

4. Physikalische Bodeneigenschaften

- **Bodenfarbe**
- **Bodentextur**
 - **Einstieg: Verwitterung**
 - **Korngrößenfraktionen**
 - **Bodenart**
- **Bodenstruktur**
 - **Gefügestufe**
 - **Bodendichte**
 - **Wirkung der Bodenverdichtung**
- **Kennwerte des Wasser- und Lufthaushalts**

Bodenfarbe

Kennzeichnung der Bodenfarbe

Zur Farbbestimmung wird die angefeuchtete Bodenprobe visuell mit den Farbwerten der Munsell-Farbtabelle verglichen und der richtige Farbton abgeschätzt.

→ **Munsell Farbtabelle:** von A. H. Munsell (1858-1918) entwickelt Farbskala zur systematischen Beschreibung von Farben.

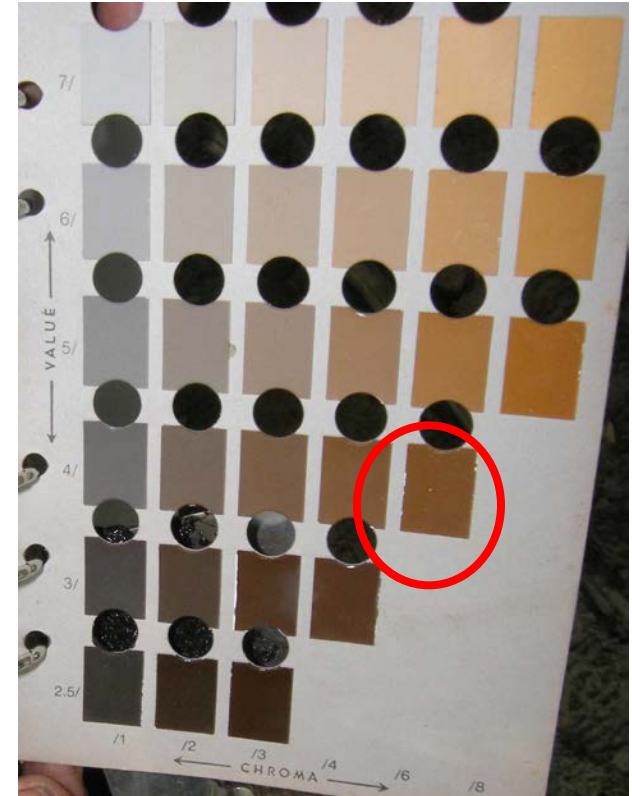
→ Kennzeichnung der Farbe anhand von 3 Größen:

1. Hue: Farbton (Spektralfarbe), Angabe des Mischungsteils von Gelb (**Yellow**) und Rot (**Red**); z.B. 10 YR, 2.5 YR; usw.

2. Value: Farbhelligkeit, Grauwert

3. Chroma: Farbsättigung, Farbintensität, Farbtiefe

7.5 YR 4/6 = „strong brown“
Hue Value Chroma



Wie kommt die Farbe in den Boden ?

Bestimmte Minerale und Huminstoffe geben dem Boden charakteristische Färbungen.

- Der Oberboden ist umso *dunkler*, desto höher der *Humusgehalt* ist. Dabei gibt es *graue* und *schwarze* Huminstoffe.
- Eisenoxide und –hydroxide färben den Boden
 - *gelb-braun* (z.B. *Goethit* in Bv-Horizonten von Braunerden),
 - *rot-braun* bzw. *orange* (z.B. *Ferrihydrit* bzw. *Lepidokrokit* in Rostflecken von Gleyen und Pseudogleyen)
 - *tiefrot* (*Hämatit* in subtropischen und tropischen Böden).
- *Gebliche* oder *hell-beige* Horizonte im Oberboden verweisen auf Stoffauswaschung in den Unterboden.
- Mangan(hydr-)oxide sind *braun-schwarz*, Eisen-sulfide *blau-schwarz* (Vorkommen in Go- bzw. Gr-Horizonten von Gleyen).



Munsell-Farbwerte von Bodenbestandteilen

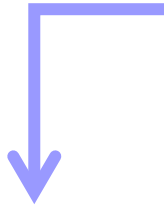
Mineral	Farbe	Munsell-Wert
Goethit	Gelb-Braun	10 YR 8/6
Hämatit	Rot	5 R 3/6
Lepidokrokit	Orange	5 YR 6/8
Ferrihydrit	Rot-Braun	2.5 YR 3/6
Eisensulfid	Blau-Schwarz	10 YR 2/1
Manganoxid	Braun-Schwarz	10 YR 2/2
Calcit (Kalk)	Weiß	10 YR 8/2
Dolomit	Weiß	10 YR 8/2
Quarz	Grau	10 YR 6/1
Humus	Schwarz	10 YR 2/2

Bodentextur (Körnung)

Verwitterung



**VERWITTERUNGS-
PRODUKTE
(Lockersedimente)**

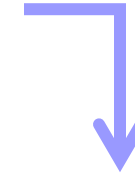


Einteilung nach der Entstehung

AQUATISCHE SEDIMENTE
(Unterscheidung von fluviatilen,
limnischen, marinen Ablagerungen)

ÄOLISCHE SEDIMENTE
(z.B. Löss, Flugsand)

GLAZIGENE SEDIMENTE
(z.B. Geschiebemergel)



Einteilung nach der Korngröße

TON
SCHLUFF
SAND

} Feinboden
(< 2 mm)

GRUS / KIES
STEINE
BLÖCKE

} Grobboden
(> 2 mm)

Physikalische Verwitterung

Zerkleinerung und Lockerung der Gesteine , Riss- und Spaltenbildung, Vergrößerung der Oberfläche, keine stoffliche Veränderung

- **Temperaturverwitterung** („Insolation“ = Sonneneinstrahlung): Temperaturgradienten innerhalb der Gesteinsmasse, Spannungen und Rissbildungen durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten der mineralischen Bestandteile
- **Frostsprenzung**: Volumenvergrößerung von gefrorenem Wasser um 9 %
- **Salzsprenzung**: Auskristallisieren von Salzen mit Volumenvergrößerung

Biologische Verwitterung

- **Wurzelsprengung** durch Dickenwachstum von Wurzeln in Spalten

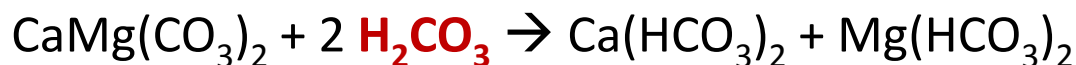
(Bio)chemische Verwitterung

Kohlensäurebildung (H_2CO_3) durch Atmung von Organismen; Säureabgabe durch Pflanzenwurzeln, Bakterien, Pilze → **(Kohlen-)Säureverwitterung**

- Bsp. Kalksteinverwitterung durch Kohlensäure



- Bsp. Dolomitverwitterung



Chemische Verwitterung:

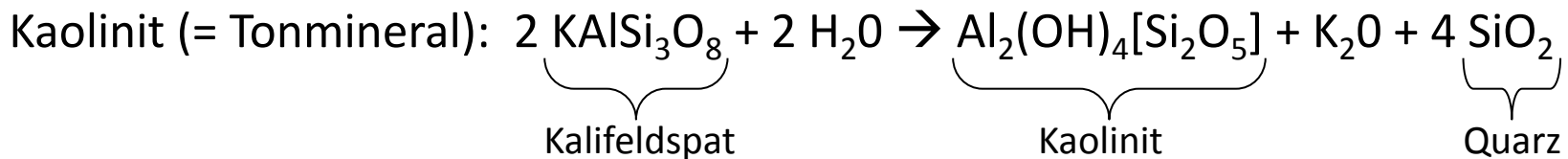
➤ Einfache **Lösungsverwitterung**:

Auswaschung von wasserlöslichen Salzen (Chloride, Nitrate, Sulfate, Carbonate)

➤ Verwitterung durch **Hydrolyse**:

- Wichtigster Verwitterungsprozess unter humiden Klimabedingungen! Anlagerung von H₂O-Dipolen an die Ionen des Kristallgitters von primären Mineralen führt zum Austausch von Kationen durch H⁺-Ionen.
- Folge: Nährstoffkationen (Ca, Mg, K, ...) werden herausgelöst und pflanzenverfügbar, Tonminerale kolloidaler Größe bilden sich neu

Bsp. Verwitterung des Kalifeldspats (= primäres Mineral) und Neubildung von



Bv-Horizont → Verwitterung → „Verlehmung“

- ### ➤ Verwitterung durch **starke Säuren** aus der Verbrennung fossiler Energieträger
- SO₂ + H₂O → H₂SO₃ (schweflige Säure); NO + NO₂ + H₂O → 2 HNO₂ (salpetrige Säure)

Bsp.: Entstehung von Gips aus Kalkstein bzw. Marmor



Korngröße und spezifische Oberfläche

<i>Kornfraktion</i>	<i>Durchmesser (Beispiel)</i>	<i>Spezifische Oberfläche (Dichte 2.65 g/cm³)</i>
Kies	10 mm	1 cm ² /g
grober Sand	1 mm	10 cm ² /g
feiner Sand	0,1 mm	100 cm ² /g
Schluff	0,01 mm	1000 cm ² /g
Ton	0,001 mm	10.000 cm ² /g (= 1 m ² /g)

**Tonminerale inkl. „innerer
Oberfläche“: bis zu 400 m²/g !**

Die feinkörnigen Fraktionen im Boden (Tonminerale, Oxide, Hydroxide) besitzen eine äußerst hohe Oberfläche und sind deshalb hochgradig oberflächenaktiv und reagibel.

