

Modul 43-4-19

Bergbauliche Wasserwirtschaft

ein weltweites Problem
acid mine drainage = AMD





Inhalt:

1. Entstehung und Herkunft von AMD
2. Zusammensetzung von AMD
3. Reaktionen in AMD
4. Beschaffenheitsprobleme mit AMD

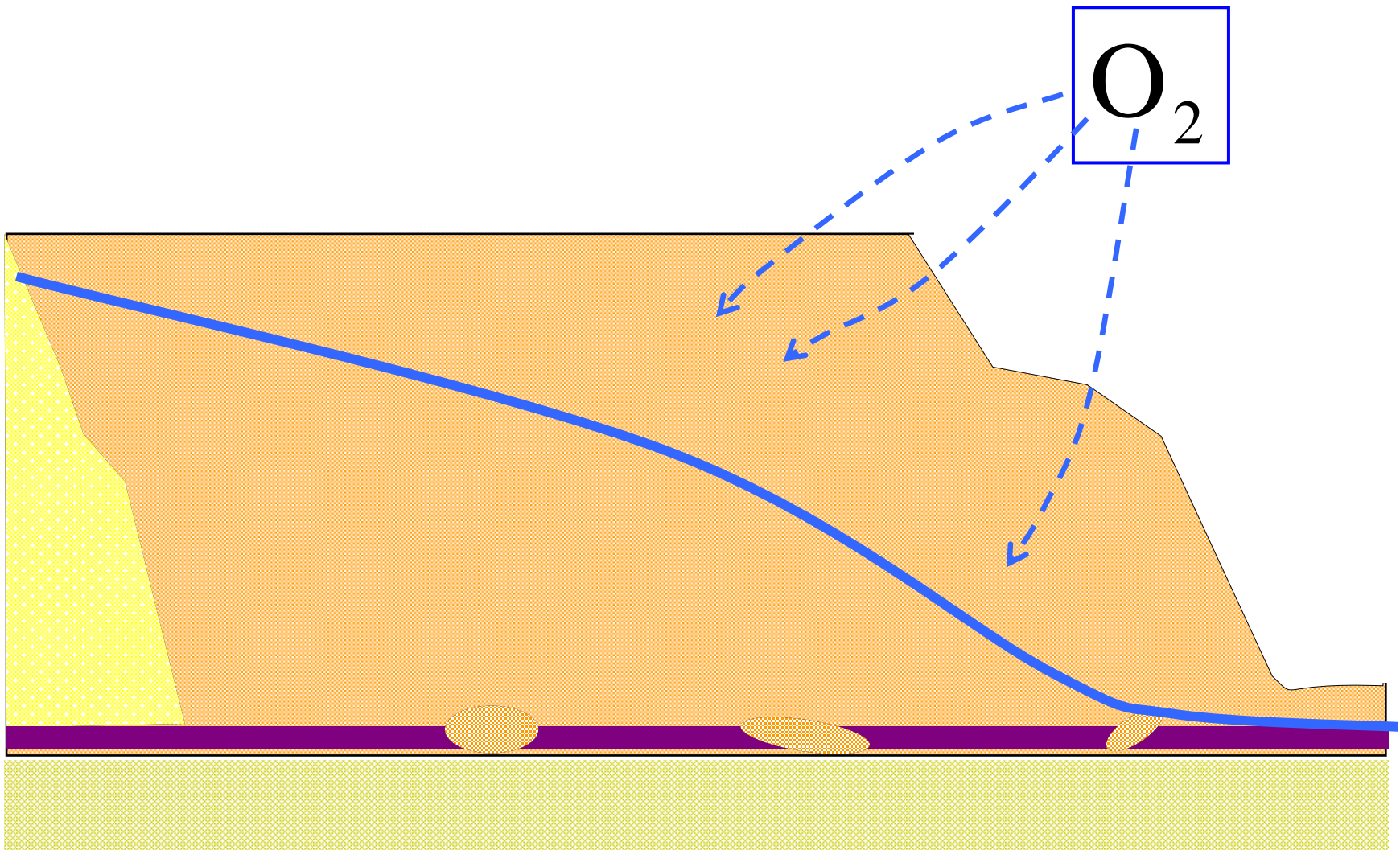
Beispiele



1. Entstehung und Herkunft

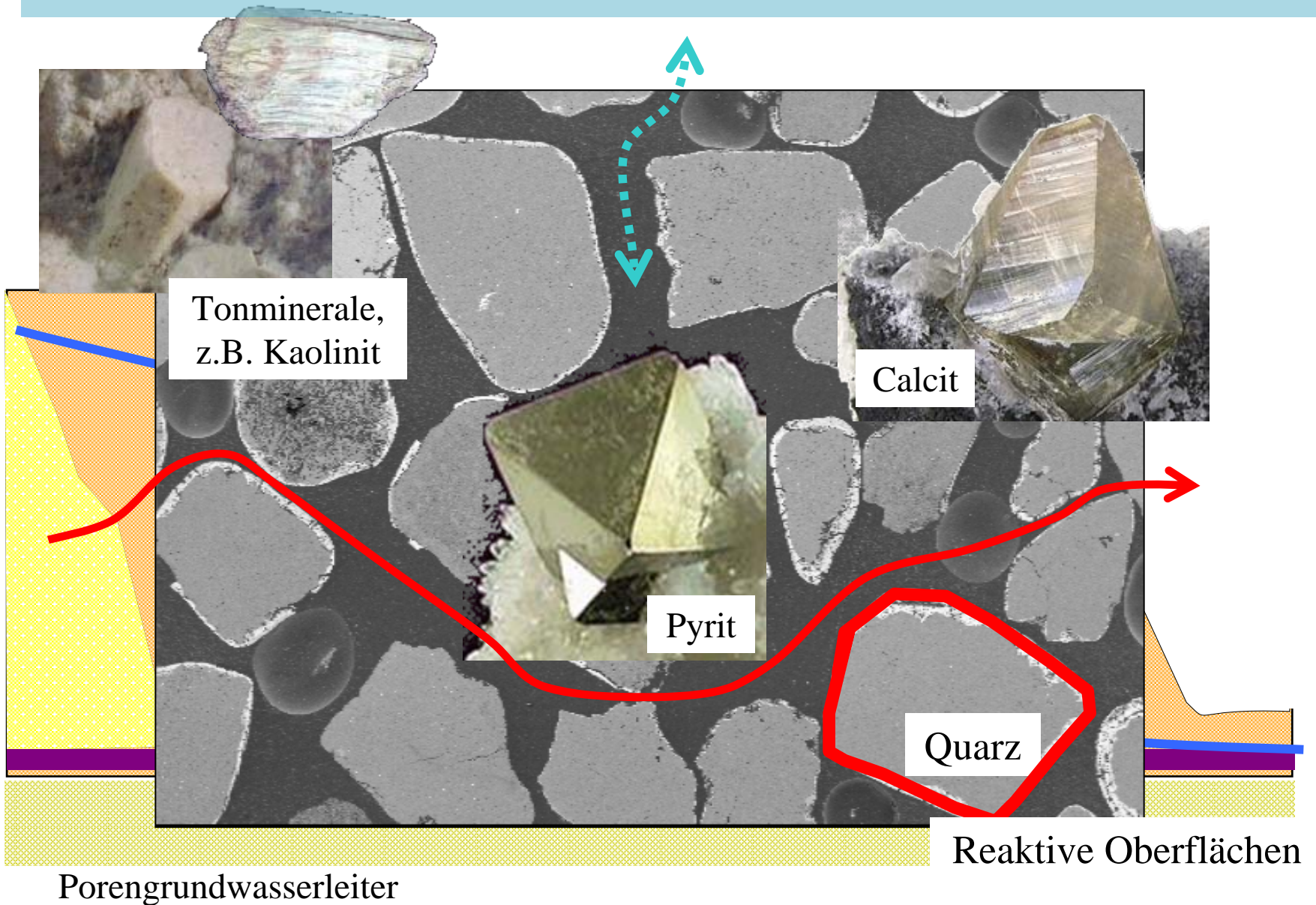


1. Entstehung und Herkunft

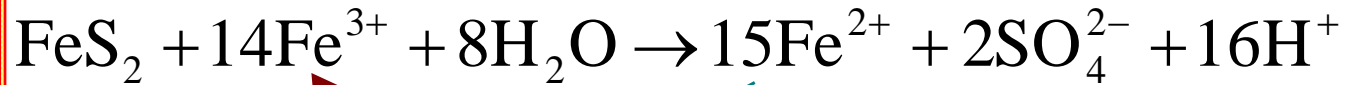
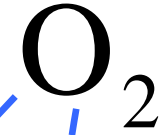
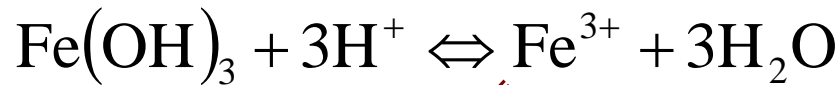
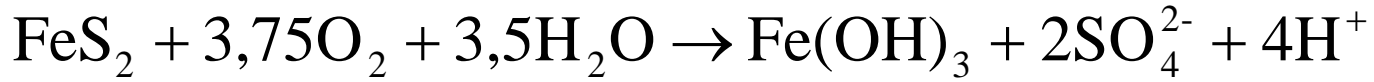


Porengrundwasserleiter

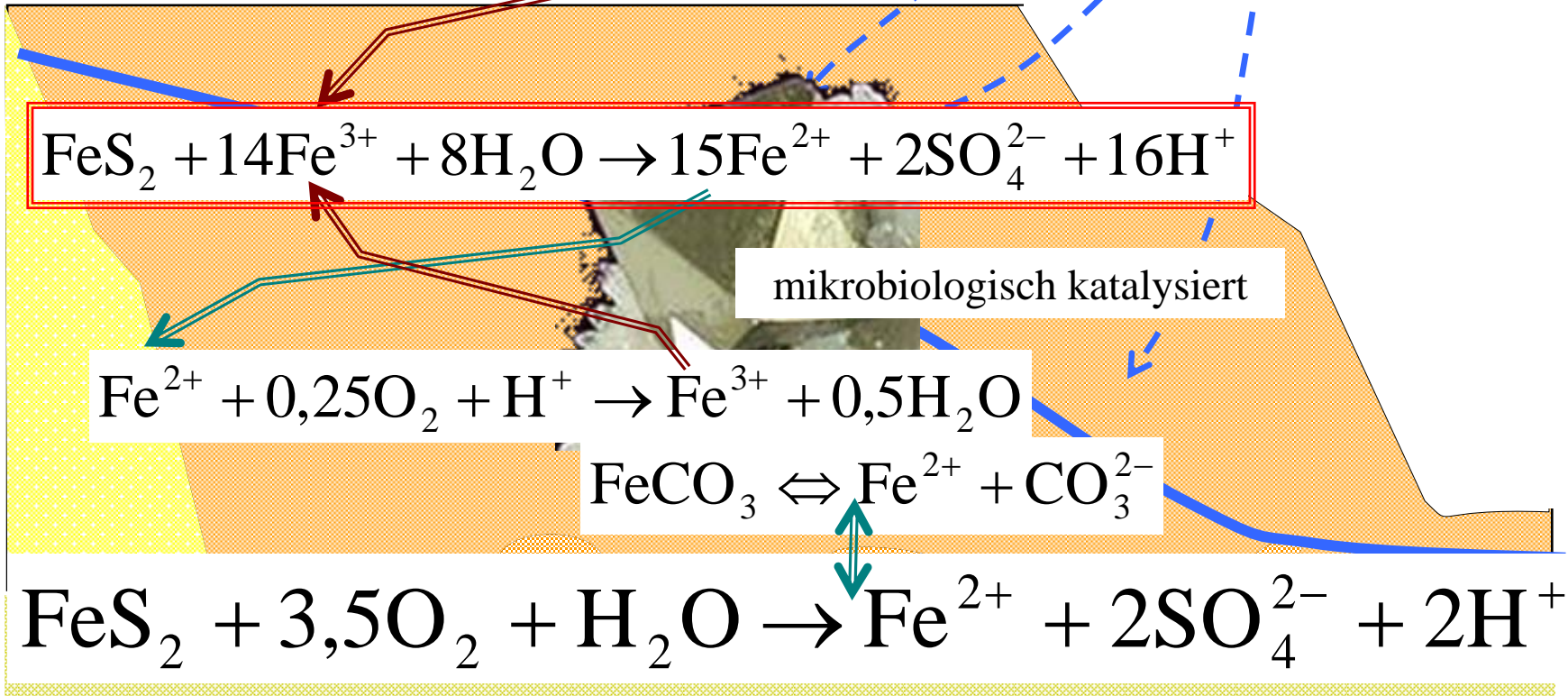
1. Entstehung und Herkunft



1. Entstehung und Herkunft



mikrobiologisch katalysiert



1. Entstehung und Herkunft

$\text{CaCO}_3 + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Calcit

$\text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$

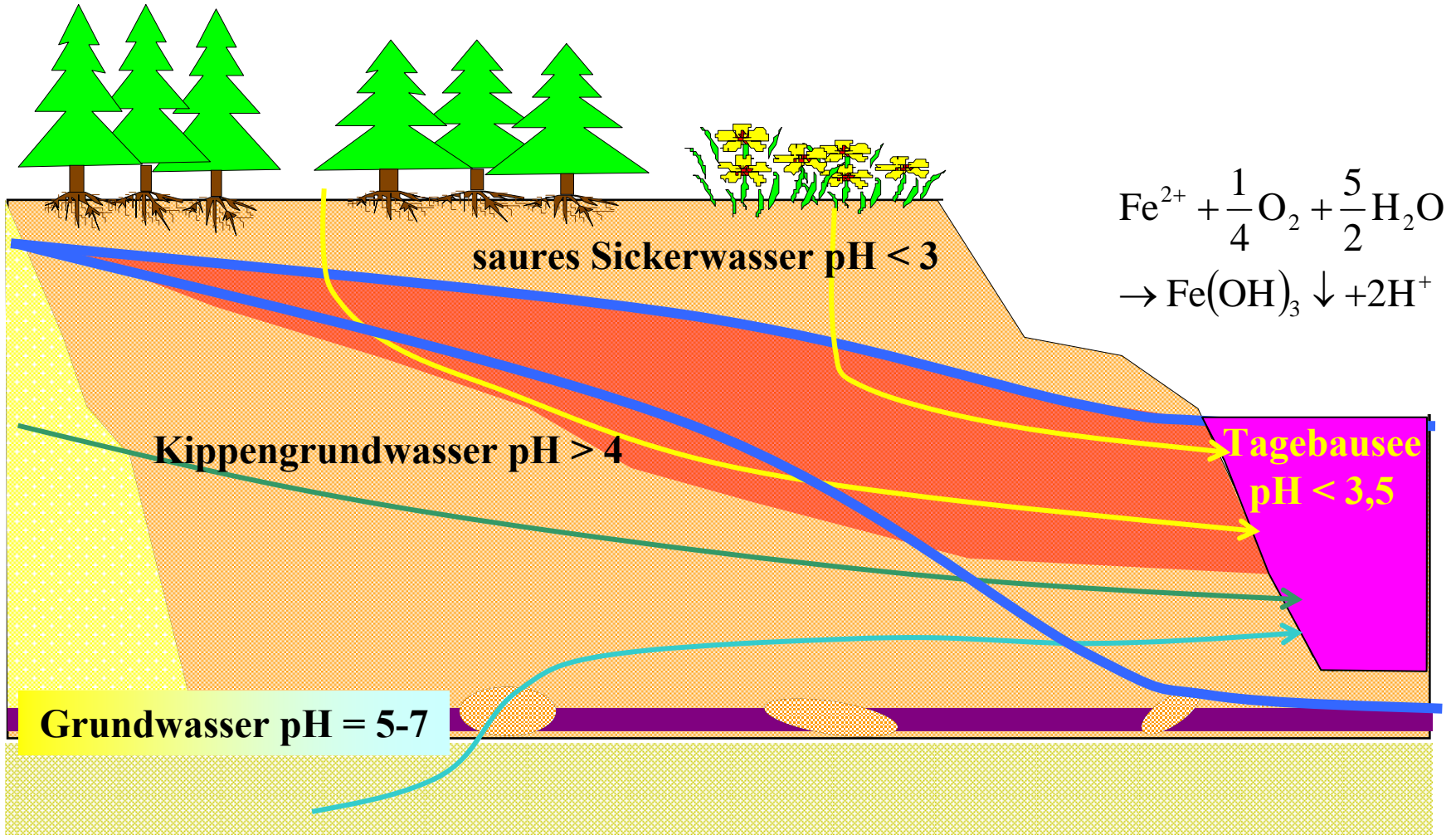
$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 6\text{H}^+ \rightarrow 2\text{Al}^{3+} + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{H}_2\text{O}$

Feldspat

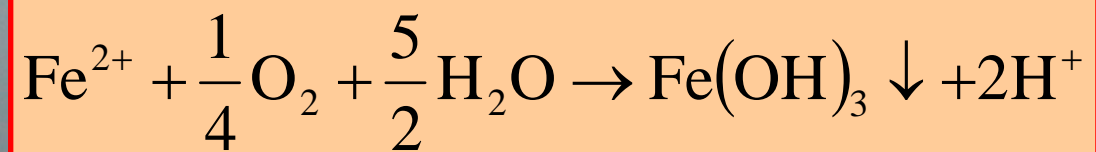
Albite

$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}^+ + [\text{Al}(\text{OH}_4)]^- + 3\text{H}_4\text{SiO}_4$

1. Entstehung und Herkunft

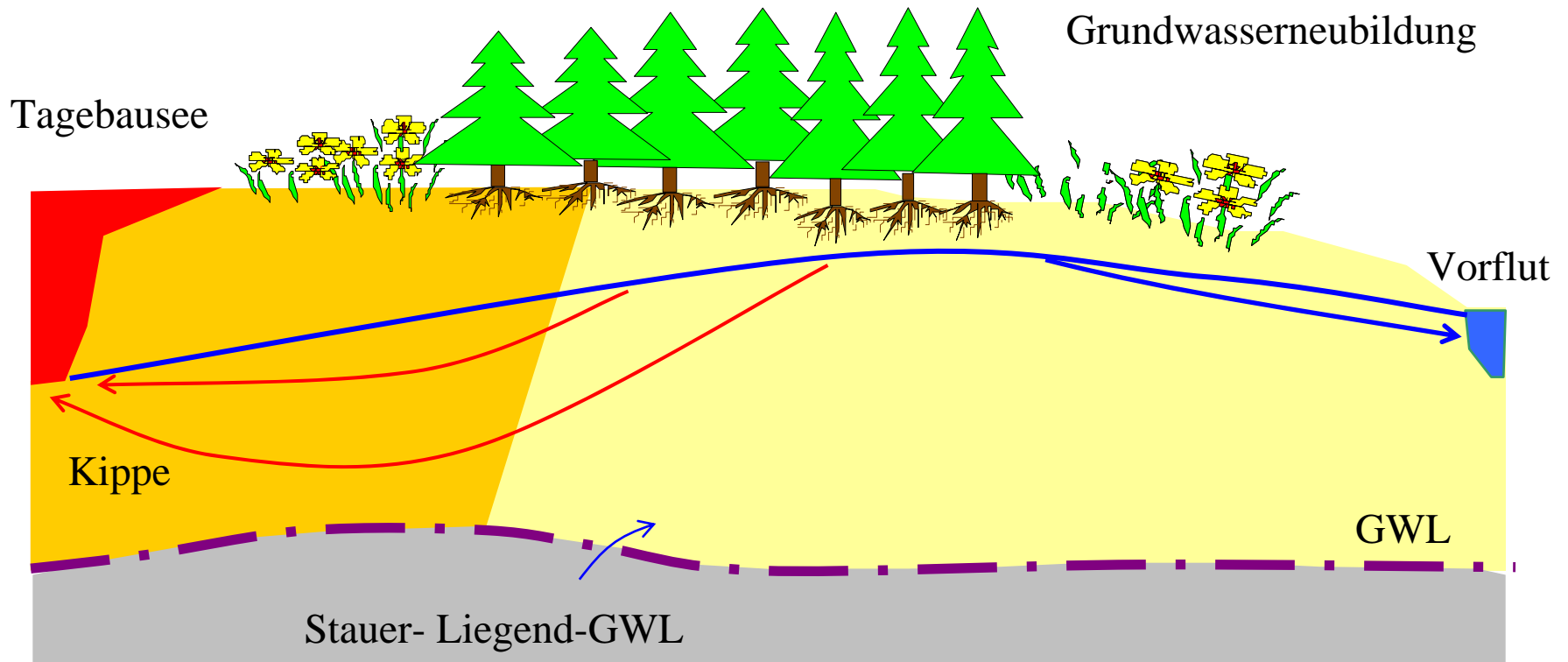


1. Entstehung und Herkunft



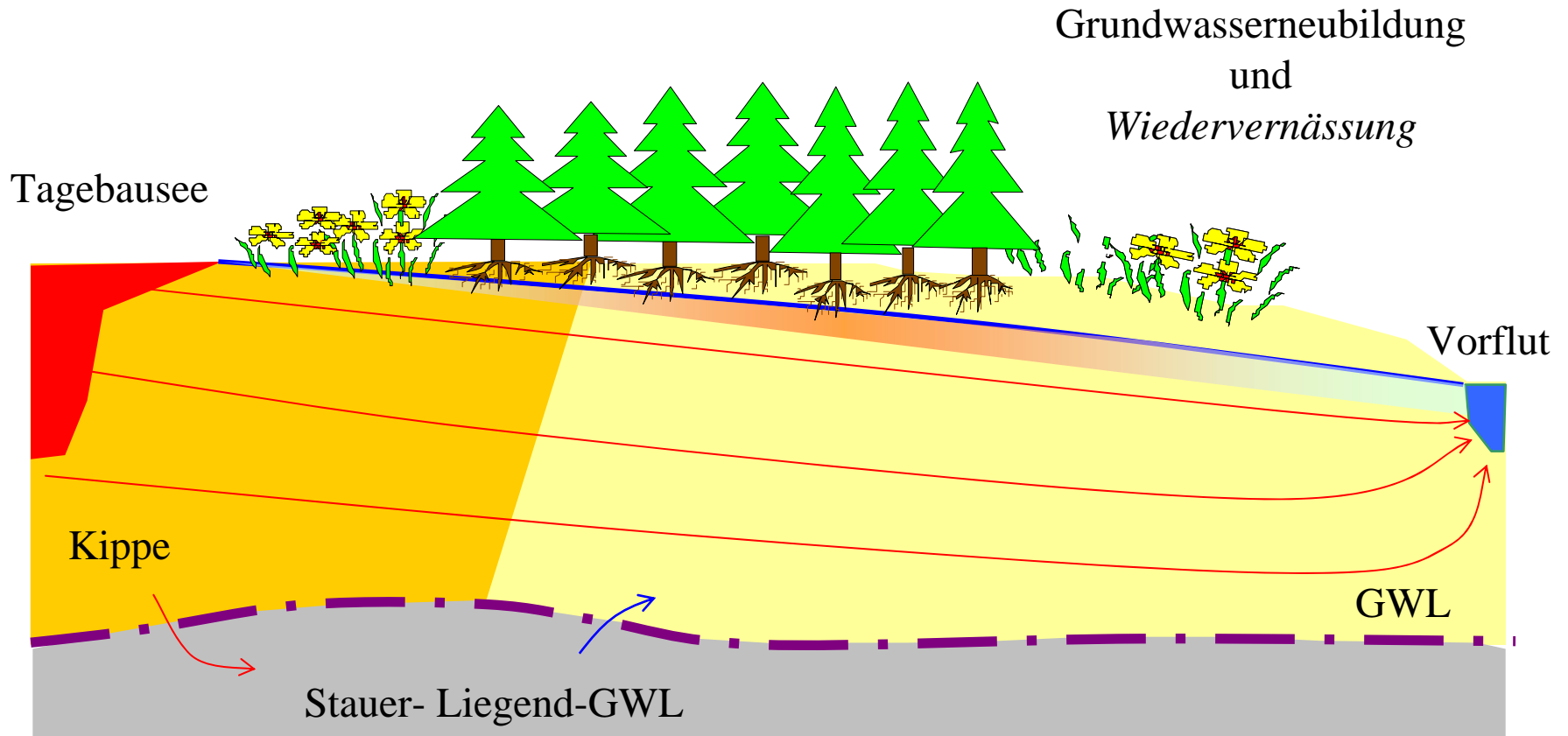
1. Entstehung und Herkunft

Versauerung und Eiseneinträge durch den Bergbau



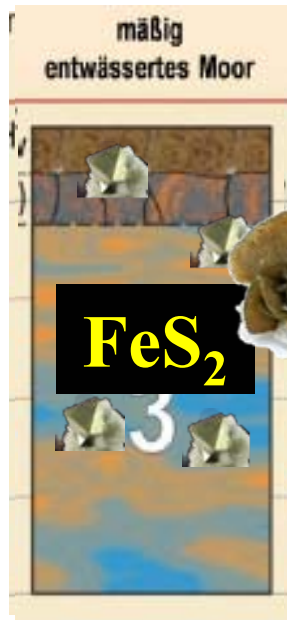
1. Entstehung und Herkunft

Versauerung und Eiseneinträge durch den Bergbau

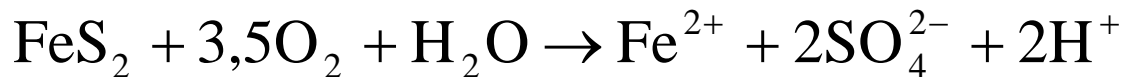
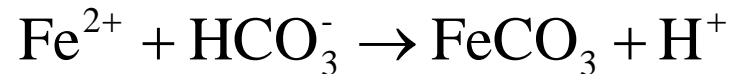


1. Entstehung und Herkunft

Düngung,
Kalkung CaO



Entwässerung durch
Melioration oder
Grundwasserabsenkung



1. Entstehung und Herkunft

keine
Kalkung CaO

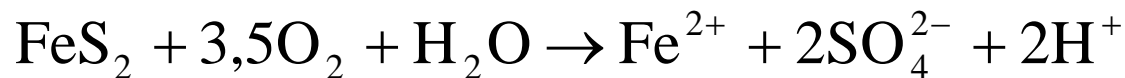


andauernde Entwässerung
Grundwasserabsenkung



pH < 4,5

Fe²⁺ > 50 mg/L



1. Entstehung und Herkunft

Im Untertagebau sehr ähnliche Wässer.

Es ist davon auszugehen, dass in Europa mehrere **10.000 bis 100.000** Grubenwasseraustritte mit **sauren Wässern** existieren, von denen ein potenzielles **Risiko** für die **Umwelt** ausgeht.



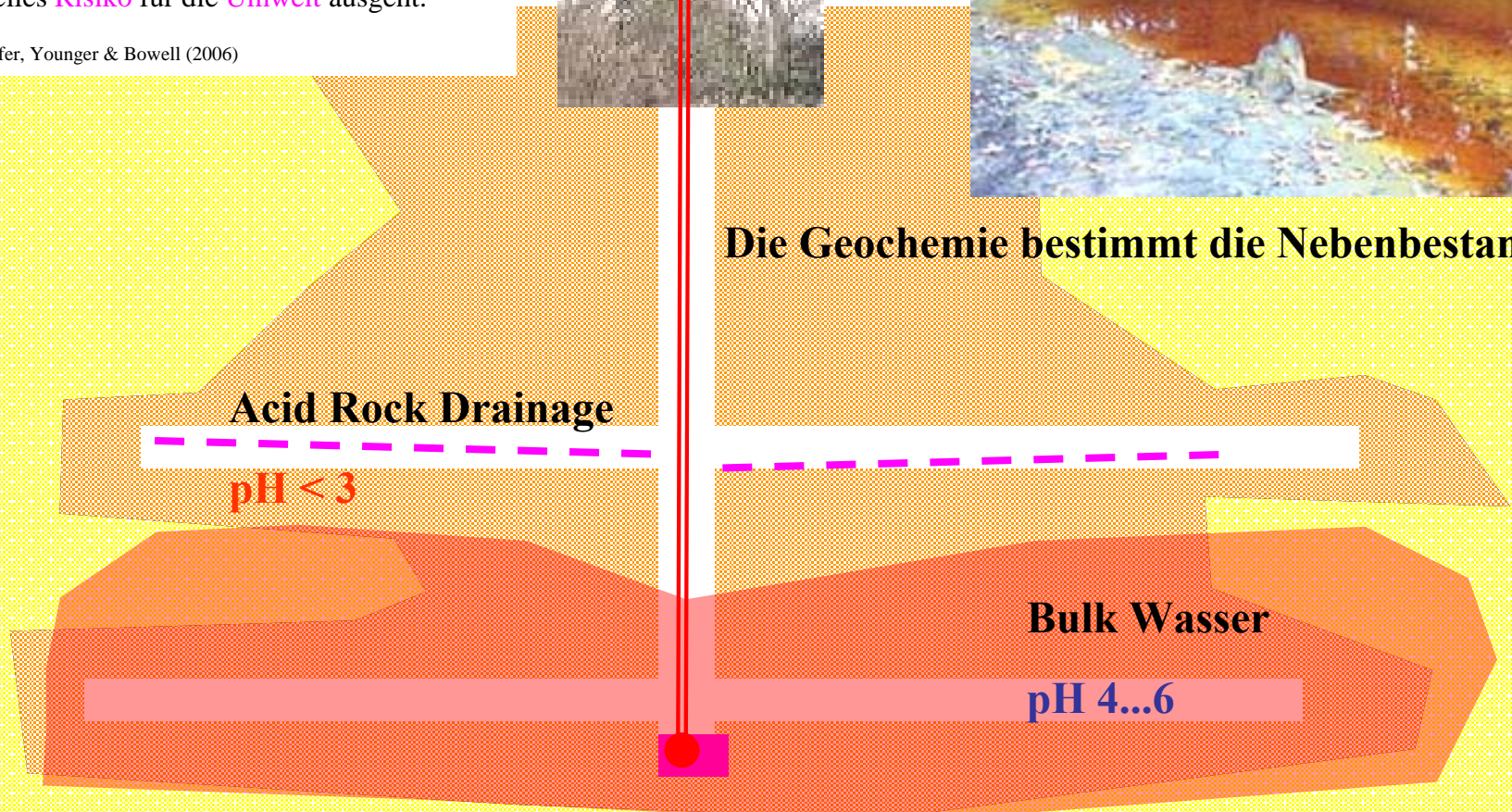
Die Geochemie bestimmt die Nebenbestandteile.

Acid Rock Drainage

pH < 3

Bulk Wasser

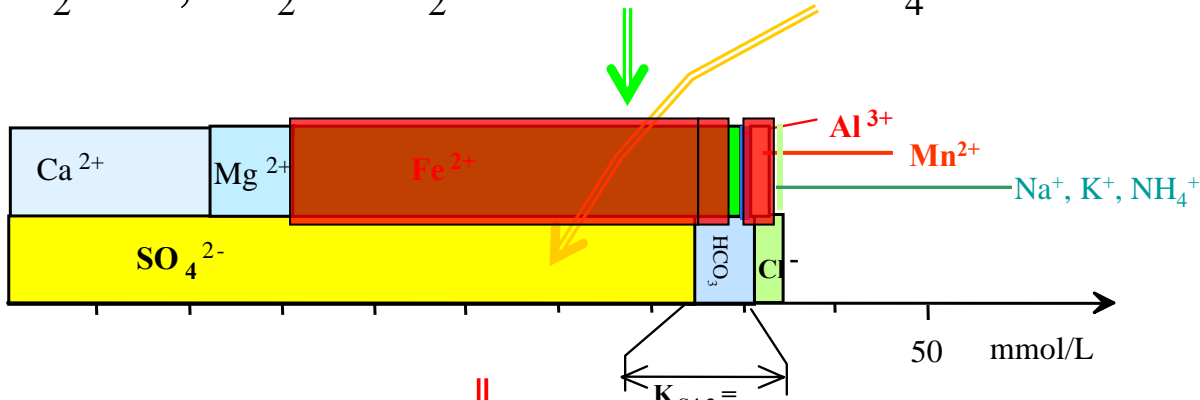
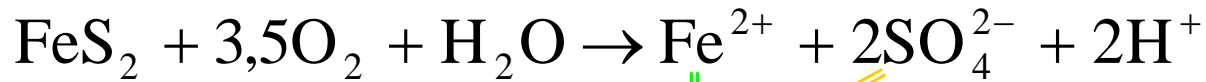
pH 4...6



Wolkersdorfer, Younger & Bowell (2006)

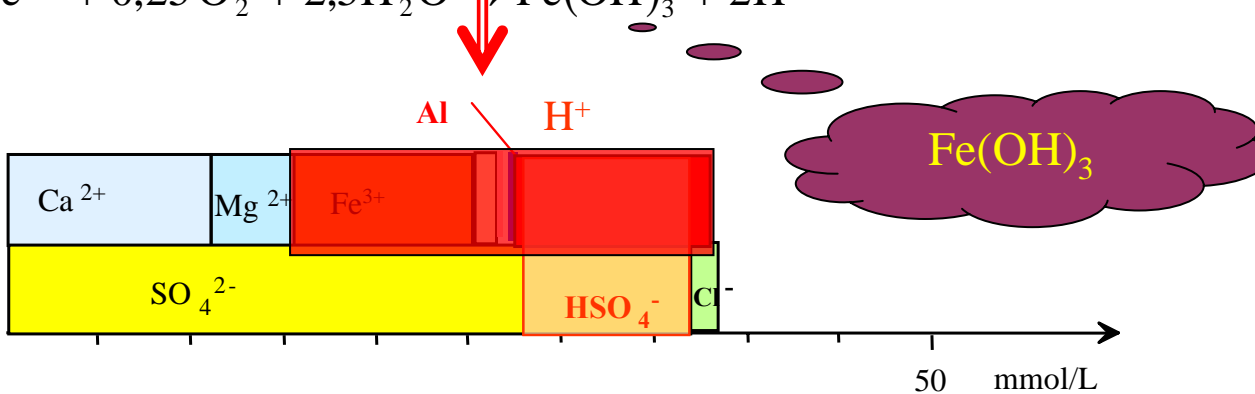
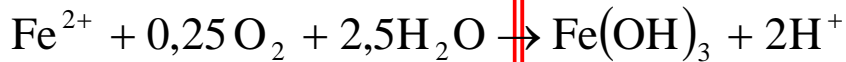
2. Zusammensetzung von AMD

Pyritverwitterung



anoxisches AMD

pH = 4 ... 6



oxisches AMD

pH < 3

2. Zusammensetzung von AMD, Acidität

Aciditätskonzept nach Stumm & Morgan (1996)

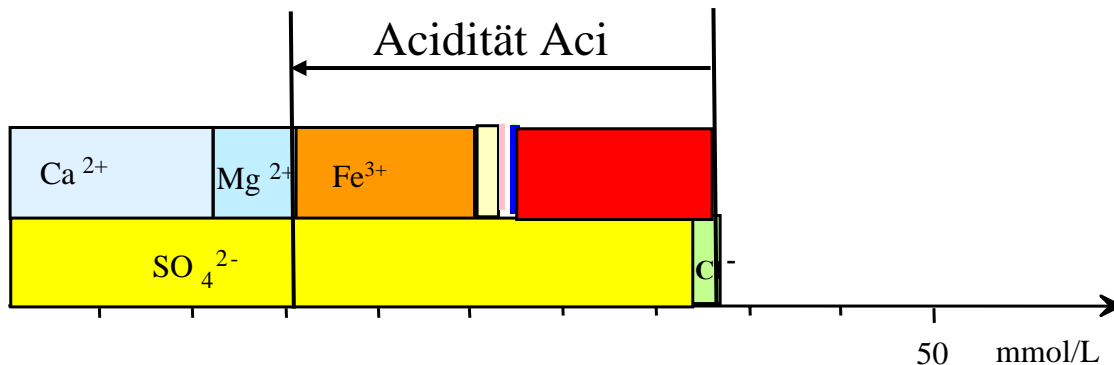
$$\text{Aci} = c_{\text{Cl}} + 2c_{\text{SO}_4} + c_{\text{NO}_3} + c_{\text{F}} - c_{\text{Na}} - 2c_{\text{Ca}} - 2c_{\text{Mg}} - c_{\text{NH}_4}$$

Alkalität **Alk**

$$\text{Alk} = c_{\text{HCO}_3} + 2c_{\text{CO}_3} + c_{\text{OH}} - c_{\text{H}^+}$$

Neutralisationspotenzial nach *Evangelou*

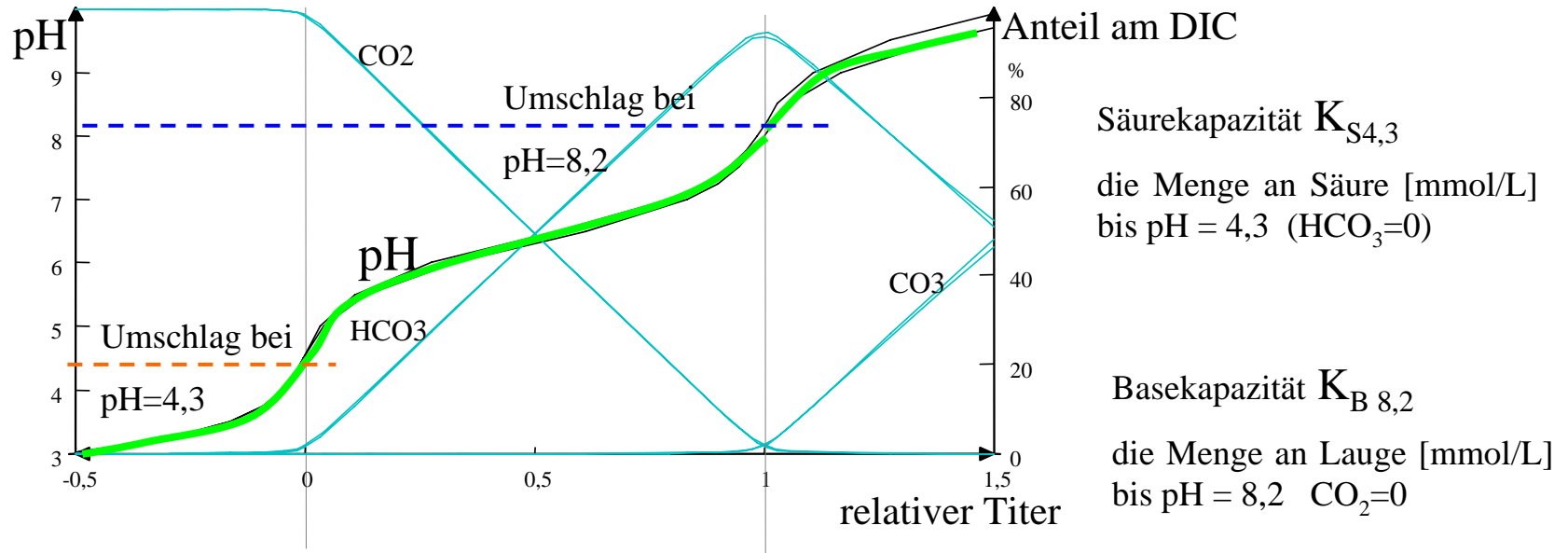
$$\text{NP} = 2c_{\text{CO}_3} + c_{\text{HCO}_3} + c_{\text{OH}} - c_{\text{HSO}_4} - c_{\text{H}^+} - 2c_{\text{Fe}^{2+}} - 3c_{\text{Fe}^{3+}} - 3c_{\text{Al}^{3+}} - 2c_{\text{Mn}^{2+}}$$



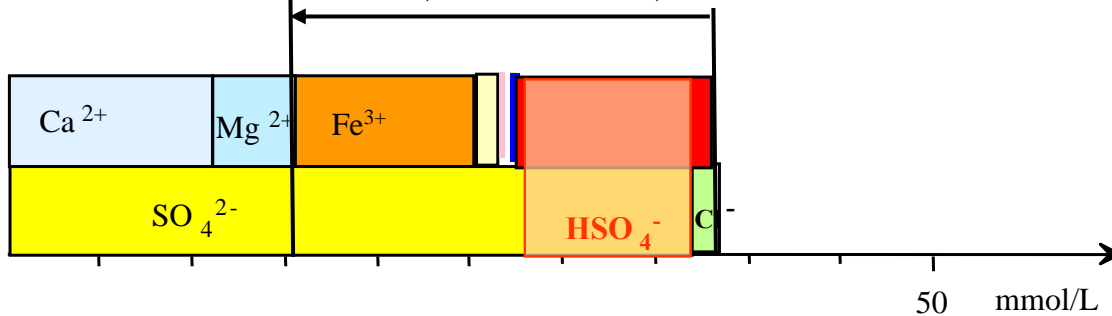
oxisches AMD

pH < 3

2. Zusammensetzung von AMD, Acidität



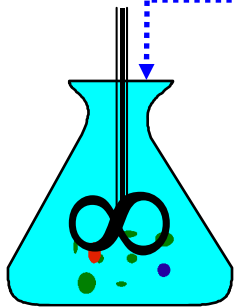
$$K_{B4,3} = -K_{S4,3} = c_{\text{H}^+} + c_{\text{HSO}_4^-} + 3c_{\text{Fe}^{3+}} - c_{\text{HCO}_3^-}$$



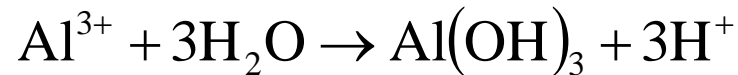
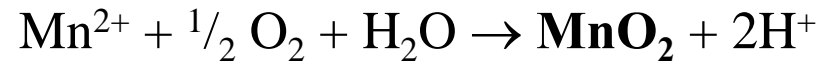
2. Zusammensetzung von AMD, Acidität

Neutralisationspotenzial nach *Evangelou*, angepasst

$$NP \approx K_{S4,3} - 3c_{Al^{3+}} - 2c_{Fe^{2+}} - 2c_{Mn^{2+}} - 2c_{Zn^{2+}}$$



H Cl
Na OH



$$-c_{H^+} - c_{HSO_4^-} - 3c_{Fe^{3+}} + c_{HCO_3^-}$$

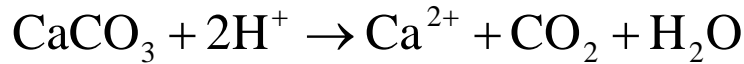
Säurekapazität $K_{S4,3} = -K_{B4,3}$

Die Reduktion der Aciditätsfunktion auf einen skalaren Wert ist für verfahrenstechnische Berechnungen notwendig.

