

**Aqua vita est !**

Studiengang: Umweltingenieurwesen M.Sc.

Modul

**Wasseraufbereitungstechnologien**

**Hydrochemie der Wasseraufbereitung**

Inhalt:

7. Reaktionen in Filtern

- Porensystem, Oberflächen und Reaktionsräume
- Filterhydraulik
- Filterberechnungen



# 7. Reaktionen in Filtern

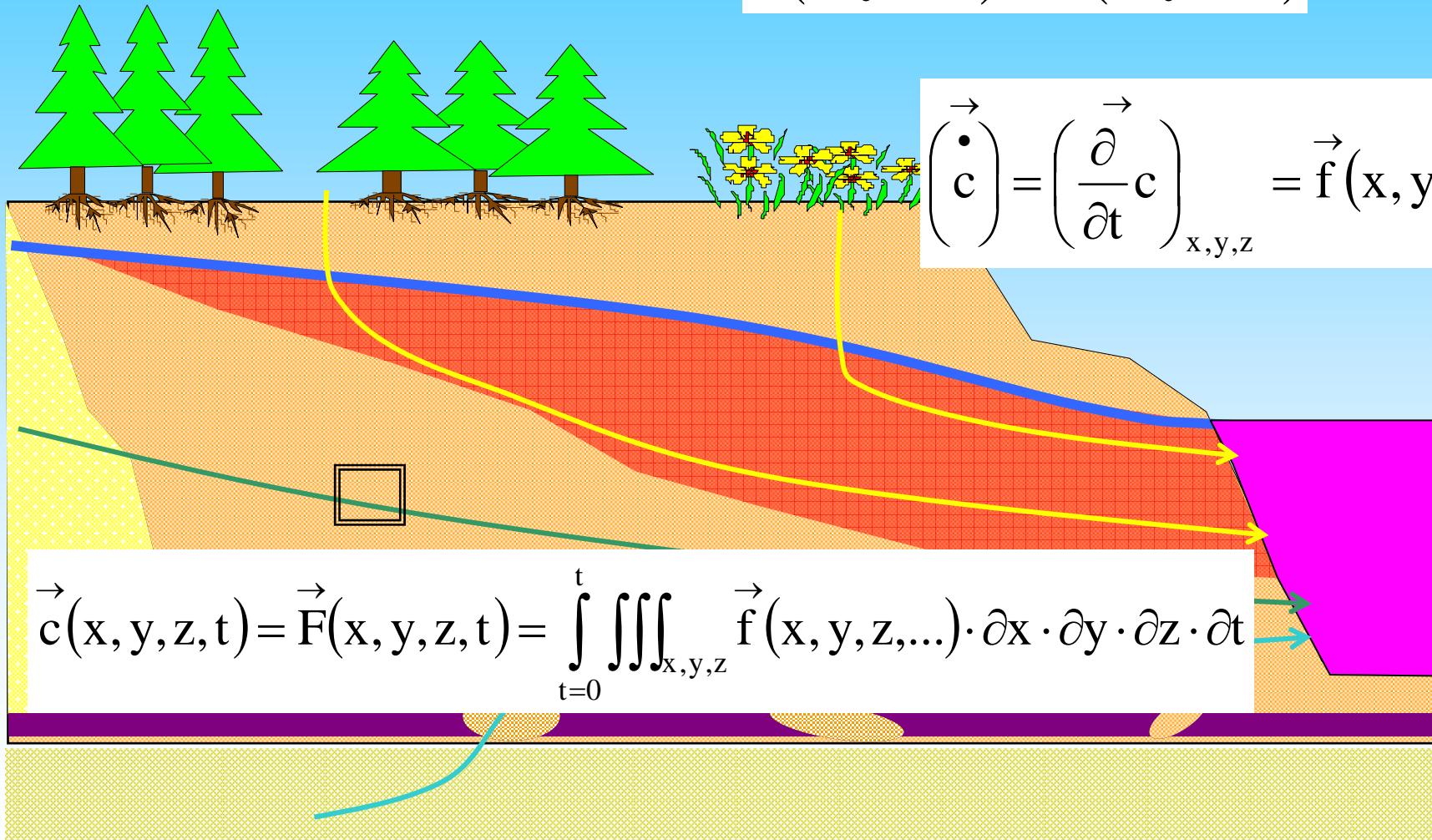
## Durchströmtes Porensystem

# 7. Reaktionen in Filtern, Durchströmtes Porensystem

Analytische Lösung des Problems

$$\vec{c}(x, y, z, t) = \vec{F}(x, y, z, t)$$

$$\left( \begin{array}{c} \dot{\vec{c}} \\ \vec{c} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \frac{\partial}{\partial t} \vec{c} \\ \vec{c} \end{array} \right)_{x,y,z} = \vec{f}(x, y, z, \dots)$$



$$\vec{c}(x, y, z, t) = \vec{F}(x, y, z, t) = \int_{t=0}^t \iiint_{x,y,z} \vec{f}(x, y, z, \dots) \cdot \partial x \cdot \partial y \cdot \partial z \cdot \partial t$$

Porengrundwasserleiter

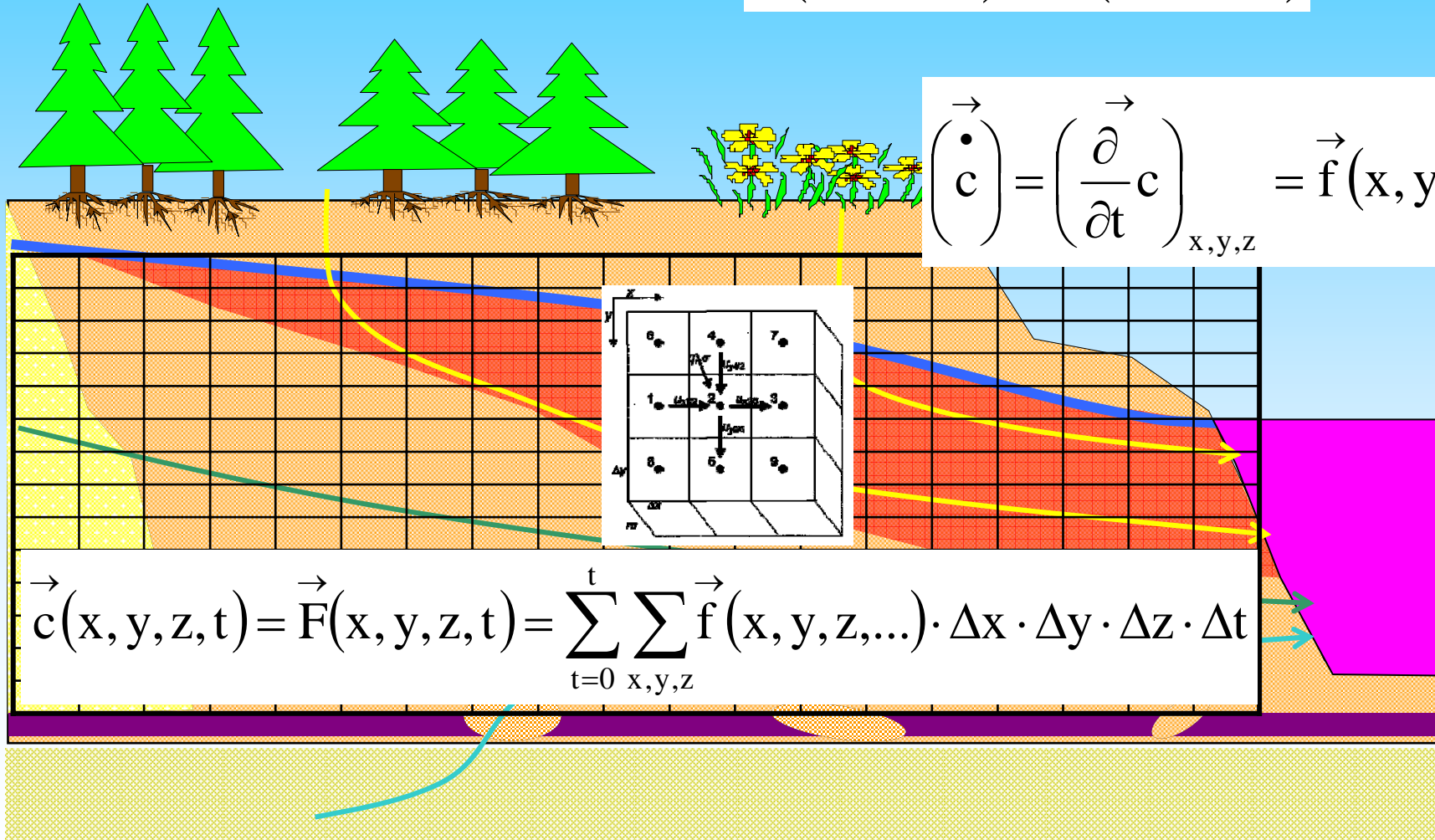
# 7. Reaktionen in Filtern, Durchströmtes Porensystem

Numerische Lösung (Simulation)

zwei bis dreidimensionales Gitternetz

$$\vec{c}(x, y, z, t) = \vec{F}(x, y, z, t)$$

$$\left( \vec{\dot{c}} \right)_{x,y,z} = \left( \frac{\partial}{\partial t} \vec{c} \right)_{x,y,z} = \vec{f}(x, y, z, \dots)$$



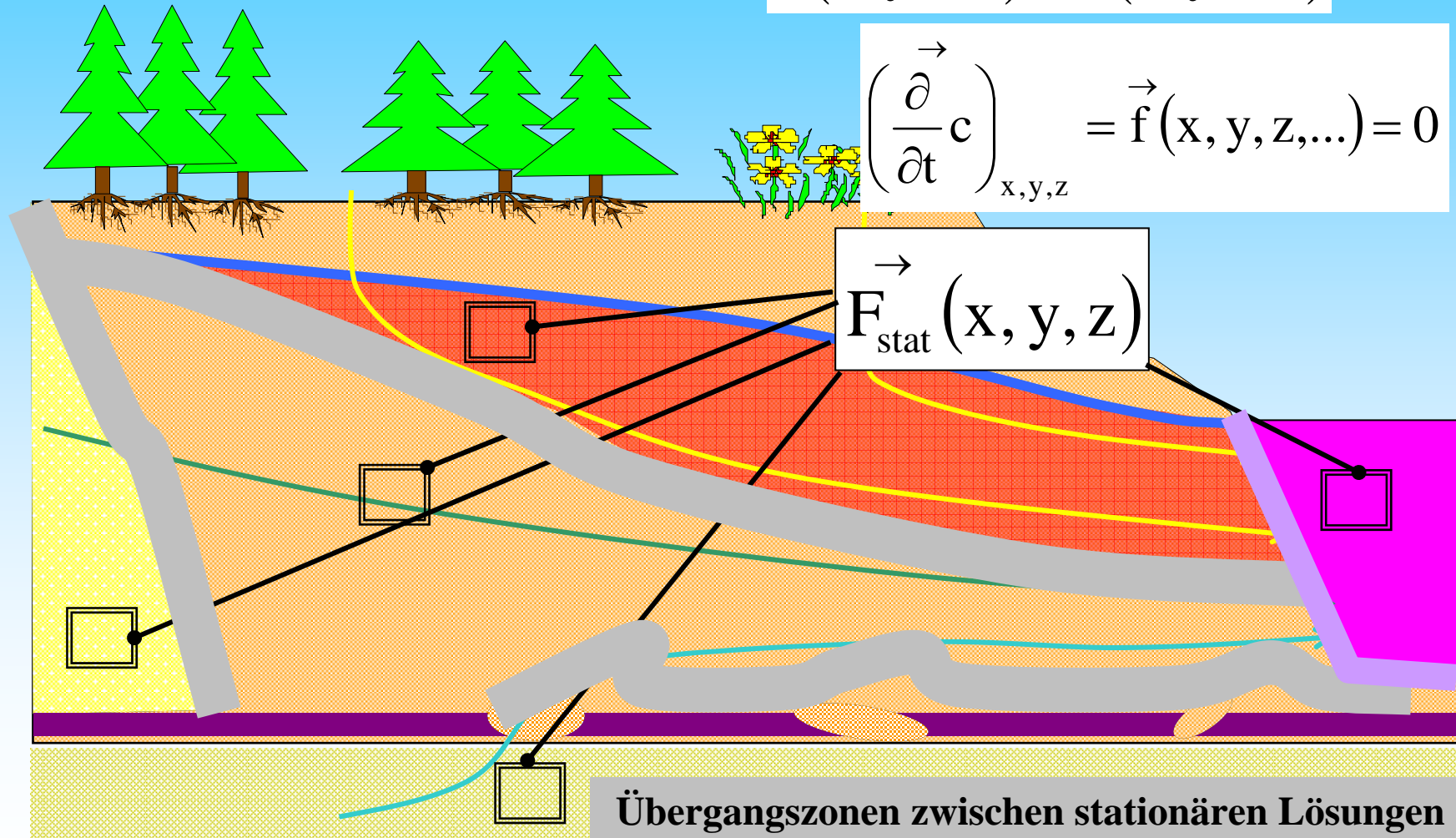
$$\vec{c}(x, y, z, t) = \vec{F}(x, y, z, t) = \sum_{t=0}^t \sum_{x,y,z} \vec{f}(x, y, z, \dots) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Delta t$$

Porengrundwasserleiter

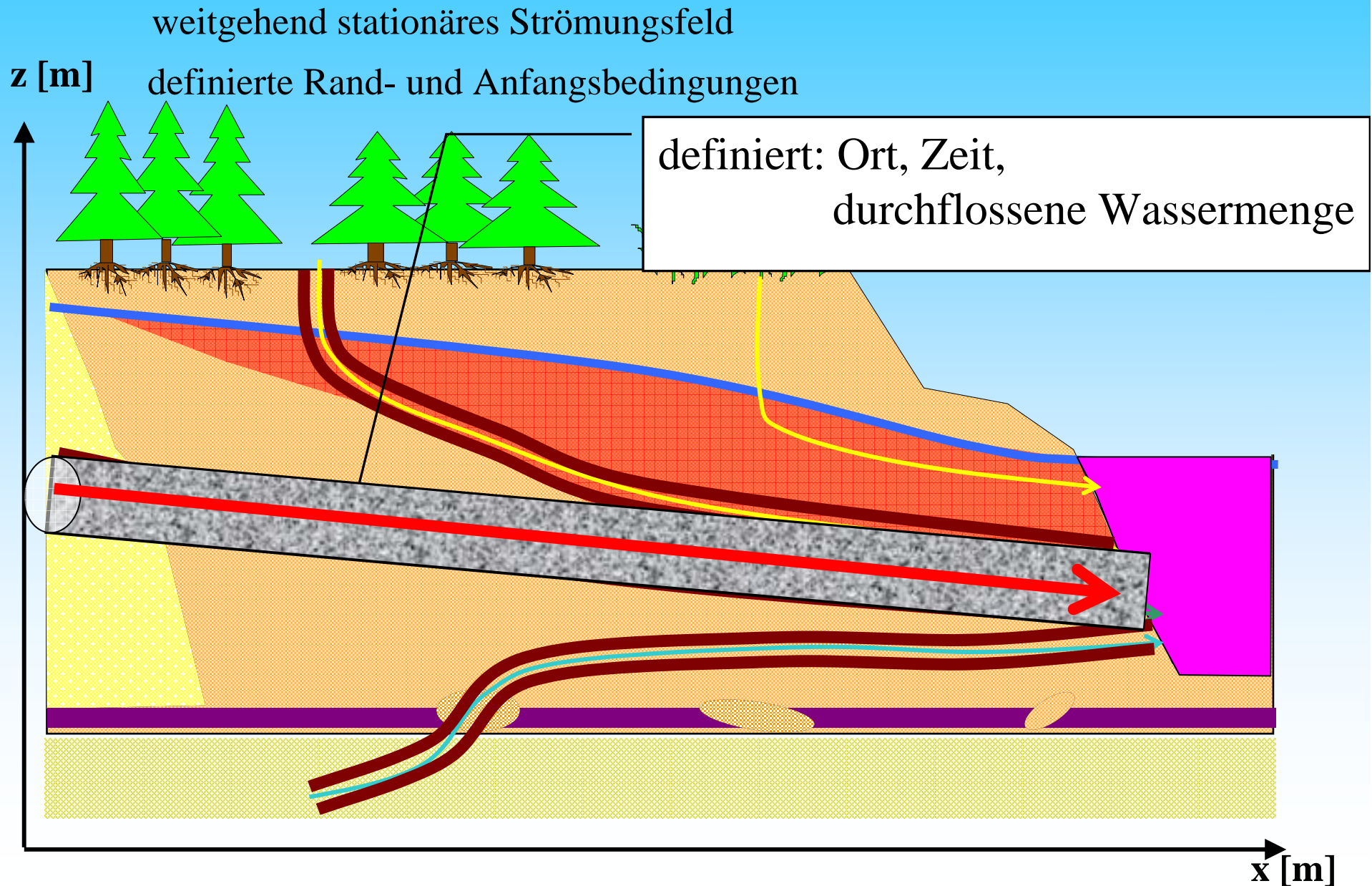
Stationäre und Gleichgewichtszustände als Partikuläre Lösungen

$$\vec{c}(x, y, z, t) = \vec{F}(x, y, z, t)$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} \vec{c} \right)_{x,y,z} = \vec{f}(x, y, z, \dots) = 0$$



# 7. Reaktionen in Filtern, Durchströmtes Porensystem



### Zusammenfassung der Problematik

Stationäre Strömung mit bekanntem Strömungsfeld (hydraulisches Modell)

Nebeneinander von Stromlinien mit definiertem Stoffaustausch, die sich zu charakteristischen Stromröhren vereinigen lassen.

Weite Bereiche mit eingestelltem Phasengleichgewicht zwischen mobiler Lösung und stationärer Festphase des Porensystems

In hydrochemisch ungestörten durchströmten Bereichen bleibt die Gleichgewichtslage konstant (dynamisches Gleichgewicht).

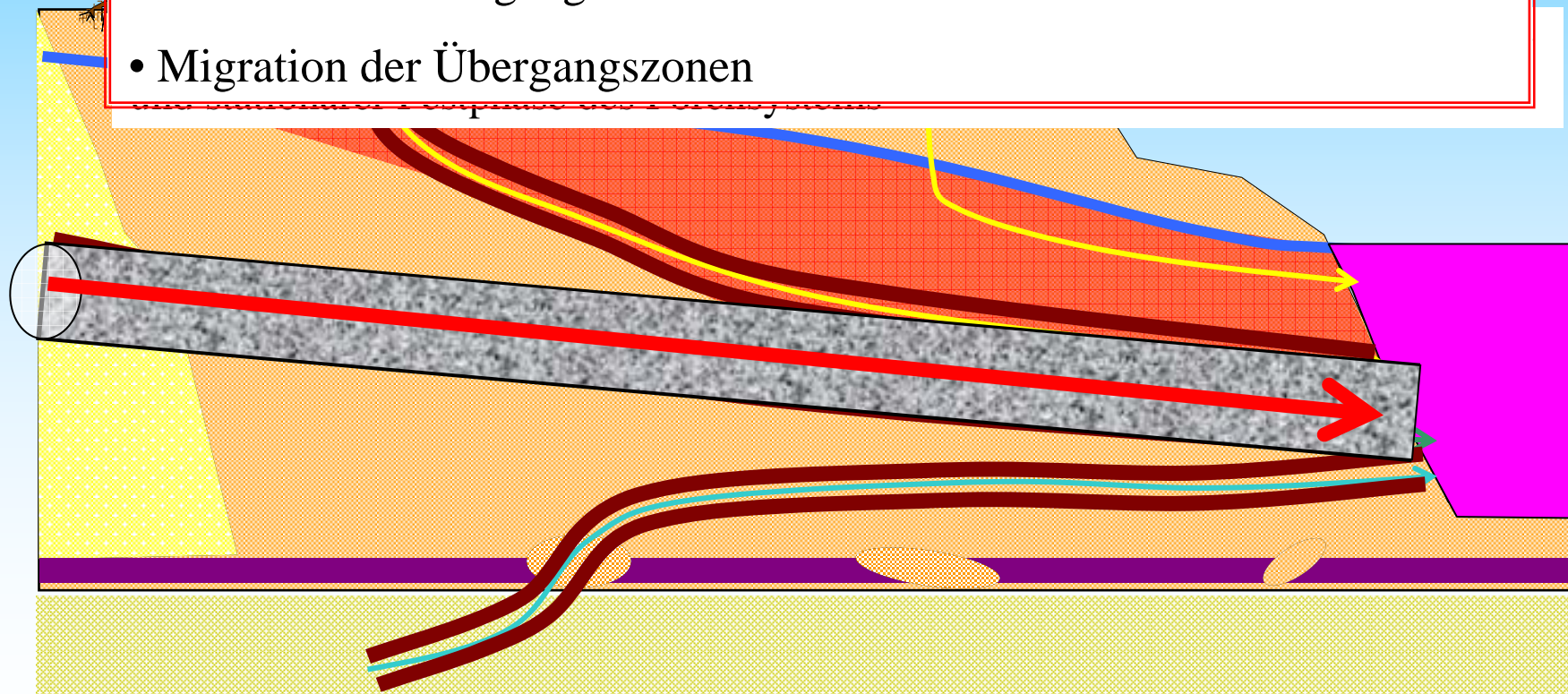
Räumlich und zeitlich definierte Störungen des Gleichgewichtes als Rand- oder Anfangsbedingungen durch Reaktionen oder Zustrom anders zusammengesetzter Porenlösungen pflanzen sich mit der Porenlösungsströmung fort.

Es bilden sich Übergangszonen zwischen den Gleichgewichtszuständen.

### Zusammenfassung der Problematik

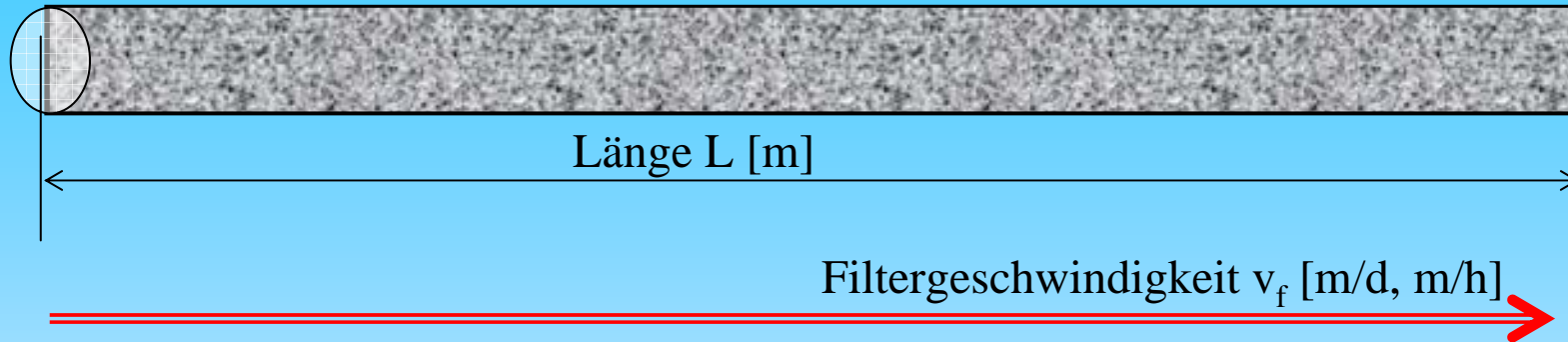
Reduktion vieler Beschaffenheitsprobleme:

- Umstellung von einem Gleichgewichtszustand auf einen Anderen:
- Struktur der Übergangszonen und
- Migration der Übergangszonen



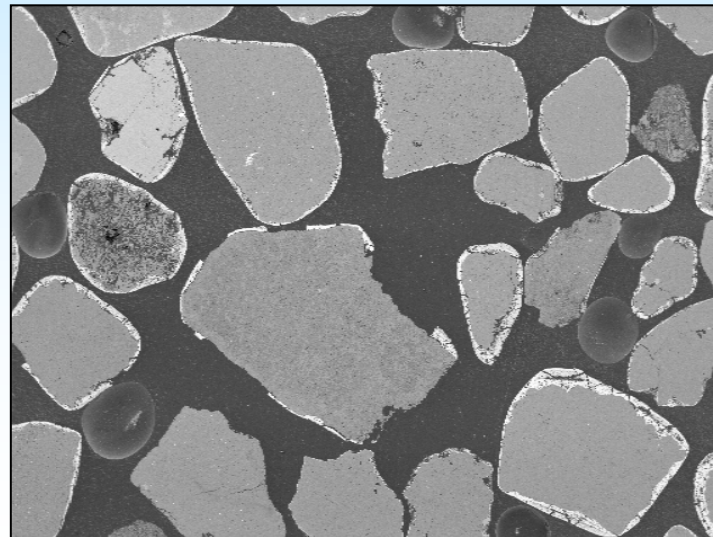
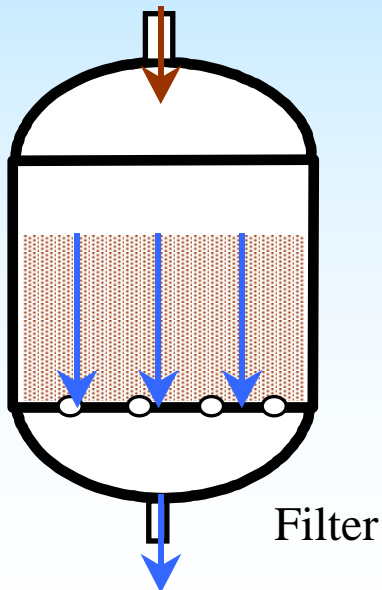


# 7. Reaktionen in Filtern, Durchströmtes Porensystem



durchgeflossene Wassersäule  $H$  [m]

