



# Flutungsmodellierung von untertägigen Steinkohlebergwerken mit finiter-Elemente Methode

Timo Kessler, Maria-Theresia Schafmeister

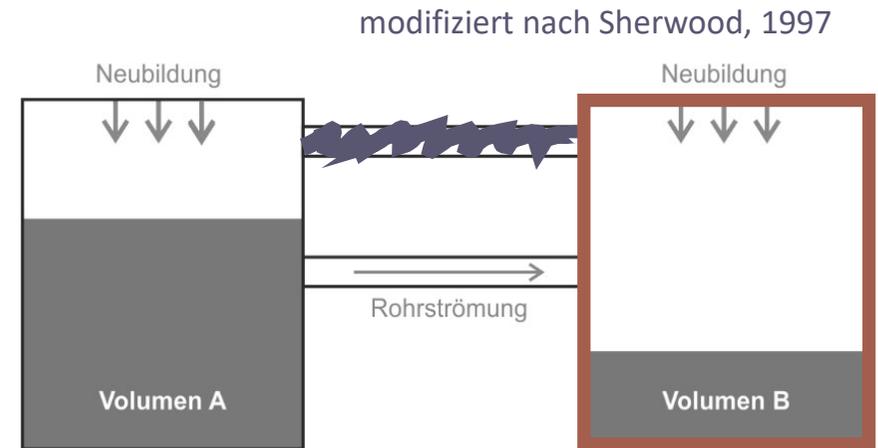
Grubenwassertagung Kassel23

18. Oktober 2023

# 1. Bestehende Modellansätze

Pond-and-pipe Ansatz  
(häufig verwirklicht als BoxModell 3D, GRAM o.ä.)

- *grobe Finite-Volumenmodelle, die das Grundwasser über das Resthohlraumvolumen bilanzieren*
- *Modellvolumina sind unabhängig von der Geometrie des Grubengebäudes, sondern werden nach hydraulischen Einheiten definiert*
- *Strömungsfunktionen werden an Wasserübertrittsstellen zwischen den Volumina definiert (Strömungstyp,  $k_f$ -Wert, Porosität, leakage Faktor)*
- *Modellkalibrierung anhand von internen Wasserübertritten und Entnahmeraten (Pumpen, Wasseraustritte)*



Volumen  
(RHV)



# 1. Bestehende Modellansätze

## Vorteile

- äußerst recheneffizient, große Gebiete modellierbar
- einfache Methode um Grubenflutungen und Schadstofffrachten (breakthrough curves) zu berechnen

## Einschränkungen

- beschränkte Aussagen über den Grundwasseranstieg im Nebengestein möglich, kein Abbild der Hydrodynamik im Untergrund, insbesondere in den Grubenhohlräumen
- Vernachlässigung von Strömung aufgrund variabler Druckpotentiale
- Basis der Berechnung ist das Resthohlraumvolumen  
→ große Unsicherheiten von bis zu 30 %

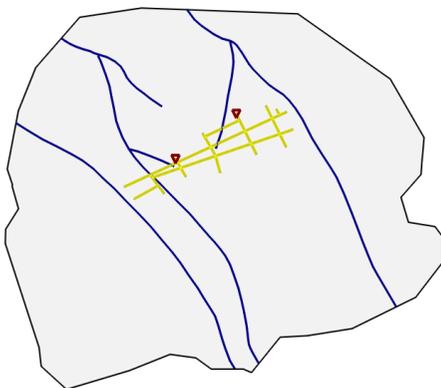
# 1. Alternativer Modellansatz

## Finite-Elemente Modelle

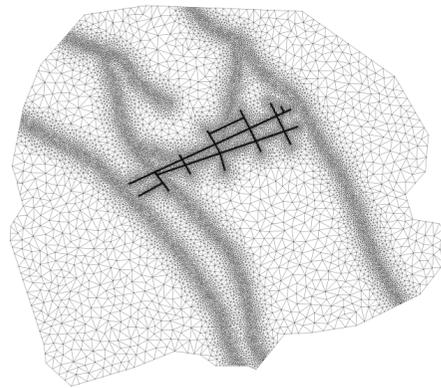
(z.B. mit Spring, FEFLOW, Multiphysics, o.ä.)

- *Räumliche Diskretisierung: parametrisierte Modellzellen (= Nebengestein, Hohlraum, Verbruch, Klüfte)*
- *Berechnung der Grundwasserpotentiale (an allen Knoten)*
- *Kalibrieren mittels Druckverteilung, Wiederanstiegskurven, Förderraten*

