

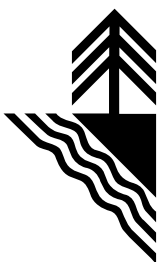
# Bodenschutz beim Bauen



**Bundesamt für Umwelt, Wald  
und Landschaft (BUWAL)**



# Bodenschutz beim Bauen



**Bundesamt für Umwelt, Wald  
und Landschaft (BUWAL)**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>5</b>
<b>Literaturhinweise mit Bezugsadressen</b>	<b>6</b>
<b>Einleitung</b>	<b>8</b>

## **Praktische Anleitungen**

<b>Teil 0: Bodenkundliche Baubegleitung</b>	<b>11</b>
<b>Teil 1: Ausgangszustand</b>	<b>12</b>
<b>Teil 2: Bodenabtrag</b>	<b>16</b>
<b>Teil 3: Zwischenlagerung</b>	<b>22</b>
<b>Teil 4: Wiederherstellung</b>	<b>27</b>
<b>Teil 5: Folgebewirtschaftung</b>	<b>32</b>
<b>Teil 6: Befahren des Bodens</b>	<b>37</b>

## **Erläuterungen zum Thema Böden**

<b>Kap. 1 Bodenfruchtbarkeit</b>	<b>41</b>
<b>Kap. 2 Bodenleben</b>	<b>42</b>
2.1 Grenzbereich Boden/Pflanze	42
2.2 Einteilung und Kurzbeschreibung nach Grössenordnung	43
2.3 Der Regenwurm	46
<b>Kap. 3 Bodentyp</b>	<b>48</b>
3.1 Durchlässige Böden	48
3.2 Staunasse Böden	49
3.3 Grundnasse Böden	49
3.4 Überflutete Böden	49
3.5 Organische Nassböden	50

<b>Kap. 4 Bodenart</b>	<b>51</b>
4.1 Ton	52
4.2 Schluff	53
4.3 Sand	54
<b>Kap. 5 Bodenstruktur</b>	<b>56</b>
5.1 Primärstruktur (= Struktur im engeren Sinne)	56
5.2 Sekundärstruktur (= Gefüge)	57
<b>Kap. 6 Bodendichte und Porenvolumen</b>	<b>60</b>
6.1 Scheinbare und reelle Dichte	60
6.2 Poren (Hohlräume) und ihre Verteilung im Bodenkörper	61
6.3 Porengrößen, Wasser- und Lufthaushalt	63
<b>Kap. 7 Befahrbarkeit</b>	<b>65</b>
7.1 Wasserleitfähigkeit oder Durchlässigkeit	65
7.2 Messen der Wasserspannung	66
7.3 Zusammenhang zwischen Gesamtgewicht, Kontaktfläche und Druckübertragung	67
7.4 Saugspannung und Maschineneinsatz	67
<b>Kap. 8 Bodenuntersuchungen</b>	<b>69</b>
8.1 Messen der Wasserdurchlässigkeit	69
8.2 Messen der Saugspannung	72
8.3 Messen der scheinbaren Dichte	74
8.4 Messen des Eindringwiderstandes	76
8.5 Eindrückliche Feldexperimente	78
<b>Zitierte Literatur</b>	<b>81</b>
<b>Bildnachweis</b>	<b>82</b>
<b>Impressum</b>	<b>83</b>

**Teil 0**

**Teil 1**

**Teil 2**

**Teil 3**

**Teil 4**

**Teil 5**

**Teil 6**

**Kap. 1**

**Kap. 2**

**Kap. 3**

**Kap. 4**

**Kap. 5**

**Kap. 6**

**Kap. 7**

**Kap. 8**

**Max Frisch (aus "Der Mensch erscheint im Holozän", 1981, S. 108)**

**«Boden gibt es  
auch in der Nacht.»**



## Vorwort

Beim Bauen werden oft grosse Kubaturen fruchtbaren Bodens ausgehoben, gelagert und später - zum Beispiel - für Rekultivierungen wieder verwendet. Zudem werden vorübergehend auch Böden für Bauinstallationen, -pisten, -depots oder -unterkünfte beansprucht.



Das Umweltschutzgesetz und speziell die Verordnung über Belastungen des Bodens von 1998 verlangen nun, dass Böden und Bodenaushub dabei sehr sorgfältig behandelt werden, damit ihre Fruchtbarkeit erhalten bleibt. Dies kann jedoch nur tun, wer etwas über die Struktur, die Bewohner, die Funktionen und die Verletzlichkeit des Bodens weiss.

Dieser Leitfaden ersetzt und aktualisiert das vergriffene Handbuch «Bodenschutz beim Bauen» von 1996. Er vermittelt grundlegende bodenkundliche Kenntnisse und zeigt in sechs praktischen Anleitungen auf, wie Boden bei Bauarbeiten geschont werden kann. Der Leitfaden ergänzt Normen, Wegleitungen und Richtlinien, die sich mit speziellen Vorhaben (z.B. Kiesabbau, Gasleitungsbau, Strassenbau) befassen. Er hält im Wesentlichen das fest, was bei jeder Art von Bauen Gültigkeit hat.

Das Handbuch richtet sich an Bau- und Umweltschutzbehörden, vor allem aber an die im Bau tätigen Unternehmungen.

Wir danken allen herzlich, die zum Gelingen dieser Vollzugshilfe beigetragen haben und die sie in der Praxis anwenden.

Bundesamt für Umwelt,  
Wald und Landschaft

Bruno Oberle  
Vizedirektor

# Literaturhinweise mit Bezugsadressen

Diese Auflistung enthält die wichtigsten Referenzen zum stofflichen und physikalischen Bodenschutz.

## **Bezugsadresse**

**[www.admin.ch/edmoz](http://www.admin.ch/edmoz)**

- Umweltschutzgesetz vom 7. Oktober 1993 (rev. Juli 1997), SR 814.01
- Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo), 1. Juli 1998, SR 814.12
- Technische Verordnung über Abfälle (TVA), 10. Dezember 1990, SR 814.015
- Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten (Altlasten-Verordnung, AltIV) vom 26. August 1998, SR 814.680

## **Bezugsadresse**

**[www.umwelt-schweiz.ch](http://www.umwelt-schweiz.ch)**

- BUWAL, Erläuterungen zur Verordnung vom 1. Juli 1998 über Belastungen des Bodens (VBBo), Vollzug Umwelt, Bern, 2001
- BUWAL, Wegleitung: Verwertung von ausgehobenem Boden (Bodenaushub), Vollzug Umwelt, Bern, 2001 (ersetzt die VSBo-Mitteilung Nr. 4 von 1993)
- BUWAL, Richtlinie: Verwertung, Behandlung und Ablagerung von Aushub-, Abraum- und Ausbruchmaterial (Aushubrichtlinie), Vollzug Umwelt, Bern, 1999
- BUWAL, Bereich Boden, UVP-Mitteilung Nr. 6, Bern, 1991
- BUWAL, Video: Bodenschutz auf der Baustelle, Bern, 1999
- BUWAL & FAL Zürich-Reckenholz, Wegleitung für die Probenahme und Analyse von Schadstoffen im Boden, in Revision

## **Bezugsadresse**

**[www.energie-schweiz.ch](http://www.energie-schweiz.ch)**

- BEW, Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen (Bodenschutzrichtlinien), Bern, 1997

## **Bezugsadresse**

**[www.vss.ch](http://www.vss.ch)**

- ASTRA, Forschungsbericht Nr. 425, Umgang mit Boden im Tiefbau, Christoph Salm & Stephan Häusler, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Zürich, 1999

## **Bezugsadresse**

**[www.admin.ch/sar](http://www.admin.ch/sar)**

- FAL, IUL, RAC & FAW, Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten, Zürich-Reckenholz, 1997
- Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden, Schriftenreihe der FAL 24, Zürich-Reckenholz, 1997

## **Bezugsadresse**

**[afu.gr.ch](http://afu.gr.ch)**

- Amt für Umweltschutz des Kantons Graubünden, Praktischer Bodenschutz; Anleitungen für tiefbauliche Eingriffe, Chur, 1997

## **Bezugsadresse**

**[www.be.ch/bve/umnet/index\\_d.html](http://www.be.ch/bve/umnet/index_d.html)**

- Fachkommission Rekultivierung des Kantons Bern, Merkblatt – Bodenkundliche Aufnahme bei Deponien und Materialentnahmestellen, Bern-Zollikofen, 1995



**Bezugsadresse****[www.snv.ch](http://www.snv.ch)**

- SN 640 581a, Erdbau, Boden; Grundlagen, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Zürich, 1998
- SN 640 582, Erdbau, Boden; Erfassung des Ausgangszustandes, Triage des Bodenaushubes, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Zürich, 1999
- SN 640 583, Erdbau, Boden; Eingriff in den Boden, Zwischenlagerung, Schutzmassnahmen, Wiederherstellung und Abnahme, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Zürich, 2000

Die im folgenden Text zitierte Literatur ist mit Ziffern in Klammern angegeben und findet sich im Anhang.

**Bezugsadresse****[www.fsk.ch](http://www.fsk.ch)**

- Schweizerischer Fachverband für Sand und Kies, Kulturland und Kiesabbau; Richtlinie für den fachgerechten Umgang mit Böden, FSK-Rekultivierungsrichtlinie, Bern, 2001

**Bezugsadresse****[www.umweltschutz.ch](http://www.umweltschutz.ch)**

- Praktischer Umweltschutz Schweiz & Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Bodenschutz in der Gemeinde: 9 Aktionsfelder, Zürich, 2000

**Bezugsadresse****[www.soil.ch](http://www.soil.ch)**

- Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Physikalischer Bodenschutz: Konzept zur Umsetzung der rechtlichen Vorgaben im Umweltschutzgesetz (USG) und in der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo), BGS-Dokument 9, Dietikon, 1999

# Einleitung

Dieser Leitfaden ist eine Hilfe zur Umsetzung der Artikel 6 und 7 der Verordnung vom 1 Juli 1998 über Belastungen des Bodens (VBBo, 7\*).

Er befasst sich mit dem Schutz von Ober- und Unterboden (vgl. untenstehende Abbildung) bei baulichen Eingriffen.

## BEGRIFFE

### Bodenkunde/Pedologie

### Qualitativer Bodenschutz

#### gewachsener Boden

**Horizont A = Oberboden** mit bis zu 30% organischer Substanz

**Horizont B = Unterboden;** hat ein entwickeltes Bodengefüge und ist biologisch aktiv; geringerer Humusgehalt und weniger Pflanzenwurzeln als im Horizont A

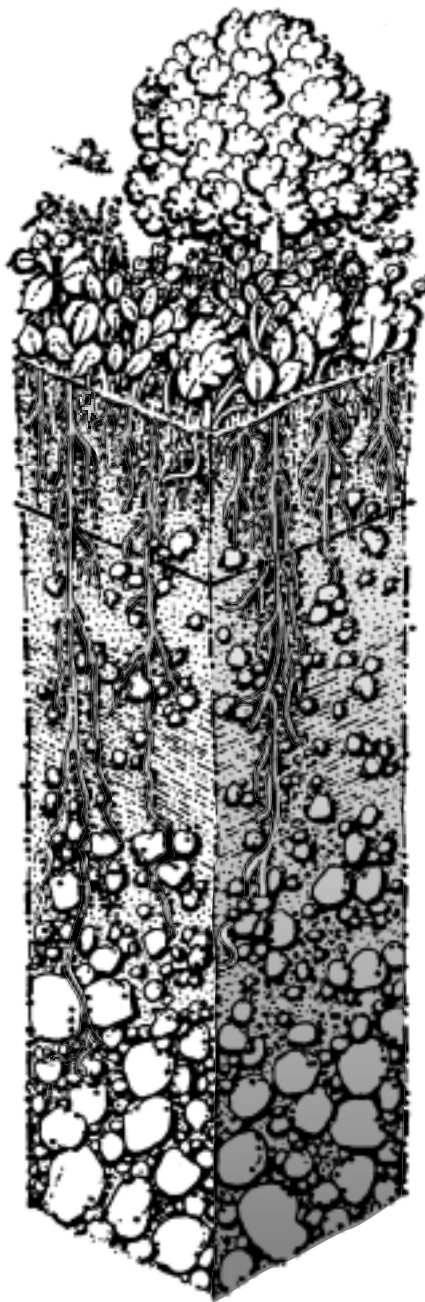
**Horizont C = Untergrund (Ausgangsmaterial),** nicht oder sehr spärlich durchwurzelt, besteht aus Lockersediment oder aus Fels

**Oberboden** (in der Regel Mächtigkeiten von 5 bis 30 cm)

#### Unterboden

Durchwurzelungsgrenze = Grenze zwischen Boden und Untergrund gemäss USG (8)

Bodenprofil

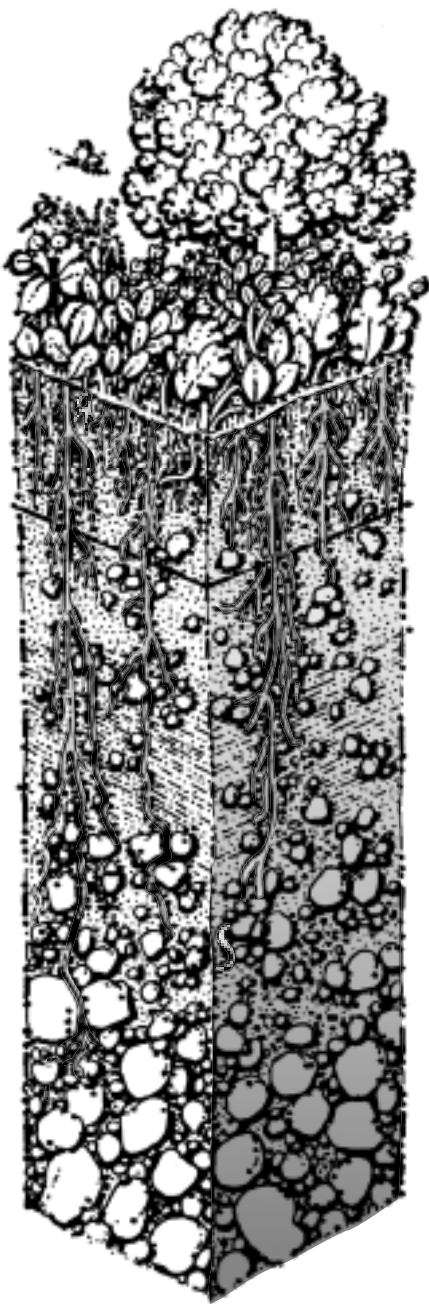


Boden gemäss USG (8)

*Schematische Darstellung eines Bodenprofils und Anwendungsbereiche verschiedener Publikationen (\*vgl. Literaturverzeichnis Seite 81)*

Er besteht einerseits aus konkreten praktischen Anleitungen zum Schutze des Bodens in allen Bauphasen von der Planung über den Eingriff bis zur Abnahme (Teile 0 bis 6) und

andererseits aus Erläuterungen und Informationen zum Thema Boden und Bodenkunde (Kapitel 1 bis 8).



### Hoch- und Tiefbau, Kulturtechnik

ausgehobener Boden = Bodenaushub

**Oberboden** (in der Regel Mächtigkeiten von 5 bis 30 cm) Abhumusieren/ Bodenabtrag

ausgehobener Unterboden

(wenn Mächtigkeit und Qualität ausreichend sind, mindestens 50 cm mächtige Schicht abtragen und zwischenlagern)

**Aushubmaterial**

**Bodenaushub**  
Wegleitung (2)

Die Untergrenze des Bodenaushubes hängt von den Wiederverwertungszielen ab (Bodenmächtigkeit nach Wiederherstellung)

**Aushub**  
gemäss Aushubrichtlinie (9)

Anwendungsbereich dieses Leitfadens

Schematische Darstellung eines Bodenprofils und Anwendungsbereiche verschiedener Publikationen (vgl. Literaturverzeichnis Seite 81)

**Teile 0 - 6**

# **Praktische Anleitungen**



# Bodenkundliche Baubegleitung

## Teil 0

Die Erdarbeiten auf Grossbaustellen, die einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) unterliegen, werden heute von anerkannten Bodenfachleuten begleitet. Diese bodenkundliche Baubegleitung (BBB) nimmt dabei eine treu-

händerische Funktion zum Schutz des Bodens wahr.

Das Pflichtenheft der BBB sieht in der Regel wie folgt aus:

<b>Phase 1: Planung und Projektierung</b>	<b>Phase 2: Bau und Eingriff</b>	<b>Phase 3: Wiederherstellung und Abnahme</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bodenschutzmassnahmen: Vorschläge zum Schutz verdichtungsempfindlicher Böden, Massnahmenpläne und Projektanpassungen oder -änderungen.</li> <li>- Mitarbeit bei Arbeitsvergabe: Vorgaben zu Maschinenlisten, Verfahren, Zeitplänen, Schlechtwetterregelungen und Baueinstellungen.</li> <li>- Materialmanagement: Planung der Triage des Bodenaushubes, der Materialflüsse und der Zwischenlager.</li> <li>- Orientierung der betroffenen Eigentümer und Bewirtschafter im Hinblick auf die vorgängige Begrünung offener Ackerflächen im Baubereich.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Information der Bauleute über den Bodenschutz und die resultierenden Massnahmen auf der Baustelle (s. Teil 6).</li> <li>- Beratung der Bauleitung in allen Fragen des Bodenschutzes: Ausscheidung genügender und geeigneter Flächen für Zwischenlager (s. Teil 3) sicherstellen, Vor-Ort-Begleitung des Bodenabtrages, Formulierung der Bauvorgaben und Anordnung allfälliger Schutzmassnahmen.</li> <li>- Teilnahme an allen bodenrelevanten Bausitzungen, selbständige Beobachtung des Zeitplanes, Präsenz und vorausschauende Kontrolle in bodenrelevanten Phasen des Bauablaufes.</li> <li>- Information der kantonalen Bodenschutzfachstellen über den Bauablauf und die Einhaltung der Massnahmen während des Baus.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Begleitung der Rekultivierung unter Beachtung der zulässigen Saugspannungen (s. Teile 2 und 6).</li> <li>- Abnahme der wiederaufgebauten Böden (Werkabnahme), zusammen mit Vertretern der Unternehmung, der Bauherrschaft und der Landeigentümer/Bewirtschafter mit Abnahmeprotokoll (s. Teil 4).</li> <li>- Begleitung von Massnahmen zur Schadensbehebung (allfällige Tiefenlockerung, Drainagen etc.).</li> <li>- Aufklärung der Bewirtschafter über die korrekte Folgebewirtschaftung zur Restrukturierung der wiederaufgebauten Böden (s. Teil 5).</li> <li>- Schlussabnahme der Flächen, Vergleich des Erreichten mit dem Ausgangszustand (Spatenprobe, s. Teil 5) und Freigabe zur normalen Nutzung.</li> </ul>

*Pflichtenheft der bodenkundlichen Baubegleitung (6)*

Ein dem Projektumfang angepasstes Pflichtenheft kann auch bei kleineren, nicht UVP-pflichtigen Projekten verwendet werden.

# Ausgangszustand

## Vorschriften, Methoden

### Teil 1

Die Aufnahme des Ausgangszustandes ist für Projekte, die der Umweltverträglichkeitsprüfung unterstellt sind, obligatorisch.

### Längerfristige Eingriffe

(Kategorie A)

Für längerfristige, eher flächige Eingriffe, bei welchen Bodenaushub in der Regel für ein oder mehrere Jahre zwischengelagert und später separat rekultiviert wird (Beispiele: Kies- und Felsabbau, Tagbautunnel und andere Grossbaustellen), wird die detaillierte Bodenkartierung gemäss der "Methode Reckenholz" (1), angewendet.

### Kurzfristige Eingriffe

(Kategorie B)

Für kurzfristige Eingriffe, in der Regel bei Linienebaustellen, ist die flächenmässige Darstellung nicht zweckmässig. Hier wird der Baustreifen kartiert. Die Ergebnisse der Kartierung werden auf den Streckenplänen in die vorgefundenen, pedologisch übereinstimmenden Abschnitte unterteilt und beschrieben. Die verwendeten Hilfsmittel und Beurteilungskriterien sind mit denjenigen der flächigen Kartierung identisch.

### Belastete Böden

(Zusatzuntersuchung)

Wird Boden ausgehoben, ist die BUWAL-Wegleitung "Verwertung von ausgehobenem Bo-

Vorhaben	Massnahmen	Flächenkartierung	Streckenkartierung	Spatenprobe (Vergleich)	Bodenanalysen*	Physikalische Messungen**
Grossbaustellen (Strasse/Bahn)						
Abbaustätten (Kies, Fels, Ton)						
Deponien und Auffüllungen						
Erdverlegte Leitungen						
Wiederherstellung						
Grosse Geländeanpassungen						
Feststellung von Altschäden						
Bewirtschaftungsschäden						
Zufuhr von Boden/Substraten						
Abfuhr von Bodenmaterial						

\* Schadstoffe, Körnung, organische Substanz

\*\* Lagerungsdichte, Vorbelastung etc.

Übersicht über die Verfahren bei der Erfassung des Ausgangszustandes (4)

#### Legende:



Die Aufnahme des Ausgangszustandes bzw. eines Ist - Zustandes ist in der Regel bereits im Rahmen eines UVP/PGV gefordert oder kann zum Beispiel für die Beweissicherung verlangt werden.



Diese Massnahmen sind als Ergänzung, zu einer gesamthaft besseren Bewertung, als gängige Methode zur Beweissicherung oder als Vergleichsmöglichkeit empfehlenswert.

den" (2) zu beachten. Der Bodenaushub ist bei Verdacht auf seine Schadstoffbelastung zu untersuchen. Liegt eine Belastung vor, entscheidet die kantonale Bodenschutzfachstelle über das weitere Vorgehen. Für Kategorie A ist diese Untersuchung Bestandteil der Erfassung des Ausgangszustandes.

## Praktisches Vorgehen

Die Beurteilung des Bodens in die Tiefe, die sog. Bodenansprache, erfolgt in der Regel mit einem Handbohrer (Edelman-Bohrer oder Hohlmeissel) bis in eine Tiefe von etwa einem Meter, sofern nicht Steine die Arbeit bereits in geringerer Tiefe behindern.

An den eigentlichen Aufschlüssen (Profil) wird die detaillierte Beschreibung in Form eines Profilblattes ausgefertigt.

### Kategorie A

In Linien (Transekt) wird je nach Gliederung der Landschaft und der zu erwartenden Unterschiede in der Bodenbildung in Abständen von 25-50 Metern eine Bohrprobe entnommen.

Die Farbe der Bodenhorizonte gibt erste Hinweise auf die Entwicklung, die Gründigkeit und die Durchlässigkeit des Bodens.

Mit der Fühlprobe wird die Korngrößenverteilung (Bodenart) bestimmt (3). Gleichzeitig können die Merkmale gestörten Wasser- und Lufthaushaltes festgestellt werden (Vernässung, Rostflecken, Graufärbung und Geruch).

Mit Salzsäure (HCl) kann Kalziumkarbonat festgestellt und mit flüssigem Reagenz oder Teststäbchen die Bodenazidität (pH) anhand einer Farbskala grob gemessen werden.

Auf einer Karte, gebräuchlicherweise im Massstab 1 : 5000, werden die ermittelten Bodentypen flächig gruppiert als Einheiten festgehalten (4).

Innerhalb einer solchen Einheit wird ein Bodenprofil gegraben. Nur im Profil können Bodenstruktur, Skelettgehalt, Verlagerungsvorgänge und Chemismus, Durchwurzelung, biologische Aktivität (Würmer), Verwitterungstiefe und Horizontgrenzen zuverlässig erkannt, beurteilt und im Profilblatt eingetragen werden. Mischproben aus dem Profil werden für chemisch-physikalische Laboranalysen entnommen (4).

### Kategorie B

Für Linienbaustellen (z.B. Gasleitungsbau) werden etwas andere Anforderungen an die Kartierung gestellt. Sie sind in den entsprechenden Richtlinien festgehalten (5).

Als erstes werden bautechnisch relevante äussere Merkmale wie Längs- und Querneigung des Geländes, Rutsche, Wasseraustritte und lokale Vernässungen, auffälliger Skelettgehalt usw., ermittelt.

Mit dem Bohrer wird vor allem die Mächtigkeit des Oberbodens (Tiefe des Abtrages), der Wasserhaushalt (Durchlässigkeit und Abtrocknung), die Verwitterungstiefe (flach- oder tiefgründige Böden) und die Bodenart (Verdichtungsempfindlichkeit) angesprochen.

Die Merkmale werden auf der Streckenkarte abschnittsweise nach baurelevanten Kriterien, Bodenempfindlichkeit und den zu treffenden Schutzmassnahmen unterteilt beschrieben (4, 5).

### Kategorie A und B

Die Ermittlung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden basiert auf Parametern, die im Rahmen der Bodenkartierung erhoben werden. Die Unterteilung in Empfindlichkeitskategorien sieht wie folgt aus:

## Teil 1

Bodentyp (vgl. Kap. 3 und 4)	Bodenverdichtungsempfindlichkeit	Belastbarkeit/Befahrbarkeit
<ul style="list-style-type: none"> <li>organische Böden</li> <li>häufig bis zur Oberfläche vernässte Böden</li> <li>selten bis zur Oberfläche porengesättigte, stauwasser geprägte bzw. ton- oder schluffreiche Böden</li> </ul>	extrem empfindlich	<ul style="list-style-type: none"> <li>dauernd verdichtungsgefährdet</li> <li>schon geringe Auflasten können die Bodenstruktur irreversibel schädigen</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>grund- oder hangwasser geprägte, jedoch selten bis zur Oberfläche porengesättigte Böden</li> <li>stau-, hang- oder grundwasser beeinflusste Schluffböden mit mehr als 50% Schluff und weniger als 10% Ton</li> </ul>	stark empfindlich	<ul style="list-style-type: none"> <li>nur beschränkt mechanisch belastbar, ausser während längerer Trockenperioden</li> <li>eingeschränkte Maschinenwahl</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>stau-, hang- oder grundwasser beeinflusste Böden</li> <li>Schluffböden mit mehr als 50% Schluff und weniger als 10% Ton mit ausgeglichenem Wasser- und Lufthaushalt</li> </ul>	normal empfindlich	<ul style="list-style-type: none"> <li>während längerer Nassperioden sowie ausserhalb der Vegetationszeit nur eingeschränkt mechanisch belastbar</li> <li>Perioden mit abgetrocknetem Boden sind optimal zu nutzen</li> <li>erhöhte Sorgfalt beim Befahren nötig</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Böden mit ausgeglichenem Luft- und Wasserhaushalt und stabilem Gefüge (ohne Schluffböden mit mehr als 50% Schluff und weniger als 10% Ton)</li> </ul>	schwach empfindlich	<ul style="list-style-type: none"> <li>nach entsprechender Abtrocknung im allgemeinen gut mechanisch belastbar</li> <li>übliche Sorgfalt</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Böden mit Skelettanteil von mehr als 50%</li> <li>kies-/steinreiche Sande, mit weniger als 50% Schluff und weniger als 10% Ton</li> </ul>	kaum empfindlich	<ul style="list-style-type: none"> <li>kaum druckempfindlich</li> <li>im allgemeinen gut mechanisch belastbar</li> <li>übliche Sorgfalt</li> </ul>

Tabellarische Darstellung der Bodenverdichtungsempfindlichkeit (4)

Sowohl die Beurteilung (Erfolgskontrolle) einer abgeschlossenen Rekultivierung (z.B. beim Kiesabbau), wie auch die Feststellung bestehender Störungen, etwa Bewirtschaftungsschäden, schlecht unterhaltene Drainagesysteme oder Schäden früherer Eingriffe (z.B. Leitungsbau), können im Sinne einer vorsorglichen Beweisaufnahme verlangt und in die Kartierarbeit einbezogen werden (6).



## Schadstoffbelastung

Gemäss VBBo vom 1. Juli 1998 müssen chemische und physikalische Belastungen des Bodens überwacht und beurteilt werden (7). Diese Verordnung stützt sich auf Artikel 29, 33, 35 und 36 des revidierten Bundesgesetzes über den Umweltschutz (USG) vom 7. Oktober 1983 (8).

Mit der Entsorgung des mineralischen Untergrundes (C-Horizont) befasst sich die Aushubrichtlinie (9).

Für die Beurteilung und Verwertung von Bodenaushub (A- und B-Horizont) gilt die BUWAL-Wegleitung "Verwertung von ausgehobenem Boden" (2). Sie ersetzt die bekannte Mitteilung Nr. 4 zur VSBo (1993), die der neuen Rechtslage angepasst werden musste. Die Wegleitung enthält Beurteilungswerte für Schadstoffbelastungen, legt fest, wann und wie Böden zu untersuchen sind und bestimmt, wie ausgehobener Boden verwertet oder abgelagert werden soll.

# Bodenabtrag

## Einleitung

Das Abtragen von Boden muss rechtlich als tiefbaulicher Eingriff bewertet werden, weil damit Boden aus seiner natürlichen Lagerung herausgeholt wird. Damit kann die Fruchtbarkeit des Bodens erheblich beeinträchtigt werden, was dem Grundsatz des Zweckartikels des USG widerspricht (8).

Der Abtrag von Boden muss in diesem Sinne an eine Baubewilligung gebunden sein. Zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit gilt der Grundsatz, dass ohne Vorliegen einer rechtskräftigen Baubewilligung kein Oberboden

abgetragen werden darf und dass die Notwendigkeit dieser Massnahme, besonders bei kurzfristigen Eingriffen wie Leitungsbau, nachgewiesen werden muss.

Besteht der Verdacht, dass der auszuhebende Boden kontaminiert ist, so sind die abzutragenden Flächen zumindest stichprobenweise auf Schadstoffe hin zu untersuchen (siehe auch Teil 1).