2. Zusammensetzung von AMD, Acidität

englischsprachiger Raum:

Angabe in äquivalenter Konzentration an Calciumcarbonat,



entsprechend der Härte­definition

$$\frac{M_{\text{CaCO}_3}}{2} = 50 \text{ mg / mmol}$$

$$\text{acidity}_{\text{calculated}} = 50 \left((1000 \cdot 10^{-\text{pH}}) + (2c_{\text{Fe}^{2+}} + 3c_{\text{Fe}^{3+}}) / 56 + 2c_{\text{Mn}^{2+}} / 55 + 3c_{\text{Al}^{3+}} / 27 \right)$$

mg/L CaCO₃ c_{H⁺} **ohne** c_{Fe²⁺} c_{Fe³⁺} c_{Mn²⁺} c_{Al³⁺} mg/L
 Aktivitätskoeffizient f_{H⁺}

Molmassen [mg/mmol]

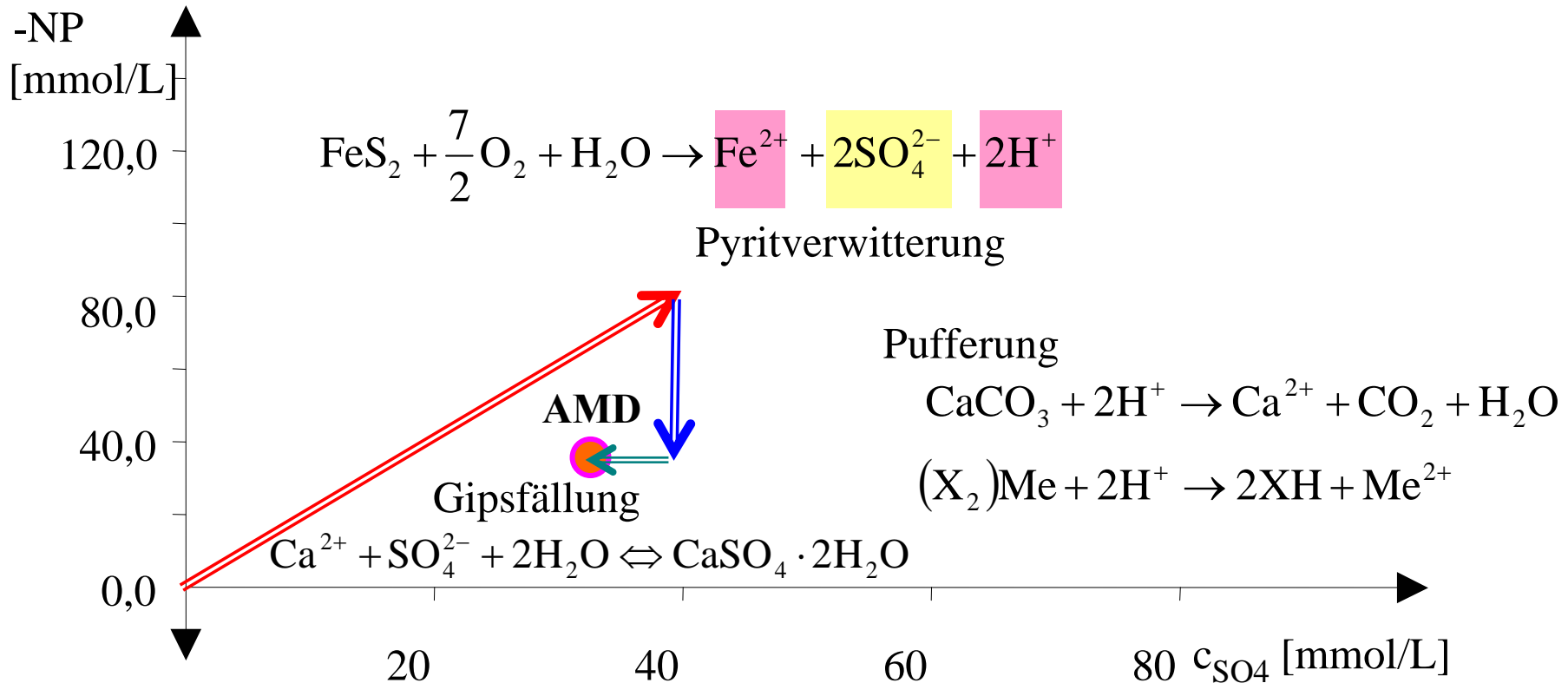
ohne Berücksichtigung der
Hydrogensulfatkonzentration

verwirrende Zahl von Begriffen, siehe u. a.

Kirby & Cravotta (2005) und Kirby & Cravotta (2005 a)

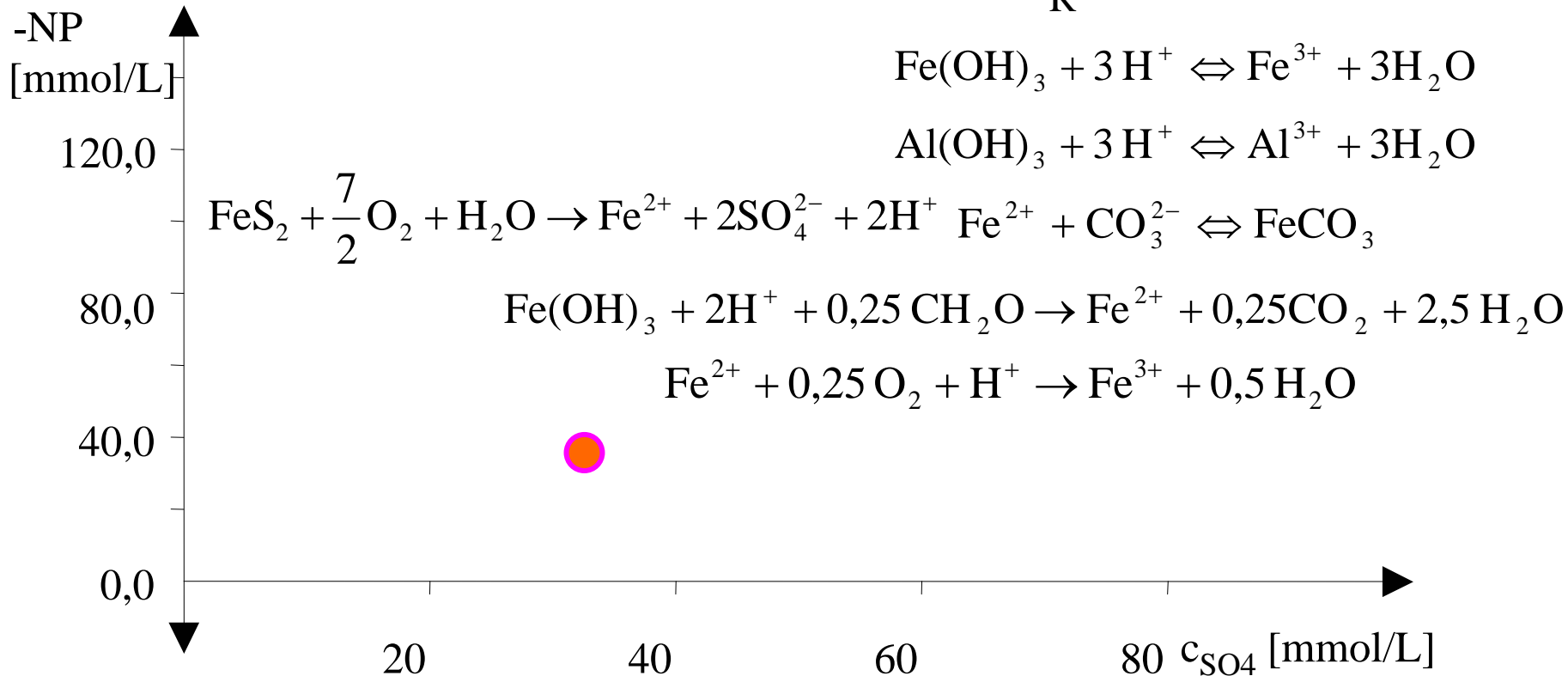
3. Reaktionen in AMD

Genese

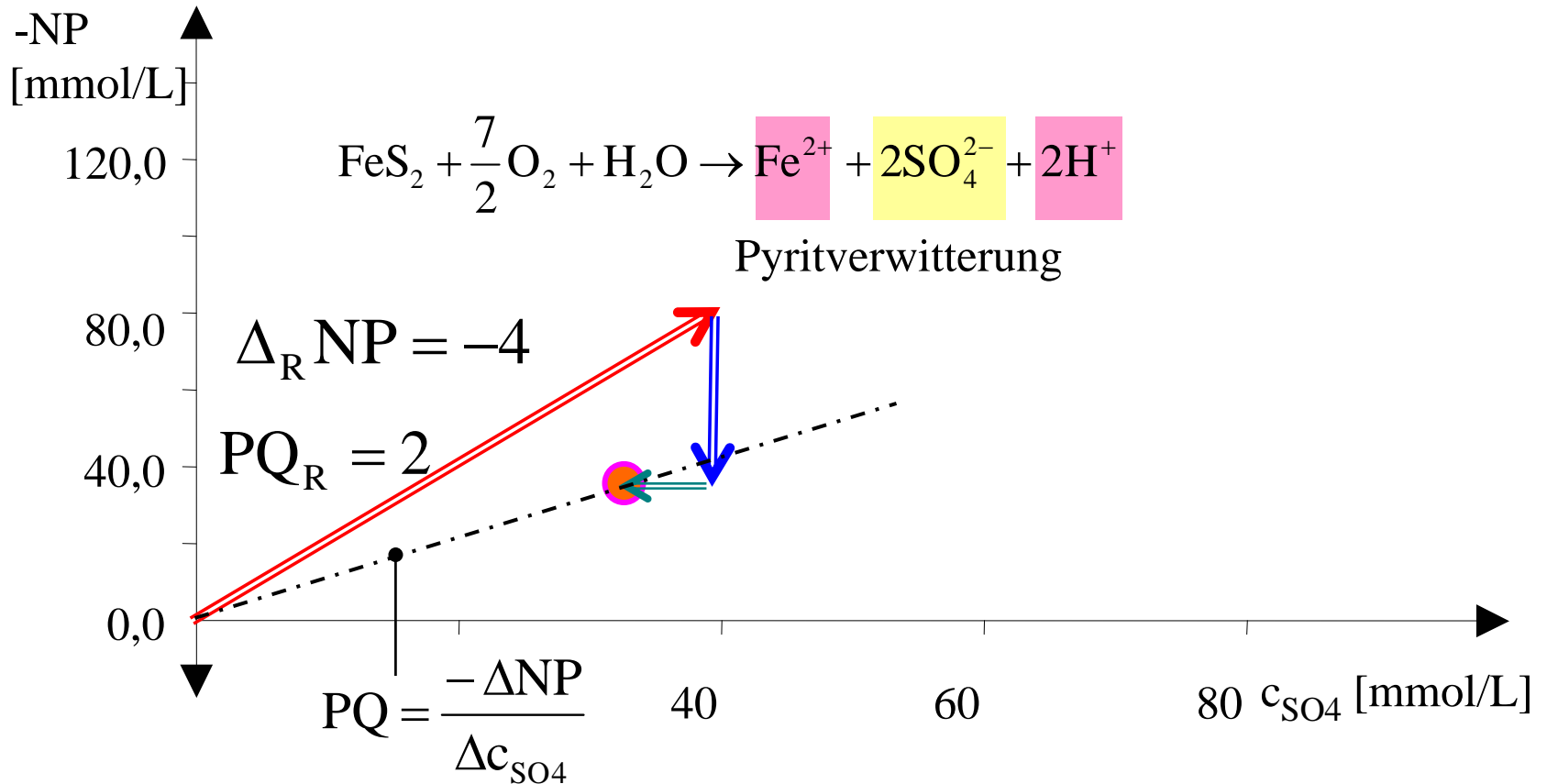


3. Reaktionen in AMD

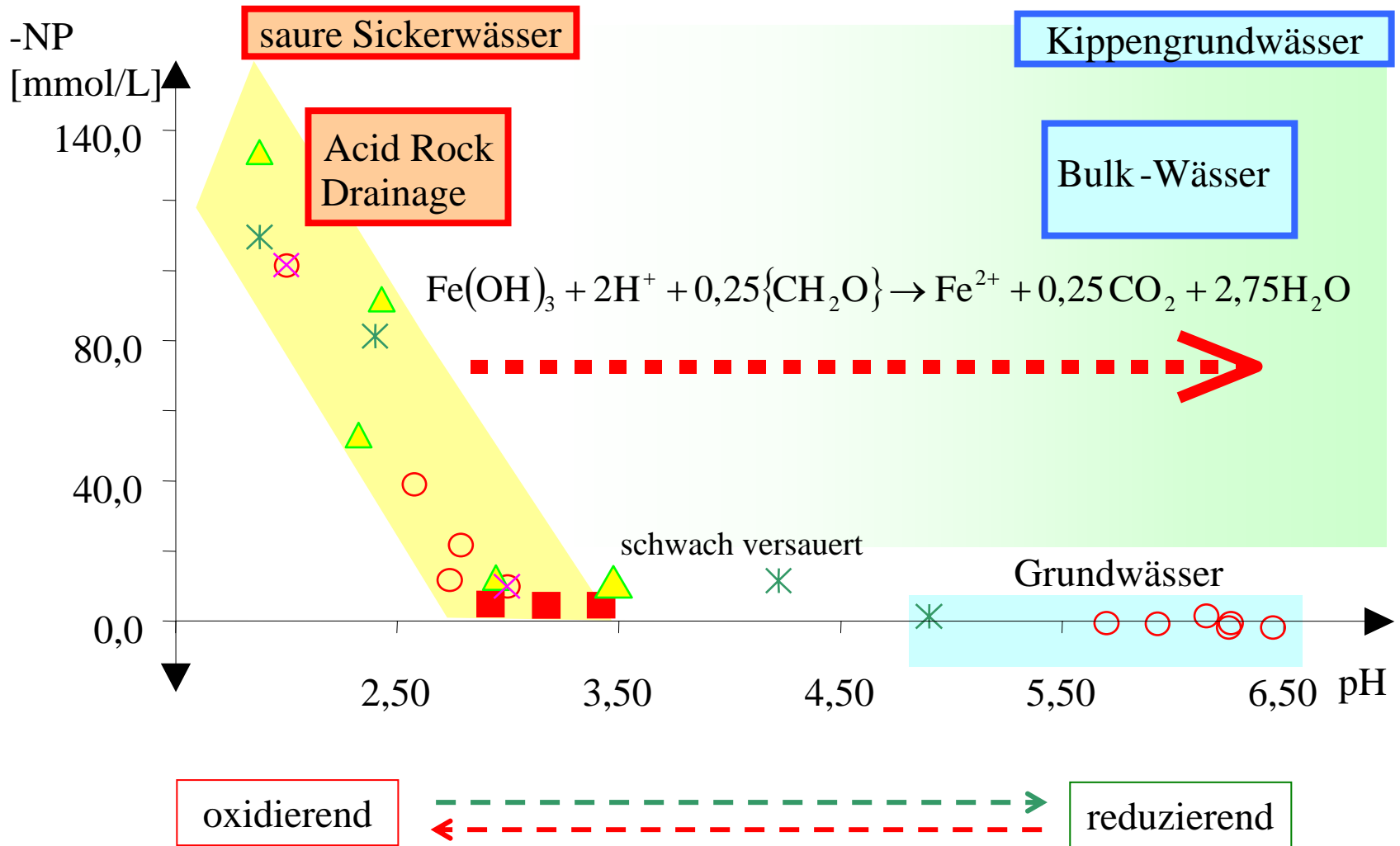
$$\Delta_R \text{NP} = 0$$



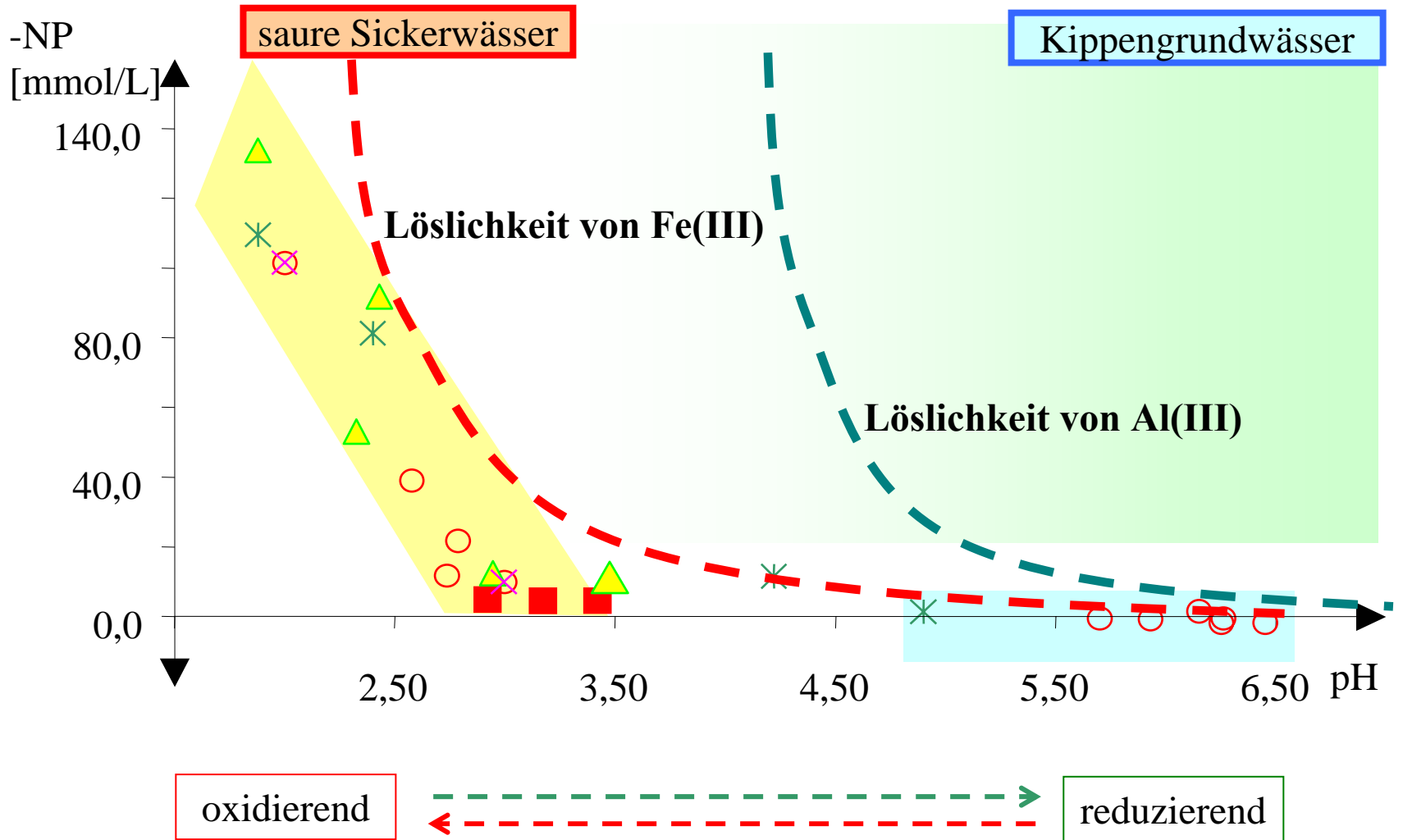
3. Reaktionen in AMD



3. Reaktionen in AMD



3. Reaktionen in AMD



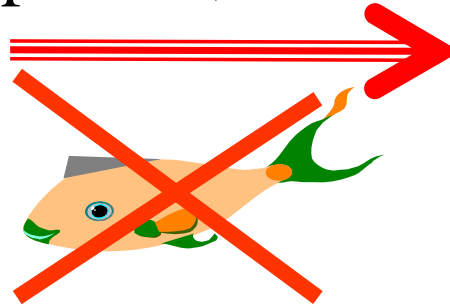
4. Beschaffenheitsprobleme mit AMD

Korrosion

- Säure (Acidität)



pH = 2,5... 4



- Eisen und

pH > 5

- Ästhetik
- Verschlammung
- Ökoschäden

- Eisenhydroxid

- Sulfat SO₄

- Betonkorrosion
- Abfürmittel (Na₂SO₄)
- Grenzwert 250 mg/L

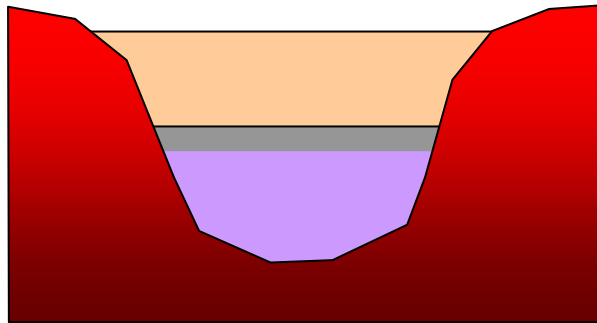
~~Ausnahme 500 mg/L
physiologisch unbedenklich~~



- Toxische Inhaltstoffe

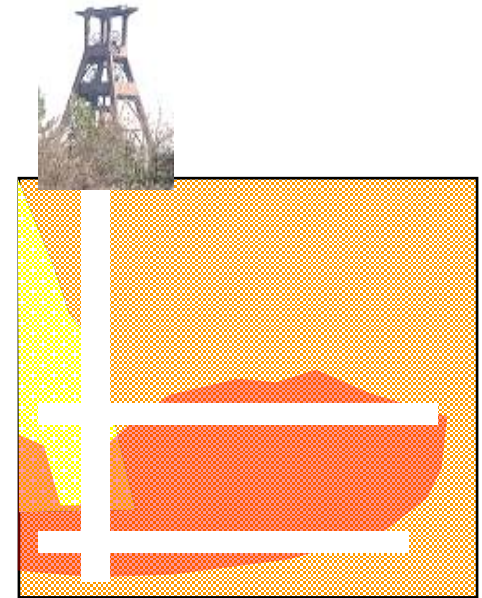
Al³⁺, Zn²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, Cd²⁺, As

4. Beschaffenheitsprobleme mit AMD



500 * 500m² * 4m

Ilsensee (End-Stand: 153 Mio m³)



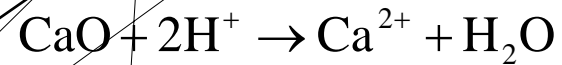
Beispiel: stark belastetes Grubenwasser
oder See

Parameter		z.B
pH	1	2,8
E _h	mV	635
Ltf	mS/cm	3,02
Temp	°C	15,2
O ₂	mg/L	4

4. Beschaffenheitsprobleme mit AMD

Stoff	c	1 Mio m ³
NP		
SO ₄	1895 mg/L	1895 t
Na	38 mg/L	38 t
K	6 mg/L	6 t
Cl	44 mg/L	44 t
F	1,98 mg/L	1,98 t
Mg	20 mg/L	19,6 t
Ca	140 mg/L	140,4 t
Sr	749 µg/L	0,75 t
Ba	27 µg/L	27 kg
Fe _{ges}	408 mg/L	408 t
Fe ³⁺	53 mg/L	52,9 t
Mn	11 mg/L	11,0 t
Al	47 mg/L	47 t

$$NP \approx -6 - 3 \frac{47}{27} - 2 \frac{355}{56} - 2 \frac{11}{55}$$



12,15 Mmol CaO =>
680t CaO

-2,8 mmol/L (Fe(III))

-3,2 mmol/L H⁺, HSO₄⁻

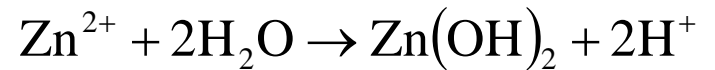
4. Beschaffenheitsprobleme mit AMD

Stoff	c	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			
NP		1	H															He		
SO ₄	1895 mg/L	2	Li	Be								B	C	N	O	F		Ne		
Na	38 mg/L	3	Na	Mg								Al	Si	P	S	Cl		Ar		
K	6 mg/L	4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Cl	44 mg/L	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	J	Xe
F	1,98 mg/L	6	Cs	Ba	La ¹	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
		7	Fr	Ra	Ac ²	Ku	Ha	Rf	Ns	Hs	Mt									
Mg	20 mg/L																			
Ca	140 mg/L																			
Sr	749 µg/L																			
Ba	27 µg/L																			
Fe _{ges}	408 mg/L																			
Fe ³⁺	53 mg/L																			
Mn	11 mg/L																			
Al	47 mg/L																			

Verteilung der Härtebildner

4. Beschaffenheitsprobleme mit AMD

Stoff	c	1 Mio m ³
U	25 mg/L	25 t
As	289 µg/L	289 kg
Zn	18 mg/L	18 t
Cd	169 µg/L	169 kg



$$\Delta\text{NP}(\text{Zn}) \approx -2 \cdot \frac{18\text{mg/L}}{63,5\text{mg/mmol}} = -0,56\text{mmol/L}$$

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	H															He		
2	Li	Be									B	C	N	O	F	Ne		
3	Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	Ar		
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	J	Xe
6	Cs	Ba	La ¹	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac ²	Ku	Ha	Rf	Ns	Hs	Mt									

vernachlässigbar gegenüber

-24 mmol/L

1) Lanthanoide: Ce, Pr, Nd, **Pm**, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu

2) Actinoide: Th, Pa, **U**, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Md, No, Lr

4. Beschaffenheitsprobleme mit AMD

Radioaktive Belastung

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	H															He		
2	Li	Be									B	C	N	O	F	Ne		
3	Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	Ar		
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	J	Xe
6	Cs	Ba	La ¹	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac ²	Ku	Ha	Rf	Ns	Hs	Mt									

1) Lanthanoide: Ce, Pr, Nd, **Pm**, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu

2) Actinoide: Th, Pa, **U**, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Md, No, Lr



Zerfallsgesetz:

Aktivität [1 Bq = 1 Zerfall pro Sekunde]:

$$c = c_0 \cdot 2^{-\frac{t}{t_{1/2}}} \quad \text{Akt} = \frac{\partial}{\partial t} c = c \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(e^{-\frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot t} \right) = \lambda \cdot c$$

Zerfallskonstante

4. Beschaffenheitsprobleme mit AMD

Radioaktive Belastung

$$c = c_0 \cdot 2^{-\frac{t}{t_{1/2}}}$$

$$\text{Akt} = \frac{\partial}{\partial t} c = -\frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot c$$

$$c = \text{Akt} \cdot \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \cdot \frac{1}{N_0}$$

$$c = \text{Akt} \cdot \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \cdot \frac{1}{N_0}$$

Avogadrokonstante:

$$N_0 = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol}$$

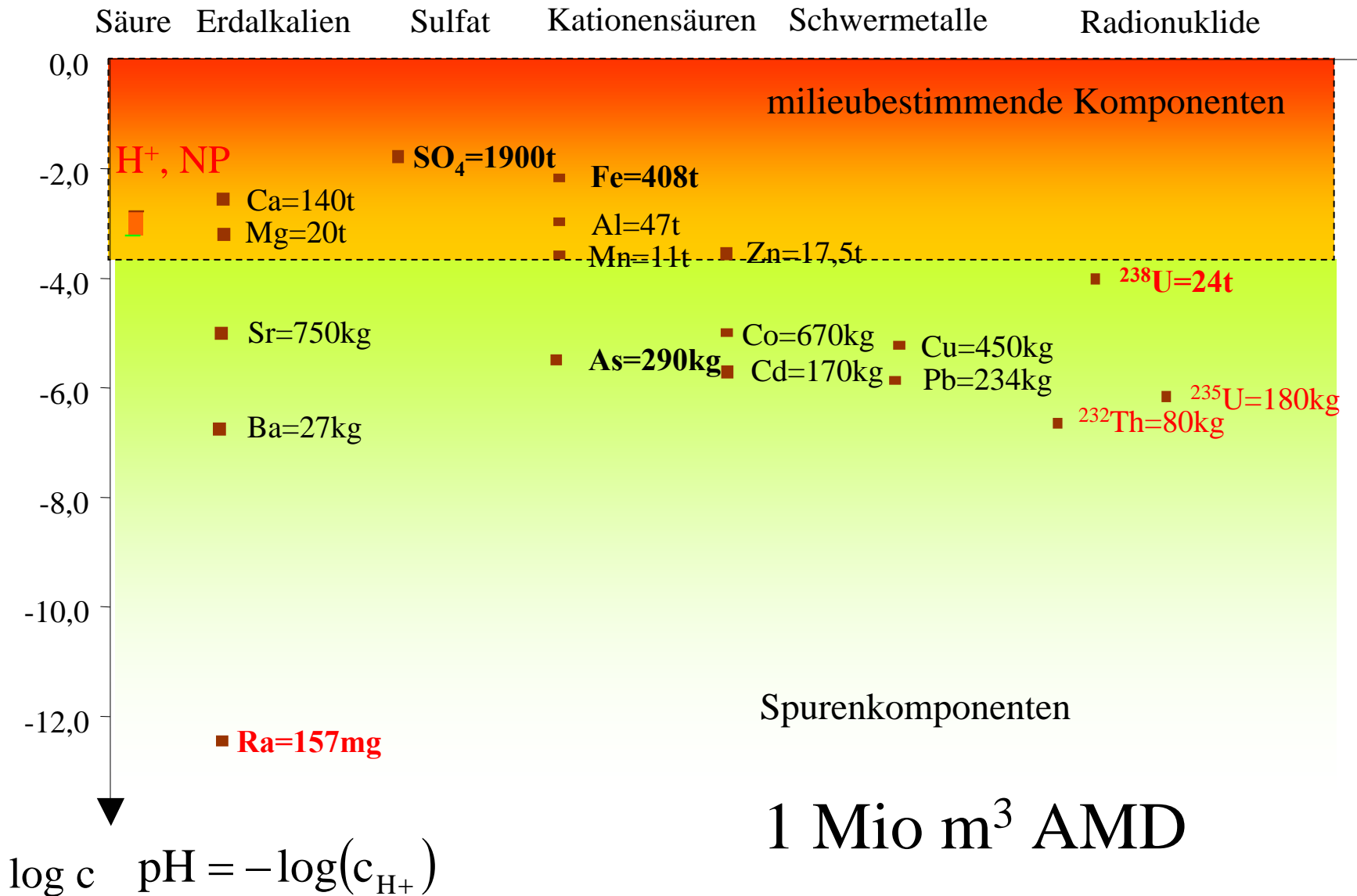
Uran-238

$$c = \text{Akt} \cdot \frac{4,47 \cdot 10^9 \cdot 365,25 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}}{\ln 2} \cdot \frac{\text{mol}}{6,02 \cdot 10^{23}} = \text{Akt} \cdot 3,38 \cdot 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{s}$$

$$c = 302,68 \frac{1}{\text{s} \cdot \text{L}} \cdot 3,38 \cdot 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{s} \cdot 238000 \frac{\text{mg}}{\text{mol}} = 24,3 \text{ mg/L}$$

Element	$t_{1/2}$	Bq/L	c	
U-235	704 000 000 a	14,357	0,18	mg/L
U-238	4 470 000 000 a	302,268	24,3	mg/L
Ra-226	1600 a	5,730	$157 \cdot 10^{-9}$	mg/L
Th-232	14 100 000 000 a	0,314	0,088	mg/L

4. Beschaffenheitsprobleme mit AMD



4. Beschaffenheitsprobleme mit AMD

kritische Parameter:

- Acidität als niedriger **pH**-Wert oder als hohe **Eisen(II)**konzentration
- Salzbelastung durch **Sulfat**

Milieukomponenten

- **Schwermetalle**, darunter **Arsen, Zink**
- **Radioaktivität**, speziell des Radiums und des Urans

Spurenkomponenten

Danke für die Aufmerksamkeit



Modul 43-4-19

Bergbauliche Wasserwirtschaft

*acid mine drainage = AMD
ein weltweites Problem*





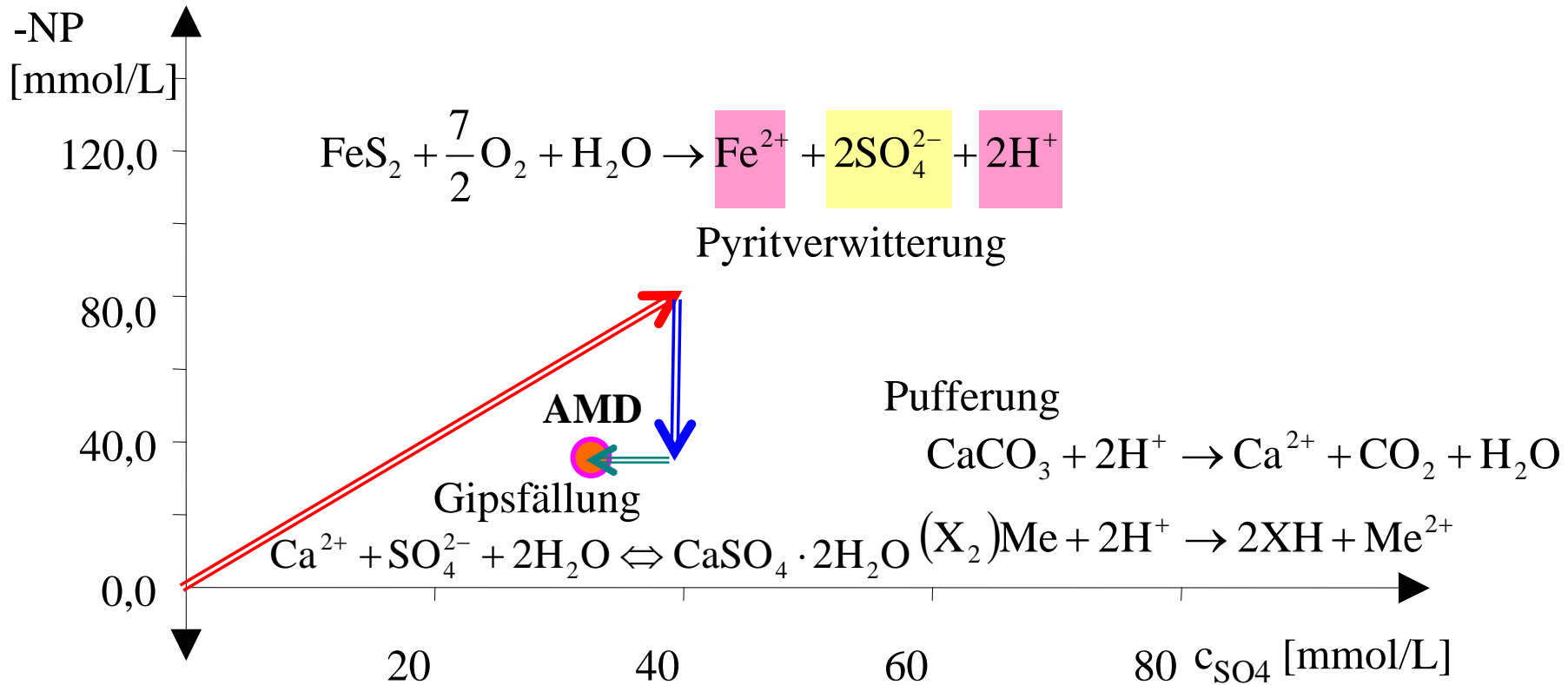
Inhalt:

1. Allgemeine Beschaffenheit von AMD (wdh.)
2. Oxische AMD - Saure Seen
3. AMD des Untertagebergbaus
4. Braune Spree
5. Zusammenfassung



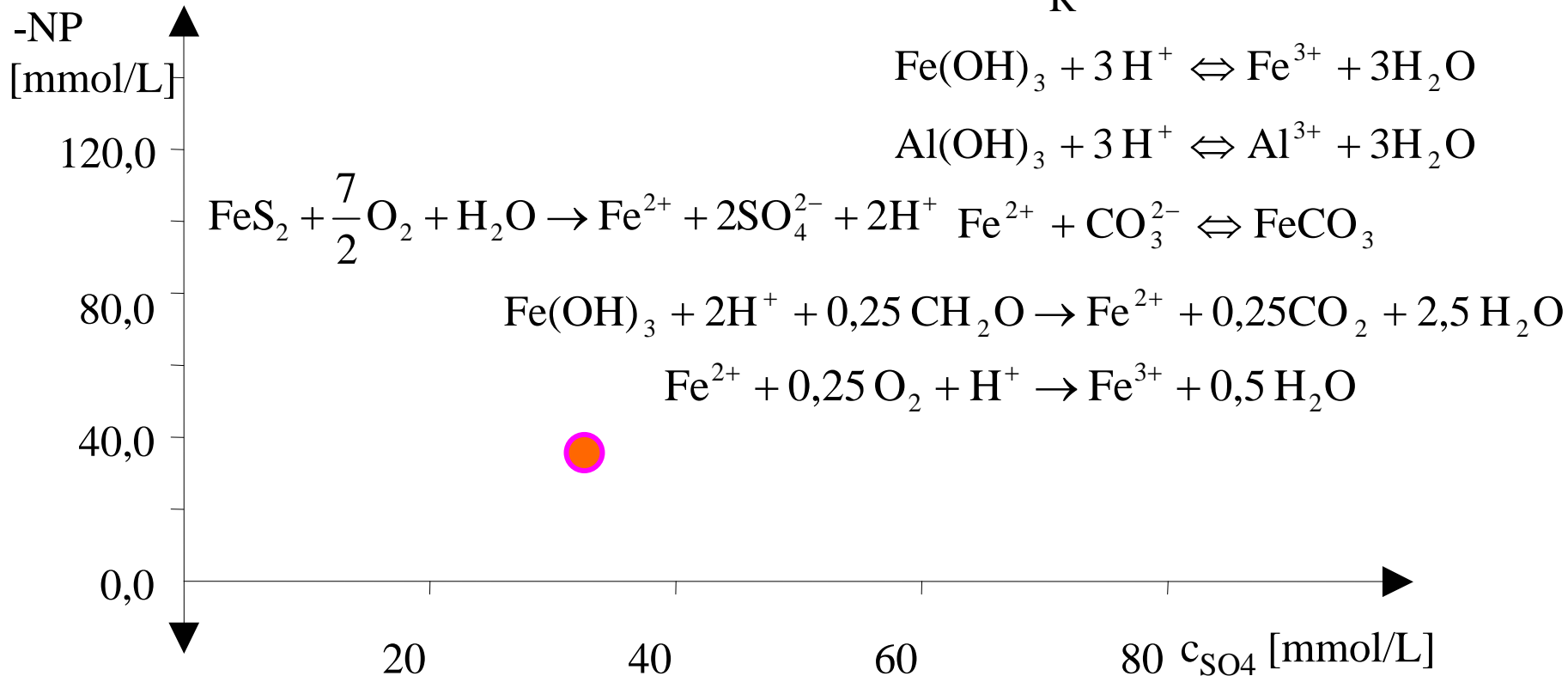
1. Beschaffenheiten von AMD, Wiederholung

$$NP \approx K_{S4,3} - 3c_{Al^{3+}} - 2c_{Fe^{2+}} - 2c_{Mn^{2+}}$$



1. Beschaffenheiten von AMD, Wiederholung

$$\Delta_R \text{NP} = 0$$



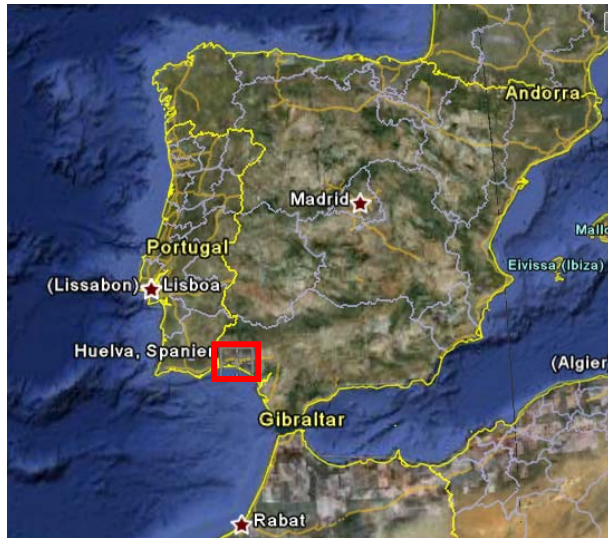
Oxische und anoxische AMD unterscheiden sich nicht in diesem Diagramm, wohl aber im pH-Wert.

