



Studiengang Agrartechnik

Modul Bodenkultur und Düngung

WS 2024/2025

Kapitel 3:

Bodenphysik

Gliederung des Moduls (Vorlesung)

Teil Bodenkultur

1. Rechtliche Rahmenbedingungen

- Bodenschutzrecht
- Düngerecht

2. Bodenentstehung

- Geologie
- Bodenbildende Faktoren und Prozesse
- Bodensystematik: Bodentypen/Bodenformen

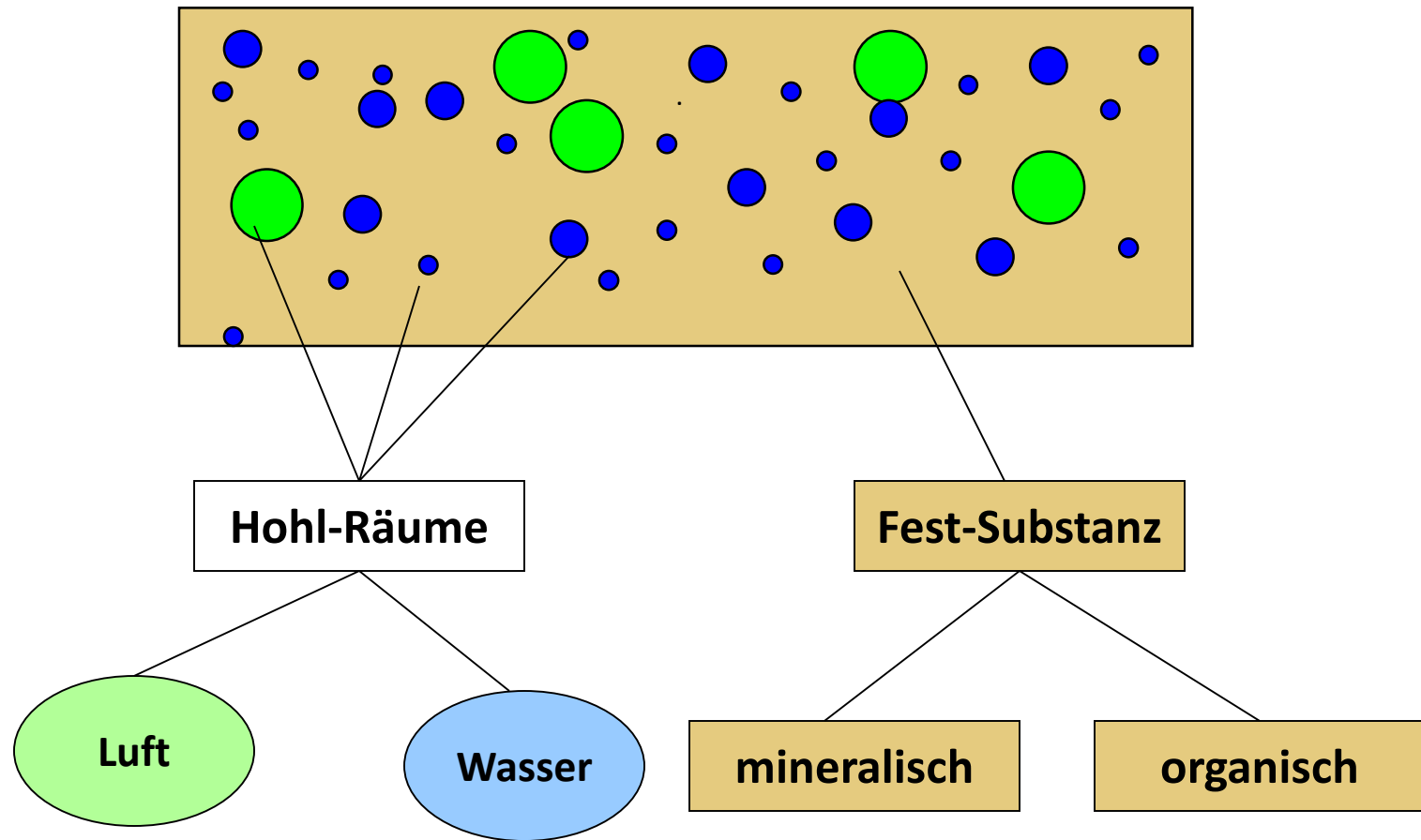
3. Bodenphysik

- Feste Bestandteile
- Flüssige Bestandteile/Bodenwasser
- Bodenluft

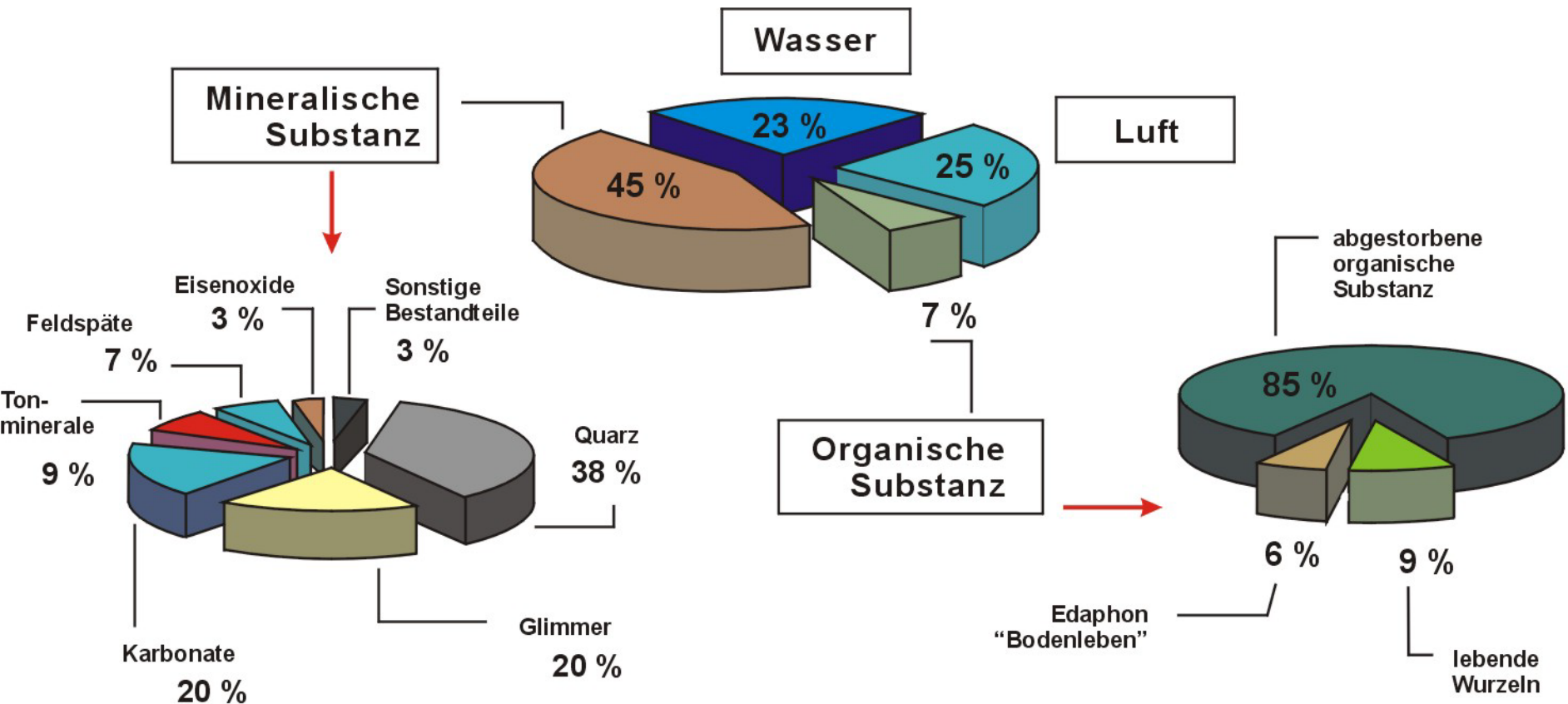
4. Organische Substanz

- Bodenhumus: Entstehung, Bedeutung
- Bodenfruchtbarkeit; Fruchtfolge

„Drei-Phasensystem Boden“



Die Zusammensetzung des Bodens



© Lernort **Boden**, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV) 2006. Alle Rechte vorbehalten.

