
Hydrologie und Flussgebietsmanagement

o.Univ.Prof. DI Dr. H.P. Nachtnebel

Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiver Wasserbau

The bottom of the slide features several concentric white circles of varying sizes, resembling ripples on water, set against the blue background. These ripples are positioned below the text and above the bottom horizontal line.

Gliederung der Vorlesung

- Statistische Grundlagen
- Extremwertstatistik
- Korrelation und Regression
- Zeitreihenanalyse und Anwendung
- Regionalisierung & räumliche Interpolation
- Bodenwasserhaushalt
- **Grundwasserhaushalt**
- N-A Modelle – Einheitsganglinie
- N-A Modelle – kombinierte Translations- und Speichermodelle
- Kontinuierliche N-A Modelle
- Retention und Flood Routing
- Hydrologische Vorhersagen
- Flussgebietsmodelle
- Stofftransport
- Sedimenttransport – Modellierung
- Flussgebietsmodelle

Gliederung

- Typisierung der Grundwasservorkommen
- Parameter und Grundgleichungen
- Pumpversuche (analytische Lösungen)
- Regionale Modelle (numerische Lösungen)
- Zusammenfassung

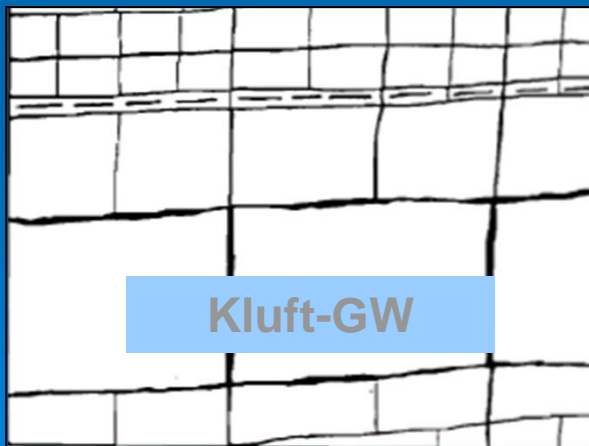
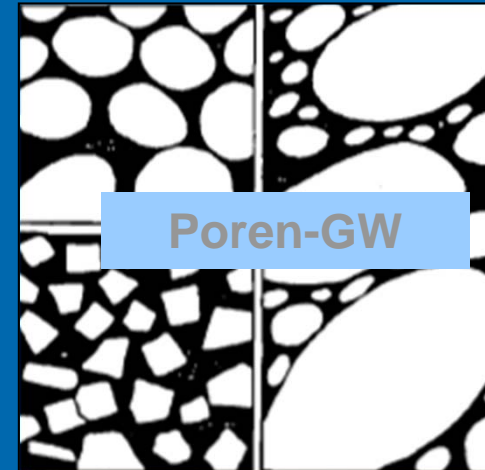
Grundwasser

- Grundwasser/Quellwasser deckt zu 99 % den Trinkwasserbedarf in Österreich
- Grundwasser steht in den großen Tallagen in Wechselwirkung mit den Oberflächengewässern
- Grundwasser wird in vielen Ländern zur Bewässerung herangezogen
- Grundwasser wird vielfältig verschmutzt
 - Punkteinträge (Industrie, Altlasten, Unfälle,..)
 - Linieneintrag über Oberflächengewässer, Abwasserkanäle
 - Flächenbelastung durch Landwirtschaft, Luft, Siedlungen

Kräfte / Unterteilung des Grundwassers 1

➤ Unterteilung nach der Geologie

- Porengrundwasser
- Kluftgrundwasser
- Karstgrundwasser

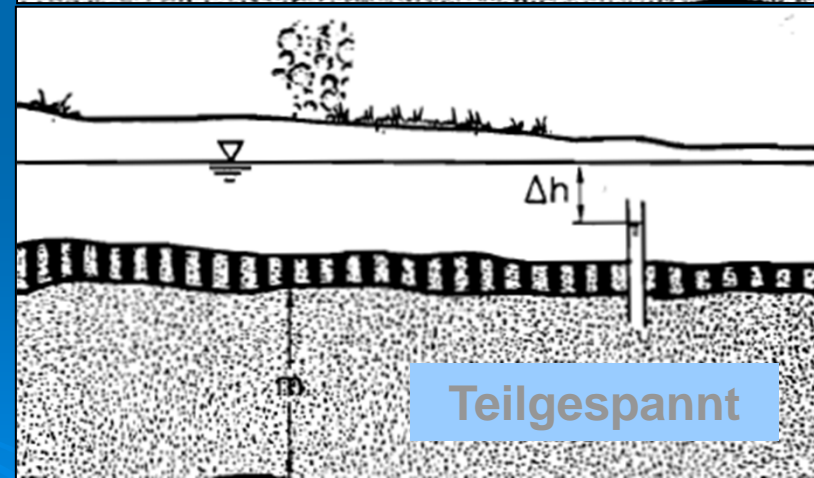
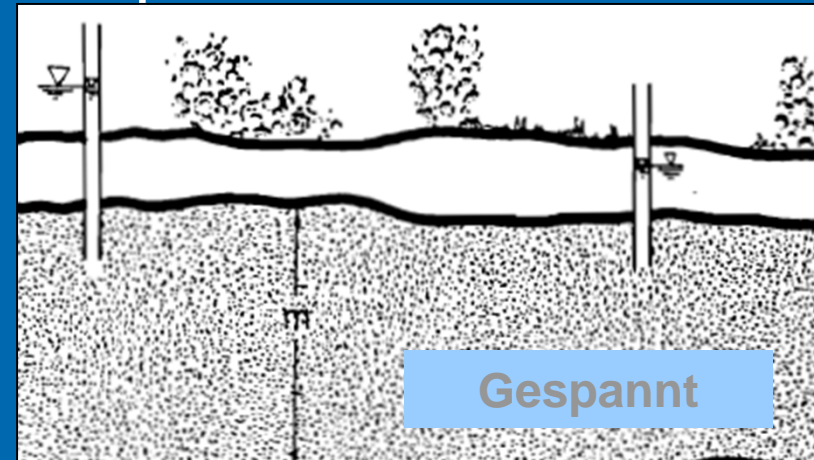
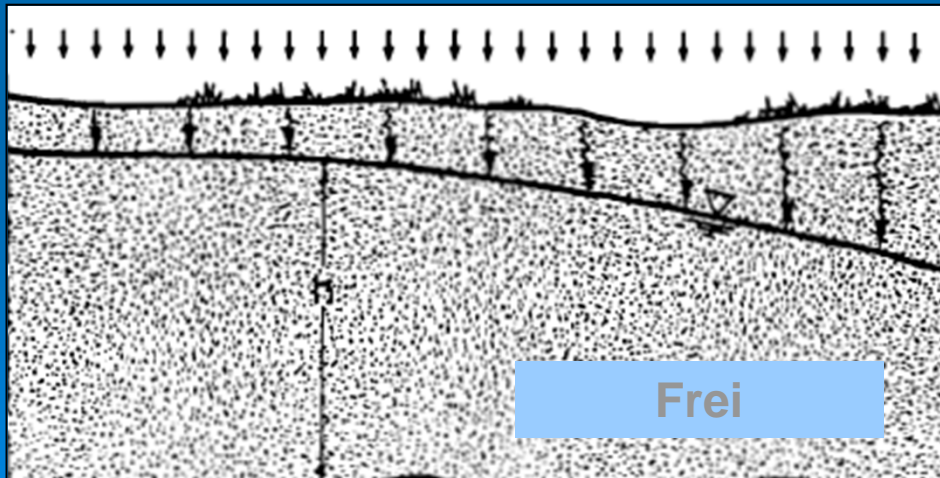