2.1 Spanischer Pyritgürtel

Hydrochemische Parameter von 22 stark bergbauversauerten und z. T. meromiktischen Tagebauseen im Spanischen Pyrit-Gürtel.

(Buntmetallbergbau Cu, Zn, Pb, Ag, Au und S)

Sanchez et al. (2008 /R3445/)



2.1 Spanischer Pyritgürtel

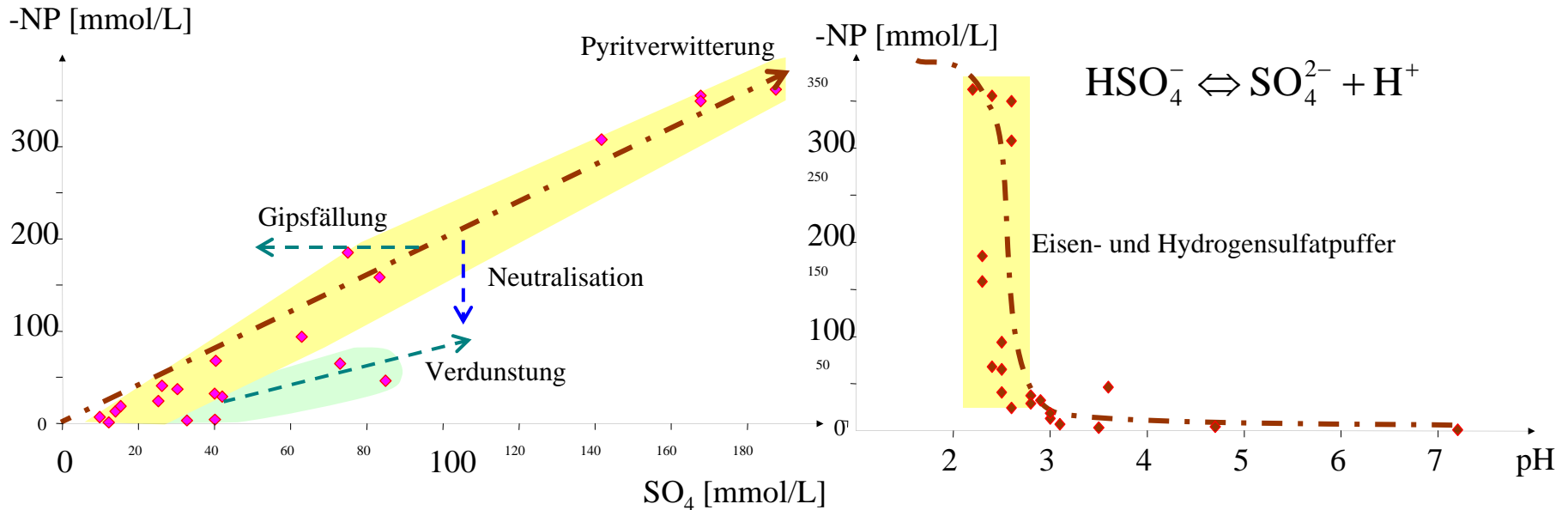
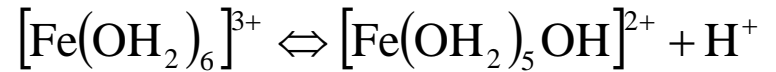
Hydrochemische Parameter von 22 stark bergbauversauerten und z. T. meromiktischen Tagebauseen im Spanischen Pyrit-Gürtel.

/R3445/		min	Mittel	max
pH	1	2,2	3,0	7,2
Temp	°C	18	24	30
E	mV	547	762	850
Ltf	µS/cm	1159	5729	13300
O ₂	mg/L	2,2	7,3	8,8
SO ₄	mg/L	940	6270	18000
Na	mg/L	10	35,8	95
K	mg/L	0,4	2,9	12,5
Mg	mg/L	33	360	1252
Ca	mg/L	19	205	533
Fe	mg/L	0,07	1007	4620
Al	mg/L	1	227	773
Mn	mg/L	3	57	254

/R3445/		min	Mittel	max
Cu	µg/L	10	55453	430000
Zn	µg/L	5000	159381	834000
As	µg/L	6	1493	21937
Cd	µg/L	16	333	1913
Co	µg/L	38	2469	8879
Cr	µg/L	1	82	452
Ni	µg/L	32	1318	7159
Pb	µg/L	2	261	1032

2.1 Spanischer Pyritgürtel

Hydrochemische Parameter von 22 stark bergbauversauerten und z. T. meromiktischen Tagebauseen im Spanischen Pyrit-Gürtel.
(Buntmetallbergbau Cu, Zn, Pb, Ag, Au und S)

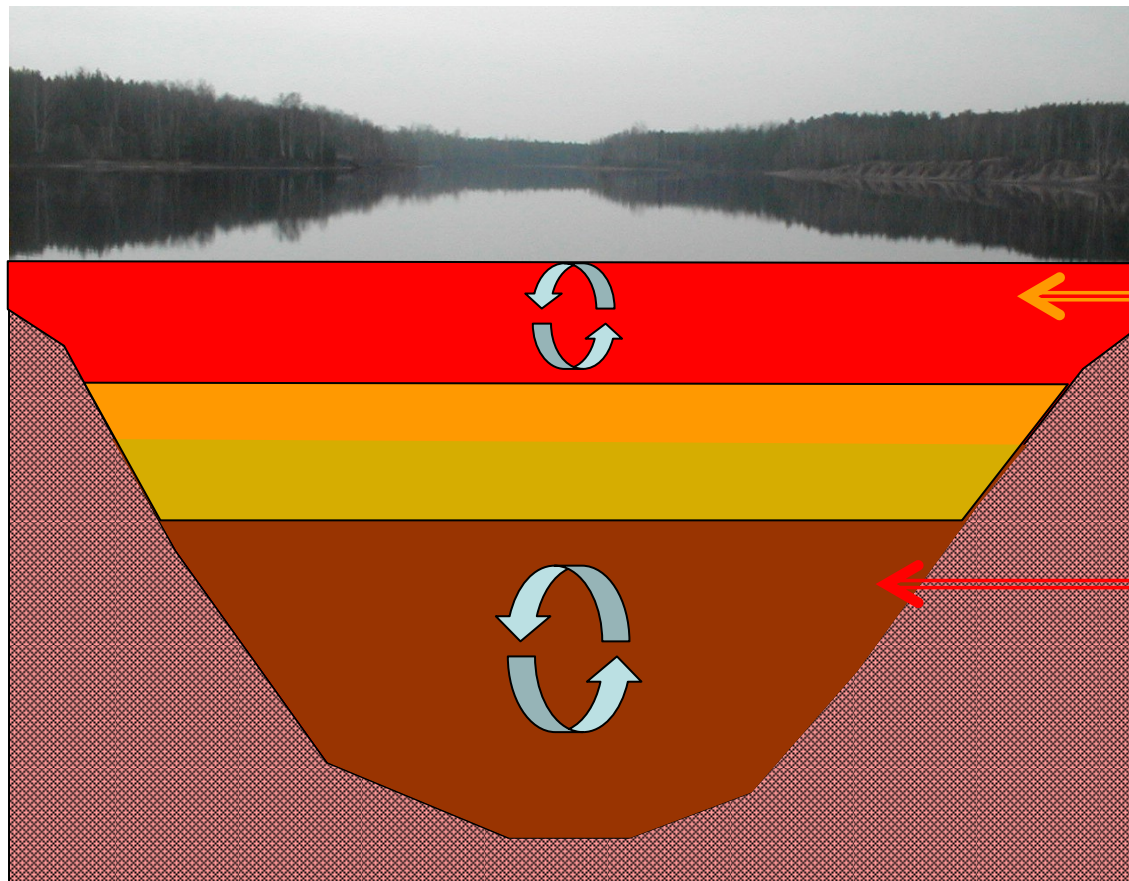


2.2 Meromiktischer See RL54 (polnischer Muskauer Faltenbogen)



2.2 Meromiktischer See RL54 (polnischer Muskauer Faltenbogen)

(RL 54 in Polen)



**stock-
sauer ?**

**schwach
sauer ?**

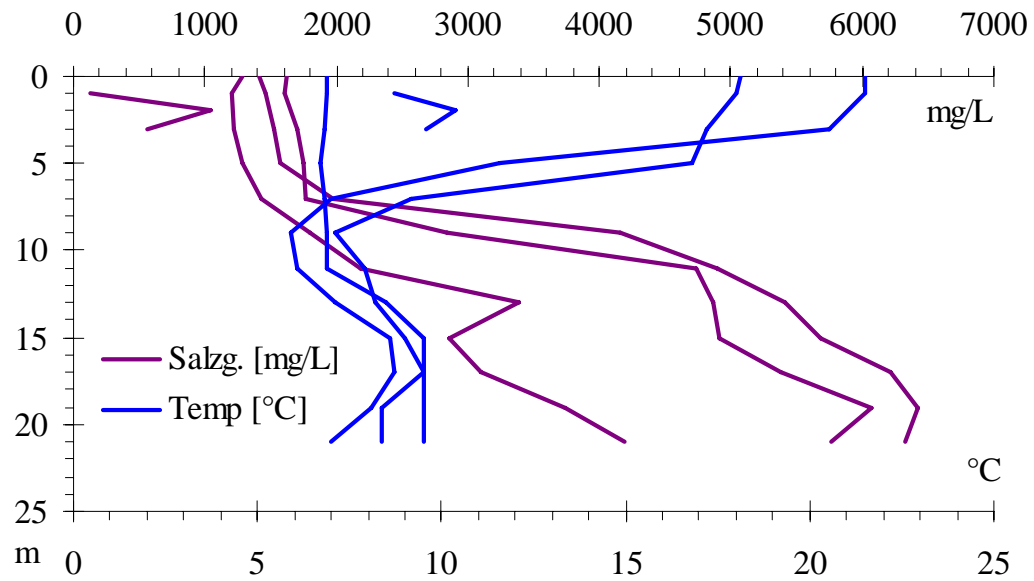
Kippengrundwasser
mit Niederschag
verdünnt

hochbelastetes
Kippengrundwasser

Tagebausee RL54



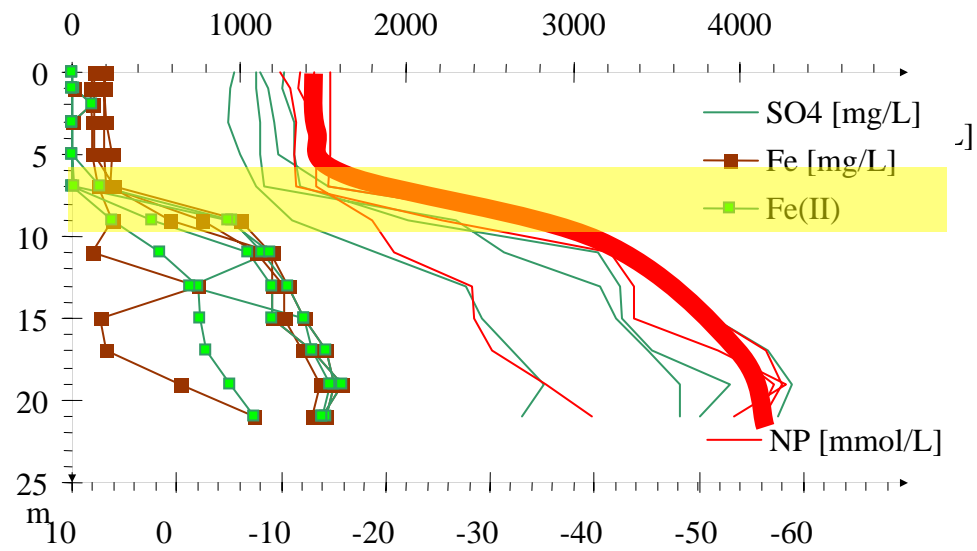
Fläche $\approx 350\,000\text{ m}^2$
Volumen $\approx 2,4\text{ Mio m}^3$



Tagebausee RL54



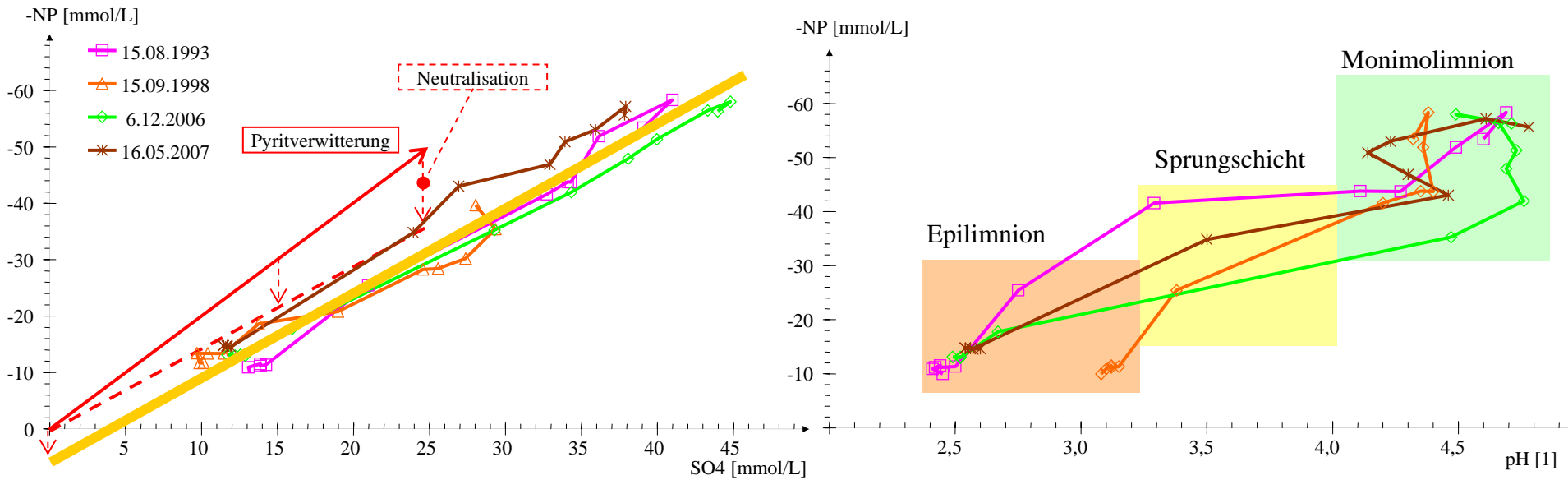
Fläche $\approx 350\,000\text{ m}^2$
Volumen $\approx 2,4\text{ Mio m}^3$



$$NP \approx K_{S4,3} - 3c_{Al3+} - 2c_{Fe2+} - 2c_{Mn2+}$$

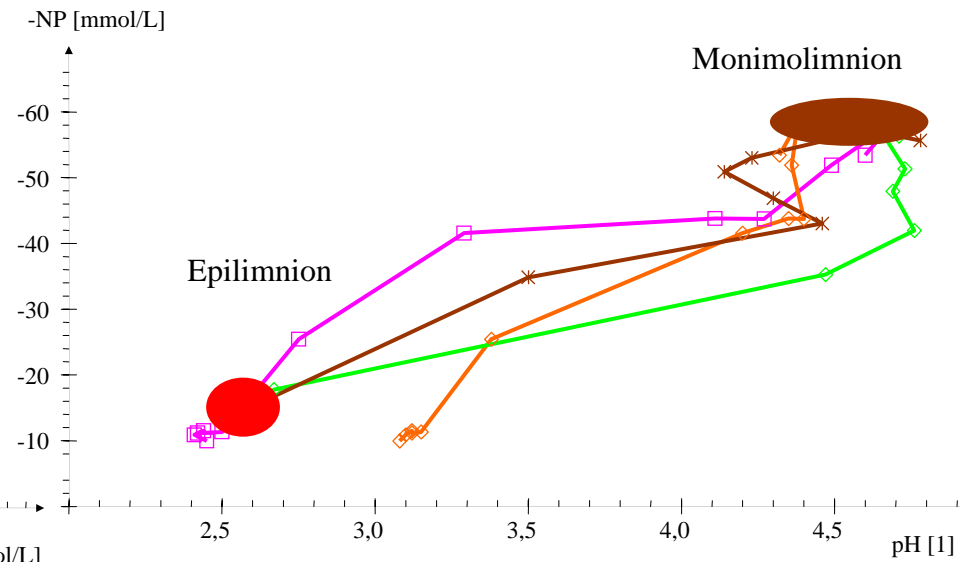
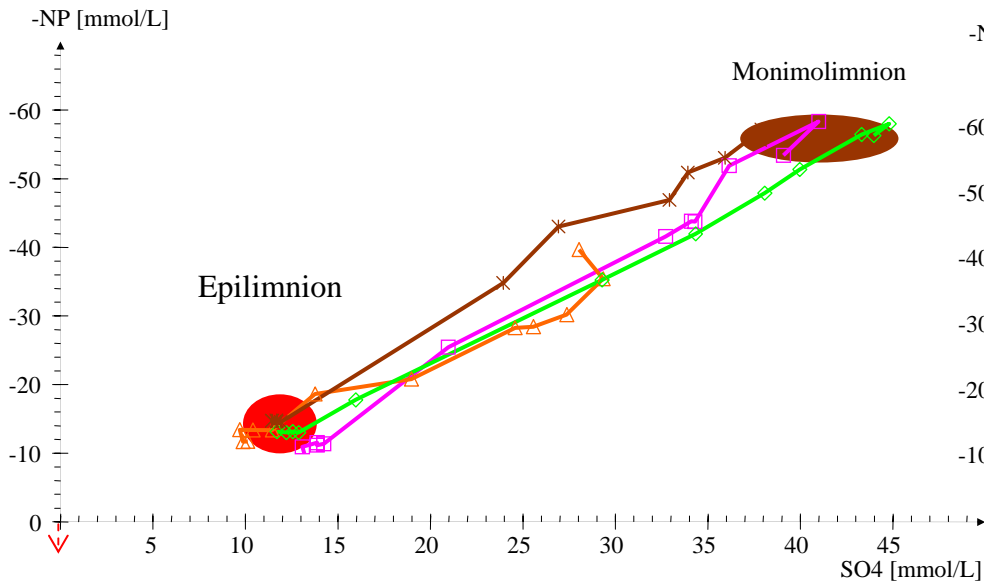


2.2 Meromiktischer See RL54 (polnischer Muskauer Faltenbogen)



$$NP \approx K_{S4,3} - 3c_{Al^{3+}} - 2c_{Fe^{2+}} - 2c_{Mn^{2+}}$$

2.2 Meromiktischer See RL54 (polnischer Muskauer Faltenbogen)

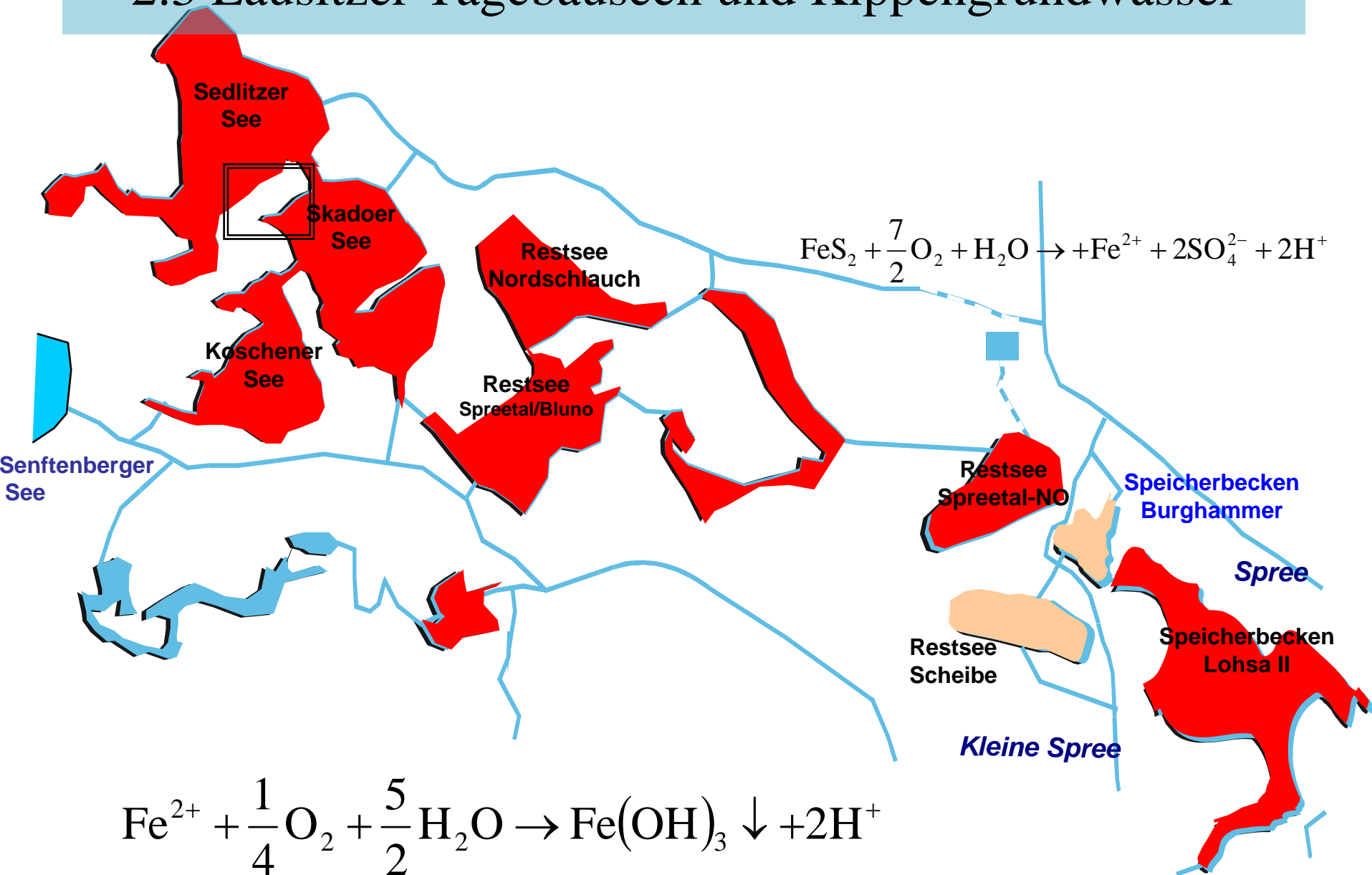


2.2 Meromiktischer See RL54 (polnischer Muskauer Faltenbogen)

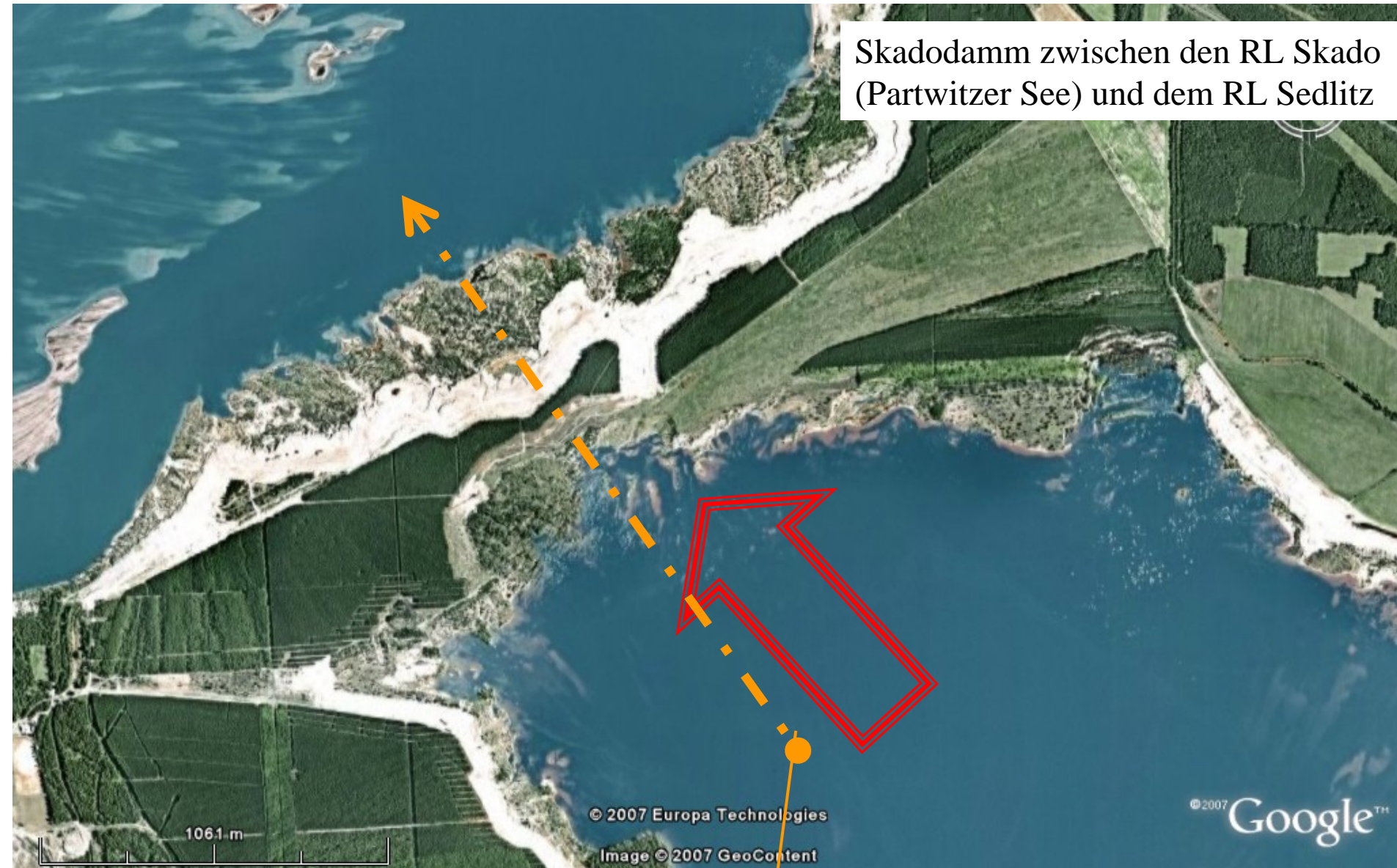
Analysen

		Epilimnion 3m	Monimolimnion 19m
temp	°C	7	9,5
pH	1	2,5	4,5
Na	mg/L	6	8,5
K	mg/L	3,2	18,3
Ca	mg/L	65	402,5
Mg	mg/L	22	68
Fe-ges	mg/L	135	1563
Fe(2)	mg/L	4	1563
Mn	mg/L	3,1	10,8
Al	mg/L	34	18,8
Cl	mg/L	4,5	4
Sulfat	mg/L	1200	4300
O ₂	mg/L	7,8	0
Alkalinity	mmol/L	-	0,3

2.3 Lausitzer Tagebauseen und Kippengrundwässer

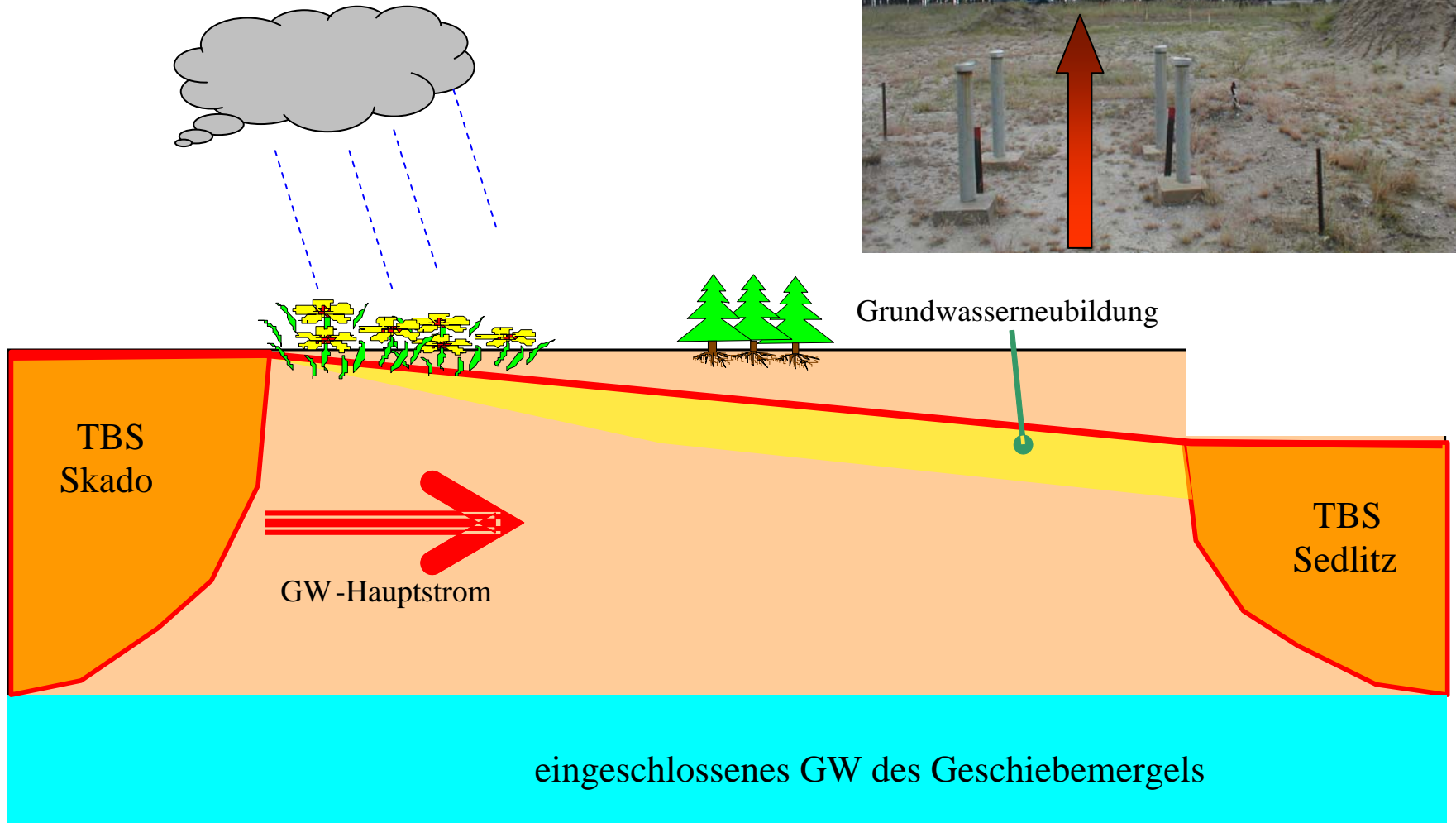
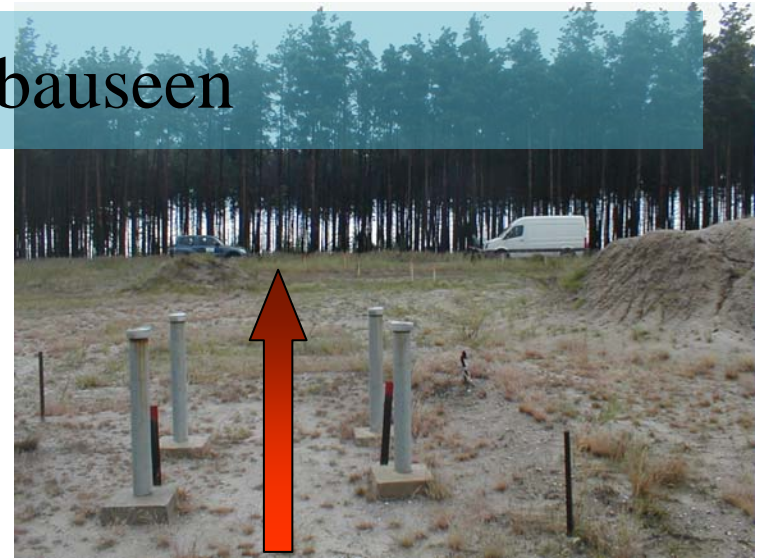


Skadodamm zwischen den RL Skado
(Partwitzer See) und dem RL Sedlitz



Betrachtung eines Schnittes durch die Kippe "Skadodamm" in Grundwasserfließrichtung

2.3 Lausitzer Tagebauseen

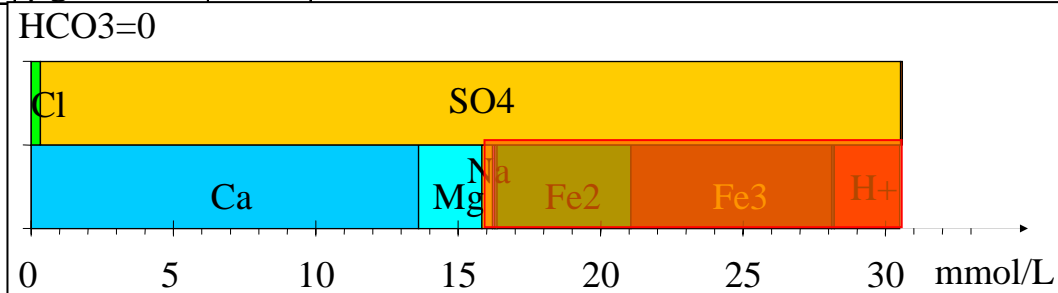


2.3 Lausitzer Tagebauseen und Kippengrundwässer

RL111 nach /R2504/

Parameter	Dimension	Wert
pH	l	2,5
Leitfähigkeit	mS/cm	2,7
K _{S4,3}	mmol/L	-11,0
Fe _{ges}	mg/L	131
Fe ²⁺	mg/L	4,0
Mn	mg/L	2,5
Al	mg/L	36,8
NH ₄	mg/L	1,3
SO ₄	mg/L	1560
NP	mmol/L	-15,4

Parameter	Dimension	Wert
Na	mg/L	8,7
K	mg/L	3,2
Ca	mg/L	272
Mg	mg/L	27
Cl	mg/L	12,0
NO ₃	mg/L	3,9
ortho-PO ₄	µg/L	3
DOC	mg/L	4,8
DIC	mg/L	0,6
Ni	mg/L	0,5
Cu	mg/L	0,17
Zn	mg/L	3,09
As	µg/L	< 10
Pb	µg/L	45,4
Cd	µg/L	3,3
Cr	µg/L	33,5
Co	µg/L	353
Mo	µg/L	20,4



2.3 Lausitzer Tagebauseen

DOC-Abbau im Tagebausees RL 111 über photochemische *Fenton*-Reaktion

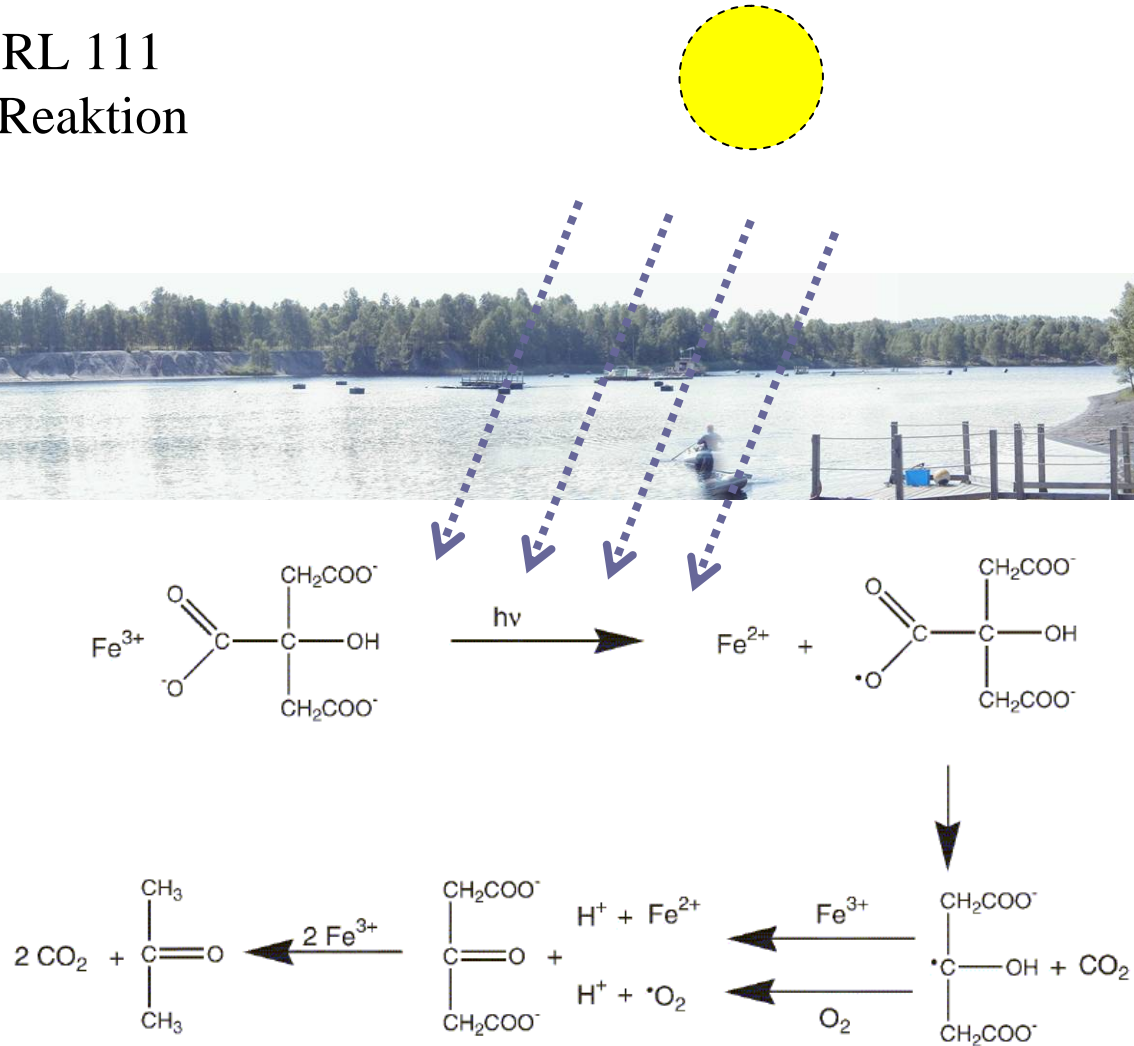


Fig. 1: Reaction scheme of photochemical degradation of the Fe³⁺-citrate complex [30].

