

Prof. Dr. Christian Wolkersdorfer

Abriss der Hydrogeologie

Warum fließt Grundwasser?

Veranstaltung im Wintersemester 2008/2009

Präsentation basiert auf
„Einführung Hydrogeologie“
Prof. Dr. habil Broder J. Merkel (Bergakademie Freiberg)



- Einführung
- Was ist ein Aquifer?
- **Warum fließt Grundwasser?**
- Wie bestimmt man Porosität und Permeabilität?
- Gesättigte und ungesättigte Zone
- Brunnen und Pumpversuche
- Pumpversuchsauswertung und Grundwasserneubildung
- Wasser: Das universelle Lösungsmittel
- Wechselwirkungen Wasser – Gestein
- weitere Wasserinhaltsstoffe
- Grundwassermodellierung
- Grundwasserschutz und Management
- Grundwassersanierung
- Regionale Beispiele



- Hohlraum und Widerstand
- Hohlräume:
 - Poren
 - Klüfte
 - Poren & Klüfte



Porenvolumen $V_P =$ Porosität

Gesamtvolumen V_G

Porositätsfaktor $\phi = V_P / V_G$

effektive Porosität ϕ_E (nutzbare Porosität)

$$\phi_E = \phi_G - \phi_R$$

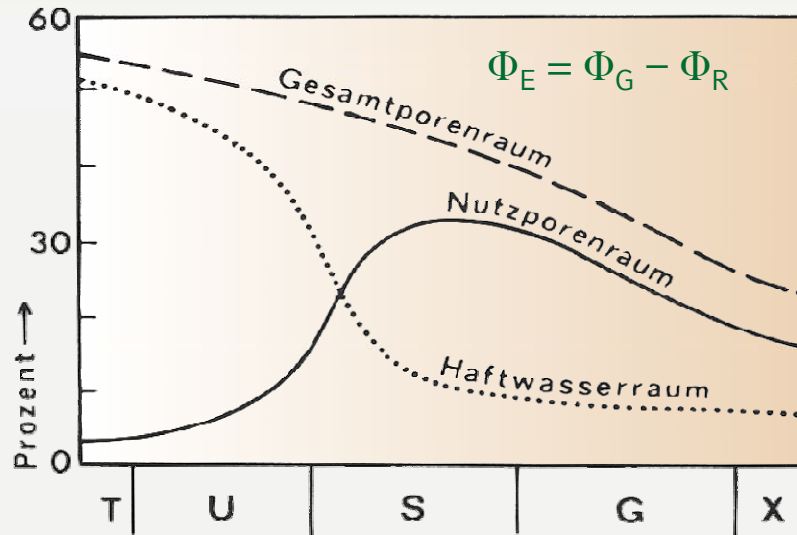
$\phi_R =$ Residualporosität

$\phi_G =$ Gesamtporosität

bei Klüften:

Kluftvolumen V_K

Hohlraumvolumen



T: Ton | U: Schluff | S: Sand | G: Kies | X: Steine



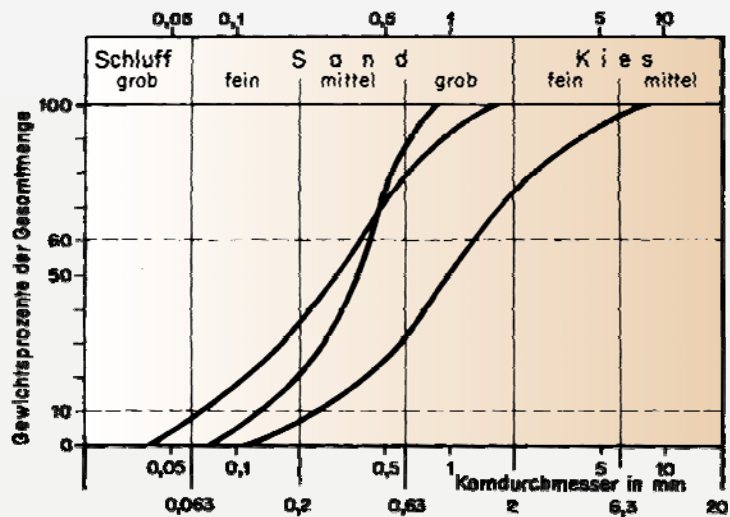
	Gesamt-P.(%)	effektive P.(%)
Kies	24 ... 38	18 ... 30
Sand	31 ... 53	10 ... 15
Schluff	34 ... 61	3 ... 6
Ton	34 ... 65	0 ... 3