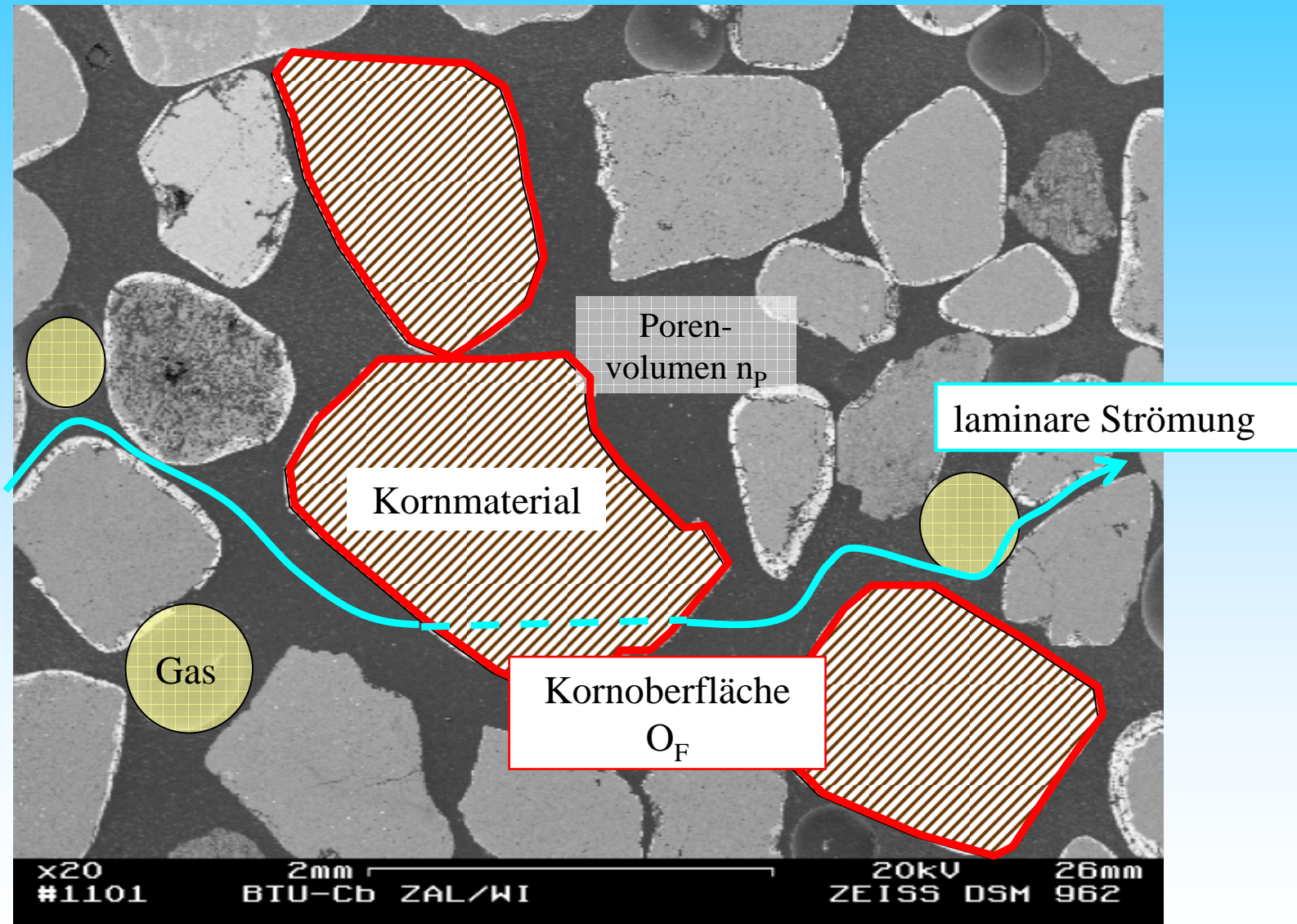
$$H = \frac{1}{A_F} \int_{t_0}^t (Q_R) \partial t = \int_{t_0}^t v_f \partial t$$



spezifisches Porenvolumen

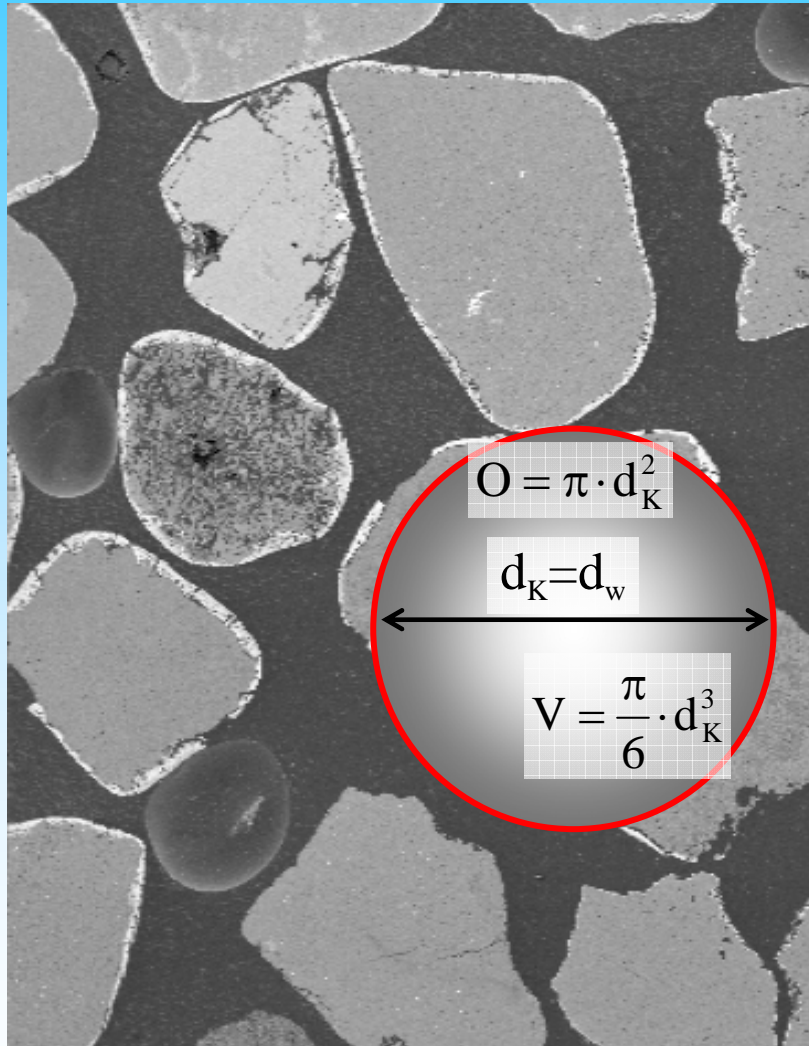
$$n_P = \frac{V_P}{V_R}$$

# 7. Reaktionen in Filtern, Durchströmtes Porensystem



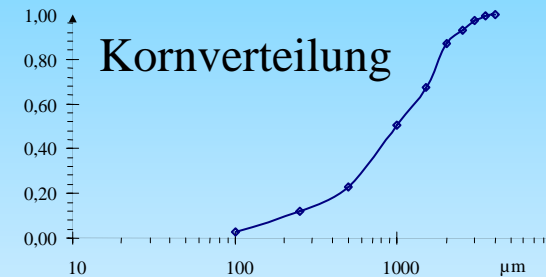
# 7. Reaktionen in Filtern, durchströmtes Porensystem

Korngrößen



$$\frac{V}{O} = \frac{(1 - n_p) \cdot V_w}{n_p \cdot O} = \frac{\frac{\pi}{6} \cdot d_K^3}{\pi \cdot d_K^2} = \frac{d_w^3}{6 \cdot d_w^2} = \frac{d_w}{6}$$

Kugel Würfel



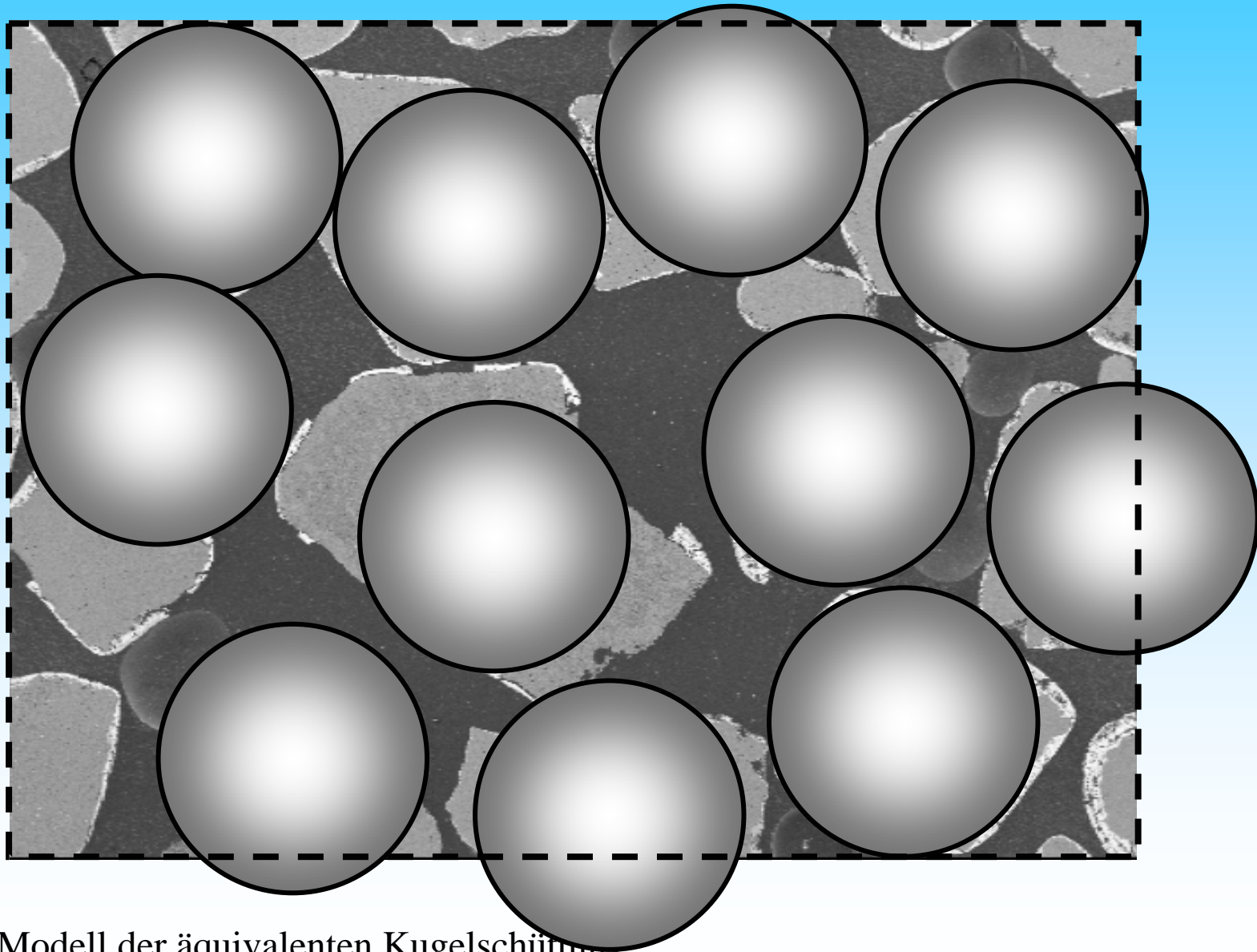
Ermittlung des mittleren wirksamen Korndurchmessers  $d_w$

mit dem gleichen

Oberflächen/Volumenverhältnis

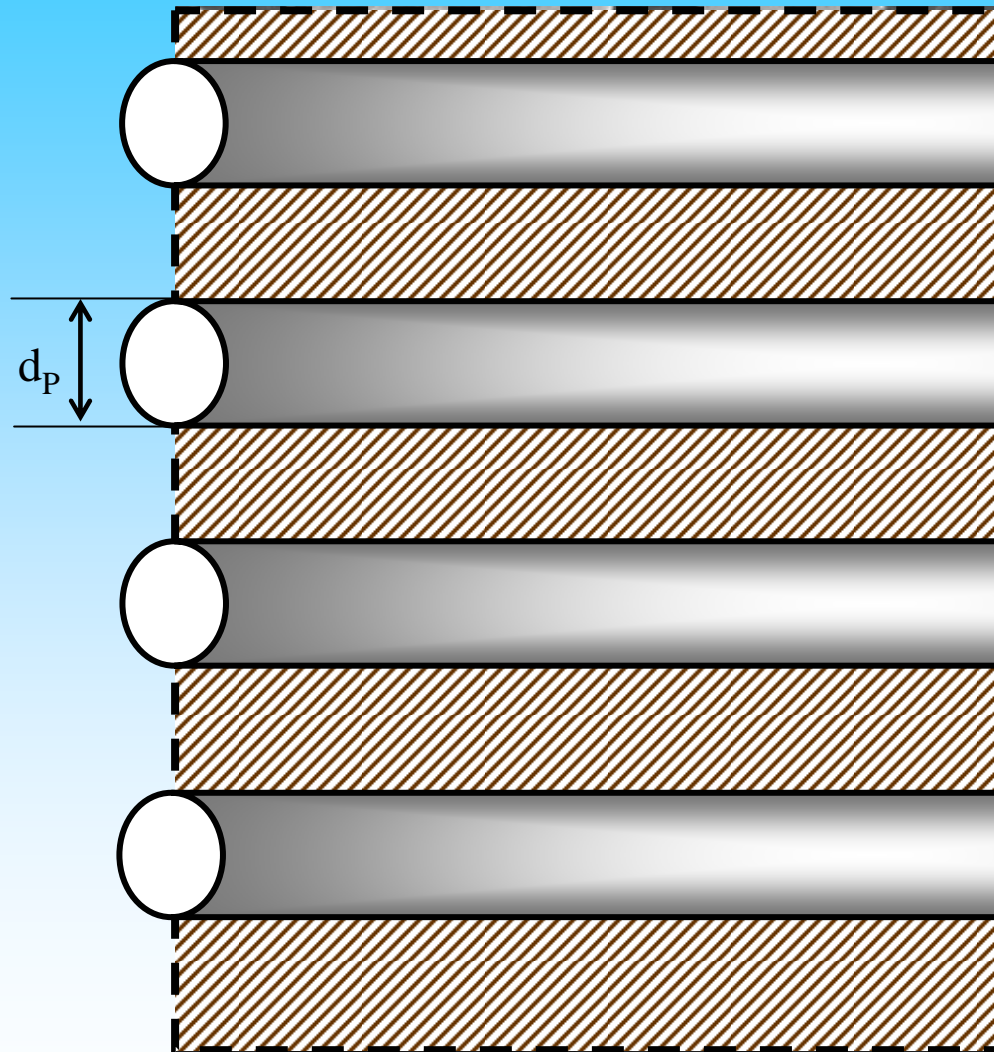
wie die Schüttung

## 7. Reaktionen in Filtern, durchströmtes Porensystem



Modell der äquivalenten Kugelschüttung

## 7. Reaktionen in Filtern, durchströmtes Porensystem



Rohrbündelmodell

$$d_P = \frac{2}{3} \cdot \frac{n_P}{(1 - n_P)} \cdot d_W$$

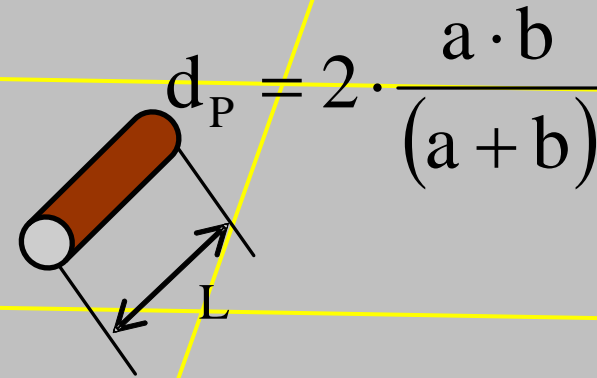
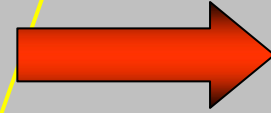
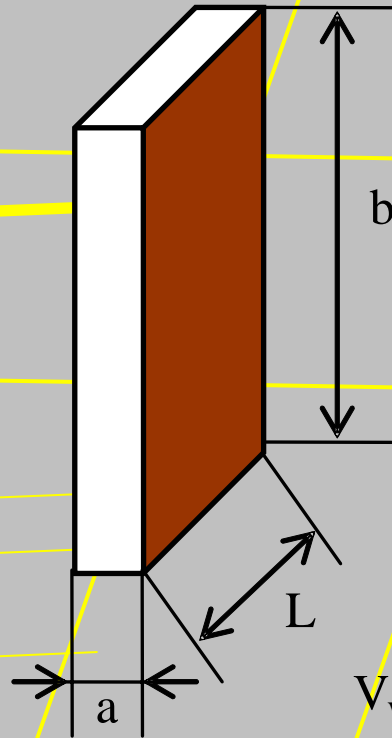
laminare Rohrströmung =>

Druckverlust

# 7. Reaktionen in Filtern, durchströmtes Porensystem

Kluft

Stromröhre



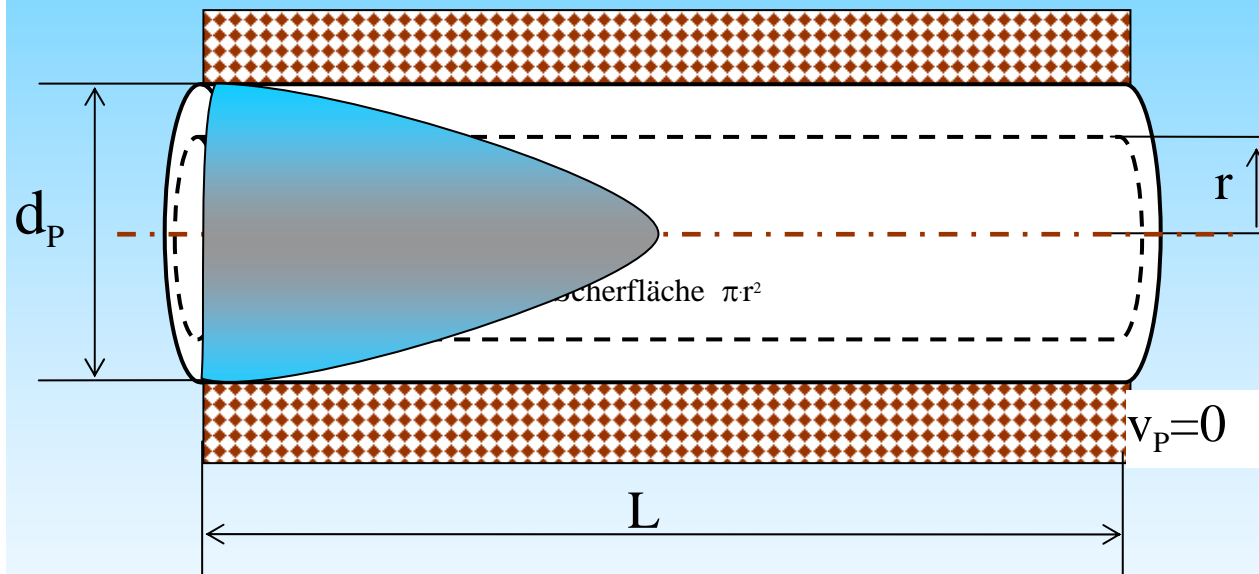
$$d_p = 2 \cdot \frac{a \cdot b}{(a + b)}$$

$$V_w = L \cdot a \cdot b = L \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_p^2$$

$$O = L \cdot (2a + 2b) = L \cdot \pi \cdot d_p$$

## 7. Reaktionen in Filtern, Filterwiderstand

Bei laminarer Rohrströmung lässt sich der Reibungsverlust theoretisch berechnen. Betrachtet man einen von der ausgebildeten Rohrströmung herausgeschnittenen gedachten Teilzylinder mit dem Radius  $r$  [m] und der Länge  $L$  [m] lassen sich an ihm die Schubspannungen [ $\text{N/m}^2$ ] und Druckkräfte angeben.



Druckkraft :

$$\Delta p \cdot A_F = \Delta p \cdot \pi \cdot r^2$$

Bei stationärer Strömung muss der Flüssigkeitszylinder im Gleichgewicht sein. Druck und Reibungskräfte müssen sich das Gleichgewicht halten (/R3706/).

Reibungskraft über die Schubspannung  $\tau$ : 
$$2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \tau = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \eta \cdot \frac{\partial v}{\partial r}$$

## 7. Reaktionen in Filtern, Filterwiderstand

Bei stationärer Strömung muss der Flüssigkeitszylinder im Gleichgewicht sein. Druck und Reibungskräfte müssen sich das Gleichgewicht halten (/R3706/).

$$\text{Druckkraft :} \quad \Delta p \cdot A_F = \Delta p \cdot \pi \cdot r^2$$

$$\text{Reibungskraft über die Schubspannung } \tau: \quad 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \tau = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \eta \cdot \frac{\partial v}{\partial r}$$

Durch Gleichsetzen der beiden Kräfte erhält man folgende, die Geschwindigkeitsverteilung beschreibende Differentialgleichung :

$$\Delta p \cdot \pi \cdot r^2 = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \cdot \eta \cdot \frac{\partial v}{\partial r}$$
$$\int_{v_{\max}}^0 \partial v = \int_r^{d_p/2} \left( \frac{\Delta p}{2 \cdot L \cdot \eta} \cdot r \right) \partial r = \left( \frac{\Delta p}{4 \cdot L \cdot \eta} \right) \cdot \left( \frac{d_p^2}{4} - r^2 \right)$$
$$v_{\max} = \left( \frac{\Delta p}{4 \cdot L \cdot \eta} \right) \cdot \left( \frac{d_p^2}{4} - 0^2 \right)$$

Die mittlere Rohrgeschwindigkeit  $v_A$  beträgt  $0,5 v_{\max}$ :

$$v_A = \frac{\Delta p}{32 \cdot L \cdot \eta} \cdot d_p^2$$
$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h = \frac{32 \cdot L \cdot \eta \cdot v_A}{d_p^2}$$



## 7. Reaktionen in Filtern, Filterwiderstand

Die mittlere Rohrgeschwindigkeit  $v_A$  beträgt  $0,5 v_{\max}$ :

$$v_A = \frac{\Delta p}{32 \cdot L \cdot \eta} \cdot d_P^2$$
$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h = \frac{32 \cdot L \cdot \eta \cdot v_A}{d_P^2}$$

Die Druckverlusthöhe (Strömungswiderstand) wird in technischen Systemen Filterwiderstand  $h_f$  und in natürlichen Systemen als  $\Delta h$  bezeichnet.

$$h_f = \frac{32 \cdot \eta \cdot v_A \cdot L}{\rho \cdot g \cdot d_P^2}$$

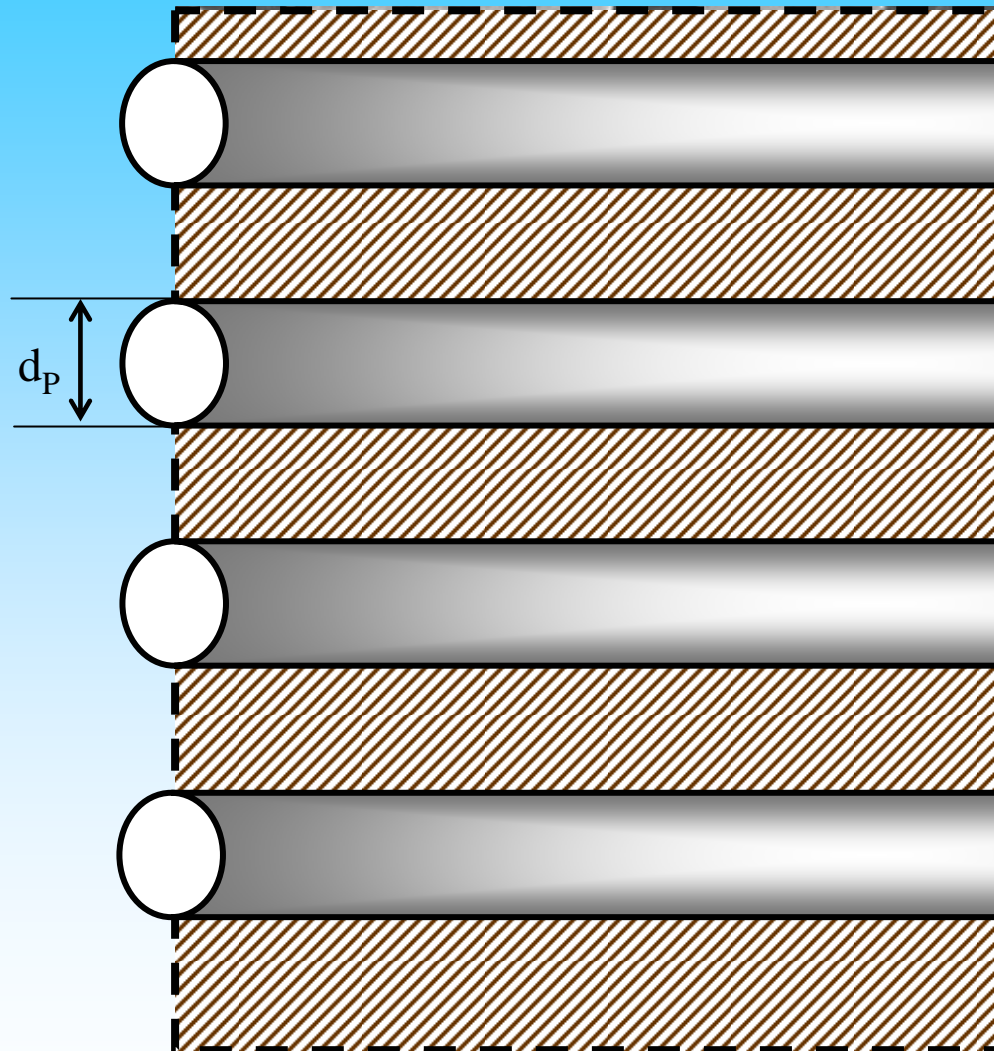
Die Umsetzung auf Filter erfolgt durch Ersetzen von  $d_P$  und

$$d_P = \frac{2}{3} \cdot \frac{n_P}{(1 - n_P)} \cdot d_K$$

$$v_A = \frac{v_f}{n_P}$$

$$h_f = \frac{32 \cdot \eta \cdot \frac{v_f}{n_P} \cdot L}{\rho \cdot g \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{n_P}{(1 - n_P)} \cdot d_K\right)^2} = \frac{72 \cdot \eta \cdot (1 - n_P)^2 \cdot v_f \cdot L}{4 \cdot \rho \cdot g \cdot n_P^3 \cdot d_K^2}$$

