

BODENPHYSIK

gelesen von

Dr. H. Lettner
Universität Salzburg (Biophysik)

1.	Einleitung / Überblick	2
2.	Böden als Dreiphasensystem	4
2.1.	Definitionen	4
2.1.1.	Bodenvolumen - Porenvolumen - Porenziffer etc.	4
2.2.	Aggregat- und Interaggregatporosität	6
2.3.	Repräsentatives Elementarvolumen (REV)	7
2.4.	Skalenniveaus in der Bodenphysik	7
2.5.	Eigenschaften poröser Medien	7
2.5.1.	Porengrösse, Porengeometrie	7
2.5.2.	Reaktive Oberflächen	10
3.	Festphase	11
3.1.	Textur	11
3.1.1.	Primärpartikel	11
3.1.2.	Einfluss von Teilchenparametern auf Poren-Kenngrössen	13
3.1.3.	Korngrössen-Verteilung	14
3.1.4.	Einteilung in Bodenarten aufgrund der Korngrössen	15
3.2.	Struktur	15
3.2.1.	Ökologische Bedeutung der Bodenstruktur	15
3.2.2.	Elemente der Bodenstruktur (Synonym = Bodengefüge)	16
3.2.3.	Strukturgenese	19
3.2.3.1.	Schrumpfung	19
3.2.3.2.	Oberflächen-Spannung oder Oberflächen-Energiedichte	20
3.2.3.3.	Rissbildung	23
3.2.3.4.	Quellung	25
3.2.4.	Strukturstabilität	28
3.2.4.1.	Faktoren der Strukturstabilität	28
3.2.5.	Kräfte, Drücke, Verformungen in Böden	32
3.2.5.1.	Scherwiderstand als Bodeneigenschaft	33
3.2.5.2.	Der Mohr'sche Spannungskreis	35
3.2.5.3.	Verformungen	37
3.2.5.4.	Messungen der Strukturstabilität	38
4.	Die Flüssigphase	41
4.1.	Wassergehalt von Böden	
4.1.1.	Definitionen und Beziehungen	
4.2.	Eigenschaften des Bodenwassers	
4.2.1.	Viskosität	
4.2.1.1.	Definition der Oberflächen-Spannung	
	Temperaturabhängigkeit der Wassereigenschaften	
	Kapillarität	
	Kapillarhub, Kapillardepression	
	Wasserspannungskurve	
	Prinzip	
	Messmethoden	
	Äquivalentproben-Grössenverteilung	
	Hysterese	
5.	Literatur	
6.	Anhang	
6.1	Bodensystematik	
6.2	Horizontsystematik	

1. Einleitung / Überblick

Probleme vielfach auch noch auf elementarer Ebene.

Fragestellung: welche Bedeutung haben Makroporen für den Stofftransport? - sie sind kaum zu messen, kaum zu modellieren jedoch wichtig für Schadstoff-Transport:

- Grundwasser-Kontamination;
- Beurteilung und Berücksichtigung der Räumlichen Variabilität von Transportparametern;
- Parameteridentifikation unter Feldbedingungen?
- Ersatzparameter, effektive Parameter?

Böden: räumlich gesehen jener abschnitt von der Boden-Oberfläche bis zum Muttergestein reicht.

- Die Verwitterung führt zur Ausbildung von Horizonten = Horizontierung, sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Ausdehnung;
- Vertikale Muster + physikalische chemische Eigenschaften: Grundlage der Klassifikation nach verschiedenen Systemen: FAO, Soil Tax, BKA, num Klassifikation;
- Physikalisch: dynamische, strukturierte, poröse Medien.

Funktionen: essentielle Bestandteile von Ökosystemen mit

- Wasserspeicherung in verfügbarer Form für Pflanzen;
- Sauerstoff-Versorgung der Pflanzenwurzeln;
- reaktive Oberflächen, Speicher von pflanzenverfügbaren Nährstoffen;
- ermöglichen der Vegetation die Verankerung des Wurzelsystems;
- Produktionsfaktor.

Boden als Schadstoff-Filter

- von Bedeutung für den Grundwasser-Schutz.
Schadstoff: problematisch, ist eine Frage der Dosis. Stickstoff gilt als essentieller Nährstoff, wirkt aber bei zu hohen Konzentrationen oder bei Applikation zum falschen Zeitpunkt als ein Schadstoff;
Auswaschung des Überschusses als Nitrat = Kontamination des Grundwassers
- Pflanzen-Standorte;
- Bodenbiologische, bodenchemische und bodenphysikalische Prozesse greifen ineinander über.

Bodenphysikalisch:

- Durchwurzelbarkeit;
- Verschlammungsneigung der Boden-Oberflächen;
- thermische Bodeneigenschaften;
- Sauerstoff-Versorgung;
- Wasserspeicherung;
- Wasserverfügbarkeit, Parameter des Wassertransportes.

Nutzungskonflikte

Aufgaben der Bodenphysik = Physik poröser Medien, entwickelt aus den Erfordernissen des Pflanzenbaues = empirische Gefügekunde und Meliorationswesen, Dräntheorie.

Grundlagen-Forschung

- Statik und Dynamik der Lagerung (Bodenmechanik);
- Wassertransport in und Wasserhaushalt von Böden (Bodenhydrologie);
- Wärmetransport und Energieumsätze in Böden (Boden-Thermodynamik);
- Gastransport in Böden (Transport in porösen Medien);
- Nähr- und Schadstoff-Transport in Böden (Transport in porösen Medien);
- räumliche und zeitliche Variabilität physikalischer Bodeneigenschaften (Geostatistik, stochastische Prozesse).

Anwendungsorientierte Forschung

- Pflanzenproduktion;
Belastung der Böden durch schwere Maschinen = Industrialisierung, bodenmechanische Probleme.
- Meliorationswesen und Kulturtechnik
Dränung (= Drainagierung ?);
Bewässerungs-Landbau, Wasser als limitierender Faktor - Verdunstung folglich Absenkung des Grundwasser-Spiegels.
- Bewässerungs-Landbau.
- Bodenschutz, Grundwasser-Schutz.

Beispiele

1. Wärmegewinnung aus dem Boden mittels Wärmepumpen, Abkühlung führt zur Beeinflussung der Standorts-Ökologie, ? Vorhersagbarkeit - Einfluss auf Vegetationsentwicklung, verringerte Wurzelaktivität, Herabsetzung der Transpiration.
 - Einfluss auf Pflanzenwuchs, Wasserhaushalt, Zunahme der Tiefensickerung;
 - mögliche Mehrbelastung des Grundwassers;
2. Nitratproblematik: durch Grünland-Umbrüche, Zusammenbruch der Denitrifikations-Kapazität.

mögliche Ursachen werden diskutiert

- Überdüngung mit Mineraldünger;
- Überdüngung mit organischem Dünger (aus Massen-Tierhaltung);
- Nutzungsänderungen;
- Umbruch von Dauer-Grünland;
- Acker - Sonderkulturen (z.b. Spargel);
- atmosphärische Einträge;
- Zusammenbruch der Denitrifikations-Kapazität im Grundwasser;
- Lecks in Abwassersystemen.

Bodenphysik: Böden als strukturierte poröse Medien, thermische, hydraulische und elektrische Eigenschaften, Stoff und Energiedynamik.

aus Sicht der Physik: 3 Phasen:

1. Feststoff-Phase;
2. Gasphase;
3. Flüssigphase;

Eigenschaften durch chemismus und die räumliche Verteilung der Phasen bestimmt.

Ein ausgewogenes Verhältnis der 3 Phasen ist relevant:

- fehlende Gasphase - Vernässung;
- fehlende Flüssigphase - Wassermangel, Austrocknung;
- fehlende Feststoff-Phase - mangelnde Verankerungsmöglichkeit des Wurzelsystems (Hydrokultur);
- fehlende Gas- und Flüssigphase - nackter Fels;

statistische Beurteilung der Primärpartikel: bestimmt Bodentextur bzw. Bodenart;

räumliche Verteilung (Verteilung der Hohlräume): bestimmt statistische und räumliche Porengrößen-Verteilung;

Bodengefüge oder Bodenstruktur : räumliche Verteilung der Festsubstanz und der Hohlräume

2. Böden als Dreiphasen-System

2.1. Definitionen

2.1.1. Bodenvolumen - Porenvolumen - Porenziffer etc.

BodenVolumen = WasserVolumen + LuftVolumen + SubstanzVolumen

$$B_v = W_{sv} + L_v + S_v$$

B_v wird oft als starr angenommen, ist allerdings nur näherungsweise gültig, da es zeitlichen Änderungen unterworfen ist:

Bodenbearbeitung, Quellung, Schrumpfung, Setzung, Mechanische Belastung

PorenVolumen = LuftVolumen + WasserVolumen

$$P_v = L_v + W_{sv}$$

BodenMasse = WasserMasse + LuftMasse + SubstanzMasse (Festsubstanz)

$$B_m = W_{sm} + L_m + S_m$$

$$\approx \text{WasserMasse} + \text{SubstanzMasse}$$

$$\approx W_{sm} + S_m$$

Trockenraum-Dichte ρ_b (Bodendichte):

$$\rho_b = \frac{S_m}{B_v} \quad [g/m^3] \quad \begin{array}{l} S_m, \text{ Substanzmasse} \\ B_v, \text{ Bodenvolumen} \end{array} \quad \begin{array}{l} [g] \\ [m^3] \end{array}$$

Dichte der Festsubstanz:

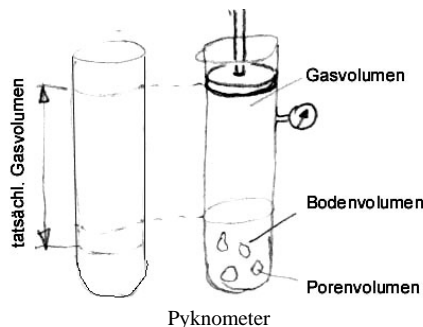
$$\rho_s = \frac{S_m}{S_v} \quad [g/m^3] \quad \begin{array}{l} S_m, \text{ Substanzmasse} \\ S_v, \text{ Substanzvolumen} \end{array} \quad \begin{array}{l} [g] \\ [m^3] \end{array}$$

Das Porenvolumen, ist in der Literatur häufig mit P_v abgekürzt, bzw. richtiger der Porenanteil, ist, wie die Dichte, ein Verhältnis einer Messgrösse zum Gesamtvolumen. Porenvolumen = Porosität = Porenanteil (n), weil anstelle der Volumina auch die Dichten verwendet werden können:

$$n = \frac{W_{sv} + L_v}{B_v} \quad \text{bzw.} \quad \begin{array}{l} W_{sv}, \text{ Wasservolumen} \\ L_v, \text{ Luftvolumen} \end{array} \quad \begin{array}{l} [m^3] \\ [m^3] \end{array}$$

$$n = \frac{B_v - S_v}{B_v} = 1 - \frac{S_v}{B_v} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad [-] = [\%]$$

Die Werte werden üblicherweise in Prozent angegeben. Die Bezeichnung Porenvolumen ist irreführend, weil es sich nicht um ein Volumen, sondern um einen Volumanteil handelt, die Grösse ist aber allgemein eingeführt und wird in diesem Sinn auch gebraucht. Die Messung der Porosität erfolgt über die Bestimmung der Dichten ρ_s und ρ_b . oder mittels eines Pyknometers, das nach der Gasgleichung ($p \cdot V = \text{konstant}$) arbeitet.



Weil das Bodenvolumen eine variable Grösse ist, das Feststoff-Volumen aber eine konstante Grösse, ist vor allem in der Bodenmechanik eine verbreitete Messgrösse die Porenziffer P_z oder ε . Bei dieser Grösse ist das Volumen der Poren auf das Feststoff-Volumen bezogen:

Porenziffer (P_z , ε):

$$\varepsilon = \frac{W_{sv} + L_v}{S_v} \quad \varepsilon = \frac{\rho_s}{\rho_b} - 1 \quad [-] \quad \begin{array}{l} W_{sv}, \text{ Wasservolumen} \\ L_v, \text{ Luftvolumen} \\ S_v, \text{ Substanzvolumen, Festsubstanz} \end{array} \quad \begin{array}{l} [m^3] \\ [m^3] \\ [m^3] \end{array}$$

ε hat den Vorteil, dass sich der Bezugswert, das Volumen der Festsubstanz (S_v), nicht ändert. Die Verwendung von ε kommt aus der ingenieurgemässen Betrachtungsweise von Böden.

Wassergehalt gravimetrisch (Θ_g):

$$\Theta_g = \frac{W_{sm}}{S_m} \quad [\text{g/g}] \text{ oder } [\%] \quad \begin{array}{l} W_{sm}, \text{ Wassermasse} \\ S_m, \text{ Substanzmasse} \end{array} \quad \begin{array}{l} [\text{g}] \\ [\text{g}] \end{array}$$

beachte die Bezugsgrösse ist die Masse der Festschubstanz (**Wassergehalt** ist daher ein weiterer irreführender Begriff !!)

Wassergehalt volumetrisch (Θ_v):

$$\Theta_v = \frac{W_{sv}}{B_v} \quad [-] \text{ oder } [\%] \quad \begin{array}{l} W_{sv}, \text{ Wasservolumen} \\ B_v, \text{ Bodenvolumen} \end{array} \quad \begin{array}{l} [\text{m}^3] \\ [\text{m}^3] \end{array}$$

Luftgehalt (a):

$$a = \frac{L_v}{B_v} \quad [-] \text{ oder } [\%] \quad \begin{array}{l} W_{sv}, \text{ Wasservolumen} \\ B_v, \text{ Bodenvolumen} \end{array} \quad \begin{array}{l} [\text{m}^3] \\ [\text{m}^3] \end{array}$$

Sättigungsgrad (s):

$$S = \frac{W_{sv}}{W_{sv} + L_v} \quad [-] \text{ oder } [\%] \quad \begin{array}{l} W_{sv}, \text{ Wasservolumen} \\ L_v, \text{ Luftvolumen} \end{array} \quad \begin{array}{l} [\text{m}^3] \\ [\text{m}^3] \end{array}$$

Wassergehalt, Luftgehalt und Sättigungsgrad werden häufig auch in Prozent angegeben. Die Umrechnung der einzelnen Grössen ineinander wird in der Praxis häufig verwendet:

Zahlenangaben (Häufigste Werte nach Hartge, 1991)

ρ [g/m^3]	Bodentyp	d_B [g/cm^3]	Pv, n [%]	Pz, ϵ [-]
Substanz ρ_s	Mineralböden	<2.65		
	Organische Böden	<1.2		
Poren ρ_b	Sandböden	1.19-1.67	37-55	0.58-1.22
	Lehmböden	1.19-1.96	26-55	0.25-1.22
	Schluffböden	1.19-1.53	42-55	0.72-1.22
	Tonböden	0.92-1.32	50-65	1.00-1.85
	Organische Böden	0.12-0.48	60-90	1.50-9.00

mittlere Aufteilung des Porenraumes nicht sehr aussagekräftig - wesentlich ist die räumliche Verteilung und Anordnung von Festschubstanz und Hohlräumen.