Die mineralische Festsubstanz des Bodens

- bildet das Bodengerüst des Mineralbodens
- Elementarteilchen (Primärkörner) sind mehr oder weniger Verwitterte Gesteinsreste
 - ✍ Silikate (Silizium-Oxid-Verbindungen)
 - ✍ Quarz
 - ✍ Carbonate
 - ✍ Metall-Oxide
- Sekundärkörner: Gefügeelemente (Aggregate)
 - ✍ „Verklebungen“ von Primärkörnern
- Größenklassen der Primärkörner:
 - ✍ Sand
 - ✍ Schluff
 - ✍ Ton
- Korngrößenverteilung = „Bodenart“ („Körnung“)

Die Bodenart

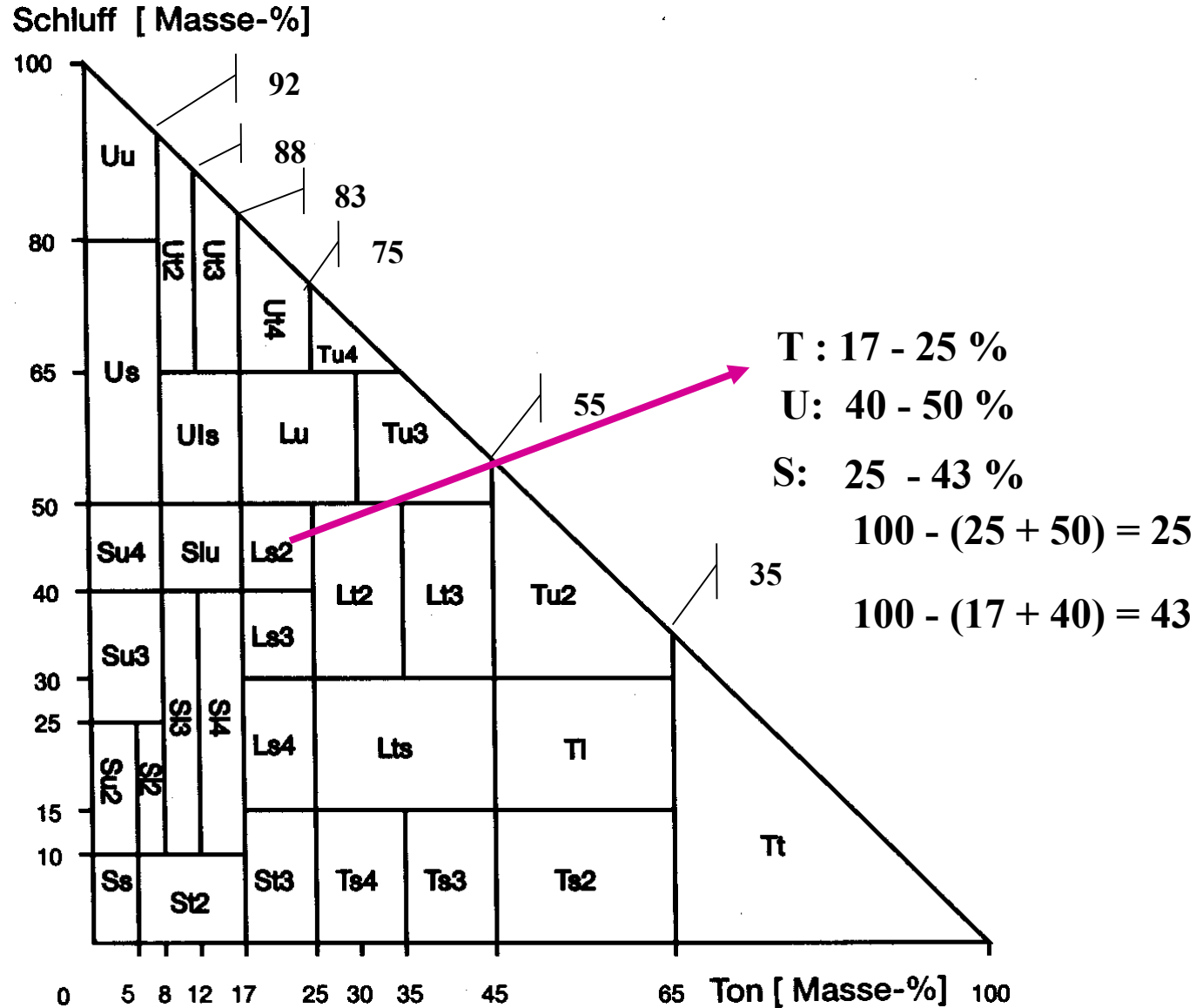
- ...ist die Korngrößenzusammensetzung der mineralischen Teilchen
- Unterscheidung zwischen:
 - ✍ Korngrößenzusammensetzung des Grobbodens = „Bodenskelett“ (>2mm)
 - ✍ Korngrößenzusammensetzung des Feinbodens (<2mm)

➤ Unter „Bodenart“ im engeren Sinne verstehen wir die „Korngrößenzusammensetzung des mineralischen Feinbodens“

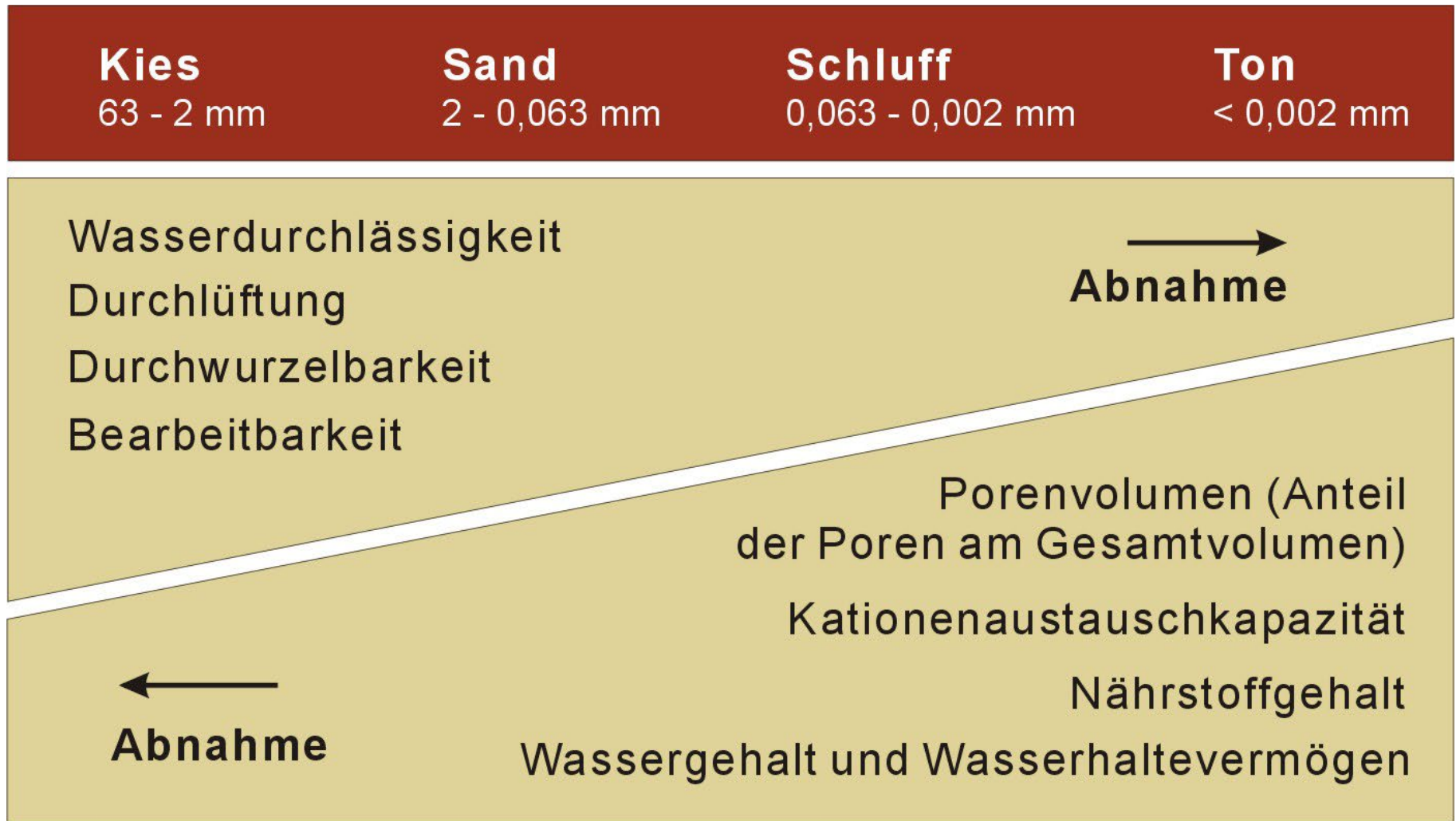
Die Kornfraktionen des Feinbodens

Fraktion	Unterfraktion	Kurz- zeichen	<u>Äquivalent</u> durchmesser			
			in mm		in μm	
Ton		T	< 0,002		<	2,0
	Feinton	fT	< 0,0002		<	0,2
	Mittelton	mT	0,0002	- 0,0006	0,2 -	0,6
	Grobton	gT	0,0006	- 0,002	0,6 -	2,0
Schluff		U	0,002	- 0,063	2 -	63
	Feinschluff	fU	0,002	- 0,0063	2 -	6,3
	Mittelschluff	mU	0,0063	- 0,02	6,3 -	20
	Grobschluff	gU	0,02	- 0,063	20 -	63
Sand		S	0,063	- 2,0	63 -	2000
	<u>Feinstsand</u> *	ffS	0,063	- 0,125	63 -	125
	Feinsand	fS	0,063	- 0,2	63 -	200
	Mittelsand	mS	0,2	- 0,63	200 -	630
	Grobsand	gS	0,63	- 2,0	630 -	2000