Unterteilung des Grundwassers 2

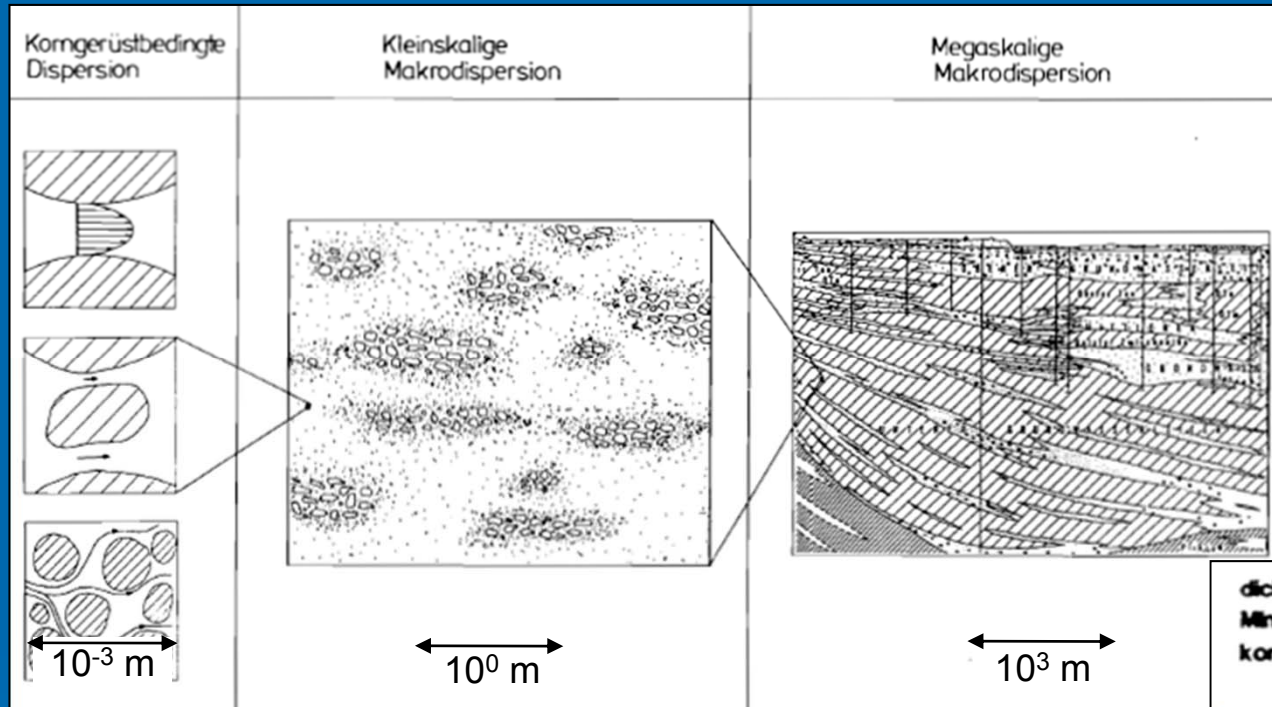
➤ Nach hydraulischen Gesichtspunkten

Lage der Wasserspiegel-
zur Druckoberfläche

- Frei
- Gespannt
- Teilweise gespannt

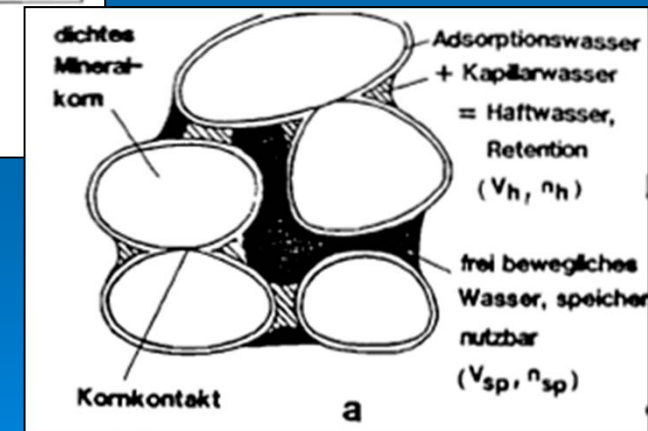


Begriffe 1: Homogenität-Heterogenität

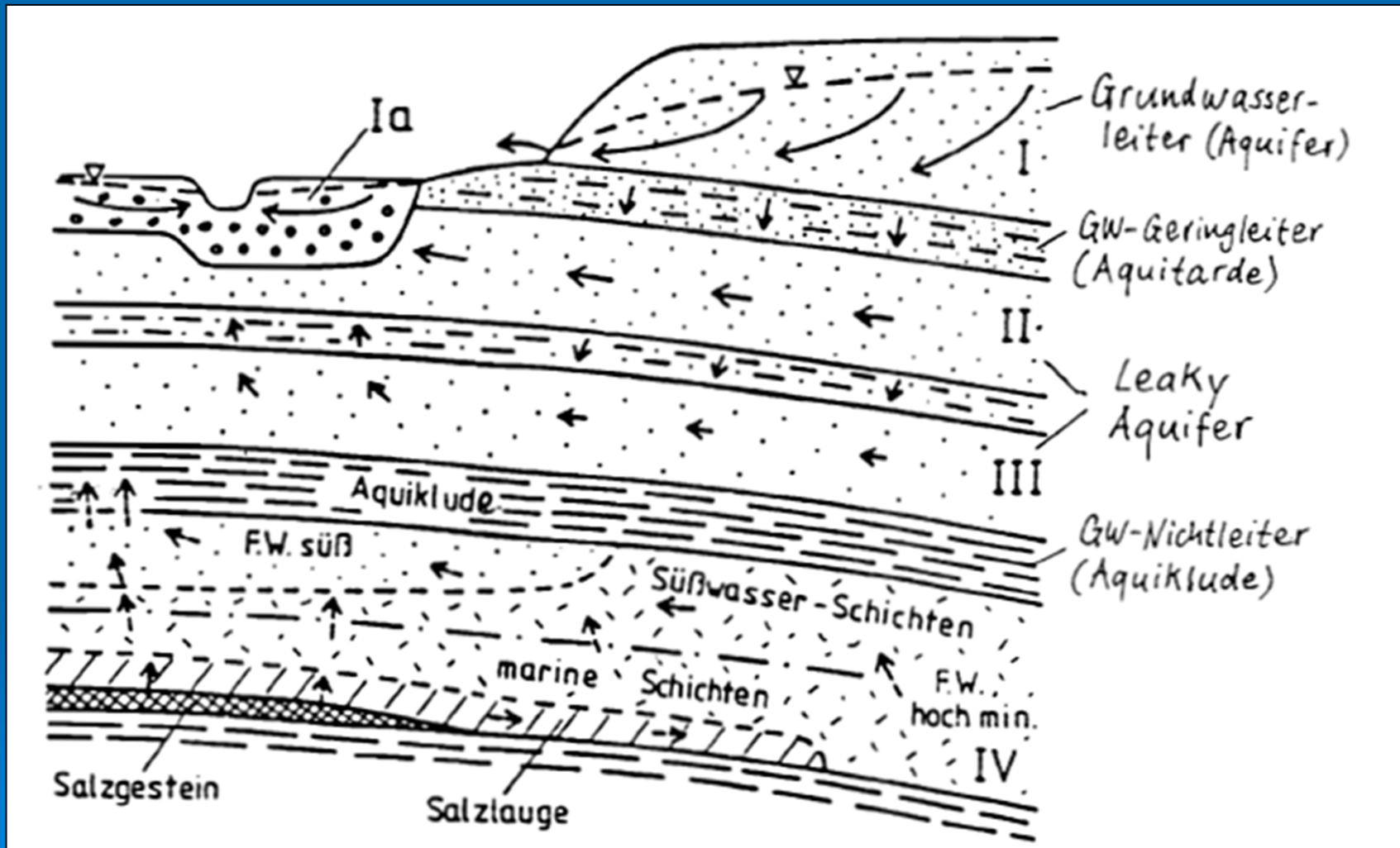


Haftwasser und frei bewegliches Wasser in einem unverfestigten Porengrundwasserleiter

Ursachen der Variabilität der Transportgeschwindigkeit auf unterschiedlichen räumlichen Skalenebenen



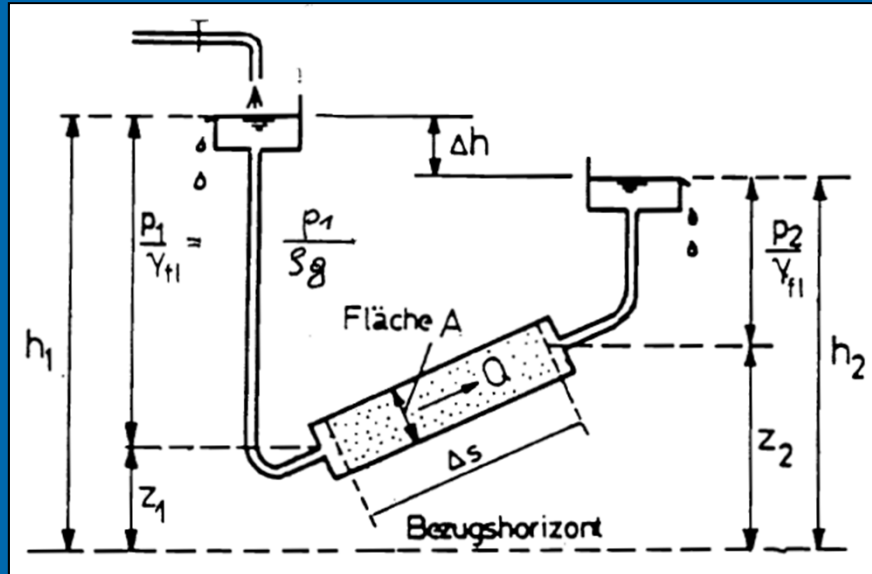
Begriffe 2: Grundwasserstockwerke



Parameter und Gesetze

- Strömung erfolgt in Porenstruktur
- Strömung wird durch Gravitation und Reibung bestimmt
- Die Porengröße und die Vernetzung der Poren bestimmt die **Durchlässigkeit** des Boden (k_f -Wert in m/s)
- Der Durchsatz im Boden wird durch die **Transmissivität** $k_f \cdot M$ in m^2/s beschrieben
- Weiters ist das **Speichervermögen** des Bodens wichtig S_0 (m^3/m^3)