Korngrößenfraktionen

Steine, Blöcke, Großblöcke

63 mm

Grobgrus /-kies

20 mm

Grus / Kies

Mittelgrus /-kies

6,3 mm

Feingrus /-kies

2000 μ m (2 mm)

(überwiegend Quarz,
wenig Feldspäte)

SAND (S)

Grobsand (gS)

630 μ m

Mittelsand (mS)

200 μ m

Feinsand (fS)

63 μ m (0,063 mm)

(v.a.Glimmer,
Feldspäte,
wenig Quarz)

SCHLUFF (U)

Grobschluff (gU)

20 μ m

Mittelschluff (mU)

6,3 μ m

Feinschluff (fU)

2 μ m (0,002 mm)

(überwiegend Oxide
und Tonminerale)

TON (T)

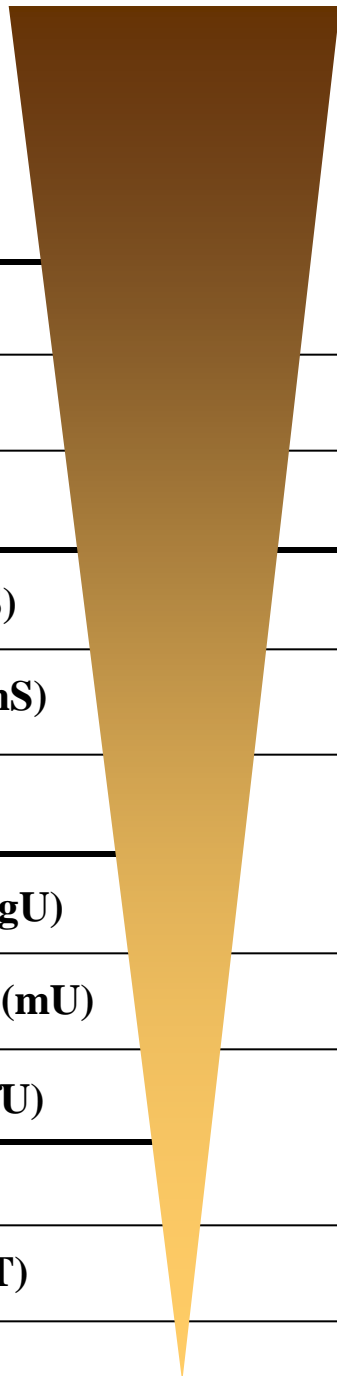
Grobton (gT)

0,63 μ m

Mittelton (mT)

0,2 μ m

Feinton (fT)



Bestimmung der Korngrößenverteilung

1) Feldmethode: „Fingerprobe“ →

Tonfraktion gut formbar,
glänzend, glatt

Schlufffraktion staubig,
mehlig, kaum formbar

Sand nicht formbar, gut
sichtbare Körnigkeit

2) Labormethode:

Sandfraktion → Sieben

Schluff- und
Tonfraktion → Sedimentationsverfahren
(Pipettmethode nach Köhn)

Sinkgeschwindigkeit nach dem Stoke'schen Gesetz:

<i>Teilchendurchmesser [μm]</i>	<i>Kornfraktion</i>	<i>Sinkdauer (10 cm)</i>
< 2	Ton	> 7 h 40 min
2 – 6,3	Feinschluff	7 h 40 min bis 50 min
6,3 – 20	Mittelschluff	50 min bis 4 min 30 sec
20 – 63	Grobschluff	4 min 30 sec bis 30 sec
63 - 200	Feinsand	30 sec - 3 sec

Begriff der „**Bodenart**“

Grundsätzliches:

Für die **Bodenchemie** und den **Wasserhaushalt** von Böden sind die **Fraktionen < 2 mm** von besonderer Bedeutung (= **Feinboden**).

Schon Albrecht Thaer führte um 1800 den Begriff der **Bodenart** ein. Er erkannte, dass sich die Böden nach ihrem Gehalt an Sand und „abschlämbbaren Teilchen“ (Ton + Schluff) ordnen lassen.

Der Feinboden wird entsprechend der **vorherrschenden Kornfraktionen (Ton, Schluff, Sand)** untergliedert.

Lehm ist ein **Dreikorngemisch** aus Sand + Schluff + Ton.

Die Bodenart kann aus dem **Bodenartendiagramm** abgelesen werden.

Im Gelände gehört die Ansprache der Bodenart mittels **Fingerprobe** zu den standardmäßig erfassten Bodenmerkmalen.

