

Grundvorlesung Hydrologie

8. Das Wasser im Untergrund



Dr. Jan Bliefernicht

Lehrstuhl für Regionales Klima und Hydrologie

Institut für Geographie

Universität Augsburg

Inhalte der Grundkursvorlesung Hydrologie

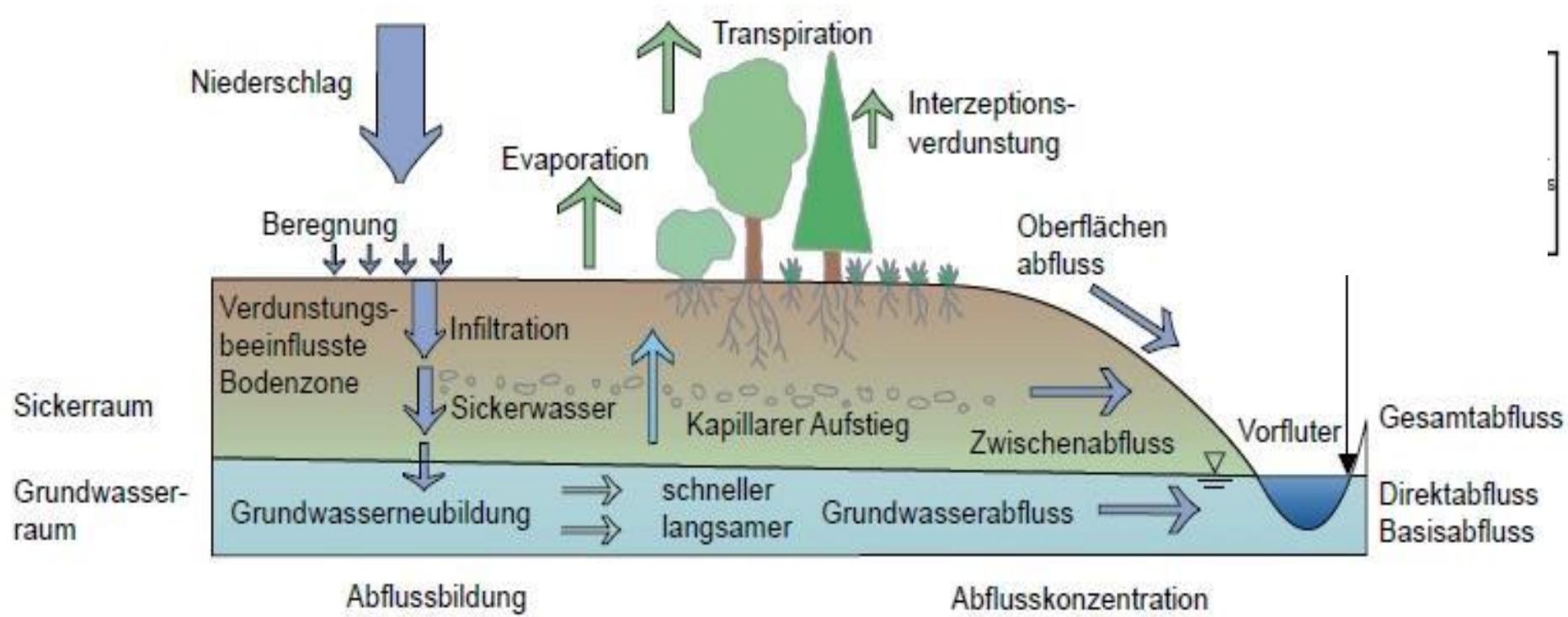
1. Einführung in die Hydrologie und Wasserforschung
2. Wasser als Stoff
3. Das Wasser auf der Erde und seine Verteilung
4. Die Ozeane
5. Die Kryosphäre und ihre Bedeutung im globalen Wasserhaushalt
6. Das Wasser der Atmosphäre
7. Fließgewässer und Seen
- 8. Das Wasser im Untergrund**
9. Prozesse der Abflussbildung
10. Einzugsgebietshydrologie

Gliederung der heutigen Veranstaltung

1. Hydrologische Gliederung des Untergrundes / Arten von Grund- und Bodenwasser
2. Grundwasser: Begrifflichkeiten, GW-Körper & -stockwerke
3. Arten und Eigenschaften eines Grundwasserleiters
4. Fließbewegungen des Grundwassers
5. Grundwasserneubildung & Messung des Grundwassers
6. Aspekte des Grundwasserschutzes

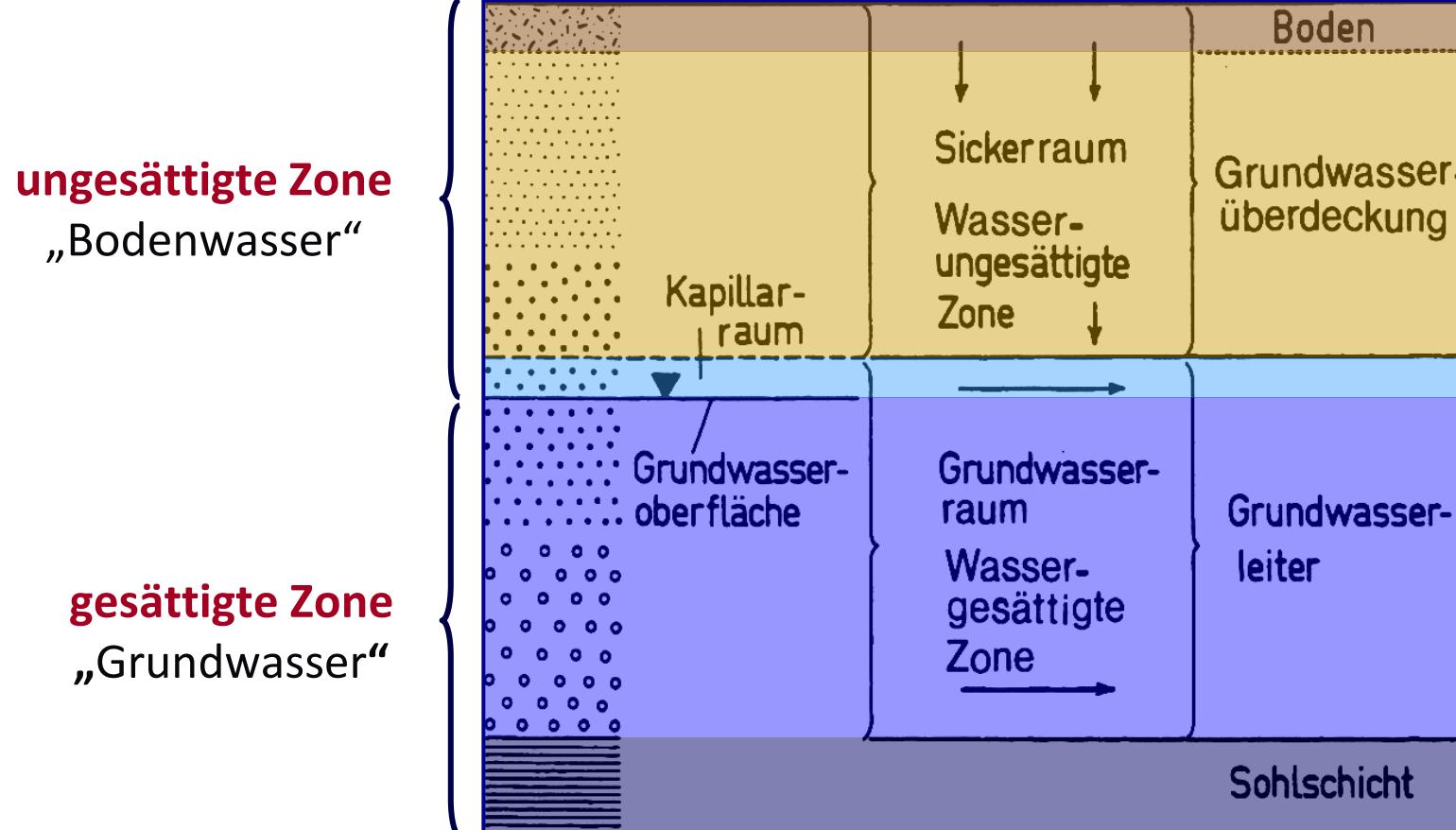
1. Hydrologische Gliederung des Untergrundes

Hydrologische Prozesse an der Landoberfläche



<https://www.lfu.bayern.de/wasser/grundwasserneubildung/index.htm>

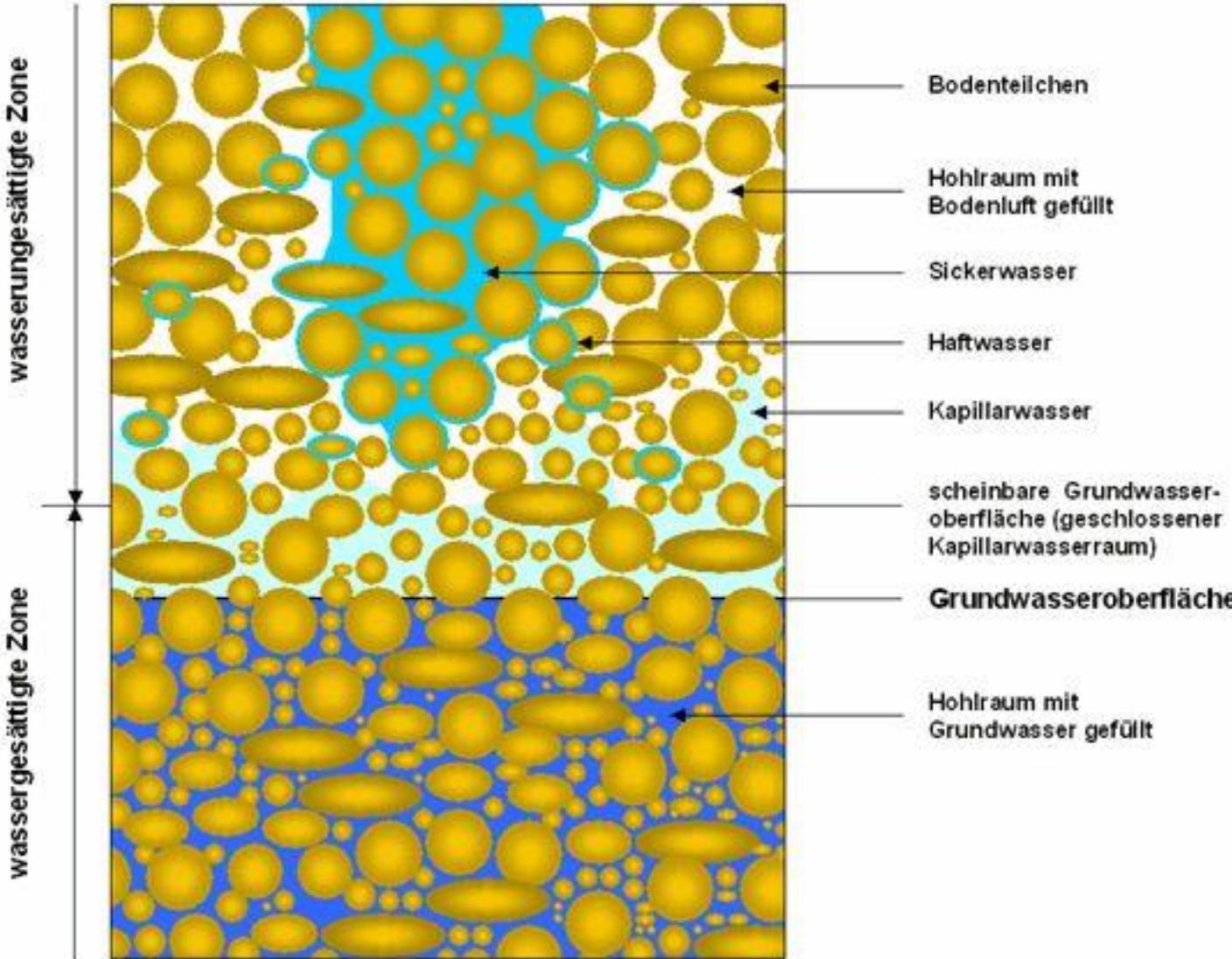
Hydrologische Gliederung des Untergrundes



aus Matthess & Ubell (2003, S. 17) nach Schwille (1966, DIN 4049 T3)

Die hydrologische Gliederung des Untergrundes und die Terminologie nach DIN 4049

Der Boden (Untergrund) als poröses Medium

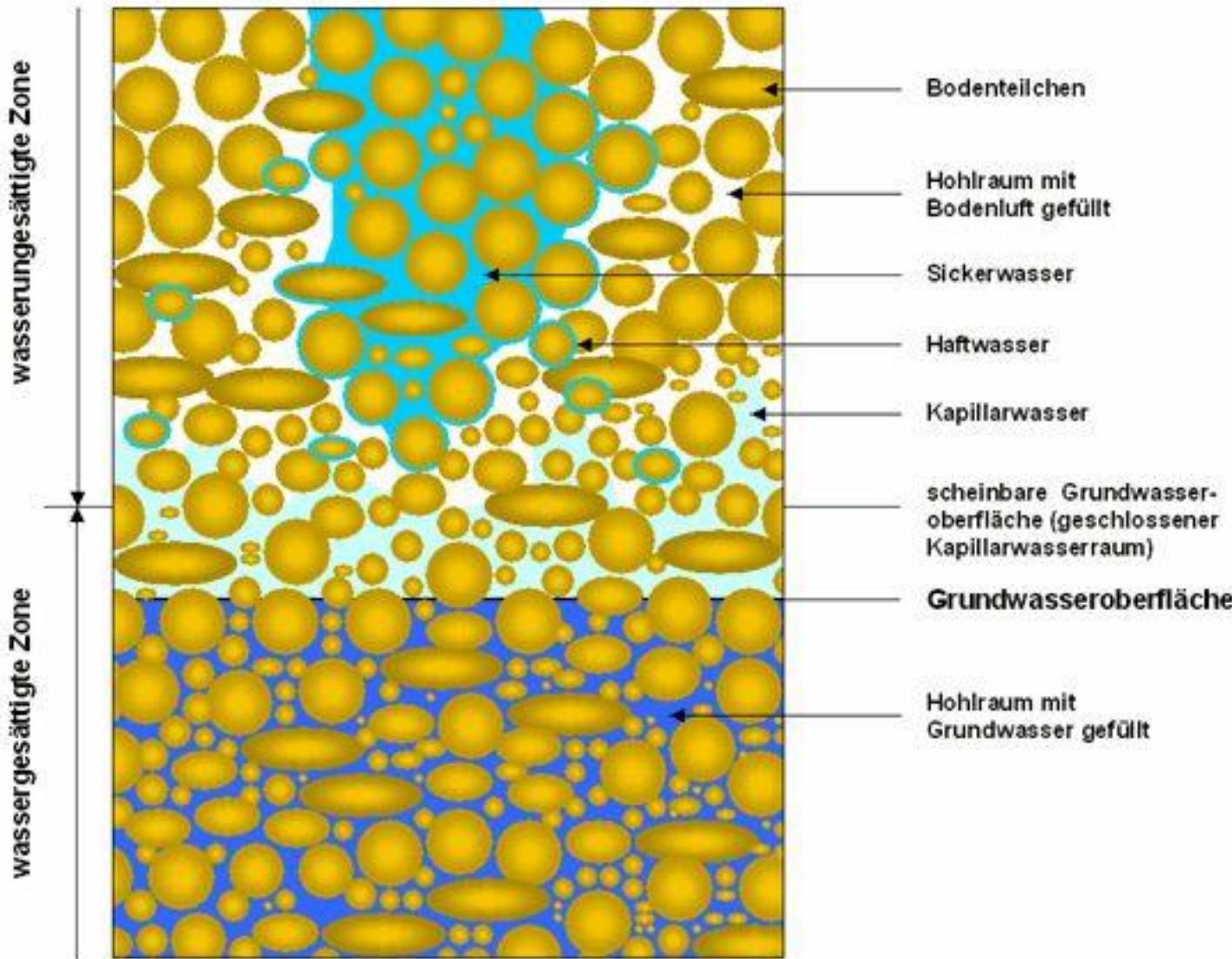


Luft entweicht aus dem Boden

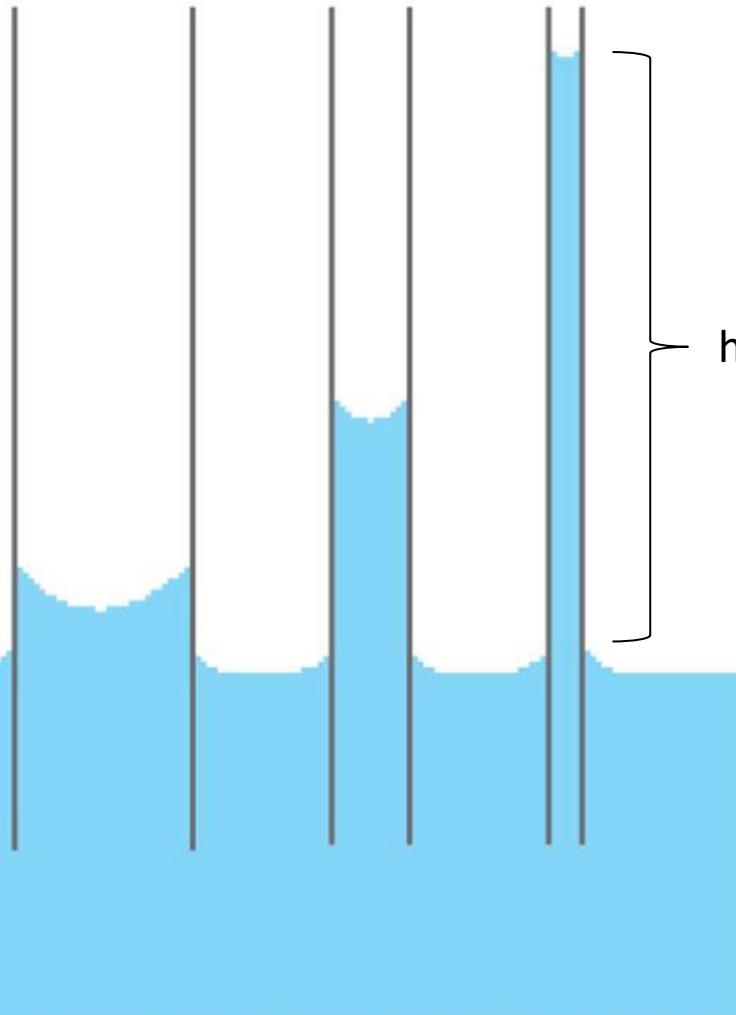


<https://www.youtube.com/watch?v=s73ShSTMQVc>

Der Boden (Untergrund) als poröses Medium



Aufstieg von Wasser in unterschiedliche Höhen



$$h = \frac{\cos\theta \cdot 2\sigma}{\rho \cdot R \cdot g}$$

h = Höhe des Kapillaraufstiegs
[m]

θ = Benetzungswinkel [rad]

σ = Oberflächenspannung des
Wassers [N/m]

ρ = Dichte des Wassers [kg/m³]

g = Gravitationskonstante [m/s²]

R = Radius der Kapillare

Abb. 1. Je dünner das Rohr, desto höher steigt das
Wasser.

2. Begrifflichkeiten, Grundwasserkörper & - stockwerke

Grundwasser – Begriffe nach DIN 4049

Grundwasser

Als Grundwasser wird das Wasser im Untergrund bezeichnet, das alle Hohlräume zusammenhängend ausfüllt und dessen Bewegung ausschließlich durch die Schwerkraft bestimmt wird.

Grundwasserleiter:

Gesteinskörper, die Hohlräume enthalten und damit geeignet sind Grundwasser zu leiten, werden als Grundwasserleiter bezeichnet.

Grundwasserhemmer:

Schlecht leitende Gesteinskörper werden als GW-Hemmer bezeichnet.

Grundwassernichtleiter:

Leitet ein Gesteinskörper kein Grundwasser, wird er als GW-Nichtleiter bezeichnet.

Grundwasser – Begriffe nach DIN 4049

Grundwasserkörper

ist ein eindeutig abgrenzbares Grundwasservorkommen.

Grundwasseroberfläche

ist die obere Begrenzung des Grundwasserkörpers, **Grundwasserosole** die untere Grenzfläche eines GW-Körpers.

Freies Grundwasser

tritt dann auf, wenn sich die freie GW-Oberfläche innerhalb des GW-Leiters einstellt.

