



**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 Manthee¹, Mirko Polster²

¹ BGE Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine, Germany

² 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



1 Einführung – Historie Schachtanlage Konrad

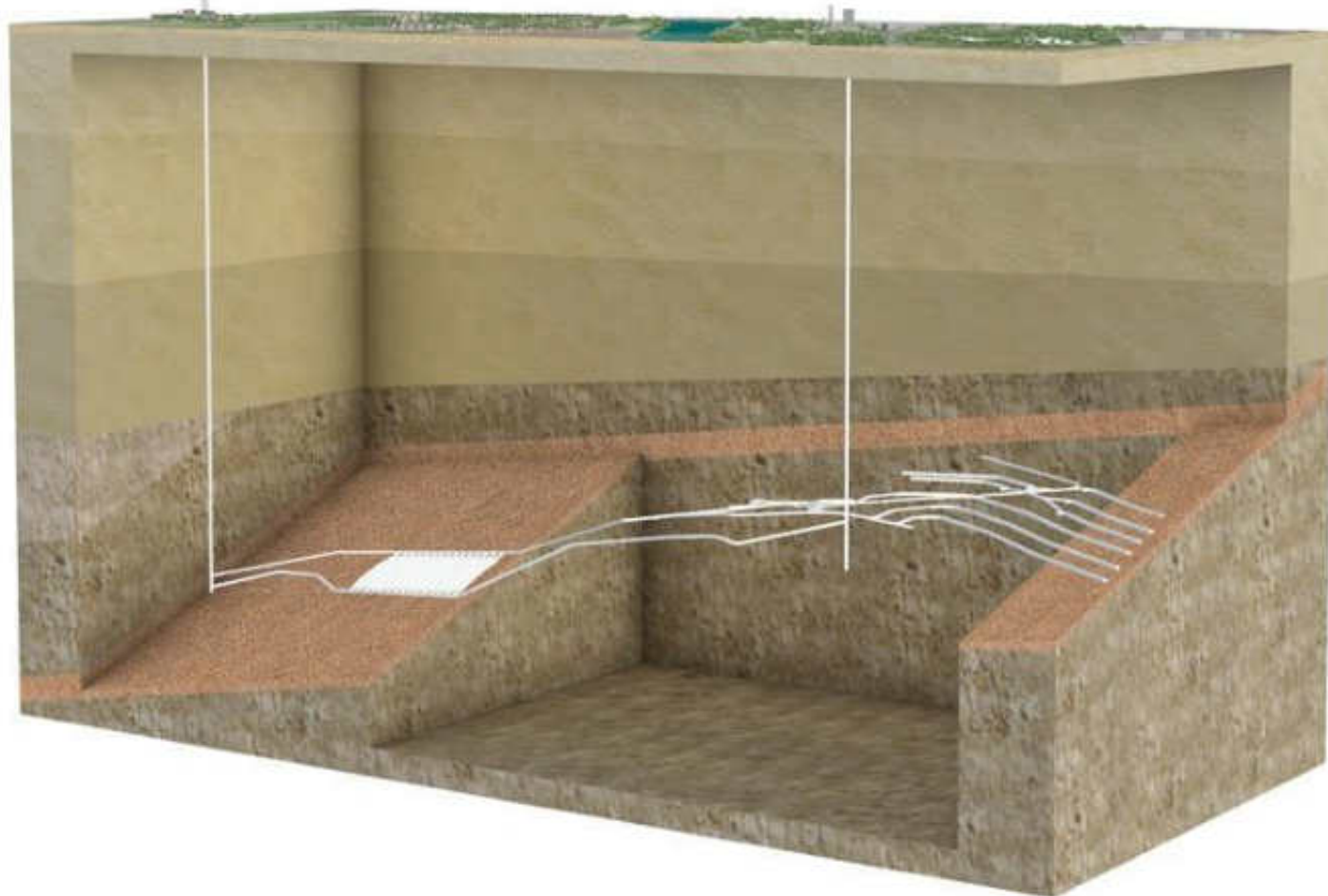


- 2002 – 2006: Klageverfahren gegen den Beschluss werden ohne Revisionsmöglichkeit abgewiesen
- 2007: Bundesverwaltungsgericht bestätigt Urteil

- 2007+: Ausführungsplanung und Beginn der Arbeiten zur über- und untertägigen Umrüstung
- Fertigstellungstermin 2027
- 303.000 m³ Abfallbindevolumen
- Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung



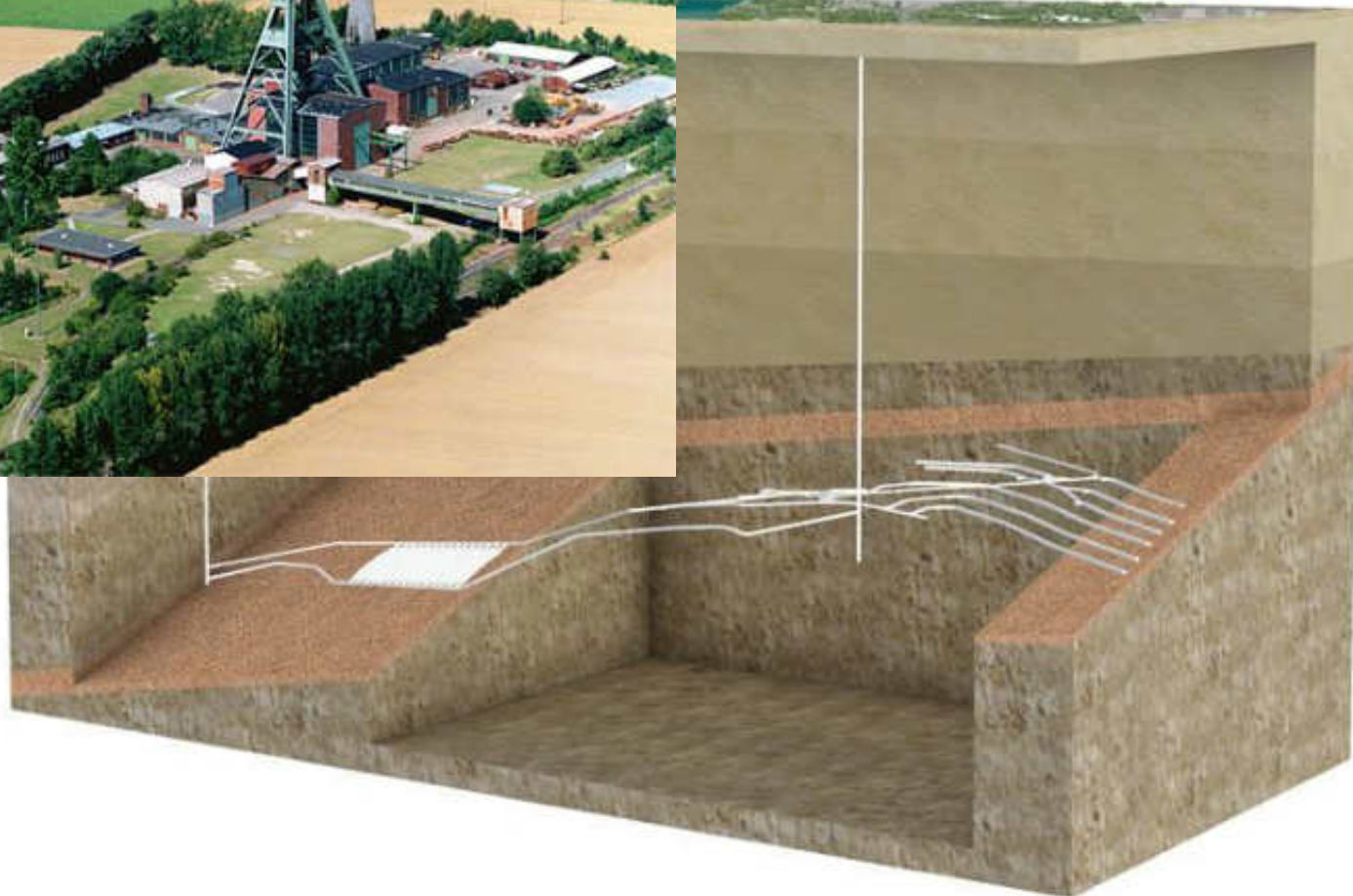
1 Einführung – Baumaßnahmen Errichtung Konrad



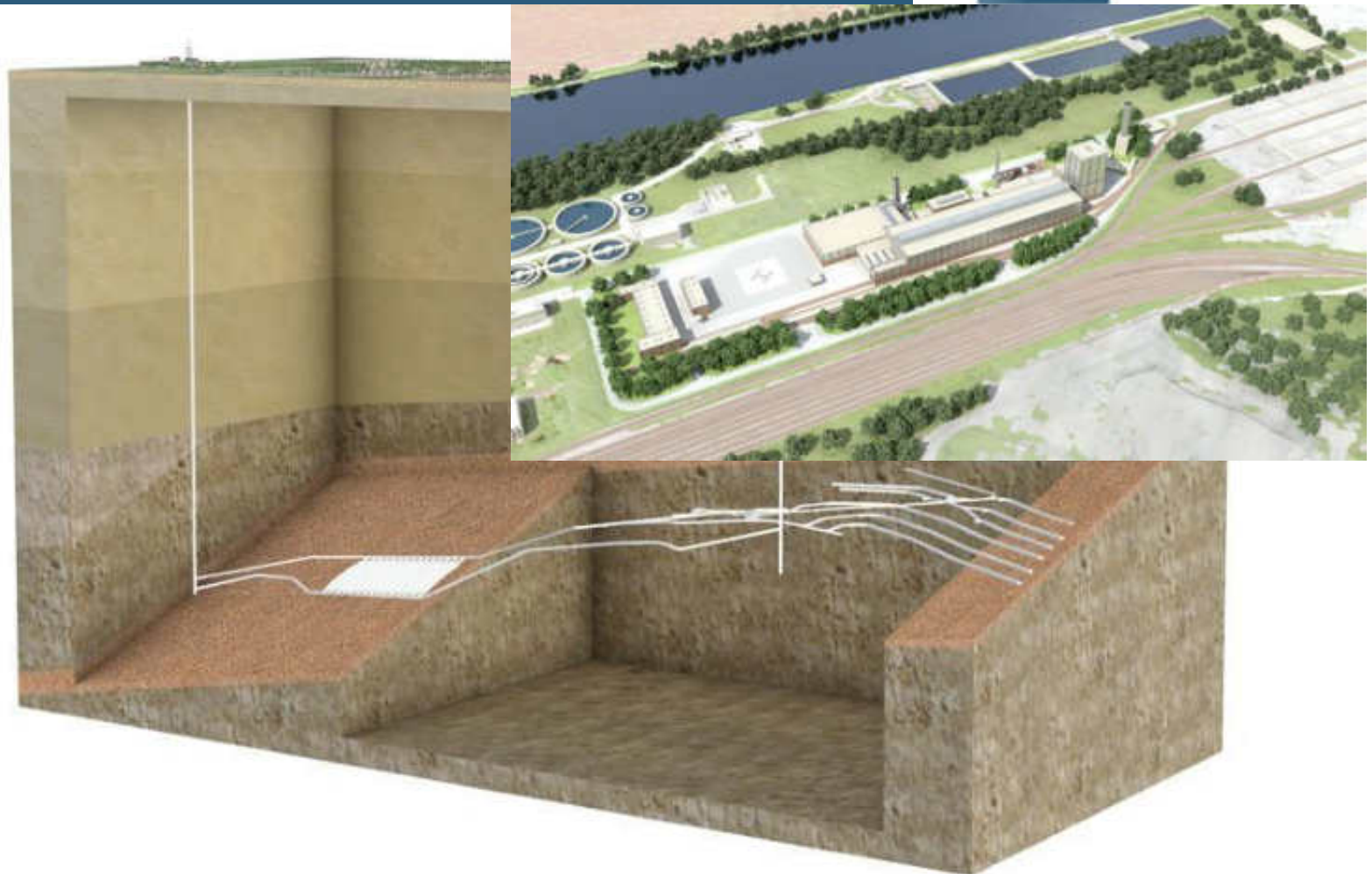
1 Einführung – Baumaßnahmen Errichtung Konrad



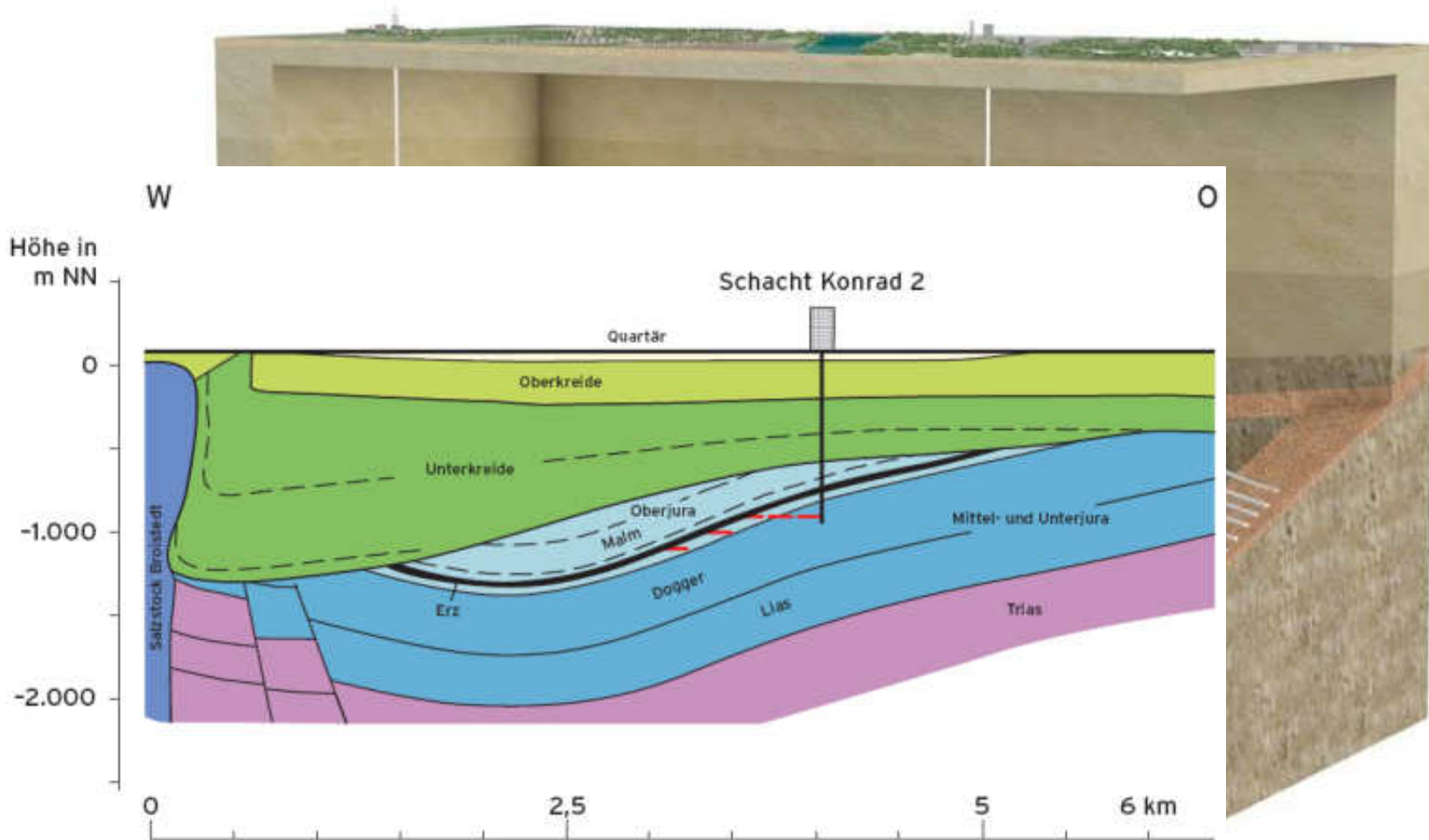
BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG



1 Einführung – Baumaßnahmen Errichtung Konrad



1 Einführung – Baumaßnahmen Errichtung Konrad



1 Einführung – Baumaßnahmen Errichtung Konrad



Aufgabenstellung

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

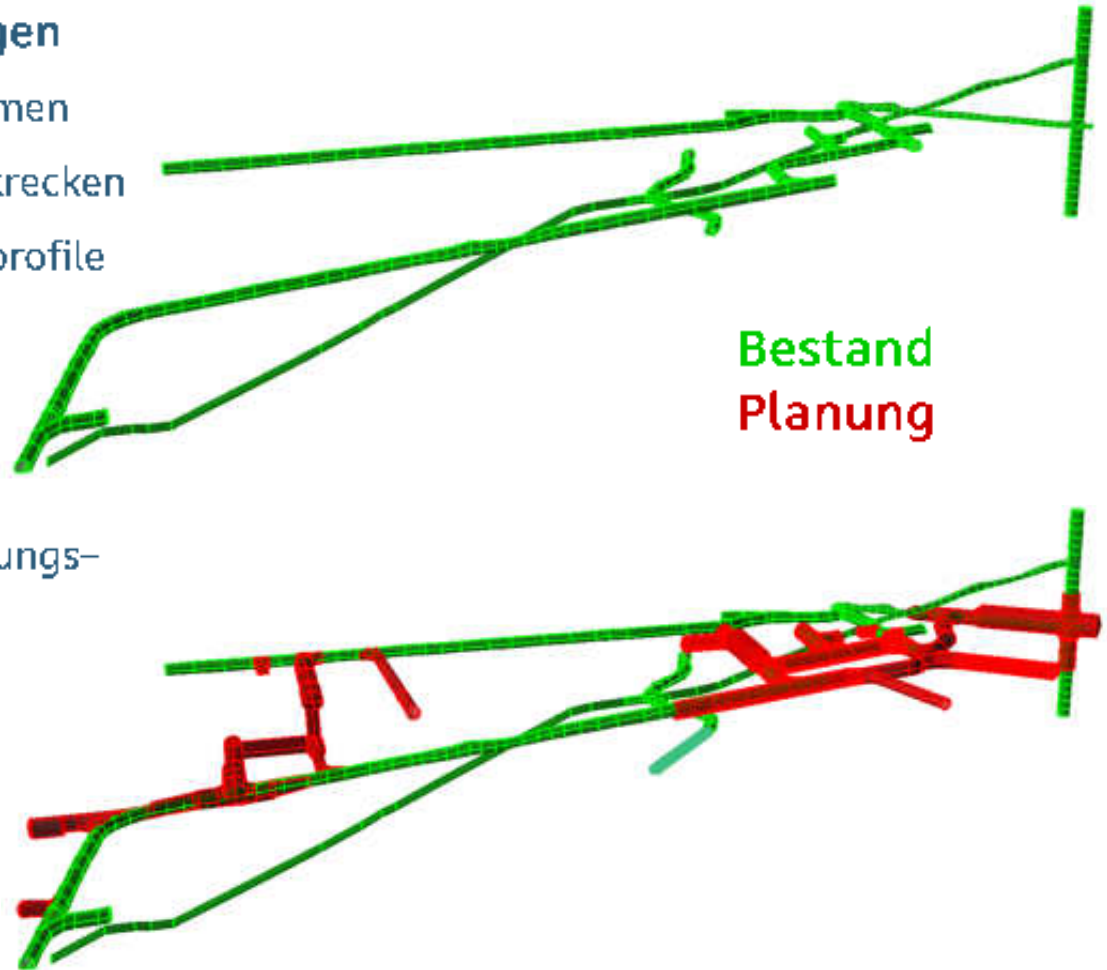
Anforderungen

- Betriebsdauer ≥ 40 a
- Sanierungs- und Instandhaltungsfreiheit während Betrieb (Kontrollbereich)
- Konformität mit PFB