% Schluff

Bodenarten- Bodenarten-
Hauptgruppe Gruppe

Bodenart

100

80

65

50

40

30

25

15

10

5

8

12

17

25

30

35

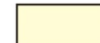
45

65

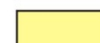
100

% Ton

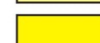
s Sande



ss Reinsande



ls Lehmsande



us Schluffsande

l Lehme



sl Sandlehme



ll Normallehme



tl Tonlehme

u Schluffe



su Sandschluffe



lu Lehmschluffe



tu Tonschluffe

t Tone



ut Schlufftone



lt Lehmtone

Ss

St2, Su2, Sl2, Sl3

Su3, Su4

Slu, Sl4, St3

Lt2, Ls2, Ls3, Ls4

Lts, Ts3, Ts4

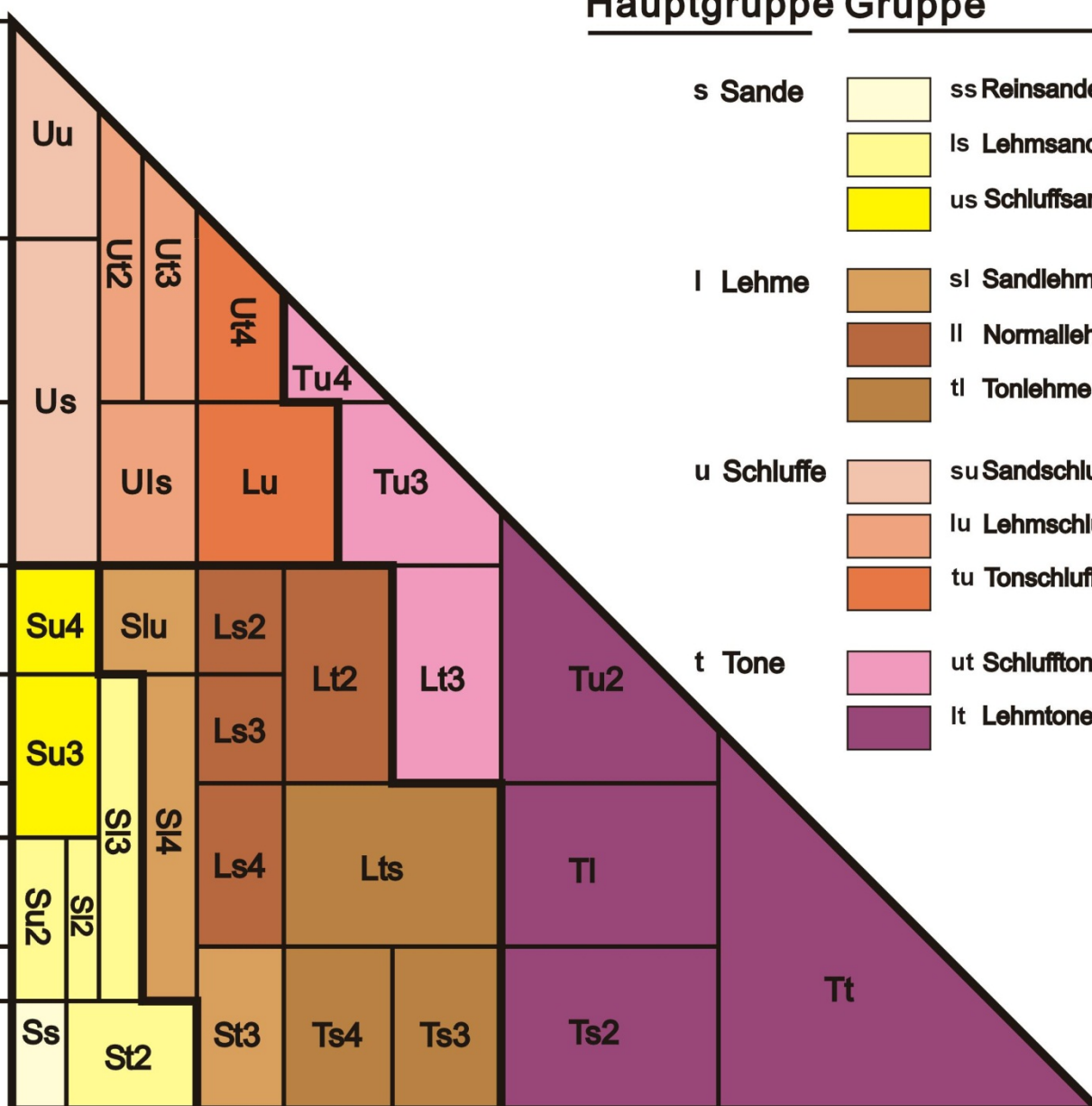
Us, Uu

Ut2, Ut3, Uls

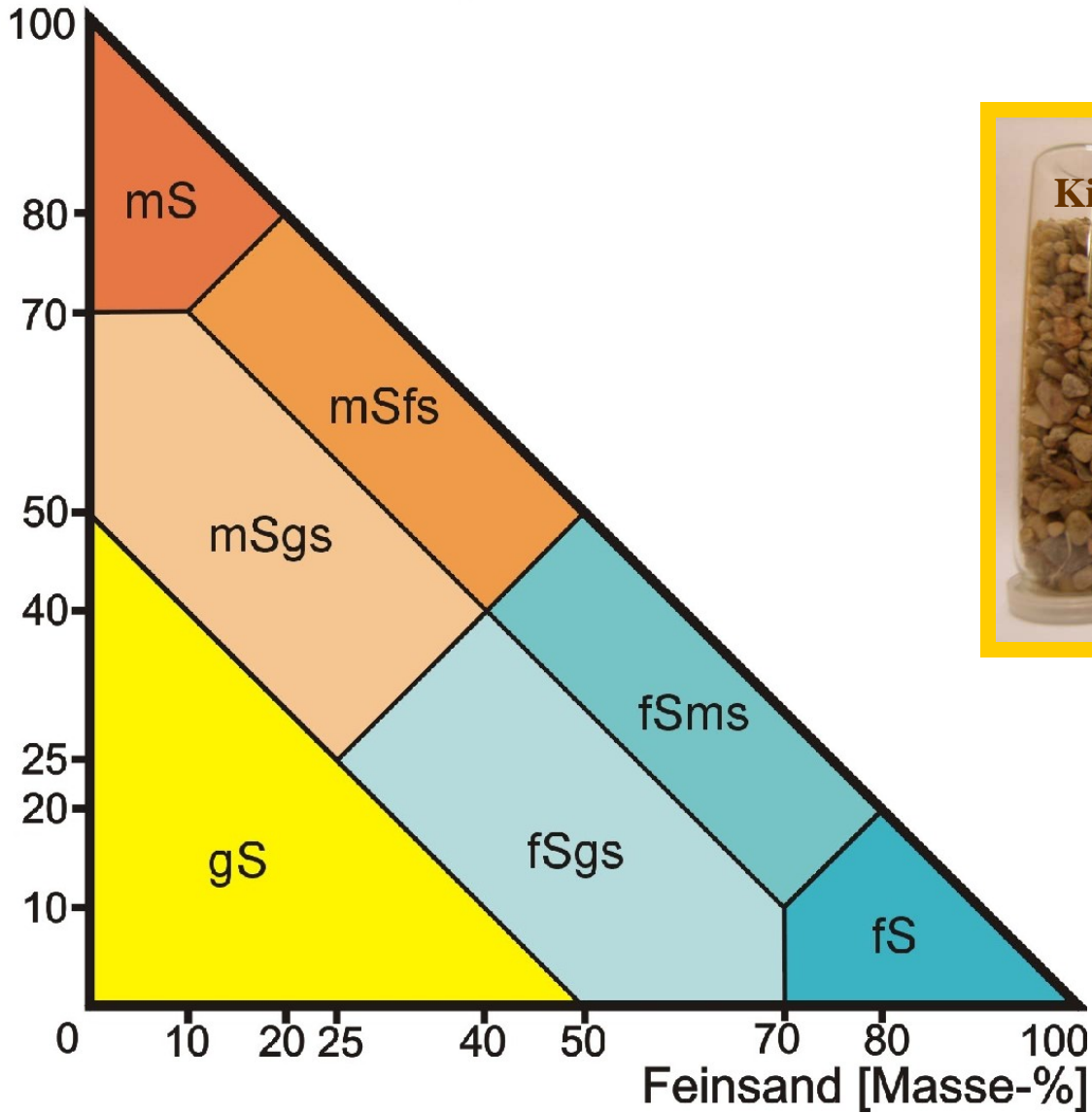
Ut4, Lu

Tu3, Tu4, Lt3

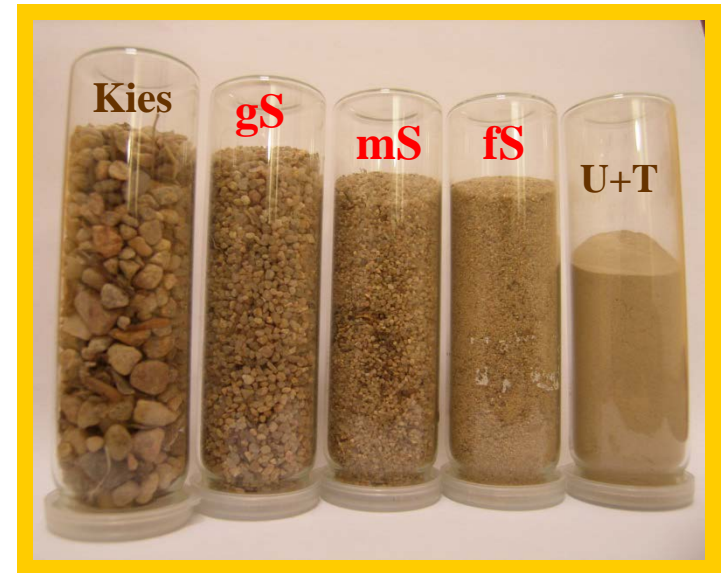
Tt, Tu2, Tl, Ts2



Mittelsand [Masse-%]