3. AMD des Untertagebergbaus

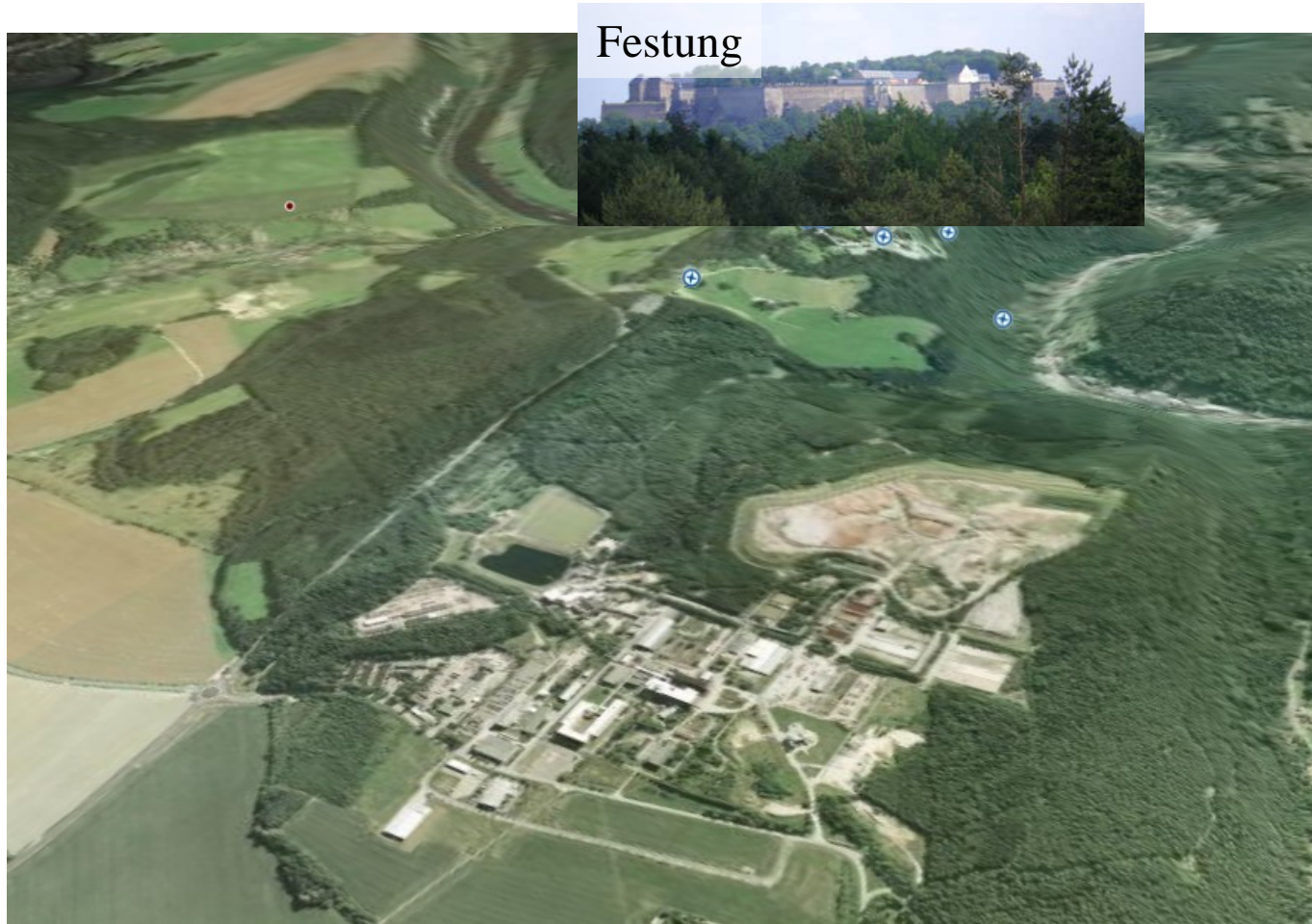


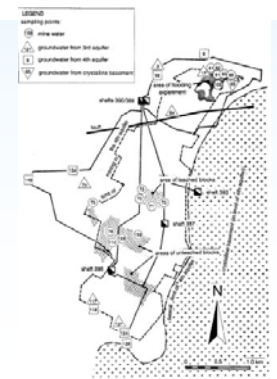
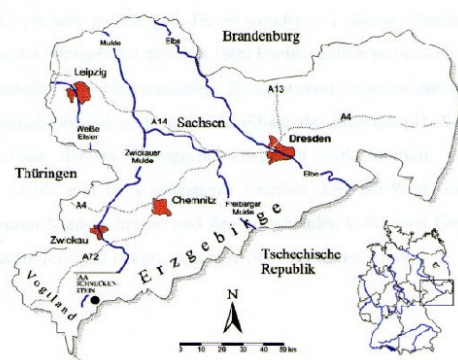
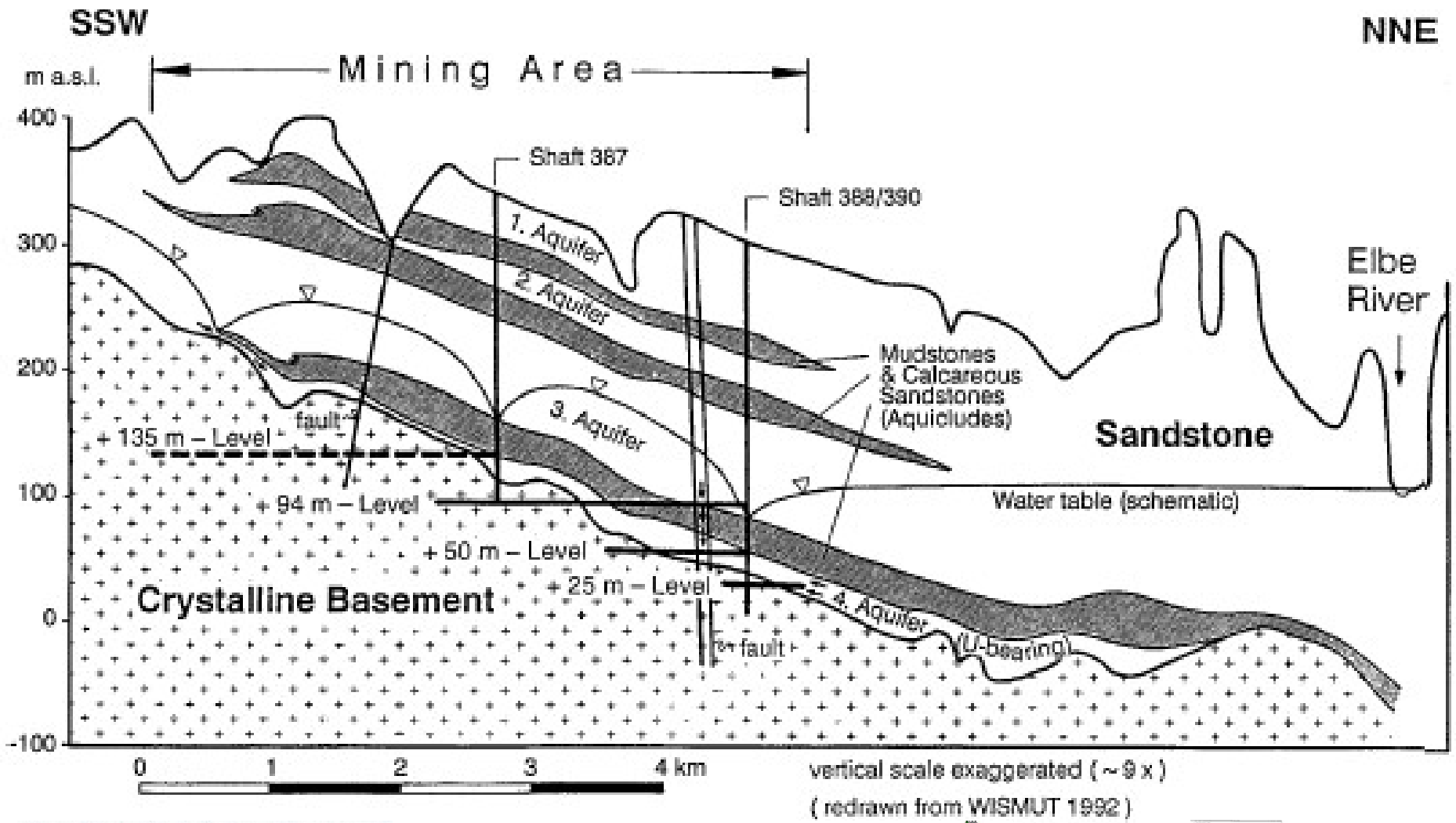
ehemalige Urangrube A



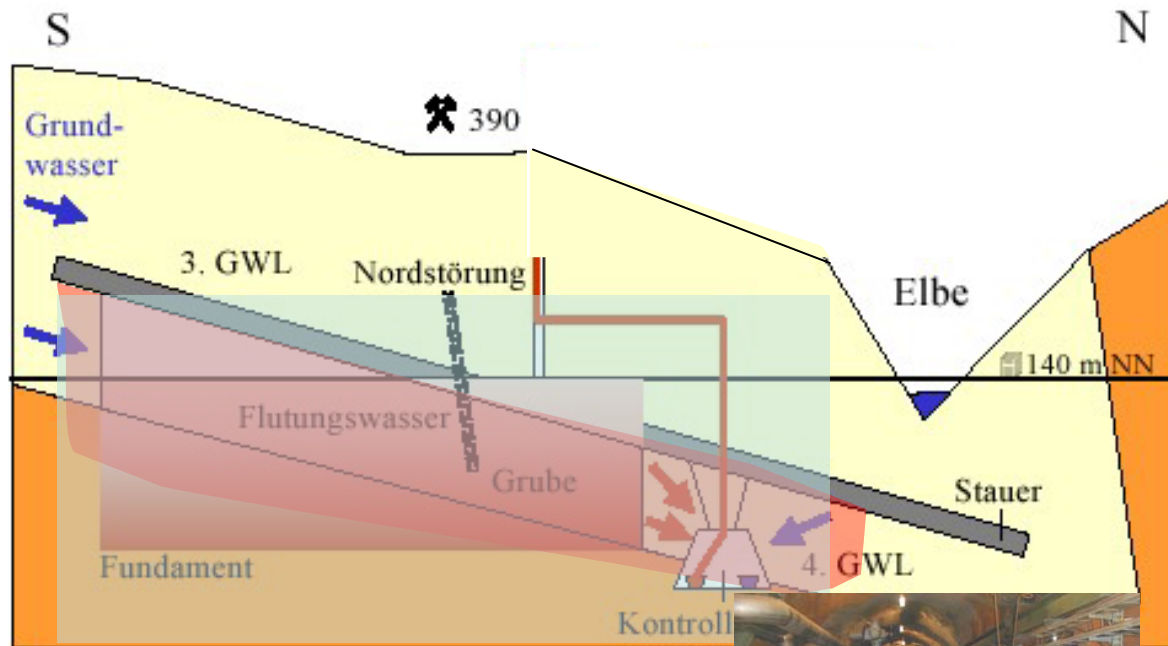
ehemalige Urangrube B

3.1 Ehemalige Urangrube A





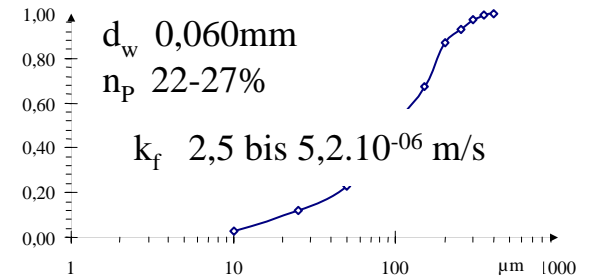
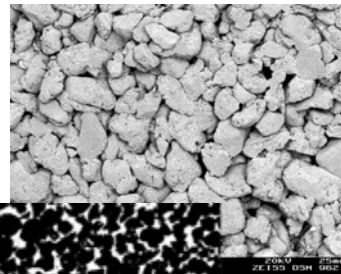
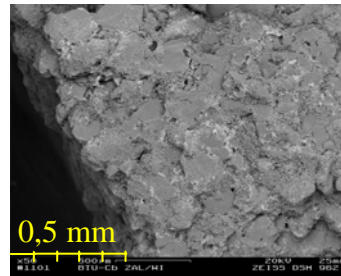
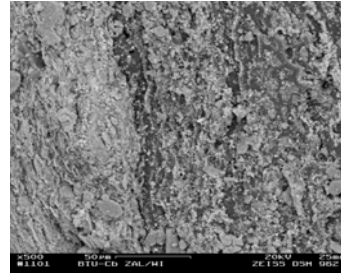
3.1 Ehemalige Urangrube A



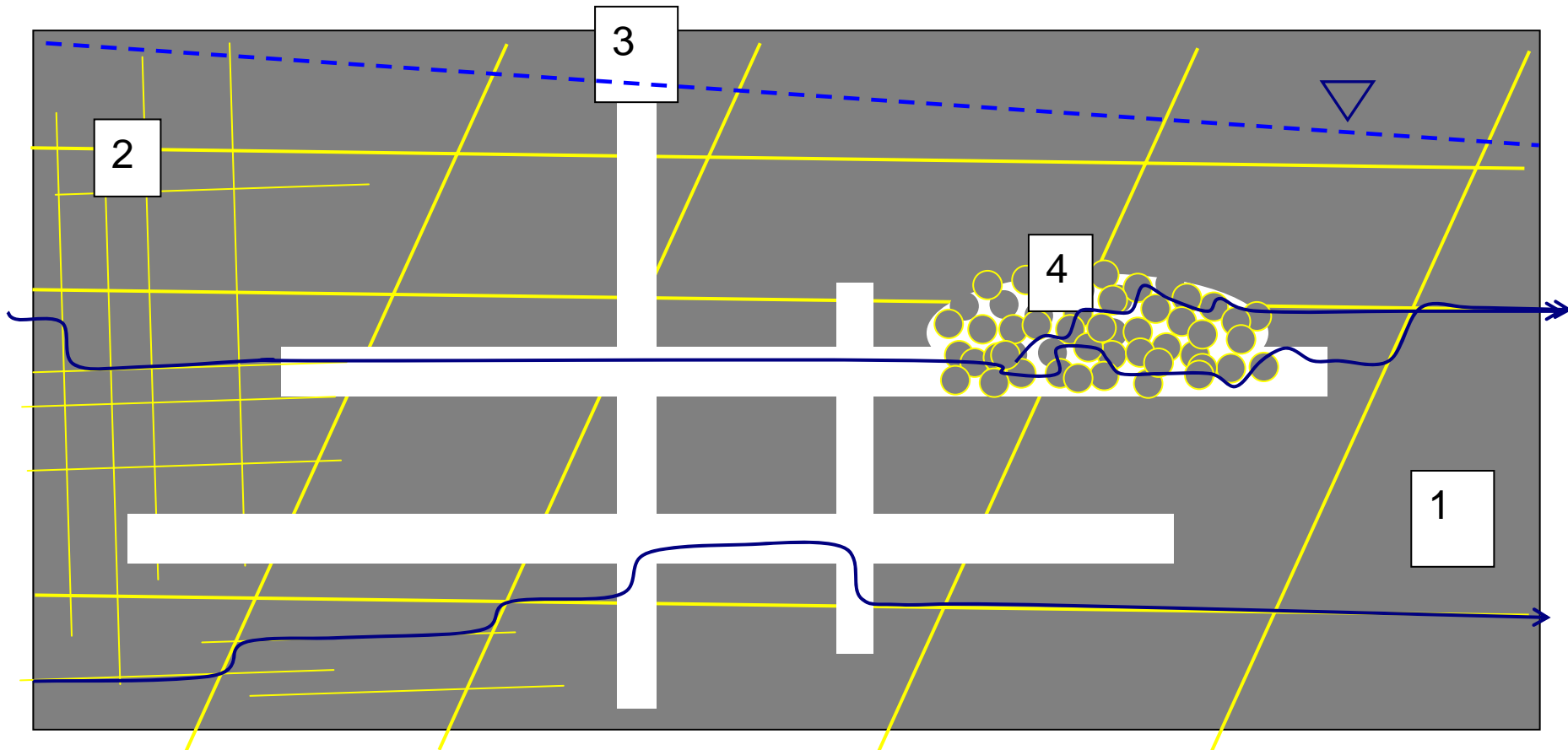
Laugungsbergbau

3.1 Ehemalige Urangrube A

Gesteinsbruch



3.1 Ehemalige Urangrube A



1 Gesteinsporosität 2 Klüftung 3 Schächte, Strecken, Hohlräume

4 Lockergesteinsbereiche

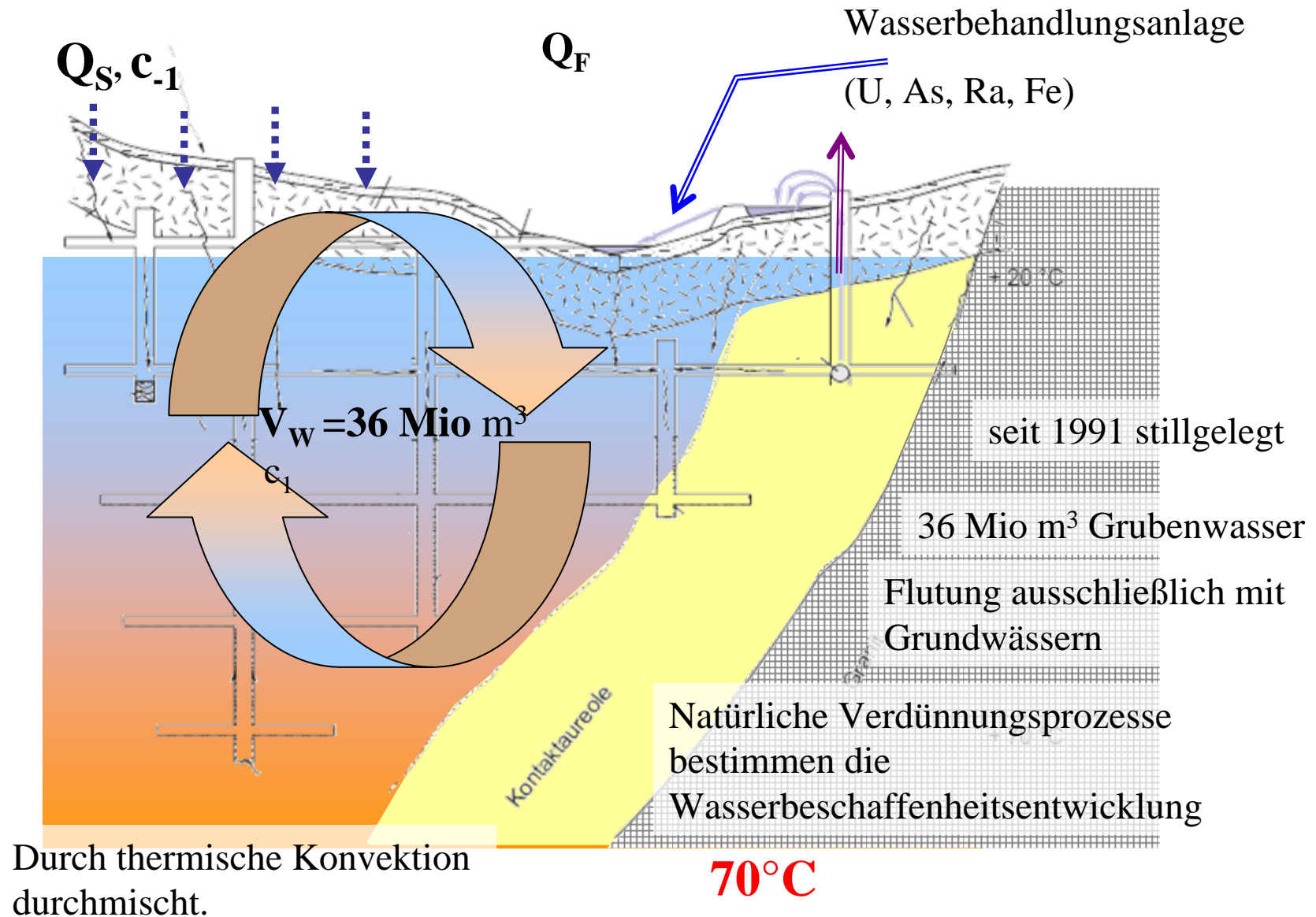
3.2 Ehemalige Urangrube B



- von 1946 bis 1991
- ca. 80 000 Tonnen Uran
- über 60 Sohlen
- bis in 1 800 m Tiefe

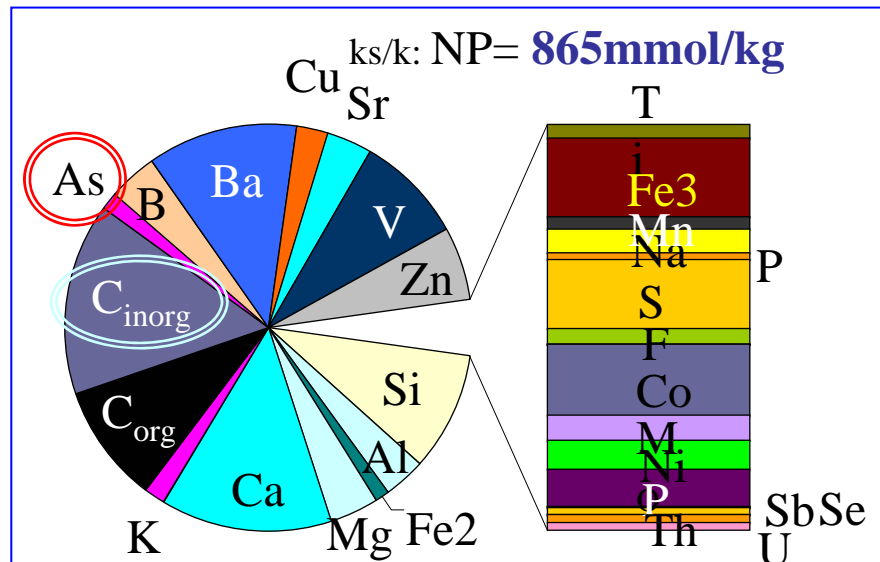
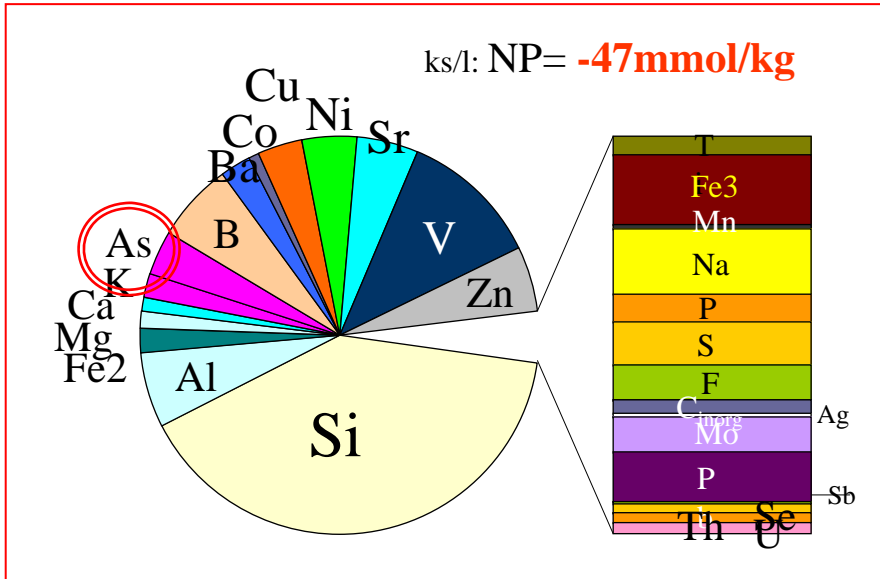


3.2 Ehemalige Urangrube B

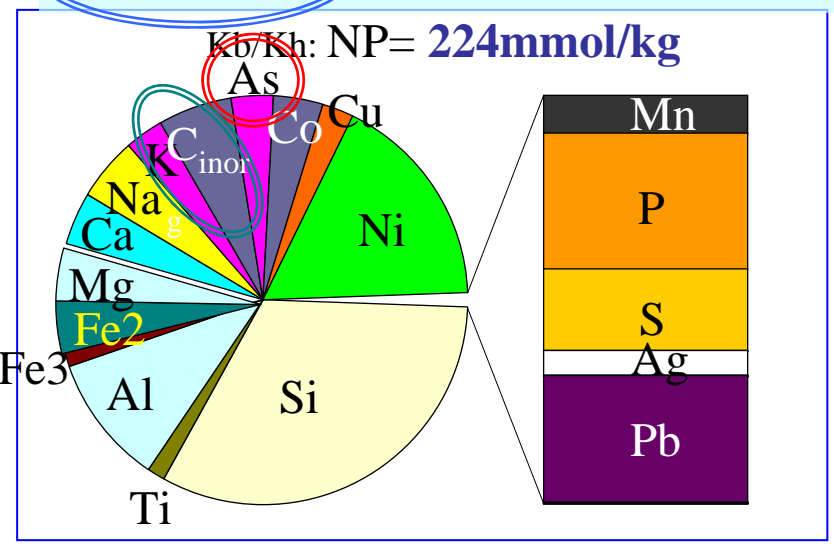


3.2 Ehemalige Urangrube B

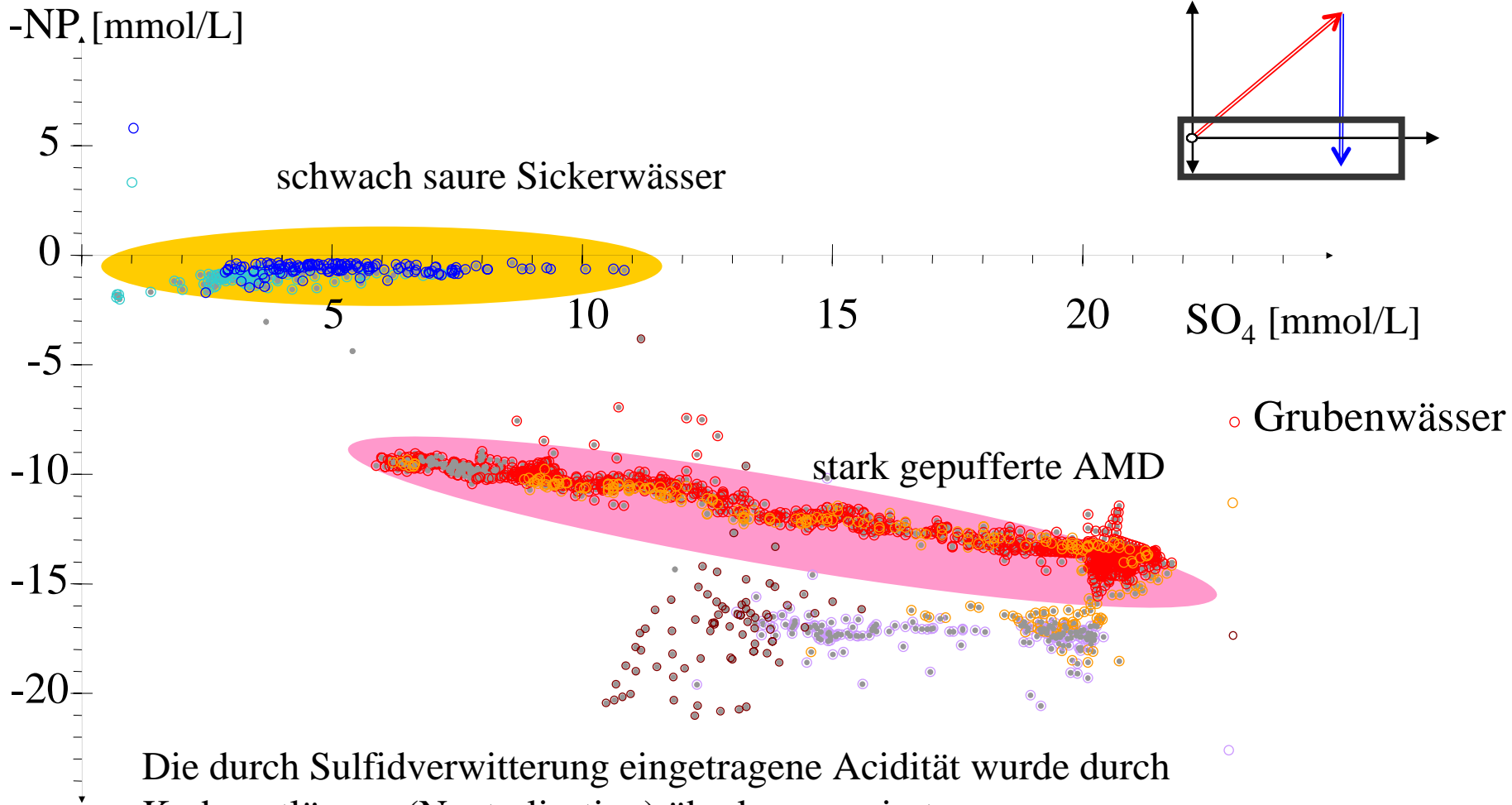
Säuregenerierung:
Eisen- und
Schwermetallsulfide



Hauptpufferung:
Carbonate: Calcite, Dolomite



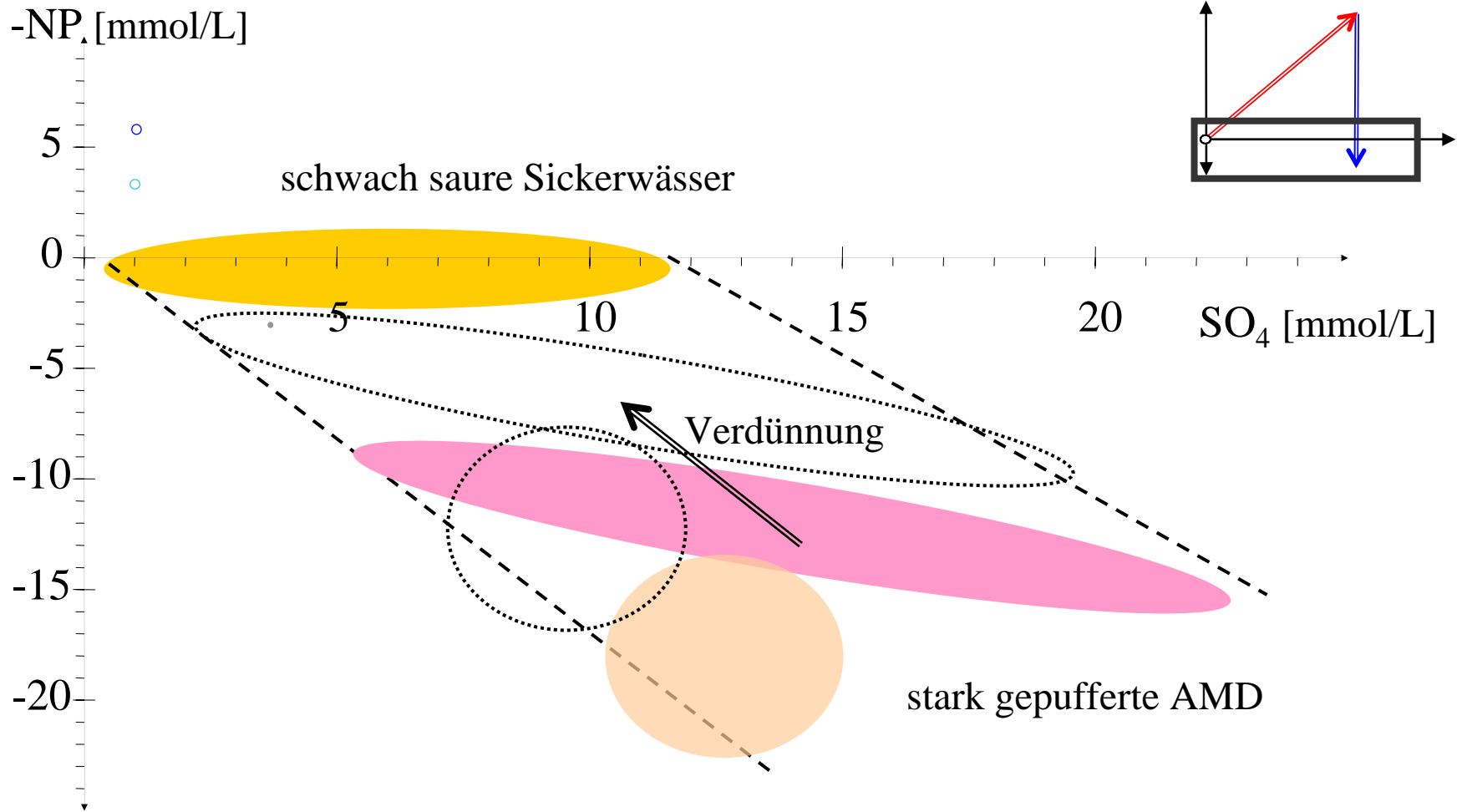
3.2 Ehemalige Urangrube B



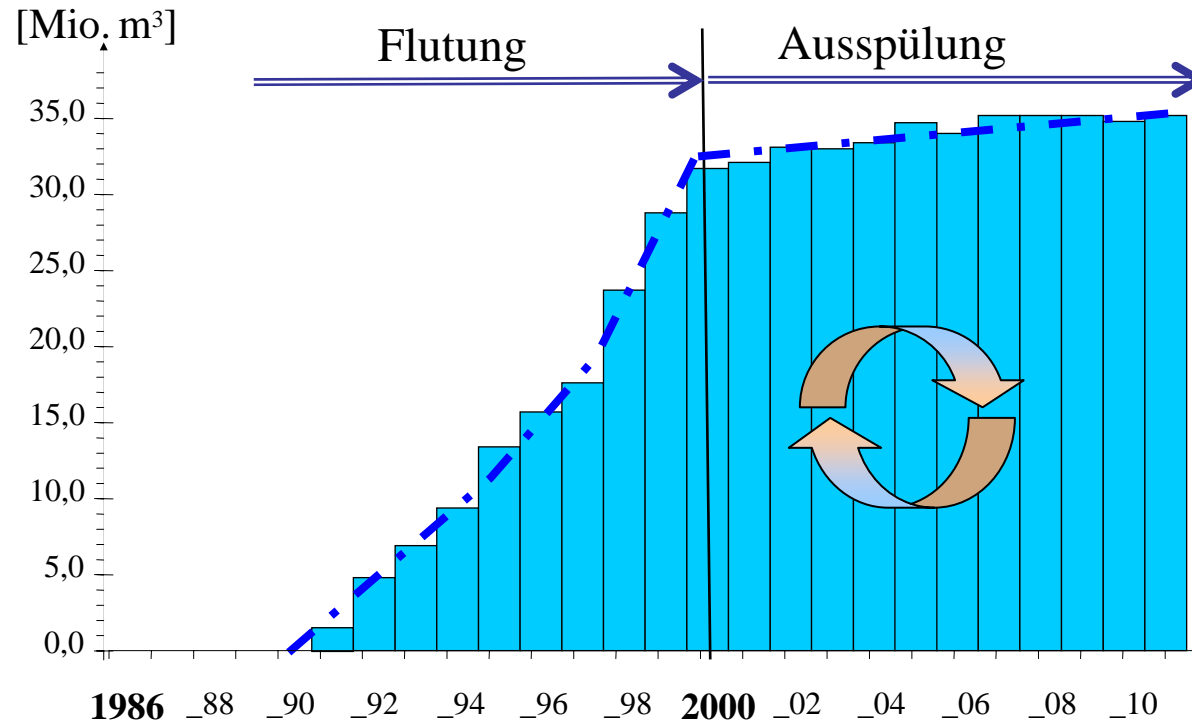
Die durch Sulfidverwitterung eingetragene Acidität wurde durch Karbonatlösung (Neutralisation) überkompensiert.

Hoher Natriumeintrag infolge Feldspatverwitterung.