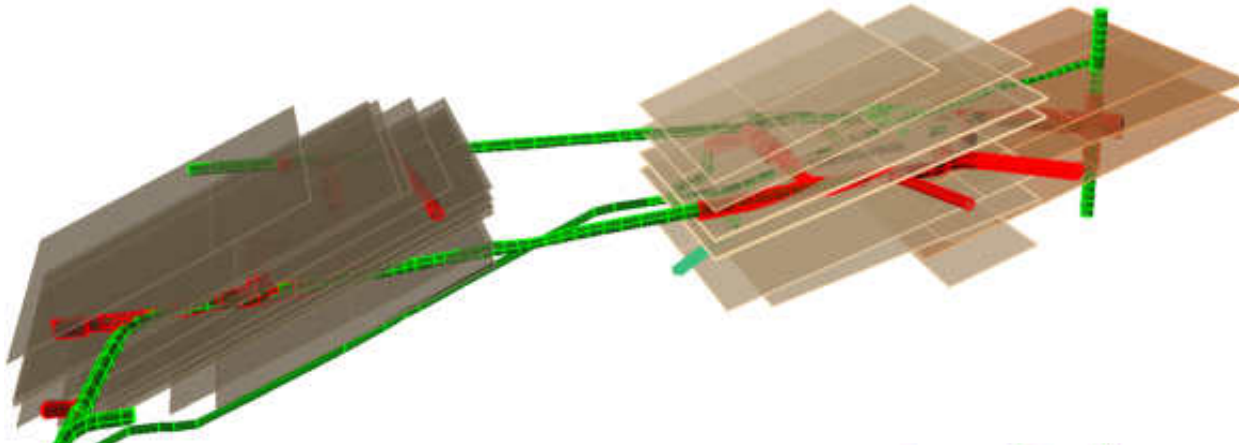
Bergbauliche Randbedingungen

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

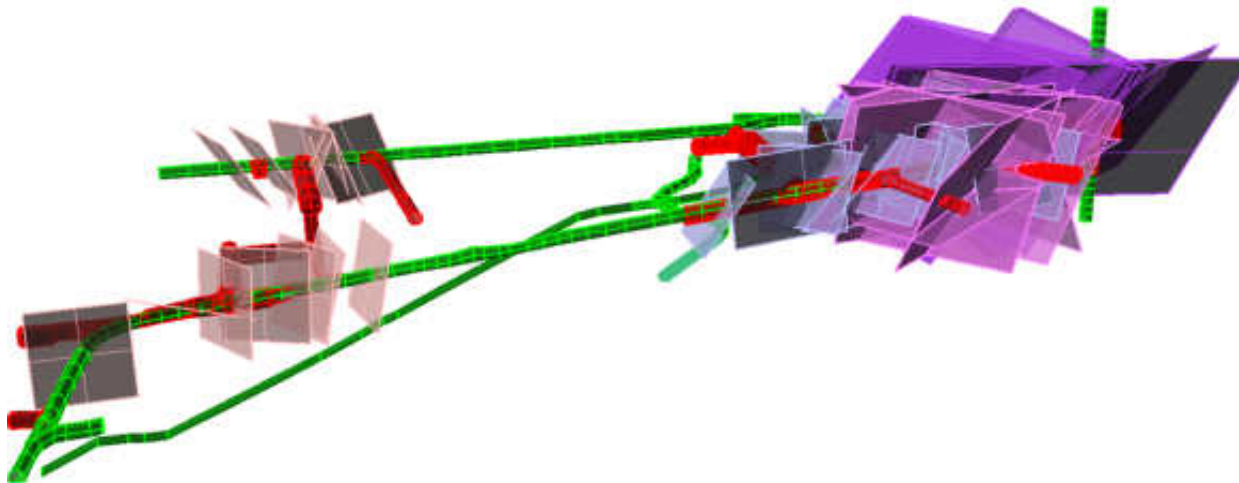


2 Standortverhältnisse

Geologische/tektonische Randbedingungen



Schichtfolge



Störungen

Geologische/tektonische Randbedingungen



**Eisenoolith
(Unteres
Erzlager)**

Geologische/tektonische Randbedingungen



**Erzkalk-
Serie**

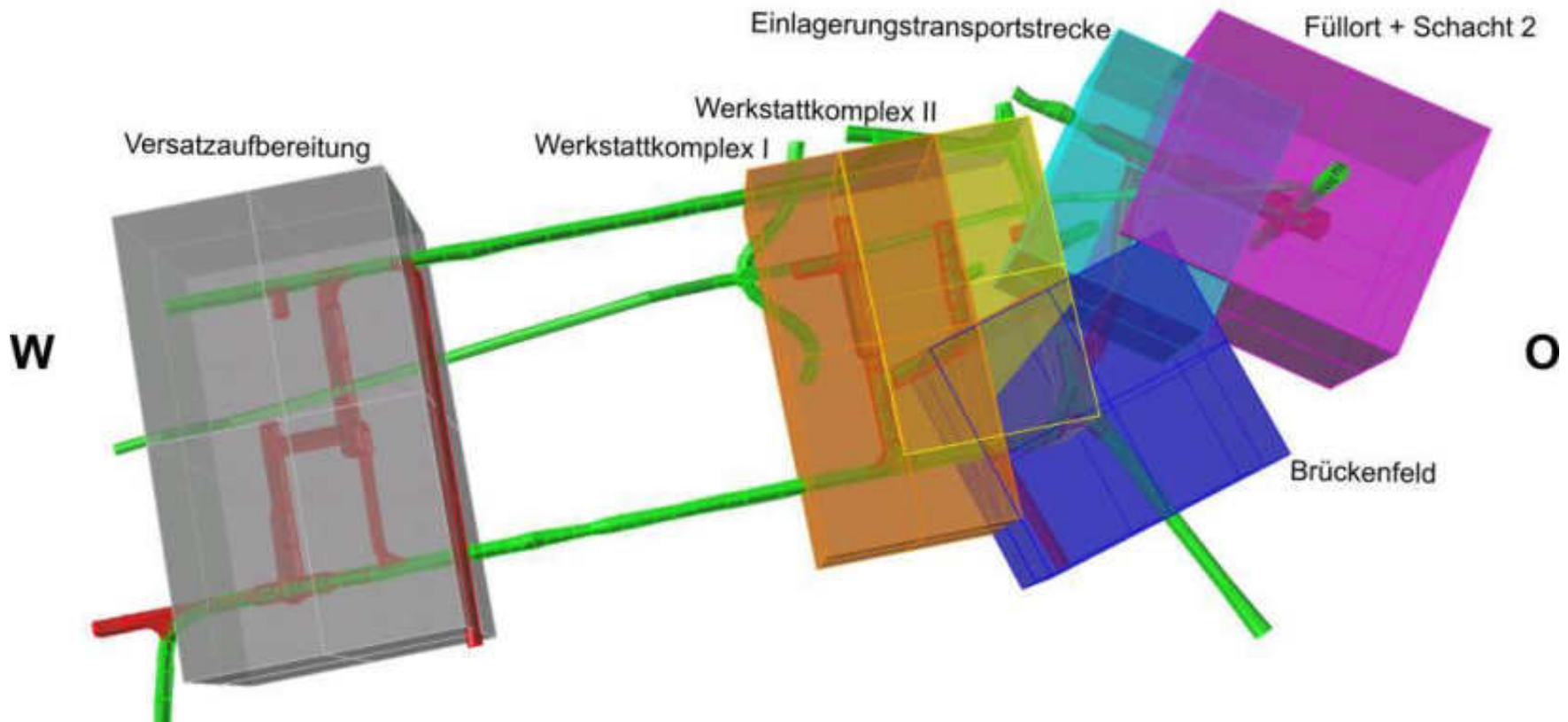
Geologische/tektonische Randbedingungen



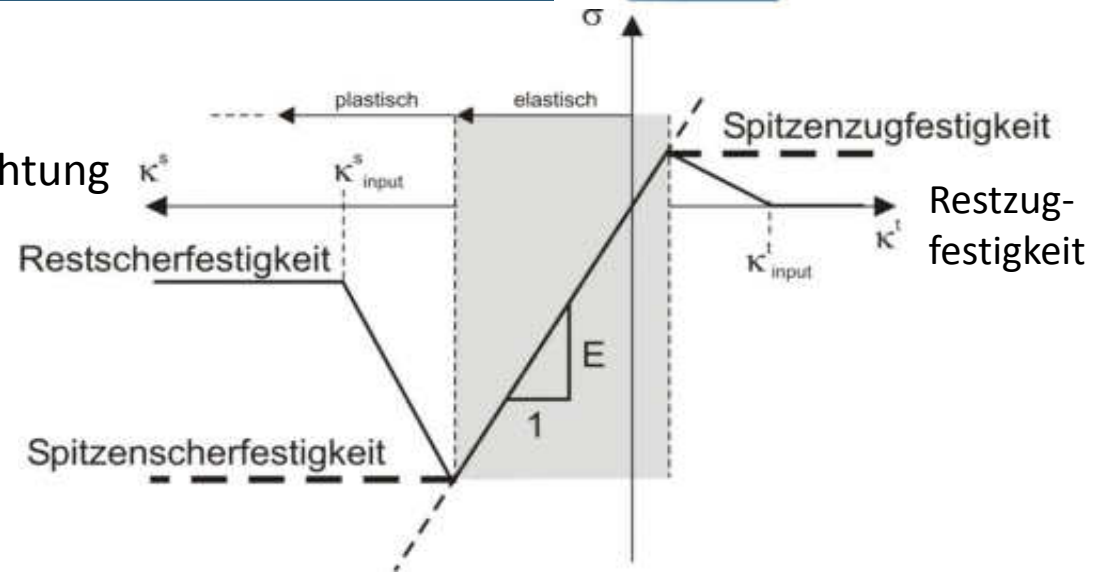
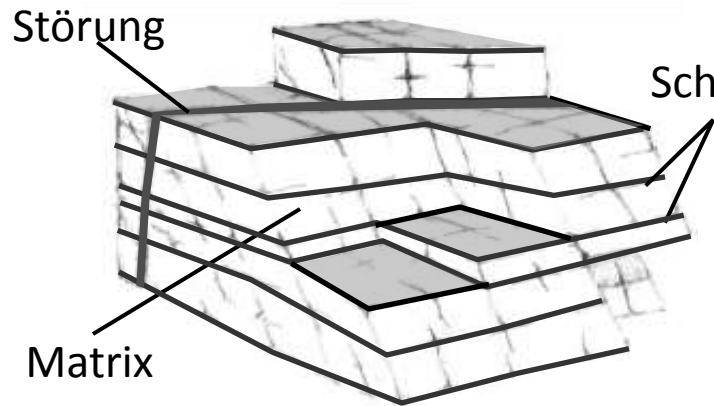
**Fladen-
tonstein-
Serie**

3 Berechnungsmodell – Prognoseberechnungen

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



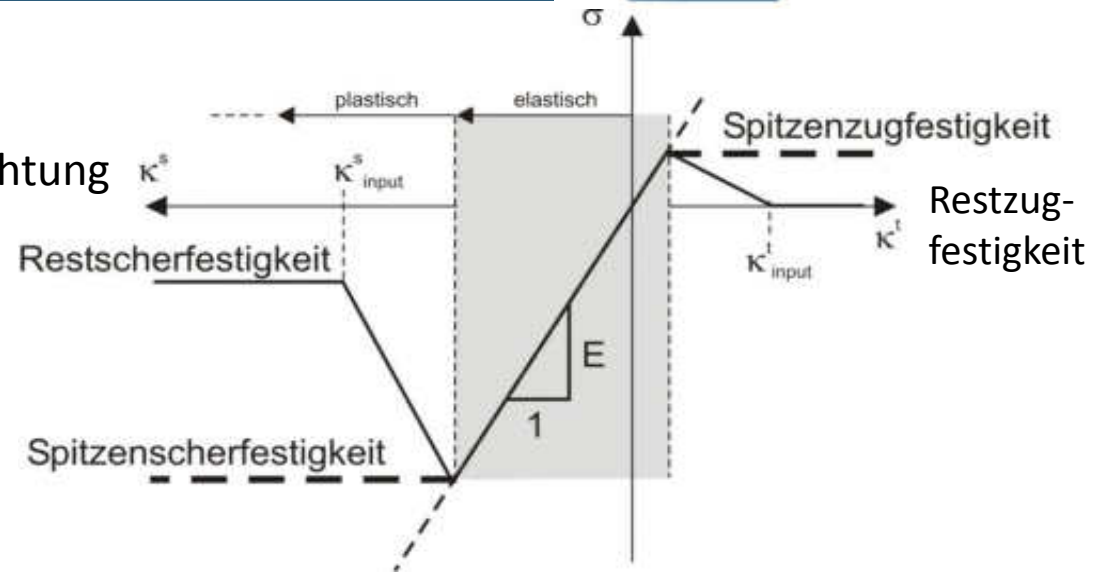
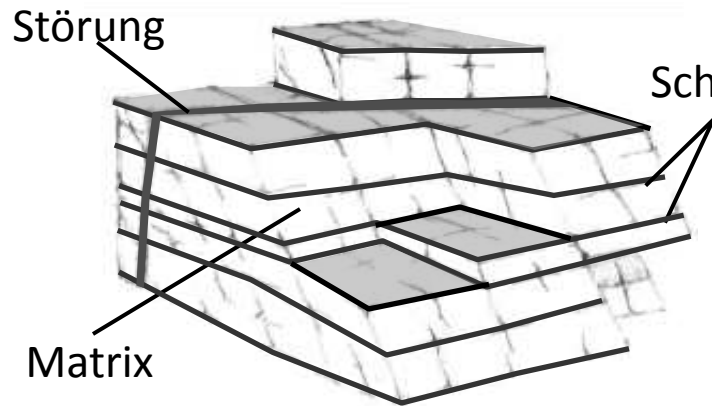
3 Berechnungsmodell – Prognoseberechnungen



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

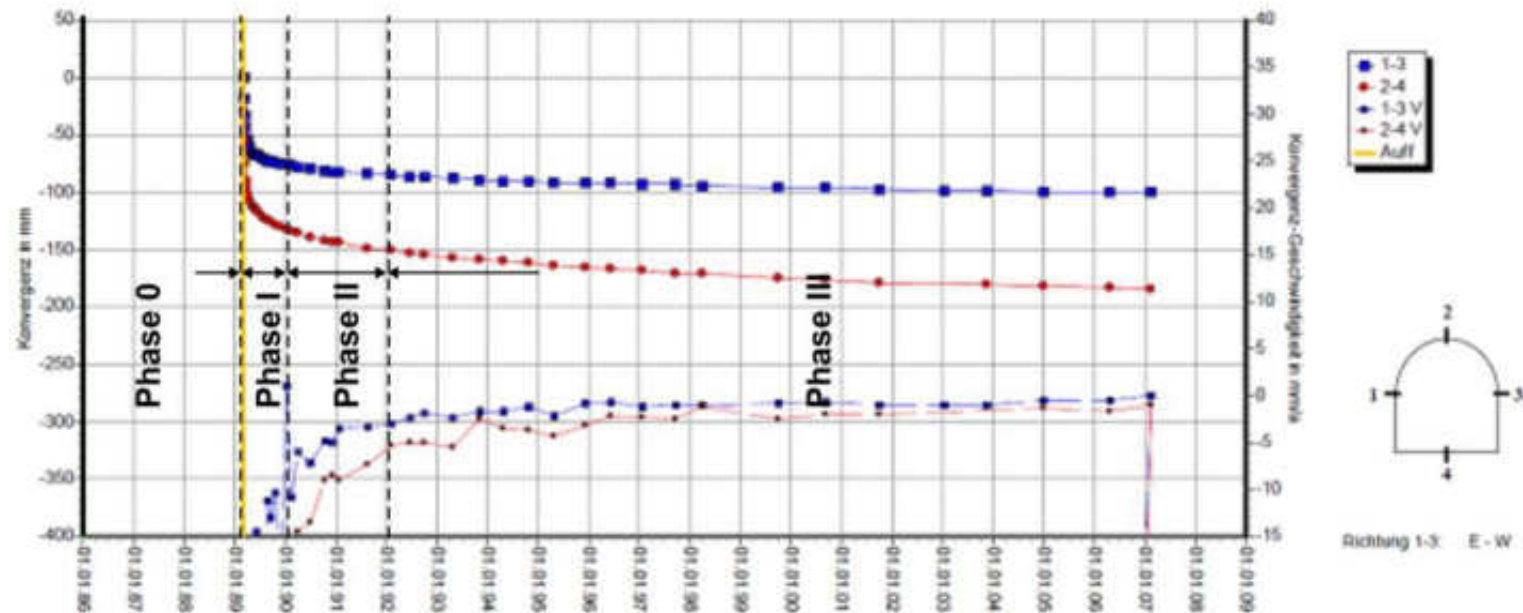
3 Berechnungsmodell – Prognoseberechnungen



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 märkscheiderischer Langzeitmessungen



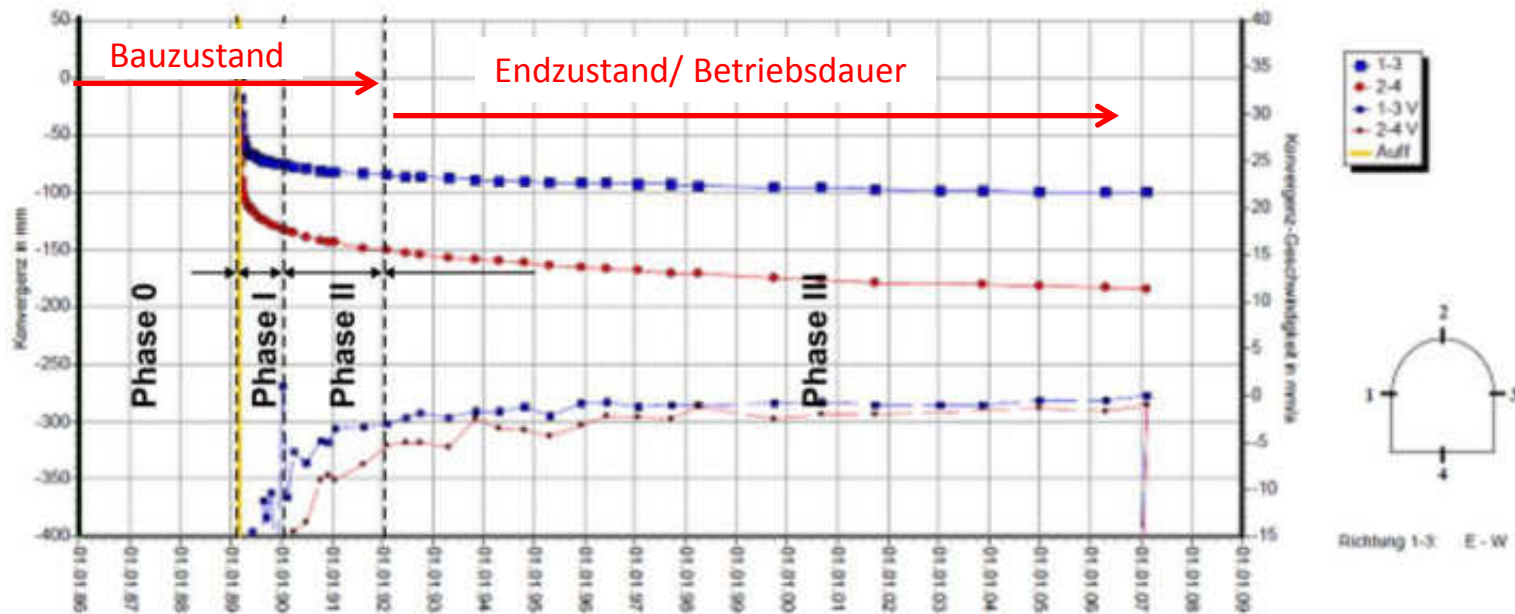
Phase 0: messtechnisch nicht erfassbare Konvergenzen

Phase I: sofort auftretende Konvergenzen

Phase II: abnehmende Konvergenzrate

Phase III: quasi konstante Konvergenzraten

Kalibrierung des Gebirgsverhaltens auf Basis märkscheiderischer Langzeitmessungen



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

Kalibrierung des Gebirgsverhaltens auf Basis markscheiderischer Langzeitmessungen

Annahmen:

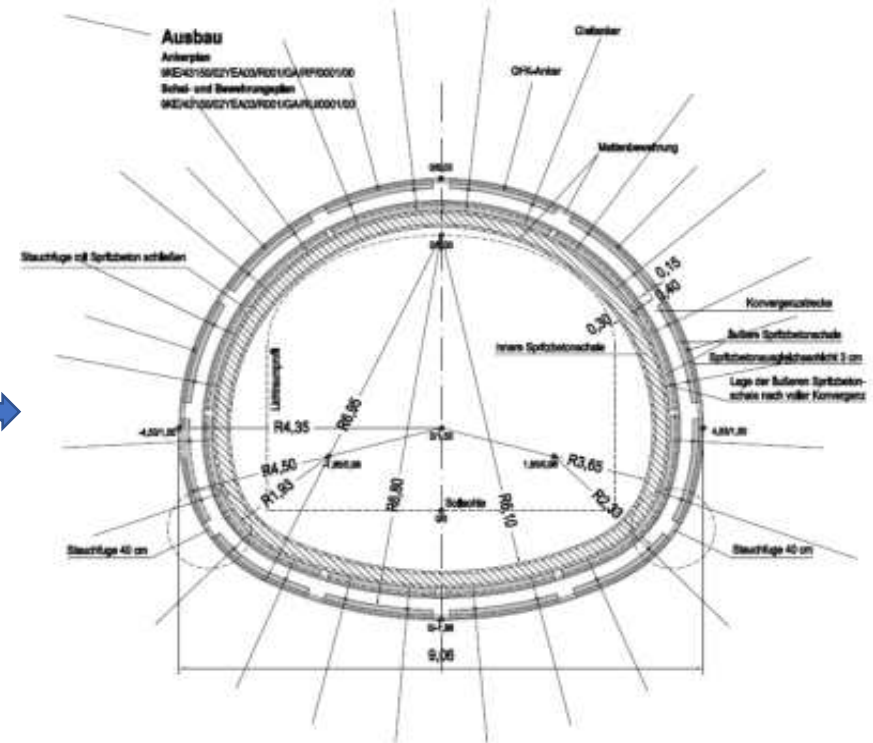
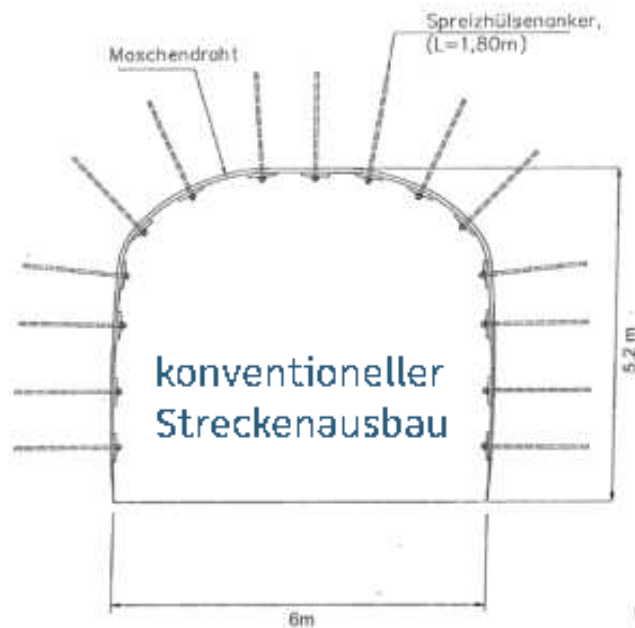
- Übertragbarkeit von Messstationen mit Konrad Standardprofil auf Planung ist gegeben.
D.h. abweichender Querschnitt und Ausbausystem
(... zum damaligen ZP keine mit Planung vergleichbaren Messstationen verfügbar)

