

# **Integrales Monitoring für den Grubenwasseranstieg im Steinkohlenbergbau in Nordrhein-Westfalen**

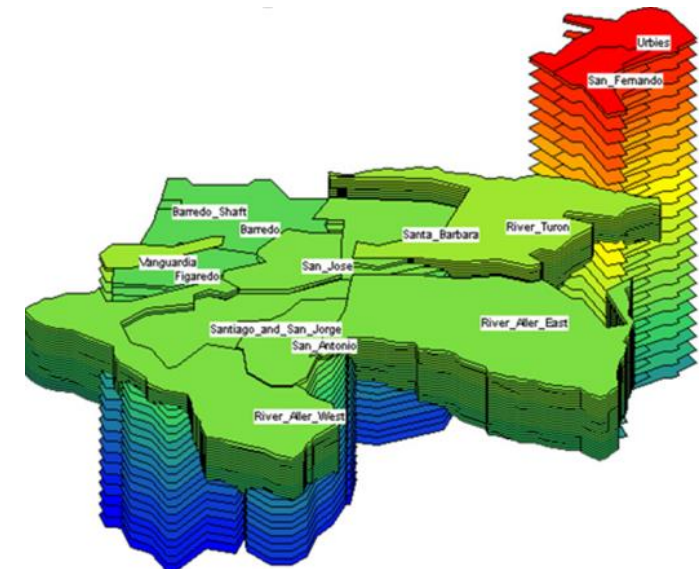
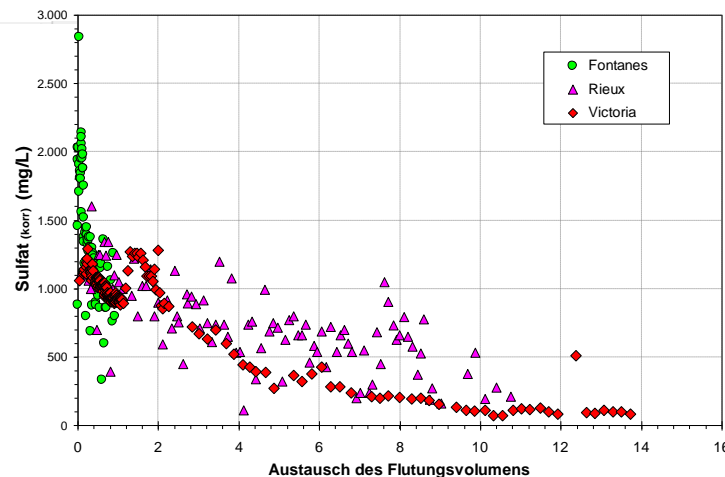
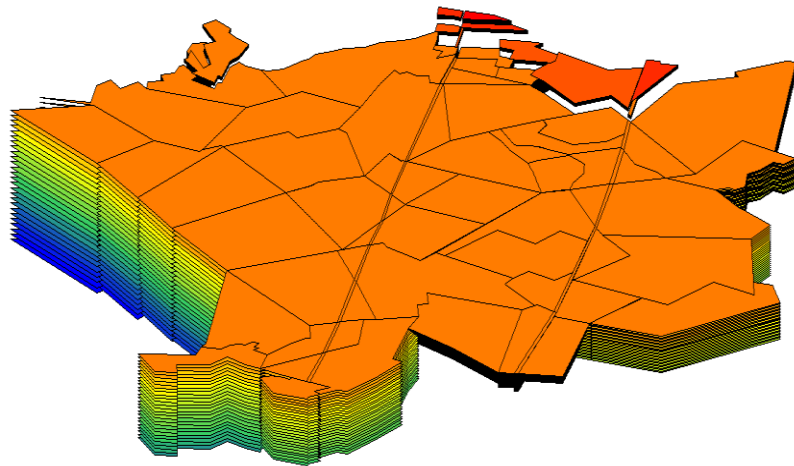
**Konzeptgruppe Wasser**

**Kories (DMT, Essen)**

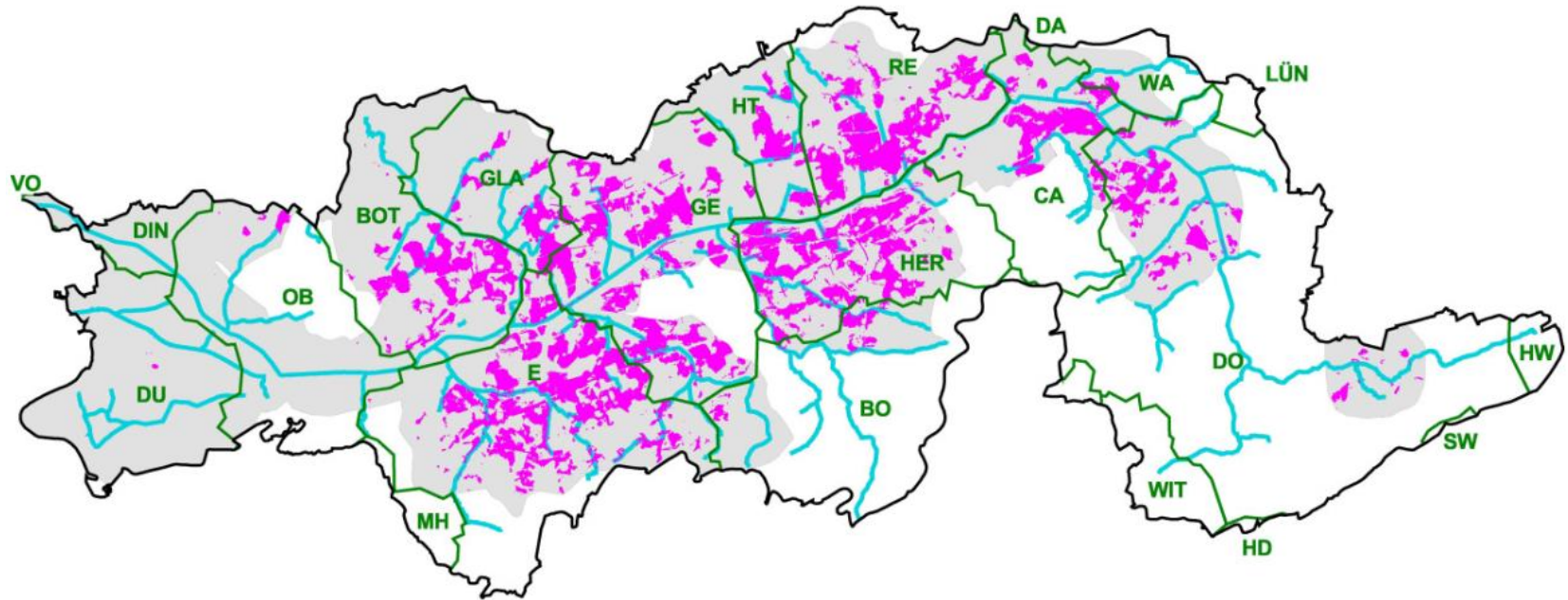
**Numerische Grubenwassermodellierung mit dem  
Programmsystem Boxmodell**

# Numerische Grubenwassermodellierung mit dem Programmsystem Boxmodell

- Konzepte für num. Grubenwassermodelle (Unterschiede zu Grundwassermodellen)
- Notwendige Feinheit der Diskretisierung
- Funktionalität
- Detailuntersuchungen zur Strömung und zu den Stoffquellen innerhalb eines Abbaubereichs
- Anwendungsbeispiele