2.2. Aggregat- und Interaggregatporosität

Zerlegung des Porenraumes in aggregierten Böden in das Porenvolumen der Aggregate Pv_A und in das Porenvolumen zwischen den Aggregaten Pv_I ; d.h. der Porenraum kann in folgende Kompartimente zerlegt werden:

Aggregatporosität:

$$n_A = \frac{Pv_A}{Bv} \quad [-] \quad \begin{array}{l} Pv_A, \text{ Porenvolumen der Aggregate} \\ Bv, \text{ Bodenvolumen} \end{array} \quad \begin{array}{l} [m^3] \\ [m^3] \end{array}$$

Interaggregat-Porosität:

$$n_I = \frac{Pv_I}{Bv} \quad [-] \quad \begin{array}{l} Pv_I, \text{ Porenvolumen zw. d. Aggregaten} \\ Bv, \text{ Bodenvolumen} \end{array} \quad \begin{array}{l} [m^3] \\ [m^3] \end{array}$$

Porenziffer der isolierten Aggregate:

$$e_A = \frac{Pv_A}{Sv} \quad [-] \quad \begin{array}{l} Pv_A, \text{ Porenvolumen der Aggregate} \\ Sv, \text{ Substratvolumen} \end{array} \quad \begin{array}{l} [m^3] \\ [m^3] \end{array}$$

Porosität der isolierten Aggregate n_I :

$$n_I = \frac{e_A}{1 + e_A} \quad [-]$$

Die Aggregatporosität (bezogen auf das Bodenvolumen) lässt sich aus diesen Beziehungen angeben als:

$$n_A = (1 - n_I) \cdot \frac{n_I}{1 - n_I} \quad [-]$$

2.3. Repräsentatives Elementarvolumen (REV)

Keinesfalls trivial, Funktion der räumlichen Variabilität der Messgrösse. Die Varianz der Messgrösse nimmt mit zunehmenden Probenvolumen in der Regel ab.
Es kann auch sein, dass ein REV gar nicht existiert, wenn bei zunehmender Volumensvergrößerung ständig neue Strukturelemente hinzukommen

2.4. Skalenniveaus in der Bodenphysik

Mikroskala	0.1 m	Aggregate, Horizonte, Pedon	100 sec	Kationenaustausch, Makroporenfluss
Mesoskala	10 m	Einzelne Felder, Pedotop	1 Tag	mikrobielle Umsetzungen in Böden, Wasserbewegung in der Bodenmatrix
Makroskala	1000 m	Einzugsgebiete, Landschaft	1 Jahr	Gebietsbilanzen, Kriechprozesse an Hängen

2.5. Eigenschaften poröser Medien

2.5.1. Porengrösse, Porengeometrie

für Transportprozesse ist Porenanteil, Porengrössen-Verteilung und Porengeometrie relevant.

Porengrössen-Verteilung: Bestimmung als Äquivalentporen-Grössenverteilung in Grob-, Mittel- und Feinporen; Zuweisung von Äquivalent-Durchmessern.

Bedeutung der Porendurchmesser für Transporteigenschaften aus Hagen-Poiseuille'sches Gesetz (denn je kleiner der Poren-Durchmesser desto stärker wird das Wasser zurückgehalten):

$$q = r^4 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta p}{8 \cdot \eta \cdot l} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

q , transport. Wassermenge pro Zeit $[\text{m}^3/\text{s}]$
 r , Kapillarradius $[\text{m}]$
 Δp , antreibende Druckdifferenz $[\text{N}/\text{m}^2]$
 l , Länge der Kapillare $[\text{m}]$
 η , Viskosität des Wassers $[\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2]$

$$F_r = \eta \cdot A \cdot \frac{\Delta v}{\Delta d}, \quad \eta = \frac{F_r \cdot \Delta d}{A \cdot \Delta v}, \quad \text{bzw.} \quad F_r = \eta \cdot A \cdot \frac{dv}{dd}$$

Porenäquivalent-Durchmesser ist nicht ausreichend. Beachte Einfluss von r^4 . (Zur Viskosität η [Pa·s] Zeichnung einfügen)

Weitere transportbestimmende Eigenschaften:

- Tortuosität, topologische Eigenschaft (Verwickeltheit),
- Kontinuität (Zusammenhang)
- Konnektivität (Vernetzung) des Porensystems

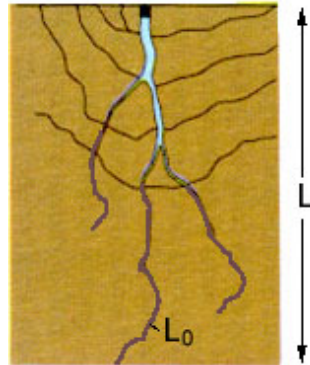
Äquivalent-Durchmesser [μm]	Matrixpotential [cm]	Bezeichnung
> 50	> -60	weite Grobporen
50 - 10	-60 bis -300	enge Grobporen
10 - 0.2	-300 bis -15000	Mittelporen
< 0.2	< -15000	Feinporen

Tortuosität: ist ein Mass für die wechselnden Poren-Durchmesser entlang einer Bodenkapillare; sie wird von der Restriktivität und der Kontinuität charakterisiert und allgemein als der Kontinuitätskoeffizient (τ) bezeichnet:

$$\tau := \frac{L}{L_0} \quad [-] \quad \begin{array}{l} L, \text{ Länge der untersuchten Pore} \quad [m] \\ L_0, \text{ Länge einer geraden Pore} \quad [m] \end{array}$$

Anmerkungen:

- **Restriktivität:** wechselnder Durchmesser einer einzelnen Pore. Transport-eigenschaften (Dispersion, Hysteresis) sind in starkem Mass davon abhängig;
- **Kontinuität:** Wird in der Literatur häufig als Kehrwert der Tortuosität angegeben. Das ist irreführend und abzulehnen. Kontinuität heisst, dass die Poren zusammenhängend sind, dann können sie aber definitions-gemäss nicht tortuos sein. (Unsin-nigerweise wird für die Tortuosität der Ausdruck Kontinuitätsziffer verwendet);



Euler-Poincarè Charakteristik - EPC N_v , Anzahl isolierter Bereiche innerhalb des Porenraumes [-]

$$EPC = N_v - C_v \quad [m] \quad C_v, \text{ Anzahl der redundanter Verbindungen} \quad [-]$$

EPC $\gg 0$ für schwache Vernetzung

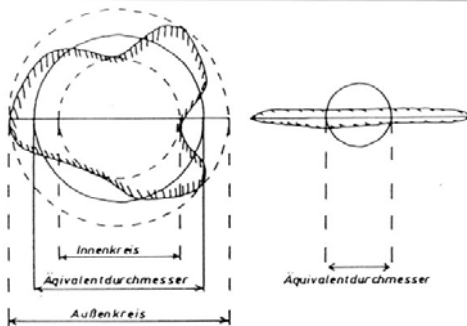
EPC $\ll 0$ für intensive Vernetzung

Analog des Äquivalent-Durchmessers von Körnern wird auch für Poren ein Äquivalent-Durchmesser d als Ersatzwert definiert. d gibt den Durchmesser der ebenen Kreiskapillare an, in der der Kapillaraufstieg ebenso hoch ist wie in der damit verglichenen Bodenpore. Der Äquivalent-Durchmesser ist aus der Wasserspannung errechenbar, wenn diese in Form der Ausstiegshöhe h angegeben ist.

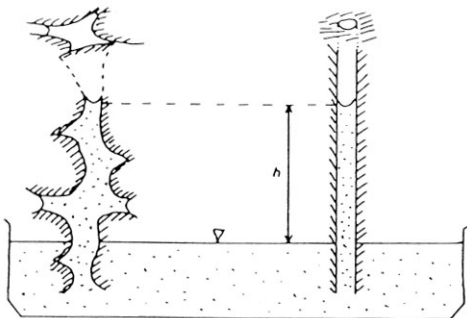
Verwendet wird dazu die Gleichung des kapillaren Aufstiegs in Röhren mit kreisförmigem Durchmesser:

$$r = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \alpha}{h \cdot \rho_w \cdot g} \quad [m]$$

r , Radius der Kapillare [m]
 γ , Oberflächen-Spannung d. Wassers [N/m]
 α , Benetzungs-, Grenzflächen-Winkel [°]
 ρ_w , Dichte des Wassers [g/m³]
 h , Steighöhe in der Kapillare [m]



Kornformen und Äquivalent-Durchmesser. Letztere Ersatzwerte für nicht bestimmbare, repräsentative, geometrisch definierte Durchmesser. Sie sind schematisch als Kreise eingezeichnet.



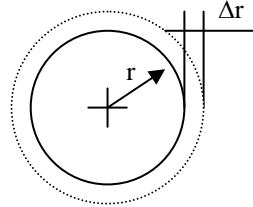
Der Äquivalent-Durchmesser einer Bodenprobe als Ersatzwert. Er gibt den Durchmesser der ebenen Kreiskapillare an, in der Kapillaraufstieg (h) ebenso hoch ist wie in der betreffenden Bodenprobe.

Oberflächen-Spannung (γ): ist die Tendenz einer Flüssigkeits-Oberfläche sich flachenmässig zusammenzuziehen und daher wie eine gedehnte Gummimembran zu wirken;

$$\gamma = \frac{\Delta W}{\Delta A} \quad \begin{matrix} [\text{N/m}] & \Delta W, \text{ erforderliche Arbeit} & [\text{N}\cdot\text{m}] \\ & \Delta A, \text{ Oberflächen-Änderung} & [\text{m}^2] \end{matrix}$$

Betrachte dazu ein Flüssigkeitströpfchen mit dem Druck (p) in der Kugel.

$$\begin{aligned} \Delta W &= \gamma \cdot \Delta A \\ &= \gamma (4 \cdot \pi (r + \Delta r)^2 - 4 \cdot \pi r^2) \\ &= \gamma 4 \cdot \pi (r^2 + 2 \cdot \Delta r \cdot r + \Delta r^2 - r^2), \\ &\text{da } 2 \cdot \Delta r \cdot r \gg \Delta r^2, \text{ wird die Gleichung vereinfacht} \\ &= \gamma 4 \cdot \pi \cdot 2 \cdot \Delta r \cdot r \\ \Delta W &= F \cdot \Delta r = p \cdot 4 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot \Delta r = \gamma 4 \cdot \pi \cdot 2 \cdot \Delta r \cdot r \end{aligned}$$

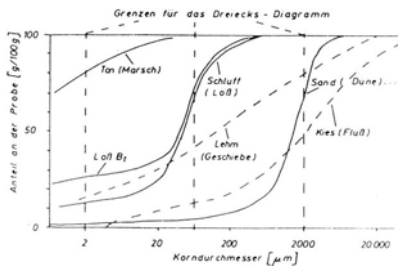


daraus ergibt sich ein interner Druck (p):

$$p = \frac{2 \cdot \gamma}{r} \quad \begin{matrix} [\text{N/m}^2] = & \gamma, \text{ Oberflächen-Spannung} & [\text{N/m}] \\ [\text{Pa}] & r, \text{ Tröpfchenradius} & [\text{m}] \end{matrix}$$

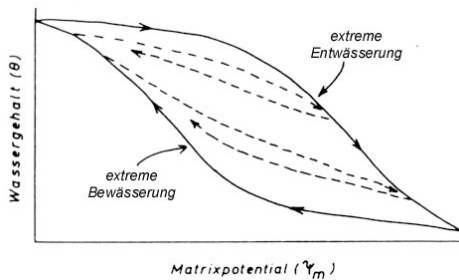
Für Wasser hat Gamma einen hohen Wert: $\gamma = 7.2 \cdot 10^{-2} \text{ N/m}$.
Der Benetzungswinkel für Wasser auf Glas ist 0° , $\alpha \cong 0^\circ$

Die Wasser-Spannungskurve selbst ist eine Summenkurve der Äquivalent-Durchmesser. Sie gibt die Porengrößen-Verteilung an und ist gewissermassen ein Analogon zur Korn-Summenkurve.



Summenkurven der Korngrößen-Verteilung für einige Böden. Die drei senkrecht gestrichelten Linien geben die Grenzen für die Ton-, Schluff-, und Sandfraktion im Körnungs-Dreieck wieder (s. 3.1.4).

Der Meniskus macht bei Be- und Entwässerung eines Bodens an ungleichen Engpässen halt. Das ist eine wesentliche Ursache der Hysterese der Wasser-Spannungskurve und bedingt eine Konvention über die Arbeitsweise ihrer Bestimmung. Im allgemeinen wird von Entwässerungskurven ausgegangen.



Hysteresisschleifen einer Wasser-Spannungskurve im Bereich zwischen der Entwässerungskurve nach extremer Bewässerung und der Bewässerungskurve nach extremer Entwässerung.

Die Poren-Größenverteilung in einem Boden ist keine Konstante, da die Lagerung in erheblichem Ausmass von der letzten Austrocknung, der stärksten Austrocknung und anderen Beanspruchungen bzw. Lasten abhängt.

(Abbildung texturgruppe -
Wasserleitfähigkeit abb. ?)

Primärporen

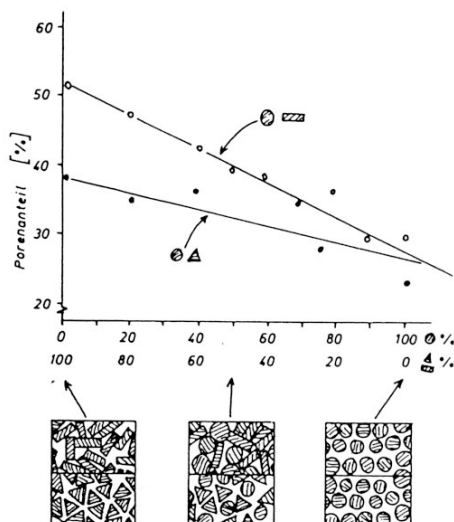
Primärporen entstehen bei der Ablagerung eines Sediments und beim Zerfall des festen Gesteinsverbandes. Sie bilden ein kontinuierliches, meist annähernd isotropes Hohlraum-System. Die Verteilung ist Korngrößen bedingt.

Sekundärporen

Diese Poren sind strukturbedingt und besteht aus flächigen Schrumpf- und Scherrissen und aus zylinderförmigen Wurzel- und Tiergängen und -röhren. Dieses Bodensystem ist meist anisotrop unter Bevorzugung der Vertikalen. Die Beständigkeit der Sekundärporen hängt vom Substrat ab, sie ist daher in Sanden eher gering und nimmt im allgemeinen mit Abnahme der Korngrösse zu. Die Häufigkeit der Sekundärporen nimmt -entstehungsbedingt - mit der Bodentiefe ab.

Häufige Poren-Größenverteilungen

	weite Grobporen	enge Grobporen	Mittelporen	Feinporen
Sand	10-20	20-40	3-12	2-8
Lehm	0-5	0-20	3-16	5-20
Schluff	0-10	5-25	7-20	5-20
Ton	0-5	3-20	5-15	25-45
Organischer Boden	7-30	20-30	25-50	15-25
Vulkanische Aschen	3-6	5-20	13-25	35-40



Einfluss der Mischung von zwei verschiedenen Kornformen auf den Porenanteil (Pv). Je weniger kreisförmig desto grösser ist das Pv. Die Kreisscheiben haben die dichteste Lagerung (Modellversuch mit Scheiben in einer Ebene).

Die Beeinflussung des Porensystems durch Vorgänge der Bodenentwicklung äussern sich in der Variationsbreite der auftretenden Wasser-Leitfähigkeits-Koeffizienten. Auch feinkörnige Böden können durch ein entsprechendes Sekundär-Porensystem die Wasser-Leitfähigkeit von Sanden aufweisen.

Die Poren-Größenverteilung beeinflusst wesentlich den Wasser- und Lufthaushalt im Boden.

2.5.2. Reaktive Oberflächen

Diese sind für Transport von Nähr und Schadstoffen relevant. Lösungs-, Fällungs-, Sorptions-, Desorptions-, Kationenaustausch-, Verdampfungs-, Kondensation-Prozesse etc; werden davon massgeblich beeinflusst.

Organische Substanz, Tongehalt und Tonmineralspektrum, Silizium, Eisen, Mangan und Aluminium-Oxide bzw. -Hydroxide.