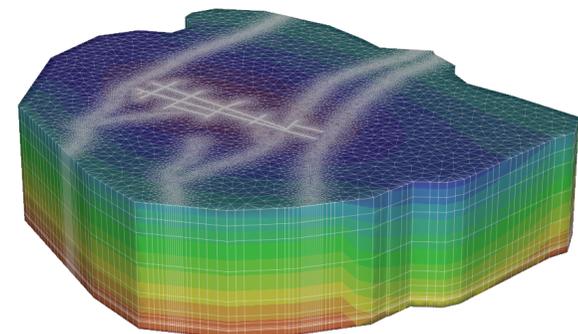
Kontinuum



diskretisiertes Modell

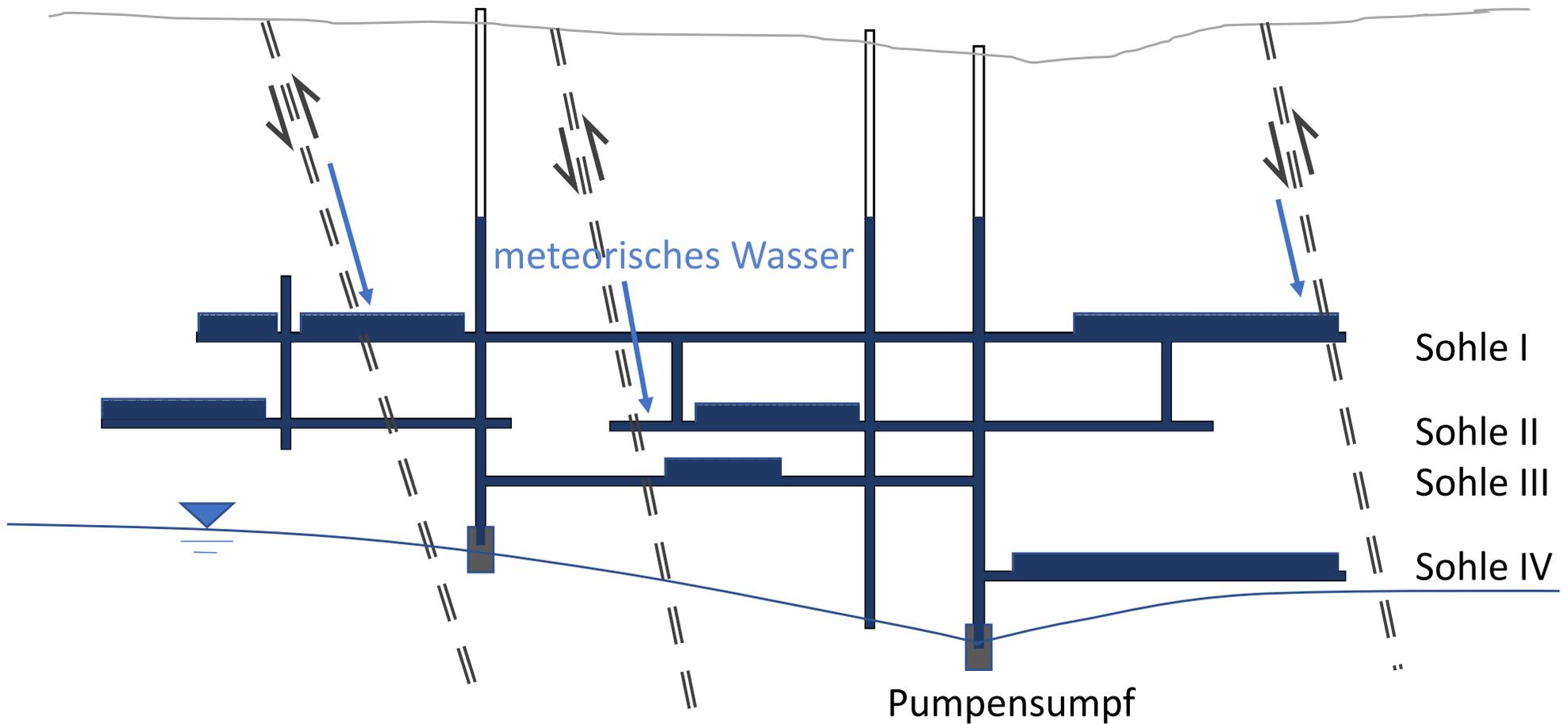


3D Druckverteilung





## 2. Konzeptionelle Modellvorstellung



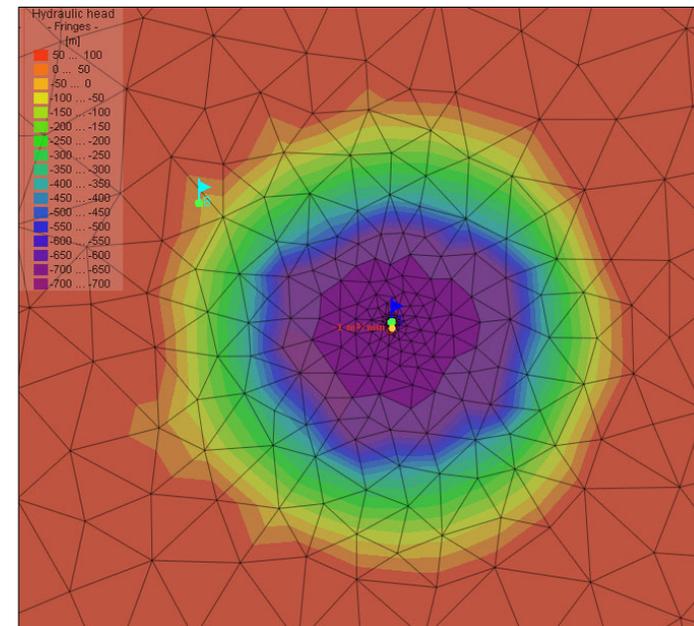
## 2. Wasseranstieg Grubengebäude



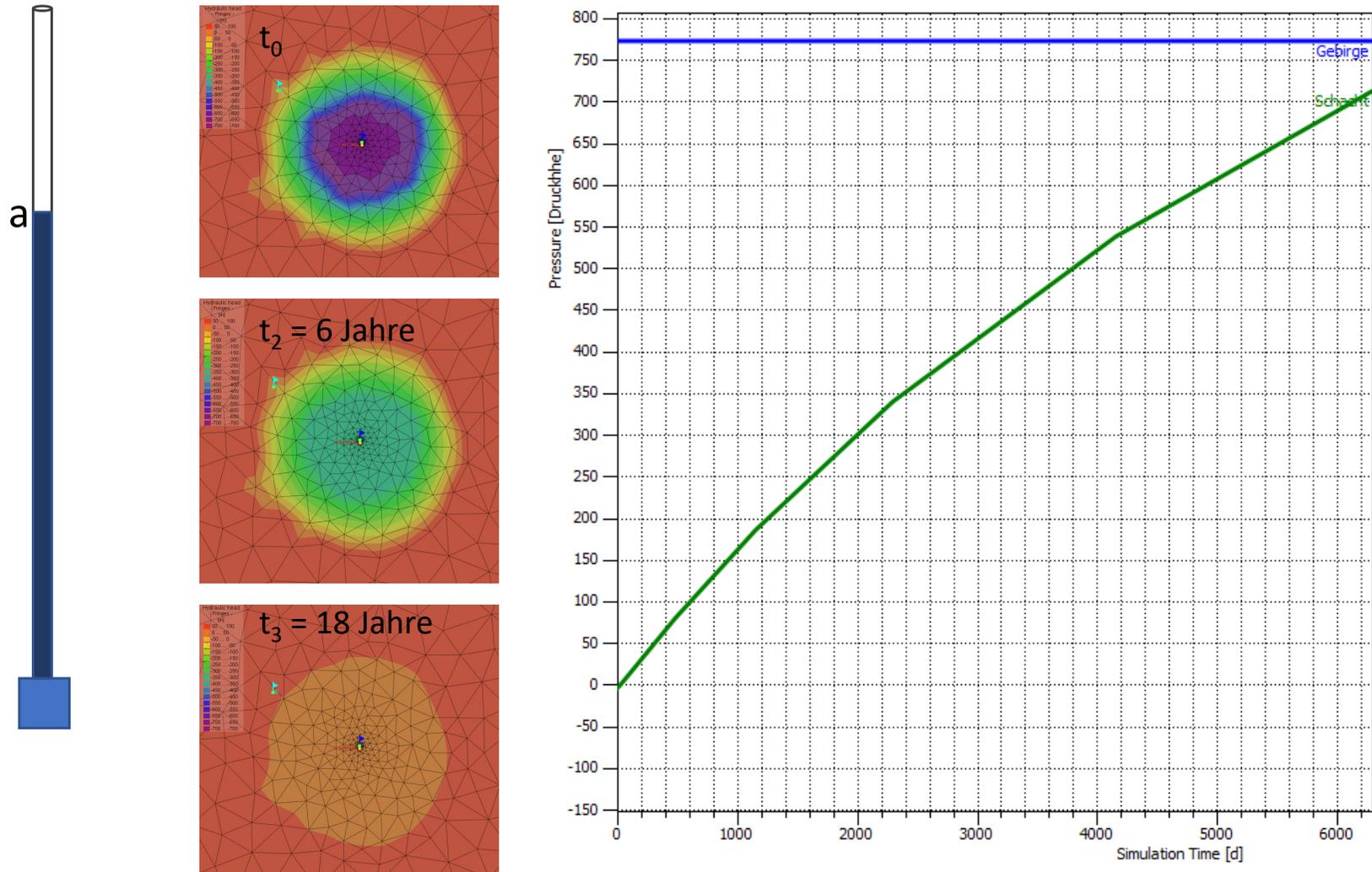
- Schacht wird initial leer gepumpt
- Schachtberandung a ist undurchlässig
- Wiederanstieg nach Pumpenstop



