



**BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG**

Geotechnische Seminarreihe IBF KIT | Karlsruhe, 12.07.2018

# Gebirgsmechanische Berechnungen im Zuge der Auffahrungen Füllort und Grubennebenräume 2. Sohle auf der Schachtanlage Konrad

Frank Manthee<sup>1</sup>, Mirko Polster<sup>2</sup>

<sup>1</sup> BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine, Germany

<sup>2</sup> BGE Technology GmbH, Peine, Germany

- BGE GmbH (Fusion Teile des BfS,  
ehem. Asse GmbH, DBE GmbH)
- alleiniger Gesellschafter: Bund
- 25.04.2017: Übertragung der  
Aufgabenwahrnehmung
- Errichtung, Betrieb und  
Stilllegung von Endlagern für  
radioaktive Abfälle (§9a AtG)  
sowie Suche und Auswahl eines  
Endlagerstandortes für Wärme  
entwickelnde Abfälle (StandAG)



- 1 Einführung / Überblick zu den Baumaßnahmen
- 2 Geologische und geotechnische Standortverhältnisse
- 3 Berechnungsmodell – Prognoseberechnungen
- 4 Ergebnisse von Prognoseberechnungen
- 5 Optimierung des Ausbausystems unter Anwendung der Beobachtungsmethode nach EC7

# 1 Einführung – Historie Schachtanlage Konrad



- 1957 – 1962: Teufen der Schächte Konrad 1 und 2
- 1965 – 1976: Bergbau auf oolithisches Eisenerz im Kammerbau und Kammer-Pfeilerbau
- 1976: Einstellen der Förderung (ges. 6,7 Mio t)

- 1975 – 1982: Eignungsuntersuchungen und Einleitung PFV durch PTB (1982)
- 1989: Vervollständigung der Unterlagen und öffentliche Auslegung
- 1992 – 1993: Erörterungstermine (290.000 Einwendungen)
- 2002: NMU erteilt Genehmigung





- 2002 – 2006: Klageverfahren gegen den Beschluss werden ohne Revisionsmöglichkeit abgewiesen
- 2007: Bundesverwaltungsgericht bestätigt Urteil

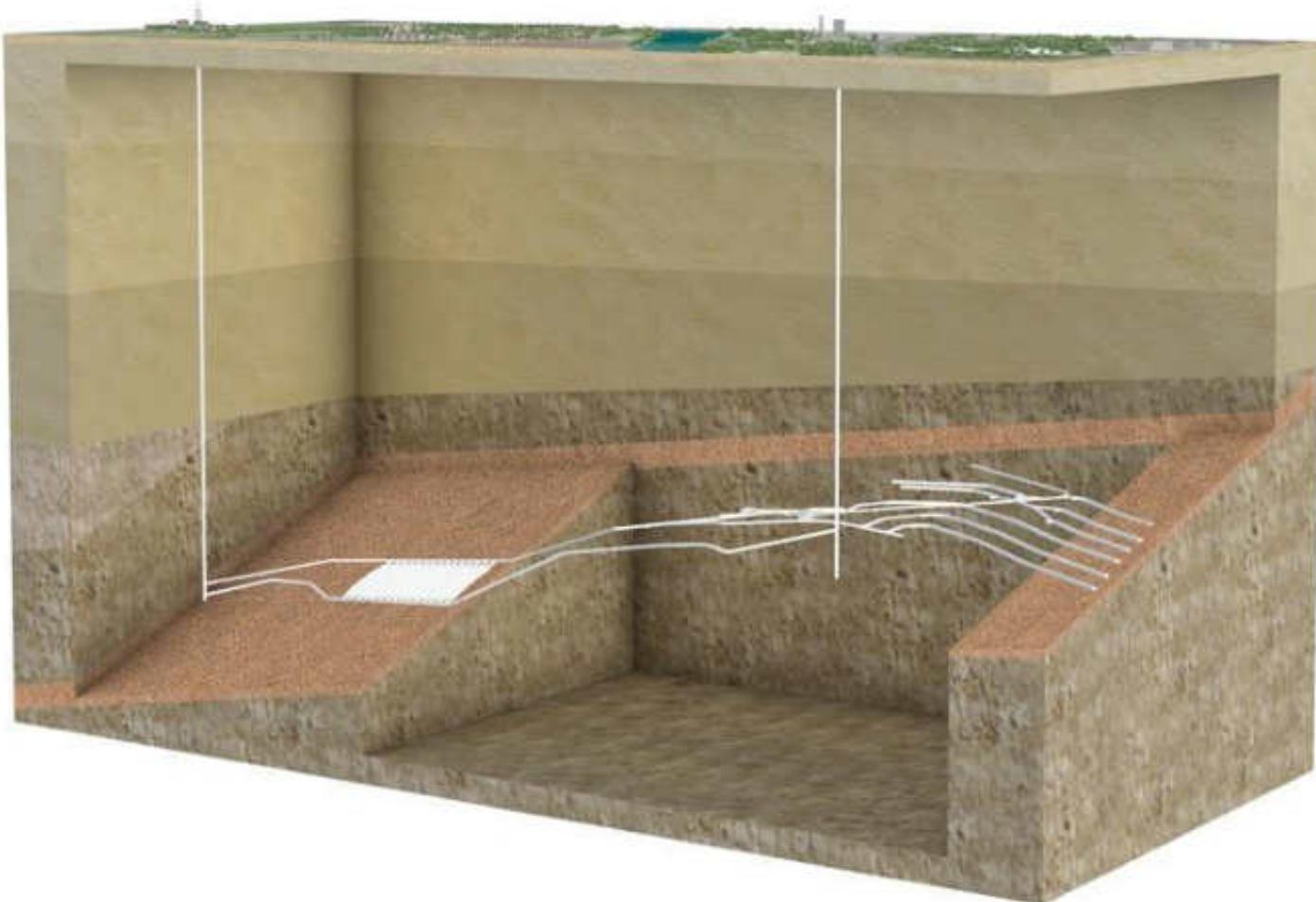


- 2007+: Ausführungsplanung und Beginn der Arbeiten zur über- und untertägigen Umrüstung
- Fertigstellungstermin 2027
- 303.000 m<sup>3</sup> Abfallgebindevolumen
- Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung

# 1 Einführung – Baumaßnahmen Errichtung Konrad



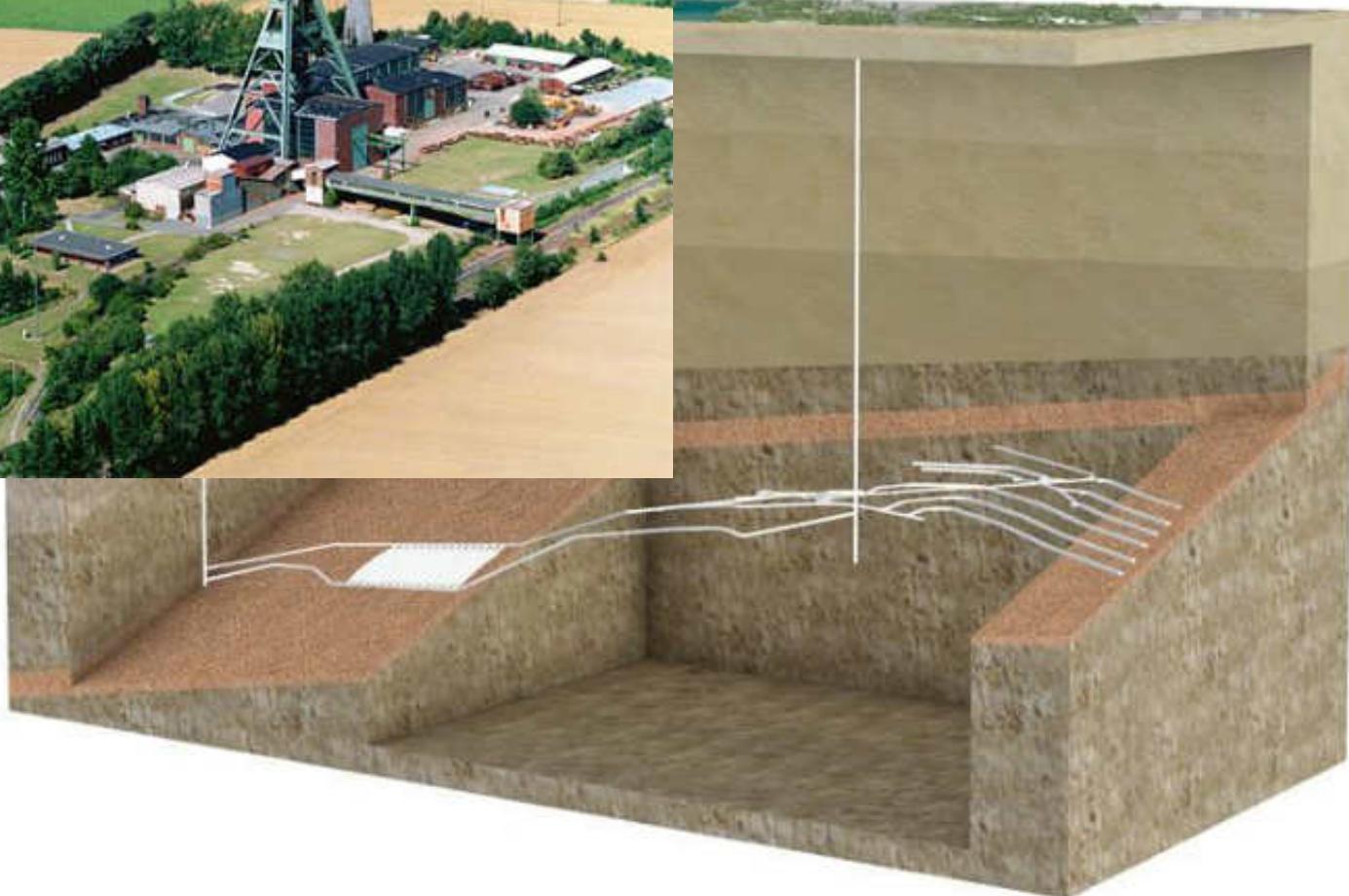
BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG



# 1 Einführung – Baumaßnahmen Errichtung Konrad



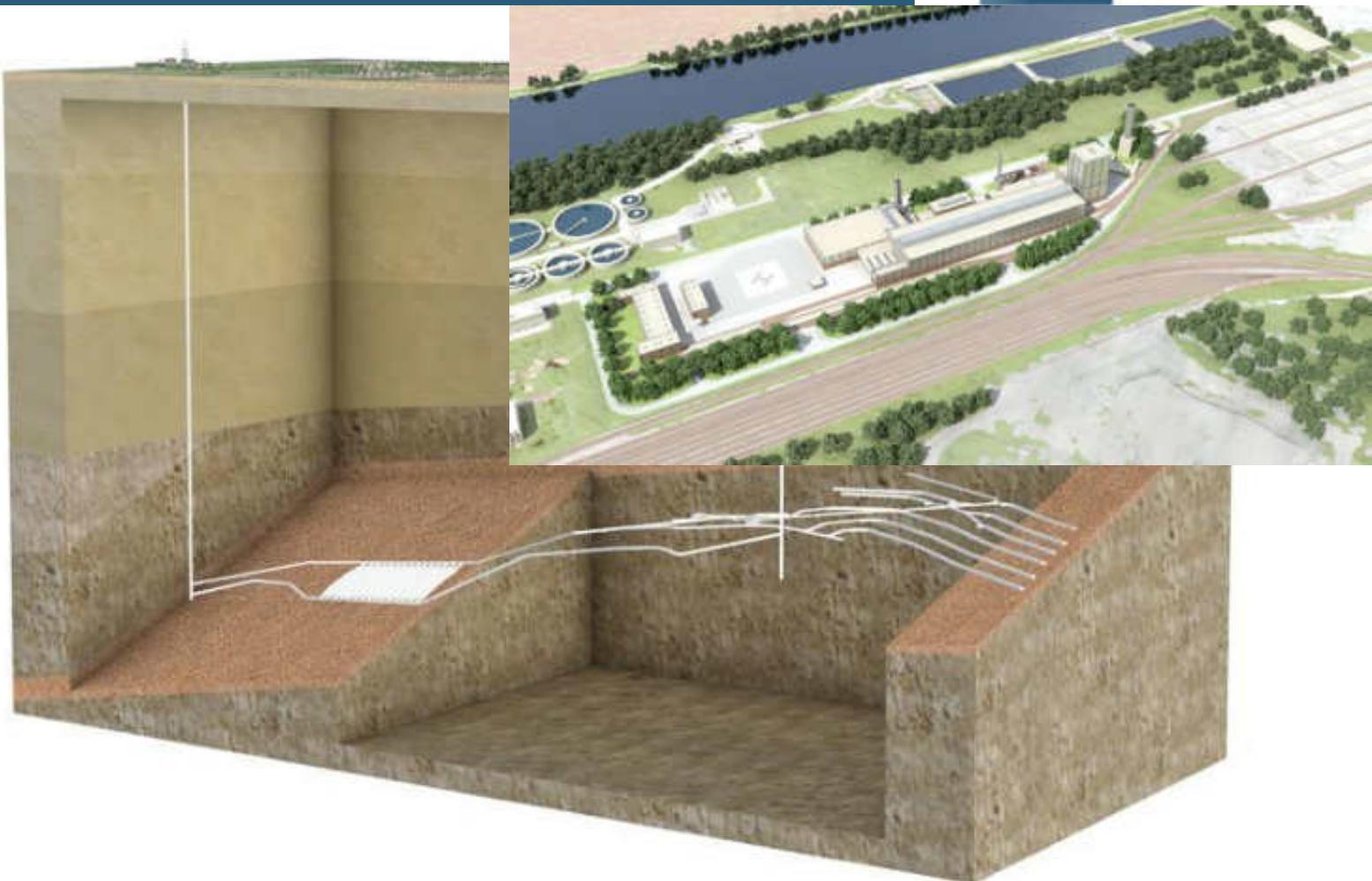
BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG



# 1 Einführung – Baumaßnahmen Errichtung Konrad



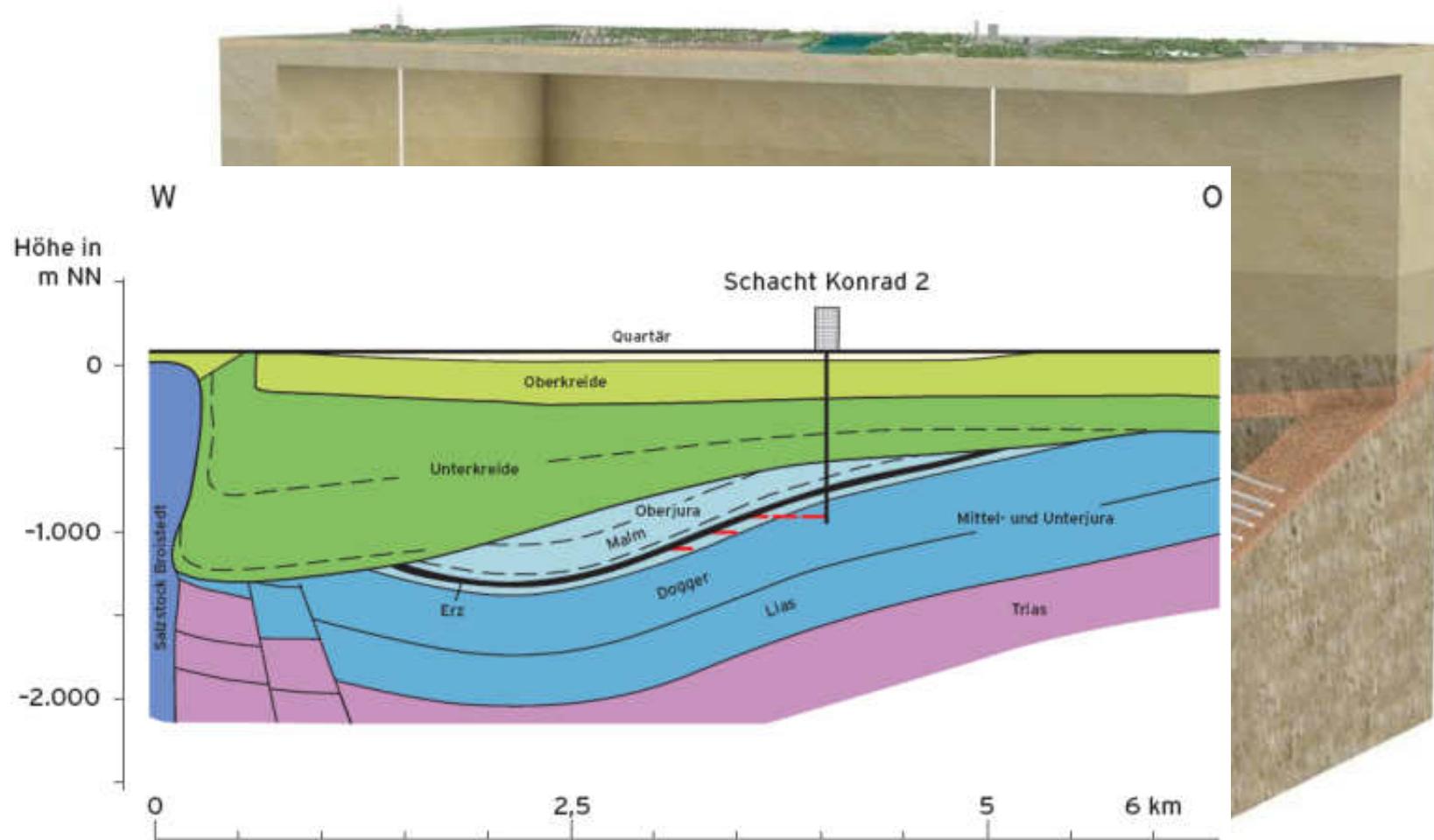
BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG



# 1 Einführung – Baumaßnahmen Errichtung Konrad



BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG





## Aufgabenstellung

- Planung und Bemessung des Ausbaus des Füllortes und der Grubennebenräume einschl.
- Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Gebirge & Ausbausystem

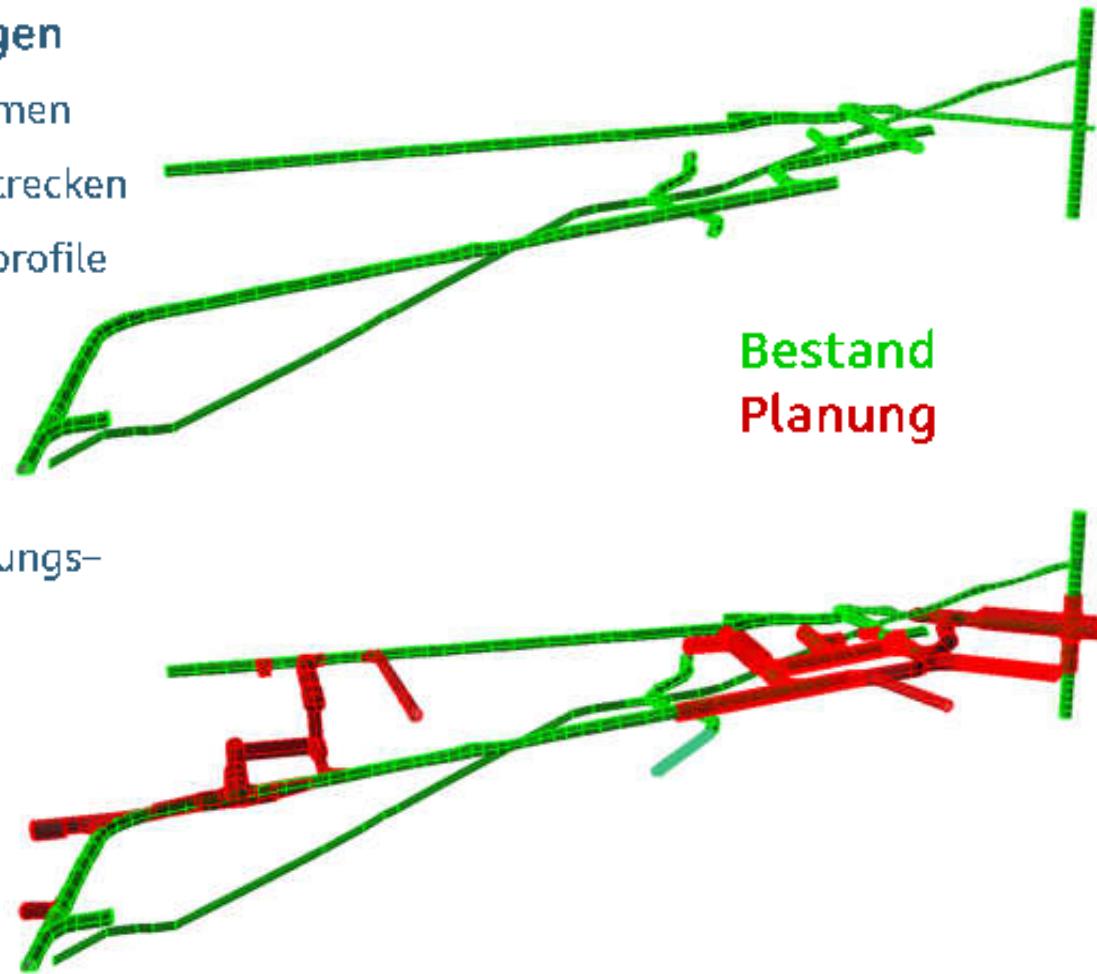
## Anforderungen

- Betriebsdauer  $\geq 40$  a
- Sanierungs- und Instandhaltungsfreiheit während Betrieb (Kontrollbereich)
- Konformität mit PFB

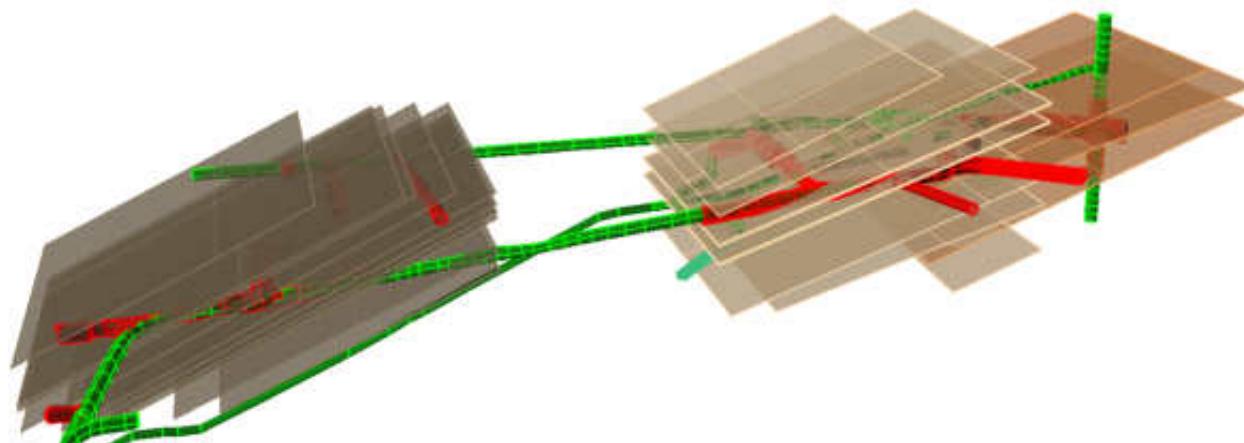


### Bergbauliche Randbedingungen

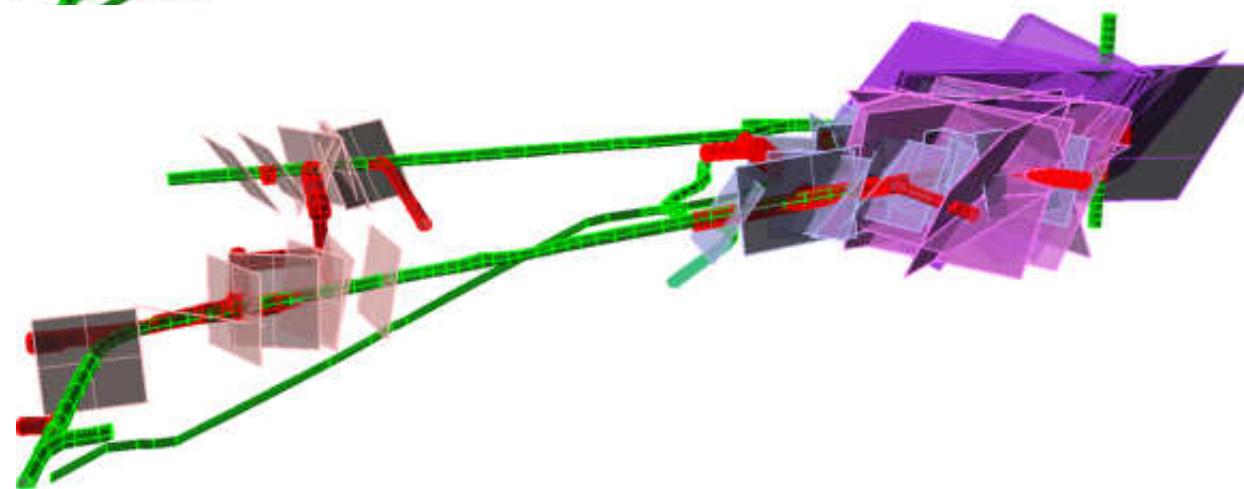
- Neuauffahrung von Grubenräumen und Aufweitung der Bestandsstrecken
- zu gewährleistende Lichtraumprofile mit z.T. > 100 m<sup>2</sup>
- Teufenlage ca. 850 – 900 m
- Teufendruck  $\geq 21 \text{ MPa}$
- bereichsweise hoher Durchbauungsgrad



### Geologische/tektonische Randbedingungen



Schichtfolge



Störungen

### Geologische/tektonische Randbedingungen



Eisenoolith  
(Unteres  
Erzlager)

### Geologische/tektonische Randbedingungen



Erzkalk-  
Serie

[Source: DBE, Martin]

### Geologische/tektonische Randbedingungen



[Source: DBE, Martin]