## 7. Reaktionen in Filtern, durchströmtes Porensystem



Rohrbündelmodell

$$d_P = \frac{2}{3} \cdot \frac{n_P}{(1 - n_P)} \cdot d_w$$

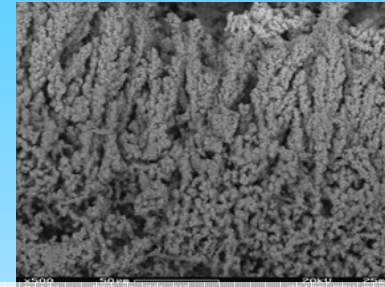
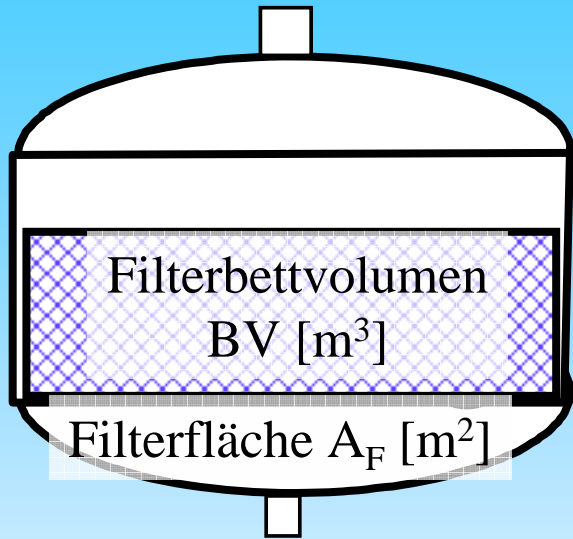
laminare Rohrströmung =>

Druckverlust

$$\frac{h_f}{v_f \cdot L} = \frac{1}{k_f} = 72 \cdot \frac{v}{g} \cdot \frac{f_L^2 (1 - n_P)^2}{n_P^3} \cdot \frac{1}{d_w^2}$$

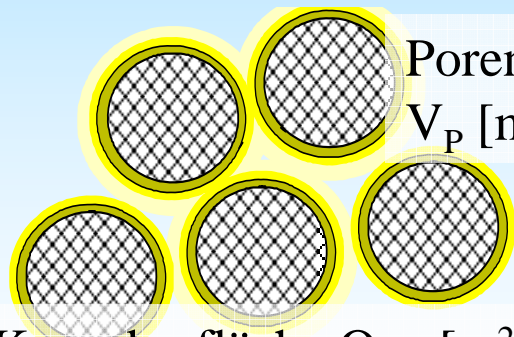
# Reaktionsräume und Oberflächen

# 7. Reaktionen in Filtern, Reaktionsräume und Oberflächen

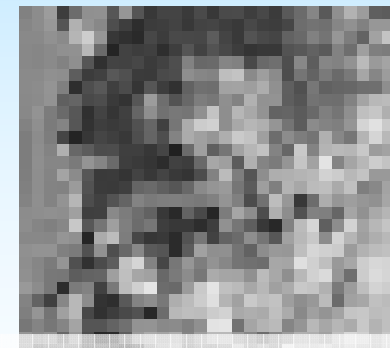


Feinporenoberfläche

Toträume,  
Adsorptions-  
wasser



Scherfläche der Porenkanalströmung

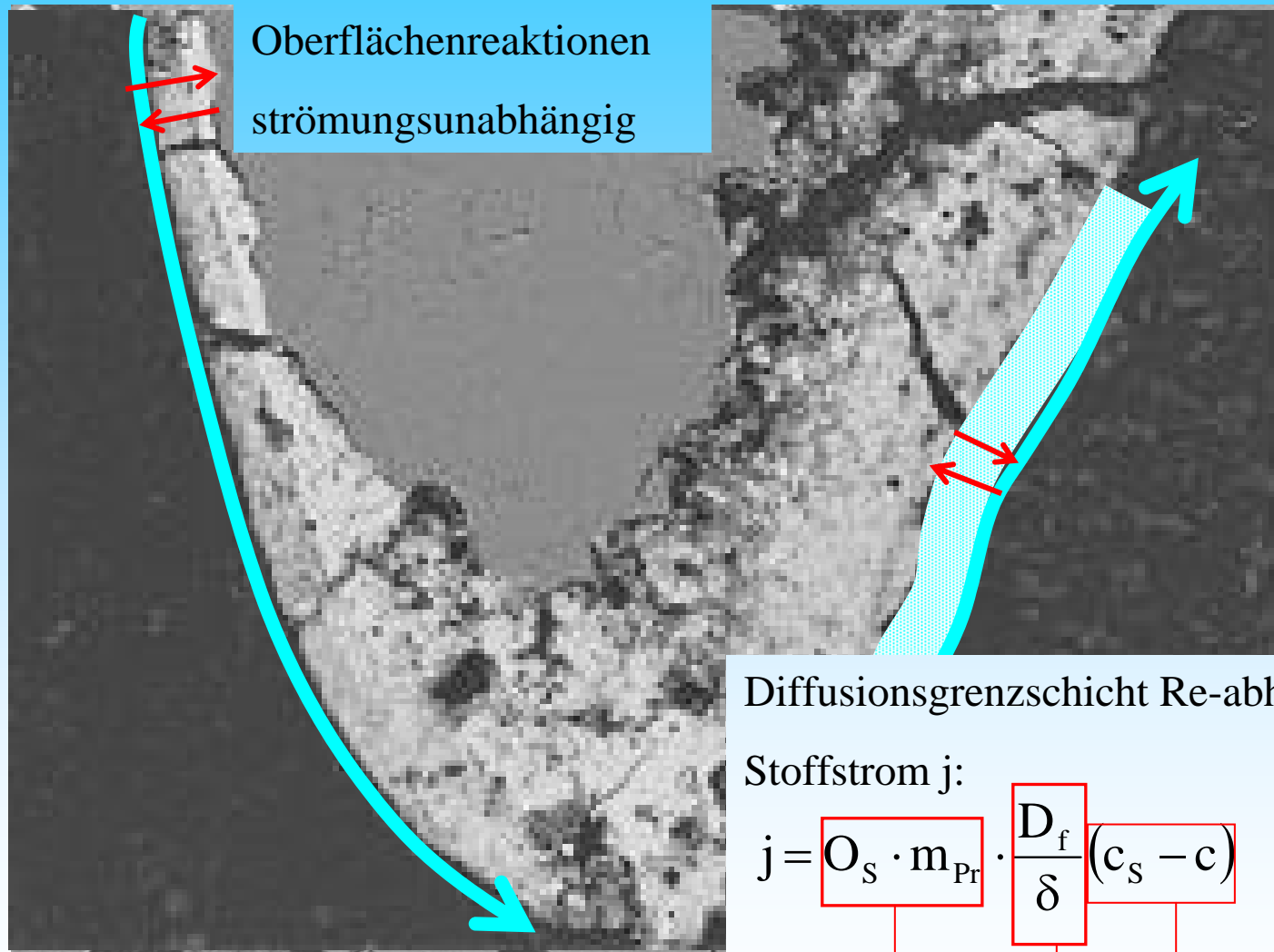


BET-Adsorptionsoberfläche  $[m^2/g]$

monomolekulare Stickstoffbelegung

Feuchte,  
Adsorptions-  
wasser

# 7. Reaktionen in Filtern, Oberflächenreaktionen



Oberflächenreaktionen  
strömungsunabhängig

Diffusionsgrenzschicht Re-abhängig

Stoffstrom j:

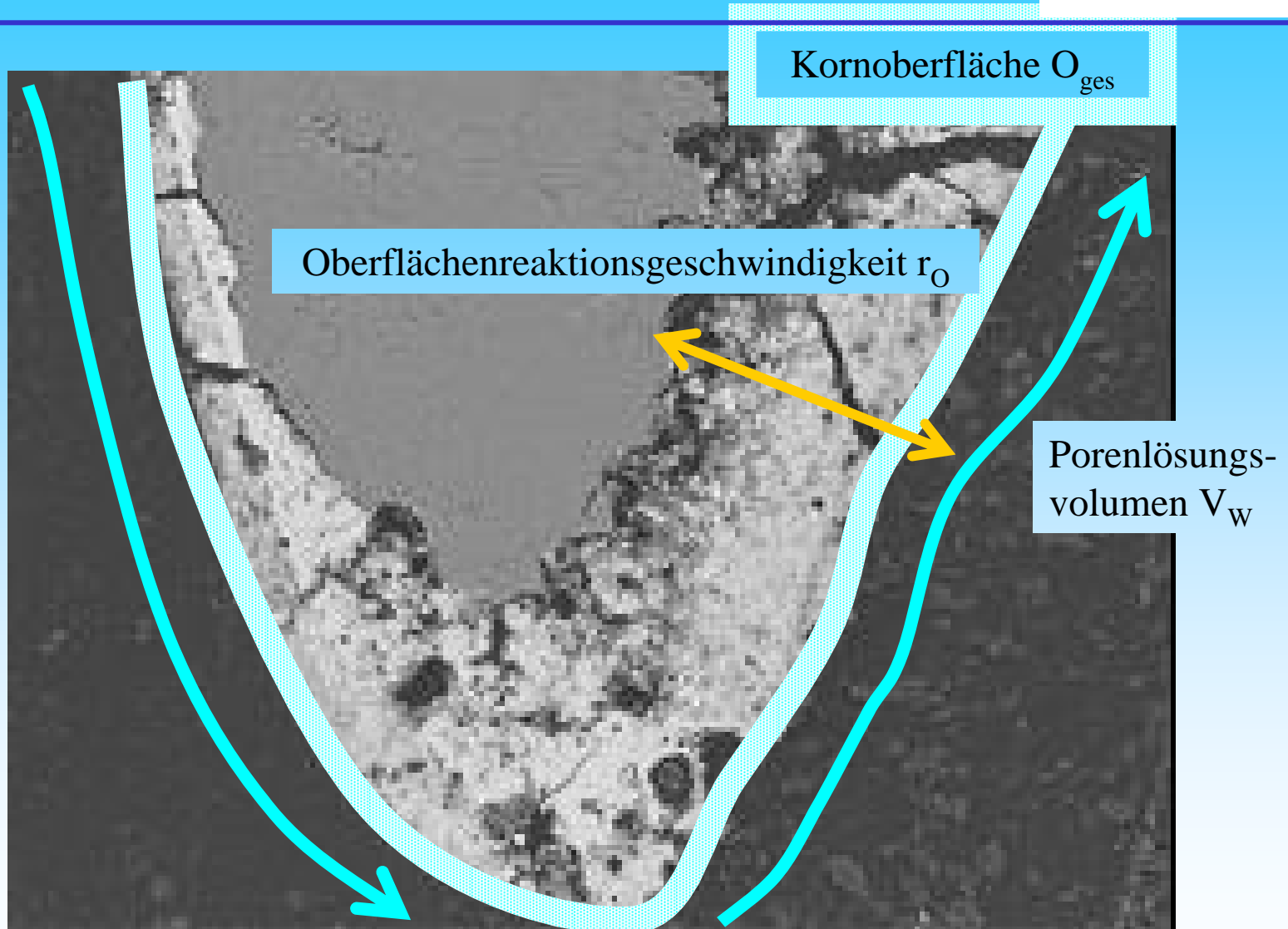
$$j = O_s \cdot m_{Pr} \cdot \frac{D_f}{\delta} (c_s - c)$$

Oberfläche

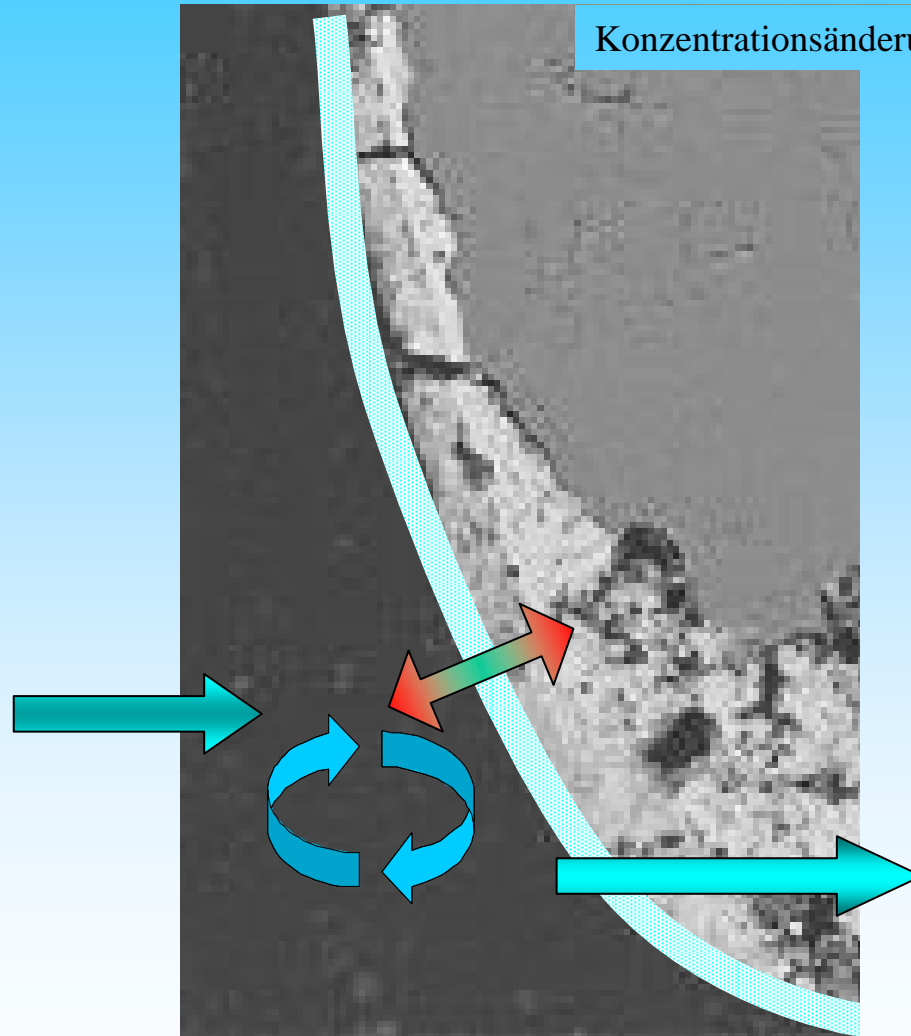
Stoffübergangskoeffizient  $\beta(Re)$

Konzentrationsdifferenz

## 7. Reaktionen in Filtern, Oberflächenreaktionen



# 7. Reaktionen in Filtern, Oberflächenreaktionen



Konzentrationsänderung = Konvektionsglied + Diffusionsglied + Reaktionsglied

$$\dot{c} = \left( \frac{\partial}{\partial t} c \right)_L = -\text{div}(\vec{v} \cdot c) + \text{div}(D \cdot \text{grad}(c)) + r$$

$$-\text{div}(\vec{v} \cdot c) = \frac{v_f}{n_p} \cdot \frac{\partial c}{\partial t}$$

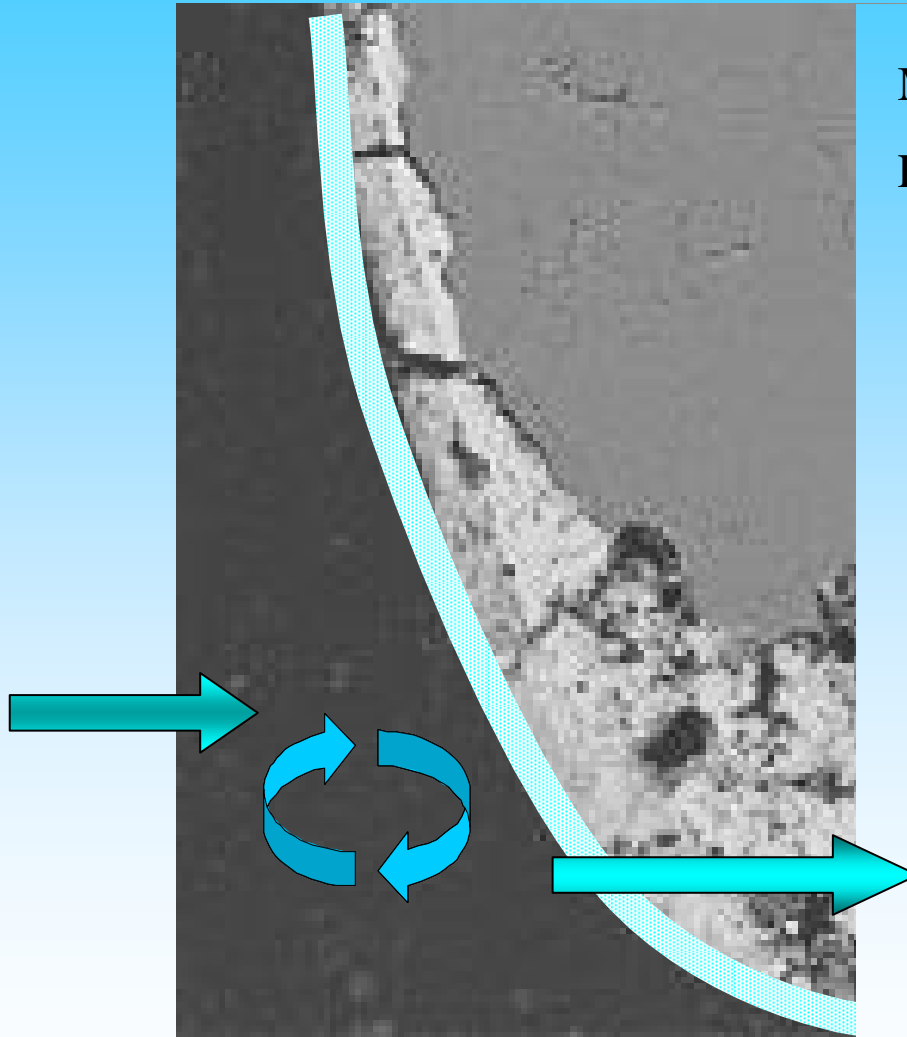
$$0$$

$$r = \frac{O_{\text{ges}}}{V_w} \cdot r_o + r_h$$

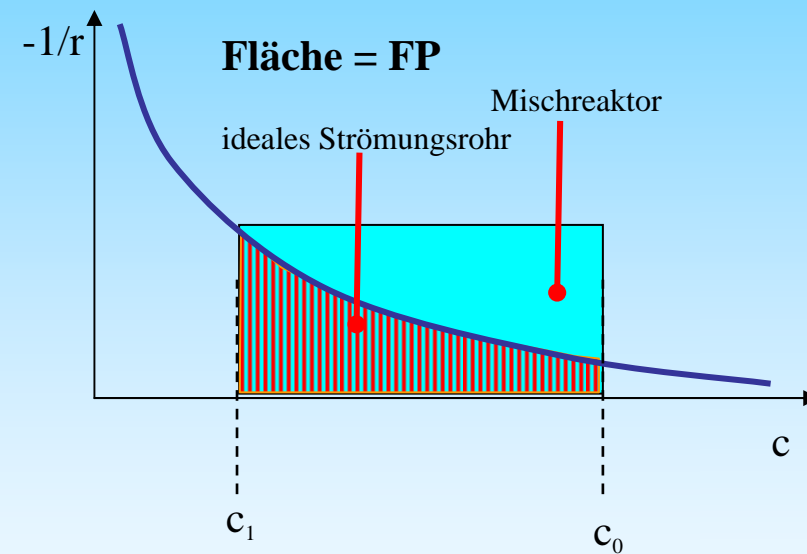
stationärer Zustand:

$$\dot{c} = -\frac{v_f}{n_p} \cdot \frac{\partial c}{\partial L} + \frac{O_{\text{ges}}}{V_w} \cdot r_o + r_h = 0$$

$$\int_{c_0}^c \left( -\frac{\partial c}{r_o} \right) = \frac{1}{v_A} \cdot \frac{O_{\text{ges}}}{V_w} \cdot L = FP$$

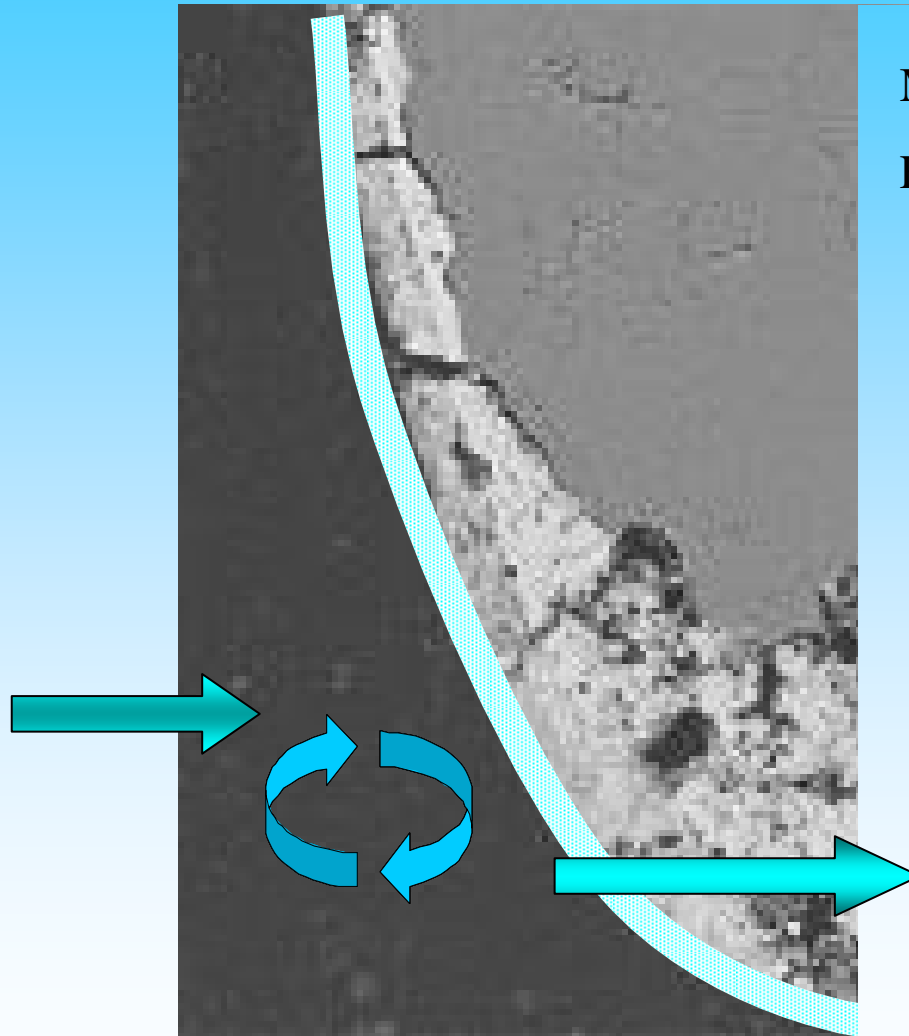


Maßstabsgröße für den Reaktionsfortschritt:  
Filtrationsparameter **FP**



$$\int_{c_0}^c \left( -\frac{\partial c}{r_O} \right) = \frac{1}{v_A} \cdot \frac{O_{ges}}{V_W} \cdot L = FP$$





Maßstabsgröße für den Reaktionsfortschritt:

Filtrationsparameter **FP**

$$FP = \frac{6 \cdot (1 - n_p)}{d_w \cdot v_f} \cdot L = \frac{6 \cdot (1 - n_p)}{d_w \cdot n_p} \cdot t$$

fließwegspezifisch

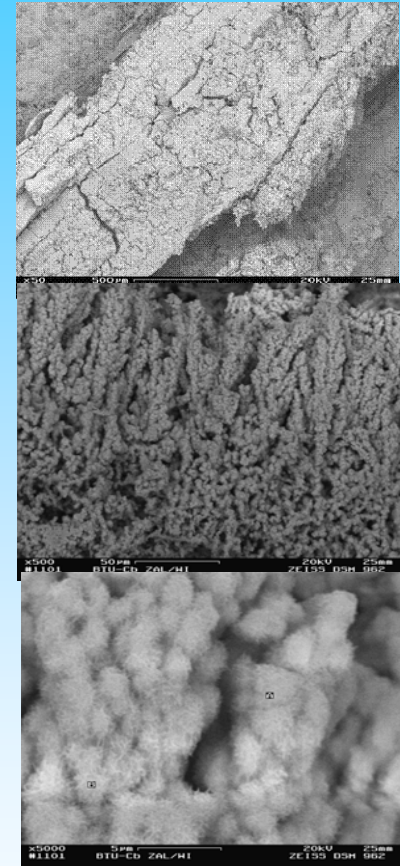
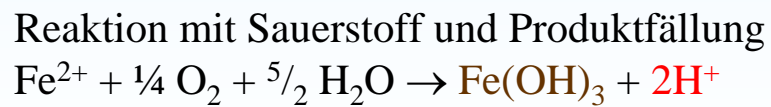
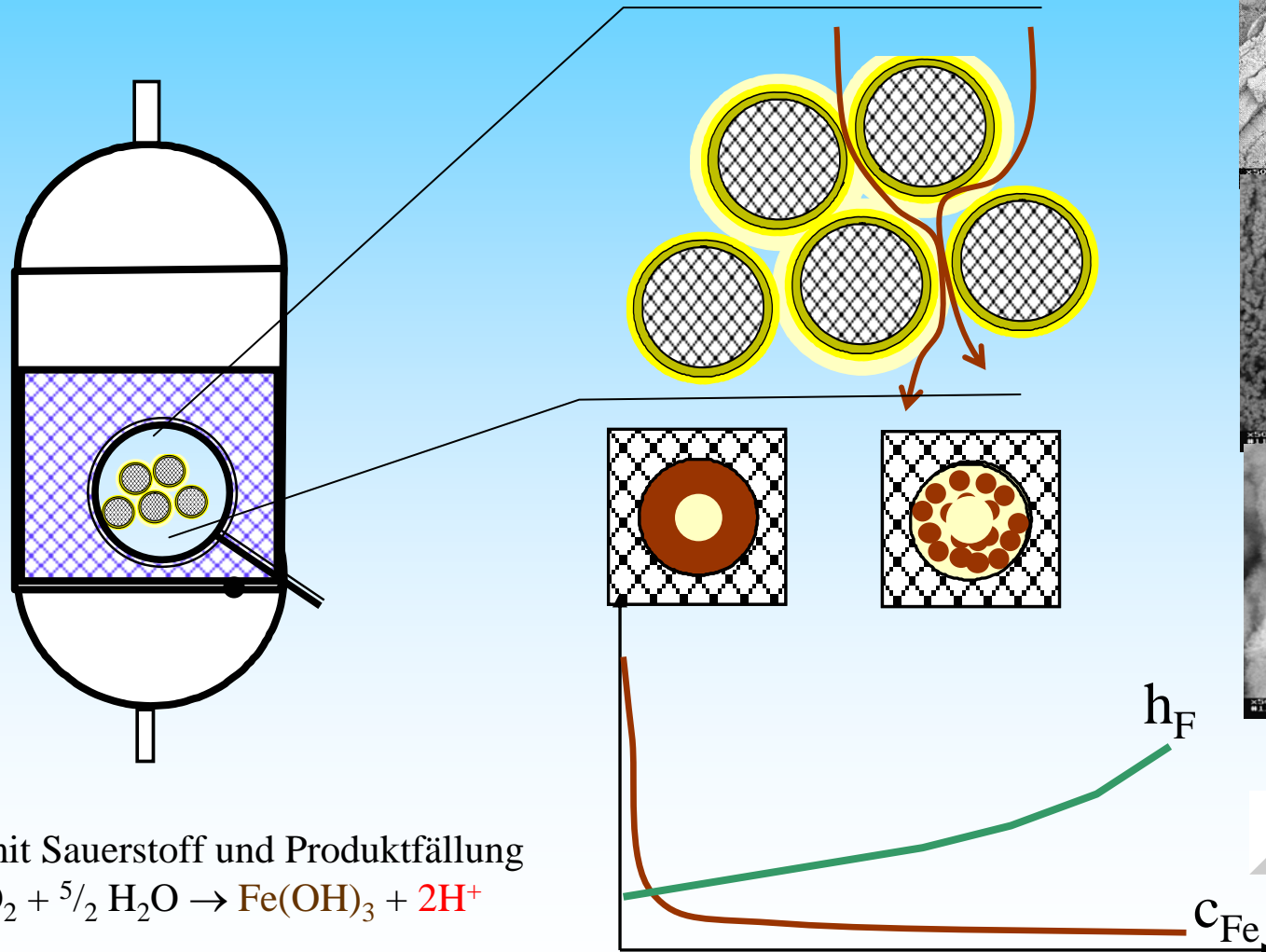
verweilzeitspezifisch

$$\int_{c_0}^c \left( -\frac{\partial c}{r_O} \right) = \frac{1}{v_A} \cdot \frac{O_{ges}}{V_w} \cdot L = FP$$

# Anwendung auf die Filtration in der Wasseraufbereitung

# 7. Reaktionen in Filtern, Anwendung auf Eisen(II)filtration

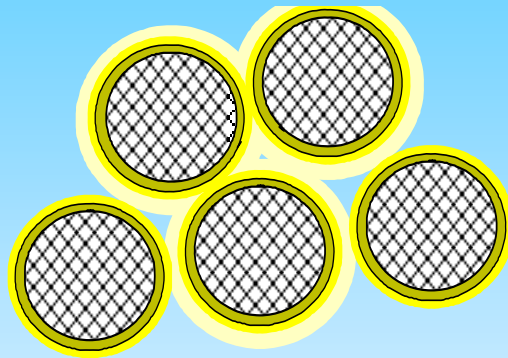
Beispiel:  
Autokatalytische Eisen(II)filtration



Details überspringen

## Beispiel: Autokatalytische Eisen(II)filtration

nach Stumm & Morgan (1971, /R0945/) für die homogene Reaktion:



$$\frac{\partial c_{\text{Fe}^{2+}}}{\partial t} = k \cdot c_{\text{OH}}^2 \cdot p\text{O}_2 \cdot c_{\text{Fe}^{2+}}$$

$$k = 1,33 \cdot 10^{12} \cdot \text{L}^2 / (\text{mol}^2 \cdot \text{atm} \cdot \text{s}) \text{ bei } 25^\circ\text{C}$$

$$r_{\text{O}} = O_{\text{S}} \cdot m_{\text{Pr}} \cdot \frac{D_{\text{f}}}{\delta} (c_{\text{S}} - c)$$

Konzentrationsdifferenz

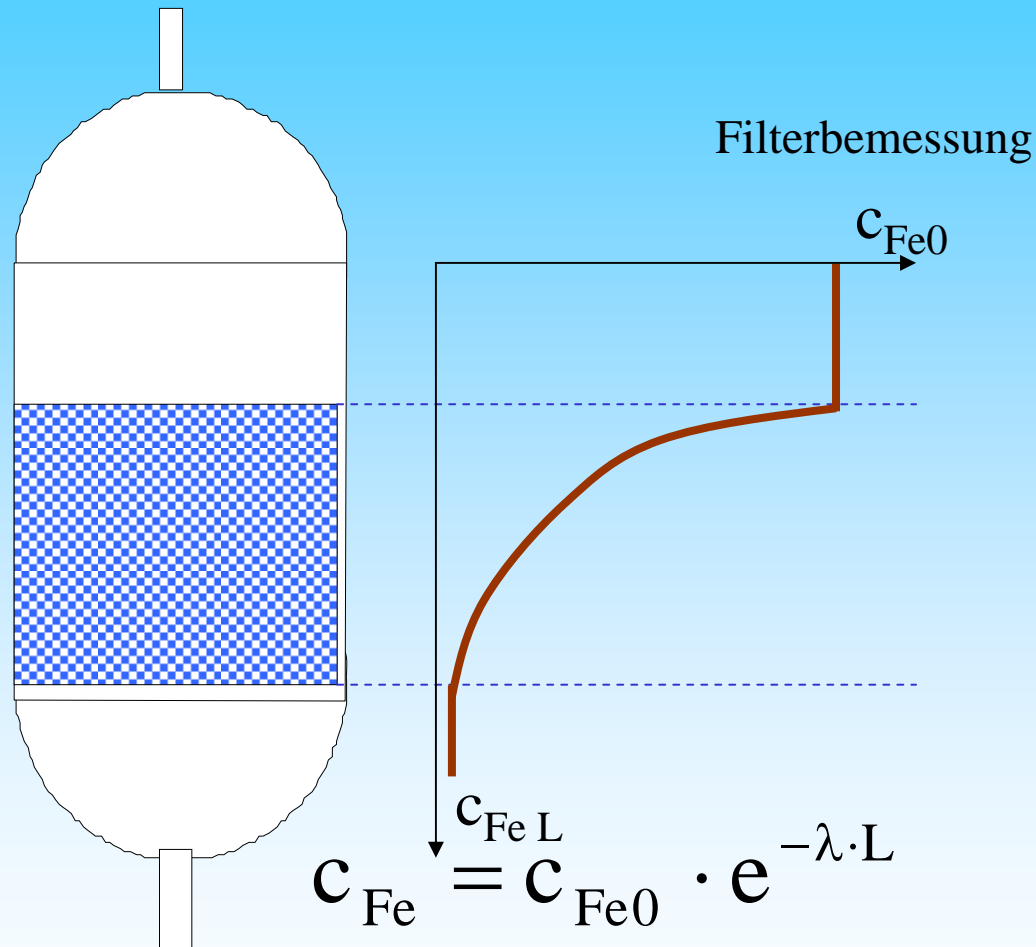
Oberfläche    Stoffübergangskoeffizient  $\beta$

als Funktion der Strömungsverhältnisse

(Reynoldszahl, ...)

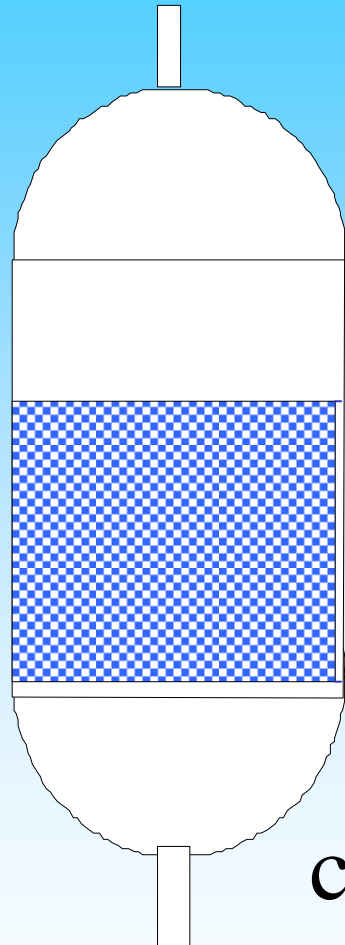
$$r_{\text{O}} = \lambda(\text{pH}, \text{Temp}, \dots) \cdot c_{\text{Fe}}$$

## 7. Reaktionen in Filtern, Anwendung auf Eisen(II)filtration



Die Reaktionsgeschwindigkeit hängt entscheidend von der mit aktivem Eisenhydroxid belegten Kornoberfläche und deren Sorptionskapazität ab.

# 7. Reaktionen in Filtern, Anwendung auf Eisen(II)filtration



nach Kittner

$$-\lambda = \ln\left(\frac{c_{FeL}}{c_{Fe0}}\right) = f_H \frac{3 \cdot (pH - 6,2) \cdot Temp^{0,8}}{c_{Fe0}^{0,1}} \cdot \frac{L}{d_w \cdot v_E^{0,78}}$$

nach Rathsack

$$-\lambda = \ln\left(\frac{c_{FeL}}{c_{Fe0}}\right) = \frac{k_0 \cdot \max\left\{\frac{(pH_0 - 6,2)}{(0,11 \cdot pH_0 - 0,24)}\right\}}{\exp\left(\frac{E_A}{RT} + 2,04 \cdot \sqrt{\frac{I}{1 \text{ mol/L}}}\right)} \cdot \frac{L}{d_w \cdot v_f^{0,7}}$$

$$c_{Fe} = c_{Fe0} \cdot e^{-\lambda \cdot L}$$

# 7. Reaktionen in Filtern, Anwendung auf Eisen(II)filtration

$$\ln\left(\frac{c_X}{c_{X0}}\right) = f(\text{Temp, pH, ...}) \cdot \text{FP} \quad \text{Filterkonstruktion}$$

Zeitgesetz

$$\left\{ \begin{array}{ll} d_w = 3 \text{ mm} & v_f = 30 \text{ m/h} \\ d_w = 1 \text{ mm} & v_f = 3 \text{ m/h} \end{array} \right\} \Rightarrow \text{Re} = 3..90$$

$$v_f = f_H \left[ \frac{3 \cdot (\text{pH} - 6,2) \cdot \text{Temp}^{0,8} \cdot L}{c_0^{0,1} \cdot \ln\left(\frac{c_0}{c_L}\right)} \cdot \frac{1}{d_w} \right]^{1,28}$$



$$\ln\left(\frac{c_L}{c_0}\right) = - \frac{6 \cdot 10^{-4} (\text{pH} - 6,2) \cdot \text{Temp}^{0,8}}{c_0^{0,1}} v_f^{0,22} \cdot \text{FP}$$

# 7. Reaktionen in Filtern, Anwendung auf Filtration

$$\ln\left(\frac{c_X}{c_{X0}}\right) = \lambda = f(\text{Temp, pH, ...}) \cdot \text{FP}$$

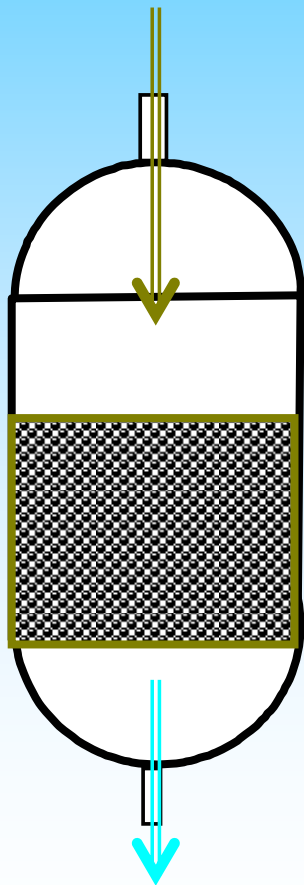
$$\lambda = \frac{6 \cdot 10^{-4} (\text{pH} - 6,2) \cdot \text{Temp}^{0,8}}{c_0^{0,1}} \cdot v_f^{0,22} \cdot \text{FP}$$

Verfahren		Bemessung	Strömung
Autokatalytische Enteisung	Sand	KITTNER et al. (1975)	$v_f^{0,22}$
		RATHSACK (1996)	$v_f^{0,3}$
	halbg.Dol.	KITTNER et al. (1975)	$v_f^{0,333}$
Autokatalytische Entmanganung	Sand	Lamm zit. KITTNER et. al (1975)	$v_f^{-0,1}$
		BOHM (1992)	$v_f^{0,375}$
Entsäuerung	halbg.Dol.	it. KITTNER et al. (1975)	$v_f^0$



Anwendung von FP zum Vergleich der ungewollten Sauerstoffzehrung von biologisch wirksamen Filtern

$$R_{O_2} = \frac{\Delta c_{O_2}}{FP} \quad [mg/(m^2 \cdot h)] \quad \text{für } c_{O_2} > 1 \text{ mg/L}$$

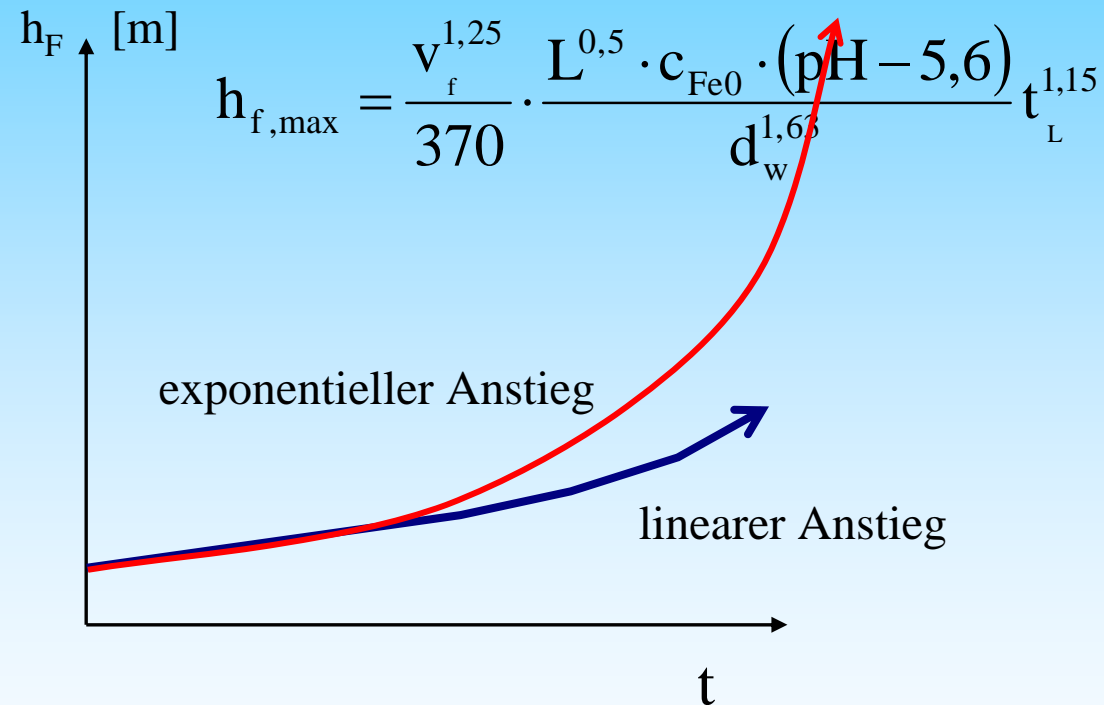


Projekt	Filter	R <sub>O<sub>2</sub></sub>		
Görlitz/Weinhübel 1981	Schnellfilter	2	...	10
	Langsamfilter	0,02	...	0,1
WW Berlin / Friedrichshagen 1980	Versuchsschnellfilter	5	...	12
	Versuchslangsamfilter	0,6	...	1
	Langsamfilter WW	0,15	...	0,25
WW Frankfurt/O 1989	Versuchslangsamfilter	≈0,2		

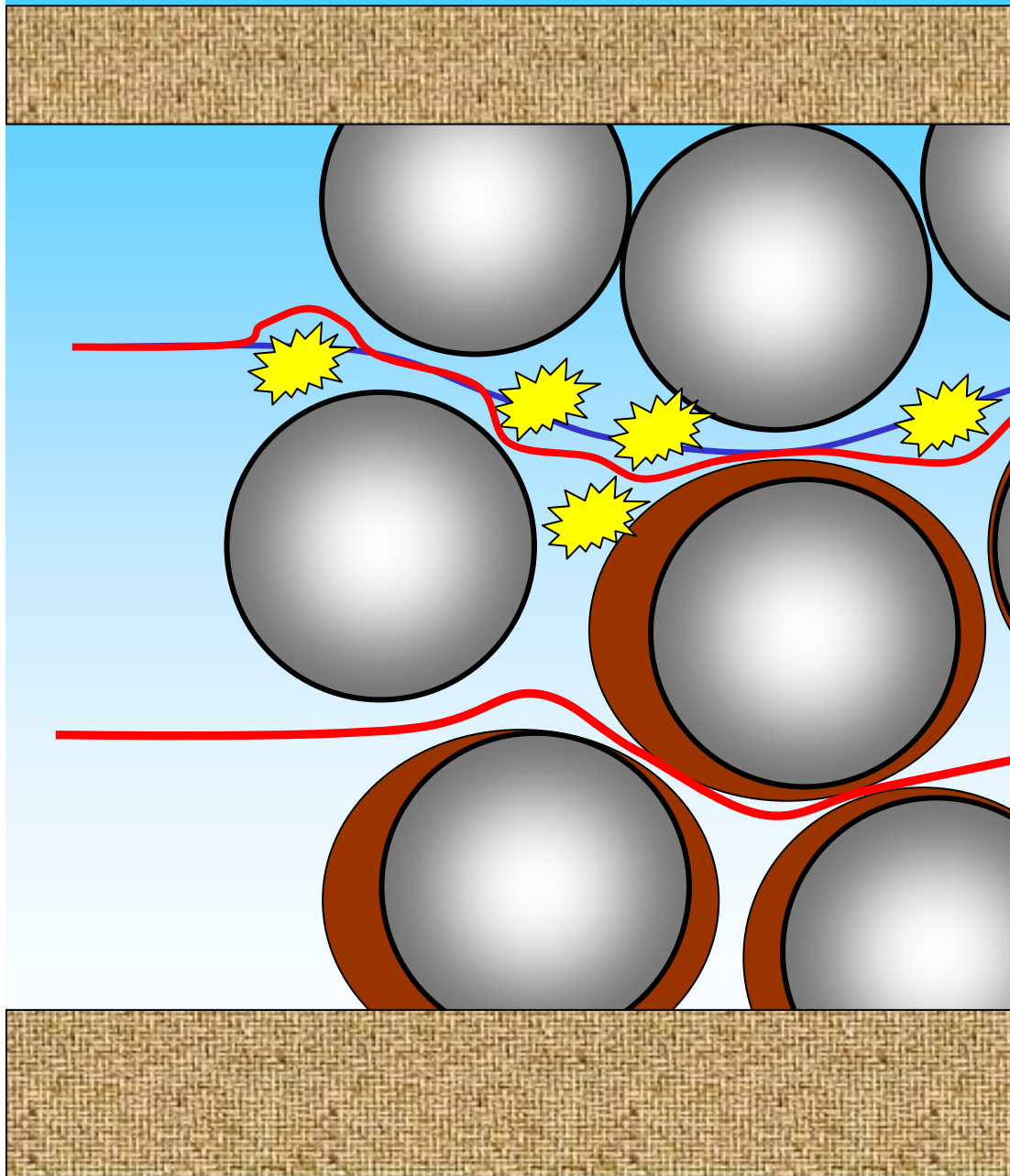
# Filterwiderstand, Druckverlust

## Filterwiderstandsentwicklung, Raum-, Tiefenfiltration

Nach der Überarbeitung von /R2398/



$$t_L = \left( \frac{370 \cdot h_{f,\max}^{0,8} \cdot d_w^{1,3}}{v_f \cdot L^{0,4} \cdot c_{\text{Fe0}}^{0,8} \cdot (\text{pH} - 5,6)} \right)^{1/0,92}$$



Volumenanteil  $\varphi$  am Porenvolumen

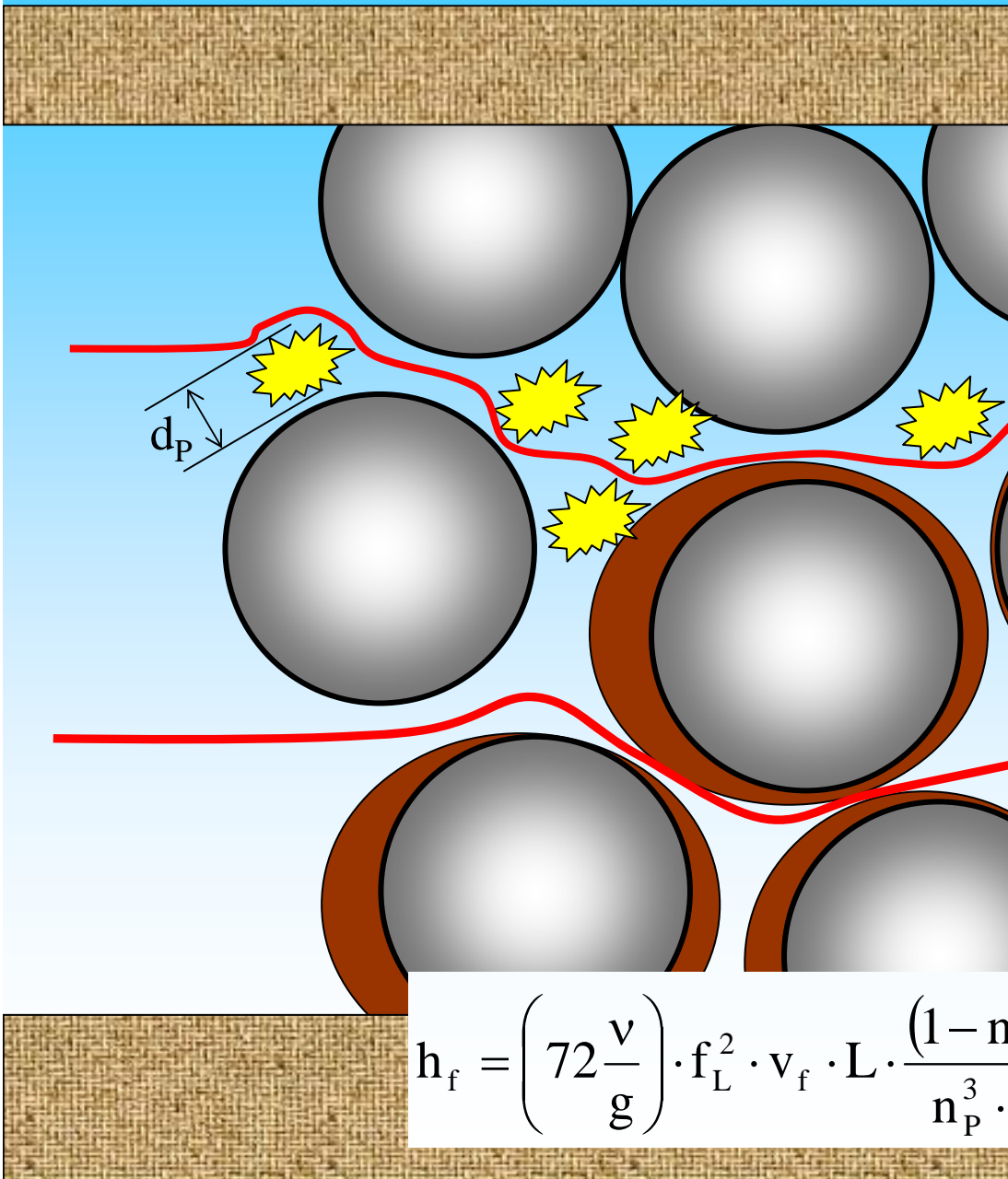
$$\varphi = \sum V_{S_i} \cdot c_i \quad [L/L]$$

$$n_P(\varphi) = n_{PG} \cdot (1 - \varphi)$$

Mineralneubildung als Einlagerung

Mineralneubildung als Ummantelung

Filterwiderstand mit Mineraleinlagerungen neu berechnen



Bei konstanter Scherfläche

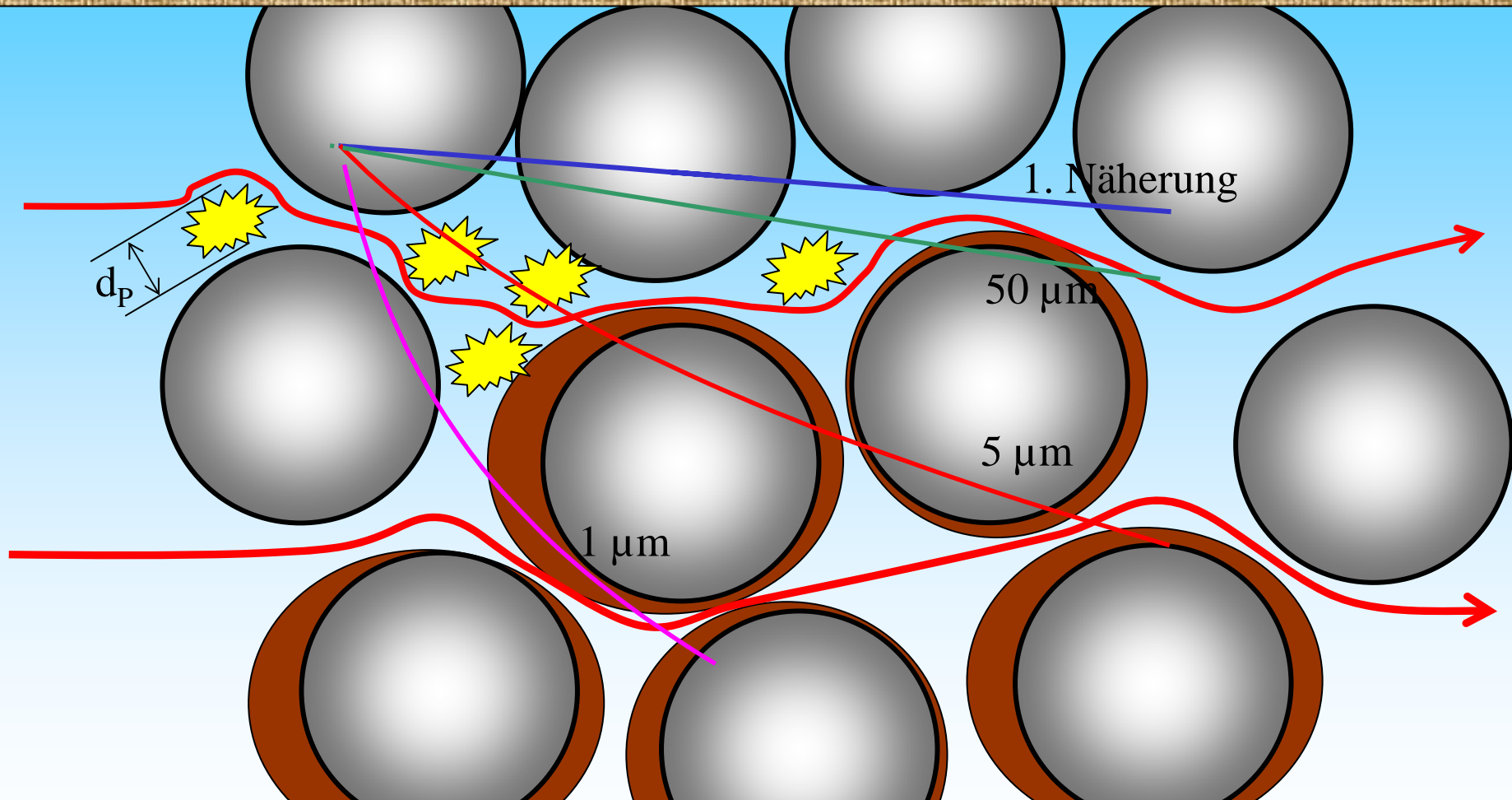
$$h_f = \left( 72 \frac{v}{g} \right) \cdot f_L^2 \cdot \frac{(1 - n_{PG} + \varphi)^2}{n_P^3 \cdot (1 - \varphi)^3} \cdot \frac{v_f \cdot L}{d_K^2}$$

Die Veränderung der Scherfläche wird berücksichtigt, indem den Partikeln ein **Durchmesser  $d_p$**  zugeschrieben wird.