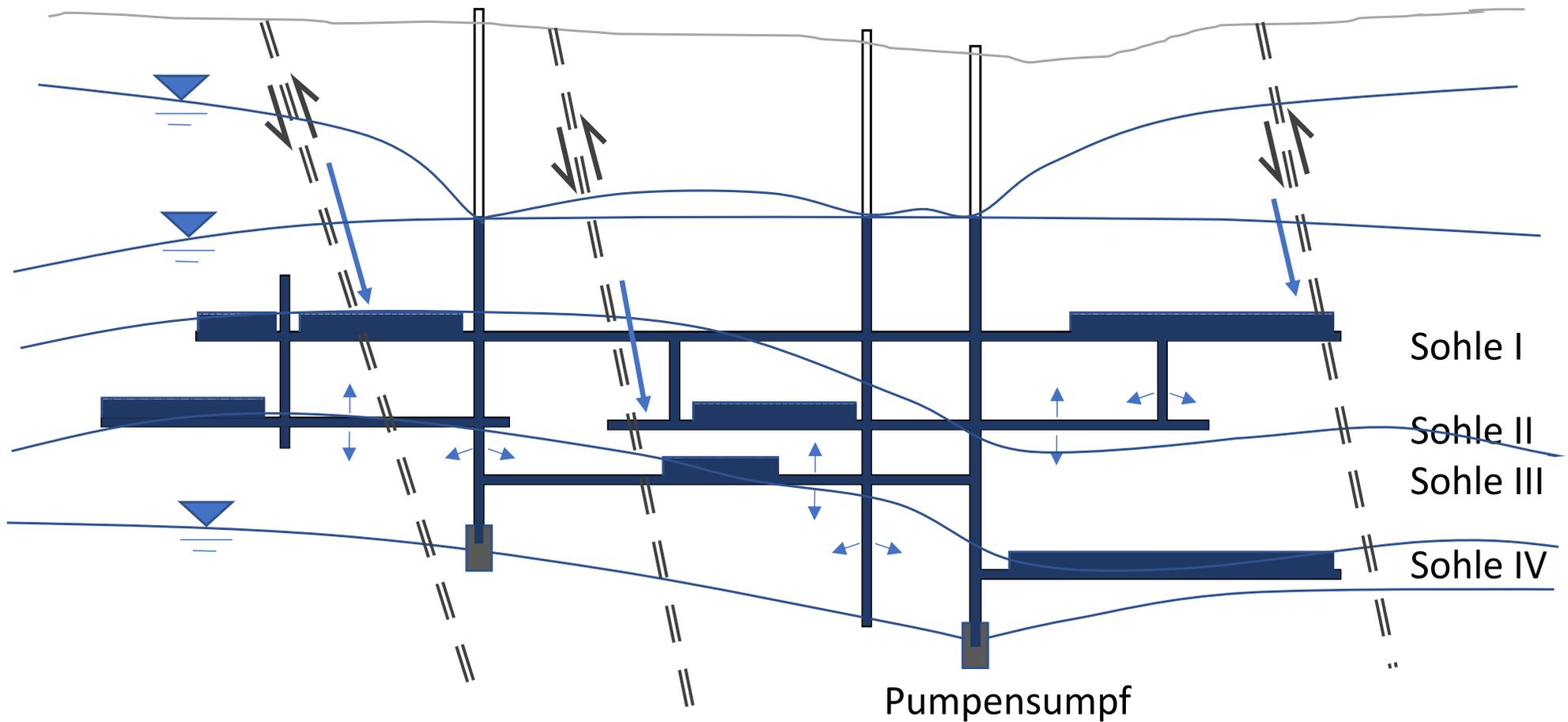
**Umsetzung mit hydr.  
Durchlässigkeiten**



## 2. Wasseranstieg Grubengebäude



## 2. Konzeptionelle Modellvorstellung

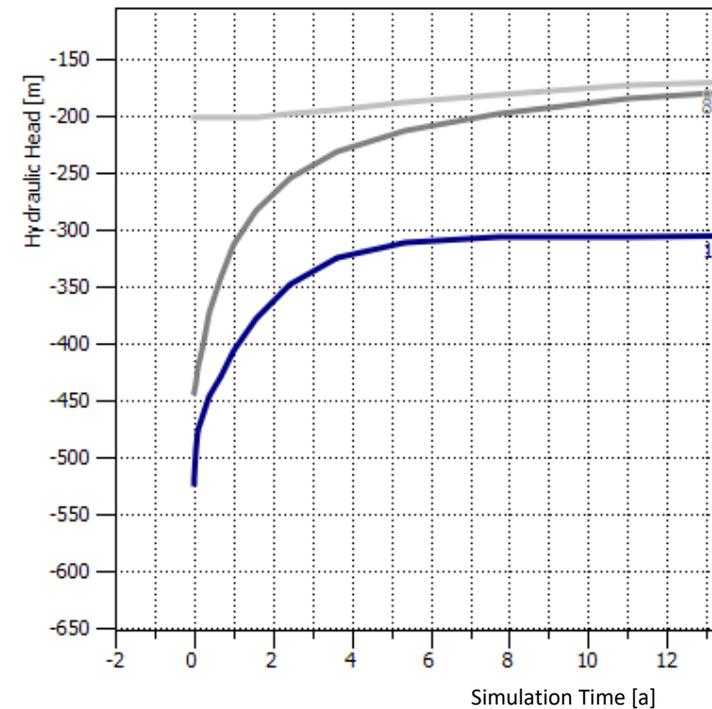
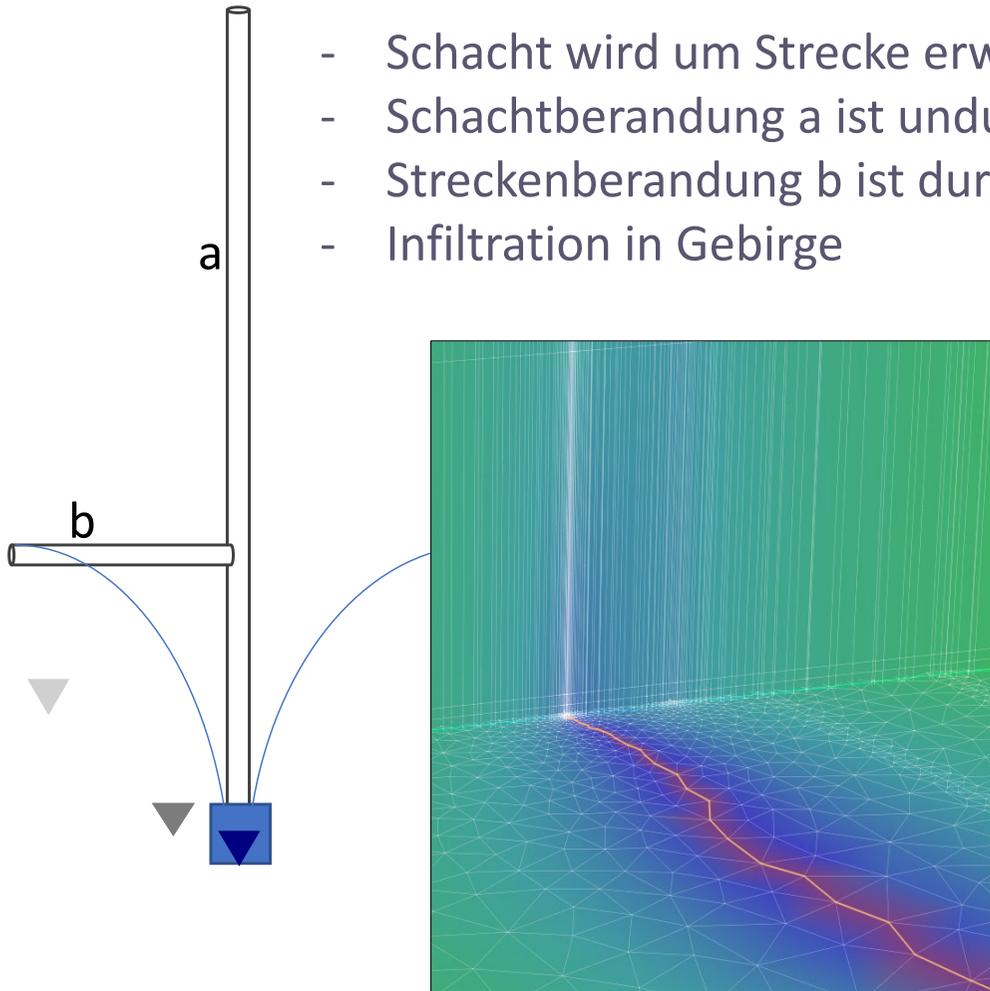