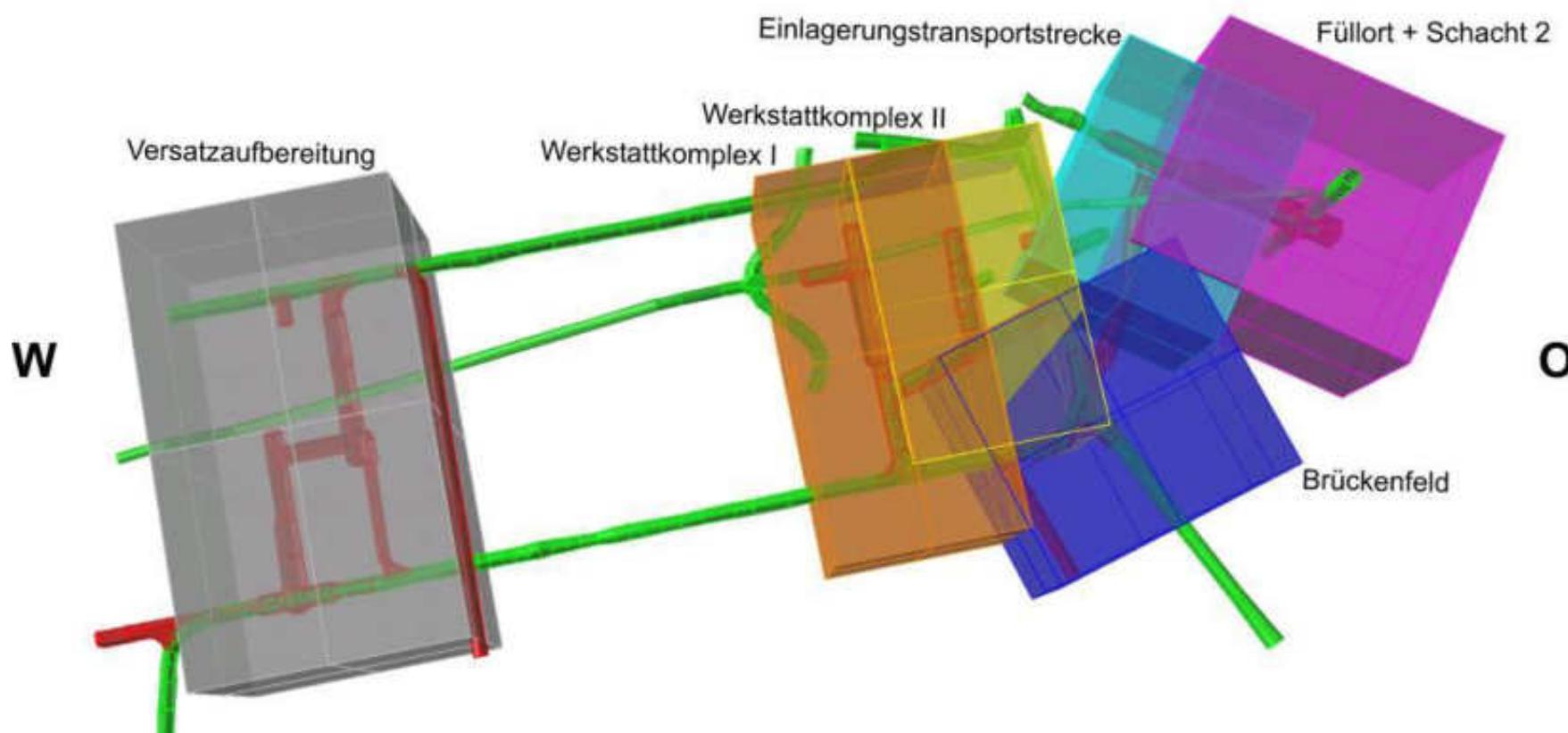
Fladen-  
tonstein-  
Serie

### 3 Berechnungsmodell – Prognoseberechnungen

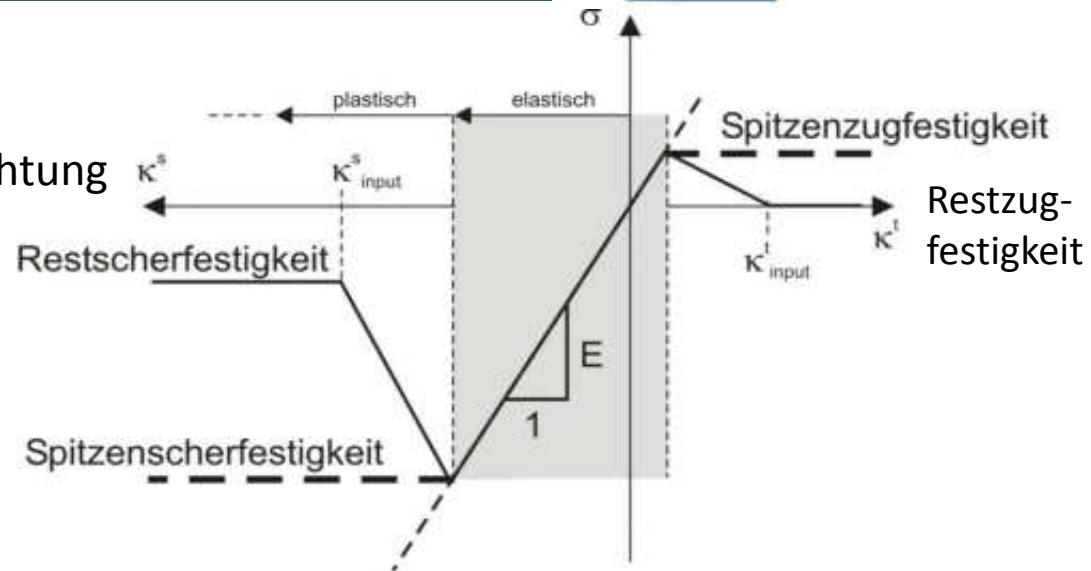
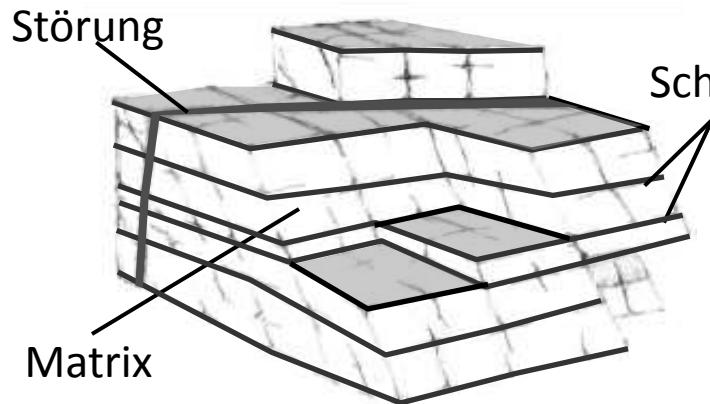


BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG

- 7 Teilmodelle, mittlere Elementanzahl 3 Mio. (15 ... 20 GB RAM)
- Berechnungsdauer je Bauzischenzustand ca. 5 bis 8 h



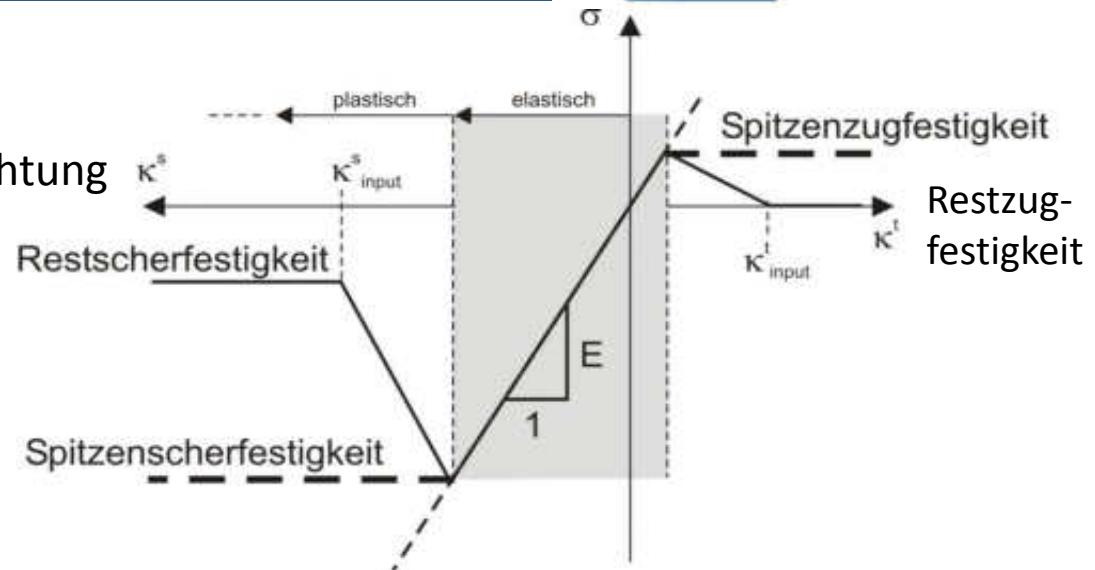
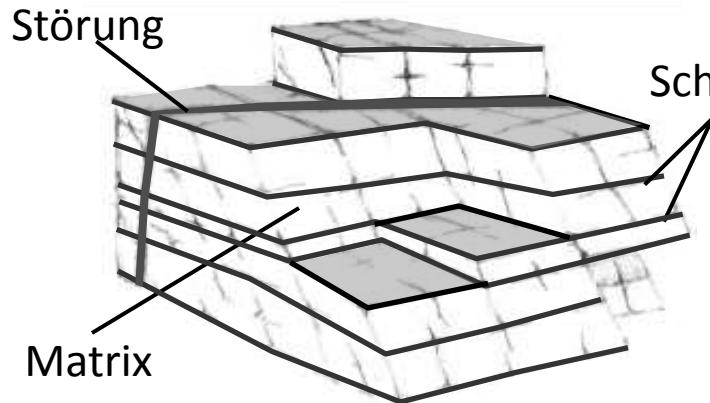
### 3 Berechnungsmodell – Prognoseberechnungen



Gebirge: elasto-plastisches Stoffmodell (M-C) mit Festigkeitsanisotropie (Matrix, Schichtung) & Entfestigung

Störungen: elasto-plastisches Stoffmodell (M-C) mit Festigkeitsanisotropie, Festigkeiten in Höhe der Restscherfestigkeiten des Gebirges

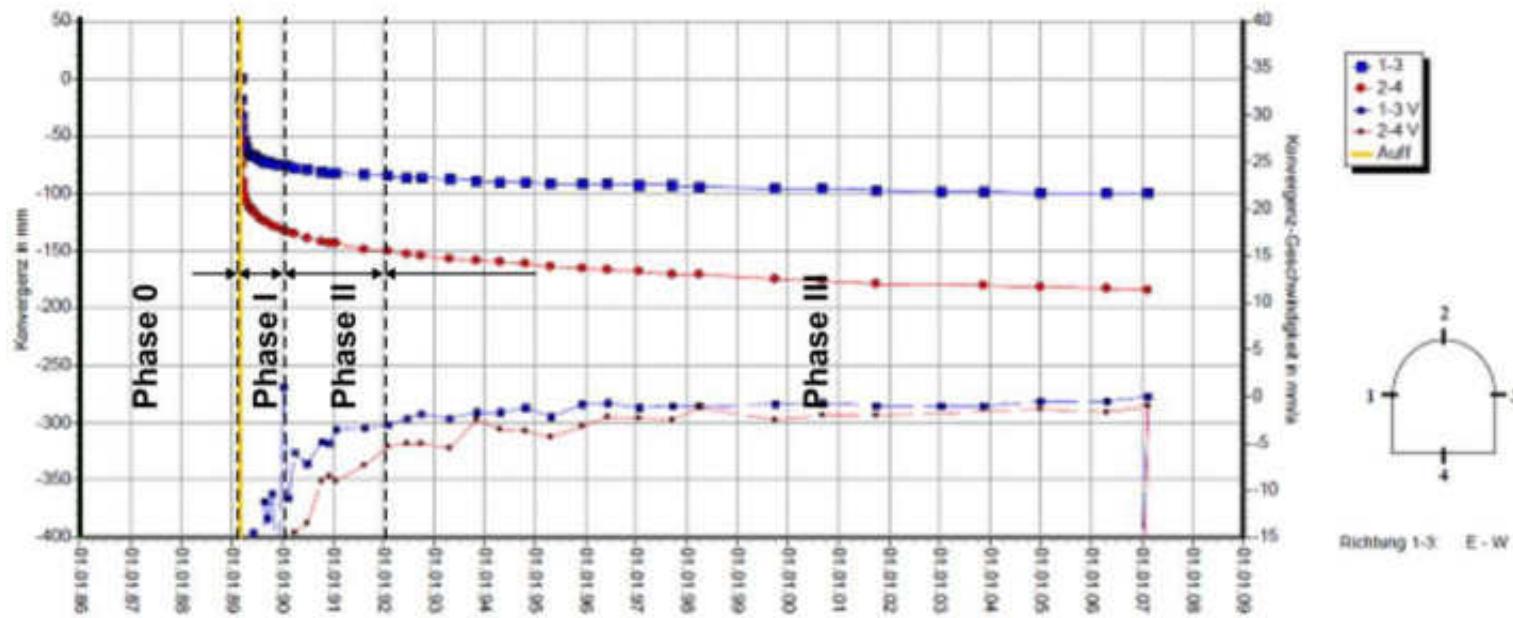
### 3 Berechnungsmodell – Prognoseberechnungen



Anker: Simulation durch Ersatzkohäsion auf Matrix und Schichtung im Bereich der Ankerlänge (jedoch max. 8 m)

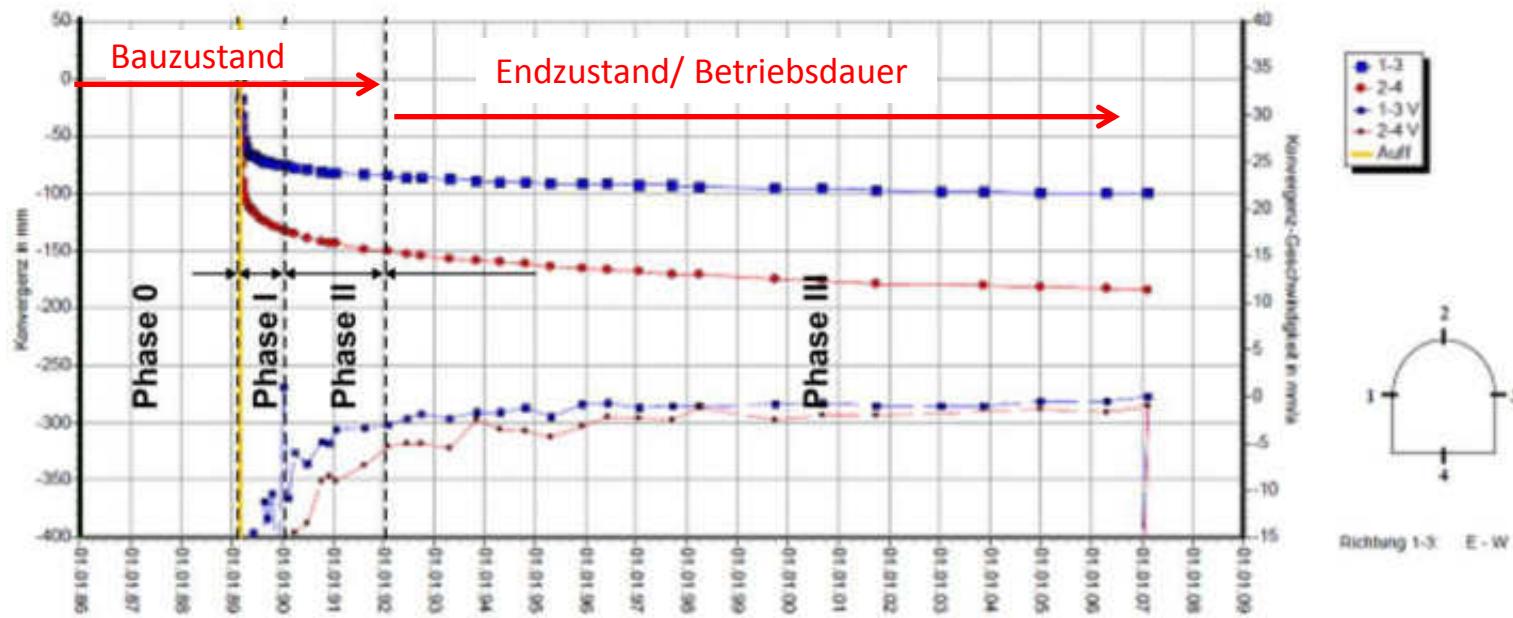
Spritzbetonausbau: Schalenelemente, linear elastisch

#### Kalibrierung des Gebirgsverhaltens auf Basis markscheiderischer Langzeitmessungen



- Phase 0: messtechnisch nicht erfassbare Konvergenzen
- Phase I: sofort auftretende Konvergenzen
- Phase II: abnehmende Konvergenzrate
- Phase III: quasi konstante Konvergenzraten

#### Kalibrierung des Gebirgsverhaltens auf Basis markscheiderischer Langzeitmessungen



- Phase 0: messtechnisch nicht erfassbare Konvergenzen
- Phase I: sofort auftretende Konvergenzen
- Phase II: abnehmende Konvergenzrate
- Phase III: quasi konstante Konvergenzraten
- Unterscheidung von Phase 0-II und Phase III durch gesonderte Parametersätze**
- } Bauzustand  
} Endzustand / Betriebsphase

#### Kalibrierung des Gebirgsverhaltens auf Basis markscheiderischer Langzeitmessungen

Annahmen:

→ Übertragbarkeit von Messstationen mit Konrad Standardprofil auf Planung ist gegeben.

