscheidung zwischen verschiedenen Typen von Verdichtungen bzw. allgemein von Veränderungen der physikalischen Bodenbeschaffenheit).

*Welche Rolle spielen Scherverformungen bei der "Verdichtung" von Böden?*

*Welche Rolle spielt der zeitliche Verlauf von Verformungsprozessen? Oder: welche Rolle spielt die zeitliche Verteilung von Belastungen?*

*Wie stark unterscheidet sich der Einfluss der Bodenfeuchtigkeit auf die Verdichtungsempfindlichkeit in verschiedenen Böden? Aus welchen Eigenschaften kann dieser Einfluss vorhergesagt werden?*

*Wie kann die Wirkung einer Bodenverdichtung auf die Bodenfruchtbarkeit vorausgesagt werden?*

*Wie kann der Schaden von Bodenverdichtungen bewertet werden?*

*Welche Möglichkeiten zur Reparatur bzw. Beschleunigung der Regeneration von Verdichtungsschäden gibt es?*

## 1.5 Weiterer Untersuchungs- und Forschungsbedarf

Ausgehend vom aktuellen Stand der Forschung und den verbleibenden offenen Fragen besteht insbesondere in den folgenden Themenbereichen ein dringender Forschungsbedarf:

- Zusammenhang zwischen Verdichtungsempfindlichkeit und Bodenfeuchtigkeit für verschiedene Bodenarten, -strukturen und andere -eigenschaften:
- Quantitative Zusammenhänge zwischen mechanischen und hydraulischen bzw. pneumatischen Zustandsgrößen von Böden
- Einfluss von Scherbelastungen auf die Verdichtungsempfindlichkeit (critical state soil mechanics)
- Erfassung von Scherverformungen, die unter Feldbedingungen entstehen
- Empfindlichkeit von Böden gegenüber wiederkehrenden (zyklischen) Belastungen
- Langfristiger Verlauf von Setzungen bei anhaltender Belastung und von Dehnungen nach Entspannung
- Dynamik der Strukturregeneration von Oberböden mit Verdichtungen und anderen Strukturschäden

### Vorschläge

#### a) Projekt "Referenzdaten"

Mit den von Qasem et al. zusammengestellten und durch eigene Untersuchungen ergänzten Daten von über zwanzig verschiedenen Standorten im Mittelland und im Jura besteht bereits ein erster Überblick über den Variationsbereich der mechanischen Vorbelastung und ihre Beziehung zu anderen Bodenparametern für eine Reihe von schweizerischen Wald- und Landwirtschaftsböden, die als normal bis stark verdichtungsempfindlich eingestuft wurden. Dieser Katalog sollte zum einen noch gezielt um bisher unterrepräsentierte, aber für die Praxis wichtige Bodentypen ergänzt werden, zum anderen ist der Datensatz durch weitere exemplarische Erhebungen der Beziehung zwischen Vorbelastung und Bodenfeuchtigkeit zu ergänzen. Bisher ist letztere nur in einem einzigen Profil systematisch untersucht worden. Damit könnte ein Referenzdatensatz bereitgestellt werden, aus dem sich die Vorbelastung anderer Böden in Ab

hängigkeit von der Bodenfeuchtigkeit durch Analogieschluss bzw. Regression oder Pedotransferfunktionen aus einfach zu erhebenden Eigenschaften mit für praktische Zwecke genügender Genauigkeit abschätzen liesse.

#### b) Projekt "Langfristiges Setzungsverhalten"

An ausgesuchten Testflächen sollte unter definierten bodenmechanischen Bedingungen der zeitliche Verlauf der Verformung, insbesondere der Setzung, von Böden bei Be- und Entlastung bzw. wiederholter (zyklischer) Be- und Entlastung verfolgt werden. Dazu ist das LAS-Meter (Large-Area-Subsidence-Meter) dahingehend weiterzuentwickeln, dass ununterbrochene mehrwöchige bis mehrmonatige Messreihen aufgenommen werden können. Die Messungen sind mit Druckspannungs- und Wasserspannungsmessungen zu kombinieren, um das mechanische Verhalten des Bodens interpretieren zu können.

#### c) Projekt "Einfluss der Bodenfeuchtigkeit auf die Verformungseigenschaften von Landwirtschaftsböden"

Mit ungestörten Bodenproben, die auf unterschiedliche Anfangsfeuchtigkeiten eingestellt werden, werden Ödometer- und Triaxialversuche durchgeführt und daraus die Abhängigkeit der Verformungseigenschaften von der Bodenfeuchtigkeit bestimmt und mit Hilfe der Theorie der Critical-State-Soil-Mechanics (CSSM) parametrisiert. An den betreffenden Standorten im Feld werden Druckplattenversuche durchgeführt und die gemessenen Verformungen mit den Vorhersagen numerischer Simulationen verglichen, die mit den im Labor bestimmten Parameter-Funktionen berechnet werden.

#### d) Projekt "Strukturregeneration"

Es werden bei der Rekultivierung von zur Nutzung als Park oder ähnliches zurückgegebenen Flächen einer derzeitigen Grossbaustelle Dauerbeobachtungspartellen angelegt, in die Bodenmaterial von Bodendepots unterschiedlicher Qualität eingebaut wird. Es wird verfolgt, wie die Strukturregeneration verläuft. Neben

bodenmechanischen und –physikalischen Parametern, die in regelmässigen Intervallen erhoben werden, werden insbeson-

dere auch von Zeit zu Zeit Messungen zum Gas- und Wasserhaushalt sowie zur Bodenbiologie durchgeführt.

## **1.6 Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes**

Die genannten wissenschaftlichen Untersuchungen erfahren ihre Fortsetzung bzw. Anwendung in den auf den nächsten Seiten vorgeschlagenen Umsetzungsprojekten (Abb. 1 bis 3). Es werden Vorschläge gemacht für Projekte zur Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes, Projekte zur Erfassung der Regeneration von Bodenverdichtungen und Projekte zur Her-

leitung von Indikatoren für Bodenschadverdichtungen. Dabei wurde soweit wie möglich auf laufenden Arbeiten in Vollzug und Praxis (z.B. Bodenbeobachtungsprogramme) aufgebaut. Die Projektvorschläge werden unterteilt in Grundlagenprojekte, Anwendungsprojekte und Umsetzungsprojekte.

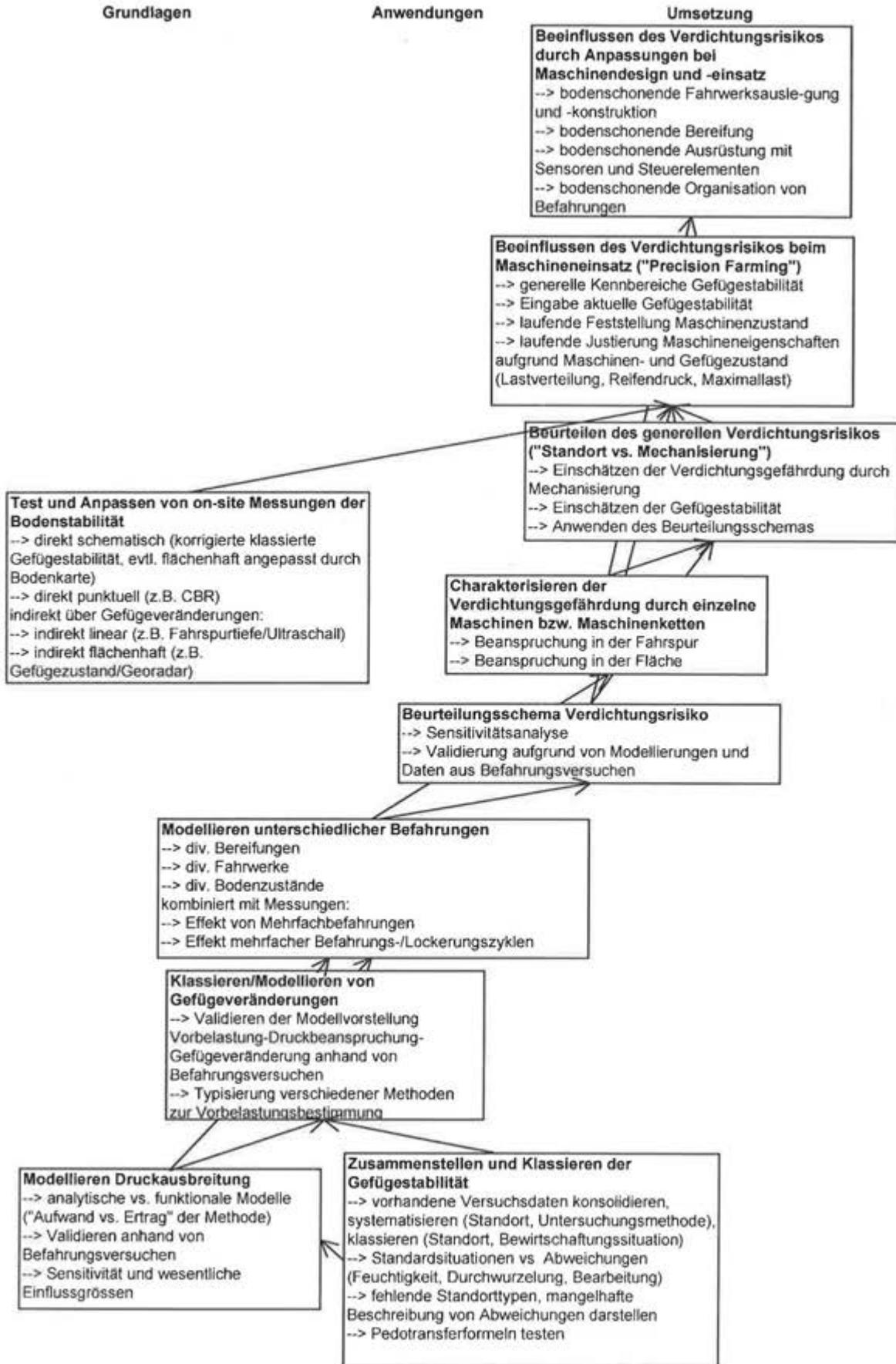


Abb. 1 Projekte zur Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes

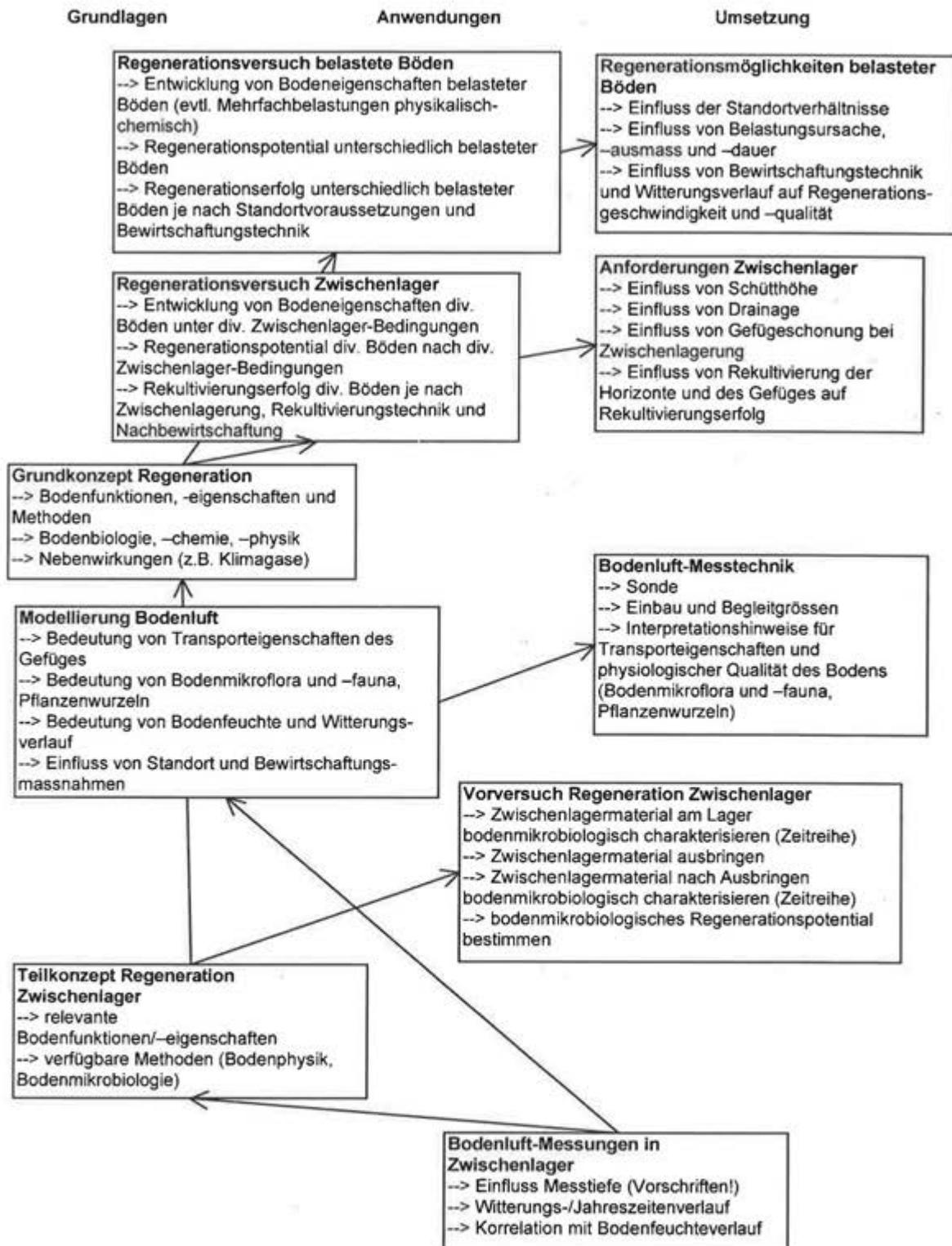


Abb. 2 Projekte zur Erfassung der Regeneration von Bodenverdichtungen

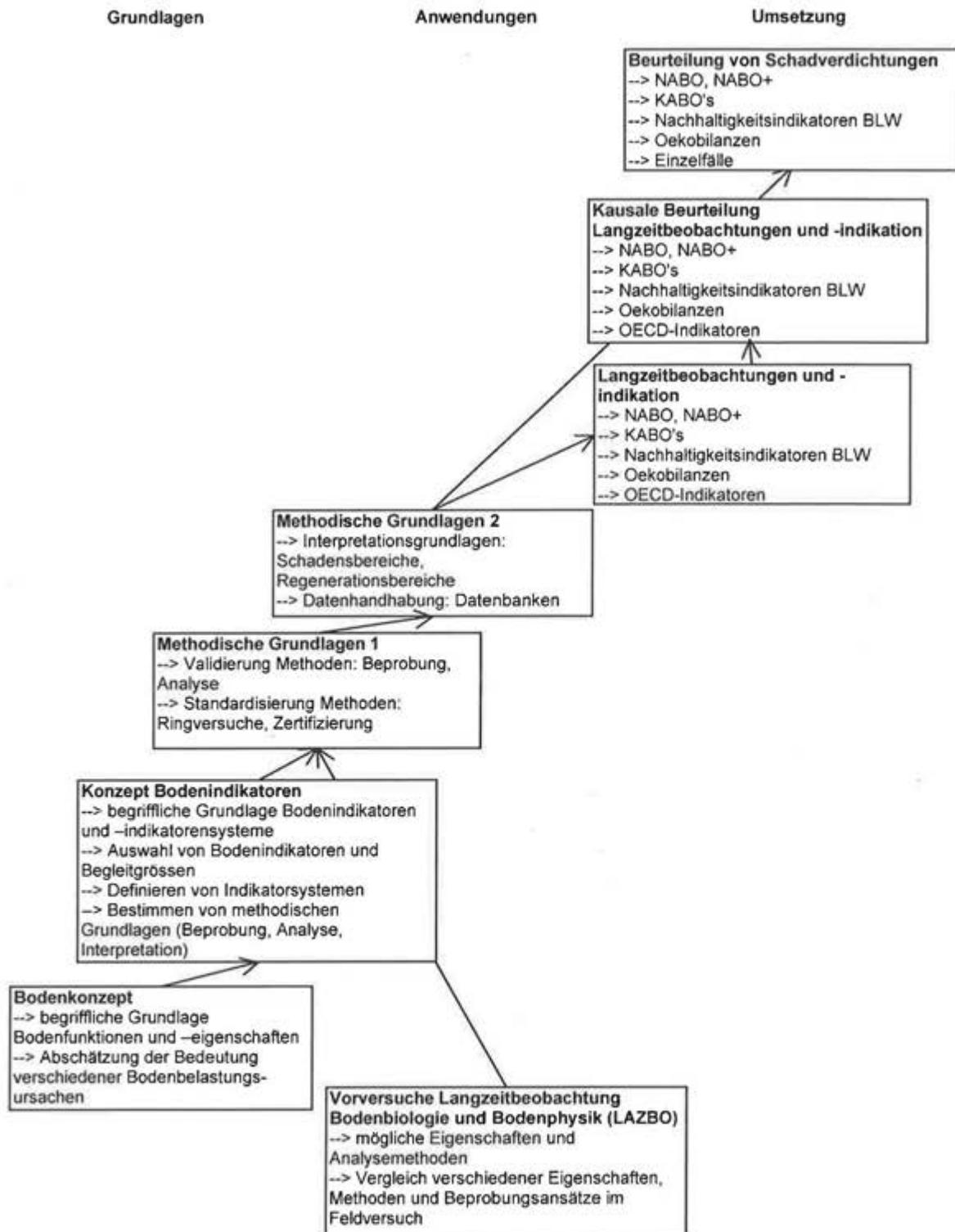


Abb. 3 Projekte zur Herleitung von Indikatoren für Bodenschadverdichtungen

## Teil 2: Vorschläge für Richt- und Prüfwerte zur Definition von Bodenschadverdichtungen

*Stephan Häusler, Bernhard Buchter*

### 2.1 Zusammenstellung bekannter Messmethoden zur Erfassung von Bodenverdichtungen und Verdichtungsempfindlichkeit

*mit Beiträgen von Abdallah Alaoui, Heinz Bender, Markus Berli, Pascal Boivin, Etienne Diserens, Massimo Guglielmetti, Manfred Kaufmann, Bea Kulli, Peter Lüscher, Milan Petrusek, Marco Rossi, Silvia Tobias und Peter Weisskopf*

Der physikalische Bodenschutz ist im revidierten Umweltschutzgesetz und seit 1998 in der darauf beruhenden Verordnung über Belastungen des Bodens erfasst. Es handelt sich also um eine junge Materie. Zwar ist die Forschung dazu älter, aber erst seit wenigen Jahren besteht der Zwang, Methoden zur Überwachung zu evaluieren, die aussagekräftig, nachvollziehbar, vorzugsweise einfach und rechtlich verbindlich sind.