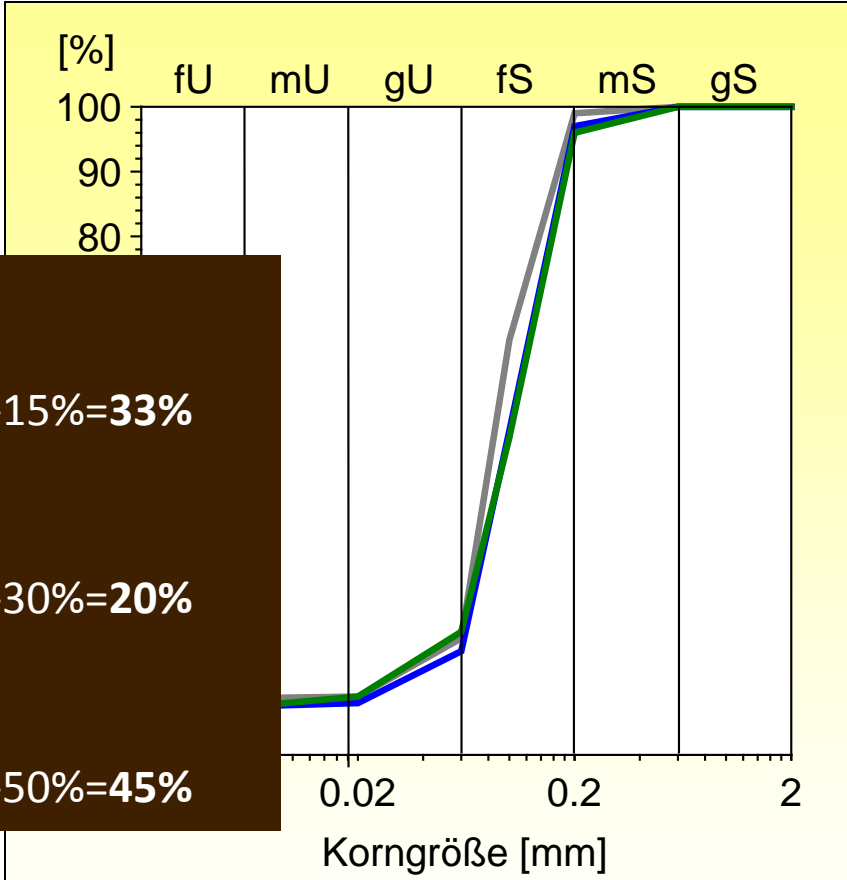
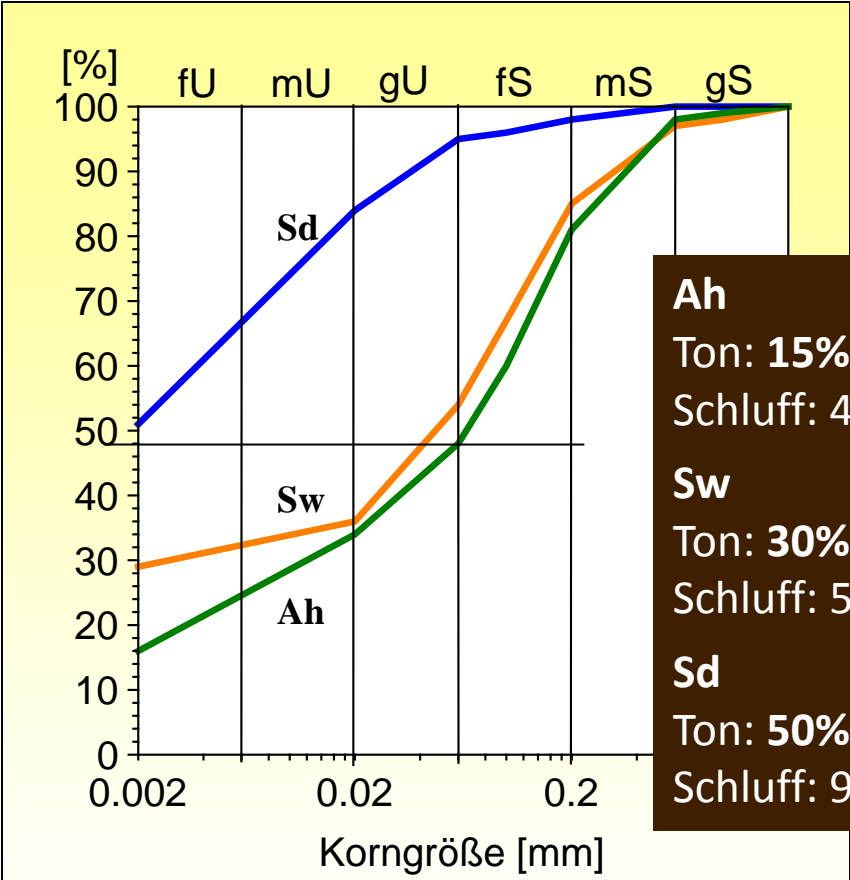
Glasröhrchen mit Kornfraktionen (→ Laborpraktikum)



Körnungssummenkurve und Bodenart (Beispiele)

Pseudogley aus Geschiebelehm

Braunerde-Podsol aus Talsand



Ah
 Ton: 15%
 Schluff: 48%-15%=33%

Sw
 Ton: 30%
 Schluff: 50%-30%=20%

Sd
 Ton: 50%
 Schluff: 95%-50%=45%

Ah-Horizont → **SI4**
 Sw-Horizont → **Lts**
 Sd-Horizont → **Tu2**

Aeh-Horizont → **St2**
 Bh-Horizont → **SI2**
 Bv-Horizont → **SI2**

% Schluff

Bodenarten- Bodenarten-
Hauptgruppe Gruppe

Bodenart

100

80

65

50

40

30

25

15

10

5

8

12

17

25

30

35

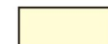
45

65

100

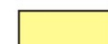
% Ton

s Sande



ss Reinsande

Ss



ls Lehmsande

St2, Su2, Sl2, Sl3



us Schluffsande

Su3, Su4

l Lehme



sl Sandlehme

Slu, Sl4, St3



ll Normallehme

Lt2, Ls2, Ls3, Ls4



tl Tonlehme

Lts, Ts3, Ts4

u Schluffe



su Sandschluffe

Us, Uu



lu Lehmschluffe

Ut2, Ut3, Uls



tu Tonschluffe

Ut4, Lu

t Tone



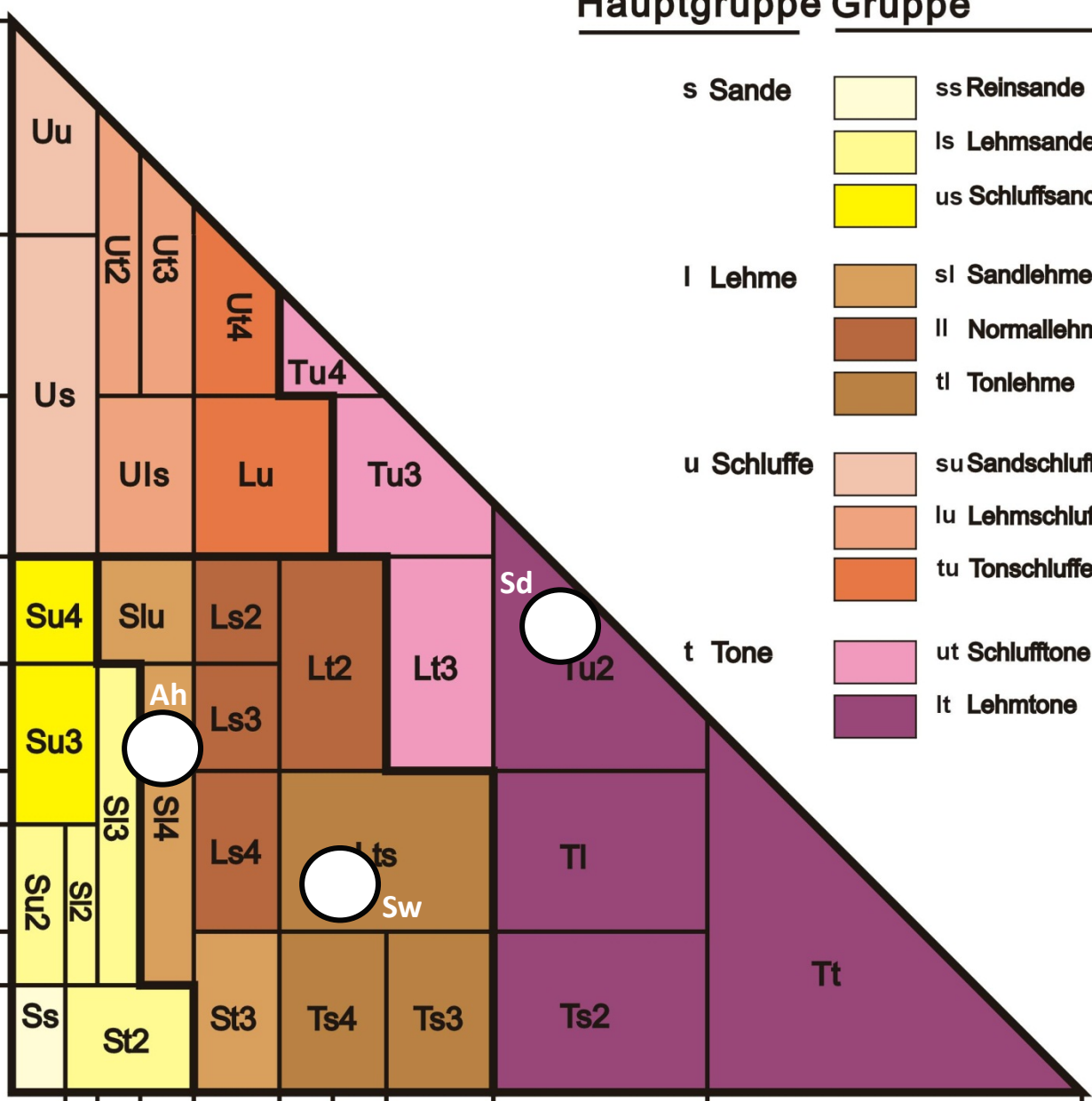
ut Schlufftone

Tu3, Tu4, Lt3



lt Lehmtone

Tt, Tu2, Tl, Ts2



Bodengefüge

Grundgefüge

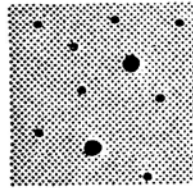
Einzelkornggefüge (ein)



Kittgefüge (kit)



Kohärentgefüge (koh)



Aggregatgefüge Makrogrubgefüge

Rissgefüge (ris)



Säulengefüge (sau)

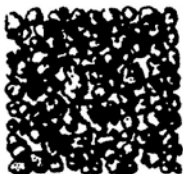


Schichtgefüge (shi)



Makrofeingefüge

Krümelgefüge (kru)



Subpolyederggefüge (sub)



Polyederggefüge (pol)



Prismengefüge (pri)



Plattengefüge (pla)



Bodengefüge / Bodenstruktur

Als Bodengefüge bezeichnet man die **räumliche Anordnung der festen Bodenbestandteile** (Primärpartikel) einschließlich der zugehörigen **Hohlräume**. Das Gefüge beeinflusst maßgeblich den Wasser- und Lufthaushalt, die Durchwurzelbarkeit sowie die Verfügbarkeit der Nährstoffe.