Gestein	Gesamthohlraumvolumen (%)	
Granite, Gneise	0 ... 5	
Sandsteine	Poren:	5 ... 15
	Klüfte:	0 ... 3
Tuff	0 ... 50	
Basalt	3 ... 35	
Karst	1 ... 5	

Steine	> 63 mm
Kies	2 ... 63 mm
Sand	0,063 ... 2 mm
Schluff	0,002 ... 0,063 mm
Ton	< 0,002 mm

Bestimmung der Kornverteilung:
Sieben, Schlämmen





- Aufsättigung einer Probe mit definierten Volumen
- Bestimmung der Masse der wassergesättigten Probe M_W
- Trocknung einer aufgesättigten Probe bei 120 °C
- Bestimmung der getrockneten Probe M_T
- gravitative Entwässerung einer aufgesättigten Probe
- Bestimmung der Masse der entwässerten Probe M_E
- Bestimmung der Dichte des Feststoffes

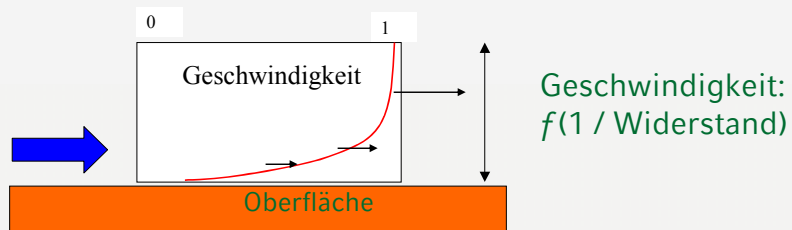


POTENTIAL



WIDERSTAND

- Viskosität (Fluid)
- Oberflächenspannung (Festgestein / Fluid)
- Rauigkeit der Oberfläche

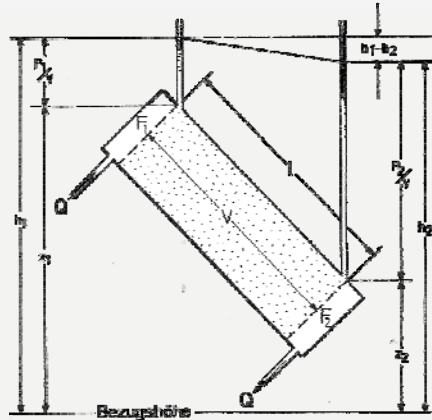


- | | |
|-------------------|-------------------|
| große Oberfläche: | großer Widerstand |
| kleine Poren: | großer Widerstand |
| enge Klüfte: | großer Widerstand |



DARCY 1803–1858

$$Q = -k_f \cdot F \cdot \frac{\Delta h}{L} = k_f \cdot F \cdot I$$



$$v_f = k_f \cdot \Delta I$$

$$\Delta I = \Delta H / \Delta L$$

L = Länge

H = Höhe



$$k_f = \frac{K \cdot \varphi \cdot g}{\eta}$$

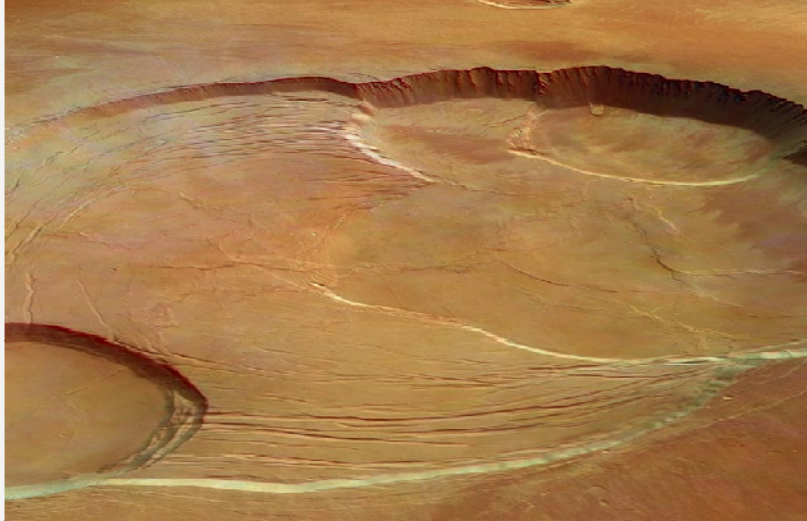
k_f Durchlässigkeitsbeiwert [m s^{-1}]

