

# Geotechnische Aspekte der Planung von Kavernen

Karl Grossauer

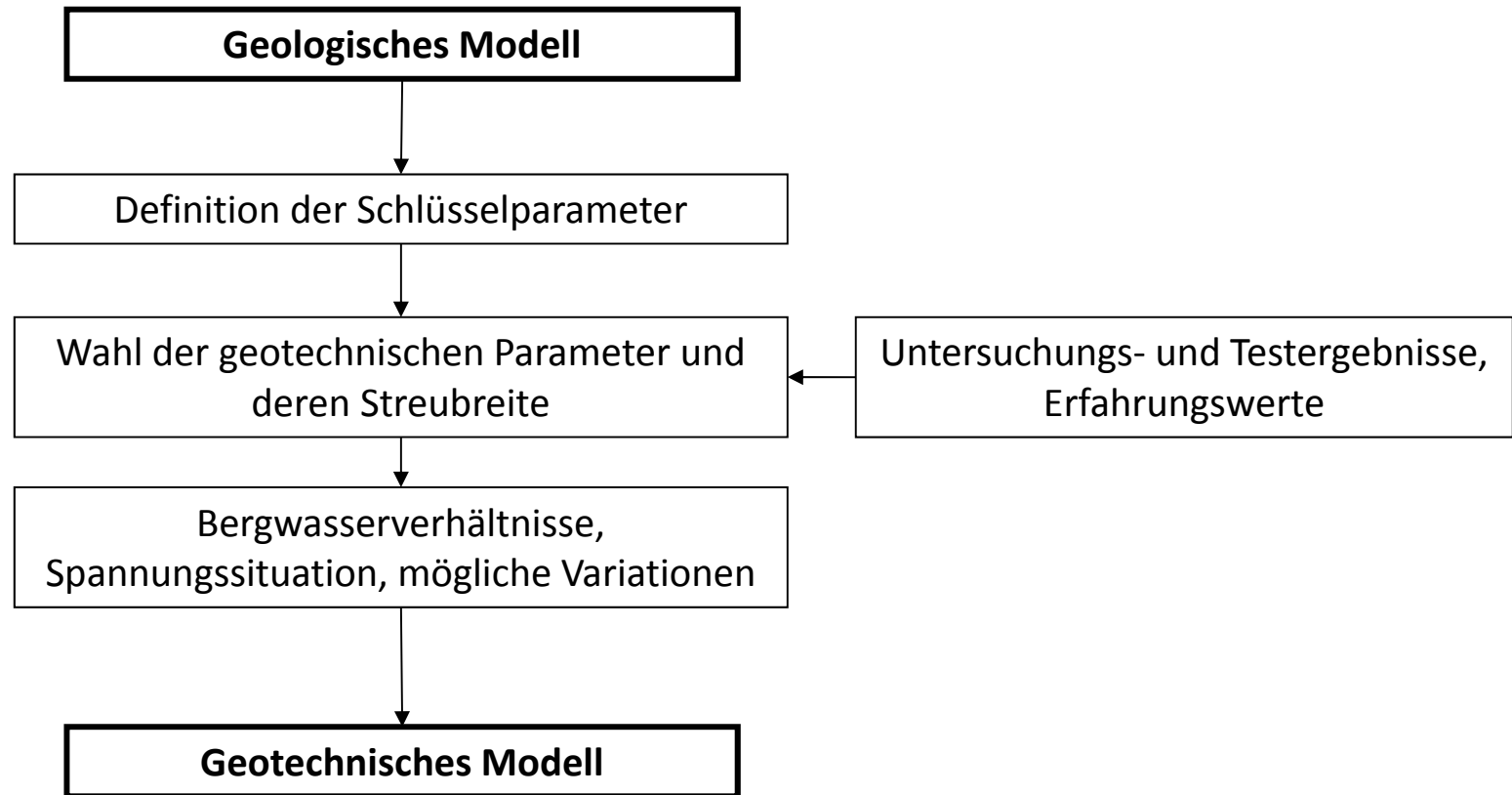
Amberg Engineering AG, Schweiz

«kgrossauer@amberg.ch»

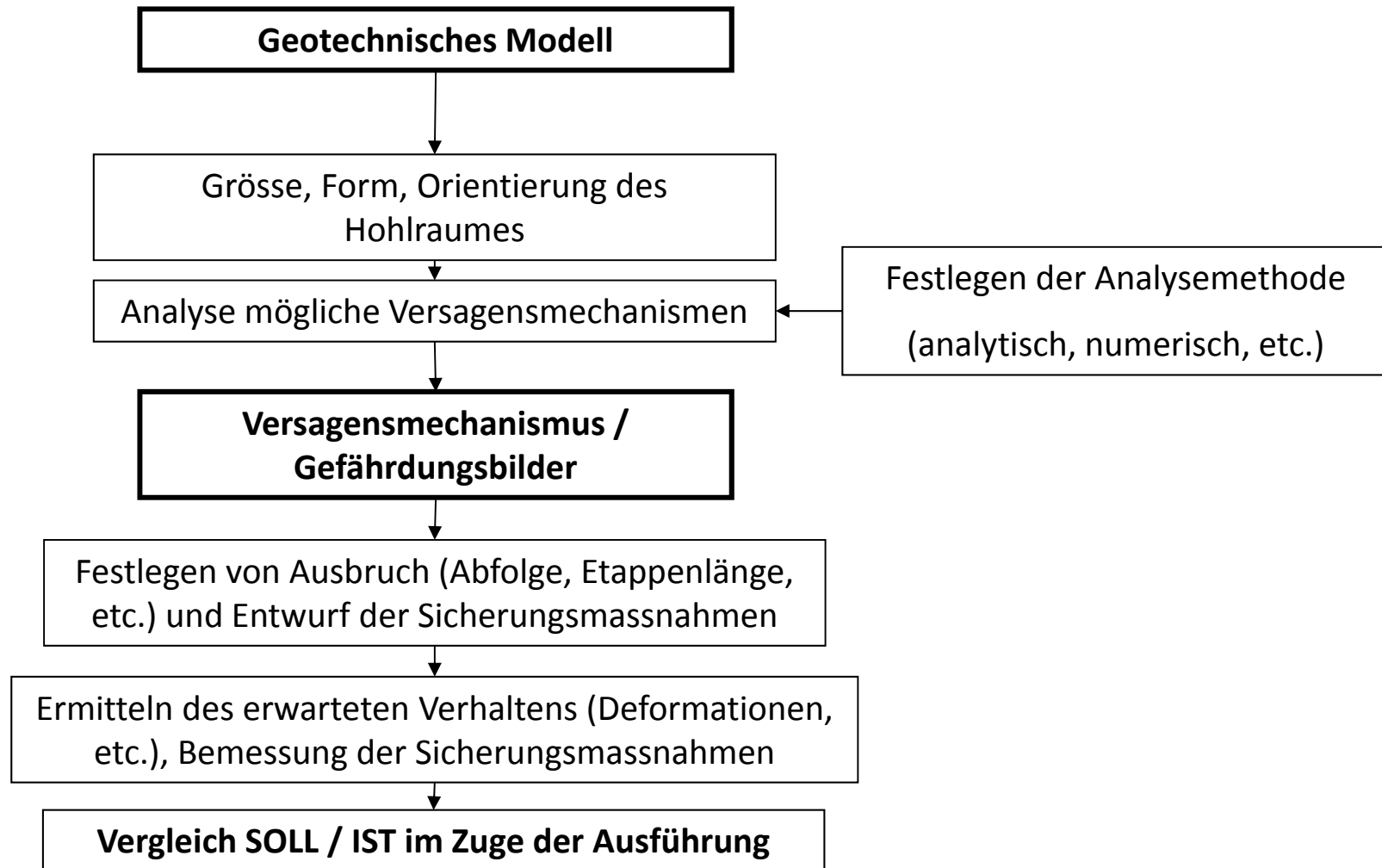


Untertagbau für Wasserkraftanlagen, ETHZ, 12.12.2013

# Genereller Ablauf einer geotechnischen Planung



# Genereller Ablauf einer geotechnischen Planung



## Genereller Ablauf einer geotechnischen Planung

### Besonderheiten in Bezug auf Kavernen

- Hohlraumgrösse und Form (Kluftkörper, gerade bzw. leicht gekrümmte Paramente, etc.)
- Geometrische Komplexität
- Nur bedingte Möglichkeit der Anpassungen an die tatsächlichen geotechnischen Verhältnisse  
→ hohe Zuverlässigkeit in der Planung erforderlich
- Auswirkungen von nicht prognostizierten und unvorhergesehenen Besonderheiten (z.B. Störungszonen) können dramatisch sein.  
→ Erkundungsmassnahmen kommt ein besondere Bedeutung zu
- Erhöhung des Ausbauwiderstandes aufgrund Beobachtungen während der Vortriebsarbeiten ist aufgrund der Hohlraumgrösse schwierig.