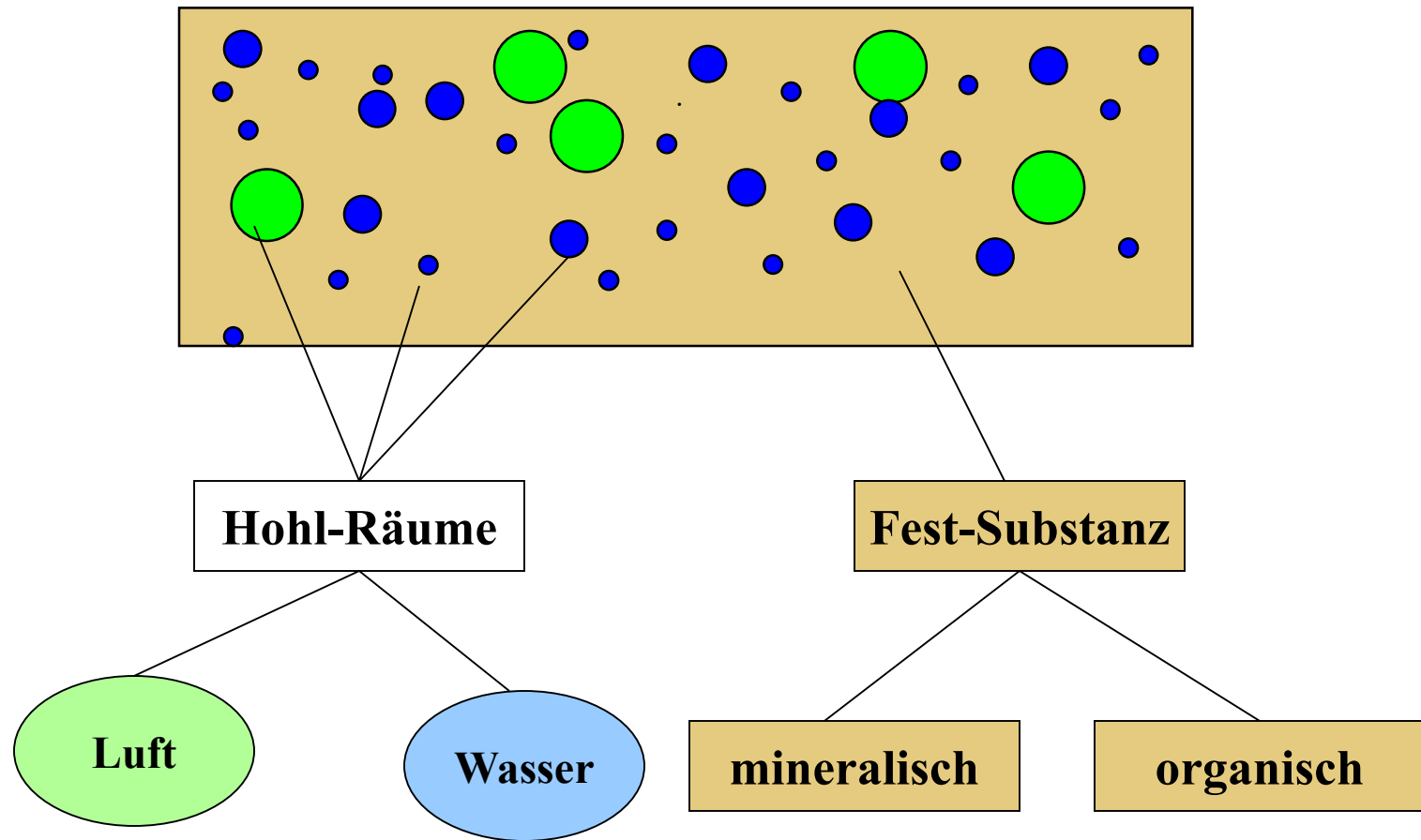
Bodenart des Feinbodens



Einfluss der Bodenart auf die Bodeneigenschaften



„Drei-Phasensystem Boden“



Der Porenraum des Bodens

Poren:

- Hohlräume des Bodens verschiedener Gestalt und Größe, die mit Luft oder auch mit Wasser gefüllt sind.

Gesamtheit der Poren im Boden:

- Porenvolumen (PV)

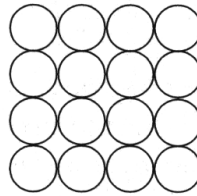
$$PV[\%] = \frac{V_p[cm^3]}{V_g[cm^3]}$$

V_p = Porenvolumen

V_g = Gesamtbodenvolumen

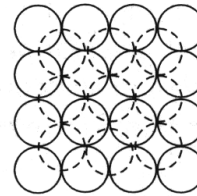
Porenvolumen in Abhängigkeit der Kugelpackung

PV = 50%

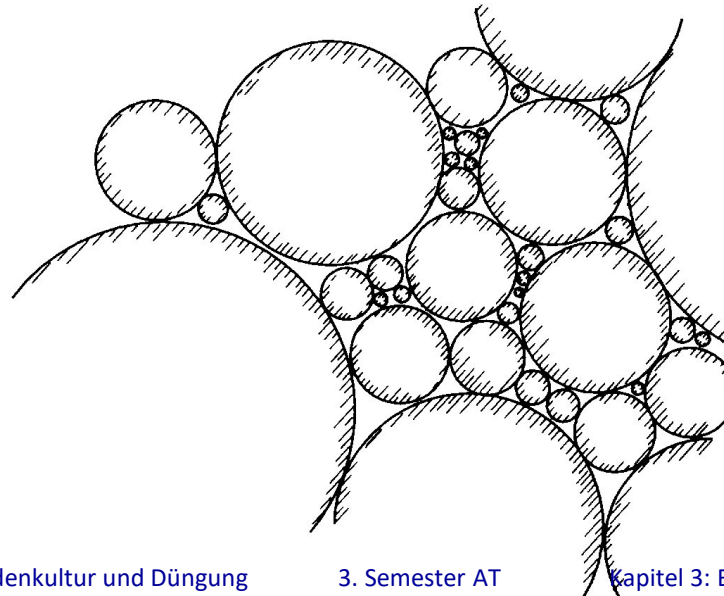
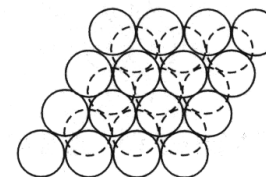
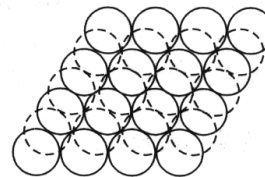
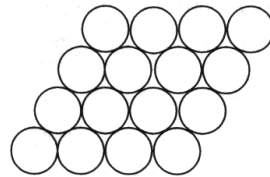


(a)

PV = 26%



(b)



Rohdichte_(trocken) = Lagerungsdichte

- auch Trockenrohdichte (TRD) genannt
- Dichte des Bodensubstrats in natürlicher Lagerung (einschließlich Bodenporen!)
- Einheit: g/cm^3 ; kg/l
- Quotient aus Trockenmasse und Bodenvolumen

Rohdichte ρ_t , g/cm^3	Stufen	Kurz- zeichen
< 1,25	sehr gering	ρ_{t1}
1,25 - 1,45	gering	ρ_{t2}
1,45 - 1,65	mittel	ρ_{t3}
1,65 - 1,85	hoch	ρ_{t4}
> 1,85	sehr hoch	ρ_{t5}