Über die Verwertung von Bodenaushub gibt die BUWAL-Wegleitung "Verwertung von ausgehobenem Boden" Auskunft (2).

*Umgang mit Oberboden bei verschiedenen Bauvorhaben (6)*

## Teil 2

Bauvorhaben	Boden begrünen, nicht abtragen	Boden abtragen und direkt wiederanlegen	Boden abtragen und zwischenlagern	Boden abtragen und abführen
Materialabbau nicht etappiert (Zwischenbegrünung)		Nur auf zwischenbegrüntem Unterboden anlegen.	Schütthöhen gemäss Teil 3, nicht befahren, sofort begrünen.	
Materialabbau etappiert (Direktumschlag)		Auf fertige Etappe (Unterboden angelegt) auftragen und begrünen.		
Grossbaustellen: Strasse, Bahn etc.			Aushub- und Pistenbereich abhumusieren. Depotfläche nicht abhumusieren.	Von überbauten Flächen, soweit er überschüssig ist.
Aushubdeponien, Auffüllungen			Aushub- und Zufahrtbereich abhumusieren, Depotfläche nicht abhumusieren.	
Erdverlegter Leitungsbau	Kein Abtrag, ausser im Grabenbereich.		Oberboden und Aushub direkt auf die Grasnarbe legen.	
Leitungsbau, Mastenbau	Piste direkt auf das Gras legen, punktueller Bodenabtrag im Bereich der Fundamente.			

Viele Kantone verfügen zudem über Merkblätter und Arbeitsrichtlinien mit weitergehenden und detaillierten Vorschriften über den Abtrag von Oberboden (siehe auch Literaturhinweise, S. 6).

## Abtrag als Eingriff

Durch das Entfernen des humushaltigen Oberbodens wird der Bodenkörper seiner wichtigsten Schutzhülle beraubt. Freigelegter Unterboden ist instabil und den Einflüssen der Witterung schutzlos ausgesetzt. Die biologische Aktivität im Boden konzentriert sich nämlich auf die oberflächennahen Schichten, welche in der Regel kurzzeitig auch ohne schützende Pflanzendecke stabil genug sind, um dem Abtrag (Erosion) durch Wasser und Wind zu widerstehen. In intensiv genutzten Ackerböden, namentlich den humusarmen Lössböden, ist die oberste Bodenschicht aber im unbedeckten Zustand ähnlich erosionsgefährdet wie blossgelegter Unterboden.

Der Eingriff des Bodenabtrags wiegt schwerer, wenn Boden nicht direkt wieder angelegt und begrünt, sondern für kürzere oder längere Zeit zwischengelagert wird.

Dass freigelegter Unterboden den Einflüssen der Witterung schutzlos ausgesetzt ist, zeigt der Zerfallstest im Wasser:

In zwei Gläsern mit Wasser wird je ein etwa gleich grosser Brocken Erde aus dem Oberboden und aus dem Unterboden sorgfältig eingelegt. Nach kurzer Zeit beginnt der Brocken aus dem Unterboden zu zerfallen, während der Oberboden intakt bleibt.

## Wahl des Zeitpunkts

Wenn der Bodenabtrag unumgänglich ist, müssen zumindest alle Vorkehrungen getroffen werden, damit der belebte Boden keinen allzu grossen Schaden erleidet. Grundsätzlich soll der Boden beim Eingriff durchgehend trocken sein; nach Möglichkeit sollte er direkt wiederangelegt und in jedem Falle sofort begrünt werden. Nur bei sehr kurzen Eingriffen, wie etwa beim Leitungsbau, kann auf die Begrünung verzichtet werden. Aufwachsende Unkräuter sind vor Samenreife zu mähen (nicht abspritzen!).

Die Voraussetzungen für Arbeiten bei trockenem Boden und für rasches Begrünen sind nur während der Vegetationsperiode, welche in Tallagen länger dauert als im Gebirge, gegeben. Alle Arbeiten mit Kulturerde sind für die Sommermonate zu planen.

Der Boden ist im Spätherbst oft trockener als im Frühsommer, sodass auch im Oktober noch unter idealen Verhältnissen gearbeitet werden kann. Das Anlegen einer Dauerwiese hat vor Mitte August zu geschehen. Bei späteren Begrünungen muss notfalls ein Wintergetreide (Grünroggen etc.) eingesetzt werden.

## Bodenfeuchte

Oberboden (Humus) wie Unterboden dürfen keinesfalls in durchnässtem Zustand befahren, abgetragen, verschoben, zwischengelagert und wiederangelegt werden. Die jeweils noch zulässige Bodenfeuchte ist abhängig von der Bodenart (Tongehalt) sowie von Gewicht und Flächendruck der zum Einsatz gelangenden Maschinen und Fahrzeuge. Als Messgrösse hat sich nicht der absolute Wassergehalt, sondern die Wasserspannung, auch Saugspannung genannt, als günstig erwiesen. Diese erlaubt es, festzustellen, welche Porenklassen jeweils noch mit Wasser gefüllt bzw. bereits entwäs-

sert sind. Für die Wasserspannung (Kap. 7.2) ist im Tiefbau der  $pF$ -Wert geläufiger; im Feld wird die Spannung mit dem Tensiometer in Centibar gemessen. Nachfolgende Tabelle schafft die nötige Verbindung zu den wichtigsten Eckwerten.

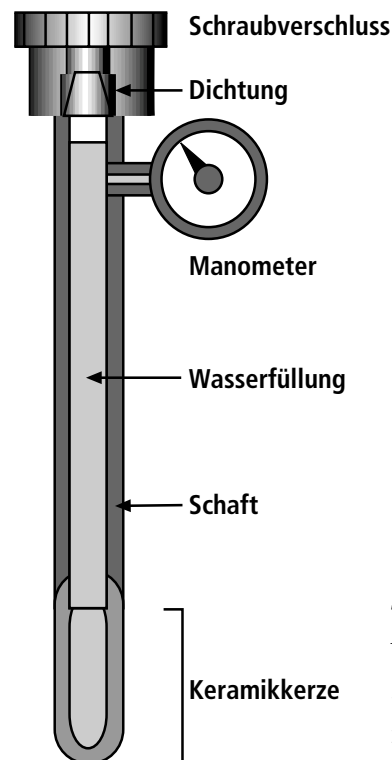
## Teil 2

$pF$	$C_b$	Entwässerung nach Poren
1,8	6,3	Grobporenbereich entwässert (Gravitationswasser)
2,0	10	> 30 $\mu m$ Poren entwässern
2,5	31,5	> 10 $\mu m$ Poren entwässern
2,7	50	> 06 $\mu m$ Poren entwässern
2,8	63	> 05 $\mu m$ Poren entwässern
2,9	80	Messgrenze Tensiometer
4,2	1500	alle Mittelporen entwässert ( permanenter Welkepunkt)

Unterhalb Bereich  $pF$  2 dürfen keine Baumaschinen mehr eingesetzt werden. Ab  $pF$  2.5 sind mit den gebräuchlichen Baumaschinen (Raupenfahrwerke) in der Regel keine grösseren Schäden mehr zu erwarten. Ab  $pF$  2.8 ist der Boden auch für schwere Maschinen tragfähig.

## Messen mit Tensiometern (vgl. Kapitel 8.2)

Die Messung der Saugspannung mit Tensiometern ist eine altbewährte Methode, die in der Praxis z.B. bei der Bewässerung von Kulturen eingesetzt wird. Tensiometer sind in den verschiedensten Ausführungen bis zum digitalen, elektronisch gesteuerten Gerät erhältlich. Für den Einsatz auf der Baustelle ist der einfache und robuste Manometerapparat geeignet. Er ist preisgünstig und arbeitet unabhängig von einer Stromquelle.



Schematische Darstellung eines Tensiometers und seiner Komponenten

## Installation

Für eine zuverlässige Messung müssen fünf Tensiometer pro Standort eingesetzt werden, da Bodenunterschiede grosse Streuungen bewirken können. Das Tensiometer wird in ein exakt vorgebohrtes Loch auf 35 cm Tiefe gesetzt. Damit ein guter Bodenkontakt entsteht, wird das ausgebohrte Erdmaterial mit etwas Wasser vermischt und ein wenig von diesem

Brei vor dem Einsetzen des Geräts in das Bohrloch gegeben. Nach dem Einsetzen des Tensiometers wird das Bohrloch an der Oberfläche noch mit etwas Tonpulver bestreut und ange-drückt, damit kein Wasser entlang des Schaftes einsickert und das Messresultat verfälscht. Auch eine gut schliessende Gummimanschette verhindert das Eindringen von Regenwasser.

### **Ablesung und Auswertung**

Nach einem Tag kann mit dem Ablesen der Saugspannung begonnen werden. Von den Resultaten einer Gruppe wird der Medianwert ermittelt. Abgelesen werden muss in täglichen oder zumindest gleichbleibenden längeren Abständen, immer zur gleichen Tageszeit, vorzugsweise am Morgen. Die gleichzeitige Messung der Niederschläge gehört dazu.

### **Wartung**

Der Innenraum des Tensiometers ist mit Wasser gefüllt. Bei einer Saugspannung von ca. 80 Cb kann die Saugspannung schlagartig zusammenfallen (sog. Abhängen).

Abgehängte Tensiometer müssen geöffnet und mit entlüftetem (am besten abgekochtem) Wasser wieder aufgefüllt werden. Verbleibende Luft im waagrechten Teil der Abzweigung zur Manometerdose muss mit einer Entlüftungspumpe abgesaugt werden, da durch die Luftkissenwirkung ein Teil der Saugspannung abgefedert und die Messgenauigkeit beeinträchtigt wird. Eingesetzte Tensiometer dürfen nie geschüttelt werden.

Für den Winterbetrieb muss dem Wasser im Tensiometer ein Frostschutzmittel beigelegt werden.

### **Lagerung**

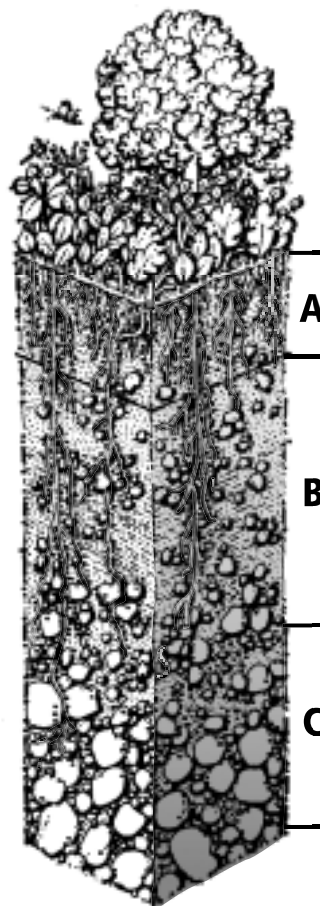
Einmal benützte Tensiometer sollen nicht eintrocknen, weil die Poren der Saugkerze wegen der im Bodenwasser gelösten Salze verkrusten. Sie sollen an einem frostsicheren Ort in destilliertem bzw. entionisiertem Wasser (auch sauberes Regenwasser ist geeignet) bis zum nächsten Einsatz aufbewahrt werden. Schmutz und

Algenbesatz sind vor dem Einlagern zu entfernen. Vor dem Wiedereinsetzen im nächsten Jahr ist eine sorgfältige Funktionskontrolle angezeigt.

## **Abtragsmächtigkeit**

Der gut entwickelte Boden teilt sich im Profil grob gesehen in drei "Schichten", sog. Horizonte (A, B und C) auf. Diese Horizonte sind durch fließende Übergänge oder klaren Schichtverlauf getrennt und deshalb als solche auch mehr oder weniger gut erkennbar. Je nach Ausgangsmaterial und Bodentyp hilft

auch eine deutliche farbliche Abgrenzung mit, die Horizontierung festzustellen.



*Schema eines Bodenprofils mit Oberboden (A), Unterboden (B) und Ausgangsmaterial (C). In Rohböden (AC-Böden) liegt der humushaltige und belebte Oberboden direkt auf dem unverwitterten*

*Ausgangsmaterial auf. Dieses kann sowohl aus festem Gestein (Fels), als auch aus Lockersediment (Ton, Lehm, Silt, Sand, Kies) bestehen.*

## Oberboden

Der A-Horizont kann durch seine dunkle Farbe im Profil klar erkannt werden. Er ist biologisch aktiv und weist, verglichen mit dem Unterboden, einen hohen Anteil an Humus auf. Er ist in der Regel dicht mit Wurzeln durchsetzt, von Wurmgängen durchzogen und dadurch ziemlich locker gelagert. Im Ackerbauggebiet entspricht der A-Horizont etwa der gepflügten Tiefe.

## Unterboden

Der darunterliegende B-Horizont besteht aus verwittertem mineralischem Material und weist einen deutlich geringeren Humusanteil auf. Deshalb ist er auch weniger dunkel gefärbt. Zumindest in der oberen Ausdehnung ist er noch gut durchwurzelt und biologisch aktiv. Nach unten geht er, mehr oder weniger deutlich, in den unverwitterten C-Horizont über; bei Fels und Kies ist der Übergang besser erkennbar als in skelettfreien Lehmen und in Löss.

## Materialeignung

Neben den beschriebenen bodenkundlichen Kriterien spielt auch die Eignung des abgetragenen Materials eine wichtige Rolle. Die Eignungskriterien sind in Teil 1 beschrieben. Im Sinne des Bodenschutzes ist darauf zu achten, dass geeignetes Material aller Kategorien sinnvoll verwertet werden kann.

## Verfahren und Maschineneinsatz

Die negativen Auswirkungen tiefbaulicher Eingriffe auf den Boden, vor allem die Bodenverdichtung, lassen sich mit der Auswahl und dem Einsatz von Maschinen und mit zweckmässigen Arbeitsabläufen stark beeinflussen.

Geeignet für den Abtrag sind Bagger (ev. Dragline), Dozer und leichte Schürfkübelraupen, wobei Lage, Form und Grösse des Einsatzgebietes und die Umlagerungsdistanz eine wichtige Rolle spielen.

Ungeeignet sind hingegen wegen der schlechten Gewichtsverteilung, des hohen Auflagedruckes (Punktbelastung) oder der schlechten Effizienz, alle Pneu- und Raupenlader, Frontlader an Traktoren und Bobcats sowie Radscraper.

## Einsatzgrenzen

Die zulässige Saugspannung für den bodenschonenden Maschineneinsatz kann für jede Maschine individuell berechnet werden. Sie gibt die Saugspannung an, bei welcher ein Boden befahren werden kann, ohne dass nachhaltige Schäden erwartet werden müssen.

Unter 10 Centibar Saugspannung dürfen keine Baumaschinen eingesetzt werden.

Die Messung der Bodenfeuchte findet dort statt, wo der Boden nach dem Abhumusieren befahren wird, d.h. auf 35 cm Tiefe. Auch wenn der Oberboden abgetrocknet ist, kann der Unterboden noch stark feucht sein.

## Einfluss der Bodenart

Wichtig ist auch die Berücksichtigung der Bodenart. Bei Böden mit hohem Tongehalt (> 30 %) muss zur zulässigen Saugspannung ein Zuschlag von 10% gemacht werden.

## **Mehrfachbelastung**

Wenn an einer Stelle mehrere Durchfahrten zu erwarten sind, nimmt der Verdichtungseffekt mit abnehmender Saugspannung schneller zu. Solche Arbeiten und Abläufe (schiebende und schürfende Geräte, rollender Transport) sind in Grenzsituationen einzustellen.

## **Berechnung der zulässigen Saugspannung**

Die zulässige Saugspannung kann für jede mit Flachfahrwerk (Raupe) ausgerüsteten Maschine individuell berechnet werden, wenn das Gewicht (beladen) und die Flächenpressung (beladen) bekannt sind (siehe auch Kapitel 7).

### **Formel für die Berechnung der zulässigen Saugspannung in Centibar:**

Gewicht (Tonnen) x Flächenpressung (bar) x 1.25

Für Radfahrzeuge ist diese Formel **nicht** anwendbar. Die entsprechenden Angaben zur Bodenverträglichkeit von Pneufahrzeugen finden sich in Kapitel 7.

# Zwischenlagerung

## Vorschriften

In einigen Kantonen bestehen Vorschriften über die Zwischenlagerung von Bodenmaterial, speziell von Oberboden. Diese Vorschriften bezeichnen die maximale Schütthöhe (meist zwischen 1,5 m - 2,5 m), wobei zwischen dem lose geschütteten und dem abgesetzten Zustand noch unterschieden werden müsste. Sie verlangen in der Regel das Anschütten rückwärts, d.h. ohne Befahren des deponierten Materials. Weitere Richtlinien wurden vom VSS (Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, vgl. untenstehende Tabelle), vom FSK (Schweizerischer Fachverband für Sand und Kies) und von der BGS

(Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz) erarbeitet, die sich im gleichen Sinne zur Zwischenlagerung von Oberboden äussern.

Für anschliessende Rekultivierungen muss nicht nur Oberboden, sondern auch geeignetes Unterbodenmaterial vorhanden sein. Die Vorgaben zur Zwischenlagerung von Ober- und Unterboden können untenstehender Tabelle entnommen werden.

Der vorliegende Teil 3 soll bereits bestehende Vorschriften sinnvoll ergänzen. Bei der Suche nach optimalen Möglichkeiten und unter Berücksichtigung der Bodenart und ihrer spezifischen Eigenschaften sind gewisse Abweichungen durchaus möglich.

### Teil 3

Art des Bodenaushubes	Lose Schütthöhe des Zwischenlagers:	Zulässige Saugspannungen bei Abtrag/Schüttung:	Allgemein gültige Massnahmen:
Oberboden für kurzfristige Zwischenlagerung (< 1 Jahr)	≤ 2,5 m	sandig: > 25 Centibar tonig: > 35 Centibar	- Ober-/Unterboden immer getrennt abtragen und zwischenlagern.
Oberboden für langfristige Zwischenlagerung (> 1 Jahr)	≤ 1,5 m	sandig: > 25 Centibar tonig: > 35 Centibar	- Zwischenlager auf gut durchlässiger, nicht verdichtungsgefährdeter Unterlage anlegen.
Unterboden, stark bis extrem verdichtungsempfindlich (4)	≤ 1,5 m	> 35 Centibar	Lagerflächen nicht abhumusieren.
Unterboden, normal bis schwach verdichtungsempfindlich (4)	≤ 2,5 m	> 25 Centibar	- Zwischenlager nie mit Baumaschinen befahren und nie mit Rindern beweiden. Zwischenlager mit Tiefwurzlern begrünen.
Unterboden, kaum verdichtungsempfindlich (4)	> 2,5 m	> 15 Centibar	

*Schütthöhen und Saugspannungen bei der Zwischenlagerung von Bodenaushub (6)*



## Auswirkungen der Zwischenlagerung

Die oberflächennahe, gut durchlüftete Bodenschicht ist durch eine rege biologische Tätigkeit entstanden. Der chemische Stoffwechsel dieser Bodenschicht läuft unter aeroben Bedingungen ab. Die Bildung von Humus und wichtigen Ton-Humuskomplexen sind charakteristische Eigenschaften dieser sauerstoffreichen Zone.

Pflanzenwurzeln, Regenwürmer und andere Bodentiere erschliessen unterhalb dieser Schicht immer tiefere Horizonte. Die Porosität, der Humusgehalt und die biologische Aktivität nehmen aber mit zunehmender Tiefe deutlich ab.

Wird nun solcher Boden an ein Depot geschüttet, so treten vorerst im am weitesten von der Aussenluft entfernten Depotkern "Erstickungserscheinungen" auf. Unter anaeroben Bedingungen "erstickt" das Bodenleben, Fäulnisvorgänge setzen ein und es entstehen Faulgas oder Methan. Wird das Depot wieder abgetragen, so können Graufärbung und oft deutlicher Faulgeruch des Bodens festgestellt werden (Klärschlammgeruch).

Mit der trapezförmigen Schüttung der Zwischenlager wird, zusammen mit einer Höhenbegrenzung, versucht, die anaerobe Kernzone des Depots möglichst klein zu halten oder zu vermeiden.

Durch das Eigengewicht werden tieferliegende Schichten innerhalb des Depots verpresst. Dabei gehen als erstes die grossen, luftführenden Grobporen verloren. Unter dem Zwischenlager wird der Boden ebenfalls leicht verdichtet und damit abgesenkt, so dass sich hier Wasser sammelt, welches kapillar im Depot aufsteigt und dieses stark vernässen kann.

Deshalb muss ein Konzept zum Schutze des Zwischenlagers gefunden werden. Je länger dieses liegen bleibt, desto wichtiger ist die Ein-

haltung dieses Konzepts. Für den einzelnen Fall geht es darum, innerhalb der gegebenen Möglichkeiten jene Variante zu finden, welche die grösstmögliche Anzahl positiv wirkender Faktoren vereinigt.

## Anlegen der Zwischenlager

Den unterschiedlichen Bedürfnissen entsprechend haben Depots unterschiedlichen zeitlichen Bestand und verschiedene Formen:

### Kurzzeitiges Depot

(Kategorie A)

Kommt z.B. beim Rohrleitungsbau, Wegebau, Kanalisationsbau etc. vor, wo die Bauzeit und damit die Zeit der Zwischenlagerung ein Jahr nicht überschreitet.

### Längerfristiges Depot

(Kategorie B)

Bleibt in der Regel über mehrere Jahre bestehen, wie dies etwa bei Grossbaustellen, beim Kies- oder Felsabbau, bei Sand- und Tongruben sowie bei offenen Deponien der Fall ist.

### Form und Gestaltung

Bei den Formen kann zwischen der trapezförmig-länglichen, nicht bewirtschafteten Miete und dem flächig angelegten, landwirtschaftlich genutzten Depot unterschieden werden.

Die nachfolgenden Grundsätze zum Schutz des Bodens sind für die Kategorie B zwingend. Für Kategorie A sind Abweichungen eher tolerierbar.

### **Wasserabfluss**

Das Depot soll so angelegt sein, dass Oberflächenwasser ungehindert abfliessen kann und sich kein Einstau am Depotfuss bildet (Kuppenlage, eventuell Kiesunterlage).

Keinesfalls soll das Depot in Muldenlage oder auf undurchlässigem Boden angelegt werden.

## **Teil 3**

### **Durchlüftung**

Das Depot soll in seinem ganzen Volumen gut durchlüftet sein. Es muss deshalb möglichst trocken geschüttet und darf nicht befahren werden. Der Abstand des Depotkerns zur Oberfläche soll möglichst klein sein (steile Trapezform). Bei Flächendepots ist die Schütthöhe zu reduzieren.

### **Gefälle**

Die Oberfläche des flächigen Depots ist mit Gefälle zu versehen, so dass sich überschüssiges Wasser nicht ansammelt und einsickert, sondern abfliesst. Dieses Gefälle sollte wenn möglich  $> 5 \%$  sein.

### **Begrünung**

Das Depot ist unmittelbar nach seiner Anlage, bei grösseren Objekten auch etappenweise, zu begrünen. Dazu ist eine ausdauernde, tiefwurzelnende Luzerne-Kleegrasmischung anzusäen. Die Wurzeln halten den Boden aktiv. Die Gründecke verdunstet im Sommer bis 5 Liter Wasser pro  $m^2$  und Tag und hält das Depot trocken.

### **Unterboden**

Für Unterbodenzwischenlager gelten, mit Ausnahme der Depotform und der Schütthöhe, weitgehend die gleichen Grundsätze. Aufgrund seiner strukturbedingten Durchlässigkeit kann kiesig-sandiges, rein mineralisches

Unterbodenmaterial an sich hoch geschüttet werden, jedoch wird der darunterliegende Boden von zu hoher Auflast verpresst. Durchlässiges Material ist für den Wiederaufbau von Böden in unseren niederschlagsreichen Gebieten besonders geeignet. Wenig geeignet sind stark tonige Böden oder Unterboden mit hohen organischen Anteilen. Der Einfluss der Bodenart auf die Schütteeigenschaften gilt sinngemäss auch für Unterbodenmaterial (vgl. Tabelle Seite 22).

### **Bodenart und Schütthöhe**

Der Zusammenhang zwischen der Bodenart und den physikalischen Eigenschaften eines Bodens sind im Grundlagenteil weiter hinten ausführlich erläutert. Die zulässigen Schütthöhen gehen aus der Tabelle von Seite 22 hervor. Grösser als der Einfluss der Bodenart ist der Einfluss der Bodenfeuchte zum Zeitpunkt der Umlagerung. Zu feucht umgelagert, reagieren vor allem tonige Böden sehr empfindlich bezüglich Verdichtung. Bei organischem Bodenmaterial ist die Erstickungsgefahr mit zunehmender Feuchte grösser. Schluffige Böden sind erosionsgefährdet. Auf ein sofortiges Begrünen (Stabilisieren der Oberfläche) ist hier besonders zu achten. Mitentscheidend für die zulässige Schütthöhe ist die Form der Schüttung. Ebenso bestehen Unterschiede zwischen der frisch angeschütteten und der abgesetzten Menge.

### **Flächige Schüttungen**

Mittel- bis längerfristige, voraussichtlich mehrere Jahre dauernde Zwischenlagerung von Oberboden über durchlässigem Untergrund (z.B. Kiesgrubenboden), erlaubt eine Schütthöhe von max. 1.5 m, wenn tiefwurzelnende Pflanzen (Luzerne-Kleegrasmischung) die Bodenaktivität aufrecht erhalten.

Kurzfristige, landwirtschaftlich bewirtschaftete Flächenlager, beispielsweise die Bodenbörse einer Grossbaustelle, können unter günstigen Voraussetzungen (kurze Lagerdauer, geeignete Bodenart, niederschlagsarme Gegend) bis auf max. 2.5 m Höhe angelegt werden.

## Wallförmige Depots

Solche Depots werden in der Regel nicht bewirtschaftet, sondern lediglich bei Bedarf (z.B. Verunkrautung) gemäht. Sie sind auch seitlich bis in eine gewisse Tiefe durchlüftet und durchwurzelt. Versuche haben gezeigt, dass sich in höher geschüttetem Bodenmaterial in den ersten zwei Jahren eine von unten her wachsende Erstickungszone bildet, die sich aber mit zunehmender Restrukturierung, vor allem durch Wurzelwachstum und Wurmtätigkeit, deutlich zurückbildet. Im Dreieckprofil wird der Auflagedruck des zusätzlich geschütteten Materials halbiert. Trockener Boden kann bis max. 2,5 m lose gemessene Höhe angeschüttet werden.

## Maschinen und Verfahren

Entsprechend dem Vorhaben wird der Boden mit derselben Maschine in einem Arbeitsgang ausgehoben und seitlich deponiert (beispielsweise beim Grabenaushub). Bei grösseren Distanzen hingegen wird er auf Lastwagen oder Dumper verladen und angekippt. Mit Bagger oder Dragline direkt umgesetzt wird beispielsweise bei grösseren Geländekorrekturen und Sanierungsarbeiten.

In jedem Falle muss der Boden locker angeschüttet sein und darf nicht befahren werden. Deshalb können Dozer und Schürfraupen notfalls für den Transport, nicht aber für das Anlegen der Bodendepots selber eingesetzt werden.

Für das Ausgleichen flächig geschütteter Depots dürfen nur leichte Planiertraupen unter 15 Tonnen Gewicht in Moorausführung (Flächenpressung < 200 g/cm<sup>2</sup>) verwendet werden.

## Allgemeine Grundsätze

Beim Anlegen von mietenförmigen und flächigen Zwischenlagern von Bodenaushub gelten, ähnlich wie bei der Rekultivierung, folgende Grundsätze:

- Im Gefälle muss immer von oben nach unten gearbeitet werden, damit in keiner Phase der Arbeiten ein Wassereinstau entsteht.
- Es darf nie auf bereits vernässtem Untergrund angeschüttet werden. Senkungen der Rohplanie, in denen sich Wasser ansammeln kann, sind mit durchlässigem Unterbodenmaterial auszugleichen.
- Direkt angekippte Schüttungen dürfen nur im Streifenverfahren, d.h. ohne Befahren des geschütteten Materials, durchgeführt werden.
- Die Einsaat einer Luzerne-Kleegrasmischung muss ohne Verzögerung, wenn nötig in Etappen, erfolgen. Eine locker angeschüttete Schicht darf niemals brach liegengelassen werden.

## Zusatzmassnahmen

Grundsätzlich soll so gearbeitet werden, dass Zusatzmassnahmen überflüssig sind. In Ausnahmefällen helfen diese aber mit, boden- und umweltverträgliche Lösungen zu finden. Einige erprobte Möglichkeiten sind nachstehend dargestellt. Sie betreffen vor allem die längerfristige Zwischenlagerung von Bodenaushub.

## Entwässerung

In ungünstigen Lagen, besonders am Hang, wo das Risiko der Vernässung besteht, ist der Einbau einer Sickerhilfe zu empfehlen. Das Abfangen des Oberflächenwassers oberhalb des Depots ist wirksamer als aufwendiges Vorverlegen einer flächigen Kiesunterlage, die in der Regel noch mit einem Trennvlies vor Verschlammung geschützt werden muss.

**Belüftung**

Wenn das Zwischenlager höher als vorgesehen geschüttet werden muss, können Belüftungsrohre in den Depotkörper eingelegt werden. Diese sollen, vor allem im unteren Bereich, von beiden Seiten her überschneidend verlegt werden, so dass auch dem Kern des Depots Luft zugeführt wird.

**Teil 3****Rutschsicherung**

Muss das Depot aus Platzgründen steil angeschüttet werden, z.B. für eine längerfristige Zwischenlagerung von geeignetem Unterbodenmaterial bei einer Kiesgrube, kann der Depotabschluss mit starkwurzelnden Pioniersträuchern befestigt und rutschsicher gemacht werden. Je nach Standort geschieht dies mit grünen, direkt vernagelten Weiden-, Erlen- oder Haselstecklingen, mit bewurzelten Jungpflanzen von Sanddorn, Schwarzdorn, Weissdorn und anderen Arten, als Direktpflanzung oder in Form von Buschlagen.