# Ausgewählte Beispiele

## Modellwahl

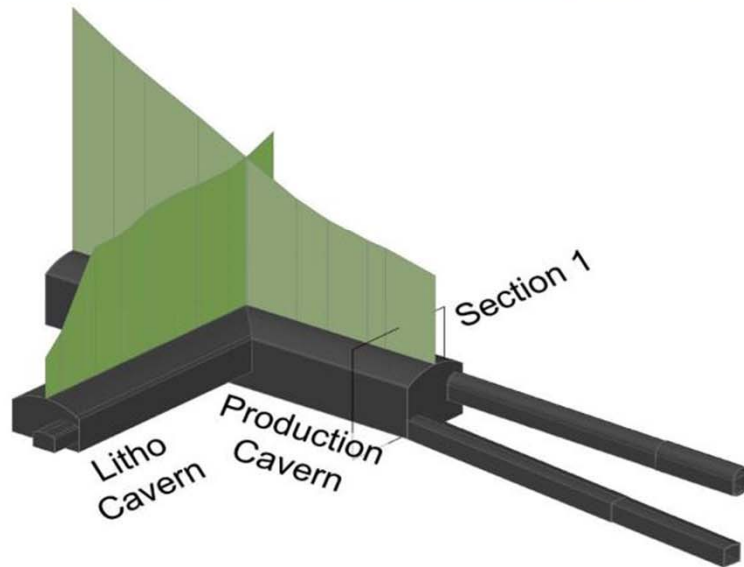
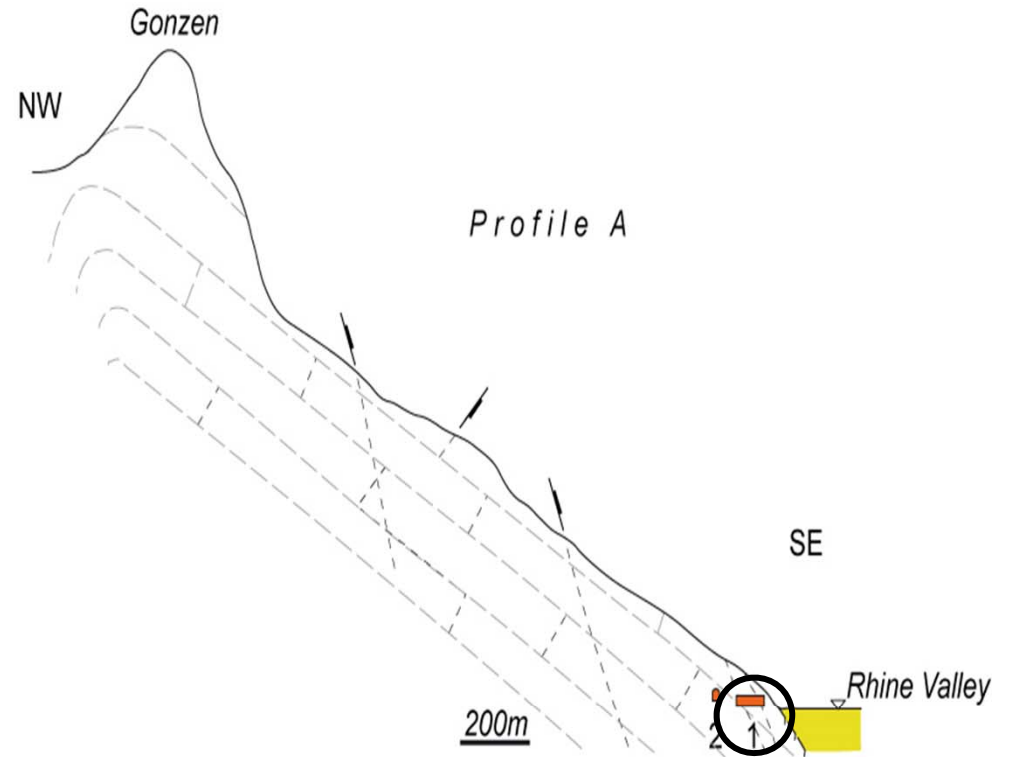
## Versagensmechanismus

- Scherbruch
- Sprödbruchanalyse
- Kontinuums Modell vs. Diskretes Modell (Kluftkörperproblematik)

## Räumliche Analyse

- Besonderheiten

# Kavernen mit geringer Überdeckung



## Überlagerung

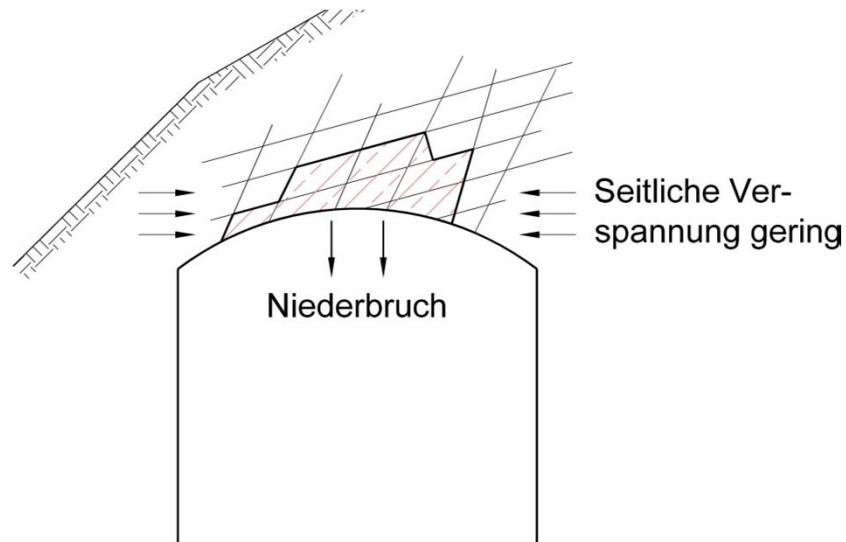
- Litho Kaverne 7 bis 35 m
- Produktionskaverne 20 bis 70 m

# Kavernen mit geringer Überdeckung

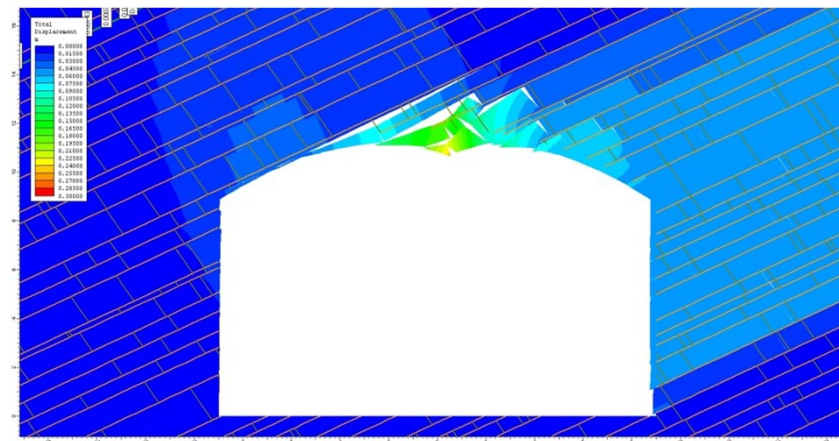
## Erkundung / Geologische Verhältnisse

- Kalkstein, bankig
- 2 Klufscharen, j1 parallel zur Hauptstörungszone

## Gefährdungsbild



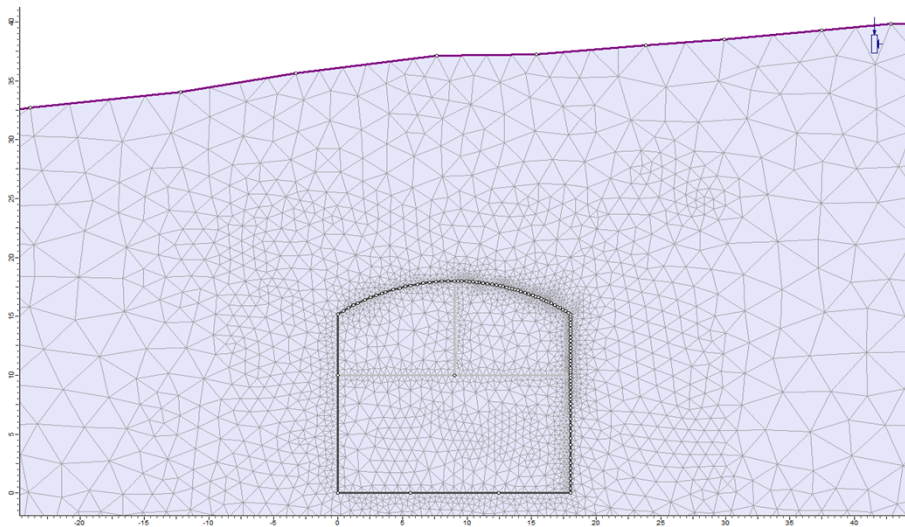
*Geringe seitliche Verspannung des Gebirges*



*Simulation spontaner Felsausbrüche*

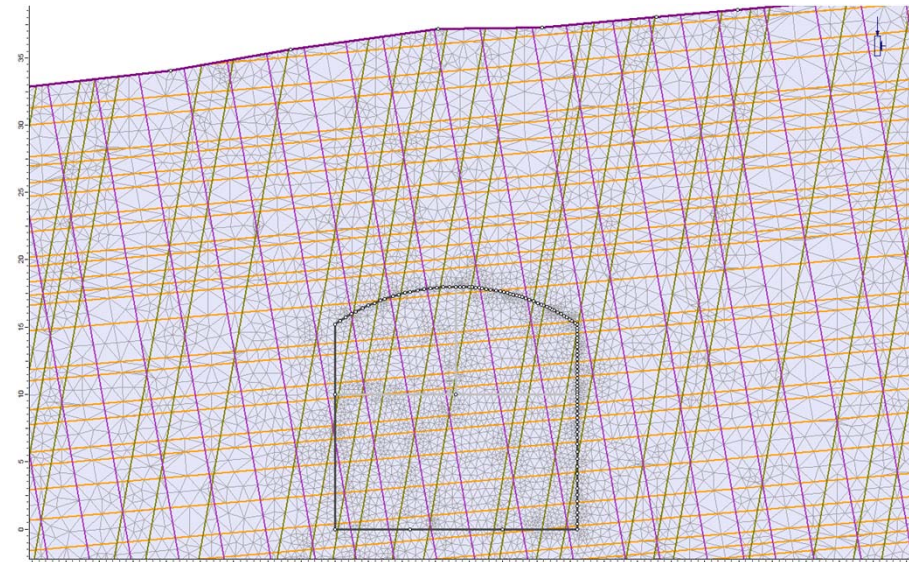
# Vergleich Modellierungsansatz

## Kontinuums Modell



	rock mass
<b>E-Modulus [GPa]</b>	<b>28</b>
<b>Poisson ratio [-]</b>	<b>0.3</b>
<b>GSI / mi</b>	<b>75 / 12</b>
<b>UCSrm</b>	<b>21</b>
<b>Tensile Strength [MPa]</b>	<b>0.96</b>
<b>Friction angle [°]</b>	<b>39</b>
<b>Cohesion [MPa]</b>	<b>8</b>