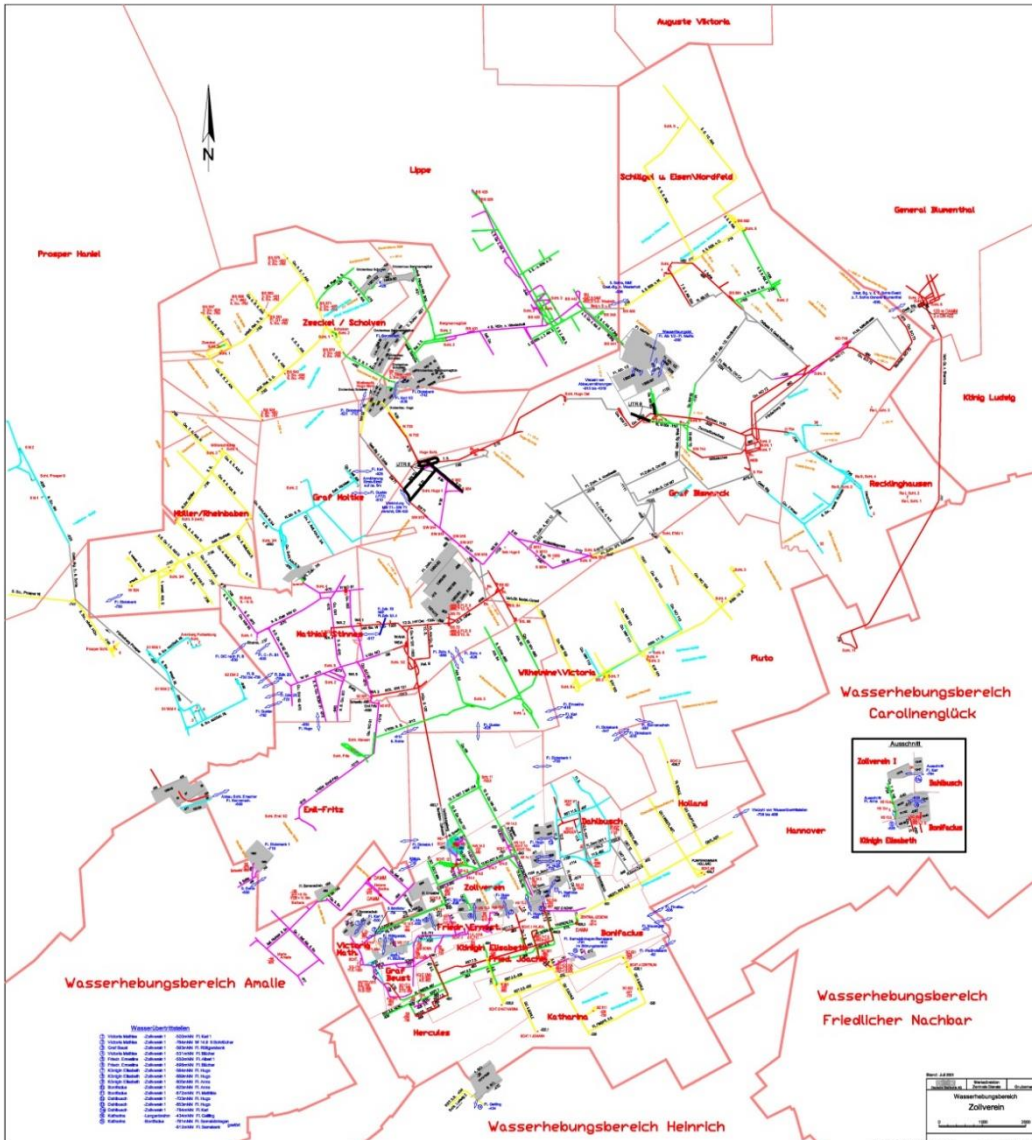
# Grund- und Grubenwassermodellierung für Bergbaureviere



- Grundwassermodellgebiete werden immer größer (>50 km<sup>2</sup>), große Flexibilität bei FE
- Modelle erreichen Größenordnungen von mehreren Millionen Knoten / Bilanzzellen
- Grubenwassermodelle naturgemäß häufig von besonders großer Fläche und vertikaler Erstreckung
- Zur Modellierung von Flutung und Stofftransport im Bergbau notwendig:
  - grobe, flexible Diskretisierung (Boxmodell, pond model) u. a. wg. Laufzeit
  - Abbildung der relevanten Stofftransport- und Geochemieprozesse

# Überblick Boxmodell

## Grubenwassermodell DMT



- Beispielhaft Zentraler Bereich des Ruhrgebiets mit Abbaubereichen und Strecken (nur tiefste Niveaus)

- Spezielle Anwendung für Bergwerke zur Beschreibung der Grubenwasserströmung, insbesondere der Flutung

- Aufteilung des Bergbaugesbietes in Elemente („Boxen“, 3d)

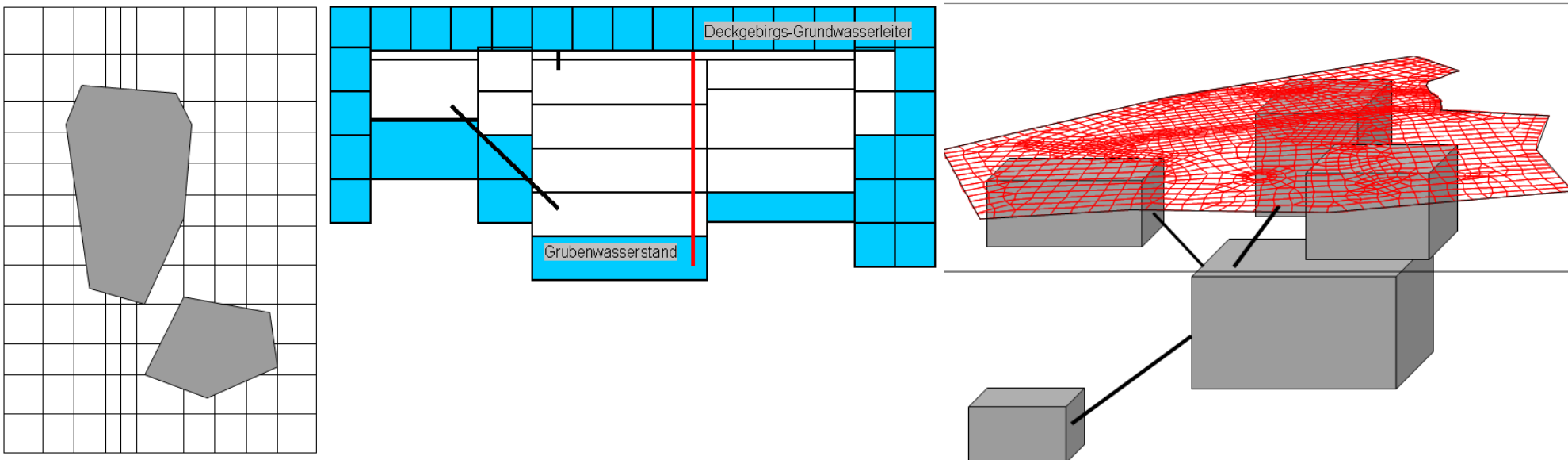
- Berücksichtigung Grubeninventar (Schächte, Strecken, Berge, Abbaue, Versatzräume, etc.) und Zuflüsse

- Innerhalb eines Elementes hydraulischer Kurzschluss (1 h), zwischen Elementen Wasserübertritte (Strecke, Abbau, Gebirge)