3. Festphase

- Ökologische Bedeutung
Räumliche Verteilung und Benetzungseigenschaften definieren
Transporteigenschaften: Wasser- und Luft-Leitfähigkeit, Verfügbarkeit des Bodenwassers für Pflanzen.;
- Chemie beeinflusst thermisches Verhalten, modifiziert das Transportverhalten;
- Mechanische Eigenschaften relevant für Verankerung von Pflanzenwurzeln, Erosionsanfälligkeit, Sensibilität gegenüber mechanischen Belastungen.

3.1. Textur

Der Begriff Textur ist ein Synonym für Korngrößen-Verteilung!! unterscheide vom Begriff "Struktur", der wesentlich umfassender ist und zahlreiche "Strukturelemente" mit einschliesst (s. 3.4.).

3.1.1. Primärpartikel (wo sind die Sekundärpartikel?)

Die Zusammensetzung der Bodenmatrix ist sehr stark abhängig vom Verwitterungsgrad. Eingeteilt werden die Primärpartikel in:

1. Ausgangs-Gesteinsreste,
2. organischer Substanz,
3. primäre und sekundäre Minerale durch Pedogenese.

Je nach Boden, entsprechend der Korngrößen-Einteilung, kommen die Primärpartikel in unterschiedlicher Häufigkeit vor:

- Sand, Schluff: primäre Silikate, Glimmer Quarz, wenig in der Tonfraktion
- Schluff: sekundäre Hydroxide und Oxide
- Ton: Tonminerale

(Ton = 3 Bedeutungen, Gattung von Mineralen, Größenfraktion, Bodenart mit Korngrösse überwiegend im tonigen Bereich);

Die Primärpartikel kommen in unterschiedlicher Form und Grösse vor, sie können:

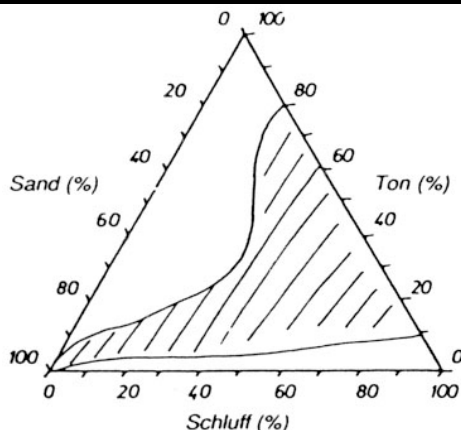
teils isoliert, teils verklebt, teils verbunden, oder teils verkittet

sein und sind die in der Regel zu höheren Struktureinheiten zusammengeslossen sein, d.h. es werden grössere Aggregate gebildet.

- Korngrösse, Kornformen sowie Einteilung in Grössenklassen

Korngrößen-Unterteilung nach Kartieranleitung (Feinunterteilung)

Feinboden < 2mm	μ	mm	Symbol	
Ton	< 2 μ	<0.002	T	
Schluff	2-63	0.002-0.063	U	
Sand	63-2000	0.063-2	S	
Grobboden > 2mm (Skelett)				
eckig, kantig: Grus		2-63	Gr	
gerundet: Kies		2-63	G	
Steine		>63	X	



Häufig vorkommende Korngrößen-Verteilungen; tonfreie Schluffe, reine Tone und Sand-Ton-Mischungen sind viel seltener als andere Mischungen.

Unterteilung ist allerdings nicht einheitlich, es gibt eine Reihe von Klassifikationssystemen:

DA-CE	Fines (silt or clay)					Fine sand		Coarse sand			
USBR	Fines (silt or clay)					Fine sand		Coarse sand			
FAA	Clay	Silt			Fine sand		Coarse sand				
AASHO ASTM	Colloids	Clay	Silt			Fine sand		Coarse sand			
USDA	Clay	Silt			Very fine sand	Fine sand	Med. sand	Coarse sand	Very coarse sand		
ISSS	Clay	Silt			Fine sand		Coarse sand				
	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.10	0.20	0.50	1.0	2.0
	particle sizes [mm]										

DA-CE: Department of Army, Corps and Engineers
 USBR: US Bureau of reclamation
 FAA: Federal Aviation Authority
 AASHO: Americ. Assoc. of State Highway Officials
 ASTM: Americ. Soc. for Testing and Materials
 USDA: US Department of Agriculture
 ISSS: International Society of Soil Science, wird als **Standard** benutzt
 DIN: Deutsche Industrienorm
 etc.

weitere sind wichtig für die Aufteilung des Porenraumes:

- Orientierung
- Mischung
- Packung

weites Spektrum von Kornformen; die Korngrösse bestimmt u.a. die Grösse der reaktiven Oberfläche, Austausch-Eigenschaften.

Die Porosität wird durch Kornform und Packung bestimmt.

Effektiver Durchmesser = Äquivalent-Durchmesser:

Bei Korngrössen-Bestimmung stellt sich das Problem, wie die Grösse geometrisch unregelmässiger Körner angegeben werden soll. Man hilft sich damit, indem ein Ersatzwert angegeben wird, der sogenannte **Äquivalent-Durchmesser**, der numerisch gleich dem Durchmesser einer Kugel mit dem gleichen Verhalten ist. Die Dichten müssen als gleich angenommen werden, denn sonst ist dieser Vergleich nicht zielführend.

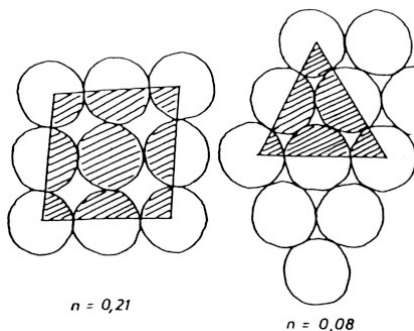
Zusammenhang von Korngrösse und Oberfläche

Texturklasse	eff. Durchmesser [mm]	Masse [g]	Fläche [cm ²]	Spez. Ofläche [cm ² ·g ⁻¹]
Kies	2	0.01131	0.125664	11.1
Sand	0.5	0.000177	0.007854	44.4
Schluff	0.002	1.13·E ⁻¹¹	1.26·E ⁻⁰⁷	1.11·E ⁺⁴
Ton	0.002	8.48·E ⁻¹⁵	6.35·E ⁻⁰⁸	7.5·E⁺⁶

Beeinflussung der Porosität durch Eigenschaften der Kornform Grösse und Lagerung

Wie gross ist das Porenvolumen?

Die kubisch dichteste Kugelpackung bei gleich grossen Kugeln ist dann gegeben, wenn eine Kugel von 12 anderen Kugeln berührt wird: Porenvolumen ca. 26%. **In der Natur liegt das Porenvolumina zwischen 38% und 42%.** Kornpackungen sind unregelmässig angeordnet mit Kontaktzahlen zwischen 5 bis 9 je Korn.



Schema des Zusammenhangs zwischen Anzahl der Korn-Korn-Kontakte und dem Porenanteil ($n = V_p/V_{ges}$); letzterer beträgt in der Ebene links 0.21; rechts 0.08.

In natürlichen Böden findet man keine gleichen Korngrössen und im allgemeinen auch keine kugelförmige Gestalt der Teilchen. Porenvolumen nimmt mit der Variabilität der Teilchengrösse ab!! Die dichtesten Packungen findet man in Geschiebe oder Solifluktuationsmaterial! Porenvolumen-erhöhend wirken die Abweichungen von der Kugelform, vgl. Mischungen von Teilchen.

3.1.2. Einfluss von Teilchenparametern auf Poren-Kenngrößen

Die absolute Teilchengröße beeinflusst theoretisch die geometrische Anordnung nicht. Vergleich der tatsächlichen Porenvolumina mit den theoretischen zeigt aber den praktischen Einfluss: Im allgemeinen nehmen mit kleiner werdender Korngröße die Porenvolumina zu.

Ursache für diese Gesetzmässigkeit: Verhältnis der Oberfläche zur Masse der Teilchen hängt ab von der Grösse der Teilchen: $O/V \sim 1/r$. Die Unterschiede zwischen Sand, Schluff und Ton sind Grössenordnungen, - die Kornskala ist logarithmisch - daher wirkt sich diese Änderung besonders stark aus. Die Folge: die massenbezogenen Kräfte treten zugunsten der Oberflächen-bezogenen Kräfte zurück.

Massenbezogen: Schwerkraft \Rightarrow Dichtelagerung, seitlicher Pressdruck von zwischen grossen Körnern liegenden Medien, führt zu Korn-Korn Kontakten.

Oberflächen-Kräfte führen zur Anziehung von benachbarten Masseteilchen, das sind meist nicht benachbarte Bodenpartikel sondern Wasser und teilw. Luft, In feinkörnigen Böden sind daher Kornkontakte selten, in der Regel erfolgt die Abstützung auf tragenden Wasserfilmen.

Eigenschaft	Ausprägung	Porosität
Kornform	rundlich	klein
	sperrig	hoch
Korngrößen-Abstufung	abgestuft	klein
	einseitig	hoch
Lagerung	verdichtet	klein
	locker	hoch

3.1.3. Korngrößen-Verteilung (KGV)

KGV definieren Bodenart bzw. Textur, steht in Beziehung zur Porengrößen-Verteilung

- Bedeutung für:**
- allgemeine Kennzeichnung (beschreibend)
 - Bodenentstehung
 - Analyse der Sedimentationsbedingungen
 - Ableitung ökologisch relevanter Bodeneigenschaften

KGV erlaubt über Pedo-Transferfunktionen Ableitung von

- Wasser-Leitfähigkeit
- reaktive Oberflächen
- Filtereigenschaften von Böden
- Mechanische Bodeneigenschaften
- Erosionsanfälligkeit
- Ertragspotential

Kennzeichnung von Korngemischen, im allgemeinen ist damit nur die mineralische Komponente gemeint !!

Mineralische Anteile der Böden liegen als feste Phasen definierter Form und definierter Grösse vor, sie sind daher der Bestimmung relativ einfach zugänglich, im Vergleich dazu ist die Charakterisierung der organischen Komponente wesentlich schwieriger. Allgemein wird daher eine Untersuchung der Körnung nach der Entfernung der organischen Substanz vorgenommen, auch wenn diese einen wesentlichen Teil der Gesamtmasse des Bodens einnehmen kann, z.T. den mineralischen Teil auch weit überwiegen kann. Die organische Fraktion ist aber im Vergleich zur anorganischen nur schwer in Grössenklassen reproduzierbar auftrennbar und wird deshalb weggelassen.

Korn-Summenkurve: Deskriptive Beschreibung der statistischen Verteilung der (idealisierten) Primärpartikel.

- Keine Rückschlüsse auf räumliche Verteilung erlaubt.
- Ableitung ist die Wahrscheinlichkeits-Dichte, ebenfalls nur deskriptiv
- meist log-normal verteilt

Wahrscheinlichkeits-Netz: Ist $x \sim N(\bar{x}, s)$? verteilt, dann ist $u = N(0,1)$ verteilt;

Im Wahrscheinlichkeits-Netz jedem u die kumulative Häufigkeit der Normalverteilung $Z(u)$ zugeordnet, ergibt eine Gerade. Die Angaben beziehen sich dabei jeweils auf Massenprozent. Anmerkung: für die Berechnung sind die Integralausdrücke numerisch auszuwerten, weil die Verteilungen in der Regel nicht stetig sind. Folgende Masszahlen:

Erwartungswert

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} d \cdot p(d) \cdot dd$$
$$\approx \frac{d_{25} + d_{75}}{2}$$

Varianz:

$$s^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (d - E)^2 \cdot p(d) \cdot dd$$

Sortierung:

$$S_o = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}}$$

Schiefe

$$g = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (d - E)^3 \cdot p(d) \cdot dd}{s^3}$$

g, zentrales 3. Moment [-]

Symmetrie: $g = 0$

linksschief: $g > 0$

rechtsschief: $g < 0$

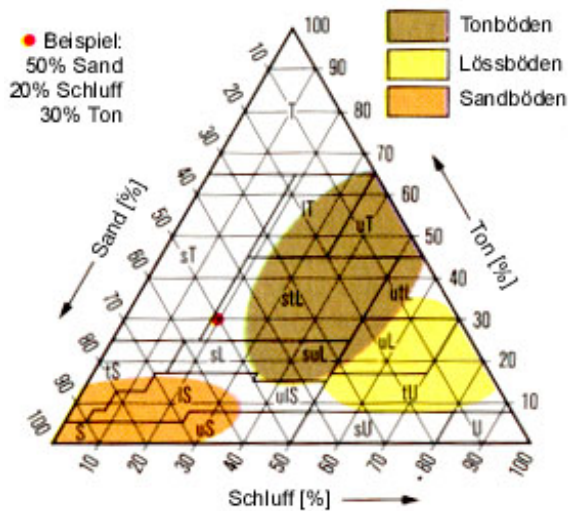
Ungleichförmigkeitsgrad:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

d, Äquivalenz-Durchmesser

d_i , Durchmesser bei dem $i \leq d$ sind

3.1.4 Einteilung in Bodenarten aufgrund der Korngrößen



Darstellung der drei wichtigsten Grössenklassen (Ton / Sand / Schluff) im Dreiecks-Diagramm:
Es erlaubt die präzise Zuordnung eines Bodentyps und ermöglicht dadurch die eindeutige Klassifizierung.

Methoden

Bestimmung der Korngrößen-Verteilung

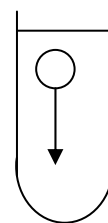
Bei der Bestimmung der Korngrößen stellt sich das Problem, dass durch die Aggregation der Körner die Korn-Summenkurve verfälscht wird (Pseudosande). Daher müssen die Proben vor der Kornanalyse dispergiert, d.h. in den Zustand der Suspension übergeführt werden. Vor allem die Dispergierung der Tone hängt ab vom dispergierenden Mittel, daher ist eine Vereinheitlichung der Verfahren notwendig, sollte sie zumindest sein (auch in Normen festgelegt). Weit verbreitet ist die Zerstörung der organischen Anteile mit H_2O_2 und der mineralischen Bestandteile mit $Na_4P_2O_7$, auch Ultraschall wird gelegentlich für die Dispergierung verwendet.

Bestimmung der Korngrößen-Verteilung erfolgt dabei in 4 Stufen:

1. Vorbehandlung
2. Trocken und/oder Nass-Siebung zur Bestimmung der Sand, Kies- und Steinfraktion
3. Bestimmen der Schlufffraktion: Sedimentation
4. Bestimmung der Tonfraktion: Sedimentation, Zentrifugation

In den Sedimentationsverfahren werden äquivalente Durchmesser bestimmt, wobei ausgegangen wird von:

- kugelförmige Teilchen (der Äquivalent-Durchmesser, durch eine Kugel idealisiert bezieht sich auf einen Durchschnitts-Dichte von $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$ (ist annähernd die Dichte von SiO_2 , $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$).
- Gültigkeit des Stoke'schen Gesetzes



$$V_s = f(d, \rho_s, \rho_L)$$

3.2. Struktur

3.2.1. Ökologische Bedeutung der Bodenstruktur

Unter Bodenstruktur versteht man die räumliche Anordnung der festen Bodensubstanz und des hiermit untrennbar verbundenen Hohlraum-Systems (vgl. Textur = Kornverteilung). Flüssig- und Gasphase sind keine Elemente der Bodenstruktur, können aber mit dieser in Wechselwirkung treten.

Bodenstruktur bedeutend für Erosion, Wasserhaushalt, Auswaschung von Nährstoffen (Makroporen), Filtereigenschaften von Böden, Eignung als Pflanzen-Standort.