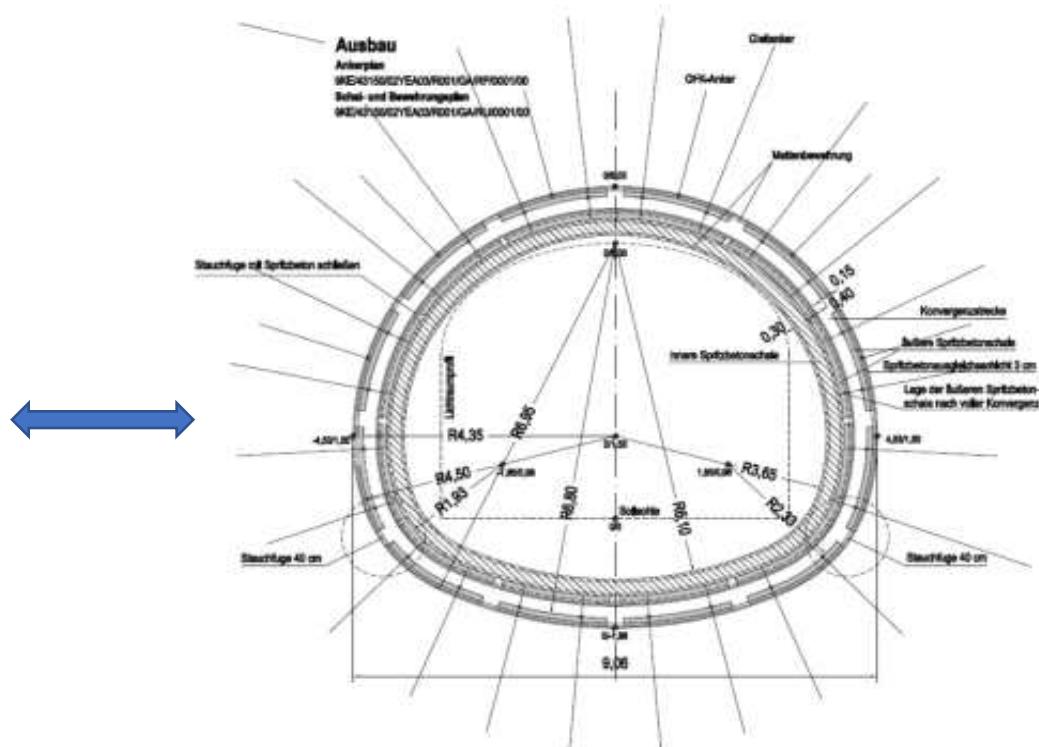
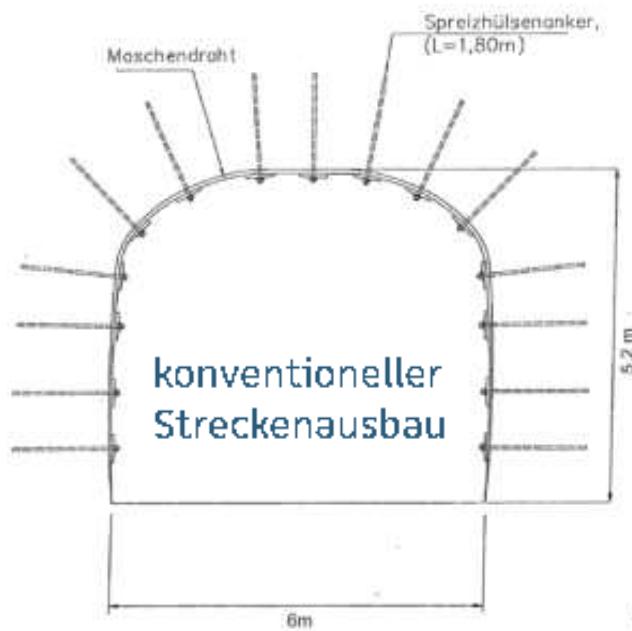
D.h. abweichender Querschnitt und Ausbausystem

(... zum damaligen ZP keine mit Planung vergleichbaren Messstationen verfügbar)

Kalibrierung des Gebirgsverhaltens auf Basis markscheiderischer Langzeitmessungen

#### **Annahmen:**

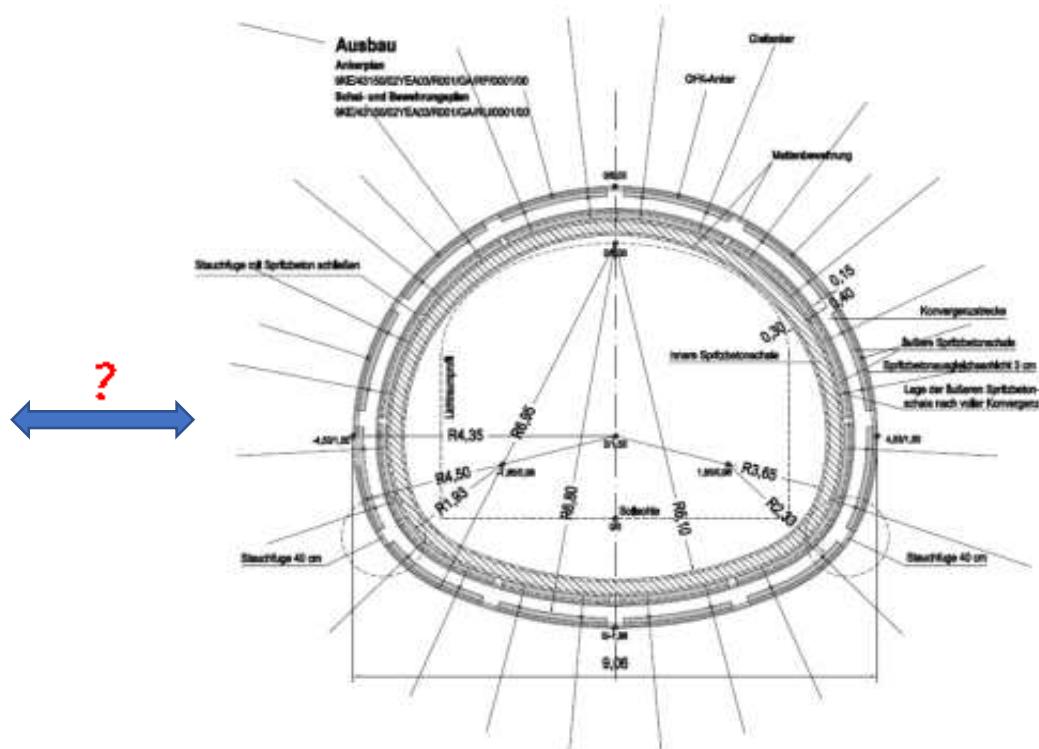
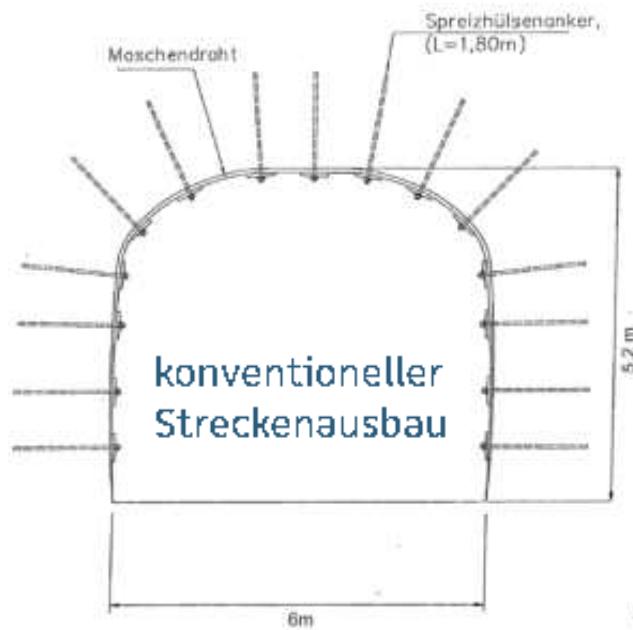
→ Übertragbarkeit von Messstationen mit Konrad Standardprofil auf Planung ist gegeben.



#### Kalibrierung des Gebirgsverhaltens auf Basis markscheiderischer Langzeitmessungen

Annahmen:

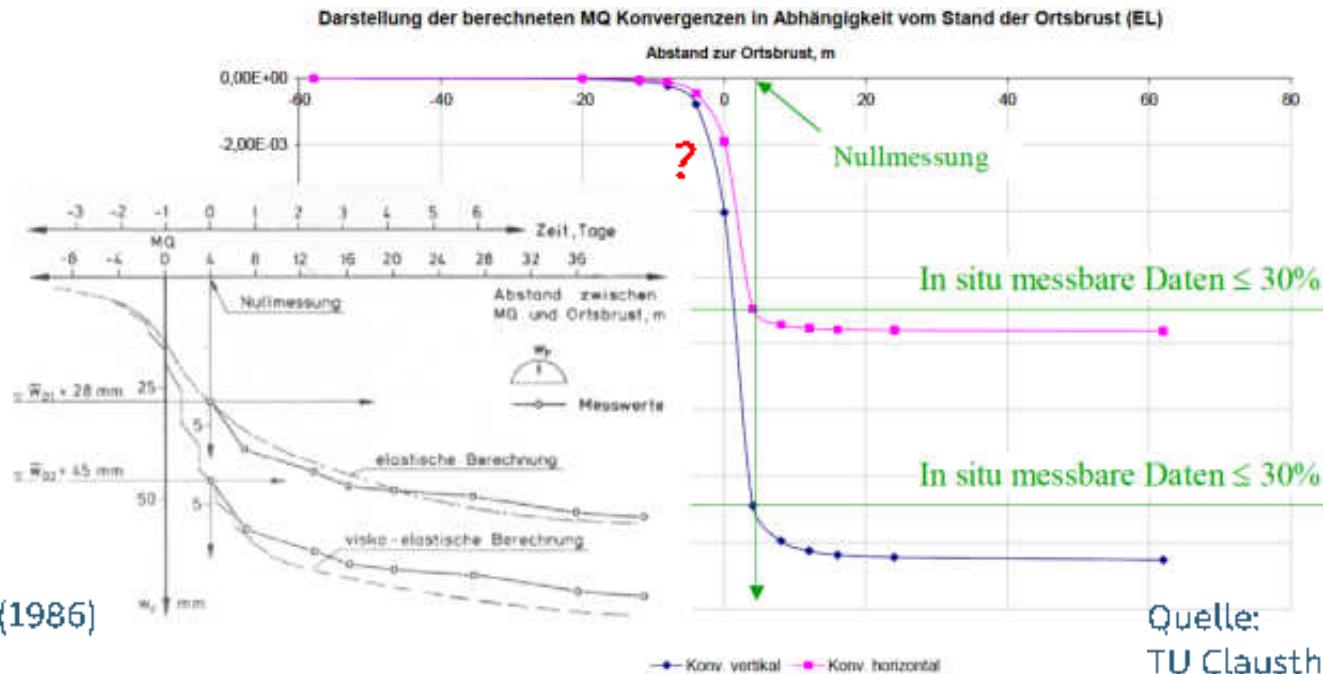
→ Übertragbarkeit von Messstationen mit Konrad Standardprofil auf Planung ist gegeben.



#### Kalibrierung des Gebirgsverhaltens auf Basis markscheiderischer Langzeitmessungen

##### Annahmen:

- Übertragbarkeit von Messstationen mit Konrad Standardprofil auf Planung ist gegeben.
- Phase 0 (nicht erfasste Konvergenzen) wird in der Größenordnung von Phase 1 + 2 abgeschätzt.



Quelle:  
Rokahr & Lux (1986)

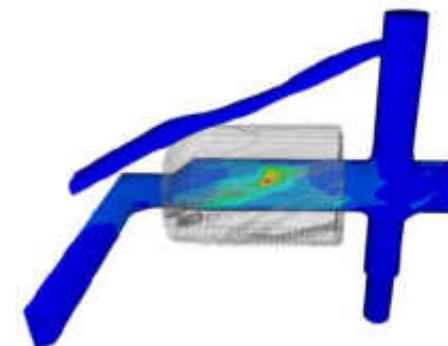
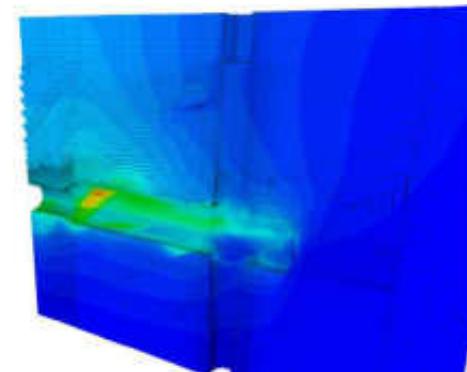
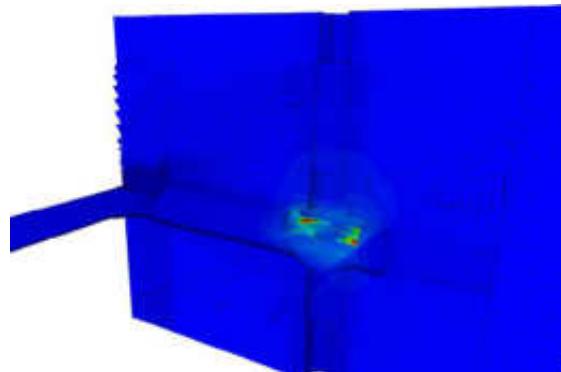
#### Kalibrierung des Gebirgsverhaltens auf Basis markscheiderischer Langzeitmessungen

##### Annahmen:

- Übertragbarkeit von Messstationen mit Konrad Standardprofil auf Planung ist gegeben.
  - Phase 0 (nicht erfasste Konvergenzen) wird in der Größenordnung von Phase 1 + 2 abgeschätzt.
  - Lineare Extrapolation über den Zeitraum der Betriebsphase.
- ↳ konservative Ansätze ⇒ auf der sicheren Seite liegende Gebirgsparameter

#### Berechnungsablauf

- ✓ Initialspannungszustand  $S_v$  = lithostatischer Druck;  $\sigma_h = \sigma_H = 0,5 * \sigma_v$   
Sekundärspannungszustand infolge Auffahrung der Bestandsstrecken
- ✓ Änderungen im SVZ infolge Streckenerweiterung/ Neuauffahrung
  - i. Lastfall Bauzustand (inkl.  $\phi/c$ -Reduktion zur Ermittlung des Standsicherheitsniveaus)  
↓ Parametertausch
  - ii. Lastfall Endzustand/ Betriebsdauer



#### Nachweisführung

##### i. Bauzustand

Verwendung Parametersatz für Phase 0-II

##### Nachweis der Standsicherheit

- Berechnung konvergiert
- Verschiebungen entsprechen einer ingenieur-geologischen Abschätzung und Erfahrungen
- plastische Deformationen zeigen keine Ausbildung von Bruchkörpern
- $\phi/c$ -Reduktion belegt Robustheit bis mindestens  $n_{Fellenius} = 1,3$   
("globale Standsicherheit")

##### ii. Endzustand/ Betriebsdauer

Verwendung Parametersatz für Phase III

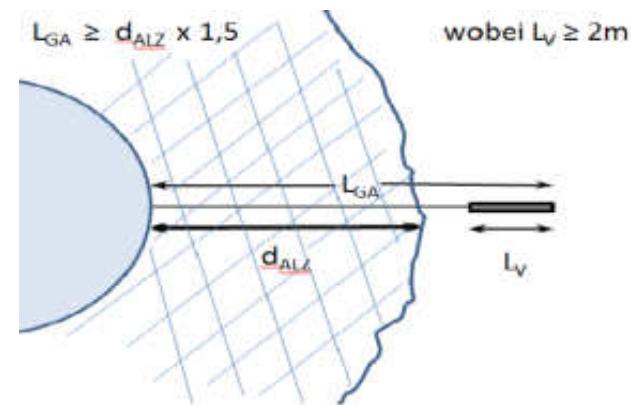
##### Nachweis der Standsicherheit-/

##### Gebrauchstauglichkeit

- Parametertausch nach Einbringen der Schalenelemente
- Ausbau ist bemessbar und erfüllt die Anforderungen über die Betriebsdauer Entscheidung über:
  - einschaligen Ausbau (starres Ausbausystem)
  - zweischaligen Ausbau (nachgiebiges Ausbausystem)