# Wiederherstellung

## Umfang und Anwendung

Dieser Teil beschreibt die Wiederherstellung von Kulturland nach länger dauernden Eingriffen. Er kommt dort zur Anwendung,

wo Ober- und Unterboden abgetragen und zwischengelagert wurden und neu angelegt und als Kulturlandfläche "reaktiviert" werden müssen. Das Vorgehen hierfür sieht in der Regel wie folgt aus:

<p>1. Vereinbarung mit Bewirtschafter/Eigentümer.</p> <p>2. Erstellen der Rohplanie.</p> <p>3. Entwässerung der Rohplanie:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gestaltung der Gefälle.</li> <li>- Einbau von Sickerhilfen.</li> <li>- Einbau eines Entwässerungssystems.</li> </ul> <p>4. Wiederherstellung mit angepassten Maschinen und unter trockenen Bedingungen.</p> <p>Für neuangelegte, tiefgründige landwirtschaftliche Böden gilt in der Regel:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Einbau des Unterbodens mit mindestens 80 cm Mächtigkeit.</li> <li>- Zwischenbegrünung, falls der Unterboden über längere Zeiträume (&gt; 1 Jahr) hinweg zwischengelagert wurde.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einbau des Oberbodens mit 30-35 cm Mächtigkeit (im Zeitraum Juni-August des Jahres nach der allfälligen Zwischenbegrünung des Unterbodens).</li> </ul> <p>5. Zwischenabnahme zur Mängelbehebung (Werkabnahme) unter Anwesenheit der bodenkundlichen Baubegleitung, von Vertretern der Unternehmung, Bauherrschaft und Landeigentümer/Bewirtschafter:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Abnahmeprotokoll (6).</li> <li>- Spatenprobe (Teil 5).</li> <li>- Verbindliche Festlegung von Art und Dauer der Folgebewirtschaftung/Folgenutzung mit Landeigentümer und Bewirtschafter.</li> </ul> <p>6. Im Bedarfsfall Reparatur bestehender und störender Spuren des Eingriffs (z. B. mittels Tiefenlockerung, Drainage oder Entsteinung).</p> <p>7. Für alle neuangelegten Böden muss eine extensive, schonende Folgebewirtschaftung/Folgenutzung erfolgen (Teil 5).</p>	<p>8. Schlussabnahme/Beurteilung (analog Ziffer 5):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Abnahmeprotokoll der Rekultivierung.</li> <li>- Beurteilung des Erreichten, ev. Vergleich mit dem Ausgangszustand (4): Spatenprobe, ev. Messung von Eindringwiderstand, Grobporenvolumen, Infiltrationsrate und/oder gesättigter Wasserleitfähigkeit (Kapitel 8).</li> <li>- Ev. Beizug der kantonalen Bodenschutzfachstelle.</li> </ul> <p>9. Ev. Schadensbehebung/Reparatur (analog Ziffer 6).</p> <p>10. Rückgabe des Bodens zur normalen Nutzung.</p> <p>Im konkreten Fall kann auf einzelne Schritte verzichtet werden!</p>
--	---	---

## Teil 4

*Wiederherstellung und Abnahme temporär beanspruchter Böden (6)*

Eine Rekultivierung kann auch mit frisch abgetragenen Boden vorgenommen werden. Das ist zum Beispiel im Kiesabbau oft der Fall, wenn die abgeschlossene Verfüllung eines Grubenteils direkt wieder mit dem Ober- und Unterboden einer neuen Abbauetappe rekultiviert wird.

## Vermeiden des Abtrages

Wo Boden abgetragen wird, besteht meist eine Rekultivierungs- bzw. Wiederherstellungspflicht. Es ist deshalb besser, vorgängig zu prüfen, wieweit der Boden bei einem tiefbaulichen Eingriff überhaupt entfernt werden muss.

Für Linienbaustellen bedeutet das bisher praktizierte Abhumusieren der Arbeits- und Transportpiste einen Mehraufwand bei der Rekultivierung, der sich nur in begründeten Ausnahmefällen rechtfertigen lässt.

Nicht direkt vom Eingriff betroffene Flächen sollen also nicht abhumusiert werden. Deshalb sind bei der Planung der Linienführung schwierige Böden zu meiden und verbleibende kritische Abschnitte mit geeigneten Hilfsmitteln, z.B. Baggermatten oder Kiespisten, vor unzulässiger Verpressung zu schützen. Wenn die Fläche schon vor dem Eingriff Wiesland war, kann sie sich in den meisten Fällen wieder selber regenerieren. Ansonsten muss sie neu begrünt werden. Auf weitere Massnahmen kann in der Regel verzichtet werden.

## Direktes Wiederanlegen

Wenn ein Boden aus seiner natürlichen Lagerung herausgeholt und direkt wieder angelegt wird, sind seine Eigenschaften weniger verändert, als wenn er vom mehrjährigen Depot genommen und aufgetragen wird. Die schichtweise biologische Voraktivierung kann des-

halb entfallen, d.h. eine Zwischenbegrünung des Unterbodens vor dem Auftragen des Oberbodens ist nicht nötig. Es ist zu prüfen, ob ein direktes Anlegen des abgetragenen Ober- und Unterbodens, also die definitive Wiederherstellung des Kulturlandes an einem anderen Ort, ohne Zwischenlagerung des Bodenmaterials möglich ist. Der zusätzliche Auf- und Abladeprozess bedeutet für den Boden nämlich eine zusätzliche mechanische Belastung. Dazu kommt der finanzielle Mehraufwand.

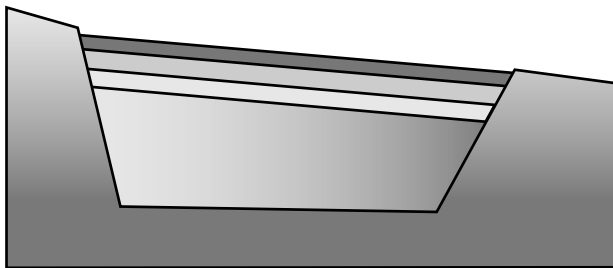
## Zweiphasensystem

Es stellt das zweistufige Vorgehen mit der Zwischenbegrünung des Unterbodens vor dem Auftrag des Oberbodens dar. Dieses Vorgehen ist dort anzuwenden, wo der Unterboden ab Depot angelegt wird und vor dem Auftragen des Oberbodens mit stark wurzelnden Pionierpflanzen erschlossen und aktiviert werden muss. Eine Zwischenbegrünung ist auch angezeigt auf Flächen, auf denen der gewachsene Unterboden freigelegt (abhumusiert) und unbedeckt oder mit Auflage eines Kieskoffers als temporäre Bau- oder Fahrpiste benutzt wurde. Sinngemäss ist die Zwischenbegrünung auch anzuwenden bei der Renaturierung von Strassen, Wegen und befestigten Plätzen. Dieses Vorgehen bedeutet ein Jahr zusätzliche Wartezeit bis zur definitiven Rekultivierung des Bodens, weil sich nur in seltenen Fällen eine Zwischenbegrünung, der Oberbodenauftrag und die Wiederbegrünung in derselben Vegetationsperiode bewerkstelligen lassen.

Nachstehend sind die einzelnen Abschnitte einer vollumfänglichen Rekultivierung, wie sie z.B. nach Kiesabbau ansteht, dargestellt.

## Rohplanie

Ein guter Boden kann sich nur über einer waserdurchlässigen Unterlage entwickeln und erhalten. Auch im natürlichen Zustand ist ein Boden, der unter Stauwassereinfluss steht, in seiner Eigenschaft als Pflanzenstandort und damit auch in seiner Nutzungsmöglichkeit, immer mehr oder weniger eingeschränkt. Nach Kiesabbau wiederherzustellende Böden lagen ursprünglich über durchlässiger Unterlage und haben sich dort meist zu fruchtbaren Parabraunerden (Kap. 3) entwickeln können. Deshalb ist die adäquate Rekultivierung in diesen Fällen äusserst schwierig.



	<b>Oberboden</b>		<b>Auffüllung (Rohplanie)</b>
	<b>Unterboden</b>		<b>Kieskörper</b>
	<b>Sickerschicht</b>		

*Schematische Darstellung des Bodenaufbaues einer Auffüllung und Rekultivierung, wie sie heute in verschiedenen Richtlinien zu finden ist.*

Es wird versucht, mittels flächigen Einbaus einer Sickerschicht aus sauberem Kies, das einsickernde Wasser in gleichmässig angelegtem Gefälle über der Rohplanie in die noch bestehende, durchlässige Kieswand abzuleiten. Die vorgeschriebene Mindestdicke dieser Schicht, in der Regel 15 cm, genügt nicht, wenn:

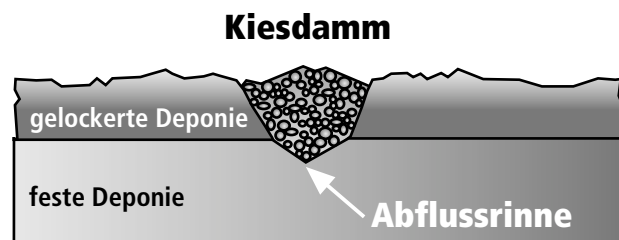
- die zu überwindende Strecke zu lange (Fließwiderstand),
- die Rohplanie nicht absolut gleichmässig (Fließunterbruch),
- das aufgebraute Bodenmaterial instabil (Verschlammung) ist.

Zudem wird diese Sickerschicht meist mit grobem und gewaschenem Material (Sickerkies) ausgeführt. In diesem Kies kann das Wasser zwar gut abfließen. Da der Kieskoffer aber keine feinen Poren enthält, kann das Wasser nicht aus dem darüberliegenden Bodenkörper einfließen. Es bleibt wegen der Kapillarkraft hängen (Vernässungssaum über dem Porensprung).

Als erstes muss geprüft werden, ob die Rohplanie dicht ist und dicht bleiben muss (geschlossene Abfalldeponie), oder ob sie vor der Anschüttung des Unterbodens eventuell aufgelockert und genügend durchlässig gemacht werden kann (Versickerungsversuche).

Ist sie nicht durchlässig, so muss festgestellt werden, wohin anfallendes Sickerwasser abgeleitet und weiterversickert oder durch eine offene Vorflut abgeleitet werden kann. Diesen Abflussmöglichkeiten muss die Oberflächengestaltung von Rohplanie und zukünftiger Kulturlandfläche Rechnung tragen.

Oberflächlich angelegte Abflusspfade (offene Gräben) und Auffangbecken für überschüssiges Wasser können als bereichernde Elemente in diese Planung einbezogen sein. Sie lassen sich als ökologische Ausgleichsflächen in die zu gestaltende neue Kulturlandschaft einfügen.



*Sicker- und Abflusshilfen können beispielsweise auch so gestaltet werden. Bei diesem System kann viel kostbares Rohmaterial eingespart und trotzdem eine gute Entwässerungswirkung erreicht werden.*

## Auftrag des Unterbodens

Je nach Verfahren und Transportdistanz wird der Unterboden mit Lastwagen, Dumper oder Schürfkübelraupe herangeführt und mit dem Bagger oder dem Moordozer verteilt. Bei günstigen Verhältnissen (absolut trockener Untergrund, trockener Unterboden, geeignete, leichte Maschinen und erfahrene Maschinisten) kann Unterboden direkt mit der Schürfkübelraupe geschüttet werden.

Fremdes Unterbodenmaterial darf nur eingebaut werden, wenn es die geeignete Qualität aufweist. Stark toniger oder torfiger Boden darf nicht verwendet werden.

## Zwischenbegrünung

Der locker geschüttete Unterboden wird mit landwirtschaftlichen Geräten vorbereitet und angesät. Das Saatbeet sollte nicht zu fein bearbeitet werden, weil Unterboden ohnehin stark zum Zerfallen und zur Verschlammung neigt. Die nachfolgende Krustenbildung verhindert dann oft das Aufkommen der Saat.

Im grob bearbeiteten Saatbeet gehen die Samenkörner teilweise verloren, weil sie zu tief zwischen die Schollen versinken. Deshalb muss für die Saat auf Unterboden die empfohlene Normsaatmenge um ca. 50 % erhöht werden.

Über die Menge und die Zusammensetzung einer allfälligen Grunddüngung geben Proben und Nährstoffanalysen Aufschluss. Auch beim Ausbringen von organischen Düngemitteln wie Mist und Kompost muss vorsichtig dosiert werden, da die für den Abbauprozess verantwortlichen Organismen im wenig belebten

Unterboden kaum vorhanden sind. Flach eingearbeitetes, aktives, organisches Material wie aerob verrotteter Mist und Kompost können aber die Startbedingungen merklich verbessern. Gülle und Klärschlamm sind hingegen ungeeignet.

## Wahl der Kultur

Verschiedene Richtlinien empfehlen die Verwendung von Ölrettich, Gelbsenf und Rüben als tiefwurzelnde Pflanzen. Diese können ihre positive Wirkung jedoch nicht in jedem Boden voll entfalten. Je nach Bodenart, pH und Klima entwickeln sich andere Pionierpflanzen ebensogut. Diese Saadmischungen sind in mancher Beziehung sicherer als Reinsaaten. Andererseits vertragen gewisse Pflanzen aber die Konkurrenz anderer nicht und kommen in Mischungen nicht auf. Als Reinsaat könnten sie sich hingegen stark und schnell entwickeln.

## Oberbodenauftrag

Der Oberboden wird im Jahr nach der Zwischenbegrünung (bei gut abgetrocknetem Boden eventuell noch im gleichen Jahr), spätestens anfangs August aufgetragen. Wenn die Zwischenbegrünung stark entwickelt ist, muss sie vor dem Überschütten geschnitten und zerkleinert liegengelassen werden (Schlegelmäher, Mulchmäher).

Abgefrorene, nicht winterharte Pflanzen (Sorghum, Sonnenblume, Buchweizen, Ölrettich) müssen in der Regel nicht zerkleinert werden.

Auf das Abführen des Pflanzenmaterials kann verzichtet werden, wenn die Saatbeetzubereitung in Form einer tiefen Durchlüftung (Spatenflug, MM100 Grubber) geschieht. Anhäufungen von Pflanzenmaterial sind vor dem Oberbodenauftrag gut zu verteilen (Vermeiden sog. Matrazenbildung).



Der Oberboden kann auf verschiedene Art angeführt und geschüttet werden. Der voraktivierte und durch Wurzeln bereits erschlossene Unterboden soll dabei möglichst wenig und nur im absolut trockenen Zustand befahren werden.

### ***Bearbeitung und Saat***

Die lose Schütmächtigkeit muss mindestens 25 - 30 % höher sein als die Mächtigkeit im abgesetzten Zustand. Es ist wenig sinnvoll, humushaltigen Oberboden mehr als 40 cm dick aufzutragen (Ausnahme: Bodenbörse). Die aufgetragene Oberbodenschicht soll Luft bis zum organisch aktivierten Unterboden vordringen lassen. Eine Tieflockerung zur Saatbeetvorbereitung kann diese Bedingungen notfalls schaffen.

Das so vorbereitete Saatbeet wird mit einer mehrjährigen Klee gras-Luzernmischung (Luzerne vorher mit Bakterienpräparat impfen) besät und mindestens drei Jahre schonend bewirtschaftet (siehe Teil 5).

# Folgebewirtschaftung

## Vorschriften

Die Dauer und Minderwertsentschädigung der Folgebewirtschaftung wird bei UVP-pflichtigen Projekten vertraglich mit den betroffenen Eigentümern geregelt.

Die Folgebewirtschaftung hat zum Ziel, in geschädigten, im labilen Zustand befindlichen Böden eine biologische Aktivität aufzubauen, welche die dauerhafte Stabilisierung und Restrukturierung der Böden einleitet und unterstützt.

## Teil 5

### Kurzfristige Grünphase

Die Folgebewirtschaftung ist überall dort angezeigt, wo Boden in seiner natürlichen Lagerung stark verdichtet wurde und mit Tieflockerung behandelt werden musste (z.B. Leitungsbau ohne Abhumusieren des Fahr- und Arbeitsstreifens). Hier genügt in der Regel eine

Restrukturierungsphase in Form einer extensiven Grünlandnutzung während eines Jahres, bevor wieder zum normalen Fruchtwechsel übergegangen werden kann.

### Normale Folgebewirtschaftung

In allen Fällen, in denen der Boden aus seiner natürlichen Lage herausgenommen wurde und deshalb eine Zwischenbegrünung des Unterbodens stattgefunden hat, muss die Dauer der Folgebewirtschaftung verlängert werden (z.B. Rekultivierungen nach Kiesabbau, Leitungsbau mit abhumusiertem Fahrstreifen). Eine Vegetationsperiode genügt nicht, um die Gleichgewichtsverhältnisse im frisch angelegten Boden wieder herzustellen und zu stabilisieren. Als Minimum sind dafür drei volle Jahre nötig. Erfahrungen in wenig begünstigten Lagen mit schwierigen Böden zeigen, dass in vielen Fällen fünf Jahre, in Einzelfällen zehn Jahre nicht ausreichen, um die gewünschte Konsolidierung im Boden zu erreichen.

Nachstehende Massnahmen sind Empfehlungen für die mehrjährige Folgebewirtschaftung frisch angelegter landwirtschaftlicher Böden (nach erfolgter Zwischenabnahme). Sie ermöglichen eine erfolgreiche Restrukturierung des Bodens

(Rekultivierung vor der Schlussabnahme und vor der Rückgabe zur normalen Nutzung):

- Nur im trockenen Zustand und mit leichten Maschinen befahren
- Keinerlei Bodenbearbeitung
- Anbau von Tiefwurzlern (Luzerne/Rotklee)
- Dürrfutternutzung

- Keine Stickstoffdüngung, keine Gülle und kein Herbizideinsatz
- Kein tiefer und kein früher Schnitt
- Keine Beweidung
- Genügende Entwicklungsdauer (mindestens 4 Jahre, von Werkabnahme bis Rückgabe zur normalen Nutzung)

*Empfohlene Massnahmen während mehrjähriger Folgebewirtschaftung (6)*

## Wirkungsweise

Die sorgfältige Folgebewirtschaftung hat zum Ziel, in einem wiederhergestellten Boden die für die Bodenfruchtbarkeit notwendigen Eigenschaften herbeizuführen. Dies sind vor allem:

- Befestigung der labilen Bodenstruktur durch Lebendverbau mit Wurzelwerk. Damit wird die Tragfähigkeit und Befahrbarkeit des Bodens verbessert.
- Verdunstung überschüssigen Wassers: Eine Wiese verdunstet an einem einzigen Sommertag bis zu fünf Liter Wasser pro m<sup>2</sup>.
- Biologische Erschliessung inaktiver, verdichteter Schollen durch Feinwurzeln: Durch Wurzelbakterien der Luzerne werden pro ha und Jahr bis zu 170 kg reiner Stickstoff aus der Luft fixiert.
- Förderung der Bodentiere, vor allem der Regenwürmer, welche nebst dem Graben von Grobporen vor allem auch für die Bildung der Ton-Humuskomplexe (Krümel) im Boden wichtig sind.

Damit diese Ziele erreicht werden, ist es notwendig, den Bewirtschafter davon zu überzeugen, dass während der Folgenutzungsphase nicht die Maximierung des Ertrages, sondern die Optimierung der Lebensbedingungen für Pflanzen und Bodentiere absoluten Vorrang hat. Es ist deshalb sinnvoll, Fragen der Folgebewirtschaftung und der Ertragsausfallentschädigung im Voraus zu regeln.

## Düngung

Die Düngung richtet sich grundsätzlich nach dem standortspezifischen Nährstoffangebot, das vorgängig durch eine Bodenanalyse ermittelt wird. Die Probenahme erfolgt an mindestens 15 Punkten, welche gleichmässig über die zu beprobende Fläche verteilt sind.

Bestehen innerhalb der Parzelle flächige Unterschiede, so sind solche Abschnitte separat zu beproben und zu kennzeichnen. Es empfiehlt sich, eine umfassende Analyse durchzuführen und sowohl die wasserlöslichen Nährstoffe als auch den Nährstoffvorrat bestimmen zu lassen.

### Kein Stickstoff

Überdüngte Bestände entwickeln kein robustes Wurzelwerk, die tiefe Durchwurzelung entsteht dann, wenn die Pflanze ihre Nährstoffe und ihr Wasser im Boden suchen muss. Um den Bestand der Luzerne zu fördern, ist auf die Stickstoffdüngung zu verzichten.

### Organische Dünger

Organische Dünger in Form von gut verrottem Mist oder Kompost sind in mässigen Gaben feinverteilt auszubringen. Sie werden von den Regenwürmern gut angenommen und fördern die Entwicklung des Wurmbestandes. Durch die Grab- und Fresstätigkeit der Würmer wird die mineralische Feinerde mit der organischen Substanz im Verdauungstrakt der Bodentiere intensiv vermischt. Es werden wertvolle Ton-Humuskomplexe (Krümel) gebildet.

### Keine Gülle

Gülle schadet dem Wurmbestand, da gerade die wertvollen, tiefgrabenden Arten in ihren senkrechten Gängen nicht flüchten können und so verätzt werden. Ebenso fördert die Gülle den Graswuchs, welcher die Luzerne konkurrenziert und verschwinden lässt. Auf Gülle und Klärschlamm als Düngemittel ist während der Folgebewirtschaftungsphase zu verzichten. Schwache Gaben gut belüfteter, nicht ätzender Vollgülle sind ab dem zweiten Standjahr tolerierbar.

## Nutzung

Im Saatjahr ist bei Frühsaaten ein Herbstschnitt, bei späteren Saaten ein Säuberungsschnitt angezeigt, bei dem das spärlich anfallende Mähgut breit liegengelassen wird. Luzerne nie zu früh und nicht zu tief mähen!

### Dürrfutter oder Silage

Ab dem zweiten Jahr wird eine regelmässige Dürrfuttternutzung empfohlen. Damit ist das Risiko der Bodenverdichtung am geringsten. Wenn strikte auf trockene, tragfähige Böden geachtet wird, kann auch die Silage toleriert werden.

### Kein Eingrasen und kein Weidegang

Auf das Eingrasen und den Weidegang ist in dieser Phase zu verzichten. Häufiges Mähen schwächt den Luzerne- und Rotkleebestand und kann zudem zu Bodenverdichtung führen. Beim Weiden entstehen punktuelle Bodenverdichtungen. Ebenso verdrängt das Weiden Luzerne und Rotklee als wertvolle Tiefwurzler rasch.

### Erfolgskontrolle

Während der Folgebewirtschaftungszeit werden Mängel wie Staunässen, Erstickung etc. an Veränderungen des Pflanzenbestandes erkennbar. Normalerweise sollte sich ein Bestand nach sorgfältiger Rekultivierungsarbeit regelmässig entwickeln und mit zunehmender Dauer immer kräftiger und ausgeglichener werden. Starke Bestandesunterschiede zeigen Mängel an, die in aller Regel durch Zusatzmassnahmen wie Tieflockerung und Drainage korrigiert werden müssen.

## Kontrolle des Nährstoffhaushaltes

Unter ähnlichen Bedingungen wie zu Beginn soll nach etwa zwei bis drei Jahren Folgebewirtschaftung die Nährstoffversorgung durch Bodenanalysen erneut überprüft werden. Um die Vergleichbarkeit der Resultate zu gewährleisten, sind die Proben demselben Labor zur Untersuchung zuzuweisen. Zur Interpretation der Ergebnisse sollte ein versierter Pflanzenbauberater beigezogen werden.

## Spatenprobe

Mit der Spatenprobe wird an mehreren Stellen, auch unmittelbar ausserhalb der Rekultivierungsfläche, ein ca. 45 cm tiefes Loch gegraben und ein zusammenhängendes Stück Boden auf die volle Tiefe ausgehoben. Dieser Erdblock wird von oben nach unten sorgfältig untersucht. Die Feststellungen werden in Abschnitten von 5 cm protokolliert (vgl. nebenstehendes Formular).

Vor allem interessieren in diesem Zusammenhang:

- der Einstichwiderstand (Verdichtungsgrad),
- Regelmässigkeit und Tiefe der Durchwurzelung (Erschliessung),
- die Anwesenheit und Tätigkeit der Bodentiere (vor allem der Regenwürmer),
- die Form und Stabilität der Krümel,
- die Abbautätigkeit auch in tieferen Bereichen (sind keine Überreste der Zwischenbegrünung mehr zu finden?) und
- die Lagerungsdichte und Durchlüftung (sind Schollen gut brechbar, gibt es stickige und verfärbte Zonen?).

Die Spatenprobe bildet zumeist Bestandteil der Abnahme grösserer Rekultivierungen durch die zuständigen Aufsichtsstellen.

# Spatenprobe

Bodenart:

Kriterien	Bodentiefe [cm]							
	05	10	15	20	25	30	35	40
<b>Genereller Bodenzustand</b>								
locker, krümelig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
hart, zäh, verklumpt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
nicht abgebaute organische Substanz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Geruch</b>								
angenehm, erdig, frisch	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
stinkend, klärschlammähnlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
geruchlos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Farbe</b>								
warm, regelmässig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
fahl, fleckig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Feinstruktur</b>								
weichbrüchig, rundlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
hart brechend, scharfkantig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Durchwurzelung</b>								
dicht, regelmässig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
auf Risse und Wurmgänge beschränkt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
keine	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<b>Würmer</b>								
sichtbar, aktiv	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
keine Aktivität	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## Einfache Beprobung

## Empfehlungen

<b>Bodenoberfläche</b>		<b>Massnahmen</b>	
<input type="checkbox"/> locker, gut aggregiert		<input type="checkbox"/> keine	
<input type="checkbox"/> verschlämmt, verkrustet		<input type="checkbox"/> striegeln, lockern	
<input type="checkbox"/> erodiert		<input type="checkbox"/> Einsaat	
<b>Bodenfeuchte / Umschreibung</b>		<b>Verdichtung vermeiden</b>	
<input type="checkbox"/> trocken, hartschollig		<input type="checkbox"/> befahren, aber nicht fein bearbeiten	
<input type="checkbox"/> erdfeucht, brüchig, gar		<input type="checkbox"/> bearbeiten, aber nicht befahren	
<input type="checkbox"/> nass, breiig oder knetbar		<input type="checkbox"/> weder befahren noch bearbeiten	
<b>Lufthaushalt, biologische Tätigkeit</b>		<b>Aktivieren</b>	
<b>Geruch, Farbe, Abbau organischer Masse</b>		<b>Grünbrache, Kunstwiese anlegen</b>	
<input type="checkbox"/> Graufärbung, stinkig		<input type="checkbox"/> nicht nass bearbeiten, ev. pfluglos	
<input type="checkbox"/> Erntereste nicht abgebaut		<input type="checkbox"/> flacher bearbeiten	

### Weitere Angaben (Kultur, Bestand, Vernässung usw.)

---



---



---

Datum:

Unterschrift:

---

## Übergang zur Fruchtfolge

In drei Jahren Folgebewirtschaftung kann ein Boden niemals seine volle Strukturstabilität aufbauen. Dieser Tatsache muss bei der ackerbaulichen Wiederinkulturnahme Rechnung getragen werden. Auf den Anbau von bodenzehrenden Hackfrüchten wie Kartoffeln oder Feldgemüse, von spät zu erntenden Kulturen mit schwerlastigen Ernteverfahren wie Zuckerrüben oder Silomais, sollte in den ersten darauffolgenden Jahren unbedingt verzichtet werden. Eine getreidebetonte Fruchtfolge, mit möglichst früher Zwischenschaltung einer Kunstwiese, ist zu bevorzugen.

### Teil 5

Es ist wenig sinnvoll, Boden mit viel Aufwand locker anzulegen, um ihn nachher in Tiefen zu verdichten, die nicht oder nur mit grossem Aufwand wieder gelockert werden können. Tieflockerung ist kein Heilmittel gegen Bodenverdichtung. Es ist ein ziemlich grober Eingriff, der die Voraussetzungen für eine Restrukturierung des geschädigten Bodens schafft. Dieser Eingriff darf keinesfalls als beliebig oft wiederholbare Bodenbearbeitungsmassnahme angesehen werden.

# Befahren des Bodens

## Befahren des Bodens bei tiefbaulichen Eingriffen

Für die Bewirtschaftung des Bodens, für die Ernte und für den Abtransport des Erntegutes muss natürlicher Boden in Feld und Wald befahren werden. Mit zunehmender Mechanisierung entstehen daraus bereits Probleme. Diese sind erkannt und müssen im Rahmen der neuen Artikel über den physikalischen Bodenschutz in der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo, 7) angegangen werden.

Wenn Boden für tiefbauliche Zwecke befahren wird, herrschen meist andere Voraussetzungen. Die wichtigsten Unterschiede zur Bewirtschaftung bestehen in der Regel darin, dass:

- der Oberboden vorgängig grossflächig abgetragen und zwischengelagert wird (sog. Abhumusieren),
- die Bauarbeiten projektbedingt meist über das ganze Jahr verteilt ausgeführt werden,
- die Durchfahrten nicht einmalig, wie bei Bestellung und Ernte, sondern oft unzählige Male an derselben Stelle erfolgen,
- meist schwerere Maschinen und Fahrzeuge zum Einsatz kommen und
- immer schwergewichtige Materialien wie Aushub, Bauelemente, Kies und Beton verschoben werden.

Gewisse Tiefbauarbeiten, vor allem für den Verkehr und die Energieversorgung, werden auch in Zukunft grössere Kulturland- und Waldflächen temporär beanspruchen. Es geht darum, die Möglichkeiten des mechanischen Bodenschutzes aufzuzeigen, damit sie im Rahmen der Planung und Durchführung solcher Arbeiten optimal berücksichtigt werden.