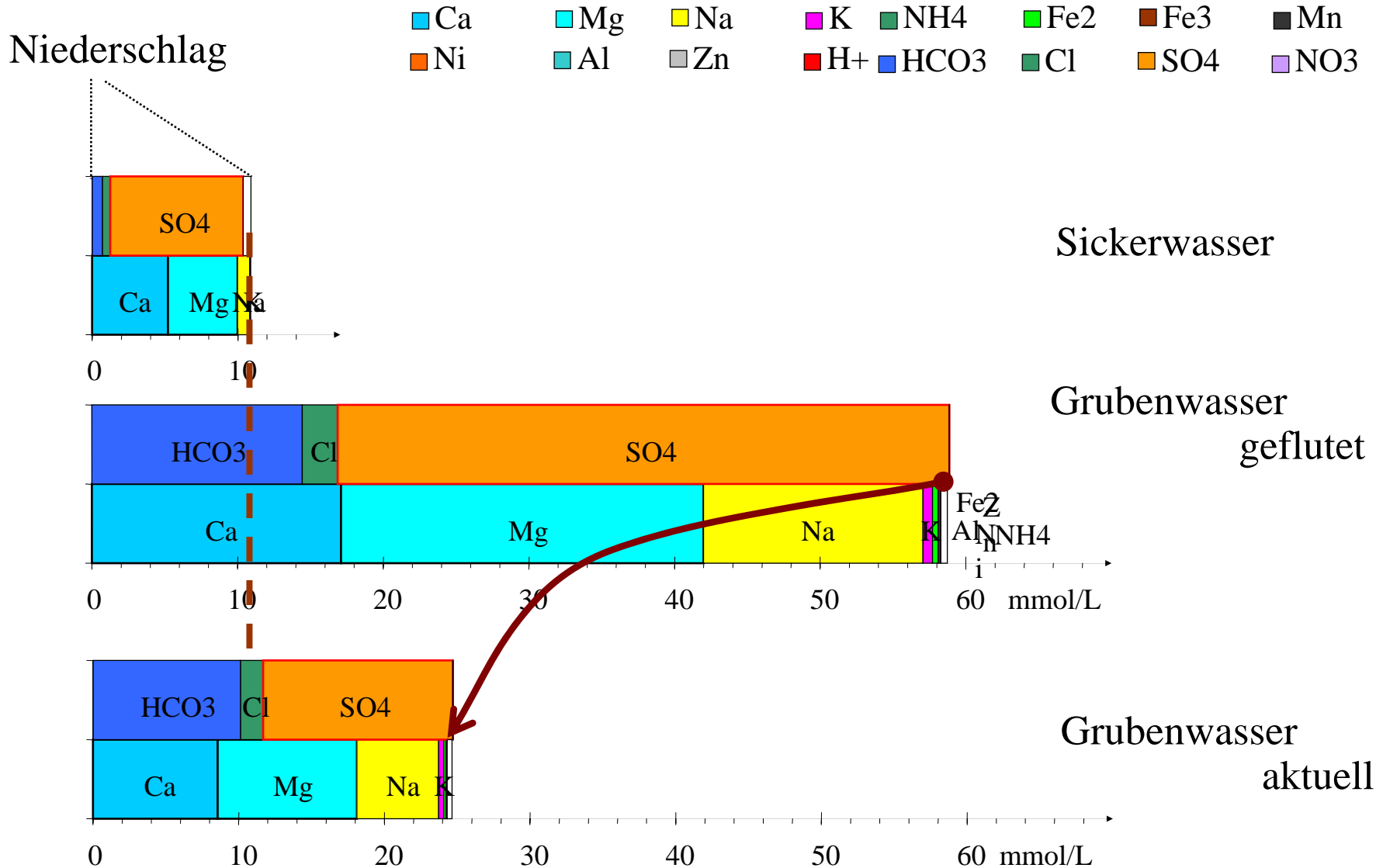
3.2 Ehemalige Urangrube B



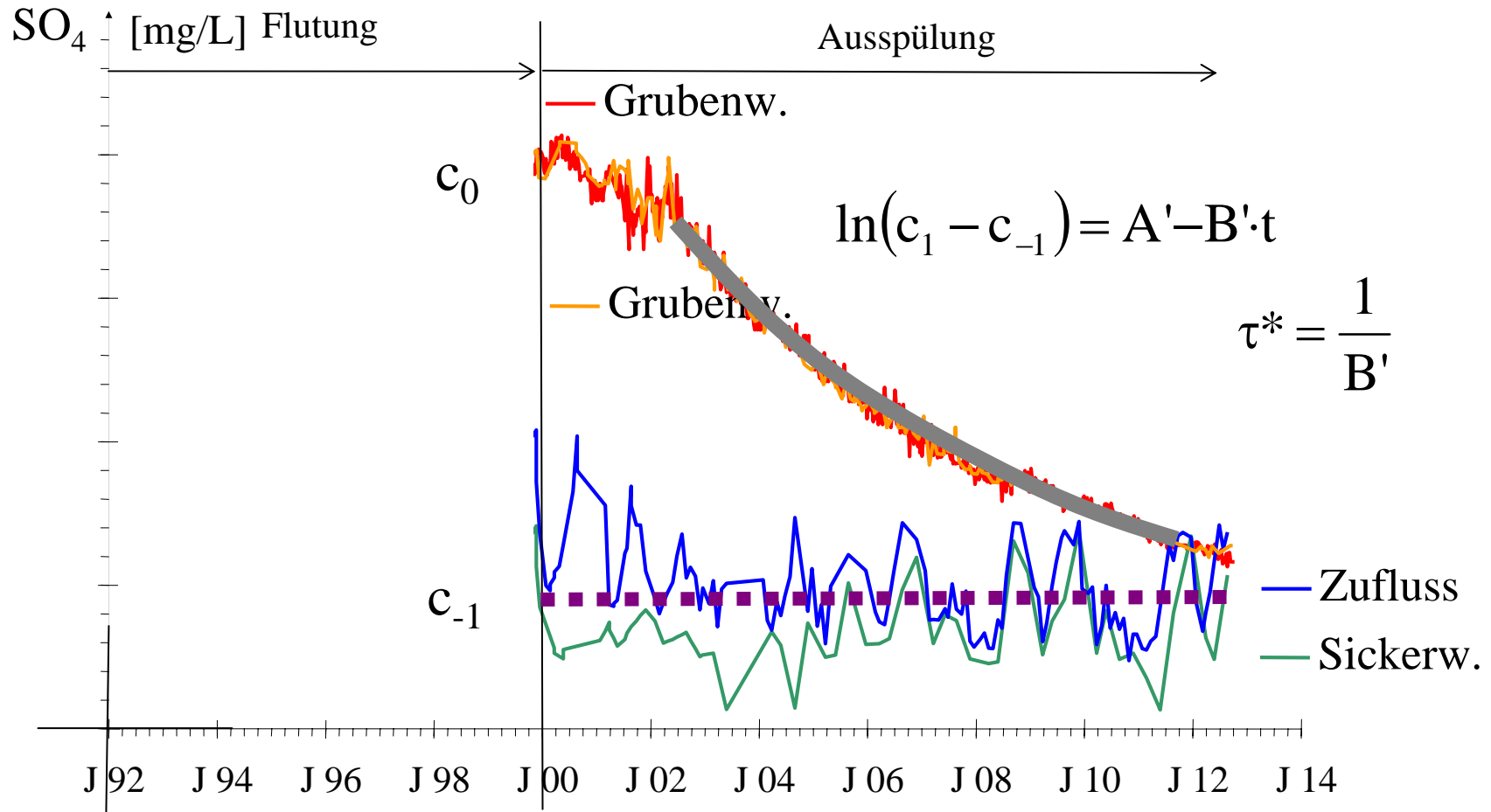
3.2 Ehemalige Urangrube B



3.2 Ehemalige Urangrube B

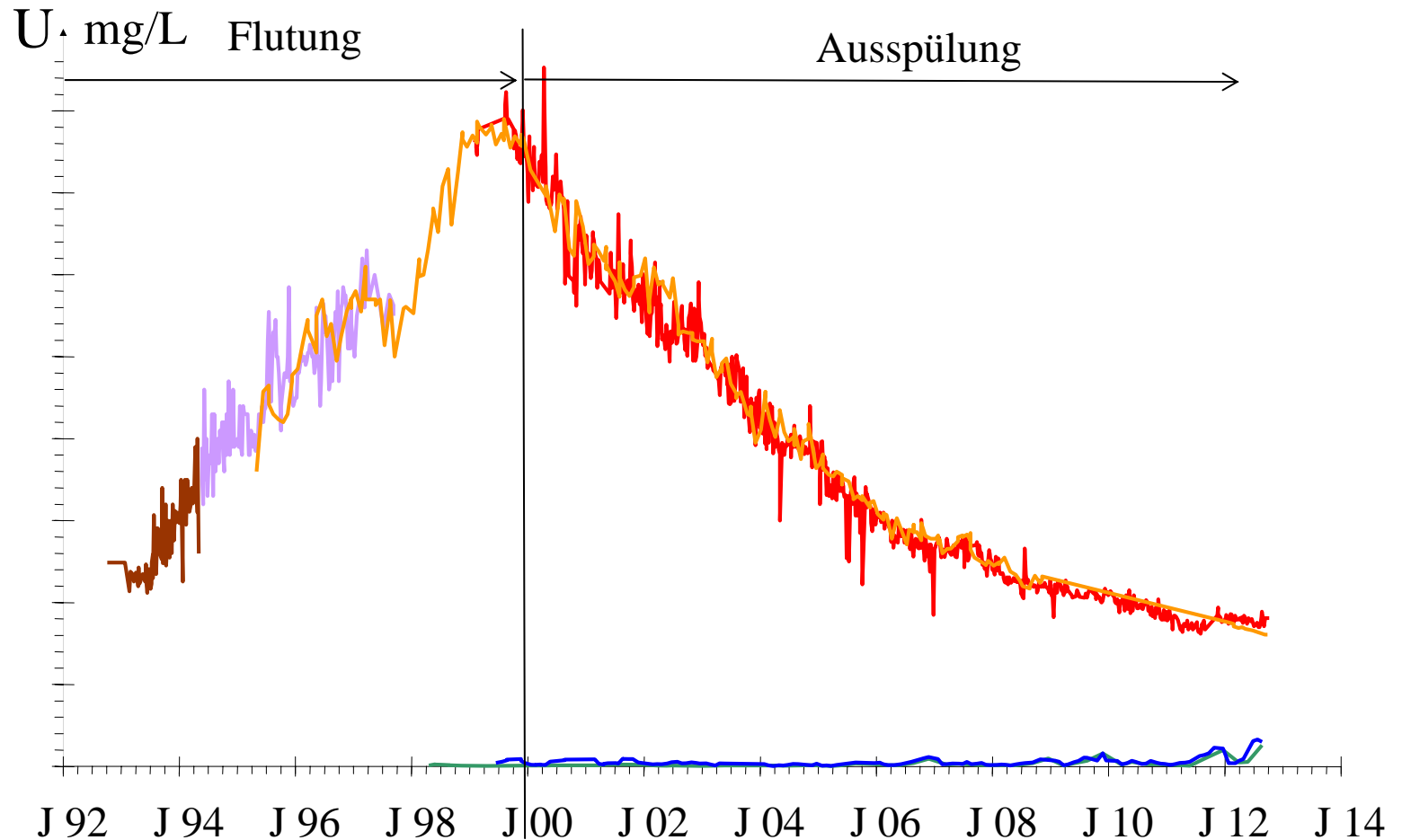


3.2 Ehemalige Urangrube B



Entwicklung der Sulfatkonzentrationen

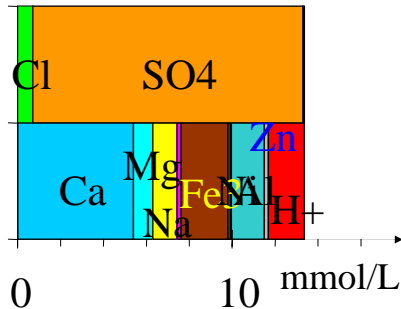
3.2 Ehemalige Urangrube B



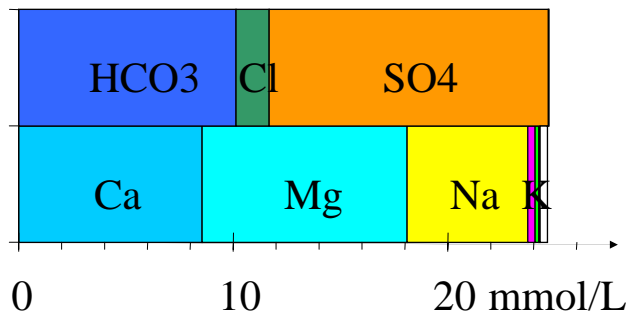
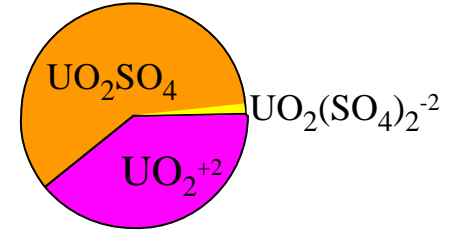
Entwicklung der Urankonzentrationen

3.3 Ehemalige Urangruben

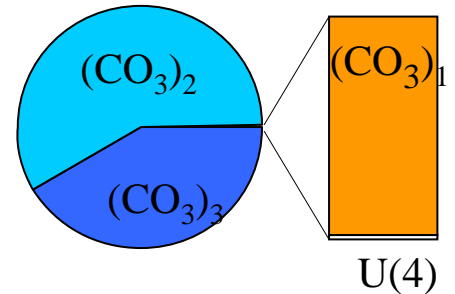
Vergleich von Urangruben



A
 pH = 2,8 NP = **-6 mmol/L**



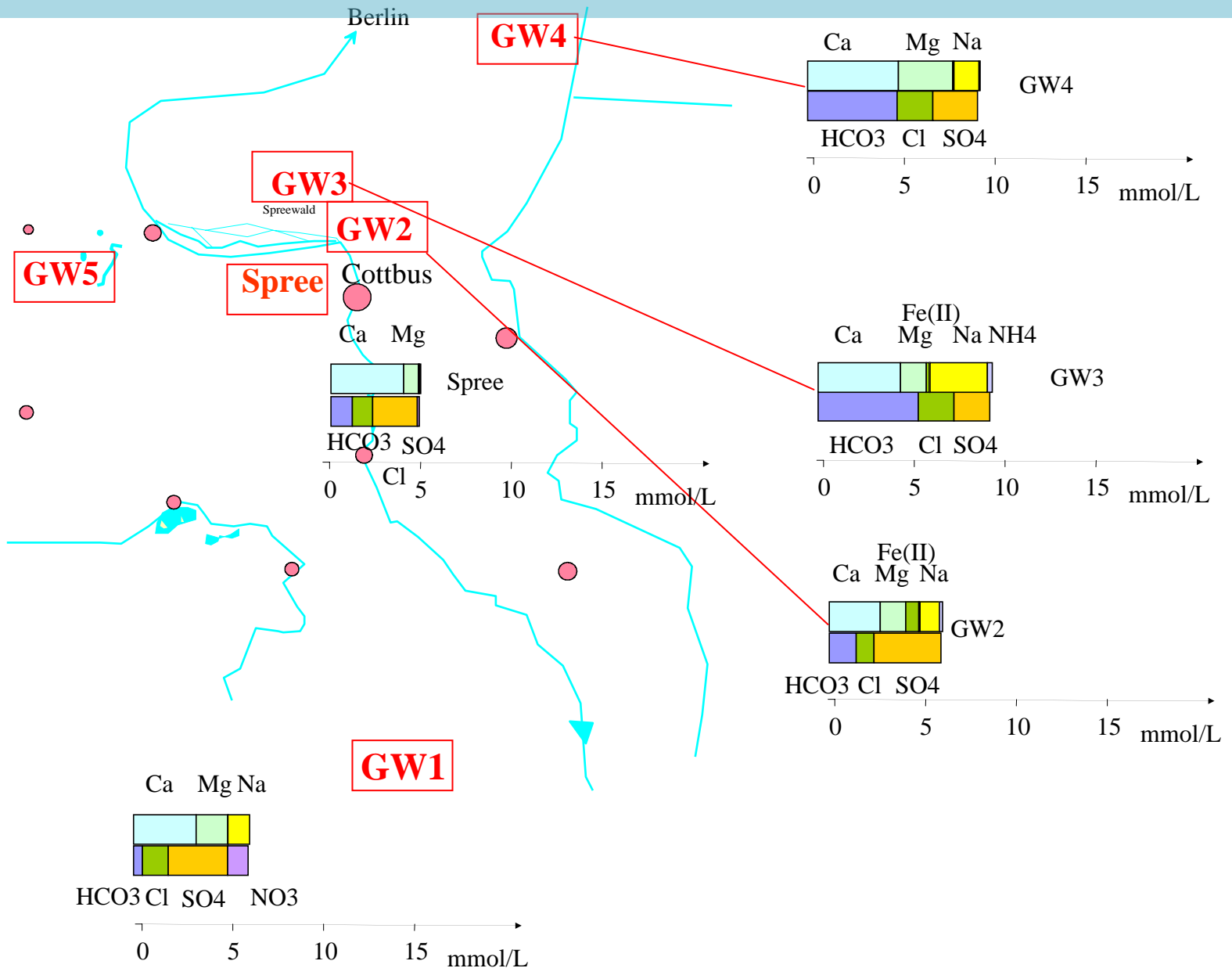
B: 12.07.2012
 pH = 6,9 NP = **+10 mmol/L**



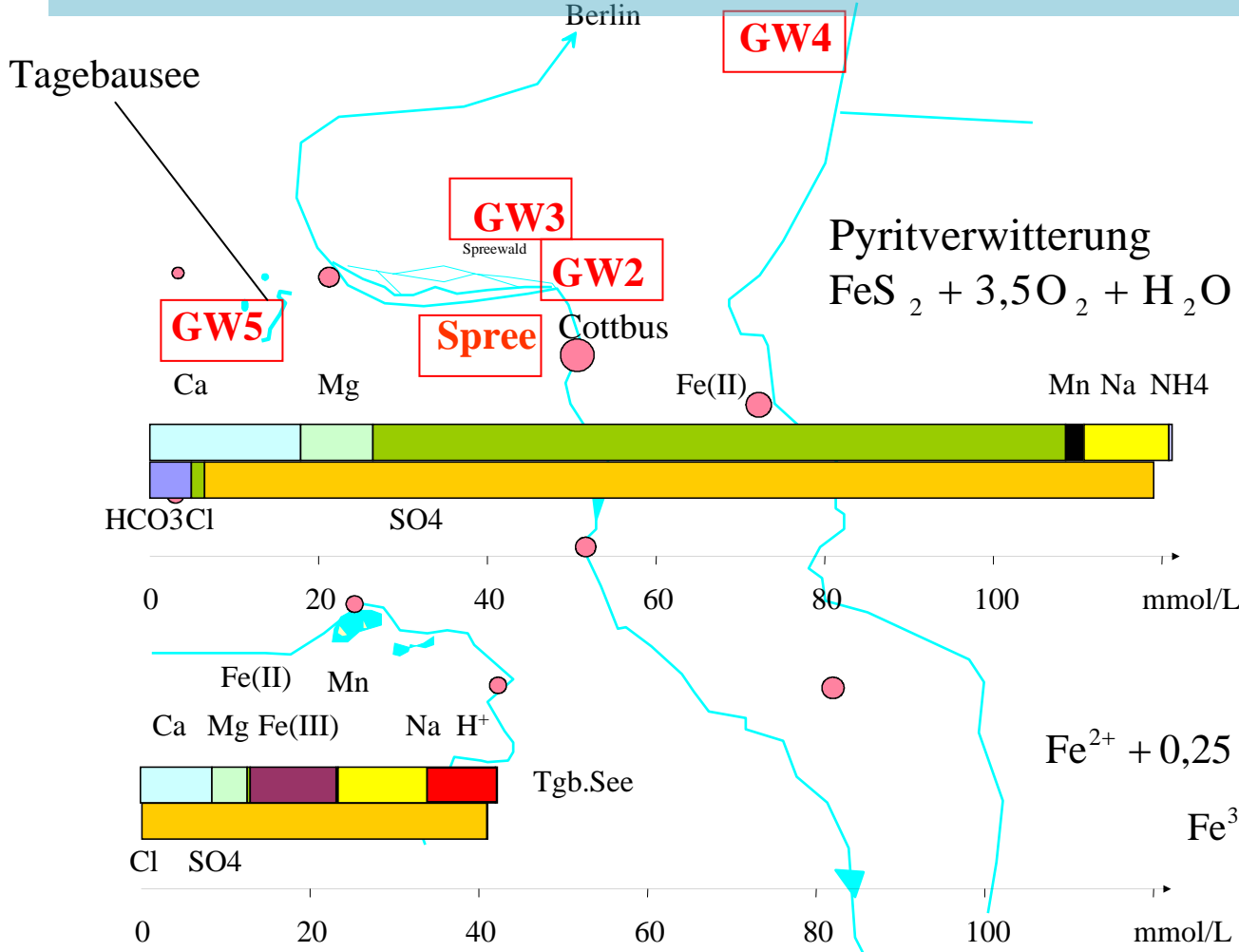
4. Braune Spree



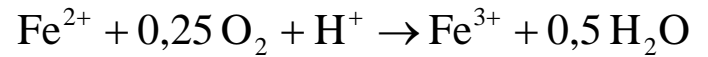
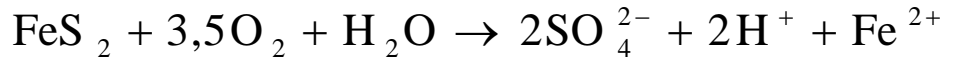
4. Braune Spree



4. Braune Spree



Pyritverwitterung

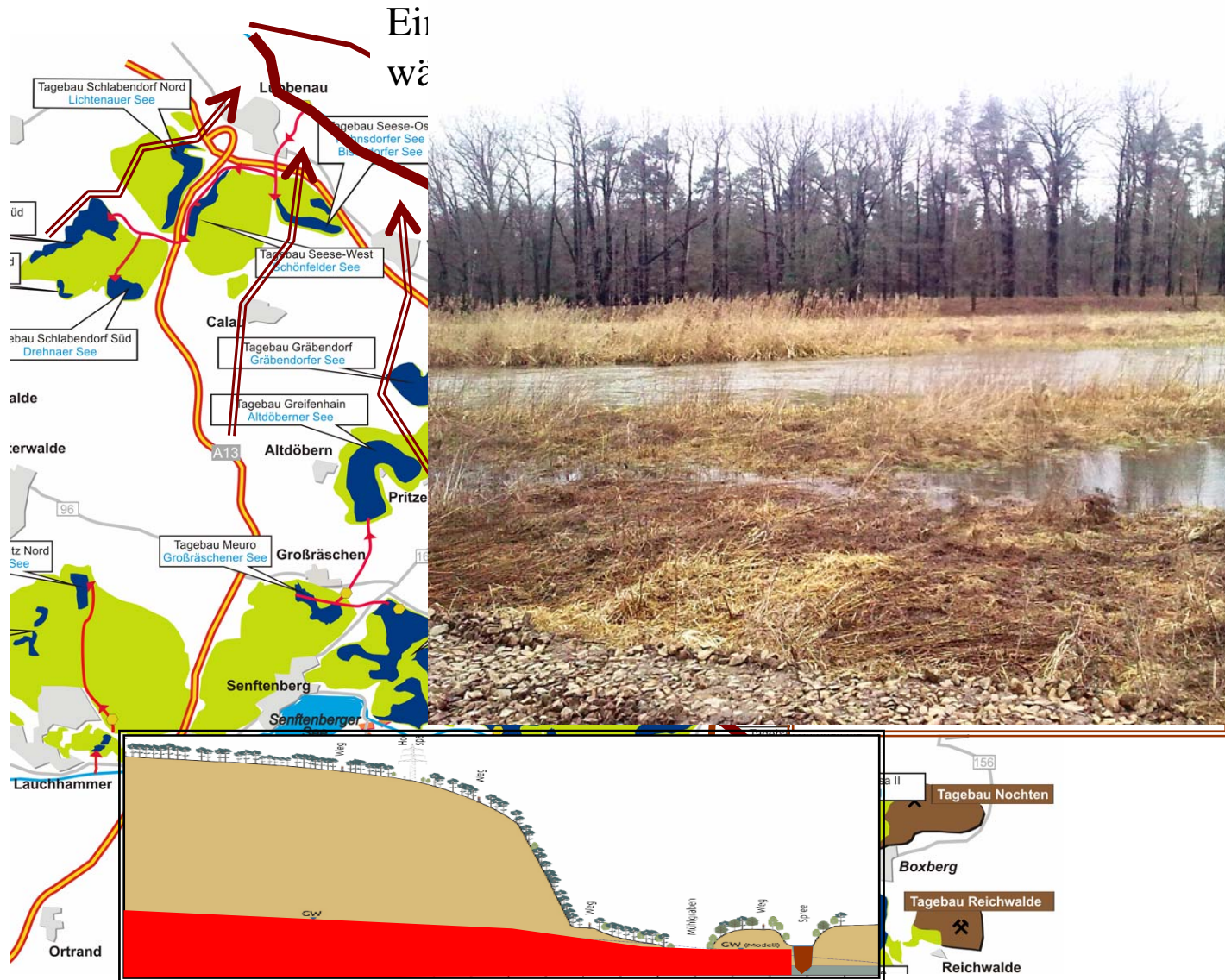


4. Braune Spree

Einträge von Kippengrundwässern über Vorfluter



4. Braune Spree



4. Braune Spree



potentiell stark zersetzten Torf bildender Bereich eines nährstoffreichen Quellmooses

5. Zusammenfassung

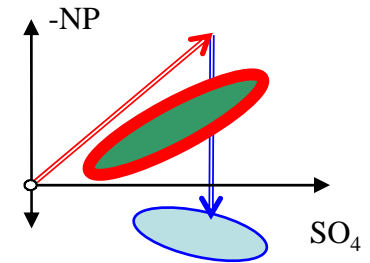
AMD

(Potenziell) **saure AMD**

oxisch, pH sauer

$$NP \ll 0$$

anoxisch, hydrogencarbonatgepuffert



gepufferte AMD

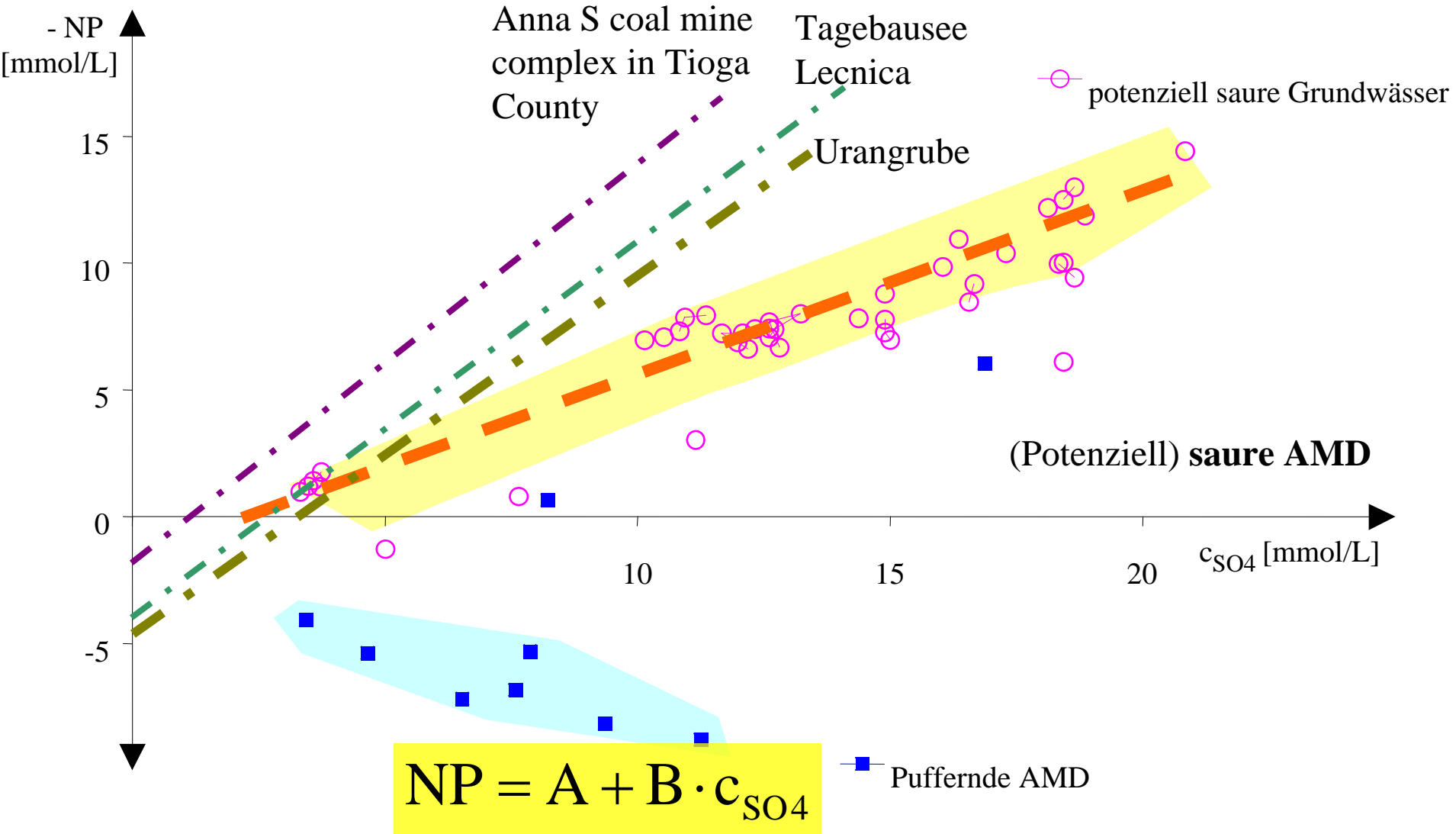
$$NP > 0$$

hochmineralisiert

langzeitstabil im jeweiligen Gebirge (GWL)

komplexer Chemismus

5. Zusammenfassung



5. Zusammenfassung

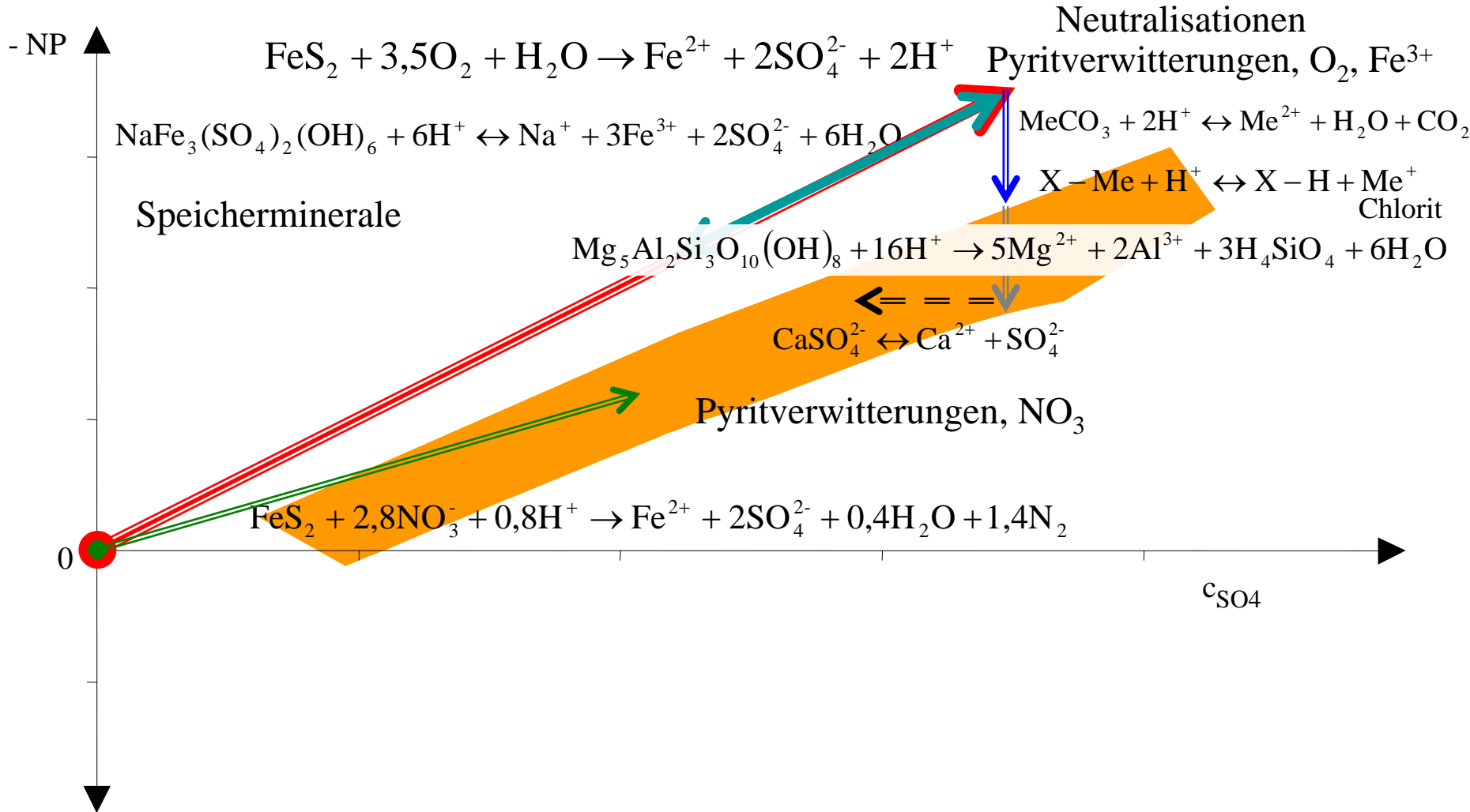
(Potenziell) saure AMD

$$NP = A + B \cdot c_{SO_4}$$

AMD	A	B	R ²	Zitat
Teilgeflutete Urangrube Königstein	4,8	-1,34	0,9630	R2882
Tagebauseen des Spanischen Pyritgürtels	39,8	-2,22	0,9204	R3445
Lake San Telmo, Iberian Pyrit Belt	-15,1	-0,51	0,9250	R3444
Anna S coal mine complex in Tioga County	1,5	-1,57	0,9385	R3904
Flooded Mine Shaft Water in Butte, Montana	13,1	-1,11	0,9488	R3079
Alta Mine, MT	35,5	-2,49	0,9533	R2995
Tagebausee Leknica Pl	4,1	-1,45	0,9648	G282
Oberflächengewässer Santa Catarina, Brasilien	1,1	-1,23	0,7978	R3913-525
<i>Teilgefluteter Piaseczno Schwefelbergbau, Polen</i>	7,3	-0,36	0,3845	R3161
Grundwasser Skadodamm	0,22	-0,68	0,7897	R3379
Südlicher Grundwasserzustrom zum Senftenberger See	0,5	-0,41	0,9072	R3137

-0,4...-2

5. Zusammenfassung



5. Zusammenfassung

$$NP = A + B \cdot c_{SO_4}$$

Die lineare Beziehung zwischen Neutralisationspotenzial und Sulfatkonzentration an einem Standort oder einer Region schränkt die Vielfalt zu betrachtender Wasserbeschaffenheiten ein.

Danke für die Aufmerksamkeit



Modul 43-4-19

Bergbauliche Wasserwirtschaft

ein weltweites Problem
acid mine drainage = AMD





Inhalt:

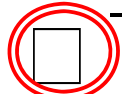
1. Behandlungsmöglichkeiten für AMD
2. Behandlung durch Verdünnung (Fremdflutung)
3. Behandlung durch Neutralisation
4. Behandlung durch mikrobielle Sulfatreduktion
5. Behandlung durch Passive Verfahren
6. Beispiel zur Untergrundsulfatreduktion

Schluss

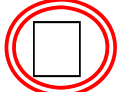
1. Behandlungsmöglichkeiten für AMD

Behandlungsmöglichkeiten :

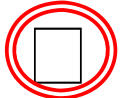
Wirkprinzipien:



Neutralisation



Verdünnung mit gepuffertem Wasser (auch Fremdflutung genannt)



Sulfatreduktion



Membranverfahren

Folgereaktionen

Fällung

Sorption

1. Behandlungsmöglichkeiten für AMD

kritische Parameter:

- Acidität als niedriger **pH**-Wert oder als hohe **Eisen(II)**konzentration
- Salzbelastung durch **Sulfat**

Milieukomponenten

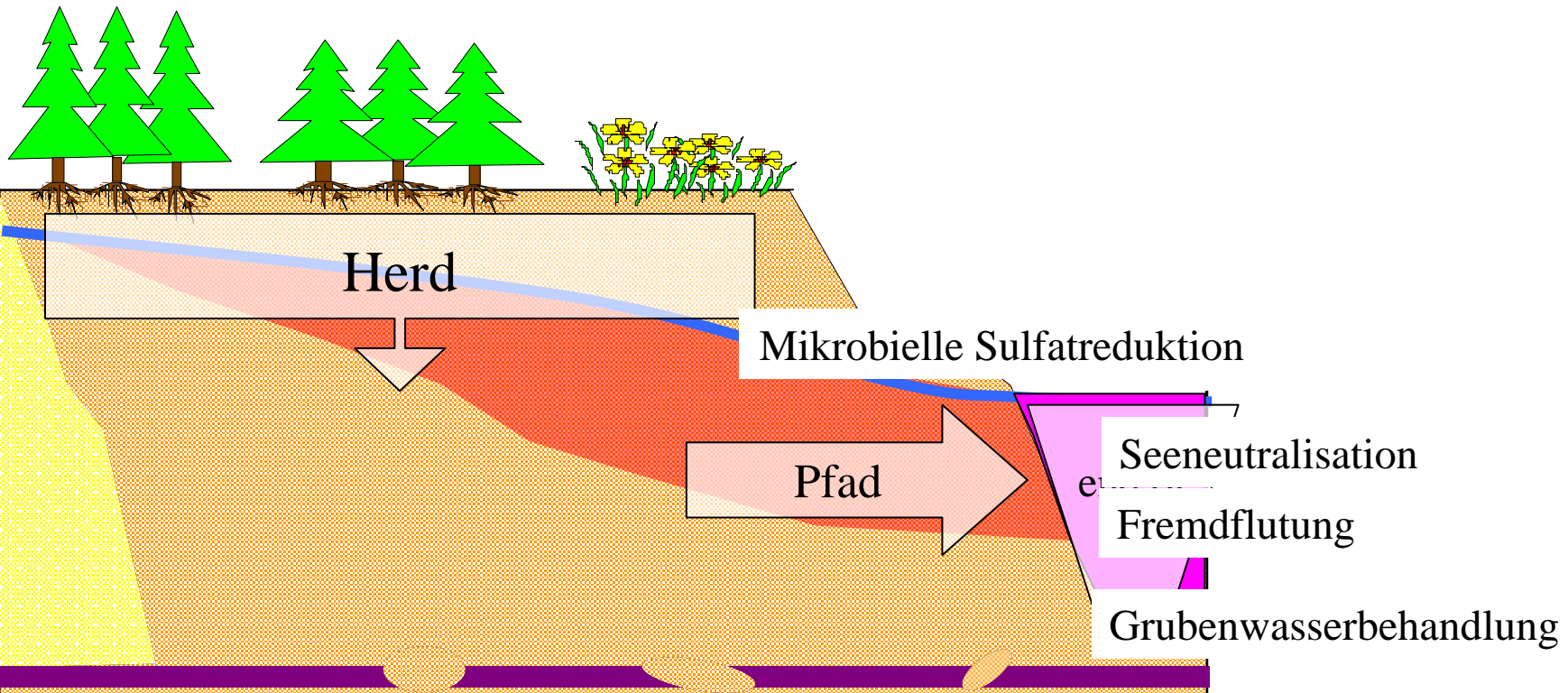
- **Schwermetalle**, darunter
Arsen, Zink
- **Radioaktivität**, speziell des Radiums und des Urans

Spurenkomponenten

1. Behandlungsmöglichkeiten für AMD

Was: Herd - Pfad - end of pipe

Wo: in-situ - ex-situ



Wie: technisch - naturnah

1. Behandlungsmöglichkeiten für AMD

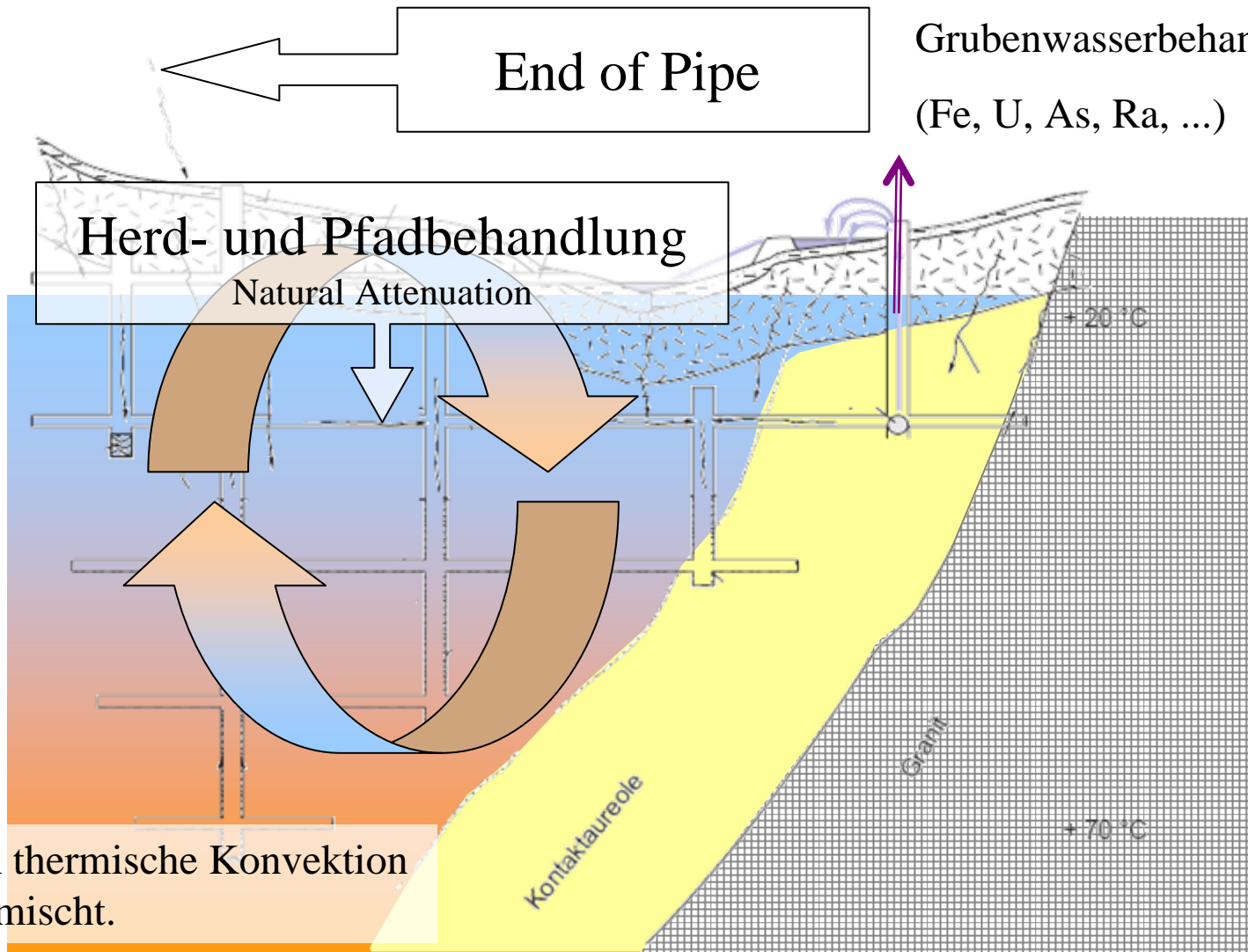
Grubenwasserbehandlung
(Fe, U, As, Ra, ...)

End of Pipe

Herd- und Pfadbehandlung

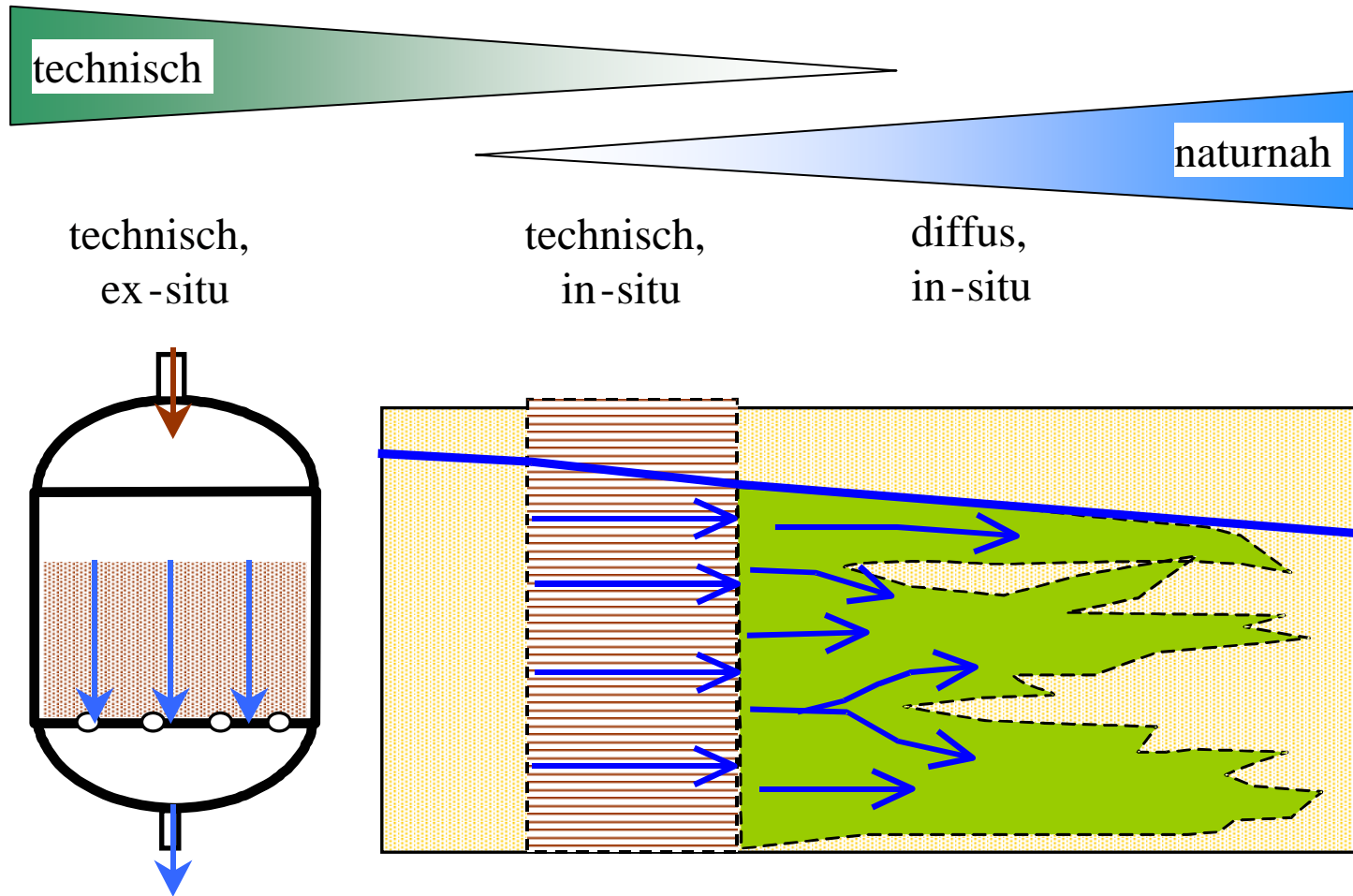
Natural Attenuation

Durch thermische Konvektion
durchmischt.



