

Erläuterungen zum Thema Boden



Erläuterungen zum Thema Boden

Hinweis:

Bei dieser Publikation handelt es sich um einen Auszug der Erläuterungen und Informationen zum Thema Boden und Bodenkunde aus dem Leitfaden Umwelt Nr. 10 «Bodenschutz beim Bauen» des Bundesamts für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL, 2001).

Der Leitfaden Umwelt Nr. 10 «Bodenschutz beim Bauen» wurde im Jahr 2022 durch das Modul «Sachgerechter Umgang mit Boden beim Bauen» der neuen Vollzugshilfe «Bodenschutz beim Bauen» abgelöst.

Inhaltsverzeichnis

Erläuterungen zum Thema Boden

Kap. 1 Bodenfruchtbarkeit	3
Kap. 2 Bodenleben	4
2.1 Grenzbereich Boden/Pflanze	4
2.2 Einteilung und Kurzbeschreibung nach Grössenordnung	5
2.3 Der Regenwurm	8
Kap. 3 Bodentyp	10
3.1 Durchlässige Böden	10
3.2 Staunasse Böden	11
3.3 Grundnasse Böden	11
3.4 Überflutete Böden	11
3.5 Organische Nassböden	12
Kap. 4 Bodenart	13
4.1 Ton	14
4.2 Schluff	15
4.3 Sand	16
Kap. 5 Bodenstruktur	18
5.1 Primärstruktur (= Struktur im engeren Sinne)	18
5.2 Sekundärstruktur (= Gefüge)	19
Kap. 6 Bodendichte und Porenvolumen	22
6.1 Scheinbare und reelle Dichte	22
6.2 Poren (Hohlräume) und ihre Verteilung im Bodenkörper	25
6.3 Porengrössen, Wasser- und Lufthaushalt	25
Kap. 7 Befahrbarkeit	27
7.1 Wasserleitfähigkeit oder Durchlässigkeit	27
7.2 Messen der Wasserspannung	28
7.3 Zusammenhang zwischen Gesamtgewicht, Kontaktfläche und Druckübertragung	29
7.4 Saugspannung und Maschineneinsatz	29
Kap. 8 Bodenuntersuchungen	31
8.1 Messen der Wasserdurchlässigkeit	31
8.2 Messen der Saugspannung	34
8.3 Messen der scheinbaren Dichte	36
8.4 Messen des Eindringwiderstandes	38
8.5 Eindrückliche Feldexperimente	40
Zitierte Literatur	43
Bildnachweis	44
Impressum	45

1. Bodenfruchtbarkeit

Definitionen

In Art. 2 der Verordnung über Belastungen des Bodens vom 1. Juli 1998 (1) 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 (2) 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.

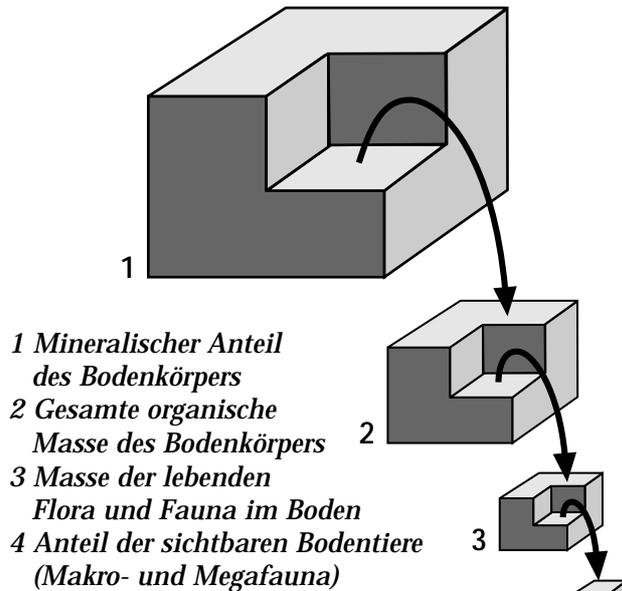


Abb. 01: Schematische Darstellung der Gewichtsanteile im Boden.

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.

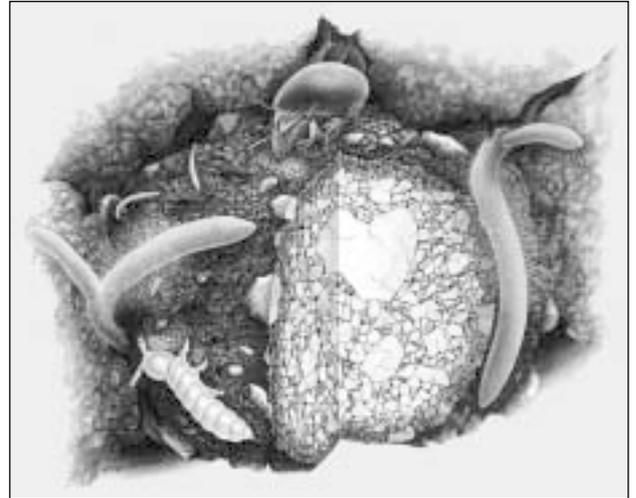


Abb. 02: Zeichnerische Darstellung des Lebens im Bereich eines Krümelns. Natürliche Bildgrösse ca. 4 mm Seitenlänge. In der oberen Bildmitte ist eine Milbe, in der unteren linken Bildhälfte ein Springschwanz abgebildet. Diese Vertreter der Mesofauna können von blossen Auge noch knapp erkannt werden.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

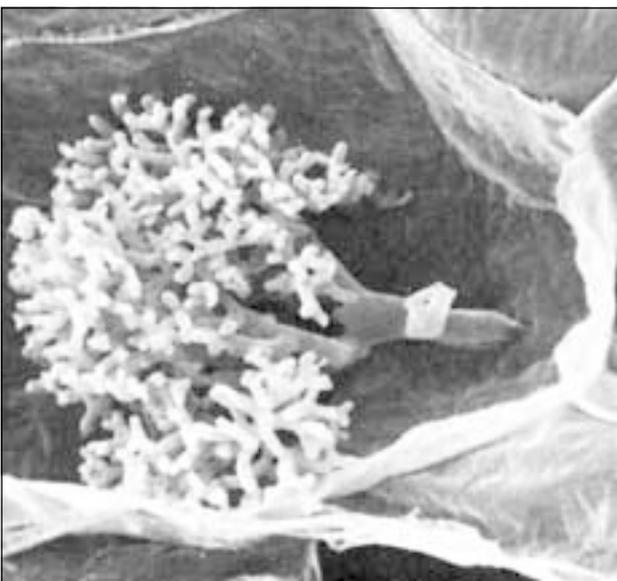


Abb. 04: Arbuskeln von Mykorrhiza, welche in die Wurzelzellen einwachsen. Die von der Pflanze bezogenen Kohlehydrate werden gegen Nährlemente aus dem Boden getauscht.

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 μ m
(= Ton-Feinschluff = feine Mittelporen)

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

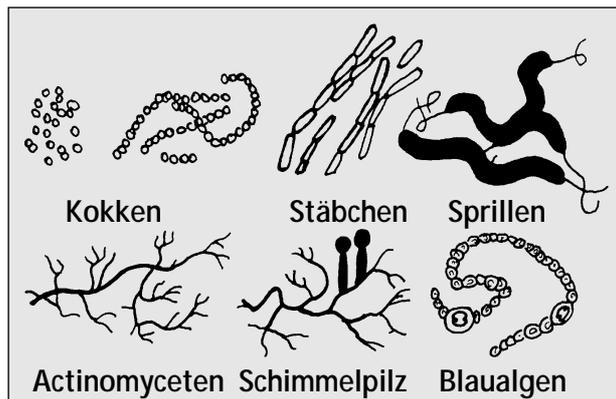


Abb. 05: Schematische Abbildung wichtiger Vertreter der sehr artenreichen Mikroflora des Bodens.