K spezifische Permeabilität [m^2]

φ Dichte des Fluids [kg m^{-3}]

η dynamische Viskosität [$\text{Pa s} = \text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$]

g Gravitationskraft [m s^{-2}]



Mars Express: Olympus Mons Caldera; February 16, 2004; European Space Agency



	Erde (Wasser)	Mars (Methan)
K, m^2	$9,87 \cdot 10^{-13}$	$9,87 \cdot 10^{-13}$
p, bar	1,025	0,007
$\varphi, kg m^{-3}$	$9,997 \cdot 10^2 (10^\circ C)$	$4,48 \cdot 10^2 (-182^\circ C)$
$\eta, kg s^{-1} m^{-1}$	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$2,23 \cdot 10^{-4}$
$g, m s^{-2}$	9,81	3,71
$k_f, m s^{-1}$	$7,4 \cdot 10^{-6}$	$8,2 \cdot 10^{-6}$



$$v_f = k_f \cdot \Delta I$$

v_f = Filtergeschwindigkeit
 k_f = Filterkoeffizient

$$\Delta I = \Delta H / \Delta L$$

L = Länge, H = Potential,
 Höhe



Einheit: $k_f = [\text{m/s}]$ Geschwindigkeit



- laminarer Fluss
 - Reynolds Zahl Re $Re < 1 \dots 10$
 - Turbulent
 - schießend
- NEWTONSches Fluid
 - Viskosität unabhängig von Deformation und Fließwiderstand, konstant bei gegebener Temperatur
- Unendlich ausgedehnter Aquifer
- Homogener Aquifer



- Ansprache bei Bohrgutentnahme
- empirische Abschätzung aus Kornverteilungsdaten
- Permeameter
- Pumpversuche, Feldteste
- numerische Modellierung eines Gebietes (invers)



LOCKERGESTEINE	k_f -WERT [m/s]
Kiese	$10^{-4} \dots 10^{-1}$
Grobsand	$10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-3}$
Mittelsand	$10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-3}$
Feinsand	$2 \cdot 10^{-6} \dots 10^{-4}$
Schluff	$10^{-9} \dots 2 \cdot 10^{-5}$
Ton	$10^{-11} \dots 2 \cdot 10^{-9}$

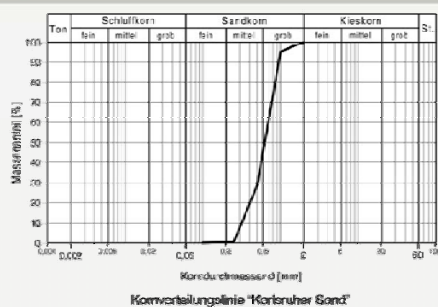


GESTEINE	k_f -WERT [m/s]
Karst	10^{-6} ... freier Fluss
Kalke / Dolomite	10^{-9} ... $5 \cdot 10^{-6}$
Sandsteine	10^{-10} ... 10^{-5}
Salz	10^{-12} ... 10^{-10} (Karst?)



Gesteine	k_f -Wert [m/s]
Basalt	$5 \cdot 10^{-11}$... 10^{-2}
geklüftete Magmatite und Metamorphite	10^{-9} ... 10^{-4}
verwitterter Granit	10^{-6} ... 10^{-5}
ungeklüftete Magmatite und Metamorphite	10^{-14} ... 10^{-10}

sehr stark durchlässig	$> 10^{-2}$ m/s
stark durchlässig	$10^{-2} \dots 10^{-4}$ m/s
durchlässig	$10^{-4} \dots 10^{-6}$ m/s
schwach durchlässig	$10^{-6} \dots 10^{-8}$ m/s
sehr schwach durchlässig	$< 10^{-8}$ m/s



HAZEN

$$k_f = (0,7 + 0,03 \cdot \text{Temp}) / 86,4 \cdot d_{10}^2 = 0,0116 \cdot d_{10}^2 \text{ (bei } 10 \text{ }^\circ\text{C)}$$