1. Behandlungsmöglichkeiten für AMD


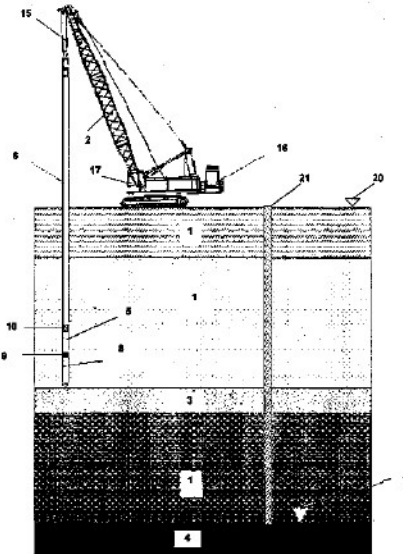
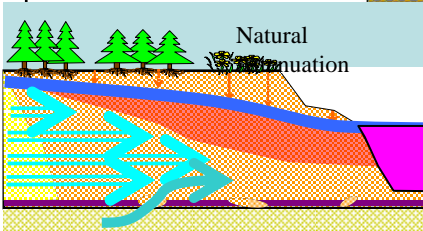
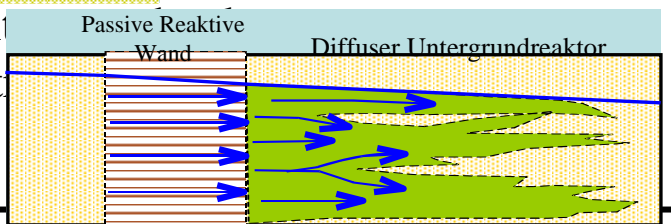
Wie: technisch - naturnah



1. Behandlungsmöglichkeiten für AMD

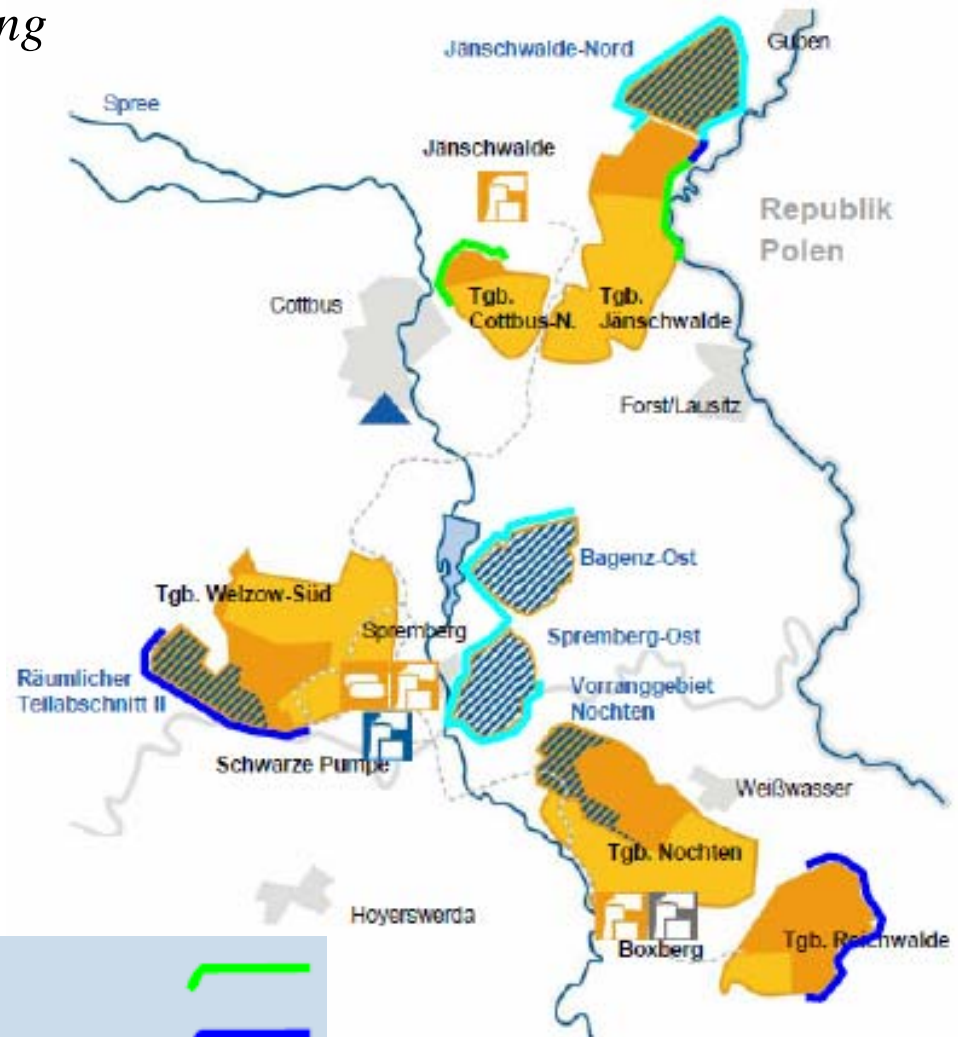
Was	Herdbehandlung	Pfadbehandlung / end of pipe
ex-situ	<p>pump and treat</p> <p>Bodenaushub</p>	<p>pump and treat</p> <p>Passive Verfahren zur AMD-Behandlung</p>
in-situ	<p>Immobilisierung,</p> <p>Einkapselung,</p> <p>Abbau</p>	<p>Natural Attenuation (NA, MNA, ENA)</p> <p>Dichtwände Passive Reaktive Wände oder Reaktive Barrieren einschl. <i>funnel and gate</i>-Verfahren</p> <p>Diffuse Untergrundreaktoren</p> <p>pump and treat mit Untertagereaktoren</p>

1. Behandlungsmöglichkeiten für AMD

Was	Herdbehandlung	Pfadbehandlung / end of pipe
ex-situ	<p>pump and treat</p> <p>Bodenaushub</p>	
in-situ	<p>Im Eir Ab</p> 	<p>Natural Attenuation</p>  <p>Diffuse Untergrundreaktor</p>  <p>...eren einschl. <i>funnel</i></p>

1. Behandlungsmöglichkeiten für AMD

Einkapselung



Vorhandene Dichtwände

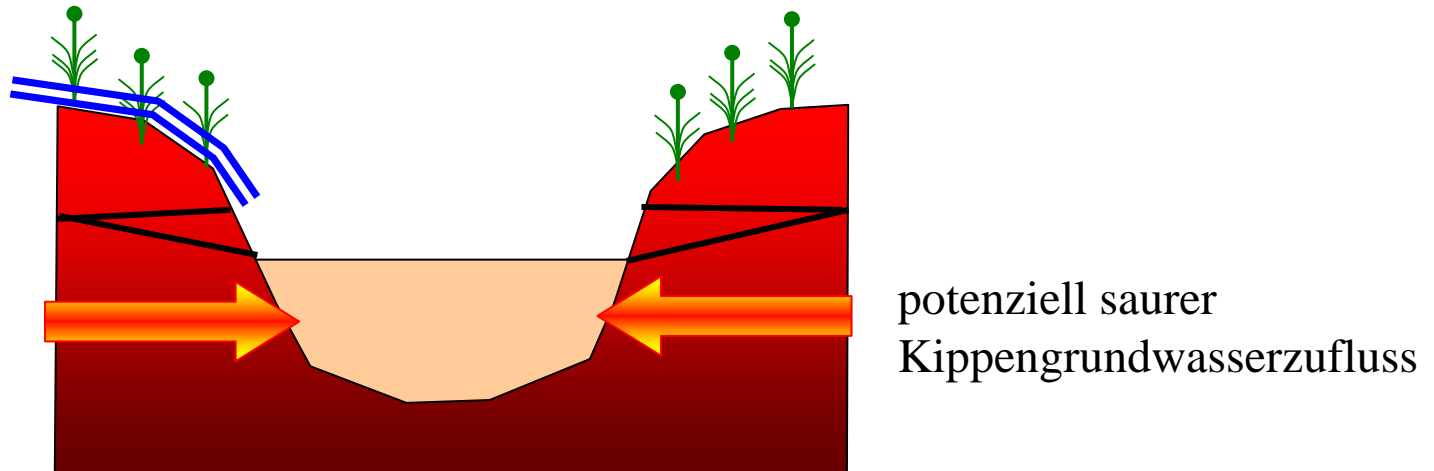
Geplante Dichtwände

Geplante Dichtwände Zukunftstagebaue



2. Behandlung durch Verdünnung (Fremdflutung)

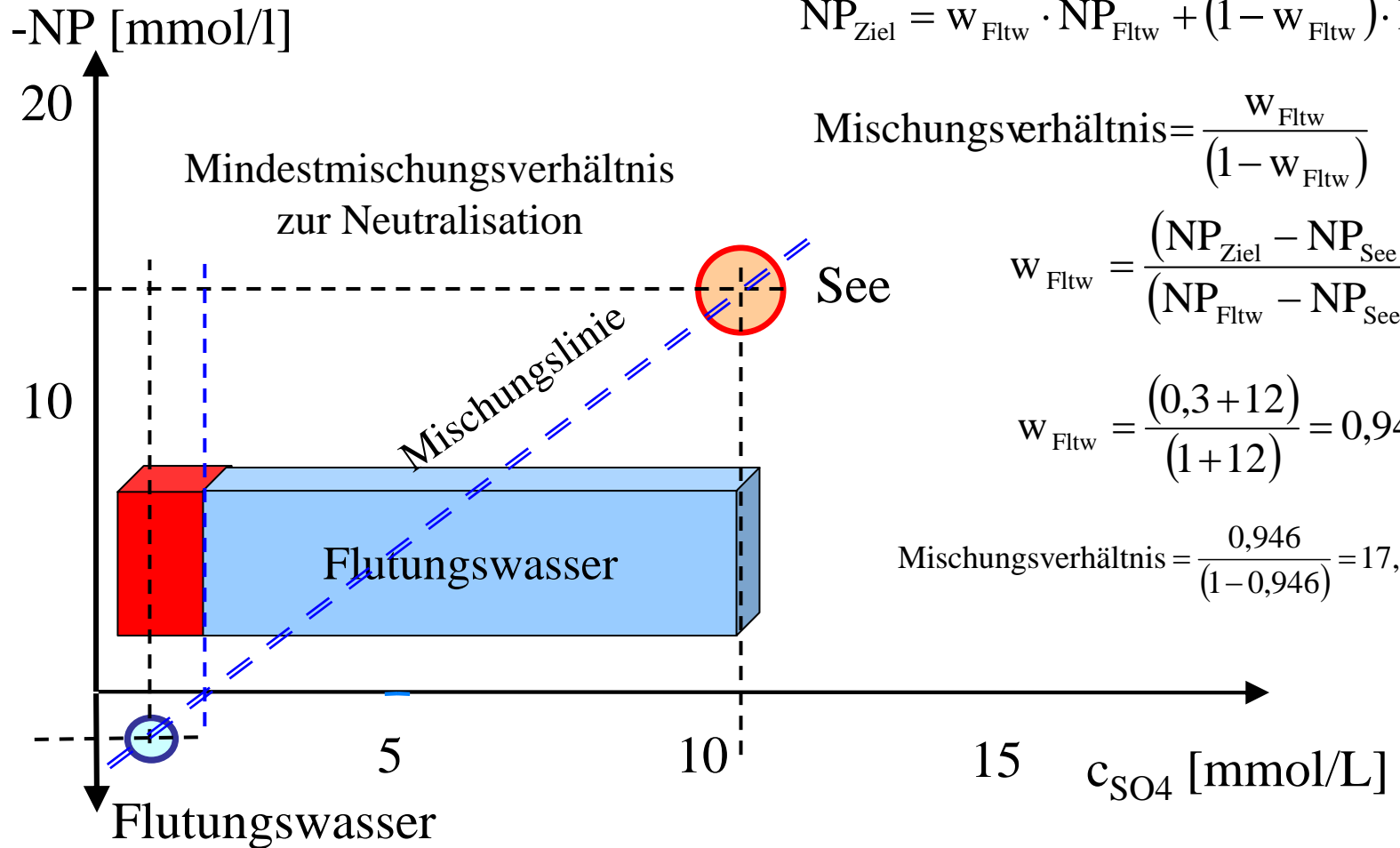
Prinzip



1. Neutralisation mit gepuffertem Flutungswasser
2. Hydraulische Unterbindung von saurem Grundwasserzufluss

2. Behandlung durch Verdünnung (Fremdflutung)

Beschaffenheitsveränderungen



w = Anteil Flutungswasser [1,%]

$$NP_{Ziel} = w_{Fltw} \cdot NP_{Fltw} + (1 - w_{Fltw}) \cdot NP_{See}$$

$$\text{Mischungsverhältnis} = \frac{w_{Fltw}}{(1 - w_{Fltw})}$$

$$w_{Fltw} = \frac{(NP_{Ziel} - NP_{See})}{(NP_{Fltw} - NP_{See})}$$

$$w_{Fltw} = \frac{(0,3 + 12)}{(1 + 12)} = 0,946$$

$$\text{Mischungsverhältnis} = \frac{0,946}{(1 - 0,946)} = 17,5$$

2. Behandlung durch Verdünnung (Fremdflutung)

Fremdflutung des Tagebausees Scheibe

w = Anteil Flutungswasser [1,%]

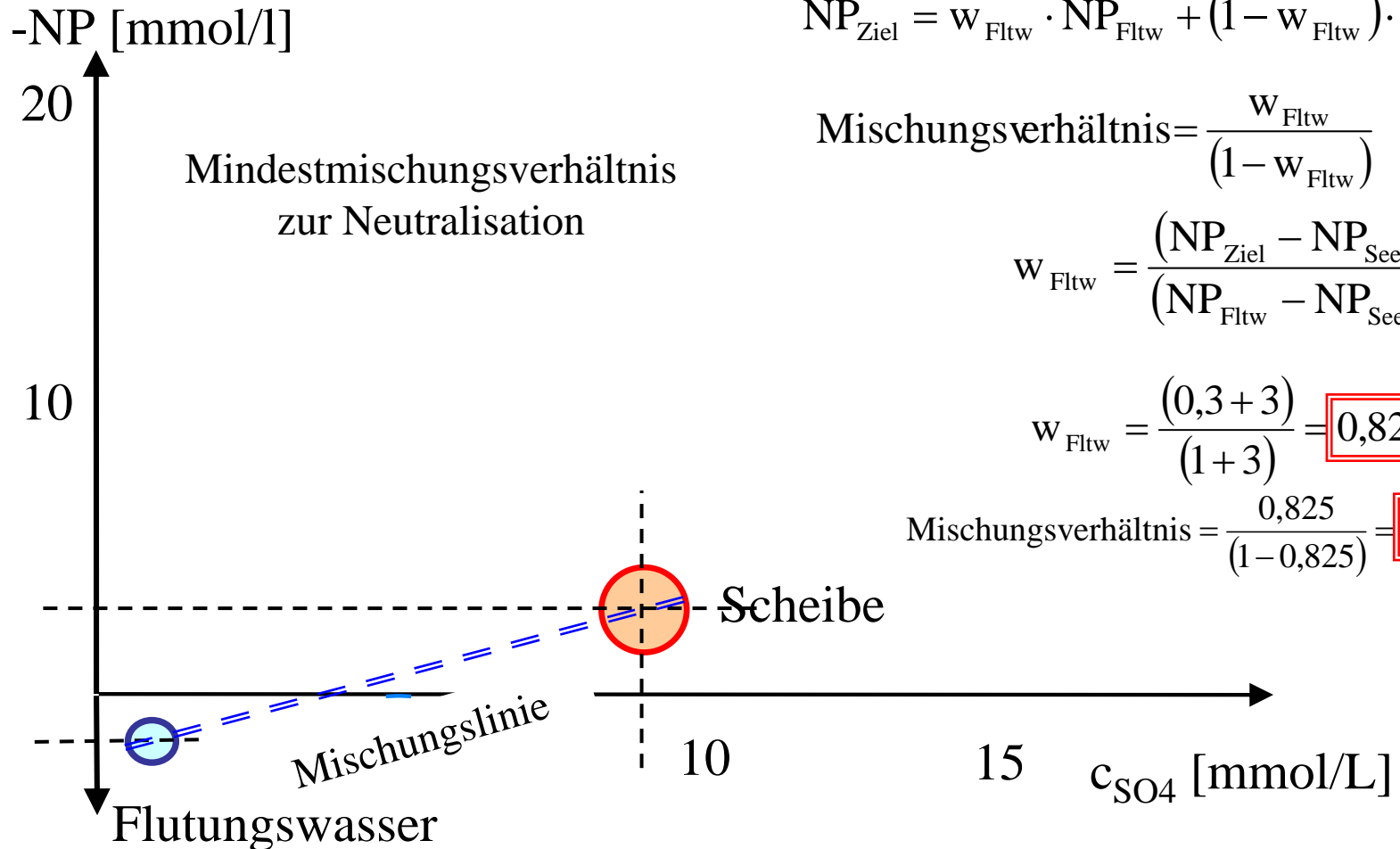
$$NP_{Ziel} = w_{Fltw} \cdot NP_{Fltw} + (1 - w_{Fltw}) \cdot NP_{See}$$

$$\text{Mischungsverhältnis} = \frac{w_{Fltw}}{(1 - w_{Fltw})}$$

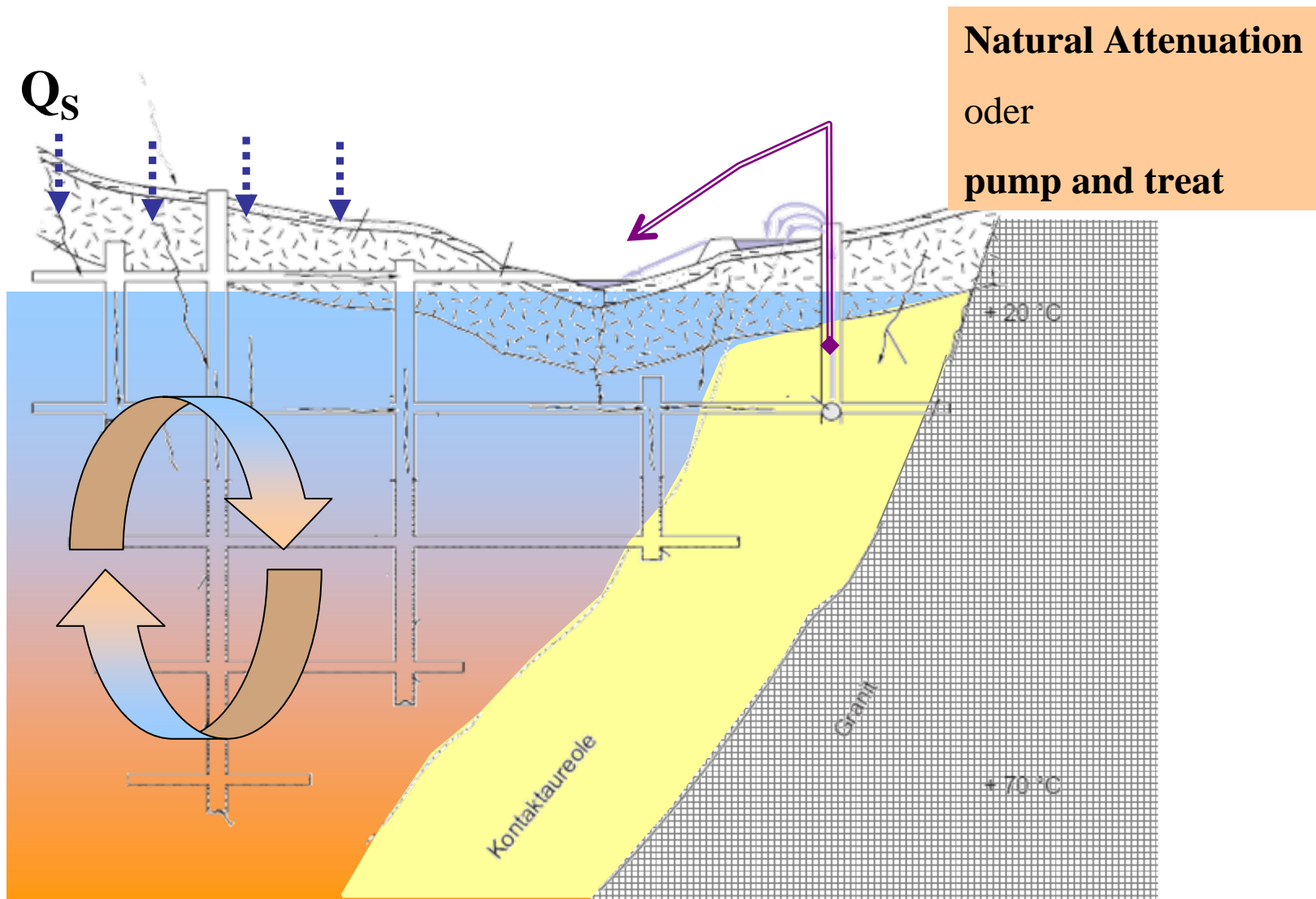
$$w_{Fltw} = \frac{(NP_{Ziel} - NP_{See})}{(NP_{Fltw} - NP_{See})}$$

$$w_{Fltw} = \frac{(0,3 + 3)}{(1 + 3)} = 0,825$$

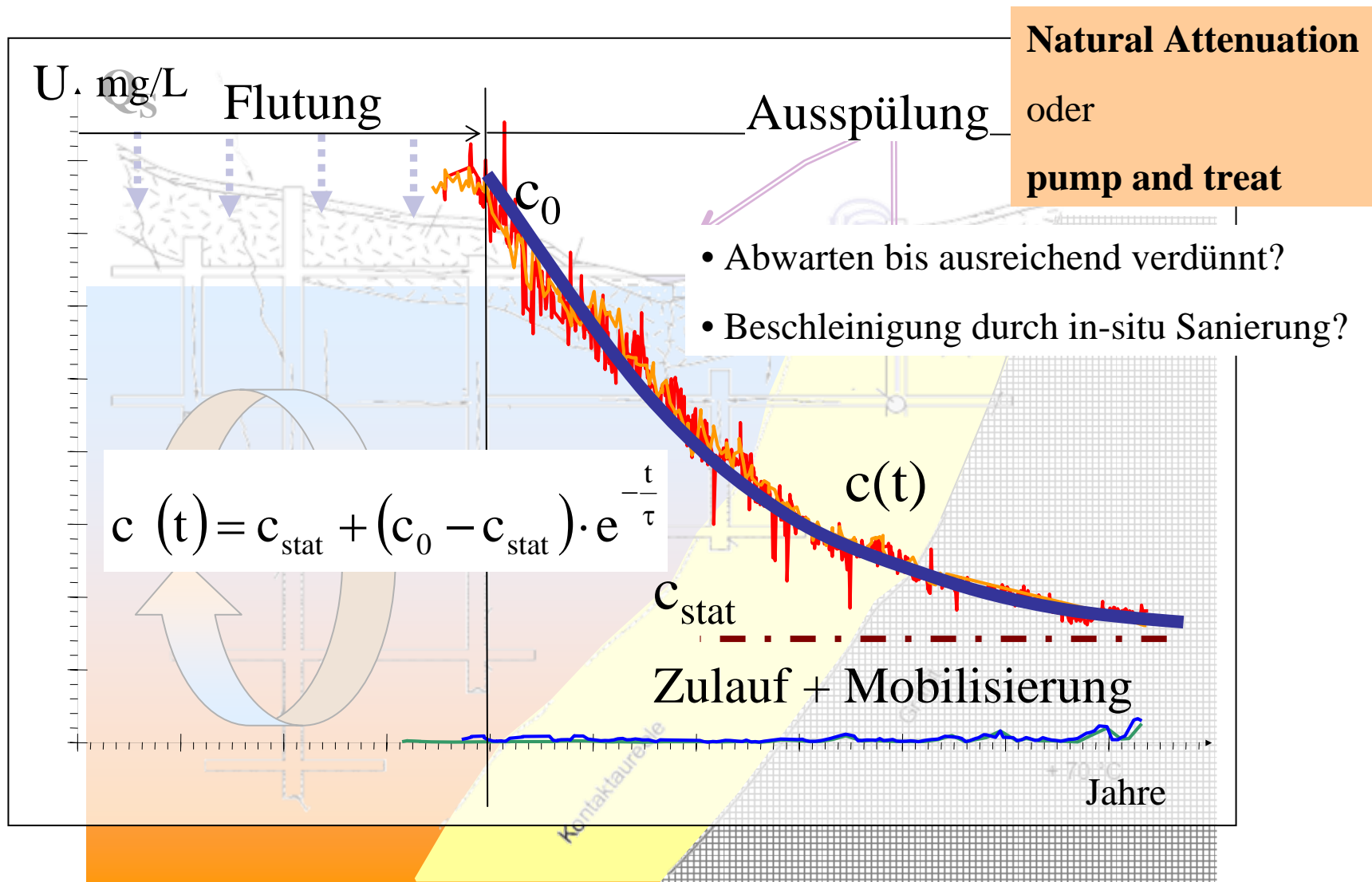
$$\text{Mischungsverhältnis} = \frac{0,825}{(1 - 0,825)} = 4,7$$



2. Behandlung durch Verdünnung



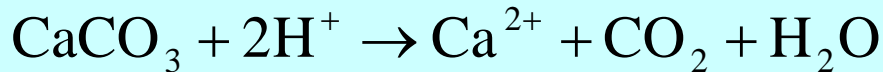
2. Behandlung durch Verdünnung



3. Behandlung durch Neutralisation

Neutralisationsmittel

Kalk Calcite, Calciumcarbonat

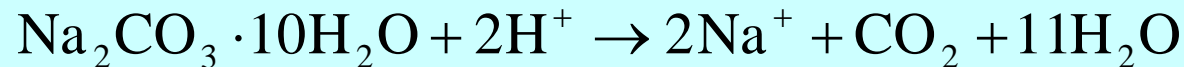


$$\Delta_{\text{R}} \text{NP} = 2$$

Dolomit



Soda, Natriumcarbonat



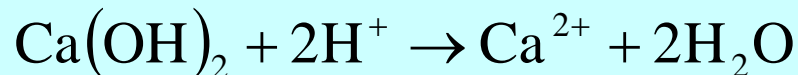
Brann**kalk**



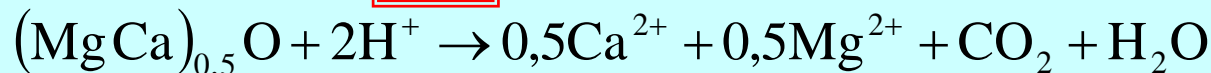
Achtung:

was so alles *Kalk* genannt wird

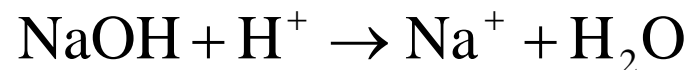
Kalkhydrat



Magnesiumbrann**kalk**



Natronlauge



$$\Delta_{\text{R}} \text{NP} = 1$$

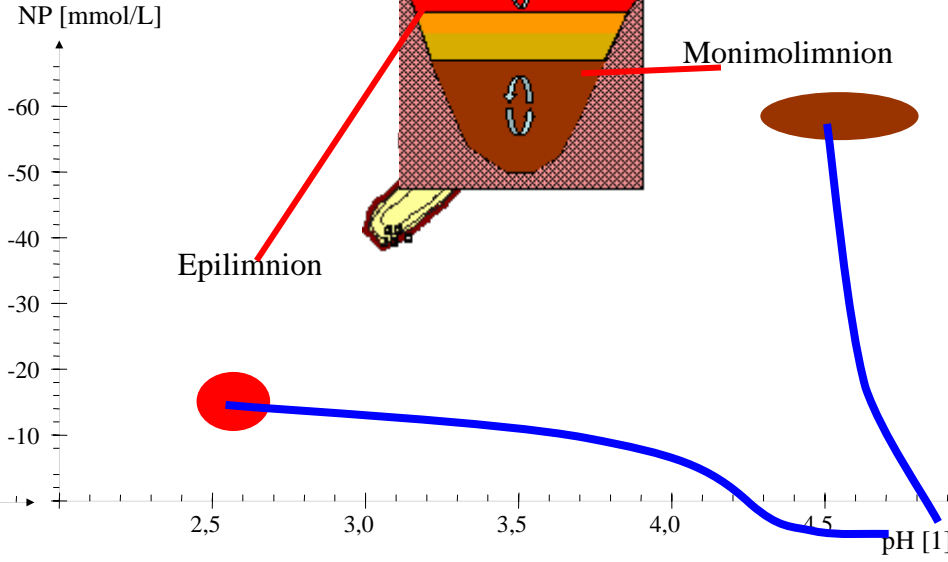
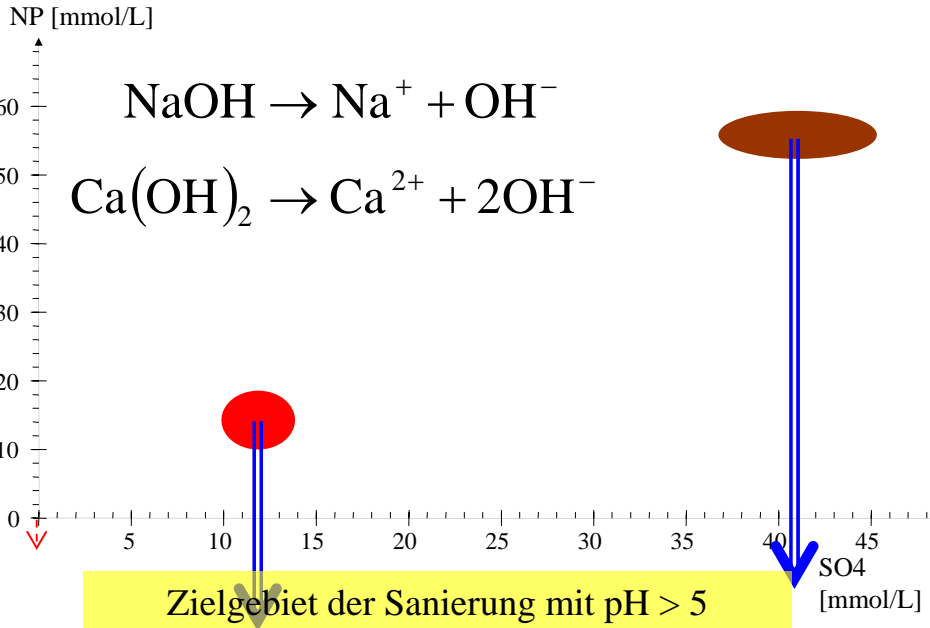
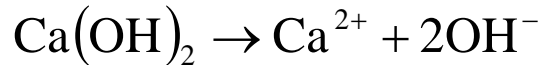
3. Behandlung durch Neutralisation

Zusammenstellung von Neutralisationsmitteln

Kategorie	Material	Bezeichnung	Formel	M	NP _{Nm}
				g/mol	mol/kg
Carbonatisch	Calcite	ungebrannter Kalk	CaCO ₃	100	19,6
	Dolomite	Dolomit	(Ca Mg(CO ₃) ₂) _{0,5}	92	21,9
	Natriuncarbonat	Soda	Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	286	7
Oxidisch	Brucite / Portlandite	Magnesiumbrannt- kalk	MgO/CaO	48	41,7
	Portlandite	Branntkalk	CaO	56	35,7
	Portlandite	Löschkalk	Ca(OH) ₂	74	
	Portlandite/ Gypsum	Kraftwerksasche		-	0,8...4
	Ätznatron	Natromlauge	NaOH	40	25

3. Behandlung durch Neutralisation

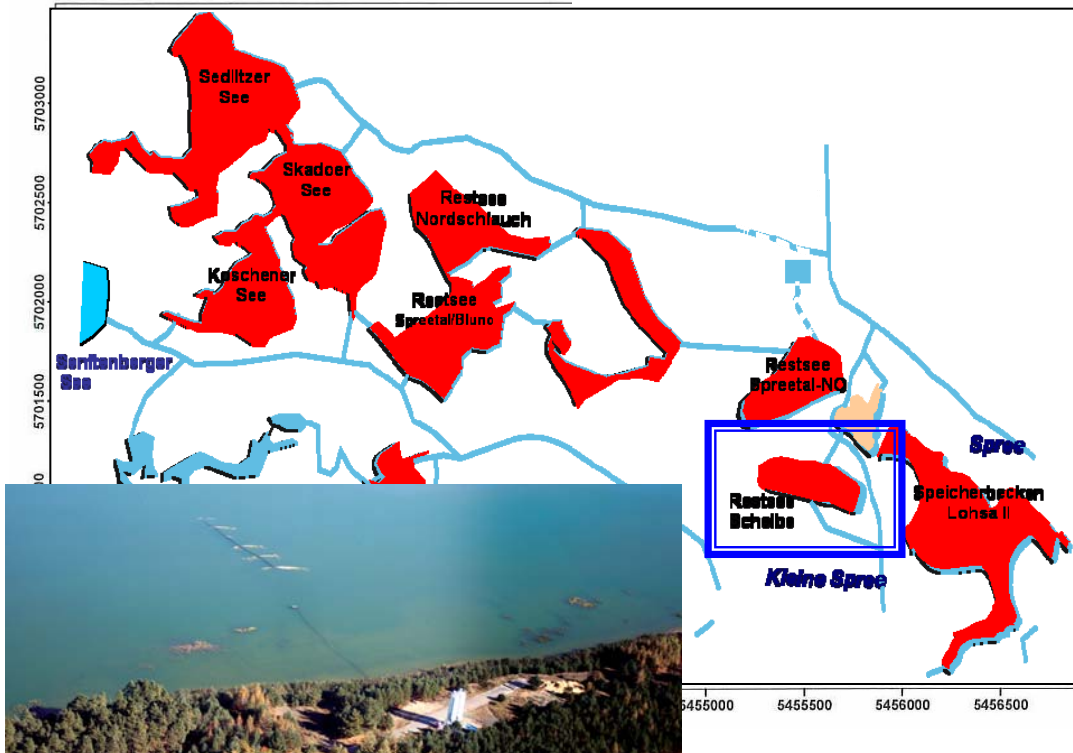
Neutralisation



$$\text{NP}_{\text{NM}} \cdot m_{\text{Nm}} = \Delta\text{NP}_W \cdot V_W$$

$$m_{\text{Nm}} = \frac{\Delta\text{NP}_W \cdot V_W}{\text{NP}_{\text{NM}}}$$

3. Behandlung durch Neutralisation



Tagebausee Scheibe

$$V_W = 109,7 \text{ Mio m}^3$$

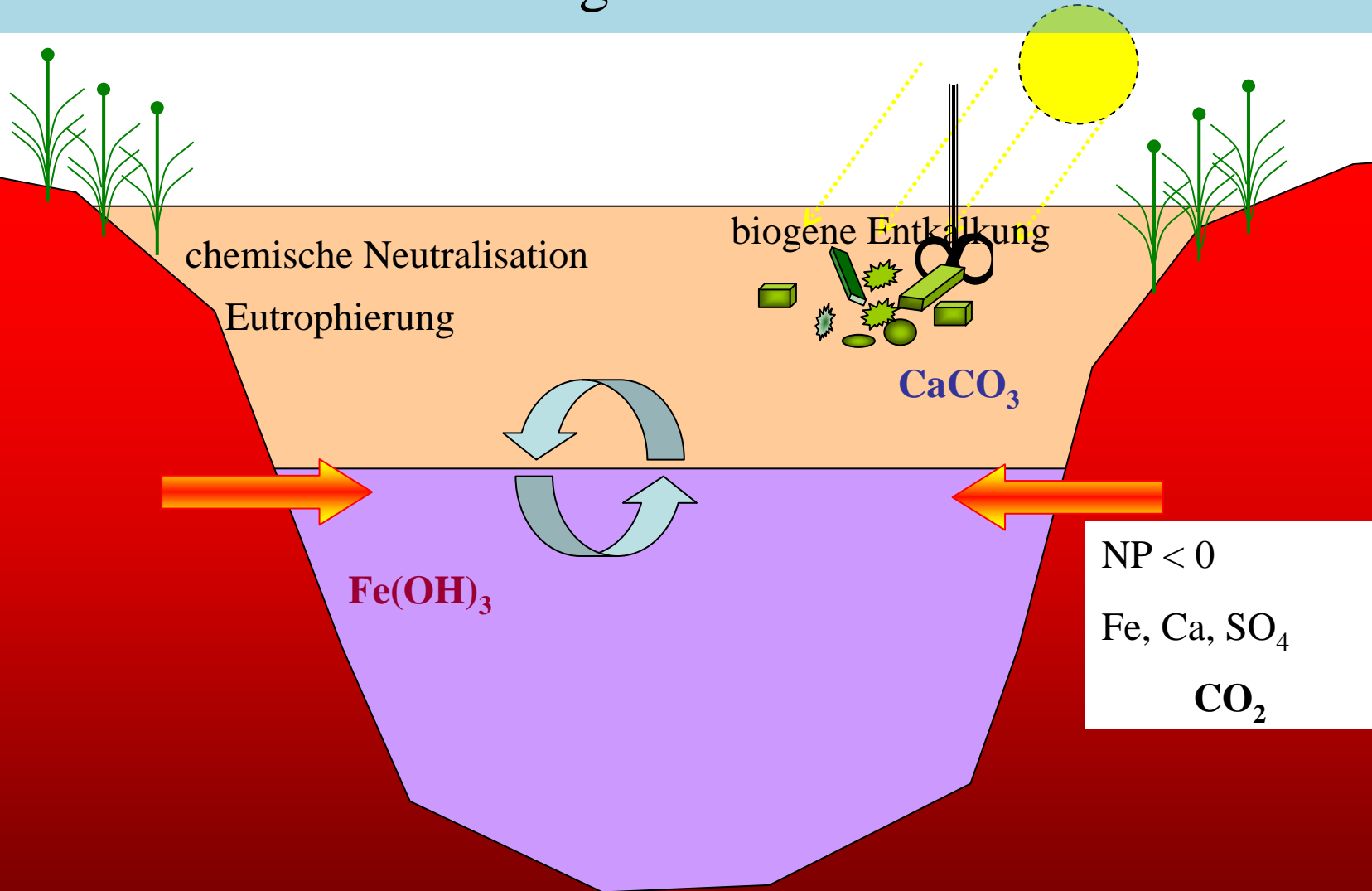
(Endstand)

Parameter		Scheibe	
pH	1	3,2	2,7
$K_{B4,3}$	mmol/L	2,3	3,6
Fe	mg/L	30	
Al	mg/L	7	
Mn	mg/L	3	
SO ₄	mg/L	800	
TIC	mg/L	0,3	0,8
NP	mmol/L	-3	