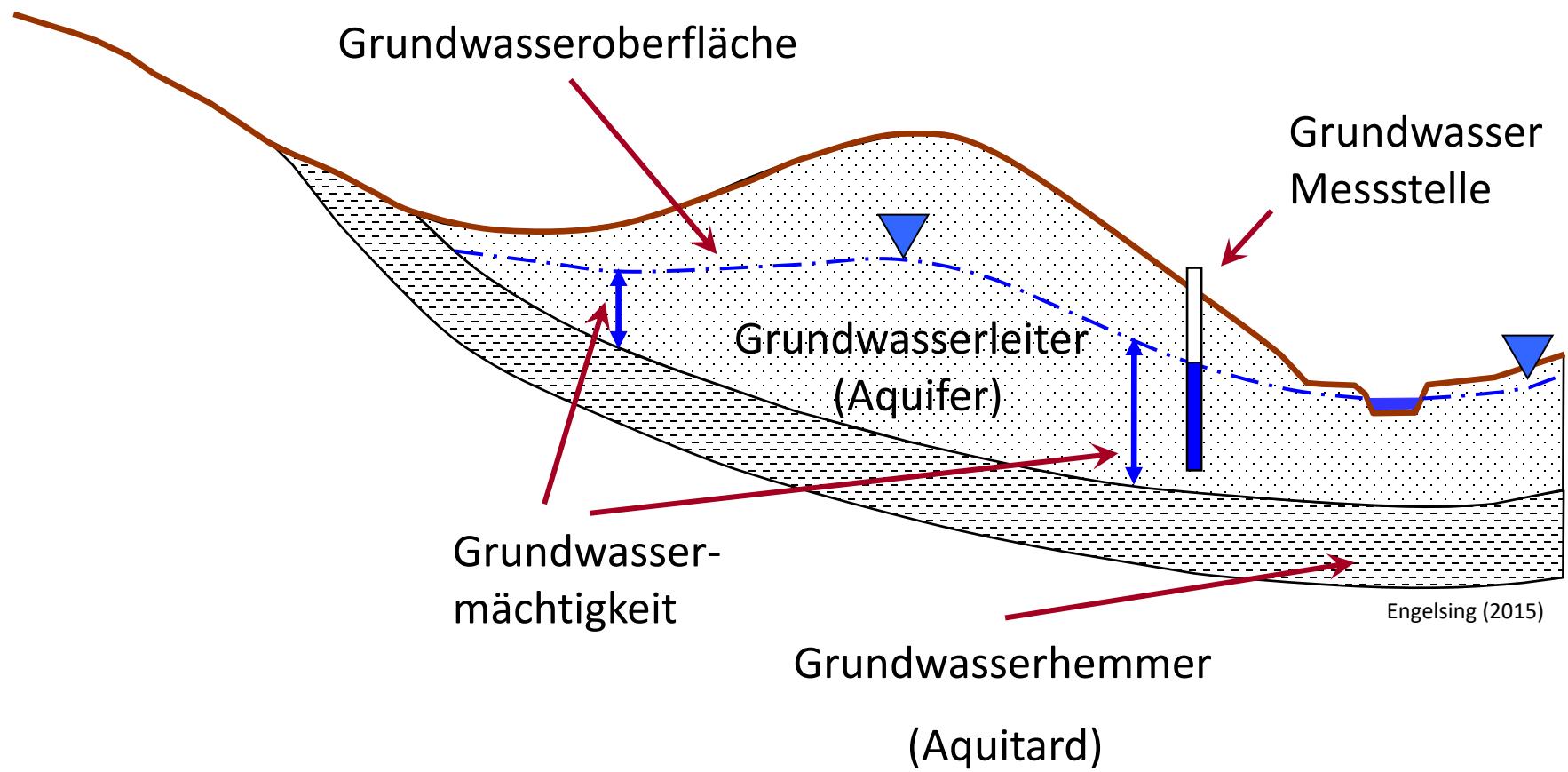
Gespanntes Grundwasser

tritt auf, wenn der freie Anstieg der Grundwasseroberfläche durch GW-Hemmer oder GW-Nichtleiter behindert wird

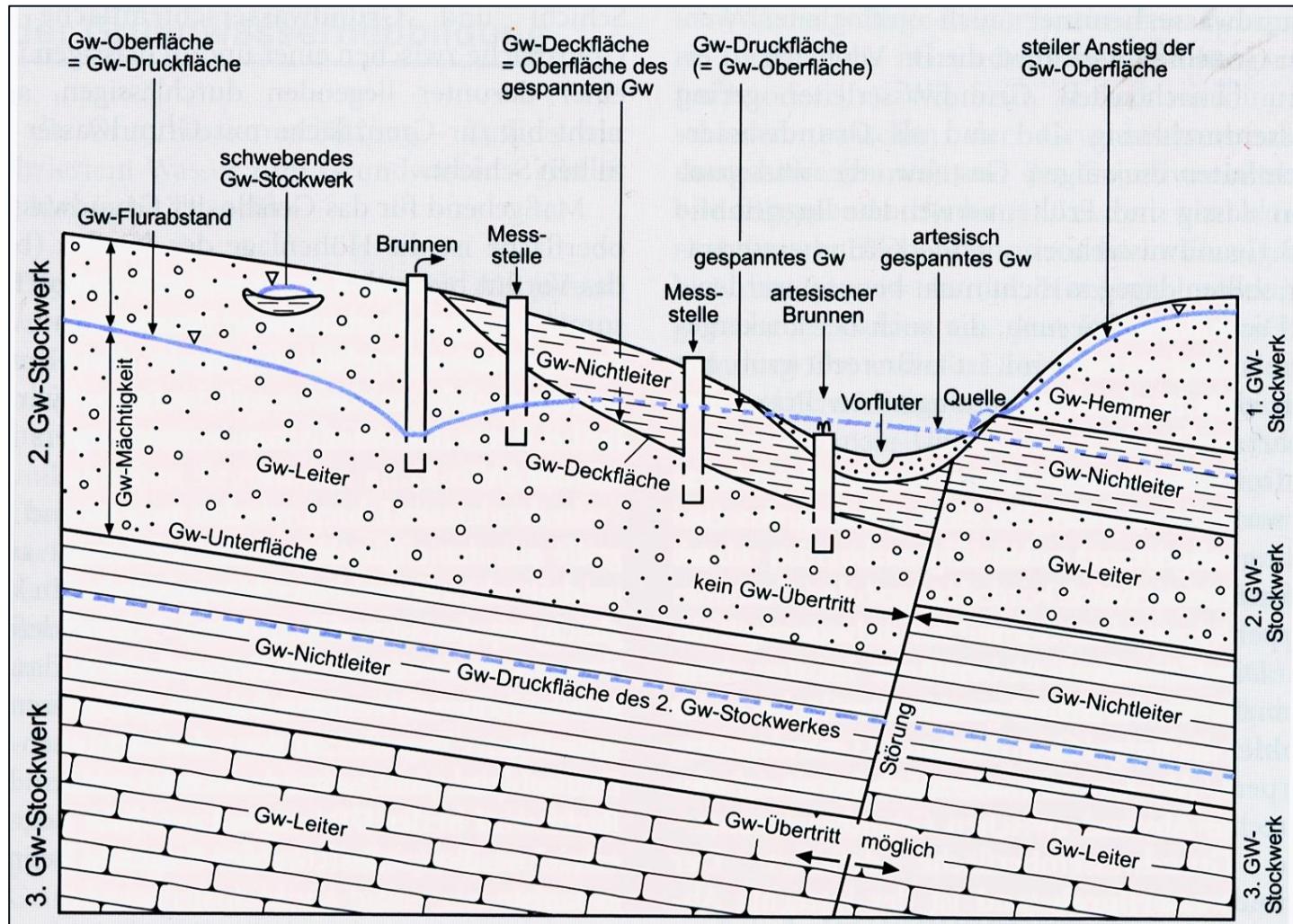
Grundwasserstockwerke

treten auf, wenn der Grundwasserkörper durch mehrere übereinander liegende GW-Leiter und GW-Hemmer gegliedert ist.

Schema eines Grundwasserkörpers



Grundwasserstockwerke

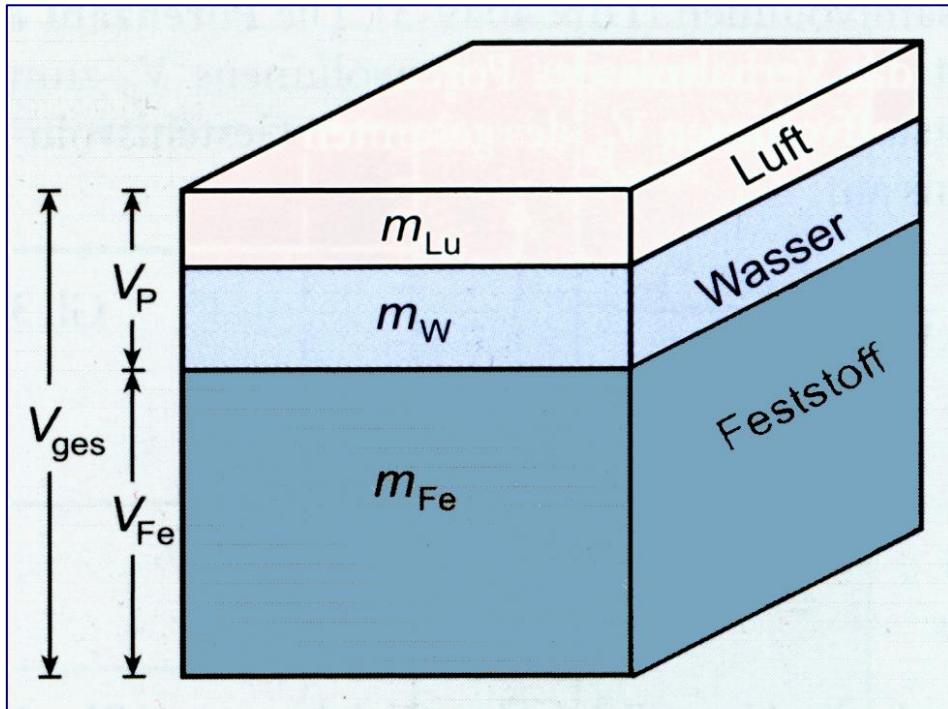


Hölting & Coldewey (2009, S. 10)

Der Aufbau des hydrogeologischen Untergrundes im Modell

3. Arten und Eigenschaften von Grundwasserleitern

Kenngrößen eines Grundwasserkörpers



Hölting & Coldeway (2009, S. 11)

Kenngrößen:

- Gesamtvolumen [m^3]: V_{ges}
- Festvolumen [m^3]: V_{Fe}
- Porenvolumen [m^3]: V_P
- Wasservolumen [m^3]: V_W
- Luftvolumen [m^3]: V_L
- **Porosität [%]:** n

$$V_P = V_{\text{ges}} - V_{\text{Fe}}$$

$$n = \frac{V_P}{V_{\text{ges}}} \cdot 100 \%$$

Die Verteilung der Phasen im Untergrund

Porositäten von Locker- und Festgesteinen

	<i>n (%)</i>
Lockergesteine	
Schluff (Silt), tonig-feinsandig	40–50
Feinsand	40–50
Mittelsand	35–45
Grobsand, Feinkies (gut sortiert)	30–40
Kies, sandig	20–30
Festgesteine	
Tonsteine, Mergelsteine, klüftig, unverwittert	
Gebankte, harte und dichte, geklüftete Sedimentgesteine	
nahe der Oberfläche (oft bis 5–10 m)	
in größerer Tiefe (bis ca. 100 m, tiefer oft < 0,1)	
Sandsteine, teilzementiert oder sekundär ausgelaugt	
Dolomite, grobkörnig-porös und stark geklüftet	
Kompakte verkarstete Kalke und Sulfatgesteine	
(Gips, Anhydrit), bezogen auf ganze Einzugsgebiete	
(lokal und in nur teilzementierten Kalkablagerungen	
höhere Werte)	
Basalte, dicht, geklüftet	
Basaltlaven und vulkanische Tuffe (jung, nur teilverfestigt)	
Granite, Gneise, kristalline Schiefer, bergfrisch	
(aufgelockert und verwittert viel höhere Werte, siehe Lockergesteine)	

Baumgartner und Liebscher (1996, S. 428)

n = Porosität

n_{sp} = speichernutzbare Porosität für Grundwasserentnahmen

Lockergesteine und ihre Durchlässigkeit

Lockergestein	Gesamtporenanteil	eff. Porenanteil	Durchlässigkeit
		n_p [%]	n_{eff} [%]
sandiger Kies	25 – 35	20 – 25	$3 \cdot 10^{-3} – 5 \cdot 10^{-4}$
kiesiger Sand	28 – 35	15 – 20	$1 \cdot 10^{-3} – 2 \cdot 10^{-4}$
mittlerer Sand	30 – 38	10 – 15	$4 \cdot 10^{-4} – 1 \cdot 10^{-4}$
schluffiger Sand	33 – 40	8 – 12	$2 \cdot 10^{-4} – 1 \cdot 10^{-5}$
sandiger Schluff	35 – 45	5 – 10	$5 \cdot 10^{-5} – 1 \cdot 10^{-6}$
toniger Schluff	40 – 55	3 – 8	$5 \cdot 10^{-6} – 1 \cdot 10^{-8}$
schluffiger Ton	45 – 65	2 – 5	ca. $< 10^{-8}$

Hölting & Coldeway (2009, S. 16)

Gesamtporenanteil, effektiver Porenanteil und Durchlässigkeit in Abhängigkeit von der Korngröße

Grundwasserführende Schichten in Deutschland



Grundwasserführende Gesteine

- Porenwasserleiter
- Kartswasserleiter
- Kluftwasserleiter

Gewöhnlich werden 3 Typen unterschieden

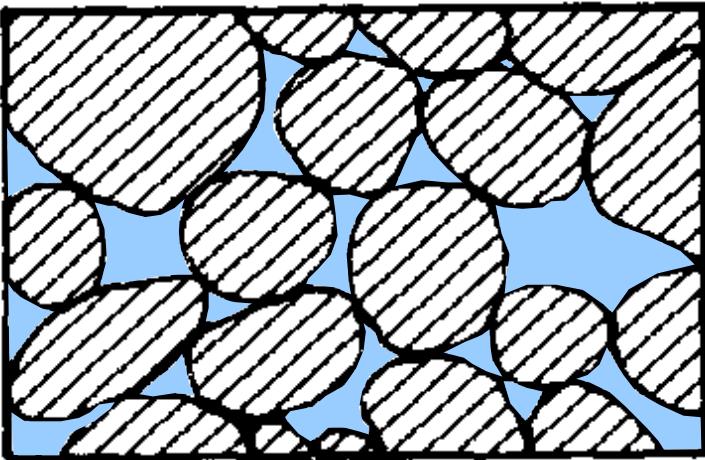


Datum: 10.01.2021

Fachdaten: Zuständige Behörden der Länder
Hintergrunddaten: © GeoBasis-DE / BKG 2021

© WasserBLICK / Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Grundwasserleiter – Porenwasserleiter



aus Matthess & Ubell (2003, S. 20) nach Meinzer (1942)

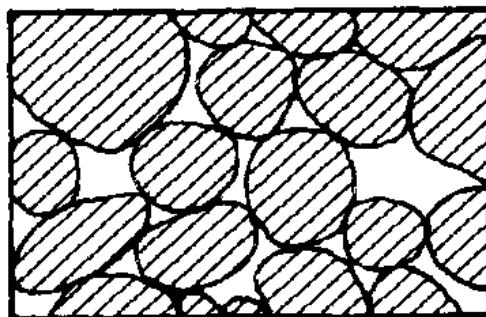
Beispiele (Lockergesteine, Sedimente)

- Pleistozäne Sande und Schotter
- Pleistozäne Moränen
- Holozäne Auensedimente
- Sandsteine
- Vulkanische Sedimente (Tephra) ...

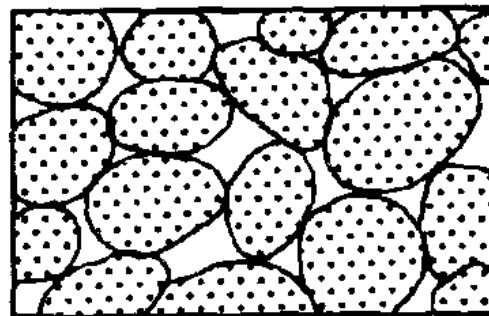
Eigenschaften:

- Hohe Porositäten und Durchlässigkeiten (hydraulische Leitfähigkeiten)
- Höhere Speicherfähigkeiten als bei Kluftwasserleiter
- Bindung des Wassers stark abhängig von der Substratzusammensetzung (Größe der Sedimentkörner)

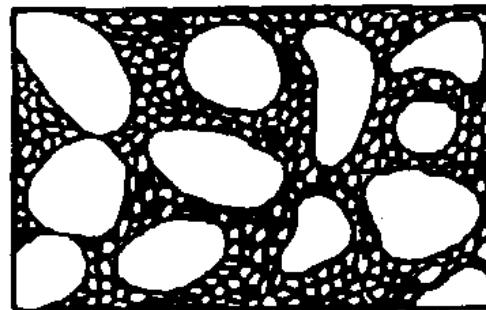
Varianten eines Porenwasserleiters



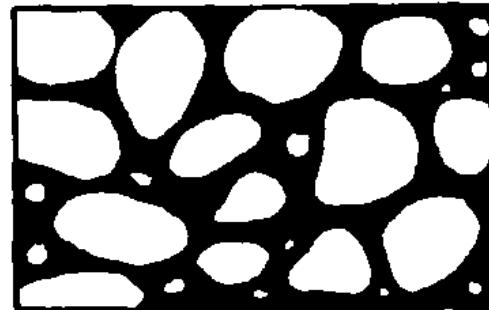
a



c



b



d

aus Matthess & Ubell (2003, S. 20)
nach Meinzer (1942)

- a) Gut sortiert, hohe Porosität
- b) Schlecht sortiert, niedrige Porosität
- c) Gut sortiert mit porösen Körnern
- d) Gut sortiert, durch nachträgliche Ausfällung geringe Porosität

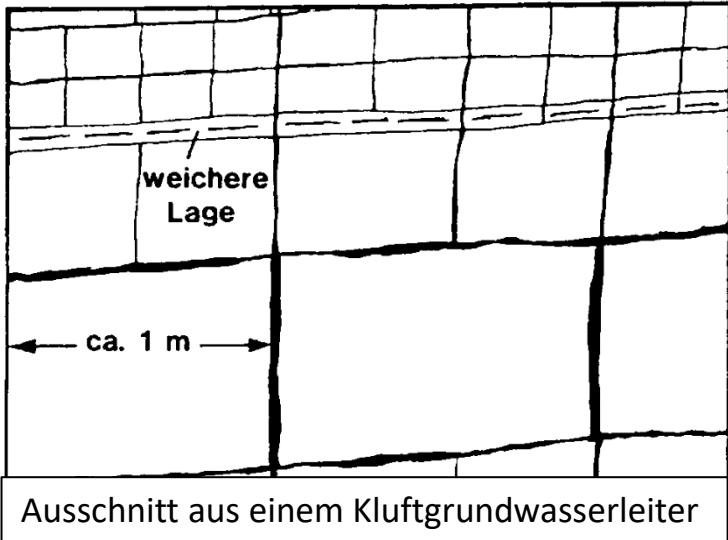
Beispiel eines Porenwasserleiters



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f2/Esker_deposits.jpg

Fluvioglaziale Sedimente eines Os in Schweden

Grundwasserleiter – Kluftwasserleiter



Festgesteine mit geringer hydraulischer Leitfähigkeit der Matrix bei einer mehr oder weniger ausgeprägten Klüftigkeit

Beispiele (Festgesteine)

- Granite und andere Tiefengesteine
- Sandsteine, Mergelsteine, Konglomerate
- Basalte und andere Effusivgesteine
- Grauwacken, Gneise, Quarzite und andere Metamorphe

Eigenschaften

- sehr geringe Durchlässigkeit der Gesteinsmatrix & nutzbares Grundwasser
- sehr hohe Durchlässigkeiten (bevorzugte Fließbahnen) entlang der Klüfte, Austausch auch mit tieferen Grundwasserstockwerken möglich, stark abhängig von der Kluftweite & Anzahl der Klüfte
- meistens geringere Speicherfähigkeiten; starke Grundwasserschwankungen