Gültigkeit $U = d_{60} / d_{10} < 5$

BEYER

$$C = f(U) \quad U: 1 \dots > 20$$

SEELHEIM

$$0,00357 \cdot d_{50}^2$$

BIALAS

$$0,0036 \cdot d_{20}^{2,3}$$

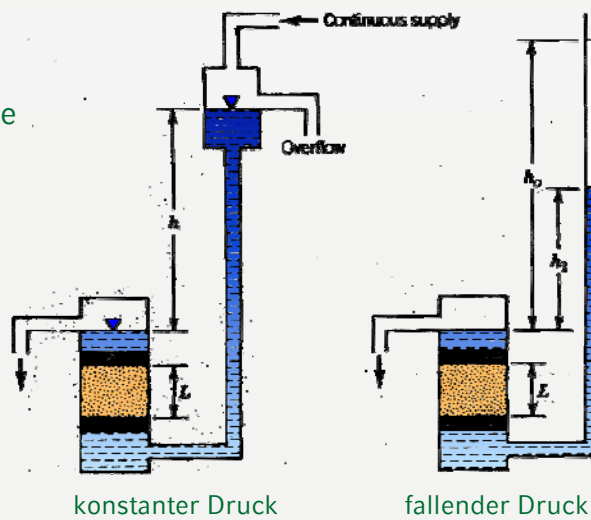
Autor	Formel	n	c_n	d	Beschränkungen
SPILLERD (1880)	$k_f = c_n d^n$	2	0,00357	d_{10}	
HAZEN (1893)	$k_f = c_n d^n$	2	0,0116	d_{10}	$U < 5$
SLICKER (1899)	$k_f = 0,0771/c_n d^n$	2	$0,985 d^{0,5}$	d_{10}	$0,01 < d_{10} < 5$
ZINKER (1930)	$k_f = \frac{c_n}{\mu^n} \left(\frac{n}{1-n} \right)^n d^n$	2	$1,1 \cdot 10^3$	d_{10}	
SCHMIDT (1932)	$k_f = c_n d^n$	2	0,005	d_{10}	
CAROLAN (1956)	$k_f = c_n d^n \frac{n^n}{(1-n)^2}$	2	0,0416	d_{10}	
ZWISCHANG (1961)	$k_f = c_n d^n$	2	$f(U)$	d_{10}	$1 < U < 5$
DEYER (1964)	$k_f = c_n d^n$	2	$f(U)$	d_{10}	$U < 20$ $0,05 < d_{10} < 0,6$
USDSIC*	$k_f = c_n d^n$	2,3	0,0036	d_{10}	
SEELYE (1979)	$k_f = c_n d^n$	2	$f(U)$	d_{10}	$U < 17 \cdot d_{10}$ $U > 17 \cdot d_{20}$
DRECHSL (1986)	Nennungsform	-	$f(U)$	d_{10}	$1,5 < U < 10$
LIMA ET AL. (1989)	$k_f = c_n d^n$	2	$2,0 - 6,0^{**}$	d_{10}	
SERREZZI (1989)	$k_f = c_n d^n$	1,65-1,85	$f(U, \dots)$	d_{10}	

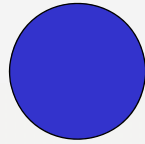
*: z.B. n. BULAS ET AL. (1970)
 **: 2,0 für unkonsolidierten Sand, 3,8 für schwach zementierten Sand, 6,0 für zementierten Sand
 ***: es wurden für verschiedene Sedimente typische Werte für c_n angegeben.

Aschenbrenner 1996

$k_f = Q_F / (\Delta I \cdot F)$
 $F = \text{Querschnittsfläche}$

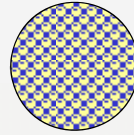
ungestörte Probe
 homogen?
 isotrop?
 repräsentativ



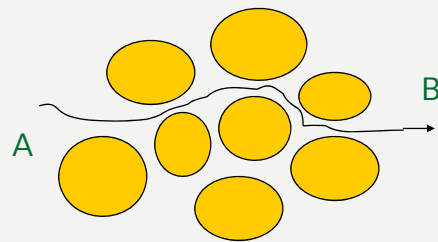
 v_F

FILTERGESCHWINDIGKEIT:
theoretische Geschwindigkeit
über gesamten Querschnitt

**FLIESSGESCHWINDIGKEIT /
BAHNGESCHWINDIGKEIT:**
tatsächliche mikroskopische
Geschwindigkeit

 v_A

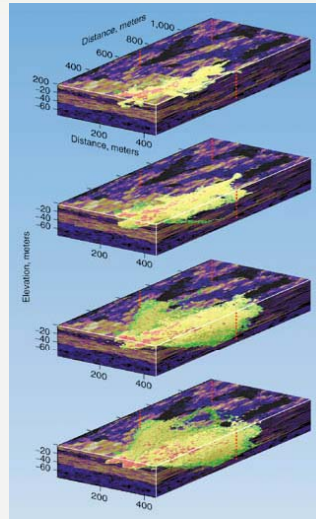
ABSTANDSGESCHWINDIGKEIT:
Geschwindigkeit berechnet aus
der Strecke von A nach B