3.2.2. Elemente der Bodenstruktur (Synonymer Begriff - Bodengefüge)

- Primärteilchen / Grösse und Form, statistische Verteilung
- Risse, Schrumpfrisse, Scherrisse
- Röhren: Wurzelbahnen, Bodentiere
- Aggregate / Aufbaugesüge (biologische Aktivität), Segregationsgefüge (Quell-/ Schrumpfdynamik)
- Bodenfragmente: Bröckel, Klumpen
Gefügeformen (nach Kuntze et al, 1988)

MAKROGEFÜGE

Grundgefüge (ungegliedert)	* Einzelkorn-Gefüge (nicht verklebt) * Kohärentgefüge (verklebt) * Kittgefüge (verkittet)
Aggregatgefüge (gegliedert) Absonderungsgefüge	Grobgefüge (Aggregat-Querachse > 5cm) * Schichtgefüge * Säulengefüge * Rissgefüge Feingefüge (Aggregat-Querachse < 5cm) * Prismengefüge * Polyedergefüge * Subpolyeder-Gefüge * Plattengefüge * Säulengefüge
Aufbau-Gefüge (< 5cm)	* Krümelgefüge * Wurmlosungs-Gefüge
Bodenfragmente (zertrümmert)	* Bröckel (<5cm) * Klumpen (>5cm)

Grundgefüge:

Eine wesentliche Ursache für die Kohärenz von Böden ist die Kontraktion durch Wassermenisken, die vorgefundene Kohärenz ist daher stark vom Wassergehalt abhängig. Vor allem bei feinkörnigen Böden ist das unterschiedliche Klebeverhalten bei verschiedenen Wassergehalten deutlich erkennbar. Diese Art von Kohärenz ist schnell reversibel, bei Wasserverlust geht dieses Gefüge in ein Einzelkorngefüge über. Kittgefüge verlieren die Kohärenz durch Zerbrechen und werden ebenso zu Einzelkorn-Gefügen.

Einzelkorn-Gefüge:

Primärteilchen sind nicht verklebt, ihre Lage zueinander ist durch Teilchenform, Körnung, Reibung an Berührungspunkten bedingt. Dichteste Lagerung wird nie erreicht. Mittlere Wassergehalte erzeugen Kohäsion, die aber beim Austrocknen sowie beim Überfluten verschwindet. Einstellung eines natürlichen Böschungswinkels bei steilen Böschungen. Vorkommen: Ton- und Eisenoxid-arme Sande und Kiese, frisch abgelagerte schluffreiche Sedimente.

Kohärentgefüge:

Zusammenhalt der Primärteilchen durch Kohäsionskräfte, Ausbildung einer ungegliederten Masse. Böschungen ± stabil, kein Zerrieseln. Vorkommen: Schluff- Lehm und Tonböden, vor allem in frisch abgelagerten, noch nicht geschrumpften Substrat.

Kittgefüge:

... ist eine besondere Art des Kohärentgefüges. Der Zusammenhalt der Primärteilchen wird durch Hüllen aus Eisenoxiden, Karbonaten oder organischen Stoffen gewährleistet.

Vorkommen: Ortstein in Podsolen, Raseneisenstein in Gleyen, Laterit und Silcrete in Ferralsols, Calcrete in Calcisols.

Aggregatgefüge:

Teile der Bodenmatrix bilden von der Umgebung deutlich abgesetzte, separate Körner - die Aggregate. Formen sind sehr verschieden, je nach Entstehungsart und Grad ihrer Ausbildung. Bei starker Aggregation können feinkörnige Böden die Eigenschaften grobkörniger Böden annehmen (Pseudosande, Pseudokiese). Die Aggregatbildung ist eine Folge der Bodenentwicklung und entsteht sowohl aus Böden mit Einzelkorn- als auch mit Kohärengefüge. Form der Aggregate ist typisch für bestimmte Horizonte und für bestimmte Entstehungsarten.

Säulengefüge:

vertikal gestreckt, 4-6 seitig, im Gegensatz zu Prismen kantengerundet mit kappenartig abgerundeter Kopffläche. Charakteristisch für infolge hoher Na-Sättigung stark quellfähigen Solonetze. (Solonetze sind Böden arider Klimate mit einem Btn Horizont, der durch hohe Na-Sättigung, relativ hohe Tongehalte und oft auch dunkle Farbe gekennzeichnet ist. Bez. Auch Schwarz-Alkaliböden, ungünstiger Kulturpflanzen-Standort).

Polyedergefüge:

Aggregate mit ähnlicher Länge der 3 Hauptachsen, \pm scharfe Kanten, geringerer Porenanteil als Krümel, Durchmesser 2 - 50mm. Durch Bewegung im Boden werden die Kanten abgerundet, morphologische Ähnlichkeit zu Krümeln wird grösser = Subpolyeder, Durchmesser 2- 30mm.

Besonders in tonreichen Böden ausgeprägt, z.B. Pelosolen.

Prismengefüge:

von 3-6 Seitenflächen begrenzt, vertikal gestreckt, Durchm. 10 - 300mm. Prismatische Absonderung entsteht durch Schrumpfen. Im oberen Bereich Zerfall in Polyeder und Subpolyeder.

Unterhalb der Polyederzone, charakteristisch für Pelosole, für Staukörper tonreicher Pseudogleye, tonreiche Gleye und Marschen im Schwankungsgebiet des Grundwassers.

Plattengefüge:

horizontal gelagerte Platten infolge von Pressungen, v.a. bei wiederholtem schnellen Wechsel der Belastungen Plattendicke 1-50mm.

Unter Fahrspuren, Trampelpfaden, Pflug- und sonstigen Bearbeitungssohlen.

Aufbau-Gefüge:

Krümelgefüge:

entstehen bei hoher biologischer Aktivität und intensiver Durchwurzelung. Meist rundlich, unregelmässig begrenzt, hohe Porosität, Durchmesser 1-10mm.

Charakteristisch für Oberboden unter Grünland und für A-Horizonte mit Mull als Humusform (Mull-Rendzinen). Sind die Krümel verklebt, spricht man von Schwammgefüge. Fliessender Übergang zum Subpolyeder-Gefüge.

Wurmlosungsgefüge:

aus feinen Bodenteilchen, die durch Schleimstoffe des Wurmes verklebt sind. Hoher Gehalt an organischer Substanz, bilden unregelmässig geformte Anhäufungen bis zu einigen cm Grösse.

In Schwarzerden Südosteuropas vorherrschend, in Mitteleuropa mit anderen Gefügeformen vergesellschaftet.

Bröckelgefüge:

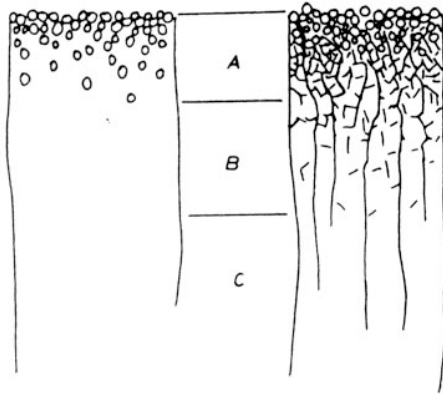
wird aus Aggregaten mit rauen Oberflächen gebildet und entsteht vorwiegend bei der Bearbeitung von Böden mittleren Tongehaltes bei optimaler Bodenfeuchte (Durchmesser der Bröckel < 50mm). Das Bröckelgefüge ist das günstigste durch Bodenbearbeitung zu erreichende Gefüge, wesentliches Ziel ackerbaulicher Massnahmen.

Fragmentgefüge:

Klumpen, Böckel sind unregelmässig begrenzte Aggregate, die in Ap Horizonten mit Kohärent- oder Aggregatgefüge als Folge der Bodenbearbeitung entstehen.

Klumpengefüge entsteht vor allem bei der Bearbeitung von Lehm oder Tonböden in zu feuchtem oder trockenem Zustand. Klumpen haben grösseren Durchmesser als Bröckel und sind an der Oberfläche oft verschmiert.

Bei abgerundeten Aggregaten wird gelegentlich der Ausdruck Rollgefüge verwendet.



Schema der Gefügenreife in einem Sandboden (links) und einem Tonboden (rechts). In beiden nimmt die Intensität der Veränderung des Gefüges vom C-Horizont nach oben hin zu: im Sand durch Zunahme der Verklebung von Primärteilchen zu Aggregaten, im Ton durch Aufteilung der kohärenten Matrix zu immer kleineren Aggregaten.

(*Gefügereife* **abb. 5.3-2**, p.10d)

Gefügereife:

- a) Krümmelgefüge, vergesellschaftet mit Subpolyedern (Schwarzerde aus Löss, Wald 15cm Tiefe);
 - b) Polyedergefüge (Pelosol aus Kreideton, Grünland, 25cm Tiefe);
 - c) Plattengefüge (Pseudogley aus Geschiebelehm, Grünland, 10cm Tiefe);
- Die Länge des Balkens entspricht in jedem Bild 1cm (R. Tippkoetter)

3.2.3. Strukturgenese

Bodenstruktur entsteht durch Interaktion chemischer, physikalischer und biologischer Prozesse, die als dynamische Prozesse betrachtet werden müssen.

Überblick über die wichtigsten strukturierenden Prozesse sind:

Setzung	Dichteverlagerung als Folge des Eigengewichtes
Schrumpfung / Quellung	Verkleinern des Bodenvolumens durch Zug der Menisken \Rightarrow Rissbildung
Verkittung	Eisenoxide, Carbonate, organische Stoffe, Kitt- oder Hüllengefüge
Biologische Aktivität	Regenwürmer (Röhren, Krümel) Pflanzenwurzeln Wühlende Bodentiere (Höhlen) Trittbelastung durch Weidevieh Stampfen der Fichten ?
Frost	Eislinsen - Plattengefüge Wasserentzug - Schrumpfung (Frostgarung)
Dispergierung / Flockung	Tonverlagerung Säulengefüge Verschlämmung an der Boden-Oberfläche
Rissbildung	Trennrisse: α ist immer 90° Scherrisse: $\alpha = 45^\circ - \phi/2$ (? Warum $\phi/2$)

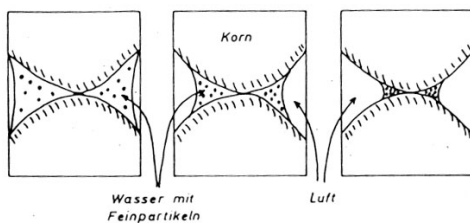
3.2.3.1. Schrumpfung

Hauptursache der Schrumpfung ist der Zug der Menisken, d.h. die Kraft, die die Partikel zusammenzieht, ist die Oberflächen-Spannung ($= 7.2 \cdot 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{cm}^{-1}$) des Wassers. Diese ist im Vergleich zu anderen Flüssigkeiten sehr hoch. Daher grosse Tendenz zur energieeinsparenden Grenzfläche Wasser/Luft, Kontraktion wird bewirkt.

Kontraktionsphänomen hängt mit dem des kapillaren Aufstieg zusammen, denn die Druckdifferenz, welche die Durchbiegung des Meniskus in der Kapillare erzeugt, wirkt allseitig und zieht deshalb die Kapillarwände zusammen.

Die Kraft, welche die Bodenpartikel zusammenzieht, ist demnach eng mit der Oberflächen-Spannung des Wassers verknüpft. Der absolute Zahlenwert von $7,2 \cdot 10^{-2} \text{ Nm}^{-1}$ bei 20°C und 1 bar ist relativ hoch. Die meisten organischen und anorganischen Flüssigkeiten haben wesentlich geringere Oberflächen-Spannungen.

Beim Aufstieg in einer Kapillare wirkt die Druckdifferenz allseitig und zieht daher die Kapillarwände zusammen.



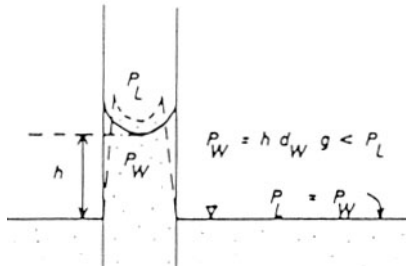
Stabilisierung eines Gefüges durch Austrocknung. Durch Zurückziehen des Meniskus werden Feinpartikel in der Nähe der Kontaktstellen konzentriert.

3.2.3.2 Oberflächen-Spannung oder Oberflächen-Energiedichte:

die Oberflächen-Spannung bezieht sich nur auf die „Phasengrenze“ Flüssigkeit - Vakuum. Berührt eine Flüssigkeit eine andere Flüssigkeit oder einen Festkörper, dann ergibt sich eine „Grenzflächen-Spannung“. Aus der Gleichgewichts-Betrachtung ergibt sich der Randwinkel der Flüssigkeit. Ist der Randwinkel ein spitzer Winkel, dann spricht man von einer „Benetzung“ der Wandung.

Man versteht darunter das Verhältnis der zur Vergrößerung der Oberfläche erforderlichen Arbeit zur Oberflächen-Änderung (= Äquivalent-Durchmesser einer ebenen Kreiskapillare mit gleich hohem Kapillaraufstieg; s. 2.5.1):

$$s = \frac{\Delta W}{\Delta A} \quad \begin{matrix} [\text{N/m}] \\ \Delta W, \text{Arbeitsaufwand} & [\text{J}] \\ A, \text{Kontaktfläche, } A = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot \Delta z & [\text{m}^2] \end{matrix}$$



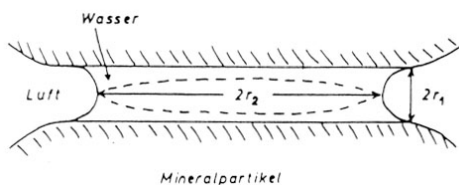
Luft- und Wasserdrücke an einer Wasser-Oberfläche und in einer Kapillare. Die kontrahierende Wirkung des Unterdrucks in der Kapillare ist durch die gestrichelten Linien symbolisiert.

$$\begin{aligned} F &\approx p \cdot \Delta A & [\text{N}] & r, \text{ Kapillarradius} & [\text{m}] \\ A &= 2 \cdot r \cdot \pi \cdot \Delta z & [\text{m}^2] & \gamma, \text{ Oberflächen-Spannung d. Wassers} & [\text{N/m}] \\ p &= 2 \cdot \gamma / r & [\text{N}] & A, \text{ Kontaktfläche,} & [\text{m}^2] \\ & & & \Delta z, \text{ Tiefeninkrement unterhalb d. Miniskus} & [-] \end{aligned}$$

Die Druckdifferenz wirkt kontrahierend, mit zunehmender Steighöhe des Miniskus wirkt sich die Kontraktion immer stärker aus. Die kontrahierende Kraft ist um so grösser, je kleiner der Kapillar-Durchmesser ist. Daher ist die Schrumpfung in feinkörnigen Substanzen viel grösser als in grobkörnigen, ausserdem ist in feinkörnigen Böden (Tone) der Porenanteil durch die von der Kugelgestalt stark abweichende Form der Mineralpartikel der Porenanteil besonders gross.

Ist keine mit dem Wasserspiegel in Verbindung stehende Wassersäule vorhanden sondern nur ein kragenförmiger Ring zwischen 2 Partikel, dann sind die beiden Radien umgekehrt orientiert. Für den Druck erhält man dann:

$$\begin{aligned} \Delta p &= \gamma \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) & \gamma, \text{ Oberflächen-Spannung d. Wassers} & [\text{N/m}] \\ & & r_{1,2}, \text{ Kapillarradius} & [\text{m}] \\ F &= A \cdot \gamma \cdot (1/r_1 - 1/r_2) & [\text{N}] & A, \text{ Kontaktfläche} & [\text{m}^2] \\ & & & l, \text{ Kapillarlänge} & [\text{m}] \end{aligned}$$



Wirkung eines Meniskusrings zwischen zwei Bodenteilchen. Während die Krümmung r_1 einen Unterdruck gegenüber der umgebenden Luft andeutet, entspricht die von r_2 einem Überdruck. Das Gesamtergebnis ist von dem Grössenverhältnis beider Radien abhängig.