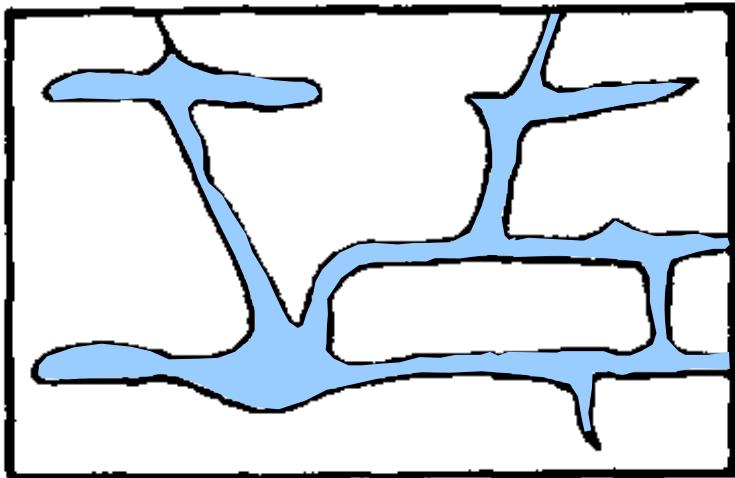
Beispiel eines Kluftwasserleiters



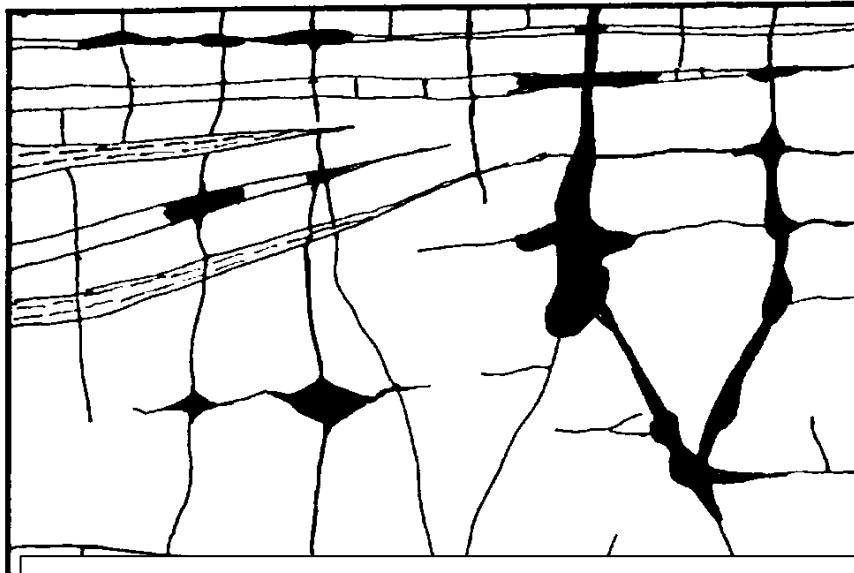
<https://www.geoenergy.nat.fau.de/geothermie-allianz-bayern/gab-projekte/fichtelgebirgsgranite/>

Granitklüfte im Fichtelgebirge

Grundwasserleiter – Karstwasserleiter



aus Matthess & Ubell (2003, S. 20) nach Meinzer (1942)



Ausschnitt aus einem Karstgrundwasserleiter

Baumgartner & Liebscher (1996, S. 422)

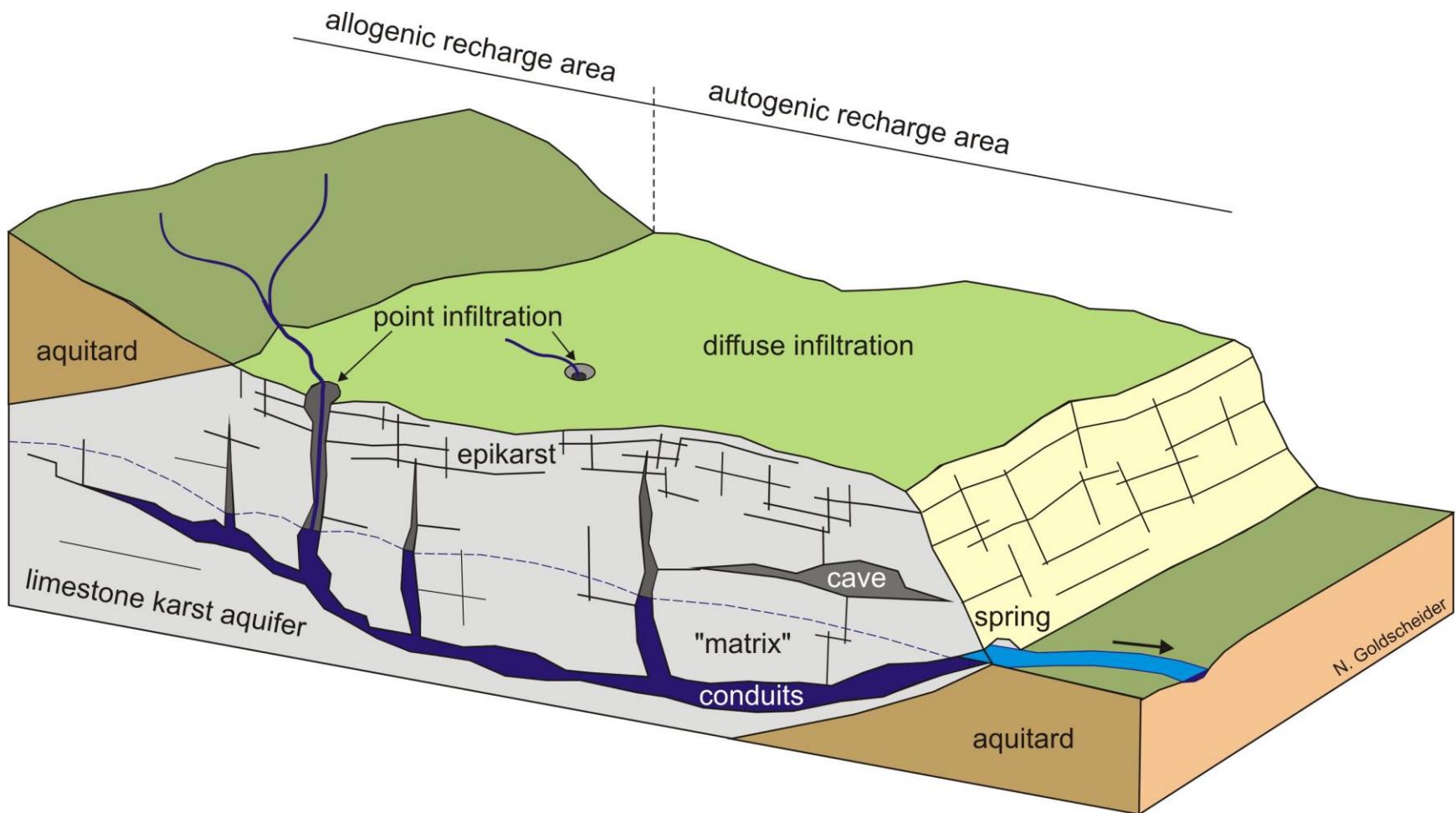
Karstwassersysteme abhängig von:

- Wasserbilanz (GW-neubildung)
- Reinheit des Kalkes /pH-Wert
- Tektonische Beanspruchung
- Entwicklungsdauer
- Abstand vom Fließgewässer

Eigenschaften

- z. T. extrem hohe Durchlässigkeiten
- Bsp.: Donauversickerung

Hydrogeologisches Schema eines Karstwasserleiters



Goldscheider & Drew 2007

Wo gibt es große Karstgebiete in Deutschland?



Legende

Grundwasserführende
Gesteine

- Porenwasserleiter
- Kärtstwasserleiter
- Kluftwasserleiter

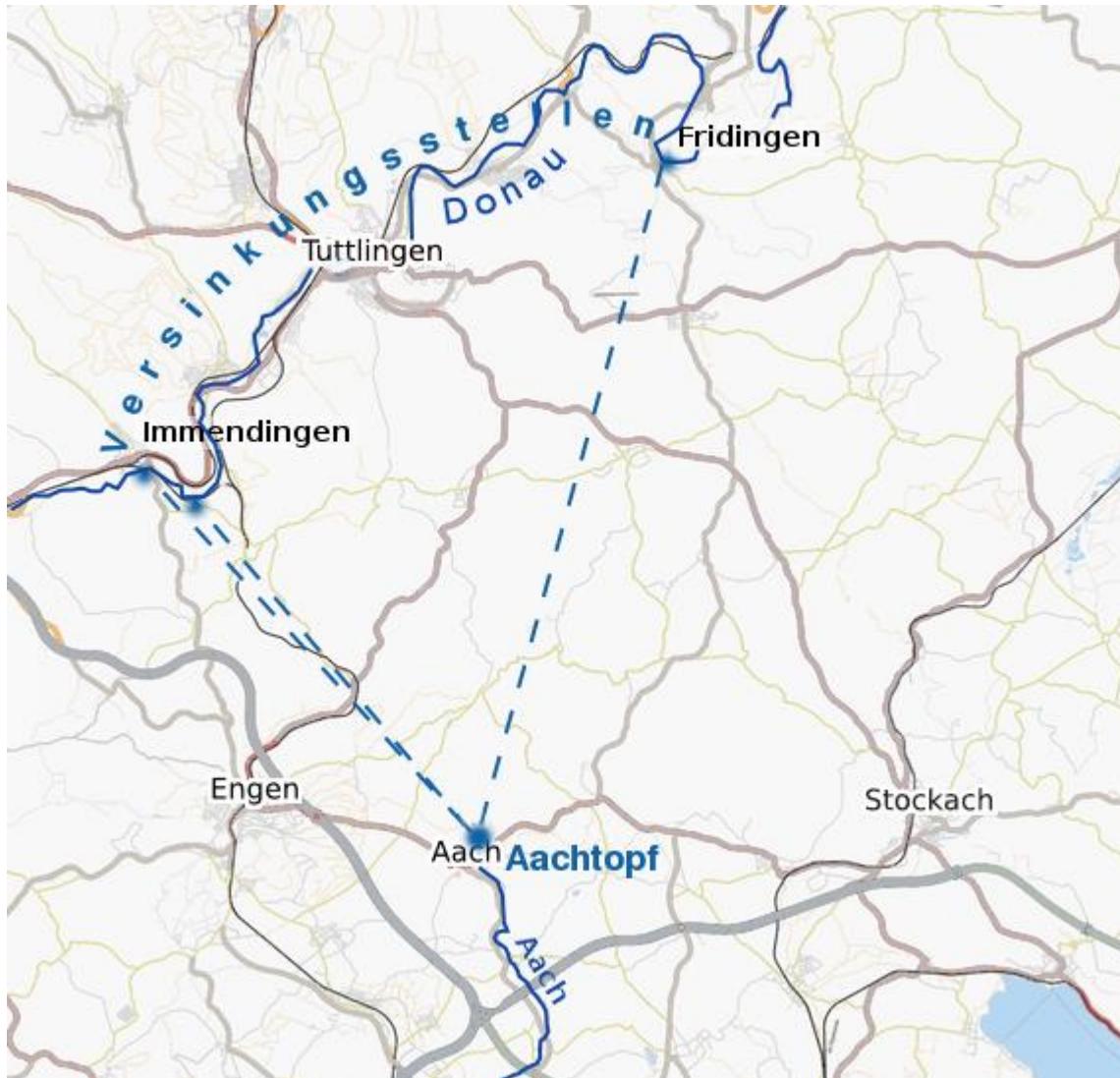


Datum: 10.01.2021

Fachdaten: Zuständige Behörden der Länder
Hintergrunddaten: © GeoBasis-DE / BKG 2021

© WasserBLICK / Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)

Karstwasserleiter - Donauversickerung



<https://de.wikipedia.org/wiki/Donauversinkung#/media/Datei:Donauversinkung-Schema.png>

Karstwasserleiter - Donauversickerung



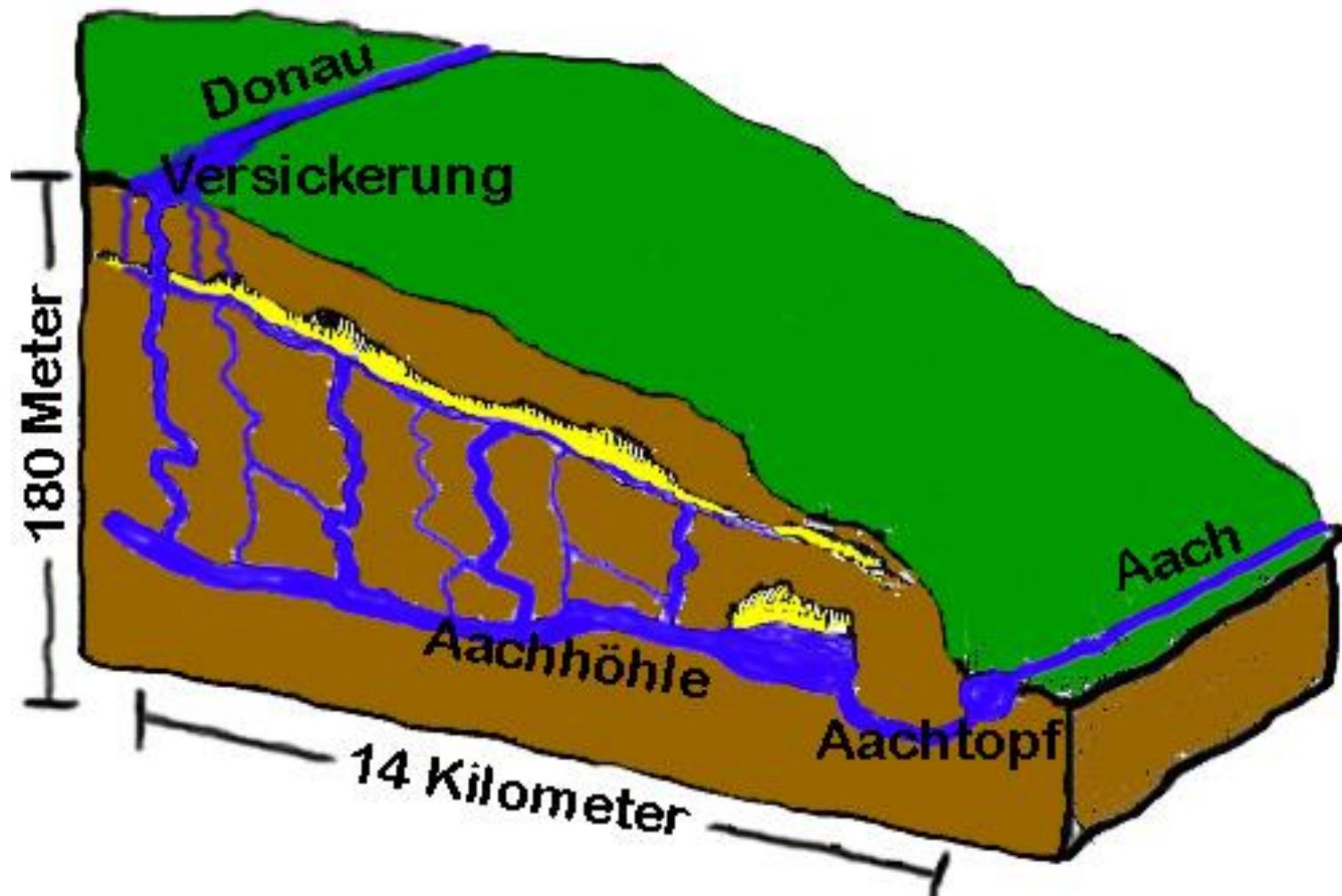
Donauversickerung bei Immendingen

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5620026>

Karstwasserleiter - Donauversickerung



Karstwasserleiter - Donauversickerung



Karstwasserleiter - Donauversickerung

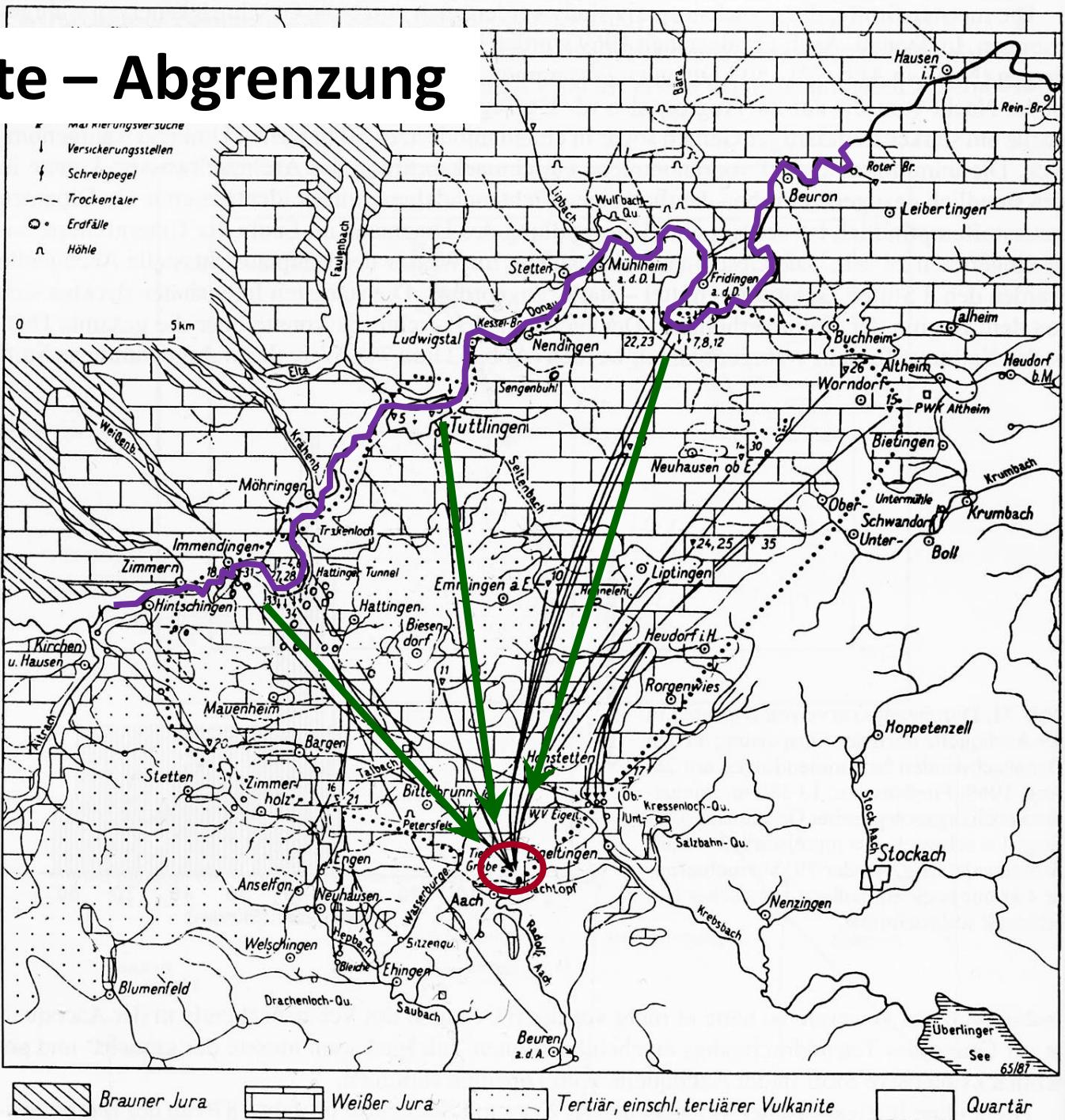


Aachtopf bei Radolfzell

Einzugsgebiete – Abgrenzung

Donauversickerung und
Aachtopf
Markierungsversuche
aus dem 19.
Jahrhundert
Einsatz von Salz, Öl und
Farbstoffen

Käss (2004, S.140)