## Bodenfruchtbarkeit erhalten

Allgemeines und oberstes Ziel ist die langfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit (Definition im Kapitel 1 der Grundlagen). Es gilt zu verhindern, dass der Boden durch mechanische Einwirkungen seine natürlichen Qualitäten als Pflanzenstandort einbüsst. Das Gleichgewicht des natürlich gewachsenen Bodens muss geschont und jede unnötige Bodenverdichtung oder Störung der natürlichen Horizontierung (Schichtung) vermieden werden.

Dieses Ziel kann durch folgende Massnahmen erreicht werden:

- Boden nur im gut abgetrockneten, genügend tragfähigen Zustand befahren,
- nur geeignete Maschinen und Verfahren einsetzen,
- unnötige Fahrten vermeiden,
- Fläche des Eingriffes möglichst klein halten,
- jede unnötige Umlagerung von Boden, insbesondere Abhumusieren, vermeiden und
- Boden nie unbepflanzt, d.h. brach und somit ungeschützt, liegen lassen.

Diese Massnahmen müssen zwingend Bestandteil des Vorprojekts, des Hauptprojekts und dessen Zeitplan sowie der entsprechenden Ausschreibung sein und in der Realisierungsphase kontrolliert umgesetzt werden. Dies bedingt in der Regel den Beizug einer bodenkundlichen Baubegleitung durch ausgewiesene Fachpersonen (siehe Teil 0).

Die Umsetzung einzelner Massnahmen in die Praxis ist nachstehend in obiger Reihenfolge kurz erläutert. Detaillierte Angaben

zu den einzelnen Punkten sind in den folgenden «Erläuterungen zum Thema Boden» behandelt.

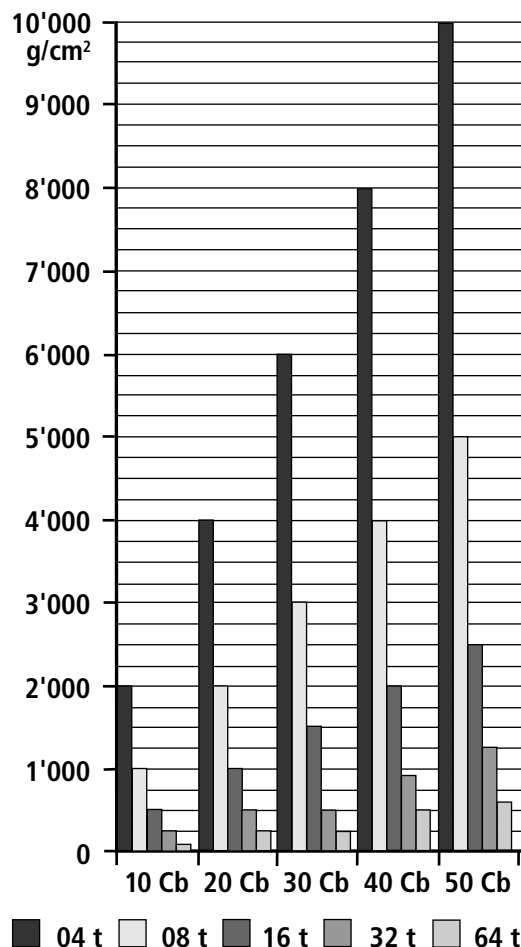
### Trockener Boden

Trockener Boden ist tragfähig. Als Mass für die Befahrbarkeit gilt die Saugspannung, die mit dem Tensiometer gemessen wird. Eine Messeinheit setzt sich aus fünf Tensiometern zusammen. Gültiger Wert ist der Median aus den abgelesenen Einzelwerten. Bei Saugspannungen unter 10 Centibar dürfen Böden nicht befahren werden.

### Geeignete Maschinen

Geeignet sind Maschinen mit möglichst geringem Gewicht und guter Gewichtsverteilung bzw. kleiner Flächenpressung. Breite und lange Fahrwerke ergeben eine geringere Flächenpressung. Optimal ausgerüstete Maschinen können leicht doppelt so lange Einsatzzeiten erreichen wie normale, besonders in Bauphasen mit relativ feuchtem Boden.

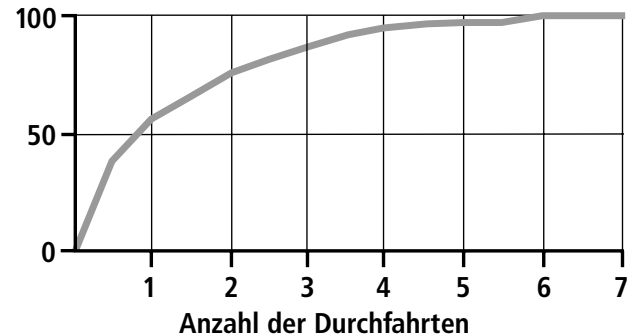
Die Grafik zeigt die zulässige Flächenpressung in  $g/cm^2$  (links) und das Maschinengewicht in Tonnen (t) bei einer bestimmten Saugspannung in Centibar (Cb, unten). Es zeigt sich beispielsweise, dass ein Bagger mit 16 t Gewicht und einer Flächenpressung von  $1000 g/cm^2$  bei Verdoppelung der Auflagefläche schon ab 10 statt erst ab 20 Cb eingesetzt werden darf.



### Weniger Fahrten

Die einzelnen Arbeiten sind so zu planen, dass sie mit möglichst wenig Fahrten realisiert werden können. Häufiges Befahren ist eine Hauptursache der Verdichtung.

### Verdichtungsgrad



Vor allem schwere Pneufahrzeuge (LKW, Pneu-lader) weisen sehr hohe Verdichtungskapazitäten auf. Auf ihren Einsatz im Kulturland sollte daher verzichtet werden. Für mehrmaliges Befahren sind Saugspannungen unter 20 Cb in tonreichen Böden (Ton-gehalt > 30 %) generell nicht zulässig, da sich der beeinflusste Bodenbereich im Zustand plastischer Verformbarkeit befindet. Wo ein mehrfaches Befahren des gleichen Abschnittes unvermeidlich ist, muss für Transportfahrten vor Arbeitsbeginn eine Piste (z.B. Baggermatrasen oder Kiespiste) ausgelegt werden.



## **Kleine Arbeitsflächen**

Die beanspruchten Flächen sind immer möglichst klein zu halten und einzugrenzen. Für Grossbaustellen, wie beispielsweise den Pipelinebau, muss das Verfahren in geeigneter Form angepasst werden. Bei Geländeauffüllungen und Rekultivierungen sind Zufahrten so anzulegen, dass sie vor dem Auftrag des Unter- und Oberbodens auf ihrer ganzen Fläche gelockert werden können.

## **Kein Abhumusieren**

Das saubere Abstossen der Oberbodenschicht vor dem tiefbaulichen Eingriff ins Gelände hat zwar Tradition. Selbst viele Landeigentümer sind von der Zweckmässigkeit dieser Massnahme überzeugt (Argument: weniger Humusverlust). Aus bodenschützerischer Sicht aber ist Abhumusieren allenfalls bei sehr flachgründigen Böden vertretbar.

Besonders dort, wo es darum geht, den Boden nur für wenige Durchfahrten zu benützen, ist es aber besser, den Oberboden als Schutzschicht liegen zu lassen. Dieser hat aufgrund seiner biologischen Aktivität ein wesentlich besseres Regenerationsvermögen als der darunterliegende Unterboden.

Im verdichteten Unterboden ist eine Restrukturierung kaum mehr möglich. Die Sanierung verdichteter Unterböden ist kostspielig und zeitaufwendig.

Auch wenn Aushub nur kurzzeitig zwischengelagert wird, ist es besser, ihn auf dem Oberboden anzulegen. Zwar ist u.U. eine lokale "Erstickung" des Bodens möglich (erkennbar am Faulgeruch beim Wiedereinfüllen des Aushubes). Die biologische Aktivität stellt sich aber bei oberflächlichem Auflockern und Belüften rasch wieder ein.

Wenn im Oberboden bei gleichem Maschinengewicht viel tiefere Spuren als im Unterboden entstehen, so ist dies auf die Verpressung der Grobporen zurückzuführen. Weil Unterboden weniger Grobporen enthält, sind Verpressun-

gen dort weniger augenfällig, bedeuten aber in den meisten Fällen einen fast vollständigen Verlust der Grobporen. Ohne aufwendige Sanierungsmassnahmen können solche Schäden nicht mehr behoben werden.

## **Boden immer begrünen**

Begrünter Boden ist bedeutend tragfähiger als Ackerboden. Fünf Liter Wasser pro Tag und m<sup>2</sup> werden im Sommer dem Boden einer Wiese problemlos entzogen, bzw. verdunstet. Die Begrünung der beanspruchten Flächen muss möglichst früh, am besten schon ein oder zwei Jahre vor dem Eingriff erfolgen, damit sich die Wiese voll entwickeln kann. Nach dem Befahren erholt sich die Wiese in der Regel rasch. Nur in schweren Fällen muss sie neu angelegt werden. Meist genügt ein Aufrauhem mit Über-

Kapitel 1 - 8

# Erläuterungen zum Thema Boden



# 1. Bodenfruchtbarkeit

## Definitionen

In Art. 2 der Verordnung über Belastungen des Bodens vom 1. Juli 1998 (7) ist der Begriff der Bodenfruchtbarkeit wie folgt umschrieben:

Boden gilt als fruchtbar, wenn

- a. er eine für seinen Standort typische artenreiche, biologisch aktive Lebensgemeinschaft und typische Bodenstruktur sowie eine ungestörte Abbaufähigkeit aufweist,
- b. natürliche und vom Menschen beeinflusste Pflanzen und Pflanzengesellschaften ungestört wachsen und sich entwickeln können und ihre charakteristischen Eigenschaften nicht beeinträchtigt werden,
- c. die pflanzlichen Erzeugnisse eine gute Qualität aufweisen und die Gesundheit von Menschen und Tieren nicht gefährden,
- d. Menschen und Tiere, die ihn direkt aufnehmen, nicht gefährdet werden.

Im Dokument "Physikalischer Bodenschutz" der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz (15) wird die Bodenfruchtbarkeit definiert als Fähigkeit des Bodens, seine Funktionen zu erfüllen, und zwar sowohl innerhalb seiner Ökosystemgrenzen als auch in Wechselwirkung mit anderen Umweltsystemen. In diesem Sinne ist die Bodenfruchtbarkeit als Mass für die Multifunktionalität des Bodens zu interpretieren.

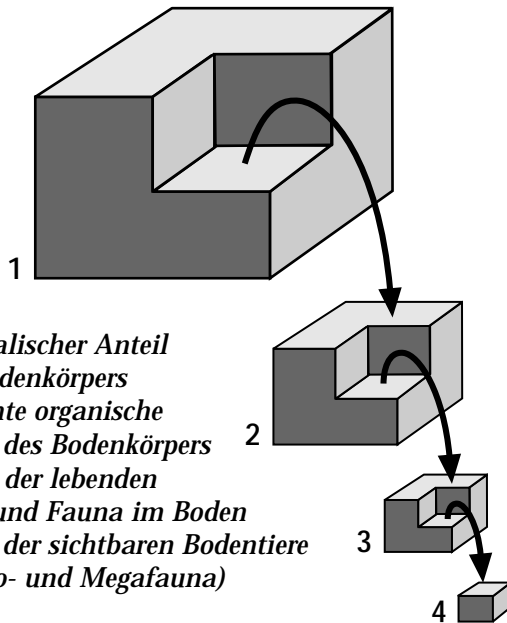
Die wichtigsten Funktionen des Bodens sind:

- Bioreaktor für den Abbau organischer Stoffe
- Standort für die natürliche Vegetation und für Kulturpflanzen
- Lebensraum für Bodenorganismen
- Filter und Puffer für Stoffe
- Ausgleichskörper im Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt
- Geschichtliche Urkunde (Boden als Informationsträger)
- Tragende Unterlage für Bauten bzw. Fahrbahn für Fahrzeuge und Geräte
- Rohstoffreservoir

## 2. Bodenleben

Im Boden lebt eine vielfältige Tier- und Pflanzenwelt. Bekannt und augenfällig sind vor allem die grösseren Bodentiere wie Würmer, Schnecken, Insekten und deren Larven. Diese machen jedoch zahlen- und gewichtsmässig nur einen kleinen Teil der Biomasse des Bodens aus. Der weitaus grösste Teil des Bodenlebens ist mit dem Auge kaum oder gar nicht erkennbar.

Dieses Kapitel vermittelt nur einen kleinen Überblick und wird der Bedeutung der Bodenbiologie damit kaum gerecht. Nachstehendes Schema versucht, den Anteil der Biomasse in einem Oberboden graphisch vereinfacht darzustellen.



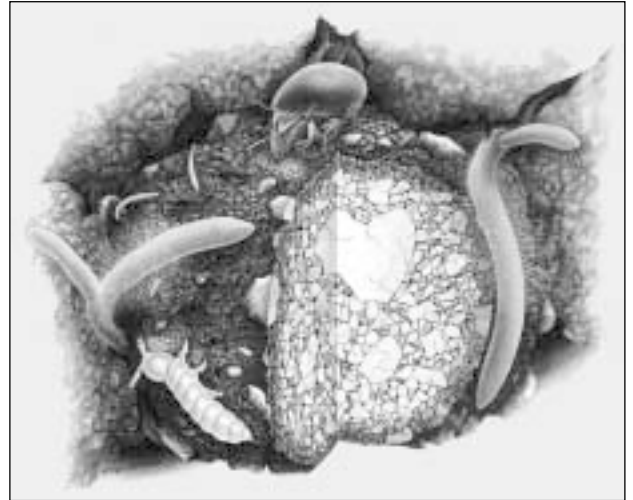
- 1 Mineralischer Anteil des Bodenkörpers**  
**2 Gesamte organische Masse des Bodenkörpers**  
**3 Masse der lebenden Flora und Fauna im Boden**  
**4 Anteil der sichtbaren Bodentiere (Makro- und Megafauna)**

**Abb. 01:** Schematische Darstellung der Gewichtsanteile im Boden.

### 2.1 Grenzbereich Boden/Pflanze

Die Pflanze findet im Boden Halt und Nahrung. So kann sie wachsen und sich vermehren. Der Boden wiederum wird durch das Wachstum der Pflanzenwurzeln erschlossen. Ausscheidungen der Pflanzenwurzeln lösen Nährstoffe aus dem Boden. Bodenteile, vor allem solche aus Kalk, werden durch diese Wurzelausscheidungen angegriffen, verwittert

und zerlegt. Diese aktive Grenzschicht zwischen Pflanzenwurzeln und Boden wird auch Rhizosphäre genannt.



**Abb. 02:** Zeichnerische Darstellung des Lebens im Bereich eines Krümelns. Natürliche Bildgrösse ca. 4 mm Seitenlänge. In der oberen Bildmitte ist eine Milbe, in der unteren linken Bildhälfte ein Springschwanz abgebildet. Diese Vertreter der Mesofauna können von blossen Auge noch knapp erkannt werden. Links und rechts des Krümelns befinden sich behaarte Spitzen von Pflanzenwurzeln.

### Boden/Wurzelhaar/Mikroorganismen

Die mineralischen Teile des kleinsten Bodenkrümelns werden durch einen Wasserfilm und durch unzählige feinste Wurzelhaare und Pilzfäden zusammengehalten.

Die Oberfläche des Krümelns ist oft teilweise oder ganz von einem Bakterienrasen überzogen. Dadurch wird der aus feinsten Einzelkörnchen (Ton, Schluff und Sand) zusammengebaute Krümel stabil (sog. Lebendverbau).

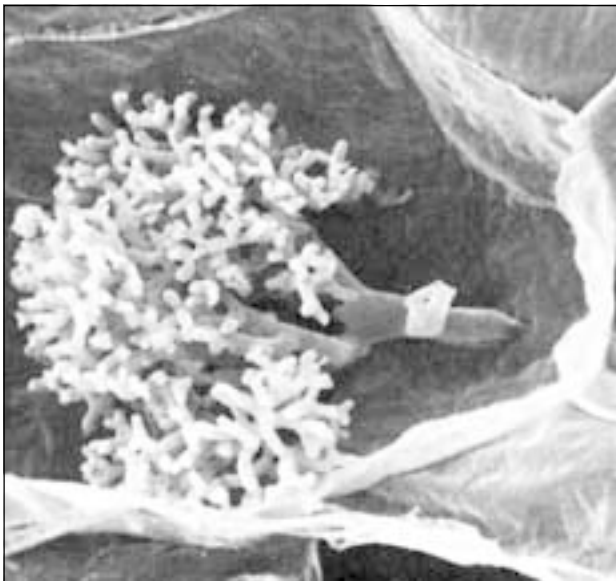
### Mikroorganismen/Pflanze

Mikroorganismen und Pflanzen können auf verschiedene Arten zusammenleben und sich in idealer Weise ergänzen. Oft ist eine Pflanzenart auf gewisse Mikroorganismen

angewiesen, damit sie überhaupt gedeihen kann. Demgegenüber sind verschiedene Mikroorganismen von lebenden Pflanzen abhängig. Nachstehend sind zwei bekannte Beispiele von gegenseitigem Stoffaustausch dargestellt.



**Abb. 03:** Symbiose mit Stickstoff-fixierenden Bakterien, vor allem bei Leguminosen. Der Gewinn ist beträchtlich; bis 170 kg N pro ha und Jahr können durch eine Luzerne- oder Kleewiese fixiert werden.



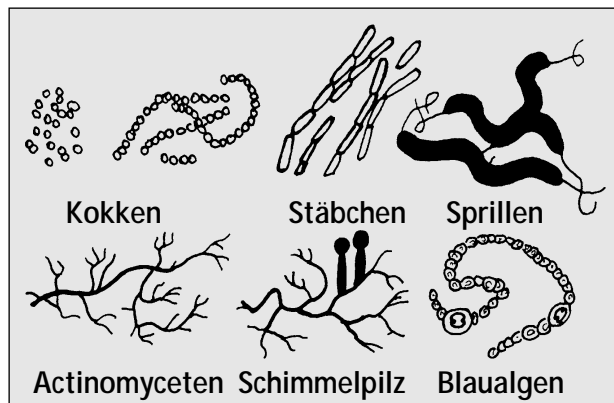
**Abb. 04:** Arbuskeln von Mykorrhiza, welche in die Wurzelzellen einwachsen. Die von der Pflanze bezogenen Kohlehydrate werden gegen Nährelemente aus dem Boden getauscht.

## 2.2 Einteilung und Kurzbeschreibung nach Grössenordnung

Die im Boden vorkommenden Lebewesen sind nach ihrer Grösse - ähnlich der Kornverteilung (Kap. 4) und Porengrösse (Kap. 6) der mineralischen Bodenmatrix, ihrem Lebensraum - in fünf Bereiche eingeteilt:

1. Mikroflora,  $\varnothing$  0,5 - 5  $\mu\text{m}$   
(= Ton-Feinschluff = feine Mittelporen)

Zahlen- und gewichtsmässig macht diese unsichtbare Fraktion des Bodenlebens den weit aus grössten Teil der Biomasse im Boden aus.



**Abb. 05:** Schematische Abbildung wichtiger Vertreter der sehr artenreichen Mikroflora des Bodens.

Die Mikroflora lebt stationär, meist in sog. Rasen, an der Oberfläche kleinster Bodenteilchen und in den Hohlräumen dazwischen. Oft verkittet sie feinste organische und mineralische Bestandteile durch gelartige Beläge. Diese wiederum bilden Nahrung für viele kleine Bodentiere. Mikroorganismen leben oft in Symbiose mit Pflanzenwurzeln, sind also in der Rhizosphäre entsprechend dicht angesiedelt.

Andere Mikroorganismen (z.B. Pilze) haben eine antibiotische bzw. wachstumshemmende Wirkung, welche durchaus erwünscht sein kann (z.B. Abtöten von Krankheitskeimen).

Bis auf wenige Ausnahmen sind diese Organismen auf eine durchlüftete, sauerstoffhaltige Umgebung angewiesen. Deshalb ist ihre Konzentration in oberflächennahen Bodenschichten am grössten.

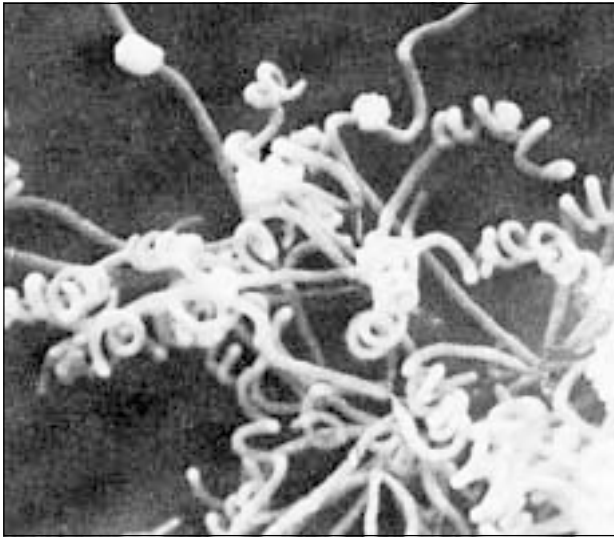


Abb. 06: Gewisse Mikroorganismen produzieren antibiotische Stoffe. Bekannt sind u.a. Penicillin und Streptomycin. Das Bild zeigt spiralförmige Sporenketten eines Streptomyceten (6000-fache Vergrößerung).

## Kap. 2

### 2. Mikrofauna, Ø 5 - 50 µm (= Schluff = grobe Mittelporen)

In diese Kategorie lassen sich grössere Organismen der Mikroflora wie Pilze und Algen, aber auch feinste Teile von Pflanzen (Wurzelhaare) sowie die Mikrofauna, wie tierische Einzeller (Protozoa), Wurzelfüssler (Rhizopoda), Wimpertierchen (Ciliata) und Sporentierchen (Sporozoa) einordnen. Sie leben teils fast stationär, teils treiben sie, mit geisselförmigen Fäden schlagend und rudernd (Flagellata) oder durch Flimmerbewegung der den Körper umgebenden Wimperhärchen (Ciliata) im Bodenwasser. Sie ernähren sich sowohl von gelösten organischen Stoffen und Detritus (Zelltrümmer, org. Schweb- und Sinkstoffe im Wasser), als auch von Bakterien, wodurch deren Vermehrung stimuliert wird.

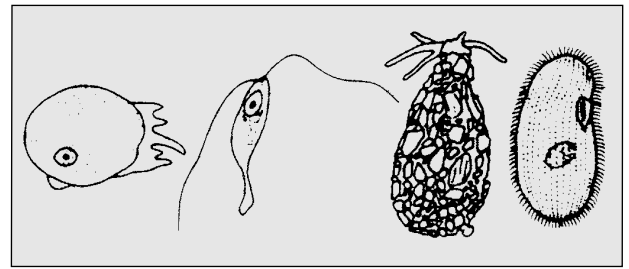


Abb. 07: V.l.n.r. Amöbe (Wurzelfüssler), Flagellate (Geisseltierchen), Testacea (Schalamöbe) und Ciliate (Wimpertierchen).

### 3. Mesofauna, Ø 50 - 2000 µm (= Sand = Grobporen)

In den Grobporen lebt die Mesofauna. Ihre bekannteren Vertreter können von blossen Auge noch knapp, unter der Lupe aber gut beobachtet werden. Es gibt beinlose Arten wie Fadenwürmer (Nematoden), aber auch viele Gliederfüssler wie Springschwänze (Collembolen), Urinsekten, Milben (Acarina) oder kleine Spinnen.

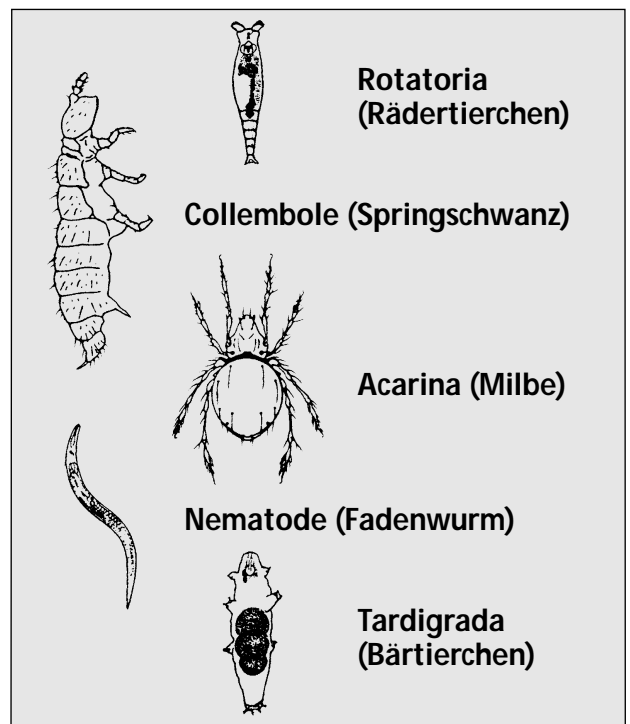


Abb. 08: Einige Beispiele aus der Mesofauna.

Collembolen sind auf den Abbau abgestorbener pflanzlicher Substanz spezialisiert, während Spinnen vor allem räuberisch leben. Milben wiederum kommen als saugende und nagende Schädlinge, aber auch als Nützlinge vor, welche Schädlinge bekämpfen. Oft sind sie ungewollt Opfer der chemischen Schädlingsbekämpfung.

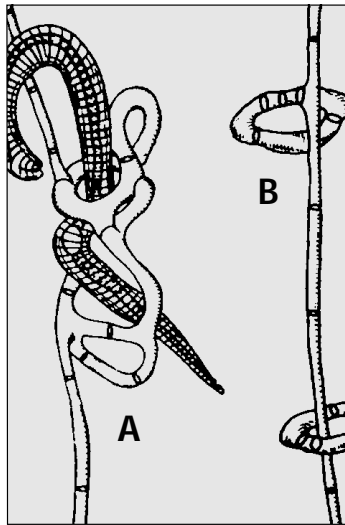


Abb. 09: Räuberpilze der Gattung Entomophthorales sind imstande, mittels spezieller Hyphen (B) kleine Bodentiere, im Bild ein Schädling (Nematode), zu fangen und zu verdauen (A).



Abb. 10: Eine Raubmilbe (unten) fällt eine Spinnmilbe (saugender Pflanzenschädling) an. Im schweizerischen Rebbau wurden die nützlichen Raubmilben als Folge der massiven chemischen Bekämpfung der Roten Spinne praktisch ausgerottet.

#### 4. Makrofauna, Ø 2 - 20 mm (= Feinkies = Risse und Wurmgänge)

Die Makrofauna umfasst viele im Boden lebende Insekten, Larven, Spinnen, Krebstiere (Asseln) und kleine Würmer (Enchiträen).

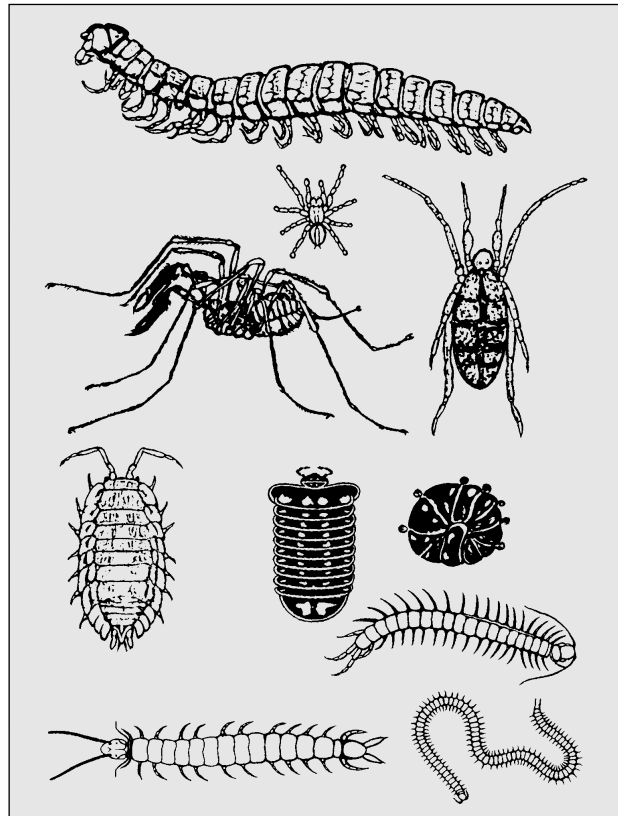
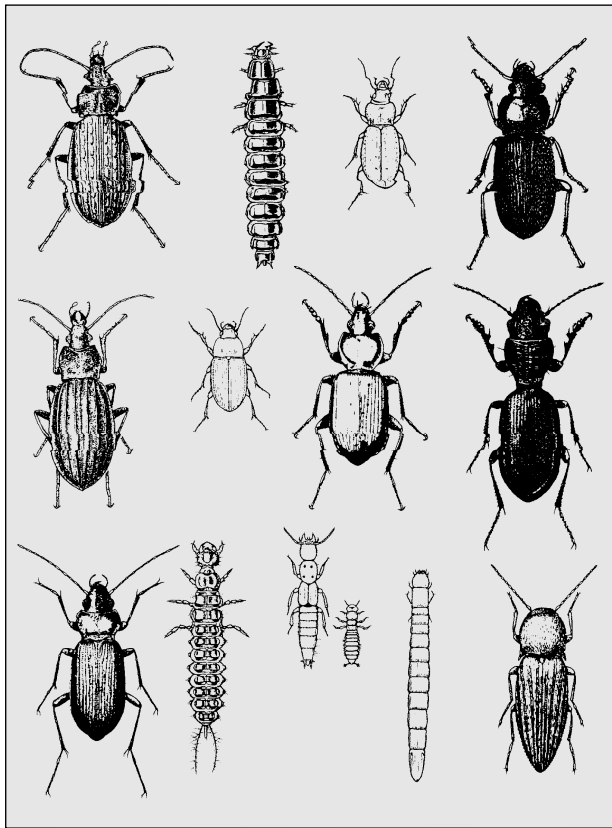


Abb. 11: Diese Abbildung zeigt die eher lichtscheuen Vertreter der Makrofauna, die kaum an der Bodenoberfläche angetroffen werden. Es sind verschiedene Formen von Insekten, Krebsen, Spinnen und Doppelfüßlern. Viele von ihnen leben räuberisch. Spinnen, Steinläufer, Ohrwürmer, Asseln und Saftkugler zerkleinern Streu und zersetzen Pflanzenreste.