Index G für Gerüst

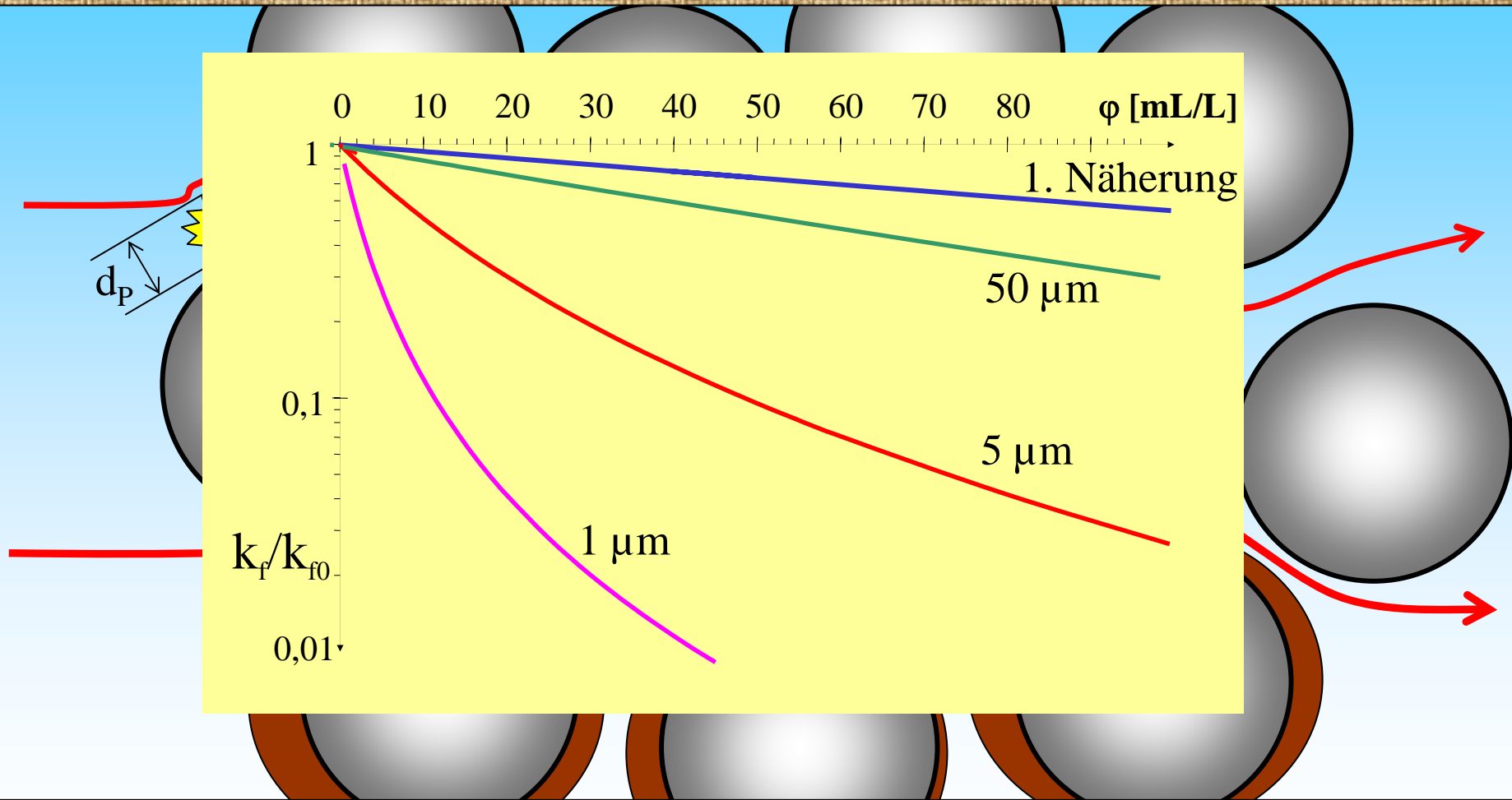
$$h_f = \left( 72 \frac{v}{g} \right) \cdot f_L^2 \cdot v_f \cdot L \cdot \frac{(1 - n_{PG} + \varphi)^2}{n_P^3 \cdot (1 - \varphi)^3} \cdot \left( \frac{1}{d_G} + \frac{n_{PG}}{1 - n_{PG}} \cdot \sum_i \frac{V_i \cdot c_i}{d_i} \right)^2$$

## 7. Reaktionen in Filtern, Filterwiderstand



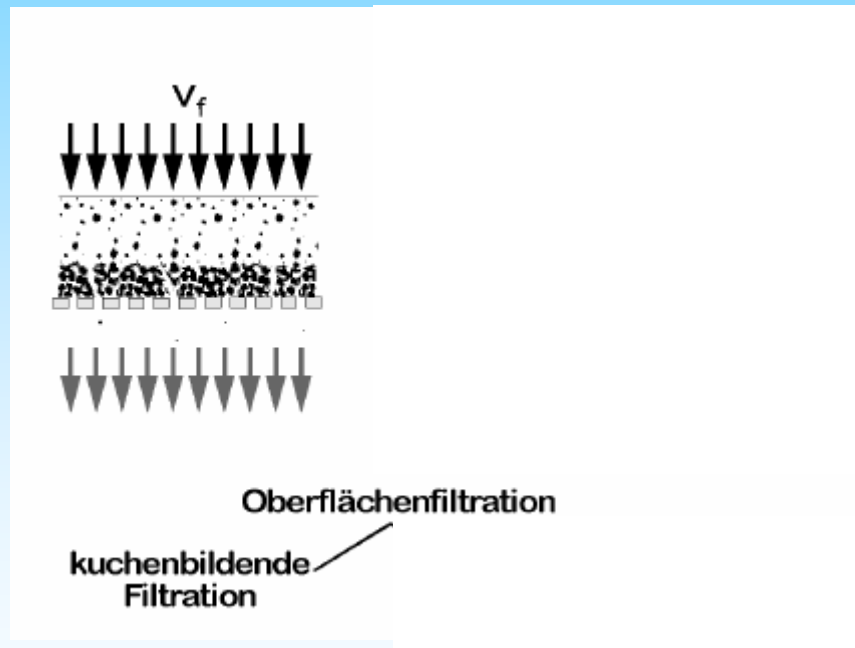
$k_f$ -Wertminderung durch Porenraumbelegung mit unterschiedlichen Partikeldurchmessern

# 7. Reaktionen in Filtern, Filterwiderstand

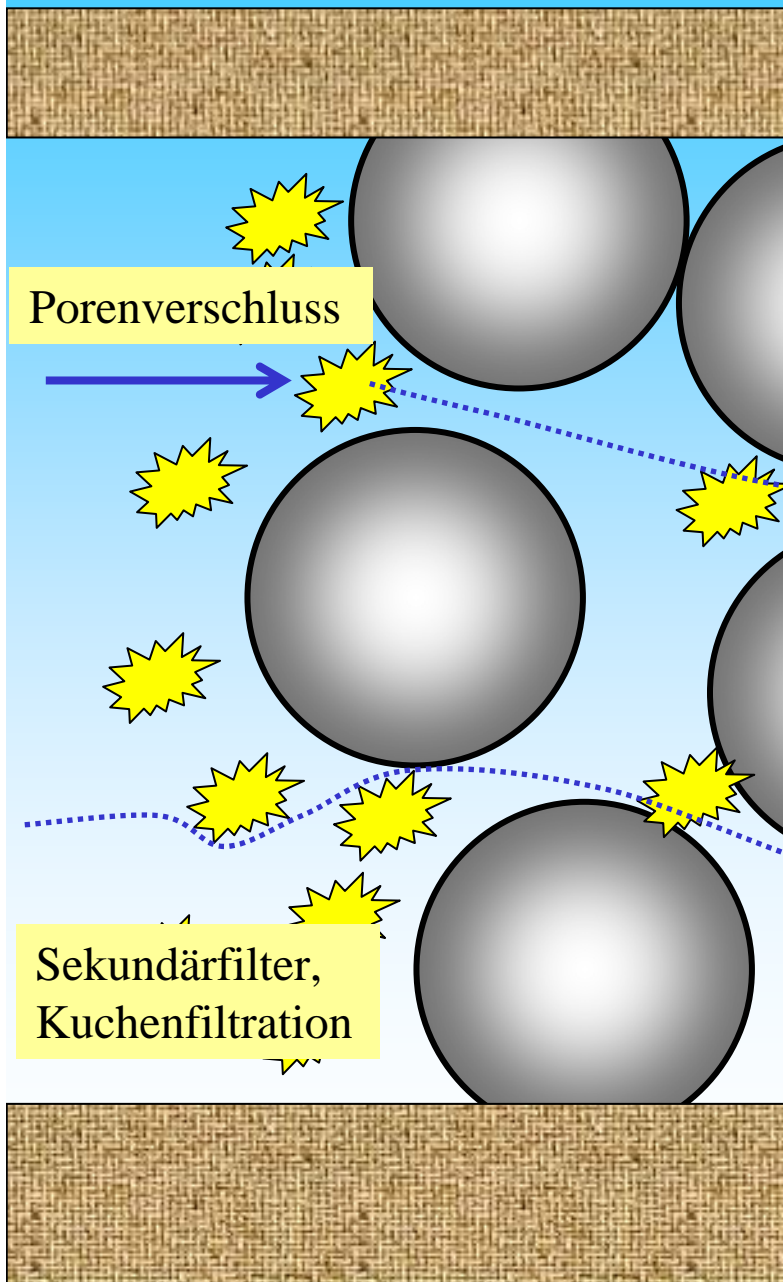


$k_f$ -Wertminderung durch Porenraumbelegung mit unterschiedlichen Partikeldurchmessern

## Filterwiderstandsentwicklung, kuchenbildende Filtration







Invasionsphase:

abnehmender durchströmter Querschnitt  $A_F$

$$v_f = \frac{A_F}{A_{F0}} v_{f0} \quad H_K \text{ [m] durchflossene Wassersäule bis zum Porenverschluss}$$

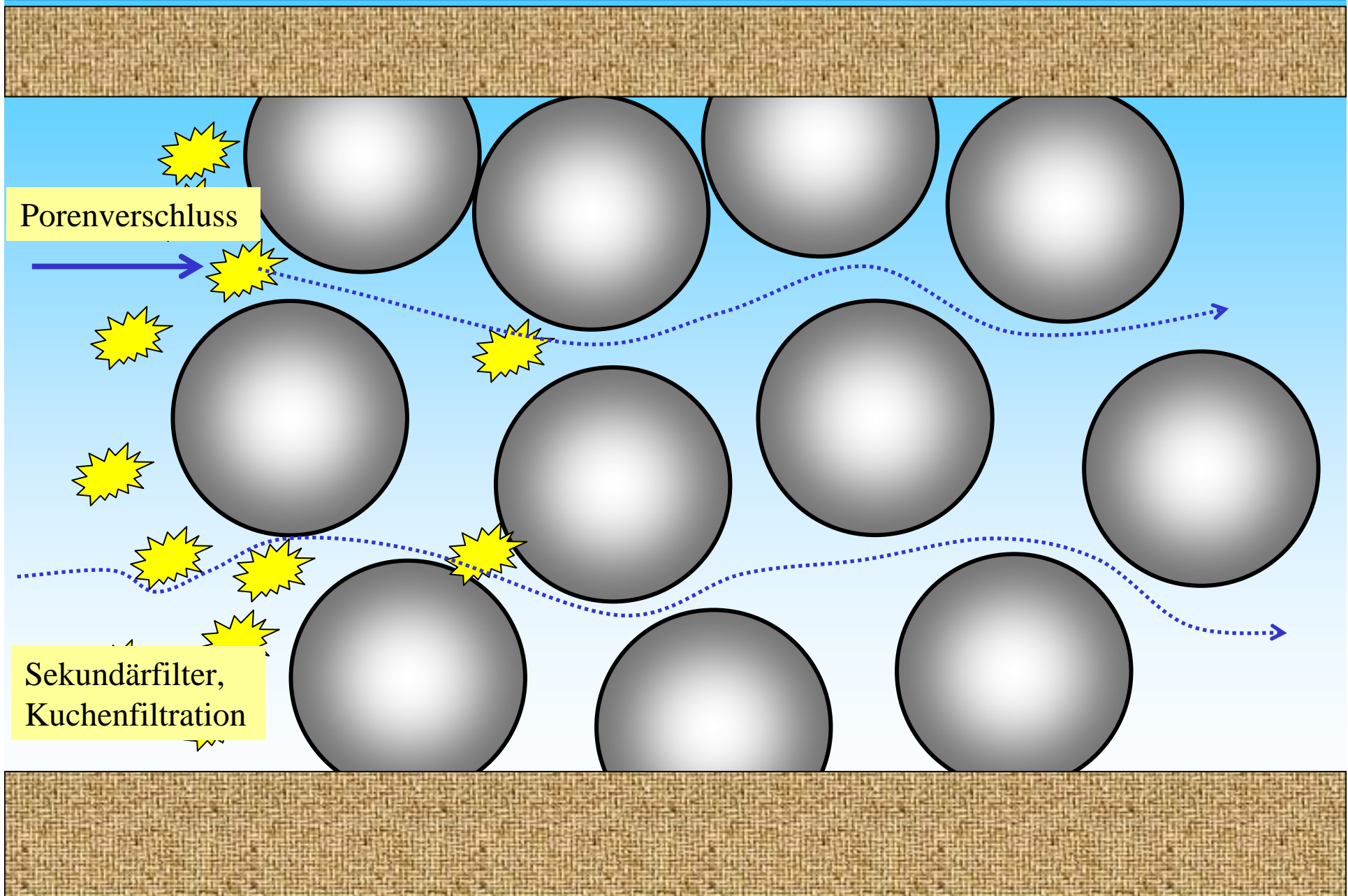
$$\frac{v_f}{h_f} = \frac{v_{f0}}{h_{f0}} \cdot \frac{(H_K - H)}{H_K} = \frac{v_{f0}}{h_{f0}} \cdot \left( 1 - \frac{H}{H_K} \right)$$

Kolmationsphase:

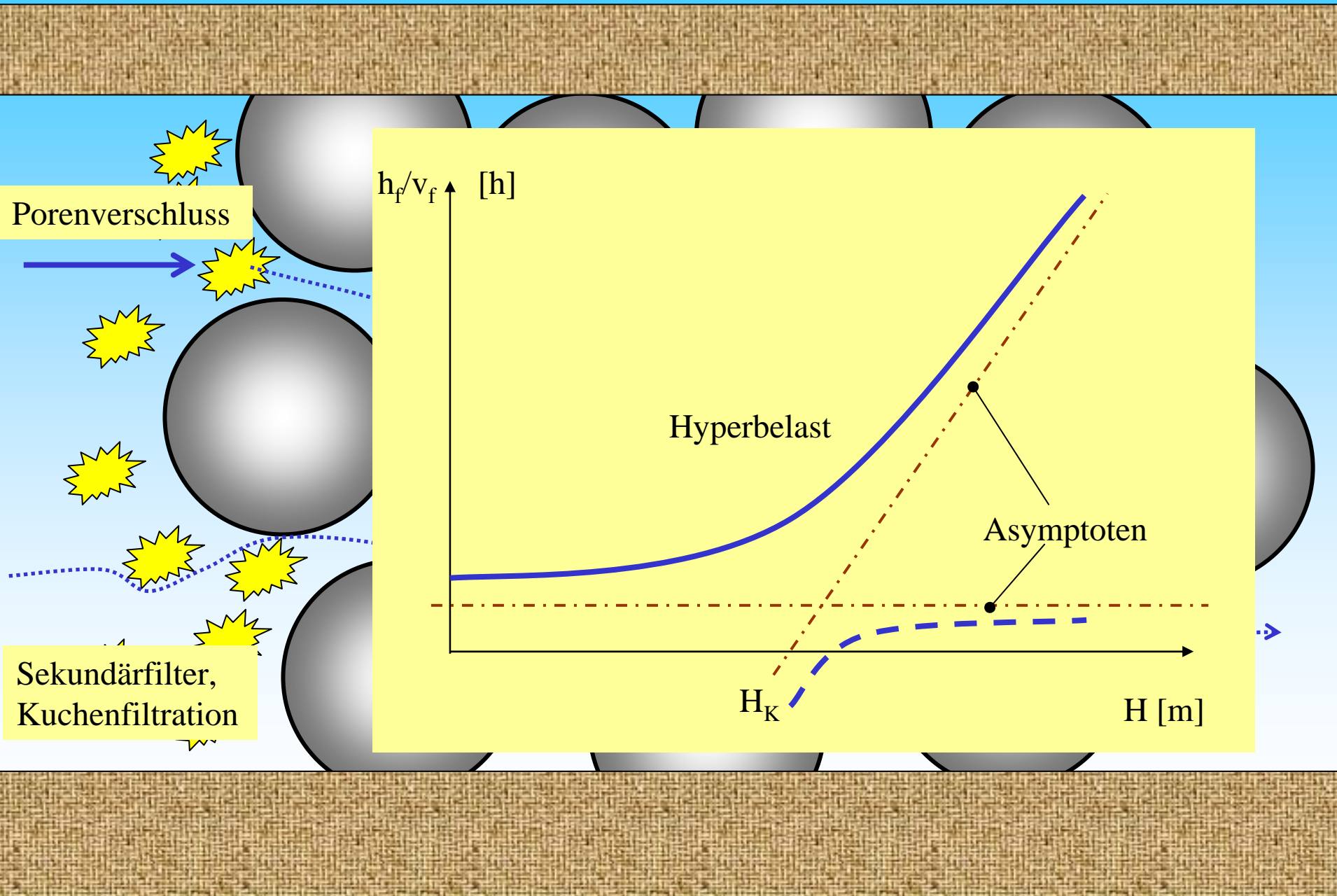
Durchströmung des sich aufbauenden Filterkuchens mit der Durchlässigkeit  $k_f$

$$\frac{h_f}{v_f} = \frac{h_{f0}}{v_{f0}} + \gamma \cdot (H - H_K)$$

# 7. Reaktionen in Filtern, Filterwiderstand

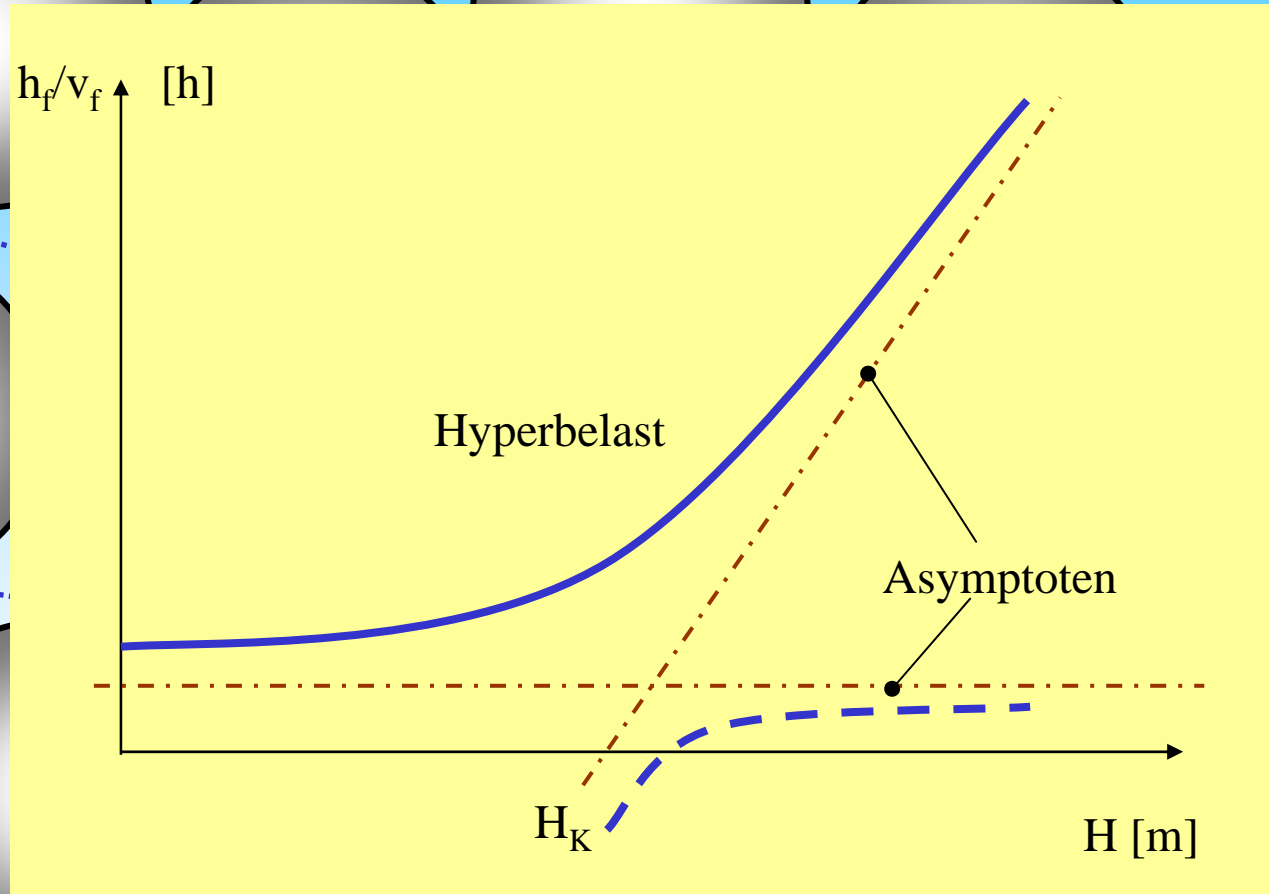


# 7. Reaktionen in Filtern, Filterwiderstand



Porenverschluss

Sekundärfilter,  
Kuchenfiltration



## 7. Reaktionen in Filtern, einfacher Transport mit Reaktion

Beispiel eines reaktiven Transportes:

Mögliche Vorgänge entlang eines Membranmoduls

Aufgabe: Entlang eines Membranmoduls wird der strömenden Lösung Wasser entzogen.

Wann können welche Minerale ausfallen?

SOLUTION 0-10 Porenlösung

temp 10  
pH 7.5  
pe 4  
redox pe  
units mg/l  
density 1  
Na 230  
Ca 100  
S(6) 400  
Cl 1 charge  
Alkalinity 50

SAVE solution 0-10

EQUILIBRIUM\_PHASES 1-10

Calcite 0 0  
Gypsum 0 0

TRANSPORT

-cells 10  
-shifts 40  
-lengths 10\*1

REACTION 1-10


H2O -1  
5 moles

Rg71.pqi

zB71.xls

# 7. Reaktionen in Filtern, einfacher Transport mit Reaktion

## Beispiel Untergrundsulfatreduktion (Skadodamm)

 Schriftenreihe  
Siedlungswasserwirtschaft und Umwelt

Heft 11

---

KOCH, R.; SCHÖPKE, R.; MANGOLD, S.; REGEL, R.; STRIEMANN A.

**Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur Untergrundsäuerung von Kippengrundwässern**

Ergebnisse der kostenneutralen Verlängerung des BMBF-Verbundthemas:  
Experimentelle und modellgestützte Entwicklung von Verfahren der geochemischen Grundwasser- und Untergrundbehandlung zur Gefahrenabwehr im Nordraum des Senftenberger Sees

BMBF 02-WB 0068

Cottbus 2006

---

Herausgeber:  
Lehrstuhl Wassertechnik und Siedlungswasserbau  
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. R. Koch  
ISBN 3-934294-17-0

 Schriftenreihe  
Siedlungswasserwirtschaft und Umwelt

Heft 9

---

Volker Preuß

**Entwicklung eines biochemischen Verfahrens zur Aufbereitung sulfathaltiger Wässer am Beispiel der Entsäuerung schwefelsaurer Tagebauseen**

Cottbus 2004

---

Herausgeber:  
Lehrstuhl Wassertechnik und Siedlungswasserbau  
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. R. Koch  
ISBN 3-934294-11-1

 Schriftenreihe  
Siedlungswasserwirtschaft und Umwelt

Heft 15

---


SCHÖPKE, R.; KOCH, R.; MANGOLD, S.; REGEL, R.; STRIEMANN A.

**Herstellung passiver reaktiver Wände (PRW) aus Braunkohlefilterasche mittels Rütteldruckverfahren im Skadodamm**

Cottbus 2007

---

Herausgeber:  
Lehrstuhl Wassertechnik und Siedlungswasserbau  
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. R. Koch  
ISBN 3-934294-21-9

 Schriftenreihe  
Siedlungswasserwirtschaft und Umwelt

Heft 21

---

**Ralph Schöpke, Martin Gast, Manja Walko, Ralf Regel,  
Roland Koch, Konrad Thürmer**

Wissenschaftliche Auswertung von Sanierungsversuchen zur Untergrundsulfatreduktion im ehemaligen Lausitzer Bergbaurevier

Cottbus 2011

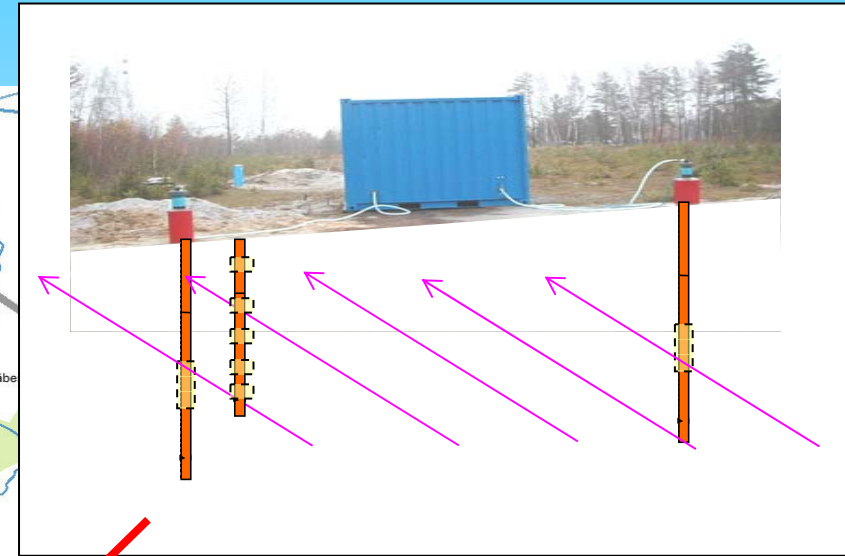
---

Herausgeber:  
Lehrstuhl Wassertechnik und Siedlungswasserbau  
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. R. Koch  
ISBN 3-934294-28-6

# 7. Reaktionen in Filtern, z.B. Skadodamm

Der Lehrstuhl Wassertechnik & Siedlungswasserbau der BTU Cottbus befasst sich seit Ende der 1990-iger Jahre mit der Sulfatreduktion zur Sanierung bergbauversauerter Wässer.

Technikumsversuche zur Seewasserbehandlung des RL111 in Enclosure-Bioreaktoren



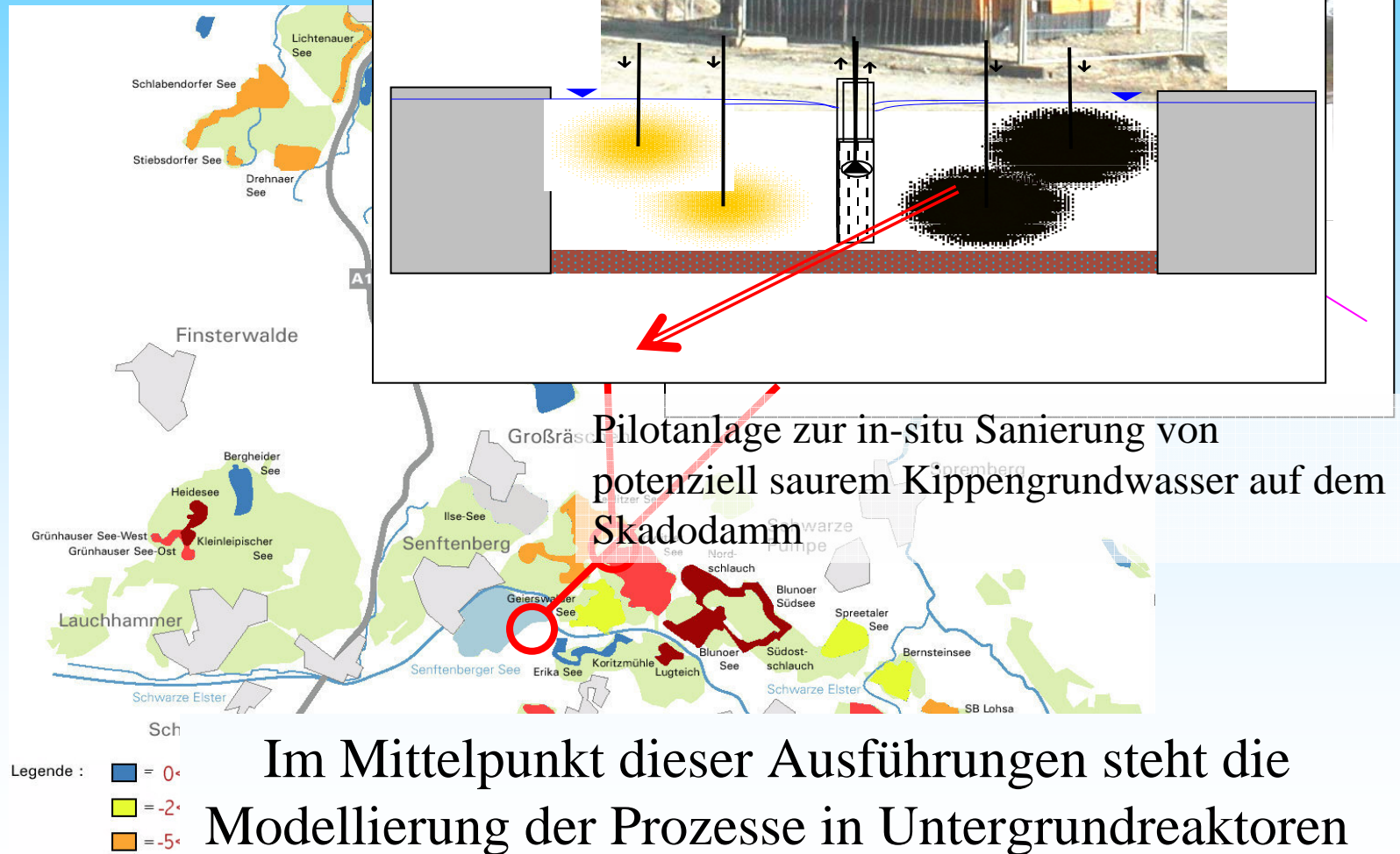
Feldversuche am südlichen Grundwasseranstrom an den Senftenberger See

- Sch
- = 0<sup>+</sup>
  - = -2<sup>+</sup>
  - = -5<sup>+</sup>

Im Mittelpunkt dieser Ausführungen steht die Modellierung der Prozesse in Untergrundreaktoren

# 7. Reaktionen in Filtern, z.B. Skadodamm

Der Lehrstuhl Wassertechnik & Siedl  
1990-iger Jahre mit der Sulfatreduktio

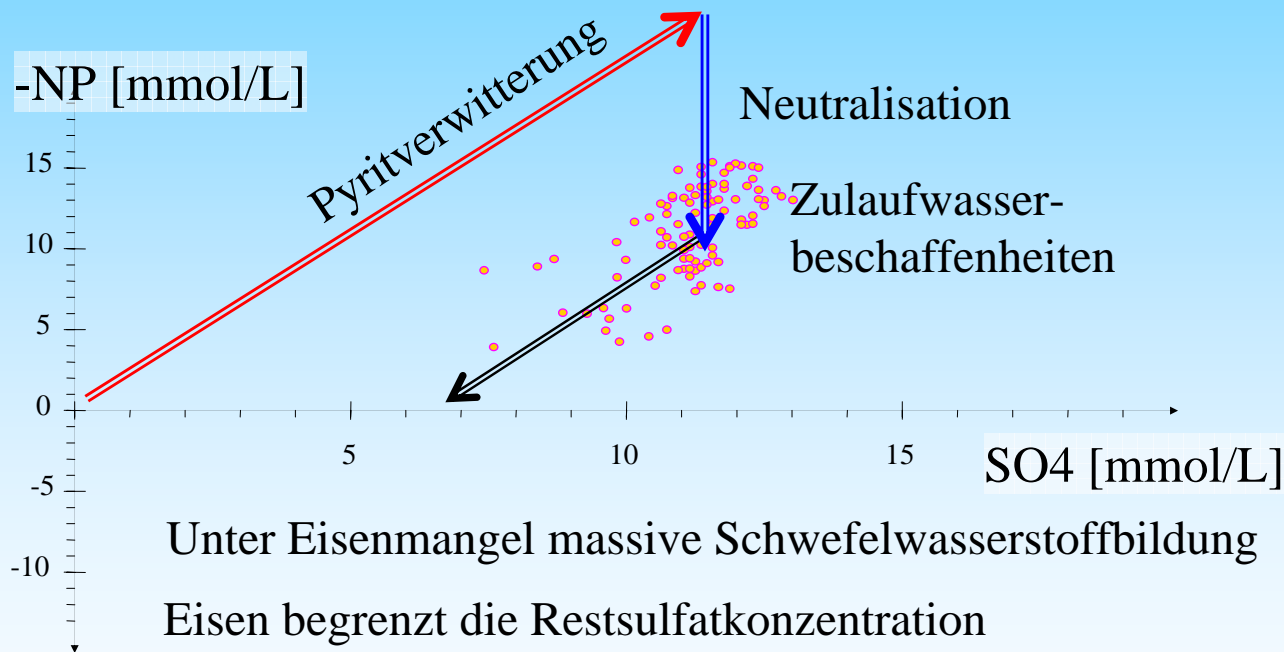


# 7. Reaktionen in Filtern, z.B. Skadodamm

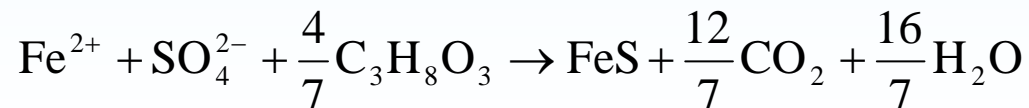
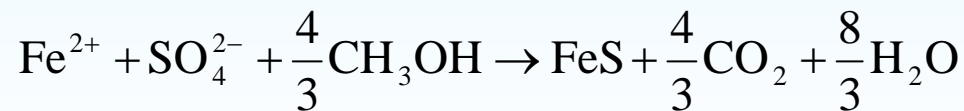
Ziel: Sanierung bergbauversauerter Wässer

Neutralisationspotenzial als Maß der Acidität

$$NP \approx K_{S4,3} - 2 \cdot c_{Fe2} - 3 \cdot c_{Al} - 2 \cdot c_{Mn}$$



Parameter		Zulauf
pH	1	5,5
NP	mmol/L	-10
Fe	mg/L	290
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	1100
DOC	mg/L	24

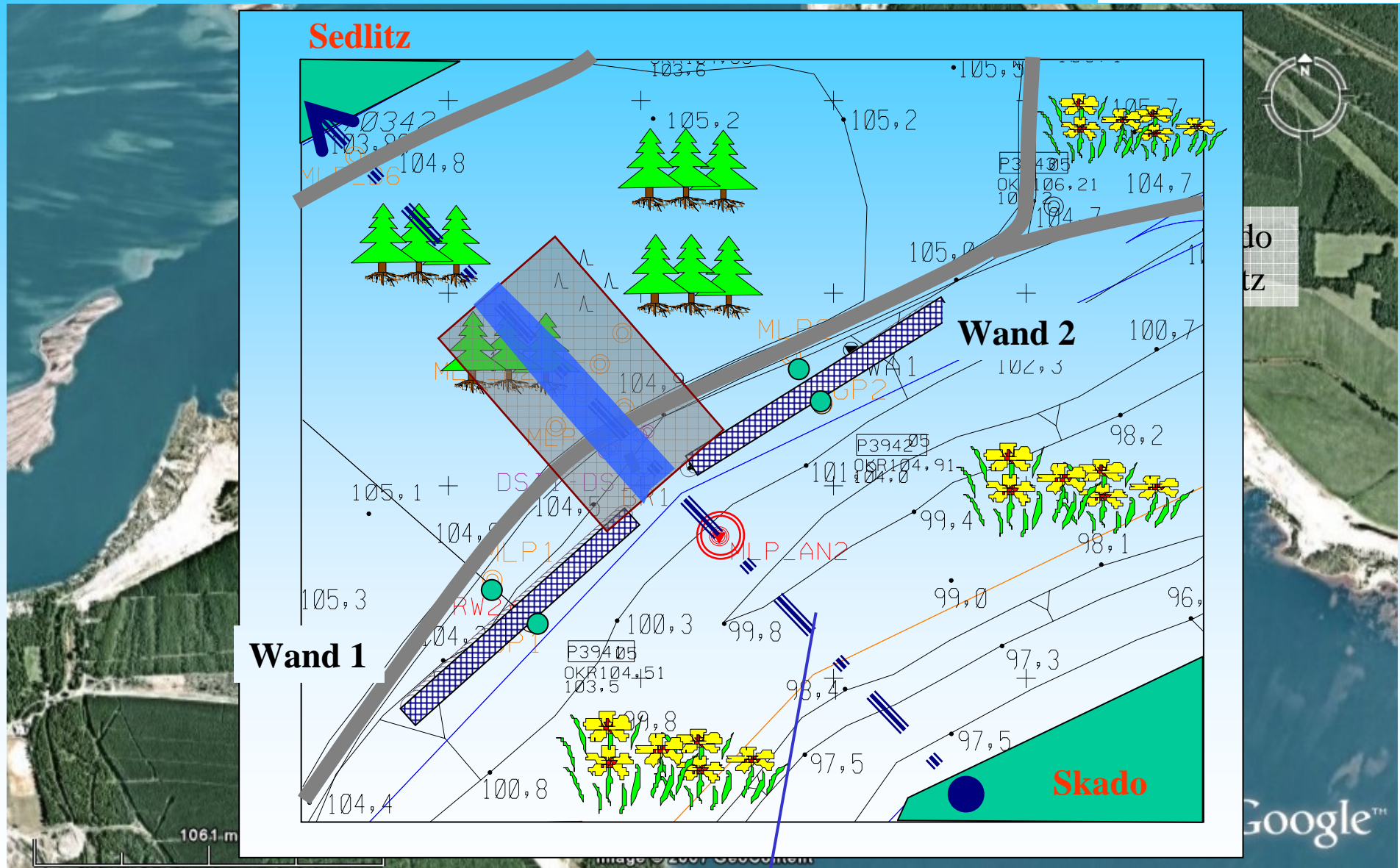




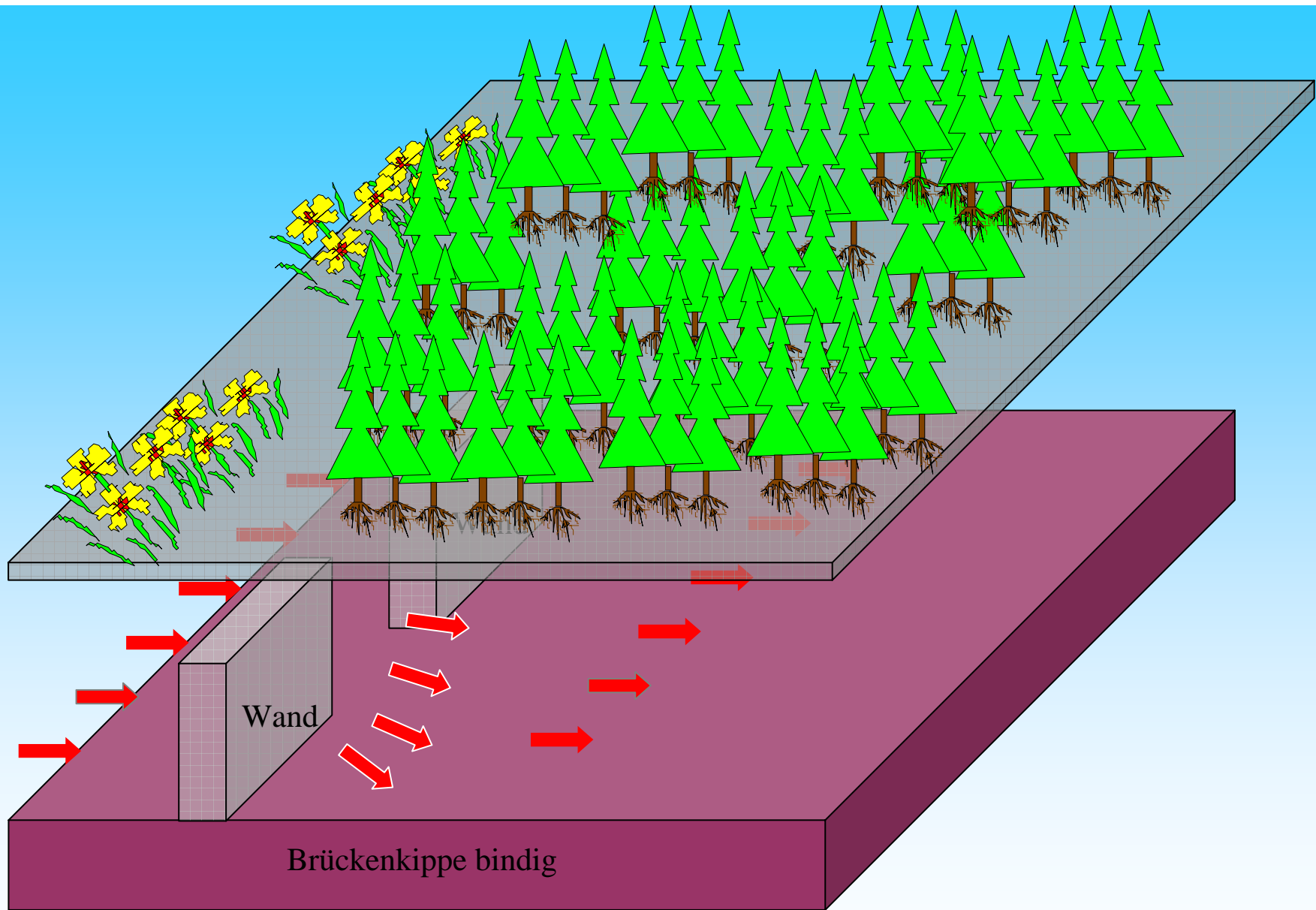
# 7. Reaktionen in Filtern, z.B. Skadodamm



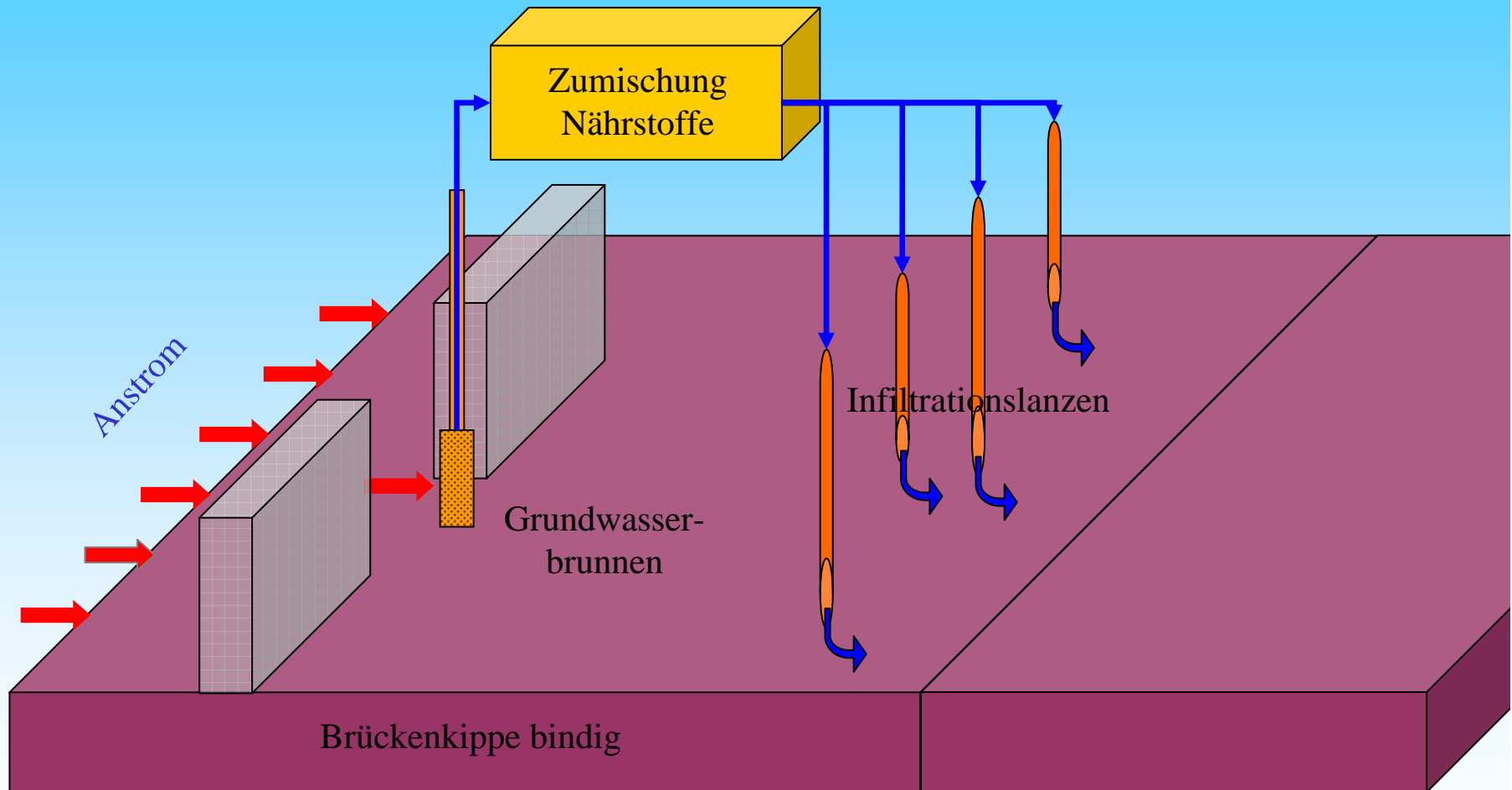
# 7. Reaktionen in Filtern, vom Problem zum Modell



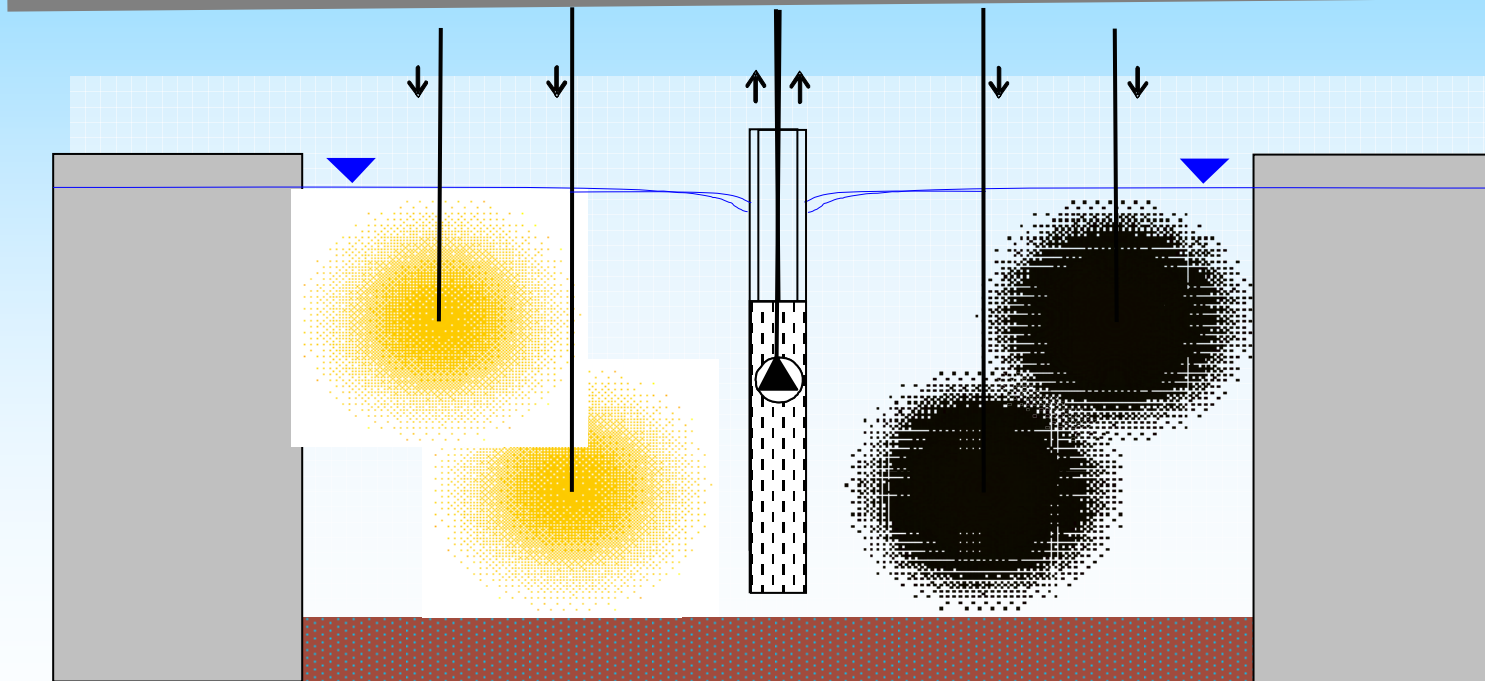
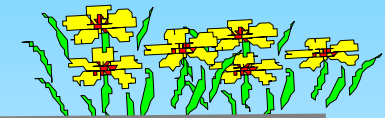
Betrachtung eines Schnittes durch die Kippe "Skadodamm" in Grundwasserfließrichtung