## 2. Wasseranstieg im Gebirge

- Schacht wird um Strecke erweitert
- Schachtberandung a ist undurchlässig
- Streckenberandung b ist durchlässig
- Infiltration in Gebirge



**Umsetzung mit  
diskreten Strukturen**

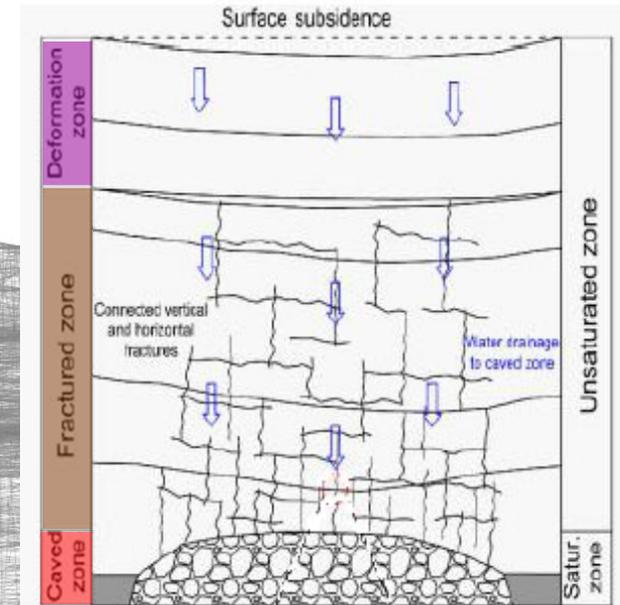
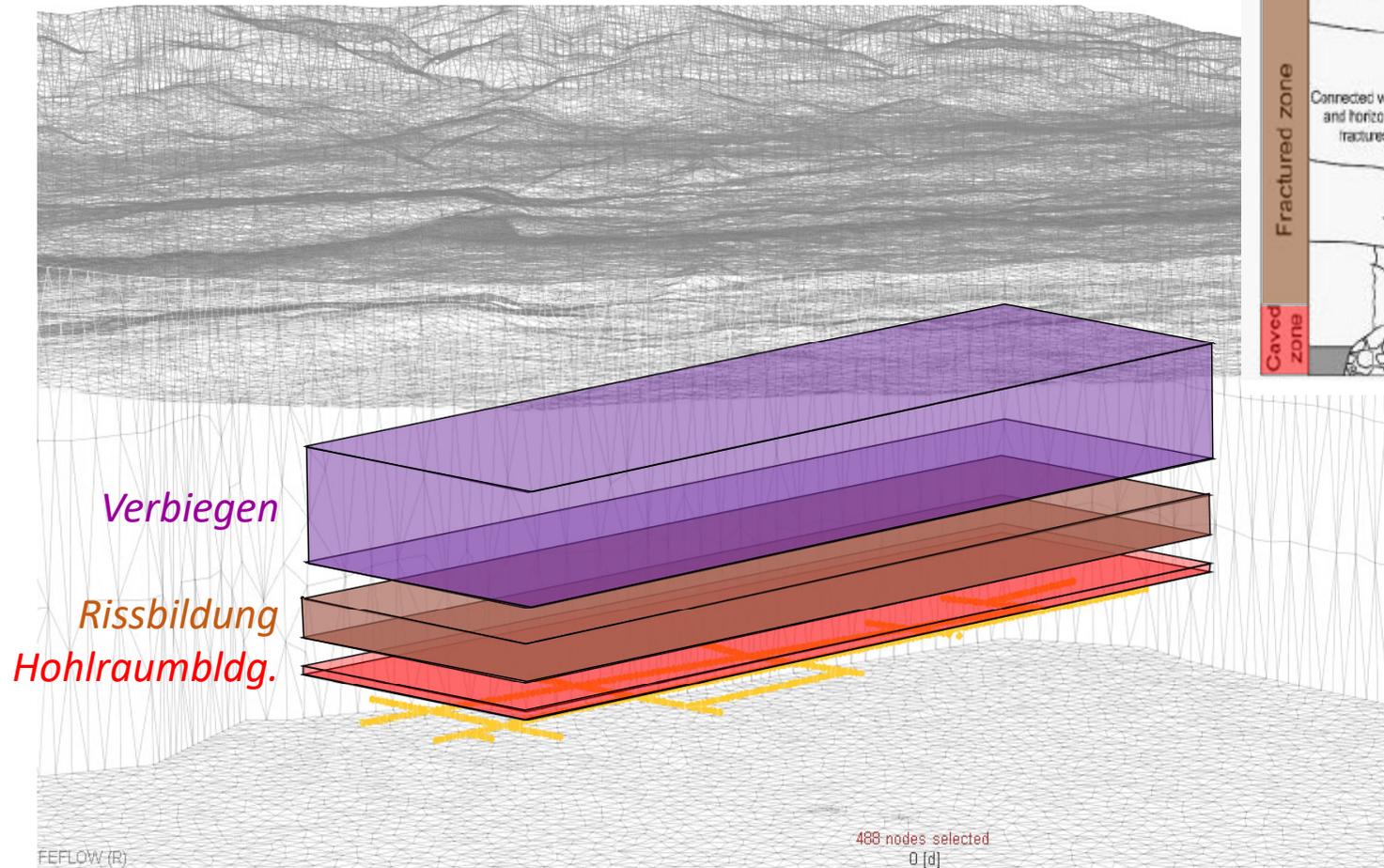




## 2. Strömungspfade

1. Schächte → *Umsetzung als isolierte Hohlräume*
  2. Strecken und Stollen → *Umsetzung als diskrete Strukturen*
  3. Poröses Medium im Umgebungsgestein
  4. Tektonische Störungen → *Umsetzung mittels diskreter Strukturen oder spezifischer Materialeigenschaften*
  5. Geklüftetes Gebirge (typischerweise im Hangenden von Abbauen)  
→ *Umsetzung mit äquivalenten Durchlässigkeiten*
- } Nicht (schwer) kombinierbar