Porenformen

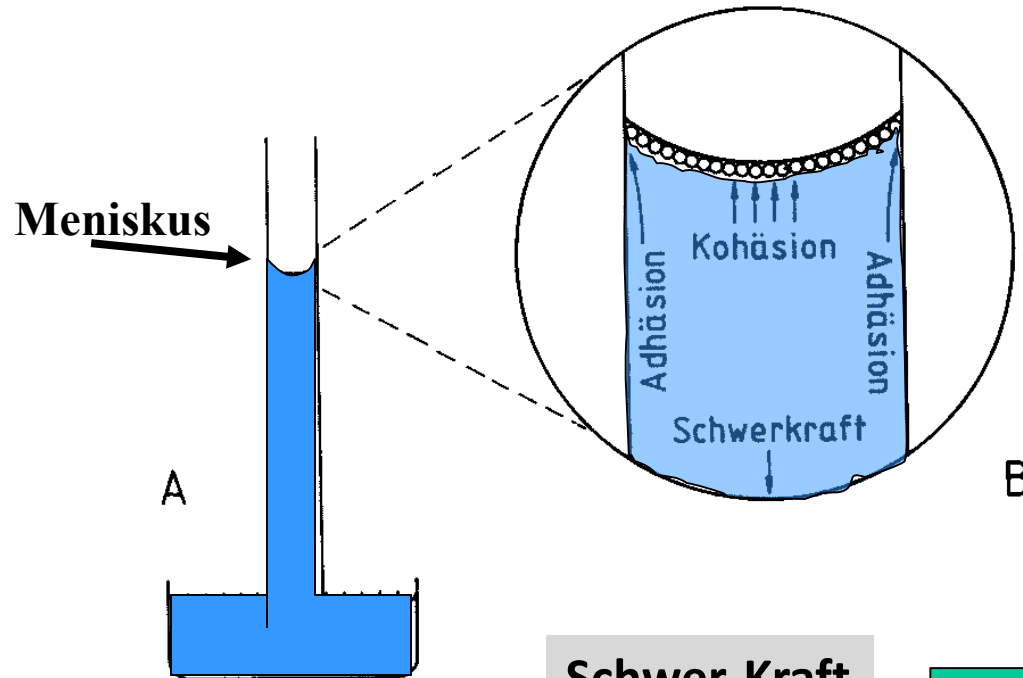
Primärporen:

- körnungsbedingt
- nur durch die Hohlräume der Primärkörner gebildet

Sekundärporen:

- entstehen durch Aggregatbildung, strukturbedingt
- Aggregatzwischenräume
- Schrumpfrisse, Wurmröhren, bearbeitungsbedingte Hohlräume
- größer als Primärporen
- haben größere Kontinuität
- sind leichter zu zerstören

Kapillarität und Meniskenbildung



Röhre im Wasserbad

Schwer-Kraft

Adhäsions-Kräfte

- am Kontaktkreis zwischen Flüssigkeit und Rohr

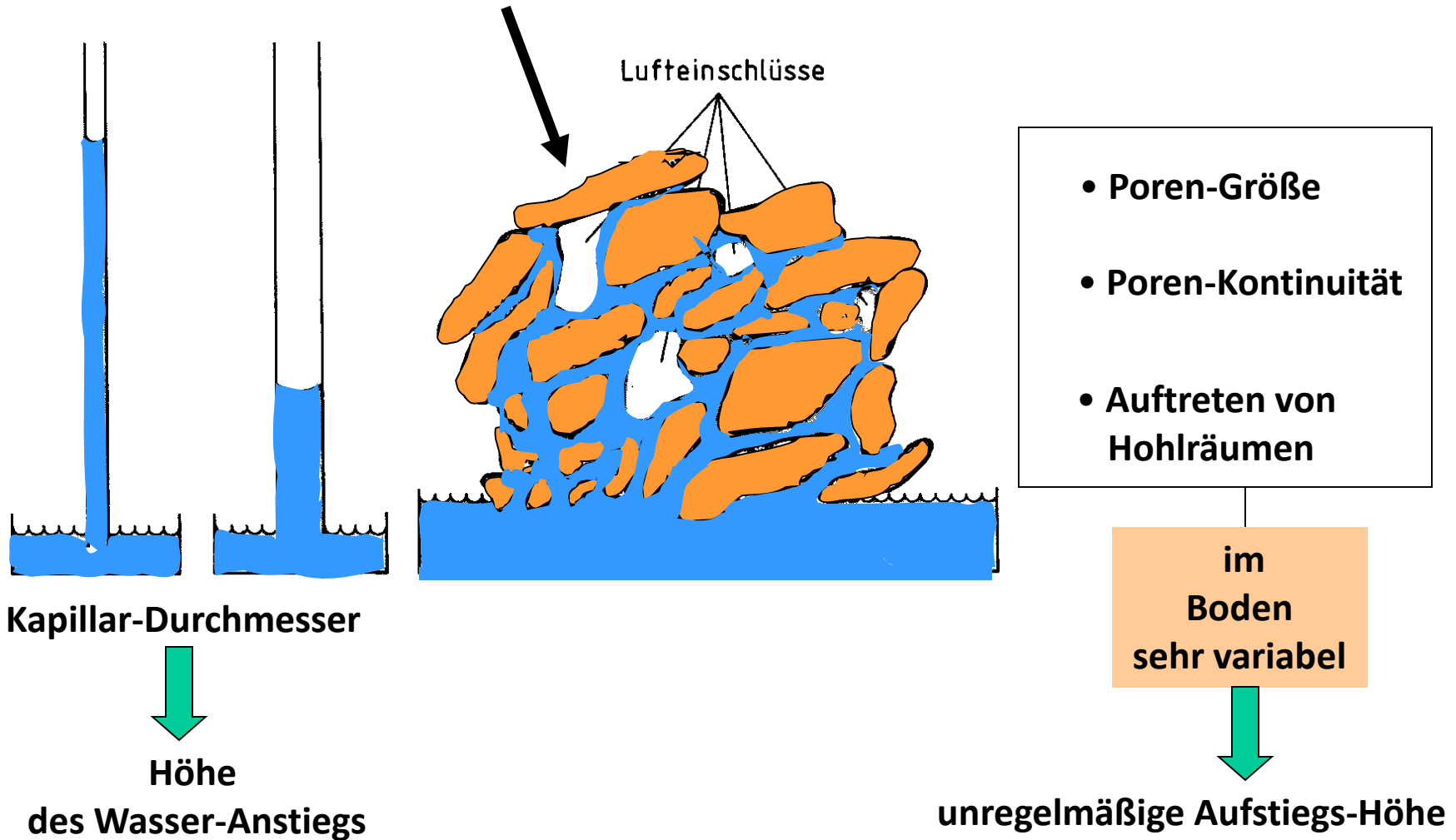
Kohäsions-Kräfte

- halten die Wasser-Moleküle zusammen

Unterdruck in der Säule

Konkave
Krümmung
der Oberfläche

Kapillarer- Aufstieg und Kapillarsysteme im Boden



Saugspannung und pF-Wert

Saugspannung

(engl. **Soil-moisture tension**)

- Einheit cm WS, bar, mbar, Kpa, hPa
- Bindungsintensität des Wassers im Boden, die bei seiner Entwässerung überwunden werden muss.

pF = pF-Wert

(engl. **pF-value**)

- Einheit: **lg** mbar, **lg** hPa
- Maß für die Saugspannung des Wassers im Boden;
- dekadische Logarithmus des jeweiligen Druckes.
- P = Potential, F = freie Energie des Wassers