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.

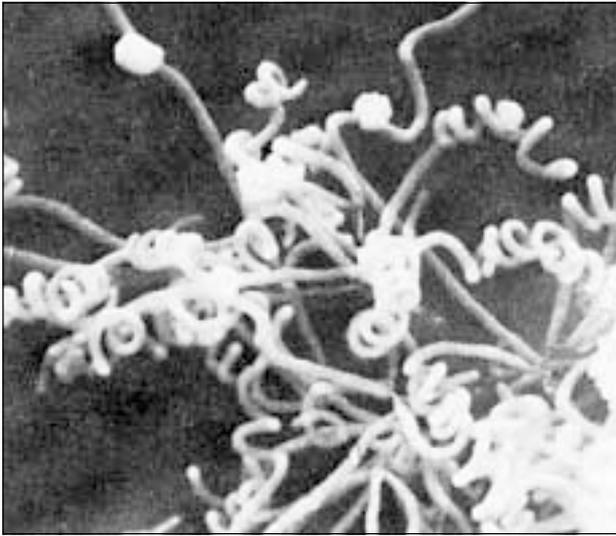


Abb. 06: Gewisse Mikroorganismen produzieren antibiotische Stoffe. Bekannt sind u.a. Penicillin und Streptomycin. Das Bild zeigt spiralförmige Sporenketten eines Streptomyceten (6000-fache Vergrößerung).

2. Mikrofauna, \varnothing 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 rudern (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.

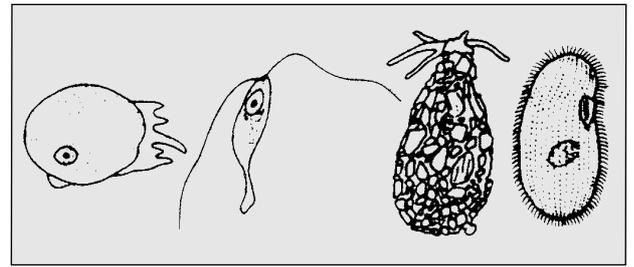


Abb. 07: V.l.n.r. Amöbe (Wurzelfüssler), Flagellate (Geisseltierchen), Testacea (Schalamöbe) und Ciliate (Wimpertierchen).

3. Mesofauna, \varnothing 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.

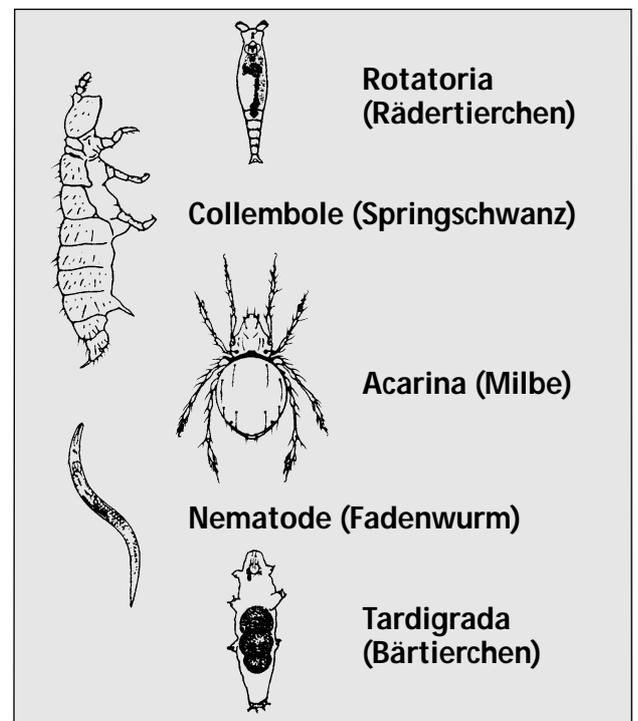


Abb. 08: Einige Beispiele aus der Mesofauna.

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.

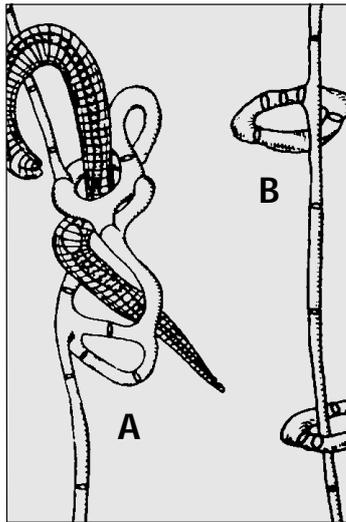


Abb. 09: Räuberpilze der Gattung Entomophthorales sind imstande, mittels spezieller Hyphen (B) kleine Bodentiere, im Bild ein Schädling (Nematode), zu fangen und zu verdauen (A).



Abb. 10: Eine Raubmilbe (unten) frisst 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).

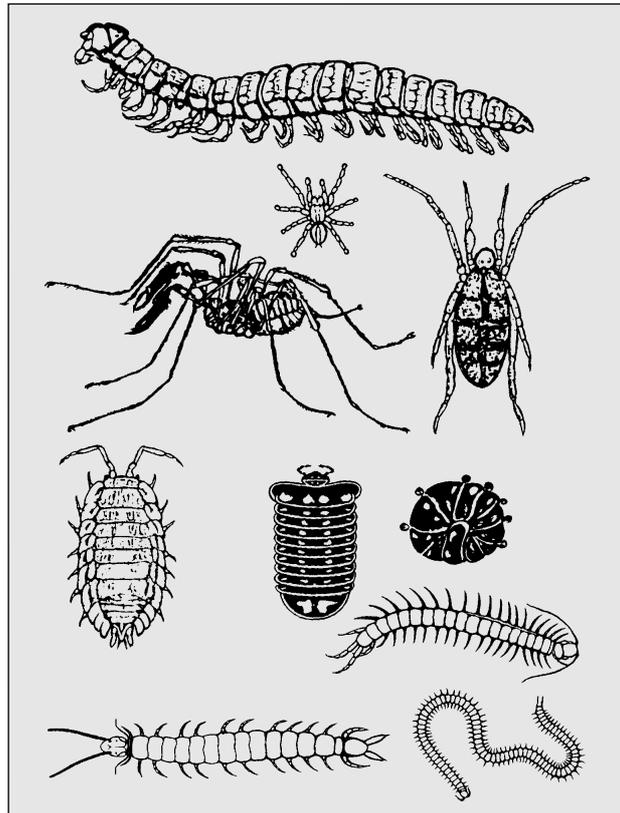


Abb. 11: Diese Abbildung zeigt die eher lichtscheuen Vertreter der Makrofauna, die kaum an der Bodenoberfläche angetroffen werden. Es sind verschiedene Formen von Insekten, Krebsen, Spinnen und Doppelfüsslern. Viele von ihnen leben räuberisch. Spinnen, Steinläufer, Ohrwürmer, Asseln und Saftkugler zerkleinern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