Grundgleichungen: Darcy'sches Gesetz



$$k_f = \frac{\gamma_{fl}}{\eta_{fl}} \cdot k_0 = \frac{\rho_{fl}}{\nu_{fl}} \cdot k_0$$

ρ_{fl}	Dichte der Flüssigkeit
k_f	hydraulische Leitfähigkeit
η_{fl}	Zähigkeit
ν_{fl}	Viskosität
k_0	Permeabilität (unabhängig vom flüssigen Medium)

$$Q = v * A = k_f * \frac{\Delta h}{\Delta s} * A$$

Im k_f -Wert werden sowohl Eigenschaften des Fluids und des durchströmten Mediums berücksichtigt

Durchlässigkeit

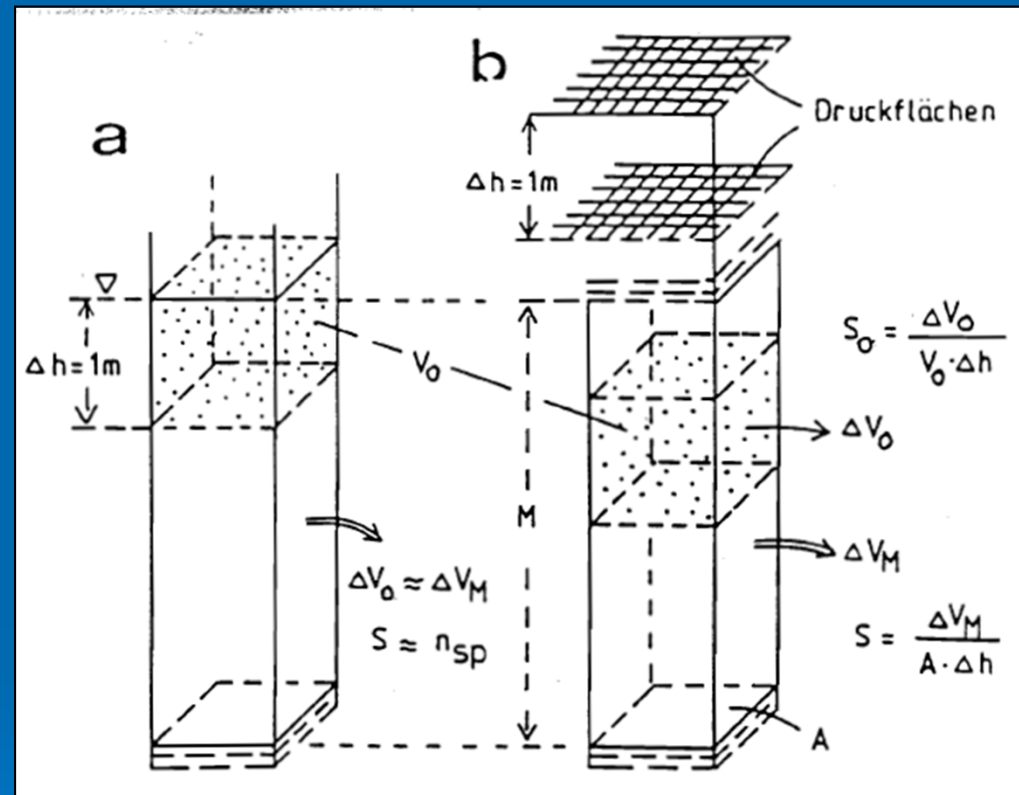
Bodenart	Durchlässigkeit k_f [m/s]
reiner Kies	<<< ██████████ >>>
sandiger Fein- bis Mittelkies	<< ██████████ >>
Grobsand	<<<< ██████████ >>>>
Mittelsand	<<<< ██████████ >
Feinsand	<<<< ██████████ >>
sehr feiner Sand	<<<< ██████████ >>
schluffiger Sand	< <<< ██████████ >>>
toniger Schluff	< ██████████ >>
Ton	██████████ >>

10^{-10} 10^{-8} 10^{-6} 10^{-4} 10^{-2} 10^0

Speicherkoeffizient

➤ Speicherkoeffizient

- Dimensionslos
- Bestimmung mittels Pumpversuch
 - Ungespannt (siehe a)
 - Werte: 0,01 bis 0,3
 - Speicherkapazität entspricht nutzbare Porosität
 - Gespannt (siehe b)
 - Werte: 10^{-3} bis 10^{-6}



Geohydraulische Parameter

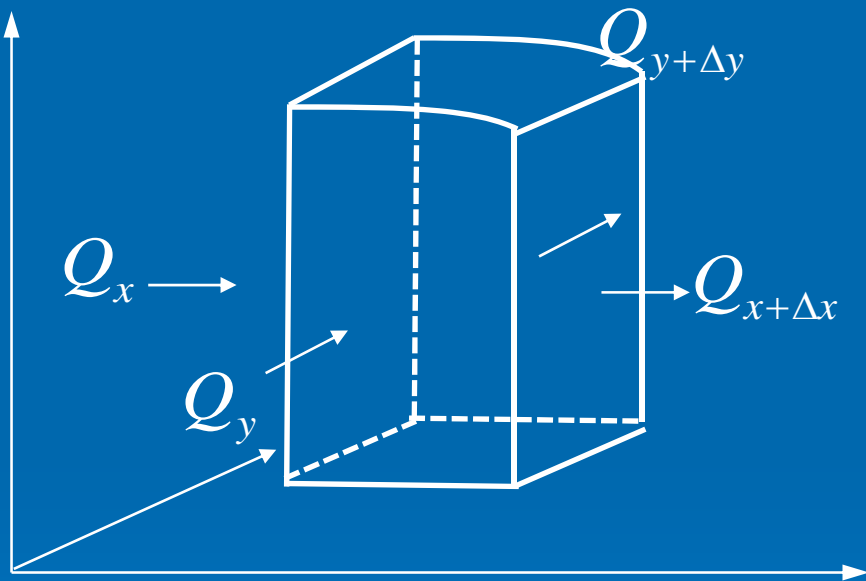
➤ Speicherkoeffizient

gespanntes Grundwasser: $S_E = \rho \cdot g \cdot M \cdot (a + n \cdot b)$
freies Grundwasser: $S = n_e$; ($S_E \cdot M \ll n_e$)

- S_E Speicherkapazitätsanteil aus elastischen Eigenschaften
- n_e speichernutzbarer Porenraum
- ρ Dichte des Wassers
- g Erdbeschleunigung
- M Mächtigkeit des Grundwasserleiters
- a Kompressibilität des Korngerüsts
- b Kompressibilität des Wassers

Die Größenordnungen für Speicherkoeffizienten für ungespannten Porengrundwasserleiter liegen bei 0,1 - 0,3;
für gespannte zwischen 10^{-3} und 10^{-6} .

Grundgleichungen 2: Bilanzgleichung



$$Q_z(t) - Q_A(t) = \frac{dS(t)}{dt}$$

2D GW-Gleichung:

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = S_o * \frac{\partial h}{\partial t}$$

S_o ... speichernutzbarer
Porenraum ausgedrückt in %

Kombination: Darcy + Bilanzgleichung

➤ Kombination

- Gesetz von Darcy
- Bilanzgleichung
- mittels Differentialgleichung
 - ➔ Allgemeine 2D Wasserströmungsgleichung

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_{xx} * h * \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_{yy} * h * \frac{\partial h}{\partial y} \right] = S_s * \frac{\partial h}{\partial t} + W$$

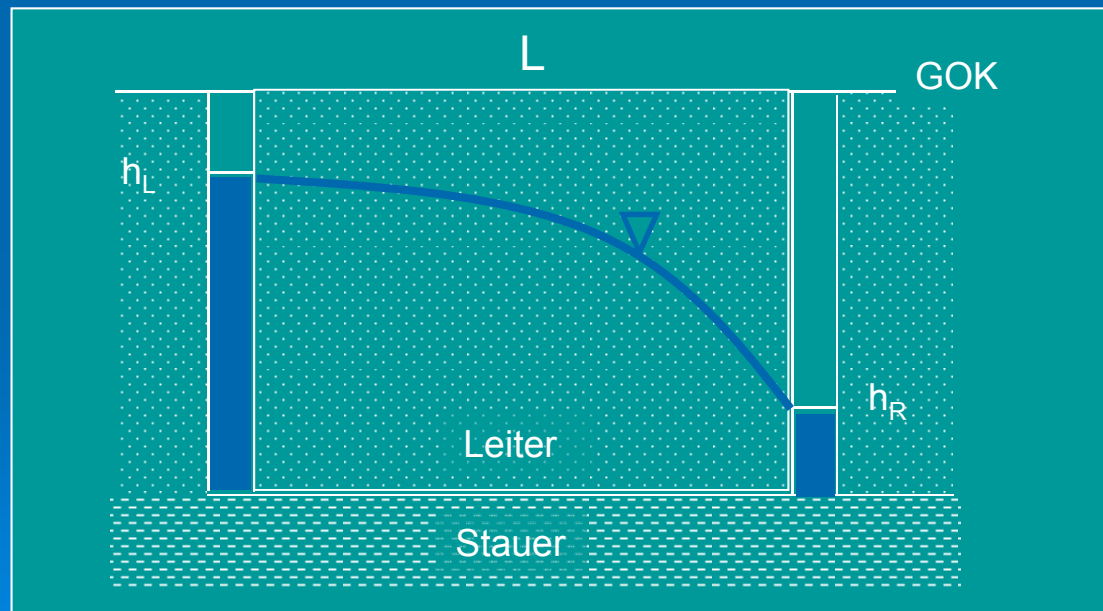
W ... Quellen-/ Senkenterm (= Infiltration / Entnahme)