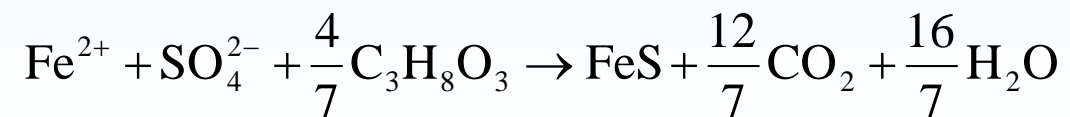
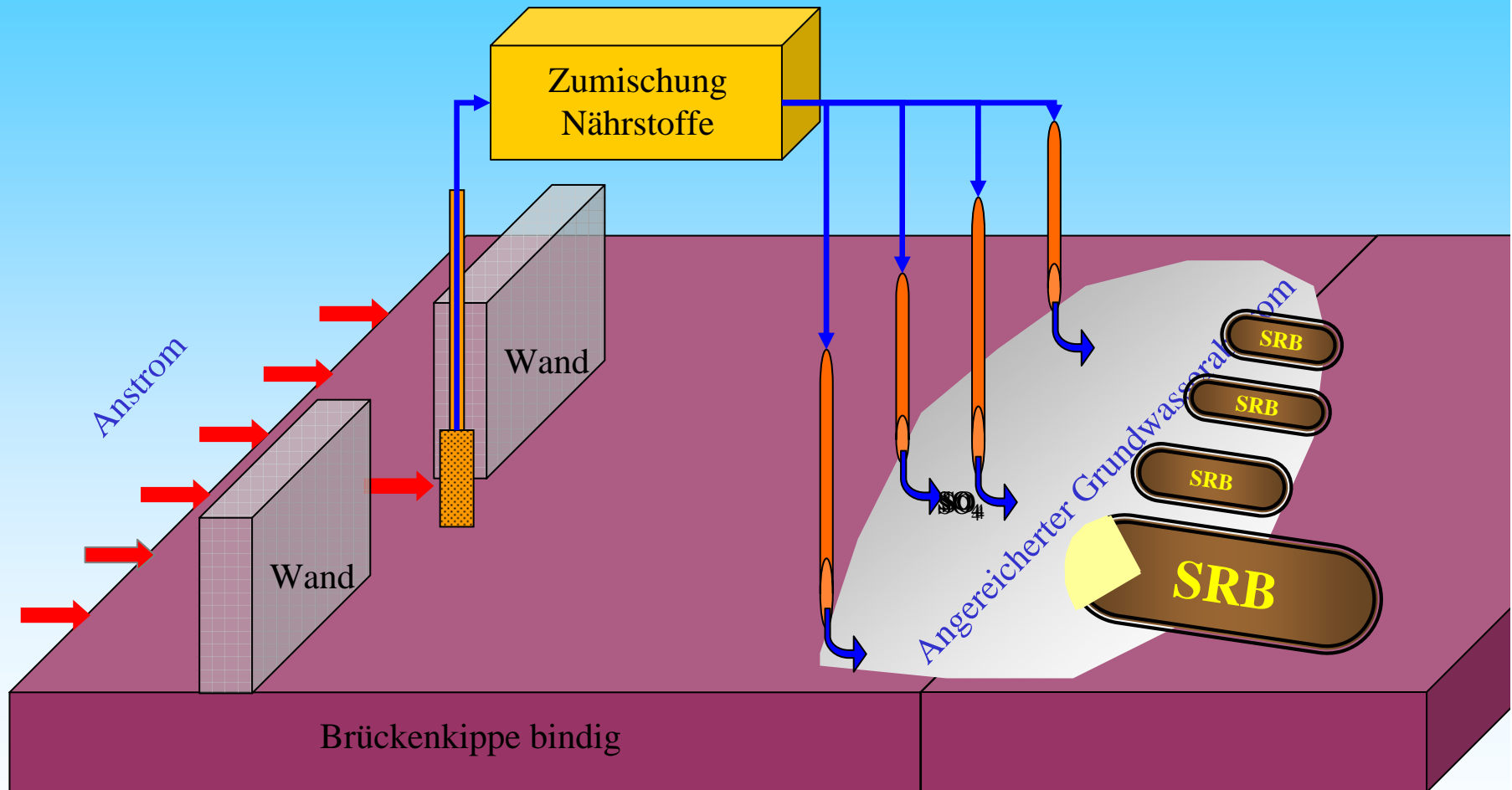
# 7. Reaktionen in Filtern, vom Problem zum Modell



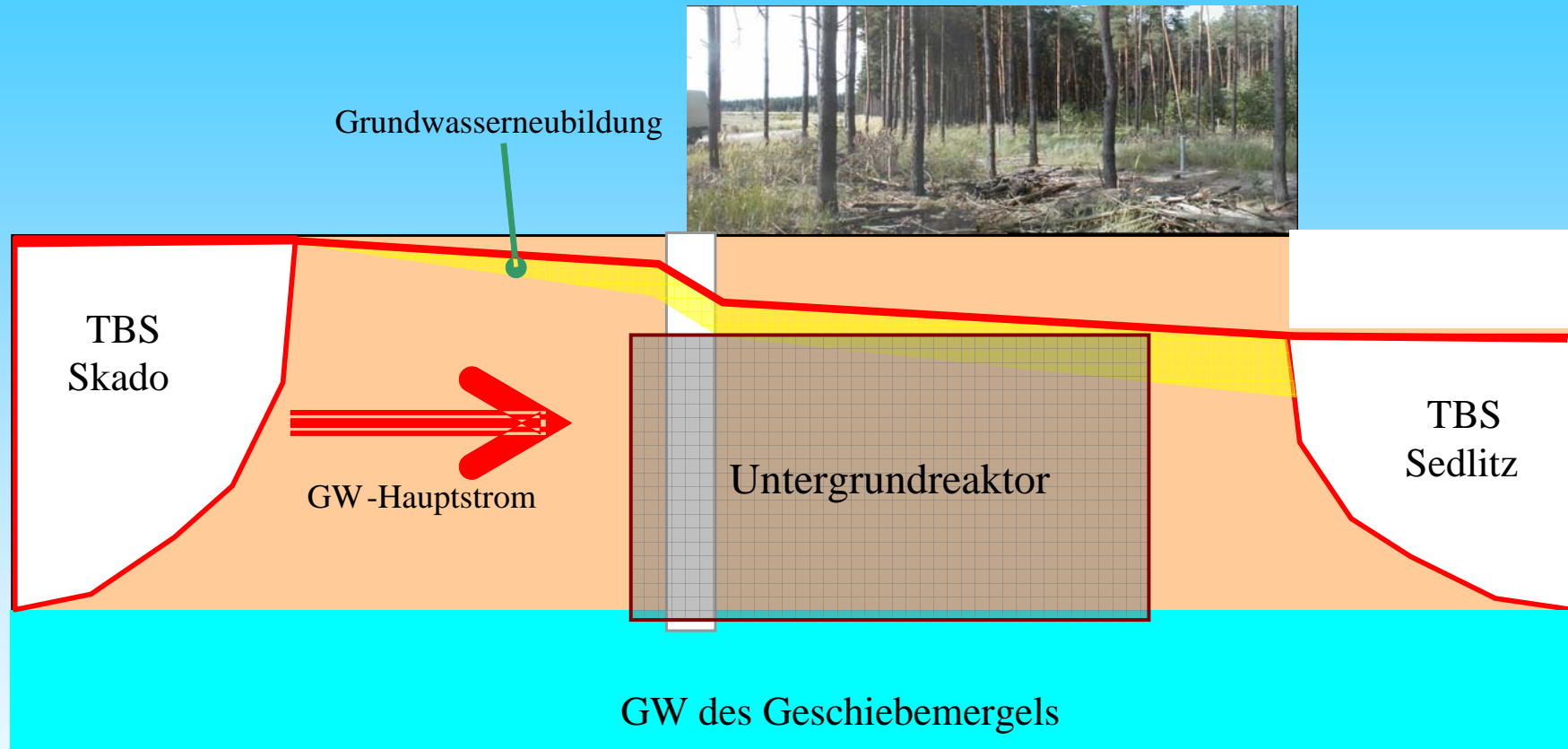
# 7. Reaktionen in Filtern, vom Problem zum Modell



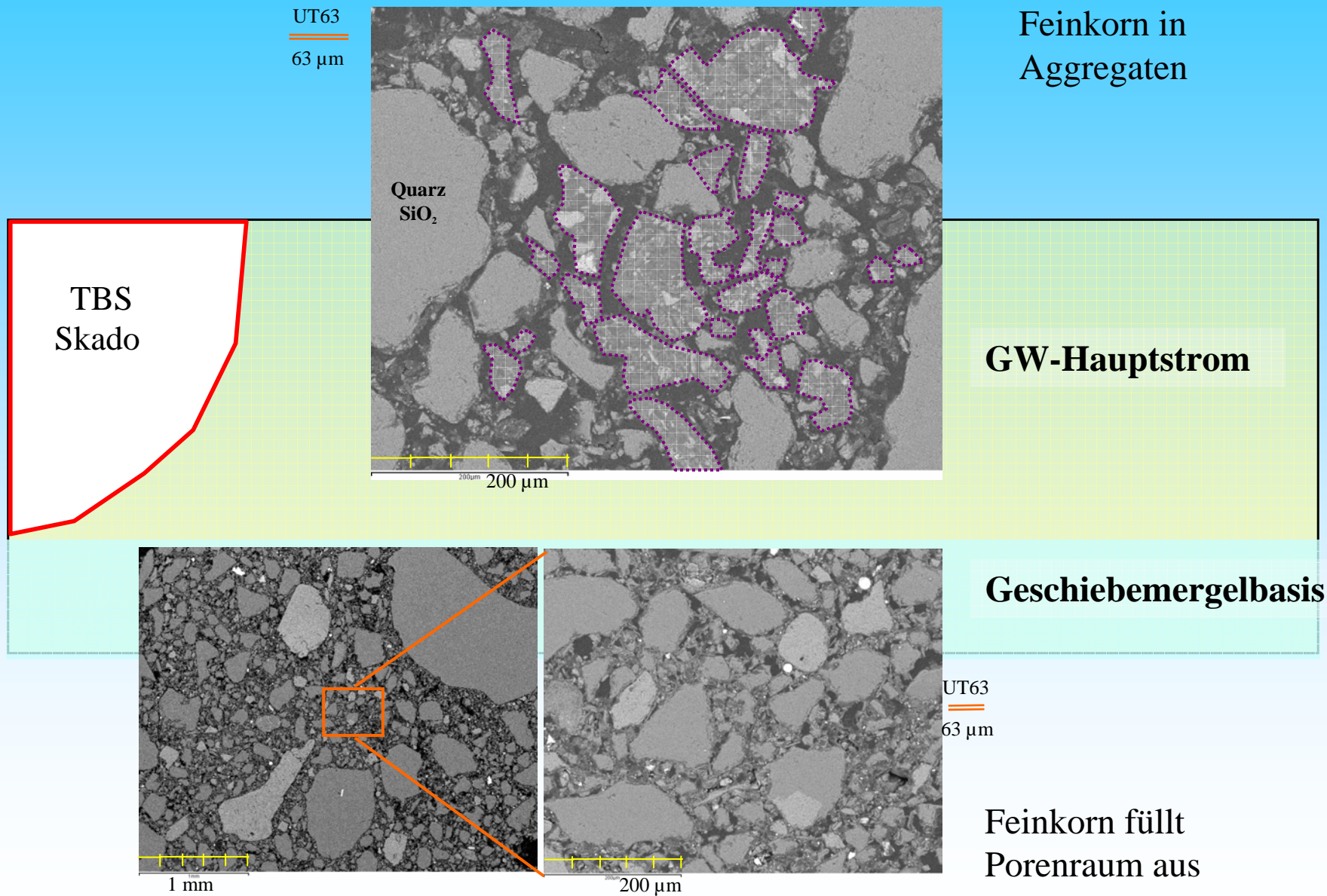
# 7. Reaktionen in Filtern, vom Problem zum Modell



# 7. Reaktionen in Filtern, vom Problem zum Modell

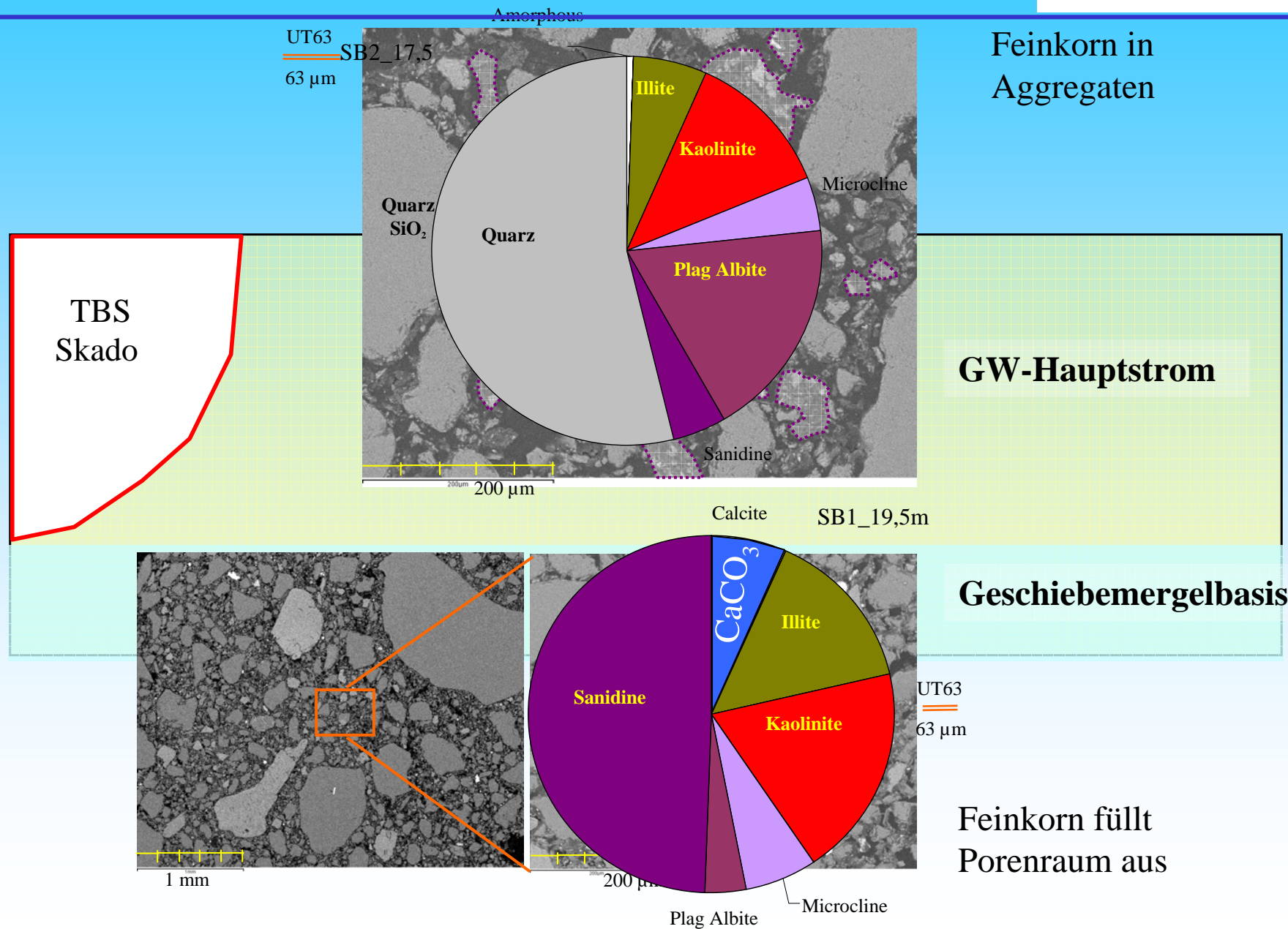


# 7. Reaktionen in Filtern, vom Problem zum Modell

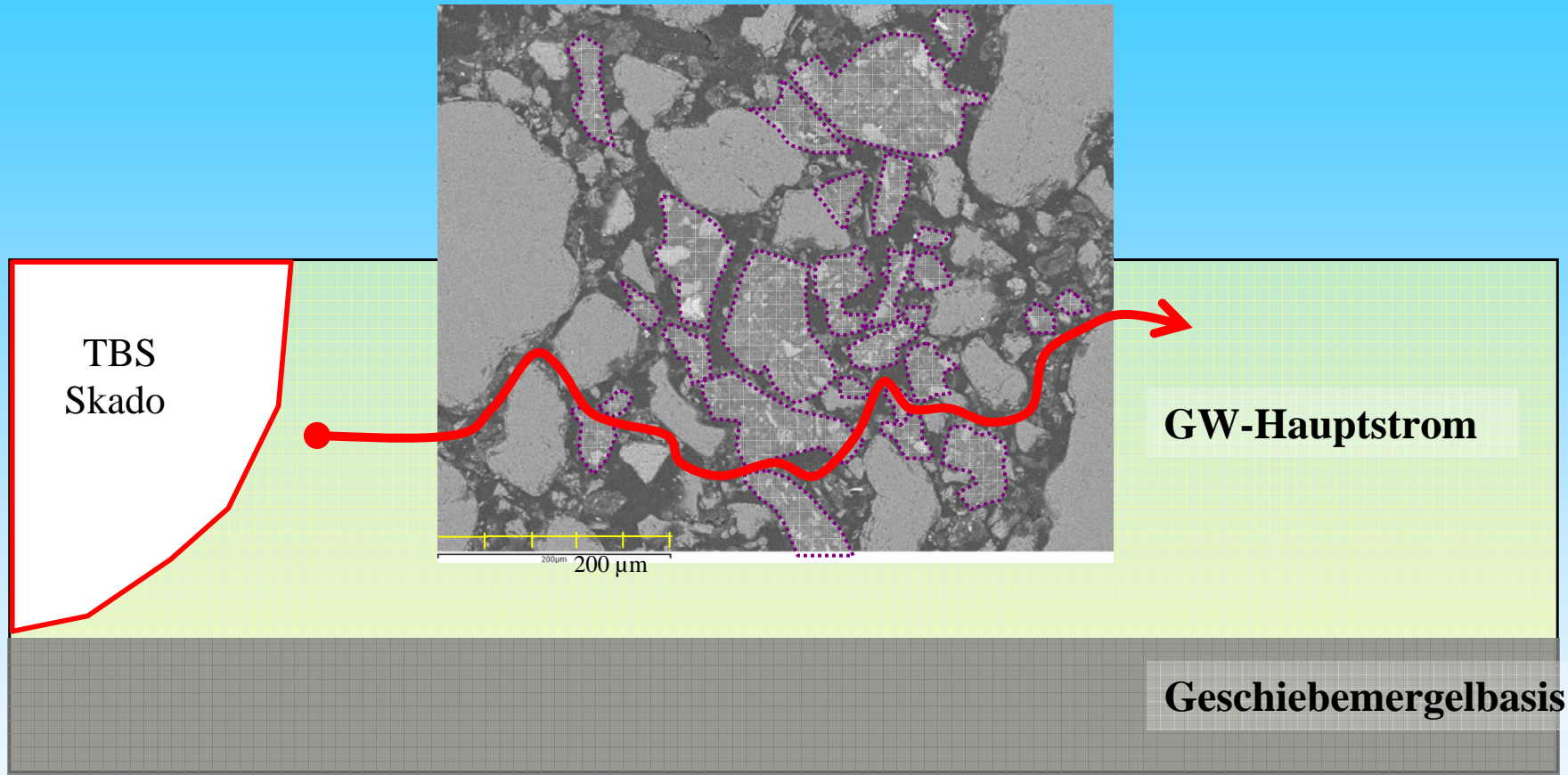




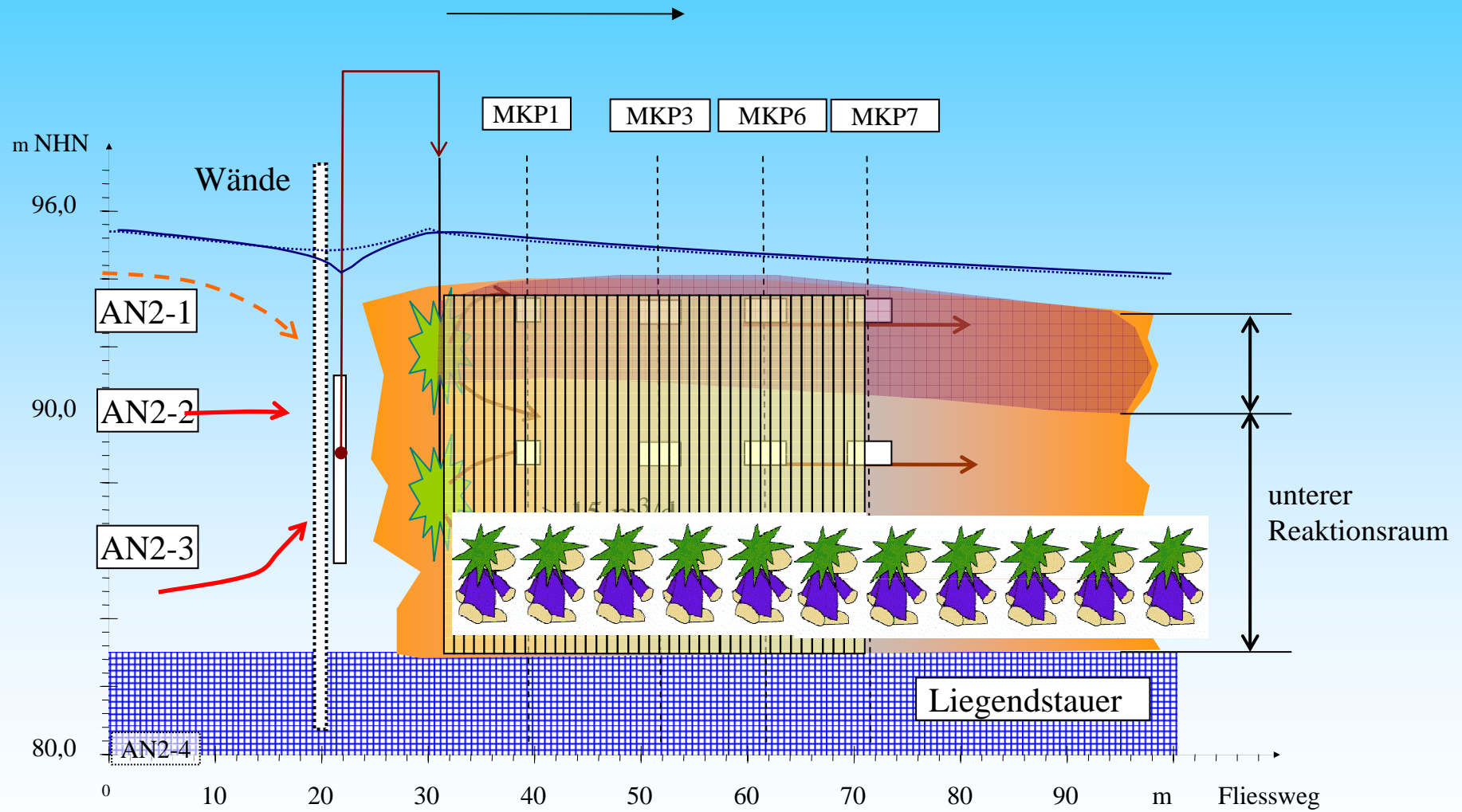
# 7. Reaktionen in Filtern, vom Problem zum Modell