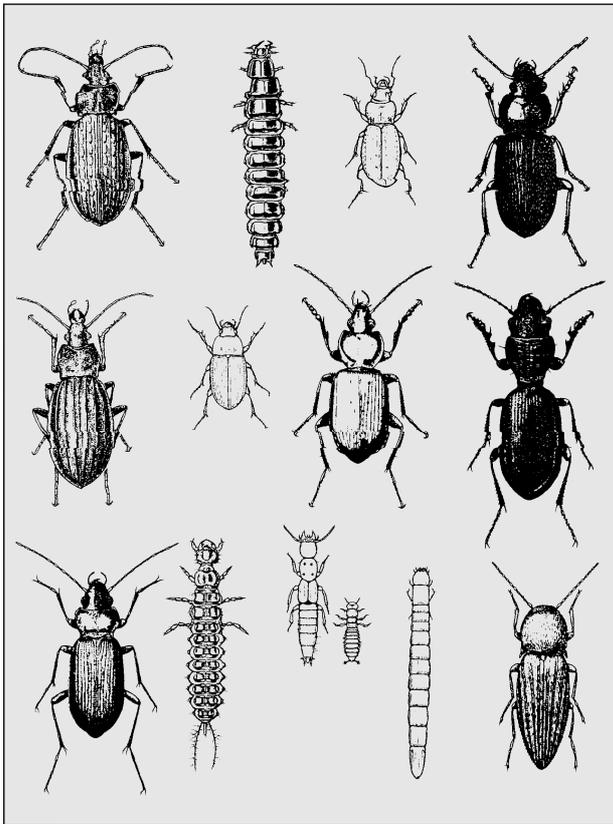


Abb. 12: Laufkäfer mit Larven. Natürliche Grösse zwischen 7 und 33 mm.

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 Regenwurmart, 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.

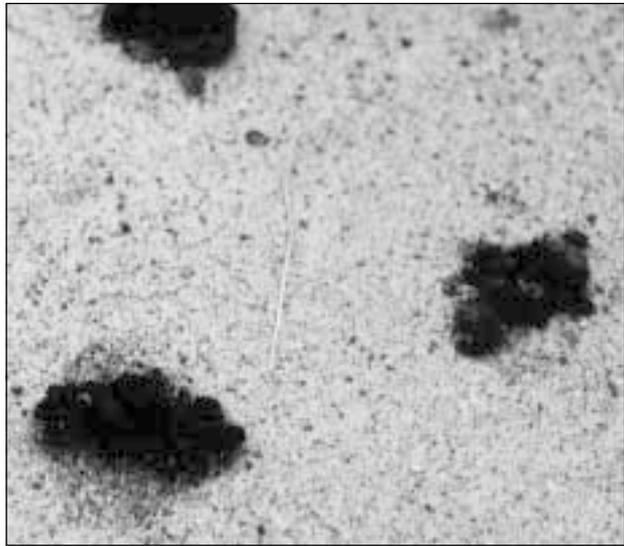


Abb. 14: Einige Tage nach einem Unwetter (24./25. August 1987 bei Seedorf/UR) haben sich einige Würmer durch einen Meter Schwemmsand an die Oberfläche emporgearbeitet (dunkle Wurmhäufchen).

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 Bodengenese, 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
10^{-2} cm/sec	360 mm/h	durchlässig
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 Akkerböden.

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 abgeschwemmte 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 ≤ 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

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

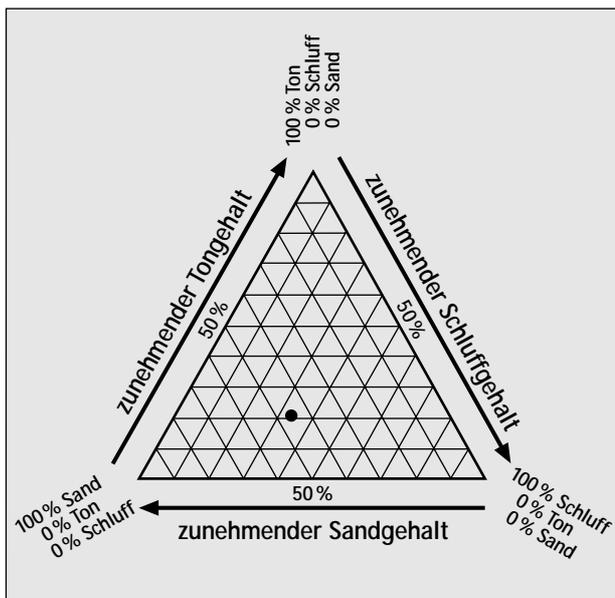
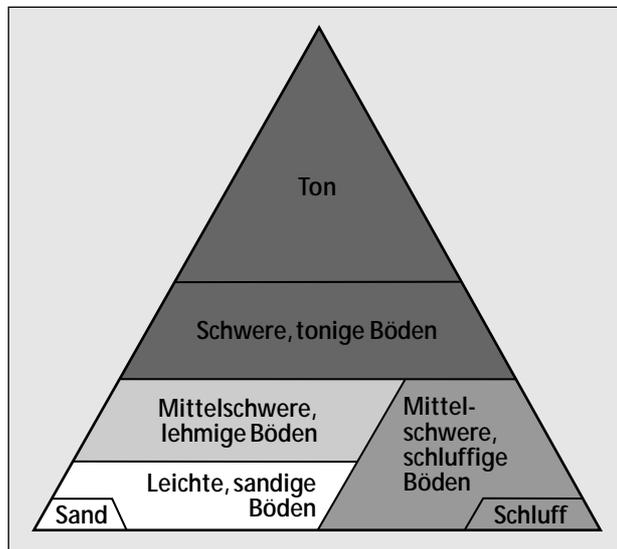


Abb. 16: Körnungsdreieck (3). Der Schnittpunkt der drei aufgetragenen Gehalte in % führt zur korrekten Bezeichnung der Bodenart. Im vorliegenden Beispiel (•) handelt es sich um einen mittelschweren, lehmigen Boden. Korrekte Bezeichnung: Mässig schluffiger Lehm.

Vereinfachte Unterteilung der Bodenart im Körnungsdreieck



Exakte Benennung der Bodenart:

	Ton %	Schluff %
Schwere, tonige Böden		
Ton-Boden	> 50	< 50
lehmiger Ton	50 - 40	< 50
toniger Lehm	40 - 30	< 50
toniger Schluff	50 - 30	> 50
Mittelschwere, schluffige Böden		
lehmiger Schluff	30 - 10	> 50
sandiger Schluff	< 10	50 - 70
Schluffboden	< 10	> 70
Mittelschwere, lehmige Böden		
Lehm	30 - 20	< 50
sandiger Lehm	20 - 15	< 50
Leichte, sandige Böden		
lehmreicher Sand	15 - 10	< 50
lehmiger Sand	10 - 05	< 50
schluffiger Sand	10 - 05	15 - 50
Sand-Boden	< 05	< 15
Je nach Schluffanteil wird weiter unterteilt:		
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 ≤ 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 μm 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.