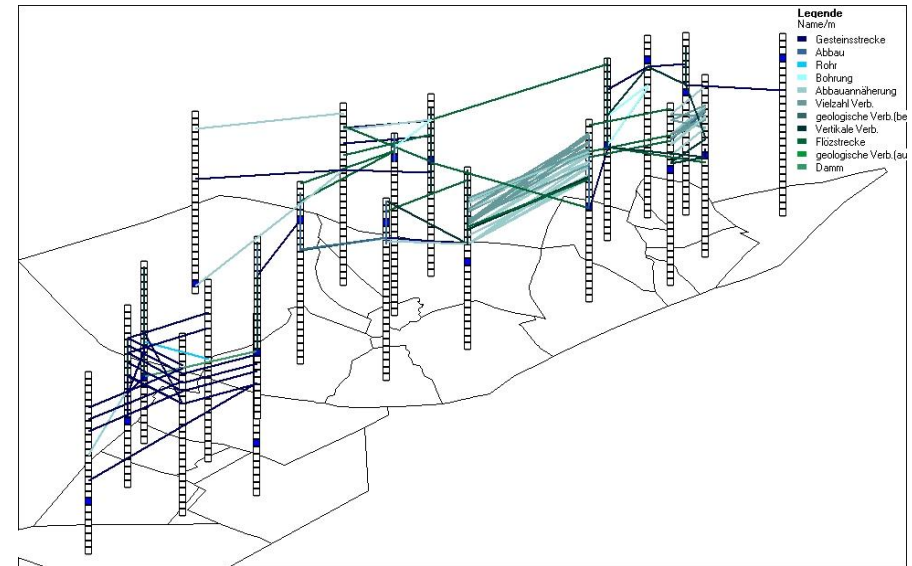
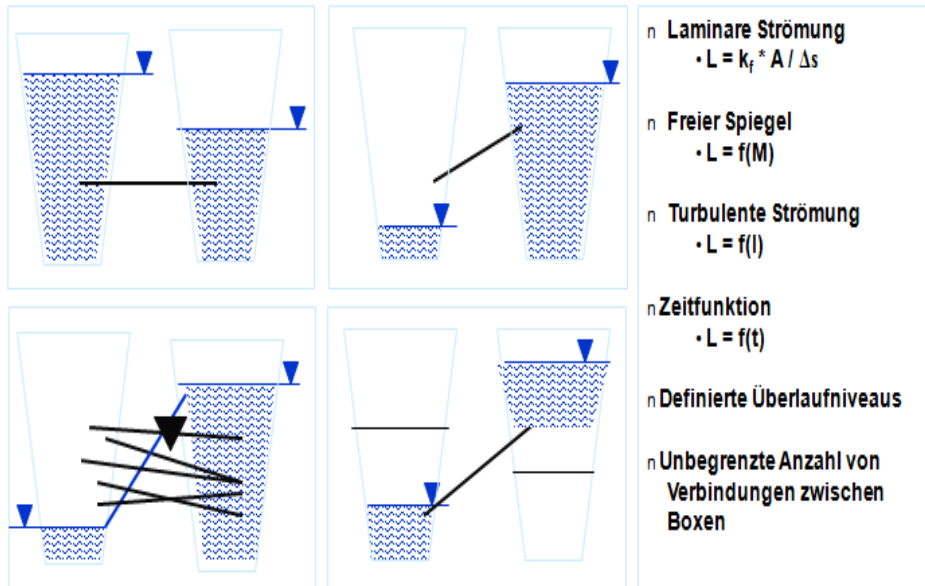
## Besonderheiten der Strömung in Bergbaurevieren

- Der größte Anteil des Wassers fließt über offene Systeme wie Strecken/Schächte.
- Innerhalb gut verbundener Systeme herrscht weitgehend hydraulischer Kurzschluss.
- Dadurch ergeben sich nahezu gleiche Grubenwasserstände im Streckensystem innerhalb eines Grubenfeldes (Definition von Element, 3-dimensional).
- Die hydraulisch wirksamen Verbindungen zwischen den Elementen sind zu definieren
- Der Speicherterm, das flutbare Hohlräumvolumen ist von großer Bedeutung für den Grubenwasseranstieg
- Grubenwasserqualitäten bei der Diskretisierung berücksichtigen, evtl. Verfeinerung.



# Besonderheiten der Strömung in Bergbaurevieren

- Definierte Überlaufpunkte
- z. T. turbulente Strömung
- Viele Verbindungen zwischen Grubenfeldern (Strecken, Bohrlöcher, Abbauannäherungen, etc.)
- Zeitlich veränderliche Strömungseigenschaften (Setzung, Konvergenz)



# Erläuterung zum Boxmodell

- 3D-Strömungs- und reaktives Stofftransportmodell (Finite-Volumen-Methode)
- Freie Strukturierbarkeit der Elemente (Boxen)
- Beschreibung der Strömung zwischen den Elementen über Verbindungen
  - Allgemeinste Darstellungsform: Leitwert [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] (Ableitung ., Kalib.)
  - Laminare/Turbulente Strömung (Manning-Strickler, Prandtl-Colebrook)
  - zeitabhängige Leitwerte (z. B. Streckenkonvergenz)
  - mächtigkeitsabhängige Leitwerte (z. B. Abbauannäherungen)
  - mehrere Verbindungen zwischen zwei Elementen
  - Statistische Methoden (für Prognosen)
- Übliche Randbedingungen (1. bis 3. Art)
- speicherwirksames Hohlraumvolumen, bergbauliches Resthohlraumvolumen
- Niveaugerechte Einbindung von Zuläufen, u. a. aus dem Deckgebirge
- Rückgang der Zulaufraten mit ansteigendem Grubenwasserstand
- Transport vieler chemischer Komponenten mit chem. Reaktionen
  - Eh-pH-Berechnung
  - Lösung/Fällung, Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht
  - Partikeltransport z. B. für PCB
- Wärmetransport

Zum Vergleich: GRAM von Younger (pond-modelling)

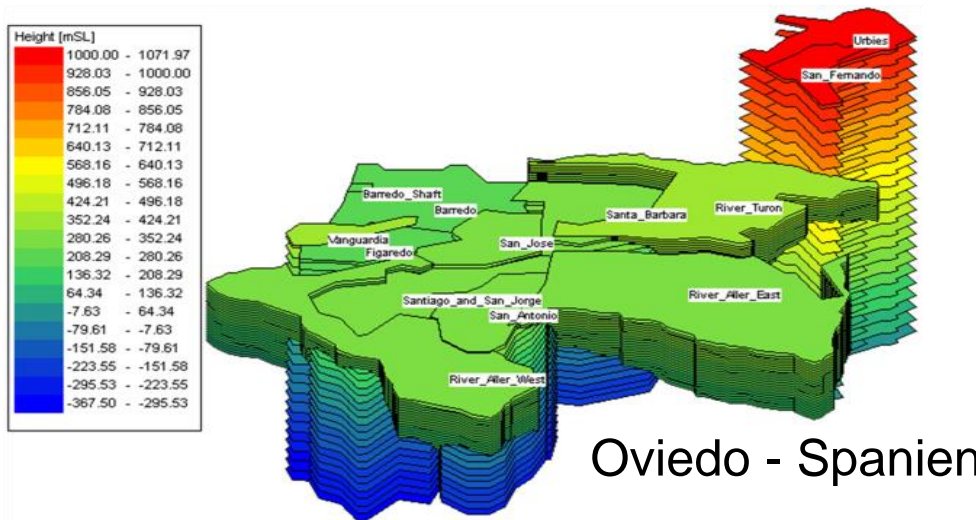


# Diskretisierungsbispiel Ruhrgebiet

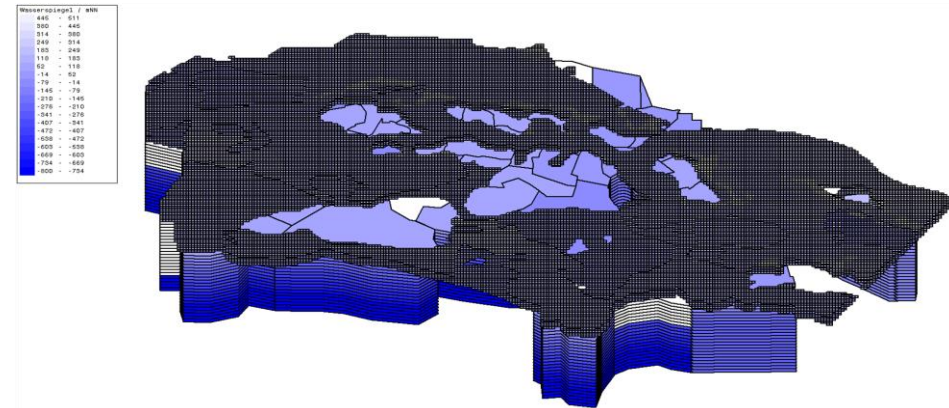




# Diskretisierungsbeispiele



Oviedo - Spanien



Oberschlesien – Polen

## Zusammenstellen und Digitalisieren der Modelldaten

Für die Grubenwassermodelle müssen die notwendigen Eingangsdaten wie Verbindungen zwischen den Grubenfeldern, Resthohlraumvolumina, Förderraten, Grubenwasserstandsmesswerte und eventuell Temperaturen und Qualitäten recherchiert und digitalisiert werden.