## Diskretes Modell



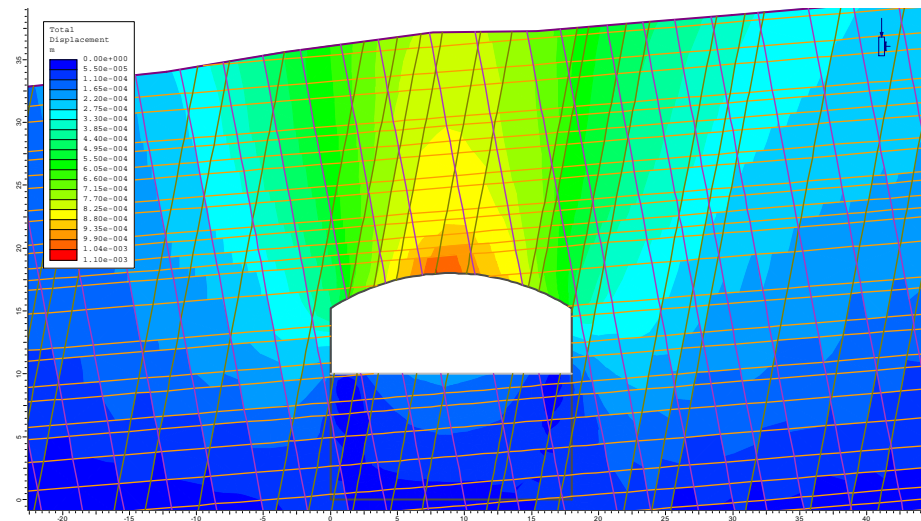
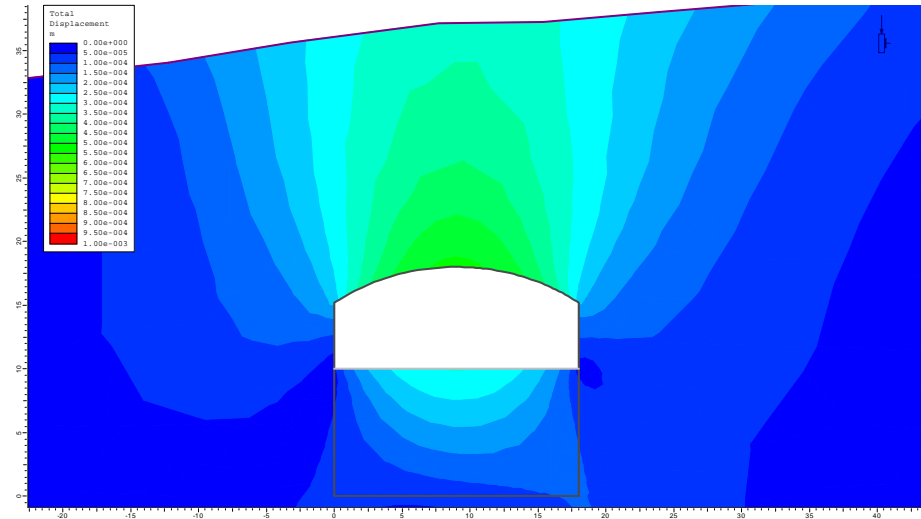
	intact rock	bedding planes	joint set 1	joint set 2
<b>E-Modulus [GPa]</b>	<b>40</b>			
<b>Poisson ratio [-]</b>	<b>0.3</b>			
<b>UCS [MPa]</b>	<b>110</b>			
<b>Tensile strength [MPa]</b>			<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Friction angle [°]</b>	<b>45</b>	<b>33</b>	<b>30</b>	<b>25</b>
<b>Cohesion [MPa]</b>	<b>21</b>	<b>1.5</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
<b>Normal/shear stiffness [GPa/m/]</b>		<b>100/10</b>	<b>35/7.5</b>	<b>35/7.5</b>



# Vergleich Modellierungsansatz

## Versagensmechanismus

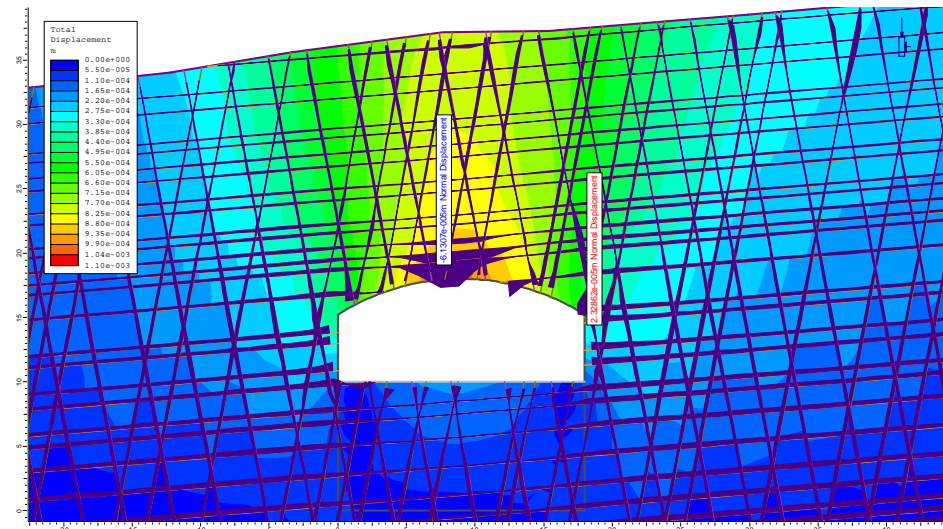
- weites Deformationsfeld
  - Verschiebungen gering ( $< 1\text{mm}$ )
  - keine Überbeanspruchung des Gebirges (Beanspruchung unterhalb der Geb.Festigkeit)
- 
- ausgeprägtes Deformationsfeld
  - Verschiebungen gering  $< 1.5\text{ mm}$
  - Scherversagen entlang der Trennflächen



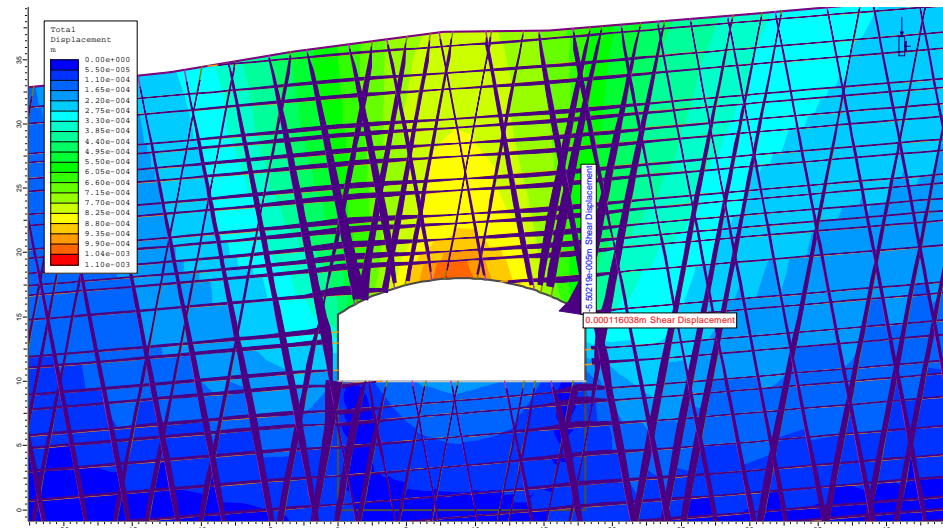
# Diskretes Modell

## Versagensmechanismus

- Verschiebungen normal zur Trennflächen



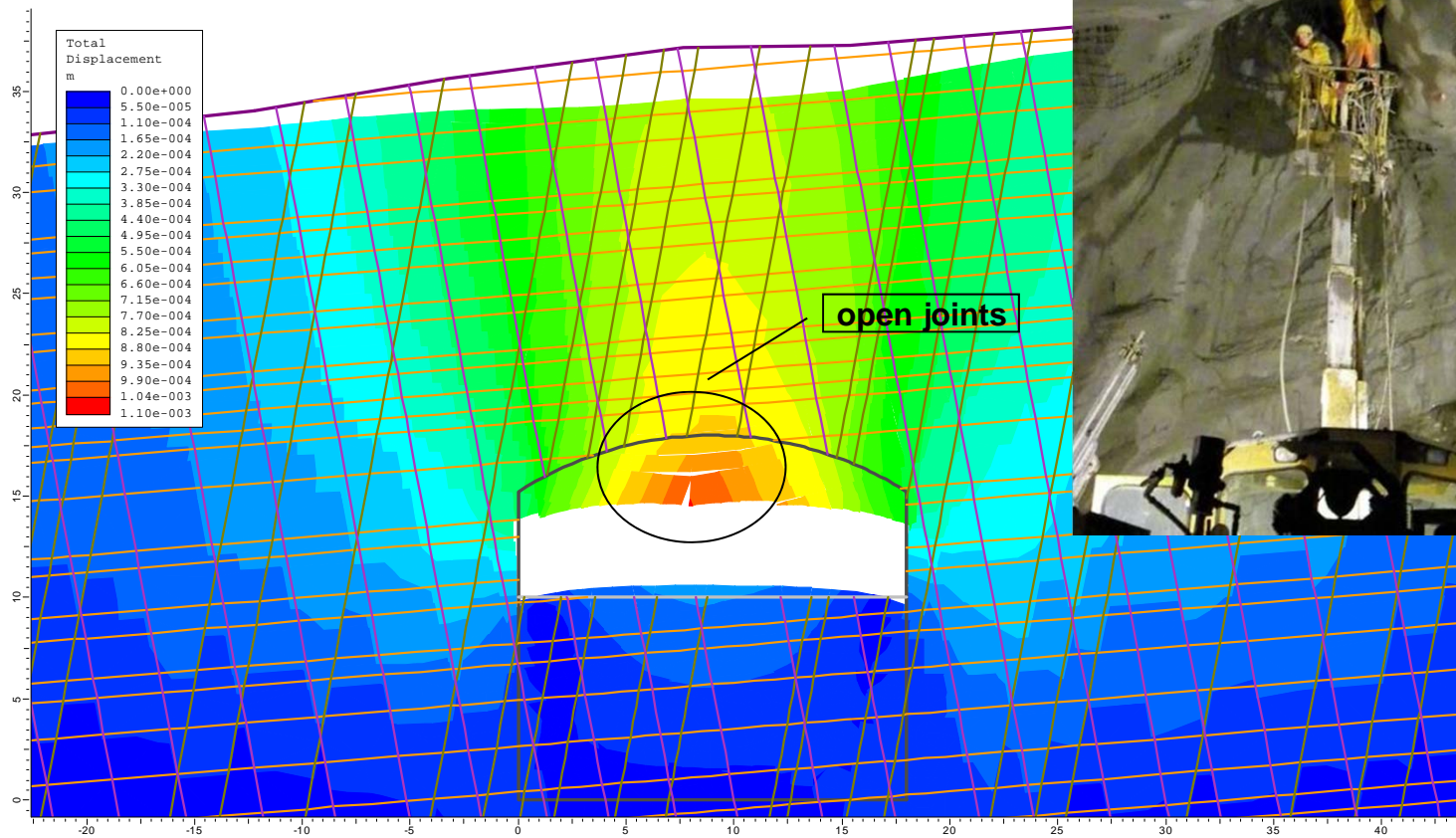
- Verschiebungen entlang der Trennflächen