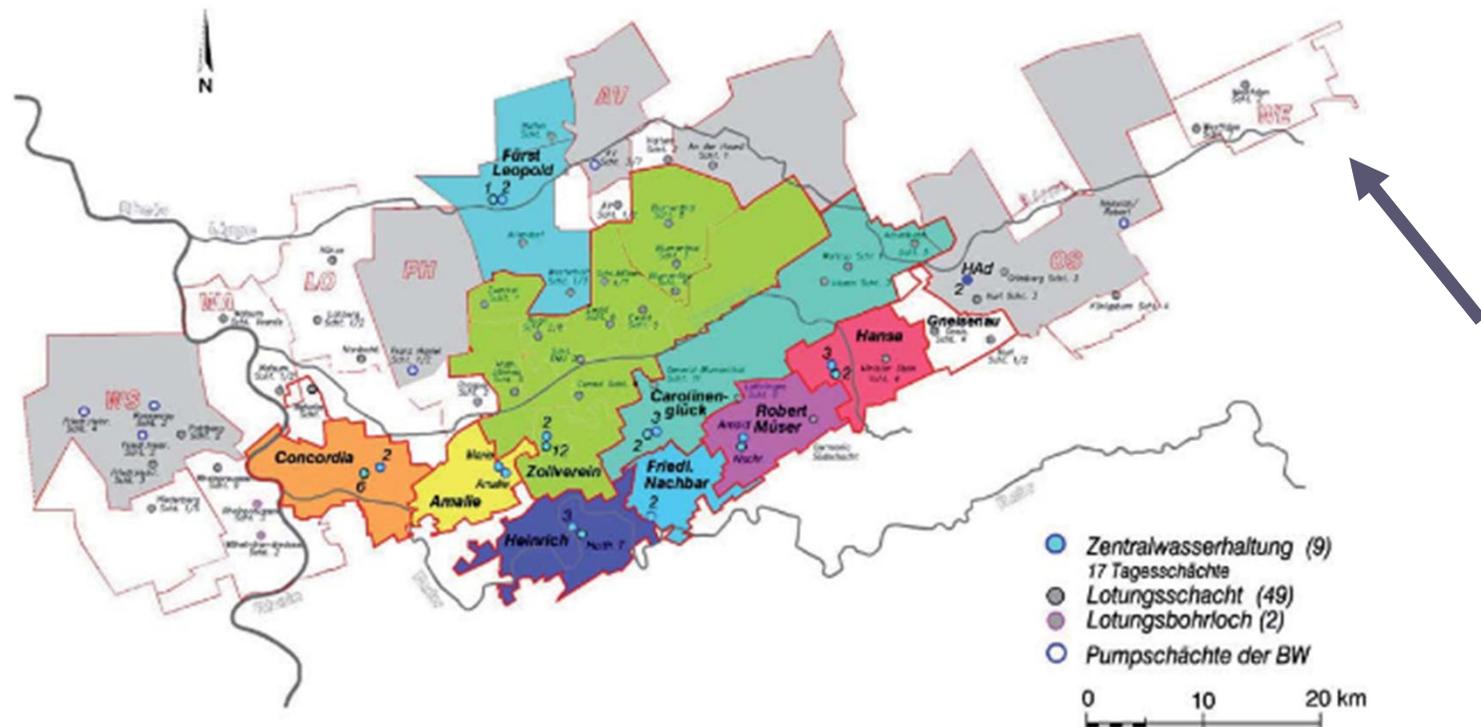
## 2. Abstraktion – 3 hydr. Zonen



Ma et al., 2016

## 3. Modellerstellung Bergwerk Westfalen

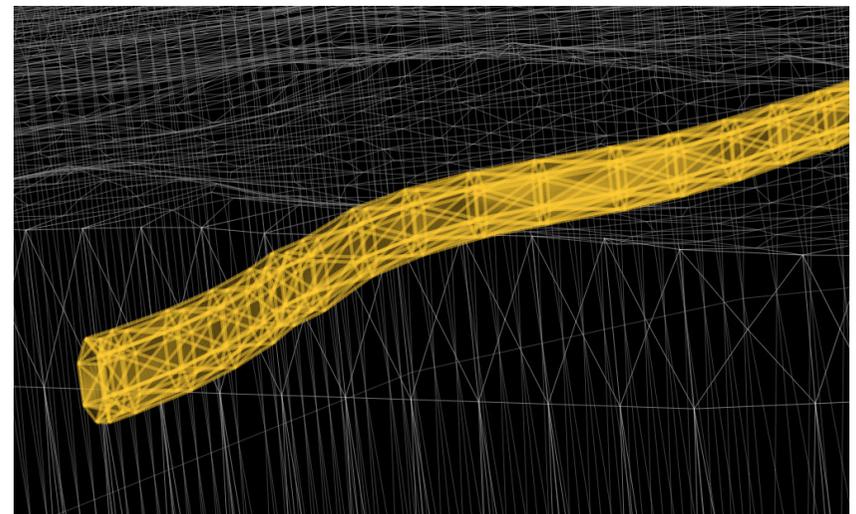
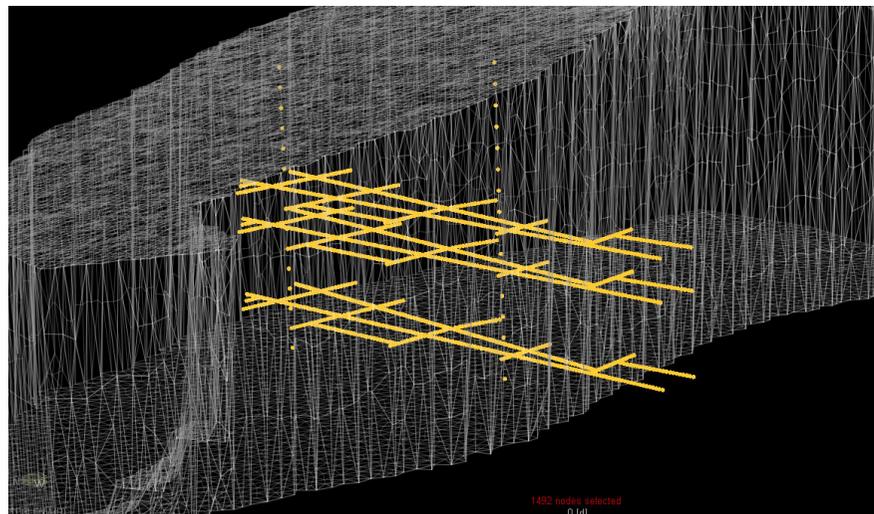
- „Insel“-Standort, hydraulische Randbedingungen definierbar
- Umsetzung mit FEFLOW



Wasserprovinzen an der Ruhr und Wasserhaltungsmaßnahmen der RAG

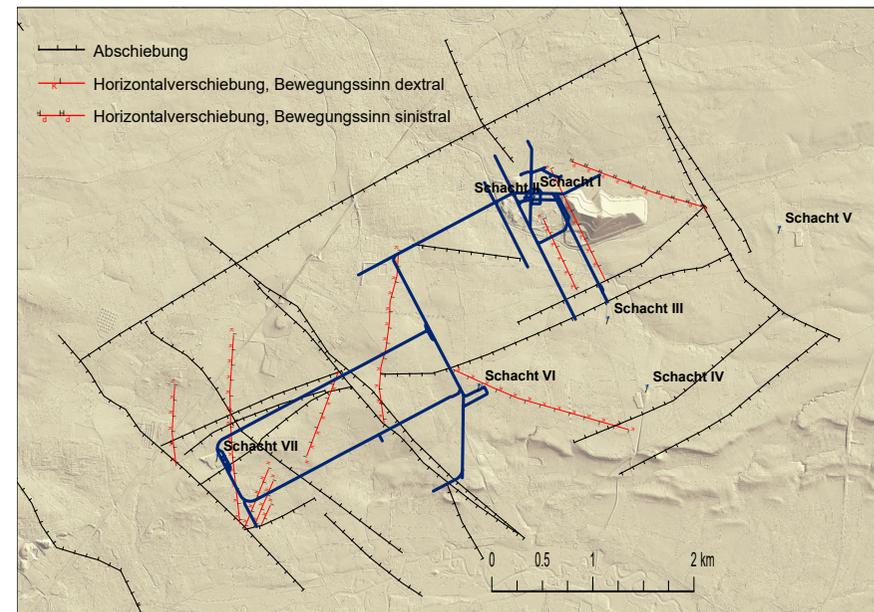
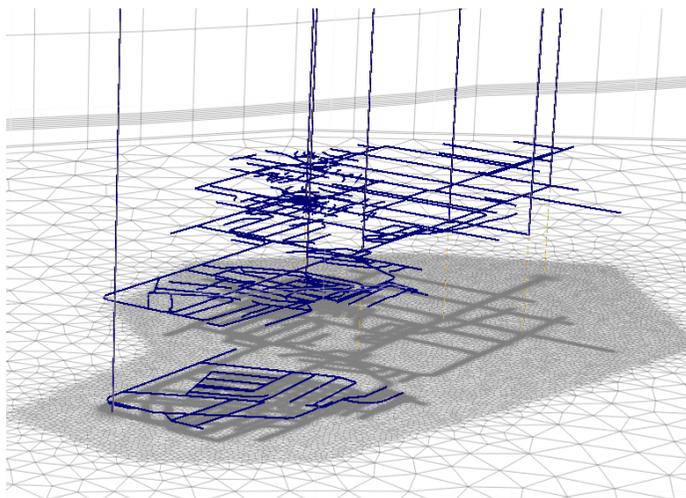
## 3. Diskretisierung des Modellraums