Im Zentrum des physikalischen Bodenschutzes steht der Schutz vor Strukturveränderungen, hervorgerufen durch die Befahrung mit Maschinen im Zusammenhang mit Bauvorhaben sowie landwirtschaftlicher Bearbeitung und Nutzung. Die Belastung führt zu Verformungen und damit zu Veränderungen des Porengefüges und diese wiederum zur Verminderung der Luft- und Wasserleitfähigkeit. Ein weiterer Bereich betrifft die Umlagerung von Boden, also Abtrag, Zwischenlagerung und Neuschüttung. Ferner ist die Erosion Gegenstand des physikalischen Bodenschutzes.

Um dem physikalischen Bodenschutz zu dienen, braucht es möglichst bald praxistaugliche Methoden zur Erfassung des Ist-Zustandes und eine genügend breite Datengrundlage für die Definition des Soll-Zustandes und damit auch von Richt- und Prüfwerten. Daneben können und sollen weitere Methoden entwickelt werden, die u. U. in der Zukunft Eingang in den Vollzug finden.

Die vorliegende Tabelle (Abschn. 2.1.1) entstand auf Initiative der Autoren und mit finanzieller Unterstützung der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz und des BUWAL. Sie sollte alle möglichen Methoden enthalten, mit denen der Verdichtungsgrad und die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens erfasst werden können. Die aufgeführten Fachleute haben geholfen, die über 30 Methoden zusammenzutragen. Einige der Methoden könnten sofort angewandt werden, sind aber nicht unbedingt genügend aussagekräftig. Andere Methoden wiederum sind seit langem in der Forschung bekannt, werden aber von Labor zu Labor je nach Fragestellung unterschiedlich angewandt und wurden nie in Ringversuchen verglichen. Schliesslich enthält die Tabelle Methoden, die teilweise erst seit kurzem im Labor angewandt werden oder sogar nur auf dem Papier existieren. Dadurch ist ein weites Spektrum abgedeckt, welches sich von rein wissenschaftlichen Forschungsmethoden bis zu in der Praxis gebräuchlichen Methoden erstreckt. Für kommerziell erhältliche Methoden sind zudem ungefähre Nettorichtpreise resp. der ungefähre Zeitaufwand angegeben. Die Tabelle enthält absichtlich keine Wertung. Die Erwähnung sagt nichts über die Tauglichkeit einer Methode aus. Die Tabelle ist einzig eine Zusammenstellung aller Methoden und dient als Grundlage für zukünftige Diskussionen.

## 2.1.1 Tabellarische Zusammenstellung bodenphysikalischer Methoden

Zusammengestellt von Bernhard Buchter und Stephan Häusler, 2004. Mit Beiträgen von Abdallah Alaoui, Heinz Bender, Markus Berli, Etienne Diserens, Massimo Guglielmetti, Manfred Kaufmann, Bea Kulli, Peter Lüscher, Milan Petrusek, Marco Rossi und Peter Weisskopf.

### Allgemeine Kommentare

- 1) Labormethoden beruhen immer auf einer Probenahme. Dabei wird der Boden auch bei sorgfältigster Ausführung verändert. Zudem ist der Boden nicht mehr in der ursprünglichen Umgebung und verhält sich daher nicht mehr völlig gleich wie in der Natur. Diese Störungen beeinflussen grundsätzlich das Messresultat. Der Einfluss kann sich von unbedeutend bis extrem erstrecken, ist schwierig zu beurteilen und wird daher meistens nicht beachtet. Messresultate sind daher leider in vielen Fällen kaum vergleichbar und sagen höchstens im Vergleich mit Resultaten des gleichen Labors etwas aus. Dafür sind im Vergleich zu Feldmethoden die Randbedingungen besser erfassbar.
- 2) Auch bei Feldmethoden kann der Boden gestört werden. Problematisch sind hier aber häufiger unklare Randbedingungen.

Methode	§	#	Beschreibung	Einteilung, mögliche Richtwerte	Aufwand, Kosten Labor†	Literatur	Bemerkung, Probleme
1 Effektive Lagerungsdichte Masse volumique apparente effective Densité apparente effective Densità apparente effettiva	L	G E	Eff. LD = LD + 0.009 x Ton (%). Probenahme mit Bürgerzylindern mit 1 Liter Volumen, jeweils 3 Wiederholungen pro Horizont.	<1.4: sehr gering 1.4-1.6: gering 1.6-1.8: mittel 1.8-2.0: hoch >2.0: sehr hoch AG RW: Richtwert 1.70 Prüfwert: 1.85	Falls der Tongehalt abgeschätzt wird, ist der Aufwand derselbe wie für die Lagerungsdichte. Labor: Ab ca. Fr. 30.- pro Probe.	Bodenkundliche Kartieranleitung 1994 Renger 1970 Kaufmann 200x	Der Skelettgehalt >2 mm muss bestimmt werden, damit die Lagerungsdichte der Feinerde berechnet werden kann. In der Formel immer die Lagerungsdichte der Feinerde einsetzen. Falls dies nicht möglich ist, mindestens eine grobe Angabe über den Skelettgehalt mitliefern.
2 Lagerungsdichte Masse volumique apparente Densità apparente	L		Probenahme mit Bürgerzylindern mit 1 Liter Volumen, jeweils 3 Wiederholungen pro Horizont.	Petelkau definierte obere Grenzwerte des optimalen Lagerungsdichtebereichs bearbeiteter Krümmenböden in Abhängigkeit der Textur und organischen Substanz und Grenzwerte für die Lagerungsdichte krümmenaher Unterböden (ebenfalls texturabhängig).	1-2 Stunden Feldarbeit pro Profil (bei 3 Bürgerzylindern pro Horizont und 2-3 Horizonten), 1 Stunde Auswertung. Labor: Ab ca. Fr. 30.- pro Probe.	Petelkau 1991 Literaturstudie Bodenverdichtung 1995 KABO Bern 1996	Ohne Textureinbezug nicht sinnvoll. Für Böden mit minimaler Bodenbearbeitung (Direktsaat.) schlägt Petelkau einen höheren Grenzwert (+0.1 g/cm <sup>3</sup> ) vor als für die bearbeitete Ackerkrume. Siehe Bemerkung bei effektiver Lagerungsdichte.
3 Grobporenvolumen Volume des pores grossiers Volume dei macropori	L	G	Desorptionskurve: Differenz zwischen Sättigungswassergehalt und Wassergehalt bei bestimmter Saugspannung h.	h = 40, 60, 100, 300 hPa => Porendurchmesser 75, 50, 30, 10 µm. AG RW (bei pF 1.8): RW 7 %, PW 5 %	Feld: 5-60 min./6 Proben (tiefenabhängig). Labor: 1 h/6 Proben, ab ca. Fr. 30.- pro Probe.	Fachbericht FaBo ZH 2001 Methods of soil analysis 635-662 FAL-Methode PYZYL-P Tobias 200x	Wassergehalt bei Sättigung ist schwierig zu bestimmen, Standard-Methode ist nicht optimiert für Grobporenbestimmung, Fehler werden einer Porenklasse zugeordnet.

Methode	§	#	Beschreibung	Einteilung, mögliche Richtwerte	Aufwand, Kosten Labort†	Literatur	Bemerkung, Probleme
4 Gesamtporenvolumen Volume total des pores Volume totale dei pori	L	G E	Volumenanteil aller Poren.	Möglicher Richtwert: 45 Vol.-%.	Labor: Ab ca. Fr. 30.- bis Fr. 35.- pro Probe. Berechnung aus Bestimmung Lagerungsdichte und Bestimmung reeller Dichte ab ca. Fr. 80.- pro Probe.	Methods of soil analysis 443-461 KABO Bern 1996	Direkte Bestimmung mittels Gaspyknometer, üblicherweise aus Lagerungsdichte und reeller Dichte berechnet oder aus Lagerungsdichte geschätzt, da reelle Dichte relativ konstant, auch berechenbar aus Desorptionskurve. Richtwerte hängen mit den Richtwerten zur Lagerungsdichte zusammen.
5 Gesättigte Wasserleitfähigkeit Conductivité hydraulique saturée Conducibilità idraulica saturata	L	G	Durchflussmessung bei konstanter oder fallender Druckhöhe.	FAL: Zu feine Einteilung. MSA: Grobe Einteilung, Geologie. FaBo ZH: log. Einteilung. Möglicher Richtwert: pksat = 6 (4 mm/h). pksat < 7: grundsätzlich lockerungsbedürftig. pksat 7 - 6: Lockerung erwägenswert. pksat > 6: Nicht lockerungsbedürftig.	Feld: 5-60 min./6 Proben (tiefenabhängig). Labor: 1-4 h/6 Proben, ab ca. Fr. 40.- pro Probe.	Fachberichte FaBo ZH 1998, 1999, 2000 Laboranleitung FaBo ZH 2000 Methods of soil analysis 687-734 FAL-Methode PYZYL-WD DVWK 1986	Bereich $10^{-6}$ bis $10^{-3}$ m/s, stellt hohe Anforderung an Messmethodik (FAL-Methode problematisch). $K_{sat}$ sollte durch $pK_{sat}$ (wie pH) ersetzt werden. Je grösser Probenlänge, desto geringere Störung durch grobe Poren und Spalten (natürliche und Probenahme-bedingte). Bei geringer Durchlässigkeit sollte Probe paraffiniert werden (20 min/Probe).
6 Luftleitfähigkeit Conductivité de l'air Conducibilità dell'aria	L	G	Durchflussmessung bei konstanter Druckdifferenz und konstantem Wassergehalt.	-	-	Methods of soil analysis 1121-1136	Bis heute nicht für Routinemessung entwickelt, daher keine Richt- und Erfahrungswerte vorhanden.
7 Infiltrationsrate (Oberfläche) Taux d'infiltration (surface) Tasso d'infiltrazione (superficie)	F	G	(Einfach-/Doppel-) Ringinfiltrrometer	Möglicher Richtwert: pksat = 6 (4 mm/h).	Vorsättigung 1-3 h, Messung 1-2 h.	Methods of soil analysis 825-844 SN 640 583 BE 1997 KABO BE 1996 Kramer 1983	Problem: Einfluss Randbedingung (Sättigung, Grösse Ring).
8 Infiltrationsrate (Boden) Taux d'infiltration (sol) Tasso d'infiltrazione (suolo)	F	G	Messung der Wasserspiegelabsenkung im Bohrloch oder Messung bei konstantem Wasserspiegel im Bohrloch mittels Permeameter (z.B. Guelph).	Möglicher Richtwert: pksat = 6 (4 mm/h).	Vorsättigung 1-3 h, Messung 1-2 h.	Methods of soil analysis 735-770 Bodenschutz beim Bauen 2001	Problem: Verschmierung Bohrloch bei feuchten Verhältnissen. Vorteil: gängige Methode.

	Methode	§	#	Beschreibung	Einteilung, mögliche Richtwerte	Aufwand, Kosten Labor†	Literatur	Bemerkung, Probleme
9	Durchlässigkeit in gesättigtem Boden Conductivité en sol saturé Tasso d'infiltrazione in suolo saturo	F	G	Rückfluss in ausgepumptes Bohrloch.	Möglicher Richtwert: pk <sub>sat</sub> = 6 (4 mm/h).	0.5 h pro Bohrloch.	Methods of soil analysis 735-770	Probleme: Verschmierung Bohrloch. Nur in gesättigten Böden möglich.
10	Saugspannung Force de succion Forza di suzione	F	E	Messung im Feld mit Tensiometer in 35 cm Tiefe.	Raupenfahrzeuge: Einsatzgrenze (Cb) = Gesamtgewicht (t) x Bodenpressung (bar) x 1.25. Leichte Pneufahrzeuge: 25 Cb.	I.d.R. 5 Tensiometer pro Standort (BSR). Kosten Tensiometer ab ca. Fr. 150./Stk. Aufwand für Setzen 5 Stk. Tensiometer ca. 1-1.5 h. Aufwand für Ableseung/Wartung ca. 3 h/Monat	Bodenschutzrichtlinien 1997 Methods of soil analysis 563-596 SN 640 583 KABO Bern 1996	5 Tensiometer pro Standort nötig. Problem: Frostempfindlichkeit.
11	Skelettgehalt Pierrosité du sol Contenuto di scheletro (contenuto di sassi)	F L	E	Volumen Skelett/Volumen Boden.	BSR: >50%: wenig bis unempfindlich (je nach Ton- und Siltgehalt).	Labor: Ab ca.a. Fr. 65.- bis Fr. 70.- pro Probe.	-	-
12	Gefügebeurteilung Appréciation de la structure Valutazione della struttura	F	G E	Fraktionierung der Probe mit Siebsatz und Bestandsaufnahme der Gefügestufen in allen Phasen der Bodenbildung nach Form, Grösse und Eigenschaft der Aggregate.	Mögliche Richtwerte: Feldanalyse: Zusammenhalt des Gefüges (ab Klassen 4 und 5). Interpretation in 5 Klassen nach Verdichtungsgrad, Verdichtungsart, Verdichtungsempfindlichkeit und Regenerationspotential.	1 h für 4 Proben (4-6 Proben/Profil nötig), nur Analyse.	FAL Gefüge 2002 Petrasek und Pazeller 2002	Semiquantitative Feldmethode mit bodengenetischem Ansatz und Quantifizierung der Gefügedynamik. Dadurch lassen sich die Messwerte den Einheiten einer Bodenkarte zuordnen und ermöglichen eine flächenhafte Interpretation. Nachteile: Bei mangelnder Erfahrung besteht der Eindruck hoher Subjektivität. Notwendige Software zur Interpretation nicht allgemein zugänglich.
13	Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit Appréciation de la sensibilité au tassement Valutazione della sensibilità al compattamento	F	E	Beurteilung anhand von Korngrössenverteilung, Wasserhaushaltsgruppe und Gehalt an organischer Substanz.	Unterteilung in 5 Klassen.	0.5 h pro Profil.	SN 640 582 BL 1998	
14	Profilaufnahme Relevé du profil Rilievo del profilo	F	G E	Beschreibung Bodenprofil nach Methode Reckenholz.	Erfassung verdichteter und/oder empfindlicher Horizonte.	1-2 h pro Profil.	FAL Kartieren 1997	

§ L: Labormethode, F: Feldmethode, #: G: Verdichtungsgrad, E: Verdichtungsempfindlichkeit, † Ungefähre Netto-Richtpreise, ohne Rabatt resp. Zuschläge für Aufbereitung

	Methode	§	#	Beschreibung	Einteilung, mögliche Richtwerte	Aufwand, Kosten Labor†	Literatur	Bemerkung, Probleme
15	Eindringwiderstand Résistance à la pénétration Resistenza alla penetrazione	F	G E	Penetrometer, Rammsonde.	< 2 MPa unverdichtet. 2-3 MPa verdichtet. > 3 MPa stark verdichtet.	PANDA: 1-2 h Feldarbeit pro Standort, 0,5 h Auswertung.	Fachberichte FaBo ZH 1997, 1998, 1999 Laboranleitung FaBo ZH 2000 Methods of soil analysis 463-468 SN 640 583	Messungen mit der PANDA-Sonde müssen bei Saugspannungen im Bereich von 15 bis 55 Centibar stattfinden (Bestimmung z. B. mittels QuickDraw-Tensiometer). Alle Penetrometer sind empfindlich auf Skelett.
16	Vorbelastung Point de préconsolidation Preconsolidazione	L	G E	Volumenabnahme des Bodens unter Belastung als Funktion der effektiven Druckspannungen (totale Druckspannungen minus Porenwasserdruck). Unterscheidung zwischen elastischer und plastischer Verformung. Messung mit Oedometer.	BSR: Richtwert von der Belastungssituation abhängig. (Anhaltspunkte zu erwartender Vorbelastungswerte siehe z. B. Qasem et al. 2000.) < 80 kPa: stark verdichtungsempfindlich 80 - 110 kPa: normal verdichtungsempfindlich > 110 kPa: kaum verdichtungsempfindlich	Fr. 150.- bis 300.- pro Probe (Jauslin und Zimmermann 1998). 6 -10 Proben pro Horizont.	Methods of soil analysis 479-491 Berli 2001 Qasem et al. 2000 Berli et al. 1999 Diserens und Bucher 1997 Tobias 200x	Probleme: Verhältnis Probenhöhe zu Durchmesser (Berli 2001, Anhang 1); Subjektivität bei der Auswertung der Drucksetzungskurve, Skelettgehalt: gute Probenqualität bis 5% Skelett, brauchbar bis 10 %, ev. 15% (für Burgerzylinder, kleinere Skelettgehalte für kleinere Proben); Methode v.a. für tonige, schluffige oder lehmige Böden geeignet; ungeeignet für Sand. Einfluss der Probenqualität auf die Vorbelastungsbestimmung gross; Messung nicht an derselben Probe reproduzierbar, aufwendig, abhängig von Bodenfeuchte (Berli, 2001) Vorteil: simuliert die wirkliche Belastung, Spannungen werden direkt mit Spannungen verglichen. Vor allem zur Bestimmung der Verdichtungsempfindlichkeit geeignet, aufwendig zur Bestimmung des Verdichtungsgrades.
17	Scherfestigkeit Résistance au cisaillement Resistenza al taglio	L F		Bestimmung im Labor an ungestörten drainierten oder undrainierten Proben mit Laborflügelsonde oder mit einachsigen oder triaxialen Druckversuch. Bestimmung im Feld mit Flügelsonde.	- (siehe Spalte Bemerkung/ Probleme)	Labor: Einachsige ab ca. Fr. 150.- pro Probe. Triaxial ab ca. Fr. 500.- pro Probe. Drehflügel ab ca. Fr. 90.-. Feld: Drehflügel ab ca. Fr. 30.-.	Otto 1990 Prinz 1997 Schär 1992	Mit der Scherfestigkeit werden weder Verdichtungsgrad noch Verdichtungsempfindlichkeit bestimmt, sondern die Druckfestigkeit des Bodens beim Eintreten eines Bruches. Die undrainierte Scherfestigkeit ist stark vom Wassergehalt abhängig und nur in skelett- und wurzelfreien tonigen Lockersedimenten aussagekräftig. Die Bestimmung der drainierten Scherfestigkeit erfolgt an gesättigten Proben. Die undrainierte Scherfestigkeit in wassergesättigten Böden wirkt nur bei schnellen, kurzen Belastungen. Baumaschinen und landwirtschaft-