$pF\ 0 = 1\text{ cm WS} = 1\text{ mbar} = 1 \times 10^0\text{ mbar};$

$pF\ 1 = 10\text{ cm WS} = 10\text{ mbar} = 1 \times 10^1\text{ mbar}$

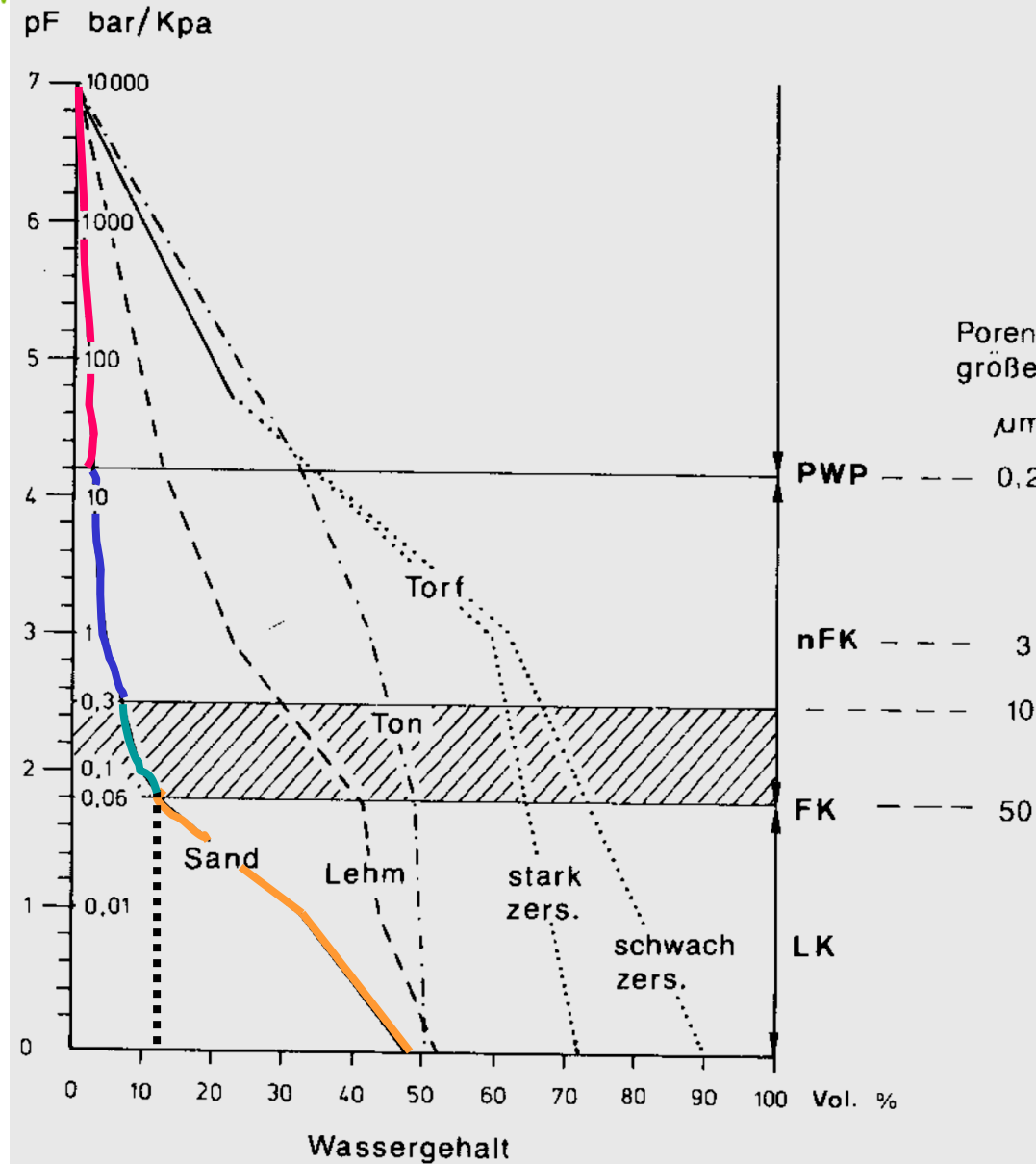
$pF\ 2 = 100\text{ cm WS} = 100\text{ mbar} = 1 \times 10^2\text{ mbar};$

$pF\ 3 = 1000\text{ cm WS} = 1000\text{ mbar} = 1 \times 10^3\text{ mbar}$

$pF\ 4 = 10000\text{ cm WS} = 10000\text{ mbar} = 1 \times 10^4\text{ mbar}$

Porengrößen und Merkmale des Luft- und Wasserhaushaltes

Bezeichnung der Poren	Unterteilung des Bodenwassers	Unterteilung der Speicherkapazität		
weite Grobporen	Sicker- wasser	schnell beweglich	Luftkapazität	
enge Grobporen		langsam beweglich	Nutzbare Feld- kapazität	maximale Wasser- kapazität
Mittelporen	Haft- wasser	pflanzen- verfügbar		
Feinporen		nicht pflanzen- verfügbar	Totwasser	
			Feld- kapazität	



Feinporen

Mittelporen

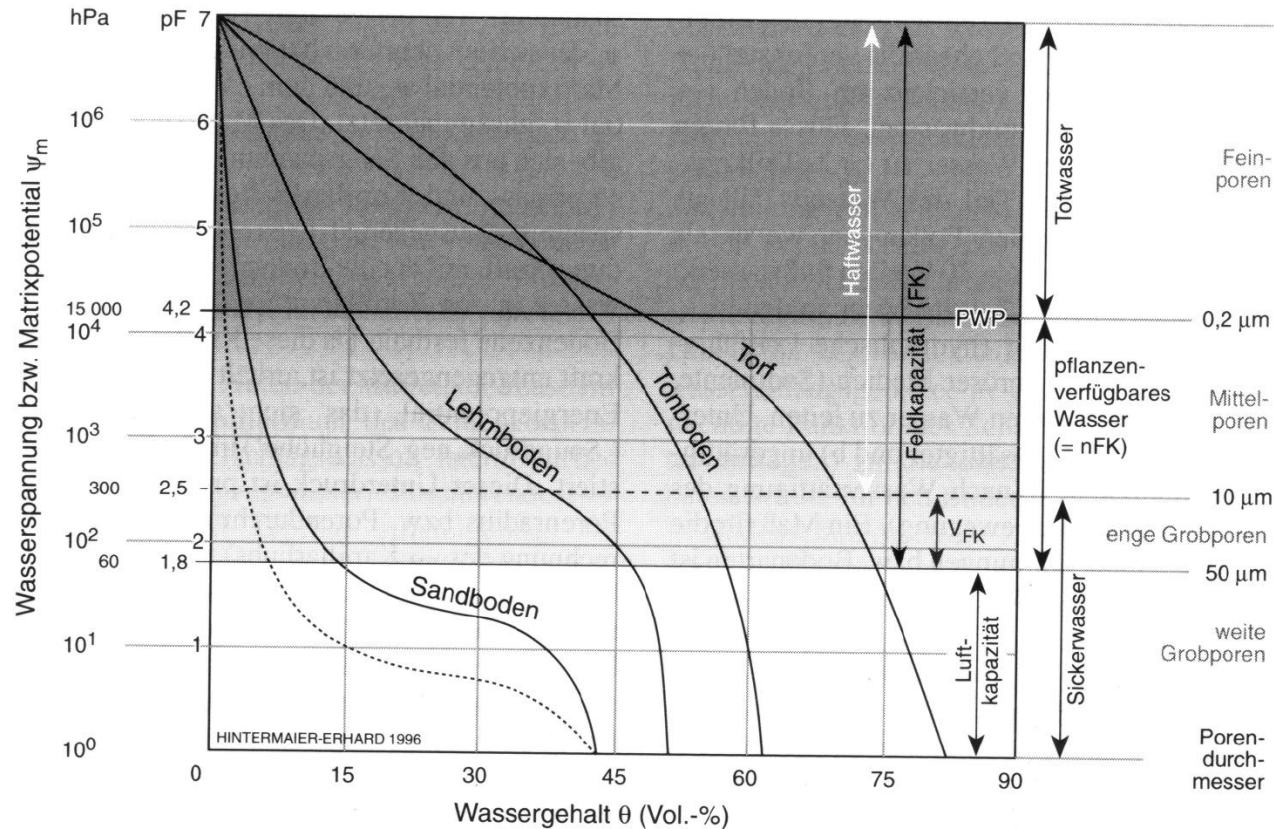
enge Grobporen

weite Grobporen

Saugspannungs-Wassergehalts-Kurven



Porengrößen-Verteilung



Wasserspannungskurve. Wasserspannung (Matrixpotential) als Funktion des Wassergehalts im Boden für Sand-, Lehm- und Tonböden sowie Torf (schematisch). --- $\rightarrow$ Hystereseis des Sandbodens, V_{FK} = Variationsbreite der Wasserspannung bei Feldkapazität (FK).