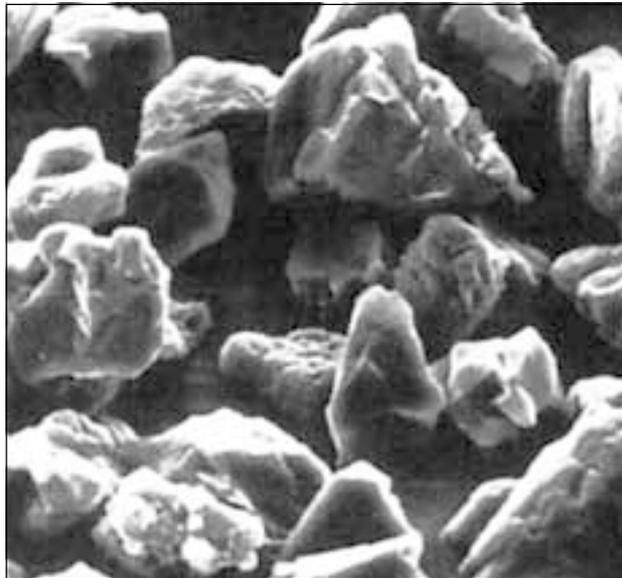


Abb. 20: Schluffkörner unter dem Mikroskop im Auflicht. Seitenlänge des Bildausschnittes ca. 1/10 mm.

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.

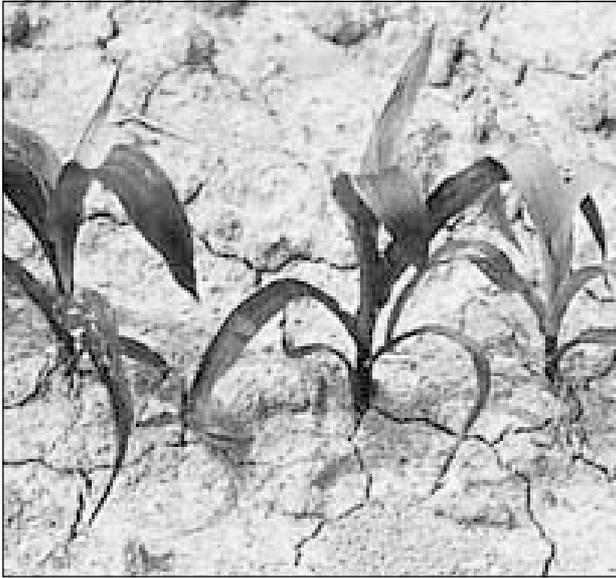


Abb. 21: Lössboden. Teilbrache im Mais, stark verschlämmt. Bei geringer Hangneigung besteht starke Erosionstendenz.

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.

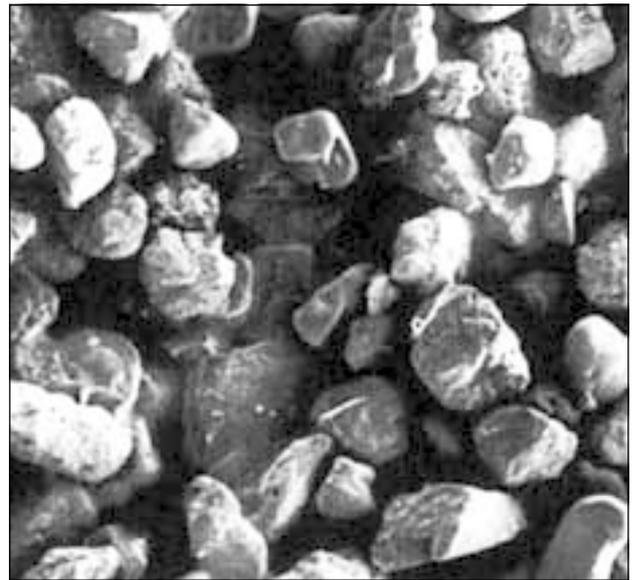


Abb. 22: Sand (Gemisch verschiedener Mineralien). Die Seitenlänge der Abbildung entspricht ca. 1 cm.

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 Ablagerungsvor- gänge entstandenen Schichten gröberen und feine- ren Sandes sind deutlich unterscheidbar.

Fühlprobe

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

Im erdfeuchten Zustand kann mit den Fin- gern 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)

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

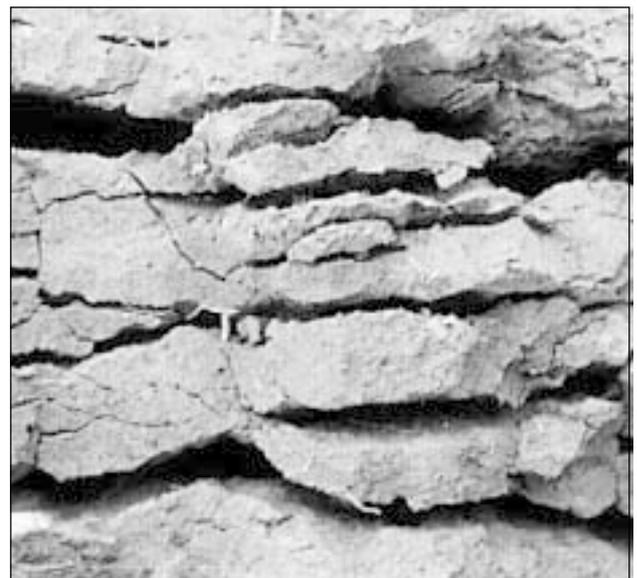


Abb. 25: Vor allem schluffige Böden zeigen oft plattige, horizontalrissige Strukturen.

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. 21).

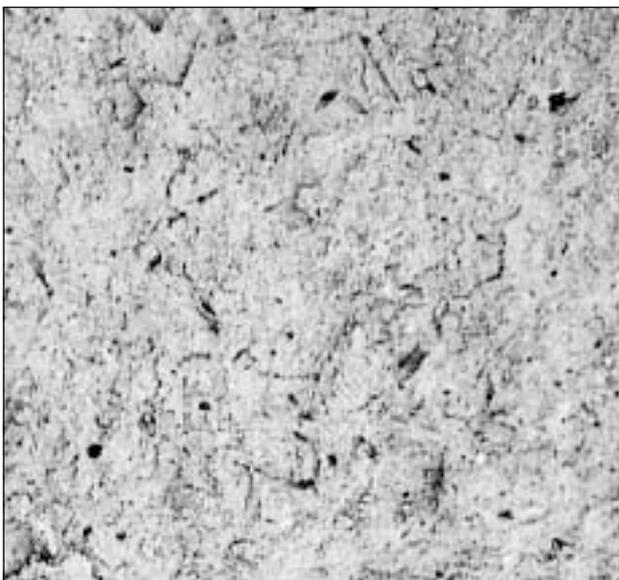


Abb. 26: Bei günstiger Körnung und Lagerung kann das Kohärentgefüge biologisch aktiv und sehr fruchtbar sein (Lössgebiete).

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.