§ L: Labormethode, F: Feldmethode, #: G: Verdichtungsgrad, E: Verdichtungsempfindlichkeit, † Ungefähre Netto-Richtpreise, ohne Rabatt resp. Zuschläge für Aufbereitung

Methode	§	#	Beschreibung	Einteilung, mögliche Richtwerte	Aufwand, Kosten Labor†	Literatur	Bemerkung, Probleme
							liche Maschinen fahren i.d.R. so langsam, dass (teilweise) drainierte Zustände vorliegen und luftgefüllte Poren zusammengedrückt werden. Vorschlag: Scherfestigkeit standardisieren, d.h. im Labor bei derselben Saugspannung wie die Vorbelastung und das Grobporenvolumen ( $pF=1.8$ ) messen.
18 Degree of Compactness Degré de compactage Grado di compattamento	L	G E	D= LD / LD(200kPa). Quotient aus aktueller Lagerungsdichte des Bodens und der erreichten Referenzdichte im Oedometer nach einer einwöchigen Druckapplikation von 200 kPa unter drainierten Bedingungen.	D-Werte um 0.87 charakterisieren optimale Wachstumsbedingungen für Getreide. D > 0.9 deutet auf limitierende Bedingungen für Getreide.	Effektiver Arbeitsaufwand pro Probe ca. 1 Stunde, aber eine Woche Wartezeit bis Resultate vorliegen	Hakansson 1990	Der optimale Degree of Compactness ist relativ unabhängig von der Bodentextur. Dies ist einer der Hauptvorteile dieser Methode. Pflanzenökologische Aussagekraft noch nicht geklärt. Bisher existieren vor allem Daten für den Getreidebau (die Richtwerte von 0.87 und 0.9 beziehen sich vor allem darauf) und es ist unklar, wieweit sie sich auf andere Kulturen übertragen lassen. Relativ einfache Methode, aber in der Praxis noch wenig angewandt.
19 Verdichtungsversuch zur Beurteilung der organisch bedingten Struktur Essai de compactage montrant l'effet de la matière organique sur la structure Compattamento del suolo per la quantificazione della materia organica	L	G E	Ein Kulturboden und ein rein mineralischer (inert) Referenzboden mit gleicher Textur (Kornverteilung) wie der zu untersuchende Kulturboden werden auf die gleiche Art und Weise verdichtet. <i>Der Dichteunterschied nach Verdichtung ist auf die organisch bedingte Struktur zurückzuführen.</i> Die rein mineralisch bedingten Strukturanteile sind in beiden Böden in ähnlicher Weise wirksam.	Der Dichteunterschied in der Größenordnung von 0 – 6 kN/m <sup>3</sup> ist ein direktes Mass für die organisch bedingte Strukturausbildung. Je geringer die Differenz, desto geringer die Strukturausbildung und desto verdichtungsempfindlicher ist der Boden. Geringe Strukturausbildung ist ein Indiz für hohen Verdichtungsgrad.	Relativ einfacher Laborversuch. Geringe Kosten.	<b>Bender 2001</b> BIOPREVENT siehe auch ausführlichen Kommentar am Ende der Tabelle	Versuch und Versuchsprinzip sind getestet und validiert. Als Untersuchungskonzept sind weitere Abklärungen notwendig.

§ L: Labormethode, F: Feldmethode, #: G: Verdichtungsgrad, E: Verdichtungsempfindlichkeit, † Ungefähre Netto-Richtpreise, ohne Rabatt resp. Zuschläge für Aufbereitung

	§	#	Beschreibung	Einteilung, mögliche Richtwerte	Aufwand, Kosten Labor†	Literatur	Bemerkung, Probleme
20	F	G E	Der Laborversuch kann auf einfache Art und Weise abgeändert und im Felde zur Untersuchung ungestörter Böden eingesetzt werden. Im Gegensatz zum Laborversuch ist die Bodenformation drei- und nicht eindimensional.			Bender 2001 BIOPREVENT siehe auch ausführlichen Kommentar am Ende der Tabelle	Der Versuch existiert erst auf dem Papier und muss in seinen Details entwickelt und getestet werden. Eine Tauglichkeitsprüfung ist mit relativ bescheidenem Aufwand möglich. Der Versuch ist als Ergänzung zum Laborversuch zu verstehen.
21	L	G E	Trockene Bodenaggregate (Krümel) werden in zwei Zuständen und auf zwei verschiedenen Arten benetzt: 1) natürlicher Zustand, langsame Benetzung 2) natürlicher Zustand, rasche Benetzung 3) verdichteter Boden, langsame Benetzung 4) verdichteter Boden, rasche Benetzung	Die Aggregatzerstörung (in Prozenten) der verschiedenen Versuche gibt Informationen zur den organisch resp. mineralogisch bedingten Strukturanteilen.	Wenig aufwendiger Versuch mit hoher Aussagekraft bei gewissen Böden, mit eher mässiger Aussagekraft bei andern.	Bender 2001 BIOPREVENT	Der Versuch ist eine Ergänzung der beiden oben beschriebenen Versuche.
22	F	E	Gesamtgewicht : Kontaktfläche (Raupen- und Pneufahrzeuge)	Richtwert: 0.5 bar.		SN 640 583 Frutig und Thees 2002 Oswald und Thees 1999	Während des Fahrens kann die auftretende Bodenpressung um das 1,5-fache über der berechneten liegen. Hängt stark von der Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens ab. In der Forstwirtschaft werden drei Klassen vorgeschlagen <0.5 bar, 0.5-1.0 bar, >1.0 bar.
23	F	E	Radlast von Pneufahrzeugen.	>3.5 t: Bodenunverträglich. 2.5-3.5 t: Kritisch. <2.5 t: Bodenverträglich, falls Saugspannung >25 Cb und Kontaktflächendruck <0.5 bar.		SN 640 583 BL BE SO 1997	Grobe Näherung. Für die Landwirtschaft werden z. Z. mögliche Richtwerte diskutiert.
24	L	G E	Volumenabnahme des Bodens unter Belastung, Unterscheidung zwischen elastischer und plastischer Verformung. Messung mit Oedometer. Parameter für Setzungsverhalten der Bodenprobe	Erste Erfahrungswerte: <0.07 sehr stabil 0.07-1.00 stabil 1.00-1.30 mässig stabil >1.30 wenig stabil	Zusätzliches Kriterium bei der Auswertung von Drucksetzungskurven; bei Automatisierung praktisch kein Zusatzaufwand.	Vgl. Drucksetzungsmethode; Einzelheiten zur Berechnung z.B. in Lang und Huder 1990	Vgl. Drucksetzungskriterium „Vorbelastung“.

§ L: Labormethode, F: Feldmethode, #: G: Verdichtungsgrad, E: Verdichtungsempfindlichkeit, † Ungefähre Netto-Richtpreise, ohne Rabatt resp. Zuschläge für Aufbereitung

	§	#	Beschreibung	Einteilung, mögliche Richtwerte	Aufwand, Kosten Labor†	Literatur	Bemerkung, Probleme
			im Erstbelastungsbereich.				
25	L	E	Stabilität von Aggregaten beim Nasssieb-Test. Kalibrierte wiederbefeuchtete Aggregate werden auf Siebturm im Wasser mit einer gegebenen Frequenz eine bestimmte Distanz und Zeitdauer auf- und abbewegt; Grössenabnahme gegenüber Ausgangszustand vor dem Nasssieben wird als Stabilitätsmass betrachtet.	Erfahrungswerte, abhängig von der Bodenart.	Aufwand pro 5 Proben ca. 1 h (Aufbereitung und Messung).	DIN 19683-16	Aufarbeitung der Bodenprobe in kalibrierte Aggregate mit beträchtlichem subjektivem Einfluss des Operateurs; Einfluss des Wiederbefeuchtungsgrades auf das Analyseergebnis; Kennwert ohne direkten physikalischen Bezug.
26	L	E	Bei den Konsistenzgrenzen - Schrumpf-, Ausroll- und Fließgrenze - handelt es sich um spezifische gravimetrische Wassergehalte aufbereiteter Proben bindiger Böden.	Ausrollgrenze = Wassergehalt in Gew.-%, bei dem der Boden vom festen in den plastischen Zustand übergeht.	Labor: Ca. Fr. 100.- bis 150.-.	SN 670 345a SN 670 010b	Probleme: Die Methode ist nur für skelettfreie Schluffe und Tone geeignet. Die Bestimmung wird an aufbereiteten Proben vorgenommen, dabei werden Struktur und Porenraum zerstört.
27	F	G	Bestimmung der Wurzel-dichte in Abhängigkeit von der Bodentiefe.	-	Profil oder Hohlmeissel: 0.5 – 1 h Präparieren und wägen: 2 – 4 h (Feld oder Labor)	WSL-Projekt FAL Kartieren 1997	Durch Verdichtung wird das Wurzelwachstum gehemmt. Wurzel-dichte wird daher direkt beeinflusst. Der Einfluss weiterer Faktoren (Pflanzenart, Entwicklung, Nährstoffe) muss erfasst werden. Z. Z. Forschungsmethode
28	F	G	Profilaufnahme der Fliesswege von markiertem Wasser (Fluoreszenz- und andere Farbstoffe).	Vergleich mit unbelastetem Boden, Erfassen von Schichtgrenzen.	Bewässern 1 d, Ausgraben 1/2 – 1 d, Interpretation 1 h – 1 d.	<a href="http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=diss&amp;nr=14658">http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=diss&amp;nr=14658</a>	Z.Z. reine Forschungsmethode. Zur Tiefenwirkung der Verdichtung lässt sich nichts aussagen, da die oberen Schichten alle darunter liegenden beeinflussen. Die Muster zeigen aber den Einfluss der Verdichtung auf den Wasserhaushalt des Bodens.
29	F	G	1 m <sup>2</sup> wird während 1 h mit 100 mm beregnet. Der Wassergehalt wird mit schräg eingebauten TDR-Sonden (Time Domain Reflectometry) alle 1 bis 5 Minuten bestimmt.	Drainfähige Poren sind vorhanden, wenn die Feuchtefront mindestens 0.2 mm/s voranschreitet und die Wassergehaltszunahme durch Beregnung mindestens 0.01 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> beträgt.	Pro Standort ca. 3 – 4 h mit 2 Personen.	Alaoui 2002 Germann 1999	Profilumfassende Beurteilung des luftführenden Grobporensystems durch Messung der schnellen Infiltration. Die Reaktionen des Wassergehaltes auf die Beregnung zeigen die hydraulische Verbindung (oder deren Fehlen) mit der Oberfläche an. Genauigkeit der Wassergehaltsänderung: ±0.003 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> . Forschungsmethode.

§ L: Labormethode, F: Feldmethode, #: G: Verdichtungsgrad, E: Verdichtungsempfindlichkeit, † Ungefähre Netto-Richtpreise, ohne Rabatt resp. Zuschläge für Aufbereitung

	Methoden	§	#	Beschreibung	Einteilung, mögliche Richtwerte	Aufwand, Kosten Labor†	Literatur	Bemerkung, Probleme
30	Tensioninfiltrometrie Infiltration in situ avec succion Infiltrazione dell'acqua sotto tensione	F	G	Messung der Infiltration an der Oberfläche des ungesättigten Bodens.	Allfälliger Richtwert hängt vom gewählten Unterdruck des eindringenden Wassers ab.	Vorbereitung 1 h, Messung 1 – 2 h.	Methods of soil analysis 793–796 Schneeberger 2003 Wettstein und Fruth 2003	Bis heute nicht für Routinemessung entwickelt, daher keine Richt- und Erfahrungswerte vorhanden.
31	Hydrostatic Soil Displacement Meter (HSDM)	F	G E	Messung der vertikalen Deformation des Bodens unter Auflast und nach Entfernen der Auflast. Erfassung des Verdichtungs- und Regenerationsprozesses	Unterscheidung zwischen elastischer (reversibler) und plastischer (irreversibler) Setzung	Prototyp; derzeit für Forschungszwecke	Tobias 2001 Tobias et al. 2001	Weiterentwicklung des Large Area Subsidence (LAS) Meters; hierzu Forschungsprojekt am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) ETHZ vorgesehen (SNF-Gesuch eingereicht) Gerät könnte sich für Dauerbeobachtungen (NaBo, KaBos) eignen
32	Refractometry/Soil shrinkage curve	L	G E	Gleichzeitige Messung der Desorptionskurve und der Volumenabnahme beim Schrumpfen zur Bestimmung von Porosität, Bodendeformation, Bodenverdichtung und weiteren Grössen.	–	Ca. Fr. 150.- pro Probe. Messung an ungestörten Bodenproben	Braudeau et al 1999 Braudeau 1988 Boivin et al. 1991 Boivin 1990.	Laborausüstung: Elektronische Druckaufnehmer und Sensoren zur Bestimmung des Schrumpfverhaltens unter isolierten Klimabedingungen. Bestimmung folgender Grössen: Lagerungsdichte bei unterschiedlichen Wassergehalten, Quellfähigkeit des Gesamtbodens und des Tonanteils, Reduktion des Grobporenanteils und Verdichtung der Tonmatrix, Desorptionskurve und Wasserleitfähigkeitskurve, Stabilitätsindex, Wasserspeichervermögen.
33	Bruchpunkt in situ Point de rupture in situ Punto di rottura in situ	F	G E	Einsinken des Bodens unter Belastung als Funktion der effektiven Druckspannungen (totale Druckspannungen minus Porenwasserdruck), Unterscheidung zwischen elastoplastischer und plastischer Verformung. Messung mit dem sog. Bevameter (Bekker Value Meter).	–	30 bis 60 Minuten pro Messung.	Diserens und Steinmann 2003	Messprinzip vergleichbar mit Druckteller-, nicht aber Oedometermessung. Scherung führt zu Brüchen und lateraler Verformung. Nachteile: Traktor erforderlich. Druckverteilung ist bei stark bindigen und grobkörnigen Böden nicht homogen. Vorteile: Einsinktiefen unter Feldbedingungen. Gesamtes Bodenprofil wird beansprucht. Grosse Fläche des Drucktellers. Zusammenhänge zwischen Bruchpunkt, Druckspannungen und Bodenverformungen können in situ gezeigt werden.

## Grundlagen zu den Versuchen von Bender 2001

1) Mit bodenmechanischen Versuchen werden alle Strukturanteile im Boden als gesamtes gemessen. Der Einfluss der organisch bedingten Struktur (Krümelstruktur) kann nur ermittelt werden, wenn ein Kulturboden (landwirtschaftlich genutzter Boden) und ein inerter Boden ähnliche Textur direkt miteinander verglichen werden.

2) Die wichtigsten Strukturanteile im Boden sind:

die organisch bedingte Struktur = Krümelstruktur = Aggregatstruktur = organische Kohäsion (nach Bender)

die mineralisch bedingte Struktur infolge Bodenverdichtung = Kohäsion (echte, Verzahnungskohäsion) = Überkonsolidation/Vorbelastung

3) In Bezug auf Bodenverdichtung und Verdichtungsempfindlichkeit sind wichtig:

Gut ausgebildete organisch bedingte Struktur ist ausschliesslich in lockeren Boden möglich. Diese wird infolge Verdichtung zerstört. Der Prozess ist irreversibel (für die meisten Anteile der organisch bedingten Struktur).

Mineralisch bedingte Struktur nimmt mit der Verdichtung des Bodens zu. Diese wird infolge Verdichtung gebildet. Bei Auflockerung des Bodens wird die Struktur (Kohäsion) abgebaut. Die Vorgänge sind reversibel.

Die obigen Zusammenhänge sind validiert, es handelt sich nicht um Hypothesen! Die Aussagen können zum Beispiel mit dem oben beschriebenen Wasserlagerungsversuch bewiesen werden.

4) Der Verdichtungsversuch wurde gewählt, weil er rasch, einfach und reproduzierbar ist. Mit Scherfestigkeitsversuchen zum Beispiel wären die selben Aussagen möglich, jedoch unvergleichlich grösseren Aufwand. Die Dichteunterschiede eines rein mineralischen und eines Kulturbodens sind mit bis zu 50 % Unterschied riesig: ein gut ausgebildeter Kulturboden besitzt ein Trockenraumgewicht (trockene Dicht) von 12 –14 kN/m<sup>3</sup>. Derselbe Boden ohne jegliche organischen Substanzen hat nach geringer Verdichtung (z.B. befahren mit leichter Maschine). ein Trockenraumgewicht von 18 –20 kN/m<sup>3</sup>.

## Literatur

AG RW: Arbeitsgruppe Richtwerte der BGS-Plattform Physikalischer Bodenschutz

Alaoui, A., 2002: Evaluation du tassement du sol par l'étude de l'évolution hydrodynamique de la teneur en eau: Mise au point d'une méthode non destructive. Rapport interne, OFEFP, Berne

Bender, H., 2001: Untersuchungen von Kulturböden mit Hilfe bodenmechanischer Mittel als Grundlage für ein Konzept zur Beurteilung der Strukturausbildung; Untersuchung im Auftrag des BUWAL sowie der Kantone (Bodenschutzfachstellen) Bern, Aargau, Solothurn, Basel Land und Luzern.

Berli et al., 1999: Schlussbericht zum FOGA-Projekt

Berli, M. (2001): Compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery. Dissertation ETH Zürich.

BIOPREVENT, Hochschule Rapperswil: Ein Programm zur Weiterentwicklung der Versuche, sowie Anwendungsprojekte der bereits entwickelten Versuche bestehen. Die Finanzierung ist noch nicht gesichert.

BE 1997: Bodenbeobachtung im Kanton Bern - Ein physikalisch-biologisch-chemischer Ansatz, 1997. Bodenschutzfachstelle BE, Zollikofen

BL 1998: Empfindlichkeit der Baselbieter Böden gegenüber mechanischen Einwirkungen (Bodenüberwachung BL, Baustein 2), 1998. Amt für Umweltschutz und Energie, BL, Liestal

BL BE SO 1997: Bodenverträglichkeit von Landmaschinen – Erarbeitung und Anwendung eines Kriterienkataloges, 1997. Amt für Umweltschutz und Energie BL, Bodenschutzfachstelle BE, Amt für Umweltschutz SO, Liestal/Zollikofen/Solothurn, .