$$v_A = \frac{k_f \cdot \Delta l}{n_e}$$

$$v_A > v_F$$

- relevant für Transport von Kontaminationen
- besser noch: tatsächliche Fließgeschwindigkeit



Lawrence Livermore National Laboratory

- Rechnerisch, aber n_e problematisch
- winzige Partikel, die sich mit der Geschwindigkeit des Wassers bewegen
- Markierungsstoff (Tracer)



- Vorkommen in Grundwasser?
- gelöst oder klein genug
- in niedrigen Konzentrationen analytisch bestimmbar
- konservativ
 - Sorption, Ionenaustausch, Fällung
- nicht toxisch
- organoleptisch unauffällig



- Fluoreszenztracer
 - Uranin (Na-Fluorescein; UV-empfindlich), Nachweisgrenze ca. 10^{-12} mol L⁻¹, Fuchsin, Eosin, Sulfo-Rhodamin, cancerogen?
- Salz
 - NaCl, KCl, KBr, LiBr
- Mikrosphären
 - Polymerkörper mit Fluoreszenzfarbstoff: Karst, Bergbau
- Sporen (*Lycopodium clavatum*)
 - Karst, Bergbau
- Bakterien (nicht pathogen)
 - Karst



- künstliche radioaktive Nuklide
 - ^{51}Cr 27,2 d; ^{58}Co 5,27 a; ^{24}Na 15 h; ^{82}Br 35,34 h; ^{131}I 8,04 d
- natürliche radioaktive Nuklide
 - ^3H , ^{18}O , ^{14}C , ^{32}Si
- Seltene Erd Elemente mit Aktivierungsanalyse
 - REE-EDTA-Komplex, 15–20 Tracer, $10^{-15} \text{ mol L}^{-1}$
- künstliche DNAs
 - nahezu beliebig viele Tracer parallel





Tracertest Bowden Close 2004



- oft nur anwendbar bei kleinen Distanzen oder großen Geschwindigkeiten
- typische Anwendungen
 - Laboruntersuchungen
 - Karst
 - Kluftgrundwasserleiter
 - Bergwerke
 - oberirdische Gewässer (Flüsse)



Aquifer, Grundwasserleiter	$k_f > 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$
Geringleiter, Hemmer, Aquitard, Leaky Aquifer	$k_f = 10^{-5} \dots 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$
Stauer, Nichtleiter, Aquiclude	$k_f < 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$



Maß für die Gesamtdurchlässigkeit eines
Aquifers

$$T = \int_0^M k_f(z) dz$$

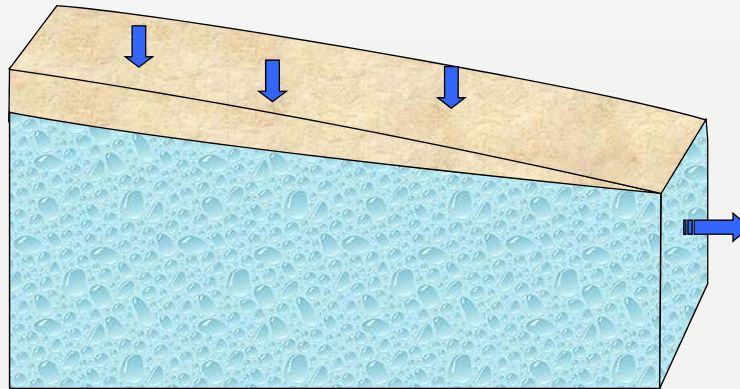
$$T = k_f \cdot M$$

z Tiefe, m

M wassererfüllte Mächtigkeit des Aquifers, m

k_f Durchlässigkeitsbeiwert, m s^{-1}

Einheit: $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$



2- oder 3-Phasen-System: Gestein – Wasser – (Gas)