An der Oberfläche lebende und jagende Vertreter der Makrofauna unterscheiden sich durch kräftige Pigmentierung und oft auffällige Färbung von ihren Verwandten im Boden. Eine bekannte Gruppe von Nützlingen bildet die grosse Familie der Laufkäfer; sie sind wichtige Indikatoren für die biologische Aktivität des Bodens.



## Kap. 2

Abb. 12: Laufkäfer mit Larven. Natürliche Grösse zwischen 7 und 33 mm.

### 5. Megafauna, $\varnothing > 20$ mm (= Steine = Schwundrisse, Klüfte)

Zur Megafauna zählen die grössten Bodentiere wie Regenwürmer, grosse Käfer und Schnecken sowie alle bodenbewohnenden Kleinsäuger (Mäuse, Maulwürfe).

## 2.3 Der Regenwurm

Der Regenwurm gilt als Schwerarbeiter unter den Bodentieren. Deshalb wird er etwas ausführlicher beschrieben. Darwin hat anhand von Ausgrabungen festgestellt, dass durch die Aktivität von Würmern innerhalb von 2000 Jahren eine Bodenschicht von über einem Meter angehäuft wurde. Beim Verdauen vermischt der Regenwurm organisches Material mit feinsten mineralischen Bodenbestandteilen zu stabilen Ton-Humuskomplexen und leistet so einen wichtigen Beitrag zur Bodenstrukturierung.

Regenwürmer sind zweigeschlechtige Tiere. Im Clitellium (= heller und ringartig verdickter Mittelteil bei den erwachsenen Tieren) wird ein Kokon ausgebildet und im Boden abgelegt. Daraus schlüpfen später die fertigen Regenwürmchen.

Die etwa 50 Regenwurmartensorten, die bei uns vorkommen, werden nach ihrer Lebensart in drei Gruppen eingeteilt.

### Epigäische Arten

(z.B. *Dendrobaena*, *Eiseniella*, *Eisenia foetida*)

Sie leben in der wenig zersetzten Streuschicht, im Kompost und im Mist. Sie sind eher klein und schlank, sehr lebendig, von rötlicher oder oranger Färbung. Diese Würmer können gut in Massen gezüchtet werden.

### Endogene Arten

(z.B. *Allolobophora*, *Octolasion*, *Nicodrilus* im Jugendstadium)

Diese leben vorwiegend im Oberboden und kommen selten an die Oberfläche. Sie graben sich fressend kreuz und quer durch den Boden. Beim Pflügen werden sie oft massenhaft an die Oberfläche gebracht. Auch senkrecht grabende Arten, wie *Lumbricus*, verbringen ihr Jugendstadium z.T. als endogene Formen.



## Senkrecht grabende Arten

(vor allem *Lumbricus*- und *Nicodrilus*arten)

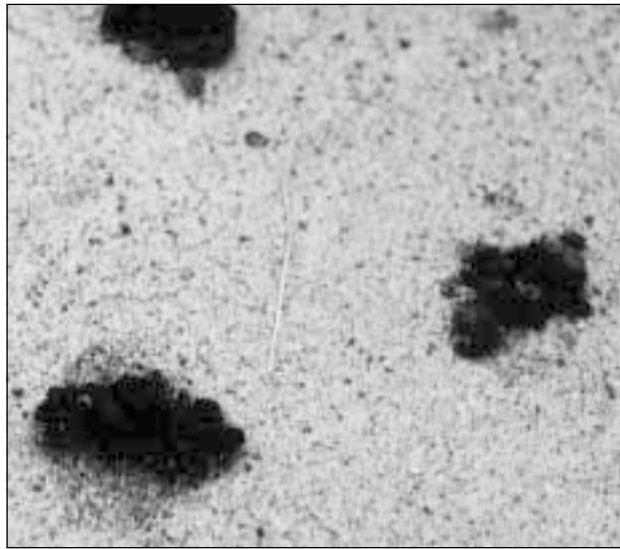
Grosse, kräftig pigmentierte Würmer. Sie leben in einer senkrecht angelegten Röhre, welche bis sehr tief in den Unterboden reichen kann. Diese Tiere zeichnen sich dadurch aus, dass sie ihre Nahrung (meist nachts) an der Bodenoberfläche holen und in ihre Wurmhöhle einziehen.



**Abb. 13:** Regenwurm beim Einziehen von Strohhalmen (Aufnahme im Schaukasten).

Dort werden die zähen, faserigen Pflanzenteile zuerst durch Mikroorganismen vorverdaut und dann vom Regenwurm im teils zersetzten Stadium gefressen und verdaut. Die organische Substanz wird mit der mitgefressenen Feinerde intensiv vermischt und als Wurmhäufchen ausgeschieden.

Regenwürmer leisten damit unter allen Bodentieren den wichtigsten Beitrag, sowohl bei der Neubildung als auch bei der Durchlüftung und Entwässerung des Bodens. Ihre Röhren bilden nährstoffreiche Pfade für Pflanzenwurzeln. Wurmbestände können vor allem durch Verzicht auf den Einsatz von ätzender Gülle und Herbiziden, durch das Belassen der Erntereste auf dem Feld sowie durch die pfluglose Feldbearbeitung (Direktsaat) geschützt und gefördert werden.



**Abb. 14:** Einige Tage nach einem Unwetter (24./25. August 1987 bei Seedorf/UR) haben sich einige Würmer durch einen Meter Schwemmsand an die Oberfläche emporgearbeitet (dunkle Wurmhäufchen).

Würmer sind vor allem in den feuchten, kühleren Frühjahrs- und Herbstmonaten aktiv. In der trockenen Sommerperiode graben sie sich tief in den feuchten Unterboden ein. In diesem Stadium können ihnen Eingriffe durch die Bewirtschaftung weniger anhaben.

## 3. Bodentyp

Bodenbildende Faktoren wie Ausgangsmaterial, Geländeform, Klima und Vegetation, dazu die Nutzung des Bodens durch den Menschen, haben zu einer Vielfalt von Böden geführt, welche die dünne, belebte Übergangsschicht zwischen dem mineralischen Teil des Erdkörpers (Fels oder Lockersediment) und der umgebenden Luftschicht bilden.

Wenn in einem Bericht beispielsweise von Parabraunerde, Kalkbraunerde oder Podsol die Rede ist, so handelt es sich um den Bodentyp. Die Bezeichnungen Sandboden oder Lehm erfassen demgegenüber die Bodenarten (s. folgendes Kapitel). Der Bodentyp wird also weitgehend durch die Bodenentstehung, die Bodenart und durch das Ausgangsmaterial geprägt.

In unseren klimatischen Verhältnissen spielt der Wasserhaushalt (I. Stufe) für die Bodenentwicklung die entscheidende Rolle. Zu seiner Charakterisierung wird oft die Wasserleitfähigkeit herangezogen. Er bildet deshalb die erste von sieben Stufen zur Klassifikation der Böden der Schweiz. Weitere Stufen werden durch das Ausgangsmaterial (II. Stufe), die chemisch-mineralischen Komponenten (III. Stufe), die Substanzverlagerung (IV. Stufe) und die Ausprägung der Profilmerkmale (V. Stufe) bestimmt. Die Bestimmung führt schliesslich über die VI. Stufe, welche die für den Pflanzenwuchs wichtigen Qualitäten wie durchwurzelbare Tiefe, Wasserspeichervermögen und Nährstoffzustand enthält, zur VII. Stufe, in welcher Standortfaktoren wie Lage, Vegetation und Nutzung berücksichtigt sind.

Die Wasserleitfähigkeit eines Bodens wird mit dem  $k$ -Wert angegeben (s. Abb. 15 und Kap. 8).

$k$ -Wert	Sicker- geschwindigkeit	Wasser- haushalt
$10^{-1}$ cm/sec	3600 mm/h	extrem durchlässig
$10^{-2}$ cm/sec	360 mm/h	
$10^{-3}$ cm/sec	36 mm/h	
$10^{-4}$ cm/sec	3,6 mm/h	staufeucht
$10^{-5}$ cm/sec	0,36 mm/h	
$10^{-6}$ cm/sec	0,036 mm/h	staunass
$10^{-7}$ cm/sec	0,0036 mm/h	
$10^{-8}$ cm/sec	0,00036 mm/h	versumpft

Abb. 15: Tabellarische Gegenüberstellung von  $k$ -Wert, Sicker-  
geschwindigkeit und Wasserhaushalt.

### 3.1 Durchlässige Böden

Als durchlässig (perkoliert) werden Böden bezeichnet, deren Wasserdurchlässigkeit mehr als 100 mm pro Tag, d.h. mehr als  $k = 10^{-4}$  cm/sec, beträgt. Durchlässige Böden zeichnen sich im Profil meist durch eine gleichmässige braune bis gelbliche Farbe aus. Auch wenn die Bodenhorizonte ("Schichten") verschieden gefärbt sind, fehlen Rostflecken oder Graufärbungen.

#### Braunerden

sind gelblich bis braungefärbt. Diese Farbtöne stammen vom oxidierten Eisen. Oxidation ist nur unter Anwesenheit von Sauerstoff möglich. Braunerden sind deshalb immer gut durchlüftete, meist tiefgründige Böden. Braunerden sind in den gemässigten Klimazonen unseres Mittellandes und der Voralpen weit verbreitet und gehören zu den fruchtbaren Ackerböden.

#### Regosole (Rohböden)

sind weniger weit entwickelt als Braunerden. Sie sind eher flachgründig. Der humushaltige Oberboden (A-Horizont) ist farblich klar vom unverwitterten Ausgangsmaterial (C-Horizont) abgesetzt. Eine Übergangs- oder Verwitterungsschicht in Form von Unterboden (B-Horizont) fehlt. Deshalb wird dieser Bodentyp auch als A/C-Boden bezeichnet.

### *Parabraunerden*

unterscheiden sich von den Braunerden dadurch, dass Tonteile in tiefere Bodenschichten abgeschwemmt und dort angereichert werden.

### *Podsole*

sind saure, stark durchwaschene Böden, welche kaum Nährstoffe fixieren; sie sind deshalb extrem nährstoffarm. Podsole finden sich vor allem auf Silikatgestein (z.B. Granit und Gneis) in den Nadelwäldern der Alpen.

## 3.2 Staunasse Böden

Staunasse bzw. ungenügend durchlässige Böden zeichnen sich durch gehemmte bis geringe Wasserdurchlässigkeiten aus. Bei ersteren kann eine fleckige Färbung auf die leicht gehemmte Sickerung hinweisen, während letztere in niederschlagsreichen Gebieten bis nahe zur Oberfläche dauernd wassergesättigt bleiben. Der Stauwasserhorizont befindet sich im Wurzelbereich des Bodenprofils.

### *Pseudogleye*

sind staunasse Böden, welche infolge dichter Lagerung oder feiner Körnung zeitweise durch Sickerwasser vernässt sind. Die Zone der wechselnden Nässe kann im Profil anhand typischer Gleyflecken (Rostflecken) und schwarzer Mangankonkretionen erkannt werden. Pseudogleye sind in niederschlagsreichen Gebieten häufig anzutreffen. Sie können kaum oder nur sehr eingeschränkt landwirtschaftlich genutzt werden.

## 3.3 Grundnasse Böden

Sie werden auch als fremdnasse oder hydromorphe Böden bezeichnet und stehen periodisch oder dauernd unter Fremdwasserzufluss. Dieser kann lateral am Hang (Hanggley) oder durch Grundwasseraufstieg in der Ebene erfolgen.

### *Gleye*

sind Böden, die durch Hangwasser oder Grundwasser vernässt werden. Weil dieses Wasser meist Kalk mitführt, versauert Gleyboden (im Gegensatz zum Pseudogley) in der Regel nicht. Der Oberboden ist oft dunkel gefärbt (anmoorig), während der überstaute Untergrund infolge der Reduktion des Eisens grauschwarze, graugrüne bis bläuliche Farbtöne aufweist.

Gleyböden sind dadurch, dass sie sich in einem Zustand dauernder Wassersättigung befinden, sehr wenig belastbar. Düngstoffe werden im gesättigten Milieu sehr rasch transportiert und können so das Grundwasser gefährden. Eine intensive Nutzung dieser Böden ist deshalb immer problematisch.

## 3.4 Überflutete Böden

### *Auenböden*

sind auf wenige flussnahe Gebiete beschränkt, die von unkorrigierten Gewässern periodisch überflutet werden. Ausserhalb von Wäldern sind ursprüngliche, d.h. unberührte Auenböden nur noch selten anzutreffen. In Auenböden ist das durch die Überflutung angeschwemmte Material als einzelne Schichten im Profil erkennbar.

### 3.5 Organische Nassböden

#### *Moorböden*

sind zwar schwarzgefärbt, aber nicht mit Schwarzerden zu verwechseln, welche in der Schweiz nicht vorkommen. Die dunkle Farbe der Moorböden stammt von den Huminstoffen. Im eingestauten Wasser können die anfallenden Pflanzenreste nicht abgebaut werden, was zur sog. Vertorfung führt. Im sauerstoffarmen, sauren Milieu werden Pflanzenteile und ganze Bäume oft über Jahrhunderte konserviert. Naturbelassene Flachmoore und Hochmoore kommen bei uns nur noch selten vor.

Werden Moorböden entwässert, so sind sie leicht bearbeitbar und werden in bevorzugten Lagen meist intensiv genutzt (Gemüsebau). Durch die Entwässerung und die damit verbundene Luftzufuhr beginnt sich die organische Masse aber rasch abzubauen. Unerwünschte Folgen dieses Prozesses sind u.a. die Torfsackungen und die Freisetzung grosser Mengen von Nitrat.

## 4. Bodenart

Bei der Bezeichnung von Boden als Material, wie etwa sandiger Lehm oder mässig schluffiger, lehmiger Ton, handelt es sich um die Bodenart. Diese wird durch die prozentualen Anteile an Ton, Schluff und Sand, d.h. die Korngrößenverteilung oder Textur der mineralischen Feinerde, bestimmt. Unter Feinerde versteht man die Gesamtheit der Bodenpartikel mit einem Durchmesser von  $\leq 2$  mm. Alle mineralischen Bodenbestandteile mit einem Durchmesser von  $> 2$  mm werden als Bodenskelett bezeichnet (= Fein- und Grobkieles, Steine, Blöcke). Die Bodenart prägt die fühlbaren Eigenschaften eines Bodens.

Zur Bezeichnung der Bodenart anhand der Korngrößenverteilung in der Feinerde wird das sog. Körnungsdreieck verwendet. Die Fraktionen

<b>Ton (T)</b>	(Korn- $\emptyset < 0,002$ mm)
<b>Schluff (U)</b>	(Korn- $\emptyset 0,002 - 0,05$ mm)
<b>und Sand (S)</b>	(Korn- $\emptyset 0,05 - 2$ mm)

sind darauf im Raster aufgetragen. In diesen Raster werden die im Labor gemessenen oder mit der Fühlprobe geschätzten Gehalte der einzelnen Fraktionen eingetragen.

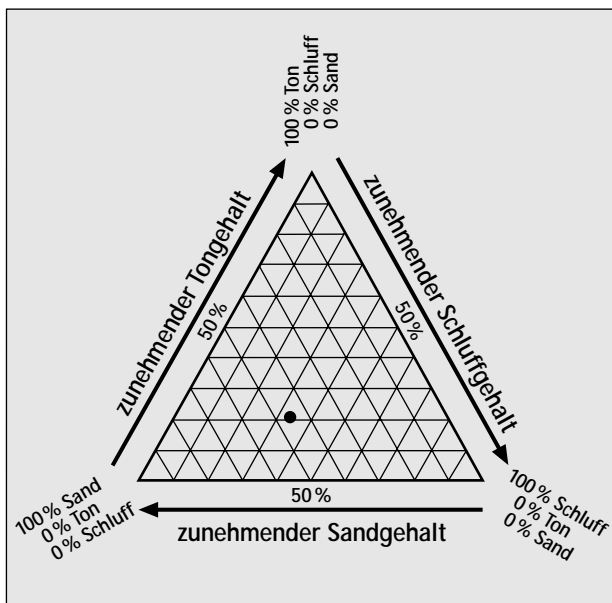
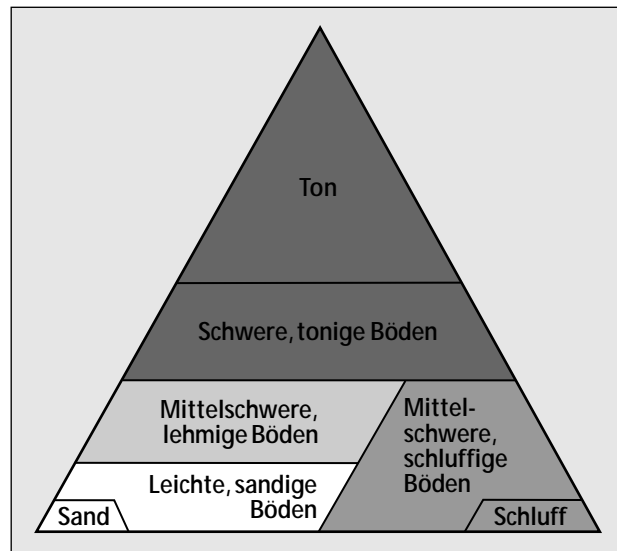


Abb. 16: Körnungsdreieck (3). Der Schnittpunkt der drei aufgetragenen Gehalte in % führt zur korrekten Bezeichnung der Bodenart. Im vorliegenden Beispiel (•) handelt es sich um einen mittelschweren, lehmigen Boden. Korrekte Bezeichnung: Mässig schluffiger Lehm.

### Vereinfachte Unterteilung der Bodenart im Körnungsdreieck



### Exakte Benennung der Bodenart:

	Ton %	Schluff %
<b>Schwere, tonige Böden</b>		
Ton-Boden	> 50	< 50
lehmiger Ton	50 - 40	< 50
toniger Lehm	40 - 30	< 50
toniger Schluff	50 - 30	> 50
<b>Mittelschwere, schluffige Böden</b>		
lehmiger Schluff	30 - 10	> 50
sandiger Schluff	< 10	50 - 70
Schluffboden	< 10	> 70
<b>Mittelschwere, lehmige Böden</b>		
Lehm	30 - 20	< 50
sandiger Lehm	20 - 15	< 50
<b>Leichte, sandige Böden</b>		
lehmreicher Sand	15 - 10	< 50
lehmiger Sand	10 - 05	< 50
schluffiger Sand	10 - 05	15 - 50
Sand-Boden	< 05	< 15
<b>Je nach Schluffanteil wird weiter unterteilt:</b>		
schwach schluffig		< 15
mässig schluffig		15 - 35
stark schluffig		35 - 50

Abb. 17: Dieses Schema erlaubt die korrekte, vereinfachte Bezeichnung der Bodenart anhand der Korngrößenverteilung.

## 4.1 Ton (T)

Unter Ton im bodenkundlichen Sinne versteht man die feinste mineralische Kornfraktion im Boden. Sein Korndurchmesser liegt unter  $2\ \mu\text{m}$ , d.h. unter  $0,002\ \text{mm}$ . Diese Definition ist nicht zu verwechseln mit den geologisch-mineralogischen Begriffen "Ton/Tone", welche entweder Tonminerale oder Tonsteine umschreiben. Ton im Boden hat die Eigenschaft, in Verbindung mit Wasser aufzuquellen und bei Trockenheit wieder zu schrumpfen (Schwundrisse). Zudem kann Ton aufgrund seiner grossen spezifischen Oberfläche Ionen verschiedener Elemente festhalten und austauschen. Ton wird in der Bodenlösung verlagert. Dies zeigt sich an Tonhüllen um Steine und an Bruchflächen der Bodenaggregate in tieferen Bodenschichten (typisches Merkmal der Parabraunerde).



Abb. 18: Ein Tonteilchen unter dem Rasterelektronenmikroskop. Die Seitenlänge des Bildes entspricht ca.  $1/1000\ \text{mm}$ . Die Plättchenstruktur ist klar erkennbar.

Ton ist ein sehr wichtiger Bodenbestandteil. Mit abgebauter organischer Substanz bildet er sog. Ton-Humuskomplexe (Krümel), welche für die Pflanzenernährung und für die Strukturstabilität eine grosse Rolle spielen. Durch sein Quell- und Schrumpfvermögen trägt der Ton zur natürlichen Bodenlockerung und Durchlüftung bei. Wurzeln suchen vorzugsweise in diesen Schwundrissen den Weg in grössere Tiefen. Trotz scheinbar dichter Lagerung sind Tonböden deshalb auch in der Tiefe noch biologisch aktiv und durchlüftet.

Ein zu hoher Tongehalt erschwert die Bearbeitbarkeit und Nutzung des Bodens. Tonboden verhärtet beim Abtrocknen rasch zu fast unzerbrechlichen Schollen. Mit zunehmender mechanischer Bodenbearbeitung, vor allem mit Maschinen, welche die Schollen zerschneiden oder zertrümmern, wird diese negative Tendenz noch verstärkt. Wirksam ist hingegen die biologische Erschliessung und die Förderung des Humushaushalts.



Abb. 19: Grobe, harte Schollen eines gepflügten Tonbodens werden der sog. Wintergare (Zerkleinerung durch Frosteinwirkung) überlassen.

## Mechanische Eigenschaften

Trockener Tonboden ist extrem hart und tragfähig. Mit zunehmender Feuchte wird Tonboden plastisch verformbar und reagiert sehr empfindlich auf mechanische Einwirkungen (verdichtungsanfällig).

### Fühlprobe

Im nassen Zustand fühlt sich Ton klebrig an. Im erdfeuchten Zustand ist Ton plastisch verformbar. Je kleiner der Rückstand auf den Handflächen, um so höher der Tongehalt.

### Ausrollprobe

Lässt sich die feuchte Probe, ohne auseinanderzubrechen, in Stränge von  $\leq 2$  mm  $\varnothing$  ausrollen, so ist der Tongehalt grösser als 30 %. Im trockenen Zustand ist der Tongehalt von Böden schwieriger abzuschätzen. Stark tonhaltige Bodenaggregate sind trocken schwer brechbar.

### Fingernagelprobe

Eine glatte und glänzende Strichfläche weist auf hohen Tongehalt ( $> 40$  %) hin.

## 4.2 Schluff (U)

Schluff ist ebenfalls ein sehr feiner Bestandteil des Bodens. Sein Korndurchmesser bewegt sich zwischen 2 und 50  $\mu\text{m}$  bzw. 0,002 und 0,05 mm. Lössböden beispielsweise enthalten in der Regel viel Schluff, da sie durch den Wind, d.h. aeolisch, abgelagert wurden. Bekannte Lössgebiete sind das Möhlinerfeld und die Wallbacher Höhe (AG). Auch Lockersedimente können schluffreich sein (St. Galler Rheintal).

Dem Schluff fehlen die physikalischen und chemischen Eigenschaften (Schrumpf- und Quellvermögen, Ionentauscher) von Ton weitgehend.

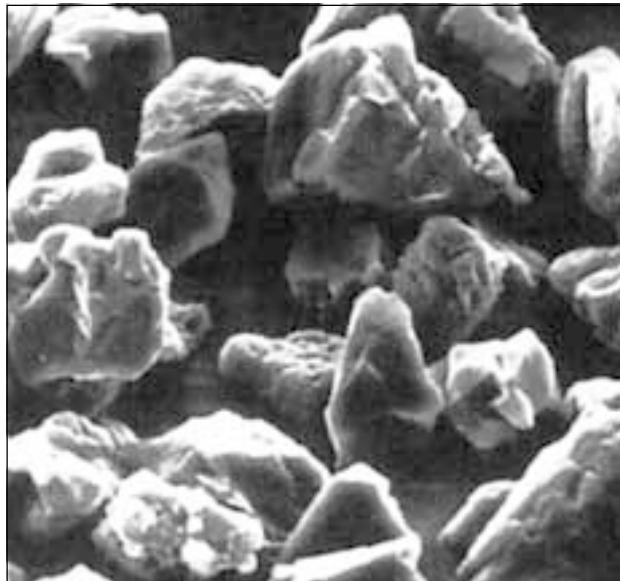
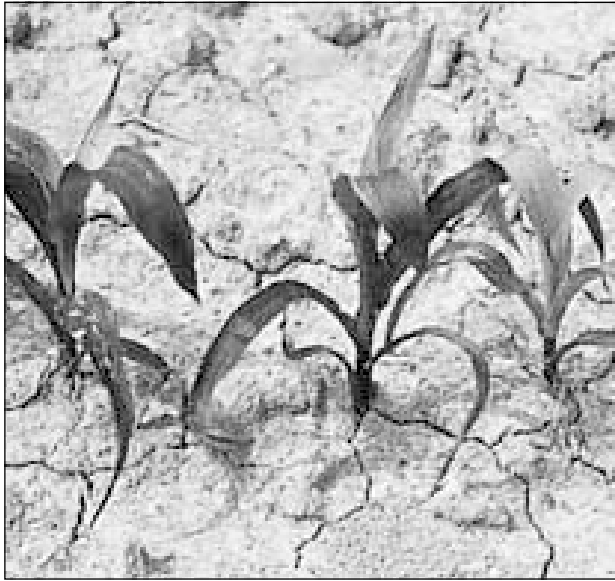


Abb. 20: Schluffkörner unter dem Mikroskop im Auflicht. Seitenlänge des Bildausschnittes ca. 1/10 mm.

## Mechanische Eigenschaften

Im gewachsenen Zustand sind Schluffböden relativ standfest und gut durchlässig. Auf das Befahren in nassem Zustand reagieren sie empfindlich. Schluffreiche Böden sind erosionsanfällig, sobald sie umgelagert oder freigelegt werden. Oft sind die schluffreichen Böden relativ humus- und tonarm. Die fehlende Strukturstabilität muss durch eine ausreichende biologische Verbauung (Dauerbegrünung und Durchwurzelung) wettgemacht werden. Die Bodenbearbeitung ist auf ein Minimum zu reduzieren.



*Abb. 21: Lössboden. Teilbrache im Mais, stark verschlämmt. Bei geringer Hangneigung besteht starke Erosionstendenz.*

### *Fühlprobe*

In nassem Zustand fühlt sich Schluff glitschig-seifig an. In erdfeuchtem Zustand ist Schluff nur beschränkt plastisch verformbar. Auf den Handflächen ist er schmierend.

### *Ausrollprobe*

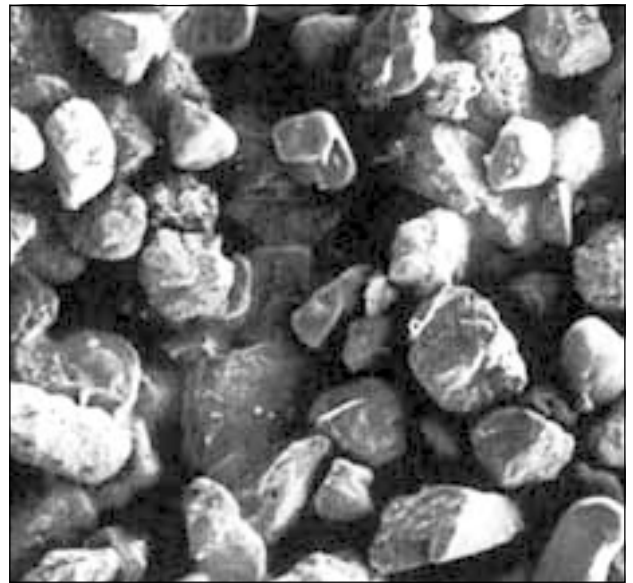
Feuchter Schluff kann zu einer Kugel von 2 bis 5 mm Ø ausgerollt werden, die bei leichtem Druck zerfällt. Im trockenen Zustand ist Schluff samtig-weich (wie Weissmehl) anzufühlen. Die schluffhaltigen Bodenaggregate sind relativ leicht zu brechen.

### *Fingernagelprobe*

Die Strichfläche ist glatt bis rissig, nicht aber körnig.

## 4.3 Sand (S)

Sand ist die grösste mineralische Kornfraktion der Feinerde (Ø 0,05 - 2 mm). Sandige Böden sind locker und durchlässig, aber wenig stabil und schwach strukturiert. Dank der Grösse der einzelnen Körner ist Sandboden auch bei grosser Belastung nicht erstickungsgefährdet, da die Zwischenräume (Grobporen) kaum beeinträchtigt werden. Sandboden trocknet auch nach relativ starker mechanischer Beanspruchung rasch ab und ist deshalb, trotz negativer Eigenschaften (Bewässerung, Nährstoffauswaschung), besonders für den Frühgemüseanbau sehr beliebt.



*Abb. 22: Sand (Gemisch verschiedener Mineralien). Die Seitenlänge der Abbildung entspricht ca. 1 cm.*



## Mechanische Eigenschaften

Sandböden sind gegenüber tiefbaulichen Eingriffen und Umlagerungsvorgängen wenig empfindlich. Die mechanische Auflockerung (Tiefenlockerung) verdichteter Sandböden ist nur kurzfristig wirksam, wenn der Tonanteil unter 12 - 15 % liegt. Deshalb ist die Tieflocke- rung nur in Verbindung mit einer stabilisie- renden Begrünung sinnvoll.