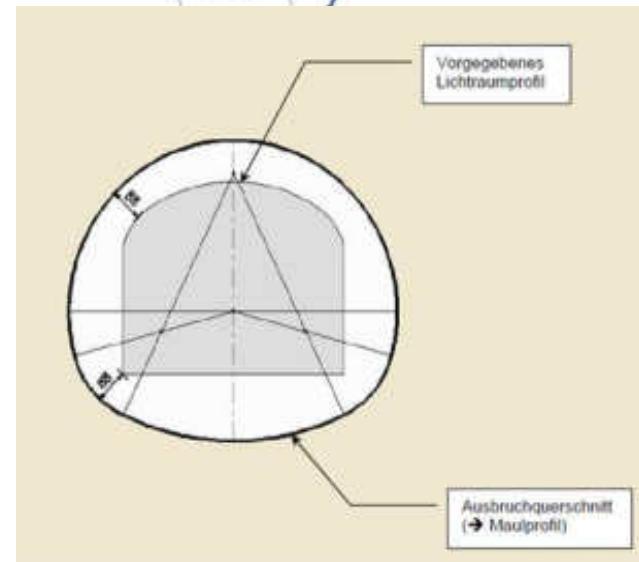
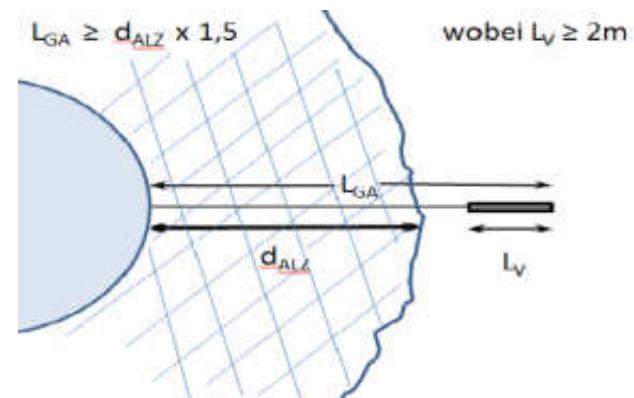
#### Dimensionierungsgrundsätze / Kriterien sowie weitere konservative Berechnungsannahmen

- Ermittlung der Gleitankerlänge unter Berücksichtigung eines konstruktiven Zuschlags (1/3 der Ankerstrecke im Unverritzten)

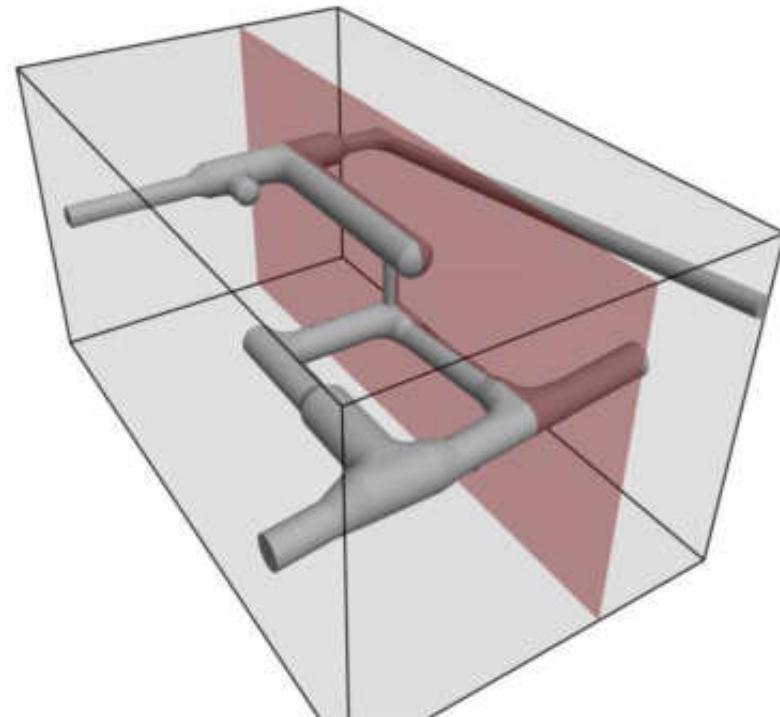


#### Dimensionierungsgrundsätze / Kriterien sowie weitere konservative Berechnungsannahmen

- Ermittlung der Gleitankerlänge unter Berücksichtigung eines konstruktiven Zuschlags (1/3 der Ankerstrecke im Unverritzten)
- Ermittlung des Ausbruchsprofils unter Berücksichtigung einer Konvergenzzulage (2 x berechnete Konturverschiebung)
- Vernachlässigung der statischen Wirksamkeit der geschlitzten Außenschale in der Konvergenzphase
- Grubenraum erhält Überzugswirkungen aller benachbarter Grubenräume (abdeckende Berechnungssequenz  $\neq$  realer Bauablauf)
- „Instantane“ Auffahrung (max. Lastumlagerungen)
- Auslegung der Anker gegen volle Konturverschiebung (unabhängig vom real verspäteten Einbau)



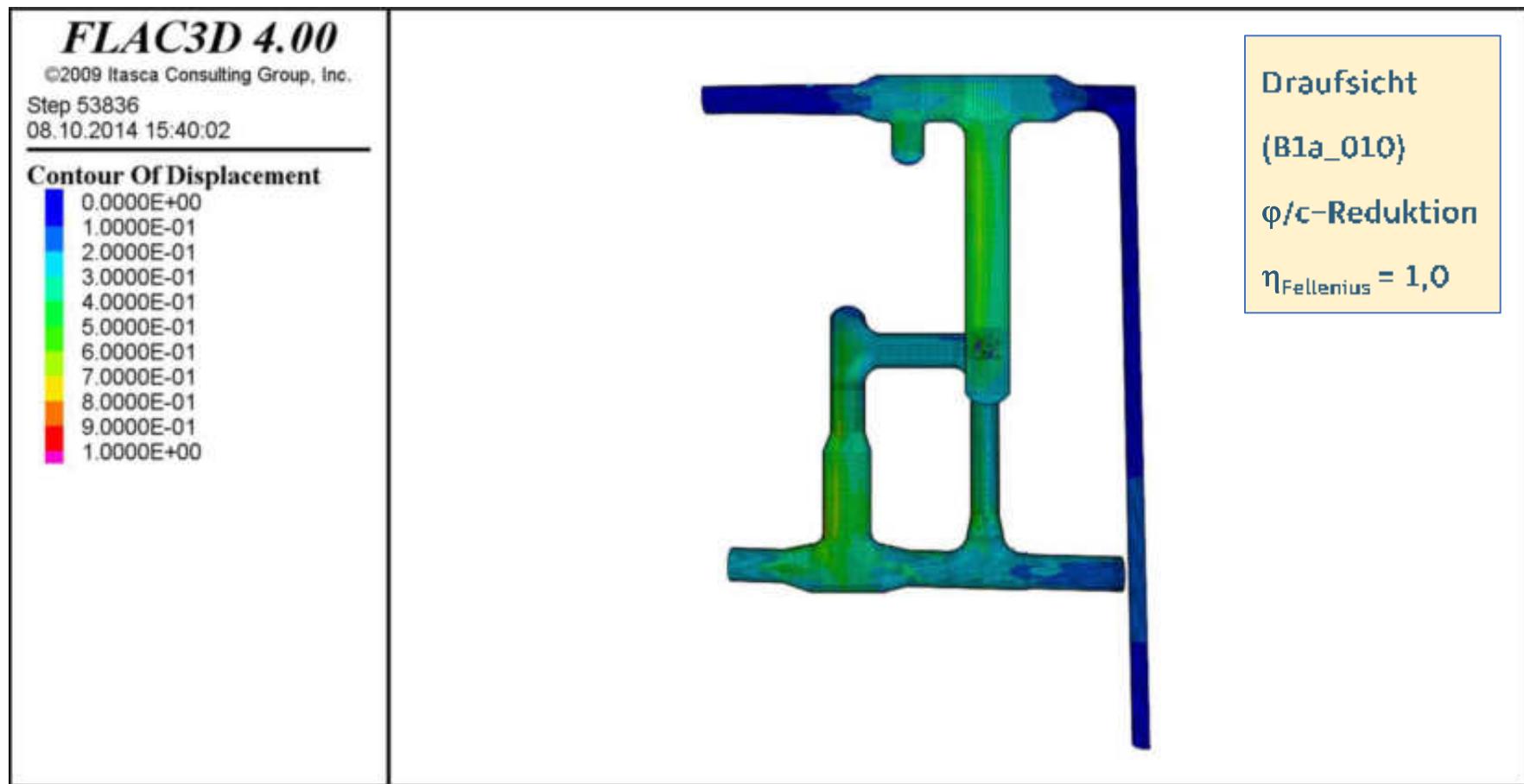
### Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage



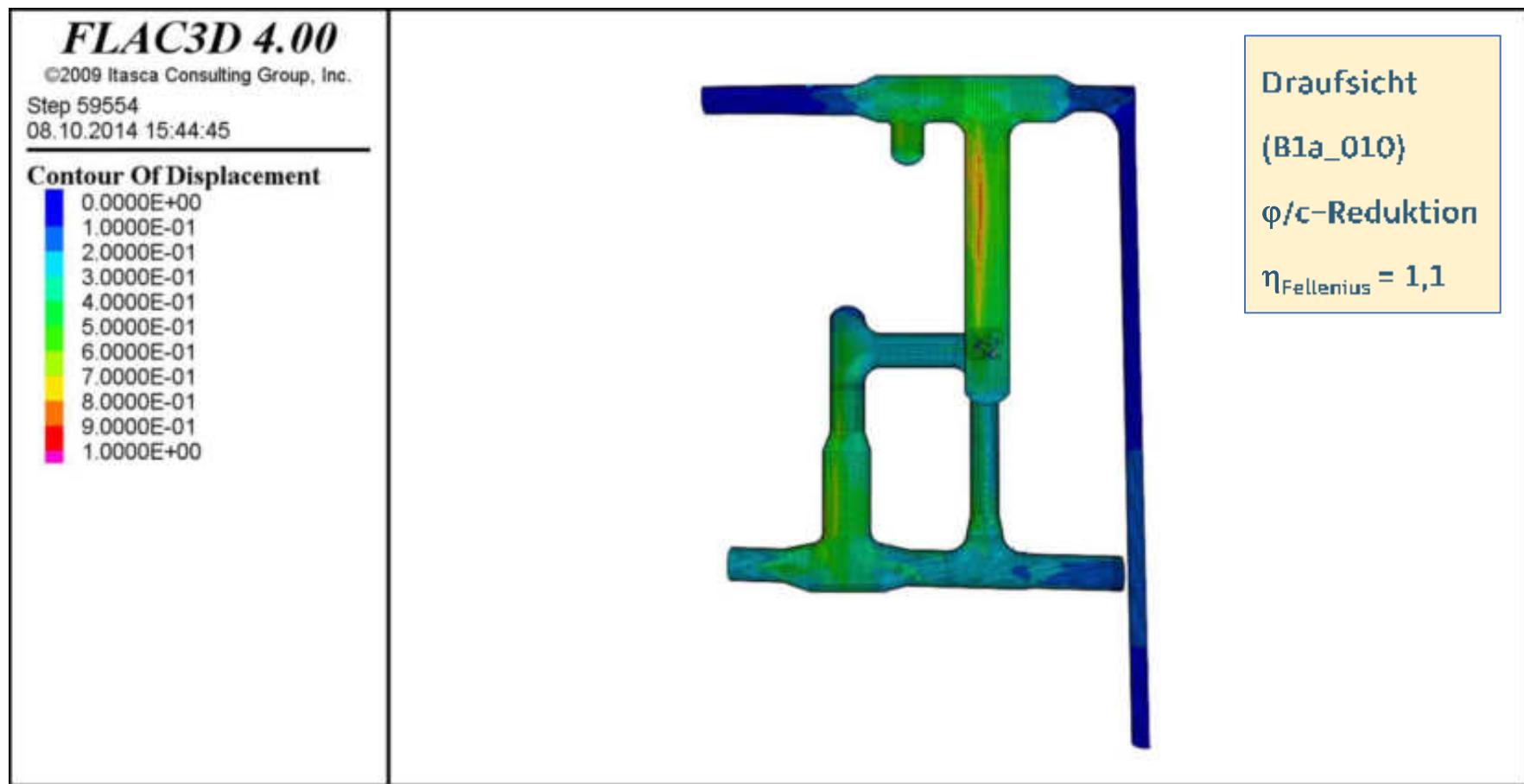
Rechnerische Annahmen Prognoseberechnung:

- Ankerdichte 1 A/m<sup>2</sup> bei
- 150 kN Traglast
- Überzugswirkung aus anderen Grubenräumen

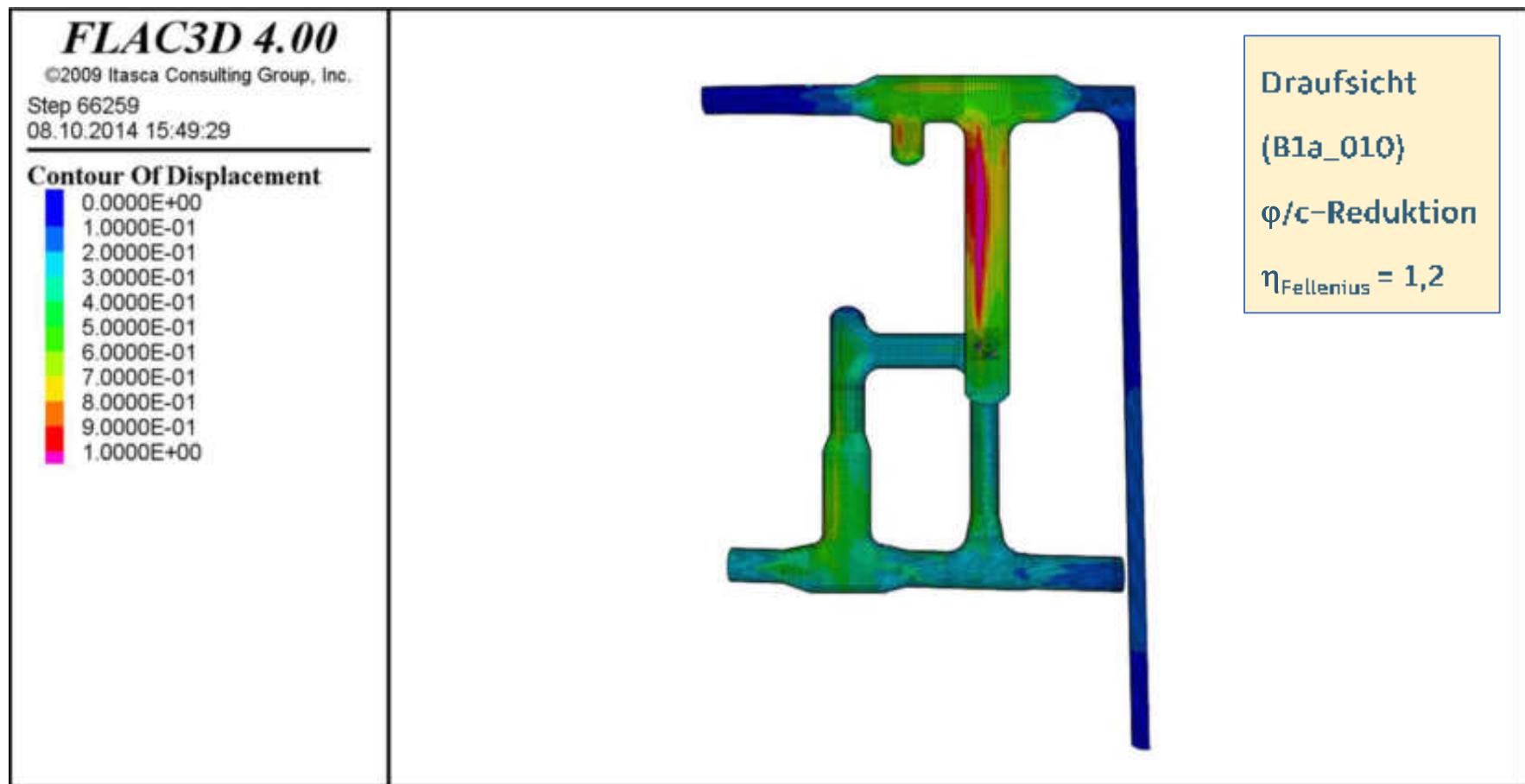
### Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage



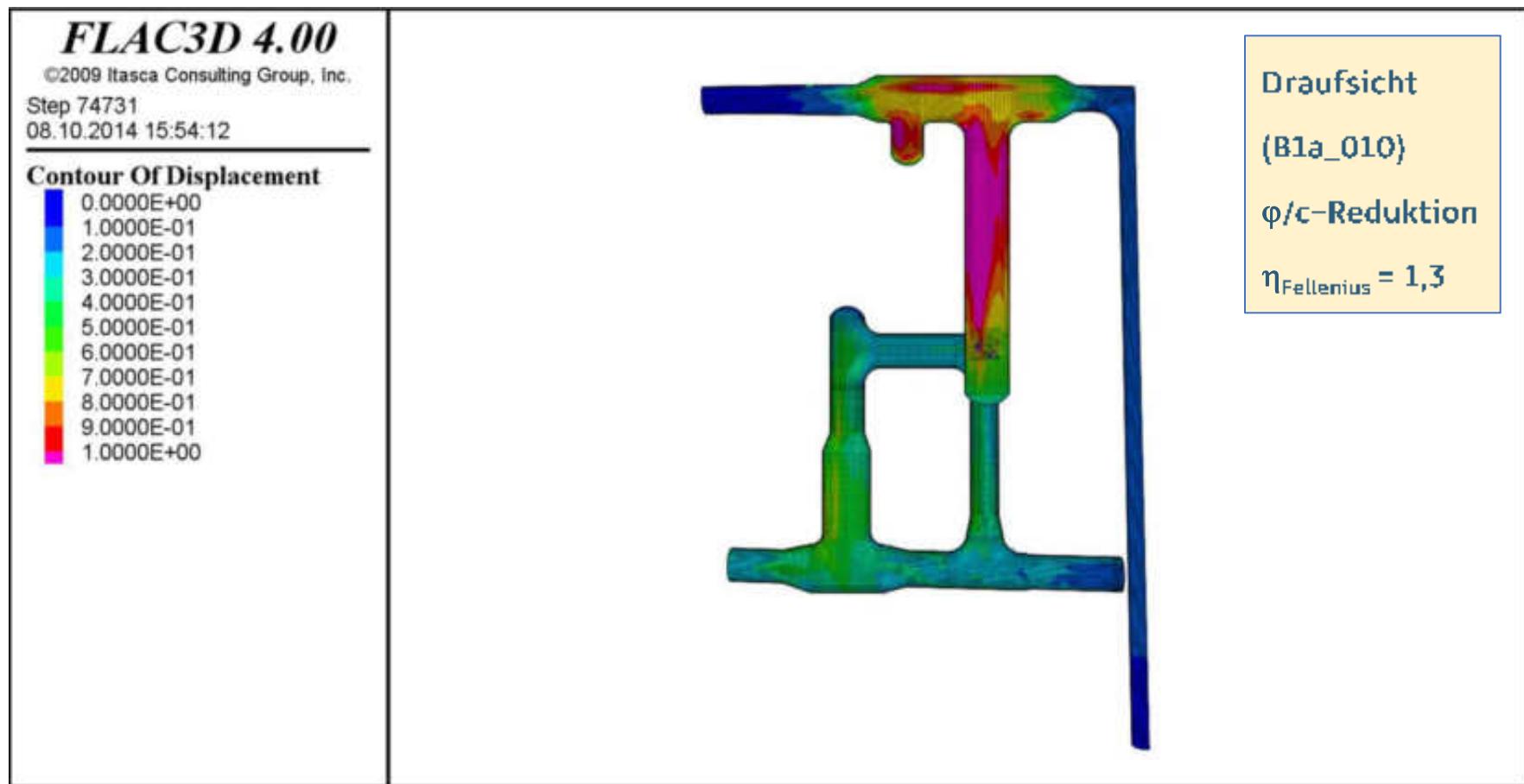
### Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage



### Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage

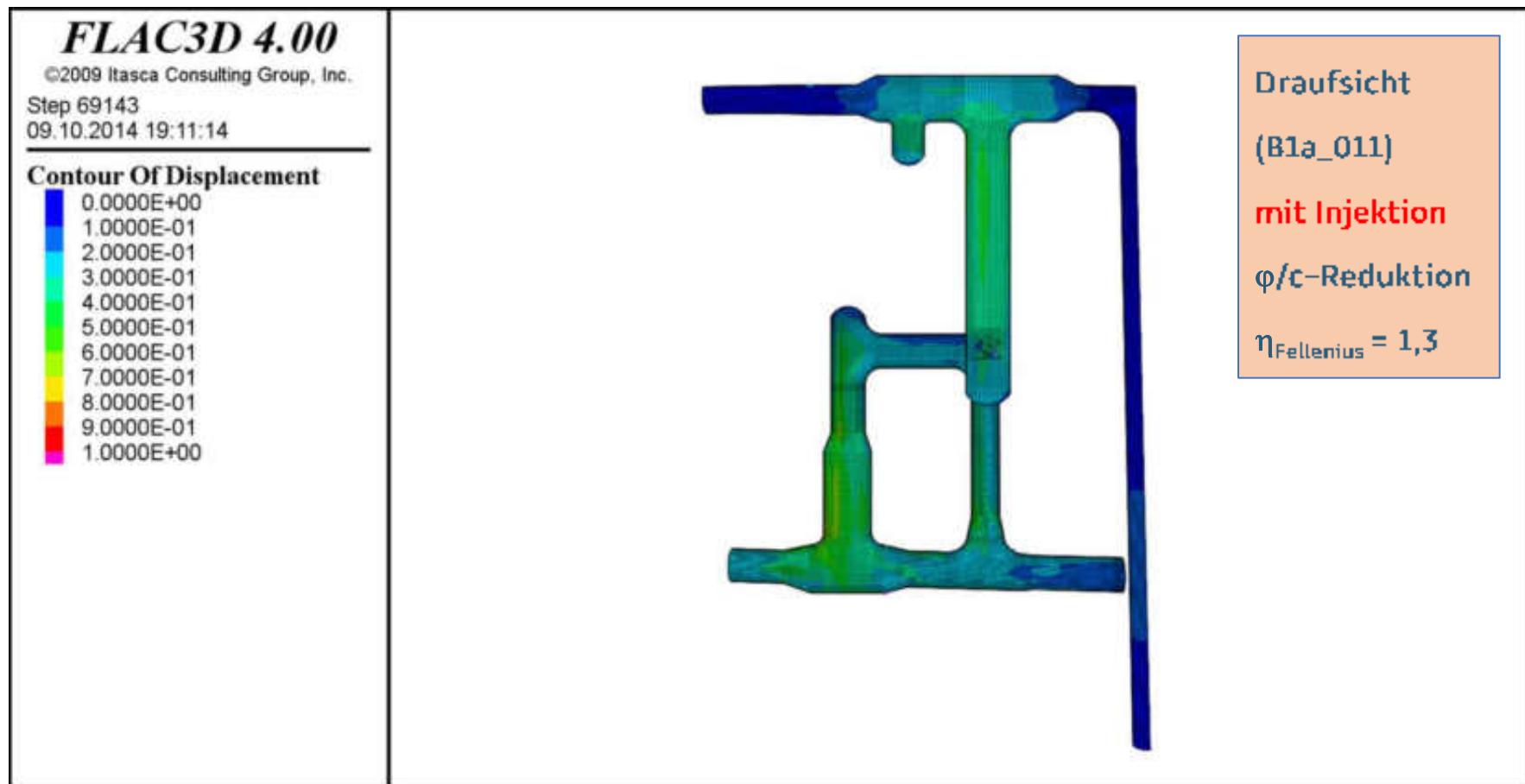


### Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage

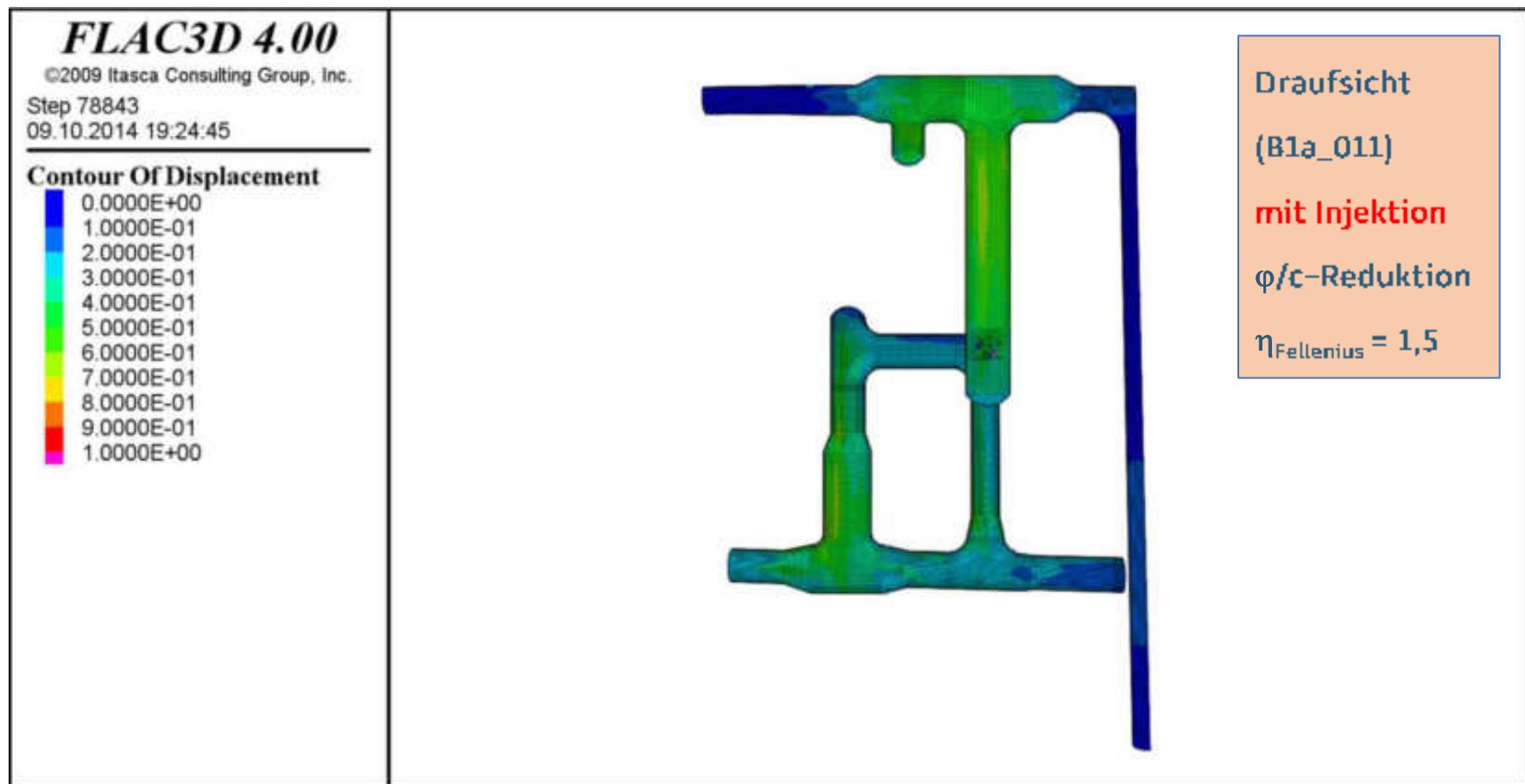


## 4 Ergebnisse von Prognoseberechnungen

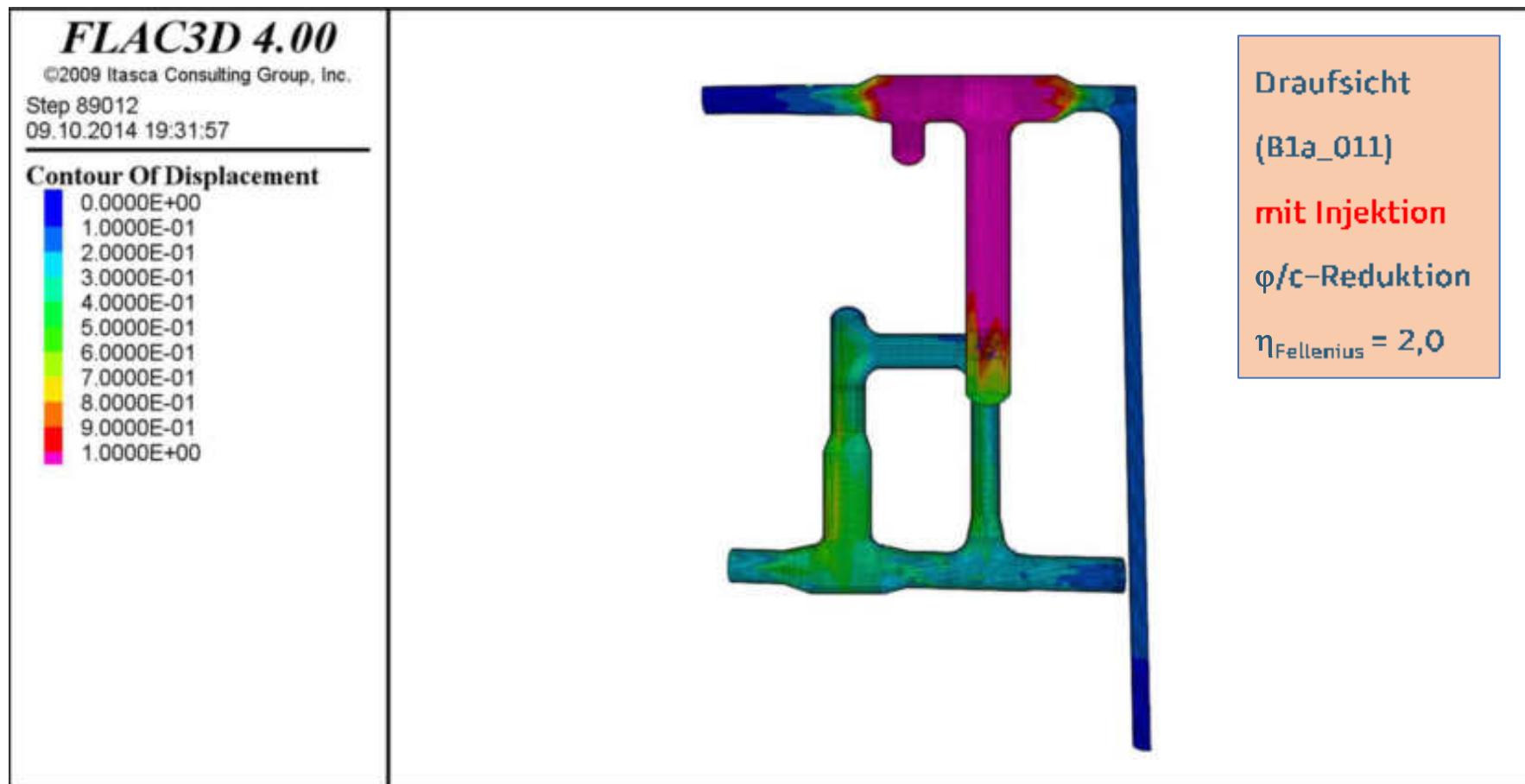
### Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage



### Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage



### Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage

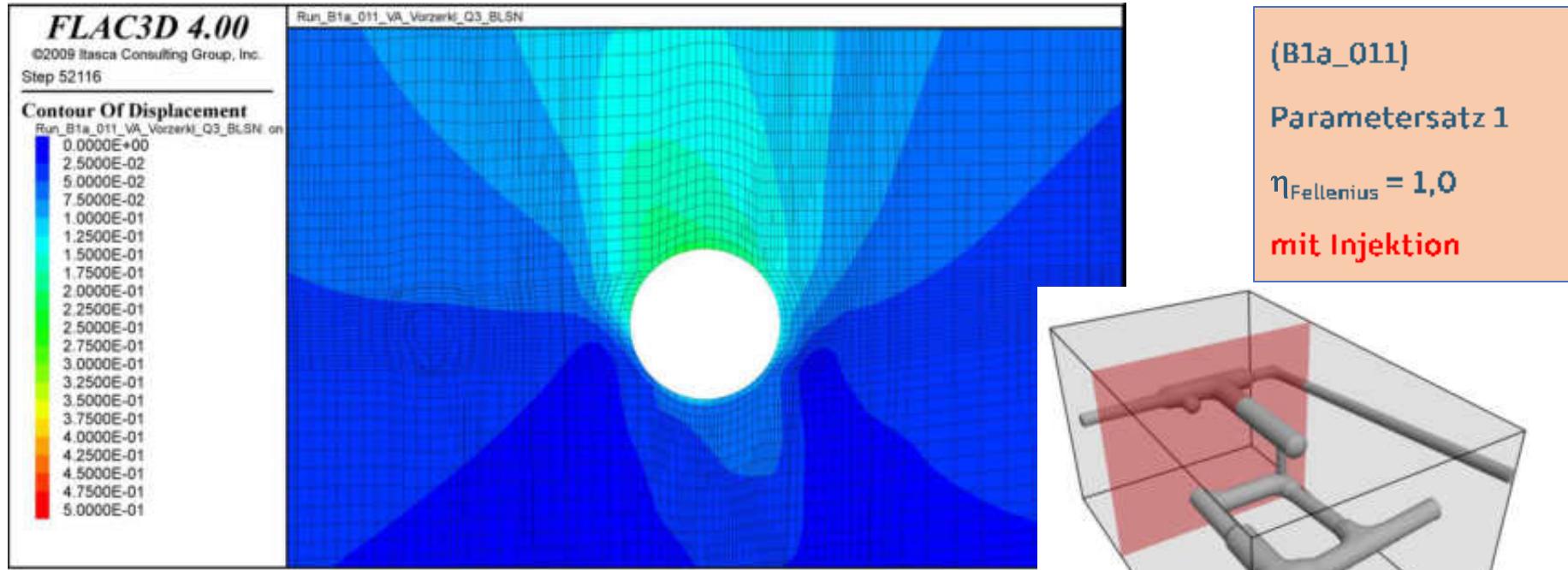


## 4 Ergebnisse von Prognoseberechnungen



BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG

### Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage



$u_{\max} \approx 25 \dots 35 \text{ cm}$

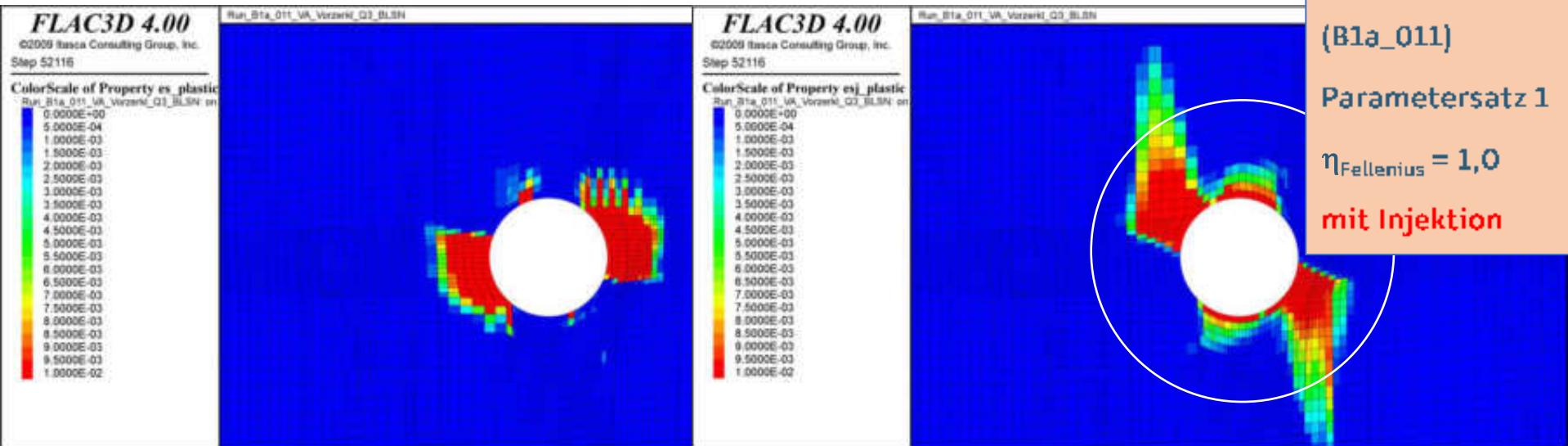
→ nachgiebiges Ausbausystem (2-schichtig mit Gleitankern)

## 4 Ergebnisse von Prognoseberechnungen

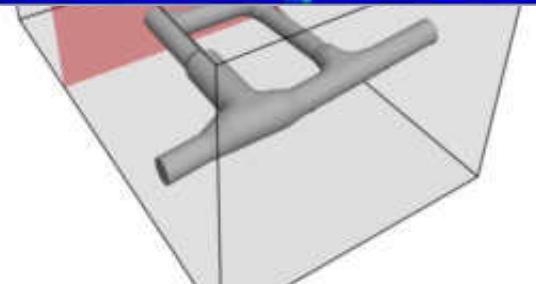


BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG

### Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage



ALZ  $\approx 9$  m



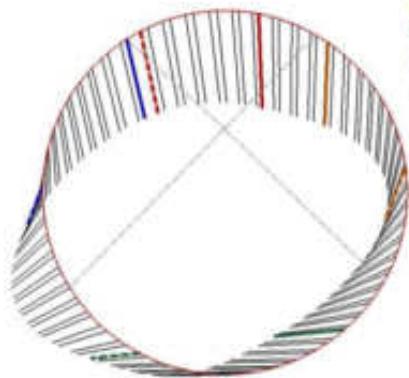
### Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage

Vorbemessung der Schale: Variantenberechnungen

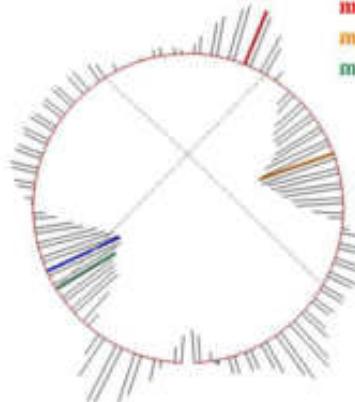
- 30 cm (ohne Injektion)
  - 50 cm (ohne Injektion)
  - 50 cm (mit Injektion)
- } nicht bemessbar, bzw. nicht ausführbar

(B1b\_002)  
Parametersatz 2  
**mit Injektion**

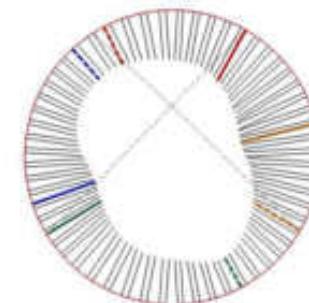
Verschiebungen der Schale



Momente



Normalkräfte



### Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage

#### 1. Vorgaben Fachplaner:

- kombinierte Gleitanker/CFK-Ankerung (16 m / 6 m)
- geschlitzte 20 cm-Schale mit Q188-Stahlmatte bewehrt
- Erfordernis einer Gebirgsinjektion

## 5 Optimierung des Ausbausystems unter Anwendung der Beobachtungsmethode nach EC7



BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG

### Ausbausystem mit Gleitankerung und geschlitzter Schale



### 1. Optimierung BGE:

- Substitution der Gleitanker
- Erhöhung des Ausbauwiderstandes der Ankerung von 150 kN auf 250 kN
- Erhöhung der Ankerdichte von 1 Anker/m<sup>2</sup> auf 1,5 Anker/m<sup>2</sup>

### Ergebnis:

- Der statische Nachweis gelingt auch ohne eine Injektion.
- Die prognostizierten Verschiebungen sind aber immer noch so groß (bis 30 cm), dass ein nachgiebiges Ausbausystem angeraten war.

### Weitere Vorgehensweise:

- Einsatz von hochduktilen vollverklebten Stahlankern in Anwendung der DIN 21521 „Gebirgsanker“
- Ersatz der 20 cm geschlitzten Außenschale gegen eine 7 cm geschlitzte Außenschale mit geringerer Segmentanzahl
- Installation eines tachymetrischen Ankerüberwachungssystems

## Auszug aus DIN21521

### **3.4 Benennung der Stahlanker nach der Nachgiebigkeit des Werkstoffes und der Konstruktion im Zugversuch**

#### **3.4.1 Starre Anker**

Starre Anker sind Gebirgsanker, deren Schaft aus einem Spannstahl nach DIN 4227 Teil 1, einem Betonstahl nach DIN 488 Teil 1, einem Baustahl nach DIN 17 100 oder ähnlichen Stählen besteht.

#### **3.4.2 Nachgiebige Anker**

Nachgiebige Anker sind Gebirgsanker, die ein Nachgieigkeitselement enthalten. Zu den nachgiebigen Ankern gehören Dehnanker und konstruktiv nachgiebige Anker.

Dehnanker sind Gebirgsanker, deren Schaft aus einem Stahl mit erhöhter Nachgiebigkeit besteht (z.B. Austenitischer Stahl).

Konstruktiv nachgiebige Anker sind Gebirgsanker, die eine Längenänderung mit Hilfe konstruktiver Maßnahmen zulassen (z.B. Gleitanker).

## 5 Optimierung des Ausbausystems unter Anwendung der Beobachtungsmethode nach EC7



BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG

### Kennlinie hochduktiler Ankerstahl

Hochduktiler Stahl

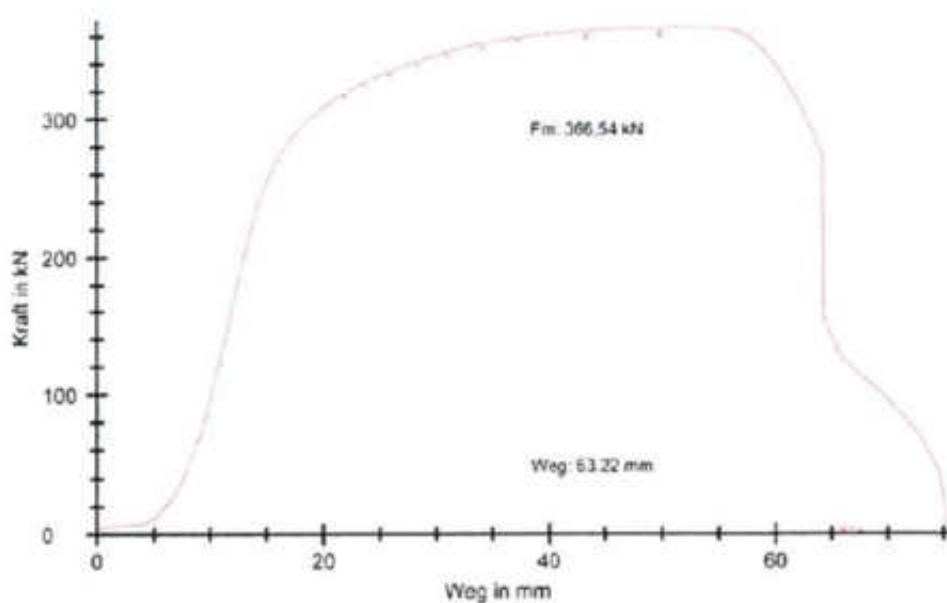
Güte 500/700

$F_m = 366 \text{ kN}$

$F_e \geq 220 \text{ kN}$

$s = 63 \text{ mm}$

$A_g \geq 10 \text{ \%}$



## 5 Optimierung des Ausbausystems unter Anwendung der Beobachtungsmethode nach EC7

### Ausbauystem Vorzerkleinerung (1. Optimierung)



Ausbauystem mit Gleitankern

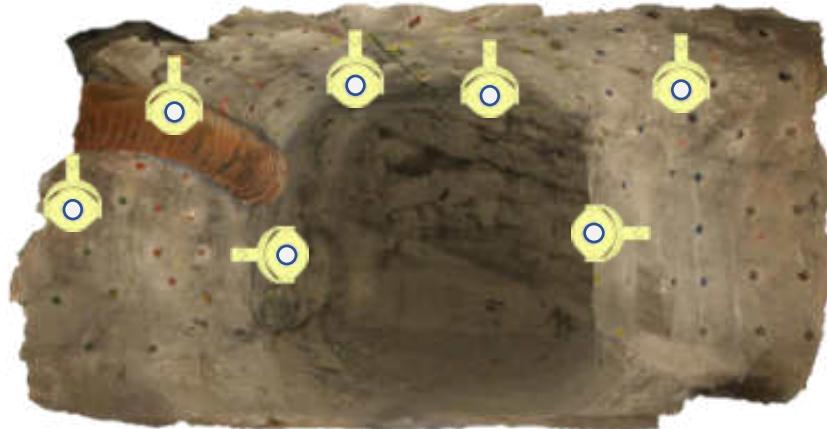


### Ausbauystem Vorzerkleinerung Tachymetrische Überwachung



**IATS:** Leica Nova TM50 0,5" R1000

- Winkelmessgenauigkeit: 0,15 mgon (Hz und V)
- Streckenmessgenauigkeit: 2 mm + 2 ppm (reflektorlos)
- Integrierte Weitwinkel- und Koaxialkamera mit 30-facher Vergrößerung