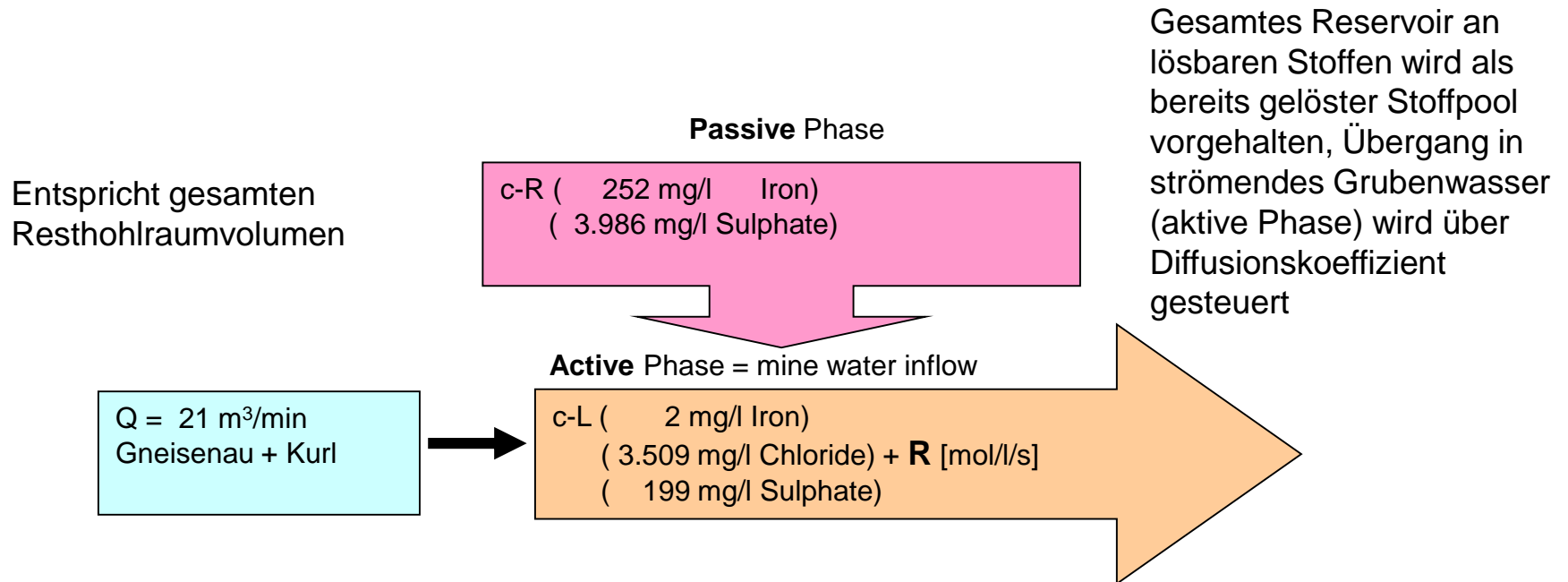
Insbesondere für die Reviere Ruhrgebiet, Saarland und Ibbenbüren wurde das mit großem Aufwand über Jahre betrieben.

# Stofftransport

Stoffeinträge: über Zuflüsse mit Konzentrationen

Stoffausträge: über Abflüsse (Wasserhaltungen, freie Ausläufe, etc.)

Stofffreisetzung: Unterteilung in aktive und passive Phase



**Boxmodell ist auch ein reaktives Stofftransportmodell**  
**Berechnung von Fällungen, mikrobiellem Abbau z. B. von Sulfat**  
**Wärmetransport, Wärmeleitung in das Gebirge**

# Modellkalibrierung: Nachrechnen des Wasserstammbaumes im aktiven Bergwerk



Herkunft		Wasserhebung Luisenthal					Provinz Reden incl. Göttelborn					Wasserhebung Viktoria
Herkunftsniveau	mNN	-467	-109	GWL	Berechnun	Analyse	-600	-300	GWL	Berechnun	Analyse	GWL
Beschreibung				Grundwasser		Luisenthal			Grundwasser		Reden	
Zulauf	L/min	250	100	210	560	560	447	2.148	19.005	21.600	21.600	3.410
Anteil Gesamt		44,6%	17,9%	37,5%			2,1%	9,9%	88,0%			
pH		6,20	6,50	7,20	6,44	7,56	6,70	6,20	7,00	6,81	7,60	6,70
EH	mV	150	170	130			130	150	150			16
T	°C	28,0	20,0	16,0	22,1	16,8	35,0	28,0	16,0	17,6	31,6	18,6
Elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	20.000	6.500	1.607	10.692	10.869	11.700	5.000	1.850	2.367	2.378	2.133
Natrium	mg/L	3.550	864	197	1.813	1.838	2.400	738	198	297	305	258
Kalium	mg/L	70	43	11,9	43,4	55	150	24	11	15,2	17	24
Calcium	mg/L	650	300	80	374	374	150	118	80	85	83	81
Magnesium	mg/L	500	200	44	275	273	230	150	60	72	74	118
Eisen	mg/L	2	0,00	0,77	1,2	0,64	3,00	2,00	0,77	0,9	0,4	0,90
Mangan	mg/L	1,4	0,60	0,9	1,07	1,1	1,00	0,50	0,4	0,42	0,45	0,80
Barium	mg/L	1	1,8	0,13	0,81	0,83	10,0	1,0	0,13	0,42	0,5	0,2
Strontium	mg/L	12	6,0	0,73	6,70	7	5,0	2,0	0,73	0,94	0,8	0,6
Ammonium	mg/L	8	6,0	0,07	4,67	4,8	20,0	8,0	0,3	1,47	1,6	1,0
Chlorid	mg/L	6.700	1.154	120	3.242	3.224	3.992	550	94	220	237	212
Schwefel als Sulfat	mg/L	600	700	250	487	499	0	700	180	228	235	316
Sulfid	mg/L				0	1,6	0,0		0	0,00	1,5	
Nitrat	mg/L	0	0	0	0,0	0	2	1	1	1,0	1,2	0
Nitrit	mg/L	0	0	0,02	0,01	0,07			0,02	0,02	0,1	0
Bromid	mg/L	50	20	8	29	49	45	10	2	3,7	4,2	3,8
HCO <sub>3</sub>	mg/L	1400	1.153	481	1011	1062	1.400	1.300	700	774	790	800
Summe	mg/L	13.494	4.429	1.187	7.260	7.339	8.363	3.595	1.326	1.698	1.746	1.812

von oben	Mehrere teufendifferenzierte Wasserqualitäten										Eine Qualität			Teufenzonen		Re										
	Ensdorf	Dilsburg	Provinz Camphausen			Camphausen	Lampennest	v. der Heydt	Luisenthal	Victoria	Provinz Reden	LI	LI	LI	LI											
203	4,85	1,40	1,800		1,154	2,80	0,92	2,200	2,45	0,68	0,12	0,09	0,23	0,18	0,56	0,21	1,600	3,41	2,57	2,150	21,60	19,005	1,850	6,96	0,76	
18																										
0																										
-10																										
-23	2,38	0,50	1,800																							
-46																										
-59																										
-100																										
-104																										
-109																										
-110																										
-120																										
-146																										
-159																										
-171																										
-174																										
-200																										
-246																										
-253																										
-253																										
-300																										
-350																										
-364																										
-400																										
-416	1,37	0,75	7,500																							
-467	0,55		14,000																							
-480																										
-486																										
-535	0,06		25,000																							
-599																										
-600																										
-657	0,02		84,000																							
Ges.-Zufluss	3,28	4,691		1,57		2,80	5,297		2,45		0,12		0,23		0,56	10,600		3,41		Provinz	21,60	2,367				