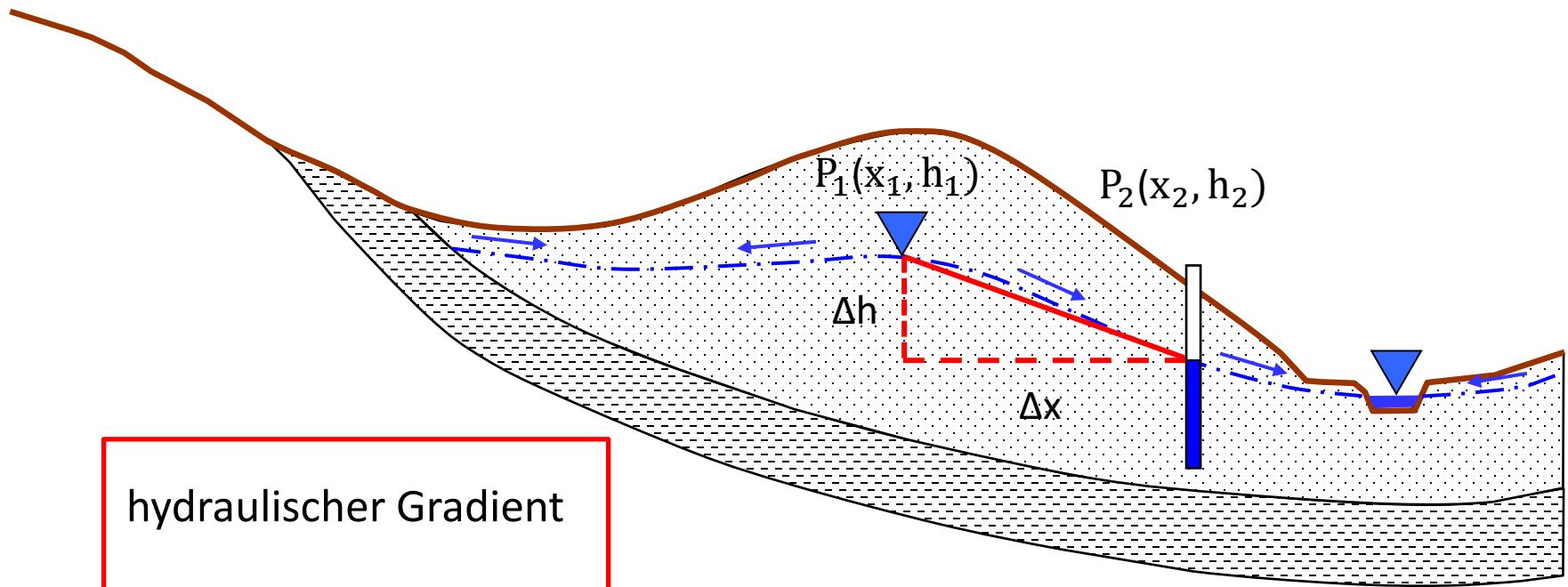


4. Fließbewegungen des Grundwassers

Fließbewegungen im Untergrund

- Grundwasser: gesättigte Verhältnisse, Fließbewegung wird rein von der Gravitation beeinflusst (Gravitationspotential)

Fließrichtung des Grundwassers



hydraulischer Gradient

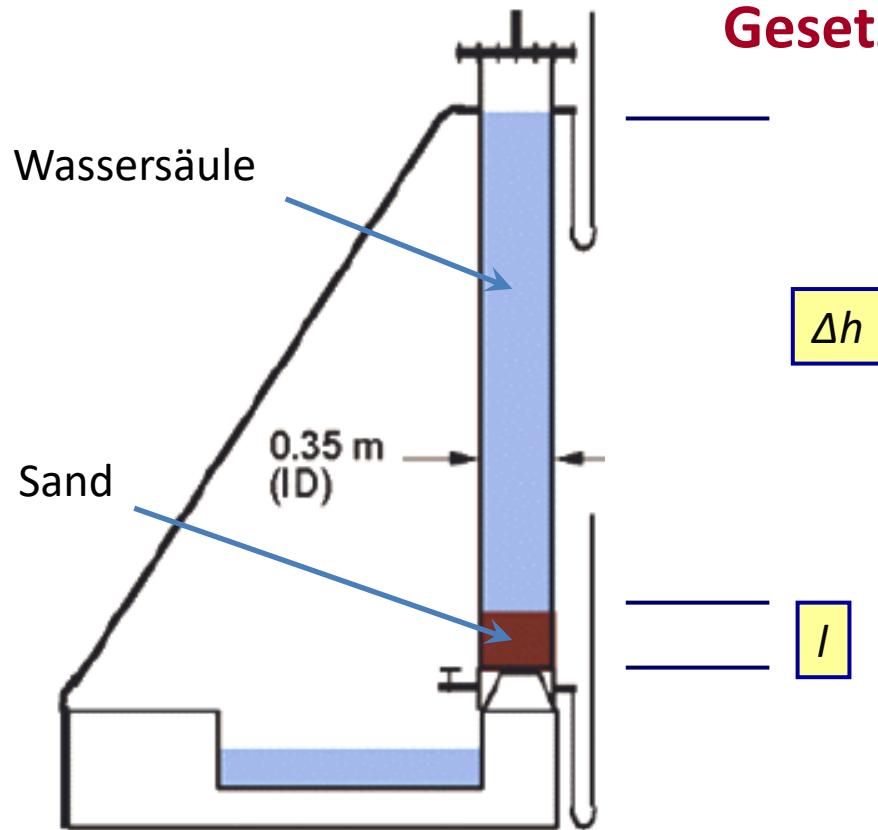
$$\frac{\Delta h}{l} = \frac{\Delta h}{\Delta x} = \frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1}$$

h = Grundwasserhöhe (über NN)
 x = geographische Koordinate in x-Richtung

Engelsing (2015)

→ bestimmt die Fließrichtung des Grundwassers

Ermittlung der Durchlässigkeit (Durchflusses)



Gesetz von Darcy (1856)

$$q = k_f \cdot \frac{\Delta h}{l}$$

mit:

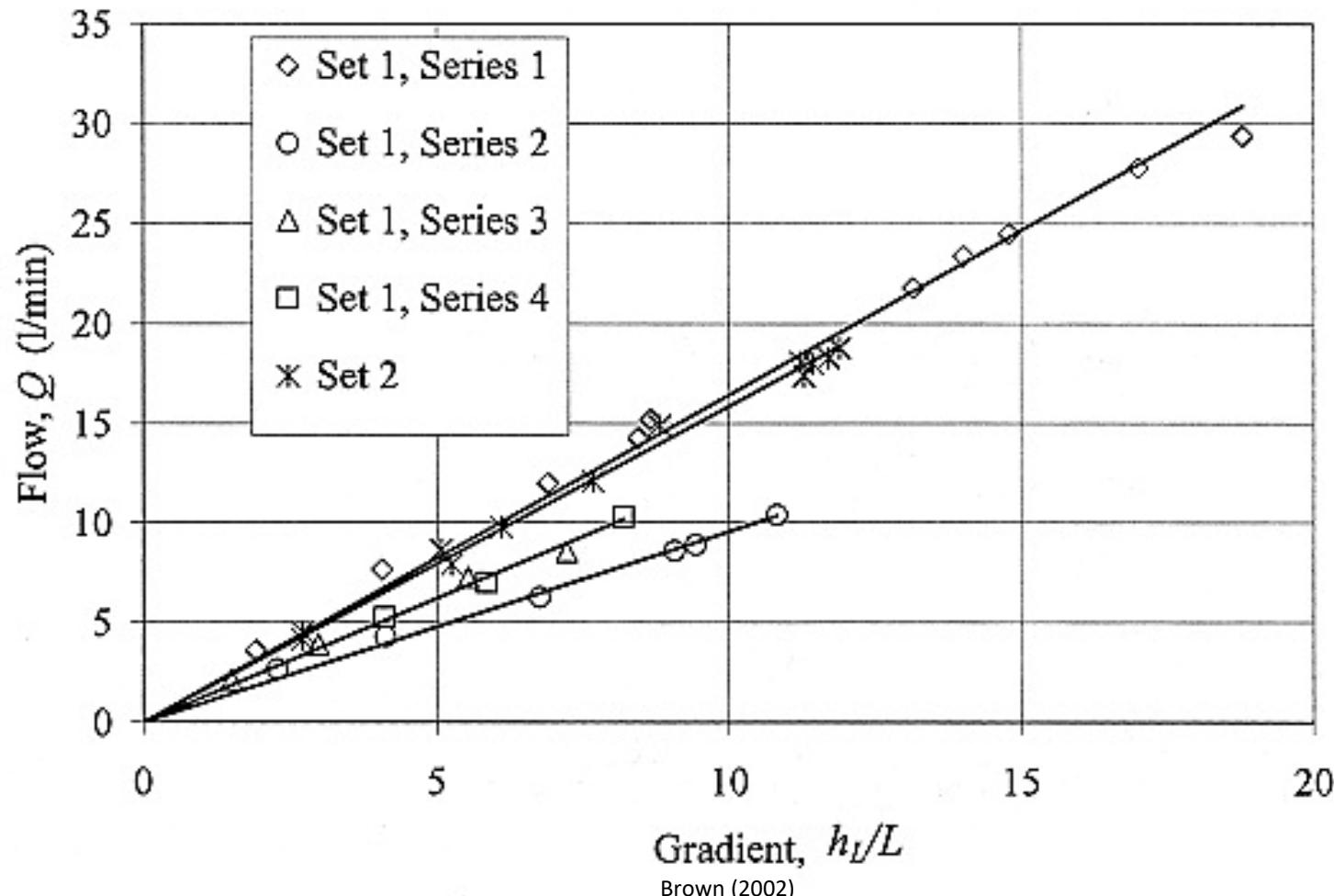
q = Durchfluss [cm/s]

k_f = Durchlässigkeitsbeiwert
gesättigt [cm/s]

Δh = Differenz der Druckhöhe

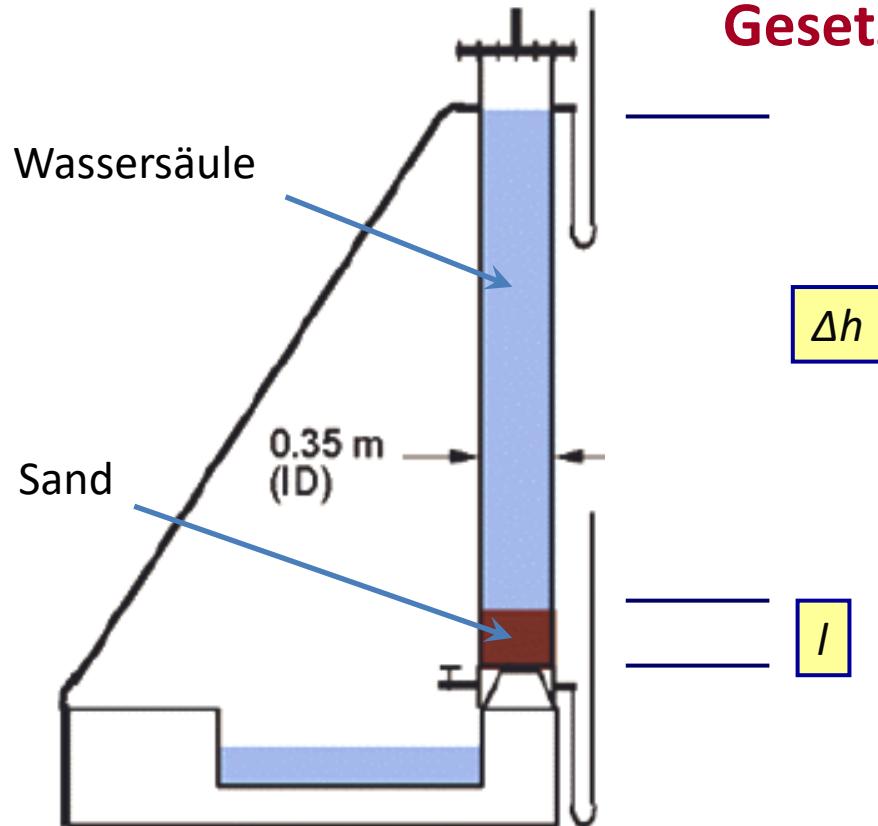
l = Fließstrecke

Resultate des Darcy-Experiments



Ausfluss Q ist linear zum hydraulischen Gradient

Ermittlung der Durchlässigkeit (Durchflusses)



Gesetz von Darcy (1856)

$$q = k_f \cdot \frac{\Delta h}{l}$$

mit:

q = Durchfluss [cm/s]

k_f = Durchlässigkeitsbeiwert
gesättigt [cm/s]

Δh = Differenz der Druckhöhe

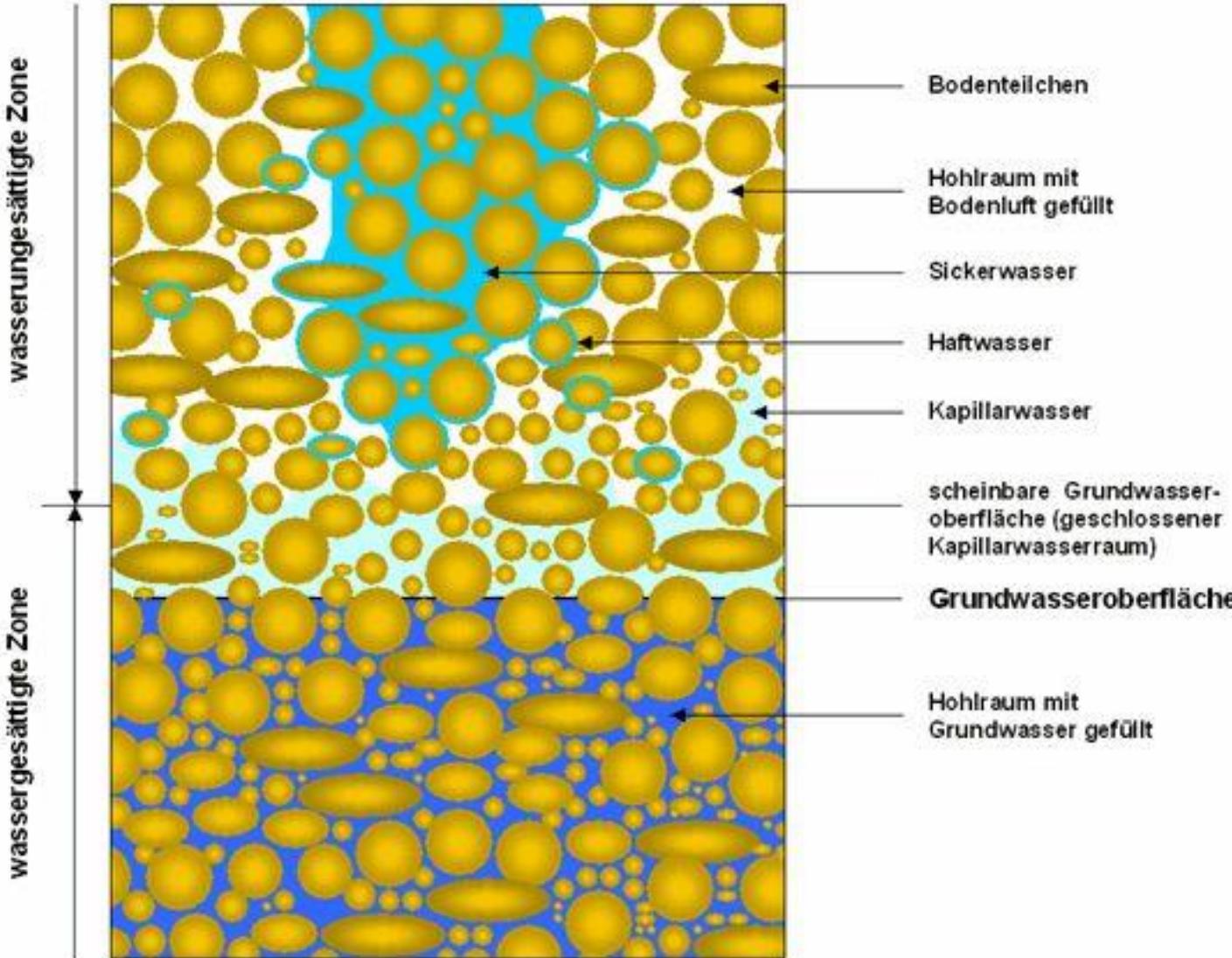
l = Fließstrecke

- Gesetz gilt in homogenen porösen Medien (Sand) und bei laminarem Fluss
- Der k_f -Wert aus Tabellen kann direkt in die Darcy-Gleichung eingesetzt werden.

Fließbewegungen im Untergrund

- Grundwasser: gesättigte Verhältnisse, Fließbewegung wird rein von der Gravitation beeinflusst (Gravitationspotential)

Der Boden (Untergrund) als poröses Medium

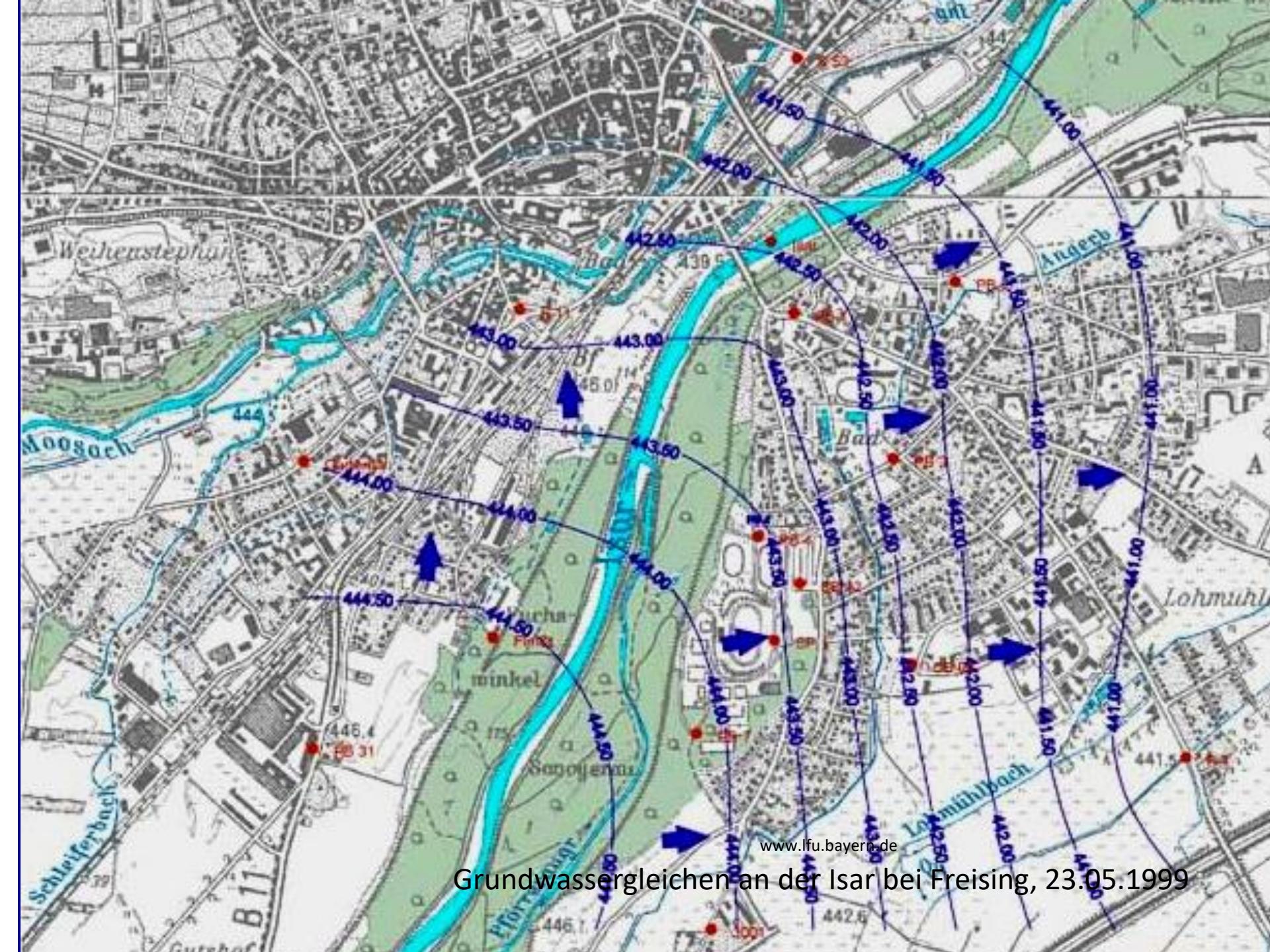


Fließbewegungen im Untergrund

- Grundwasser: gesättigte Verhältnisse, Fließbewegung wird rein von der Gravitation beeinflusst (Gravitationspotential)
- Bodenwasser: ungesättigte Verhältnisse, Fließbewegung ist abhängig von verschiedenen Teilkräften (Matrixpotential, Gravitationspotential, Osmotisches Potential, ...)