# Diskretes Modell

## Versagensmechanismus



# Tiefliegende Kaverne, hohes Spannungsniveau

## Gebirge

- Massig und spröde Gesteine (Granit, Granodiorit, feinkörnige Gneise, leicht geschieferte Gneise)

## Überlagerung

- ca. 650 m

## Hohe Horizontalspannungen:

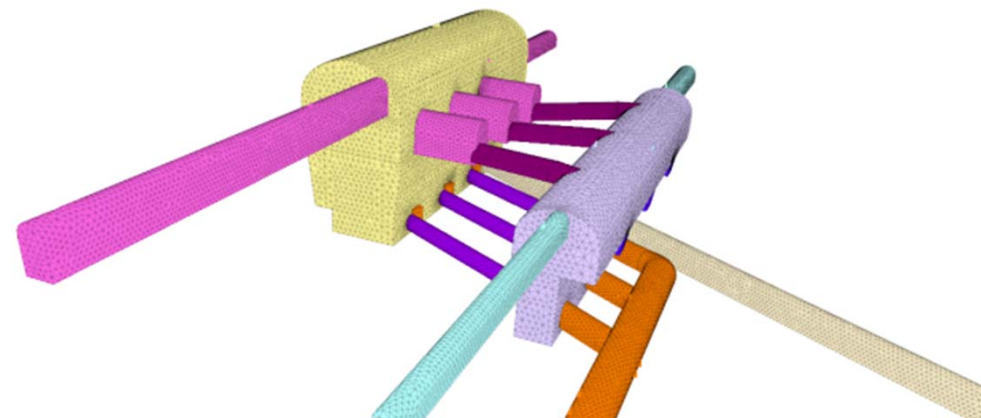
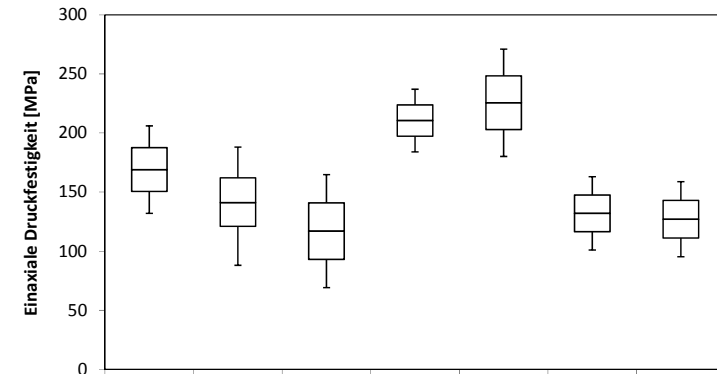
- $\sigma_H/\sigma_V \sim 2.2$  (bis zu 45 MPa)
- $\sigma_h/\sigma_v \sim 1.3$

## Hohe Zug- und Druckfestigkeiten Gestein

- UCS  $\sim 130 - 150$  MPa
- $\sigma_t: \sim 7.0 - 12.5$  MPa

## Massiges Gebirge

- GSI: 85



## Tiefliegende Kaverne, hohes Spannungsniveau

### Erwartete Gefährdungsbilder

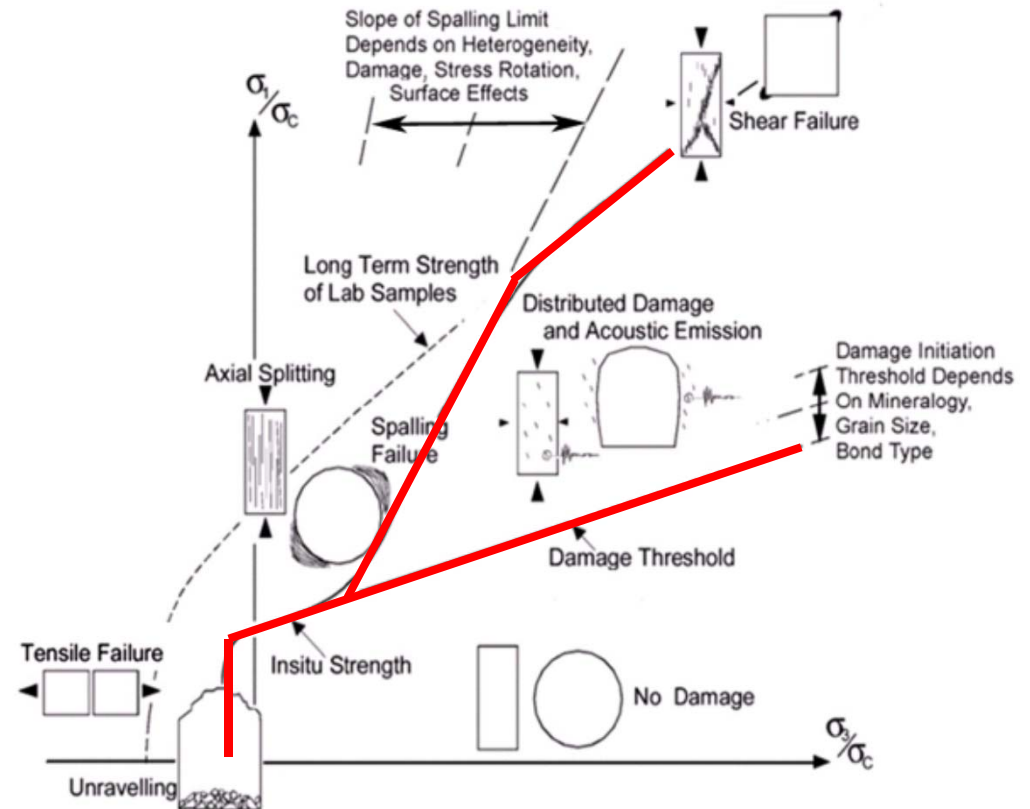
- Kluffkörper (Grosskluffkörper im First)
- Abschalungen und Potential für Bergschlag



# Sprödbbruchanalyse

## Vier Hauptversagenszustände

- Schädigung
- Abplatzungen / Abschaltungen
- Scherversagen
- Zugversagen



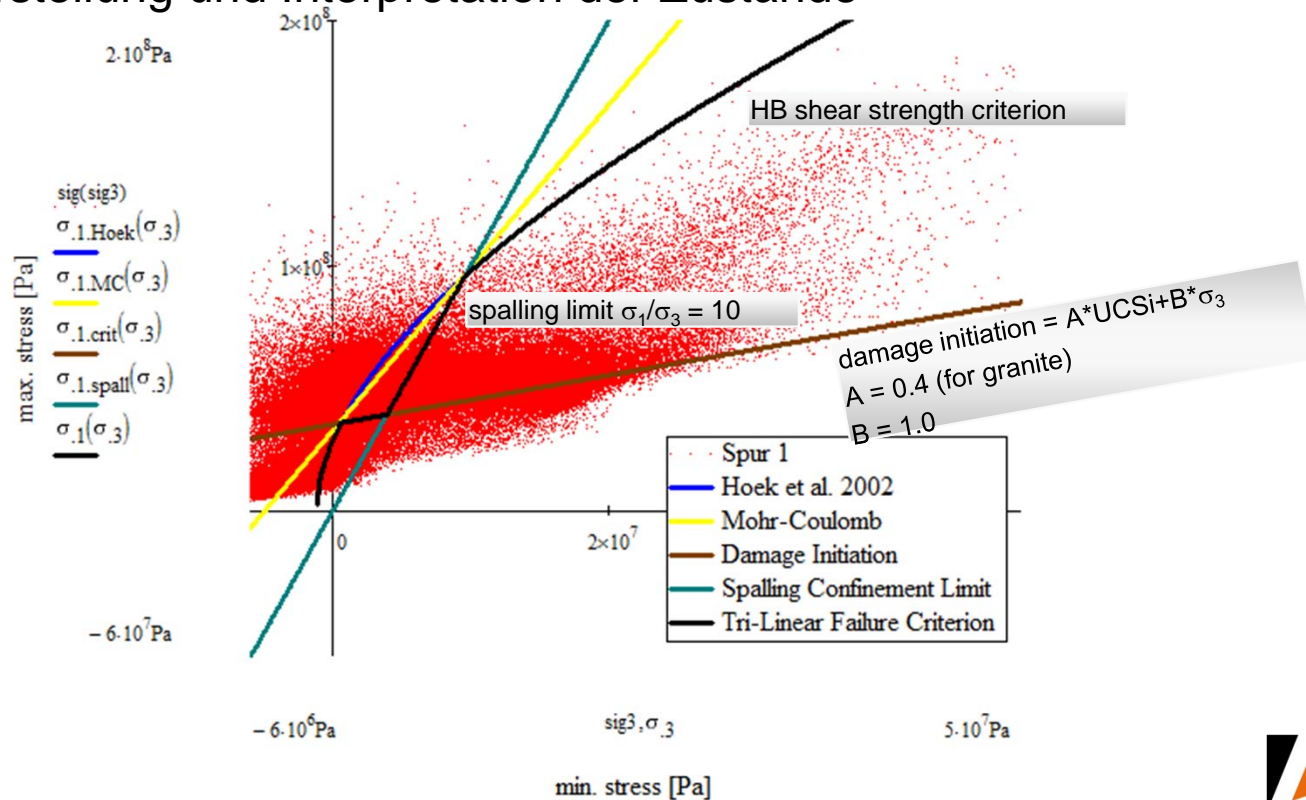
Quelle: Diederichs 2002



# Sprödbbruchanalyse

## Vereinfachte Analyseprozedur

- 3D numerische Modellierung mit elastischem Materialverhalten
- Auswertung der Spannungspunkte in Bezug auf Versagenskriterium Sprödbbruch
- Darstellung und Interpretation der Zustände