- Diskretisierung mit strukturierten Netzen (*prismatische Elemente*)
- Schichtenaufbau
- Hohlräume werden mittels diskreter Strukturen implementiert (Punkte, Linien oder Flächen) → diese werden geometrisch parametrisiert
- Möglichkeit unstrukturierter Netze (*tetraedrische Elemente*)
- Grubengebäude können als ortstreu Körper realitätsnah diskretisiert werden
- deutliche Optimierung des Rechenaufwands möglich



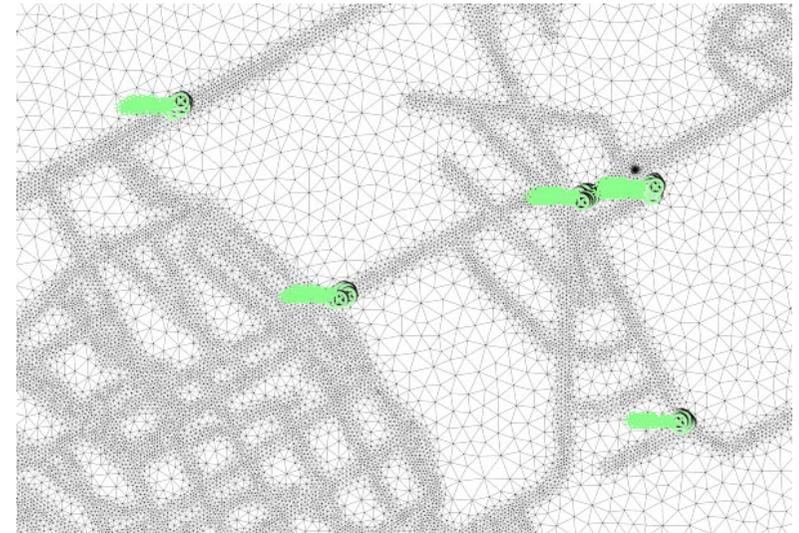
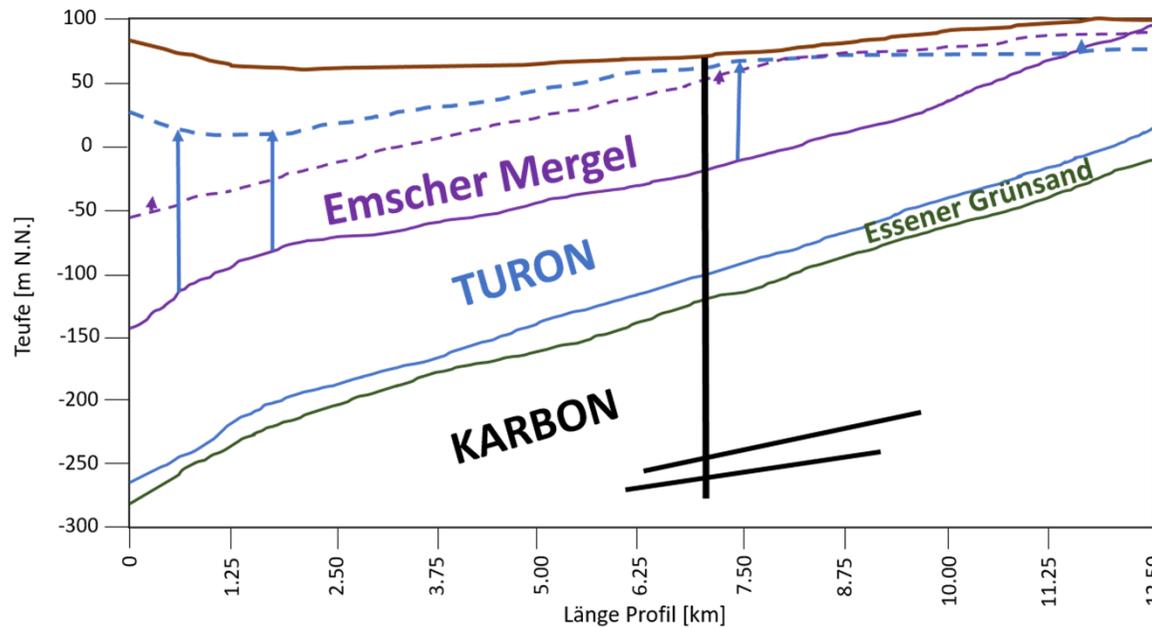
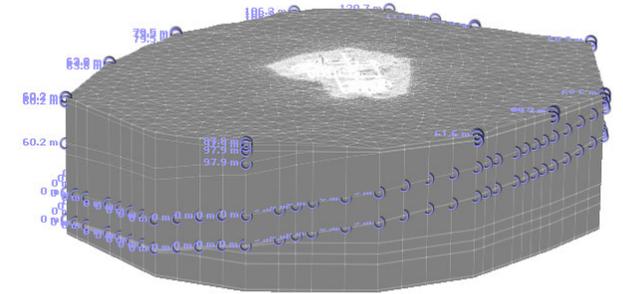
## 3. Modellstrukturen

- Störungen (vertikale Fließpfade meteorischen Wassers)
- Strecken und Schächte als eindimensionale diskrete Strukturen
  - Hauptstrecken auf vier Sohlen 1200m, 1035m, 945m, 850m u GOK
  - 7 Schächte
  - (wassergefüllte Hohlräume mit niedrigem Strömungswiderstand)
- Sohlen in einheitlicher Höhenlage, als 5m mächtige Modellschicht



### 3. Grundwasser und Randbedingungen

- 3 Grundwasserleiter mit unterschiedlichen Potentialen (oberflächennahes Grundwasser, Kluftgrundwasser Turon, karbonisches Tiefengrundwasser)
- Teilweise gespannte Verhältnisse