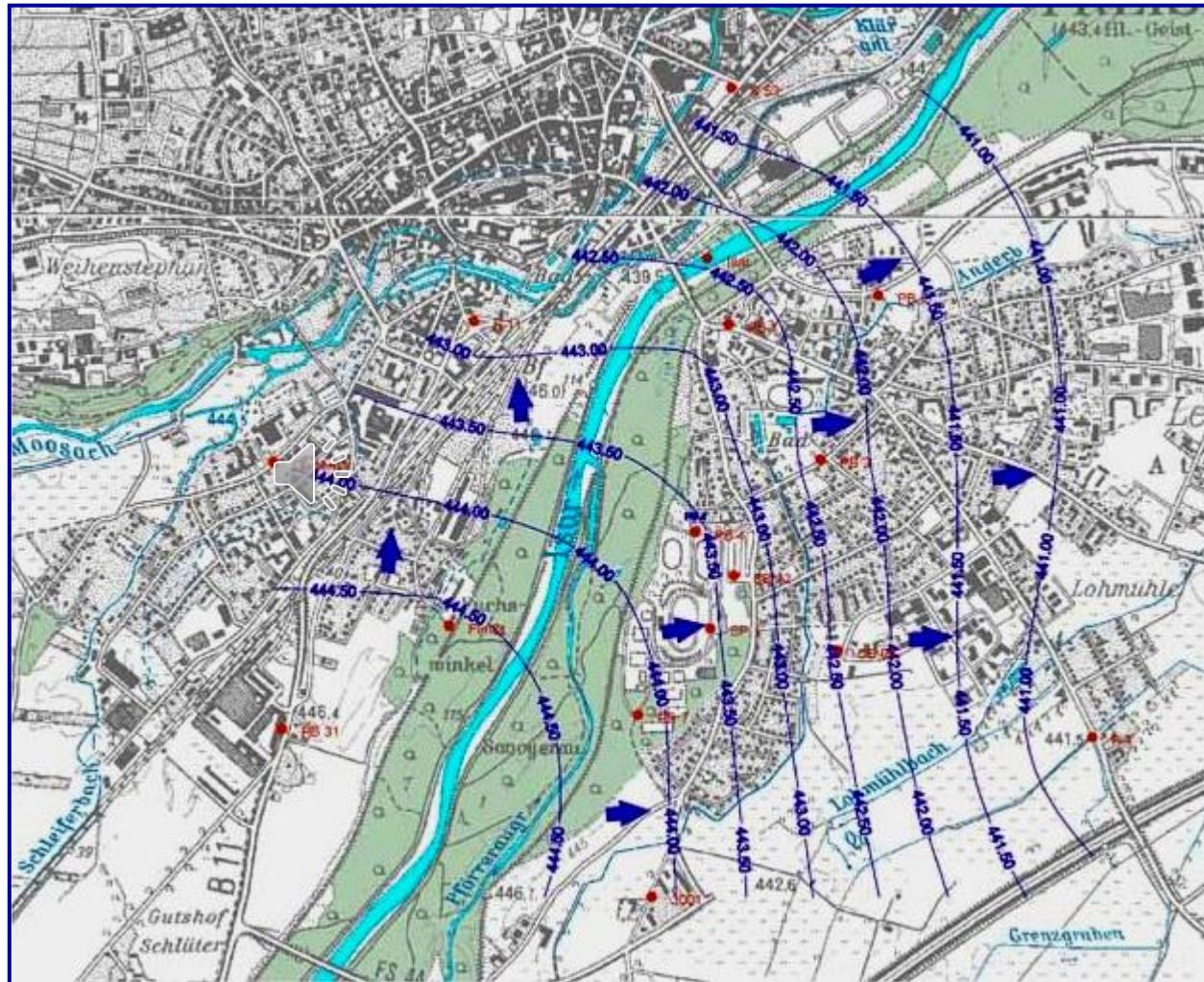


siehe Bodengeographie



Grundwassergleichenpläne - Isar in Freising

- Grundwasserverhältnisse werden mit **Gleichenplänen** dargestellt
- **Grundwassergleichen** zeigen Abstand zur Geländeoberfläche
→ **GW-Flurabstand**
- auch **absolute Höhenlage** des Grundwassers kann dargestellt sein
- die **Fließrichtungen** sind direkt ablesbar



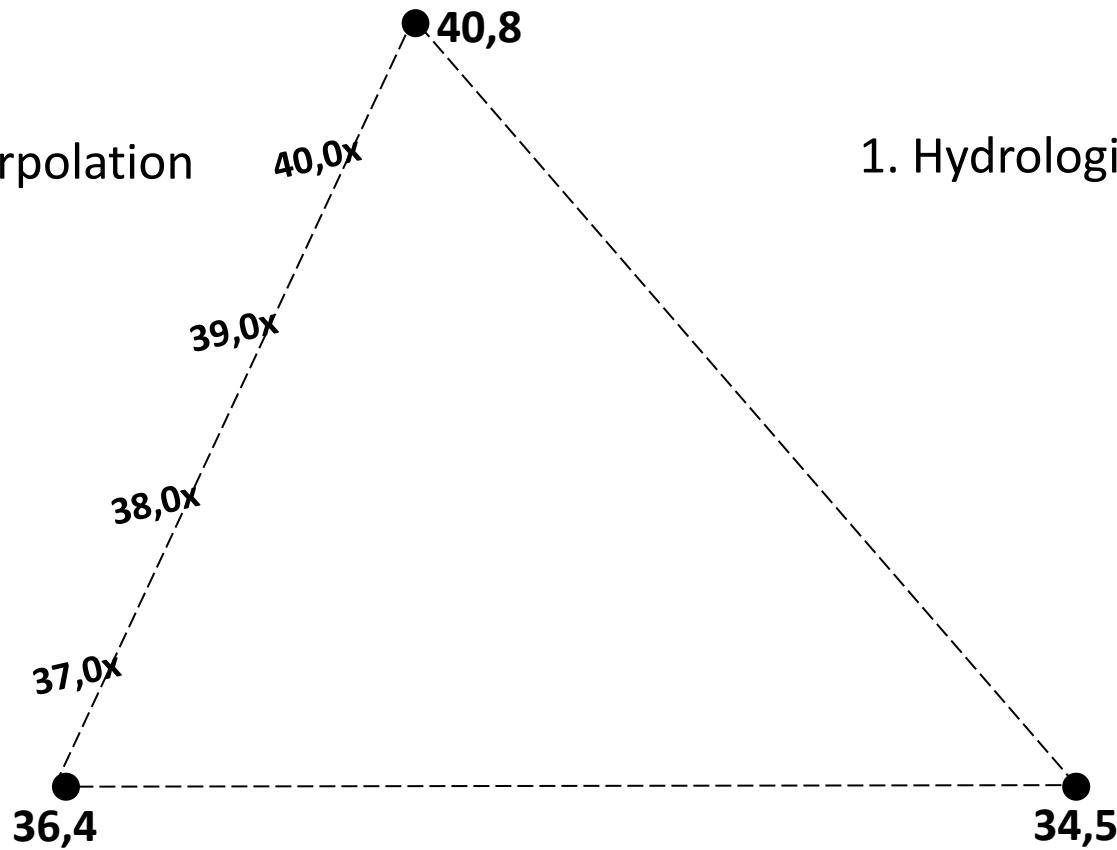
www.lfu.bayern.de

Grundwassergleichen an der Isar bei Freising, 23.05.1999

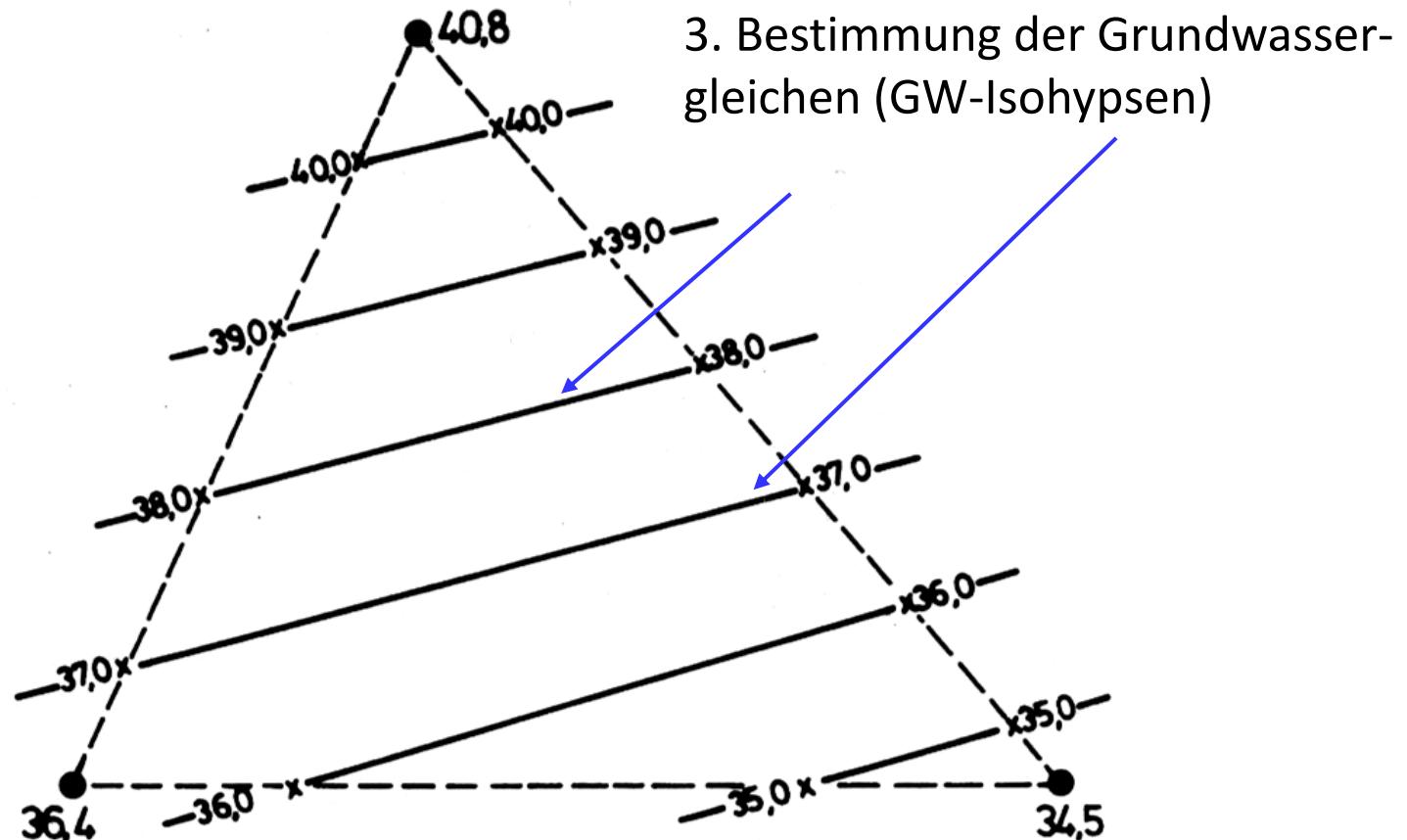
Konstruktion von GW-Gleichen & Fließrichtung

2. Lineare Interpolation

1. Hydrologisches Dreieck

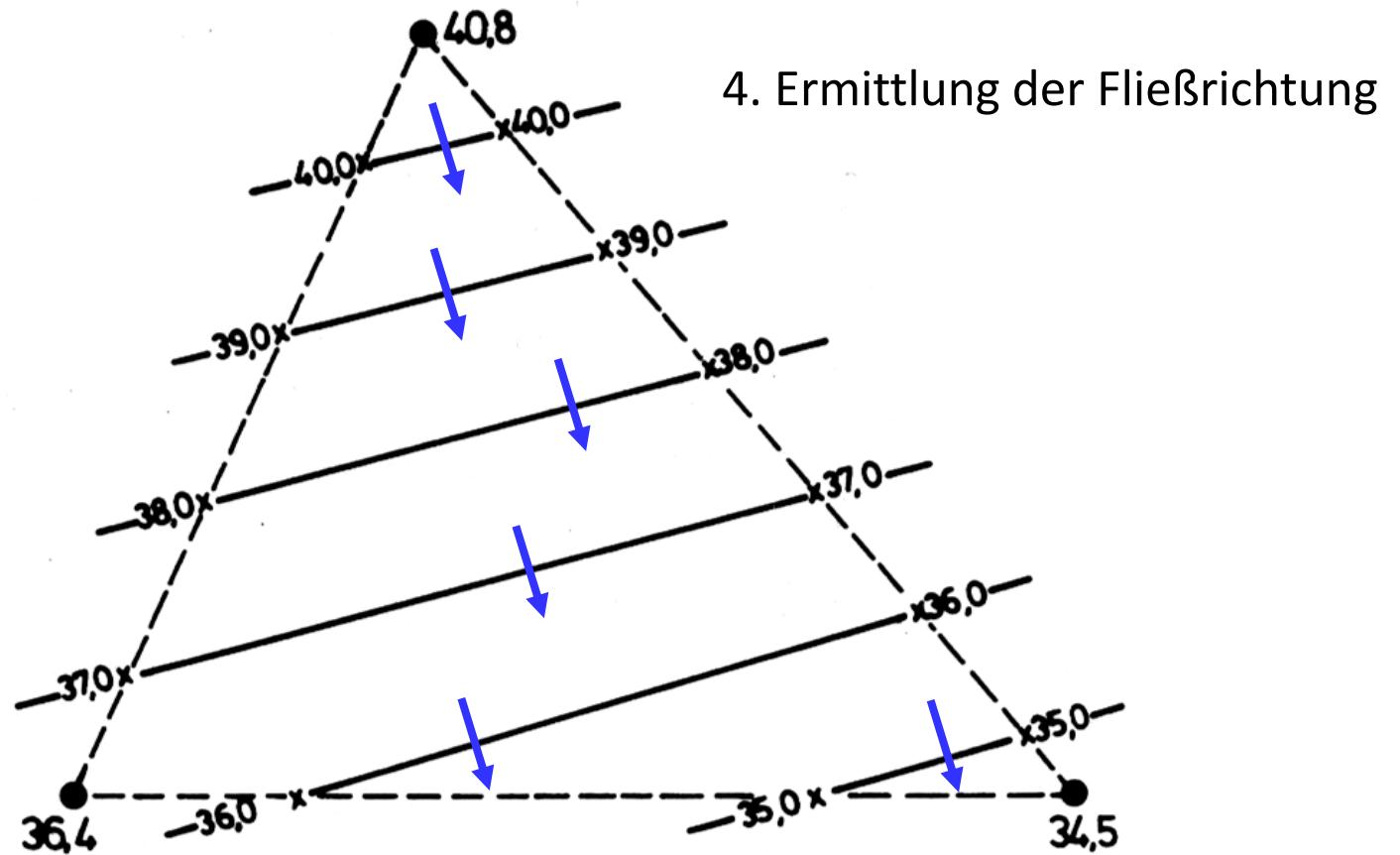


Konstruktion von GW-Gleichen & Fließrichtung



aus Matthess & Ubell (2003, S.210) nach Richter & Lillich (1975)

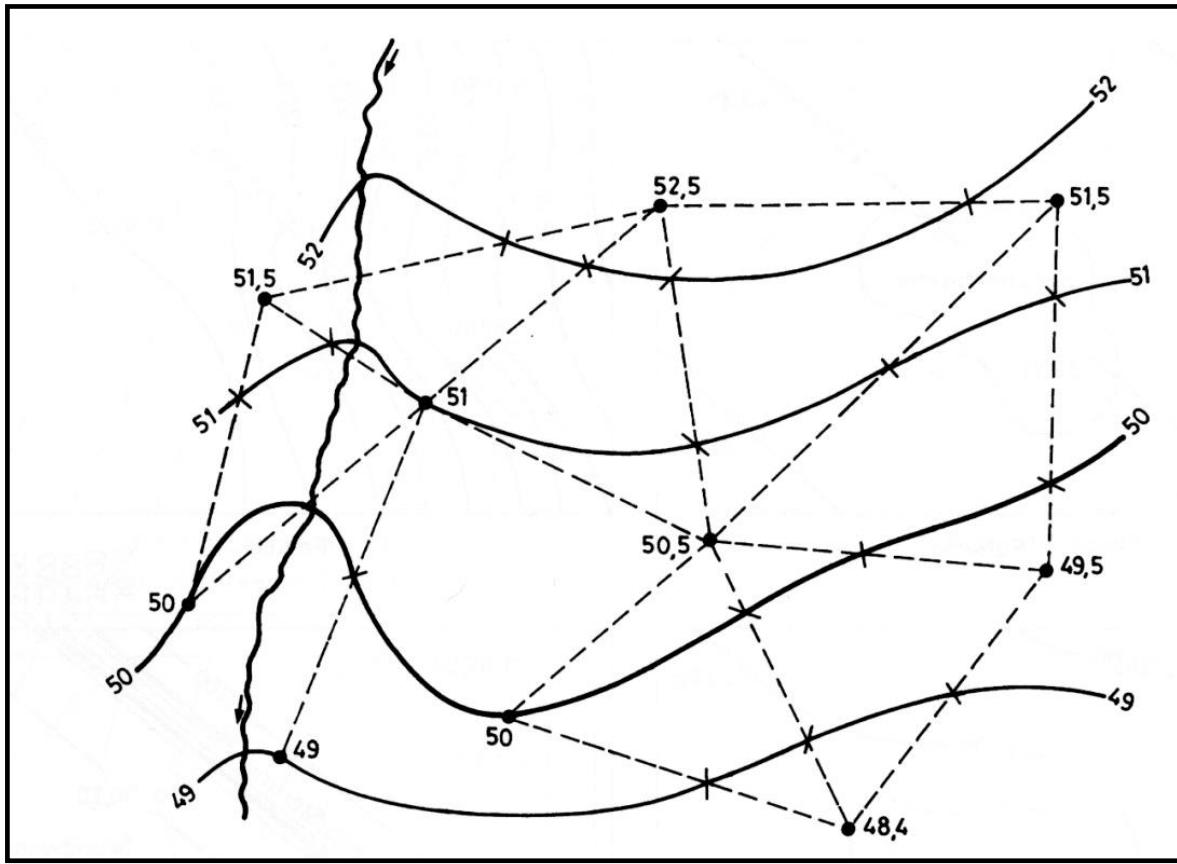
Konstruktion von GW-Gleichen & Fließrichtung



aus Matthess & Ubell (2003, S.210) nach Richter & Lillich (1975)

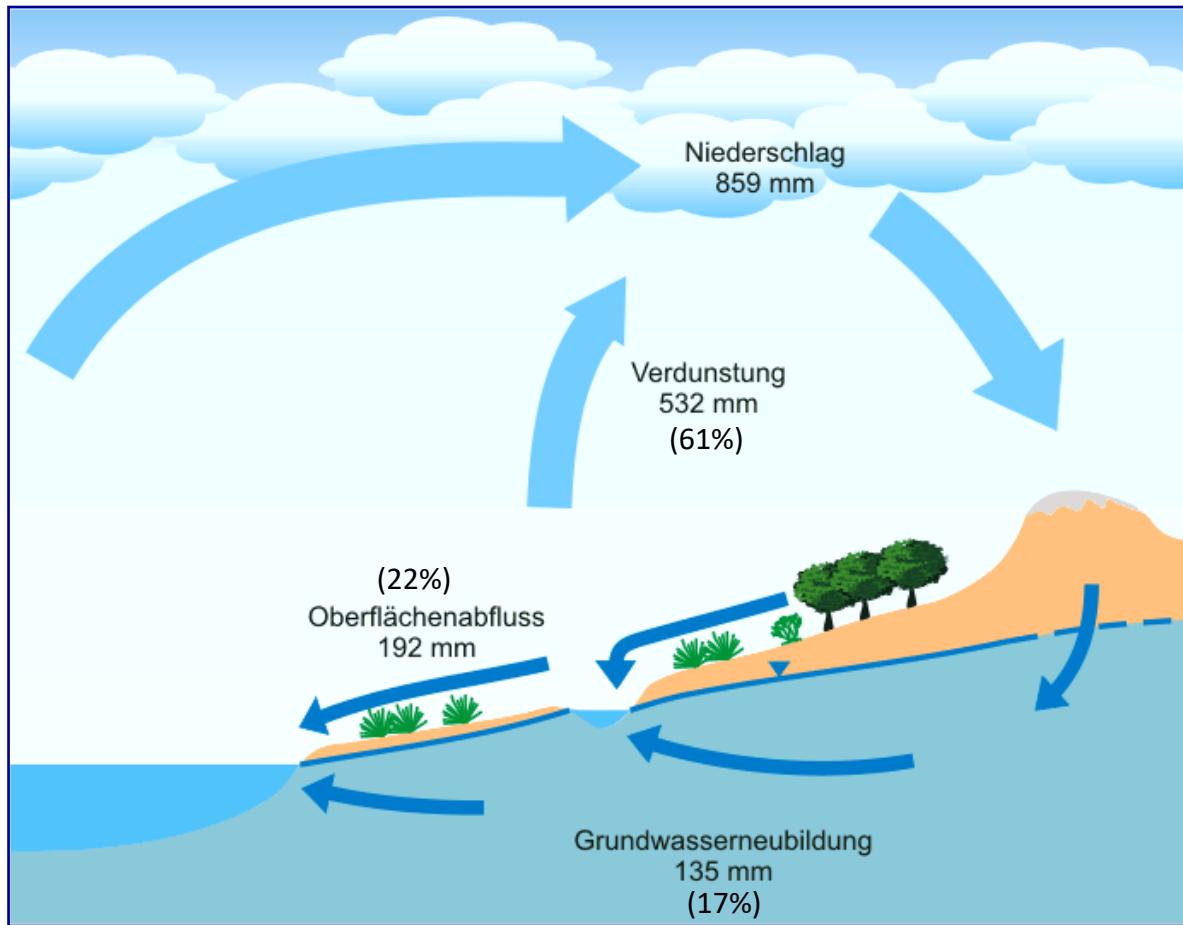
Hausaufgabe: GW-Gleichen und Fließrichtung

Vervollständigen Sie die hydrologischen Dreiecke und zeichnen Sie die Fließrichtung des Grundwassers ein.