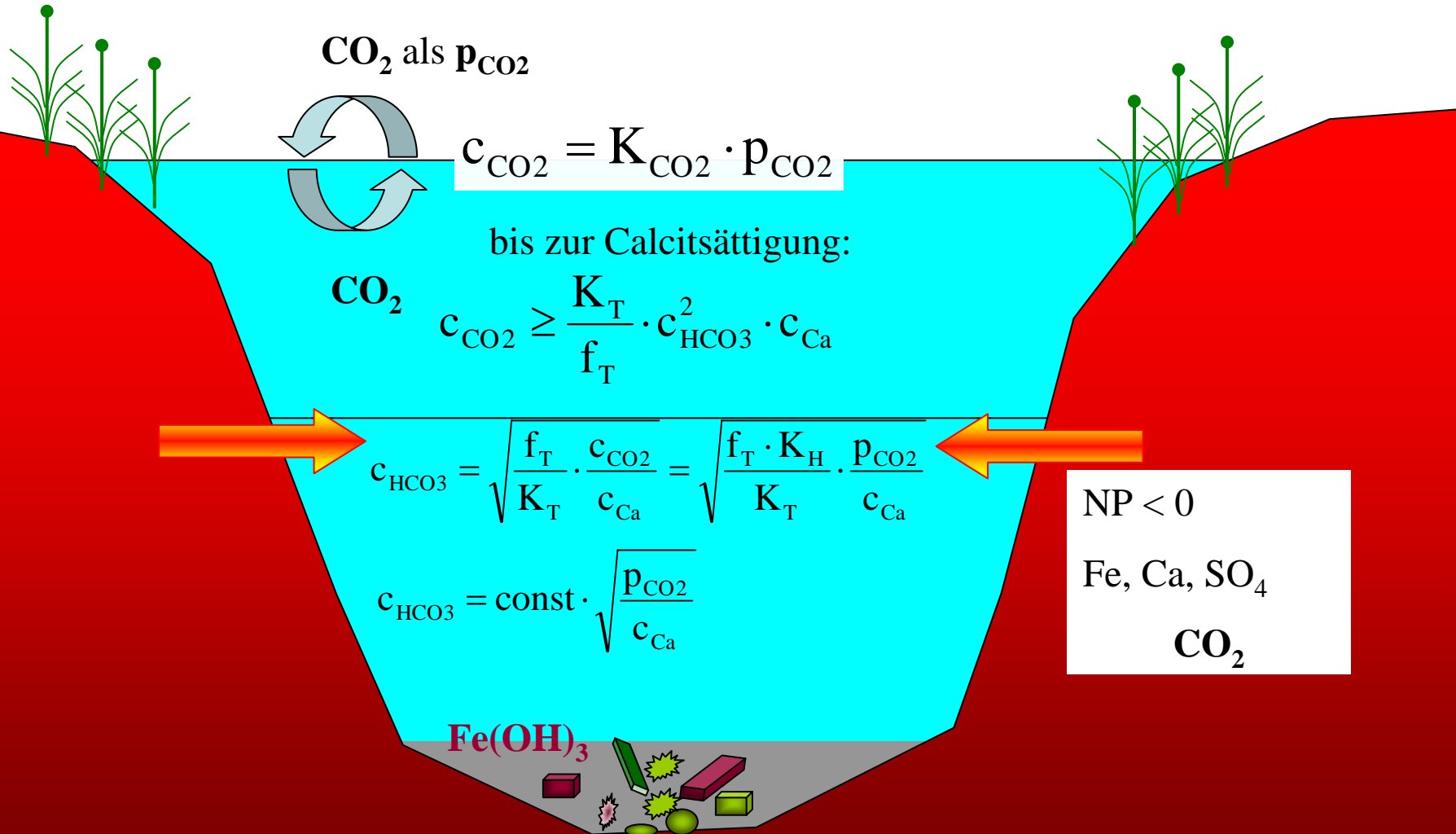
$$\text{Ziel: NP} = +0,3 \text{ mmol/L} \Rightarrow \Delta\text{NP}_W = 3,3 \text{ mol/m}^3$$

$$m_{Nm} = \frac{\Delta\text{NP}_W \cdot V_W}{\eta \cdot \text{NP}_{NM}} = \frac{3,3 \text{ mol} \cdot 109,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3}{\eta \cdot \text{m}^3} \frac{\text{kg}}{35,7 \text{ mol}} = 10,1 \cdot 10^6 \text{ kg}$$

2. Behandlung durch Neutralisation



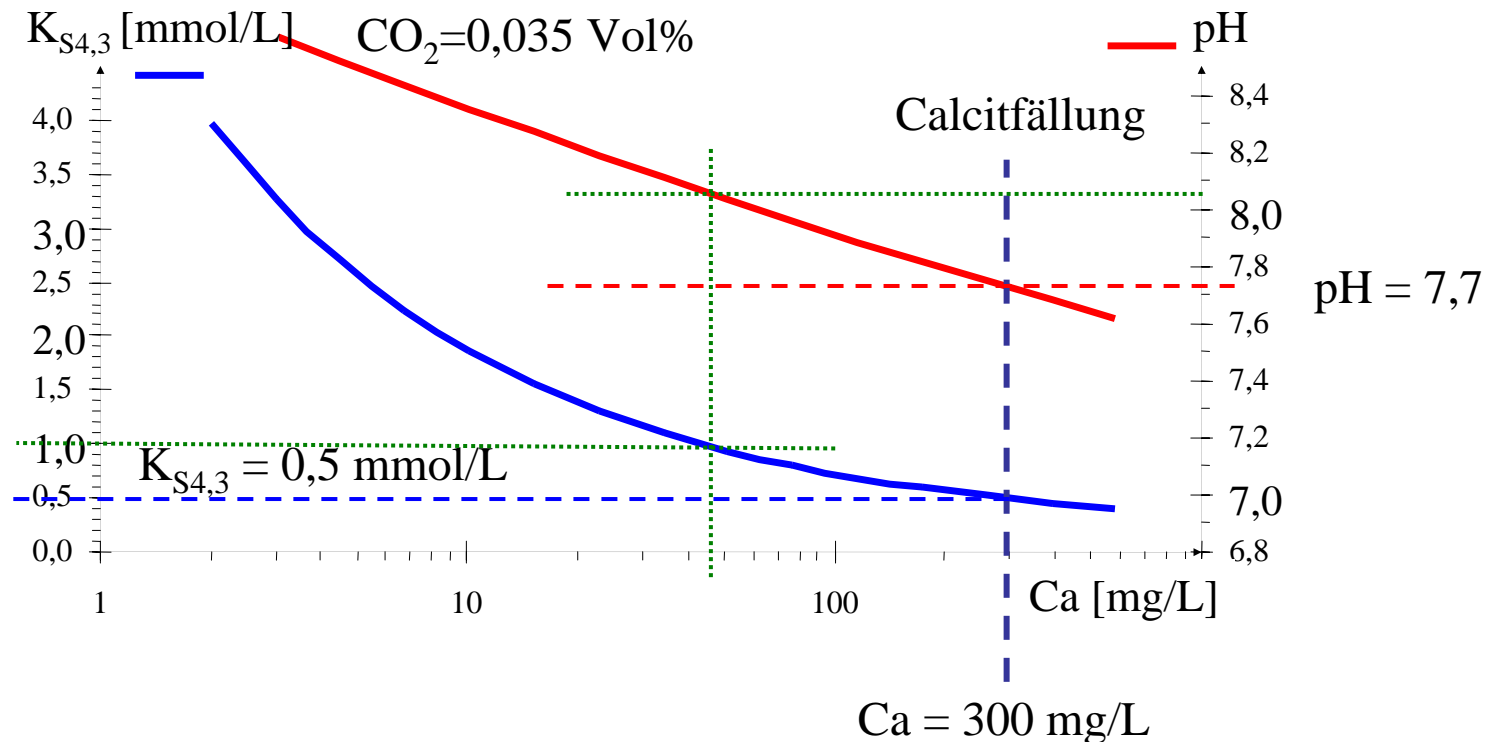
2. Behandlung durch Neutralisation



2. Behandlung durch Neutralisation

$$\text{pH} \approx 6,33 - 0,00477 \cdot \text{Temp} + \frac{2 \cdot \sqrt{c_{\text{Ca}}}}{31,62 + 2,8 \cdot \sqrt{c_{\text{Ca}}}} + 0,5 \cdot (-\lg p_{\text{CO}_2} - \lg \text{Ca})$$

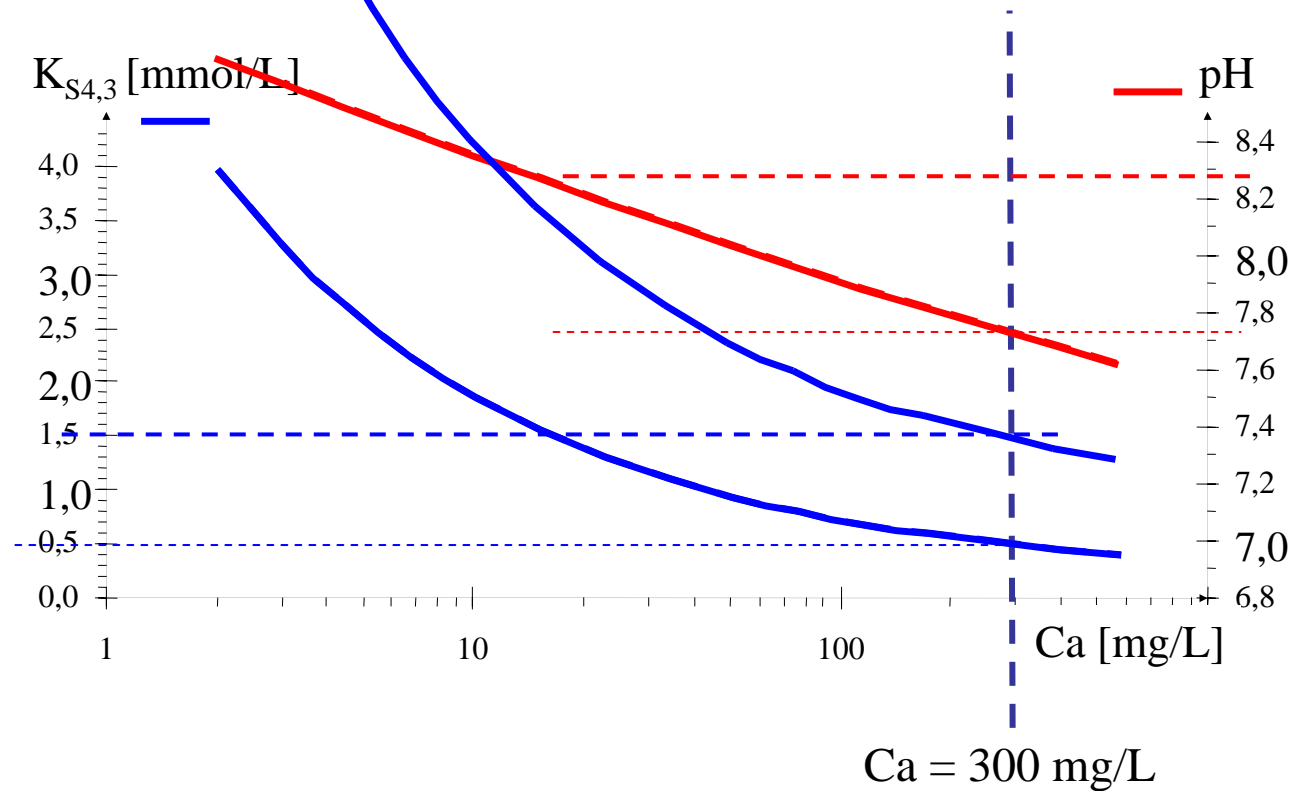
$$\lg c_{\text{HCO}_3} \approx (1,8 - 0,012 \cdot \text{Temp}) + \frac{3 \cdot \sqrt{c_{\text{Ca}}}}{31,62 + 2,8 \cdot \sqrt{c_{\text{Ca}}}} + 0,5 \cdot (0,071 + \lg p_{\text{CO}_2} - \lg c_{\text{Ca}})$$



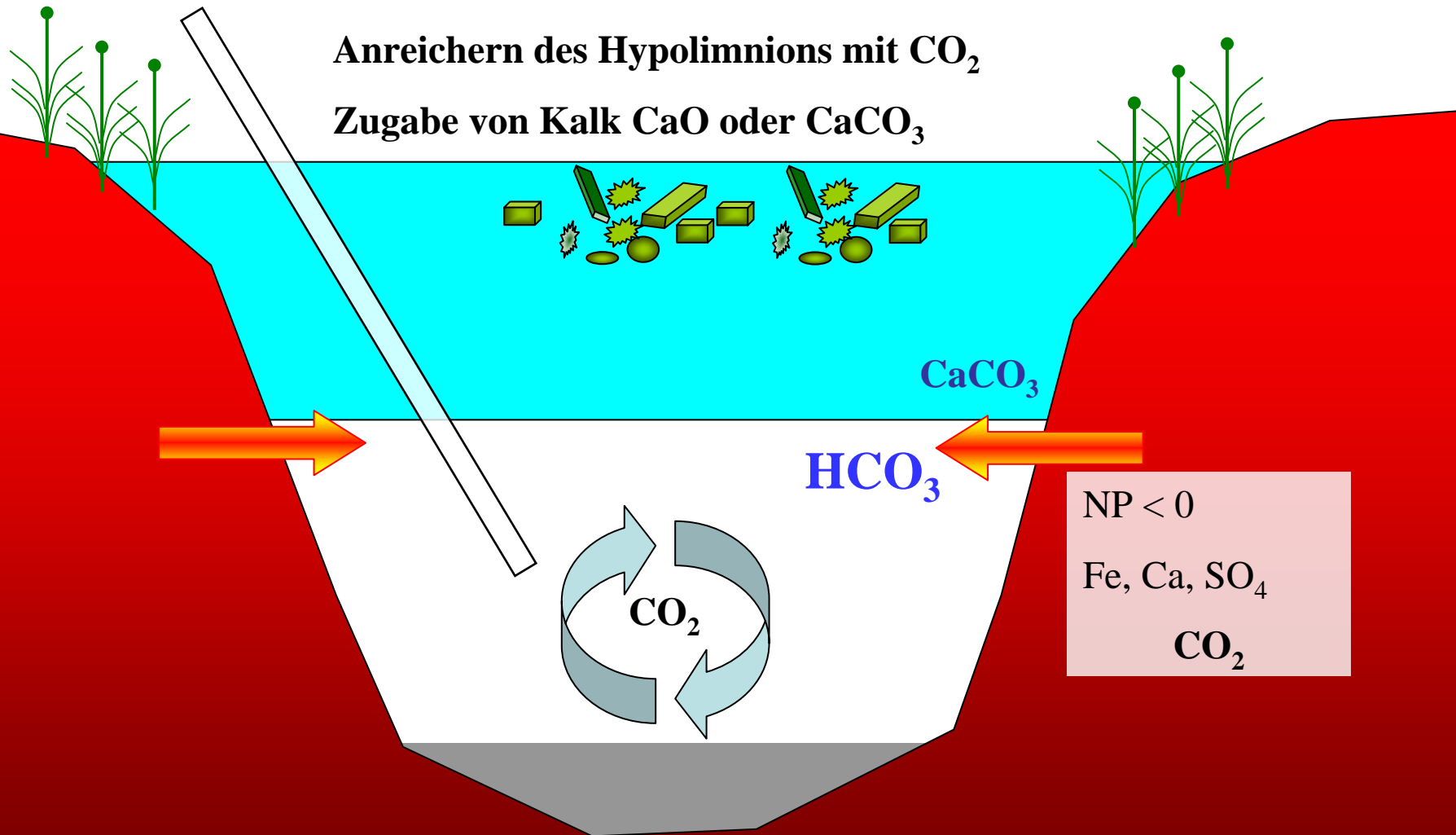
2. Behandlung durch Neutralisation und CO₂-Begasung

p(CO₂) erhöhen:

- höherer Druck
- höhere Konzentration [Vol-%]

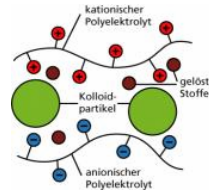
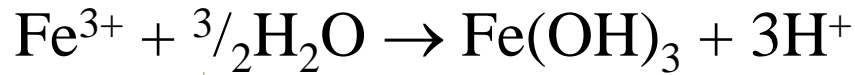
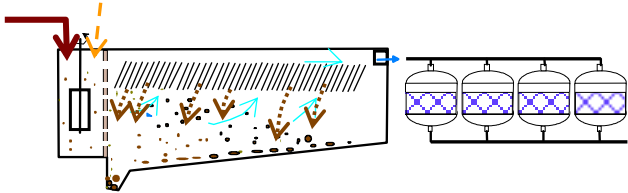
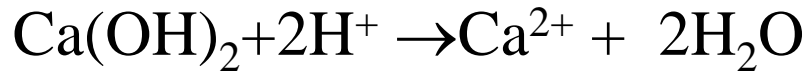


2. Behandlung durch Neutralisation und CO₂-Begasung



3. Behandlung durch Neutralisation

Grubenwasserbehandlung

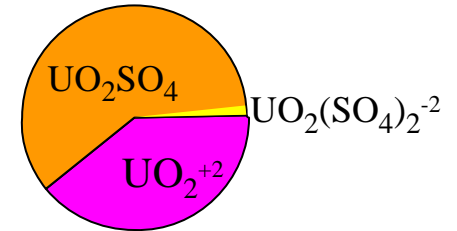


pH-gesteuert => selektive Schwermetallfällung

3. Behandlung durch Neutralisation

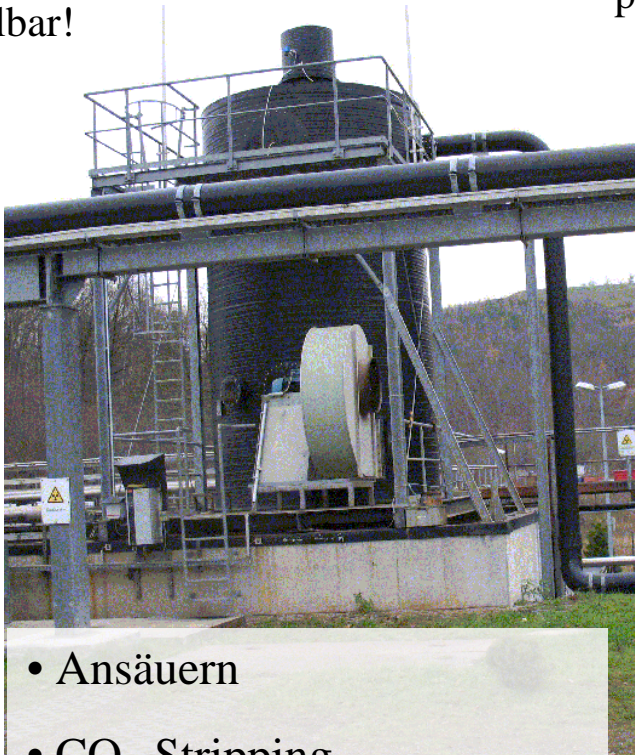
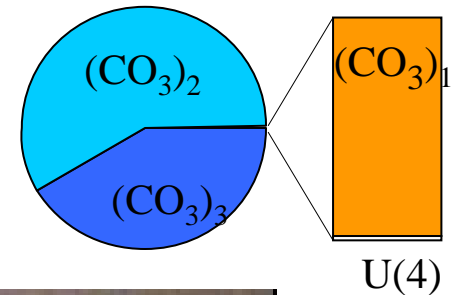
Uran kann gefällt oder separat über Ionenaustausch gewonnen werden^.

Ehemalige Grube A
pH = 2,8 NP = **-6 mmol/L**



Urankomplexe nicht mit Eisen fällbar!

Ehemalige Grube B
pH = 6,9 NP = **+10 mmol/L**



- Ansäuern
- CO₂-Stripping



- mit Eisen fällen
- Eisenhydroxidschlamm entsorgen

3. Behandlung durch Neutralisation

Fällung von Eisenhydroxid (Ferrihydrit) - Schlammzubildung

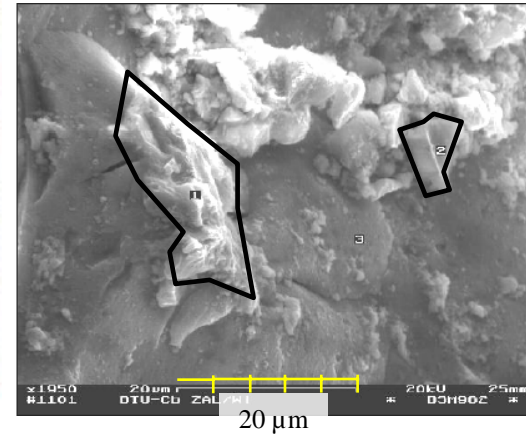


Probe F2: GWRA Kringelsdorf
Schlammstapelbecken



Calcit

Gips



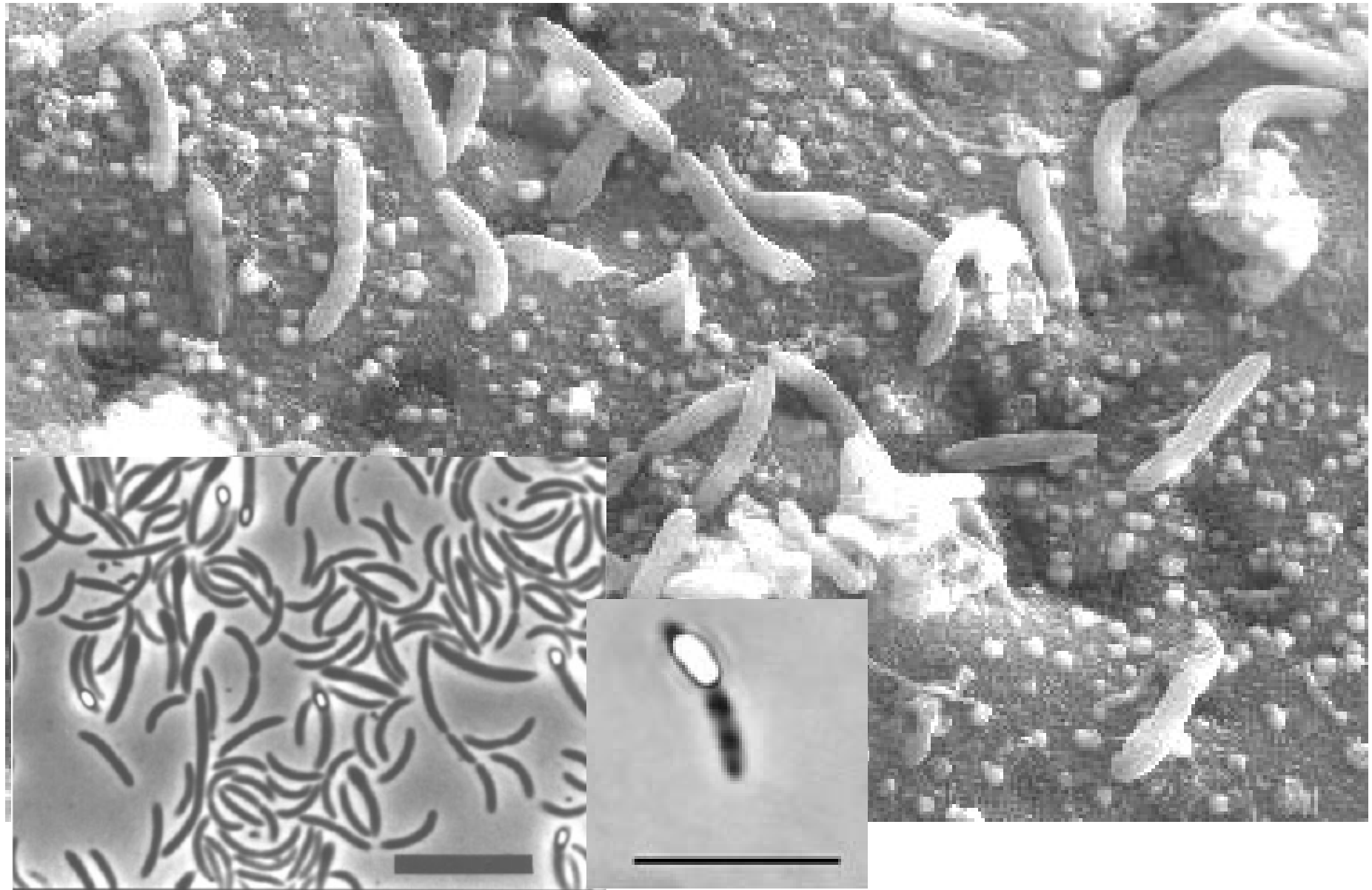
$\text{Fe}(\text{OH})_3$

nach Gröschke, /R3209/

Herstellung von körnigen Adsorptionsmitteln
aus Eisenhydroxidschlamm

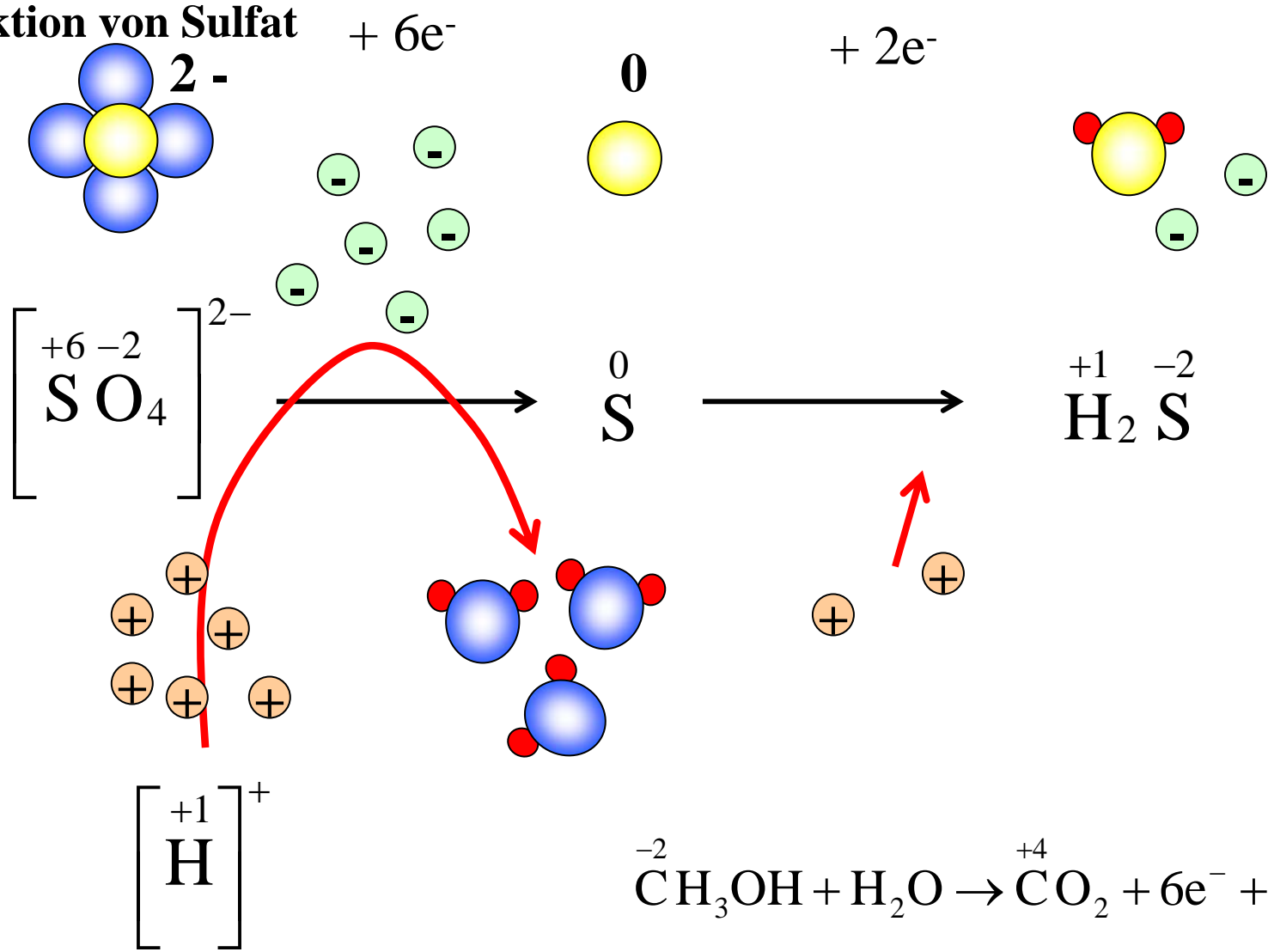
Ferrosorp®

4. Behandlung durch mikrobielle Sulfatreduktion



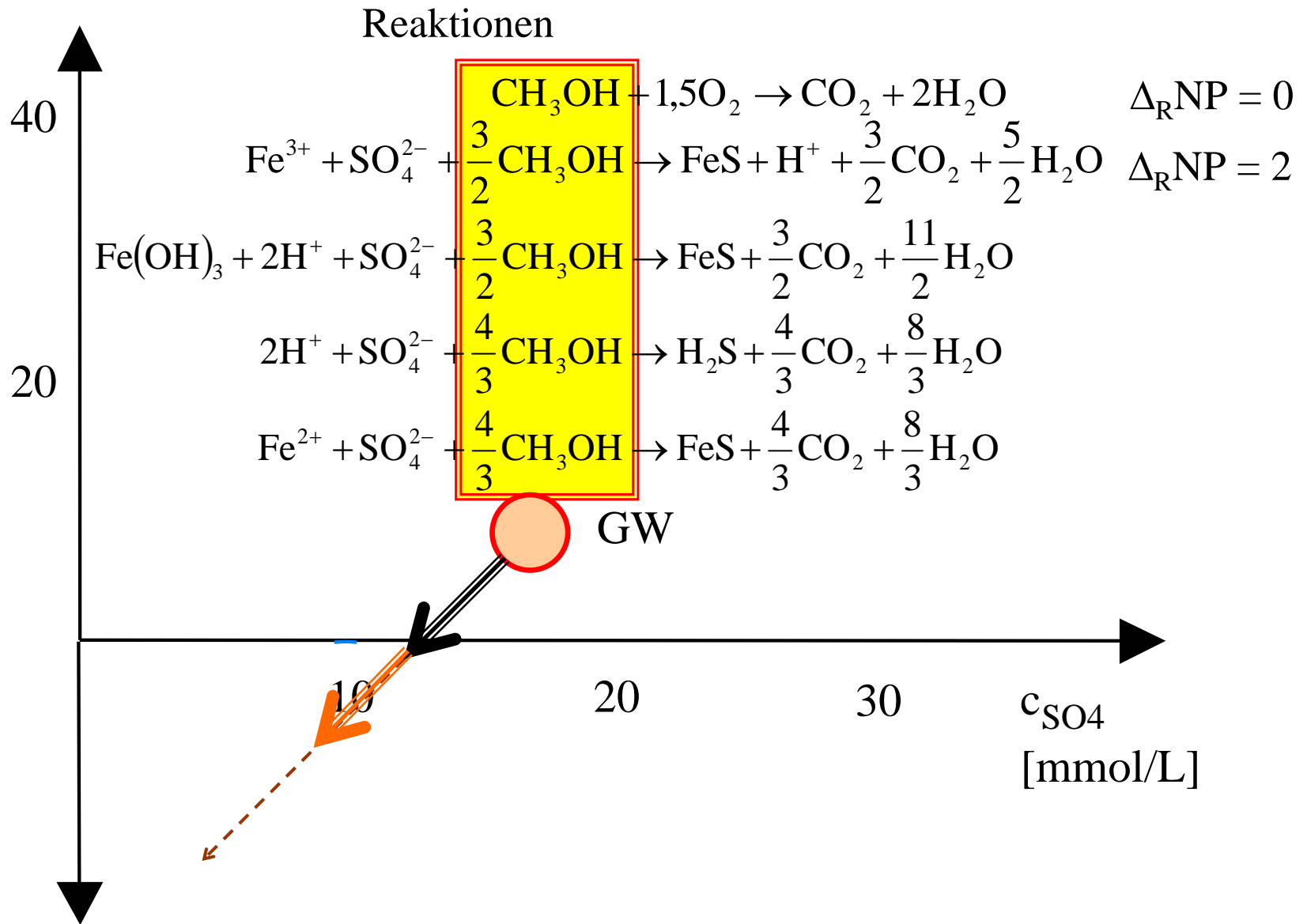
4. Behandlung durch mikrobielle Sulfatreduktion

Reduktion von Sulfat



4. Behandlung durch mikrobielle Sulfatreduktion

-NP [mmol/l]



5. Behandlung durch mikrobielle Sulfatreduktion

Behandlungsziel und Wasseranalyse

Parameter		Ziel	GW
pH	1	> 6	5,6
Ltf	µS/cm		2330
K _{S4,3}	mmol/L	möglichst hoch	0,6
Fe	mg/L	möglichst wenig	260
Fe ²⁺	mg/L	möglichst wenig	256
SO ₄	mg/L	1060	1500
NP	mmol/L	+ 0,4	-8,8

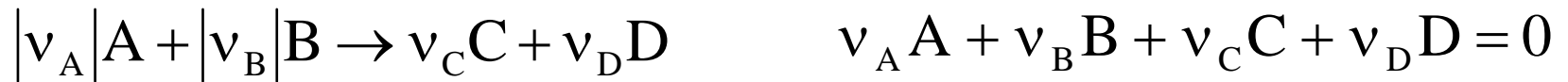
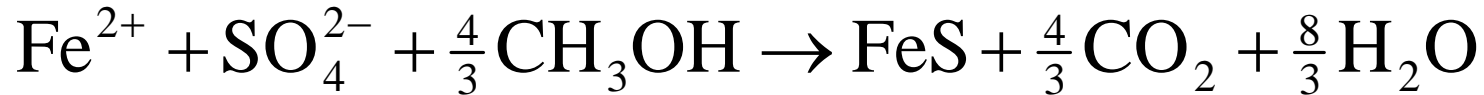
= 4,6 mmol/L

$$\Delta NP = \Delta K_{S4,3} - 2 \cdot (-4,6 \text{ mmol/L}) - 2 \Delta c_{Mn^{2+}}$$

$$\Delta NP = +9,2 \text{ mmol/L}$$

$$\Delta c_{SO_4} = -4,6 \text{ mmol/L} \cdot 96 \frac{\text{mg}}{\text{mmol}} = -442 \text{ mg/L}$$

5. Behandlung durch mikrobielle Sulfatreduktion



$$\xi = \frac{\Delta n_{\text{Fe}^{2+}}}{-1} = \frac{\Delta n_{\text{SO}_4}}{-1} = \frac{\Delta n_{\text{CH}_3\text{OH}}}{-4/3} = \frac{\Delta n_{\text{FeS}}}{+1} = \dots$$

$$\Delta c_{\text{CH}_3\text{OH}} = \frac{4}{3} \cdot \Delta c_{\text{Fe}^{2+}}$$

$$\Delta c_{\text{CH}_3\text{OH}} = \frac{4}{3} \cdot 4,6 \text{ mmol/L} = 6,1 \text{ mmol/L}$$

$$\Delta c_{\text{CH}_3\text{OH}} = 6,1 \text{ mmol/L} \cdot 32 \frac{\text{mg}}{\text{mmol}} = 196 \text{ mg/L} \approx \mathbf{200 \text{ g/m}^3}$$

5. Behandlung durch mikrobielle Sulfatreduktion

Substrat		Faktor in BSB mol/mol	M g/mol	Stöchiometrikoeffizienten			
				v(O ₂)	v(Fe(III))	v(Fe(II))	v(H ₂ S)
Kohlehydrat	{CH ₂ O}	1,00	30	1,00	2,25	2,00	
Methanol	CH₃OH	1,50	32	0,67	1,50	1,33	1,66
Glycerin	C ₃ H ₈ O ₃	3,50	92	3,5	0,64	0,57	0,71
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	3,00	46	3,00	0,75	0,67	
Essigsäure	CH ₃ COOH	2,00	60	2,00	1,13	1,00	
BSB (theoretisch)	O ₂		32	1	2,25	2	

$$c_{\text{Substrat}} = v_{\text{O}_2} \cdot \Delta c_{\text{O}_2} + v_{\text{Fe}_3} \cdot \Delta c_{\text{Fe}_3} + v_{\text{Fe}_2} \cdot \Delta c_{\text{Fe}_2}$$

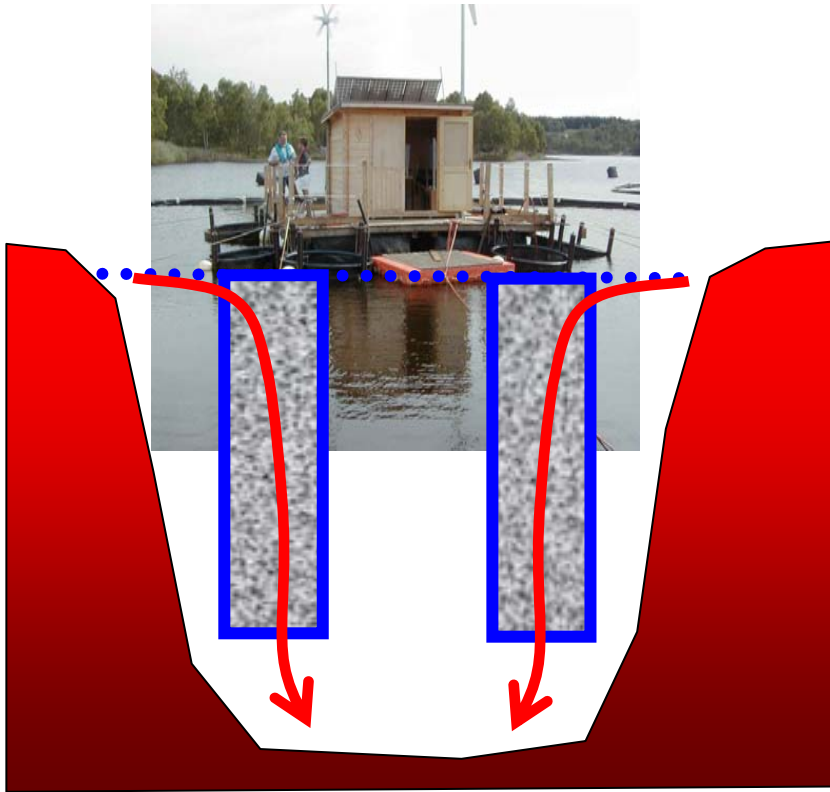
Über die Oxidation des Substrates (z.B. Methanol) mit Sauerstoff nach lässt sich der Substratbedarf auch als BSB angeben

reicht das gelöste Eisen?