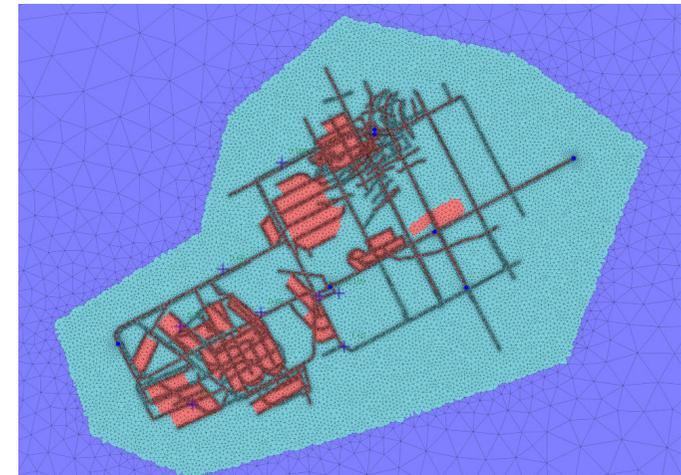
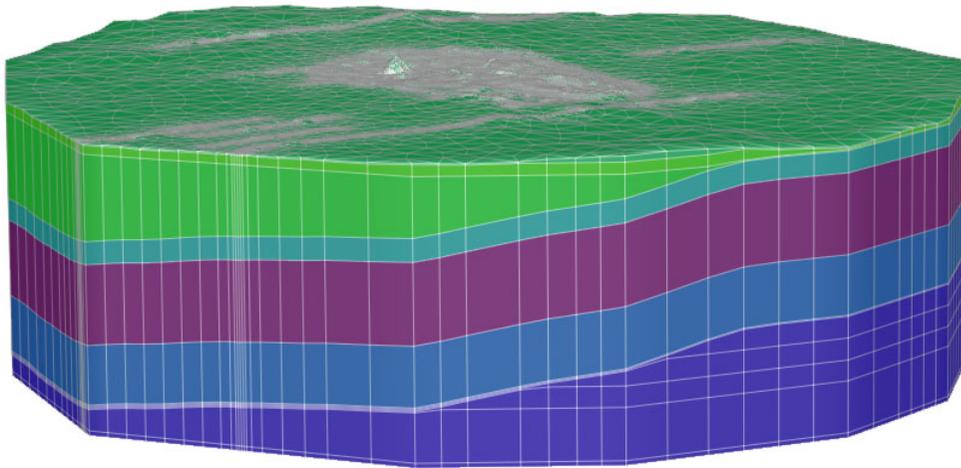


### 3. Materialeigenschaften

- Die Aquifere werden mittels hydraulischer Durchlässigkeiten voneinander abgegrenzt
- Störungen werden als vertikale Infiltrationspfade mit hohem  $K_{zz}$  definiert
- Im Bereich von Abbauen oder verbrochenen Bereichen werden erhöhte äquivalente Durchlässigkeiten angesetzt

Conductivity:  $K$   
- Patches -  
[m/s]

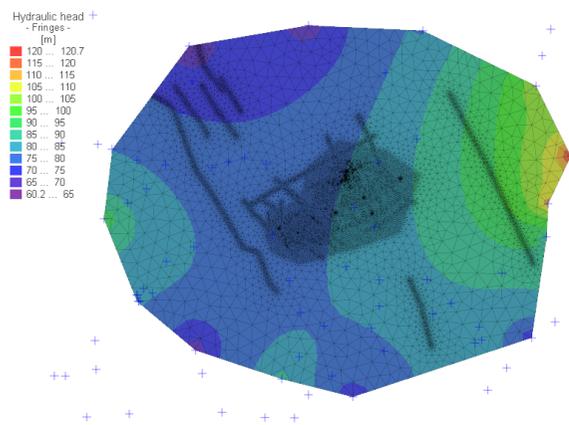
1
0.1
0.01
0.001
0.0001
1e-05
1e-06
1e-07
1e-08
1e-09
1e-10



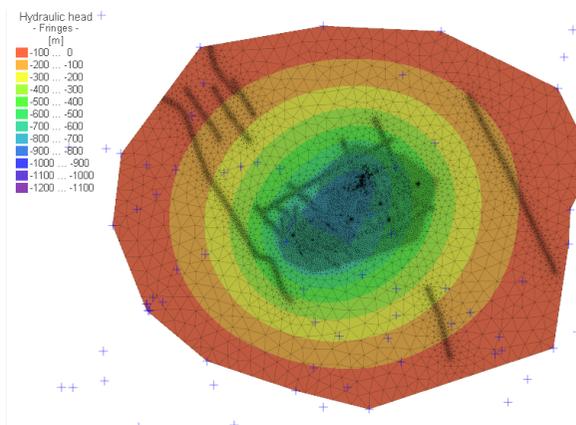
## 3. Stationäres Grubenwassermodell

- stationäres Modell versucht die Potentialverteilung während des aktiven Pumpenbetriebs abzubilden
- oberflächennahes Grundwasser unbeeinflusst
- Grundwasserabsenkung jedoch im Turon deutlich erkennbar

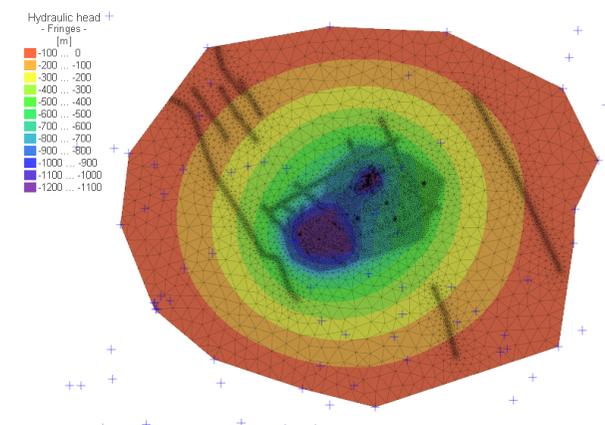
Modellschicht 3 (Deckgebirge)



Modellschicht 8 (Turon)

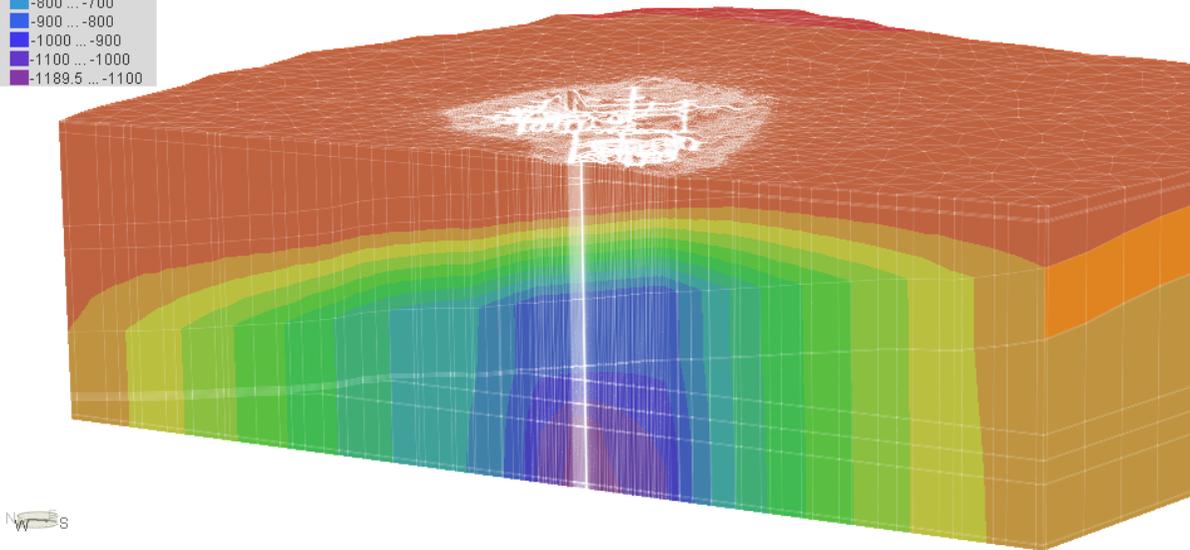
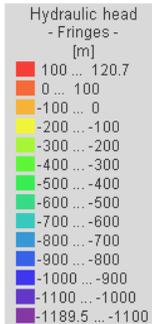


Modellschicht 12 (Karbon)



### 3. Stationäres Grubenwassermodell

- nach unten gerichteter Gradient zum unteren GW-Leiter (Turon)
- punktuelle Zuflüsse in das Grubengebäude
- nahezu horizontaler Gradient im Karbon