$$\Psi = \Psi_G + \Psi_M + \Psi_O + \Psi_D$$

Ψ_G Gravitationspotential

Ψ_M Matrix Potential
Kapillar Potential

Ψ_O osmotisches Potential

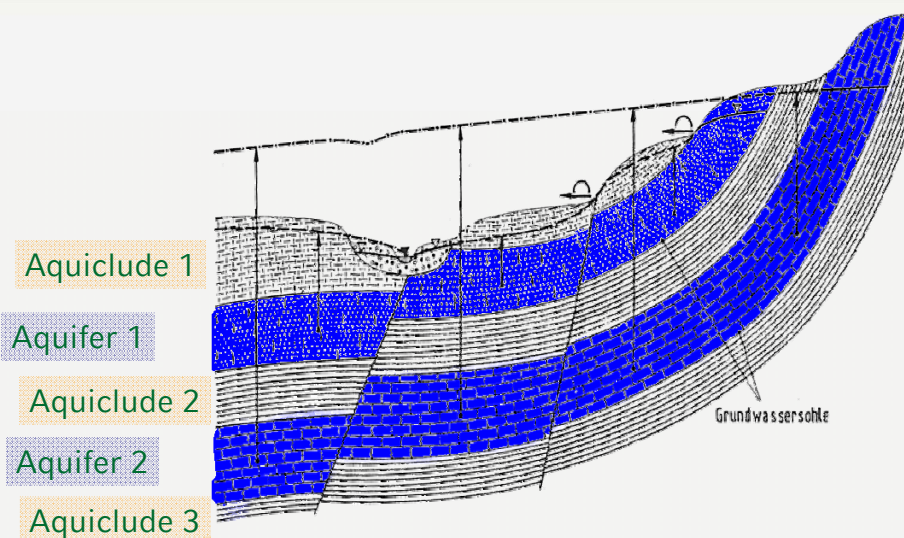
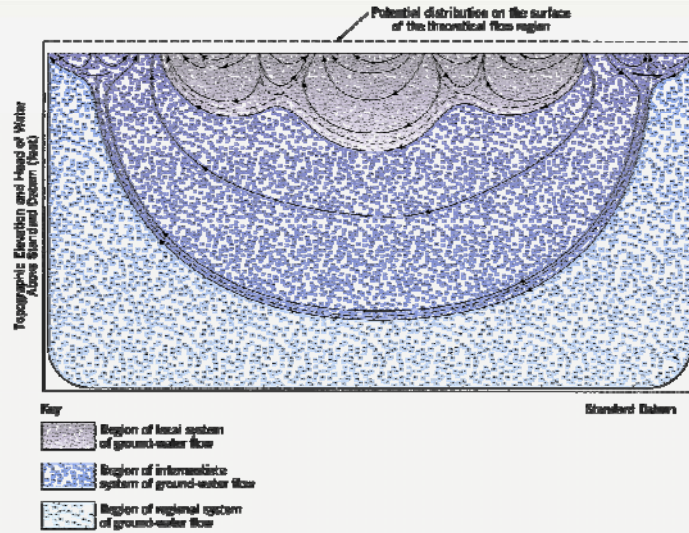
Ψ_D hydrostatisches Potential
Druck-Potential