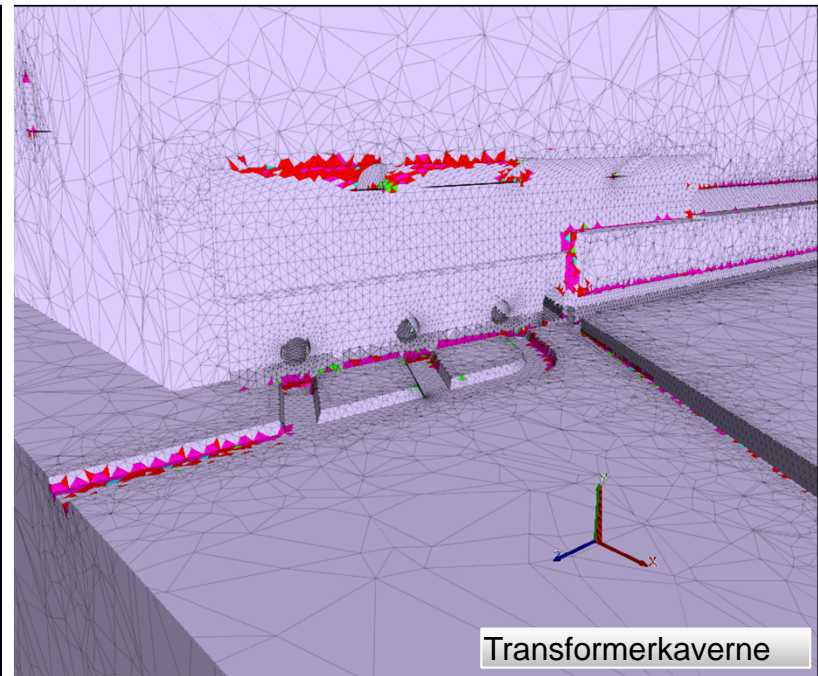
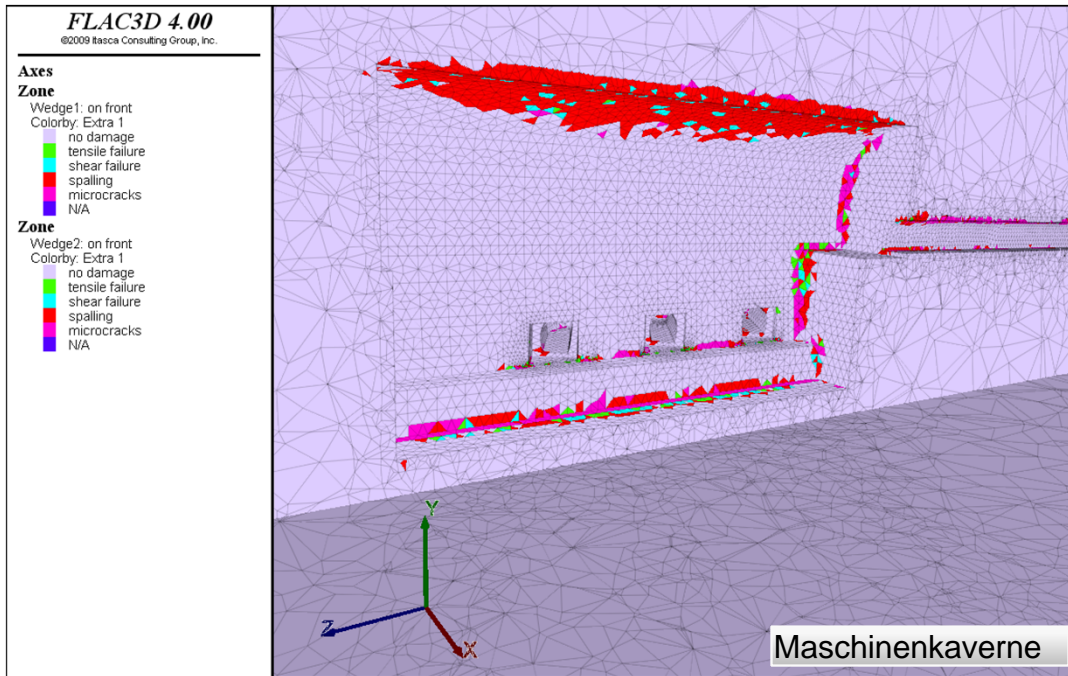