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 g/cm^3 oder in Mg/m^3 (Megagramm pro Kubikmeter) ausgedrückt und liegt innerhalb folgender Bereiche:

Scheinbare Dichte/Lagerungsdichte/Raumgewicht (D_s)

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

Reelle Dichte/spezifisches Gewicht (D_r)

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

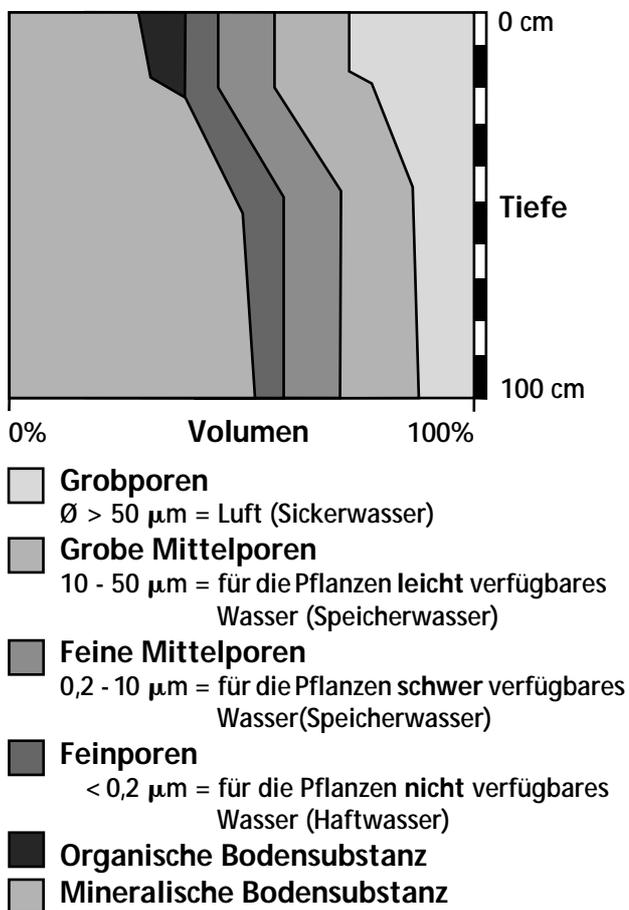


Abb. 34: Das Schema zeigt die Volumenanteile der festen Bodensubstanz und die Verteilung der Poren nach Grössenklassen in verschiedenen Tiefen am Beispiel eines humosen, gepflügten Lehmbodens. Dabei entspricht das Volumen der Grobporen > 50 µm der Luftkapazität (in der Furche 0 - 20 cm erhöht), die Summe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

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.

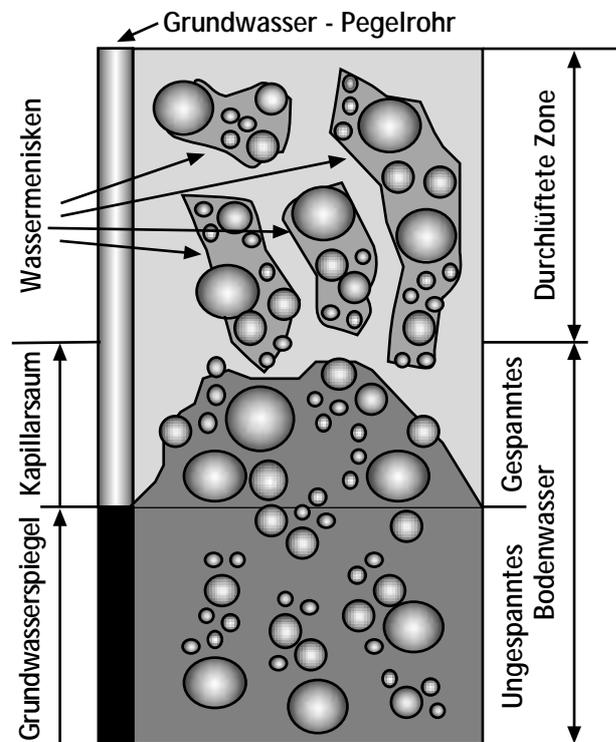
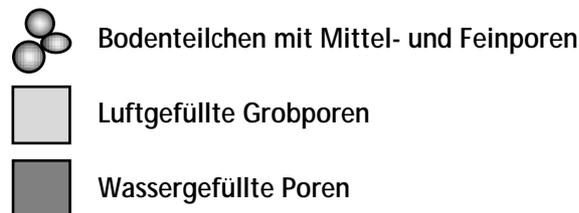


Abb. 38: Schematische Darstellung der Formen des Bodenwassers.

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

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.

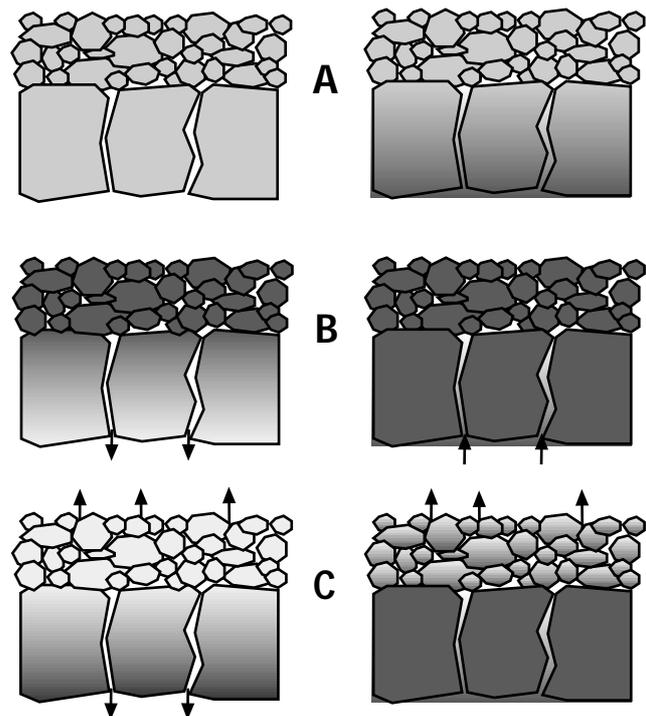


Abb. 39: Unterschiede des Entwässerungsverhaltens zwischen einem durchlässigen (links) und einem grundnassen Boden (rechts).

- 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 (4) und (5).

Masseinheiten

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

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

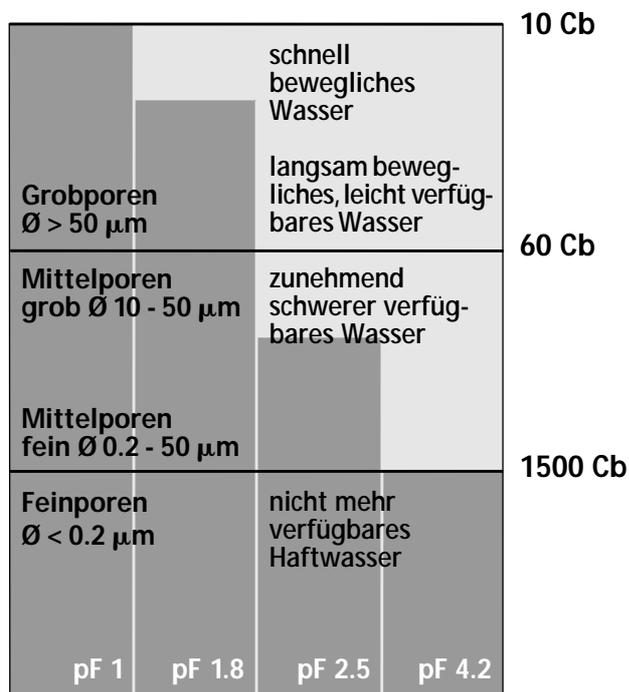


Abb. 40: Die dunkle Fläche stellt wassergefüllte Poren dar. Die entwässerten Bereiche für die Saugspannung zwischen pF 1 (nahezu gesättigt) und pF 4.2 (permanenter Welkepunkt) sind heller dargestellt. Das Wasser im Bereich < 6 Cb wird als Gravitationswasser bezeichnet. Zwischen 6 - 60 Cb ist das Wasser 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 (5)