Bodenkundliche Kartieranleitung (1994). AG Boden, 4. Aufl., Hannover.

Bodenschutz beim Bauen (2001) Leitfadern Umwelt, Nr. 10, BUWAL, Bern.

Bodenschutzrichtlinien: Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen (Bodenschutzrichtlinien), 1997. Bundesamt für Energiewirtschaft. Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern.

Boivin, P., D. Brunet, und C. Gascuel-Oudou, 1991: Densité apparente d'échantillon de sol: méthode de la poche plastique. Bull. GFHN. 28, 59-71.

Boivin, P. (1990): Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katoure (Basse Casamance, Sénégal): variabilité spatiale et relation avec les caractéristiques pédologiques. Ph.D. diss. Université Paris VI, Ed. ORSTOM, Paris, Série Etudes et Thèses.

Braudeau, E., JM. Costantini, G. Bellier, und H. Colleuille, 1999: New device and method for soil shrinkage curve measurement and characterization. Soil Sci. Soc. Am. J. 63: 525-534.

Braudeau, E., 1988: Equation généralisée des courbes de retrait d'échantillons de sols structurés. C. R. Acad. Sci. Ser. 2, 307, 1731-1734.

DIN 19683-16 (1998): 12 Bodenuntersuchungsverfahren im landwirtschaftlichen Wasserbau - Physikalische Laboruntersuchungen - Teil 16: Bestimmung der Aggregatstabilität nach dem Siebtauchverfahren

Diserens E., Bucher F., 1997: Bodenverdichtung aus der Sicht der Bodenmechanik. Agrarforschung 2/1997, 83-86

- Diserens E., Steinmann G, 2003: In-situ determination of the fracture point of an agricultural soil using the plate penetration test, comparison with the oedometer method and validation. Proceedings of the international conference on geo-environmental engineering, 9–10 December 2003, Singapore.
- DVWK – Richtlinie 117 (1986): Bodenkundliche Grunduntersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten meliorationsbedürftiger Standorte, Teil III: Anwendung der Kennwerte für die Melioration.
- Fachberichte zur Messung von Bodenverdichtungen im Feld inkl. Anleitung, 1997, 1998, 1999, 2000. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich.
- Fachbericht Grobporenbestimmung – Verfahrensoptimierung für den Vollzug. 2001. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich.
- Fachberichte zur Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit  $k_{sat}$  im Labor inkl. Laboranleitung. 1998, 1999, 2000. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich.
- FAL Gefüge: Bodengefüge – Ansprechen und Beurteilen mit visuellen Mitteln, 2002. Schriftenreihe FAL 41, FAL, Zürich-Reckenholz.
- FAL Kartieren: Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden, 1997. Schriftenreihe FAL 24, FAL, Zürich-Reckenholz.
- FAL-Methoden: Schweizerische Referenzmethoden der Eidg. Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten – Band 2, 1996. Zürich Reckenholz.
- Frutig, F., und Thees, O., 2002: Bodenschonender Einsatz von moderner Holzerntetechnik – Kurs-Unterlage August 2002, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf.
- Germann, P. (1999): Makroporen und präferentielle Sickerung. In: Handbuch der Bodenkunde, Kap. 2.7.1., S. 1-14
- Hakansson, I. 1990: A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. Soil and Tillage Research, 16, 105-120.
- Jauslin und Zimmermann. 1998. Untersuchung unterschiedlicher Baupistensysteme zum Schutz der Kulturböden vor Schädigung durch das Befahren mit schweren Baumaschinen.
- KABO Bern, Methodensammlung, Landwirtschaftliche Dauerbeobachtungsstandorte, 1996. Bodenschutzfachstelle des Kantons Bern, Rütli/Zollikofen
- Kaufmann M. 200x. Literaturrecherche zur pflanzenökologischen Bedeutung der effektiven Lagerungsdichte (in prep.).
- Kramer, E., 1983. Infiltrationsmessungen mit Metallrohr – Methodenbeschreibung. Eidg. Forschungsanstalt Betriebswirtschaft und Landtechnik Tänikon.
- Lang und Huder (1990): Bodenmechanik und Grundbau. 4. Auflage. Springer-Verlag, Berlin.
- Literaturstudie Bodenverdichtung, 1995. Umweltbundesamt, Texte 55/95, Berlin.
- Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. (1986): A. Klute (ed.). 2<sup>nd</sup> edition. ASA, Madison, USA.
- Oswald, K., und Thees, O., 1999: Bodenschonung: ein Qualitätsmerkmal der Holzernte, Zürcher Wald 3/1999
- Otto H. (1990): Geotechnik für die Praxis, 4. Aufl., Aarau.
- Petrasek und Pazeller. 2002. Beurteilen der Qualität von Geländeauffüllungen mit der Bodengefügeanalyse nach FAL. Richterswil
- Prinz H. (1997): Abriss der Ingenieurgeologie, 3. Aufl., Stuttgart,
- Qasem, H., W. Attinger, M. Berli, R. Schulin, 2000. Zusammenhänge zwischen ödometrischer Verdichtungsempfindlichkeit und morphologischer Merkmale von Böden, untersucht an ausgewählten Standorten auf den Trasse der Transitgasleitungen Däniken – Grimsel (TRG2) und Rodersdorf – Lostorf (TRG3). Schlussbericht zum Forschungsprojekt, ItOe ETH-Zürich
- Petelkau H. 1991: Ertragliche Auswirkungen technogener Schadverdichtungen der Ackerkrume. Agrartechnik, 41.
- Renger, M. 1970: Über den Einfluss der Dränung auf das Gefüge und die Wasserdurchlässigkeit bindiger Böden. Mitt. Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, 11, 23-28.
- Schär U. (1992): Geologie in der Baupraxis, Dietikon,
- Schneeberger, K. (2003): Estimation of soil hydraulic properties of structured soils by microwave radiometry. Diss ETH.
- SN 640 582 (1999): Erdbau, Boden. Erfassung des Ausgangszustandes, Triage des Bodenaushubes. Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Zürich
- SN 640 583 (2000): Erdbau, Boden. Eingriff in den Boden, Zwischenlagerung, Schutzmassnahmen, Wiederherstellung und Abnahme. Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Zürich,
- SN 670 345a (1989): Konsistenzgrenzen, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Zürich
- SN 670 010b (1999): Bodenkennziffern, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Zürich
- Tobias, S., 2001: Vorsicht beim Befahren feuchter Böden: Bleibende Setzungen drohen! Agrarforschung 8(2): 60-65
- Tobias, S., M. Hennes, E. Meier und R. Schulin (2001): Estimating soil resilience to compaction by measuring changes in surface and subsurface levels. Soil Use and Management 17: 229-234
- Tobias, S. 200x. Herleitung von Schwellenwerten für Bodenverdichtung aus Expertenumfragen, Zürich, in prep.
- Wettstein, B., und D. Fruth. 2003. Untersuchung der Schwemmetallverlagerung in einem künstlich durch Kupfer und Zink kontaminierten Boden. Diplomarbeit ItOe ETH Zürich.
- WSL-Projekt "Baumwurzeln und Bodeneigenschaften". Es wird versucht - ausgehend von Durchwurzelungssituationen (Wurzelverteilung, -dichte, -vitalität) - von Fi, Ta und Bu auf LWF-Flächen in Vordemwald AG (Rissmoräne), Schänis SG (Kalk), Lausanne VD, Beatenberg BE Zusammenhänge zwischen chem. und physik. Bodeneigenschaften sowie den Wurzelwachstum herzuleiten. Leitung: P. Lüscher.

## 2.2 Vorschläge zu Richt- und Prüfwerten für den Vollzug im physikalischen Bodenschutz

Arbeitsgruppe Richtwerte (Plattform Bodenschutz/BGS): St. Häusler, B. Buchter, E. Diserens, S. Isler, M. Kaufmann und P. Weisskopf

Basierend auf

- Sitzungen der Arbeitsgruppe Richtwerte vom 16.12.02, 05.03.03, 05.05.03 und 27.04.04,
- schriftlichen Beiträgen der Arbeitsgruppenmitglieder aus dem Zeitraum 2003-2004,
- Sitzungen der Plattform Bodenschutz vom 27.01.03, 16.06.03 und 14.06.04,
- Stellungnahmen von Mitgliedern der Plattform Bodenschutz aus drei Vernehmlassungsrunden (Januar 2003, Juni 2003 und Juni 2004),
- Stellungnahmen von S. Tobias (Vorsitz Plattform Bodenschutz bis 2004), C. Strehler (Präsidentin BGS bis 2004) und J.-P. Clément (BUWAL/Sektion Boden),
- Stellungnahmen von Mitgliedern der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz aus der Vernehmlassung vom Februar/März 2004,
- Beiträgen von J. Witzig und P. Lüscher (Eidgenössische Forschungsanstalt WSL).

### 2.2.1 Geltungsbereich und Begriffe

Das vorliegende Dokument befasst sich mit Werten und Methoden zur Bestimmung und Beurteilung des Verdichtungsgrades von Böden.

Die praktische Anwendung von Werten und Methoden zur Bestimmung und Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit ist in folgenden Dokumenten dargestellt und wird von der Arbeitsgruppe Richtwerte nicht behandelt:

- a) Bundesamt für Energiewirtschaft: Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen (Bodenschutzrichtlinien). Bern, 1997
- b) Amt für Umweltschutz und Energie, Bau- und Umweltschutzdirektion Kanton Basel-Landschaft: Empfindlichkeit der Baselbieter Böden gegenüber mechanischen Einwirkungen. Liestal, 1998
- c) Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute: SN 640 582, Erdbau, Boden; Erfassung des Ausgangszustandes, Triage des Bodenaushubes. Zürich, 1999

Für den Verdichtungsgrad schlagen wir die Verwendung von Richtwerten einerseits und Prüfwerten andererseits vor.

Diese Richt- und Prüfwerte gelten grundsätzlich für alle land- und forstwirtschaftlich genutzten Böden, können aber auch für Böden mit anderer Nutzung herangezogen werden.

Ist der Richtwert bei einer Messgrösse (s. Abschn. 2.2.2) überschritten (bei Grobporen unterschritten), dann ist dies ein erstes Anzeichen dafür, dass die Bodenfruchtbarkeit langfristig gefährdet ist. Die Ursache der Belastung wird durch die Kantone ermittelt (VBBo, Art. 8, Abs. 1).

Ist der Prüfwert bei einer Messgrösse (s. Abschn. 2.2.2) überschritten (bei Grobporen unterschritten), so prüfen die Kantone, ob die Belastung des Bodens Tiere oder Pflanzen konkret gefährdet (in Anlehnung an: VBBo, Art. 9, Abs. 1). Bei konkreter Gefährdung schränken sie die Nutzung des Bodens soweit ein, dass die Gefährdung nicht mehr besteht (VBBo, Art. 9, Abs. 2).

Die zuständige Behörde kann im Sinne einer Ausnahme von den Richt- und Prüfwerten abweichen, sofern der Nachweis erbracht wird, dass eine Richt- oder Prüfwertüberschreitung (bei Grobporen Prüfwertunterschreitung) aus pedogenen, geogenen oder biogenen Gründen vorliegt.

## 2.2.2 Messgrößen, empfohlene Methoden, Richt- und Prüfwerte

### A. Einleitung, Anwendungsbereich und Vorgehensweise

Der Verdichtungsgrad eines Bodens wird anhand folgender vier Messgrößen ermittelt:

- Gesättigte Wasserleitfähigkeit
- Effektive Lagerungsdichte
- Grobporenvolumen
- Eindringwiderstand

Die Richt- und Prüfwerte sowie die empfohlenen Messmethoden dieser vier Parameter sind Inhalt der Unterabschnitte B bis E. Die entsprechenden Quellenangaben finden sich in Abschn. 2.2.4, detailliertere Ausführungen zu den empfohlenen Messmethoden in Abschn. 2.3.

Die in den Unterabschnitten B bis E aufgeführten Richt- und Prüfwerte gelten für den mineralischen Ober- und Unterboden (A- und B-

Horizont) bis in eine Tiefe von max. 60 cm. Sie gelten nicht für das Ausgangsmaterial (C-Horizont).

Eine Ausnahme bilden die Oberböden (A-Horizonte) im Wald: Für sie sind in den Unterabschnitten B bis E eigene Richt- und Prüfwerte angegeben.

Besteht der Verdacht auf das Vorhandensein einer Bodenverdichtung, so klären die Kantone ab, welche der vier Messgrößen untersucht werden sollen. Eine Vergleichsuntersuchung des Bodens an einem analogen (d. h. bodenkundlich vergleichbaren, gleich genutzten), unbeeinträchtigten Standort ist empfohlen.

### B. Gesättigte Wasserleitfähigkeit $p_{k_{sat}} = -\log k_{sat}$

<b>Richtwert:</b>	$p_{k_{sat}} = -\log k_{sat} = 6$ ( $k_{sat} = 10^{-6}$ m/s);	Waldoberboden: $p_{k_{sat}} = -\log k_{sat} = 5$ ( $k_{sat} = 10^{-5}$ m/s)
<b>Prüfwert:</b>	$p_{k_{sat}} = -\log k_{sat} = 7$ ( $k_{sat} = 10^{-7}$ m/s);	Waldoberboden: $p_{k_{sat}} = -\log k_{sat} = 6$ ( $k_{sat} = 10^{-6}$ m/s)

*Empfohlene Messmethoden (vgl. Abschn. 2.3.1 und 2.3.2):*

- Bestimmung im Feld mittels Bohrlochmethode oder im Labor mit fallender Druckhöhe an 10 cm hohen Proben (schlecht durchlässige Proben müssen paraffiniert werden).
- Massgebend ist der Median von fünf Messungen pro Horizont.

### C. Effektive Lagerungsdichte = Lagerungsdichte ( $\text{g/cm}^3$ ) + 0.009 x Tongehalt (%)

<b>Richtwert:</b>	1.70 $\text{g/cm}^3$ ;	Waldoberboden: 1.50 $\text{g/cm}^3$
<b>Prüfwert:</b>	1.85 $\text{g/cm}^3$ ;	Waldoberboden: 1.65 $\text{g/cm}^3$

*Empfohlene Messmethoden (vgl. Abschn. 2.3.3 und 2.3.4):*

- Im Labor wird an 1 Liter-Zylindern (Verhältnis Durchmesser : Höhe = ca. 1 : 1, z. B. Bürger-Zylinder) die Lagerungsdichte der Feinerde (Korndurchmesser < 2 mm) bestimmt.
- Falls ein zu hoher Skelettgehalt die Zylinderentnahme verunmöglicht, wird die Lagerungsdichte im Feld mit dem Membran-Densitometer (Ballonmethode) ermittelt.
- Die Bestimmung des Tongehaltes erfolgt nach gängigen Laborvorschriften.
- Massgebend ist der Median von fünf Messungen pro Horizont.

### D. Grobporenvolumen

<b>Richtwert:</b>	7 Vol.-% bei pF 1.8 (Poren-Ø 50 $\mu\text{m}$ );	Waldoberboden: 10 Vol.-% bei pF 1.8 (Poren-Ø 50 $\mu\text{m}$ )
<b>Prüfwert:</b>	5 Vol.-% bei pF 1.8 (Poren-Ø 50 $\mu\text{m}$ );	Waldoberboden: 7 Vol.-% bei pF 1.8 (Poren-Ø 50 $\mu\text{m}$ )

*Empfohlene Messmethoden (vgl. Abschn. 2.3.5 und 2.3.6):*

- Die Bestimmung im Labor erfolgt an mindestens 100 ml grossen Zylinderproben, entweder mittels Drucktopf (evtl. mit Sandbox) oder auf einer Keramikplatte mit hängender Wassersäule.
- Massgebend ist der Median von fünf Messungen pro Horizont.

### E. Eindringwiderstand

<b>Richtwert:</b>	2.0 MPa;	Waldoberboden: 1.5 MPa
<b>Prüfwert:</b>	3.5 MPa;	Waldoberboden: 3.0 MPa

*Empfohlene Messmethoden (vgl. Absch. 2.3.7):*

- Mit einem dynamischen Rammpenetrometer (bspw. PANDA-Sonde) werden im Feld entlang eines Transektes zehn Messungen in Abständen von 20 bis 50 cm durchgeführt. Die Messungen erfolgen bei Saugspannungen im Bereich von 150 bis 550 hPa (15 - 55 Centibar). Massgebend ist die Mittelwertskurve mit Vertrauensintervall (95 %) der ermittelten Eindringwiderstände.

### 2.2.3 Weiteres Vorgehen

- a) Durchführung von Messkampagnen, Methodenvergleichen, Methodvalidierungen und Ringversuchen sowie Definition von Probenahme-Design und -Timing.
- b) Anpassung der Schweizerischen Referenzmethoden und Harmonisierung mit internationalen Standards.
- c) Entwicklung eines Entscheidungsbaumes für die Anwendung der vorgeschlagenen Methoden und Aufforderung an das BUWAL/Sektion Boden zu einer entsprechenden Ergänzung der VBBo.