Die kontrahierende Druckdifferenz wird immer grösser, je grösser die benetzte Fläche im Vergleich zum Abstand der Partikel.

Durch die Kraft F werden die Bodenpartikel zueinander gezogen.

Die Bildung von Menisken bzw. Verkleinerung ihrer Durchmesser beginnt im Extremfall beim wassergesättigten Boden mit geringen Eindellungen der Wasser-Oberfläche und ist daher auch immer mit Wasserverlusten verbunden. Daher erhält man, wenn man Wassergehalte gegen das Gesamtvolumen oder den Porenanteil aufträgt, Kurven, die den Drucksetzungs-Kurven dem Prinzip und der Form nach entsprechen.

Die Zunahme der Kraft, mit der die Teilchen aneinander gepresst werden, führt zu einer Erhöhung des Scherwiderstande: Bei Tonen führt dies zu ansteigender Festigkeit, bei Sanden ebenfalls zunächst ebenfalls allerdings gefolgt von einer Abnahme wenn die Menisken zwischen den Körnern zu klein werden. (Sandburgen sind bei zuviel und zuwenig Wasser instabil, bei einer optimalen Mischung bzw. optimalem Wasseranteil haben sie die höchste Stabilität.).

Die Volumenverkleinerung führt zu Spannungen und Rissen im Boden und zur Aggregation des Bodens (Absonderungsgefüge).

Schrumpfungsphasen nach Kuntze et. Al, 1988., abfolgend

Phase 1: Strukturschrumpfung

$\frac{\Delta B_v}{\Delta W_{sv}} < 1$ [-] Bv, Bodenvolumen [m³]
Wsv, Wasservolumen [m³]
Entleerung grober Poren, verbunden mit dem Übergang von gesättigter in ungesättigte Wasserbewegung.

Phase 2: Normalschrumpfung

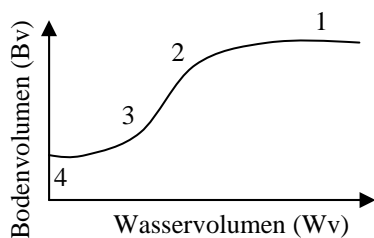
$\frac{\Delta B_v}{\Delta W_{sv}} = 1$ [-] Bv, Bodenvolumen [m³]
Wsv, Wasservolumen [m³]
Wasserverlust führt zu einer gleich grossen Volumensabnahme
Dichtlagerung, Annäherung der Bodenteilchen
kein Luftzutritt
Der Wassergehalt reicht von der Suspension bis unter den Wassergehalt der Fließgrenze

Phase 3: Restschrumpfung

$\frac{\Delta B_v}{\Delta W_{sv}} < 1$ [-] Bv, Bodenvolumen [m³]
Wsv, Wasservolumen [m³]
kaum mehr Annäherung der Bodenteilchen möglich, denn diese sind durch die Normalschrumpfung bereits soweit angenähert, dass eine weitere Kontraktion verhindert wird, der Wasserverlust aber fortschreitet.
Luftzutritt, Wasserverlust > Volumenabnahme,
der Wassergehalt reicht von der Ausroll-Grenze bis zur Schrumpfgrenze.

Phase 4: Nichtschrumpfung

$\frac{\Delta B_v}{\Delta W_{sv}} = 0$ [-] Bv, Bodenvolumen [m³]
Wsv, Wasservolumen [m³]
Bodenmatrix ist stabilisiert, nur mehr geringe Wasserabgabe.
die Wasser-Leitfähigkeit nimmt von Phase 1 zu Phase 4 drastisch ab.



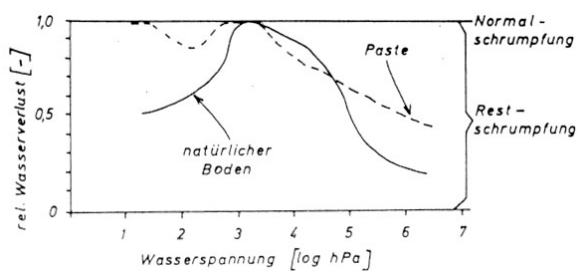
Schrumpfungsphasen nach Kuntze, 1988

- 1) Entwässerung
- 2) Bodenverdichtung
- 3) Boden-Konsolidierung ? (m/Schrumpfung)
- 4) Wasserverlust (o/ Schrumpfung)

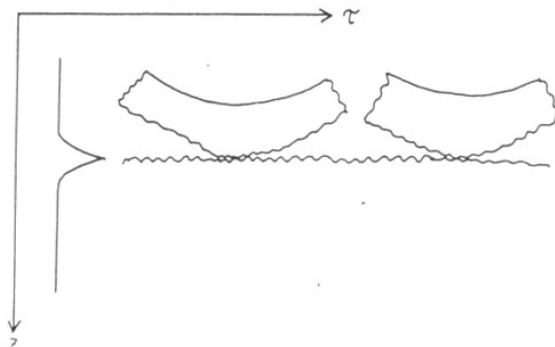
Graphische Veranschaulichung

Terrestrische Böden liegen in der Regel im Bereich der Restschrumpfung, bei semiterrestrischen Böden sind die Oberflächen-nahen Teile im Bereich der Restschrumpfung, die Unterböden dagegen haben sehr viel Wasser und liegen im Bereich einer Hystereseschleife einer Drucksetzungskurve. Tritt eine Änderung des Wasser-Haushaltes zum Trockenem hin auf, dann tritt eine einmalige Normalschrumpfung auf, die dem Übergang von der Hystereseschleife des bisherigen Spannungszustandes zu der eines Spannungszustandes bei höherem Kontraktionsdruck entspricht. Ein solcher einmaliger Kontraktionsdruck führt zu charakteristischen Rissbildungen (s. 2.5.1) ?.

Normalschrumpfung tritt vor allem dort auf, wo Rückquellung infolge knetender Belastung (Scherung) die erforderliche Anfangssituation entstehen lässt. Sie ist ein einmaliger Vorgang und nach ihrem Ende an den Rissen zu erkennen, die als Folge der Kontraktion entstehen. Tritt regelmässig und räumlich eng begrenzt in Fahrspuren, auf Trampelpfaden, auf Akkumulationsflächen neben Erosionszonen sowie auf vegetationsfreien Bodenflächen nach Regenschlag auf (Feinanteil ist sehr wichtig!!!).



Unterschiede im Schrumpfverhalten einer gekneteten Paste (Normalschrumpfung im Nassbereich, in Restschrumpfung übergehend) und eines ungestörten Bodens (frühere Schrumpfung verhindert Normalschrumpfung im Nassbereich).



Hoher Scherwiderstand (τ) in einer sandreichen Sedimentschicht erzwingt Trennbrüche infolge ungleichmässiger Schrumpfung

3.2.3.3. Rissbildung

Mechanik kennt zwei Arten von Brüchen: Trennbrüche und Scherbrüche. In beiden Fällen handelt es sich um Entlastungen von Spannungszuständen im Körper, die auftreten, wenn die mechanische Festigkeit eines Körpers überschritten wird.

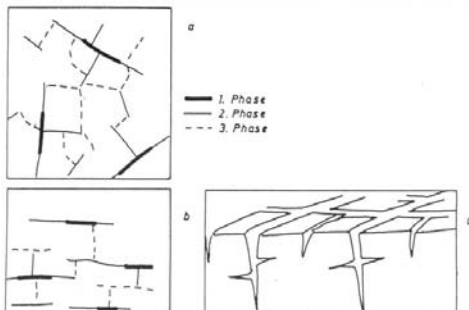
In Böden sind die ersten Risse die auftreten, durch Schrumpfung entstandene **Trennrisse**, die rechtwinklig zur gemeinsamen Wirkungslinie der beiden voneinander weg gerichteten Kräfte verlaufen. Die Kräfte sind die Resultierenden der im Gesamtvolumen vorliegenden Krafrichtungen.

Wird die Deformationsfestigkeit der Tonmatrix überschritten, entstehen zunächst Spannungsspitzen an Inhomogenitäten der Lagerung. Das Weiterwachsen entstehender Risse ist mit der Neubildung von Wasser-Luft-Grenzflächen und mit Energieverbrauch verbunden, d.h. es ist an das weitere Ansteigen der Zugspannung gebunden. In einer feinkörnigen Bodenmatrix bedeutet das ein ständiges Weiterwachsen der Wasserspannung. Die Entlastung führt zu einer Umverteilung der Spannungen im Bodenvolumen, da sie über den Riss hinweg nicht mehr übertragen werden können. Der nächste Trennbruch tritt auf, wenn die Volumenabnahme an der nunmehr der Entwässerung verstärkt ausgesetzten neuen Grenzfläche infolge geringerer Beweglichkeit (= hoher Scherwiderstand) nicht in die Tiefe des Körpers weitergegeben werden kann. Diese zweite Generation der Trennbrüche zeigt bei einem homogenen Sediment rechte Winkel zur ersten Generation. Wenn die ersten Brüche - unabhängig voneinander in zufälligen Richtungen auftreten, dann krümmen sich die Brüche bei Annäherung an die nächsten aufeinander zu, so dass beim Zusammentreffen rechte Winkel entstehen. Daher entstehen in Böden im Verlauf der Normalschrumpfung typische Schrumpfungsriss-Systeme, die zunächst senkrecht in den Boden hineinreichen, weil das Sedimentvolumen der Horizontalkomponente der isotropen Meniskenkontraktion am wenigsten folgen kann. Bei gleichem Ausgangs-Wassergehalt müssen um so öfter Risse entstehen, je weniger beweglich die Gesamtmatrix und je höher mithin ihr Verformungswiderstand ist. In Na-Tonen bilden sich daher größere Blöcke mit wenigen breiteren Rissen als in Ca-Tonen.



Trennriss-System, entstanden bei der ersten Austrocknung (Foto). Zeitliche Aufeinanderfolge von Trennriss-Bildung:

- Gefälle verzerren das Bild
- indem der Gravitations-Einfluss waagrechte Riss-Orientierung fördert.
- Die zweite Phase der Trennrisse tritt auch horizontal zu den Rissen der ersten Phase auf.



Senkrechtcs Riss-System führt zur Bildung 4 bis 6-seitiger Prismen.

Schrumpfrisse sind die Folge des Überschreitens der Festigkeit gegenüber kontrahierenden Kräften.

Ist die Oberfläche eines Sedimentpaketes geneigt, dann treten durch die Wirkung der Schwerkraft als zusätzliche Kraftkomponente in der Schrumpffphase Risse im Streichen auf (= normal zum Gefälle).

Neben Trennbrüchen treten auch Scherbrüche auf, diese verlaufen schräg zur gemeinsamen Wirkungslinie der Kräfte, die aufeinander zugerichtet sind. Der Winkel zur Wirkungslinie der Kraft beträgt $45^\circ - \phi/2$. Scherbrüche treten z.B. beim weiteren Zusammensacken von Prismen auf, häufig auch aber als Folge ungleichmässiger Befeuchtung bzw. partieller Quellung.

Scherrisse treten bei verschiedenen Wassergehalten des Bodens auf, der Winkel ϕ hängt ab vom Wassergehalt, daher haben die Scherrisse auch verschiedenen Winkel. Die Bildung von Scherrissen kann erst nach dem primären Schrumpfen einsetzen, ihr Anteil nimmt mit der Entwicklung des Riss-Systems zu, gleichzeitig nimmt die Abweichung vom 45° Winkel immer mehr zu. Spitze Winkel brechen im Freiland häufiger als stumpfe, daher sind diese seltener zu beobachten, obwohl ihre Zahl gleich sein sollte. Die Rissbildung nimmt mit zunehmender Schrumpfung und zunehmender partieller Rückquellung zu, daher sind alte Bodengefüge durch engere Rissnetze und kleinere Aggregate ausgezeichnet.

3.2.3.4 Quellung

Quellung ist eine Volumensvergrößerung des Bodensubstrates, die auftritt, wenn die einzelnen Teilchen durch Wasseraufnahme auseinander getrieben werden = Wasseradsorption. Die Quellungsfähigkeit eines Bodens ist daher bestimmt durch:

- Oberfläche der Körner, Mineralart
- Austauschkapazität (Mineralart)
- Bindungsfähigkeit (Wertigkeit und Durchmesser)

Quellung spielt bei der Genese von Absonderungs-Gefügen eine wichtige Rolle. Die Ursachen sind die Verringerung des Zuges der Menisken, die zur Ausdehnung des Materials aufgrund elastischer oder viskoelastischer Materialeigenschaften führt. Unter Quellung im eigentlichen Sinne versteht man die Hydratation aufgrund von Konzentrationsgradienten in der Nähe geladener Oberflächen (z.B. Tonminerale), das zu einem Auseinanderdrängen benachbarter Teilchen führt (= Vorstufe zur Dispergierung).

Verlauf der Quellung: Rückquellen nach Erstschrumpfung, erneutes, meist nicht mehr vollständiges Rückquellen nach Wiederschrumpfung.

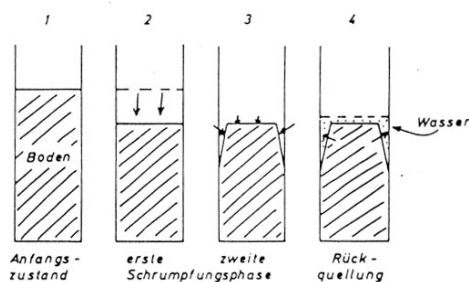
In Böden Mitteleuropas treten Quellungsdrücke auf, die in der Regel $< 2 \text{ Mpa}$ betragen. Durch die Quellung kommt es zu einer Abnahme der groben Sekundärporen und zu einer Zunahme der Mittel- und Feinporen.

Quellungsvermögen verschiedener Tonminerale:

Smectit \approx Vermiculit $>$ Illit $>$ Kaolinit

Für den Kationenbelag der Austauscher gilt:

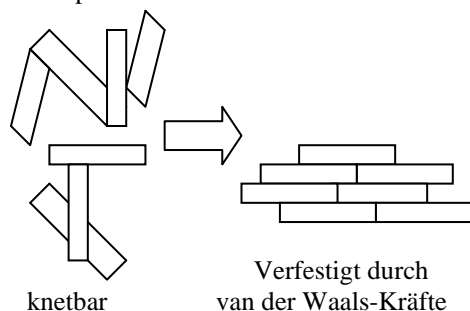
$\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Al}^{3+}$



Schrumpfung und Rückquellung einer Tonpaste. Modellversuch in Glaszylindern, die in der Reihenfolge die Bewegungsvorgänge zeigen.

Erste und zweite Schrumpfungsphase entsprechen der zweiten (Normal-schrumpfung) und dritten (Rest-schrumpfung) unter 3.2.3.2.

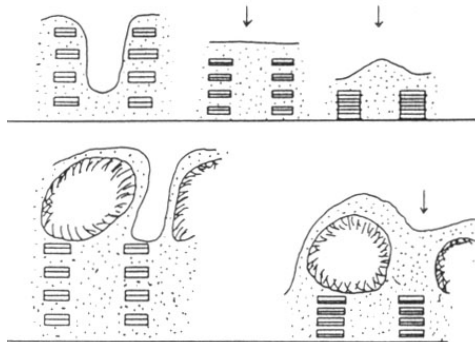
Wird der Quellung ein äußerer Widerstand entgegengesetzt, dann baut sich ein Quellungsdruck auf; Der Druck ist für die aufgrund von Hydratationsvorgängen angelagerte Wassermenge teils sehr hoch, er wirkt sich aber makroskopisch nicht aus, weil in diesem Wassergehalts-Bereich die Aggregate meist teilweise entwässert sind, d.h. sie enthalten Luftporen, die Raum für die zusätzliche Platzanforderung der Aggregate bieten. Es kommt daher zu einem erheblichen Teil zu einer Umorientierung innerhalb der Aggregate. In der Natur ist eine starke Entwässerung des Bodens notwendig um Quellung überhaupt zu erreichen.