Quelle: Hintermaier-Erhard/Zech

Porengrößenklassen

Bezeichnung	Äquivalent-Durchmesser in μm	Saugspannungsbereich hPa (cm WS)	Unterteilung des Bodenwassers	
weite Grobporen	> 50	< 60 < 1,8	Sicker- wasser	schnell beweglich
enge Grobporen	50 - 10	60 - 300 1,8 - 2,5		langsam beweglich
Mittelporen	10 - 0,2	300 - 15000 2,5 - 4,2	Haft- wasser	pflanzenverfügbar
Feinporen	< 0,2	> 15000 > 4,2		nicht pflanzenverfügbar

Porengößenverteilungen in unterschiedlichen Böden

Tab. 6.4 Anteil des Porenvolumens und der Porengrößenbereiche am Gesamtvolumen von Mineralböden (C-Gehalt bis 2 %) und organischen Böden

	Porenvolumen (%)	Grobporen (%)	Mittelporen (%)	Feinporen (%)
Sande	46 ± 10	30 ± 10	7 ± 5	5 ± 3
Schluffe	47 ± 9	15 ± 10	15 ± 7	15 ± 5
Tone	50 ± 15	8 ± 5	10 ± 5	35 ± 10
Anmoore	70 ± 10	5 ± 3	40 ± 10	25 ± 10
Hochmoore	85 ± 10	25 ± 10	40 ± 10	25 ± 10

Quelle: Scheffer/Schachtschabel

Kennwerte des Wasser- und Lufthaushaltes

Fach-ausdruck	Zeichen	Einheit bzw. Dimension	Erläuterung	Bedeutung
maximale Wasser-kapazität		Masse % Vol.-% l/m ³ mm/dm	Wassermenge, die ein Boden maximal (bei voller Wassersättigung) aufnehmen kann	
Luftkapazität	LK	Vol.-%	Sobald der in den schnell-dränenden, weiten Grobporen enthaltene Teil der der maximalen Wasserkapazität aus einem natürlich gelagerten Boden nach 2 - 3 Tagen abgezogen ist, füllen sich diese Poren mit Luft. Luftgehalt des Bodens bei Feldkapazität;	Gasaustausch und damit Sauerstoffversorgung der Wurzeln, wenn der Boden durch Niederschläge auf Feldkapazität aufgefüllt ist. Erwärmbarkeit • Welche Böden bezeichnet man als warme Böden, welche als kalte Böden? • Warum? • Welche Bedeutung?
Feldkapazität = Wasser-speicher-kapazität	FK	Masse % Vol.-% l/m ³ mm/dm	Das Volumen des 2 - 3 Tage nach Vollauffüllung noch mit Wasser gefüllten Porenraumes entspricht der Feldkapazität. Es ist die Wassermenge, die ein Boden maximal gegen die Schwerkraft zurückhalten kann.	Maß für die Fähigkeit, die Verlagerung gelöster Stoffe in den Untergrund zu verhindern.

Kennwerte des Wasser- und Lufthaushaltes

(Fortsetzung)

Totwasser		Masse % Vol.-% l/m^3 mm/dm	Wasser, das mit höherer Spannung gehalten wird, als die Wurzeln landwirtschaftlicher Nutzpflanzen in der Regel entwickeln können;	je höher der Totwasseranteil um so geringer ist die nutzbare Feldkapazität
Nutzbare Feldkapazität = nutzbare Wasserspeicherkapazität	nFK	Masse % Vol.-% l/m^3 mm/dm	Feldkapazität abzüglich Totwasseranteil;	stark ertragsbeeinflussend abhängig von Klima und Verlauf der Jahreswitterung, wichtiges Merkmal für die Beurteilung der Ertragsfähigkeit
Wasserdurchlässigkeit im wassergesättigten Boden	kf	cm/d m/d cm/s	Durchflußmenge je Flächeneinheit und Zeiteinheit (Filtergeschwindigkeit) im wassergesättigten Boden	Befahrbarkeit nach Niederschlägen, Geschwindigkeit mit der gelöste Stoffe in das Grundwasser gelangen.

maximale Wasserkapazität

weite Grob-Poren	Maximale Wasser- kapazität (Porenvolumen)
enge Grob-Poren	
Mittel-Poren	
Fein-Poren	

Luftkapazität

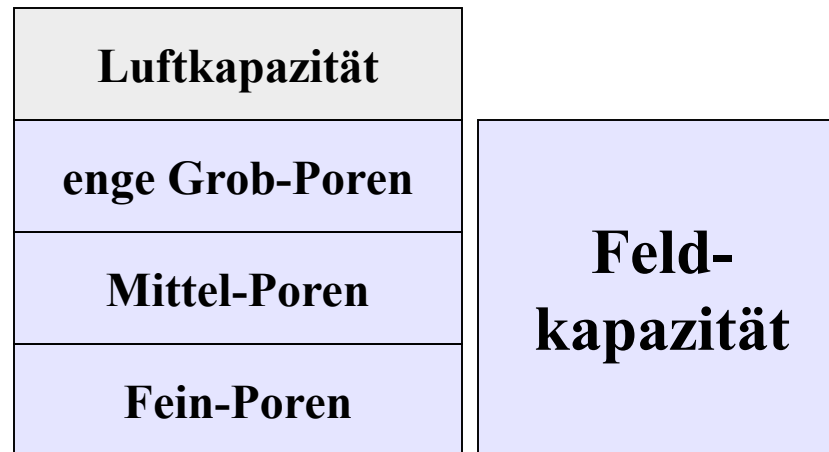
Luftkapazität	Feld- kapazität
enge Grob-Poren	
Mittel-Poren	
Fein-Poren	

**Die Luftkapazität nimmt mit steigendem Tongehalt ab!
Je schwerer der Boden, desto weniger Luftkapazität**

Ab < 5% Luftkapazität spricht man von „Schadverdichtung“

Feldkapazität

= Wassergehalt eines frei dränenden Bodens 2-3 Tage nach Sättigung

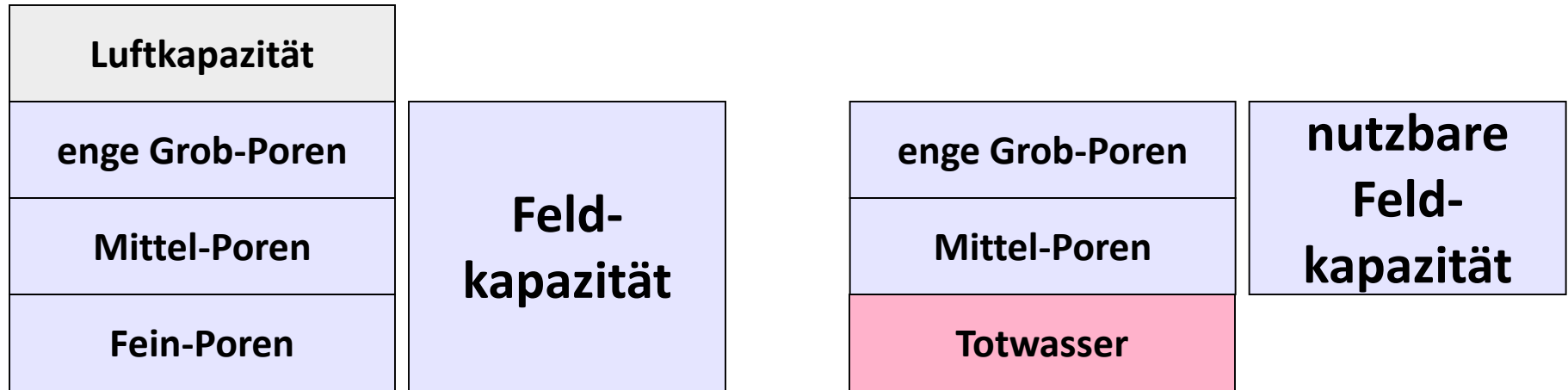


je höher der Tongehalt, desto höher die Feldkapazität

Einstufung der Feldkapazität berechnet für 10 dm Profiltiefe (KA 3)

Kurz- zeichen	Bezeichnung	Feldkapazität		Beispiele für FK von Bodenarten bei mittlerer effektiver Lagerungsdichte
		in l/m ³	in Vol.-%	
FK1	sehr gering	< 130	< 13	mS, gS
FK2	gering	130–260	13–26	fS, Sl2
FK3	mittel	260–390	26–39	Us, Ls3
FK4	hoch	390–520	39–52	Tu3, Lt2, Lt3, Lts
FK5	sehr hoch	> 520	> 52	Tu2

Nutzbare Feldkapazität



Schluffböden haben die höchste nFK, Sand- und Tonböden niedrigere nFK

Einstufung der nutzbaren Feldkapazität des effektiven Wurzelraums

Kurzzeichen	Bezeichnung	nFKWe in mm	Beispiele
nFKWe1	sehr gering	< 60	Regosol aus Kies und Grobsand, Mullrendzina aus Dolomitsand
nFKWe2	gering	60–140	Podsol und Braunerde aus feinsandigem Mittelsand
nFKWe3	mittel	140–220	Braunerde aus schwach lehmigem Sand, Hochmoor aus schwach zersetztem Torf
nFKWe4	hoch	220–300	Braunerde, Parabraunerde und Vega aus Sandlehmen, Kolluvisol aus Tonschluffen, Niedermoor aus stark zersetz- tem Torf
nFKWe5	sehr hoch	> 300	Schwarzerde und Parabraun- erde aus Tonschluffen

Bedeutung der nutzbaren Feldkapazität (nFK)