### 2.2.4 Quellen

- AG BODEN (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Aufl., S. 125 - 127, Hannover
- AMOOZEGAR, A., and A.W. WARRICK (1986): Hydraulic conductivity of saturated soils; Field methods. In: KLU-TE, A. (ed.): Methods of soil analysis, Part 1, Physical and mineralogical methods. 2<sup>nd</sup> edition, ASA, Madison, USA, S. 735 - 770
- AMT FÜR LANDSCHAFT UND NATUR DES KANTONS ZÜRICH (1998, 1999, 2000): Berichte und Laboranleitung zur Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit ( $k_{sat}$ ). Fachstelle Bodenschutz, Zürich
- AMT FÜR LANDSCHAFT UND NATUR DES KANTONS ZÜRICH (2001): Grobporenbestimmung - Verfahrensoptimierung für den Vollzug. Bericht und Laboranleitung, Fachstelle Bodenschutz, Zürich
- BUWAL (2001): Bodenschutz beim Bauen. Leitfaden Umwelt, Nummer 10, Bern
- DVWK RICHTLINIE 117 (1986): Bodenkundliche Grunduntersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten meliorationsbedürftiger Standorte, Teil III, Anwendung der Kennwerte für die Melioration.
- EIDGENÖSSISCHE FORSCHUNGSANSTALT WSL (2004): Bodenökologie WSL, Auszug vom 15.04.04 aus der Bodendatenbank der Abteilung Bodenökologie. WSL, Birmensdorf
- EPPINGER, M., H. SCHACK-KIRCHNER und E.E. HILDEBRAND (2002): Rückegassen als Wurzelraum? Allgemeine Forstzeitschrift Nr. 57
- FACHSTELLE BODENSCHUTZ KANTON ZÜRICH (1997, 1998, 1999): Fachberichte zur Messung von Bodenverdichtungen im Feld. Zürich
- FAL (1996): Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten, Band 2. Zürich-Reckenholz
- GASSER, U. (2004): Bodenphysikdaten aus der kantonalen Bodenüberwachung KABO 2003. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich
- HILDEBRAND, E. E. (1983): Mechanische Holzernte und Bodenstruktur. Allgemeine Forstzeitschrift Nr. 38
- KAUFMANN, M. (in prep.): Literaturrecherche zur pflanzenökologischen Bedeutung der effektiven Lagerungsdichte. IfK/ETHZ
- PAGLIAI, M. (1988): Soil porosity aspects. International Agrophysics 4, p. 215 - 232
- PETELKAU, H. (1991): Ertragliche Auswirkungen technogener Schadverdichtungen der Ackerkrume. Agrartechnik 41
- RICHARD, F. und P. LÜSCHER (1978, 1981, 1983, 1987): Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz, Band 1 - 4. ETH Zürich & WSL Birmensdorf
- TOBIAS, S. (2004): Deriving threshold values for soil compaction from expert judgement. Proceedings Eurosoil Conference, Freiburg, Germany, [www.forst.uni-freiburg.de/eurosoil/](http://www.forst.uni-freiburg.de/eurosoil/)
- UMWELTBUNDESAMT (1995): Literaturstudie Bodenverdichtung. Texte 55/95, Berlin
- VEREINIGUNG SCHWEIZERISCHER STRASSENFACHLEUTE (2000): SN 640 583, Erdbau, Boden; Eingriff in den Boden, Zwischenlagerung, Schutzmassnahmen, Wiederherstellung und Abnahme. Zürich
- VBBO, Verordnung über Belastungen des Bodens vom 1. Juli 1998. SR 814.12
- ZISA, R. P., H.G. HALVERSON, and B.J. STOUT (1980): Establishment and early growth of conifers on compost soils in urban areas. USDA Forest Service Res. Pap. NE, NE-451

## 2.3 Empfohlene Feld- und Labormethoden

### 2.3.1 Feldmethode zur Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (Bohrlochmethode)

#### Vorgehen:

Der Boden muss vor Messbeginn möglichst wassergesättigt sein. Der Messstandort ist daher bei Bedarf am Vortag zu bewässern.

Mit dem Rahmenbohrer werden fünf gleich grosse Löcher (z. B. 7 cm Durchmesser und 30 cm Tiefe) ausgehoben. Bohrlochwand und -boden dürfen dabei nicht verschmiert werden. Der Abstand zwischen den einzelnen Bohrlöchern sollte jeweils ca. 50 cm betragen.

Die Löcher werden mit Wasser gefüllt.

Während einer Stunde wird in bestimmten Zeitabständen (z. B. alle 5 Minuten) der Wasserstand in den Bohrlöchern gemessen.

Mit Hilfe des Gesetzes von Darcy lässt sich aus den Feldmessungen die gesättigte Wasserleitfähigkeit  $k_{sat}$  errechnen.

#### Literatur:

AMOOZEGAR, A., and A. W. WARRICK (1986): Hydraulic conductivity of saturated soils: field methods. In: KLUTE, A. (ed.). Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2<sup>nd</sup> edition. ASA, Madison, USA. S. 735–770

BUWAL (2001): Bodenschutz beim Bauen. Leitfaden Umwelt, Nr. 10, Bern

### 2.3.2 Labormethode zur Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit

#### Vorgehen:

Bestimmung der Wasserleitfähigkeit des leeren Permeameters. Werden mit einer Probe ähnlich grosse Werte gemessen, sollte überprüft werden, ob der Überdruck angeschlossen ist. Bei Werten, die höchstens einen Zehntel der Leitfähigkeit des Permeameters betragen, kann dessen Einfluss ignoriert werden. Werte, die nur wenig kleiner als die Leitfähigkeit des Permeameters sind, müssen korrigiert werden.

Herstellung des Dichtungsschlauchs aus 0.5 mm dickem Silikon und Qualitätstest (Leitfähigkeit < 10-8 m/s).

Bei schlecht durchlässigen Proben muss die Probe aus dem Transportzylinder in einen der Länge nach halbierten Zylinder (aus Plexiglas, Alu, etc.) ausgestossen und mit einem Paraffinmantel versehen werden. Auf diese Weise wird vermieden, dass Wasser zwischen der Probe und der Zylinderwand fließen kann. Damit die Probe genügend stabil ist, sollte die Dicke des Paraffinmantels ca. 2 mm betragen.

Die Probe wird vorsichtig auf die Länge des Probezylinders verkürzt ohne die Oberfläche der Probe zu verschmieren (d.h. Brechen ist besser als Schneiden). Das untere Ende der Probe sollte möglichst eben sein.

Im Wasserbad die Proben während rund 6 Stunden mit Leitungswasser sättigen. Bei den 10 cm langen Proben ist es sinnvoll, in zwei Schritten zu sättigen. Eine gut gesättigte Probe ist am oberen Ende feucht und glänzt daher.

Einsetzen der Proben und Zusammenbau des Permeameters und Anschliessen des Überdruckes.

Vor der eigentlichen Messung müssen die Proben bei kleinen Druckhöhen fertig gesättigt werden und die Deckplatte des Permeameters bis zum Auslauf mit Wasser gefüllt werden.

Erfassen der Messparameter: Querschnittsfläche der Probe, Länge der Probe, Querschnittsfläche der Bürette, Temperatur des Wassers, Höhe des Ausflusses des Permeameters über der Referenzhöhe.

Messung mit Gradient 1. Bei Bedarf kann der Gradient bei Wiederholungsmessungen erhöht werden. Wegen der Gefahr der Auswaschung oder Verschlammung des Bodens bei grossen hydraulischen Gradienten ist es jedoch ratsam, zuerst bei kleinen und danach bei grossen Gradienten zu messen. Wenn möglich sollte die Differenz zwischen den beiden Druckhöhen grösser als 2 cm und die Messzeit grösser als 20 s sein (Messfehler). Messung mindestens dreimal wiederholen ( ), um die Streuung der Messwerte und allenfalls eine Drift (Verschlammung/Auswaschung) erfassen zu können.

Es ist wichtig für die Interpretation der gemessenen Werte, dass der Zustand der Probe nach der Messung beurteilt wird. Von besonderer Bedeutung sind der Zustand des Paraffinmantels (Deformation, Risse) oder bei der Messung ohne Paraffinmantel der Zustand der

Querschnittsflächen der Probe nach der Entnahme aus dem Stahlzylinder (Löcher, Steine).

#### **Kommentare:**

Diese Methode ist ausführlich beschrieben, da die offizielle Methode (FAL 1996) unseres Erachtens zu wenig genau ist. Zudem ist die Messung allgemein fehleranfällig. Auch sind die Resultate wegen der ungeheuren Bandbreite der möglichen Leitfähigkeiten (1 zu 100'000!) kaum vorstellbar.

Wir schlagen vor,  $K_{\text{sat}}$ -Werte durch  $pK_{\text{sat}}$ -Werte ( $= -\log_{10}K_{\text{sat}}$ ) zu ersetzen (Vorbild pH). Dabei muss zwingend m/s als Einheit verwendet werden. So wird beispielsweise aus  $K_{\text{sat}} = 10^{-8}$  m/s  $pK_{\text{sat}} = 8$ . Da gesättigte Leitfähigkeiten üblicherweise lognormal verteilt sind, entspricht der arithmetische Mittelwert der  $pK_{\text{sat}}$ -Werte dem wirklichen Mittelwert, während bei  $K_{\text{sat}}$ -Werten der geometrische Mittelwert berechnet werden sollte.

Bei der Entnahme und bei der weiteren Behandlung können leicht Risse in der Bodenprobe entstehen, die zu einer unnatürlich hohen Leitfähigkeit führen. Die Entnahme und Vorbereitung von sogenannten ungestörten Proben erfordert bei der Bestimmung der gesättigten Leitfähigkeit ausserordentliche Sorgfalt.

Insbesondere verschmierte Bereiche an den Probenenden bewirken, dass potentiell wasserleitende Poren verschlossen sind, was zu einer unnatürlichen Verringerung der Leitfähigkeit führt. Der Einfluss ist gravierend und führt zu völlig falschen Werten.

Im Porenraum eingeschlossene Luftblasen führen zu einem Verschluss der betroffenen Poren für das durchfliessende Wasser und zu einer Verkleinerung der Leitfähigkeit, weil nicht mehr die gesättigte Leitfähigkeit gemessen wird.

Die Genauigkeit der Ergebnisse der einzelnen Methoden hängt logischerweise von der Genauigkeit der verwendeten Messgrössen ab. Diese wirken sich jedoch unterschiedlich aus. Um abschätzen zu können, welche Messgrössen mit welcher Genauigkeit erhoben werden müssen, damit die Genauigkeit der berechneten Durchlässigkeit erreicht wird, ist eine Fehlerrechnung zwingend nötig.

### **2.3.3 Labormethode zur Bestimmung der Lagerungsdichte**

#### **Vorgehen:**

Die Bodenprobe wird bei 105 °C getrocknet und dann gewogen.

Die Dauer der Messung ergibt sich aus der Optimierung des tolerierten Messfehlers, des zeitlichen Aufwands und der eben beschriebenen Problematik des Druckgradienten. Bei sehr lang dauernden Messungen ist die Verdunstung aus der Burette zu unterbinden.

Die Temperatur des Wassers muss gemessen oder auf 5°C genau geschätzt werden, damit die Temperaturabhängigkeit der Viskosität des Wassers in die Berechnung einbezogen werden kann.

Die Proben sollten möglichst feldfrisch, d.h. annähernd bei Feldkapazität entnommen werden. Ausgetrocknete Böden sollten vor der Probenahme befeuchtet werden.

Obwohl vor allem die Leitfähigkeit der Bodenmatrix interessiert, sollten bei der Probenahme die Proben mit sichtbaren Makroporen nicht verworfen werden. Die Prognose der Leitfähigkeit aufgrund des Aussehens der Probe hat sich als meist unzuverlässig erwiesen (Durchgängigkeit der Poren unbekannt). Zudem sind nach der Messung die Werte von Proben mit durchgängigen Makroporen bei der statistischen Auswertung leicht erkennbar und können, sofern gewünscht, verworfen werden.

Bei der Beprobung an einer bestehenden Profilgrube besteht vor allem im oberen Bereich des Profils die Gefahr, dass sich während der Probenahme vertikale Entlastungsrisse bilden. Solche Proben müssen unbedingt verworfen werden, da sie eine durch die Probenahme erhöhte Leitfähigkeit aufweisen werden. Dieses Problem kann umgangen werden, wenn nicht entlang einer Profelseite, sondern in den Ecken der Profilgrube beprobt wird.

#### **Literatur:**

FAL (1996): Schweizerische Referenzmethoden der Eidg. Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten. Methode PYZYL-WD. Band 2, FAL Reckenholz

FACHSTELLE BODENSCHUTZ KANTON ZÜRICH (2000): Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit  $k_{\text{sat}}$  im Labor – Laboranleitung. Amt für Landschaft und Natur, Zürich

Feinerde und Skelett werden voneinander getrennt.

Die Lagerungsdichte der Feinerde berechnet sich wie folgt:

(Gewicht Total – Gewicht Skelett) : (Volumen Total – Volumen Skelett)

**Kommentare:**

Grössere Proben (z. B. Burgerzylinder, 1000 ml) sind genauer als 100-ml-Proben. Die kleinen Proben werden bei der Probenahme eher (leicht) verdichtet. Da die Verdichtung des Bodens untersucht werden soll, kann diese zusätzliche Verdichtung während der Probenahme stören.

### **2.3.4 Feldmethode zur Bestimmung der Lagerungsdichte (Membran-Densitometer/Ballonmethode)**

**Vorgehen:**

Auf einer sauber präparierten, ebenen Probe-  
fläche wird die Bodenplatte (Ringplatte) fixiert.

Durch die runde Öffnung der Ringplatte wird  
etwas Boden ausgehoben und verpackt.

Das Ballongerät, welches mit Wasser gefüllt  
und am unteren Ende von einer Gummimemb-  
ran abgeschlossen ist, wird auf die Ringplatte  
aufgesetzt.

Das Wasser wird mit der Pumpe aus dem Zy-  
linder ausgepresst. Bei erreichtem Messdruck  
(Manometer) wird das verdrängte Volumen  
abgelesen.

Das entnommene Bodenmaterial wird im Labor  
bei 105 °C getrocknet und dann gewogen.

Zur Schätzung der Genauigkeit ist eine Fehler-  
rechnung empfehlenswert.

**Literatur:**

FAL (1996): Bestimmung der Lagerungsdichte  
von Bodenproben mit ungestörtem Gefüge  
(Zylinderproben). Methode PYZYL-D, Schwei-  
zerische Referenzmethoden der Eidgenössi-  
schen landwirtschaftlichen Forschungsanstal-  
ten, Band 2, FAL Reckenholz

Aus der im Labor gemessenen Masse (Ge-  
wicht) und dem im Feld bestimmten Volumen  
berechnet sich die Lagerungsdichte.

**Kommentare:**

Pro Horizont sind fünf Messungen durchzufüh-  
ren.

Die Horizonte müssen eine Mächtigkeit von  
mindestens 5 cm aufweisen.

**Literatur:**

BUWAL (2001): Bodenschutz beim Bauen.  
Leitfaden Umwelt, Nr. 10, Bern

### **2.3.5 Labormethode zur Bestimmung des Grobporenvolumens (Drucktopfmethode)**

**Vorgehen:**

Sättigung der Zylinderproben.

Desorption bis zur gewünschten Saugspan-  
nung.

**Kommentare:**

Die Methode mit dem Drucktopf ist sinnvoll,  
wenn die Apparatur ohnehin bereits für die  
Desorptionskurvenbestimmung vorhanden ist.  
Nur für die Bestimmung des Grobporenanteils  
ist sie teuer und aufwendig. Die Methode liefert  
ähnlich genaue Ergebnisse wie die Methode  
mit der hängenden Wassersäule.

Die Bodenproben sind im Gegensatz zur offi-  
ziellen Methode (FAL, 1996) bis zur ge-  
wünschten Saugspannung mit dem Drucktopf  
zu desorbieren, nicht mit der Sandbox (oder  
ähnlichen Verfahren). Die Messung in der  
Sandbox ist zwar nicht aufwendig, aber auch

nicht nötig und zudem nicht problemlos (siehe  
nächsten Punkt).

Desorption in der Sandbox (oder nach ähnli-  
chem Verfahren) ist nur bei gleichzeitiger Mes-  
sung der Saugspannung in der Probe erlaubt,  
wozu grössere Proben (Burgerzylinder,  
1'000 ml) nötig sind, da die Saugspannung an  
der Sandoberfläche nicht immer der einge-  
stellten Saugspannung entspricht.

Der Anfangswassergehalt ist nicht nach dem  
Konditionieren in der Sandbox bei einer Saug-  
spannung von 1 hPa zu bestimmen, sondern  
die Desorption ist mit möglichst gesättigten  
Bodenproben zu beginnen. Die dazu geeig-  
nete Methode liegt noch nicht vor.

**Literatur:**

FAL (1996): Bestimmung des Desorptions-  
verhaltens von Bodenproben mit ungestörtem  
Gefüge (Zylinderproben). Methode PYZYL-P,

Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungs-

anstalten, Band 2, FAL Reckenholz

### **2.3.6 Labormethode zur Bestimmung des Grobporenvolumens (Methode Hängende Wassersäule)**

#### **Vorgehen:**

Plexiglasapparatur mit eingebauter Keramikplatte im Exsikkator unter Wasser bei Vakuum entlüften (Schlauch + Apparatur mit Keramikplatte).

Luftblasen unter der Keramikplatte durch Öffnen des Entlüftungsschlauchs mit einer Spritze absaugen.

Die Probe, die sich im 100 ml-Stahlzylinder befindet, an der Unterseite mit dem Messer so präparieren, dass nichts vorsteht und die Probenunterseite möglichst eben ist. Damit realistische Werte gemessen werden können, sollte auf mindestens 60% der Querschnittsfläche ein guter Kontakt zwischen Bodenprobe und Keramikplatte bestehen.

Seitliches Entlüftungsloch der Plexiglasapparatur öffnen, die Probe auf Saugplatte montieren und sicherstellen, dass der Kontakt zwischen Probe und Keramikplatte (Höhenkontrolle) gewährleistet ist. Die Probe wird durch ein Konfitüreglas vor Verdunstung geschützt.

Das Entlüftungsloch mit einem Scotch-Klebband schliessen.

Wasserspiegel in der Bürette wenige Zentimeter über die Oberkante der Probe heben, zur Sättigung der grössten Poren. Dadurch wird die Probe vollständig mit Wasser gesättigt. Kontrollieren, ob kein Wasser zwischen O-Ring und Stahlzylinder durchdringt (sonst Probe herausnehmen und mit Scotch-Klebband den Umfang des Stahlzylinders vergrössern und erneut bei 3. beginnen). Bevor die eigentliche Messung beginnen kann, muss die Verdunstung unterbunden werden. Die Probe wird durch ein Konfitüreglas auf einem Dichtungsring abgedichtet. Die Bürette wird durch ein Stück Parafilm gegen Verdunstung geschützt. Ein kleines Loch im Parafilm (Nadel) gewährleistet den Druckausgleich ohne den Verdunstungsschutz aufzuheben. Die Höhe (HA) der Oberkante der Plexiglashalterung bezüglich der Referenzhöhe (z. B. Fussboden) messen und notieren.

Volumen  $V_0$  in der Bürette ablesen.

Die Bürette soweit absenken, bis sich der Wasserspiegel in der Bürette auf der gleichen Höhe wie die Probenunterkante befindet. Nach ca. 10 Min. das Volumen des Wassers in der Bürette ablesen (notieren) und die Höhe des Wasserspiegels neu einstellen. Den Vorgang

solange wiederholen, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat, d.h. bis sich das Wasservolumen in der Bürette nicht mehr ändert. Dauer ca. 12 h.