Lösungsansätze

- Analytische Methoden
- Konzeptive Methoden
- Numerische Ansätze

Beispiel: 1D - ungespannt

- 2 parallele Gräben mit konstantem Wasserstand
 - Homogen
 - Ungespannter Grundwasserkörper
 - Stationäre Bedingungen
 - Quell- und Senkenterm entfällt

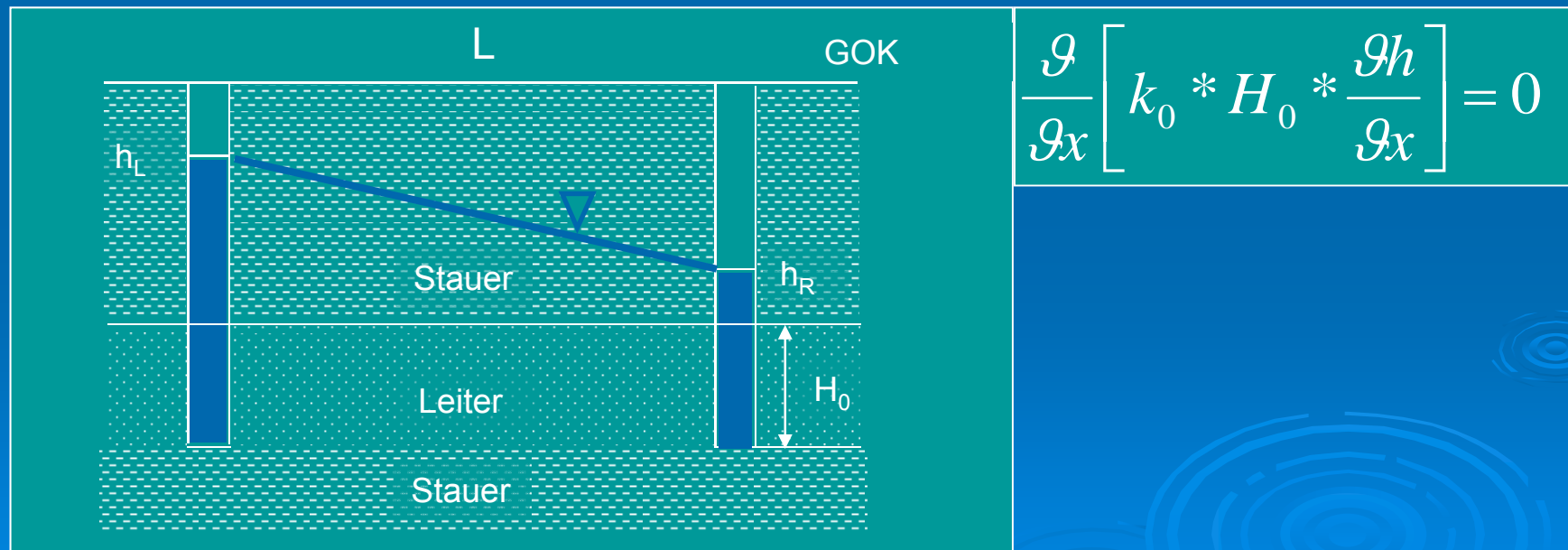


$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_{f,0} * h * \frac{\partial h}{\partial x} \right] = 0$$

Beispiel: 1D - gespannt

➤ 2 parallele Gräben mit konstantem Wasserstand

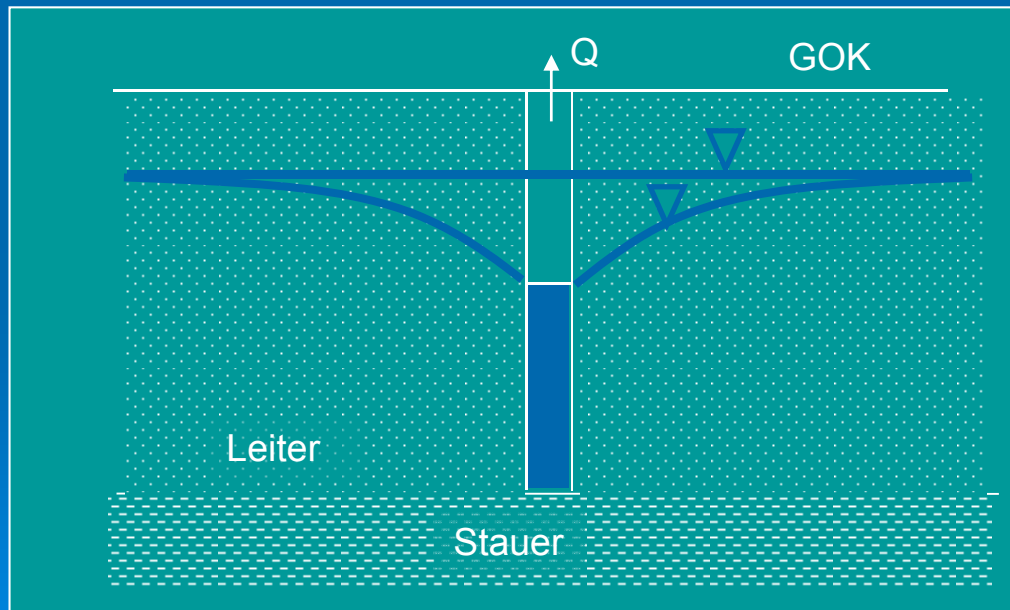
- Homogen
- Gespannter Grundwasserkörper
- Stationäre Bedingungen
- Quell- und Senkenterm entfällt



Beispiel: Wasserströmungsgleichung: 2D - ungespannt

➤ Zuströmung zu einem Brunnen:

- Homogen
- Radialsymmetrische Anströmung
- Ungespannter Grundwasserkörper
- Stationäre Bedingungen

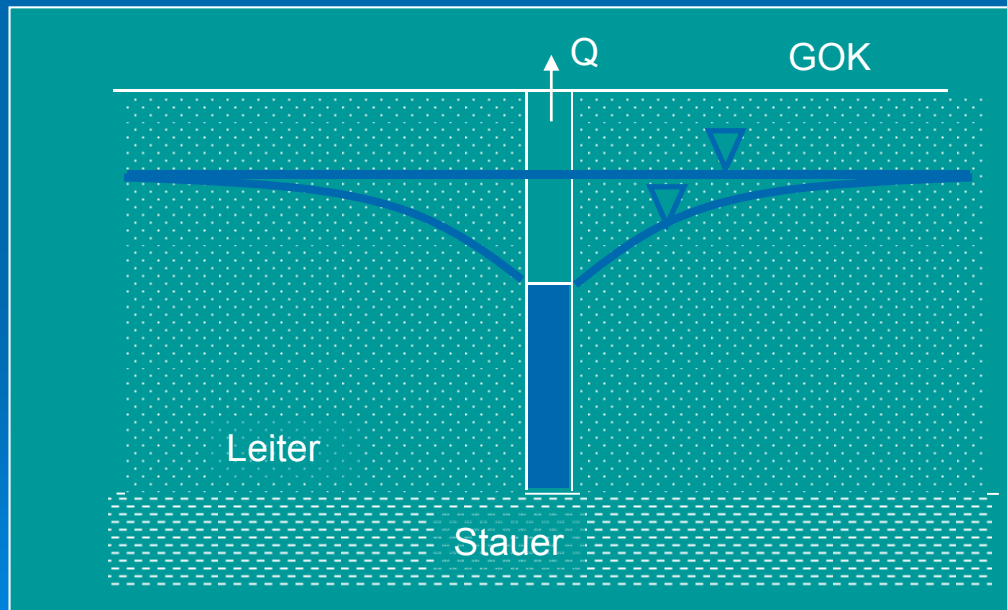


Beispiel: Wasserströmungsgleichung: 2D - ungespannt

➤ Zuströmung zu einem Brunnen:

- Homogen
- Radialsymmetrische Anströmung
- Ungespannter Grundwasserkörper
- Stationäre Bedingungen

$$Q = v * A = -k_0 * \frac{\partial h}{\partial r} * 2r\pi h$$

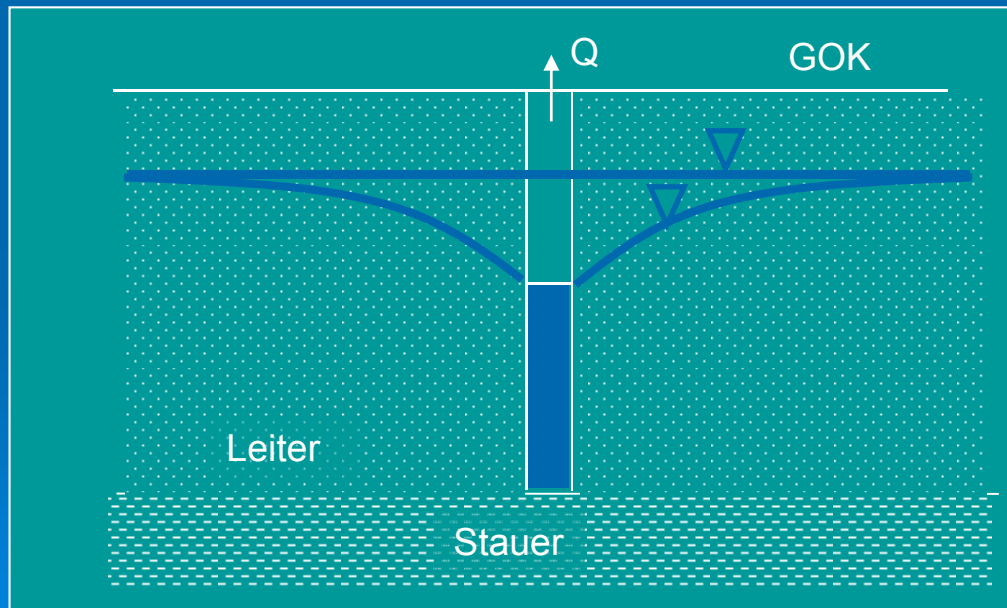


Beispiel: Wasserströmungsgleichung: 2D - ungespannt

➤ Zuströmung zu einem Brunnen:

- Homogen
- Radialsymmetrische Anströmung
- Ungespannter Grundwasserkörper
- Stationäre Bedingungen

$$Q = v * A = -k_0 * \frac{\partial h}{\partial r} * 2r\pi h$$



- Berechnung der Absenkung

$$\frac{Q}{2\pi * k_0} * \frac{\partial r}{r} = -h * \partial h$$

$$\frac{Q}{2\pi * k_0} * \ln r = -\frac{h^2}{2} + A$$

Parameterermittlung

➤ Labor

➤ Feldversuche

- Pumpversuch

- zeitlich befristete Entnahme von Grundwasser
- GW-Spiegelreaktion wird registriert
- Auswertung der raum-zeitlichen Veränderungen
- Ermittlung von
 - Grundwasserleitenden Eigenschaften: Transmissivität, Durchlässigkeitsbeiwerte
 - Grundwasserspeichernde Eigenschaften: Speicherkoeffizient und spezifischer Speicherkoeffizient
 - Lagen und Eigenschaften hydraulisch wirksamer Aquiferränder
 - Brunnen- und Bohrlocheinflüsse

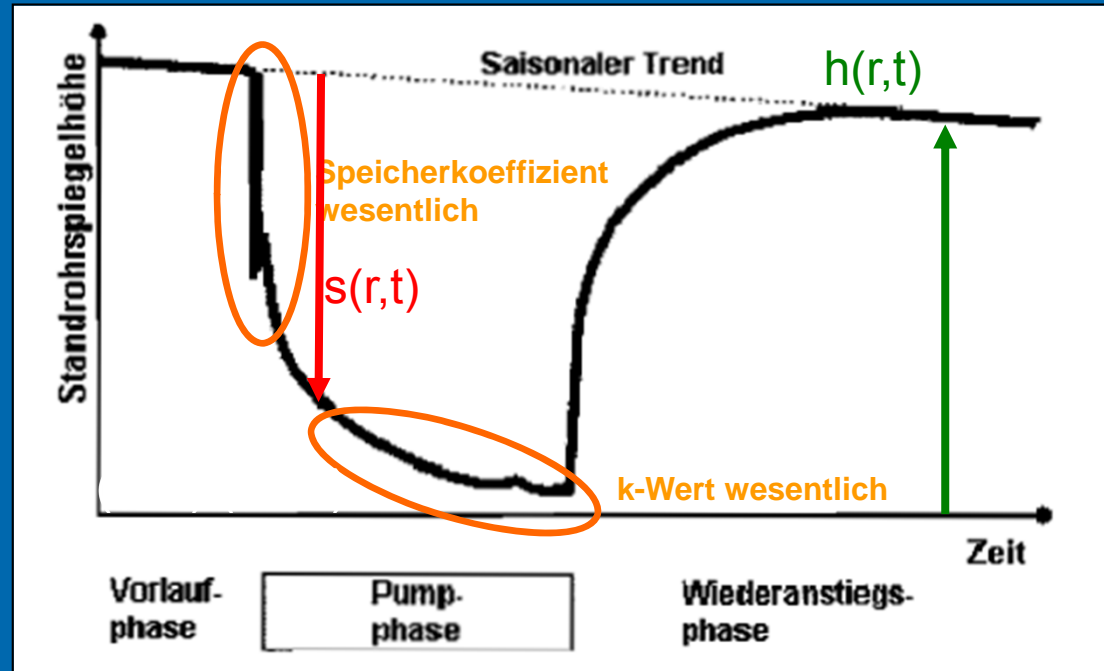
➤ Indirekt

- Aus Wasserständen

Pumpversuch 1

- Ansatz für instationäre Strömung in
- homogenen
 - isotropen GW-Leiter

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial r} \cdot \frac{1}{r} = \frac{S}{T} \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$$



Klassische Brunnenformel von Theiss: eine Lösung der Gleichung

$$s(r, t) = h_0 - h = \frac{Q}{4\pi T} \cdot W(u)$$

$$W(u) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-x}}{x} dx = -0,577216 - \ln u + u - \frac{u^2}{2 \cdot 2!} + \frac{u^3}{3 \cdot 3!} - \frac{u^4}{4 \cdot 4!} + \dots$$

$$u = (r^2 \cdot S) / (4 \cdot t \cdot T)$$

Pumpversuch 2

➤ Brunnenformel von Thiem

$$s_1 - s_2 = h_2 - h_1 = \frac{Q}{2\pi T} * \ln \frac{r_2}{r_1}$$

$s_1; s_2$... stationäre Absenkungsbeträge

$h_1; h_2$... Standrohrspiegelhöhen, die sich im Abstand r_1 und r_2 zum Förderbrunnen befinden ($r_1 < r_2$)

- Stationär
- Gespannt
- Aquifer konstanter Mächtigkeit

➤ Korrigierte Absenkung nach Jacob

- $s; s'$... gemessene / korrigierter Absenkungsbetrag
- H ... ursprüngliche Aquifermächtigkeit