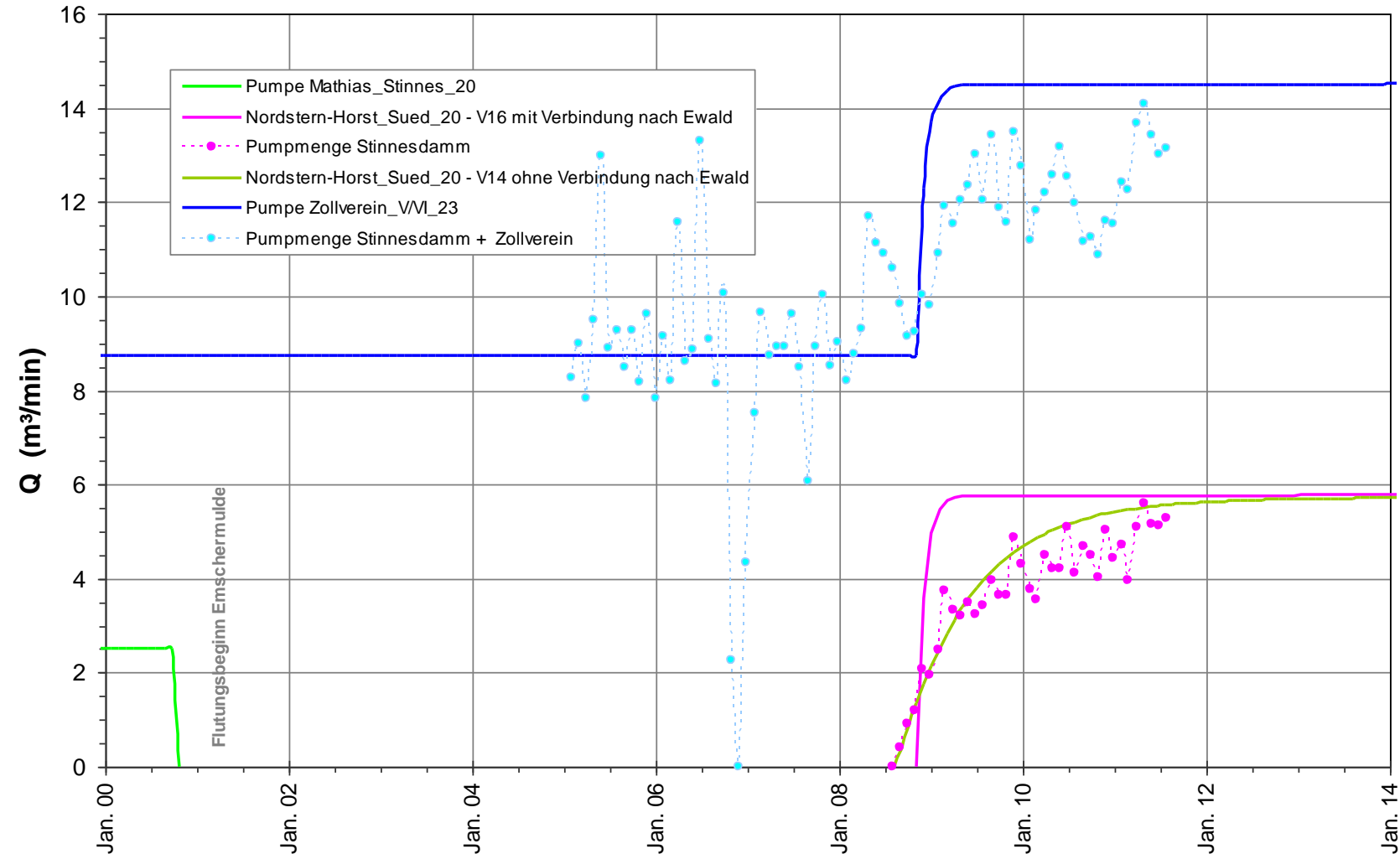




# Kalibrierung Grubenwassermodell

## Beispiel Zollverein/Zulauf Emschermulde

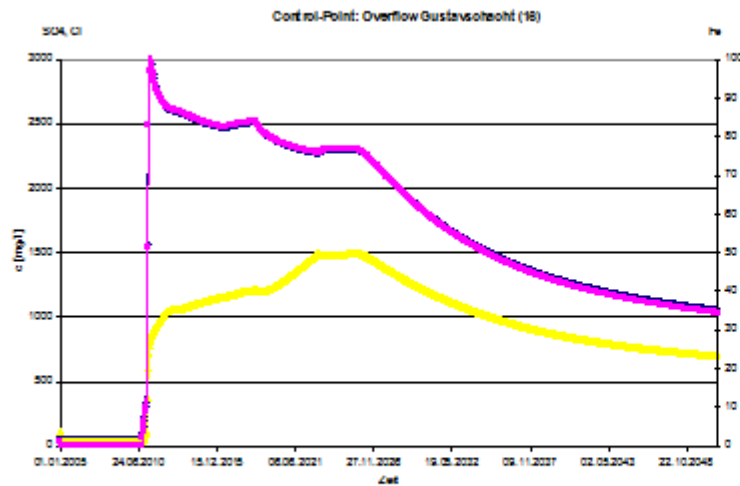
hier: Abgleich von gemessenen und berechneten Förderraten, Grubenwasserstände und Qualitäten analog



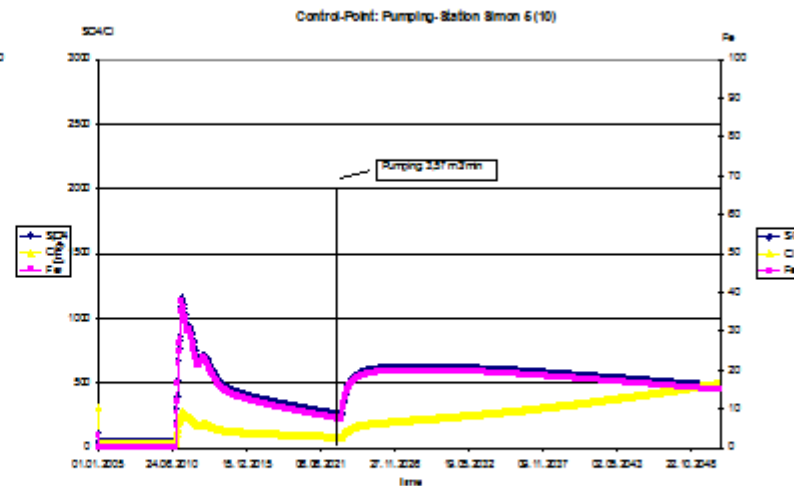
# Prognoserechnungen

## Beispiel: Flutungsprognose Lothringen

Konzentrationsentwicklung am Überlauf (Gustavschacht) bzw. an Wasserhaltung (Schacht Simon)



Tiefer Überlauf nach Deutschland



Dezentrale Wasserfassung in Frankreich

Blau: Sulfat  
 Gelb: Chlorid  
 Rot: Eisen

**Optional:**

**Verifikation des Modellierungsansatzes von Boxmodell durch Abgleich mit hochaufgelösten Finite-Elemente-Modellierungen sowohl für Strömung als auch Stofftransport am Beispiel Zollverein V/VI**

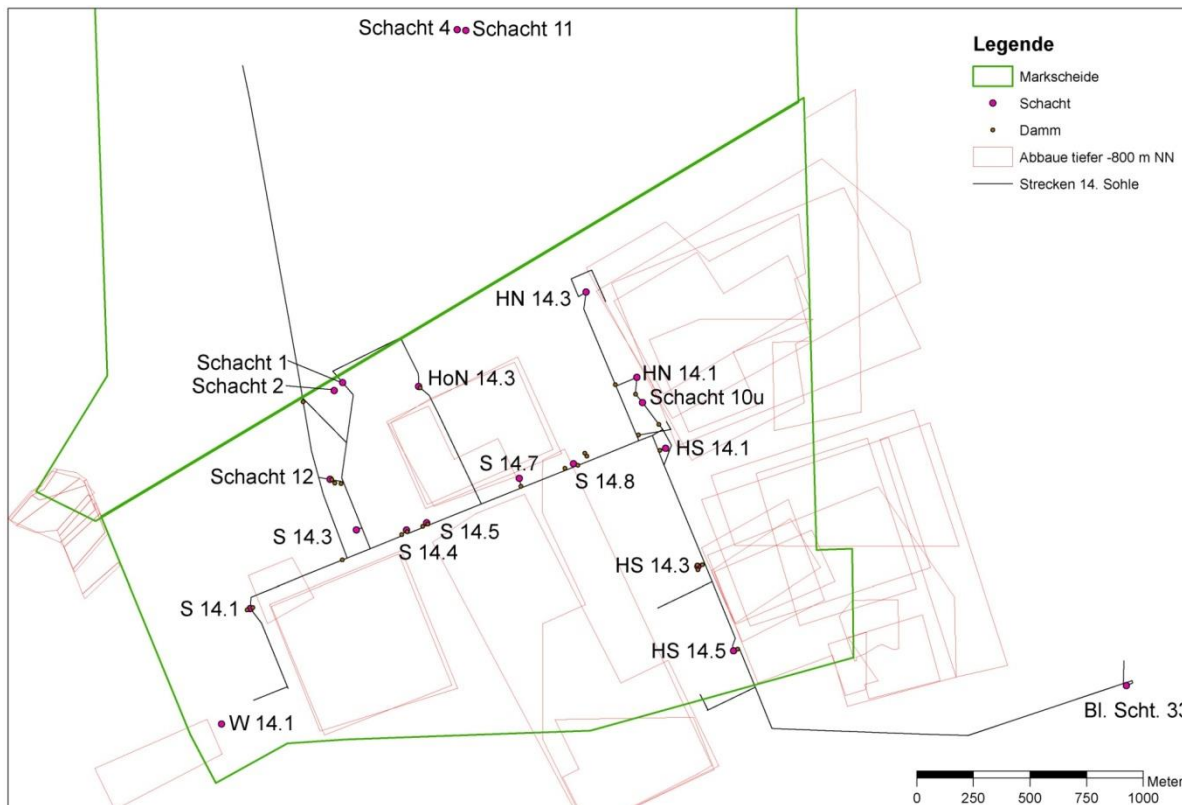


# Verifikation des Stofffreisetzungskonzeptes

## Einsatz von hochaufgelösten FE-Modellierungen

Abgleich des Modellkonzeptes mit detaillierter FE-Modellierung

besonderer Fokus: mögliche Ungenauigkeiten, Stoffquellen  
 repräsentativer Abbaubereich im Ruhrgebiet mit Wasserhaltung  
 Unterlagen zur bergbaulichen Situation ausgewertet