Den Wasserspiegel der Bürette auf 31,85 cm ( $\pm 0.5$  cm) unter Plexiglasoberkante senken ( $pF = 1.5$ ). Nach ca. 30 Min. erste Ablesung mit Neueinstellung der Höhe des Wasserspiegels vornehmen. Vorgang wiederholen, bis das Gleichgewicht erreicht wird (analog zu 8.). Dauer ca. 12 – 24 h.

Den Wasserspiegel der Bürette auf 100,25 cm ( $\pm 1.5$  cm) unter Plexiglasoberkante einstellen ( $pF = 2$ ). Weiteres Vorgehen wie 8. und 9. Dauer ca. 48 h.

Probe wägen und bis zur Gewichtskonstanz trocknen ( $105^\circ\text{C}$ ) und wieder wägen. Aus der Gewichts Differenz folgt der Anteil der Feinporen.

Die während eines Desorptionsschrittes aus der Probe geflossene Wassermenge entspricht der Differenz aus dem Wasserstand vor dem Desorptionsschritt und dem extremsten Wert danach. Dieser entspricht wegen der Verdunstung nicht immer genau der letzten Ablesung. Damit der extremste Wert gut erfasst werden kann, sollten, wenn sich dieser einstellt, genügend Ablesungen gemacht werden.

#### **Kommentar:**

Die Methode mit der hängenden Wassersäule ist eine Alternative zum Drucktopf. Die Apparatur ist günstig (weniger als Fr. 300.--) und liefert von allen Methoden die genauesten Resultate. Allfällige Probleme (Luft im Schlauch, Kontakt zur Platte) sind einfach überprüfbar.

#### **Literatur:**

FACHSTELLE BODENSCHUTZ KANTON ZÜRICH (2001): Grobporenbestimmung – Verfahrensoptimierung für den Vollzug. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich, Amt für Landschaft und Natur, Zürich

### **2.3.7 Feldmethode zur Bestimmung des Eindringwiderstandes (PANDA-Sonde)**

#### **Vorgehen:**

Pro Standort werden entlang eines Transektes zehn Messungen in Abständen von 20 bis 50 cm bis in eine Tiefe von je 60 cm durchgeführt.

Die Aufzeichnung der Messungen erfolgt im punktuellen Modus (d.h. Erfassung aller Einzelschläge).

In skelettreichen Böden wird die 2 cm<sup>2</sup>-Sondenspitze verwendet. Bei Böden mit einem Tongehalt > 25 % oder einem Gehalt an organischer Substanz > 10 % kommt die 4 cm<sup>2</sup>-Sondenspitze zum Einsatz.

Die Messungen erfolgen bei Saugspannungen von mindestens 150 bis maximal 550 hPa, d.h.

15 bis 55 Centibar (Bestimmung bspw. mit QuickDraw-Tensiometer).

Der Verdichtungsgrad wird anhand der Mittelwertkurve mit Vertrauensintervall (95 %) der ermittelten Eindringwiderstände in MPa ermittelt.

#### **Literatur:**

FACHSTELLE BODENSCHUTZ DES KANTONS ZÜRICH (1997, 1998, 1999): Fachberichte zur Messung von Bodenverdichtungen im Feld. Zürich



## Anhang: Resultate ausgewählter Forschungsarbeiten

### SUBSOIL COMPACTION OF AGRICULTURAL SOILS - A REVIEW OF RESEARCH IN SWITZERLAND

M. Berli <sup>1</sup>, P. Weisskopf <sup>2</sup>, and R. Schulin <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Terrestrial Ecology, ETH Zürich, Grabenstr. 3, CH-8952 Schlieren, Switzerland

<sup>2</sup> Federal Research Station for Agroecology and Agriculture, Reckenholzstr. 191, CH-8046 Zürich, Switzerland

#### Abstract

Subsoil compaction due to excessive mechanical stress exerted by agricultural machinery has been recognised as a potential problem for the fertility of agricultural soils in Switzerland for about twenty years. While agricultural vehicles used in Switzerland are generally not as heavy as in many other countries, primarily due to limiting topographical conditions, many agricultural soils in Switzerland tend to be sensitive to compaction because of clayey texture and because of the humid climate. Recently, the problem of subsoil compaction has obtained attention in soil protection as agricultural land has become increasingly affected by its temporary use as access ways for heavy machinery in the course of pipeline and road construction work.

Most research related to soil compaction in Switzerland focussed on effects on physical soil quality associated with various farming practices. Such effects were primarily assessed in terms of bulk density, porosity, hydraulic conductivity and air permeability. More recently structural effects were also determined in situ by the analysis of infiltration patterns of dye tracers. In order to find measures for the sensitivity of subsoils to compaction, recent studies also assessed soil parameters such as soil-water potential, preconsolidation pressure, and penetration resistance.

Of all the parameters considered in these studies so far, preconsolidation pressure proved to be the best predictor for the sensitivity of a soil to compaction. Attempts to predict this parameter from other soil properties such as textural and hydraulic characteristics have in general been promising for light-textured soils, but met with little success for heavy-textured soils. Furthermore, while experience has shown that soil compressibility may depend critically on soil moisture, proposed predictive relationships for this dependence remain to be validated.

*In: J.J.H. van den Akker, J. Arvidsson and R. Horn (Editors), Proceedings of the First Workshop of the Concerted Action "Experience with the impact of subsoil compaction on soil, crop growth and environment and ways to prevent subsoil compaction" (1999). DLO-Staring Centre, Wageningen, The Netherlands, pp. 56-63.*

### **Background of subsoil compaction research in Switzerland**

Mainly because of topographical limitations, agricultural vehicles are in general not as large and heavy in Switzerland as in many other countries. Nonetheless, soils in many places are subject to compaction by agricultural machinery because of the humid climate and the relatively widespread occurrence of poorly drained fine-textured soils. Soil compaction has been recognised as a problem for soil fertility in Switzerland in the late seventies. Since then various studies dealt with the risks of agricultural soil compaction. Thus, Schmid and Thöni (1986) investigated soil compaction caused by fodder production. Vez and Neyroud (1979) and Reust and Neyroud (1985) found that compaction decreased yields of spring wheat by more than 15% and also reduced the effect of nitrogen fertilization. In a long-term study, Kramer (1983, 1988, 1991) compared the effects of light-weight versus heavy-weight machines on soil structure and crop yields. He found that, over two decades, light-weight agricultural machinery performed slightly, but significantly better.

While earlier studies primarily focused on topsoil quality and only marginally considered subsoil compaction, Weisskopf et al. (1988, 1989) and Schwab et al. (1989) specifically addressed the problem of subsoil compaction. In the framework of the Swiss National Research Programme 'Soil' these authors performed a nation-wide assessment with respect to the compaction of Swiss agricultural soils and to the risk-determining factors. They estimated that 10-15 % of Swiss agricultural soils were over-compacted.

As the size and weight of agricultural vehicles continued to increase, more and more concern arose about the eventual impacts of their use on subsoil compaction (Kramer, 1991), and the lack of scientific basis to predict them (Schulin, 1993) motivated further studies on agricultural subsoil compaction. These studies include the investigation of soil compaction caused by trailers on caterpillar tracks (Anken et al., 1993), by two different plough systems (Weisskopf et al., in preparation), and by heavy sugar-beet harvesters (Diserens, 1996; Diserens et al. 1998; Weisskopf et al., 1997). Furthermore, the regeneration of the physical structure of top- and subsoil compaction is under investigation, using the analysis of dye tracer infiltration patterns in addition to traditional soil physical methods (von Albertini et al., 1995).

Until the early nineties, soil compaction research in Switzerland was focused on the comparison of effects exerted by different farming practices and equipments. At that time the construction of gas transport pipelines through agricultural land made soil compaction also an issue for soil protection agencies called by worried farmers. Guidelines were drafted in collaboration between soil protection agencies and the gas industry and issued by the Federal Office of Energy Management (BEW, 1993) as part of federal government concessions for pipeline constructions. These guidelines, which were revised in 1997, rule the allowable weight and contact pressure of construction machinery according to a postulated dependence of soil compaction sensitivity on the tensiometric soil-water potential.

Debate about the validity of the assumed relationship between soil moisture and compaction risk (e.g. Schulin, 1995) not only spawned a series of pilot studies in form of diploma theses and other student works (e.g., Sabbadini, 1995; Berli & Hoerner, 1996; von Rohr, 1996; Schönbächler, 1997; Weber & Zimmermann, 1997; Jauslin & Zimmermann, 1998), but also led to the initiation of a research project funded by the gas industry to investigate the compaction effects of heavy construction machinery on various Swiss agricultural and forest subsoils in terms of parameters such as bulk density, pressure-consolidation curves, water retention characteristics, hydraulic and pneumatic permeability, and infiltration characteristics, as well as the relationship of such effects to soil properties assumed to characterize the sensitivity of soils for compaction, e.g. tensiometric soil-water potential, preconsolidation pressure, soil type and texture. First results of the latter project have been

summarized in internal reports by Kulli et al. (1997) and Berli et al. (1998). A journal publication is in preparation.

Publicity of the soil compaction risks associated with pipeline construction led to an increased awareness of the problems of physical soil degradation in Switzerland. As a consequence, physical soil protection, in particular protection of physical soil quality against erosion and compaction, became incorporated explicitly into the 'Federal Law relating to the Protection of the Environment' (USG) recently revised by the Swiss Parliament (Schweizerische Bundesversammlung, 1997). Detailed regulations how the general principles of the Environmental Protection Law are to be made effective in practice is subject to the 'Federal Ordinance relating to Impacts on Soil' (VBBo), which is currently in preparation to be issued later on this year, 1998, by the Swiss Government (Schweizerischer Bundesrat, 1998).

### **Research into subsoil compaction: state of the art in Switzerland**

Table 1 gives a list of major research projects dealing with subsoil compaction in Switzerland. Soil properties recorded in these projects are compiled in Table 2, and Table 3 gives a short description of the methods used to determine these properties. We do not claim that these lists are complete, they represent the material that our search has turned up.

Although Project 5 gave estimates of the abundance of soil compaction in Swiss agricultural soils on the basis of sample information and soil maps, no comprehensive survey areal extension and distribution of compaction, has been performed in Switzerland up to now. As mentioned before, previous research related to soil compaction in Switzerland has focussed mainly on effects on physical soil quality associated with various farming practices. In addition to effects on soil properties, effects on crop production have been assessed, e.g. in Projects 1 and 3. In recent work, more emphasis is given on specific load situations in order to get a better mechanistical understanding of processes involved in soil compaction.

Table 1. Selected research projects dealing with agricultural subsoil compaction in Switzerland

No.	Description	Institution	References
1	Long-term impact of farming machinery on physical soil properties: comparison between systems of light and heavy machinery	Federal Agricultural Research Station Tänikon	Kramer (1991), Diserens (1996)
2	Comparison of the effects of various plough types on soil structure	Federal Agricultural Research Stations Tänikon and Zürich Reckenholz	Weisskopf et al. (in preparation)
3	Soil compaction effects of various sugar-beet harvesters	Federal Agricultural Research Stations Tänikon and Zürich Reckenholz	Weisskopf et al. (1997) Diserens et al. (1998)
4	Soil compaction caused by caterpillar-driven vehicles for the distribution of manure in comparison to conventional trailers with wheels	Federal Agricultural Research Stations Tänikon and Zürich Reckenholz	Anken et al. (1993)
5	Risk of agricultural soil compaction in Switzerland	Federal Agricultural Research Stations Tänikon and Zürich Reckenholz	Weisskopf et al. (1988), Schwab et al. (1989), Weisskopf et al. (1989)
6	Subsoil compaction on agricultural land due to heavy machinery used in gas pipeline construction	Institute of Terrestrial Ecology, ETH Zürich	Berli et al. (1996), Kulli et al. (1997), Berli et al. (1998)

The soil properties listed in Table 2 may be divided into three groups: properties primarily determined to assess effects of mechanical stress on soil structure, properties determined to characterize the consistence of the soil, in particular its sensitivity of soil for compaction, and parameters characterizing the stress situation itself. The first group comprises bulk density, porosity, water retention characteristics, pneumatic permeability and hydraulic conductivity, the second group comprises preconsolidation stress, shear strength, penetration resistance, soil structure, aggregate stability, grain size distribution, stone content, organic matter content and soil water potential, while the third group is represented here by one parameter only: mean soil stress as determined by Bolling pressure probes.

As compaction will in general also affect the resistance of soil against further compaction, parameters directly characterizing this resistance may also be used to assess effects. Preconsolidation pressure has been used in such manner (e.g., Project 6). By the same reasoning, parameters primarily used to assess compaction effects such as bulk density may also be used as indicators for the mechanical stability of a soil. Although no strict distinction between the three groups of parameters is possible, Table 2 shows that half of the projects were primarily effect-oriented, while in the other projects the focus was or still is on the soil conditions determining resistance against compaction.

Of all the parameters investigated so far, the preconsolidation pressure was found to be the best predictor of soil sensitivity to compaction. Using the method of DVWK (1995), other parameters such as soil structure and organic matter content were usually found to provide fairly good predictions of soil resistance against compaction for sandy to loamy textures, but

in general not for clayey soils. Furthermore, field methods such as soil penetrometry did not prove to be useful for mapping soil sensitivity to compaction up to now. Like other indicators, soil penetrometer resistance may, however, be useful for assessing compaction effects by differential comparison, i.e. by comparing measurements of compacted soils with reference measurements of non-compacted, but otherwise comparable soils (including measurements of the same soil before compaction).

Table 2. Soil properties determined in the projects listed in Table 1 with respect to subsoil compaction (for description of methods cf. Table 3).

Property	No. of project in Tab. 1					
	1	2	3	4	5	6
Bulk density	x	x	x	x	x	x
Porosity	x	x	x	x	x	x
Water retention characteristics	x	x	x	x	x	x
Pneumatic permeability		x	x	x	x	x
Saturated hydraulic conductivity	x	x	x			x
Preconsolidation pressure						x
Shear strength						x
Penetration resistance	x			x		x
Soil structure	x				x	x
Aggregate stability					x	
Grain size distribution	x				x	x
Stone content	x				x	x
Organic matter content	x				x	x
Soil-water potential	x				x	x
Soil stress		x	x	x		x

### Current trends, new approaches, and future research needs

Current work on subsoil compaction includes the development and improvement of methods suited for in-situ assessment of soil compaction and its effects on pore structure, the application of numerical models to assist the design and analysis of experiments, and investigations of the regeneration of compacted soils.

At the Institute of Terrestrial Ecology, one sub-project is focussing on the potential of numerical image analysis of dye infiltration patterns and X-ray tomograms (Kulli et al., 1997; Berli et al., 1998) to assess subsoil compaction, after von Albertini et al. (1995) found that dye infiltration patterns were sensitive indicators of natural regeneration of soil structure in a previously compacted agricultural soil. Preliminary results show that this technique may also be very useful for studying soil compaction impacts of heavy construction machinery on

farmland (Sabbadini, 1995). Recently, Diserens et al. (1998) applied this method to assess the spatial extent of soil compaction caused by sugar-beet harvesters.

At the Institute of Land Improvement and Water Management of ETH Zurich, a device called 'Large Area Subsidence Meter' (LASM) is adapted to determine vertical compression within soil profiles (S. Tobias, personal communication). The device consists of pairs of water-filled probes to be inserted at different levels into the soil profile and connected by plastic tubes to a pressure gauge and measures changes of the vertical distance between the two levels of the probes in terms of the hydrostatic pressure difference between them.

As mentioned before, there is now an increased interest in the mechanical processes involved in subsoil compaction in Switzerland. Current studies focus on the investigation of the precise nature of the relationship between soil moisture and resistance against compaction, on the analysis of stress transition between wheels or caterpillar tracks and soil, and on the analysis of stress propagation in heterogeneous soils.

Table 3. Methods used to determine the soil properties listed in Table 2.

Property	Method	Reference	Comment
Bulk density	oven-drying of 'undisturbed' core samples	Blake and Hartge (1986)	sample sizes varying between 0.1 and 1 L
Porosity	calculation from real and bulk density		real density determined by pycnometer method or estimated from soil composition
Water retention characteristics	pressure plate method (Richards apparatus)	Klute (1986)	sample sizes varying between 0.1 and 1 L
Pneumatic permeability	Eijkelkamp air permeameter, as well as own method with air pressure relaxation at constant water content	Berli and Hoerner (1996)	'undisturbed' core samples varying between 0.1 and 1 L
Saturated hydraulic conductivity	constant head method.	Klute and Dirksen (1986)	'undisturbed' core samples varying between 0.1 and 1 L
Preconsolidation pressure	analysis of pressure-consolidation curves (oedometer method) by method of Casagrande (1936)	Lang et al. (1996)	'undisturbed' cylindrical samples of various sizes: 3 cm height x 9 cm diameter or 11 cm height x 11 cm diameter
Shear strength	consolidated undrained triaxial test	Lang et al. (1996)	
Penetration resistance	cone-penetrometer	Bradford (1986)	various types of probes and cones used
Soil structure	qualitative assessment by visual inspection	Brunner et al. (1997)	no standard classification scheme
Aggregate stability	settling of loosely packed aggregates in a stamping apparatus	Hartge (1969)	
Grain size distribution	wet sieving and sedimentation (pipet method)	Gee and Bauder (1986c)	
Stone content	wet sieving	Gee and Bauder (1986b)	1 L samples, not applied to soils with large stones
Organic matter content	potassium permanganate method or gravimetric determination of 'wet-ashing' with H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Gee and Bauder (1986a)	
Soil-water potential	tensiometry	Cassel (1986)	
Soil stress	Bolling pressure probes	Bolling (1987)	indicator of mean stress (depending on soil stiffness)

Another subject, which deserves much more attention in Switzerland for future research into subsoil compaction, is the scale problem. The size of samples analyzed in the laboratory has usually been insufficient to represent field soil heterogeneity even on the local scale of a soil profile. To study the spatial variability of soil properties and processes involved in compaction is of particular importance for Switzerland. Swiss soils tend to be extremely heterogeneous even over very short distances, due to the diversity in topography and geology.