Allgemein gilt: je gröber das Gefüge und / oder je dichter gepackt die einzelne Gefügeeinheit, desto ungünstiger sind die Bodeneigenschaften.

Verfahren: spatenblattgroßen Bodenmonolithen aus 1 m Höhe fallen lassen → Betrachtung der einzelnen Bruchstücke (Fallprobe).

Aus dem mit bloßem Auge erkennbaren Makrogefüge wird die **Gefügeform** abgeleitet.

Zu unterscheiden sind **Grundgefüge** und **Aggregatgefüge**. Bei letzterem wird wiederum zwischen dem übergeordneten **Makrogrubgefüge** und einem diese Grobaggregate weiter aufteilenden **Makrofeingefüge** differenziert.

Bodengefüge / Bodenstruktur

Grundgefüge

keine Absonderung zu
Aggregaten erfolgt

- Einzelkorngefüge
- Kittgefüge
- Kohärentgefüge

Aggregatgefüge

Bodeneinzelteilchen fügen sich
zu Aggregaten bestimmter Größe
und Form zusammen

Makrogrobggefüge

entsteht durch Quellungs- und
Schrumpfungsvorgänge in
tonreichen Böden
(**Absonderungsgefüge**);
Gefügeelemente > 50 mm

- Rissgefüge
- Säulengefüge
- Schichtgefüge

Makrofeinggefüge

entsteht durch Quellungs- und
Schrumpfungsvorgänge
(**Absonderungsgefüge**)
und/oder bodenbiologische
Prozesse (**Aufbaugesfüge**);
Gefügeelemente < 50 mm

- Krümelgefüge
- Subpolyederggefüge
- Polyederggefüge
- Plattengefüge

Gefügearten, die Sie (er)kennen sollten

Einzelkorngefüge	ein	Bodenteilchen (Minerale, Gesteinsstückchen) liegen lose nebeneinander; typisch für humusarme Horizonte aus Sand
Kohärentgefüge	koh	Bodenteilchen bilden eine zusammenhaftende, nicht gegliederte Masse; typisch für nicht aggregierte bindige Böden (z.B. Schluffböden)
Kittgefüge	kit	Einzelkörner miteinander verkittet z.B. häufig durch Fe-Verbindungen (→ Bs- oder Sw-Horizonte: Ortstein, Raseneisenstein) oder durch Kalkausfällung (→ Wiesenkalk)
Rissgefüge	ris	typisches Absonderungsgefüge durch Quellung und Schrumpfung von Tonmineralen entstanden
Plattengefüge	pla	glatte horizontal liegende Grenzflächen; oft auch durch mechanische Verdichtung (z.B. durch Holzernte) entstanden
Polyeder	pol	Aggregate mit Durchmesser 10-50 mm; scharfkantig brechend; glatte Oberflächen (z.B. Bt-Horizonte)
Subpolyeder	sub	Aggregate mit Durchmesser 10-30 mm; stumpfkantig brechend; rauhe abgerundete Oberflächen; häufig Bv-Horizonte
Krümelfgefüge	kru	biogenes Aufbaugesüge; 1-5 mm messende rundliche Aggregate mit sehr rauher Oberfläche; häufig in Ah-Horizonten mit hoher biologischer Aktivität (Humusform Mull)

Bodendichte

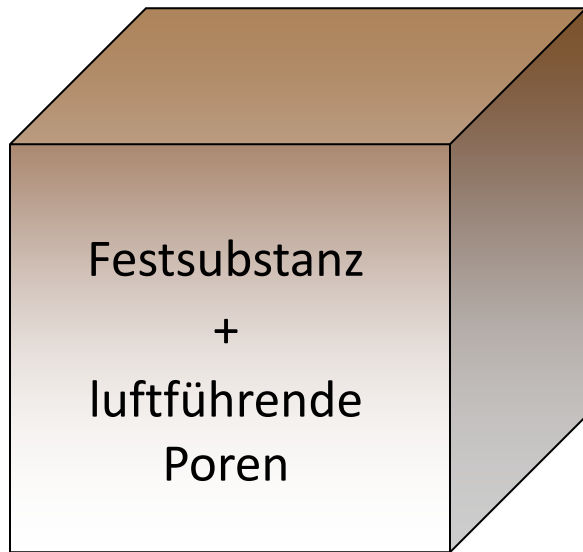
Bodendichte^{*)} [g/cm³]

(syn.: Trockenrohdichte TRD,
Trockenraumgewicht TRG,
Lagerungsdichte)

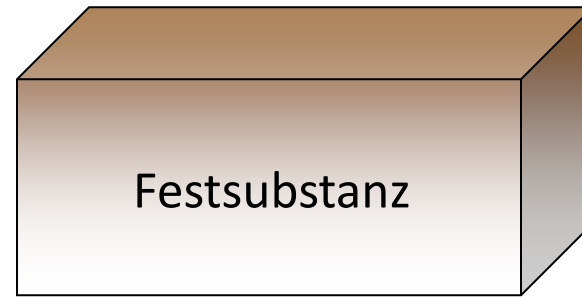
Festsubstanzdichte [g/cm³]

(z.B. Dichte von reinem Quarz = 2,65 g/cm³)

ofentrockene Bodenprobe (105°C)



→ Entfernung aller Poren



$$\begin{aligned} V_B &= 100 \text{ cm}^3 \\ M_B &= 130 \text{ g} \\ \text{TRD} &= 1,3 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{FS} &= 50 \text{ cm}^3 \\ M_{FS} &= 130 \text{ g} \\ D_{FS} &= 2,6 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

^{*)} Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde . 16. Aufl. S. 179

Bodendichtebestimmung durch volumenbezogene Probennahme

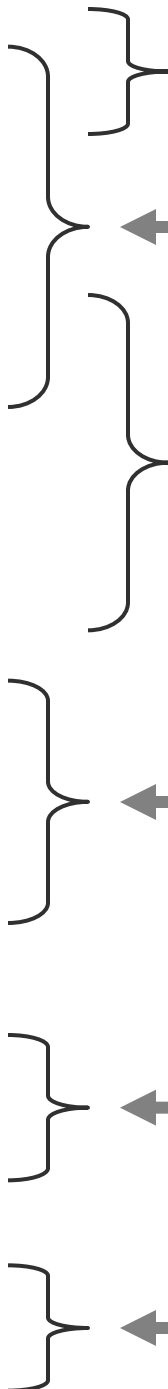
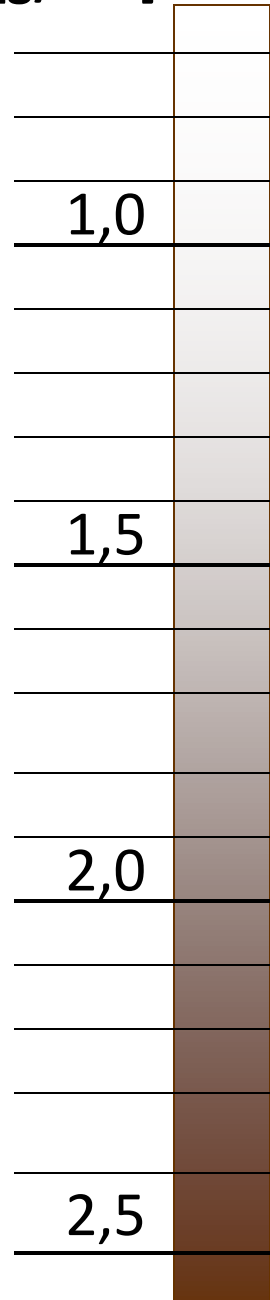
Stechzylinder ($V=100\text{cm}^3$)



- 1) Trocknung des gesamten entnommenen Bodenvolumens bei 105°C
- 2) Wägung der absolut trockenen Probe (ATRO-Masse) $\rightarrow M_B$
- 3) Berechnung der Bodendichte: $\text{TRD} = M_B / 100 \text{ cm}^3$