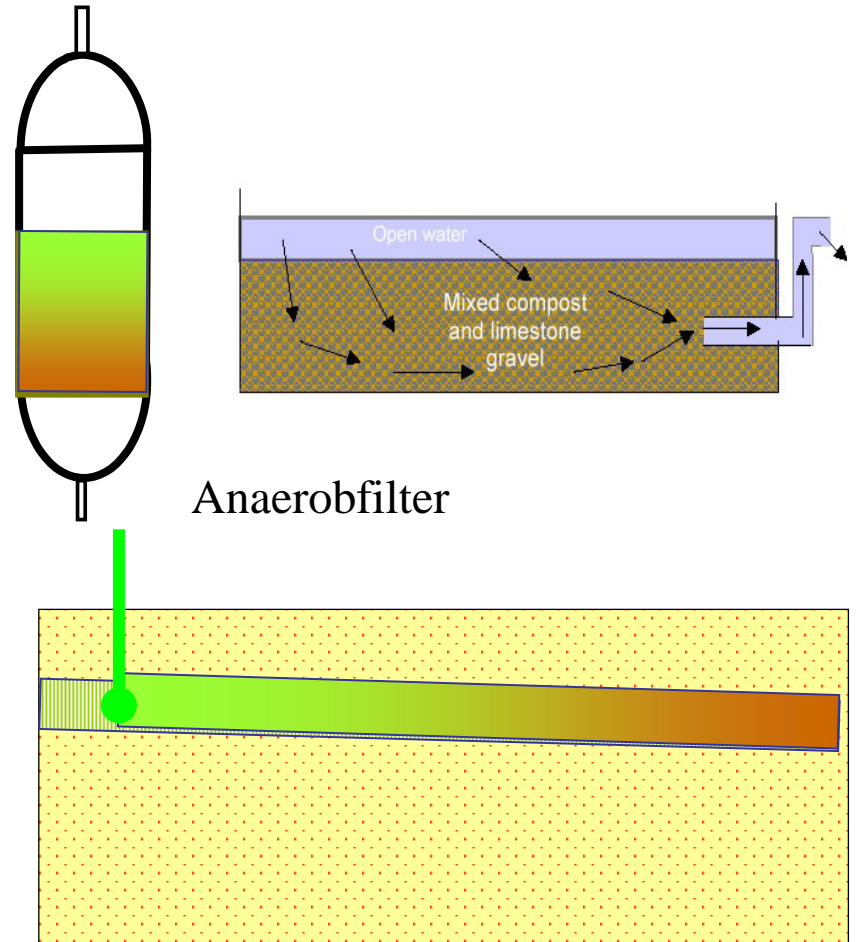
Zusatzbedarf:

$$\Delta c_{\text{Fe}} = \frac{\Delta \text{NP}_{\text{soll}}}{2} - c_{\text{Fe}}$$

4. Behandlung durch mikrobielle Sulfatreduktion



In-situ Seebehandlung



Untergrundbehandlung

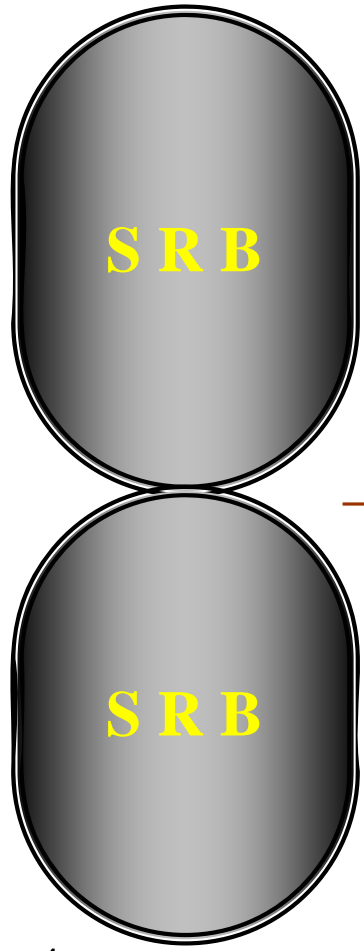
4. Behandlung durch mikrobielle Sulfatreduktion

assimilatorisch



Sulfat

dissimilatorisch



Konkurrenzreaktion:
Methanbildung
 CH_4

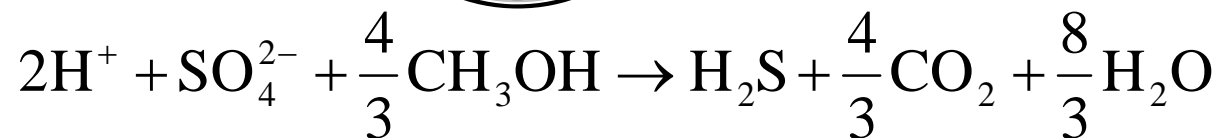
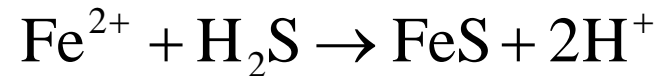
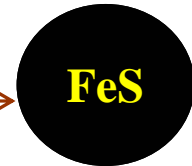
Methanol

Ethanol

Lactat

Glycerin

Acetat



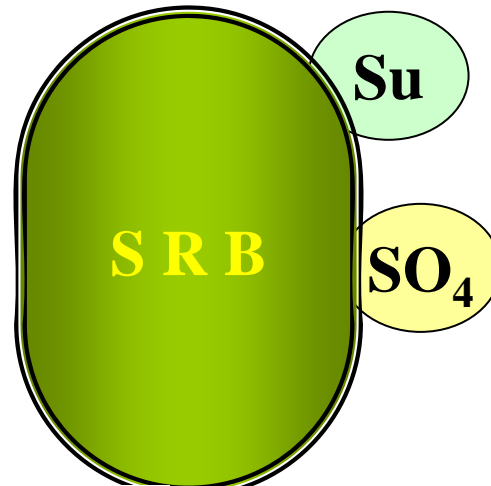
5. Behandlung durch mikrobielle Sulfatreduktion

Umsatzgeschwindigkeit

$$r_{\text{cells}} = (\mu - b) \cdot c_{\text{cells}}$$

Wachstumsrate

Absterberate

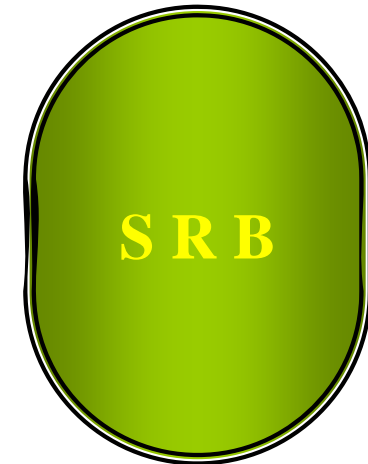
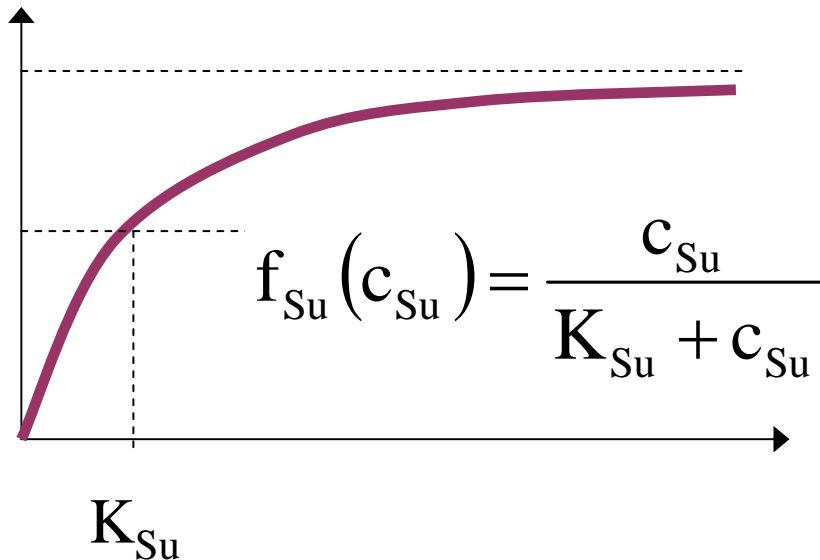


Enzymkinetik

Substrathemmung

Produkthemmung

$$\mu = \mu_{\text{max}} \cdot f_{\text{Su}}(c_{\text{Su}}) \cdot f_{\text{SO}_4}(c_{\text{SO}_4}) \cdot f_{\text{nc}}(c_{\text{I}})$$



5. Behandlung durch mikrobielle Sulfatreduktion

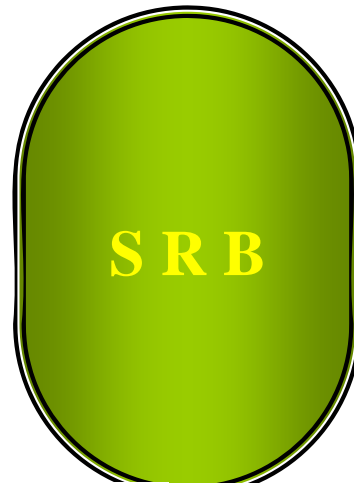
Umsatzgeschwindigkeit

$$r_{\text{cells}} = (\mu - b) \cdot c_{\text{cells}}$$

Wachstumsrate

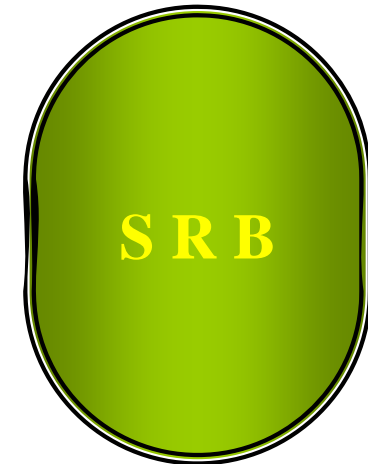
Absterberate

Enzymkinetik



$$\mu = \mu_{\text{max}} \cdot f_{\text{Su}}(c_{\text{Su}}) \cdot f_{\text{SO}_4}(c_{\text{SO}_4}) \cdot f_{\text{nc}}(c_{\text{I}}) \cdot \zeta_{\text{Temp}}(\text{Temp})$$

$$\zeta_{\text{Temp}}(\text{Temp}) = e^{-\frac{E_a}{RT}}$$



5. Behandlung durch mikrobielle Sulfatreduktion

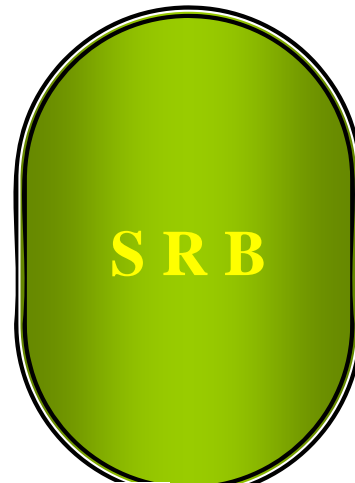
Umsatzgeschwindigkeit

$$r_{\text{cells}} = (\mu - b) \cdot c_{\text{cells}}$$

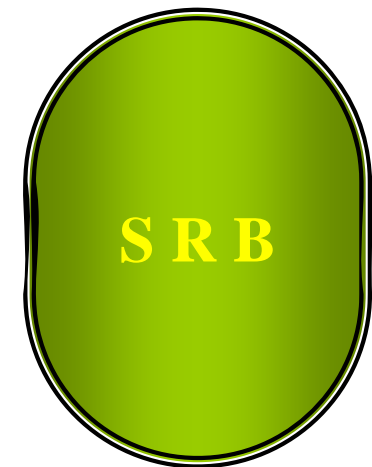
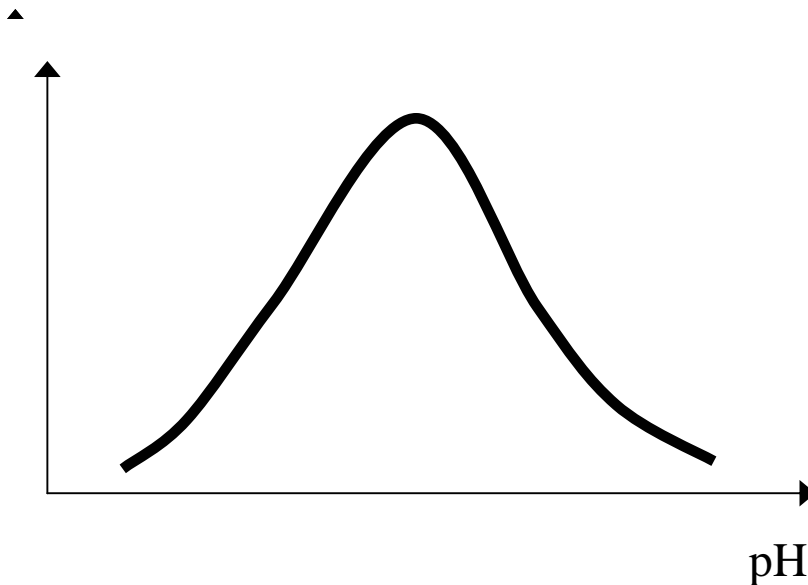
Wachstumsrate

Absterberate

Enzymkinetik



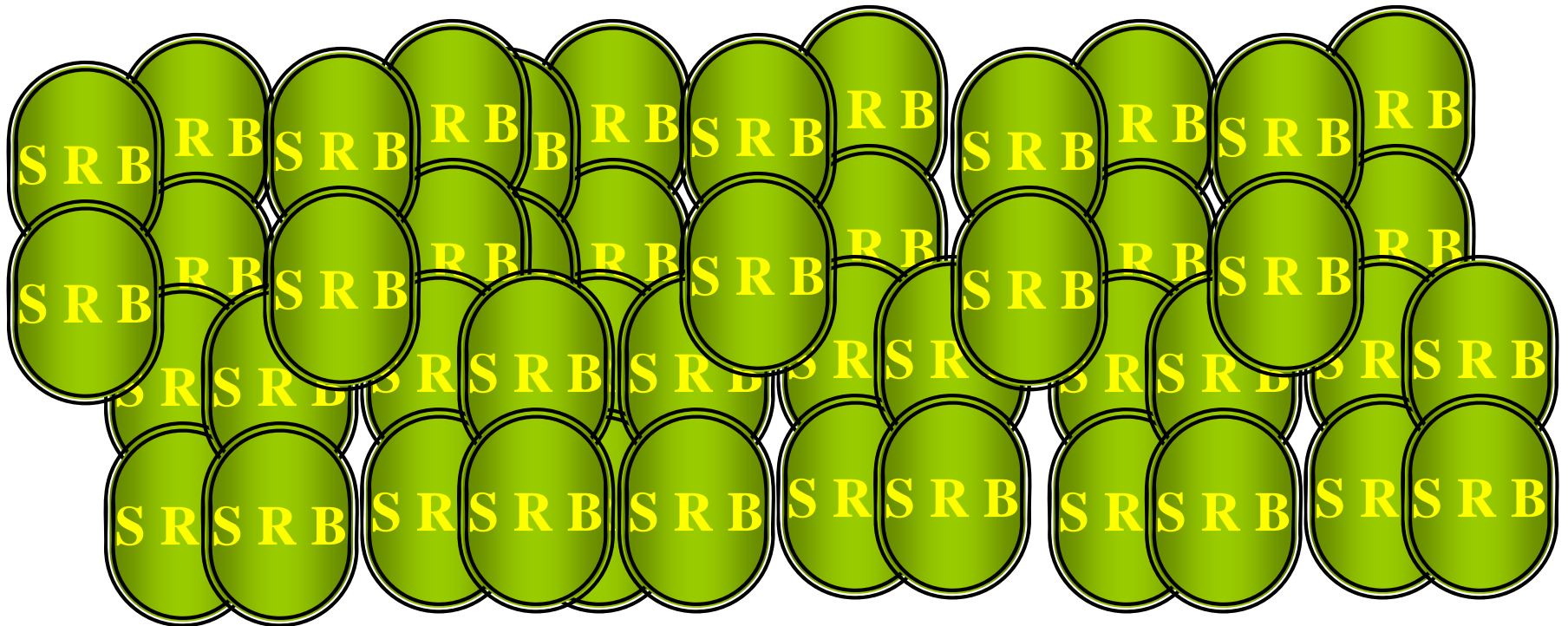
$$\mu = \mu_{\text{max}} \cdot f_{\text{Su}}(c_{\text{Su}}) \cdot f_{\text{SO}_4}(c_{\text{SO}_4}) \cdot f_{\text{nc}}(c_{\text{I}}) \cdot \zeta_{\text{Temp}}(\text{Temp}) \cdot \zeta_{\text{pH}}(\text{pH})$$



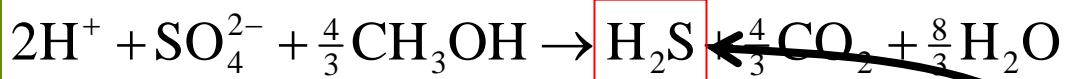
5. Behandlung durch mikrobielle Sulfatreduktion

Der Substratumsatz ist über den Ertragsfaktor Y mit dem Biomassewachstum verknüpft.

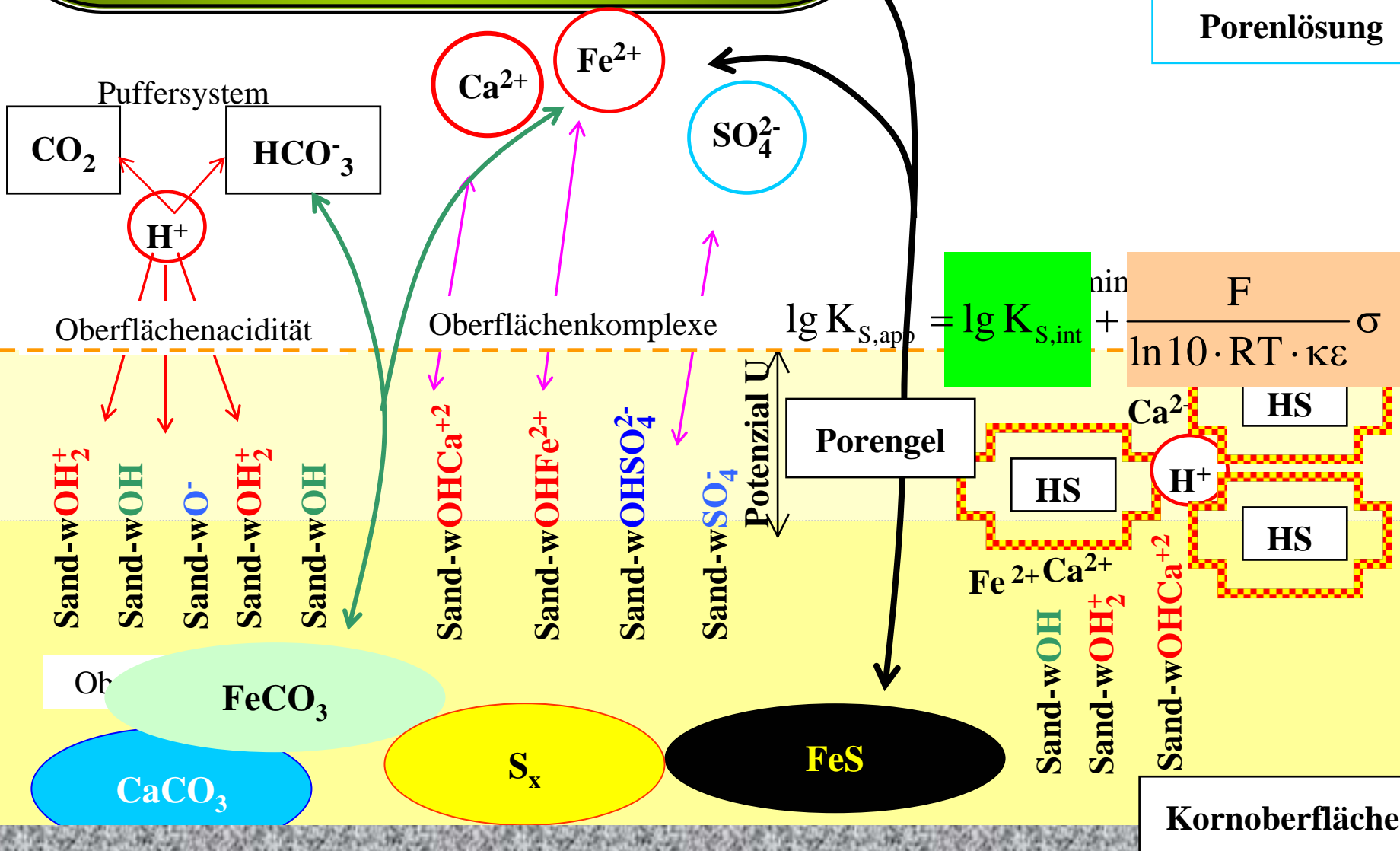
$$r_{\text{Su}} = -\frac{1}{Y} \cdot r_{\text{cells}}$$



Umfangreiches Literaturmaterial liegt für industrielle Bioreaktoren und Fermenter im Temperaturoptimum um 37°C vor



Porenlösung

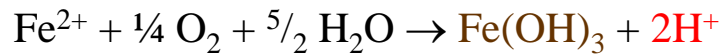
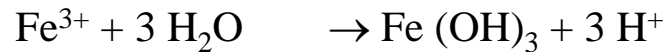
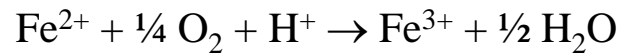


5. Passive Verfahren (Kombination von Wirkprinzipien)

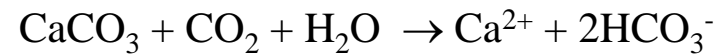
Oxidationsgraben mit Sedimentationsbecken



Quelle: BTU, LS WT & SWB



Offener Kalksteingraben



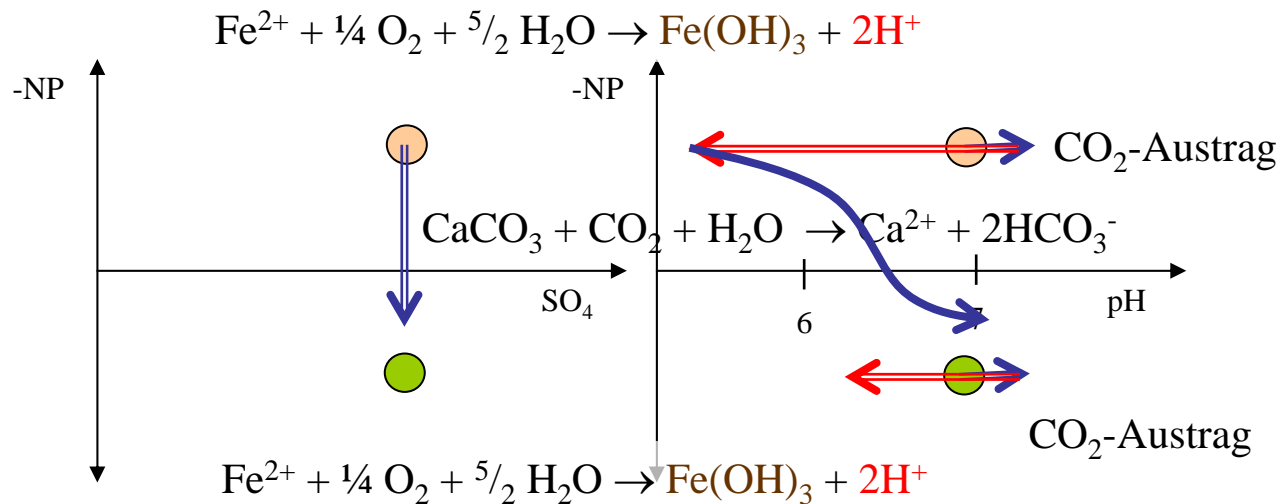
5. Passive Verfahren (Kombination von Wirkprinzipien)

Oxidationsgraben mit Sedimentationsbecken



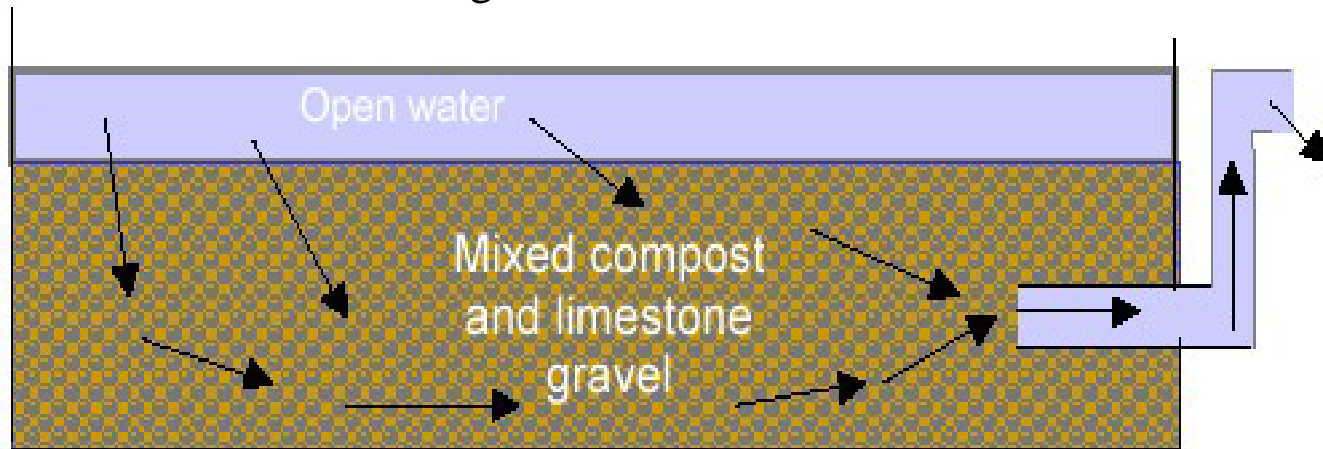
Quelle: BTU, LS WT & SWB

Offener Kalksteingraben

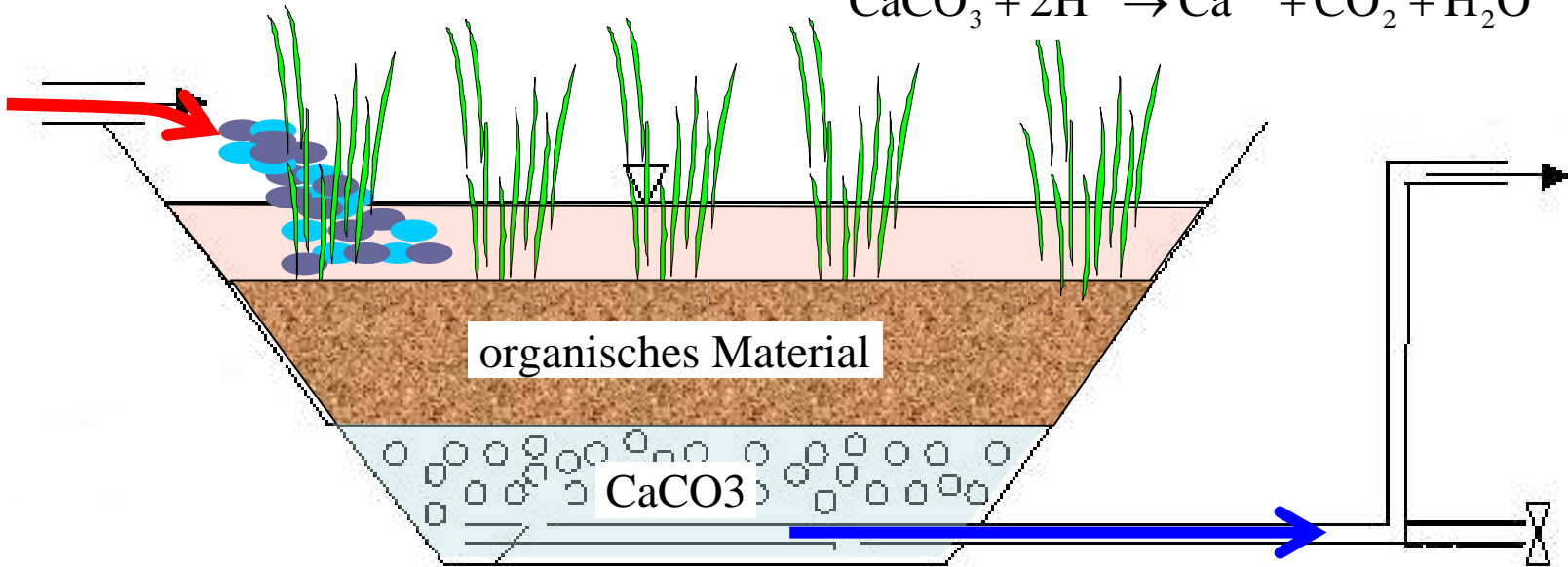
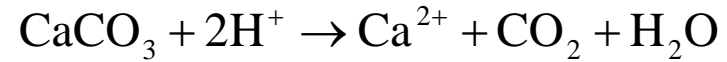
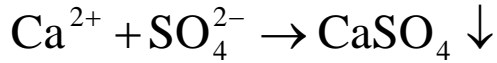
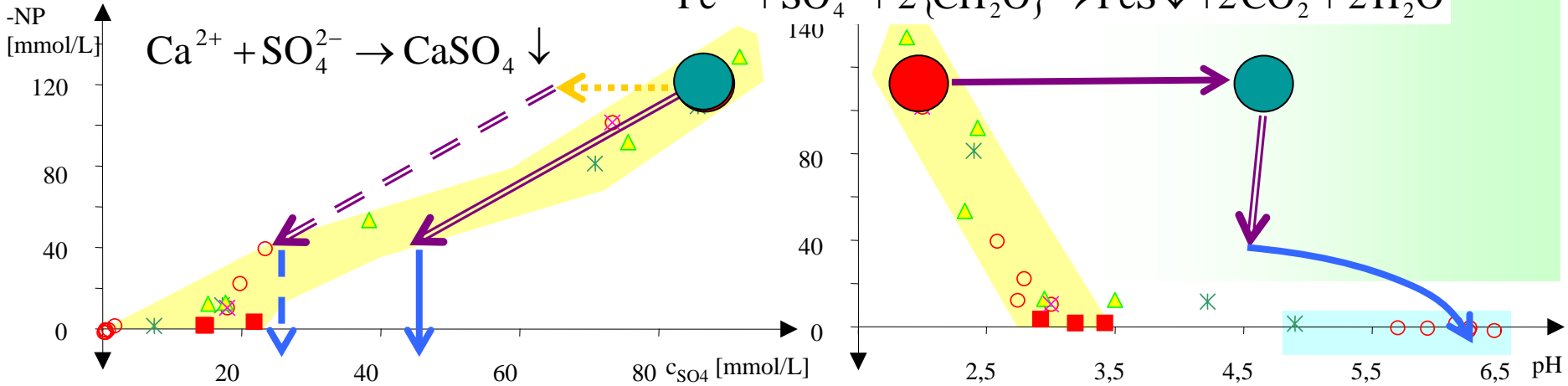
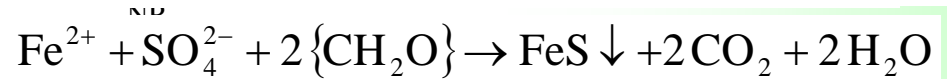
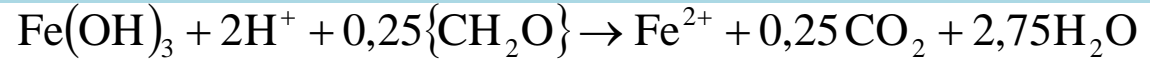


5. Passive Verfahren (Wetlands)

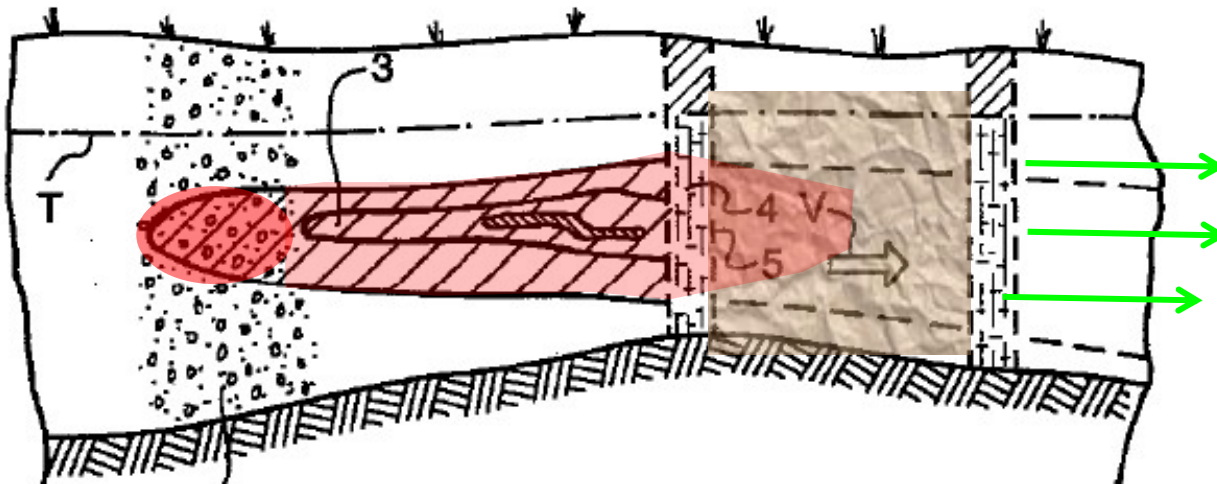
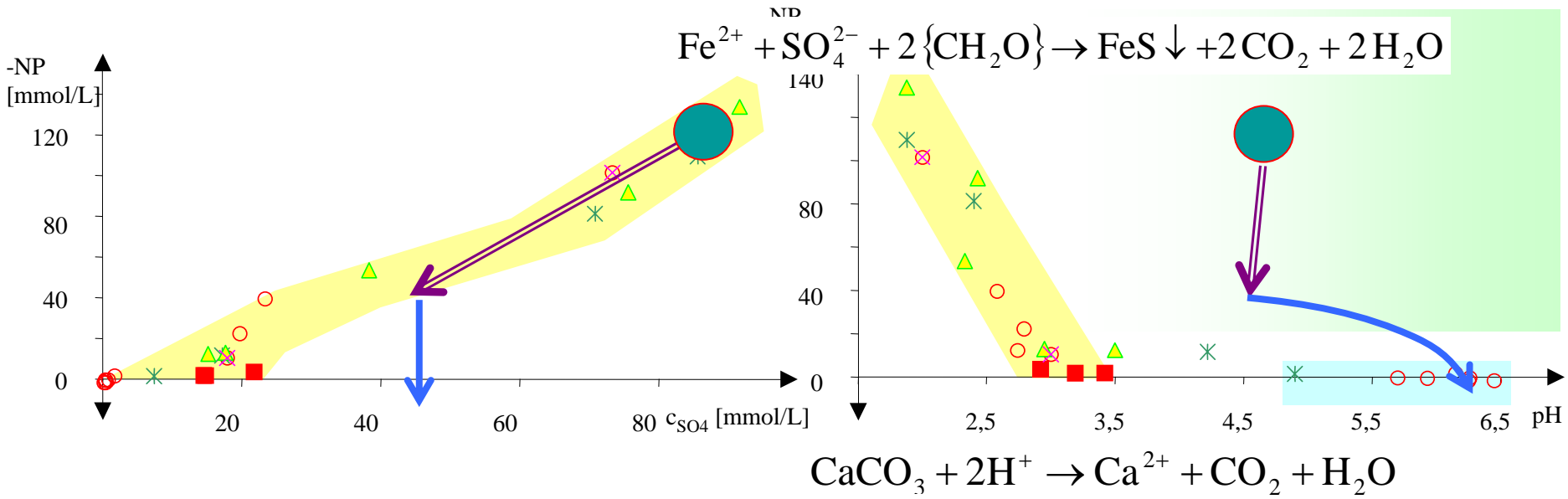
Passive Behandlungsverfahren



5. Passive Verfahren (Wetlands)

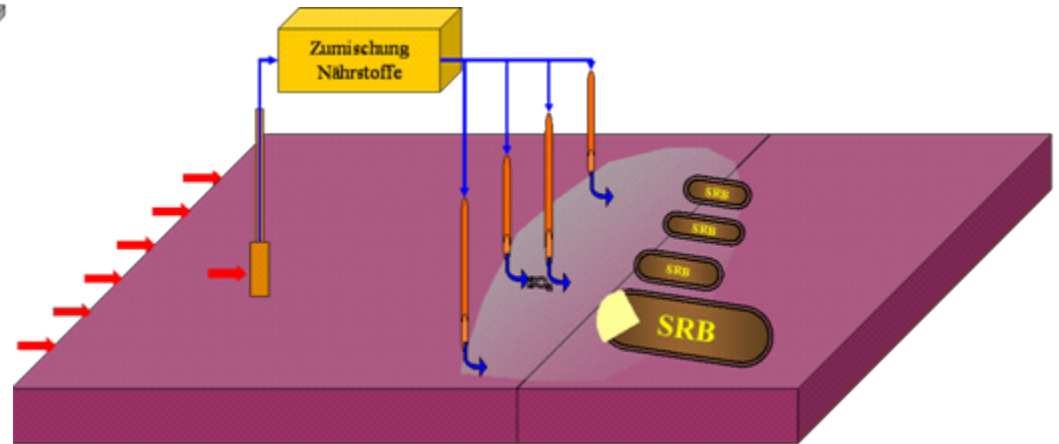
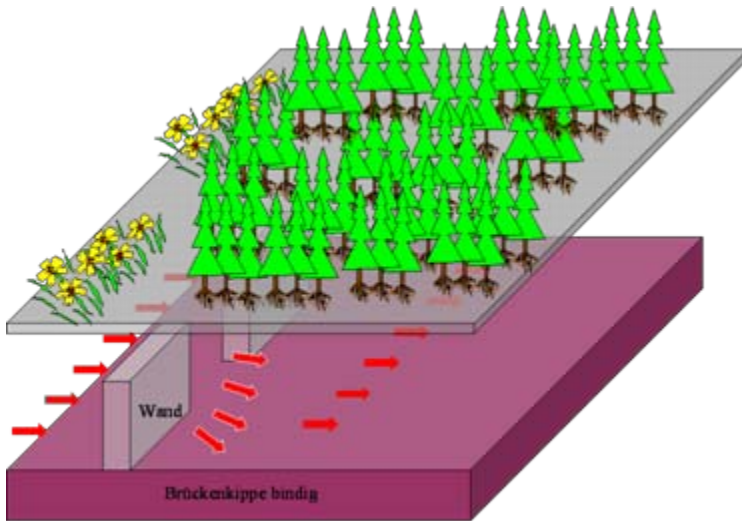


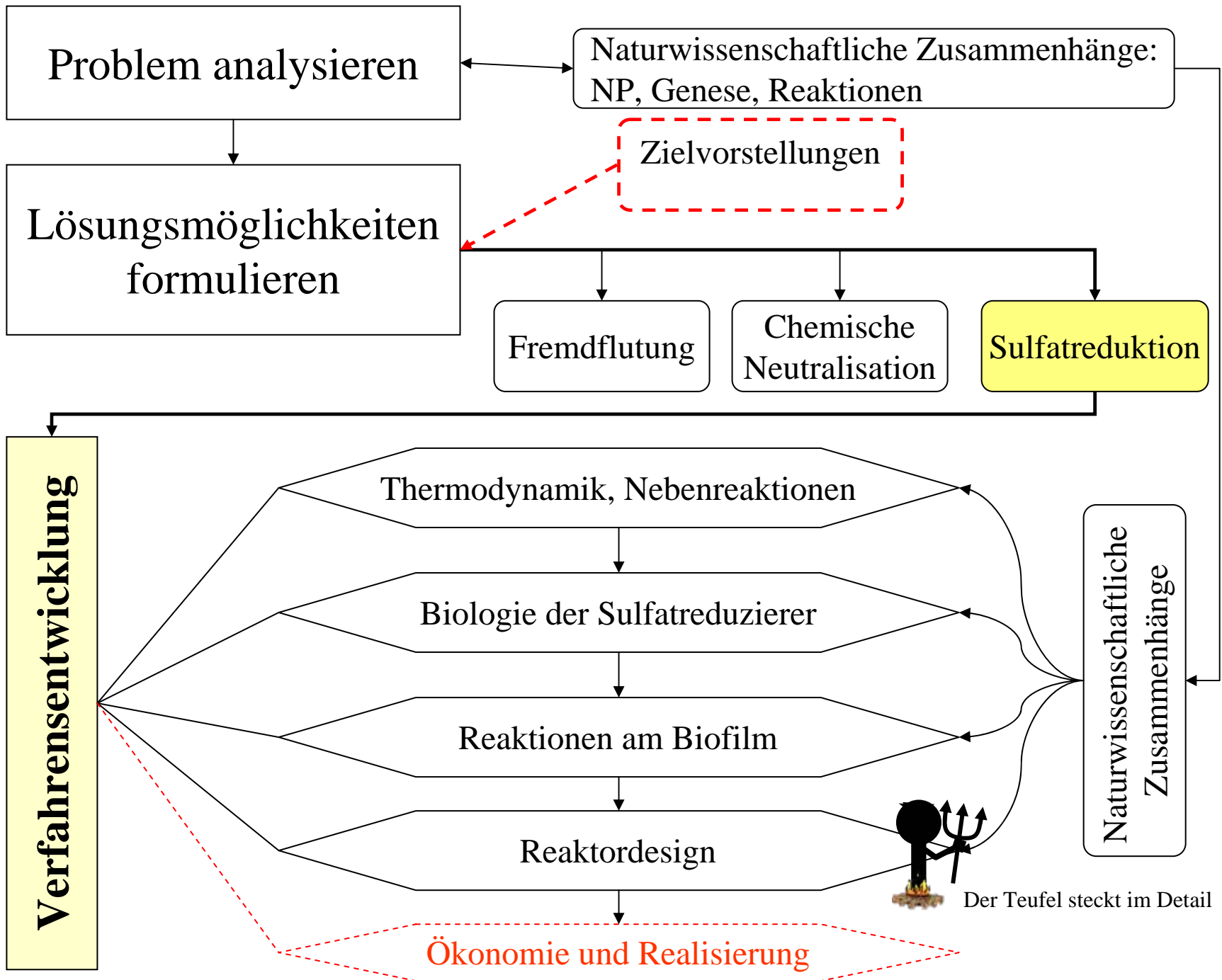
5. Passive Verfahren (Passive Reaktive Wände)



Bau einer Reaktiven Wand

6. Beispiel zur Untergrundsulfatreduktion





Zum Schluss: Was man so wissen sollte

Was sind AMD?

Wie entstehen AMD?

Zusammensetzung von AMD, qualitativ, Konzentrationsbereiche, Acidität, Neutralisationspotenzial, -NP-SO₄-Diagramm

Wie unterscheiden sich bergbaubeeinflusste Grund- von Oberflächenwässer?

Wirkprinzipien von Behandlungsverfahren.

Einfache stöchiometrische Berechnung nach vorgegebener Reaktionsgleichung.

Bloss keine Formeln auswendig pauken.

In Zusammenhängen denken.

Anwenden können (mit Hilfe der Unterlagen).

Das ist hier ein interdisziplinäres Fach, Wissen anderer Fachgebiete gehört dazu!

Danke für die Aufmerksamkeit