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:

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

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

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

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

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

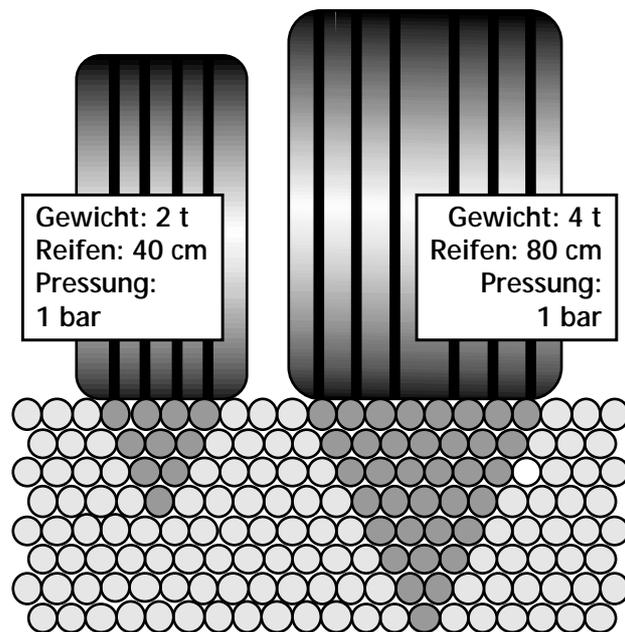


Abb. 41: Dieses vereinfachte Walzenmodell zeigt die Druckübertragung von Rädern in die Tiefe: Grau sind die mit einer Gewichtseinheit belasteten Bodenteilchen und somit der Bereich der Druckfortpflanzung in die Tiefe angegeben. Trotz gleicher Bodenpressung erfolgt die Druckfortpflanzung rechts bis in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

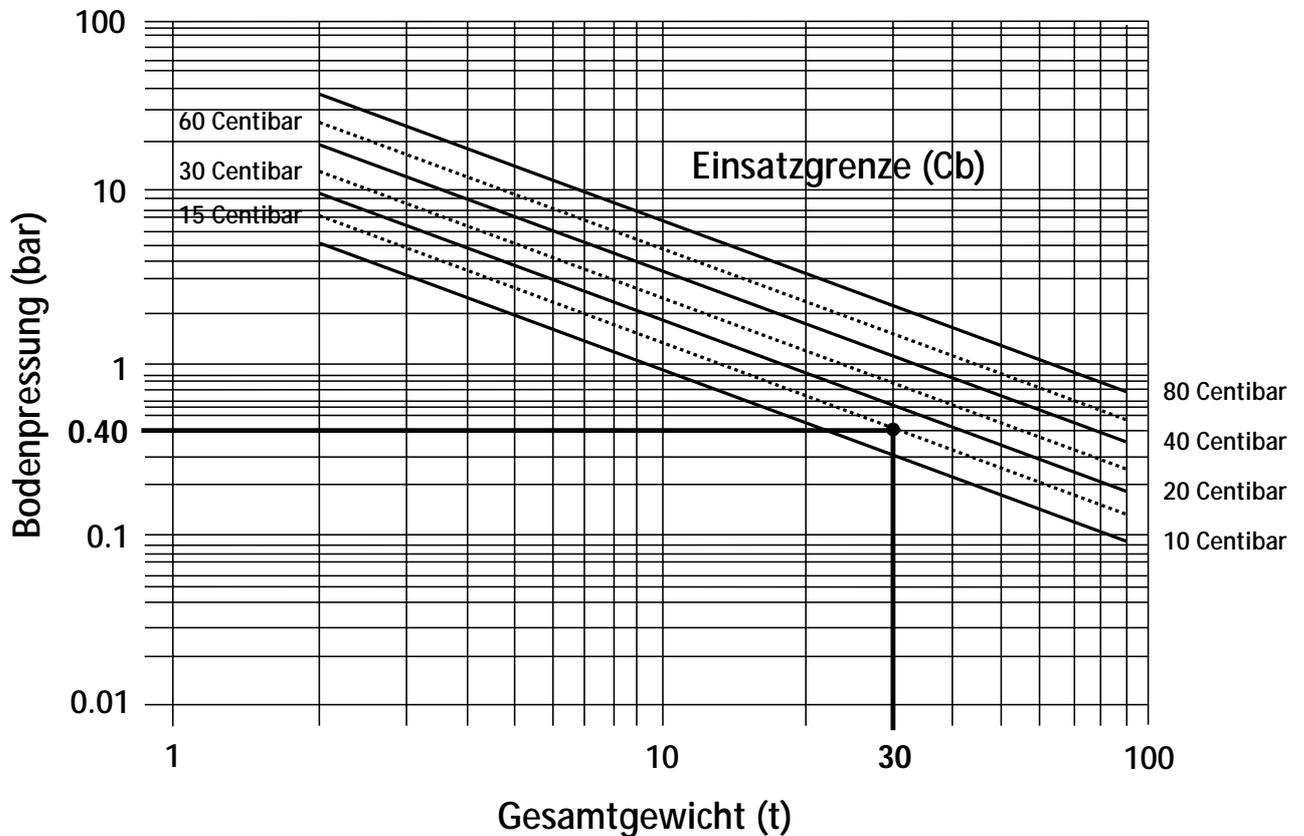
7.4 Saugspannung (y) und Maschineneinsatz (4, 5)

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:

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

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 (4, 5) 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 (4, 5, 6, 7, 8, 9).

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.

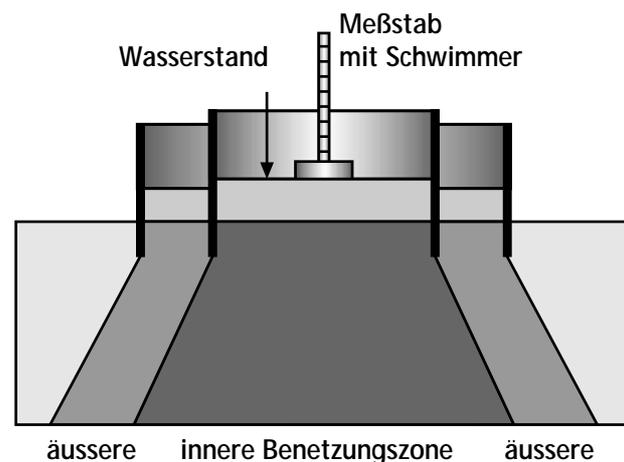


Abb. 43: Schema eines Doppelring-Infiltrimeters (Schnitt).

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.