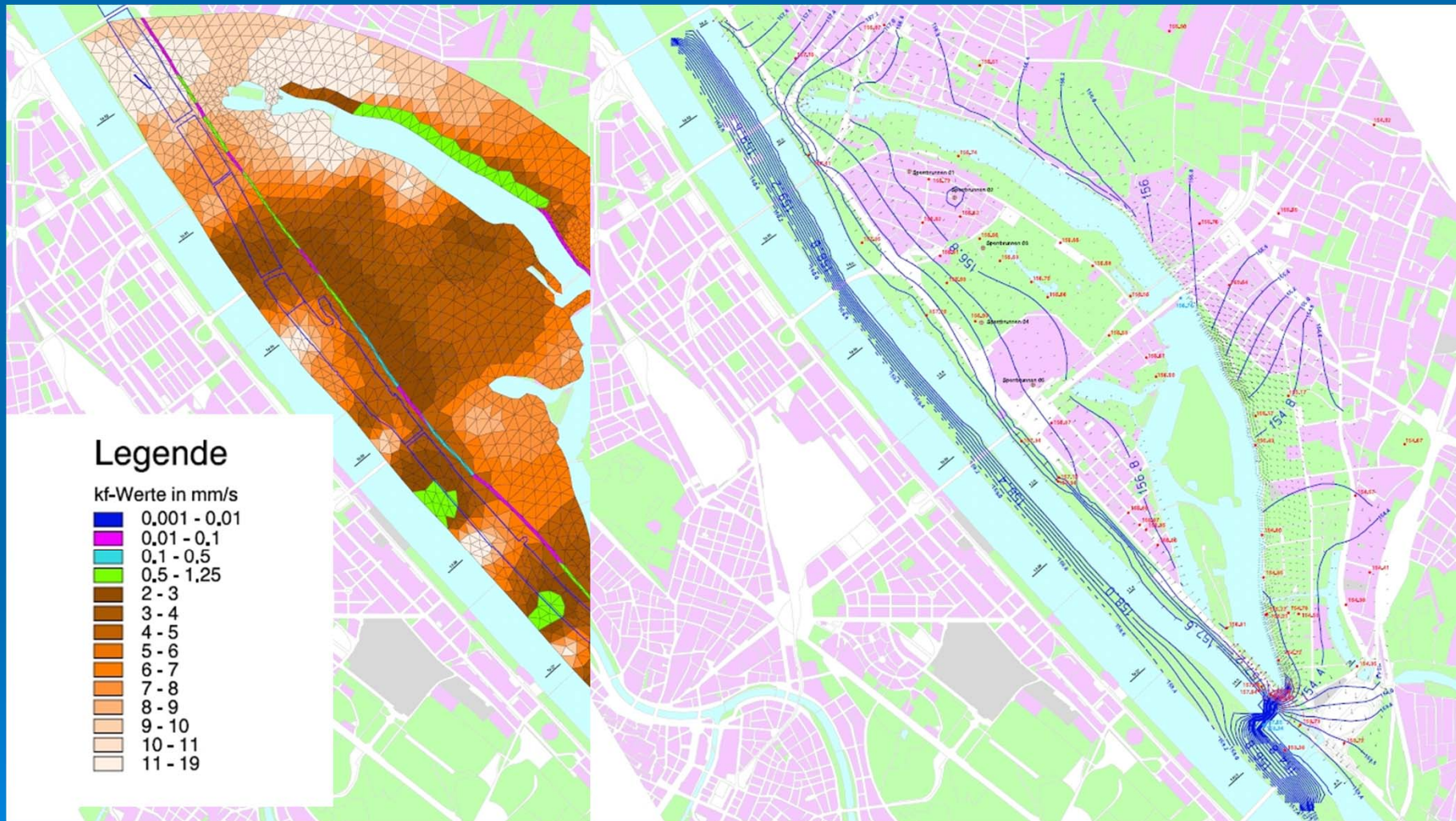
$$s' = s - \frac{s^2}{2H}$$

Anwendungsbeispiel:

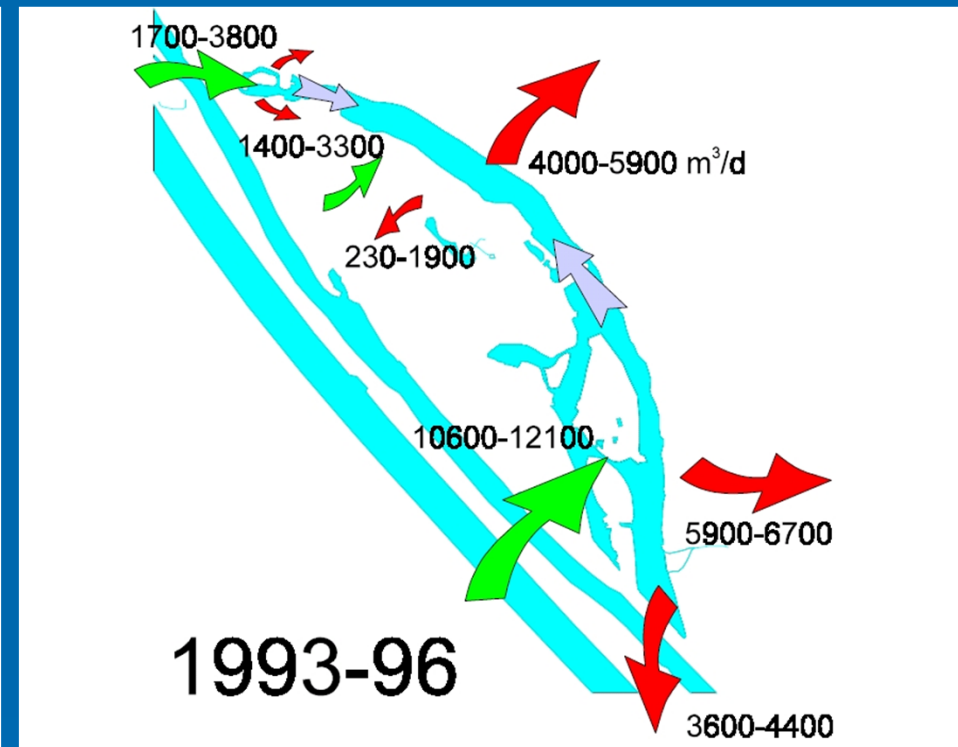
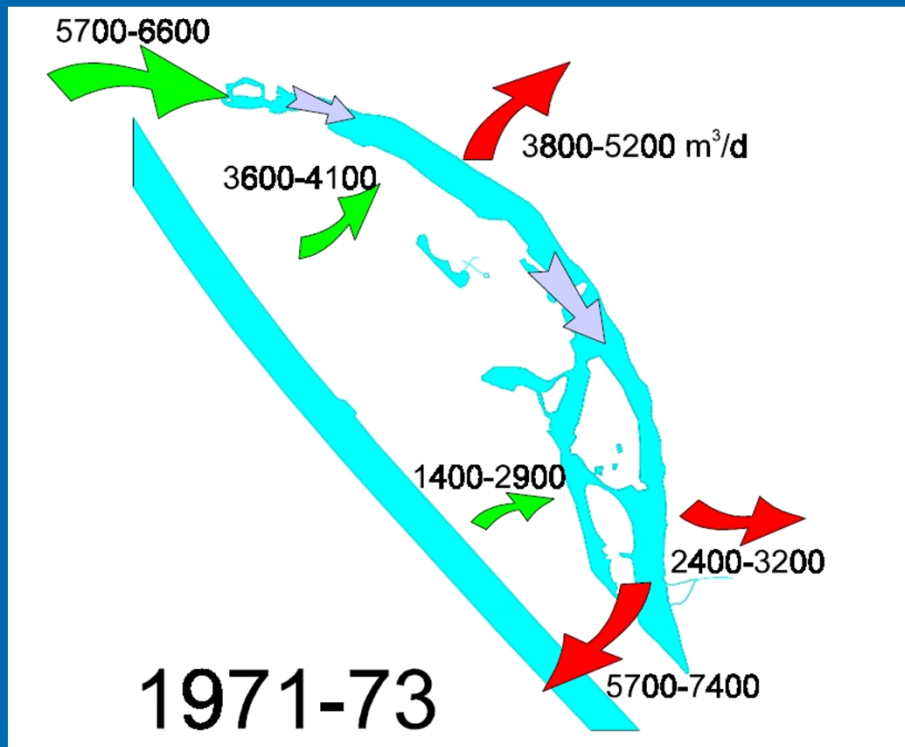
➤ Wasserbilanz Alte Donau



Anwendungsbeispiel



Anwendungsbeispiel



- Ursprünglich unterirdische Anreicherung
- Durchströmung von N nach S
- Dann Rückgang der unterirdischen Zuströmung
- Dotation mit OW, Algen und Schweb
- Umkehrung der Strömungsrichtung

Allgemeines: Stofftransport im Grundwasser

- Grundwasserströmung → Physik
 - Hydraulisches Problem
- Stoffeigenschaften → Chemie
 - Chemisches Problem des Materials, Wassers
- Art des Eintrages → Nutzung
 - Punktförmiger Eintrag: Industrie, Kläranlage
 - Linienförmiger Eintrag: kontaminierte Oberflächengewässer
 - Flächenhafter Eintrag: Landwirtschaft
- → Quell- und Senkenterm zur Beschreibung
- Biologie → Biologie
 - Abbau durch biologische Prozesse

Stofftransport im Grundwasser

➤ Stofftransport abhängig von

- Grundwasserströmung
- Stoffeigenschaften
- Art des Eintrages
- Biologie

➤ Transportprozesse

- Konvektion
- Dispersion
- Diffusion

➤ Einflussgrößen

- kf-Wert
- Staueroberkonte
- Spiegellage
- Speicherkoeffizient

➤ Ausbreitung eines idealen Tracers

Def. idealer Tracer

- Völlständig lösbar
- Phys. + chem. nahezu ident mit Wasser
- Keine Verbindung mit Umgebung

Stofftransport im Grundwasser

- Stoff kann gelöst sein
- Kann als Phase transportiert werden (leichter oder schwerer als Wasser)
- Kann teilgelöst sein

Transportmodelle

- Analytische Verfahren
 - Einfachste Strömungsverhältnisse und Randbedingungen
 - Homogene Bedingungen
- Numerische Verfahren
 - 1D / 2D / 3D Verfahren
 - Finite Differenzen Verfahren
 - Finite Elemente Verfahren
- Stochastische Verfahren
- Konzeptive Modelle