[g/cm³]

Dichte von Bodenhorizonten



← Humusauflagen

← Ah-Horizonte

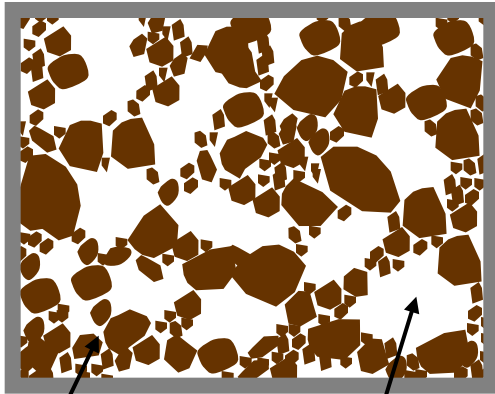
← Verdichtungshinweise bei Oberböden

← C-Horizonte pleistozäner Sande

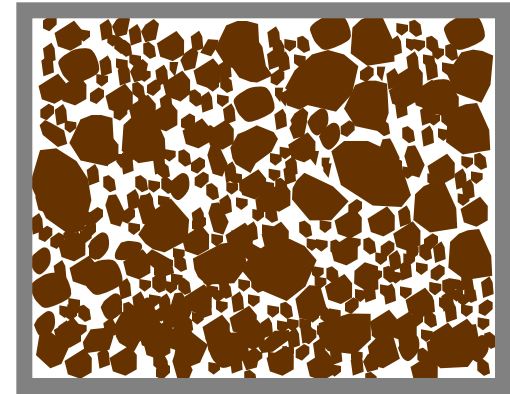
← ausgetrocknete Tonaggregate,
Bt-Horizonte

← Konkretionen aus Ortstein, Raseneisenstein

← quarzreiche Gesteine



Boden- Verdichtung



Primärporen
→ körnungsabhängig

Sekundärporen
(z.B. Schwundrisse)
→ gefügeabhängig

ökologische Effekte ab
TRD > ca. **1,4 g/cm³**

Folgen der Bodenverdichtung

- Zerstörung der Bodenstruktur (Gefüge)
- Reduktion des Gesamtporenvolumens
- Zunahme der Bodendichte
- Verringerung v.a. des Grobporenanteils
- ggf. Erhöhung des Feinporenanteils

Ökologische Veränderungen

- Störung des Lufthaushalts: Erhöhung der CO₂-Konzentration, O₂-Mangel
- biologische Aktivität reduziert
- Keimfähigkeit reduziert
- Dränung verschlechtert, Vernässung, Oberflächenabfluss
- Durchwurzelbarkeit eingeschränkt
- pflanzenverfügbares Bodenwasser reduziert

Bodenverdichtung nach Durchforstung (Bsp. Schorfheide)



Harvester Timberjack (810B und 1110)
Gewicht: 10,4 t / 13,7 t
Reichweite: 9,5 m
Nutzlast: 9 t / 11 t



Eintiefungen auf den Hauptabfuhrassen
nach der Durchforstung bis zu 20 cm

Bodendichte im Bereich der Fahrspuren (Messwerte, LFE):

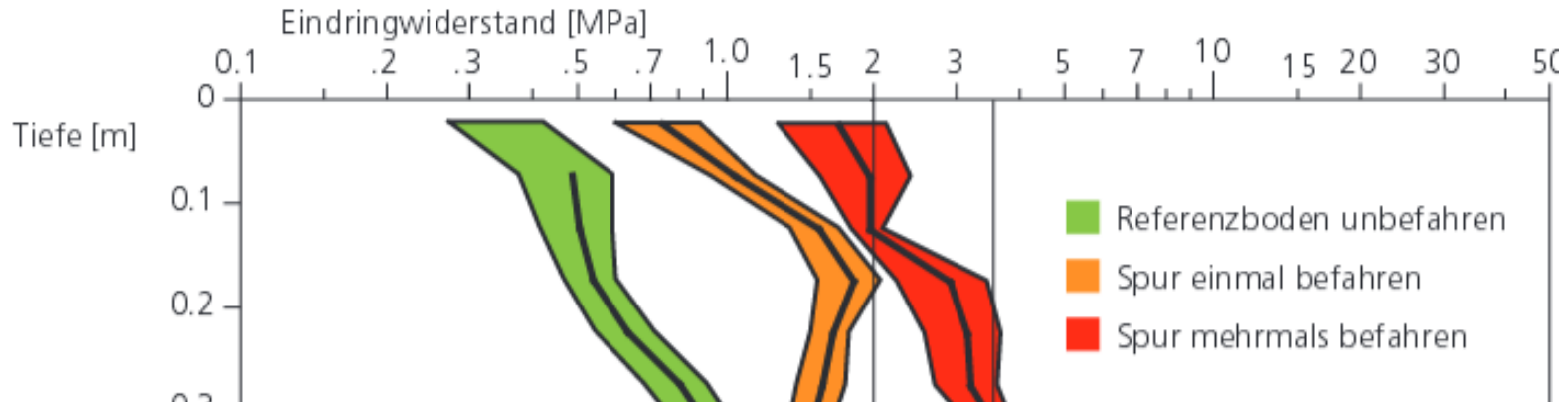
Oberboden natürlich: 0,9 – 1,2 g/cm³



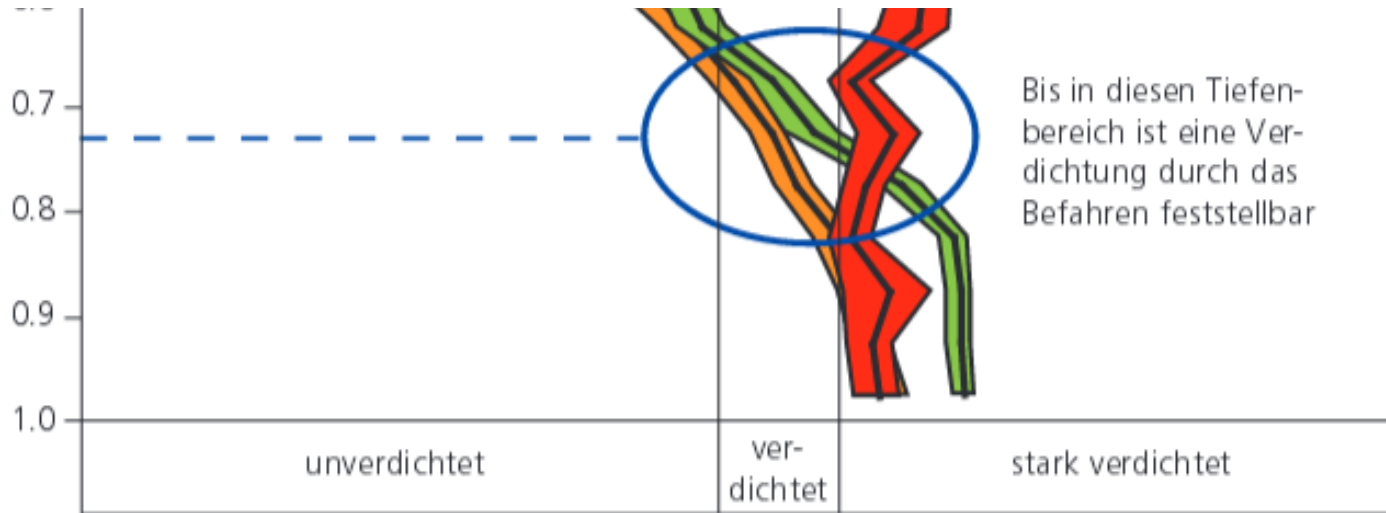
Oberboden befahren: 1,3 – 1,5 g/cm³

→ Rückegassen verhindern eine flächenhafte Bodenverdichtung !