As a concluding remark to this brief overview of Swiss research into agricultural subsoil compaction we should emphasize that drawing more attention to the soil mechanical problems in subsoil compaction research does not mean that our knowledge about the effects of subsoil compaction on soil fertility and soil functions in general is already sufficient. Although beyond the scope of this review, we found that, in the framework of compaction research, several other topics besides those mentioned before require much more in-depth investigation. These topics include the detailed nature of soil structure deformation, changes in the air, water, nutrient and temperature regimes of affected soil, and changes in the functioning of compacted soils as a vital part of our environment.

### **Acknowledgement**

We thank the following persons for their kindness to supply us with material, information, and helpful criticism for the preparation of this report: Beatrice Kulli, Silvia Tobias, Thomas Anken, Etienne Diserens, Werner Attinger, Urs Müller, Jean-Auguste Neyroud and Tim Green.

### **References**

- Anken, T., Weisskopf, P., und Johner, F., 1993. Bodendruck und -verdichtung unter einem Raupenfahrzeug. *Landtechnik Schweiz* 93/1, 9-12.
- Berli, M., Hoerner, J., 1996. Bestimmung der Verdichtungsempfindlichkeit von Kulturböden mittels Oedometer- und Luftdurchlässigkeitsuntersuchungen. Diplomarbeit an der Abt. VIII der ETH Zürich. Institut für terrestrische Ökologie der ETHZ, Grabenstrasse 11a, 8952 Schlieren. 71 S. und Anhang.
- Berli, M., Hoerner, J., Attinger, W. und Schulin R., 1996. Bestimmung der Verdichtungsempfindlichkeit von Kulturböden. *Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Dokument* 8, 15 - 18.
- Berli, M., Kulli, B., Attinger, W., Keller, M., Leuenberger, J., Flühler, H. und Schulin, R., 1998. Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit des Unterbodens beim Verlegen unterirdischer Rohrleitungen durch Kulturland. Interner Bericht. Institut für terrestrische Ökologie der ETH Zürich, Grabenstrasse 11a, 8952 Schlieren. 25 S. und Anhang.
- BEW, 1993. Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen (Bodenschutzrichtlinien). Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW), 3003 Bern. 7 S. und Anhang.

- BEW, 1997. Revidierte Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen (Bodenschutzrichtlinien). Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW), 3003 Bern. 8 S. und Anhang.
- Blake, G.R., Hartge, K.H., 1986. Bulk Density - Core Method. In: Klute A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods - Agronomy Monograph no. 9* (2nd Edition). American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 364-367.
- Bolling, I., 1987. Bodenverdichtung und Triebverhalten bei Reifen: Neue Mess- und Rechenmethoden. Dissertation, Universität München.
- Bradford, J. M., 1986. Penetrability - Cone Penetrometer. In: Klute A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods - Agronomy Monograph no. 9* (2nd Edition). American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 468-472.
- Brunner, J., Jäggi, F., Nievergelt, J. und Peyer, K., 1997. Kartierung und Beurteilung von Landwirtschaftsböden. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau Zürich-Reckenholz, 8046 Zürich.
- Casagrande, A., 1936. The Determination of Pre-Consolidation Load and its practical Significance. Proceedings of the international Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 22 to 26 July 1936, Harvard University, Cambridge, Massachusetts Vol. III, pp. 60-64.
- Cassel, D. K., 1986. Field Tensiometry. In: Klute A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods - Agronomy Monograph no. 9* (2nd Edition). American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 570- 587.
- Diserens, E., 1996. Höheres Maschinengewicht im Feldbau? FAT-Bericht 492, 1-8.
- Diserens, E., Anken, T., Weisskopf, P. und Zihlmann, U., 1998. Tragen Unterböden grössere Lasten als erwartet? Agrarforschung 5, 9-12.
- DVWK, 1995. Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden. Teil I: Mechanisch Belastbarkeit. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V (DVWK), Merkblätter zur Wasserwirtschaft 234/1995. 12 S.
- Gee, G. W., Bauder, J.W., 1986a. Particle-Size Analysis - Organic Matter Removal. In: Klute A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods - Agronomy Monograph no. 9* (2nd Edition). American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, p. 390.
- Gee, G. W., Bauder, J.W., 1986b. Particle-Size Analysis - Sieving. In: Klute A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods - Agronomy Monograph no. 9* (2nd Edition). American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, p. 393.
- Gee, G. W., Bauder, J.W., 1986c. Particle-Size Analysis - Pipet Method . In: Klute A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods - Agronomy*

- Monograph no. 9 (2nd Edition). American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, pp. 399-404.
- Hartge, K. H., 1969. Die Sackungsneigung als Aspekt der Strukturstabilität. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 122, 250-259.
- Jauslin, M., Zimmermann, S., 1998. Verdichtungsempfindlichkeit unterschiedlicher Bodentypen entlang der geplanten Erdgas-Transportleitung Däniken-Griespass. Diplomarbeit an der Abt. VIII der ETH Zürich. Institut für terrestrische Ökologie der ETH Zürich, Grabenstrasse 11a, 8952 Schlieren. 69 S. und Anhang.
- Klute, A., 1986. Water Retention - Laboratory Methods. In: Klute A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods - Agronomy Monograph no. 9 (2nd Edition). American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, Madison Wisconsin, pp. 644-656.
- Klute, A., Dirksen, C., 1986. Hydraulic Conductivity of saturated Soil - Constant Head Method. In: Klute A. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods - Agronomy Monograph no. 9 (2nd Edition). American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, Madison Wisconsin, pp. 694-700.
- Kramer, E., 1983. Anhängerreifen. Blätter für Landtechnik 222, 1-8.
- Kramer, E., 1988. Traktorreifen - 14 Merkmale zu über 140 Typen. FAT-Bericht 340, 1-10.
- Kramer, E., 1991. Schlagkräftige Mechanisierung - eine Gefahr für unsere Böden? FAT-Bericht 412, 1-6.
- Kulli, B., Berli, M., Attinger, W., Flühler, H., und Schulin, R., 1997. Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit des Unterbodens beim Verlegen unterirdischer Rohrleitungen durch Kulturland. Interner Bericht. Institut für terrestrische Ökologie der ETH Zürich, Grabenstrasse 11a, 8952 Schlieren. 16 S..
- Lang, H. J., Huder, J., und Amann, P., 1996. Bodenmechanik und Grundbau. 6. Auflage. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 320 S..
- Reust, W., Neyroud, J. A., 1985. Effets du tassement du sol sur la croissance de la pomme de terre et les propriétés physique de la rhizosphère. Revue suisse d'Agriculture 17, 273-278.
- Sabbadini, F., 1995. Auswirkungen von mechanischen Bodenbelastungen auf die bodenphysikalischen Eigenschaften von verdichtungsgefährdeten Kulturböden. Diplomarbeit an der Abt. VIII der ETH Zürich. Institut für terrestrische Ökologie der ETH Zürich, Grabenstrasse 11a, 8952 Schlieren. 75 S. und Anhang.
- Schmid, Ch., Thöni, E., 1986. Bodenverdichtungen - auch im Futterbau? Die Grüne 114, 11-18.
- Schönbächler, D., 1997. Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit von Kulturböden anhand Luftdurchlässigkeit und mechanischer Vorbelastung beim Bau einer Transportgasleitung. Diplomarbeit an der Abt. XB der ETH Zürich. Institut für terrestrische Ökologie der ETH Zürich, Grabenstrasse 11a, 8952 Schlieren. 58 S. und Anhang.

- Schulin, R., 1993. Physikalische Grundlagen zur Umschreibung des Begriffs der Bodenfruchtbarkeit. *Landwirtschaft Schweiz* 6, 115 - 120.
- Schulin, R., 1995. Physikalischer Bodenschutz und die Kluft zwischen Physik und Bodenschutz. *Bull. Bodenkundl. Ges. Schweiz* 19, 67 - 72.
- Schwab, P., Weisskopf, P., Kramer E. und Jäggli, F., 1989. Die Verdichtungsgefährdung schweizerischer Ackerböden. II. Die Verdichtungsgefährdung aus landtechnischer Sicht. *Landwirtschaft Schweiz* 11, 640-644.
- Schweizerische Bundesversammlung, 1997. Bundesgesetz über den Umweltschutz. Revision vom 22. Dezember 1995. Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale, 3001 Bern.
- Schweizerischer Bundesrat, 1998. Verordnung über Bodenbelastungen. Eidgenössische Drucksachen- und Materialzentrale, 3001 Bern. (In preparation).
- Vez, A., Neyroud, J. A., 1979. Tassement du sol par les passages de tracteur et effet sur les rendements du blé de printemps. *Revue suisse d'Agriculture* 11, 221-225.
- von Albertini, N., Leuenberger, J., Läser, H.P. und Flühler, H., 1995. Regeneration eines verdichteten Ackerbodens unter Kunstwiese. *Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz Dokument* 7, 10-16.
- von Rohr, G., 1996. Auswirkungen des Rohrleitungsbaus auf bodenphysikalische Kenngrössen. *Berichte der Geographischen Gesellschaft Bern* Nr. P 33. 108 S. und Anhang.
- Weber, M., Zimmermann, S., 1997. Bestimmung der Vorbelastung eines verdichtungsempfindlichen Waldbodens vor und nach der Ueberfahung mit einer schweren Baumaschine. Semesterarbeit an der Abt. VIII der ETH Zürich. Institut für terrestrische Ökologie der ETH Zürich, Grabenstrasse 11a, 8952 Schlieren. 42 S. und Anhang.
- Weisskopf, P., Schwab, P., Jäggli, F., Kramer, E., Peyer, K. und Studer, R., 1988. Die Verdichtungsgefährdung schweizerischer Ackerböden. Nationales Forschungsprogramm "Boden", Bericht Nr. 20, 128 S.
- Weisskopf, P., Schwab, P., 1989. Mechanisierungsbedingte Verdichtungsgefährdung an Beispielen aus Praxisbetrieben. *Landtechnik Schweiz* 89/8, 21-33.
- Weisskopf, P., Schwab, P., Jäggli, F. und Kramer, E., 1989. Die Verdichtungsgefährdung schweizerischer Ackerböden. I. Die Verdichtungsgefährdung aus bodenkundlicher Sicht. *Landwirtschaft Schweiz* 11, 635-639.
- Weisskopf, P., Zihlmann, U., Diserens, E. und Anken, T., 1997. Zuckerrübensvollernter und Bodenverdichtungen. *Landtechnik Schweiz* 97/10, 16-20.

## **Deriving threshold values for soil compaction from expert judgement**

Silvia Tobias

Swiss Federal Institute of Forest, Snow and Landscape Research (WSL)

Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, Switzerland

Phone: +41-1-739 23 49, fax: +41-1-739 25 75, [silvia.tobias@wsl.ch](mailto:silvia.tobias@wsl.ch)

*Implementation of the soil protection legislations in soil physical aspects is an urgent task, although there is a lack of criteria and threshold values to assess the state and risk of soil compaction. The following contribution presents the first results of a Delphi survey among Swiss soil experts to elicit their personal experience in judging soil compaction. Threshold values can be derived from descriptive statistics, although they do not show unambiguous results. A fuzzy membership model to classify the soil data was equally derived from the experts' answers. This model allows more for uncertainties of the experts' decisions and is rather recommended to the policy makers than possible thresholds from descriptive statistics.*

### **Introduction**

Many European countries have enacted their soil protection legislations. However, the execution of these legislations lacks of rules to assess soil health and to decide on sustainable management practices in many aspects. There is a particular lack of criteria and threshold values to assess the state and risk of soil compaction. In the recent past, much effort has been made in sophisticated experiments to describe the processes and effects of soil compaction. However, the specific results of single experiments cannot be applied to any other case in a general way. On the other side, different kinds of experts (scientists, officers, farmers) dispose of personal experience that allows them to judge soil compaction and the feasibility of the experimental data within their working fields. This contribution presents the first results from an elicitation of expert judgment with the Delphi method to derive meaningful and operable criteria and evaluation rules for the assessment of soil compaction.

### **Materials and Methods**

#### ***Delphi survey***

In the years 2001 and 2002, a Delphi survey was accomplished among the members of the Swiss Soil Science Society. The Delphi survey consisted of three turns with 42 questionnaires returned at the first turn and 24 at the third turn. In the first turn, the experts were asked to mention in their own words the three most important criteria, i.e. physical soil properties, they use to judge the state of soil compaction and susceptibility to compaction.

In the second turn, the experts were asked to group 21 data records with measurements of soil physical parameters from single horizons into 5 classes ranging from not compacted to highly compacted and not susceptible to highly susceptible to compaction, respectively. In addition, they had to mention the parameters that had been crucial for their decisions.

The third turn of the Delphi survey was a replication of the second turn in order to create a convergence in the answers. For each data record, the experts were presented the distribution

of the judgments from the second Delphi-turn as well as their own judgment. They were asked whether they agreed with the median of all the judgments or not.

### **Soil data**

The soil data were restricted to eutric cambisols with agricultural land use. The experts were given the following parameters: depth where the sample was taken, bulk density, coarse pore content (ascertained at a matrix potential of 6 kPa), precompression stress (ascertained at a matrix potential of 6 kPa), organic matter, soil texture, soil type, water regime, soil structure, land use. The range of the different soil parameters was chosen as wide as possible, whereas the range of soil type varied between naturally developed and artificially restored eutric cambisols, only. The data records in Tab. 1 show real measurements of those parameters that were mentioned to be most important for judging the state and susceptibility of compaction.

### **Descriptive statistics of the Delphi results**

The data sets were grouped into the different classes according to the number of counts. A case summary of the different classes provided the means and standard deviations of the decisive soil parameters that can be interpreted as threshold values to judge the state or susceptibility of compaction. The discriminatory power between the groups gained from the Delphi survey was tested by contrast analysis within a one-way anova.

### **Fuzzy membership functions of the Delphi results**

In most cases, the distribution of the counts showed that most data records could be grouped in more than one single class. In addition, the statistical analyses described above assume independency of the soil parameters, which is not true and was not assumed by the experts either. The comments in their answers showed that they took the relationships between the soil parameters into account. Examples of comments were: "even with this low precompression stress, coarse pore content is very low"; "good values for coarse pores in a B-horizon with medium precompression stress"; "although bulk density is high, there are many coarse pores (soil can still be more compacted)"; "with this texture, bulk density and precompression stress are high (soil is not susceptible to compaction)".

For these reasons, fuzzy membership functions were estimated for each of the decisive soil parameters and each class of state of compaction and susceptibility to compaction. We estimated the parameters  $a_i$  ( $i=1, 2, \dots, 5$ ) for three types of fuzzy membership functions (Fig. 1):

- Fuzzy low function: steadily decreasing function, where the low values of the measured data had the highest membership degrees

$$f_{low}(x) = \begin{cases} a_3 & \text{if } x < a_1 \\ a_3 \cdot \frac{x - a_2}{a_1 - a_2} & \text{if } a_1 \leq x < a_2 \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

- Fuzzy mid function: convex function, where the middle range of the measured values had the highest membership degree

$$f_{mid}(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < a_1 \vee x \geq a_4 \\ a_5 \cdot \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & \text{if } a_1 \leq x < a_2 \\ a_5 & \text{if } a_2 \leq x < a_3 \\ a_5 \cdot \frac{x - a_4}{a_3 - a_4} & \text{if } a_3 \leq x < a_4 \end{cases}$$

Fuzzy high function: steadily increasing function, where the highest values of the measured data had the highest membership degrees

$$f_{high}(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < a_1 \\ a_3 \cdot \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & \text{if } a_1 \leq x < a_2 \\ a_3 & \text{else} \end{cases}$$

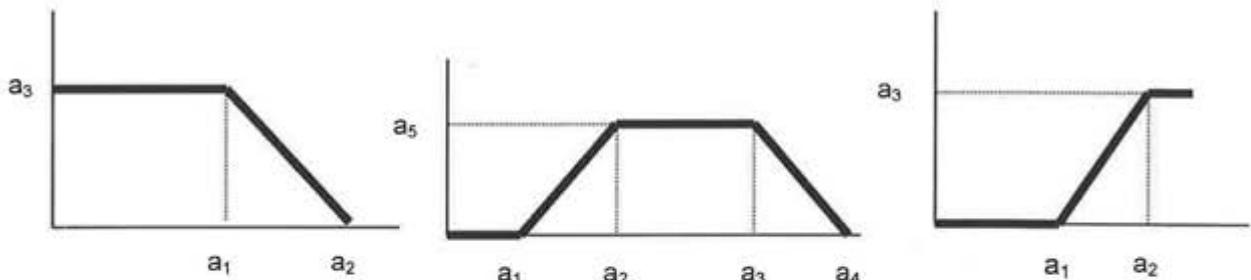


Fig. 1 Fuzzy membership functions that were fitted for each class and each of the decisive soil parameters; left: fuzzy low function; middle: fuzzy mid function; right: fuzzy high function

## Results

### Convergence of the experts' answers

There was a high convergence in the answers; the grouping of the data records was much sharper in the third turn of the survey than in the second one. The answers always converged towards the class with the most counts, although the experts were asked, if they agreed with the median of the answers. Sometimes, the distribution of the counts between the different classes was flat. Table 1 shows the final classification of the data sets taking the maximum of the counts.

### Decisive parameters

There was also a convergence in the criteria the experts mentioned as the basis of their judgments (Fig. 2). In the first turn of the survey, the experts mentioned qualitative parameters (e.g. soil water regime, soil structure) as most important. However, in the second and third turn, most of the experts declared to have mainly used quantitative parameters (e.g. coarse pore content, bulk density) to judge the examples given. Quantitative parameters seem to be relied on more in a concrete problem and are possibly more useful as threshold values in soil protection legislation.