5. Grundwasserneubildung & Messung des Grundwassers

Wasserhaushaltbilanz für Deutschland



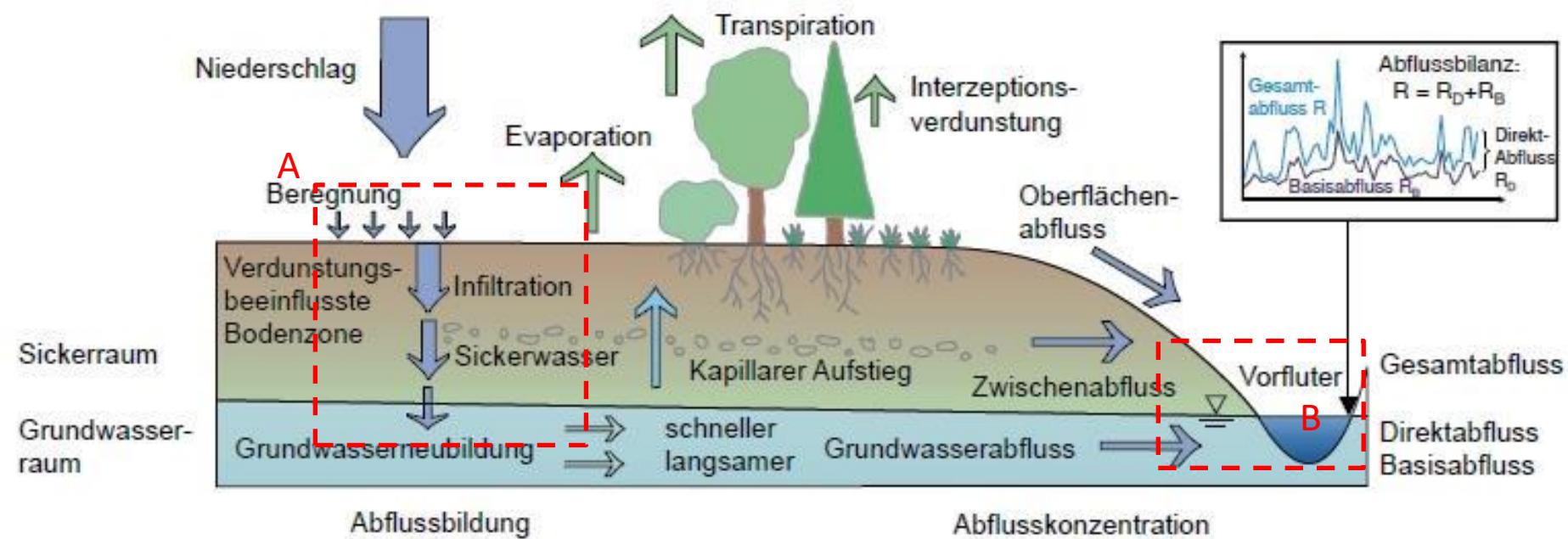
https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Wasser/Bilder/Was_wasser_startseite_wasserkreis_g.html

Schematische Darstellung des Wasserkreislaufs mit Zahlen der mittleren Wasserbilanz
für Deutschland 1961 - 1990

Arten der Grundwasserneubildung

A. Infiltration von Niederschlagswasser & Bildung von Sickerwasser

B. Infiltration aus Gewässern (Flüsse, Seen, Meeren) – lokale/regionale Bedeutung

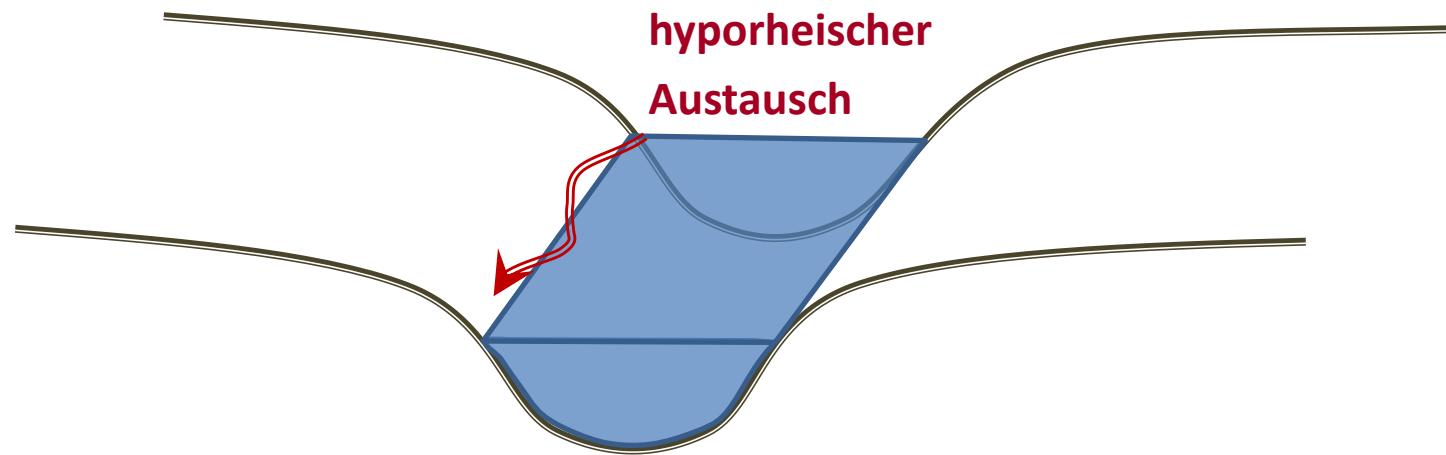


<https://www.lfu.bayern.de/wasser/grundwasserneubildung/index.htm>

Grundwasserneubildung: Infiltration von Gewässern

Austausch von Grundwasser und Fließgewässer:

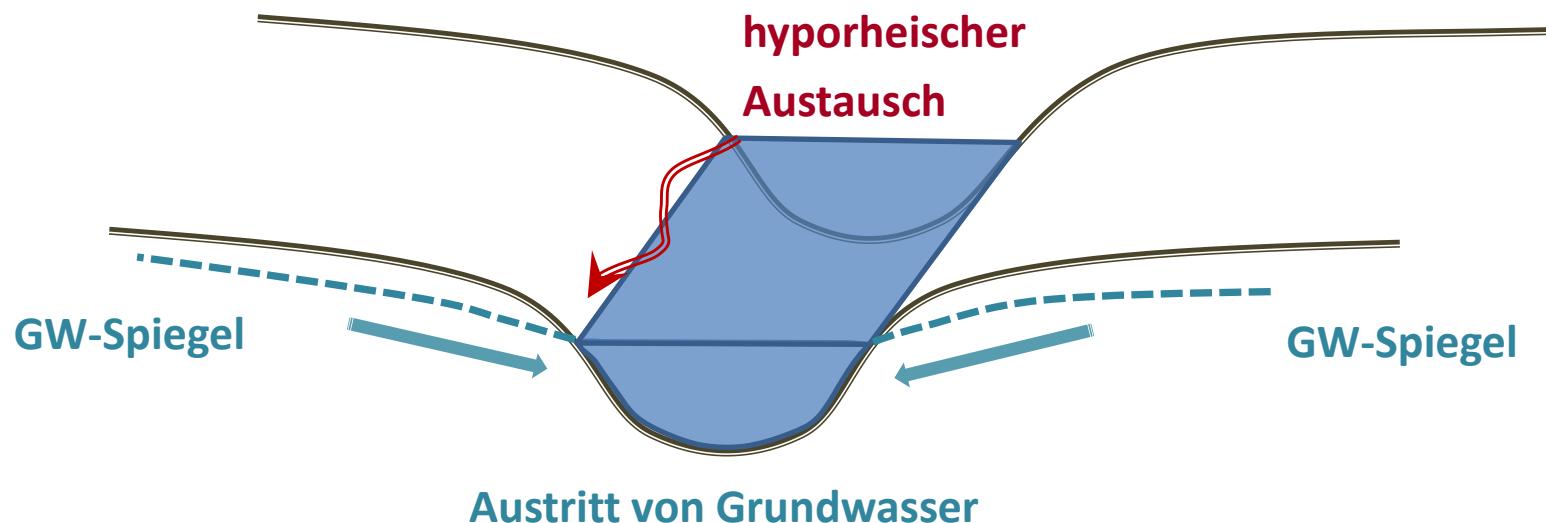
- Austausch von Wasser im Porenbereich des Ufers und der Sohle
→ **hyporheischer Austausch/Zone**



Grundwassererneubildung: Infiltration von Gewässern

Austausch von Grundwasser und Fließgewässer:

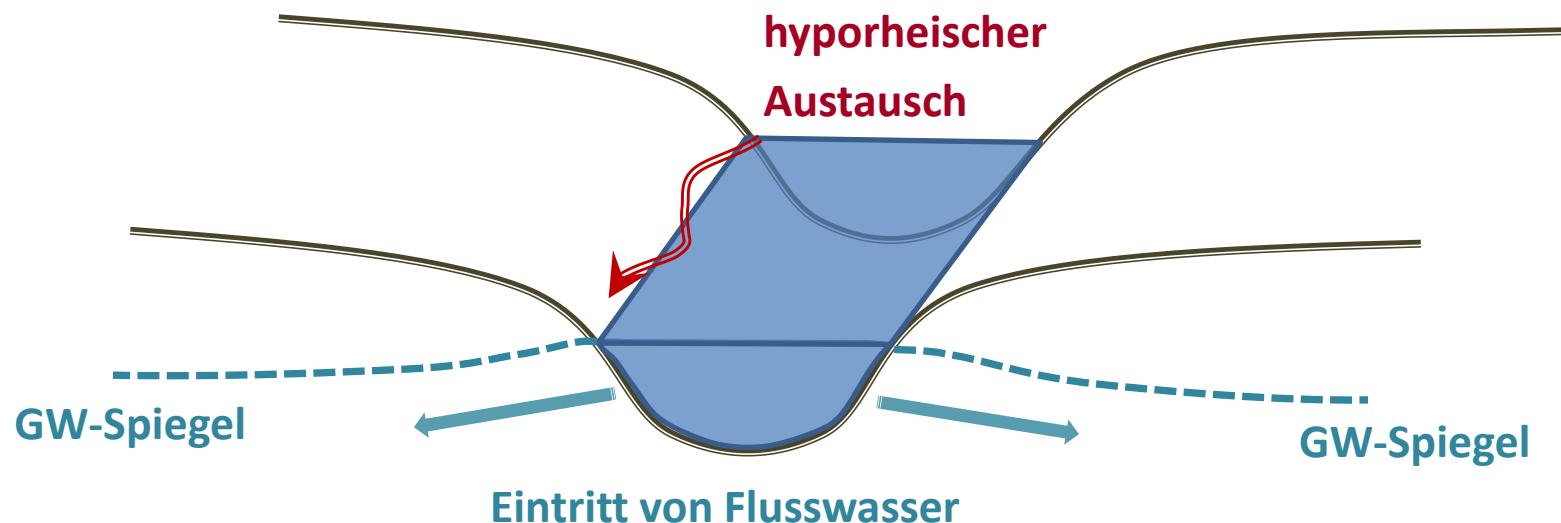
- Austausch von Wasser im Porenbereich des Ufers und der Sohle
→ **hyporheischer Austausch**
- bei GW > Flusspegel → **Exfiltration** → **GW fließt in das Gewässer**



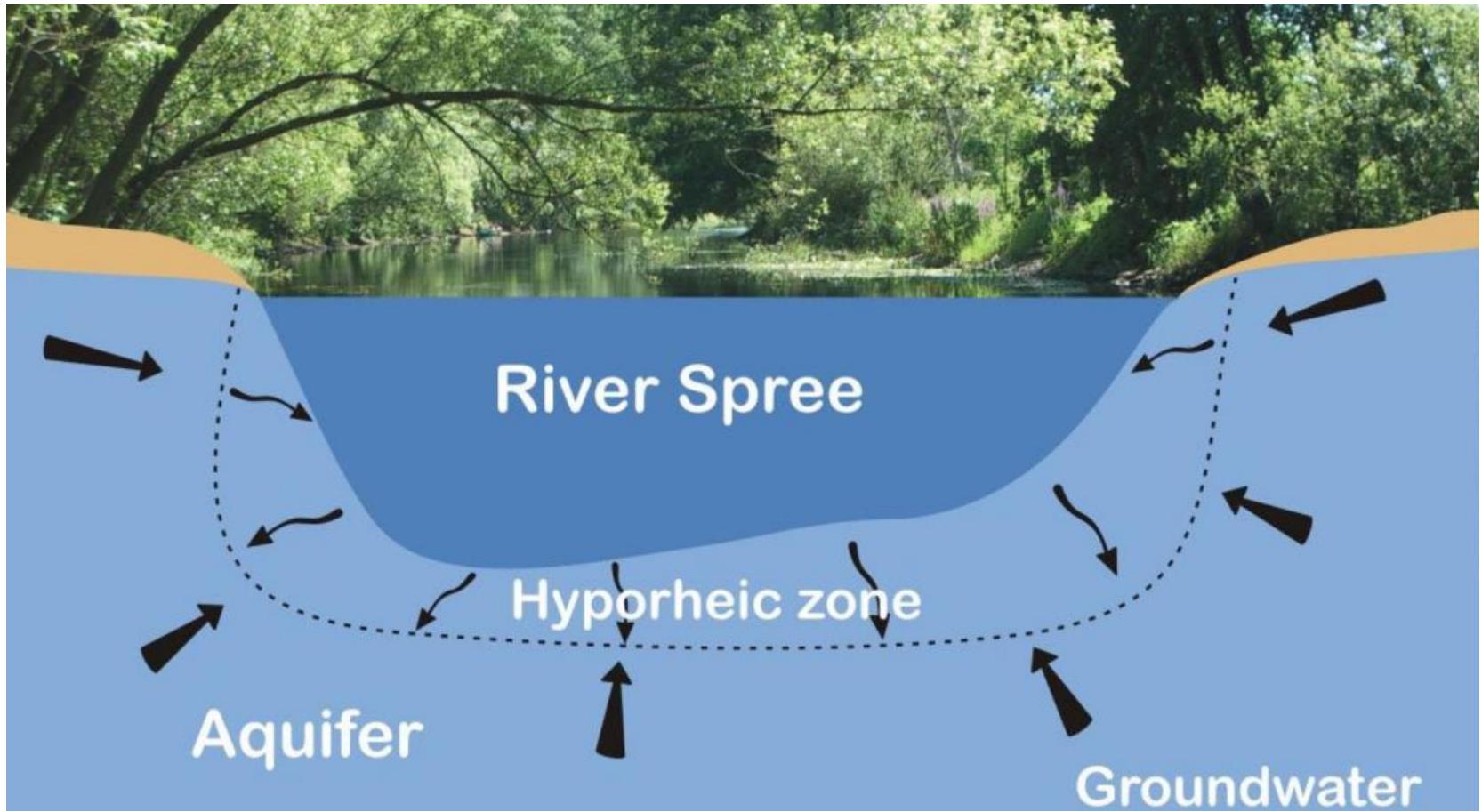
Grundwassererneubildung: Infiltration von Gewässern

Austausch von Grundwasser und Fließgewässer:

- Austausch von Wasser im Porenbereich des Ufers und der Sohle
→ **hyporheischer Austausch**
- bei $GW > \text{Flusspegel}$ → **Exfiltration** → **GW fließt in das Gewässer**
- bei $GW < \text{Flusspegel}$ → **Infiltration** → **GW wird angereichert**