Messung von Bodenverdichtungen mittels Penetrometer

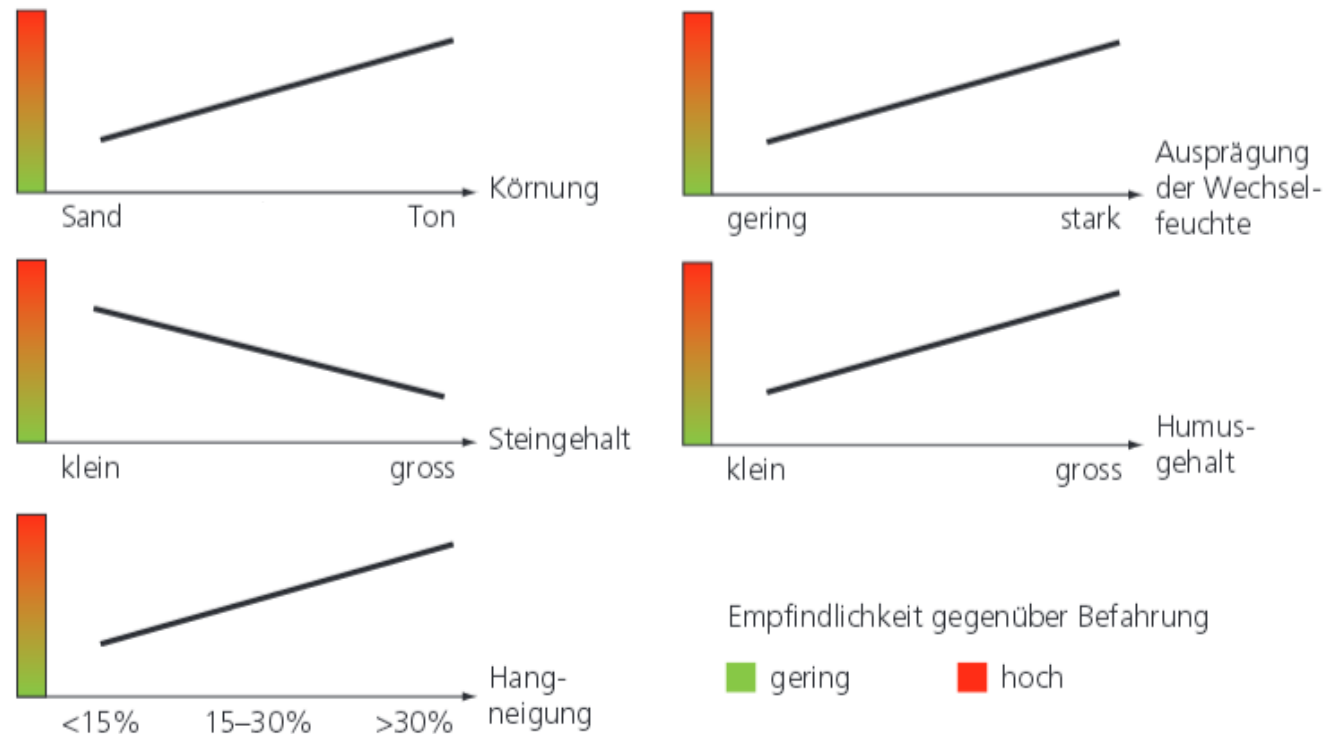


- Plastische Verformung durch erste Überfahrt 60-80 % der maximalen Bodenverdichtung
- Mechanische Belastung des Bodens wirkt sich bis in grössere Tiefen aus (70-80 cm).



Einflussfaktoren auf die Befahrungsempfindlichkeit

- Bodenart
- **Feuchtezustand**
- Humusgehalt
- Grobbodenanteil
- Makrogefüge



WSL Merkblatt für die Praxis Nr.45.
Physikalischer Bodenschutz im Wald.
Bodenschutz beim Einsatz von
Forstmaschinen

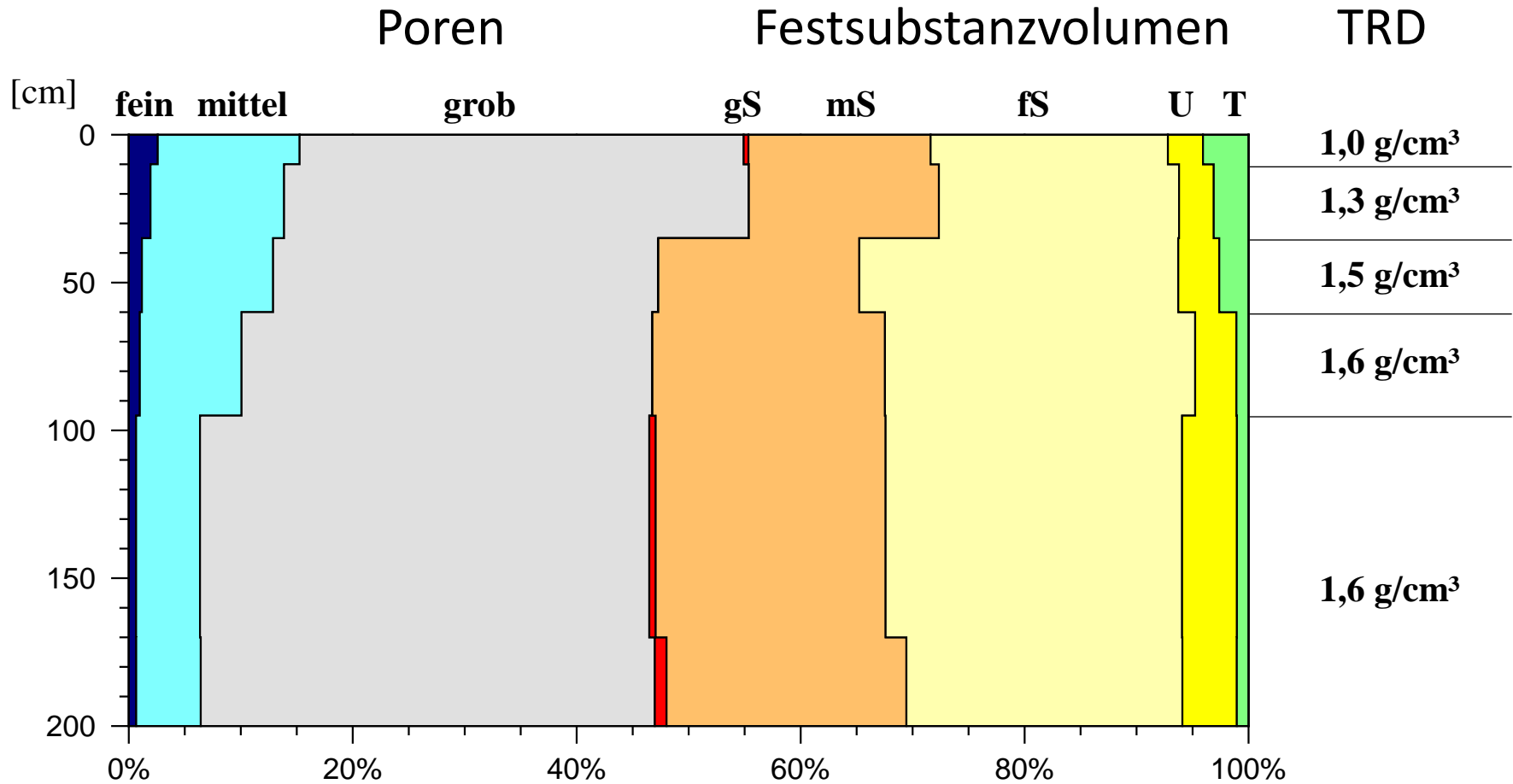
Bodenschutz bei der Holzernte

- Flächenbefahrungsverbot
- Mindestabstände der Rückegassen einhalten
 - allg. 20 m („muss“, PEFC), 40 m auf empfindl. Standorten („soll“, PEFC)
 - allg. 40 m („muss“, Naturland), („soll“, FSC)
- Zeitliche Befahrungseinschränkungen (Trocken- / **Frost**perioden)
- Radlast verkleinern z.B. durch Verringerung des Lastgewichts
- Kontaktfläche vergrössern durch niedrigen Reifenfülldruck, Breitreifen, ...
- Reisigmatten auf der Rückegasse führen zu gleichmäßiger Kräfteverteilung

Kennwerte des Wasser- und Lufthaushalts

Körnung und Porung

Beispiel: Podsol aus Flugsand in natürlicher Lagerung



Porenvolumen und Porengrößen

Grobporen > 10 μm (1/100mm)	werden durch die Schwerkraft entwässert ; nach Entwässerung luftgefüllt → ökologische Bedeutung: Durchlüftung, Dränung, Durchwurzelbarkeit des Bodens, Lebensraum für Bodenorganismen S >> L > U >> T
Mittelporen 0,2 – 10 μm	enthalten kapillar gebundenes pflanzenverfügbares Wasser (Boden = Schwamm); Humus erhöht Mittelporenanteil bei Sanden → ökologische Bedeutung: Eindringen von Wurzelhaaren, Wasseraufnahme, Lebensraum für Mikroorganismen U > L > T > S
Feinporen < 0,2 μm	sind unter humiden Bedingungen stets wasserführend ; Wasser wegen zu starker Bindung (Adsorptionswasser) nicht pflanzenverfügbar; sind weitgehend unbelebt T >> U > L >> S
Gesamtporenvolumen (GPV)	Summe der Fein-, Mittel- und Grobporen; bei Tonböden aufgrund sperriger Lagerung und abstoßender Oberflächenkräfte der Tonminerale maximal T >> U, L, S