*Abb. 23: Sandboden (alluvial) im unbearbeiteten Zustand. Die einzelnen, durch Ablagerungsvorgänge entstandenen Schichten gröberen und feineren Sandes sind deutlich unterscheidbar.*

## Fühlprobe

In nassem und trockenem Zustand fühlt sich Sand in der Regel rau an. Ein hoher Sandanteil im Boden bewirkt, dass die Bindung nur lose ist und wenige bis keine Aggregate feststellbar sind.

Im erdfeuchten Zustand kann mit den Fingern die grobe Schlufffraktion von der feineren Sandfraktion kaum unterschieden werden.

Tip: Sand mit  $\varnothing > 0,05$  mm knirscht ganz deutlich zwischen den Zähnen.

## Ausrollprobe

Kann die feuchte Probe nicht mehr zu einer Kugel von ca. 10 mm  $\varnothing$  ausgerollt werden, so beträgt der Tonanteil weniger als 10 %. Die Kugel zerfällt auch ohne Druck rasch.

## Fingernagelprobe

Die Strichfläche ist, je nach Sandanteil, mehr oder weniger rau und körnig, der Strich ist immer matt.

## 5. Bodenstruktur

Die verschiedenen Korngrößen (Sand, Schluff und Ton) der mineralischen Feinerde sind in jedem Boden in bestimmter Art angeordnet und unterschiedlich stark zusammengefügt. Die Struktur wird immer von den Bodenbildungsfaktoren, vor allem von Ablagerungsart, Klima, Wasserhaushalt und Chemismus, mitgeprägt.

Der Begriff der "Bodenstruktur" bezieht sich also immer nur auf die Verwitterungstiefe (Profiltiefe), nie aber auf das unverwitterte Ausgangsmaterial (C-Horizont).

### 5.1 Primärstruktur (= Struktur im engeren Sinne)

Jeder Boden weist eine für ihn typische Struktur (Primärstruktur) auf. Sie ist vor allem im unbearbeiteten Horizont des Bodens anzutreffen. Wir unterscheiden:

- **geteilte Strukturen:** aggregierend und segregierend
- **massive Strukturen:** kohärente, verkittete Formen
- **lose Strukturen:** Einzelkorn, lose (ungefügt)

#### Kap. 5

#### Geteilte Strukturen

##### Prismenstruktur

Durch Schwundrisse werden die scharfkantigen, klar abgegrenzten Aggregate immer neu gebildet.



Abb. 24: Die Prismenstruktur, typisch für tonige Böden.

##### Polyeder- und Säulenstruktur

bilden weitere Variationen segregierter, d.h. durch Teilung entstandener Gefüge. Die Polyederstruktur lässt sich von der Prismenstruktur kaum abgrenzen, die Säulenstruktur ist selten.

##### Plattenstruktur

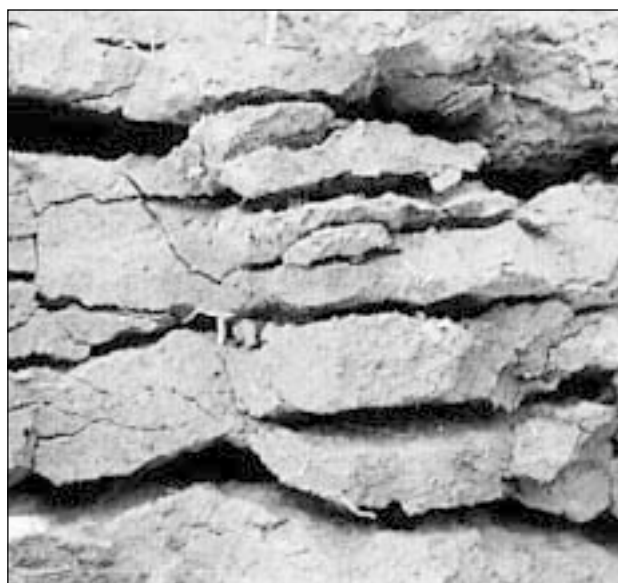


Abb. 25: Vor allem schluffige Böden zeigen oft plattige, horizontalrissige Strukturen.

## Massive, kohärente Strukturen

Kohärentgefüge unterscheiden sich vom losen Einzelkorngefüge dadurch, dass die einzelnen Feinteile (v.a. Sand und Schluff) mehr oder weniger stark miteinander verkittet sind und blockig aufbrechen. Dichtgelagerte Kohärentgefüge können z.T. von Wurzeln nicht erschlossen werden (s. negative Formen, S. 59).

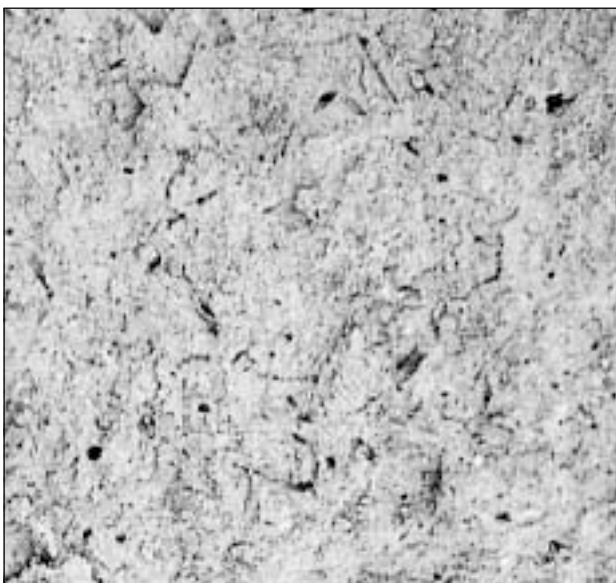


Abb. 26: Bei günstiger Körnung und Lagerung kann das Kohärentgefüge biologisch aktiv und sehr fruchtbar sein (Lössgebiete).

## Lose Einzelkornstruktur

Die lose Einzelkornstruktur ist vor allem in leichten, ton- und humusarmen Sandböden anzutreffen.



Abb. 27: Einzelkörner, lose.

## 5.2 Sekundärstruktur (= Gefüge)

Durch Pflanzenwurzeln und Bodentiere, Bodenbearbeitung und Umsetzung organischen Materials zu Humus sowie durch die Ton-Humuskomplexbildung (Krümelbildung) entsteht in der oberen Bodenschicht eine mehr oder weniger ausgeprägte Sekundärstruktur (Gefüge), die je nach Entwicklung positiven oder negativen Einfluss auf den Boden als Pflanzenstandort ausübt und so seine Fruchtbarkeit mitbestimmt.

### Reine Gefügeformen

Eine gute Struktur resp. ein gutes Gefüge verbessert die Durchlässigkeit des Bodens für Luft, was u.a. zu einer raschen Erwärmung des Bodens und zu einem besseren Wasser- und Nährstofftransport führt. Eine gesunde Struktur bietet zudem Nischen und Lebensraum für Bodentiere. Im losen Gefüge können sich Pflanzenwurzeln besser entwickeln. Die Bearbeitung ist leichter. Je feiner ein Boden strukturiert ist, um so grösser ist seine innere Oberfläche und damit seine Filterwirkung.

### Krümelfüge

Diese ideale Gefügestufe leichter und mittelschwerer Böden besteht aus runden Aggregaten von 2 - 5 mm Durchmesser.



Abb. 28: Krümelfüge

### Polyedergefüge

Polyeder weisen kantige Formen und glatte Bruchflächen auf. Dies ist die typische Gefügestufe tonreicher Böden. Sie entsteht durch Quellen und Schrumpfen. Feine Polyeder in tonreichen Böden sind Zeichen guter Struktur und erhalten eine gute Gefügestufe.



Abb. 29: Polyedergefüge

### Mischgefüge

Die intensive ackerbauliche Nutzung verändert die Struktur in ein Gemisch aus Krümel, Bröckeln und Fragmenten, das sich von Jahr zu Jahr und von Parzelle zu Parzelle ändert.



Abb. 30: Mischgefüge mit Krümeln enthalten viele Bioporen und sind als gute Gefügestufe einzustufen.



**Abb. 31:** Mischgefüge mit größeren Bröckeln haben weniger Bioporen und damit eine generell schlechtere Porenverteilung. Bröckel entstehen durch mechanische Einwirkung und durch Bearbeiten zu feuchten Bodens. Diese Gefügeform ist nur noch befriedigend.

### Negative Formen

Die durch mechanische Bearbeitung (Zertrümmern, Schneiden) erreichte «Feintrümmerstruktur» ist negativ zu bewerten und der Bodenfruchtbarkeit abträglich. Sie provoziert Verschlammung, Verkrustung, Erosion und Verlagerungsverdichtung. Feintrümmer besitzen keine Humushüllen!

#### Mischgefüge mit Fragmenten

Solche Gefüge von unterschiedlicher, heterogener Größe und Form (Trümmer) enthalten kaum Bioporen. Die Hohlräume sind unregelmäßig verteilt. Dies ist eine schlechte Gefügeform, charakterisiert durch das Fehlen der Humushülle und die typische, lose-bröselige Beschaffenheit der Aggregate. Kantige Formen werden oft als pseudo-polyedrisch eingestuft.

### Trümmergefüge

Die einzelnen Trümmer sind hart und dicht und infolge Porenmangels im Inneren biologisch kaum erschliessbar. Der Bearbeitungsaufwand nimmt mit der Verschlechterung der Bodenstruktur zu.



**Abb. 32:** Trümmerformen entstehen oft durch maschinelle Zerkleinerung zu nasser Böden.

### Spezialgefüge

Sie umfassen die ungegliederten Formen der Einzelkornstruktur. Die massive Kohärenzstruktur liegt als Trümmerstruktur vor.

#### Einzelkorngefüge

Sie bilden vor allem in humusarmen Sandböden die bestmögliche Form. Der Boden rieselt lose, ohne grössere Aggregate, oft auch noch im leicht feuchten Zustand (abhängig von der Korngröße).

## 6. Bodendichte und Porenvolumen

Ebenso wichtig wie die festen Bodenteilchen (Bodensubstanz) sind die Hohlräume dazwischen. Sie werden in ihrer Gesamtheit als Porensystem des Bodens bezeichnet.

In Abhängigkeit von der Bodenart nimmt das Substanzvolumen mit zunehmender Korngröße zu, das Gesamtporenvolumen hingegen ab.

### Substanzvolumen

Sand  $\geq$  Lehm  $\geq$  Schluff  $\geq$  Ton

### Gesamtporenvolumen

Ton  $\geq$  Schluff  $\geq$  Lehm  $\geq$  Sand

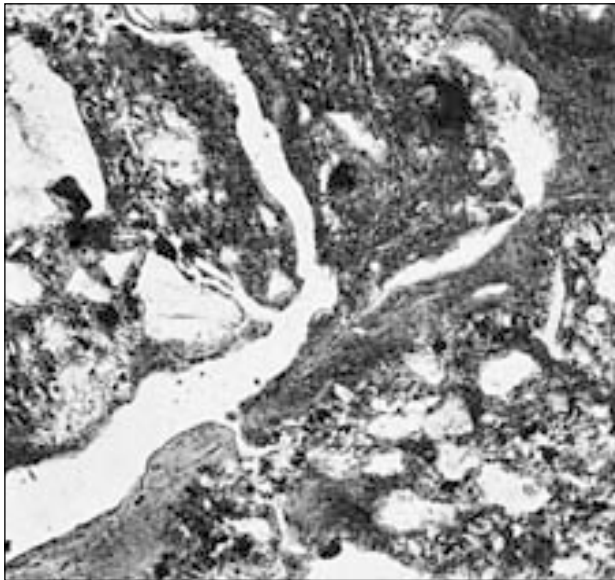


Abb. 33: Schnitt durch einen Krümel (Dünnschliff) im Durchlicht unter dem Mikroskop (Bildlänge ca. 1 mm). Die Hohlräume (Poren) treten weiss deutlich hervor.

### Kap. 6

Im unbearbeiteten Bereich des Bodens, etwa 25 - 30 cm unter der Oberfläche, beträgt das gesamte Porenvolumen zwischen 35 % (dichtgelagerte, humusarme Mineralböden) bis über 80 % (Torfe) des Bodenvolumens. Bewirtschaftungsschäden (Pflugsohlen, Druckschäden von Erntemaschinen) und tiefbauartige Eingriffe können Porenvolumen und -verteilung stark beeinflussen. Ein gesunder Boden besteht zu über 50 % aus Hohlräumen.

### 6.1 Scheinbare und reelle Dichte

Wird mit einem Stechzylinder bekannten Volumens dem Boden eine sog. ungestörte Probe entnommen, im Ofen getrocknet und gewogen, so erhält man die scheinbare Dichte ( $D_s$ ) oder Lagerungsdichte als Raumgewicht (vgl. Kap. 8.3). Die scheinbare Dichte ist abhängig vom Hohlraumgehalt (Porenvolumen) eines Bodens. Sie nimmt mit der Tiefe in der Regel zu.

Die reelle Dichte ( $D_r$ ) ist das spezifische Gewicht der festen Bodensubstanz. Die reelle Dichte eines Bodens ist also abhängig von der mineralischen Zusammensetzung und vom Anteil organischer Substanz innerhalb der festen Substanz.

Die Dichte ( $D_s$  und  $D_r$ ) wird in  $\text{g/cm}^3$  oder in  $\text{Mg/m}^3$  (Megagramm pro Kubikmeter) ausgedrückt und liegt innerhalb folgender Bereiche:

#### Scheinbare Dichte/Lagerungsdichte/Raumgewicht ( $D_s$ )

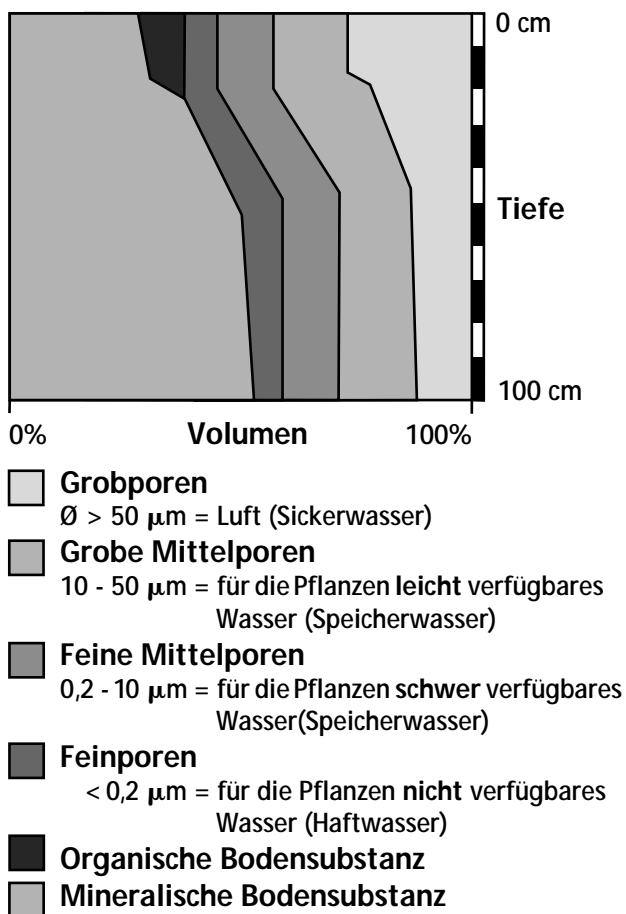
mineralische Böden	1.10 - 1.80 $\text{Mg/m}^3$
häufiger Bereich	1.30 - 1.50 $\text{Mg/m}^3$
rein organische Moorböden	ca. 0.15 $\text{Mg/m}^3$

#### Reelle Dichte/spezifisches Gewicht ( $D_r$ )

mineralische Böden	2.60 - 2.75 $\text{Mg/m}^3$
schwach bis mässig humose Böden	2.40 - 2.65 $\text{Mg/m}^3$
Quarz	2.65 $\text{Mg/m}^3$
humifizierte organische Substanz	ca. 1.40 $\text{Mg/m}^3$
unzersetztes Material (Moorböden)	< 1.00 $\text{Mg/m}^3$

## 6.2 Poren (Hohlräume) und ihre Verteilung im Bodenkörper

Jeder Boden hat das aufgrund seines Typs (Entstehung), seiner Textur (Korngrößenverteilung) und seiner Struktur (Gefüge) eigene Porenvolumen und die zugehörige Porenverteilung innerhalb des festen Bodenkörpers.



*Abb. 34: Das Schema zeigt die Volumenanteile der festen Bodensubstanz und die Verteilung der Poren nach Grössenklassen in verschiedenen Tiefen am Beispiel eines humosen, gepflügten Lehmbodens. Dabei entspricht das Volumen der Grobporen > 50 µm der Luftkapazität (in der Furche 0 - 20 cm erhöht), die Summe der Volumina von groben und feinen Mittelporen der nutzbaren Feldkapazität, d.h. der den Pflanzen zur Verfügung stehenden, langsam sickern den bzw. gespeicherten Wassermenge.*

Die Neubildung des Porennetzes ist in biologisch aktiven Oberböden sichergestellt und tritt unmittelbar nach der Bearbeitung, z.B. Pflügen, mit dem Setzungsprozess ein. Zentral ist dabei die Tätigkeit der Bodentiere. Grobe Poren werden vor allem von Würmern hinterlassen und von Pflanzenwurzeln gerne als vorgegebene «Wachstumspfade» benutzt. In tonigen Böden entstehen die Grobporen zusätzlich durch Schwundrissbildung beim Abtrocknen.



*Abb. 35: Wurmgänge bilden bevorzugte Wurzelpfade. Ein grosser Teil dieser wertvollen Poren wird jedoch durch das Befahren des Bodens mit schweren Maschinen in zu feuchtem Zustand zerstört.*

Die Neubildung von Poren konzentriert sich auf die oberste, biologisch aktive, d.h. belebte und durchwurzelte Bodenschicht. Diese besitzt deshalb, im Gegensatz zum wenig belebten Unterboden, ein gutes Regenerationsvermögen.

Damit ein Boden die für das Gedeihen der Pflanzen und das Überleben der Bodentiere nötige Durchlässigkeit für Wasser und Luft erbringt, ist auch die Vernetzung von Poren in tiefere Schichten erforderlich. Je tiefer ein Boden biologisch erschlossen ist, um so größer ist seine Fruchtbarkeit.

Die von Wurzeln noch erschliessbaren Porengrößen enden im Bereich der feinen Grobporen. Grobe Mittelporen können noch von Mycelien, beispielsweise Mykorrhiza oder Strahlenpilzen, nicht aber vom Wurzelsystem der höheren Pflanzen erschlossen werden.



*Abb. 36: Querwuchs infolge Verdichtungen beim Pflügen. Pflugsohlen sind oft derart verdichtet, dass sie das senkrechte Wurzelwachstum verunmöglichen. Die Wiederherstellung des natürlichen Porensystems kann länger als ein Jahr dauern.*



*Abb. 37: Fahrspuren im Oberboden sind zwar unschön anzusehen, aber weit weniger schlimm als Verdichtungen im tieferen Bodenbereich.*

Bodenverdichtungen betreffen in erster Linie das Grobporennetz. Weil Unterboden dichter gelagert ist, deshalb weniger verpressbare Grobporen besitzt und schwere Maschinen relativ wenig Spuren hinterlassen, scheint er tragfähiger zu sein. Deshalb wird im Tiefbau meist abhumusiert. Verdichtungen im Unterboden regenerieren jedoch kaum. Dieser ist in hohem Masse verdichtungsgefährdet, vor allem dann, wenn die Tragfähigkeit des Bodens bei zu hoher Bodenfeuchte reduziert ist.



### 6.3 Porengrössen, Wasser- und Lufthaushalt

Die natürlichen Poren im Boden werden in der Regel in die drei Hauptklassen Grob-, Mittel- und Feinporen eingeteilt. Das gesamte Porenvolumen und die Anteile der einzelnen Grössenklassen am Gesamtporenvolumen sind abhängig von der Bodenart, vom Skelettgehalt (Steine), von der biologischen Aktivität, der Lagerungsdichte und der Pflanzendecke.

Durch Bodenbearbeitung, Aushub und Umschlag wird dieses Porensystem verändert. Durchgehende vertikale Wurmgänge und Schwundrisse werden unterbrochen, andere - vor allem bei grosser Bodenfeuchte - zerdrückt. Kurzfristig entsteht eine sog. Sekundärstruktur mit einem grossen Anteil an künstlichen Hohlräumen, welche beim nachfolgenden Setzungsvorgang grösstenteils wieder zusammenfallen, vor allem in tonarmen, sandigen und schluffigen Böden. Solche Hohlräume sind keine Poren im nachstehend beschriebenen Sinn.

#### Groporen

Dank der Groporen mit  $\varnothing > 50 \mu\text{m}$  kann das Wasser in den Boden einsickern. Über das Groporennetz verlässt das überschüssige Wasser spannungsfrei, d.h. bei  $< 0,1$  bar Saugspannung, die oberen aktiven Bodenschichten und wird zum Grundwasser. Durch die weiten Groporen kann das Wasser rasch versickern und zieht Luft in den Boden mit. Weite Groporen sind deshalb das Belüftungssystem des Bodenkörpers.

Vor allem natürlich entstandene, senkrecht bis in grosse Tiefe durchgehende Groporen (Wurmgänge, Wurzelkanäle, Schwundrisse) sind für die hohe natürliche Fruchtbarkeit der tiefgründigen Böden verantwortlich.

Solange sich Wasser aufgrund der Schwerkraft im Boden bewegt, befindet es sich im Bereich der Groporen. Die engen Groporen lassen das Wasser jedoch nur noch langsam passieren.

#### Mittelporen

Die Mittelporen mit  $\varnothing 0,2 - 50 \mu\text{m}$  halten das Wasser entgegen der Schwerkraft im Boden zurück. Das Volumen der Mittelporen bildet die nutzbare Feldkapazität eines Bodens.

Der Mittelporenanteil eines Bodens wird einerseits durch die Bodenart (Korngrössenverteilung) geprägt und andererseits von kleinen und kleinsten Bodentieren und von den Feinwurzeln der Pflanzen gebildet und erneuert.

Durch Bodenverpressung kann der Anteil der Mittelporen auf Kosten des Groporenanteils zunehmen. Verdichtete Böden trocknen in der Regel deutlich schlechter ab (Wasserabfluss gestört!).

Eine Ausnahme bilden die Sandböden. Hier wird die Grösse der Zwischenräume durch die Grösse der einzelnen Bodenteilchen (Korngrösse) bestimmt. Grobsandige Böden können deshalb auch bei Verdichtung nicht undurchlässig werden. Weil sie wenig oder keine Mittelporen enthalten, können sie aber auch kein Wasser zurückhalten und bilden einen trockenen, wenig fruchtbaren Standort für Pflanzen.

Mittelporen halten das Wasser, ähnlich wie in einem Schwamm, mit Saugspannungen zwischen  $0,1 - 15$  bar zurück und dienen den Pflanzen als Wasserreservoir. Dabei ist Wasser bei  $0,1 - 1$  bar leicht verfügbar und wird als leicht bewegliches, bei  $1 - 15$  bar als langsam bewegliches Speicherwasser bezeichnet.

## Feinporen

In den Feinporen mit  $\varnothing < 0,2 \mu\text{m}$  befindet sich Wasser, welches einerseits hygroskopisch (d.h. mit dem Dampfdruck der umgebenden Luft im Gleichgewicht) ist und andererseits solches, das kristallin und chemisch gebunden ist und das erst im Ofen bei Temperaturen über dem Siedepunkt aus dem Boden ausgetrieben werden kann. Dieses Restwasser ist zu stark fixiert, als dass es von den Pflanzenwurzeln genutzt werden könnte (Saugspannung über 15 bar). Es handelt sich um sog. Haftwasser, welches für die Pflanzen nicht mehr verfügbar ist.

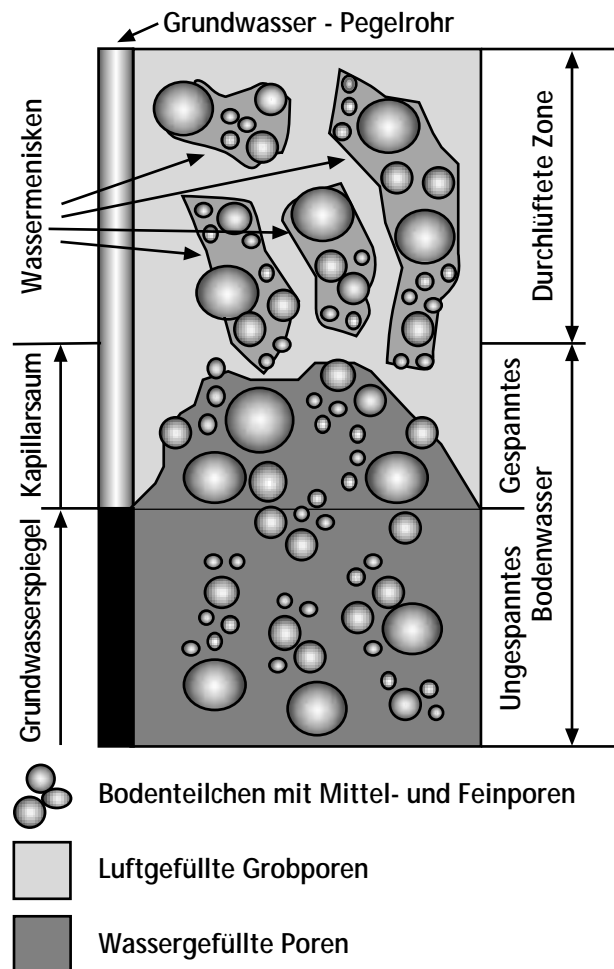


Abb. 38: Schematische Darstellung der Formen des Bodenwassers.

Im vollständig gesättigten Bereich des Grundwassers sind alle Zwischenräume im Boden mit Wasser gefüllt (ungespanntes Bodenwasser).

## Kap. 6

Im Kapillarsaum steigt das Wasser durch die Kapillarkraft über den Grundwasserspiegel hinaus im Boden auf (gespanntes Bodenwasser).

Im durchlüfteten, obersten Teil des Bodens wird Wasser durch die eigene Oberflächenspannung und durch Kapillarkräfte in den Hohlräumen zwischen den feinsten Bodenteilchen zusammengehalten (sog. Menisken).

## 7. Befahrbarkeit

Die Befahrbarkeit des Bodens ist stark von der Bodenfeuchte abhängig. Je feuchter ein Boden ist, desto geringer ist seine mechanische Belastbarkeit. Je feinkörniger der Boden ist, umso eher neigt er zur plastischen Verformung. Mit jeder Verformung ist ein namhafter Verlust an Grobporen verbunden. Mit zunehmender Bodentiefe kann dieser Verlust immer weniger regeneriert werden.

Weil das Gesamtporenvolumen je nach Bodentyp stark variiert, ist die Messung des volumetrischen Wassergehaltes kein taugliches Mittel zur Bestimmung der Befahrbarkeit eines Bodens. Vielmehr muss beachtet werden, wie weit die Bodenhohlräume vor einem Eingriff, bzw. Befahren, entwässert sind.

### 7.1 Wasserleitfähigkeit oder Durchlässigkeit

Wie schnell ein Boden entwässert, hängt in erster Linie von seinem Grobporenvolumen ab. Böden, die über durchlässiger Unterlage (z.B. Kies) liegen, sind von ihrer Entstehung her gut durchlässig und werden deshalb auch als senkrecht durchwaschene Böden bezeichnet (s. Kapitel 3).

Die Durchlässigkeit ( $k$ ), auch Wasserleitfähigkeit genannt, ist bei wassergesättigtem Boden am grössten. Deshalb verlangsamt sich der Entwässerungsvorgang mit zunehmender Abtrocknung des Bodens. Die Durchlässigkeit ( $k$ ) ist aber nicht nur vom Anteil der Grobporen, sondern auch von deren Durchgängigkeit bis in grössere Bodentiefen abhängig. Diese Luft- und Sickerporen werden durch Würmer, Wurzeln und Schwundrisse zwar immer wieder neu gebildet, durch Verdichtung des Unterbodens, bzw. Verschmieren vor allem beim Pflügen von zu nassem Boden, aber zerstört oder zumindest unterbrochen.

### Entwässerungsverhalten

Zur Beurteilung seiner Befahrbarkeit muss das Entwässerungsverhalten eines Bodens berücksichtigt werden.

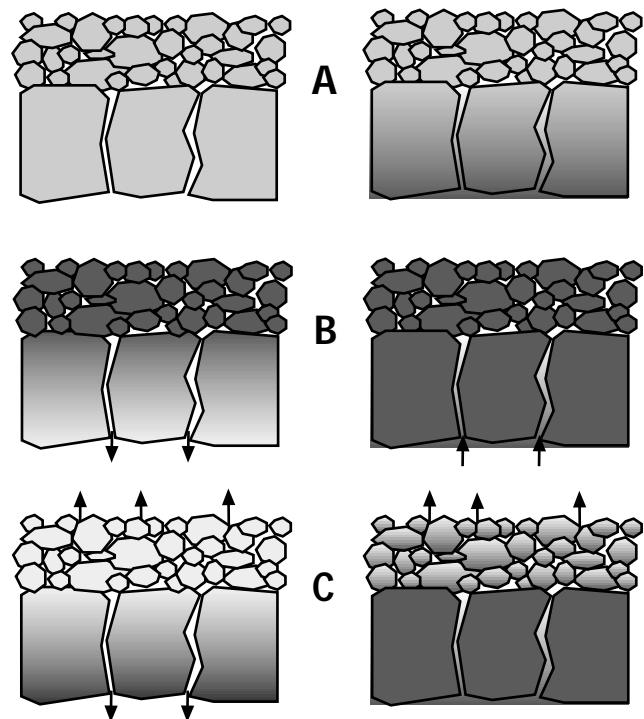


Abb. 39: Unterschiede des Entwässerungsverhaltens zwischen einem durchlässigen (links) und einem grundnassen Boden (rechts).