Transportprozesse

➤ Advektion

- Transport mit Wasserbewegung

➤ Dispersion

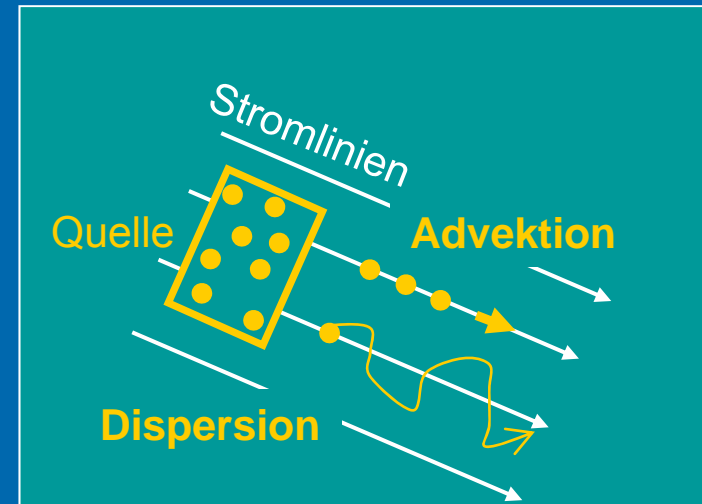
- „Streuung“ von Schadstoffen im Grundwasser → punktförmige Belastung wird zu einer flächenförmigen

➤ Diffusion

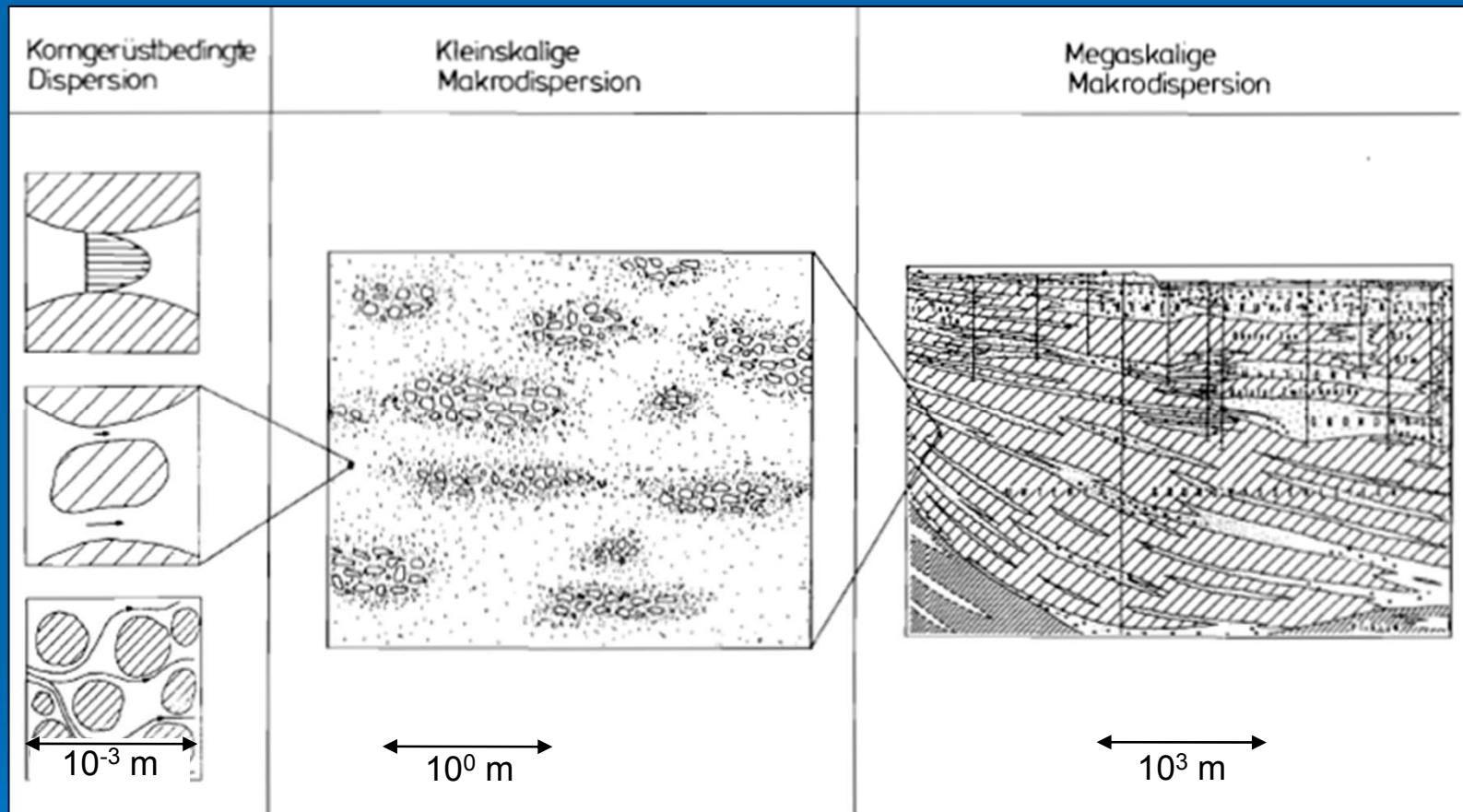
- Stofffluss aufgrund eines Konzentrationsgradienten

➤ Bedeutung für Stofftransport

- Konvektion am größten

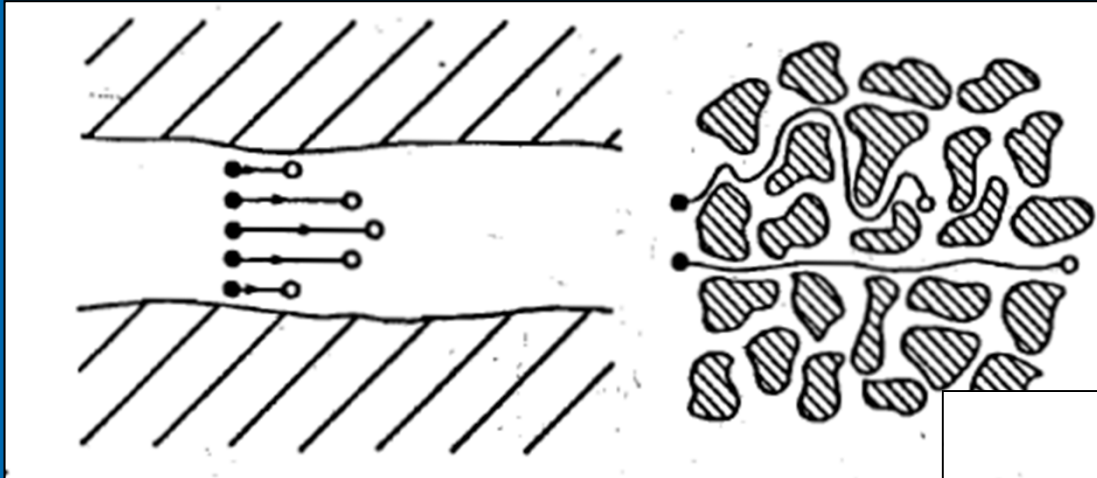


Skalenbegriff



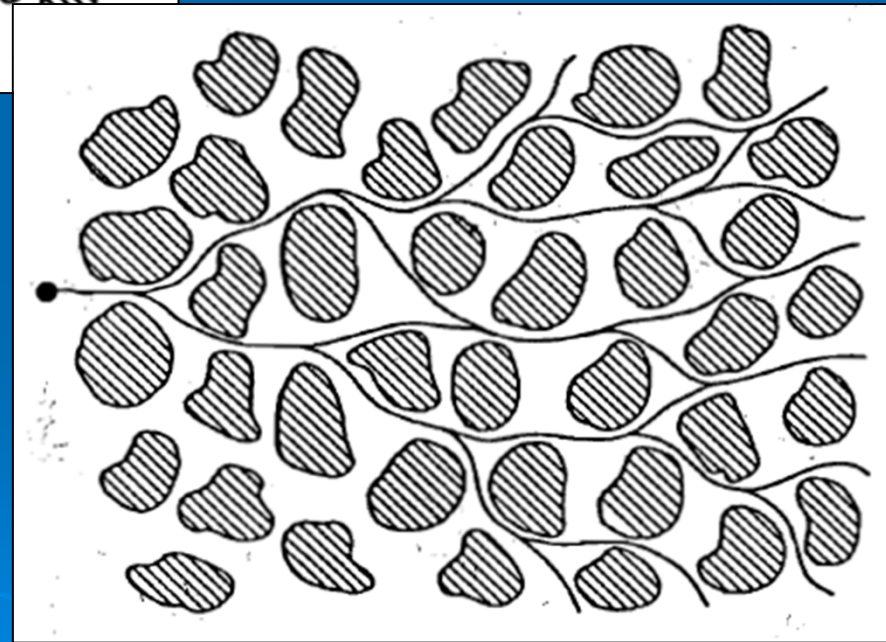
Ursachen der Variabilität der Transportgeschwindigkeit auf unterschiedlichen räumlichen Skalenebenen