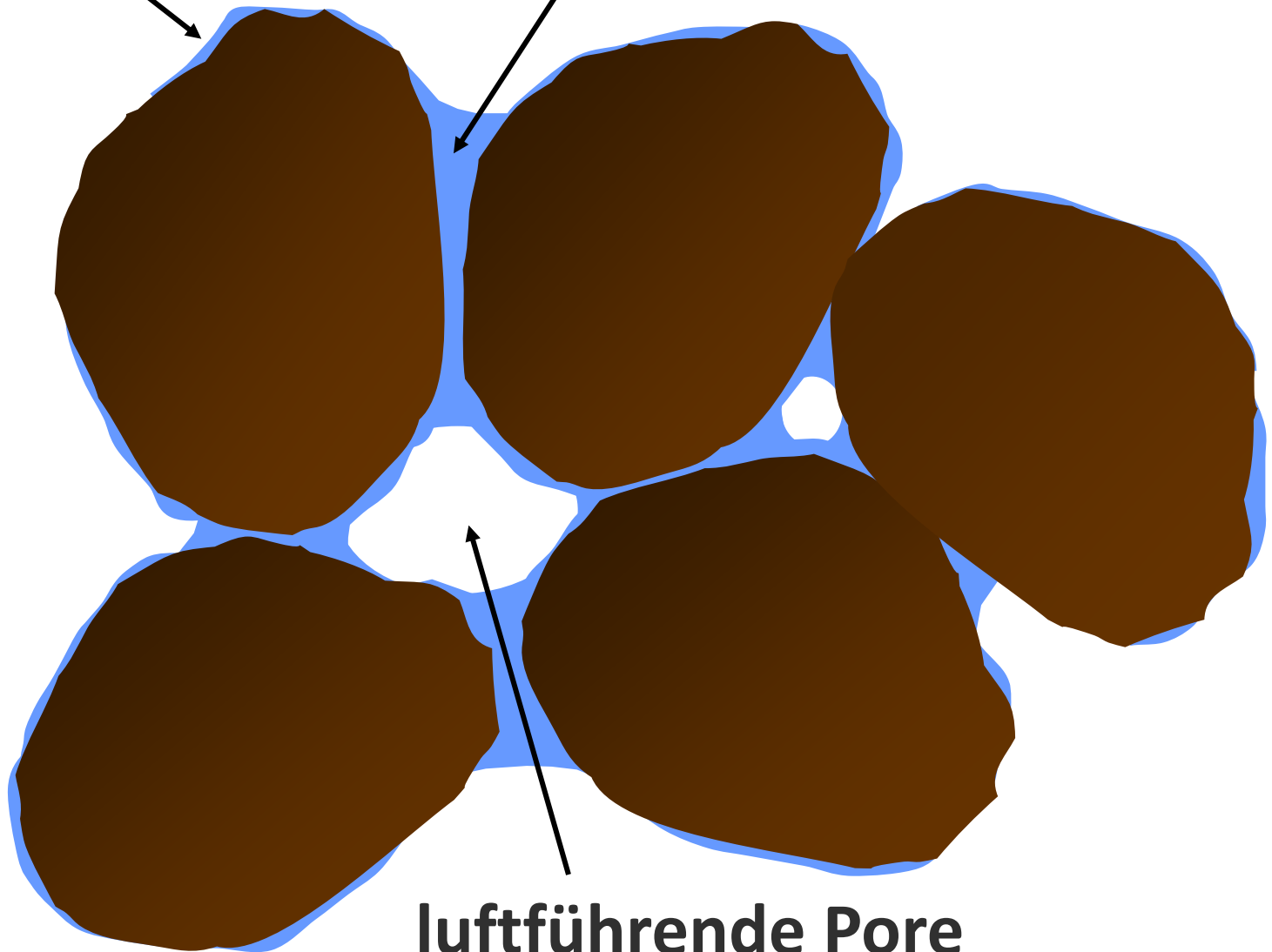
Adsorptions-
wasser

+

Kapillarwasser

=

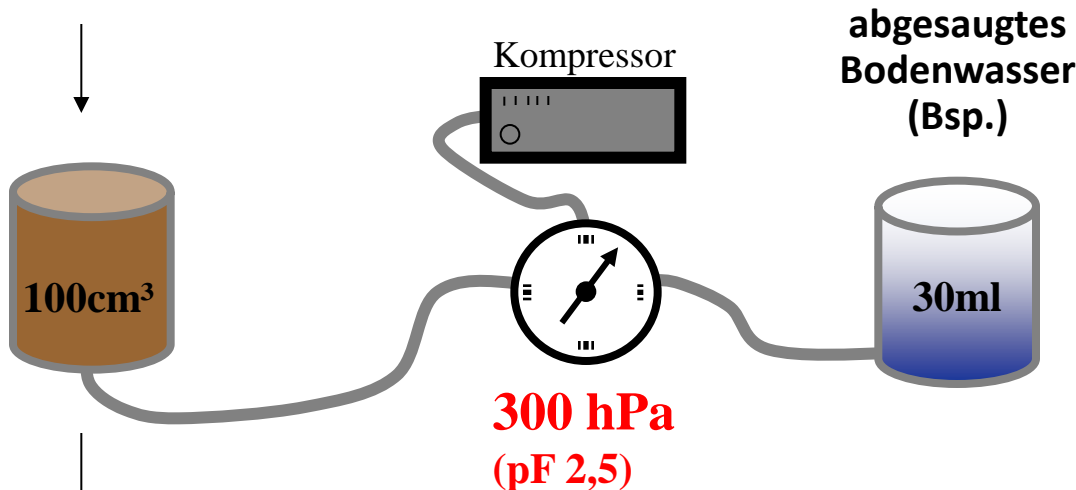
Haft-
wasser



nach Niederschlag **Sickerwasser** führend

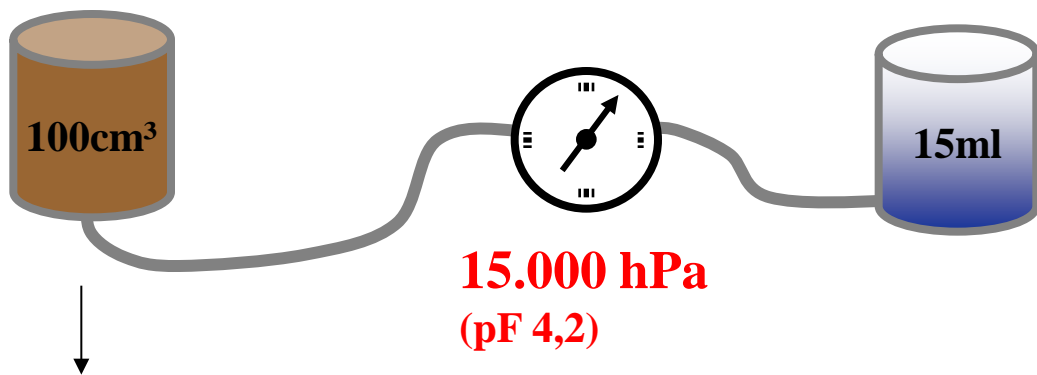
Bestimmung der Porenanteile (→ Bindungsintensität des Bodenwassers)

1) Aufsättigung der Bodenprobe



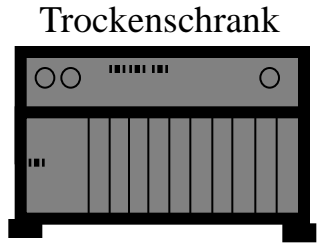
30 ml = 30 cm³ Wasser
= **Volumen der Grobporen**
30 Vol.-%

3)



15 ml = 15 cm³ Wasser
= **Volumen der Mittelporen**
15 Vol.-%

4) Bestimmung des Restwassers durch Trocknung bei 105°C (Trockenschrank) und Wägung



3 g = 3 cm³ Wasser
= **Volumen der Feinporen**
3 Vol.-%

Kennwerte des Wasser- und Lufthaushalts

	weite Grobporen	enge Grobporen	Mittelporen	Feinporen
Saugspannung [hPa]	< 60	60 – 300	300 – 15.000	> 15.000
pF-Wert	< 1,8	1,8 - 2,5	2,5 – 4,2	> 4,2
Äquivalentdurchmesser [µm]	> 50	50 - 10	10 – 0,2	< 0,2
Bodenwasser	schnell bewegliches Sickerwasser	langsam bewegliches	pflanzenverfügbares Haftwasser	nicht pflanzenverfügbares
Kennwerte	Luftkapazität	nutzbare Feldkapazität		Totwasser
		Feldkapazität		
	Gesamtporenvolumen			

pF-Kurve

- Beziehung zwischen Saugspannung und Wassergehalt -