**A** Nach Trockenperiode: Der Oberboden ist beidseits trocken, der Unterboden rechts ist infolge Einstau im unteren Bereich nass.

**B** Nach Regenperiode: Der Oberboden ist beidseits wassergesättigt. Links hat der Unterboden von oben her Wasser aufgenommen, während er rechts bereits durchgehend gesättigt ist. Durch Grobporen gelangt links überschüssiges Wasser in den Untergrund, während rechts der Grundwasserspiegel ansteigt.

**C** Die Sonne scheint wieder: Wasser verdunstet, links und rechts zeigt sich der Oberboden trocken. Beim durchlässigen Boden links kann zusätzlich Wasser in die Tiefe abfließen, womit der Unterboden abzutrocknen beginnt. Rechts bleibt der Boden durch Einstau weiter nass.

## 7.2 Messen der Wasserspannung ( $y$ )

Der Grad der Entwässerung kann mit der sog. Saugspannung ( $y$ ) gemessen werden. Das verbreitetste Messgerät ist das Tensiometer, das z.B. auch für die automatische Steuerung von Bewässerungssystemen und Berechnungsanlagen eingesetzt wird.

Im Zustand der Wassersättigung ist der Boden spannungsfrei (als Dauerzustand zum Beispiel im Grundwasserbereich). Sobald Wasser unterirdisch abfließt, verdunstet oder durch Pflanzen verbraucht wird, die Bodenhohlräume (Poren) also entwässern, wird eine sog. Saugspannung (Unterdruck) aufgebaut.

Diese Spannung wird für die Bestimmung der Befahrbarkeit einheitlich in einer Tiefe von 35 cm gemessen.

Details zum praktischen Tensiometereinsatz finden sich unter Kapitel 8 sowie in (5) und (6).

### Masseinheiten

Die Saugspannung wird in cm Wassersäule (cm WS), als pF-Wert (= log cm Wassersäule), in Pascal oder in bar angegeben:

$$1 \text{ Cb (Centibar)} = 10^{-2} \text{ bar} = 1 \text{ kPa} = 10 \text{ hPa} = 10 \text{ cm WS} = \text{pF } 1$$

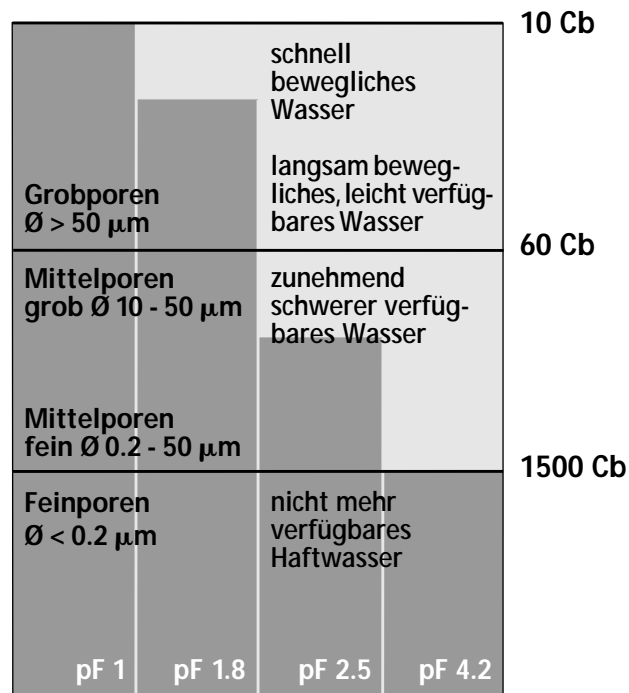


Abb. 40: Die dunkle Fläche stellt wassergefüllte Poren dar. Die entwässerten Bereiche für die Saugspannung zwischen pF 1 (nahezu gesättigt) und pF 4.2 (permanenter Welkepunkt) sind heller dargestellt. Das Wasser im Bereich < 6 Cb wird als Gravitationswasser bezeichnet. Zwischen 6 - 60 Cb ist das Wasser leicht, ab 60 Cb bis etwa 1500 Cb nur schwer pflanzenverfügbar. pF 4.2 = 1500 Cb ist der permanente Welkepunkt.

spannung zwischen pF 1 (nahezu gesättigt) und pF 4.2 (permanenter Welkepunkt) sind heller dargestellt. Das Wasser im Bereich < 6 Cb wird als Gravitationswasser bezeichnet. Zwischen 6 - 60 Cb ist das Wasser leicht, ab 60 Cb bis etwa 1500 Cb nur schwer pflanzenverfügbar. pF 4.2 = 1500 Cb ist der permanente Welkepunkt.

### 7.3 Zusammenhang zwischen Gesamtgewicht, Kontaktfläche und Druckübertragung (6)

Der Kontaktflächendruck (auch Bodenpressung genannt) eines Raupenfahrzeuges berechnet sich aus dessen Gesamtgewicht geteilt durch die Kontaktfläche. In speziellen Fällen (bspw. bei unebener Auflagefläche) können die unter Raupen auftretenden Kontaktflächendrücke um das 1.5fache über den berechneten liegen.

Für Pneufahrzeuge gilt bei 2 bar Reifeninnendruck folgende Annäherung:

$$\text{Kontaktflächendruck (kPa)} = \frac{\text{Radlast (kg)} \times 100}{\text{Felgendurchmesser (cm)} \times \text{Reifenbreite (cm)}}$$

$$\text{Kontaktfläche (cm}^2\text{)} = \frac{\text{Radlast (kg)} \times 100}{\text{Kontaktflächendruck (kPa)}}$$

Die Kontaktfläche von Diagonalreifen kann zudem mit folgender Formel angenähert werden:

$$\text{Kontaktfläche (cm}^2\text{)} = \frac{\text{Reifendurchmesser (cm)} \times \text{Reifenbreite (cm)}}{x 0.27}$$

Für alle Fahrzeuge gilt: Der Kontaktflächendruck (= Gesamtgewicht : Kontaktfläche) ist bodenverträglich, wenn er unter 50 kPa = 0.5 bar liegt.

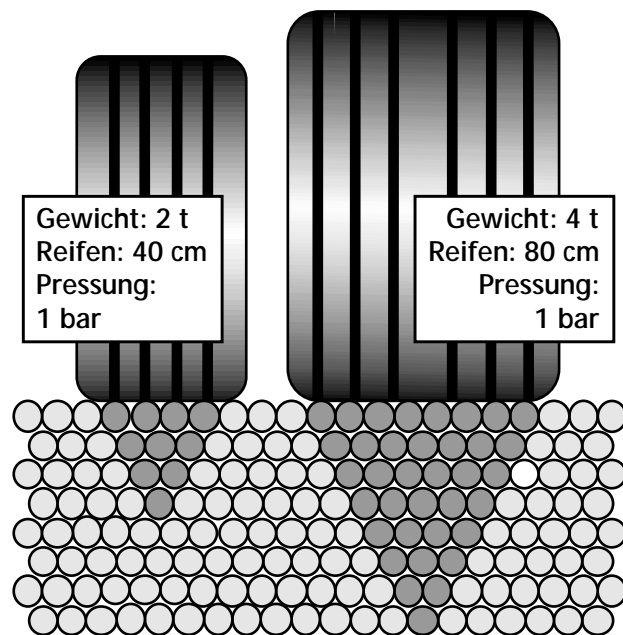


Abb. 41: Dieses vereinfachte Walzenmodell zeigt die Druckübertragung von Rädern in die Tiefe: Grau sind die mit einer Gewichtseinheit belasteten Bodenteilchen und somit der Bereich der Druckfortpflanzung in die Tiefe angegeben. Trotz gleicher Bodenpressung erfolgt die Druckfortpflanzung rechts bis in grössere Tiefe.

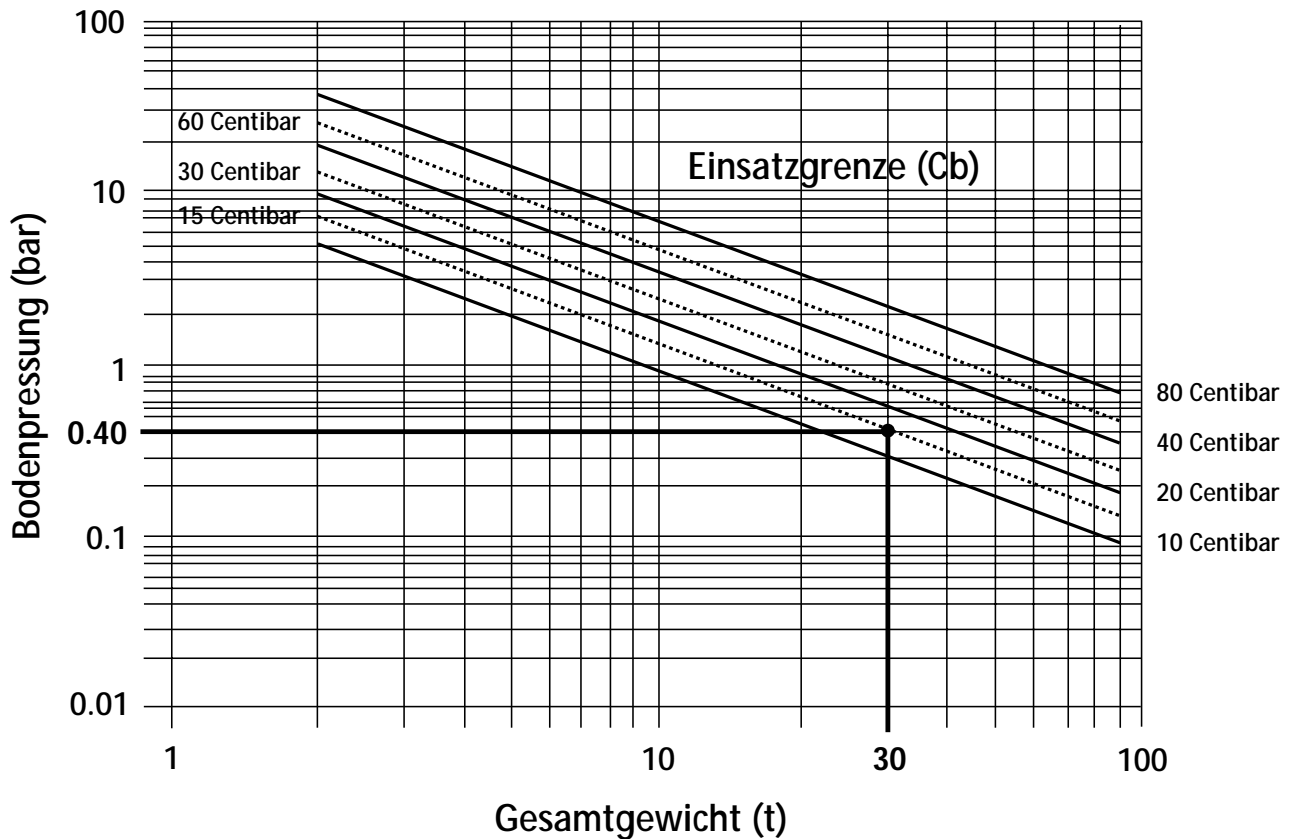
### 7.4 Saugspannung (y) und Maschineneinsatz (5, 6)

Bei Saugspannungen unter 10 Cb (= pF 1) darf der Boden nicht befahren werden. Ab pF 2.5 ist der Boden für die meisten leichteren bis mittelschweren Baumaschinen mit Raupenfahrwerken befahrbar. Ausgesprochen schwere Maschinen dürfen ohne Schutzmassnahmen erst ab pF 2.8 eingesetzt werden.

Die genaue Einsatzgrenze, d.h. die zulässige Saugspannung, ab welcher ein Boden befahren werden darf, lässt sich für Raupenfahrzeuge wie folgt ermitteln:

$$\text{Einsatzgrenze (Cb)} = \frac{\text{Gesamtgewicht (t)} \times \text{Kontaktflächendruck (bar)}}{x 1.25}$$

## Nomogramm: Einsatzgrenzen von Baumaschinen



$$\text{Einsatzgrenze [Cb]} = \text{Gesamtgewicht [t]} \times \text{Bodenpressung [bar]} \times 1.25$$

Beispiel:	Gesamtgewicht	30 Tonnen
	Bodenpressung	0.4 bar
	Einsatzgrenze	15 Centibar

Abb. 42: Aus dieser Abbildung (5, 6) lässt sich die erforderliche minimale Saugspannung direkt herauslesen. Beispiel: Eine Maschine von 30 t Gesamtgewicht und einer Bodenpressung von 0.4 bar kann ab 15 Cb Saugspannung ohne besondere Schutzmassnahmen eingesetzt werden.

Ein bodenverträglicher Einsatz von leichten Pneufahrzeugen ist erst ab Saugspannungen > 25 Cb gewährleistet.

Die Bodenverträglichkeit von Pneufahrzeugen kann zudem mit Hilfe der Radlast in folgende Kategorien aufgeteilt werden:

> 3.5 t Radlast:	bodenunverträglich
2.5 - 3.5 t Radlast:	kritisch für den Boden
< 2.5 t Radlast:	bodenverträglich, falls Saugspannung > 25 Cb und Kontaktflächendruck < 0.5 bar

## 8. Bodenuntersuchungen

In diesem Abschnitt sind einige relativ einfach zu handhabende bodenkundliche Methoden dargestellt. Die meisten davon sind altbewährt. In der Praxis werden sie oft kritisiert, statt richtig eingesetzt. Da Boden kein homogenes Medium ist und auf kleinstem Raum in unterschiedlichster Zusammensetzung und Beschaffenheit vorkommen kann, müssen für eine zuverlässige Aussage pro Standort und/oder Bodenhorizont in der Regel mehrere Messungen durchgeführt resp. mehrere Proben entnommen werden.

Dieses Kapitel dient in erster Linie der Übersicht. Es erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Anwendung der Methoden ist Sache des bodenkundlichen Spezialisten und des erfahrenen Bodenlabors. Die Methoden sind in verschiedenen Methodensammlungen normiert und ausführlich beschrieben (5, 6, 11, 12, 13, 14).

Nebst den klassischen Untersuchungsgeräten sind in Kap. 8.5 auch einige einfache und eindruckliche Feldexperimente dargestellt. Diese Methoden dienen vor allem dem Anschauungsunterricht bei praktischen Feldübungen.

### 8.1 Messen der Wasserdurchlässigkeit

Die Wasserdurchlässigkeit eines Bodens gibt wichtige Hinweise auf dessen Qualität als Pflanzenstandort. Sie wird durch mechanische Eingriffe, namentlich durch Verdichtung, stark beeinflusst. Die Beobachtung der Wasserdurchlässigkeit ist vor allem zur Feststellung möglicher Bodenschäden vor (Ausgangszustand), wie auch nach tiefbaulichen Eingriffen (Nachkontrolle) wichtig. Sie dient auch der Erfolgskontrolle neu angelegter Böden (Aufschüttungen, Rekultivierungen).

#### Im Feld:

Das Messen der Infiltrationsrate, d.h. der Menge Wasser, die in einer bestimmten Zeiteinheit in den Boden versickert, ist sehr zeitaufwendig. Da die konstante Rate erst

mit Wassersättigung des Bodens erreicht wird, verlangt ein Infiltrations-Feldversuch unter normalen Bedingungen mindestens vier Stunden Zeit, falls der Boden vor der Messung schon nahezu gesättigt ist. Im Folgenden werden einige Infiltrimeter beschrieben.

#### Doppelring-Infiltrimeter

Der Doppelring wird senkrecht ca. 10 cm tief in den Boden eingetrieben und mit Wasser gefüllt. Mittels eines auf einem Schwimmer ruhenden Messstabes wird nach eingetretener Wassersättigung des Bodens die Versickerungszeit für eine bestimmte Wasserhöhe im Innenring gemessen. Der wassergefüllte Außenring bewirkt eine äussere Benetzung und vermindert den seitlichen Wasseraustritt, besonders in inhomogenen Böden.

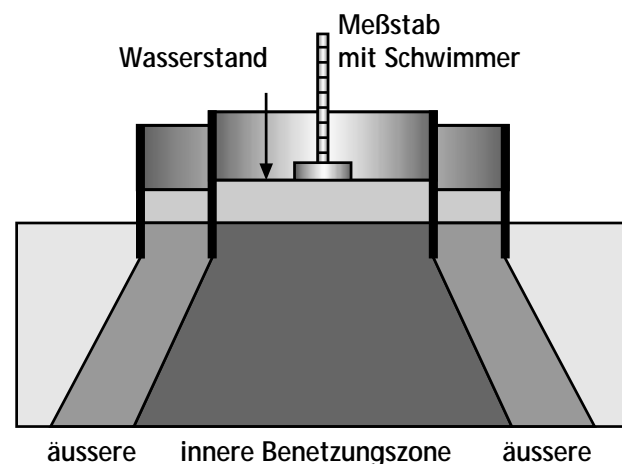


Abb. 43: Schema eines Doppelring-Infiltrimeters (Schnitt).

#### Infiltrimeter (System LBL)

Dieses einfach zu handhabende Gerät eignet sich vorzüglich, um die Durchlässigkeitsunterschiede auf engstem Raum im Feld eindrucklich darzustellen. Die Sickergeschwindigkeit wird durch den gegenüber dem Bodenring um ein Vielfaches reduzierten Durchmesser des Messrohres auch bei geringer Versickerungsrate sichtbar gemacht.

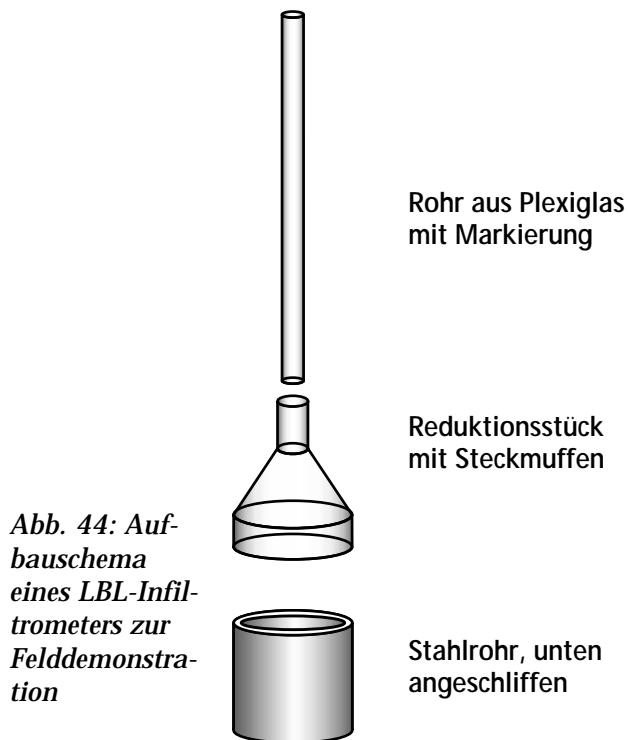


Abb. 44: Aufbauschema eines LBL-Infiltrometers zur Felddemonstration

Beim Einsatz dieses Geräts ist folgendes zu beachten:

1. Der Boden muss vorgängig durch Wässerung aufgesättigt werden, d.h. sowohl am Tag vorher, als auch ca. eine Stunde vor der eigentlichen Messung im Feld.
2. Das Stahlrohr muss senkrecht eingetrieben werden, was bei steinigen Böden Schwierigkeiten bereiten kann. Das Rohr wird mit einem starken Hartholzbrett abgedeckt und, am besten mit einem Handstamper, mind. 5 cm tief in den Boden geschlagen.
3. Das Wasser kann zur besseren Ablesbarkeit im Glasrohr mit Lebensmittelfarbstoff gefärbt werden.

Eine Verdichtung liegt vor, wenn der Median aus fünf Einzelmessungen am selben Standort kleiner ist als  $10^{-6}$  m/s  $\sim 10^{-4}$  cm/s  $\sim 4$  mm/h  $\sim 10$  cm/Tag (6, 13).

### Permeameter (GUELPH)

Dieses Gerät stammt aus Kanada und ist bei uns im praktischen Einsatz noch wenig verbreitet.



Abb. 45: Kontrolle der Wasserdurchlässigkeit einer grossen Geländeaufschüttung anlässlich einer Feldkampagne des IATE/EPFL (Al Carcale, 1994) bei Gordola (TI).

Durch ein Zweikammersystem wird der Staudruck zwischen dem Wasserreservoir und dem Ablesebereich, welcher sich in bequemer Höhe auf einem Dreibein-Stativ befindet, und der in der Tiefe verstellbaren Infiltrationssonde konstant gehalten.

Mit einem speziellen Bohrer wird die zu prüfende Bodenschicht angebohrt. Das erlaubt, die unterschiedliche Durchlässigkeit im Profil darzustellen. Auch bei diesem Gerät ist der zeitliche Aufwand für den Aufbau und die Messung hoch. Zudem sind diese Geräte teuer in der Anschaffung und nicht sehr robust.

### Bohrlochmethode (Porchet-Methode)

Im wassergesättigten Boden wird mit dem Bohrstock ein Loch ausgehoben (bspw. 8 cm Durchmesser und 50 cm Tiefe). Bohrlochwand und -boden dürfen dabei nicht verschmiert werden. Das Loch wird mit Wasser gefüllt.



Danach wird in bestimmten Zeitabständen der Wasserstand im Bohrloch gemessen (bspw. nach 5, 10, 15, 20, 25 und 30 Minuten). Mit Hilfe des Gesetzes von Darcy (1856) lässt sich aus den Feldmessungen die Wasserleitfähigkeit (k-Wert) errechnen. Die Flussdichte  $q$ , auch Filtergeschwindigkeit genannt, ist proportional zum hydraulischen Gradienten  $i$  des totalen Wasserpotentials:

$$q = -k i$$

Das Minuszeichen bedeutet, dass der Wasserfluss entgegengesetzt zum Gradienten stattfindet. Der Proportionalitätsfaktor  $k$  heisst Wasserleitfähigkeit und wird für den gesättigten Fall mit  $k_{\text{sat}}$  bezeichnet. Der Gradient berechnet sich aus der Änderung des totalen Wasserpotentials  $H$  über die betrachtete Strecke  $dz$ :

$$i = \frac{dH}{dz}$$

Ein Boden ist verdichtet, wenn der Median aus fünf  $k_{\text{sat}}$ -Messungen kleiner ist als  $10^{-6} \text{ m/s} \sim 10^{-4} \text{ cm/s} \sim 4 \text{ mm/h} \sim 10 \text{ cm/Tag}$  (6, 13).

*Im Labor:*

### Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit ( $k_{\text{sat}}$ )

Im Feld werden pro Bodenhorizont mehrere ungestörte Bodenproben in sog. Stechzylindern (= Stahlringe, vgl. Kap. 8.3) entnommen. Die Proben werden im Labor aufgesättigt. Anschliessend wird in sog. Permeametern die Menge des durchgeflossenen Wassers während einer bestimmten Messdauer ermittelt, woraus sich mit Hilfe des Gesetzes von Darcy die gesättigte Wasserleitfähigkeit ( $k_{\text{sat}}$ ) herleiten lässt.

Diese Leitfähigkeit wird in folgende Klassen unterteilt (11, 13):

Einteilung nach Methode PYZYL-WD - FAL (11)					Andere Einteilung nach Vorschlag FaBo ZH (13)
ksat m/s	ksat mm/h	Durchlässig- keitsklasse	Staufeuchte	Bodentyp	
$> 3.5 \cdot 10^{-5}$	$> 126$	extrem hoch	extrem durchlässig	vollständig durchlüftete Böden	Durchlässigkeitsklasse gross, gut durchlässig ( $10^{-4}$ bis $10^{-5}$ m/s; 40 bis 400 mm/h)
$3.5 \cdot 10^{-5}$ bis $1.2 \cdot 10^{-5}$	126 bis 43	sehr hoch	sehr durchlässig	vollständig durchlüftete Böden	
$1.2 \cdot 10^{-5}$ bis $4.6 \cdot 10^{-6}$	43 bis 17	hoch	erhöht durchlässig	vollständig durchlüftete Böden	Durchlässigkeitsklasse normal, normal durchlässig ( $10^{-5}$ bis $10^{-6}$ m/s; 4 bis 40 mm/h)
$4.6 \cdot 10^{-6}$ bis $2.9 \cdot 10^{-6}$	17 bis 10	normal	durchlässig	vollständig durchlüftete Böden	
$2.9 \cdot 10^{-6}$ bis $1.2 \cdot 10^{-6}$	10 bis 4	mässig	leicht gehemmt durchlässig	vollständig durchlüftete Böden	Durchlässigkeitsklasse klein, schlecht durchlässig ( $10^{-6}$ bis $10^{-7}$ m/s; 0.4 bis 4 mm/h)
$1.2 \cdot 10^{-6}$ bis $4.6 \cdot 10^{-7}$	4 bis 1.7	gehemmt	staufeucht bis schwach staunass	pseudogleyige Böden, Braun- erde-Pseudogleye	
$4.6 \cdot 10^{-7}$ bis $1.2 \cdot 10^{-7}$	1.7 bis 0.4	gering	staunass	Pseudogleye	
$< 1.2 \cdot 10^{-7}$	$< 0.4$	sehr gering	stark staunass	Fahlgleye	Durchlässigkeitsklasse sehr klein, sehr schlecht durchlässig ( $< 10^{-7}$ m/s; $< 0.4$ mm/h)

## 8.2 Messen der Saugspannung

### Tensiometer

Die Saugspannung erlaubt (im Gegensatz zu allen anderen Messmethoden im Feld, wie Eindringwiderstand, Scherfestigkeit, Wassergehalt) die zuverlässige Beurteilung der Befahrbarkeit eines Bodens (vgl. Kap. 7.4).

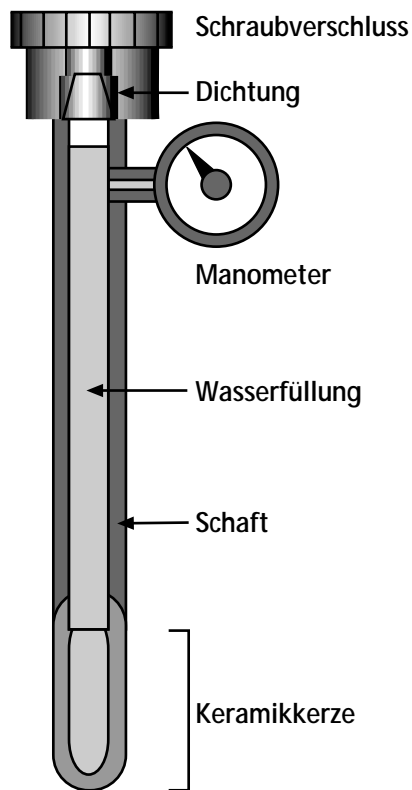


Abb. 46: Schematische Darstellung eines Manometer-Tensiometers.

Tensiometer gibt es in unterschiedlichster Ausführung. Die Funktionsweise ist aber bei allen gleich. Eine poröse Keramikkerze, die in engem Kontakt zum umgebenden Boden stehen muss, baut mit zunehmender Entwässerung des Bodens ein Vakuum auf, das im abgebildeten Schema von der eingeschlossenen Wassermasse im Hohlraum des Geräts auf das Unterdruck-Manometer übertragen wird und dort als Saugspannung in Centibar abgelesen werden kann. Geräte mit angeschlossener Quecksilbersäule sind zwar genauer, stellen aber eine latente Umweltgefährdung (Gerätebruch) dar.

Der Unterdruck kann auch mittels digitaler Messgeräte sehr präzise abgelesen werden: Eine Injektionskanüle wird durch den Verschlusspfropfen gestossen, durch welche der Unterdruck auf das Messgerät übertragen wird. Nach einer bestimmten Anzahl von Einstichen wird der Pfropfen aus Spezialgummi undicht und muss ausgewechselt werden. Solche Geräte werden vor allem für wissenschaftliche Arbeiten eingesetzt.

### Messanordnung

Die Messung der Saugspannung erfolgt einheitlich auf 35 cm Tiefe (5, 6). Es werden fünf Tensiometer pro Standort mit max. 50 cm seitlichem Abstand eingesetzt. Die Werte werden am besten am frühen Morgen, bei mehreren zu beobachtenden Standorten möglichst zur gleichen Zeit, abgelesen. Von den jeweils fünf Einzelwerten pro Standort wird der Medianwert ermittelt.

### Einsetzen der Tensiometer

Es ist sehr wichtig, dass die Tensiometerkerze einen guten Bodenkontakt hat und dass entlang des Schaftes weder Luft noch Wasser frei zuströmen können. Zum Versetzen wird ein Loch vorgebohrt und, vor allem in skeletthaltigen Böden, durch Einschlagen eines Eisenstabes, der etwa die Masse des Tensiometers hat, sauber nachgeformt. Beim Einsetzen kann das ausgebohrte, feine Erdmaterial, in etwas Wasser angerührt, als Gleitmittel dienen. Die Bodenoberfläche wird anschliessend von Hand angedrückt.

### Mögliche Fehler

Es ist möglich, dass sich im Bereich der Kerze ein lokaler Wassereinstau befindet oder dass durch einen Schwundriss oder Steine kein vollständiger Kontakt zwischen Kerze und Boden vorliegt und deshalb Luft hinzutritt. In beiden Fällen weicht der abgelesene Wert von denen der übrigen Geräte ab. Das entsprechende Gerät muss in einem solchen Fall neu versetzt werden. Bodenfrost führt meist zu Schäden am Manometer. Deshalb sollte in Übergangsperioden etwas Frostschutz beigegeben werden.

### Richtige Wartung

Nebst dem täglichen Ablesen muss auch der Wasserstand überwacht werden. Besonders bei hohen Saugspannungen im Sommer muss oft täglich Wasser nachgefüllt werden. Am besten eignet sich entlüftetes, d.h. abgekochtes Wasser. Zur besseren Kontrolle wird dem Wasser ein wenig gut löslicher, giftfreier Farbstoff wie Fluoreszin beigemischt.

Am Ende einer Messperiode werden die Geräte sauber gereinigt und im Schaftinnern sowie am Verschluss von Algen und Bakterien-schleim befreit. Rissig gewordene Verschlusszapfen müssen ersetzt, beschädigte Kerzen ausgewechselt werden.

Mittels Kontrollgerät (Vakuumpumpe mit aufgebautem Manometer) wird die Funktion der Manometer sorgfältig überprüft. Wichtig ist, dass diese gut ansprechen (träges Ansprechen

weist auf mögliche Frostschäden hin) und dass die Manometernadel beim Eintauchen der Kerze ins Wasser vollständig in den Nullbereich zurückfällt.



**Abb. 47: Manometer-Tensiometer verschiedener Baulängen/-arten und Zubehör.**

### Nachkontrollen im Feld

Die Saugspannung kann mit fest montierten Tensiometern, aber auch mit einem rasch anzeigenden Handgerät (Quick-Draw, Abb. 47 rechts) überall überprüft werden. Die Schnellmessung ist nicht als Ersatz, sondern als Ergänzung zum bestehenden Messnetz einzusetzen. Die Verwendung des Quick-Draw erfordert eine sorgfältige Wartung (tägliches Entlüften) und ergibt nur mit der vom Hersteller angegebenen Ansprechzeit brauchbare Resultate. Das Gerät muss bei Nichtgebrauch immer im wassergesättigten Schutzbehälter aufbewahrt werden. Es empfiehlt sich, nur destilliertes oder entionisiertes, gut entlüftetes Wasser zu verwenden.

### 8.3 Messen der scheinbaren Dichte ( $D_s$ )

Für die Ermittlung des Raumgewichts (auch Lagerungsdichte oder scheinbare Dichte  $D_s$  genannt) von Boden im Feld stehen verschiedene Methoden zur Verfügung.

#### Zylinderprobe (ungestörte Probe)

Mit einem Stechzylinder bekannten Inhalts (z.B. 100 / 500 / 1000 ml), der unter Verwendung einer Aufsatzhülse mit einem Hammer senkrecht in den gewachsenen Boden eingetrieben wird, kann ein definiertes Volumen Boden entnommen werden.



Abb. 48: Die Abbildung zeigt ein 100 ml Entnahmeset.

Nach dem Ausgraben des Zylinders wird das vorstehende Erdreich mit einem Messer sorgfältig glatt abgetrennt, ohne die Probenoberfläche zu verschmieren. Wenn nur Dichte und Wassergehalt bestimmt werden sollen, kann die Probe z.B. auch waagrecht einer Profilwand entnommen werden. Für die Messung der Wasserleitfähigkeit resp. der Porenverteilung ist die waagrechte Entnahme jedoch nicht zulässig (vgl. Kap. 8.1).

**Senkrechte Entnahme auf vorbereiteten Entnahmeflächen (Beprobung in Stufen)**

**Waagrechte Entnahme in der Profilwand**

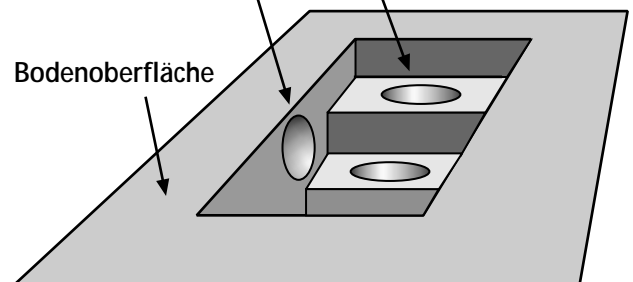


Abb. 49: Schematische Darstellung der Probenahme im stufig abgetieften Profil. In der Praxis müssen auf jedem Tiefen-Niveau natürlich mehrere Proben genommen werden. Die allenfalls durch den maschinellen Aushub des Profils verursachten Verdichtungen und Verschmierungen müssen vorgängig sauber entfernt werden.

#### Weiterbearbeitung im Labor

Die ungestörte Probe kann im Labor zu weiteren Messungen (z.B. Porenvolumen, Porenverteilung, gesättigte Wasserleitfähigkeit etc.) verwendet werden. In diesem Fall muss die Probe, in der Regel sind es Zylinder kleineren Inhalts, in der Metallhülse belassen und diese dicht verschlossen werden, damit die Probe nicht austrocknet.

### Bestimmung von $D_s$

Die scheinbare Dichte  $D_s$  berechnet sich aus dem Trockengewicht pro Zylindervolumen und wird in der Regel in  $\text{Mg/m}^3$  oder in  $\text{g/cm}^3$  angegeben. Für die Bestimmung des Trockengewichtes wird die Probe während mehrerer Stunden bei  $105^\circ\text{C}$  im Ofen getrocknet.

### Nachteile

Diese Methode ist nur in steinarmen bis steinfreien Böden anwendbar. Um aussagekräftige Resultate zu erreichen, müssen viele Proben untersucht werden (Heterogenität des Bodens). Deshalb ist diese Untersuchung ziemlich zeit- und materialaufwendig.

### Membran-Densitometer oder Ballonmethode

Das frische, d.h. feldfeuchte Raumgewicht eines Bodens kann mit der sogenannten Ballon-Methode im Feld bestimmt werden. Der Vorteil dieser Methode besteht in der sofortigen Verfügbarkeit relativ genauer Resultate.

**$D_s$  feldfeucht** = Gewicht des ausgehobenen Erdreichs dividiert durch das verdrängte Volumen Wasser

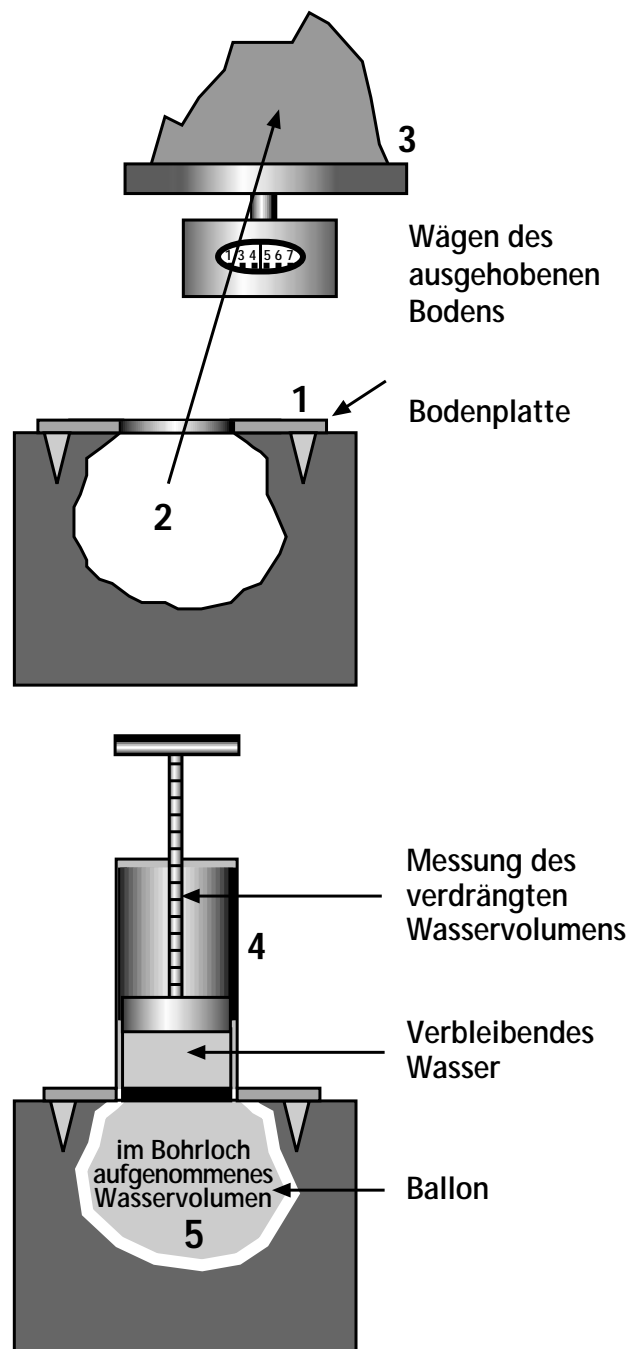


Abb. 50: Schematische Darstellung des Arbeitsablaufes eines Densitometers im Schnitt. Beschreibung nachstehend.

*Vorgehen*

1. Auf einer sauber präparierten, ebenen Probenfläche wird eine Bodenplatte (Ringplatte) fixiert.
2. Durch die runde Öffnung wird etwas Boden ausgehoben.
3. Das ausgehobene Erdmaterial wird auf eine Waagschale gelegt und gewogen.
4. Das Ballongerät, welches mit Wasser gefüllt ist und am unteren Ende von einer Gummimembran abgeschlossen ist, wird auf die Ringplatte aufgesetzt.
5. Das Wasser wird mit der Pumpe aus dem Zylinder ausgepresst. Bei erreichtem Messdruck wird das verdrängte Volumen abgelesen.

Oft wird mit der Entnahme und Wägung des Aushubmaterials im Feld auch noch die Grobsiebung ( $\varnothing > 2 \text{ mm}$ ) für die Kies-Steinfraktion durchgeführt und nur die Feinerdefraktion zur Weiterbearbeitung (Granulometrie und chemische Parameter) ins Labor gebracht.

Auch das Trockengewicht kann nachträglich im Labor gemessen werden. Dazu werden die ausgehobenen Proben sauber verpackt.

Die Reproduzierbarkeit der Entnahmebedingungen wird durch das im Gerät eingebaute Manometer kontrolliert. Die Methode ist relativ einfach zu handhaben. Die Einsatzgrenze liegt bei sehr flachen Horizonten ( $< 5 \text{ cm}$  Schichthöhe).

*Nachteile der Methode:*

Ziemlich zeitaufwendig (ca. 1 Tag pro Profil).

## 8.4 Messen des Eindringwiderstandes

Der Eindringwiderstand eines Bodens kann auf verschiedene Arten gemessen werden. Es gibt eine grosse Auswahl von Geräten zum direkten Ablesen resp. mit graphischer oder digitaler Aufzeichnung der Werte.

### *Statisches System (Feder-Penetrometer)*

Mit möglichst konstantem Druck wird der Messstab, an dessen Ende ein Konus mit speziellem Anstellwinkel und gegebener Oberfläche angeschraubt ist, senkrecht in den Boden gedrückt. Über die Druckfeder wird eine Rollskala in Bewegung versetzt, an welcher die Werte abgelesen werden müssen. Verbesserte Apparate verfügen über einen Schreibmechanismus, welcher den Widerstand gemäss der Federbelastung auf einem mitlaufenden Papierstreifen aufzeichnet.

Neueste Ausführungen dieses Geräts verfügen über ein elektronisches Sensorsystem, das die Werte digital anzeigt und auf einem Logger auch speichert. Der Einsatz des statischen Geräts bleibt aber, ungeachtet der verbesserten Aufzeichnungstechnik, vor allem in steinigem oder stark ausgetrockneten Böden schwierig.

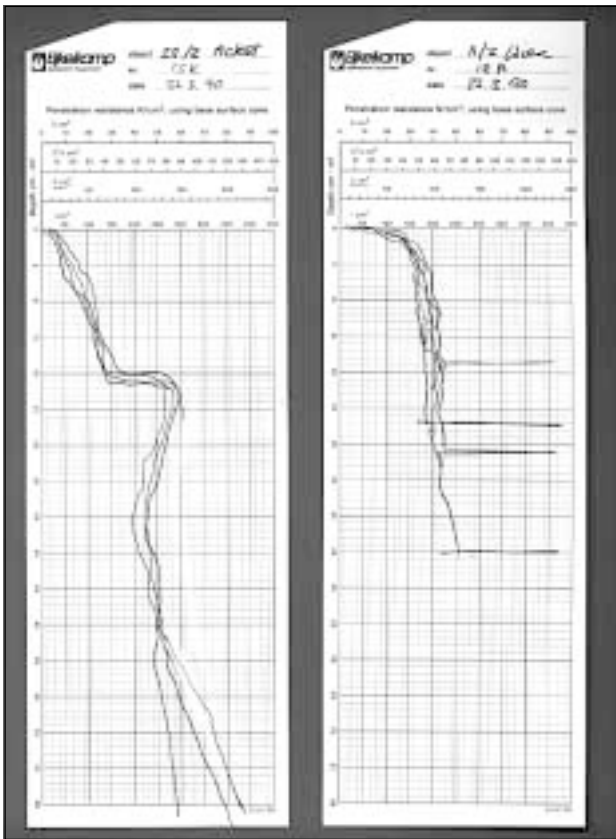


Abb. 51: Zwei Messstreifen als Beispiele direkt aufgezeichneter Penetrogramme mit je 4 bzw. 3 Messungen. Links: Acker im Lössgebiet; die bearbeitungsbedingte Verdichtungszone (15-25 cm Tiefe) ist klar erkennbar. Rechts: Penetrogramm aus einer Naturwiese; der oberflächliche Einstichwiderstand ist deutlich höher (ab 15 cm Tiefe verhindern Steine ein weiteres Messen).

### Dynamische Systeme (Ramm- penetrometer)

Ein bekanntes Verfahren basiert, in stark verkleinertem Massstab, auf dem Prinzip der bekannten und altbewährten Rammsonde (12). Dieses System reagiert weniger empfindlich auf Steine und Trockenheit.

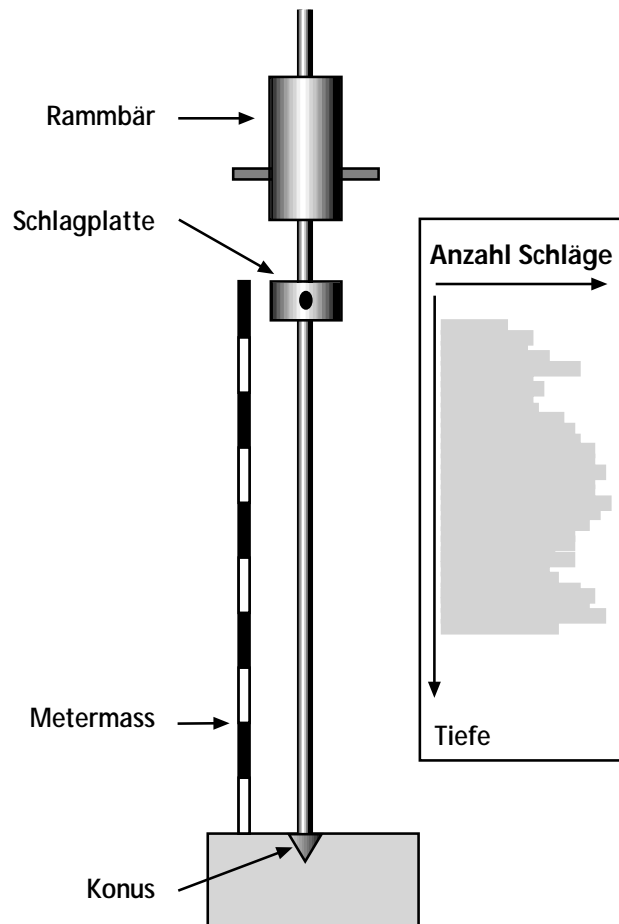


Abb. 52: Die Handramme in einfachster Ausführung. Die Darstellung des Eindringwiderstandes erfolgt in Form sog. Histogramme.

Der Rambär wird an einer Eisenstange bis zum oberen Anschlag gehoben und auf die Schlagplatte fallengelassen. Die benötigte Anzahl Schläge für ein bestimmtes Eindringmass (z.B. 2 cm) wird notiert. In graphischer Darstellung ergibt sie ein sog. Histogramm. Weil die Energie pro Schlag (Gewicht des Rambärs x Fallhöhe) und das Gewicht des unbeweglichen Geräteteils bekannt sind, kann das Resultat auch auf einschlägige Einheiten aus der Bodenmechanik wie SPT (Standard Penetration Test) umgerechnet werden (12).

Ein weiteres System ist die sog. PANDA-Sonde (14). Es handelt sich dabei um ein tragbares Feldmessgerät (Abb. 53).

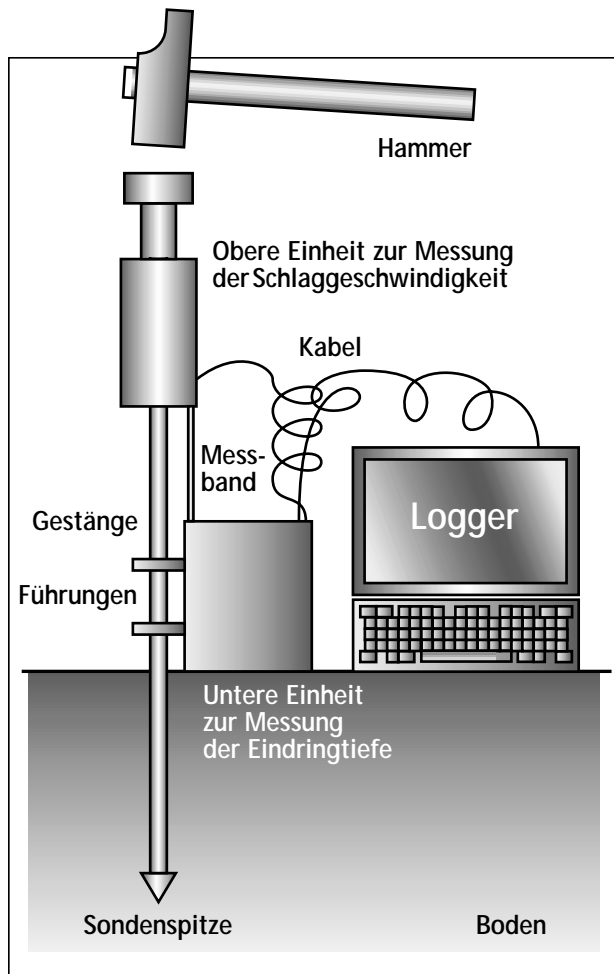


Abb. 53: Schematische Darstellung der PANDA-Sonde und ihrer Komponenten (14).

Das Grundprinzip der Sonde basiert darauf, dass ein Sondiergestänge mit Hammerschlägen in den Boden getrieben wird. Die Ermittlung des Eindringwiderstandes erfolgt durch die Bestimmung der Schlaggeschwindigkeit. Dies geschieht in der oberen Systemeinheit, wo die Durchlaufzeit eines beweglichen Magneten zwischen zwei fixierten Sensoren für jeden Hammerschlag gemessen wird. Die Aufzeichnung der Eindringtiefe mit Hilfe eines Messbandes und der unteren Systemeinheit erlaubt die Berechnung des Eindringwiderstandes für jeden Hammerschlag bei bekannter Konusoberfläche und bekannter Masse von Hammer, Gestänge und Sondenspitze mittels einer im Logger programmierten Formel. Im Feld werden die Daten automatisch vom Logger aufgezeichnet und gespeichert.

Pro Standort werden zehn Messungen in Abständen von 20 cm bis in eine Tiefe von je 0.5 m durchgeführt. Die Messungen erfolgen im abgetrockneten Boden bei Saugspannungen von mindestens 15 bis maximal 55 Centibar. Die Bodenfeuchte zum Zeitpunkt der Messungen wird mit Tensiometern ermittelt (Kap. 8.2).

Der Verdichtungsgrad bis in 0.5 m Tiefe wird anhand der Median- oder Mittelwertskurve der ermittelten Eindringwiderstände in Megapascal (MPa) beurteilt (6):

Eindringwiderstand:	Verdichtungsgrad, Lagerung:
< 2 MPa	unverdichtet, normal gelagert
2.0 - 3.5 MPa	verdichtet, erhöhte Lagerungsdichte
> 3.5 MPa	stark verdichtet, kompakt gelagert

Überschreitet die Kurve in einer bestimmten Tiefe oder über einen Tiefenbereich die Grenzen von 2.0 resp. 3.5 MPa, so ist der Boden dort verdichtet resp. stark verdichtet.

## 8.5 Eindrückliche Feldexperimente

Als Ergänzung zu den klassischen Methoden sind nachstehend einige Experimente erwähnt, die sich als Felddemonstration gut eignen.

### *Einfluss des Pseudrucks*

Ein Traktor wird über ein frisch gepflügtes Feld gefahren. Eines der Hinterräder ist normal aufgepumpt, beim anderen wird der Druck auf ca. 1/3 reduziert. Quer zur Fahrspur wird ein Blech senkrecht in den Boden gedrückt und die Kontur der Fahrspur mit Farbspray markiert.

Der Unterschied von Spurform und Spurtiefe ist meist beträchtlich. Beim hart gepumpten Rad gibt vor allem der Boden nach, beim wenig gepumptem Pneu ist dieser «weicher als der



Boden». Der Pneu wird breitgedrückt und verteilt dasselbe Gewicht auf eine wesentlich grössere Fläche.

### *Pflugsohle und Durchlässigkeit*

Die immer stärkere Mechanisierung zeigt bei vielen Böden klare Folgen. Wo in schweren Böden jedes Jahr gepflügt wird, sind sog. Pflugsohlenverdichtungen häufig anzutreffen. Auf der Bodenoberfläche und auf dem bis auf die Pflugsohleschicht abgetragenen Boden werden Infiltrationsrohre (am besten Modell LBL, Kap. 8.1) eingesetzt und gleichzeitig mit Wasser gefüllt. Sofern die Rohre gut versetzt sind und nicht zufällig ein grosser Wurmgang oder ein Schwundriss das Experiment verfälscht, kann eine oft um ein vielfaches längere Versickerungszeit in der Pflugsohlenzone beobachtet werden.

### *Anaerobie*

Parallel zur Verdichtung und besonders häufig in feuchten Böden kann die Erstickung durch Sauerstoffmangel beobachtet werden. Beim Nachgraben, aber auch bereits bei der Probenahme mit dem Erdbohrer, fallen solche Schichten durch Graufärbung und oft penetranten Klärschlammgeruch auf. Dieser Geruch wird durch die Methangasentwicklung (Faulgas) beim Verfaulen organischer Substanz im Boden verursacht. Deshalb lohnt es sich, besonders bei humusreichen Oberboden-depots, die zudem vielleicht zu nass oder zu hoch angeschüttet wurden, Nachschau zu halten.

### *Stabilität*

Oft wird hart mit stabil verwechselt. So entstehen beispielsweise beim Befahren von Unterboden deutlich weniger Fahrspuren. Unterboden ist weniger belebt und deshalb weniger struktur stabil. Ein eindrückliches Experiment ist der Zerfallstest im Wasserglas:

Einige Schollen Unterboden und etwa gleich-grosse Stücke Oberboden werden während etwa zwei Tagen bei Zimmertemperatur getrocknet. Die Schollen aus dem Unterboden sind meist härter und schwieriger zu brechen. Gleichzeitig werden je eine Scholle in ein mit Wasser gefülltes Glas gelegt. Der Unterboden zerfällt meistens in kurzer Zeit, während der Oberboden am Stück verbleibt. Je nach Bodenart, Humus- und Tongehalt ist das Zerfallsverhalten unterschiedlich. Am eindrücklichsten ist die Stabilität der Wurmhäufchen.

### *Regenwürmer-Tritttest*

Regenwürmer als wichtige Bodentiere sind besonders in den feuchten, kühleren Jahreszeiten (Frühjahr und Herbst) aktiv. Bei wasser-gesättigtem Boden kann ein einfaches Experiment die Anwesenheit dieser Tiere zeigen:

Sorgfältig und leise auftretend ein Stück Wiesland begehen und aufspringen. Beim Wiederauftreffen auf den Boden entsteht eine Erschütterung, welche von den Würmern in weitem Umkreis registriert wird und sie zum sofortigen Rückzug in ihre Röhre veranlasst. Dabei wird Wasser und Luft nachgezogen, was dann ein gut hörbares, knisterndes Schlürfgeschall verursacht.

### *Halmtest*

In der aktiven Zeit kann die Präsenz der tiefgrabenden Arten in einem Stück Ackerland wie folgt festgestellt werden:

Eine Bodenfläche wird sauber abgewischt und mit einem Rahmen aus Karton begrenzt. Innerhalb dieses Rahmens werden zündholz-grosse Stücke feiner, grüner Weichholzzweige in regelmässigen Reihen eng ausgelegt. Darüber wird eine feine Schicht Kreidemehl ausgestreut. Am anderen Morgen sind die Zweiglein, die der Wurm kaum in die Röhre einziehen konnte, sichtbar verschoben. Der Halmtest ist, wie alle beschriebenen Experimente, unwissenschaftlich, aber eindrücklich.



## Zitierte Literatur

- 1 FAL, Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden, Schriftenreihe der FAL 24, Zürich-Reckenholz, 1997
- 2 BUWAL, Wegleitung: Verwertung von ausgehobenem Boden (Bodenaushub), Vollzug Umwelt, Bern, 2001 (ersetzt die VSBo-Mitteilung Nr. 4 von 1993)
- 3 VSS, SN 640 581a, Erdbau, Boden; Grundlagen, Zürich, 1998
- 4 VSS, SN 640 582, Erdbau, Boden; Erfassung des Ausgangszustandes, Triage des Bodenaushubes, Zürich, 1999
- 5 BEW, Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen (Bodenschutzrichtlinien), Bern, 1997
- 6 VSS, SN 640 583, Erdbau, Boden; Eingriff in den Boden, Zwischenlagerung, Schutzmassnahmen, Wiederherstellung und Abnahme, Zürich, 2000
- 7 Verordnung vom 1. Juli 1998 über Belastungen des Bodens (VBBo), SR 814.12
- 8 Umweltschutzgesetz vom 7. Oktober 1993 (rev. Juli 1997), SR 814.01
- 9 BUWAL, Richtlinie für die Verwertung, Behandlung und Ablagerung von Aushub-, Abraum- und Ausbruchmaterial (Aushubrichtlinie), Vollzug Umwelt, Bern, 1999
- 10 BUWAL & FAL Zürich-Reckenholz, Wegleitung für die Probenahme und Analyse von Schadstoffen im Boden, in Revision
- 11 FAL, IUL, RAC & FAW, "Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten", Zürich-Reckenholz, 1997
- 12 H. Otto, Geotechnik für die Praxis, 4. erweiterte Auflage, Aarau, 1990
- 13 Amt für Landschaft und Natur des Kantons Zürich, Interne Berichte zur Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit ( $k_{\text{sat.}}$ ), Fachstelle Bodenschutz, Zürich, 1998, 1999, 2000
- 14 Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich, Fachberichte zur Messung von Bodenverdichtungen im Feld, Zürich, 1997, 1998, 1999
- 15 Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Physikalischer Bodenschutz: Konzept zur Umsetzung der rechtlichen Vorgaben im Umweltschutzgesetz (USG) und in der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo), BGS-Dokument 9, Dietikon, 1999

## Bildnachweis

Quelle	Abb.-Nr.
• P. Schoch, Amt für Umweltschutz, Kanton Solothurn, 1991	02
• R. Wenger, Land- und hauswirtschaftliche Schulen Ebenrain, Sissach	03
• Honegger/Bodmer in U. Gisi, „Bodenökologie“, Thieme Verlag, 1990	04
• F. Scheffer/P. Schachtschabel, „Lehrbuch der Bodenkunde“, Enke Verlag, 1992	05
• S.T. Williams, „Forum Mikrobiologie 6“, 1983	06
• J.C.G. Ottow, „Bild der Wissenschaft 3“, 1985	07/08
• G. Bruckner, „Lebensraum Boden“, Frankh-Kosmos Verlag, 1988	11/12
• R. Giovanoli, Laboratorium für Elektronenmikroskopie, Universität Bern	18/20/22
• Th. Diez/H. Weigelt, Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau	21/24-32/36
• E. Frei, „Agrarpedologie“, Geographisches Institut der Universität Bern, 1983	33
• BEW, „Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen (Bodenschutzrichtlinien)“, Bern, 1997	42

Sämtliche Abbildungen, Fotos, Grafiken, Tabellen, Schemas etc. wurden von Hans-Peter Imhof überarbeitet. Alle Vorlagen hierzu - mit Ausnahme der oben aufgeführten - stammen von den Autoren dieses Leitfadens (Christoph Salm und Stephan Häusler) resp. vom Herausgeber (BUWAL).

## Impressum

### *Bezug*

BBL/EDMZ, CH-3003 Bern

Fax: +41 (0)31 325 50 58

E-Mail:

edmz@bbl.admin.ch

Internet:

www.admin.ch/edmz

### *Bestellnummern*

Deutsch: 319.775d

Französisch: 319.775f

### *Herausgeber*

Bundesamt für Umwelt,  
Wald und Landschaft (BUWAL)

CH-3003 Bern

www.umwelt-schweiz.ch

### *Autoren*

Stephan Häusler

Angewandte Erdwissenschaften

Rodtmattstrasse 51

3014 Bern

Christoph Salm

Terre AG

Postweg 1

5704 Egliswil

### *Projektleitung*

Jean-Pierre Clément

Jürg Zihler

BUWAL

Sektion Boden und allg. Biologie

3003 Bern

### *Publizistische Begleitung*

Norbert Ledergerber

BUWAL

Sektion Kommunikation

3003 Bern

### *Layout und Gestaltung*

Hans-Peter Imhof

Grafiker SGD

Elfenauweg 3

3006 Bern