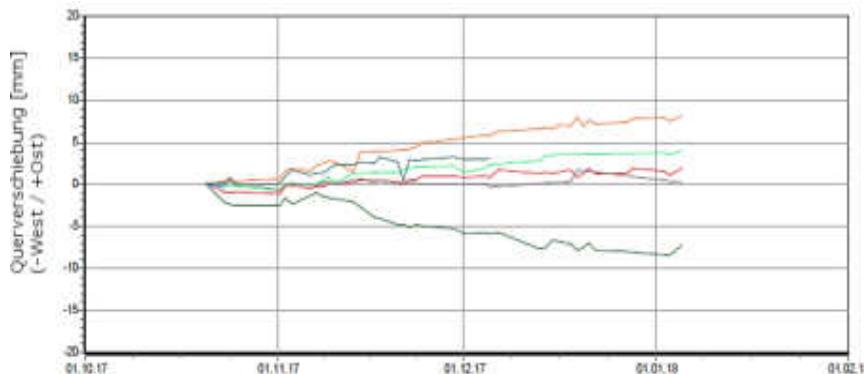
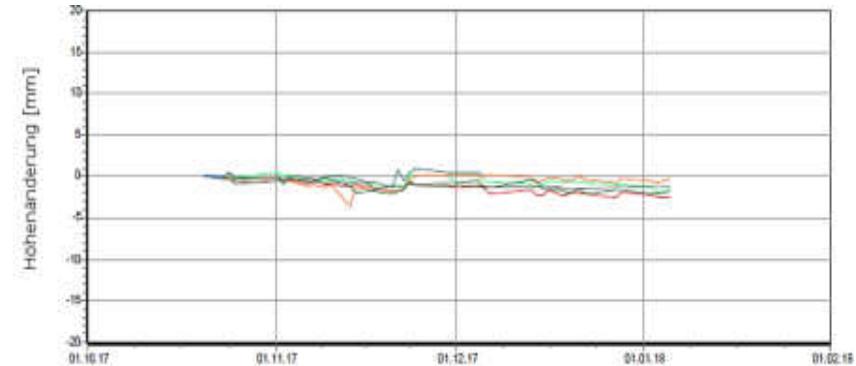
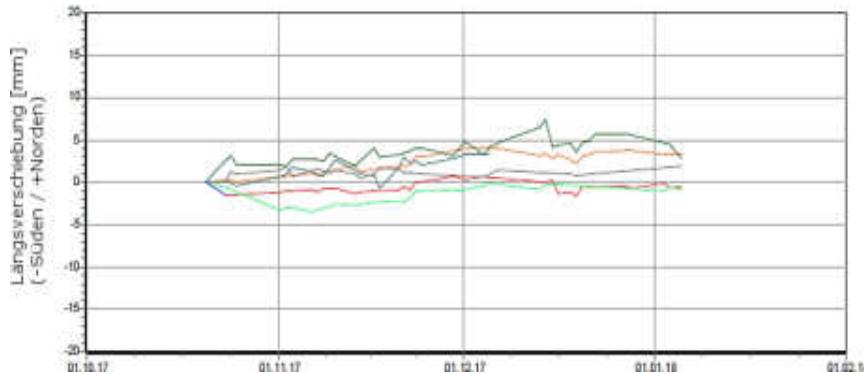


- Realisierung eines eindeutigen Bezugspunktes
- Kompakte Bauform
- Robuste und zuverlässige Detektion unter Tage

### Ausbauystem Vorzerkleinerung Tachymetrische Überwachung



### Ausbausystem Vorzerkleinerung Tachymetrische Überwachung



Längs-, Quer- und Höhenverschiebung der Punkte eines Ankerquerschnitts über einen Zeitraum von ca. 2,5 Monaten  
Messergebnisse im Bereich < 1 cm  
Prognose im Bereich mehrerer Dezimeter

### 2. Optimierung BGE:

Durchführung eines neuen numerischen statischen Nachweises unter Berücksichtigung folgender Sachverhalte:

- Reduzierung des Ausbruchprofils auf Basis der Optimierung (Verkleinerung) der Anlagentechnik
- Berücksichtigung des aktuellen Kenntnisstandes zur Geologie auf Basis neuer Aufschlüsse durch Bohrungen, Nischenauffahrungen zur Durchführung von *in situ*-Messungen sowie Kartierungen aus den laufenden Auffahrungen → geomechanisch günstigere Geologie
- Reduzierung des rechnerisch angesetzten Grundspannungszustandes im Ergebnis von Überbohr- und Hydrofracmessungen
- Neubewertung der Trennflächen (Durchtrennungsgrade)
- Veränderung der Lage der Modellränder

### 2. Optimierung BGE:

#### Ergebnis:

- Trotz einer Reduzierung der Ankerdichte von 1,5 Anker/m<sup>2</sup> auf **0,5 Anker/m<sup>2</sup>** konnte ein ausreichendes Standsicherheitsniveau nachgewiesen werden.
- Die prognostizierten Verschiebungen lagen im Maximum bei ca. 15 cm. Eine geschlitzte Schale erschien weiterhin als angeraten.

## 5 Optimierung des Ausbausystems unter Anwendung der Beobachtungsmethode nach EC7



BUNDESGESELLSCHAFT  
FÜR ENDLAGERUNG

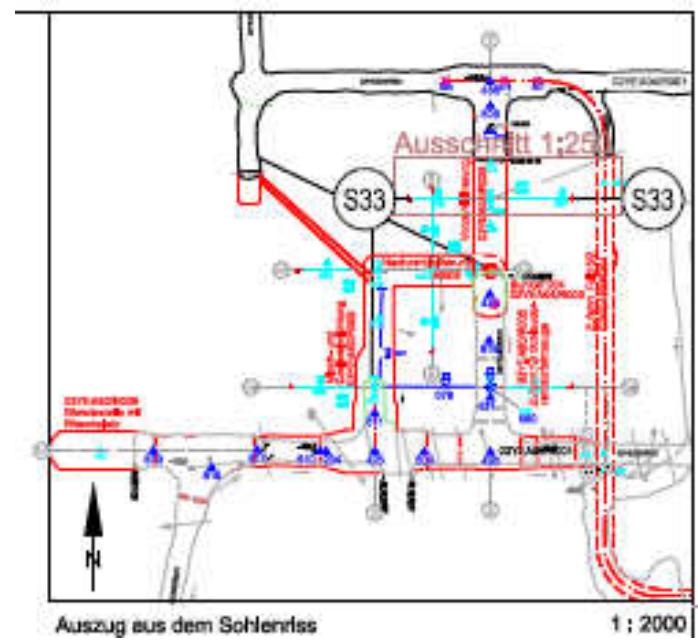
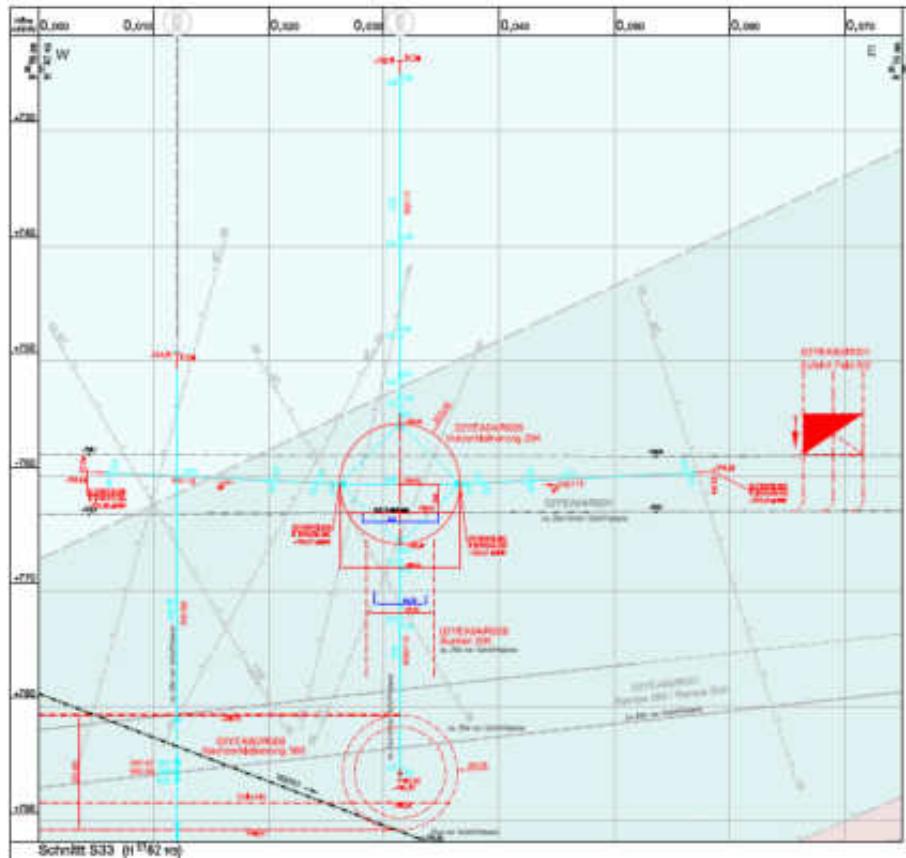
Ergebnis 1. Optimierung



Ergebnis 2. Optimierung



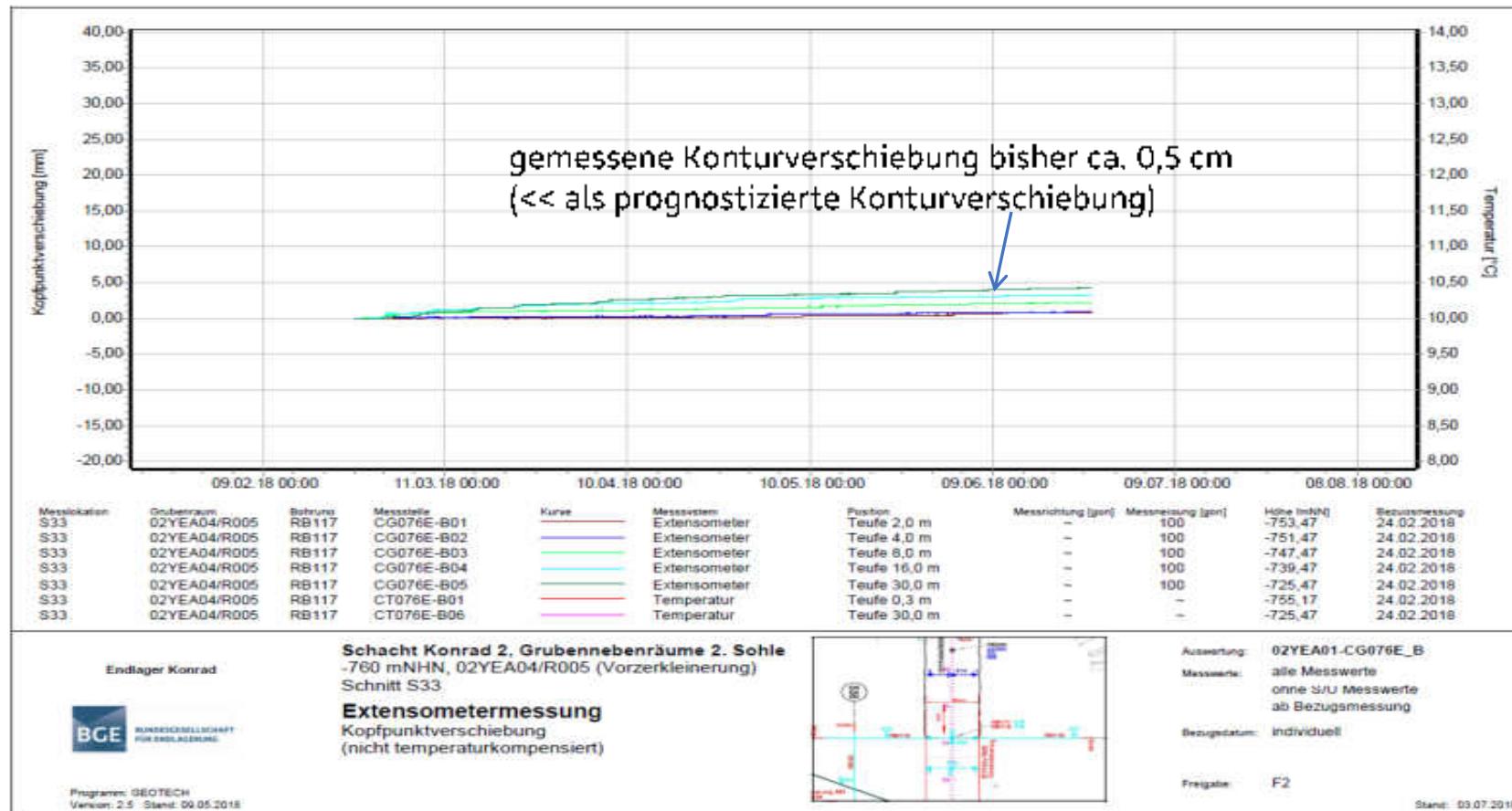
### Messtechnische Überwachung des Gebirgsverhalten mit Extensometern



### Messtechnische Überwachung des Gebirgsverhalten mit Extensometern



## Messtechnische Überwachung des Gebirgsverhalten mit Extensometern



### 3. Optimierung BGE:

- Austausch der einbauintensiven hochduktilen Anker gegen Injektionsbohranker aus Stahl
- Derzeit wird überlegt, ob für die Strossen- und Sohlenauffahrung auf die geschlitzte Schale verzichtet werden kann.

### Weitere Vorgehensweise zur Bemessung der Innenschale:

- Ermittlung der Parameter zur Bemessung der Innenschale auf Basis der Ergebnisse von Verformungsmessungen aus dem jeweiligen Grubenraum (lokationsspezifische Kalibrierung)

### Ergebnis:

- Exemplarisch erfolgte für einen Grubenraum auf Basis dieser Vorgehensweise die Vorbemessung der Innenschale. Nachdem bisher eine bemessbare (ausführbare) 50 cm-Schale nicht nachgewiesen werden konnte, lässt sich jetzt die Innenschale mit ausführbarer Betongüte sowie Bewehrungsgehalt herstellen.



Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit und  
Glückauf!