3 Berechnungsmodell – Prognoseberechnungen

Kalibrierung des Gebirgsverhaltens auf Basis markscheiderischer Langzeitmessungen

Annahmen:

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

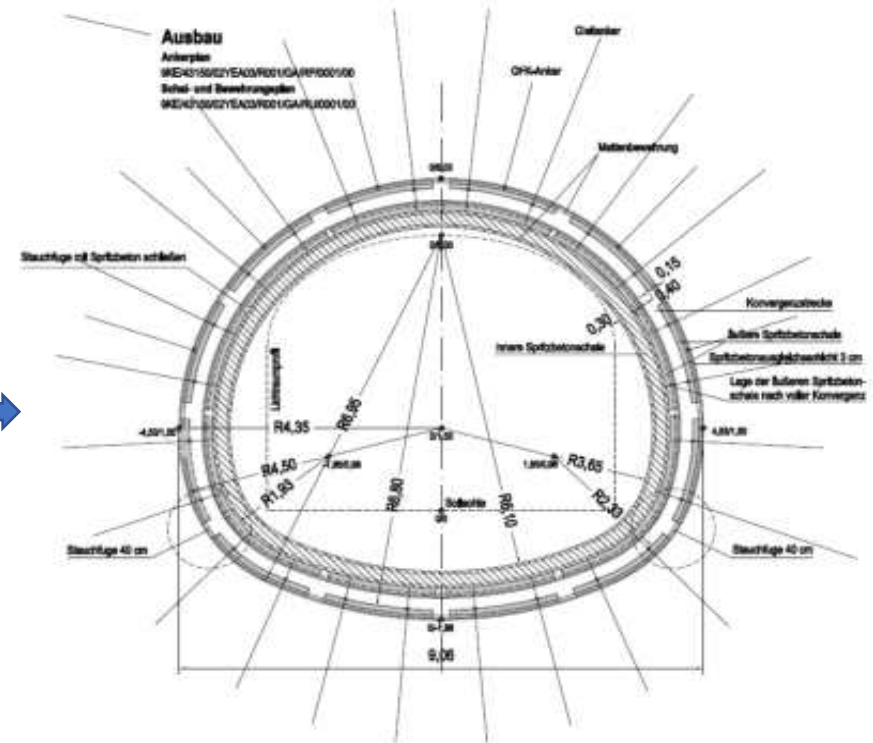
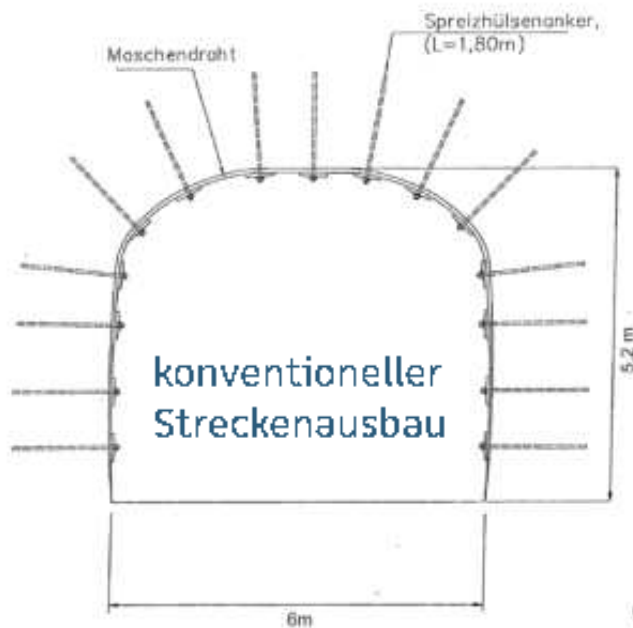


3 Berechnungsmodell – Prognoseberechnungen

Kalibrierung des Gebirgsverhaltens auf Basis markscheiderischer Langzeitmessungen

Annahmen:

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

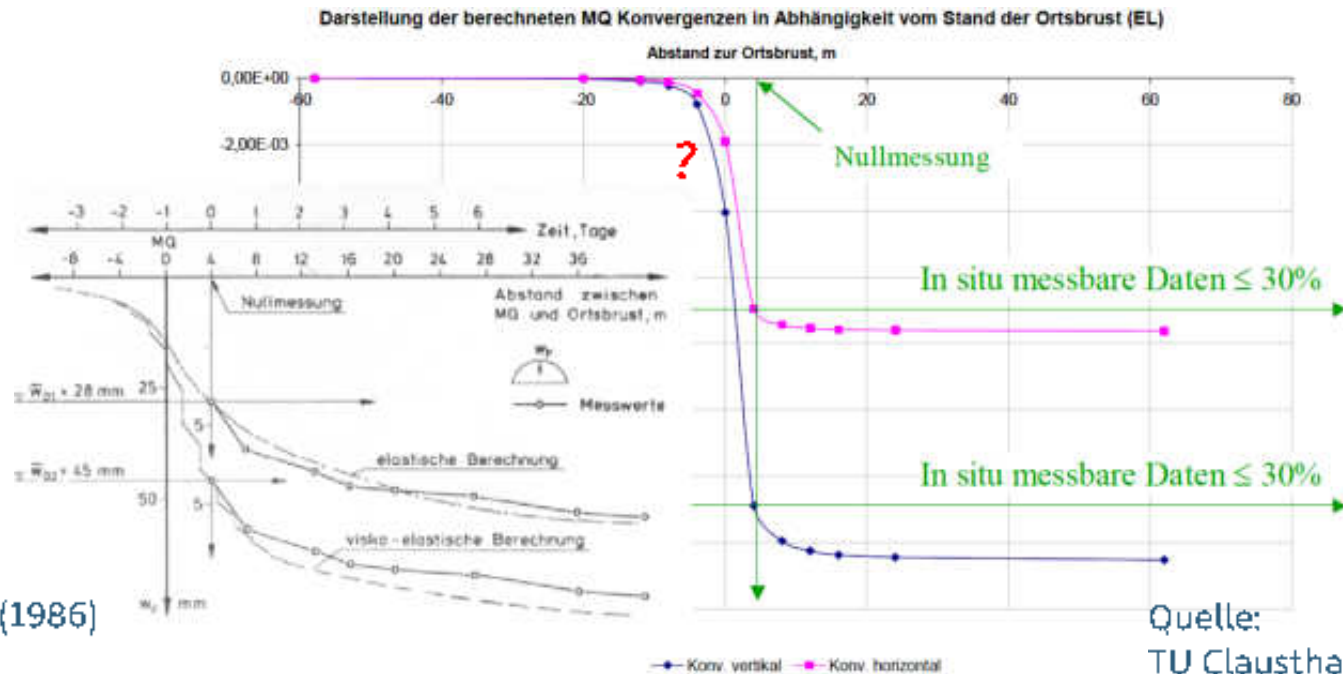


3 Berechnungsmodell – Prognoseberechnungen

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

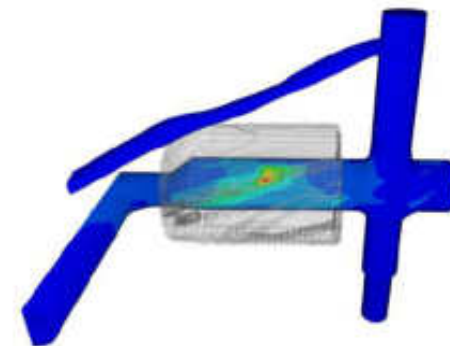
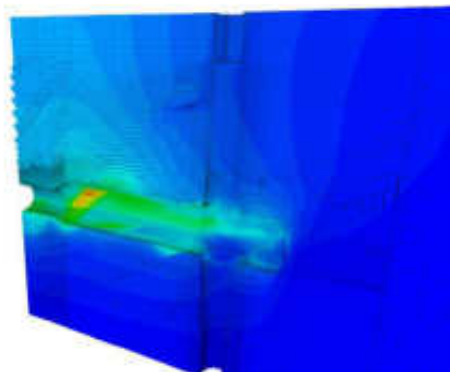
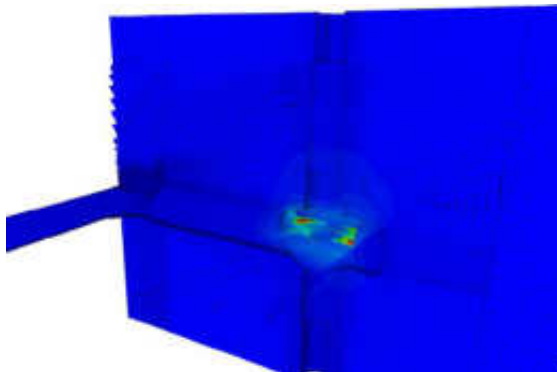
Annahmen:

- 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. ϕ/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
- φ/c -Reduktion belegt Robustheit bis mindestens $\eta_{\text{Fellenius}} = 1,3$ („globale Standsicherheit“)

ii. Endzustand/ Betriebsdauer

Verwendung Parametersatz für Phase III

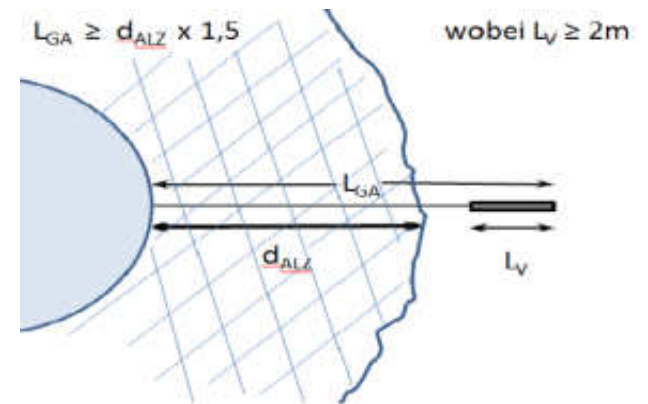
Nachweis der Standsicherheit-/

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)

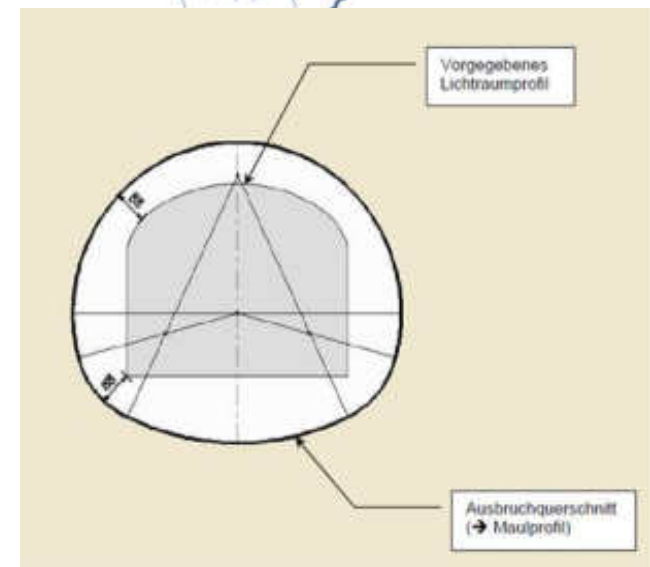
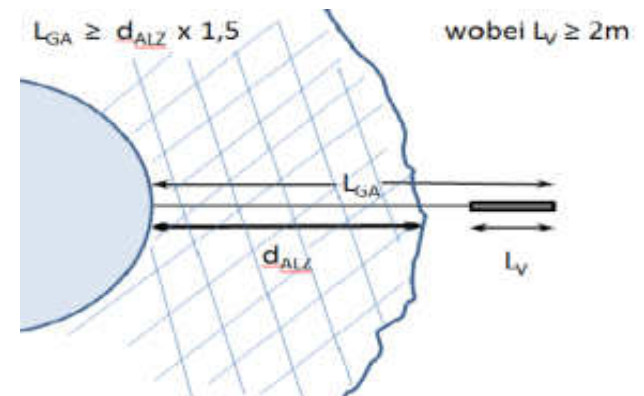
Dimensionierungsgrundsätze / Kriterien sowie weitere konservative Berechnungsannahmen