Reorientierung und Umlagerung während der Schrumpfung. Die zufällig ausgerichteten Tonminerale werden im Zuge der Schrumpfung so ausgerichtet dass ein Minimum an Raumbedarf erforderlich ist.

Eine Quellung ist im gleichen Zeitraum nicht möglich; weiters dauert eine erneute Umlagerung sehr viel länger.

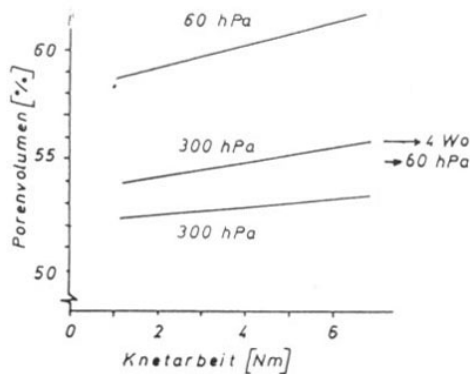
Bei tonreichen Böden geht der Quellung eine Schrumpfung mit Rissbildung voraus, die dazu führt, dass die Quellung zuerst in der Horizontalen erfolgt, bei der die Risse geschlossen werden. Kaum Aufwärtsbewegung, weil bereits genug Wasser in dieser Phase gebunden wird.



Schema der Quellungshemmung durch vermindern von Wasserdruck-Zunahmen bei Knetung (= Meniskenglättung) (oben) durch grobe Partikel auf Tonaggregat-Oberflächen (unten).

Ist allerdings eine seitliche Ausdehnung von Beginn an unterbunden, dann wird der Boden durch die Quellung gehoben. Die Hebung erfolgt häufig kuppenförmig, weil die Reibung an den seitlichen Begrenzung ein Aufwärtsbewegen behindert.

Quellung kann durch Kneten und Scheren erhöht werden: Viehtritt, Befahren, oder Aufprall von Regentropfen. Von Belang ist die bei der Verformung aufgewendete Arbeit !



Quellungsfördernde Wirkung der Knetarbeit, dargestellt durch die Zunahme des Porenvolumens bei unterschiedlicher Wasserspannung (Gleichgewicht mit 60 und 300 hPa) und unterschiedlicher Vorbehandlung (Entwässerung auf 300 hPa, danach vier Wochen freies Wasserangebot, dann Entwässerung auf 60 hPa).

Wasseraufnahme als Folge einer Knetbewegung durch lokale Kraftübertragung und Ausbildung eines örtlich begrenzten Überdrucks, der dem Adsorptionswasser erhöhte Beweglichkeit verleiht. Verschiebung der Tonteilchen gegeneinander verkürzt die Wege zu den Adsorptionsflächen. Reibungsbedingte Quellungshinderung wird durch die von aussen aufgebrachte „Verformungskraft“ kompensiert.

Quellung führt zum Schliessen von Rissen und hat daher einen erheblichen Einfluss auf Wasser- und Lufthaushalt von Böden. Für die Landwirtschaft ist eine Struktur, die wenig quillt günstiger als eine stark quellende.

Hemmung der Quellung

entsteht dort, wo der Wasserzutritt zu den adsorbierenden Flächen verhindert wird. Kann damit die Hysterese Schrumpfen / Quellen erklärt werden ? - zumindest teilweise:

- *geringe Wasser-Leitfähigkeit* in Tonböden, zeitlich begrenztes Wasserangebot kann nicht vollständig genützt werden, weil die Wegsamkeiten nicht gegeben sind. Extrem ausgetrocknete Tonböden können daher auch nach längeren Niederschlags-Phasen noch Schrumpfungsrisse zeigen.
- *hoher Salzgehalt* im zugeführten Wasser, v.a. wenn Kationen mit höheren Wertigkeiten als der Kationenbelag des Tones zugeführt werden. ?
wie funktioniert dieser Mechanismus ?
- *Quellungshemmung durch Wasserentzug*. Das ist die Ursache für die Wirkung von Brantkalk (CaO) auf die Aggregatstabilität von Tonböden. Das zugeführte CaO bleibt an den Aggregat-Oberflächen haften und entzieht den Bodenaggregaten Wasser und setzt es zu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ um. Dieser Stabilisierungseffekt hängt solange an, bis $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durch CO_2 -Zufuhr in CaCO_3 übergeführt werden kann. In biologisch wenig aktiven Böden kann dieser Vorgang sehr lange dauern.
- organische Partikel wirken in derselben Richtung. Wesentlicher Mechanismus bei dieser Quellungshemmung besteht darin, dass in einem aus Plättchen mit Wasserhüllen bestehenden Medium ein Auseinanderrücken erschwert wird, wenn grössere „Nichtplättchen“ die freie Verschiebung der Wasserhüllen gegenseitig verhindern.
- *weiterer quellungshemmender Mechanismus durch Wasser-Druckzunahme* im Boden, die mit mechanischen Belastungen einhergeht. Die Menisken werden geglättet, grobe Partikel auf Ton-Oberflächen. Diese Wirkung kommt auch durch Kneten zustande und vermindert die durch knetende Bewegungen verbesserte Quellung deutlich.

Quellung tritt in Solonetzen auf, in denen auch die kuppelförmigen Strukturen zu beobachten sind. Was sind die seitenbegrenzenden Mechanismen?

Hebung des gesamten Bodenpaketes kann dann erfolgen, wenn eine vorausgehende Schrumpfung noch zu keiner Rissbildung führte, z. B. bei der Entwässerung von jungen Sedimenten wie Marschen und Auen. Die Hebung in der vertikalen Richtung wird durch den Überlagerungsdruck begrenzt, daher nimmt die Quellfähigkeit mit der Tiefe rasch ab (?xerischer Wasserspannungs-Verlauf).

3.2.4. Strukturstabilität

Definition: Die Bodenstruktur wird als stabil bezeichnet, wenn sich bei einer von aussen einwirkenden Spannungsänderung die Bodenstruktur, d.h. die relative Lage der Primärpartikel zueinander, nicht ändert. Das Gefüge muss demnach in der Lage sein können, einwirkenden Kräften ausreichend Widerstand entgegenzusetzen, um plastische Verformungen zu verhindern.

Eine stabile Bodenstruktur in der Wurzelzone in bezug auf Wasser-, Gas- und Stoffhaushalt ist in produktionstechnischer und ökologischer Hinsicht wünschenswert.

3.2.4.1. Faktoren der Strukturstabilität

.... diese kommen in schnell fluktuierende Faktoren und zeitlich mehr oder weniger konstante Faktoren eingeteilt werden

+/- konstante Faktoren	schnell veränderliche Faktoren
* Korngrößen-Verteilung	* Kationenbelag der Austauschschicht
* Kornformen	* Salzkonzentration der Bodenlösung
* Mineralbestand	* Biologische Aktivität
* Organische Substanz	* Kapillarkräfte

Stabilisierende Stoffe

- ? Fe- und Al-Oxide sowie deren Hydroxide;
- ? CaO, CaCO₃ (durch Wasserentzug);
- ? Tonminerale (über elektrisch geladene Oberflächen);

Organische Stoffe

- Vegetationsrückstände;
- organische Düngung;
- Schleimstoffe (Mikroorganismen);
- Bodentiere (Losung);
- Pilzmycel, Bakterienkolonien, Haarwurzeln;

organische Stoffe haben vor allem ihre Wirkung in Oberböden; Ihre Wirkung hält nur so lange, wie die biologische Aktivität aufrechterhalten bleibt.

Fe- und Al-Oxide

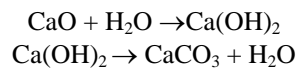
Strukturen: kleine Aggregate und Konkretionen, Raseneisenstein und Lateritkrusten. Die stabilisierende Wirkung erfolgt durch Zementation oder durch elektrostatische Bindung oder andere Bindungsformen.

CaCO₃ und CaO

Kalk verkittet den Boden und bildet Kalkbrücken. Wirkung auf den diffusen Teil der elektrischen Doppelschicht.

CaO entzieht dem Boden Wasser und verringert den diffusen Teil der Doppelschicht.

Temporäre Wirkung:



Synthetische Stabilisatoren

Elektrische Doppelschicht (diffuse double layer DDL)

... tritt bei geladenen Oberflächen, wie z.B. bei Tonmineralen, auf und führt zu einer ungleichen Verteilung von Kationen und Anionen in der Bodenlösung.

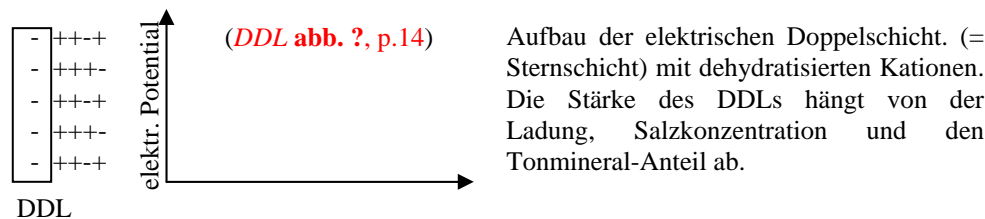
Tonminerale weisen durch den isomorphen Ersatz höherwertiger Kationen durch niederwertige eine mehr oder weniger negative Oberflächenladung auf:

- Kationen konzentrieren sich an der Mineral-Oberfläche (= Sternschicht). Die Konzentration nimmt mit zunehmender Entfernung ab
- Anionenkonzentration zeigt einen komplementären Verlauf zur Kationen-Konzentration
- Beide Konzentrationen nähern sich einem Gleichgewichtswert mit ausgeglichener Ladungsbilanz.

Die charakteristische Dicke der diffusen Doppelschicht (z_0) kann - bei hinreichend hohem Wassergehalt - berechnet werden (Fetter, 1992):

$$z_0 = \frac{1}{e \cdot V} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon \cdot k_B \cdot T}{8 \cdot \pi \cdot n_0}} \quad [\text{m}]$$

e, Elementarladung	[C]
V, Ionenwertigkeit	[-]
ϵ , Dielektrizitäts-Konstante	$8.854 \cdot 10^{-12} \text{ [C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)]$
k_B , Boltzmann-Konstante	$1.381 \cdot 10^{-23} \text{ [J/(K} \cdot \text{mol)]}$
T, absolute Temperatur	[K]
n_0 , Ionenkonzentration in der Gleichgewichtslösung	[mol/L]



Verteilung einwertiger Kationen zwischen Sternschicht und diffuser Schicht

Ion	Radius [nm]	Ladungsdichte		Anteil an der Sternschicht [C/m ²] ?
		Q _u [C/m ²]	Q _h [C/m ²]	
Li	6.0	0.017	0.080	17.3
Na	9.5	0.037	0.090	41.2
K	13.3	0.057	0.039	59.1
Cs	16.9	0.070	0.026	76.0

$$Q_t = Q_u + Q_h \cdot d$$

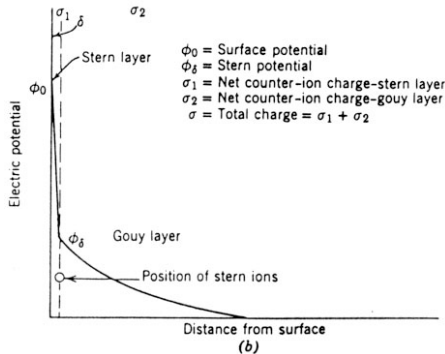
Q_t , totale Ladung	[C/m ²]
Q_u , unhydrated charge	[C/m ²]
Q_h , hydrated charge	[C/m ²]
d, Dicke der Sternschicht ?	[m]

Die Grösse der Ionen und das Ausmass ihrer Hydratation haben einen beträchtlichen Einfluss auf die Kationenverteilung. Von den Kationen in der Sternschicht wird angenommen, dass sie aufgrund der starken Anziehungskraft der negativen Oberflächenladung zum Teil dehydratisiert sind. Die Kationen in der diffusen Schicht sind voll hydratisiert und werden rein elektrostatisch gebunden. Höherwertige Kationen werden bevorzugt in der Sternschicht gebunden, Na⁺ hält sich dagegen bevorzugt in der diffusen Schicht auf.

Für das Verhalten und die Wirkung der elektrischen Doppelschicht ist letztlich ihre Dicke massgebend, wobei im wesentlichen die diffuse Schicht Quellungs-, Schrumpfungs-, Flockungs- und Dispergierungsverhalten massgeblich beeinflusst und letztendlich auch die Aggregation und Rissbildung in tonigen Böden.

Einflussfaktoren sind:

- Tonmineralart (Ladungs-Flächendichte, Partikelgrösse, Oberflächen-Dichte);
- Kationenbelag des Austauschers: Wertigkeit, Ionengrösse bzw. Grösse der Hydrathülle der Ionen (lyotrope Reihe);
- Salzkonzentration in der Bodenlösung: hohe Konzentrationen verringern die Dicke der elektrischen Doppelschicht;
- Wassergehalt des Bodens: geringe Wassergehalte verkleinern über die Reduktion der Dicke der Wasserfilme auch die Ausdehnung der elektrischen Doppelschicht.



← Diffuse Double Layer relationships:

- a) concentration of ions versus distance from surface;
- b) electric potential of Stern and Gouy layers;

.... besser abb. 4.1.6 (script p. 14a fehlt!)

Von Bedeutung ist das Zusammenspiel von Kationenbelag und Salzkonzentration bei der Melioration von Salzböden von Bedeutung für die Gefügestabilität und es

macht gefügestabilisierende Ergänzungsmeliorationen durch Zugabe zweiwertiger Kationen erforderlich.

Die Wirkung der Dicke der diffusen Doppelschicht auf die Gefügestabilität ergibt sich im wesentlichen aus dem Zusammenwirken der beteiligten Kräfte:

$$\Rightarrow \text{Elektrostatische Kräfte} \propto \frac{1}{r^2}$$

Abstossende Resultierende aufgrund der Verteilung positiver und negativer Ladungen (Tonmineraloberflächen, Sternschicht, diffuse Schicht) in relativ grosser Distanz:

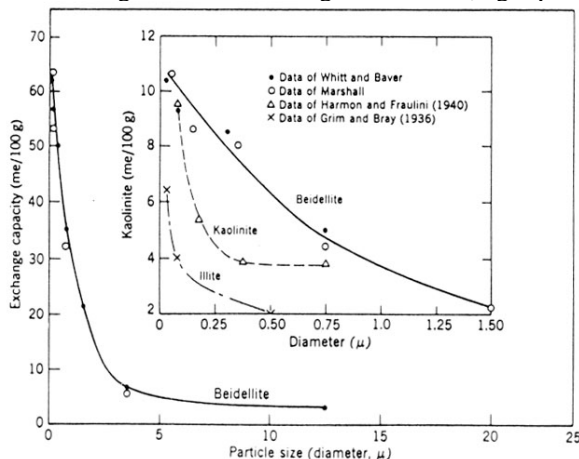
$$\Rightarrow \text{Van der Waalsche Kräfte} \propto \frac{1}{r^7}$$

Diese Kräfte sind aufgrund der Abhängigkeit von $1/r^7$ erst bei grösserer Annäherung von Bedeutung.

- Gitterkräfte, sind aber erst bei noch grösserer Annäherung an die Tonmineral-Oberfläche wirksam.