# Sprödbbruchanalyse

## Versagensformen

**Zone**  
vertical: on  
Colorby: Extra 1

- no damage
- tensile failure
- shear failure
- spalling
- microcracks





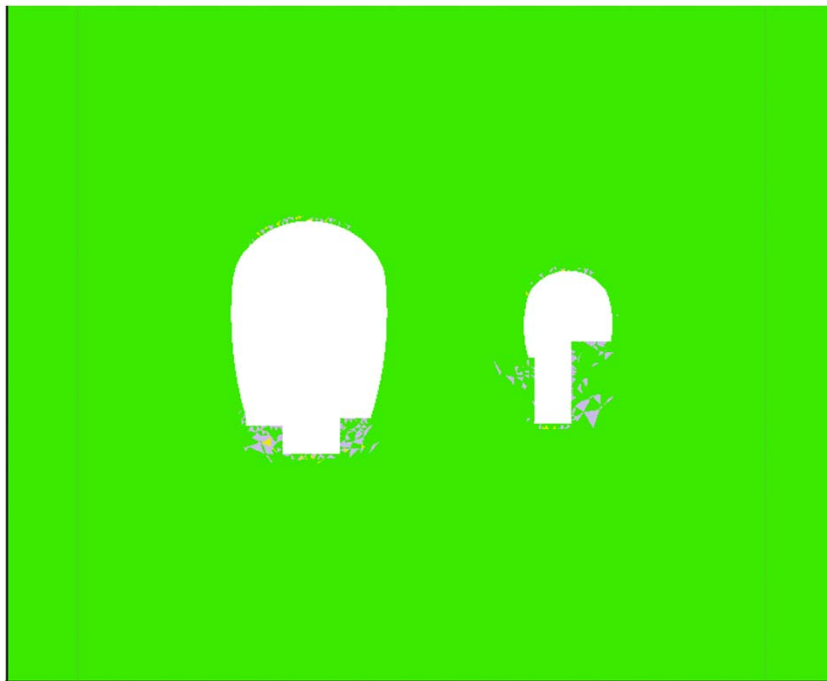
# Sprödbruchanalyse

## Versagensformen

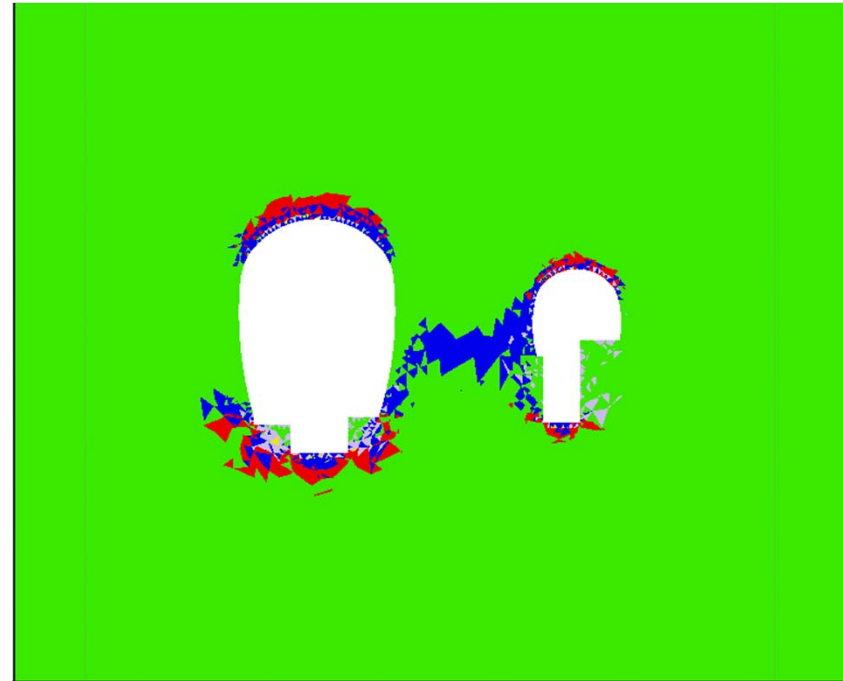
- Querschnitt

**Zone**  
vertical: on  
Colorby: Extra 1  
no damage  
tensile failure  
shear failure  
spalling  
microcracks

Analyse Scherbruch



Sprödbruchanalyse



# Sprödbbruchanalyse

## Versagensformen

- Horizontalschnitt

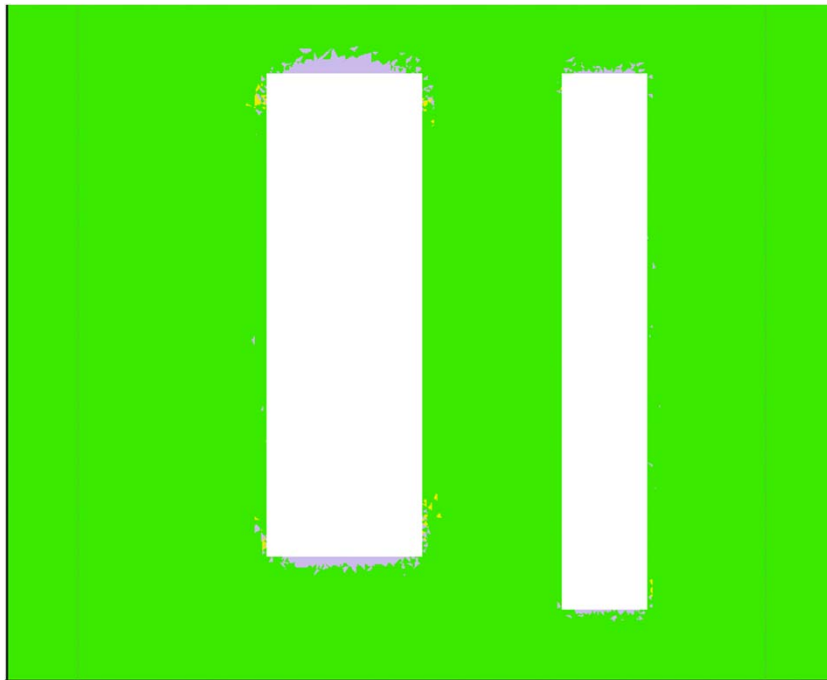
### Zone

vertical: on

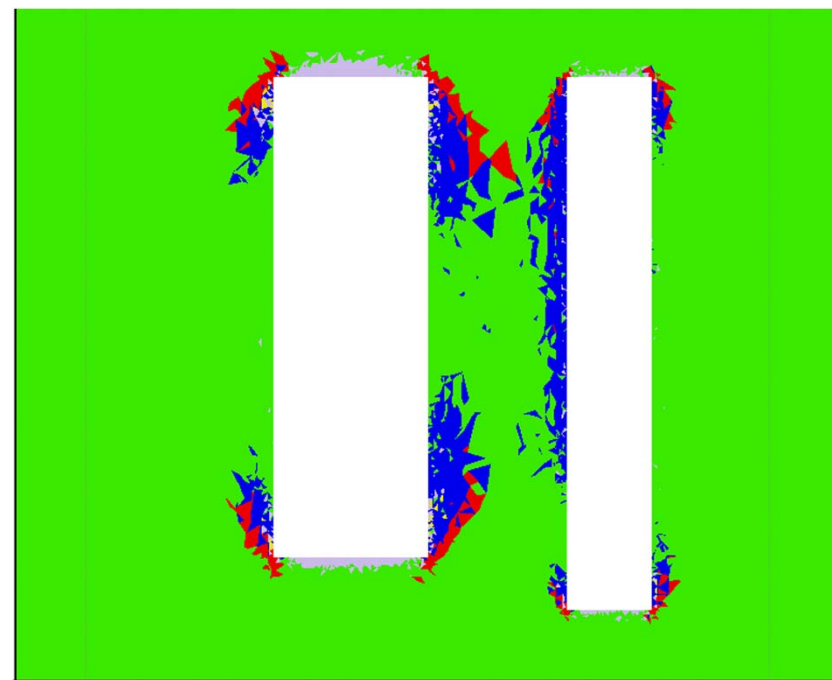
Colorby: Extra 1

- no damage
- tensile failure
- shear failure
- spalling
- microcracks

Analyse Scherbruch



Sprödbbruchanalyse



# Komplexe räumliche Geometrie

## Geologisch / Geotechnische Verhältnisse

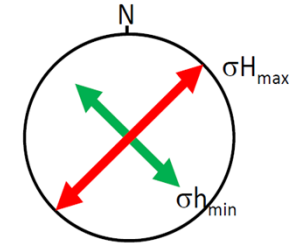
- Gebirge: Rauwacke und Störungsbrekzie

$$\sigma_v = \gamma \times h \quad (h = 280 \text{ m})$$

$$\sigma_{hmin} = 0.8 \times \sigma_v$$

$$\sigma_{Hmax} = 1.2 \times \sigma_v$$

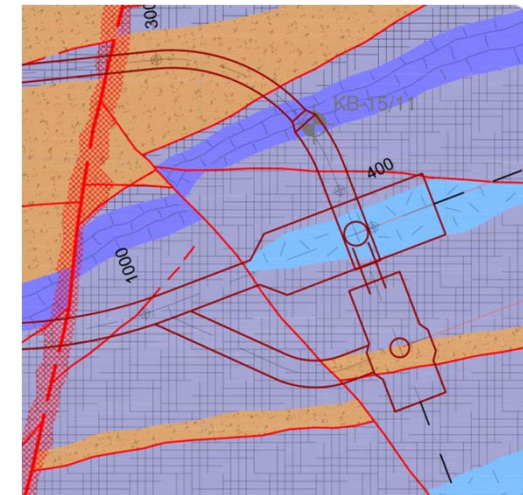
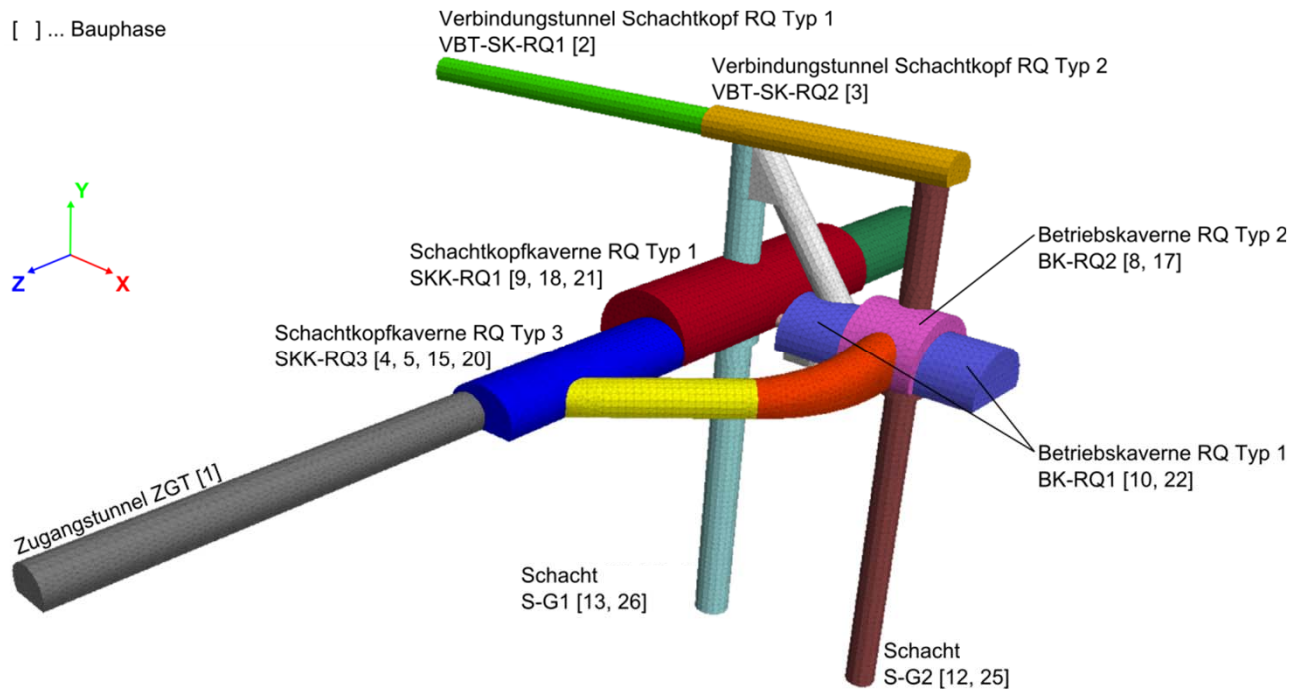
Orientierung der horizontalen Hauptnormalspannungen



$\sigma_{Hmax} \dots \text{NO - SW} (\sim 045^\circ - 225^\circ)$

$\sigma_{hmin} \dots \text{NW - SO} (\sim 135^\circ - 315^\circ)$

[ ] ... Bauphase



# Komplexe räumliche Geometrie

## 3D Numerisches Modell

- Grundgebirge: Rauwacke
- querverlaufende Störungsbrekzie

## Rechenkennwerte Schachtkopfkaverne

- Mittelwert der Bandbreite
- konservative Schätzwerte der Bandbreite

## Materialmodell

- Linear-elastisches, ideal-plastische (MC)

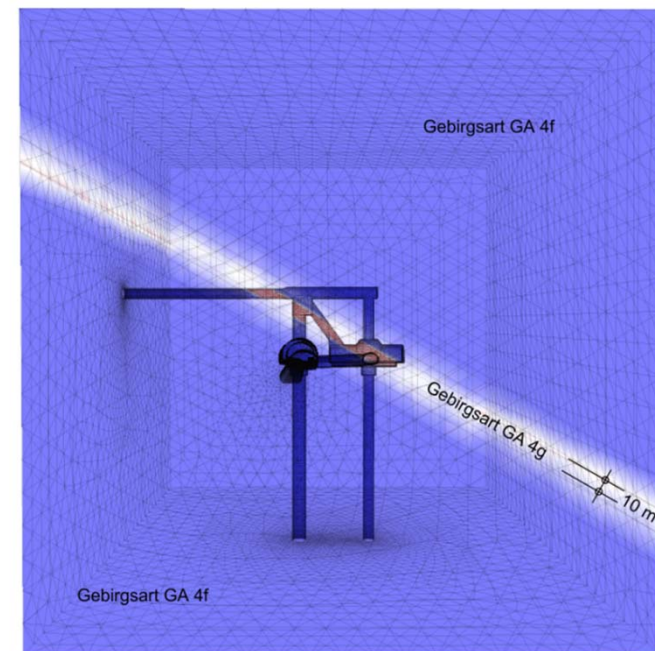
Rechenmodell	GB	Überlagerung [m]	k0 <sup>2)</sup> [-]	GA	GA Kennwerte					Rechenwerte RW/SP
					$\gamma^{1)}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	E [GPa]	$\nu$ [-]	$\phi$ [°]	c [MPa]	
3D-1	11	280	0.8 - 1.2	4f	27	15	0.15	35	2	RW
				4g	27	5	0.25	32	0.6	RW
3D-2	11	280	0.8 - 1.2	4f	27	10	0.15	32	1	SP
				4g	27	4	0.25	30	0.3	SP