**Umwandlung in  
transientes  
Modell um den  
Grubenwasser-  
anstieg zu  
berechnen**

### 3. Ergebnisse Grubenwasseranstieg

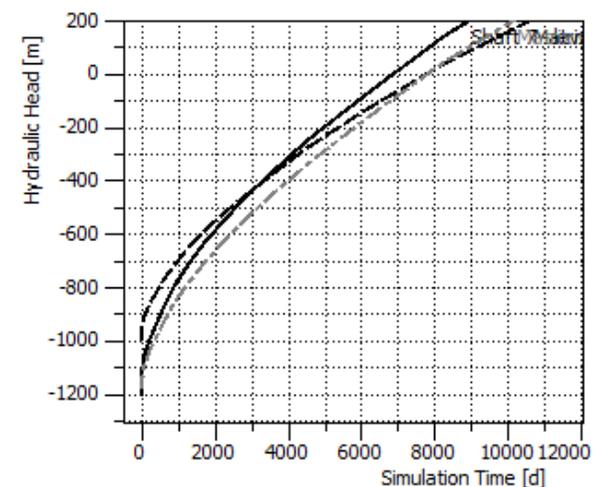
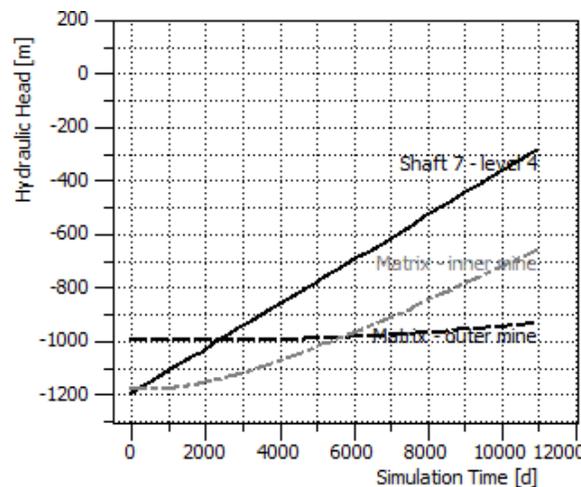
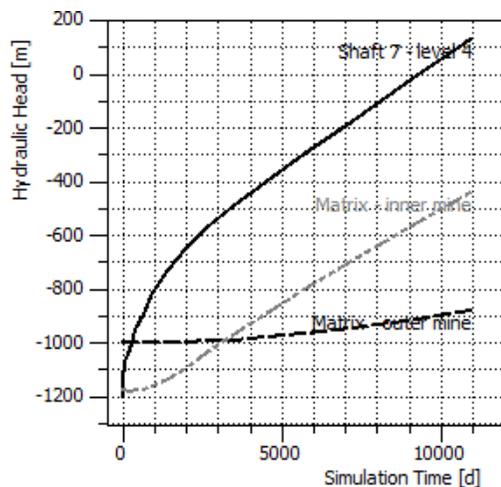
- Messungen anhand von drei Beobachtungsbrunnen
  - im Schacht (Sohle 4) - *schwarze Linie*
  - im bergwerksnahen Gebirge (-1200m) - *grau gestrichelte Linie*
  - im bergwerksfernen Gebirge (-1000m) - *schwarz gestrichelte Linie*

Referenz-Modell:

Hohlräume sind hydraulisch sehr gut durchlässig  
→ Zuflüsse dominieren den Anstieg

Fließwiderstand in den Strecken/Schächten wird minimiert  
→ Verzögerung durch Wasserspeicherung in Hohlräumen

sehr hohe Gebirgsdurchlässigkeit (bspw. durch starke Klüftung)  
→ Zustrom kontrolliert den Anstieg





## 4. Finite-Elemente Ansatz vs. pond-and-pipe

- die Abbildung von Bergwerksstrukturen, Hohlräumen und Störungen im Modell ist möglich, teilweise schwierige Abstraktion
- sehr variable räumliche Parametrisierungen, wie z.B. zeitabhängige Materialeigenschaften oder variable Druckhöhen in Grundwasserstockwerken
- die hydromechanischen Prozesse bestimmen den Grubenwasseranstieg und nicht die Volumenbilanz (Modellunsicherheiten)
- Grubenwasseranstieg im Schacht kann nicht losgelöst vom Wasseranstieg im Gebirge berechnet werden
- erheblicher Datenaufwand für Modellkalibrierung, jedoch können bestehende Modelle sukzessive optimiert werden
- wesentlich höherer Rechenaufwand (Zeit, Kosten)
- einzelne Fließpfade und -zeiten können berechnet und dargestellt werden

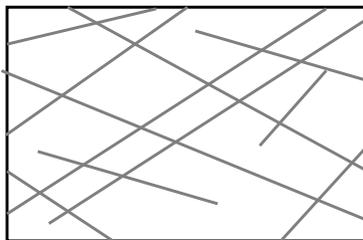
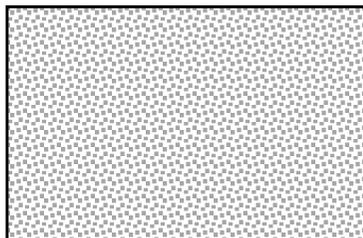
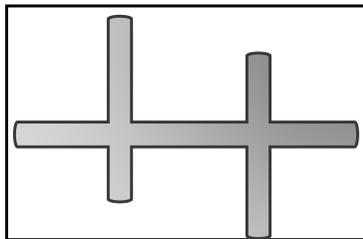


+/-

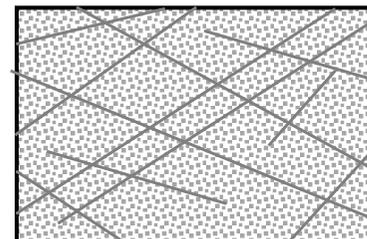
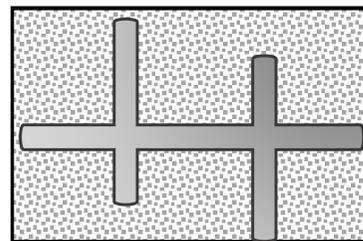


# 4. Weiterentwicklung Modellstruktur

single Kontinuum

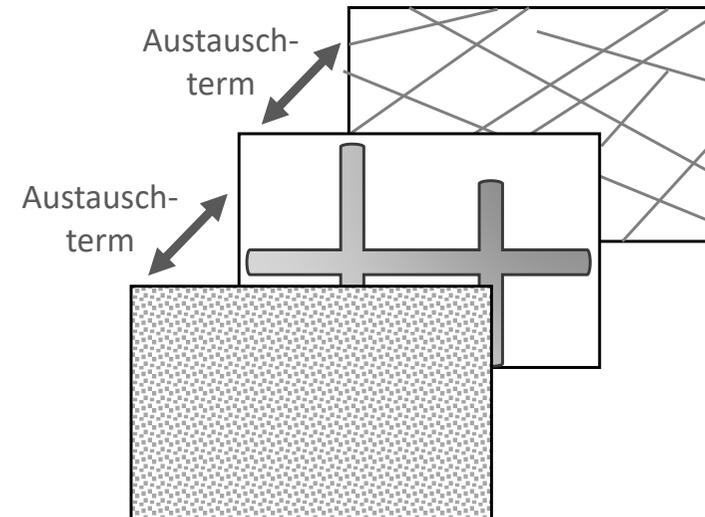


diskretes Hohlraum-  
medium



äquivalentes  
poröses Medium

doppelte/multiple Kontinua





Glück auf.