Wenn die Doppelschicht klein ist, dann heben sich die Ladungs-Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen bereits in kurzem Abstand auf, dadurch wird die Annäherung erleichtert. Ist die Doppelschicht aber gross, dann sind grössere Abstossungskräfte zu überwinden und die Annäherung wird erschwert. Die Tonminerale kommen daher nicht in den Anziehungsbereich der Van-der-Waals Kräfte.

Kationen-Austauschkapazität: = die Summe der austauschbaren Kationen in einem Boden, ausgedrückt in mval.kg^{-1} , oder $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$, ph abhängig.



Negative Oberflächenladung steigt mit dem pH, daher steigt auch die KAK.

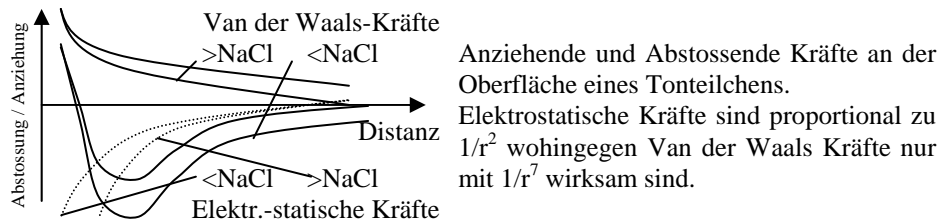
potentielle KAK: bei $\text{ph} = 7..7,5$
effektive KAK: bei vorliegendem pH,

← Relation of CEC (cation exchange capacity) to particle size.

Bodenwasser

.... ist ein weiterer wichtig, allerdings stark fluktuierender Faktor der Bodenstabilität. Unterscheidbare Effekte:

- Effekte, die mit der Beeinflussung der Dicke der elektrischen Doppelschicht zusammenhängen (wie vorher);
- Stabilisierende und destabilisierende Wirkung als Folge von Über- oder Unterdrücken im Kapillarwasser, erkennbar an der Krümmung der Grenzfläche Wasser / Luft;
- Zug der Menisken, konkav :Unterdruck hält die Partikel zusammen;
- konvexe Menisken, Z.B. durch Auflast, der Überdruck treibt die Partikel auseinander.



Flockung, Dispergierung

.... sind Prozesse bei der Gefügedifferenzierung, Verschlammung, Tonverlagerung und Erosion sind vor allem bei tonhaltigen Böden von grosser Bedeutung. Wichtig für Kulturtechnik.

Flockung:

Bei Annäherung von Tonmineralen ist die Dicke der Doppelschicht relevant ob die Tonminerale sich anziehen oder abstossen. Elektrostatische und Van der Waalsche Kräfte überlagern sich, die Resultierende bestimmt ob die Teilchen sich anziehen oder abstossen. Alle Faktoren, welche die Dicke der Doppelschicht verringern, verbessern das Flockungsverhalten von Tonmineralen.

Dispergierung / Peptisation (Flockung):

Ist der umgekehrte Prozess zur Flockung. Alle Faktoren, welche die Dicke des diffusen Teils der Doppelschicht vergrössern, tragen zur Dispergierung bei. Wichtig ist das z.B. bei Melioration ? von Salzböden, bei der die Salzauswaschung bei hohem Belag der Austauscher mit Na aufgrund der grossen Ausdehnung der Doppelschicht zu einer Destabilisierung der Bodenstruktur führen kann.

3.2.5. Kräfte, Drücke, Verformungen in Böden

Böden sind verschiedensten Belastungen ausgesetzt, deren Auswirkungen je nach Art und Dauer der Belastung sehr unterschiedlich sein können. Die Belastungen können nach ihrer unterschiedlicher Natur grob eingeteilt werden in:

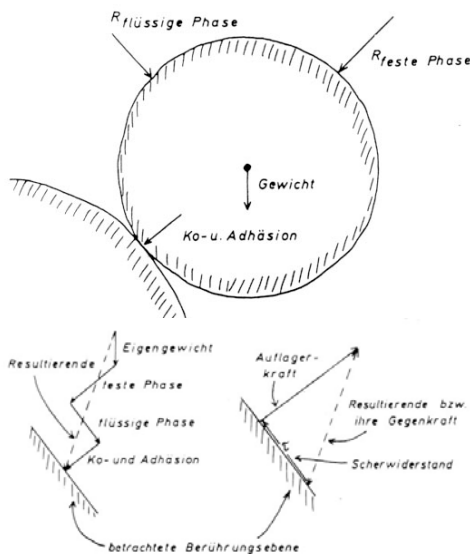
Bodenbelastung durch Wasser	<ul style="list-style-type: none"> • Hochwasser • Starkregen, Hagel
Luftspregung	<ul style="list-style-type: none"> • Überdruck in Aggregaten durch Kompression eingeschlossener Luft im Zuge von Infiltrations-Ereignissen
Mechanische Belastung durch Maschinen	<ul style="list-style-type: none"> • Zertrümmerung von Aggregaten • Verdichtung • elastische Verformungen • Knetungen, plastische Verformungen • Verschmierungen
Chemische Belastungen	<ul style="list-style-type: none"> • Lösungen von Kittsubstanzen • Auswaschung von Salzen • Austausch von zweiwertigen Kationen gegen einwertige

Kräfte im Boden werden als Spannungen bezeichnet, darunter werden eigentlich Drucke verstanden. Über Korn-Korn Kontakte wirken Druckkräfte in vorgegebenen Richtungen, während hydrostatische Kräfte und Luftdruck richtungslos sind.

Die wichtigsten Kräfte sind:

- Gewichtskraft der Bodenteilchen (verdichtend) - kaum beeinflussbar, ausser durch Auftrieb in wassergesättigten Böden;
- Auflagerkräfte durch externe Lasten (verdichtend) - sind an Kontaktpunkten wirksam, Richtungen variabel, übertragen ständige als auch variable Lasten;
- Strömungskräfte des Bodenwassers (verdichtend) - statische und dynamische Komponente, Strömungsdruck, Schubbeanspruchung, wenn Wasser oder Luftstrom an der Grenzfläche einer körnigen Matrix durch deren Rauigkeit abgebremst wird;
- Kräfte zwischen Oberflächen benachbarter Teilchen, Meniskenkräfte, Ad- und Kohäsion, bei Porenwasser-Sättigung Überdruck (ansonsten stabilisierende Wirkung).

Jedes Primärteilchen hat im Bodenverband mehrere Kontakte mit Nachbarpartikeln, deren Flächennormalen verschiedenen Richtungen im Raum haben. Daher sind Grösse und Richtung der Gesamtresultierenden für jedes Korn anders als für jedes Nachbarkorn. Aufgrund der unterschiedlichen Abstützung von Partikeln ergibt sich Stabilität oder Nichtstabilität.



Schema der auf ein Bodenteilchen oder Aggregat einwirkenden Kräfte. Für jede Art der Kraftübertragung ist eine Resultierende (R) eingetragen, wenn Einzelkräfte mit verschiedenen Richtungen auftreten können.

Resultierende aus den vier Kräften (links) und Gegenkräften (rechts), die das Korn bzw.; Aggregat in Bezug auf seine Nachbarschaft in der Lage halten. Wird die Resultierende durch die Gegenkräfte nicht aufgehoben, das Krafteck also nicht geschlossen, so ist das Korn nicht im Gleichgewicht und wird verschoben.

3.2.5.1. Scherwiderstand als Bodeneigenschaft

Die Stabilität einer Lagerung ist eine Folge des Zusammenwirkens verschiedener Kräfte, wobei die tangentielle Komponente eine Eigenschaft des Bodenmaterials ist, das gilt nicht für die Normalkomponente!

Scherwiderstand und Bestimmung

ist diejenige Kraft, die an der Berührungsstelle zweier fester Körper *mobilisiert* wird, wenn diese bewegt werden. Der Scherwiderstand hängt als Kraft von der Auflast ab, welche die beiden teile aneinander drückt. Der Zusammenhang ist durch die Coulombsche Formel gegeben:

$$\tau = t_g \cdot \phi \cdot \sigma_n + c$$

[N/m²] ϕ , Winkel der inneren Reibung [°]
c, Kohäsion [N/m²]

der auf die Fläche bezogene Scherwiderstand, der im Boden als Scherspannung bezeichnet wird, ist:

$$\tau = \frac{F_{II}}{A}$$

[N/m²] F_{II}, paralleler Kraftvektor [N]
A, Schnittfläche [m²]

die auf die Fläche bezogene Normallast, wird als Normalspannung bezeichnet:

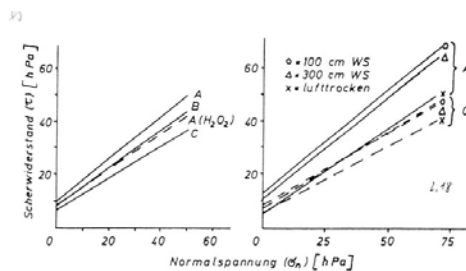
$$\sigma_n = \frac{F_{\perp}}{A}$$

[N] F_⊥, senkrechter Kraftvektor [N]

Der resultierende Kraftvektor, der in der Ebene angreift:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

[N]



Links: Einfluss geringer Mengen q_n organischer Substanz ($< 1\% C_{org}$) auf den Scherwiderstand von Sand (podsolige Braunerde). Durch die Behandlung mit H_2O_2 wird die hohe Stabilität des Materials herabgesetzt.

Rechts: Einfluss der Wasserspannung auf den Scherwiderstand von Sand (A- und C-Horizont einer podsoligen Braunerde); Die Stabilitätsabnahme infolge Trocknung ist im A-Horizont grösser als im C-Horizont.

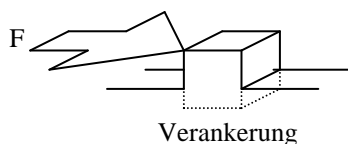
Materialeigenschaften:

Die Vertikalspannung oder Normalspannung führt zu einer Kompression des Bodens, die Horizontalspannung zu einer Scherung. Im Boden gibt es ausgezeichnete ?Tichtungen in denen keine Schubspannungen auftreten, die sogenannten Hauprichtungen, deren zugehörige Normalspannungen als Hauptspannungen bezeichnet werden. Da es 3 davon gibt, werden sie als $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ bezeichnet: Aus Gleichgewichts-Betrachtungen ergibt sich, dass diese 3 Spannungen aufeinander senkrecht stehen.

Werden Kräfte im Boden nicht nur über Korn-Korn Kontakte übertragen, sondern auch über die Gas- und Flüssigphase, so gilt die effektive Spannungsgleichung nach *Terzaghi*:

$$\sigma = \sigma_{eff} \pm u$$

[N] σ , Gesamtspannung [N]
 σ_{eff} , effektive Spannung = über die Feststoff-Phase übertragene Anteil der Gesamtspannung [N]
u, neutrale Spannung = über die Wasser- und Gasphase übertragener Anteil der Gesamtspannung [N]



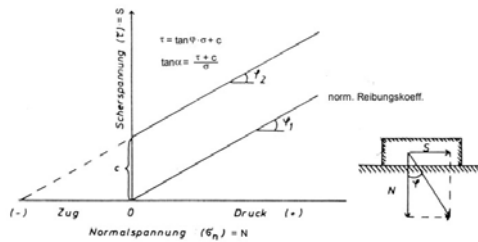
Scherversuch laut nebenstehender Anordnung. Die Scherspannung verhält sich analog dem Reibungswiderstand (Körper liegt nicht einfach auf).

Im Boden selbst müssen die Kräfte als innere Kräfte angesehen werden, daher verwendet man die flächenbezogenen Spannungen. Die so definierten Spannungen hängen von der Lage der Schnittebene ab (vgl. Mohrscher Spannungskreis).

Zur Erfassung der Materialeigenschaften Kohäsion und Winkel der inneren Reibung ist der einfache Scherversuch geeignet (Kasten oder Ringscherversuch).

Diese Parameter können auch aus dem komplizierteren Triaxialversuch ermittelt werden, der nicht nur eine einzige Bruchebene erzwingt, sondern Scharen von Bruchebenen, die dem natürlichen Verhalten von Böden wesentlich besser entsprechen.

Eine weitere Möglichkeit zu einer Aussage über Kohäsion und Reibung besteht in der Anwendung über ihre korrelative Beziehungen zu anderen Parametern, z.B. den Konsistenzgrenzen.



Scherspannung (τ) als Funktion des Reibungswinkels (φ) der Kohäsion wird bei negativer Auflast als Zugfestigkeit wirksam. Rechts als Beispiel ein Klotz auf ebener Fläche, bei dem anstelle von σ_n die Auflast (N) und anstelle von τ der Scherwiderstand (s) tritt.

Für homogenisiertes Bodenmaterial besteht ein Zusammenhang zwischen dem Winkel der inneren Reibung einerseits und dem Unterschied der Wassergehalte bei der Fließgrenze und der Ausrollgrenze andererseits. Auf diesen Zusammenhängen beruhen die Konsistenzgrenzen nach *Atterberg*. Die Werte für ϕ , der Winkel der inneren Reibung, liegen im Boden meist zwischen 25° und 36° . Bei kohäsionslosen Material bilden diese Winkel gleichzeitig die **natürlichen Böschungswinkel**. Bei sehr kantigen Körnern können die Winkel der inneren Reibungswinkel bis 45° auftreten. In ungestörten Böden je nach Bodenart, Aggregation, Lagerungsdichte und Wasserspannung zwischen 20° und 60° . Die Werte für die Kohäsion können dann in land- und forstwirtschaftlich genutzten Böden 100 bis 150 kPa betragen.

Beeinflussung des Scherwiderstandes durch Bodensubstanzen

Organische Beimengungen, auch in sehr geringer Konzentration, wirken stabilitäts-erhöhend.

Synthetische Stabilisatoren

Wasser: erheblicher Einfluss, Zug der Menisken!!

3.2.5.2. Der Mohr'sche Spannungskreis

Um Belastungen und plastische Verformungen in Böden beurteilen bzw. berechnen zu können, d.h. es muss bekannt sein in welcher Richtung maximale Scherspannungen auftreten, die die Belastbarkeit des Bodens überschreiten können. Dazu ist es notwendig die Spannungsverteilung im Boden in beliebigen Schnitten zu kennen. Im dreidimensionalen System erfolgt die Berechnung mit Hilfe des Spannungstensors, (eine symmetrischen 3*3 Matrix). Im zweidimensionalen Fall erfolgt das über den Mohr'schen Spannungskreis.

Wird dazu ein an den Hauptrichtungen orientierter quadratischer Bodenausschnitt betrachtet, der in einem Winkel α geschnitten wird, dann ergibt sich aus der Gleichgewichtsbedingung, weil sich der Ausschnitt in Ruhe befindet.