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



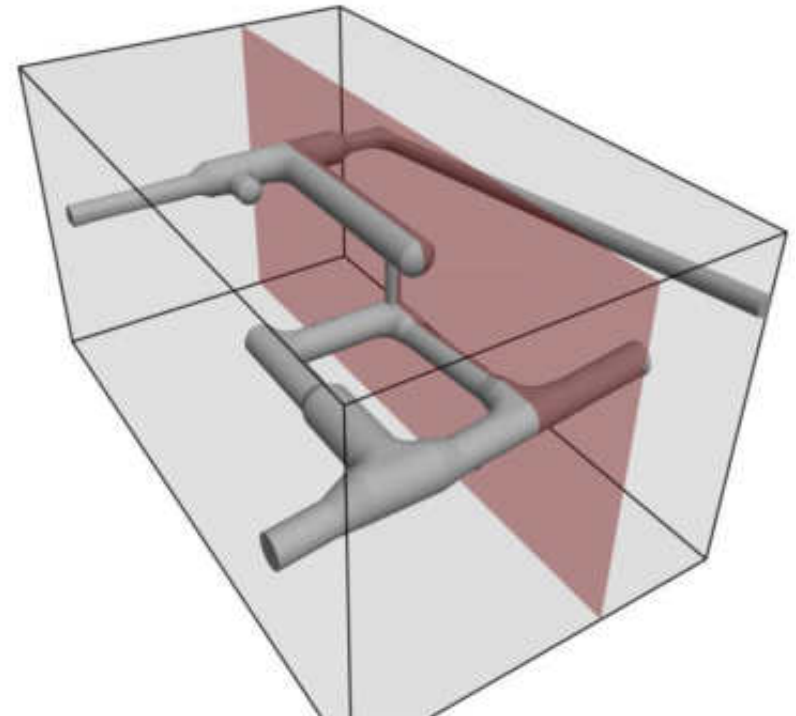
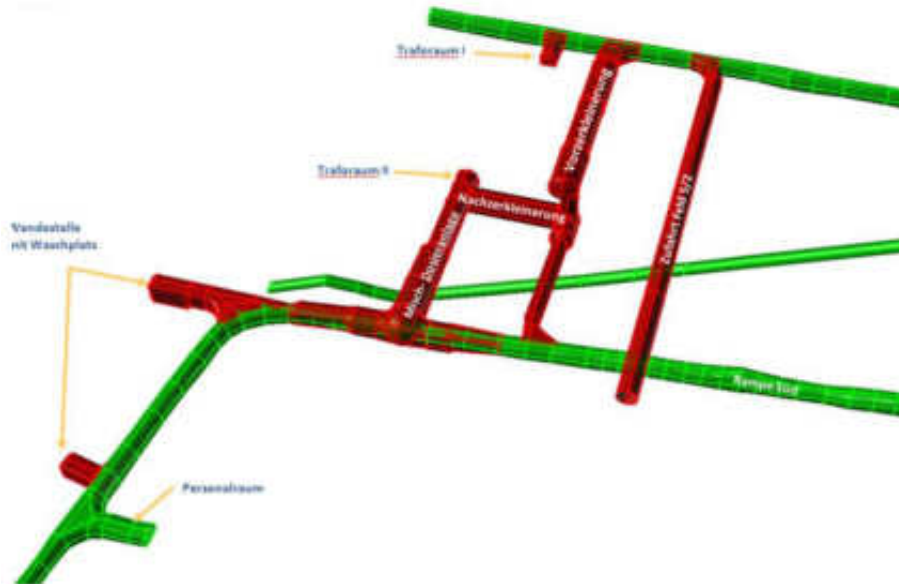
Dimensionierungsgrundsätze / Kriterien sowie weitere konservative Berechnungsannahmen

- Ermittlung der Gleitankerlänge unter Berücksichtigung eines konstruktiven Zuschlags (1/3 der Ankerstrecke im Unverritzten)
- Ermittlung des Ausbruchprofils 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 ≠ realer Bauablauf)
- „Instantane“ Auffahrung (max. Lastumlagerungen)
- Auslegung der Anker gegen volle Konturverschiebung (unabhängig vom real verspäteten Einbau)



4 Ergebnisse von Prognoseberechnungen

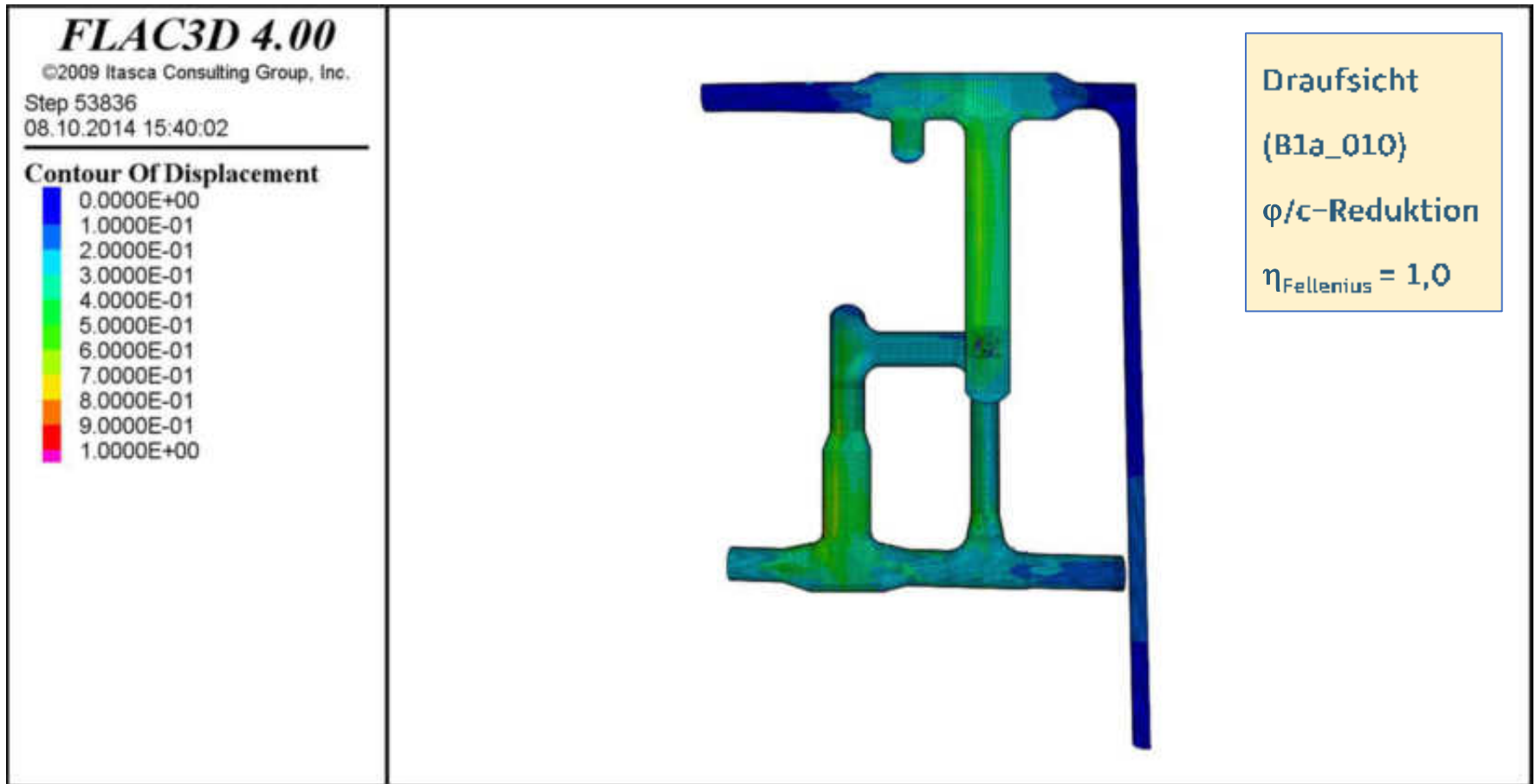
Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage



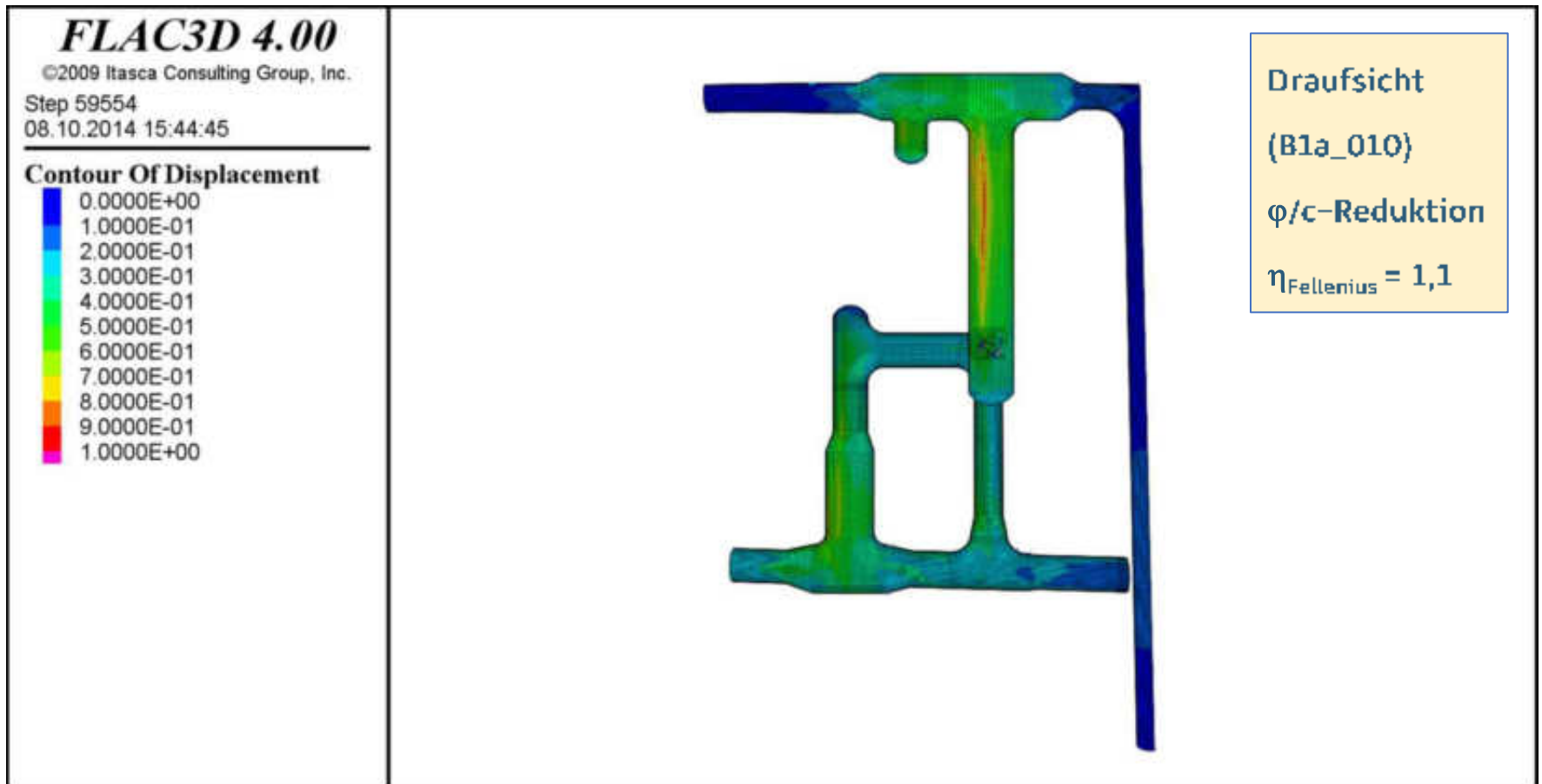
Rechnerische Annahmen Prognoseberechnung:

- Ankerdichte 1 A/m^2 bei
- 150 kN Traglast
- Überzugwirkung aus anderen Grubenräumen

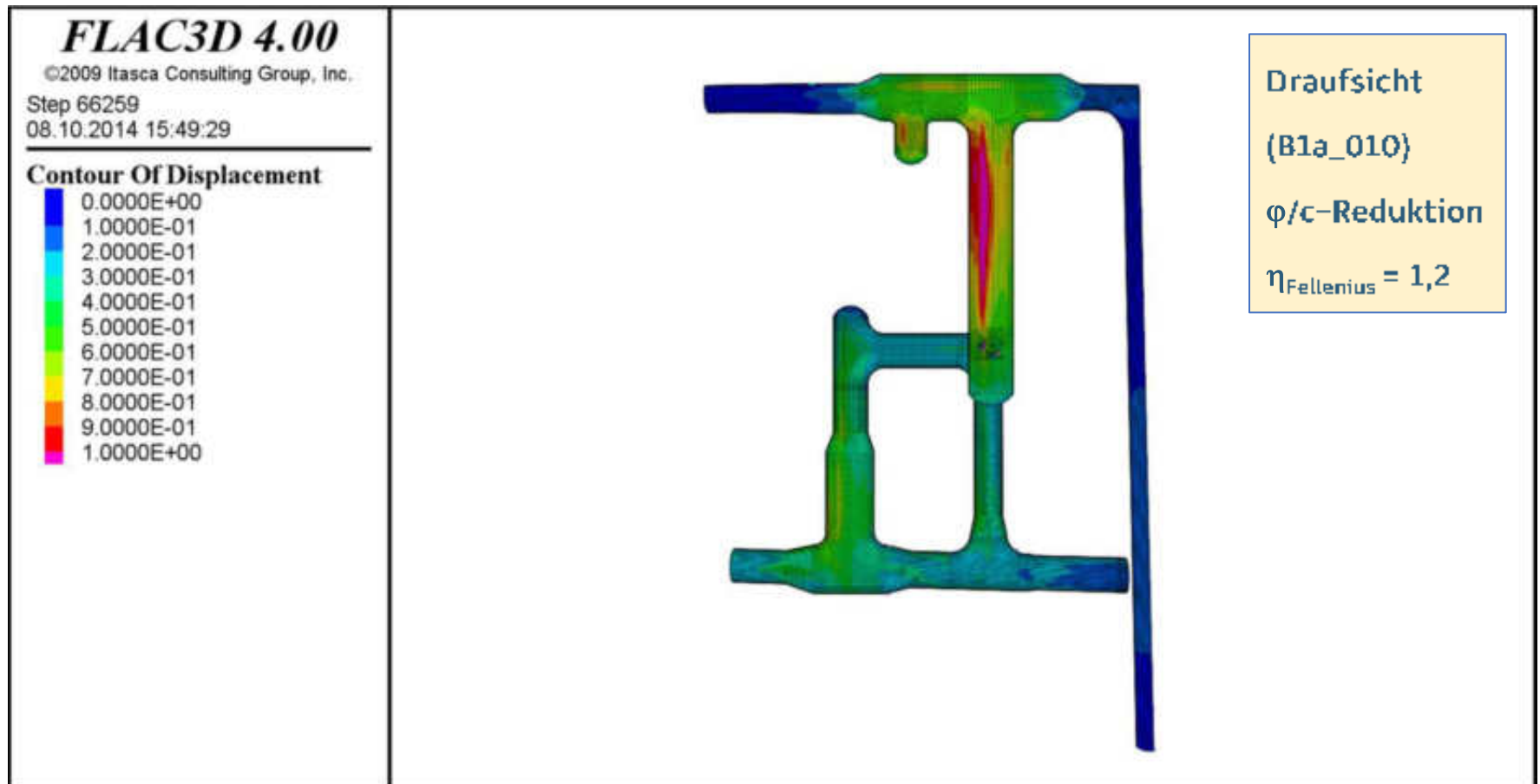
Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage



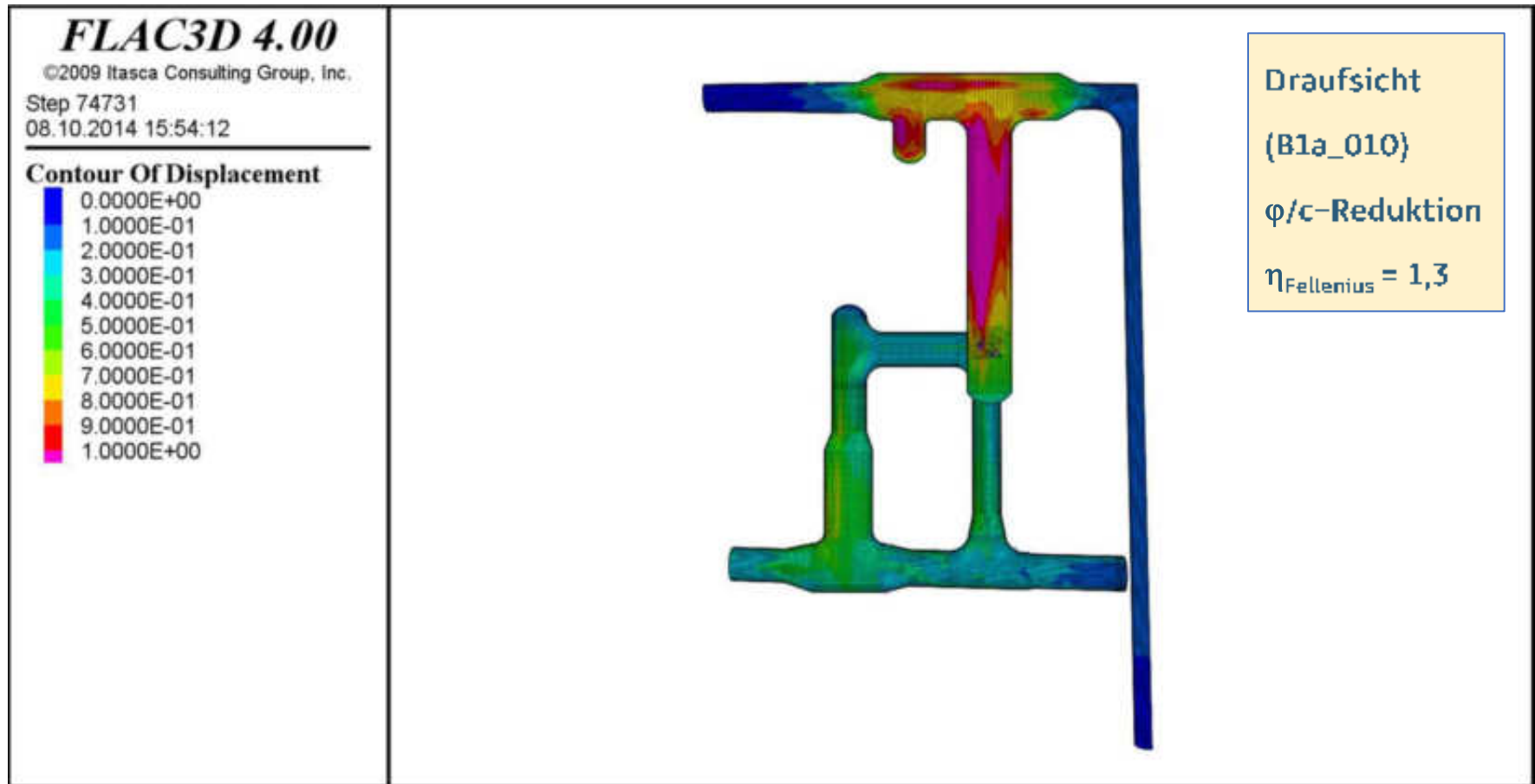
Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage



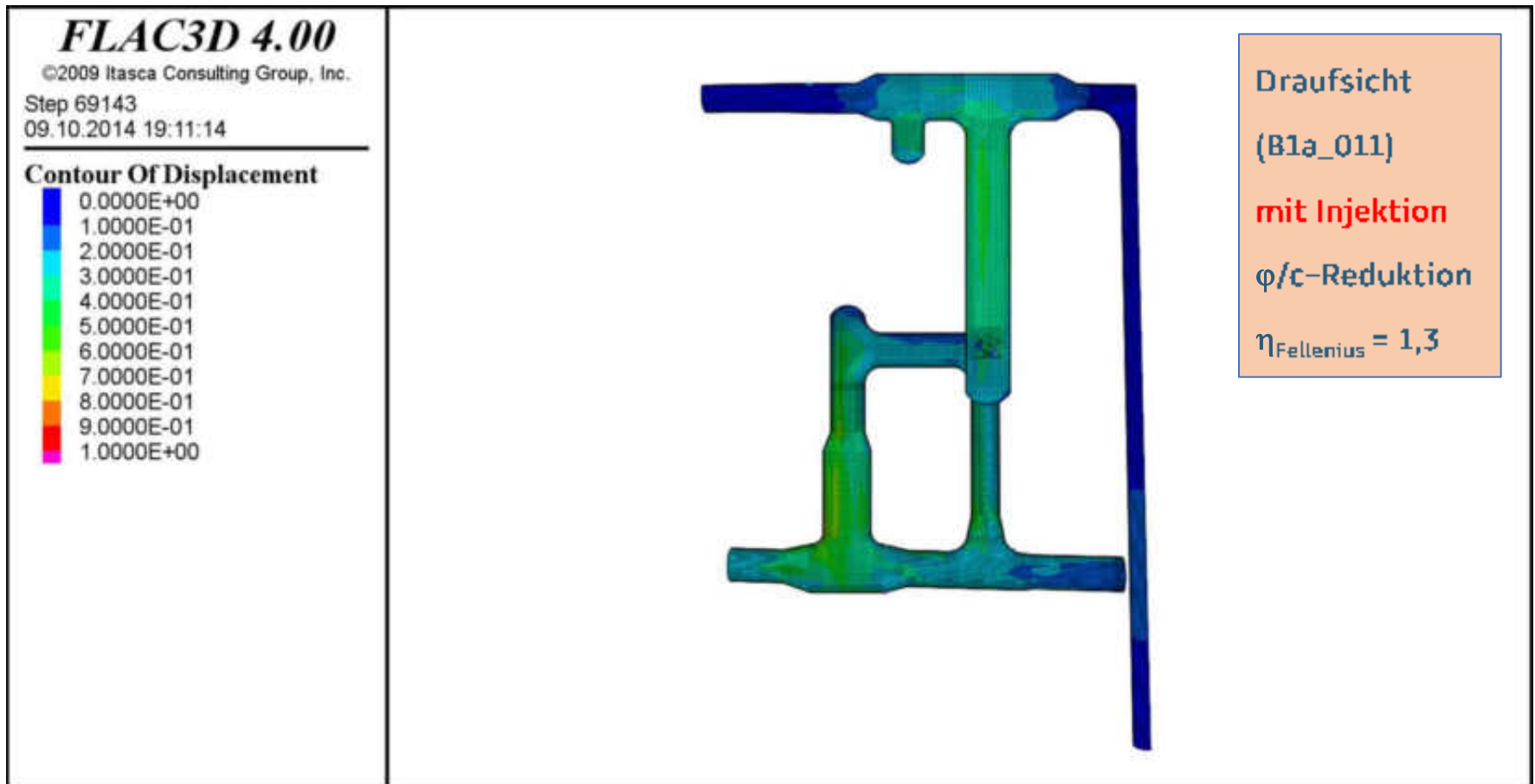
Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage



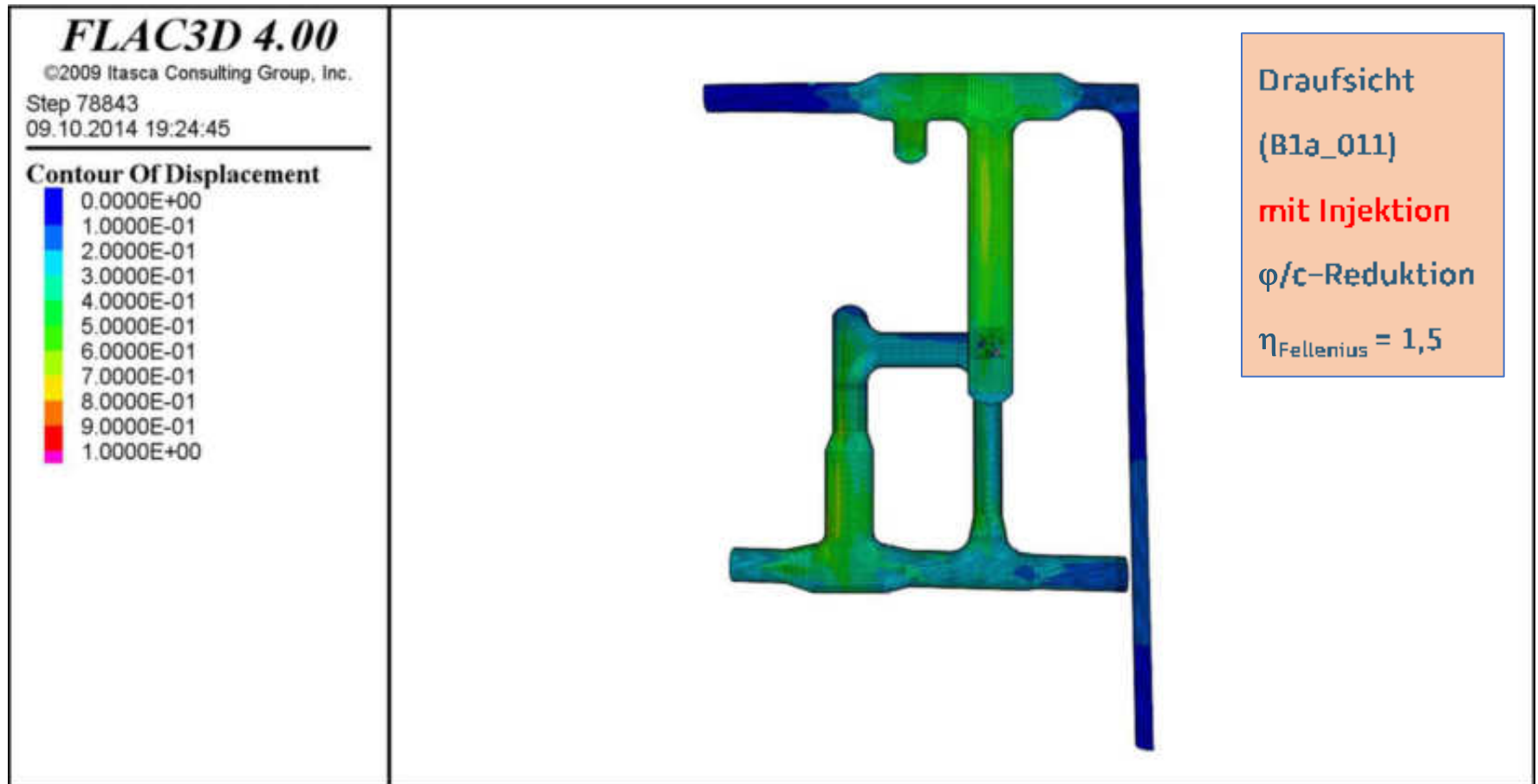
Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage



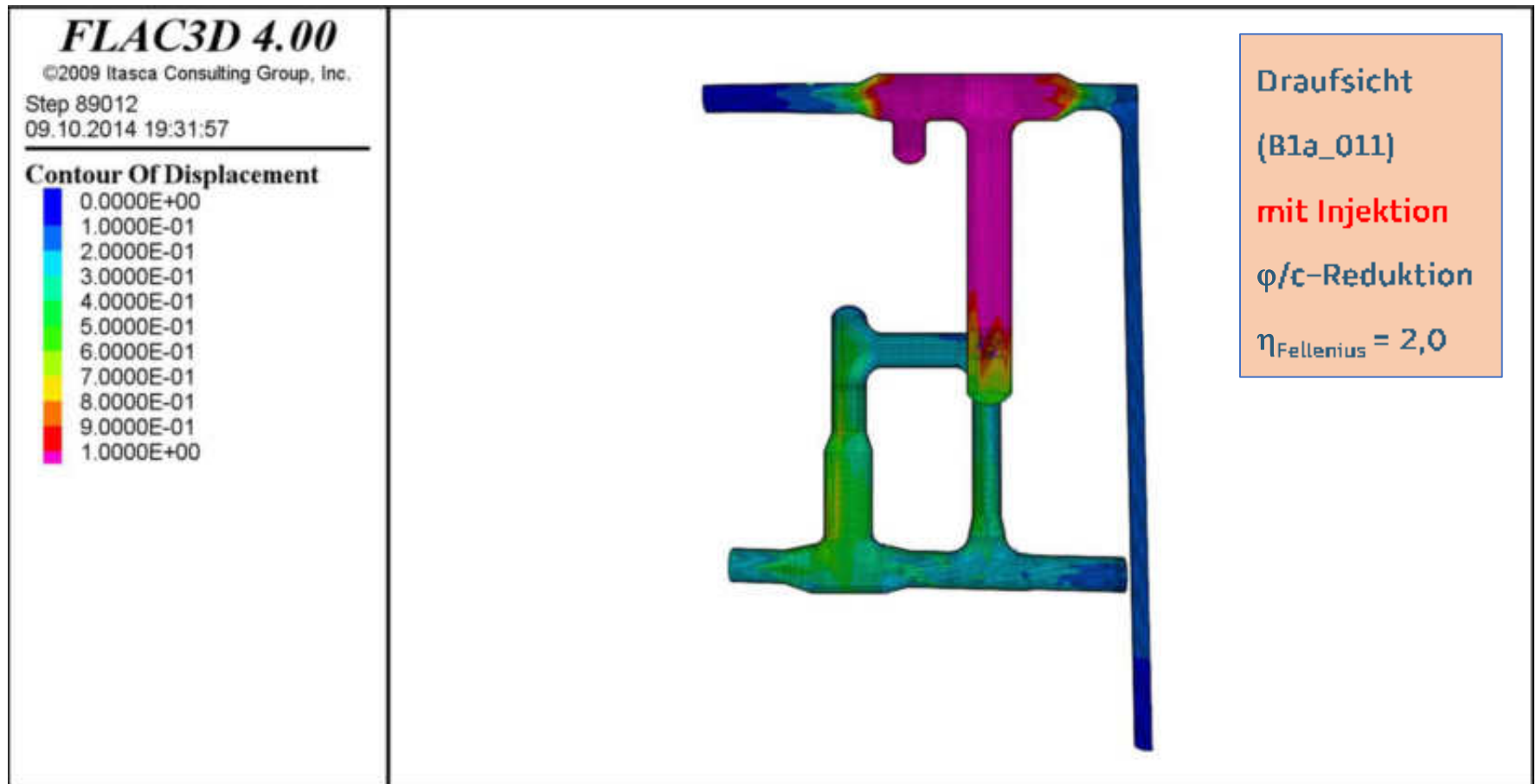
Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage



Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage

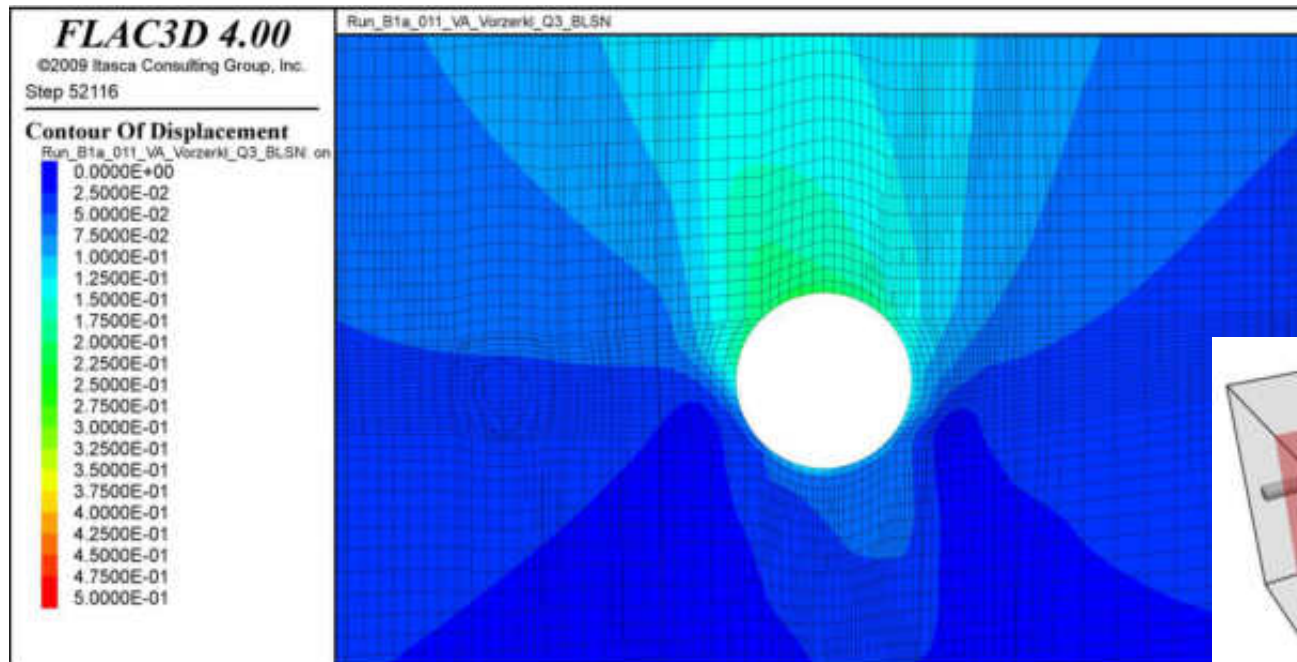


Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage

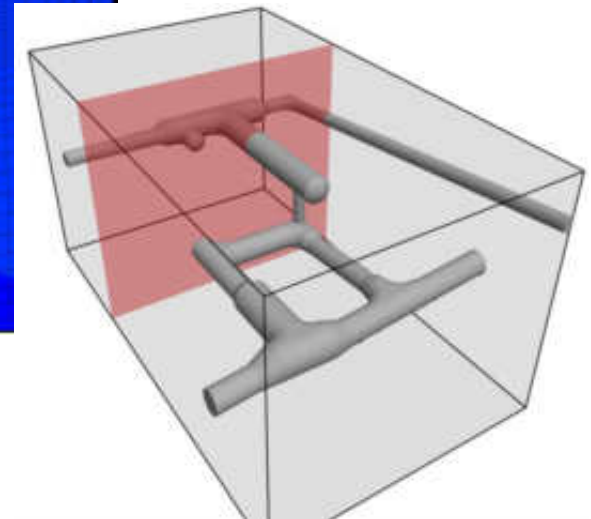


4 Ergebnisse von Prognoseberechnungen

Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage



(B1a_011)
Parametersatz 1
 $\eta_{\text{Fellenius}} = 1,0$
mit Injektion

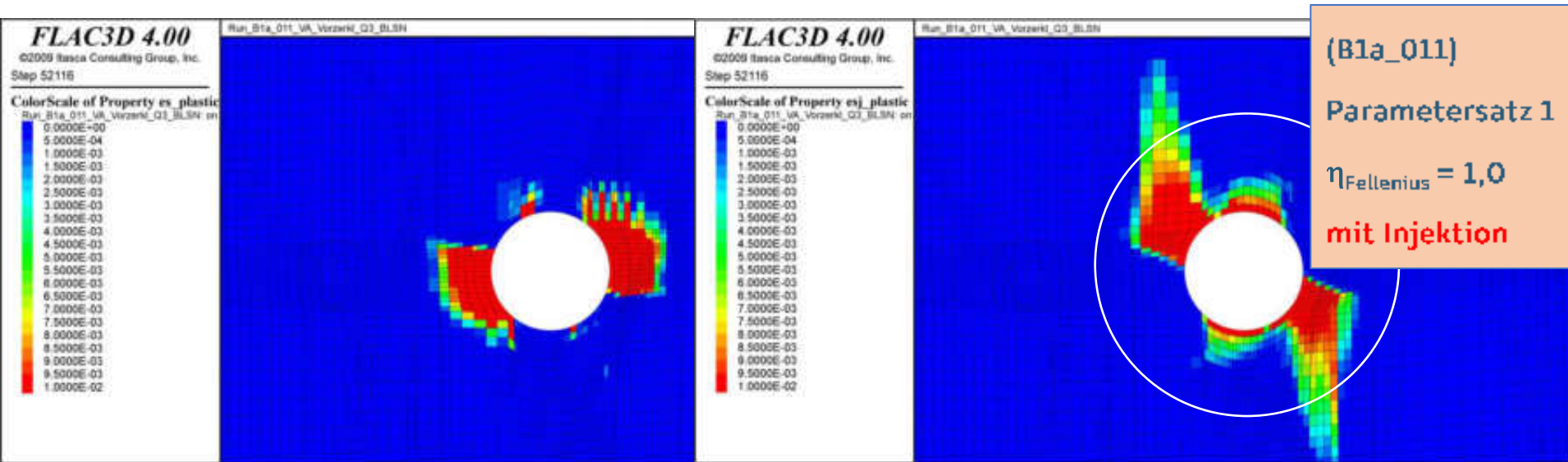


$u_{\text{max}} \approx 25 \dots 35 \text{ cm}$

→ nachgiebiges Ausbausystem (2-schalig mit Gleitankern)

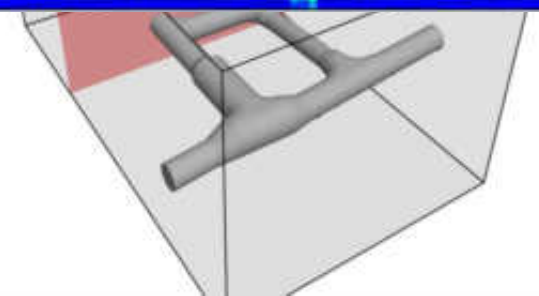
4 Ergebnisse von Prognoseberechnungen

Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage



(B1a_011)
Parametersatz 1
 $\eta_{\text{Fellenius}} = 1,0$
mit Injektion

ALZ \approx 9 m



4 Ergebnisse von Prognoseberechnungen

Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage

Vorbemessung der Schale: Variantenberechnungen

- 30 cm (ohne Injektion)
- 50 cm (ohne Injektion)
- 50 cm (mit Injektion)

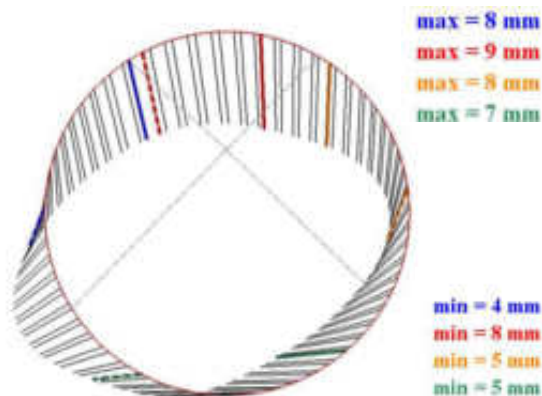
nicht bemessbar, bzw. nicht ausführbar

(B1b_002)

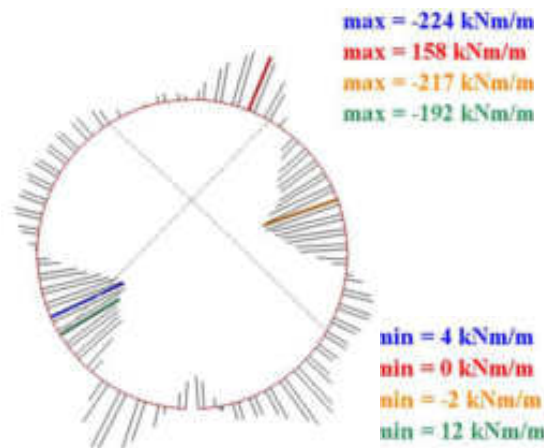
Parametersatz 2

mit Injektion

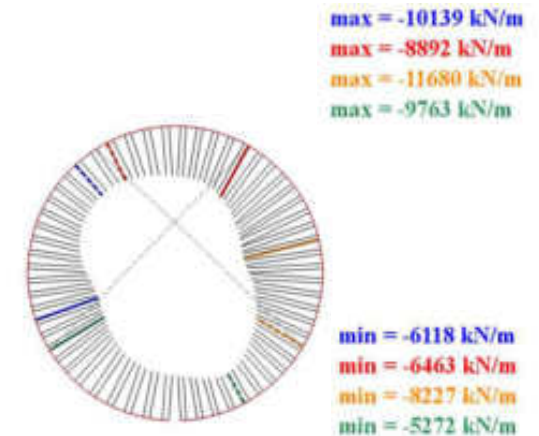
Verschiebungen der Schale



Momente



Normalkräfte



Beispiel: Grubenraum für Vorzerkleinerung der Versatzaufbereitungsanlage

1. Vorgaben Fachplaner:

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

Ausbausystem mit Gleitankeringung 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/m² auf 1,5 Anker/m²

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 Stahllankern 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

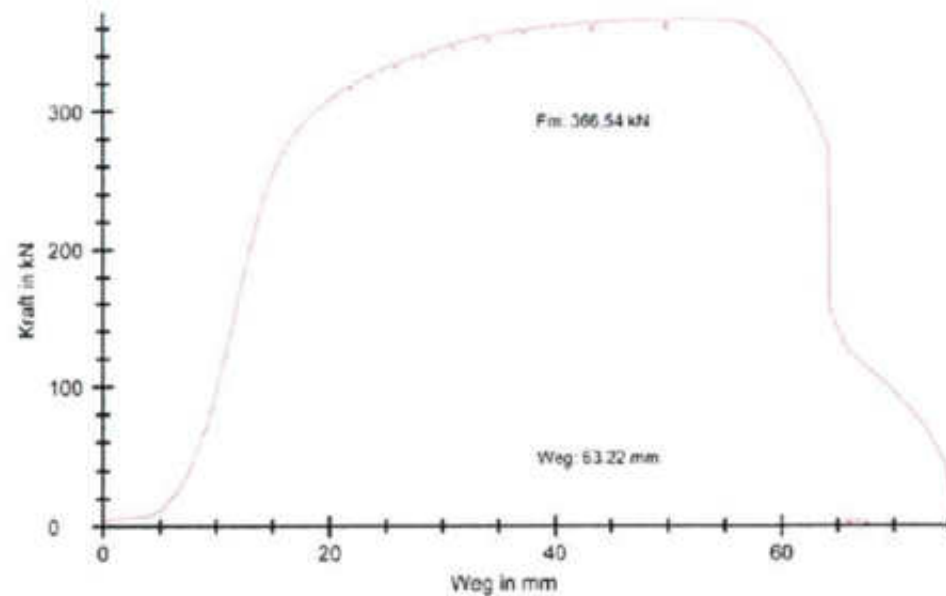
Nachgiebige Anker sind Gebirgsanker, die ein Nachgiebigkeitselement enthalten. Zu den nachgiebigen Ankern gehören Dehnanker und konstruktiv nachgiebige Anker.