# 7. Reaktionen in Filtern, vom Problem zum Modell



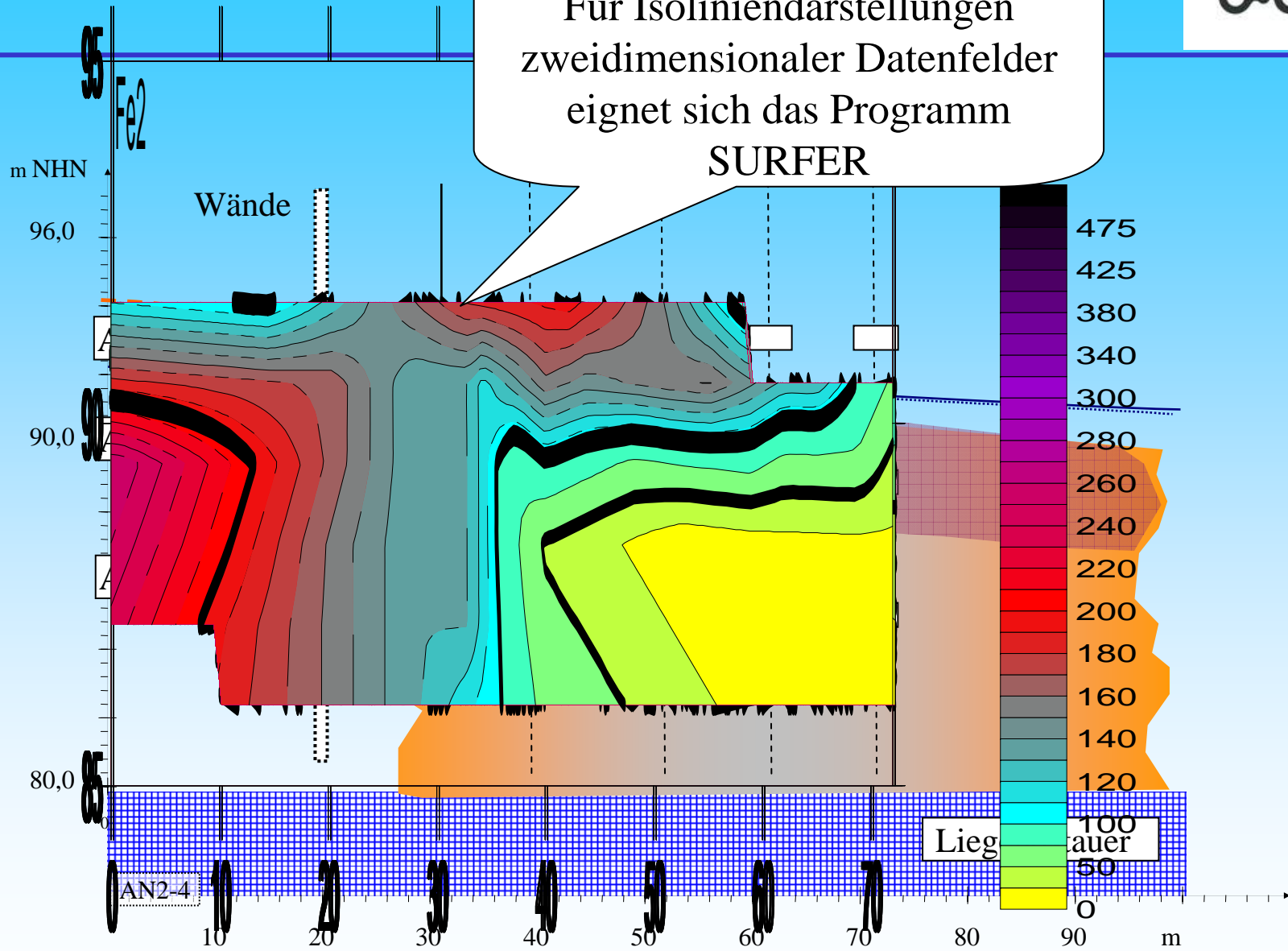
# 7. Reaktionen in Filtern, vom Problem zum Modell



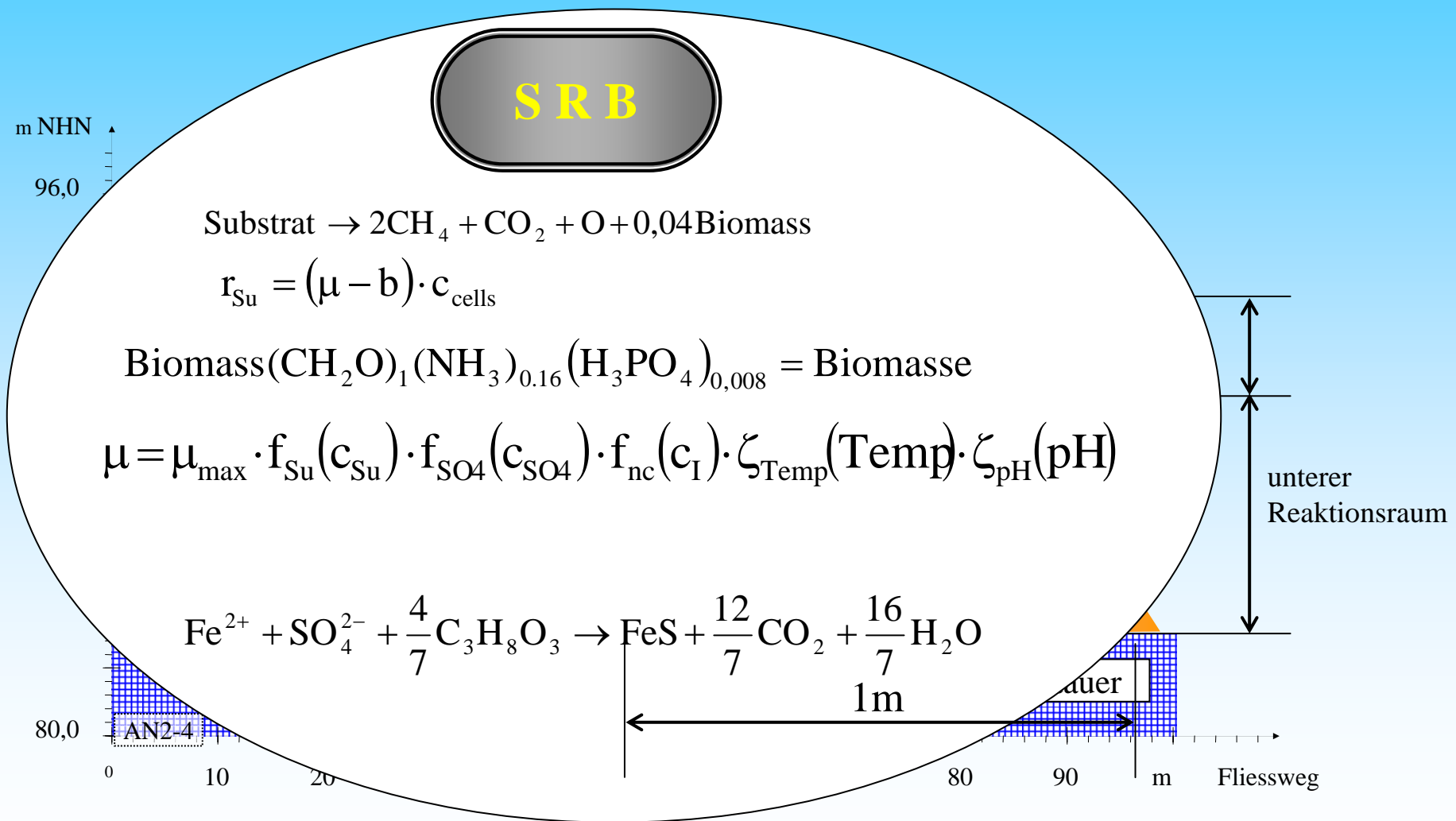
Längskoordinate y [m] für den Fließweg

# 7. Reaktionen in Filtern, z.B. S...

Für Isoliniendarstellungen zweidimensionaler Datenfelder eignet sich das Programm SURFER

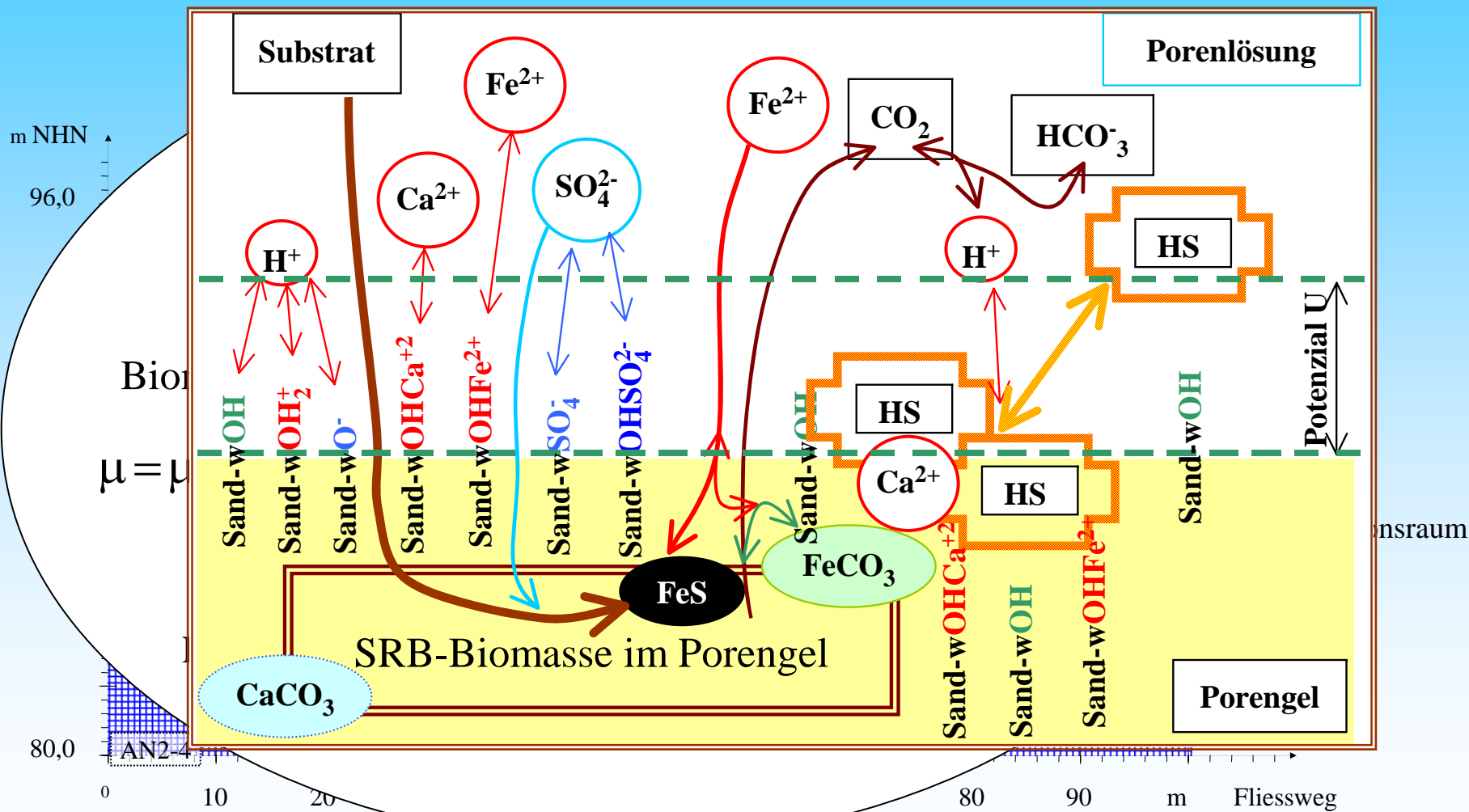


# 7. Reaktionen in Filtern, z.B. Skadodamm



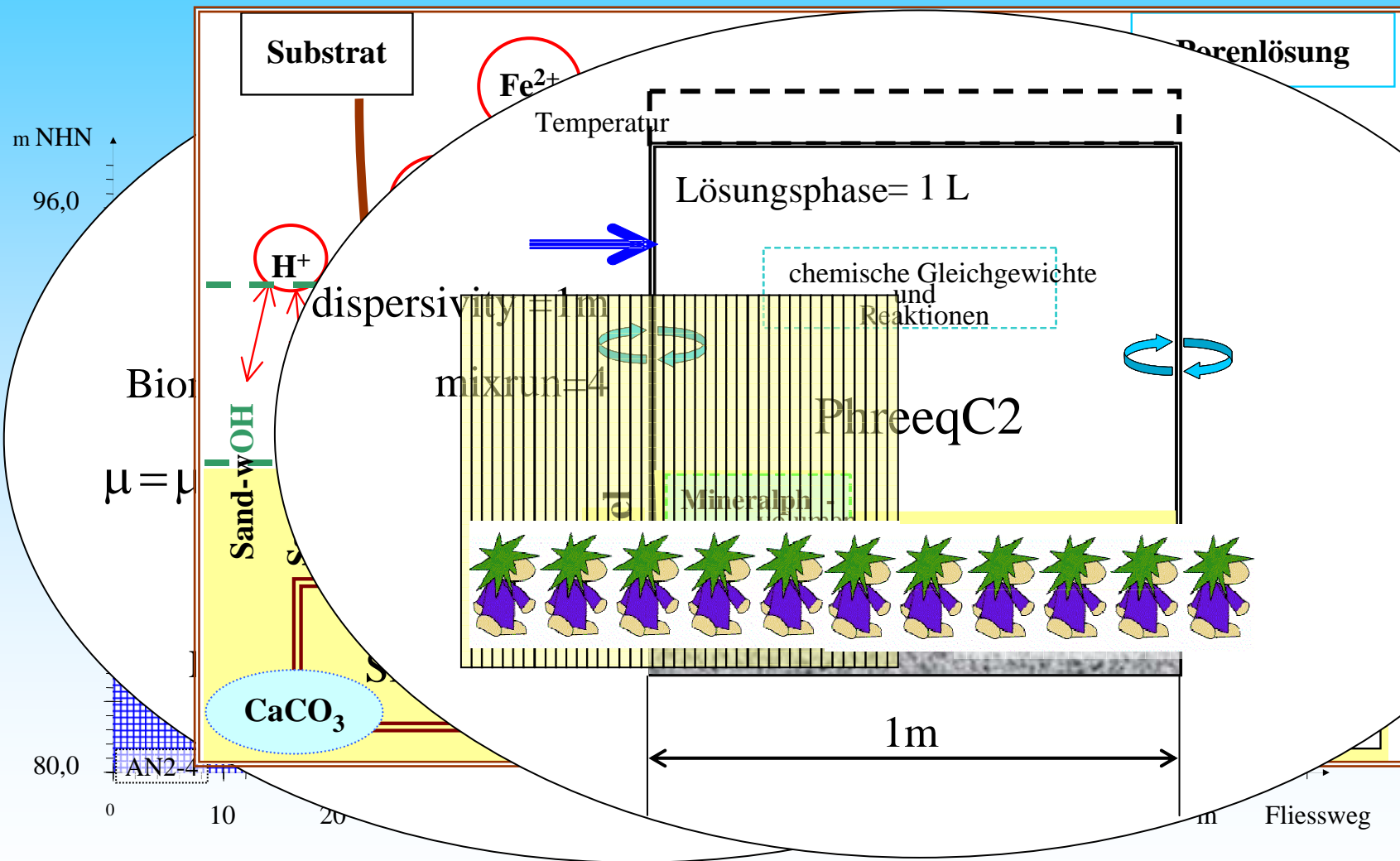
Längskoordinate y [m] für den Fließweg

# 7. Reaktionen in Filtern, z.B. Skadodamm



Längskoordinate y [m] für den Fließweg

# 7. Reaktionen in Filtern, z.B. Skadodamm



Längskoordinate y [m] für den Fließweg

## 7. Reaktionen in Filtern, z.B. Skadodamm

### Ausschnitte aus dem *input*-file

#### **SOLUTION\_MASTER\_SPECIES**

```
Nn      Nn2      0.0      28.0134 14.0067
Sta      Sta      0 1 1
Stb      Stb      0 1 1
Sulf      Sulf-2      0.0      96.0616      96.0616
Biomass Biomass 0 1 1
Substrat Substrat 0 1 1
Amm      AmmH+ 0.0 AmmH 17.0
```

#### **SURFACE\_MASTER\_SPECIES**

```
Sand_w  Sand_wOH
#Sand_l Sand_lOH
```

#### **SURFACE\_SPECIES**

```
Sand_wOH = Sand_wOH
log_K    0
Sand_wOH + H+ = Sand_wOH2+
log_K    5.5
Sand_wOH = Sand_wO- + H+
log_K    -8.2
Sand_wOH + Ca+2 = Sand_wOHCa+2
log_K    7.5
Sand_wOH + Fe+2 = Sand_wOHFe+2
log_K    7.54
```



## 7. Reaktionen in Filtern, z.B. Skadodamm

### RATES

#### Bio

##### -start

```
1 rem      SO4atreduktion
2 rem      parm(1) = ?    parm(2) = ?
10 pH1 = -1 * LA("H+")
20 kt = 4 * (pH1 - 4.00 ) * (pH1 - 6.50 ) / 6.25
30 my = 1 * 2 ^ (1 - kt)
110 my = my * MOL("SO4-2") * TOT("Substrat")
115 my = my * TOT("Amm") * TOT("P")
120 my = my / (MOL("SO4-2") + 0.00009338)
130 my = my / (TOT("Substrat") + 0.0009338)
135 my = my / (TOT("Amm") + 0.0000000)
140 my = my / (TOT("P") + 0.0000000093)
150 my = my * equi("Biomasse")
160 my = my * 4.37471E-06
170 Schww = MOL("H2S")
171 my = my * 0.933768815257495 / (0.933768815257495 + Schww)
198 moles = my
199 moles = moles * time
200 save moles
```

##### -end

\* \* \*

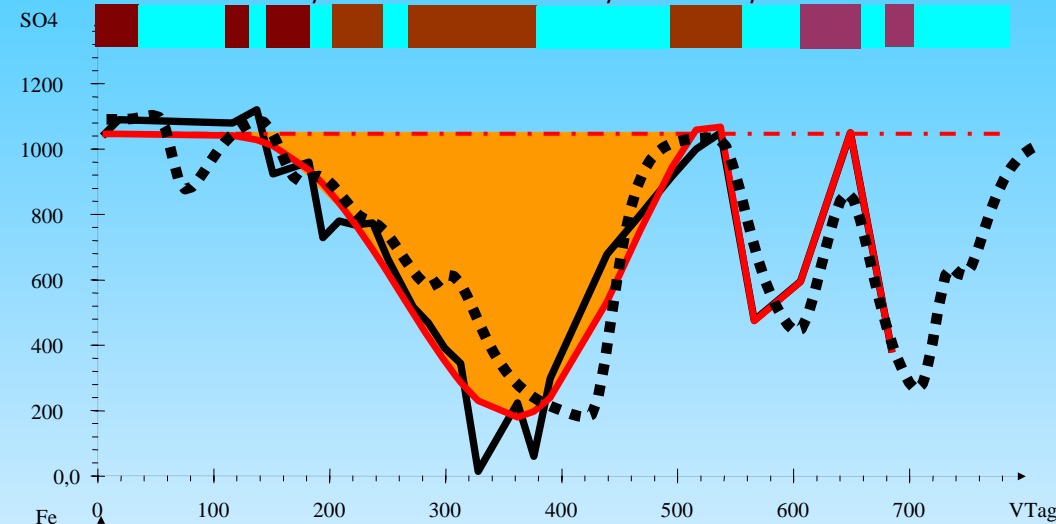
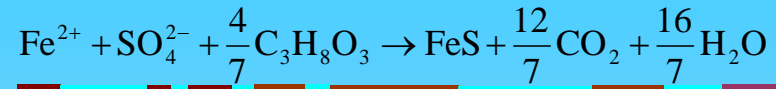
## 7. Reaktionen in Filtern, z.B. Skadodamm

```
* * *
TRANSPORT
-cells 40
-shifts 21
-t 246857.1429
-l 40*1.000
-dis 40*5.000
-punch_frequency 2
-w false

Kinetics 1-40
Bio
-formula CH4 2 CO2 1 H2O 0 0 1 Substrat -1 Biomass 0.08 Sta 1
-tol 1e-10
Lyse
-formula Biomass -1 Sta -0.33 0 0.33
-tol 1e-8

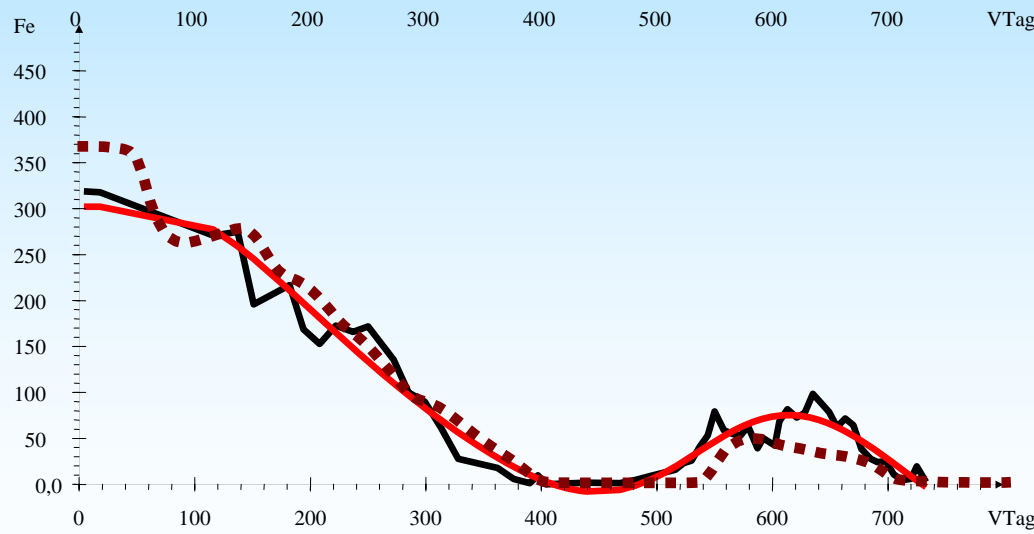
END
```

# 7. Reaktionen in Filtern, z.B. Skadodamm

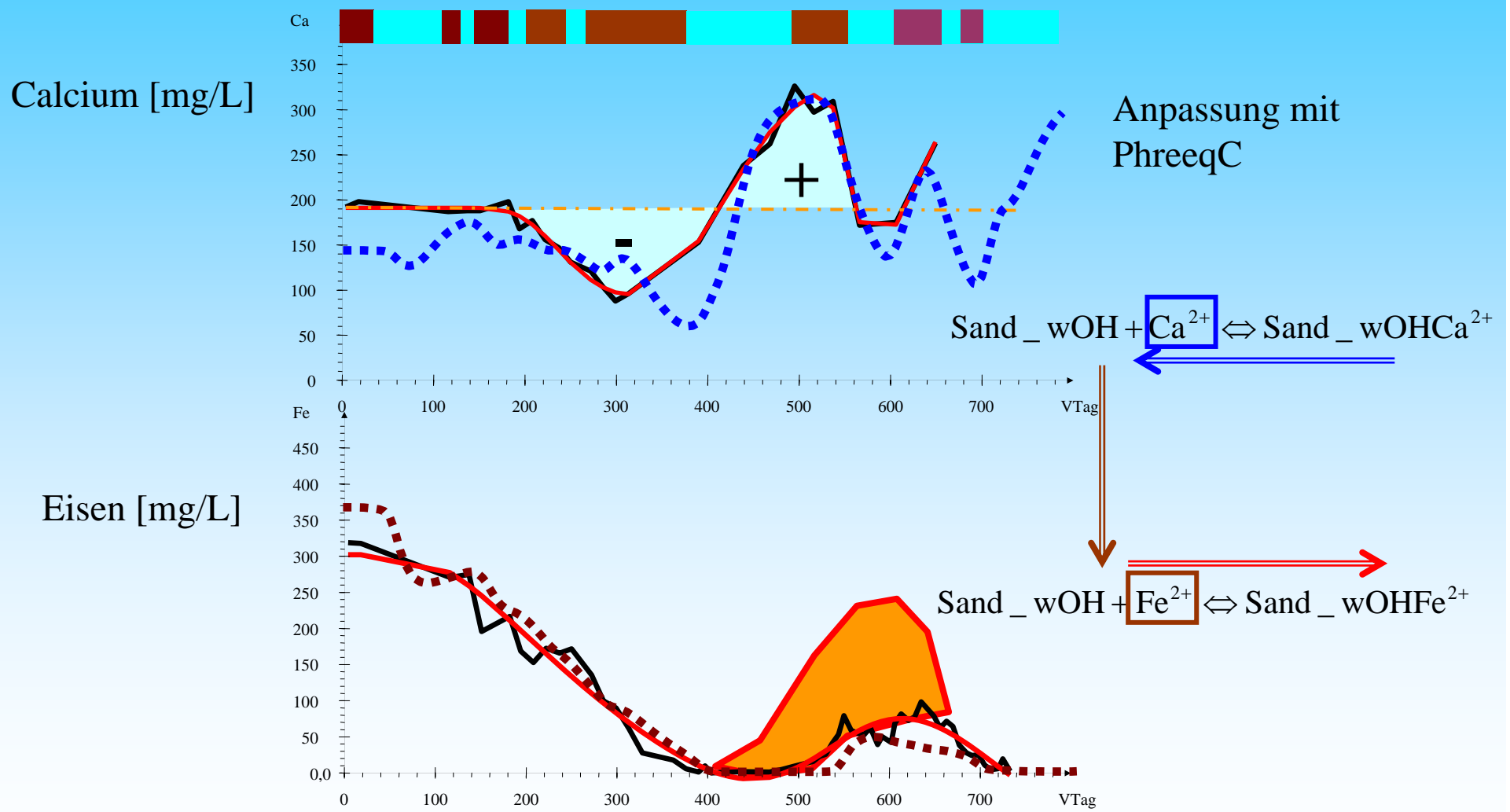


Anpassung mit PhreeqC

Eisen [mg/L]



# 7. Reaktionen in Filtern, z.B. Skadodamm



# JA, das war's auch schon

- GIMBEL, R.; JEKEL, M.; LIEßFELD, R. (Hrsg.): Wasseraufbereitung - Grundlagen und Verfahren; DVGW Lehr- und Handbuch Wasserversorgung Bd. 6; DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.; Oldenbourg Industrieverlag München Wien R3689
- PARKHURST, D. L.; APPELO, C.A.J. (2006): USER'S GUIDE TO PHREEQC (VERSION 2) - A COMPUTER PROGRAM FOR SPECIATION, BATCH-REACTION, ONE-DIMENSIONAL TRANSPORT, AND INVERSE GEOCHEMICAL CALCULATIONS; Water-Resources Investigations Report 99-4259 R3171
- MERKEL, B. J.; PLANER-FRIEDRICH, B. (2002): Grundwasserchemie; Praxisorientierter Leitfaden zur numerischen Modellierung von Beschaffenheit, Kontamination und Sanierung aquatischer Systeme; Springer Berlin Heidelberg R2244
- VAUCK, R. A.; MÜLLER, H. A. (2000): Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik; Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig Stuttgart R2236
- Rausch, R.; Schäfer, W.; Wagner, C. (2002): Einführung in die Transportmodellierung im Grundwasser; Gebrüder Bornträger Berlin Stuttgart R2130
- HAGEN, J (1993): Chemische Reaktionstechnik; Eine Einführung mit Übungen; Weinheim R0664

JA, das war's auch schon

*Danke*

*für die*

*Aufmerksamkeit*