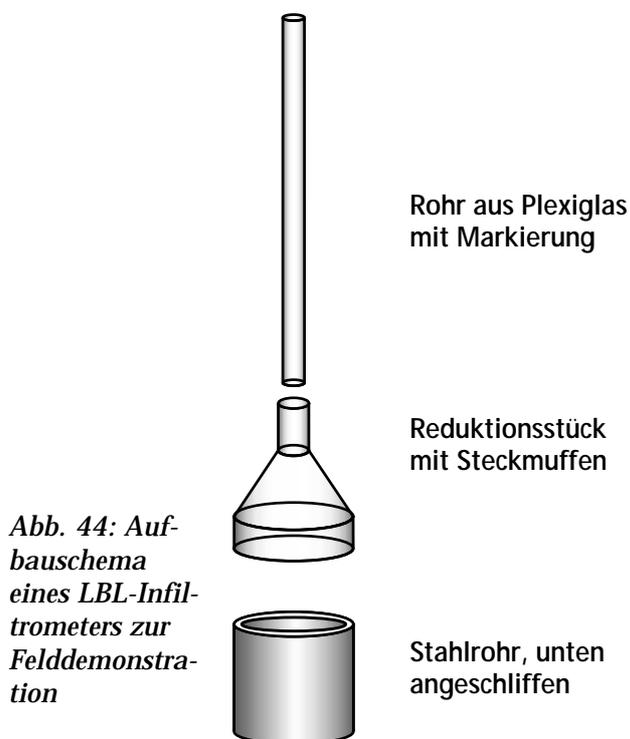


Abb. 44: Aufbauschema eines LBL-Infiltrometers zur Felddemonstration

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 steinigem 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 ~ 4 mm/h ~ 10 cm/Tag (5, 8).

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_{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_{sat} -Messungen kleiner ist als $10^{-6} \text{ m/s} \sim 10^{-4} \text{ cm/s} \sim 4 \text{ mm/h} \sim 10 \text{ cm/Tag}$ (5, 8).

Im Labor:

Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_{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_{sat}) herleiten lässt.

Diese Leitfähigkeit wird in folgende Klassen unterteilt (6, 8):

Einteilung nach Methode PYZYL-WD - FAL (6)					Andere Einteilung nach Vorschlag FaBo ZH (8)
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	
$1.2 \cdot 10^{-6}$ bis $4.6 \cdot 10^{-7}$	4 bis 1.7	gehemmt	staufeucht bis schwach staunass	pseudogleyige Böden, Braun- erde-Pseudogleye	Durchlässigkeitsklasse klein, schlecht durchlässig (10^{-6} bis 10^{-7} m/s; 0.4 bis 4 mm/h)
$4.6 \cdot 10^{-7}$ 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).

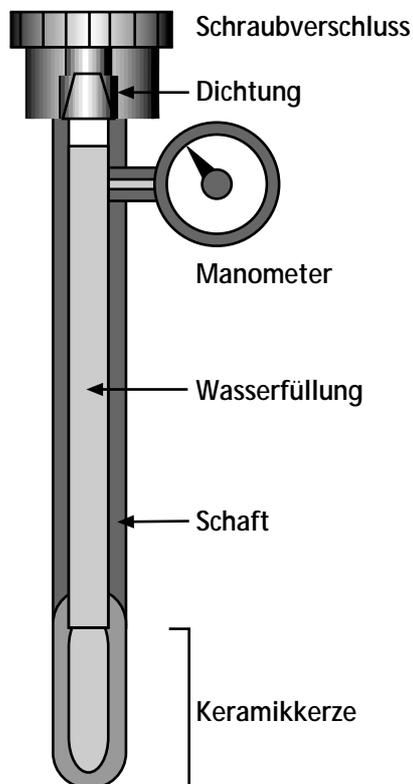


Abb. 46: Schematische Darstellung eines Manometer-Tensiometers.

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 (4, 5). 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

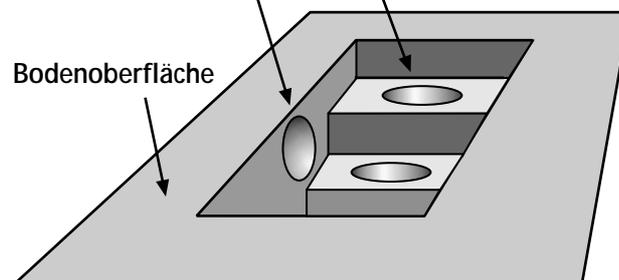


Abb. 49: Schematische Darstellung der Probenahme im stufig abgetieften Profil. In der Praxis müssen auf jedem Tiefen-Niveau natürlich mehrere Proben genommen werden. Die allenfalls durch den maschinellen Aushub des Profils verursachten Verdichtungen und Verschmierungen müssen vorgängig sauber entfernt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

Weiterbearbeitung im Labor

Die ungestörte Probe kann im Labor zu weiteren Messungen (z.B. Porenvolumen, Porenverteilung, gesättigte Wasserleitfähigkeit) 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 Mg/m^3 oder in g/cm^3 angegeben. Für die Bestimmung des Trockengewichtes wird die Probe während mehrerer Stunden bei 105°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

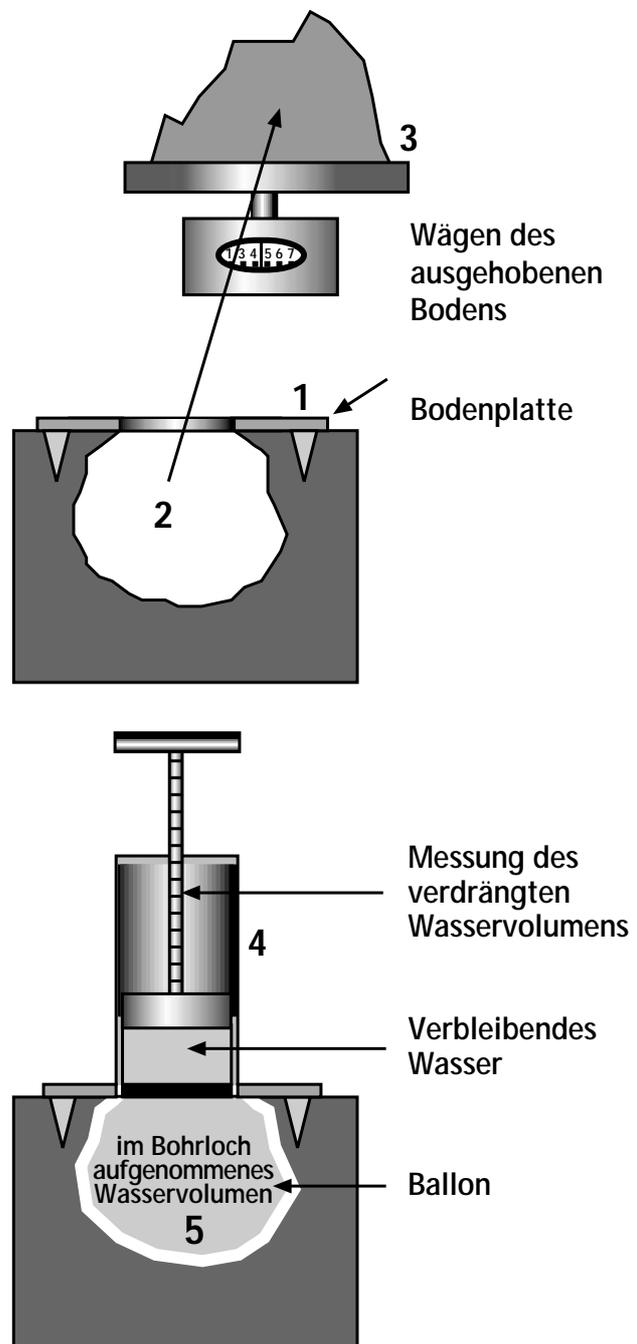


Abb. 50: Schematische Darstellung des Arbeitsablaufes eines Densitometers im Schnitt. Beschreibung nachstehend.

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.