*Table 1 Values of decisive parameters mentioned to judge the state and susceptibility of soil compaction*

Data set	Class for state of compaction	Class for susceptibility to compaction	Bulk density (kg/l)	Coarse pores (%)	Precompression stress (kPa)	Clay content (%)
1	2	5	0.91	6.8	40	47.8
2	4	3	1.50	5.4	56	26.1
3	3	4	1.5	5.4	47	31.0
4	5	2	1.51	4.2	166	27.9
5	2	3	1.49	10.9	62	24.2
6	3	3	1.52	8.5	64	22
7	3	3	1.49	6.9	59	23.6
8	3	3	1.51	6.6	87	28.6
9	3	2	1.57	9.7	140	16.3
10	1	4	1.44	16.4	16.6	18.6
11	2	3	1.56	7.2	38.5	19.7
12	1	3	1.32	10.0	72	17.6
13	1	3	1.35	12.5	27.2	20.3
14	3	3	1.42	8	106	19.0
15	2	2	1.38	11.5	113	18.2
16	2	4	1.13	8.7	31	28.2
17	3	3	1.55	6.4	84	25.8
18	3	2	1.43	5	119	17.0
19	1	5	1.26	17.0	13.0	21.8
20	1	4	1.04	12.3	70	50.9
21	5	2	1.54	2.3	200	20.2

The decisive parameters for grouping the data records in different classes of state of compaction were coarse pore fraction, bulk density and precompression stress. Grouping the data records in classes of susceptibility to compaction, the experts mentioned precompression stress, coarse pore fraction, bulk density, water regime, and clay content as decisive parameters. In the tables 2 and 3 the importance of these parameters is shown. It is derived from the average counts (in % of 24 as there were 24 experts in the last Delphi turn) over all 21 data sets. The weights were determined from these average counts the way that they sum up to 1 for the three or four parameters mentioned in the tables.

A quantitative analysis of the values of the single soil parameters is shown for the state of compaction by the means and standard deviation for each class in Fig. 3. The values for the state of compaction are given in table 4. Note that there is only one data set in class 4. Coarse pore content decreases almost linearly with higher classes of state of compaction. In addition, for this obviously most decisive parameter the data scatter the least.

Contrast analysis within a one way anova reveals significant differences between the means of two neighbour classes only where it can already be assumed by a look at Fig. 3. Coarse pore content shows significant mean differences between the classes 1 and 2 for the state of compaction. For bulk density, significant mean differences are given between the classes 2 and 3 for the state of compaction. Precompression stress reveals significant mean differences between the classes 3 and 5 for the state of compaction.

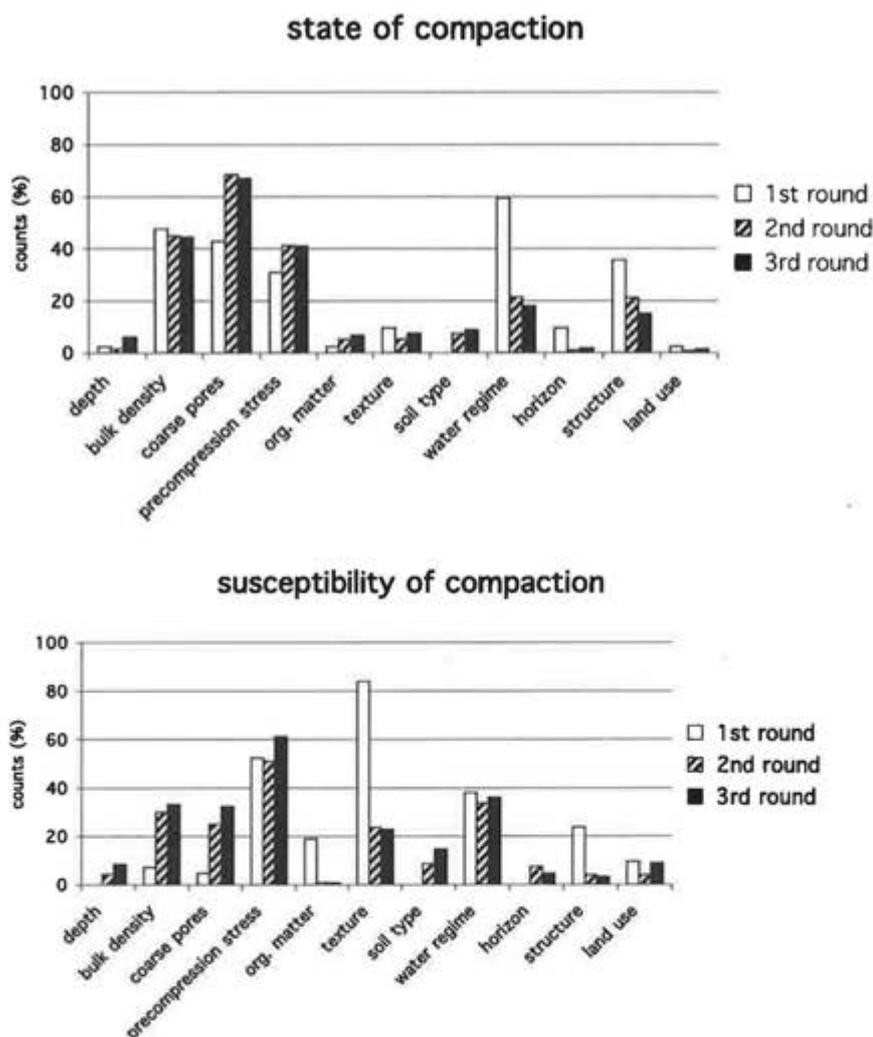


Fig. 2 Importance of the different soil parameters to judge the state of or the susceptibility to soil compaction as mentioned by the experts in the different turns of the Delphi survey

Table 2 Weight of the decisive parameters for the experts' judgments of the state of compaction

	Coarse pore content	Bulk density	Precompression stress
Average counts (in % of 24)	58.5	38.8	35.8
Weight	0.44	0.29	0.27

Table 3 Weight of the decisive parameters for the experts' judgments of the susceptibility to compaction

	Precompression stress	Bulk density	Coarse pore content	Clay content
Average counts (in % of 24)	53.6	29.0	28.3	27.6
Weight	0.39	0.21	0.20	0.20

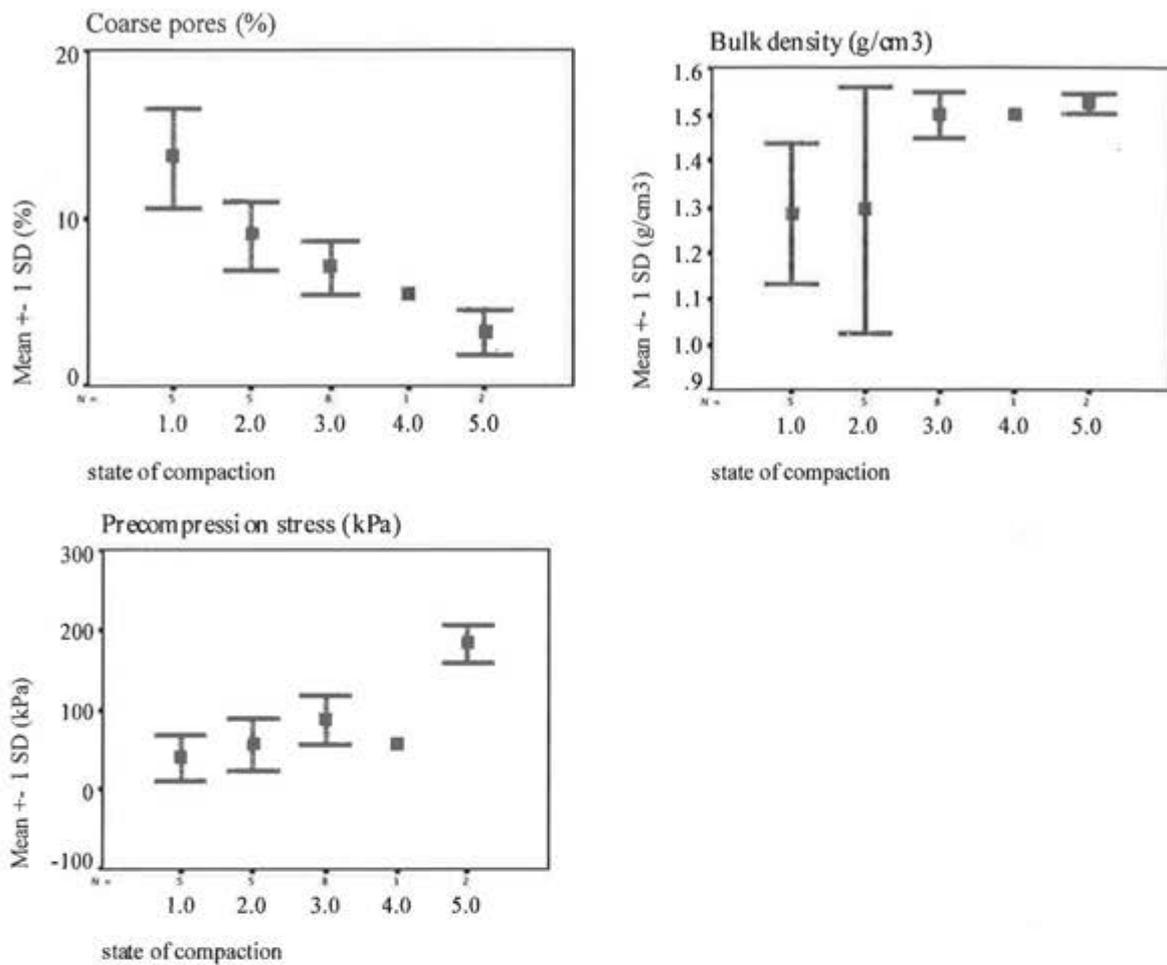


Fig. 3 Means +/-1 standard deviation in the different classes of state of compaction for the most decisive parameters in the 3<sup>rd</sup> turn of the Delphi survey

Table 4 Case summary for the decisive parameters of the experts' judgments of the state of compaction

State of compaction class	Bulk density (kg/l)	Coarse pores (%)	Precompression stress (kPa)
1	mean	13.67	39.79
	standard dev.	2.960	29.057
	N	5	5
	maximum	17.01	72.19
	minimum	10.05	13.00
2	mean	7.98	81.75
	standard dev.	2.120	33.488
	N	5	5
	maximum	11.51	113.29
	minimum	6.80	31.30
3	mean	7.06	88.28
	standard dev.	1.584	31.777
	N	8	8
	maximum	9.66	139.78
	minimum	5.00	47.00

4	mean	1.50	5.4	56
	standard dev.	—	—	—
	N	1	1	1
	maximum	—	—	—
	minimum	—	—	—
5	mean	1.53	3.25	183.00
	standard dev.	0.021	1.344	24.042
	N	2	2	2
	maximum	1.54	4.20	200.00
	minimum	1.51	2.30	166.00

### *Fuzzy membership model*

Calculation of the fuzzy membership functions was successful. For the state of compaction, fuzzy membership function could be fitted to all the data of the decisive parameters. Applying the fuzzy membership functions for the decisive parameters of the experts' judgments and accounting for the parameters' weights of table 2 reveals the distribution of the memberships of the different classes for each data set. Table 5 shows the membership distribution gained with our fuzzy membership model in comparison to the distribution of the experts' judgments. The fuzzy membership model approaches the distribution of the experts' judgments in principle. The experts' judgments show more distinct peaks, while the membership distribution gained from the fuzzy model is more even. The maximum of the modeled membership lies in the same class as the maximum of the experts' counts for 18 cases. Differences are given for the data records 3, 11 and 12.

### **Conclusions**

The Delphi survey presented here is an approach to derive threshold values to judge the state of compaction and the susceptibility to compaction in soil protection legislation. This experts' judgment cannot replace further experimental research on soil compaction, but it may support policy makers in their decisions about sustainable soil use and management. Implementation of the soil protection legislation is an urgent task and therefore it is necessary to gather the existing knowledge among the soil experts. This contribution showed the results according to the current state of the work.

The thresholds that were implicitly used by the experts to distinguish different degrees of soil compaction can be derived from the range of the values in the different classes in table 4. It is in the responsibility of the policy makers to make a simple distinction between compacted and un-compacted soils by determining the mean values of class 3 as thresholds for the state of compaction, or to make a more detailed classification according to the different classes. These thresholds are, however, gained from a very simple statistical analysis where, in particular, independence of the variables is supposed. This independence between the different soil parameters holds not true for the experts' judgments.

Unlike the statistical analysis, the fuzzy membership model allows for uncertainties in grouping the different data records according to the state of compaction. It quantifies the membership of a certain data record to several classes. In addition, different soil parameters can be integrated in the estimation according to their weights in the experts' judgments. For these reasons, it is assumed that the fuzzy membership model approaches the experts' decisions better than a pure analysis with descriptive statistics. This fuzzy membership model

can be used as a basis to generate evaluation rules for soil compaction that include several soil parameters.

*Table 5 Membership distribution in % for the different classes of state of compaction after the experts' judgments and the fuzzy membership model developed in this study*

data set		class 1	class 2	class 3	class 4	class 5	max in class
1	experts	8	88	4	0	0	2
1	fuzzy model	18	39	24	9	0	2
2	experts	0	0	13	79	8	4
2	fuzzy model	0	13	38	48	2	4
3	experts	0	0	50	42	8	3
3	fuzzy model	0	13	37	42	3	4
4	experts	0	0	0	8	92	5
4	fuzzy model	0	5	11	11	74	5
5	experts	17	79	4	0	0	2
5	fuzzy model	18	34	20	4	0	2
6	experts	4	17	71	8	0	3
6	fuzzy model	0	33	40	8	8	3
7	experts	0	8	58	29	4	3
7	fuzzy model	0	34	39	20	0	3
8	experts	0	0	63	38	0	3
8	fuzzy model	0	12	44	18	7	3
9	experts	4	17	50	25	4	3
9	fuzzy model	3	27	44	8	9	3
10	experts	92	8	0	0	0	1
10	fuzzy model	65	15	11	0	0	1
11	experts	8	63	25	4	0	2
11	fuzzy model	0	31	35	13	8	3
12	experts	63	33	4	0	0	1
12	fuzzy model	26	39	13	0	0	2
13	experts	92	8	0	0	0	1
13	fuzzy model	79	18	2	0	0	1
14	experts	0	17	79	4	0	3
14	fuzzy model	0	37	44	0	0	3
15	experts	13	79	8	0	0	2
15	fuzzy model	30	39	16	0	0	2
16	experts	21	75	4	0	0	2
16	fuzzy model	18	39	22	0	0	2
17	experts	0	0	67	33	0	3
17	fuzzy model	0	10	44	20	8	3
18	experts	0	13	58	21	8	3
18	fuzzy model	0	15	44	21	4	3
19	experts	100	0	0	0	0	1
19	fuzzy model	84	18	0	0	0	1
20	experts	96	0	4	0	0	1
20	fuzzy model	53	18	10	0	0	1
21	experts	4	0	0	11	81	5
21	fuzzy model	0	3	11	8	75	5

## Acknowledgements

The author thanks the many anonymous soil compaction experts for participating in this Delphi survey. The fuzzy membership model was generated in collaboration with Olaf Tietje from o.tietje.Systaim GmbH. Further, the author is indebted to the Swiss Federal Agency of Environment, Forest and Landscape, Section Soil and Biology, as well as the Soil Protection Offices of the Cantons Bern and Solothurn for financial support of this study.

## Nachtrag

Statistische Werte für die effektive Lagerungsdichte für die Klassen des Verdichtungsgrads

*Effektive Lagerungsdichte = Lagerungsdichte + 0.009 x Tongehalt (%)*.

Case Summaries

Klasse	Total	N	Eff.Lagerungsdichte
1	Total	N	5
		Mean	1.516935
		Minimum	1.4560
		Maximum	1.6118
		Std.	.0605453
		Deviation	
2	Total	N	5
		Mean	1.541443
		Minimum	1.3405
		Maximum	1.7330
		Std.	.1797419
		Deviation	
3	Total	N	8
		Mean	1.704411
		Minimum	1.5830
		Maximum	1.7854
		Std.	.0789279
		Deviation	
4	Total	N	1
		Mean	1.733746
		Minimum	1.7337
		Maximum	1.7337
		Std.	
		Deviation	
5	Total	N	2
		Mean	1.741450
		Minimum	1.7218
		Maximum	1.7611
		Std.	.0277893
		Deviation	
Total	Total	N	21
		Mean	1.625896
		Minimum	1.3405
		Maximum	1.7854
		Std.	.1361891
		Deviation	

a Limited to first 100 cases.

## Publikationen der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz

**Bestellungen, Versand:** Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale LmZ  
 Länggasse 79  
 3052 Zollikofen  
 Tel. 031 911 06 68  
 Fax 031 911 49 25  
 E-Mail [lmz@edition-lmz.ch](mailto:lmz@edition-lmz.ch)  
 Internet <http://www.edition-lmz.ch>

**BGS-Bulletins** Preis: Fr. 15.- (ab No. 24 Fr. 25.-) pro Stück **ohne** Porto und Verpackung

Nummer	Jahr	Bestellnummer	Nummer	Jahr	Bestellnummer
3	1979	970 801	18	1994	970 815
5	1981	970 802	19	1995	970 816
6	1982	970 803	20	1996	970 817
8	1984	970 805	21	1997	970 818
11	1987	970 808	22	1998	970 819
12	1988	970 809	23	1999	970 870
14	1990	970 811	24	2000	970 871
15	1991	970 812	25	2001	970 872
16	1992	970 813	26	2002	970 873
17	1993	970 814	27	2004	970 874

No. 1, 2, 4, 7, 9, 10 und 13 vergriffen

**BGS-Dokumente** Preis: Fr. 15.- (ab No. 9 Fr. 25.-) pro Stück **ohne** Porto und Verpackung

Nummer	Jahr	Thema	Bestellnummer
1 f	1984	Exploitation du gravier et agriculture	970 840
2 f	1985	Estimation et protection des sols	970 841
3 d	1986	Bodenschädigung durch den Menschen	970 822
4 d	1989	Lysimeterdaten von schweizerischen Messstationen	970 823
5 d	1994	Aktuelle Bodenforschung in der Schweiz	970 824
6 d	1995	Aktuelle Bodenforschung in der Schweiz II	970 825
7 d	1995	Aktuelle Bodenforschung in der Schweiz III	970 826
8 d	1996	Aktuelle Bodenforschung in der Schweiz IV	970 827
9 d	1999	Physikalischer Bodenschutz	970 828
9 f	1999	Protection des sols contre les atteintes physiques	970 842
10 d	2000	Umfrage Bodenkartierung	970 829
11 d	2001	Bodenkunde und Bodenkundler in der Schweiz 1855 – 1962	970 830
12 d	2003	Sanfte Bodensanierung	970 831
13 d	2004	Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen	970 832
14 d	2004	Bodeninformation Schweiz BI-CH - Schlussbericht 2003	970 833

No. 1 und 2 deutsch vergriffen

**Weitere Publikationen** Preis: Fr. 15.- pro Stück **ohne** Porto und Verpackung

Exkursionsführer ISSS 1986 (Alpentransversale)	Bestellnummer	970 860
Gefährdete organische Böden der Schweiz (1982)		970 861