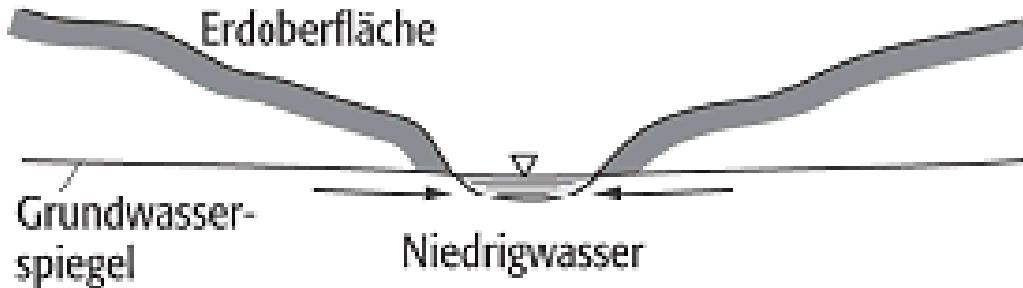


Grundwasserzufluss entlang eines Ufers

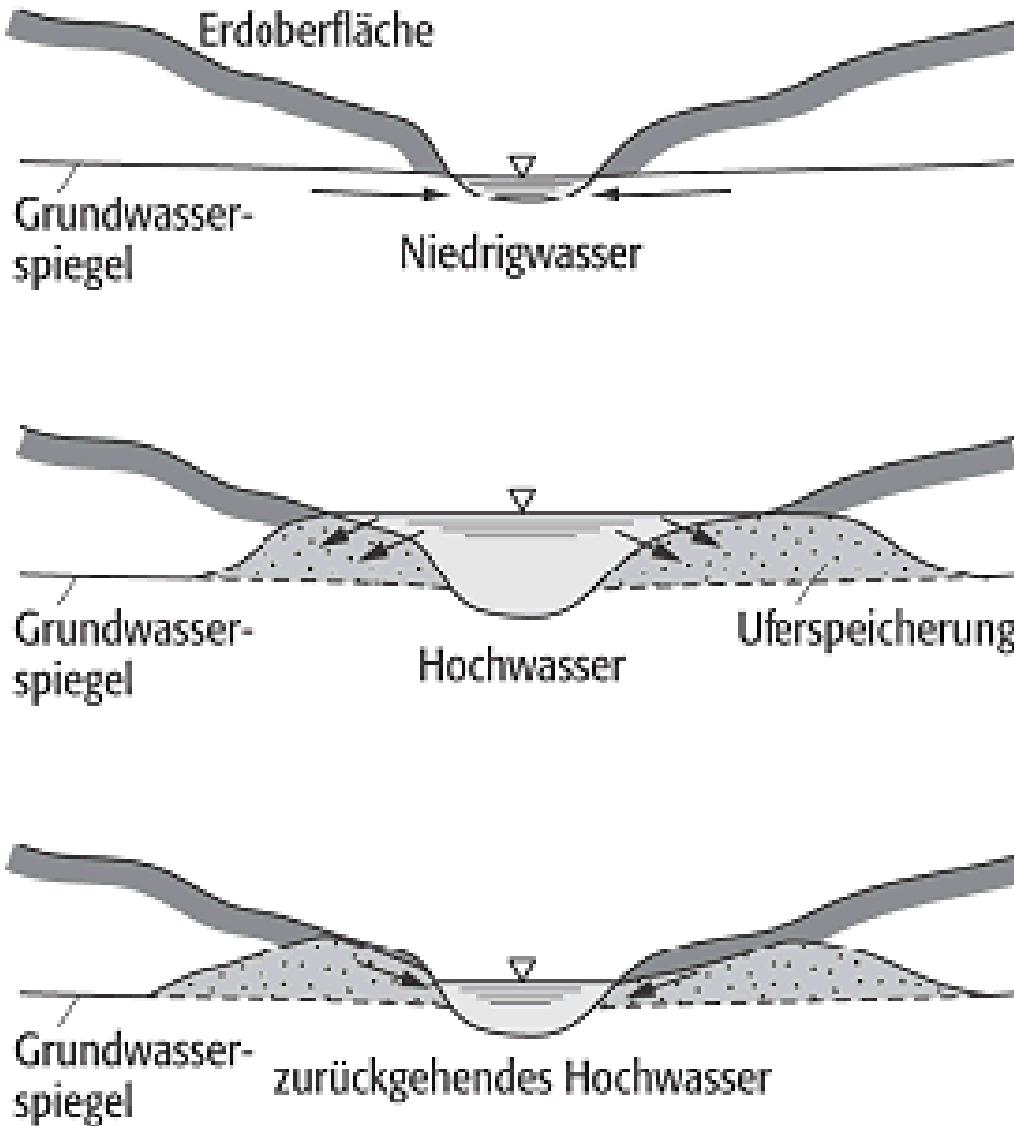


<https://www.igb-berlin.de/lewandowski>

Uferspeicherung während eines Hochwassers

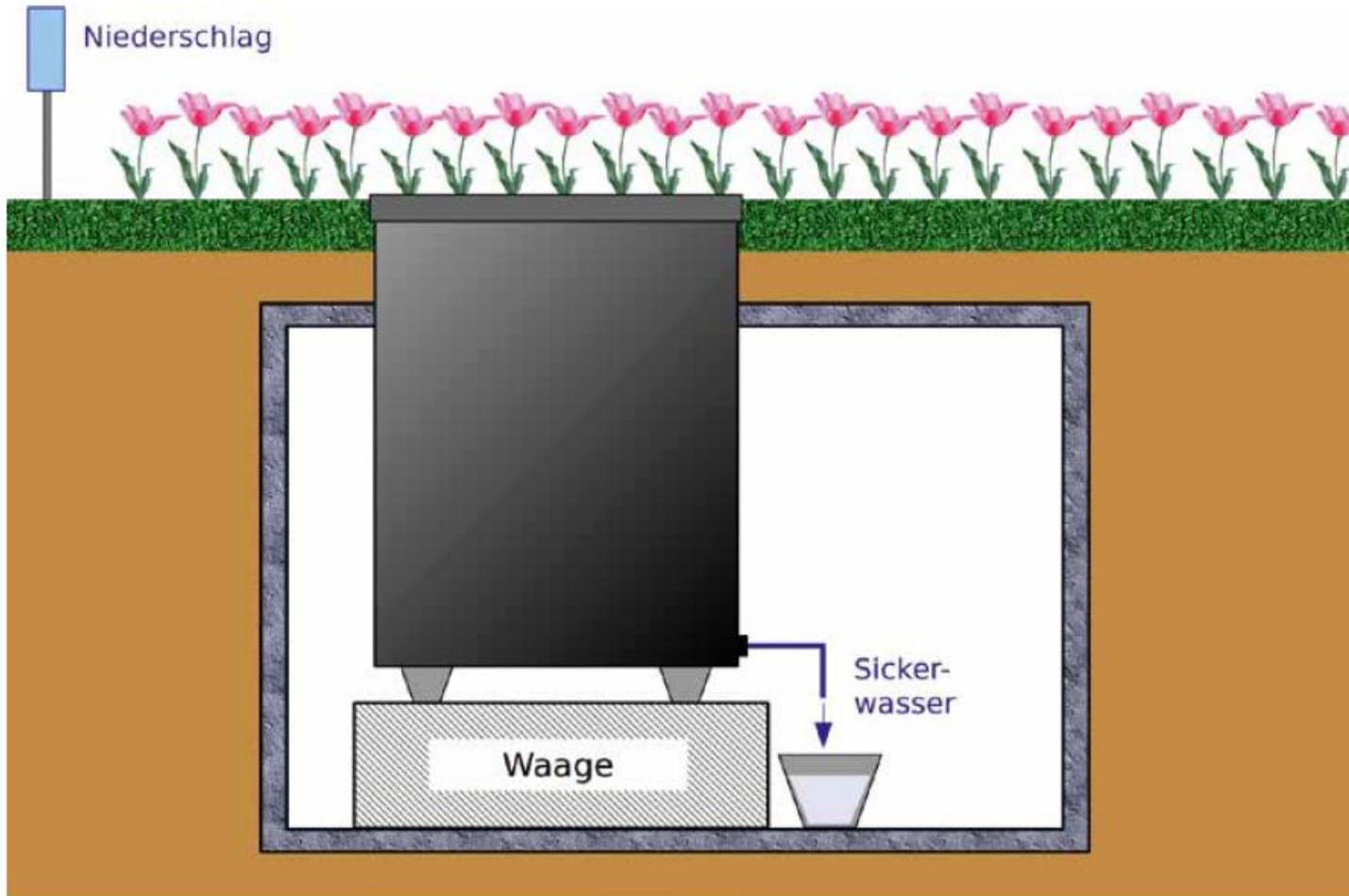


Uferspeicherung während eines Hochwassers



- Kurzfristige Speicherung von „**unechten**“ **Grundwasser** während eines Hochwassers in der Uferzone
- Speicherwirkung wird als **Retention** bezeichnet
- Beitrag **zur Minderung der Hochwasserwelle**

Ermittlung der Grundwassererneubildung

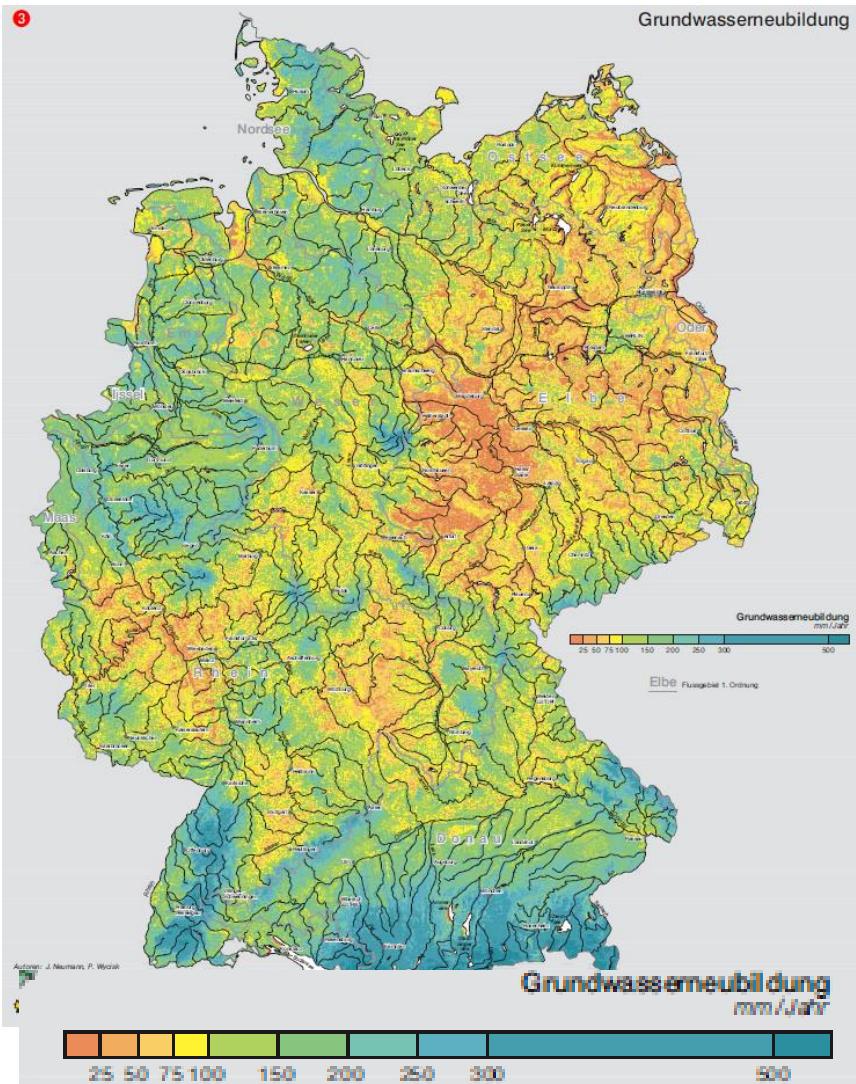


Fohrer et al. (2016)

- Sickerwassermenge eines Lysimeters wird als Abschätzung der Grundwassererneubildung verwendet

Ermittlung der Grundwasserneubildung

Grundwasserneubildung in Deutschland



- große **regionale Unterschiede** ($< 25 \text{ mm bis } > 500 \text{ mm}$)
- bayerisches Alpenvorland höchste Neubildung
- enger Zusammenhang mit **Niederschlag**
- **lokale Wasserhaushaltsbilanz** entscheidend ($N > V$)

Weitere Faktoren:

- **Durchlässigkeit des Bodens**
- **Relief**
- **Landnutzung / Landmanagement**

Messung des Grundwassers bei der LfU Bayern

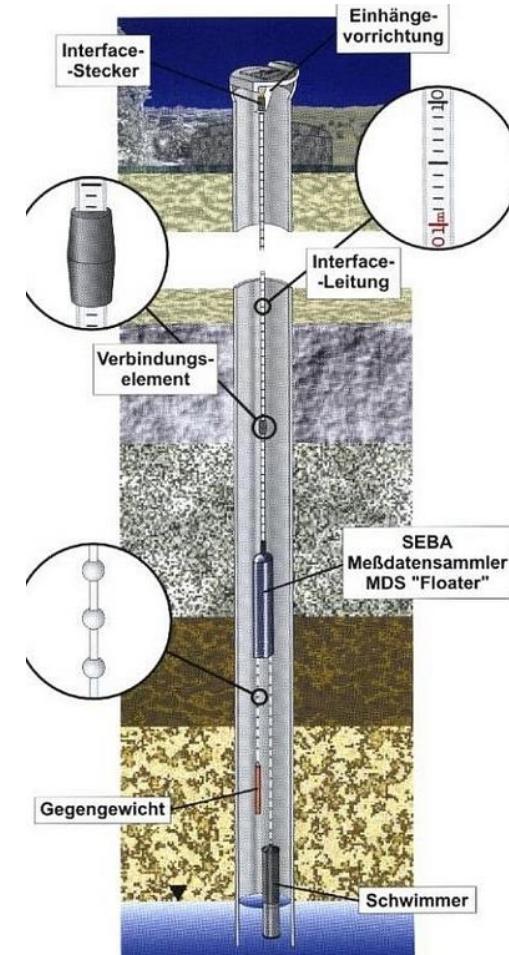
Kabellichtlot



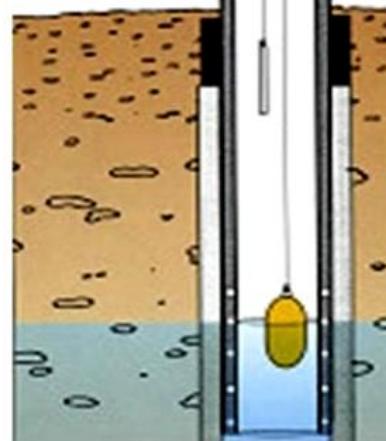
Schreibpegel



Pegel mit elektronischer Datenerfassung



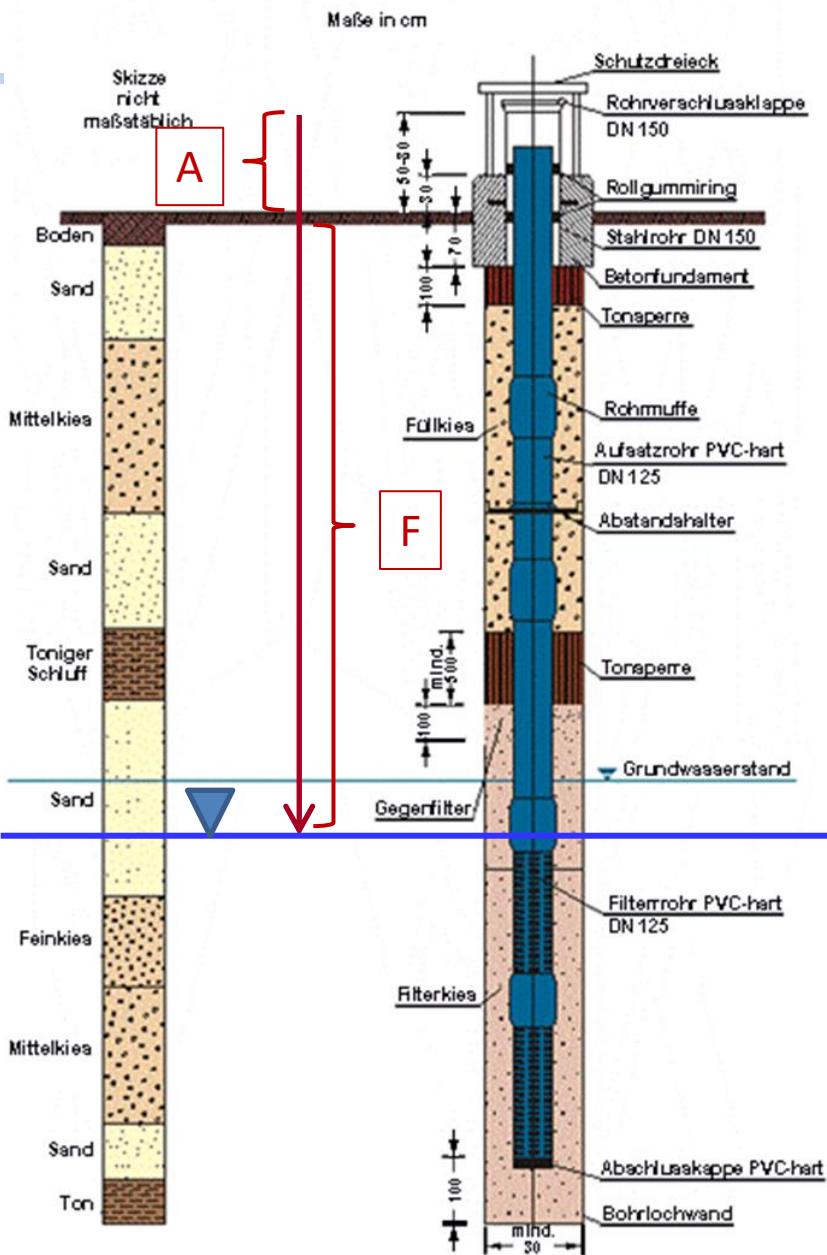
GW-Messstelle



→ Ermittlung des **Grundwasserflurabstandes [m]** und/oder **Grundwasserhöhe [m ü. NN]**

Messung des Grundwassers

BAUWEISE EINER GRUNDWASSERMESSTELLE



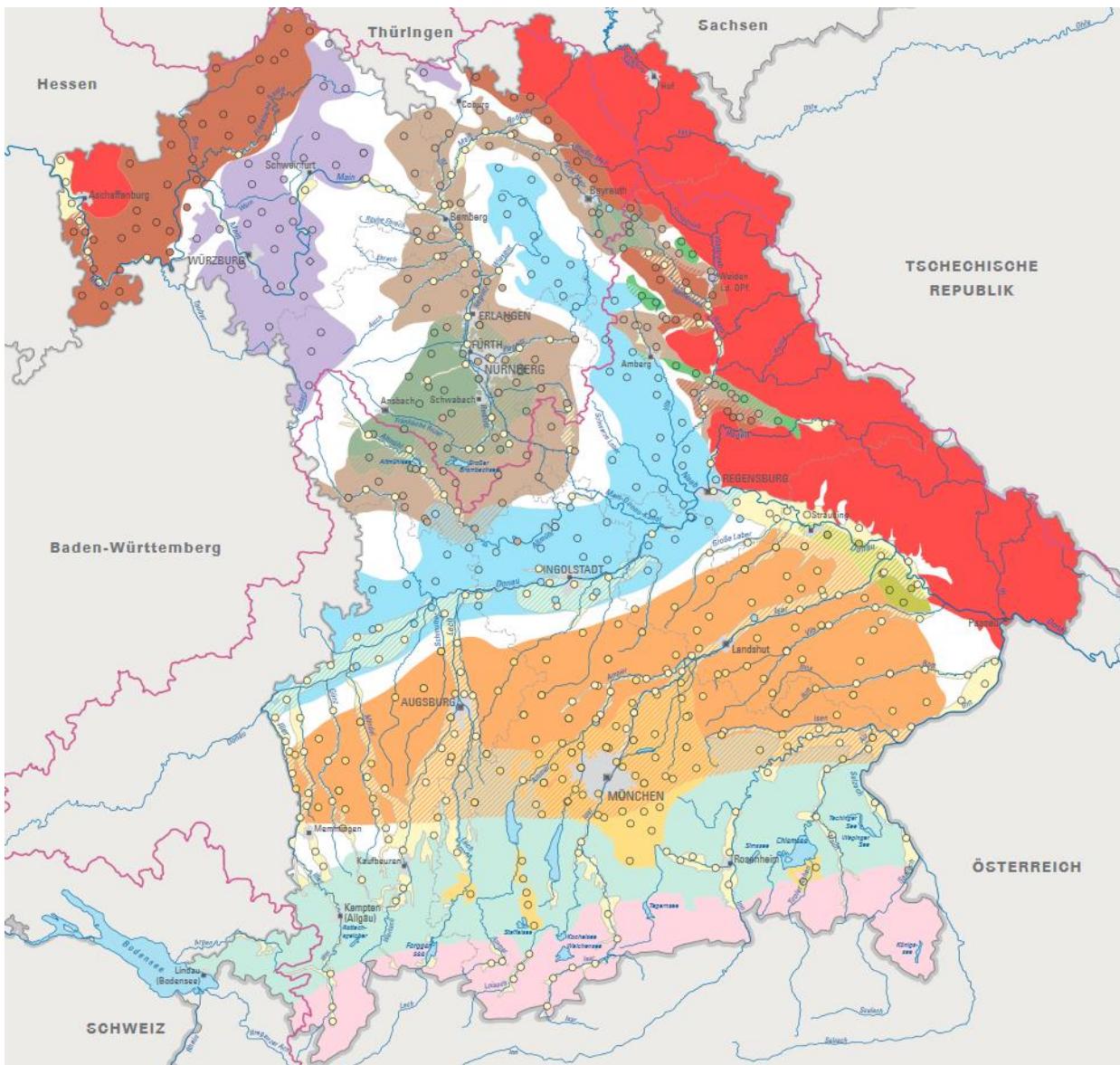
Grundwasserhöhe : Höhenlage der GW-Oberfläche über NN

GW-Flurabstand F: Abstand zwischen Geländeoberfläche und GW-Oberfläche

Abstich A: Abstand zwischen eingemessener Höhe der Rohroberkante und Geländeoberfläche

Aufbau einer GW-Messstelle mit geologischen Profil

Grundwassermessnetz in Bayern



Bayerisches Landesamt für Umwelt



Wasser

Messtellen Grundwasserstand in Bayern

Staatliches Grundnetz – Stand September 2019

Grundwassermessstellen (Anzahl)

- vorhanden (620)
- ◊ geplant (2)

Das Grundnetz ist ein weitmaschiges Netz anthropogen möglichst unbeeinflusster Messstellen zur langfristigen Beobachtung überörtlich bedeutsamer Grundwasserleiter.

Die Farbe im Symbol gibt den von der Messstelle erfassten Grundwasserleiter an.