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).

Kennlinie hochduktiler Ankerstahl

Hochduktiler Stahl
Güte 500/700
 $F_m = 366 \text{ kN}$
 $F_e \geq 220 \text{ kN}$
 $s = 63 \text{ mm}$
 $A_g \geq 10 \%$



5 Optimierung des Ausbausystems unter Anwendung der Beobachtungsmethode nach EC7

Ausbausystem Vorzerkleinerung (1. Optimierung)



Ausbausystem mit Gleitankern

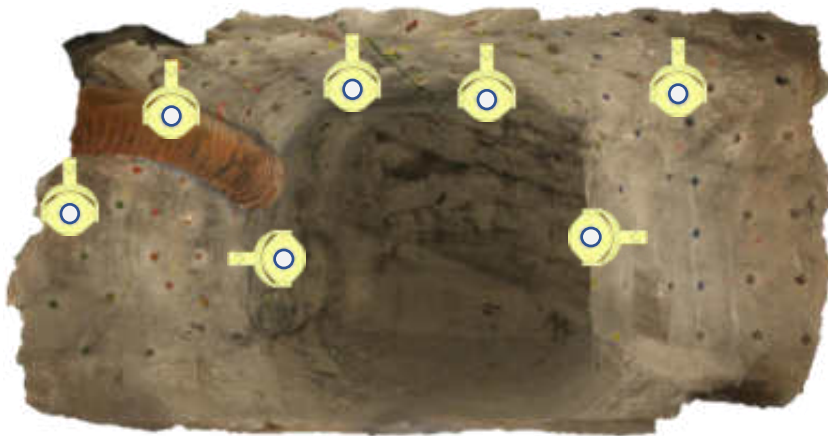


Ausbausystem Vorzerkleinerung Tachymetrische Überwachung



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

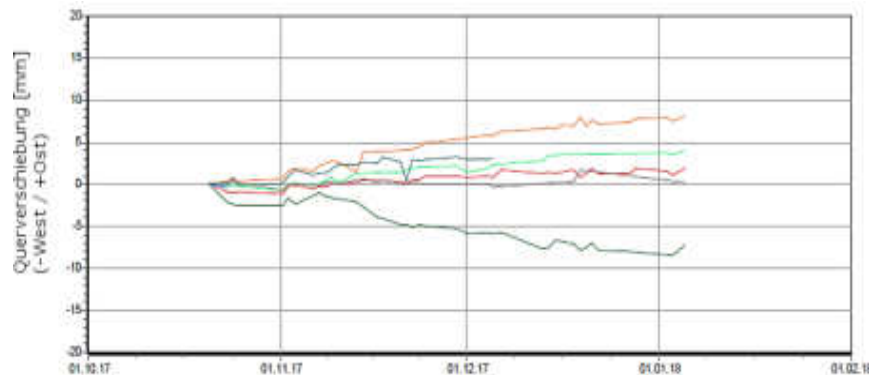
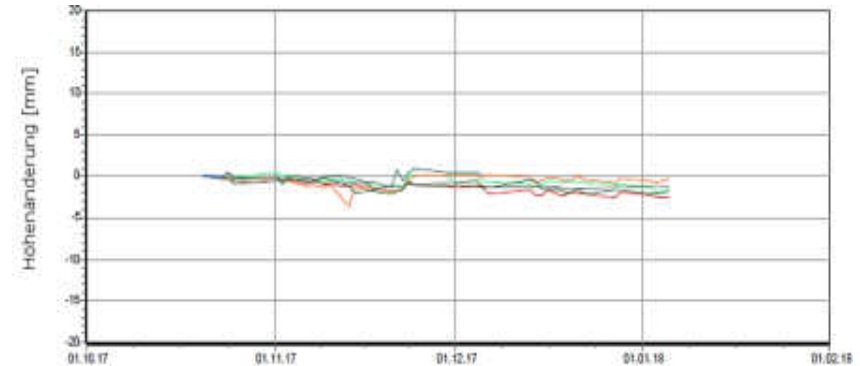
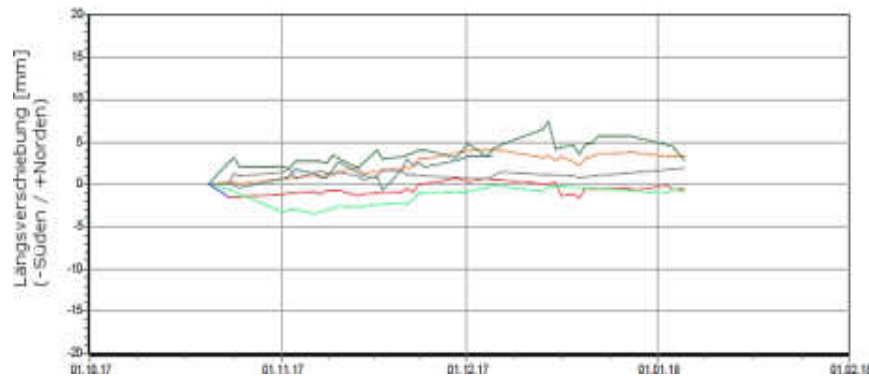


- Realisierung eines eindeutigen Bezugspunktes
- Kompakte Bauform
- Robuste und zuverlässige Detektion unter Tage

Ausbausystem 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/m² auf **0,5 Anker/m²** konnte ein ausreichendes Standsicherheitsniveau nachgewiesen werden.
- Die prognostizierten Verschiebungen lagen im Maximum bei ca. 15 cm. Eine geschlitzte Schale erschien weiterhin als angeraten.

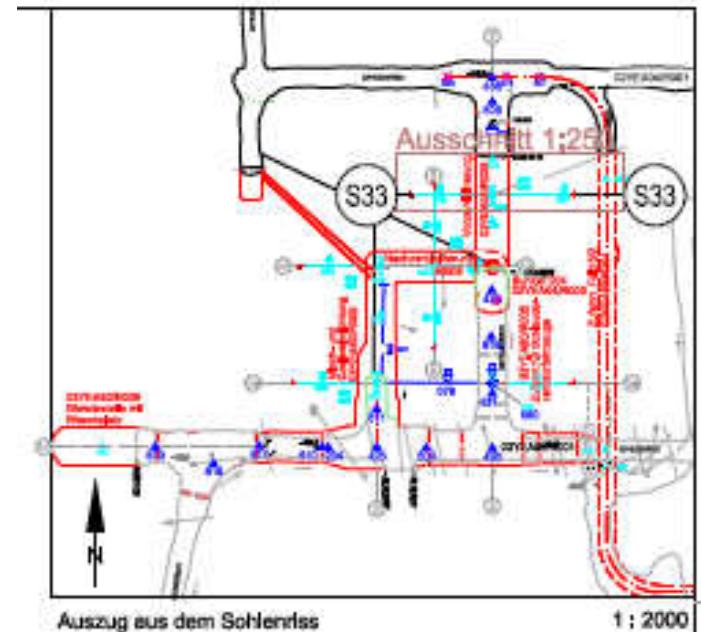
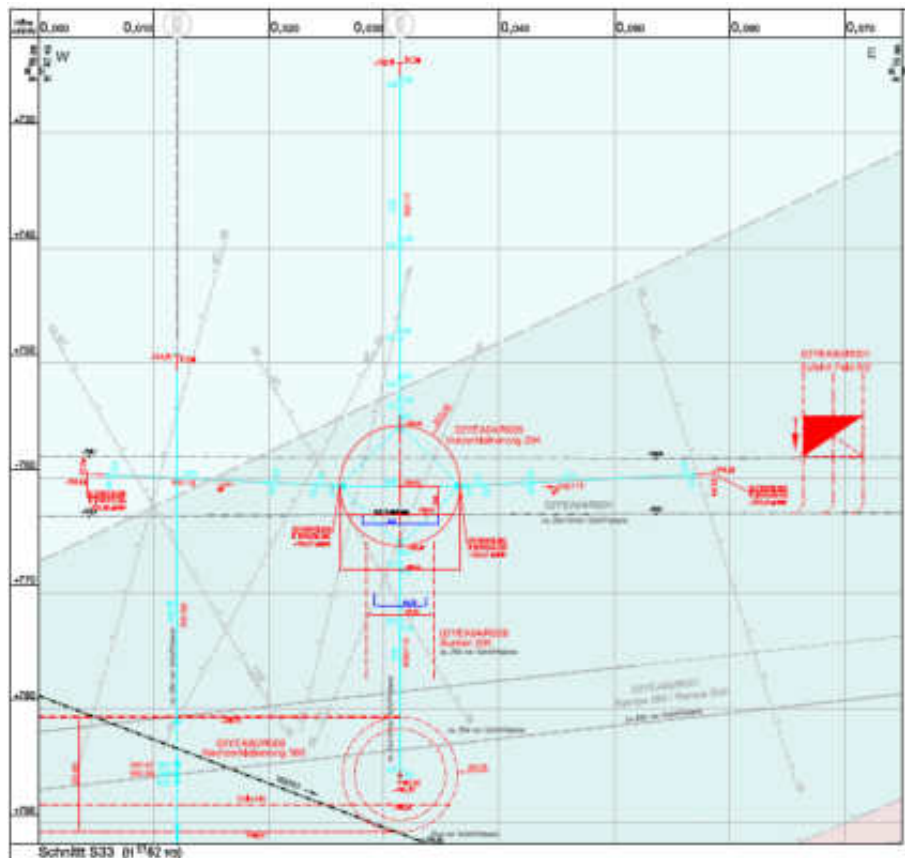
Ergebnis 1. Optimierung



Ergebnis 2. Optimierung



Messtechnische Überwachung des Gebirgsverhalten mit Extensometern

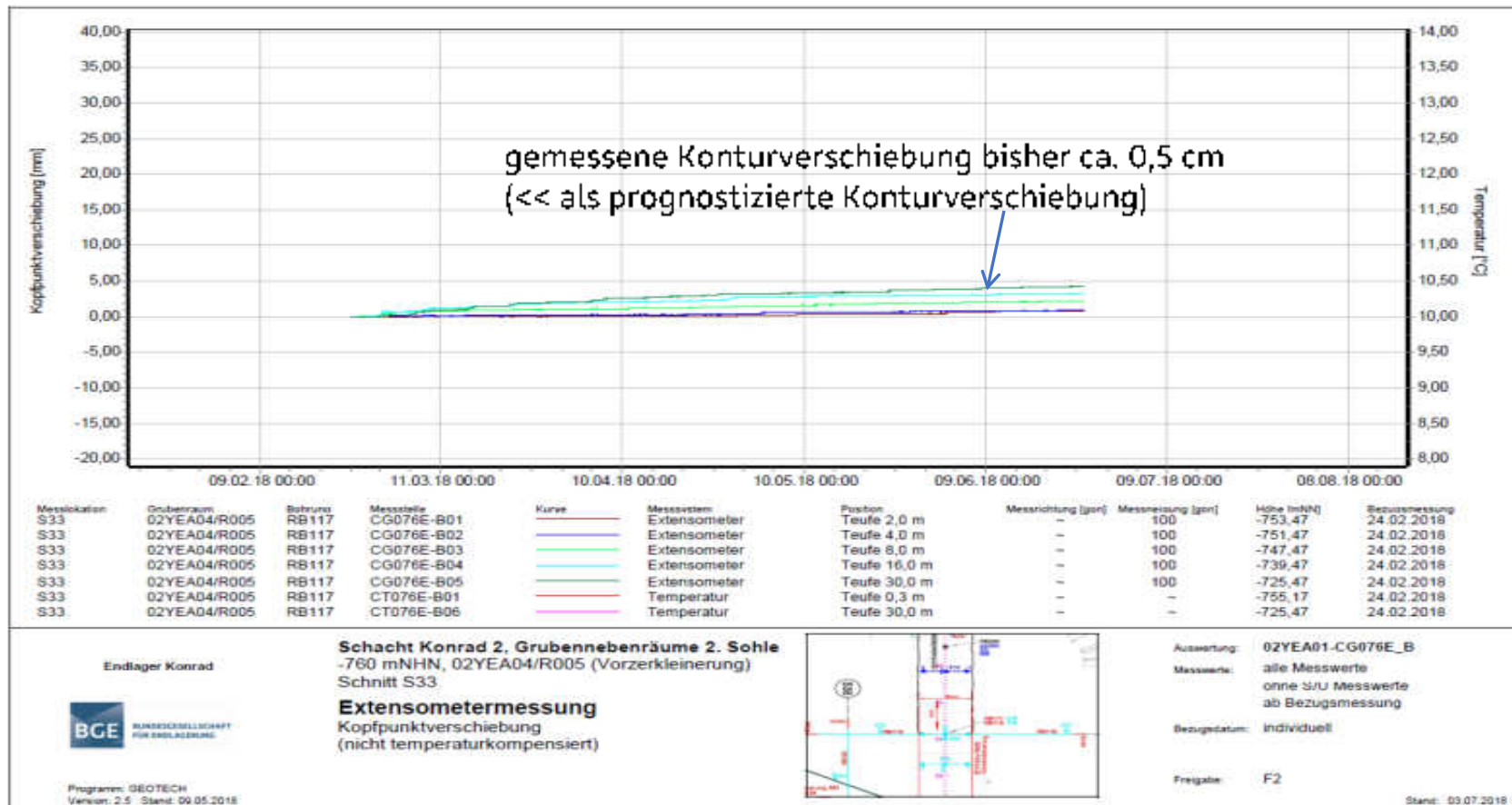


Messtechnische Überwachung des Gebirgsverhalten mit Extensometern



5 Optimierung des Ausbausystems unter Anwendung der Beobachtungsmethode nach EC7

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!**