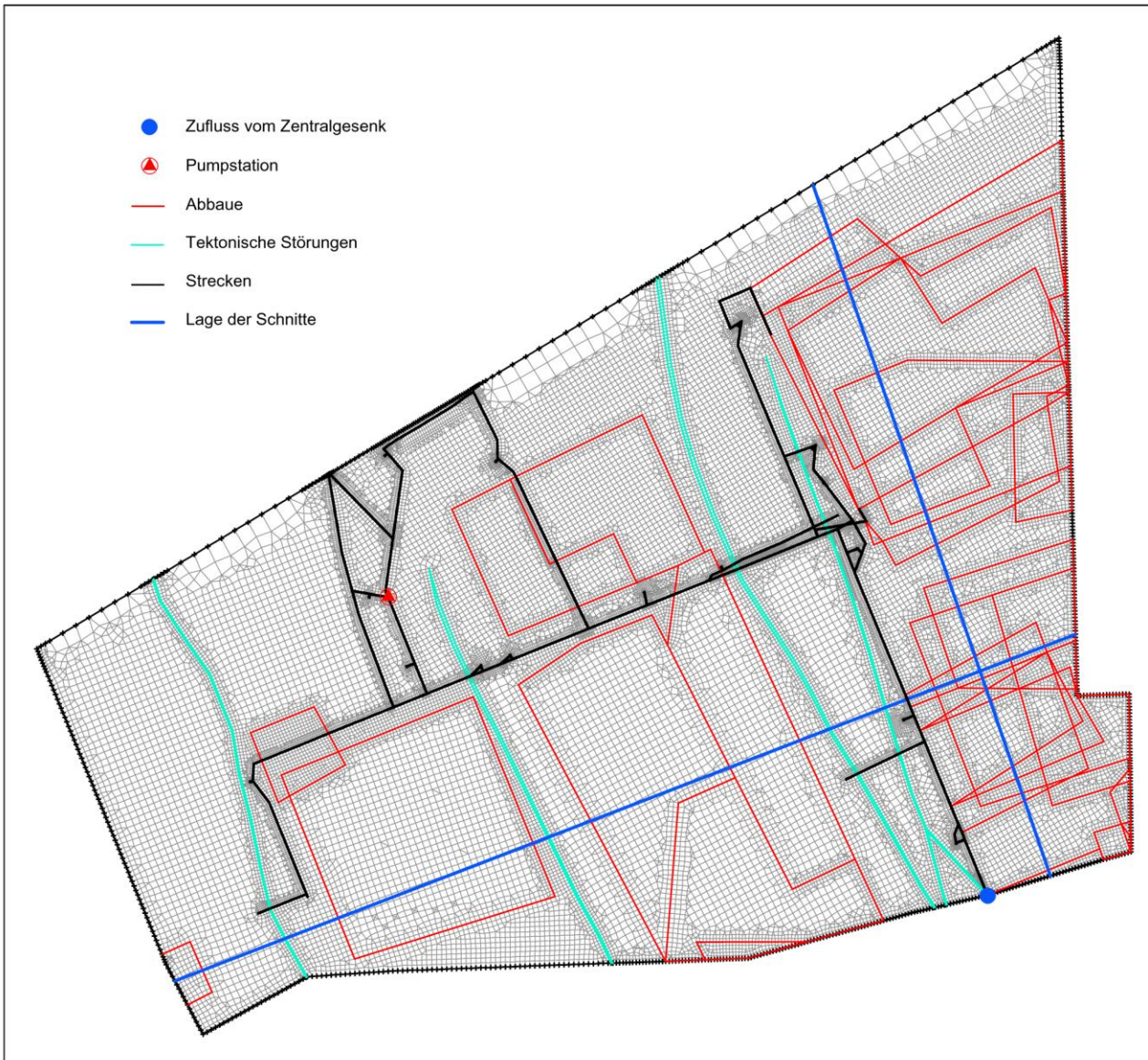
Vor längerer Zeit Teilflutung bis unterste Sohle

Hauptzufluss aus Südosten

Modellgebietsgröße ~5,7 km<sup>2</sup>  
 ca. 360 m mächtig,  
 bis ca. -1100 m NN

1 horizontales Element,  
 7 Schichten  
 im Boxmodell,

# Diskretisierung



ca. 45000 horizontale Knoten  
35 Knotenschichten

Parameterfestlegung  
entsprechend Unterlagen und  
vorliegenden Erkenntnissen  
Bsp: kf Gebirge  $\sim 1 \cdot 10^{-9}$  m/s  
kf Abbaue  $\sim 1 \cdot 10^{-5}$  m/s

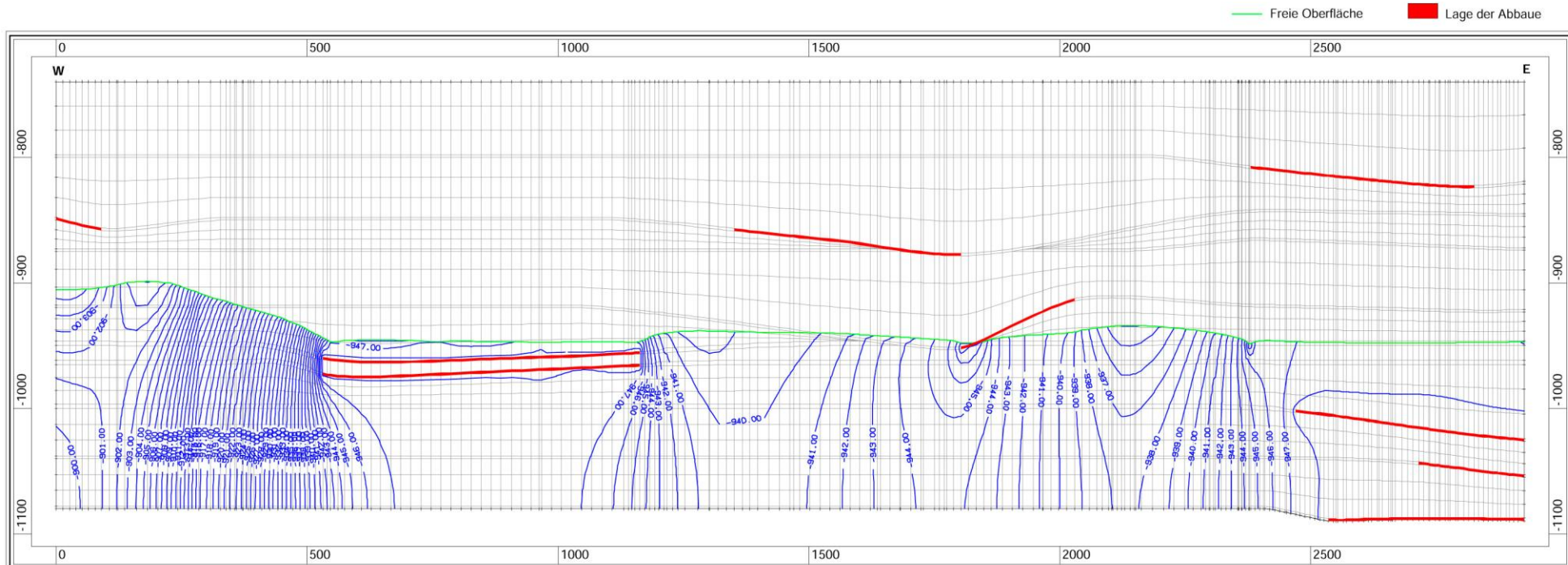
# West-Ost-Schnitt durch Modell, aktueller Zustand