$N = N_1 \cdot \cos \alpha + N_2 \cdot \sin \alpha$	[N]	N, Normalkraft	[N]
		N_1 , "- in der 1. Hauptrichtung	[N]
$T = N_1 \cdot \sin \alpha - N_2 \cdot \cos \alpha$	[N]	N_2 , "- in der 2. Hauptrichtung	[N]
		T, Tangentialkraft	[N]

.... Dieses Diagramm plus Text fehlt

(Kraftdiagramm) **abb?**, p.?a)

Für die Gleichgewichts-Bedingung ergibt sich

$$N = \frac{\sigma \cdot d}{\cos \alpha} \quad [N] \quad \begin{array}{l} N, \text{ Normalkraft} \\ \sigma, \text{ Gesamtspannung} \end{array} \quad \begin{array}{l} [N] \\ [N] \end{array}$$

$$N = \sigma_1 \cdot d \quad [N] \quad \begin{array}{l} d, ? \end{array} \quad [N]$$

$$N = \sigma_2 \cdot d \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \quad [N] \quad \begin{array}{l} \alpha, \text{ Schnittwinkel} \end{array} \quad [^\circ]$$

$$\frac{\sigma \cdot d}{\cos \alpha} = \sigma_1 \cdot d \cdot \cos \alpha + \sigma_2 \cdot \frac{d \cdot \sin \alpha}{\cos \alpha}$$

$$\frac{\sigma}{\cos \alpha} = \sigma_1 \cdot \cos \alpha + \sigma_2 \cdot \frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha}$$

$$\sigma = \sigma_1 \cdot \cos^2 \alpha + \sigma_2 \cdot \sin^2 \alpha$$

Nachdem, wie aus der Trigonometrie bekannt:

$$\cos^2 \alpha = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos(2 \cdot \alpha))$$

$$\sin^2 \alpha = \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos(2 \cdot \alpha))$$

$$\sin \alpha \cdot \cos \alpha = \sin(2 \cdot \alpha)$$

führen ein paar Umformungen zu folgendem Resultat:

für die Normalspannung auf die Schnittfläche:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos(2\alpha) \quad [N]$$

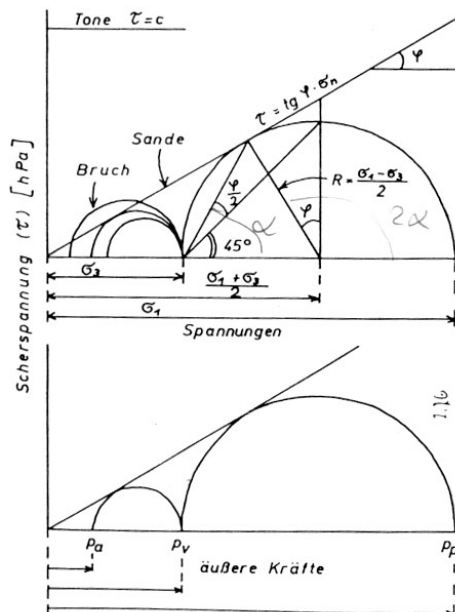
analog für die Scherspannung:

$$\frac{\tau \cdot d}{\cos \alpha} = \sigma_1 \cdot d \cdot \sin \alpha - \sigma_2 \cdot \frac{d \cdot \sin \alpha}{\cos \alpha} \cdot \cos \alpha$$

$$\frac{\tau}{\cos \alpha} = \sigma_1 \cdot \sin \alpha - \sigma_2 \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} \cdot \cos \alpha$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha) \quad [N/m^2]$$

Die Punkte σ, τ bilden einen Kreis den sogenannten Mohrschen Spannungskreis, aus dem sich bei gegebenem Neigungswinkel und gegebenem Hauptspannungen Normal- und Scherspannungen der gedrehten Fläche direkt (!) ablesen lassen.



Mohrscher Spannungskreis; Auf der Abszisse werden die Hauptspannungen (σ_1 und σ_3) bzw. Erddruck (p_a) und Erdwiderstand (p_p) sowie der wirksame senkrechte Bodendruck (p_v) eingetragen. Letzterer ist je nach Fragestellung σ_1 (gegenüber p_a) oder σ_3 (gegenüber p_p). Der Kreisbogen; der die Auftragung zweier zusammengehöriger Hauptspannungen bzw. Der entsprechenden äusseren Kräfte verbindet, gibt die höchste erreichbare Scherspannung an und die verschiedenen Scherspannungen (τ) zu den Zwischenwerten eines Hauptspannungs-Paares. Die gemeinsame Tangente aller Kreise, die den beginnenden Bruch kennzeichnen, ist die Coulombsche Gerade.

3.2.5.3. Verformungen

Verformungen können elastisch oder plastische sein. Eine Folge von Kräften, bzw. Scher- und Normalspannungen sind entsprechende Verformungen, Scherverformung und Längsverformung, die ein Zeitverhalten zeigen und daher auch die Definition von Verformungsgeschwindigkeiten erlauben.

Grundsätzlich werden zwischen den nachfolgend angeführten Typen unterschieden

elastisches Verhalten	<ul style="list-style-type: none"> - Linearer Zusammenhang zwischen effektiver Spannung (Kraft) und Verformung (Weg), beschrieben durch das Hook'sche Gesetz - keine zeitliche Verzögerung - reversibel, vollständige „Rückformung“ nach Wegfall der verformenden Kraft
viskoelastisches Verhalten	<ul style="list-style-type: none"> - Verformung erfolgt mit zeitlicher Verzögerung - Verformung ist voll reversibel
plastisches Verhalten	<ul style="list-style-type: none"> - Verformung irreversibel - Nichtlinearer Zusammenhang zwischen Verformung (Weg) und Spannung (Kraft) - Zeitliche Verzögerung <p>meist gilt:</p> <ul style="list-style-type: none"> - elastischer Bereich - Übergangsbereich - ideal plastischer Bereich
Kriechprozesse	langsame Verdichtung, Verformung bei langer Einwirkung der Kraft

Bei der Kompression von Böden durch externe Auflasten kann eine Unterscheidung in Phasen vorgenommen werden:

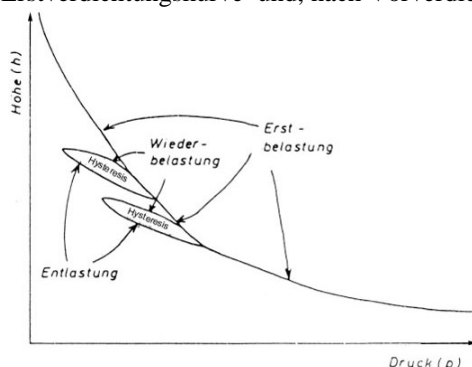
Primärkompression	<ul style="list-style-type: none"> - Umlagerung der Primärpartikel - Entweichen von Luft
Konsolidierungsphase	<ul style="list-style-type: none"> - Umorientierung der Primärpartikel - Auspressen von Wasser
Sekundärkompression	- Deformation der Primärteilchen (z.B. org. Substanz)

Setzung bzw. Verdichtung ist im eindimensionalen Kompressionsversuch (Ödometer) definiert durch die Porenziffer (e), gegeben durch:

$$e = \frac{H_o - \Delta h - H_f}{H_f} \quad [m]$$

H_o , Anfangshöhe [m]
 H_f , Höhe der Festsubstanz (o/ Poren) [m]
 Δh , Höhenabnahme [m]

Bei der Bodenverdichtung ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen einer Erstverdichtungskurve und, nach Vorverdichtung, einer Wiederverdichtungskurve



Drucksetzungs-Kurve. Höhe der Lagerung eines Bodenvolumens als Funktion der vertikalen Last. Bei Entlastung ist nur die elastische Verformung reversibel; die plastische bleibt erhalten und verursacht Vorverdichtungen.

3.5.2.4. Messungen der Strukturstabilität

Feldmethoden

Zugstabilität: Bestimmung der maximalen Zugbelastung eines herauspräparierten Erdkernes (Hillel 1980).

Aggregatstabilität: (Schlichtling-Blume) Visuelle (subjektive) Bewertung der Aggregatzerstörung durch Wasser nach Schwenken in einer Porzellanschale.

Penetrometer Messung des Eindring-Widerstandes als Mass für die physikalische Durchwurzelbarkeit mit speziellen Sonden unterschiedlicher Grösse und Form. Eindring-Widerstände hängen stark vom Wassergehalt und der Lagerungsdichte ab. Grobmaterial im Boden kann zu Fehlinterpretation führen.

Abscherwiderstand: die Kohäsion des Bodens wird beim jeweiligen Feuchtezustand über das Drehmoment mit einer Flügelsonde bestimmt. Analog zum Rahmen-Scherversuch, nur ändert sich bei einer kreisförmigen Geometrie die Fläche nicht!

Messung von Verschiebungen: durch Anbringen von Messmarken und Aufzeichnung des zeitlichen Verlaufes.

Erosivität, Verschlammungsneigung: Abfluss-Messungen und der Sedimentfracht mit Regensimulator (Feldregner nach Kamphorst, 1987).

Labormethoden

Aggregatstabilität durch Nass-Siebung: Bestimmung der Aggregat-Grössenverteilung einer Bodenprobe vor und nach Belastung durch Wasser im Tauchversuch. Beurteilt wird die Änderung des gewichteten mittleren Durchmessers (\bar{d}):

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot d_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad [\text{m}]$$

$i = 1 \dots n$, Anzahl der Siebfractionen	[m]
m_i , Masse der Aggregate der i-ten Fraktion	[m]
d_i , Aggregatdurchmesser der i-ten Fraktion	[m]

Es wird der mittlere Durchmesser vor und nach dem Tauchversuch bestimmt. Die Differenz ist ein Mass für die Stabilität, ist sie gering (ca. 1mm), dann ist der Boden stabil und umgekehrt.

- Aggregatstabilität im Perkulationsverfahren Feinböden wird in Röhren gepackt und der Wasser-Durchfluss bestimmt, durch Perkulation ändert sich der Durchfluss. Damit kann eine relative Beurteilung der Verschlammungsneigung und der Erodibilität des Bodens angegeben werden;
- Sackungsstabilität: Sackungsverhalten einer Aggregatpackung wird bei mehrmaligem Fall aus definierter Höhe bestimmt;
- Proktordichte: Bestimmung der maximalen Verdichtbarkeit;
- Bestimmung des Bruchmoduls: Zweiseitig aufgestütztes Erdbricket wird auf Bruch belastet;
- Rahmen-Scherversuch: Ermittlung des inneren Reibungswinkels ϕ und der Kohäsion c . Mit diesem Versuch kann die Mohr-Coulomb'sche Bruchgerade bestimmt werden;
- Triaxialversuch: Ermittlung der Scherparameter;
- Kompressionsversuch mit Ödometer: Bestimmung des Drucksetzungs-Verhaltens durch Auflast.

Konsistenz

Mit diesem Begriff wird der innere Zusammenhalt eines Bodens, bzw. seiner Einzelteile zueinander, bezeichnet. Die Konsistenz ist ein Stabilitätsmerkmal der Bodenstruktur und kann sich in weiten Grenzen zwischen flüssig über leicht bis weniger knetbar bis hin zu plastisch bewegen. Die Atterberg'schen Konsistenzgrenzen charakterisieren das ? rheologische Verhalten eines Bodens, d.h. sie werden als viskose Flüssigkeiten betrachtet.

.... Text und Abbildungen fehlen

(Konsistenzbereiche **abb. 9.1**, p.?)

Bodenvolumen / Wassergehalts-Feld werden 4 Konsistenzbereiche definiert:

Flockungsgrenze Θ_{fio} : gravimetrischer Wassergehalt, bei dem der Boden vom Sol- in den Gelzustand übergeht; Einheit in $[m^3/m^3]$ oder [%];

Fliessgrenze Θ_f : Gravimetrischer Wassergehalt, bei dem sich eine 12mm breite Furche nach 25 Schlägen, Fallhöhe 1cm, schliesst (Flie遝grenz-Gerät nach Casagrande);

Ausroll-Grenze Θ_a : Gravimetrischer Wassergehalt, bei dem das Ausrollen zu einer 3mm dicken Walze noch möglich ist;

Schrumpfgrenze Θ_s : ab diesem gravimetrischen Wassergehalt ändert sich bei weiterem Austrocknen das Volumen nicht mehr.

.... Text und Abbildungen fehlen

(Konsistenzgrenzen und Schrumpfungsverlauf **abb. ?**, p.?)

Ein Mass für die Verformbarkeit ist die **Bildsamkeit** oder **Plastizitätsindex** (W_{fa}):

$$W_{fa} = \Theta_f - \Theta_a \quad \begin{array}{l} \Theta_a, \text{ Ausroll-Grenze} \\ \Theta_f, \text{ Flie遝grenze} \end{array} \quad \begin{array}{l} [\%] \\ [\%] \end{array}$$

Der aktuelle Bodenzustand wird beschrieben durch die „Zustandszahl“ W_z :

$$W_z = \frac{\Theta_f - \Theta_n}{\Theta_f - \Theta_a} \quad \begin{array}{l} W_{fa}, \text{ Plastizitätsindex} \\ \Theta_n, \text{ natürliche Wassergehalt des Bodens,} \\ \text{eben der im vorgefundenen „Zustand“} \\ \text{festgestellte Wassergehalt} \end{array} \quad \begin{array}{l} [\%] \\ [\%] \end{array}$$

Die Zustandszahl gibt an, wie weit entfernt sich der Boden hinsichtlich seines Wassergehaltes von der Flie遝grenze befindet. $W_z = 1$, im Zustand der Ausrollgrenze, $W_z = 0$ im Zustand der Flie遝grenze.

Der Plastizitätsindex hängt von der Textur und sehr stark von der Tonmineral-Art ab.

Flockungs- und Flie遝grenze hängen von der Kationen-Austauschkapazität, dem Tongehalt und der spezifischen Oberfläche ab.

In der Praxis wird die Zustandszahl eines Bodens für die Beurteilung der Tragfähigkeit und der Bearbeitbarkeit verwendet. Bearbeitungsmassnahmen wie ?Melioration, Rohrdränung, ?Tieflocken und Tiefpflügen hängen sehr von der Zustandszahl ab. Für die meisten dieser Massnahmen ist ein hoher Wassergehalt in der Nähe der Ausroll-Grenze am günstigsten.

Konsistenzgrenzen für verschiedene Bodenarten (Archer, 1975)

Textur	Tongehalt %	Wassergehalt		
		Schrumpfgrenze	Ausroll-Grenze	Fliessgrenze
Sandiger Lehm	12	14	16	21
Sandig-toniger Lehm	23	18	25	40
Ton	51	13	36	83

Die einzelnen Parameter sind untereinander mehr oder weniger gut korreliert, z.B. besteht eine gute Korrelation zwischen Fließgrenze und spezifischer Oberfläche oder zwischen Fließgrenze und KAK, weniger gut zwischen Tongehalt und spezifischer Oberfläche.

Korrelationen der einzelnen Parameter untereinander (nach Marshall & Holmes, 1988)

	Ausrollgr.	KAK	Tongeh.	Spez. Of.
Fließgrenze	0.83	0.90	0.82	0.91
Ausrollgrenze		0.81	0.60	0.79
KAK			0.66	0.90
Tongehalt				0.64

.... Text und Abbildungen fehlen

(Plastizitätsindex $f(Tonmial)$ **abb. ?, p.?**)

4. Die Flüssigphase

,

5. Literatur

- AG Boden* (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart - FRG
- Hanks, R.J. and G.L. Ashcroft* (1980): Applied Soil Physics. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg - FRG
- Hartge, K.H. und R. Horn* (1991): Einführung in die Bodenphysik. Enke Verlag, Stuttgart - FRG
- Hartge, K.H. und R. Horn* (1989): Die physikalische Untersuchung von Böden. Enke Verlag, Stuttgart - FRG
- Hillel, D.* (1998): Environmental Soil Physics. Academic Press, New York, London - UK
- Jury, W.A., W.R. Gardner and W.H. Gardner* (1991): Soil Physics. John Wiley and Sons, New York - USA
- Klute, A. (ed.)* (1986): Methods of Soil Analysis. Agron. Monograph No. 9(1), Am. Soc. Agron., Madison/Wisconsin - USA
- Marshall, T.J. and J.W. Holmes* (1988): Soil Physics. Cambridge University Press, Cambridge, u.a. - UK
- Richter, J.* (1986): Der Boden als Reaktor. Enke Verlag, Stuttgart -FRG
- Richter, J. (Hsg.)* (1988): Modelle für Prozesse im Boden. Programme und Übungen. Enke-Verlag, Stuttgart - FRG

6. Anhang

6.1. Bodensystematik

6.2. Horizontsystematik