Grundwasserleiter mit überörtlicher Bedeutung Beobachtung im Grundnetz

oberer unterer Grundwasserleiter
berührbarer unter schwerer
Überstand Gußstein

	Flusslauffüllungen	Quartär
	Schotterflächen	Tertiär
Obere Süßwassermolasse		
Ortenburger Schotter		
Kreide-Sandstein		
Weißer Jura (Malmkarst)		
Burg- und Blässsandstein (Sandsteinkuppen)		
Benker Sandstein (Glockenkuppen)		
Muschelkalk		
Buntsandstein		

Grundwasserleiter mit örtlicher Bedeutung keine Beobachtung im Grundnetz

Moränen
Alpine Gesteine (i. W. Tries bis Kreide)
Kristallines Grundgebirge
Sonstige Grundwasserleiter

Hauptwasserscheide

- Landeshauptstadt
- Sitz Bezirksregierung
- Stadt
- Siedlungsfläche

Staatsgrenze

Landesgrenze

Grenze Regierungsbezirk

0 50 km

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg,
Telefon: 0821 9071-0, Fax: 0821 9071-5566,
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de, Internet: www.lfu.bayern.de

Wasserwirtschaftliche Fachdaten; Informationssystem Wasserwirtschaft

Geobasisdaten: DLM 1000, © GeoBasis-DE / BKG 2013 (Daten verändert)

September 2019



6. Aspekte des Grundwasserschutzes

Grundwasser als wichtigste Trinkwasserressource



- nicht nur in ariden oder semi-ariden Gebieten, auch in den Mittelbreiten sehr relevant
- Süßwasser in flüssiger Form ist zu ca. 98% als Grundwasser gespeichert

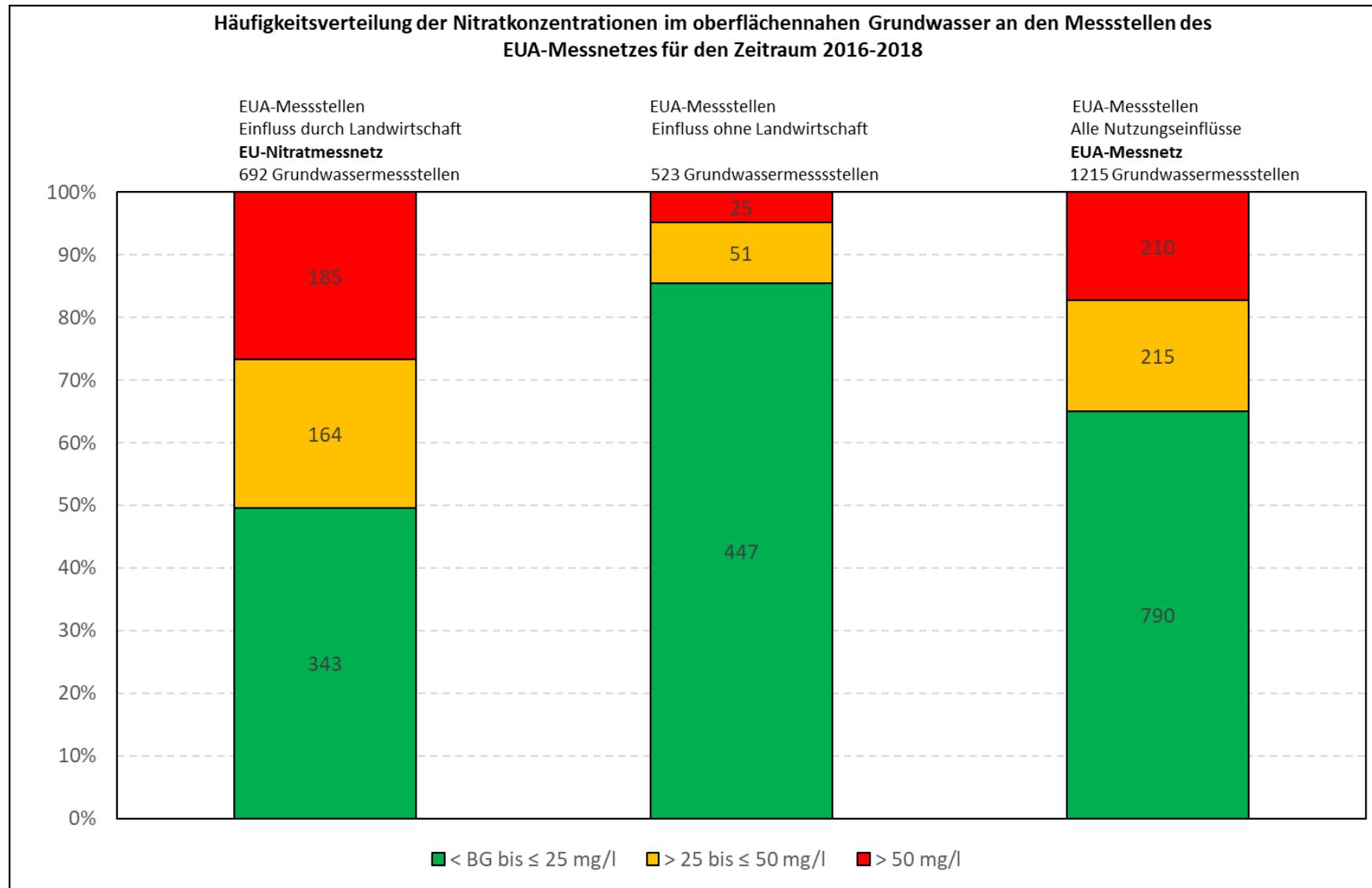
Grundwasserbelastung u.a. durch Landwirtschaft



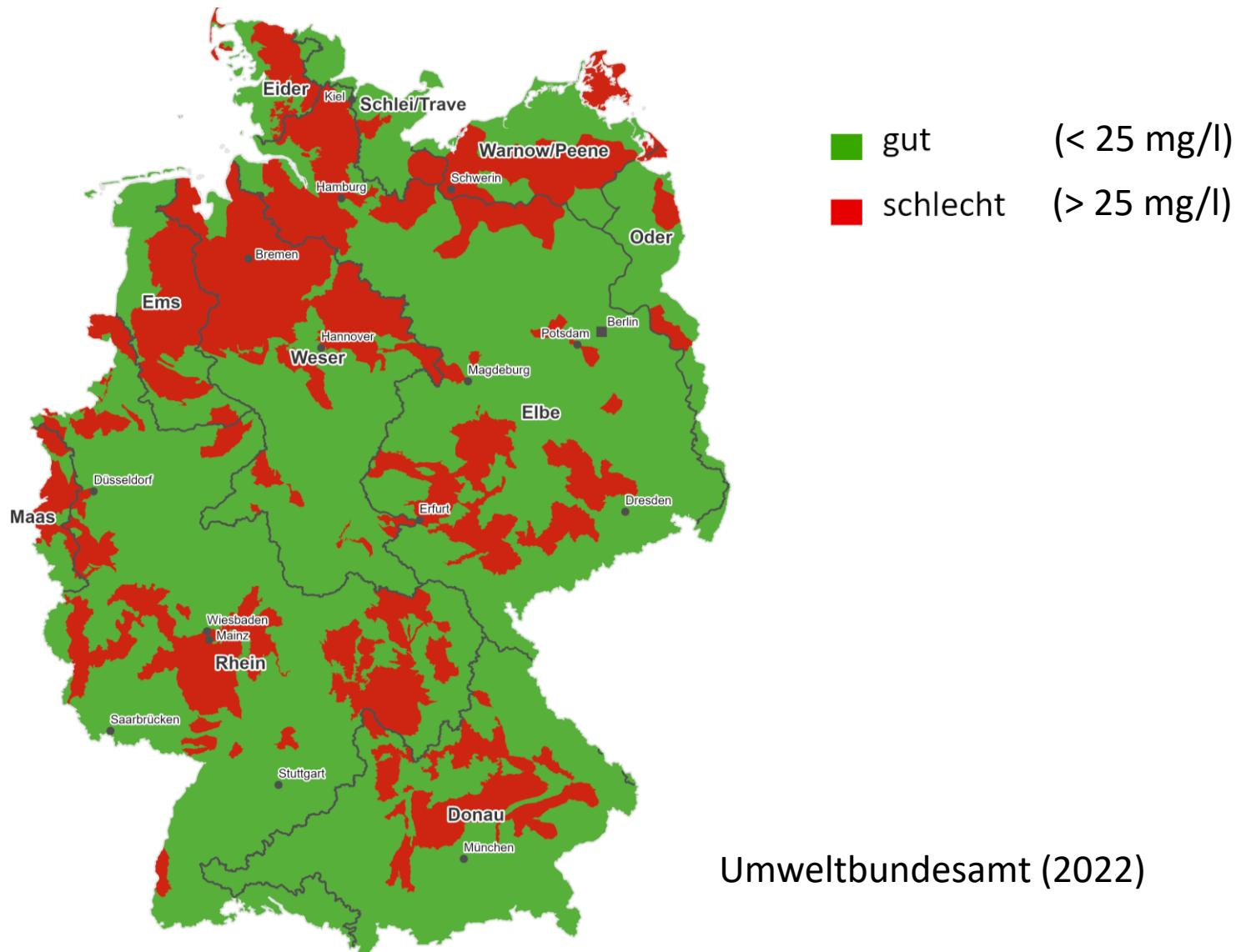
Quelle: countrypixel / Fotolia.com

Anreicherung des Bodens mit Nährstoffen (Nitraten) durch organische Zuführung
(Gülle)

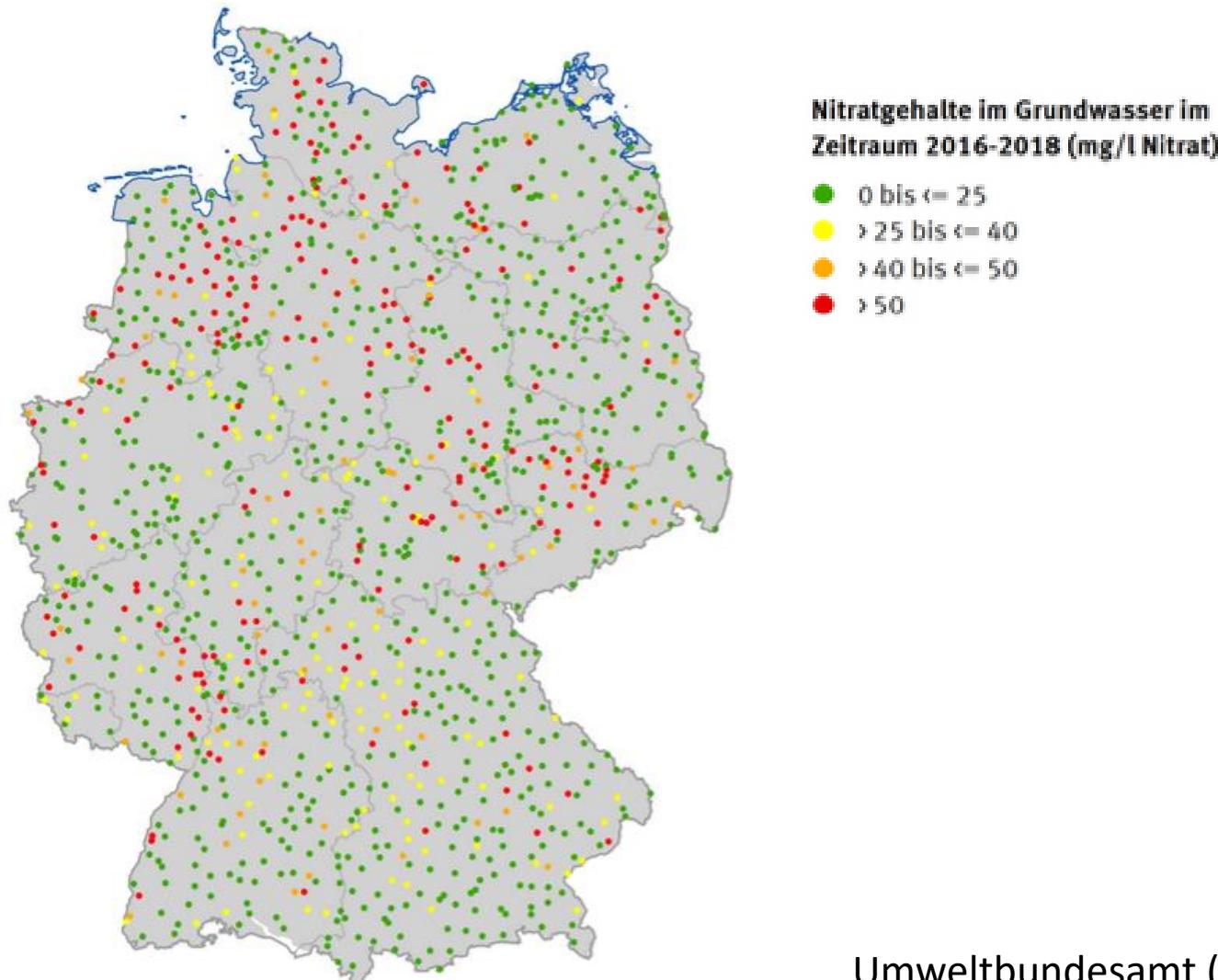
Grundwasserbelastung – Nitratgehalte



Überschreitung Nitratgrenzwerte im Grundwasser



Überschreitung Nitratgrenzwerte im Grundwasser



Umweltbundesamt (2022)

Grundwasserschutz - Schutzzonen

Schutzzonen Trinkwasser-brunnen:

Engere Schutzzzone:

50-Tages-Grenze

Keime sterben ab

$v = \text{ca. } 20 \text{ m/d}$

$$50 \text{ d} \cdot 20 \text{ m/d} = 1000\text{m}$$



Grundwasserschutz

Trinkwasserschutzgebiet

Haunstetter Wald der
Stadtwerke Augsburg

<https://www.sw-augsburg.de/wasser/swa-trinkwasser/>

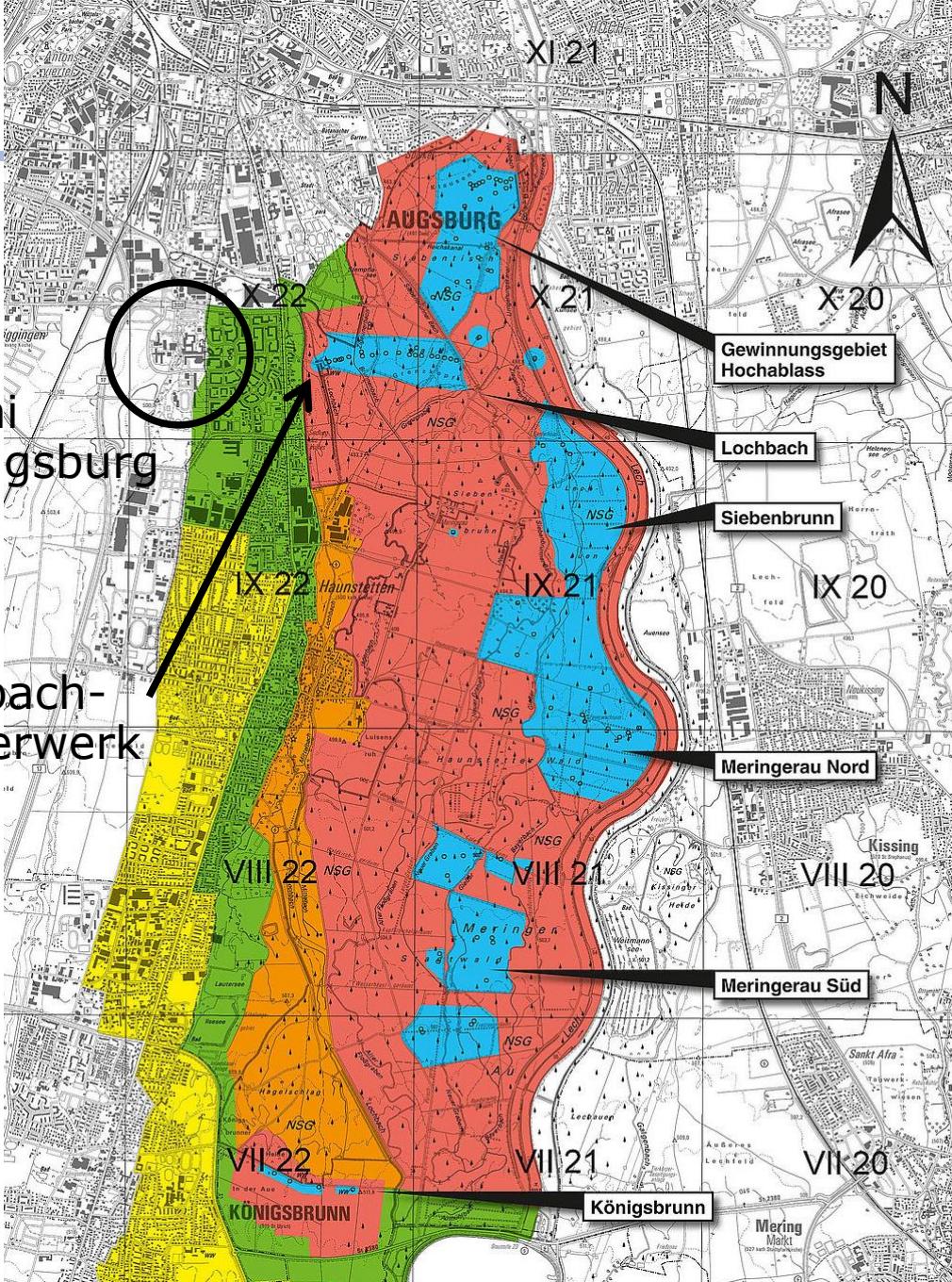
Verordnung der Regierung von Schwaben über das Trinkwasserschutzgebiet für die öffentliche Wasserversorgung der Städte Augsburg und Königsbrunn vom 24. Oktober 1991 in der Fassung der Änderungsverordnung vom 11.04.2008.

- Fassungsbereich »W I«
- Engere Schutzone »W II«
- Weitere Schutzone »W III a1« früher »A1«
- Weitere Schutzone »W III a2« früher »A2«
- Weitere Schutzone »W III b« früher »b«

Verordnung des Landratsamtes Augsburg über das Trinkwasserschutzgebiet für die öffentliche Wasserversorgung der Städte Augsburg und Königsbrunn aus der Fohlenau I und II vom 10.04.2008.

- Fassungsbereich (Schutzone I)
- Engere Schutzone II
- Weitere Schutzone III A
- Weitere Schutzone III B

Kartengrundlage: Topographische Karte 1:25.000;
Landesamt für Vermessung und Geoinformation Bayern, Nr. 6502/07.



Literaturverzeichnis

- **Baumgartner & Liebscher, 1996, Lehrbuch der Hydrologie, Allgemeine Hydrologie, Quantitative Hydrologie, 2. Auflage, Gebrüder Borntraeger, Berlin**
- **Matthess & Ubell, 2003, Allgemeine Hydrologie, Grundwasserhaushalt, 2. Auflage, Borntraeger, Berlin**
- Marcinek & Rosenkranz, 1996, Das Wasser der Erde, 2. Auflage, Justus Perthes Verlag Gotha
- **Hölting & Coldwey, 2009, Hydrogeologie, 7. Auflage, Spektrum Akad. Verl., Heidelberg**
- Kuntze et al., 1994, Bodenkunde, 5. Auflage, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- Scheffer & Schachtschabel, 2018, Lehrbuch der Bodenkunde, 17. Auflage, Springer Spektrum, Berlin
- Meyer et al., 1991, Wanderung in die Erdgeschichte, 2. Auflage, Pfeil, München

Literaturverzeichnis

- Dyck & Peschke, 1995, Grundlagen der Hydrologie, 3. Auflage, Verl. für Bauwesen, Berlin
- Scheffer & Schachtschabel, 2018, Lehrbuch der Bodenkunde, 17. Auflage, Springer Spektrum, Berlin
- Höltig, 1996, Hydrogeologie, 5. Auflage, Enke, Stuttgart
- Schwille, 1966, Die Kontamination des Untergrundes durch Mineralöl – ein hydrologisches Problem – Dtsch. Gewässerkdl. Mitt., Koblenz/Rhein
- Zunker, 1930, das Verhalten des Bodens zum Wasser, in Blank, Handbuch der Bodenlehre, Springer, Berlin
- Meinzer & Baver, 1942, Hydrology – Physics of the Earth, Dover Publications, New York
- Castany, 1968, Prospection et Exploitation des Eaux Souterraines, Paris
- Richter & Lillich, 1975, Abriß der Hydrogeologie, Schweizerbart, Stuttgart
- Korzun et al., 1974, Atlas mirovogo vodnogo balansa, SSSR/
Gidrometeorologiceskoe izdatel stvo, Moskau/Leningrad