Gebirge teilweise gesättigt

Flutungsrechnungen (Teilflutung um 200 m, ca. 2 Jahre)

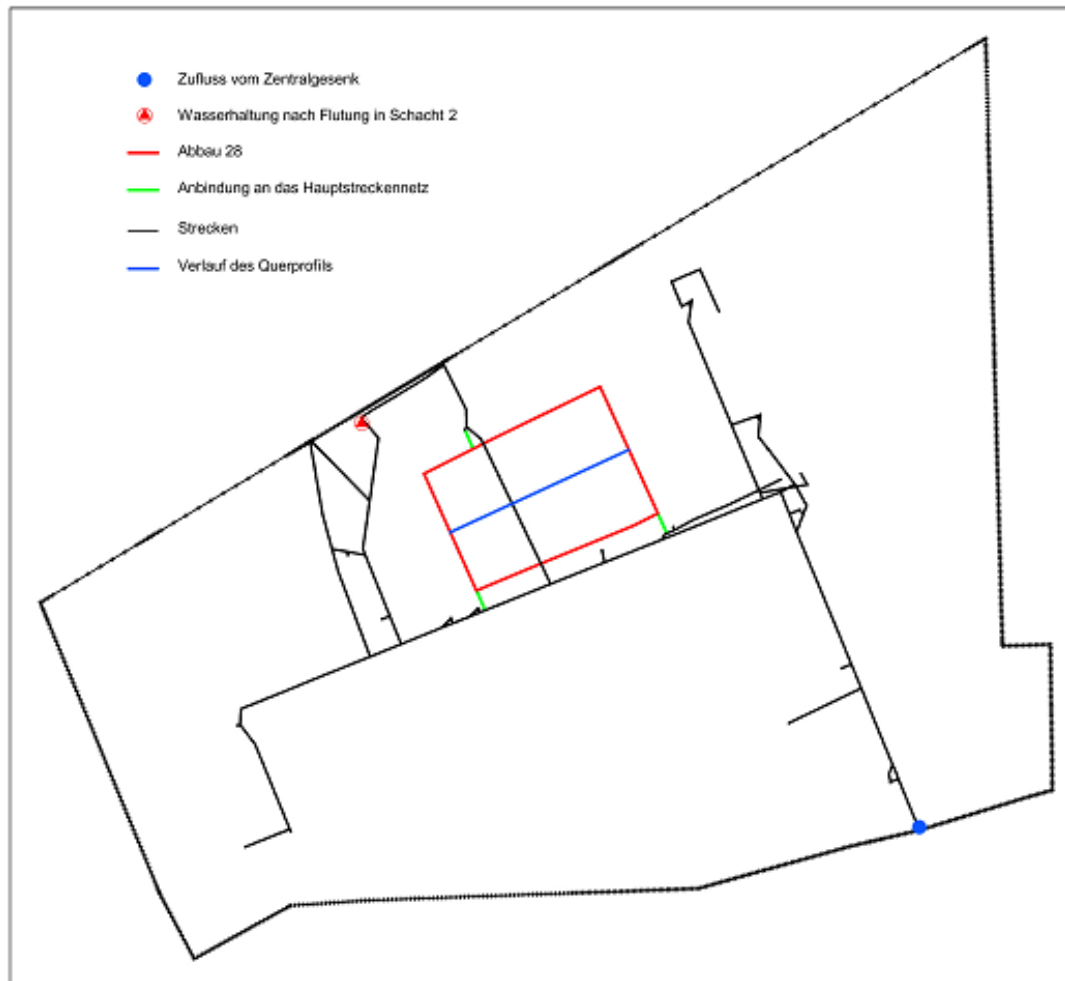
Parametervariationen

guter Abgleich mit Boxmodell





# Besonderer Fokus: Stoffquellen, insbesondere aus der Pyritoxidation Erste Flutungswässer zeigen hohe Stoffbeladungen



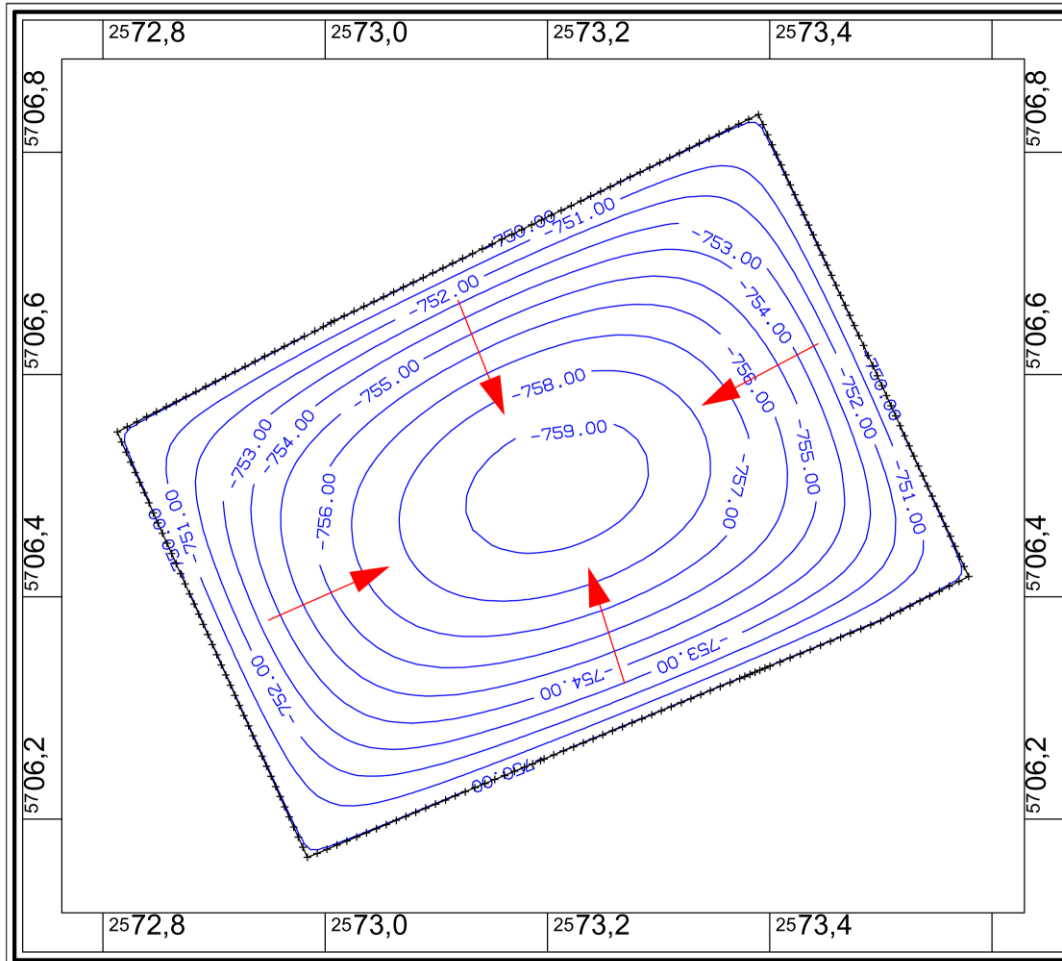
Ausgeschnittenes Teilmodell  
Abbau 28 (Fläche 0,3 km<sup>3</sup>)  
zur Analyse der Vorstellungen  
über **Stoffquellen**  
(früher im Wesentlichen  
alte Abbaue vermutet)

Stofftransportberechnungen (Sulfat)