Wasserverbrauch für 60 dt/ha Weizen = 350 mm

nFK

Niederschlag in der Vegetation

80 mm

230 mm

**Bedarf
nicht gedeckt**

120 mm

230 mm

**Bedarf
knapp gedeckt**

160 mm

230 mm

Kf-Wert (Wasserleitfähigkeit, Durchlässigkeitsbeiwert)

= Durchlässigkeit (Permeabilität) von Böden bei Wassersättigung

- hat die Dimension einer Geschwindigkeit (cm s^{-1} ; m d^{-1})
- wird i.d.R. im Labor bestimmt

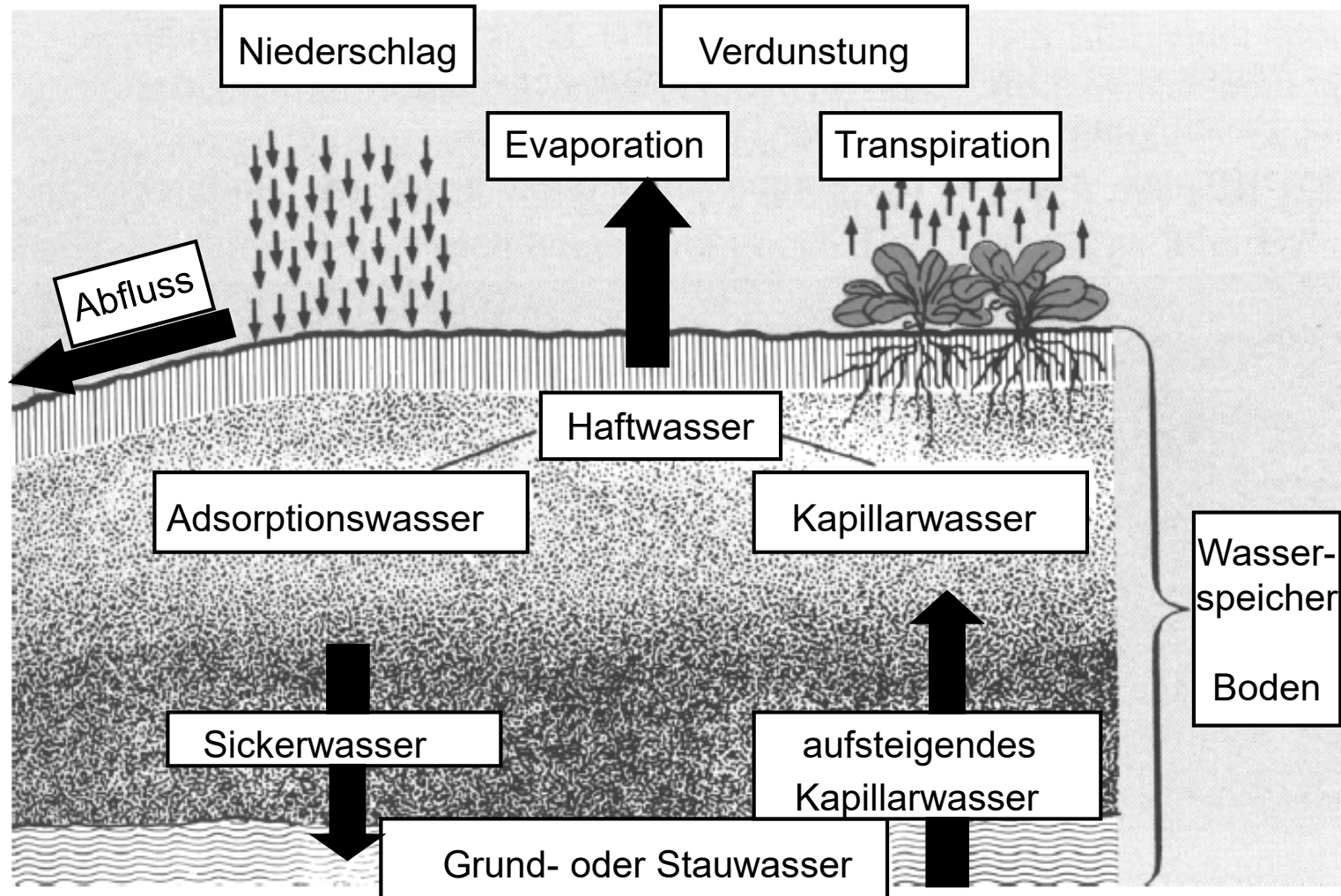


Sandböden haben einen hohen Kf- Tonböden einen sehr niedrigen Kf-Wert

Einstufung der Wasserdurchlässigkeit im Wassergesättigten Boden

Kurz- zeichen	Bezeich- nung	kf-Werte		Beispiele
		cm/d	cm/s	
kf1	sehr gering	< 1	$< 1,16 \cdot 10^{-5}$	Sd-Horizonte, Knickhorizonte
kf2	gering	1– 10	$1,16 \cdot 10^{-5}$ bis $1,16 \cdot 10^{-4}$	Sd-Übergangshorizonte, Sg-Horizonte, weniger ausgeprägte Knick- und Dwoghorizonte, stark zersetzte Torfe
kf3	mittel	10– 40	$1,16 \cdot 10^{-4}$ bis $4,63 \cdot 10^{-4}$	schluffreiche tonarme Schichten, mittel zersetzte Torfe
kf4	hoch	40–100	$4,63 \cdot 10^{-4}$ bis $1,16 \cdot 10^{-3}$	Horizonte mit guter Gefügeentwicklung, fein- bis mittelkörnige Sande, mittel bis schwach zersetzte Torfe
kf5	sehr hoch	100–300	$1,16 \cdot 10^{-3}$ bis $3,47 \cdot 10^{-3}$	Horizonte mit sehr guter Gefügeentwicklung, mittelkörnige Sande, schwach zersetzte Torfe
kf6	äußerst hoch	> 300	$> 3,47 \cdot 10^{-3}$	sehr schwach zersetzte Torfe, schilf-durchwurzelte Tone, Grobsande, Kiese

Vereinfachter Bodenwasserkreislauf



Grundgrößen des Wasserhaushalts

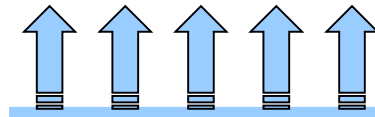
- Niederschlag (N in mm)
- Verdunstung (V in mm)
- Abfluss (A in mm)
 - ✍ oberirdisch (>Erosion)
 - ✍ unterirdisch (GW-Bildung)
- ggf. GW-Stand und Fremdwasserzufluss
- Wasserhaushaltsgleichung: $N = A + V \pm \Delta S$

ΔS = Speicheränderung (+/-)

Grundgrößen des Wasserhaushalts

Verdunstung

- Evaporation



- „unproduktive“ Verdunstung des Bodens

- Transpiration

- produktive Verdunstung der Pflanze

- Interzeption

- direkte Verdunstung von der Pflanzenoberfläche

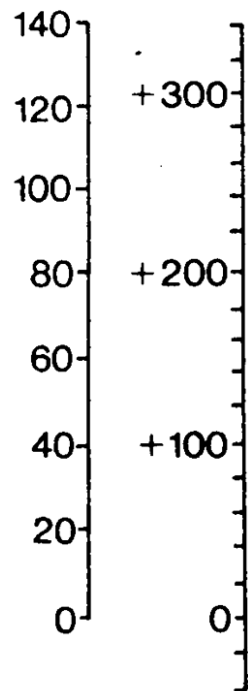


- Evapotranspiration = Evaporation + Transpiration + Interzeption

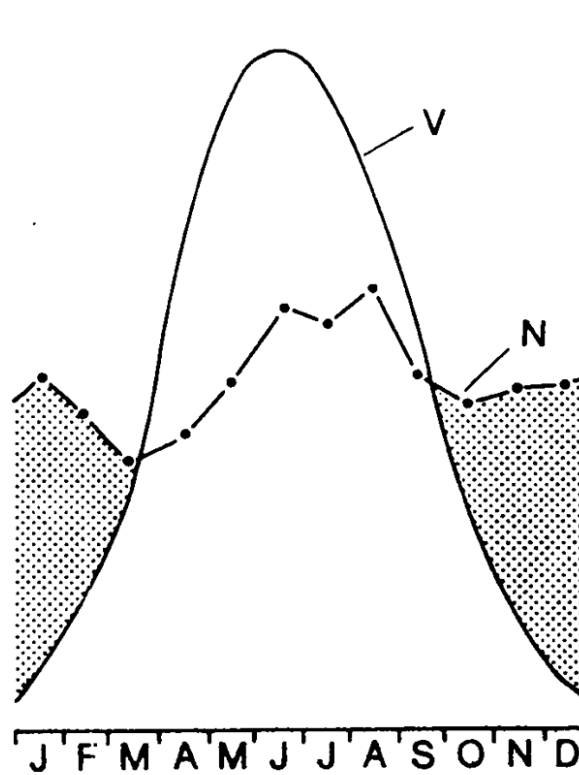
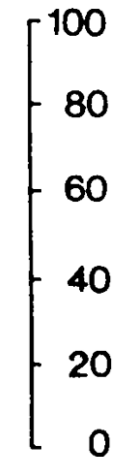
Wasserhaushalt des Bodens im Jahresverlauf