<sup>1)</sup> gemittelter Wert zur Bestimmung des Primärspannungszustandes

<sup>2)</sup> Orientierung Primärspannungszustand gemäß Kap. 4.1

RW ... Rechenwerte gemäß Kap. 3.2

SP ... speziell abgestimmte Rechenwerte



# Komplexe räumliche Geometrie

## Auswertung plastische Zonen

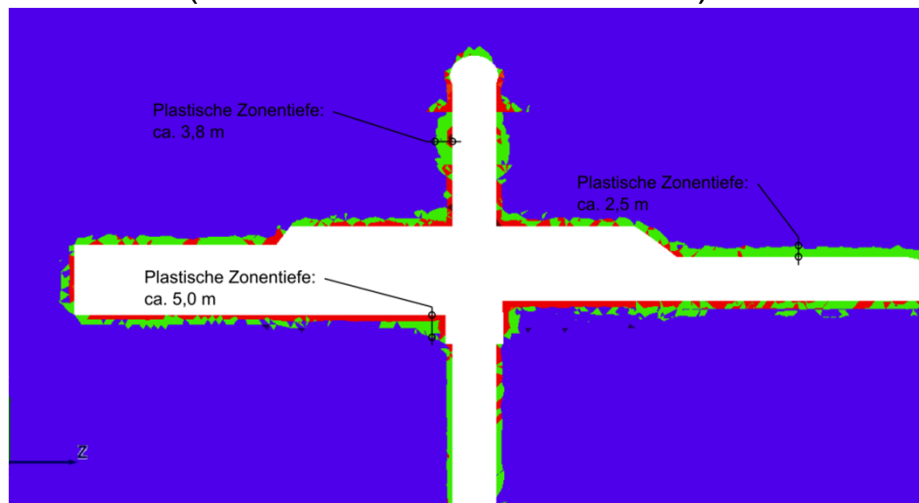


## Komplexe räumliche Geometrie

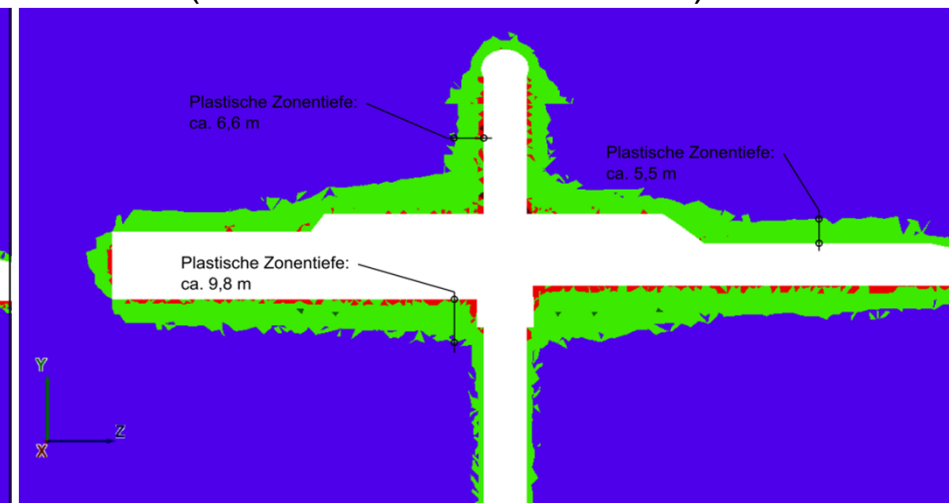
### Auswertung / Vergleich Parametervariation

- Sohlgewölbe bei MW Betrachtung nicht erforderlich → gesamter Schachtkopfkavernenbereich kann mit flacher Sohle ausgeführt werden.
- Sohlgewölbe bei konservativer Betrachtung im Kavernenbereich erforderlich.

(Mittelwerte der Bandbreite)



(Konservative Schätzwerte)

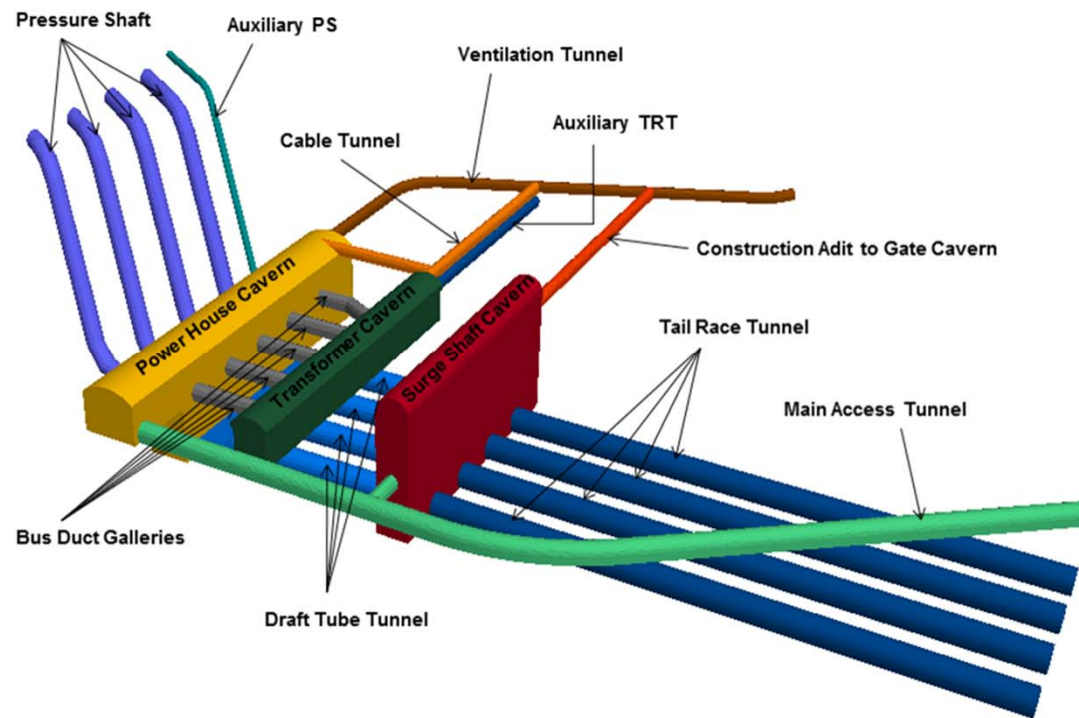




# 3D Modellierung

## Modellierung

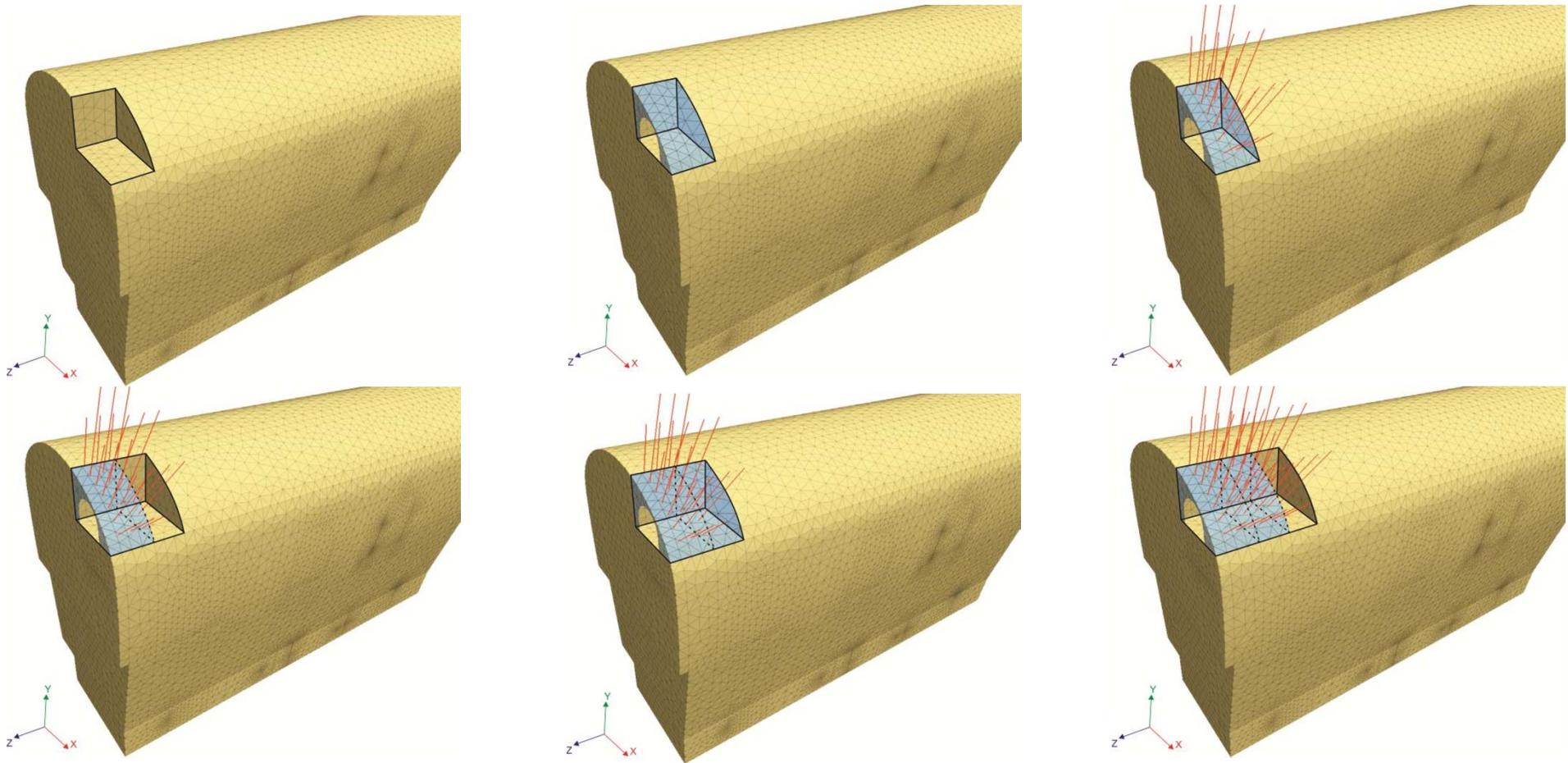
- Räumliche Anordnung und Grösse der Anlagenteile