Übernahme der RB aus  
Gesamtmodell

# Strömungssituation im Abbau

## 2 Jahre nach Beginn der Flutung



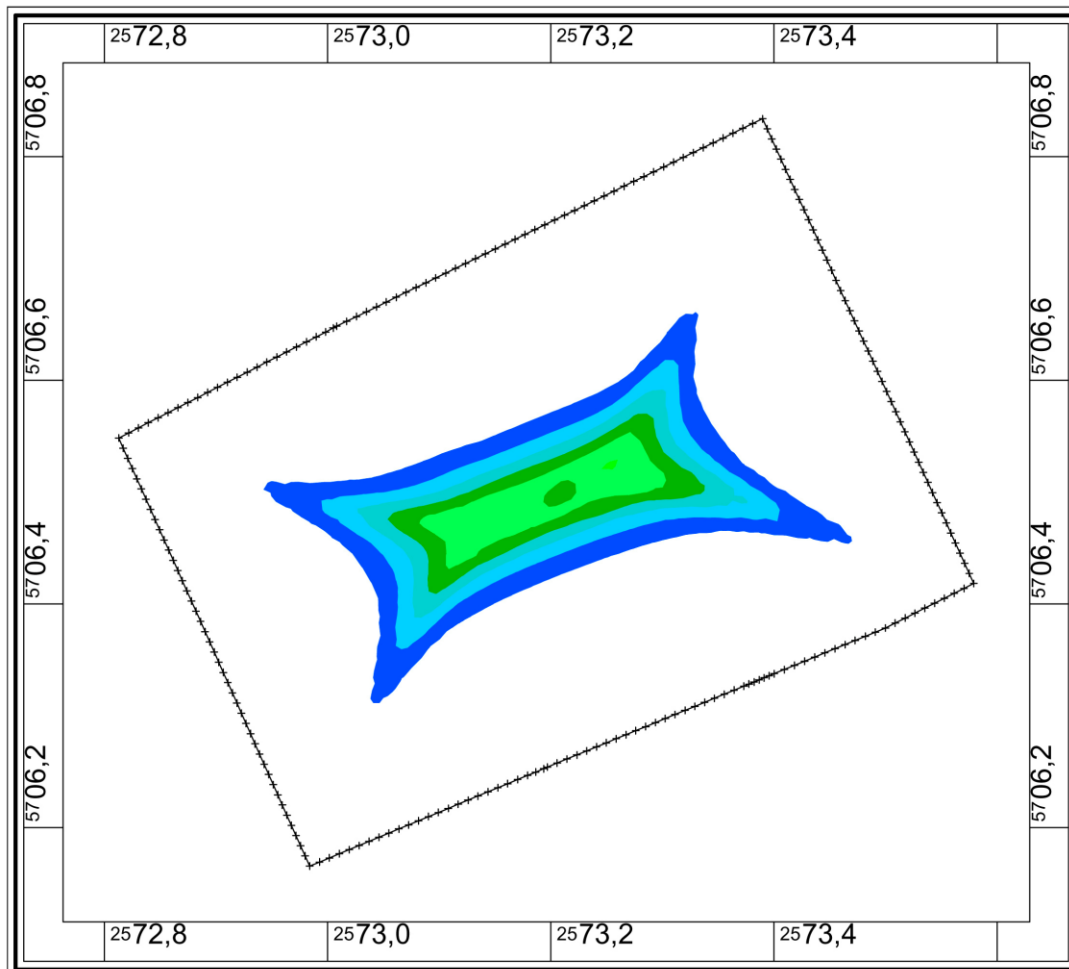
Abbaubegleitstrecken und  
Abbaurandzwickel wirken wie  
hydraulischer Käfig

hydraulische Gradienten über lange  
Zeiträume nach Flutung nach innen  
gerichtet

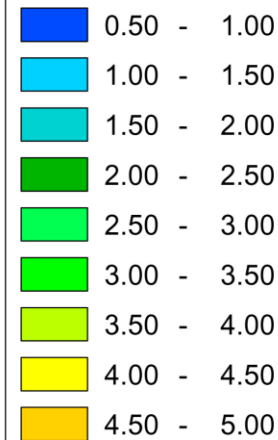
# Sulfatkonzentration im Abbau 3,5 Jahre nach Beginn der Flutung

Nach Volllaufen des Abbaus  
(nach ca. 5 Monaten)  
Aufkonzentrierung des  
Grubenwassers im Abbau auf 5 g/l

kein Stoffaustrag in Streckensystem  
über viele Jahre erkennbar



Konzentrationen (g/l)



# Sulfatkonzentration im Abbau ca. 2 Jahre nach Beginn der Flutung

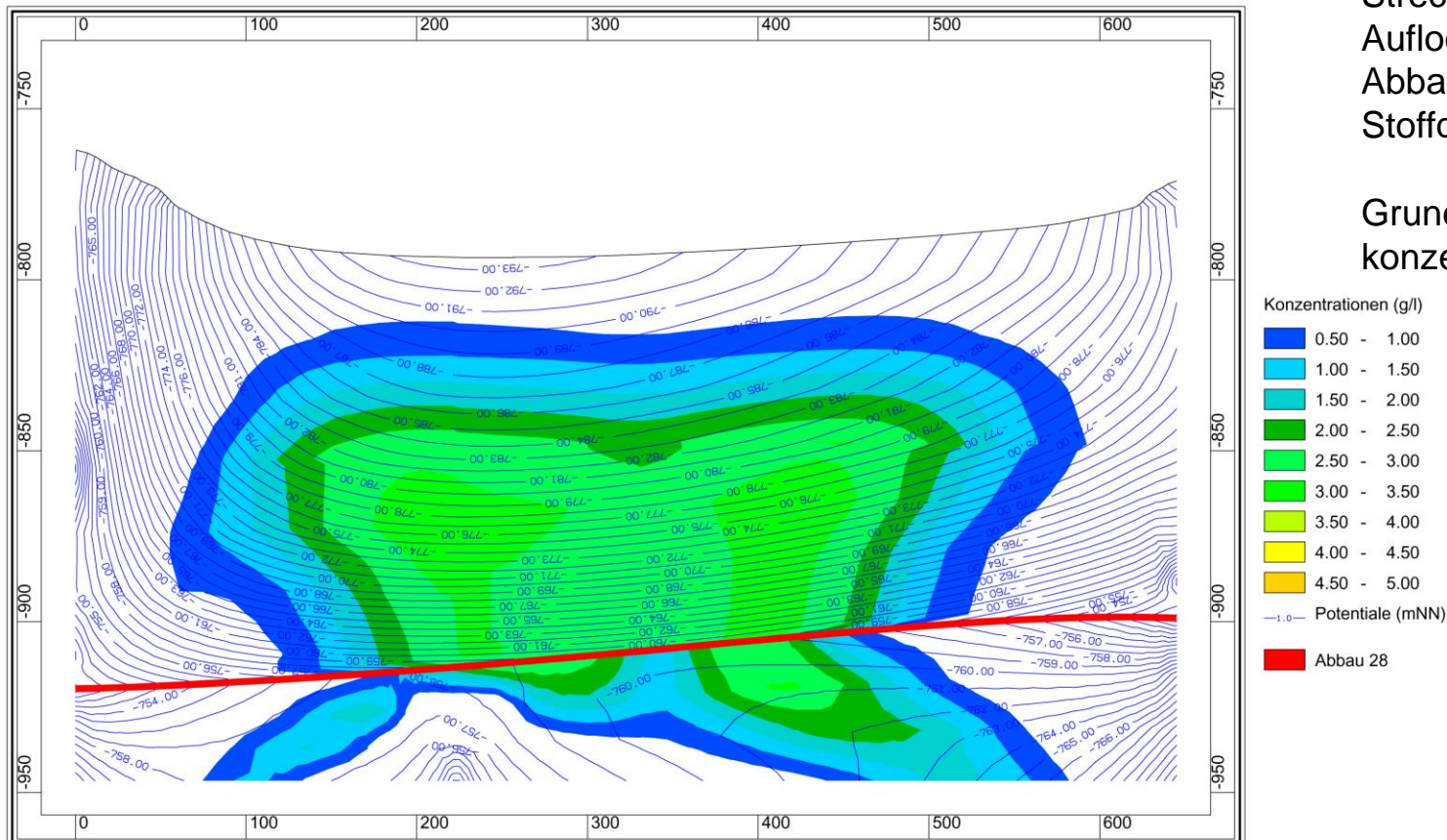
Stofffracht wird in das Hangende und Liegende des Abbaus gedrückt, Flutungswasserstand überholt Grundwasserstände im Gebirge

Fazit:

Abbaue fallen als Stoffquellen weitgehend aus  
Strömung fokussiert sich auf Hauptdurchleitungssystem

Streckenwandungen, Auflockerungsbereiche und Abbaurandbereiche nur als Stoffquellen möglich

Grundlage des Stofffreisetzungskonzepts im Boxmodell





**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**