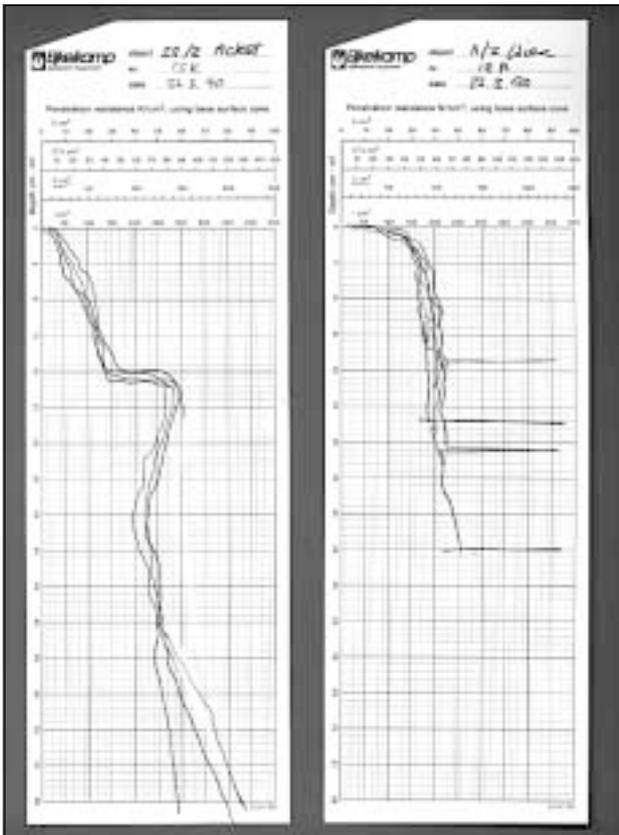


Abb. 51: Zwei Messstreifen als Beispiele direkt aufgezeichneter Penetrogramme mit je 4 bzw. 3 Messungen. Links: Acker im Lössgebiet; die bearbeitungsbedingte Verdichtungszone (15-25 cm Tiefe) ist klar erkennbar. Rechts: Penetrogramm aus einer Naturwiese; der oberflächliche Einstichwiderstand ist deutlich 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 (7). Dieses System reagiert weniger empfindlich auf Steine und Trockenheit.

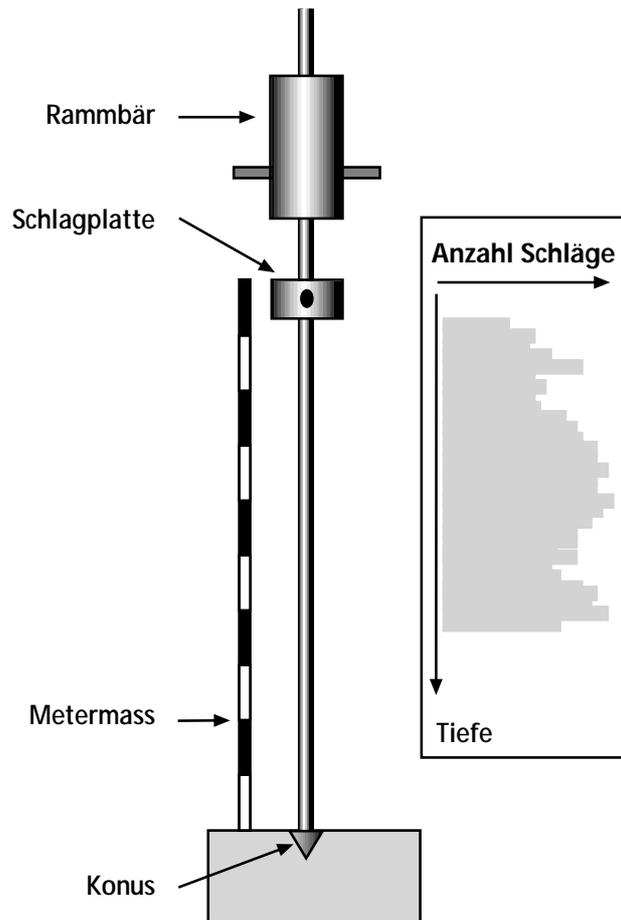


Abb. 52: Die Handramme in einfachster Ausführung. Die Darstellung des Eindringwiderstandes erfolgt in Form sog. Histogramme.

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 (7).

Ein weiteres System ist die sog. PANDA-Sonde (9). Es handelt sich dabei um ein tragbares Feldmessgerät (Abb. 53).

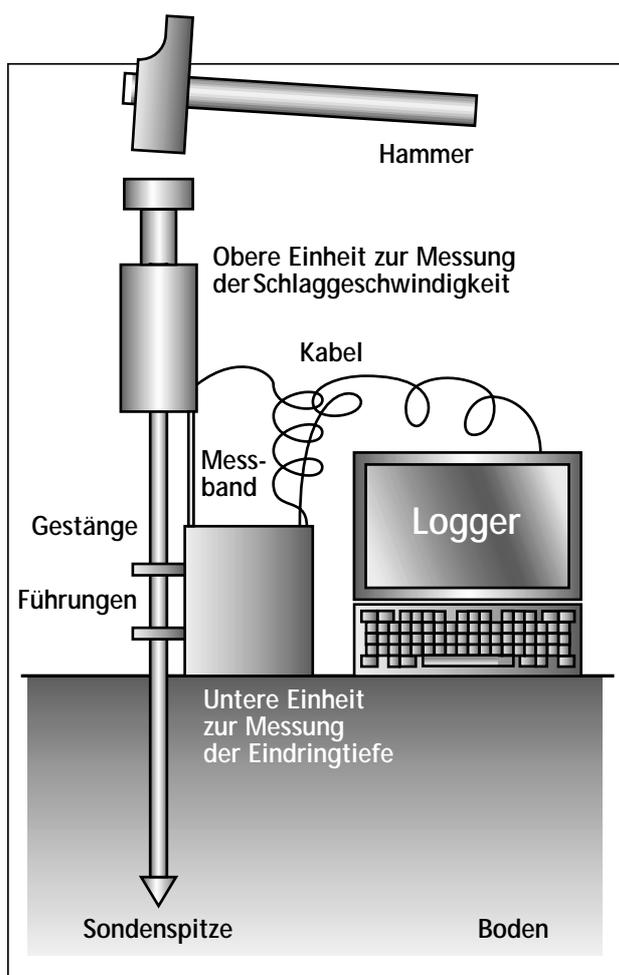


Abb. 53: Schematische Darstellung der PANDA-Sonde und ihrer Komponenten (9).

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 (5):

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 Schlurfgeräusch 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. Verordnung vom 1. Juli 1998 über Belastungen des Bodens (VBBo), SR 814.12
2. 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
3. VSS, SN 640 581a, Erdbau, Boden; Grundlagen, Zürich, 1998
4. BEW, Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen (Bodenschutzrichtlinien), Bern, 1997
5. VSS, SN 640 583, Erdbau, Boden; Eingriff in den Boden, Zwischenlagerung, Schutzmassnahmen, Wiederherstellung und Abnahme, Zürich, 2000
6. FAL, IUL, RAC & FAW, "Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten", Zürich-Reckenholz, 1997
7. H. Otto, Geotechnik für die Praxis, 4. erweiterte Auflage, Aarau, 1990
8. Amt für Landschaft und Natur des Kantons Zürich, Interne Berichte zur Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (ksat.), Fachstelle Bodenschutz, Zürich, 1998, 1999, 2000
9. Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich, Fachberichte zur Messung von Bodenverdichtungen im Feld, Zürich, 1997, 1998, 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

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