ungesättigte Zone

$$\Psi = \Psi_G + \Psi_M$$

gesättigte Zone

$$\Psi = \Psi_G + \Psi_D$$

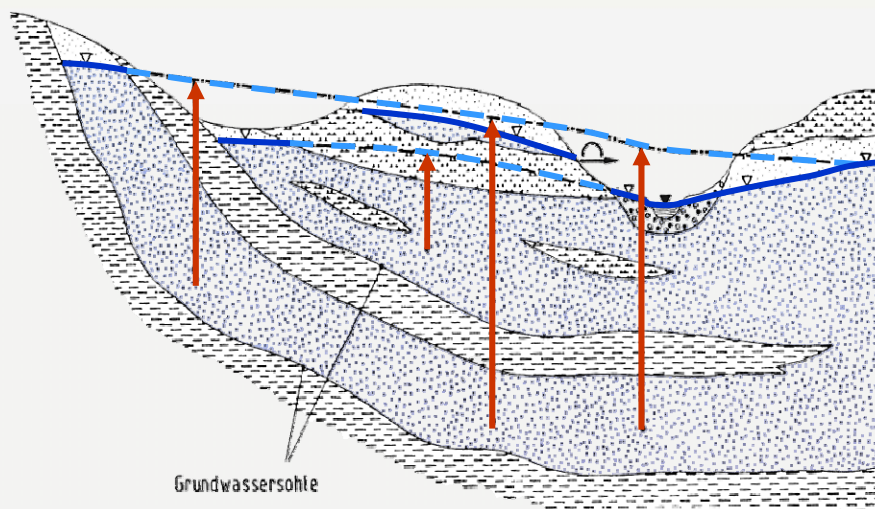




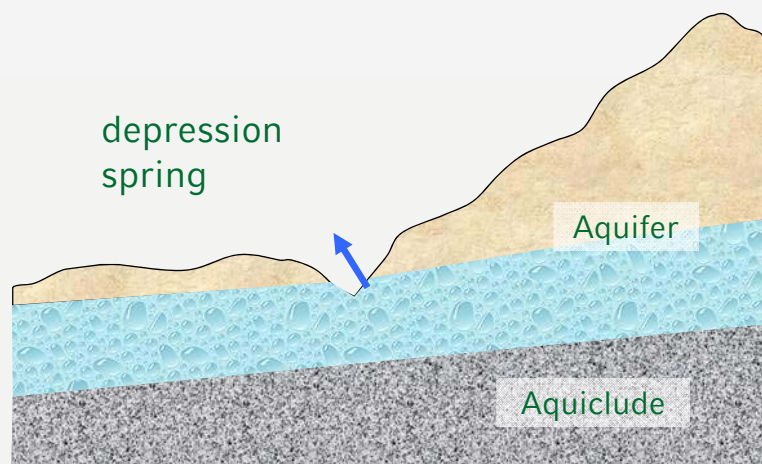
ungespannt	unconfined	freier Wasserspiegel
Gespannt	confined	Wasserspiegel oberhalb Oberkante Aquifer
Arteser	artesian A.	gespannter Aquifer mit Druckspiegel über Geländehöhe

IST EIN AQUIFER GESPANNT ODER UNGESPANNT?

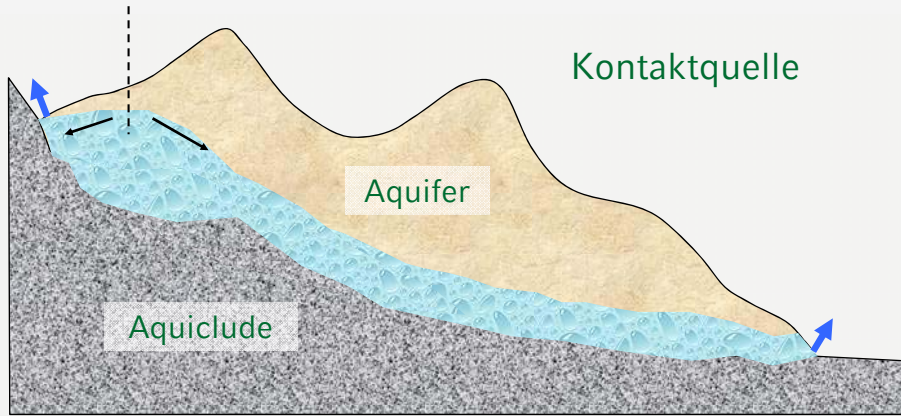
- Stratigraphie
- Wasserspiegelschwankungen (Luftdruck, Erdbeben)
- Pumpversuche



- warum und wo treten Quellen auf?
 - immer dann, wenn der Fließquerschnitt in einem oberflächennahen Grundwasserleiter nicht mehr ausreicht, um das Grundwasser zu transportieren
 - Abnahme des k_f -Wertes
 - Abnahme der Mächtigkeit des Aquifers
 - Abnahme des Gradienten des Grundwassers