Verdunstungsenergie (V)

$\text{l} \cdot \text{m}^{-2}$ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$
·1000



Nieder-
schlag (N)
mm



Nettoenergie/Jahr = $1.591.800 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$

Dränmaschine

mit Grabenfräse und Verlegekasten für Ton- und PVC-Rohre



Grabenfräse



Fräskette

Videotipp: <https://www.youtube.com/watch?v=RxvRsYa986I>

Tonrohre

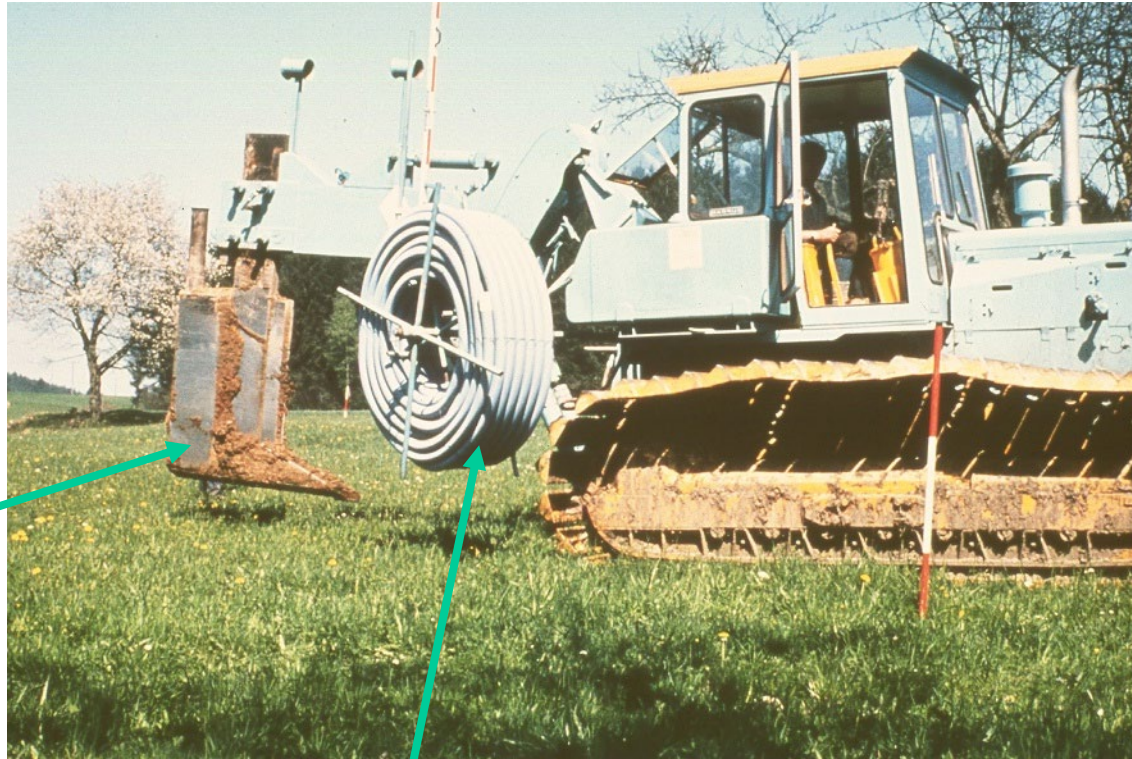


PVC-Rohre



mit Dränmaschinen direkt verlegbar

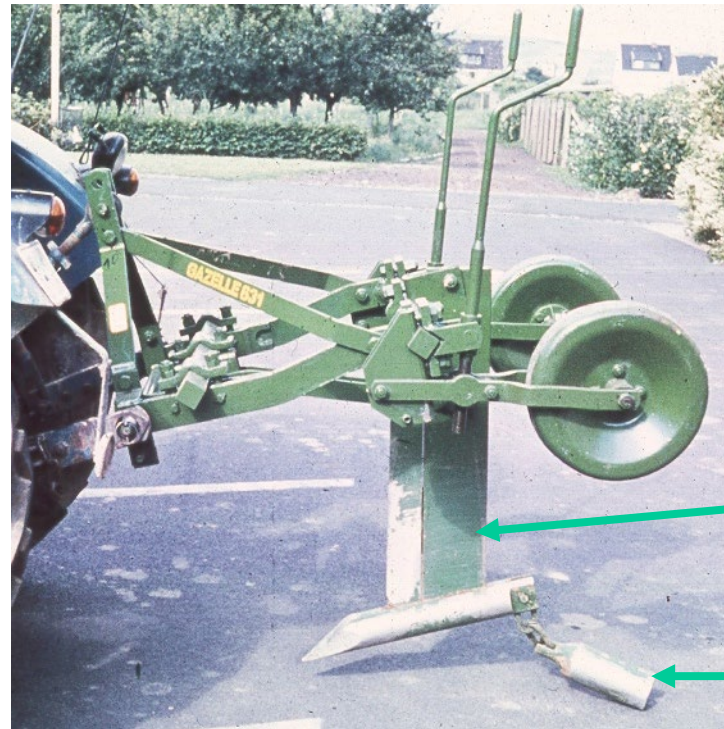
Dränmaschine für die grabenlose Rohrdränung



Dränschwert

PVC-Rohr

Maulwurfsdränung



Dränschwert

Presskegel

Voraussetzungen für den Einsatz:

$> 25 \% T$ und $T/U > 0,5$

Verformbarkeit

Standfestigkeit

Haltbarkeit: 3 - 5 Jahre
Kapitel 3: Bodenphysik

Gliederung des Moduls (Vorlesung)

Teil Bodenkultur

1. Rechtliche Rahmenbedingungen

- Bodenschutzrecht
- Düngerecht

2. Bodenentstehung

- Geologie
- Bodenbildende Faktoren und Prozesse
- Bodensystematik: Bodentypen/Bodenformen

3. Bodenphysik

- Feste Bestandteile
- Flüssige Bestandteile/Bodenwasser
- Bodenluft

4. Organische Substanz

- Bodenhumus: Entstehung, Bedeutung
- Bodenfruchtbarkeit; Fruchtfolge

O_2 - Mangel in der Bodenluft



reduzierte der Eisenoxide/-hydroxide

Worin unterscheiden sich Bodenluft und atmosphärische Luft?

	Atmosphäre [Vol %]	Bodenluft [Vol %]	
		gut durchlüftet	schlecht durchlüftet
N₂	79	79 – 83	
O₂	20,95	18 – 21	0 – 5
CO₂	0,035	1 – 2	5 – 12

Niedrige Sauerstoffgehalte bzw. hohe Kohlendioxidgehalte vermindern das Wurzelwachstum und die biologische Aktivität

Verschlämmung



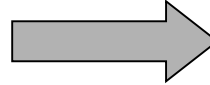
Verkrustung



Vor allem Schluffe neigen zu hoher Verschlämmung!

Folgen?

- Gasaustausch behindert



O_2 in der Bodenluft verringert

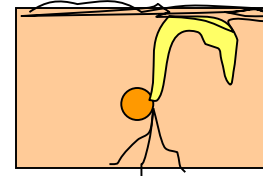
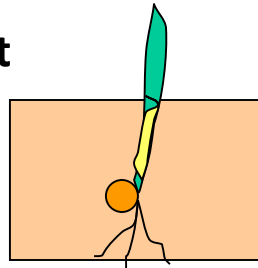


reduzierte Verbindungen

- gasförmige (N_2 , N_2O) N-Verluste
- wachstumshemmende Substanzen
z.B. Ethylengas, Essigsäure

- Feldaufgang

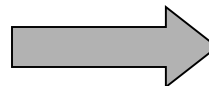
beeinträchtigt



Quelle: Düka

- Infiltration

verringert



Oberflächen-Abfluss verstärkt



Erosion

Wasser-Erosion



Verschlämmung I



16.05.2013
nach 15 mm Niederschlag

Verschlämmung II