## 3D Modellierung

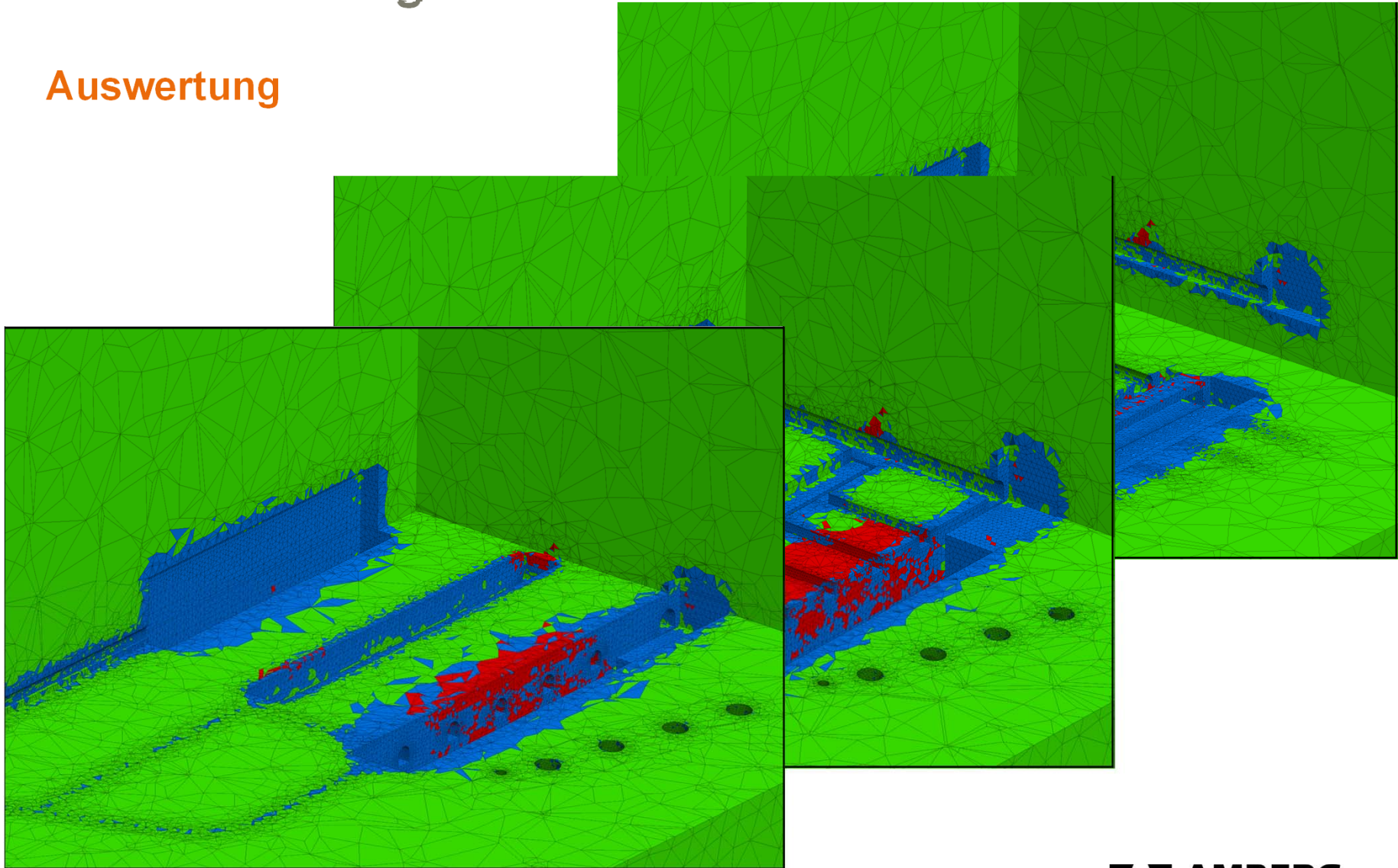
### Modellierung

- 3D Anordnung und Grösse der Anlagenteile
- Ausbruchsequenz und Einbau der Stützmittel



# 3D Modellierung

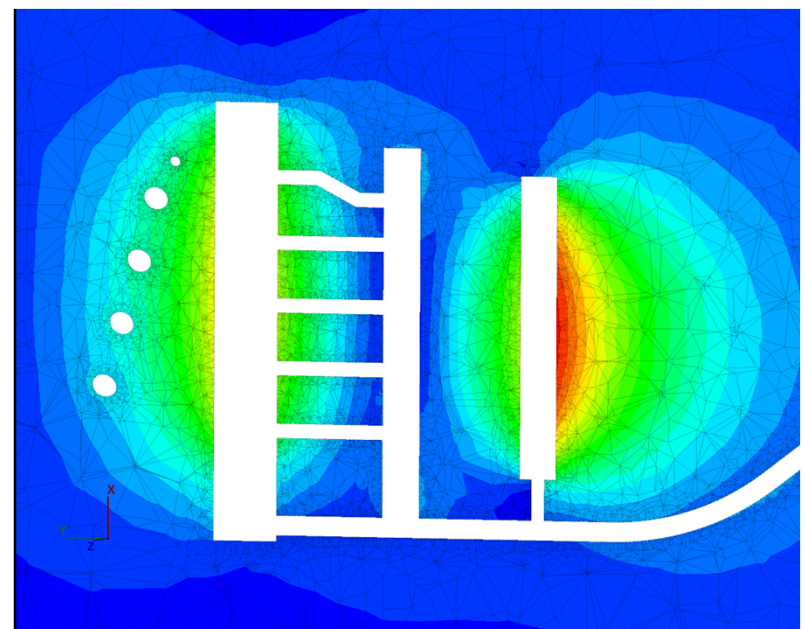
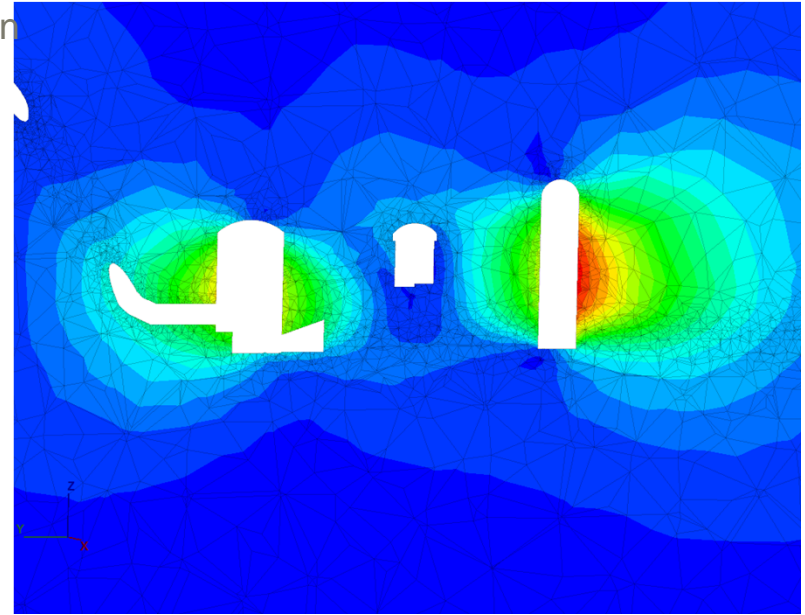
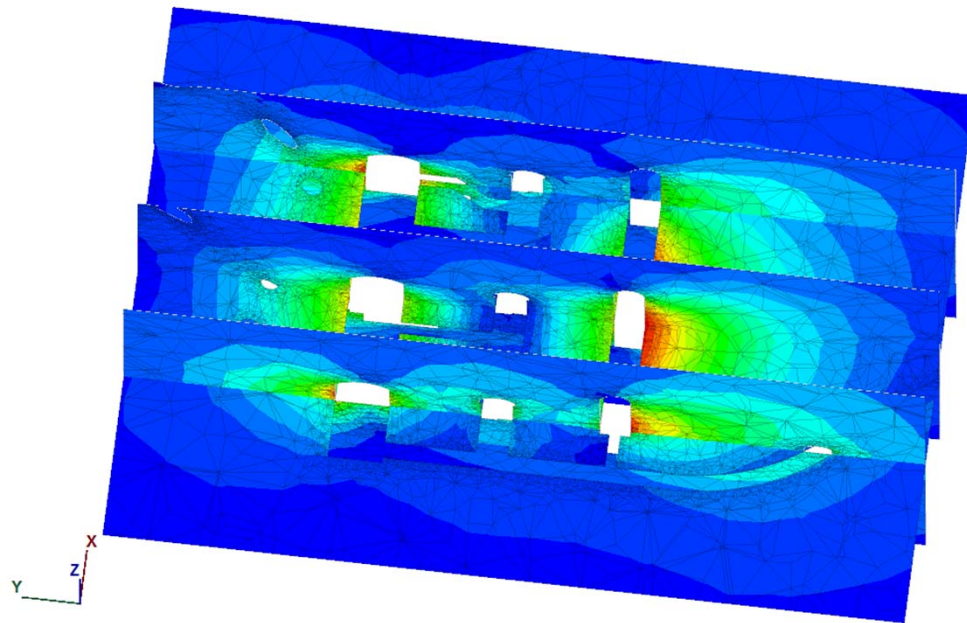
## Auswertung





# 3D Modellierung

## Auswertung



## Vergleich 2D / 3D Modellierung

### Vorteile 3D

- Berücksichtigung von räumlich komplexen Hohlraumgeometrien
- Berücksichtigung von komplexen Bauabläufen
- Berücksichtigung von beliebig orientierten Primärspannungszuständen
- Berücksichtigung von komplexen geologischen Strukturen
- Realitätsnahe Berücksichtigung der Steifigkeits- und Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons

### Nachteil 3D

- Hoher zeitlicher Aufwand für Modellierung selbst, für Änderungen in der Geometrie, etc.
- Variantenuntersuchung und Sensitivitätsanalysen aufgrund von Zeitbedarf quasi nicht umsetzbar.
- Plausibilitätskontrolle wird mit zunehmender Komplexität des Modells schwieriger

## Zusammenfassung

- Die Wahl der «richtigen Materialmodelle» und der «Modellierungsart» ist entscheidend für ein realistisches Erfassen der Versagensformen und dem zu erwartenden Verhalten.  
→ erforderlich für die «passende» Auslegung von Ausbruch und den Sicherungsmassnahmen.
- Numerische Modellierung (insbesondere 3D) für komplexe geometrische Verhältnisse erlaubt eine realistische Beurteilung des zu erwartenden Gebirgsverhaltens (Deformationen, Spannungen, Versagensformen usw.).



ETHZ Kolloquium 2013\_Untertagbau für Wasserkraftanlagen

# DANKE FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT