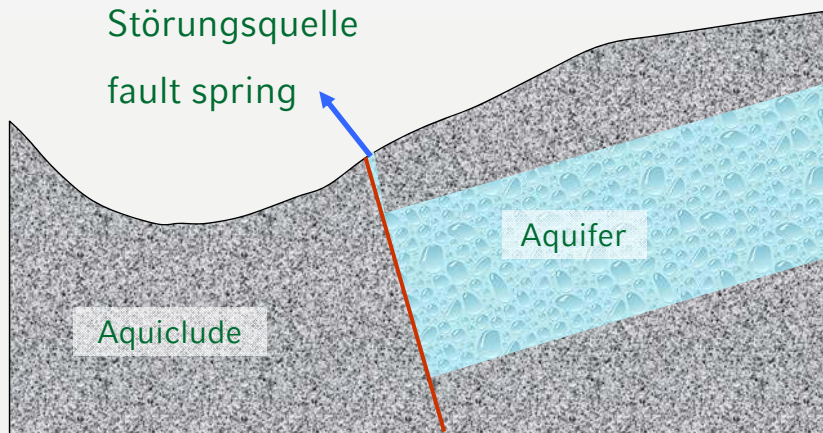


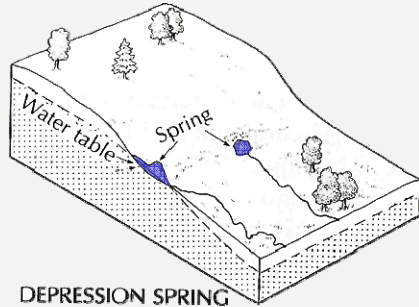
Wasserscheide



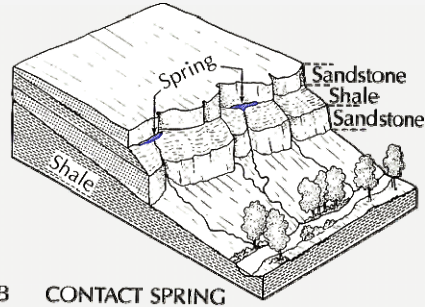
Störungsquelle

fault spring

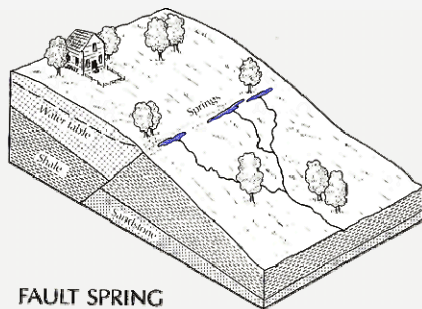




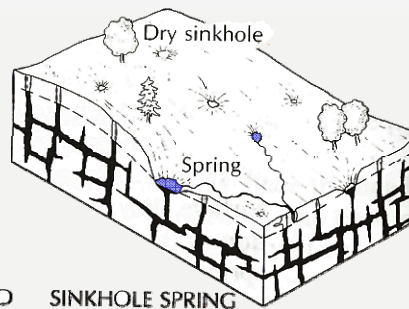
A DEPRESSION SPRING
Depressionsquelle
Schichtquelle



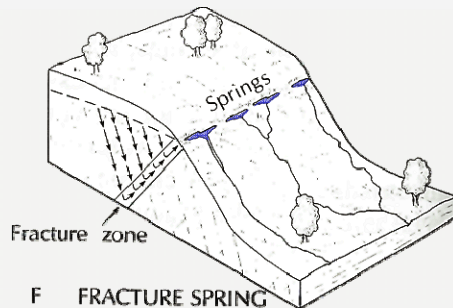
B CONTACT SPRING
Schichtquelle



C FAULT SPRING
Störungsquelle

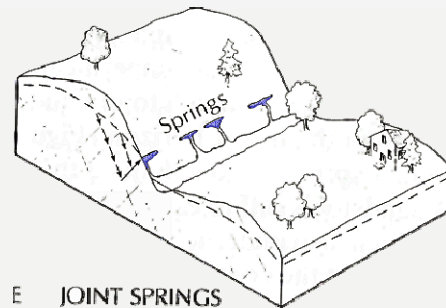


D SINKHOLE SPRING
Dolinenquelle
Karstquelle



F FRACTURE SPRING

Kluftquelle
Stauquelle



E JOINT SPRINGS

Schichtflächenquelle
Stauquelle



- verschiedene Porositäten: gesamt, effektiv
- Reibungskräfte: lineares DARCY-Gesetz
- Bandbreite k_f -Werte: $10^{-2} \dots 10^{-14} \text{ m s}^{-1}$
- Verschiedene Methoden zur Bestimmung k_f -Werte
- 3 Geschwindigkeiten:
Filter-, Abstands, Fließgeschwindigkeit
- Tracer
- Grundwasserstockwerke
ungespannt, gespannter Wasserspiegel
- Quelltypen