Dispersion



Entstehung der
Längsdispersion

Entstehung der
Querdispersion



Einflussgrößen / Ausbreitung

➤ Einflussgrößen

- kf-Wert
- Staueroberkante
- Spiegellage
- Speicherkoeffizient

$$Q_Z(t) - Q_A(t) = \frac{\partial Q}{\partial x}$$

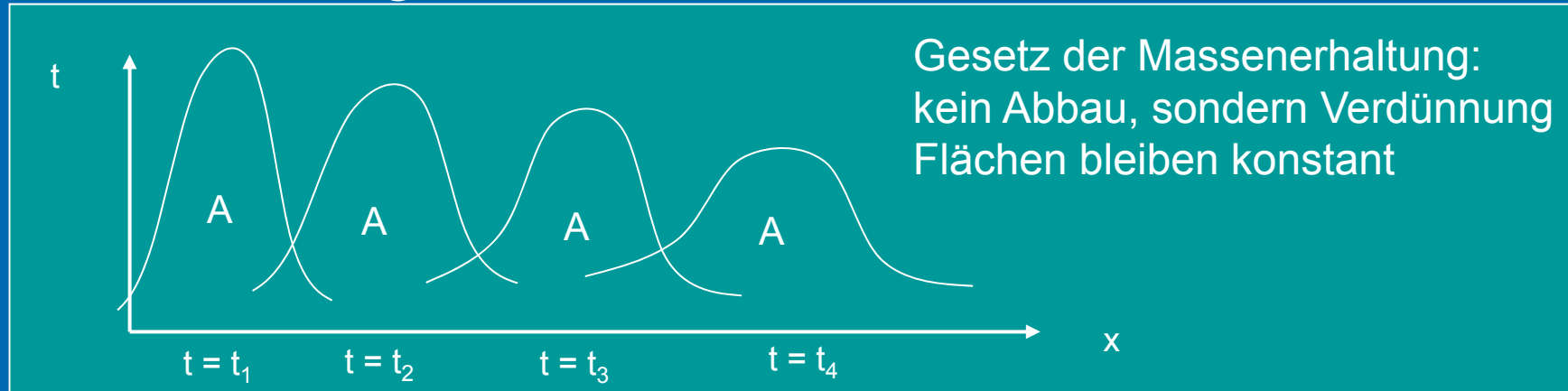
$$\underbrace{\theta_\alpha \frac{\partial c}{\partial t}}_{\text{Speicher}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} (c * v)}_{\text{Konvektion}} - \text{Inhomogenitäten des Untergrundes} = 0$$

➤ Ausbreitung eines idealen Tracers

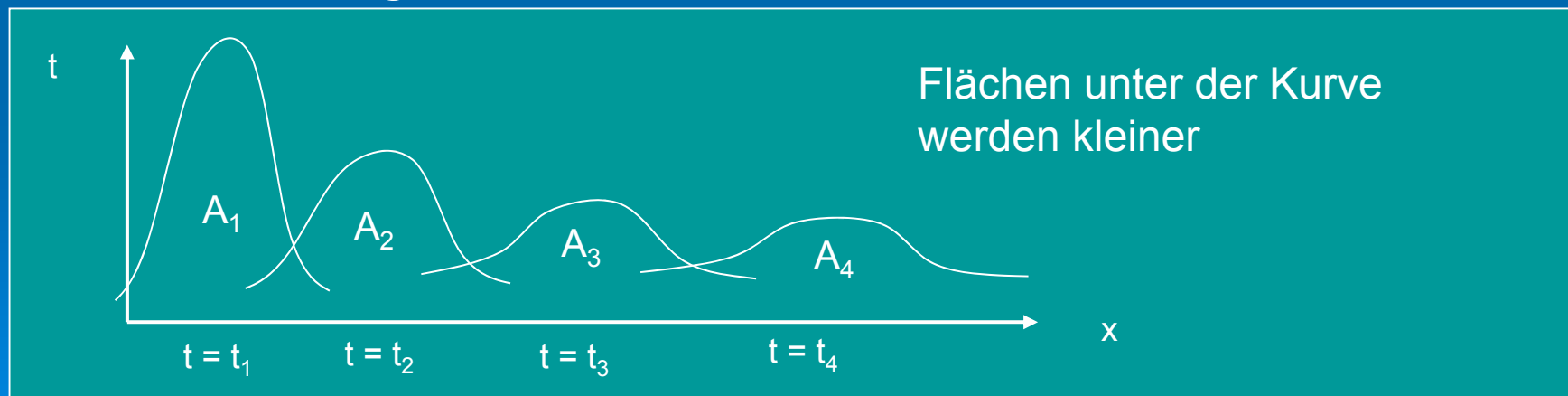
- Definition: Idealer Tracer
 - Vollständig lösbar
 - Physikalisch und chemisch nahezu ident mit Wasser
 - Geht keine Verbindungen mit der Umgebung ein
- ➔ Wasserisotope

Ausbreitung

➤ Ausbreitung ohne Abbau

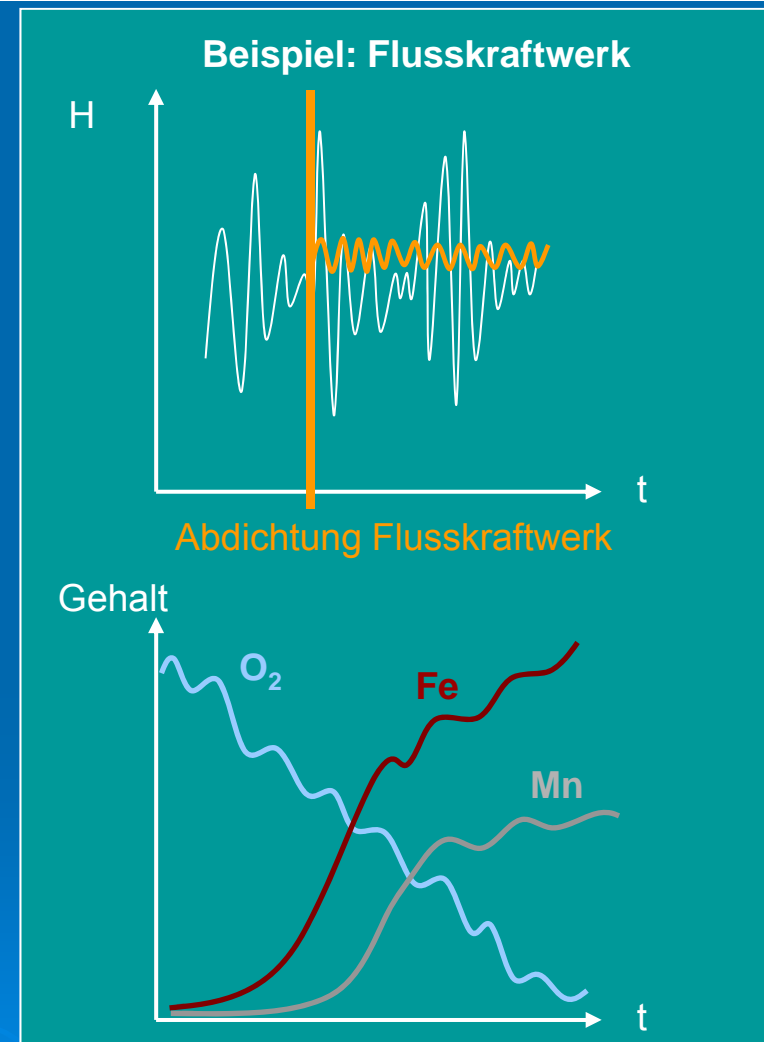


➤ Ausbreitung mit Abbau



Chemisches Problem

- Idealer Tracer
- Adsorption – Desorption
 - Austausch von Stoffen
- Abbau, Zerfall
 - Biologisch, Radioaktiv
- Chemische Reaktion
 - Welche Stoffe sind beteiligt?
- Mehrphasensysteme



Rückblick Stofftransport

- Allgemeines zu Stofftransport
 - Welche Disziplinen sind beteiligt?
- Transportmodelle
- Transportprozesse
 - Konvektion
 - Dispersion
 - Diffusion
- Einflussgrößen
 - kf-Wert
 - Staueroberkante
 - Spiegellage
 - Speicherkoeffizient
- Ausbreitung
 - Tracer

Stofftransport im Grundwasser

- Stoff wird mit der Wasserströmung transportiert (Advektion)
- Stoff wird auf Grund der Heterogenität des Untergrundes unterschiedlich transportiert (Dispersion)
- Stoff breitet sich auch in ruhendem Medium aus (Diffusion)

Zusammenfassung Grundwasserhaushalt

- Typisierung des Grundwassers
- Grundgleichungen
 - Darcy
 - Bilanzgleichung
 - Kombination: Bilanzgleichung / Darcy
- Wasserströmungsgleichungen
 - 1D / 2D
 - Gespannt / Ungespannt
- Geohydraulische Parameter
 - Durchlässigkeit
 - Speicherkoeffizient
 - Quell- und Senkenterme
- Parameterermittlung
- Pumpversuch