

BERÜCKSICHTIGUNG DES QUELLENS VON TONSTEIN UND ANHYDRIT BEI DER BEMESSUNG DER TUNNELSCHALE

Bert Schädlich

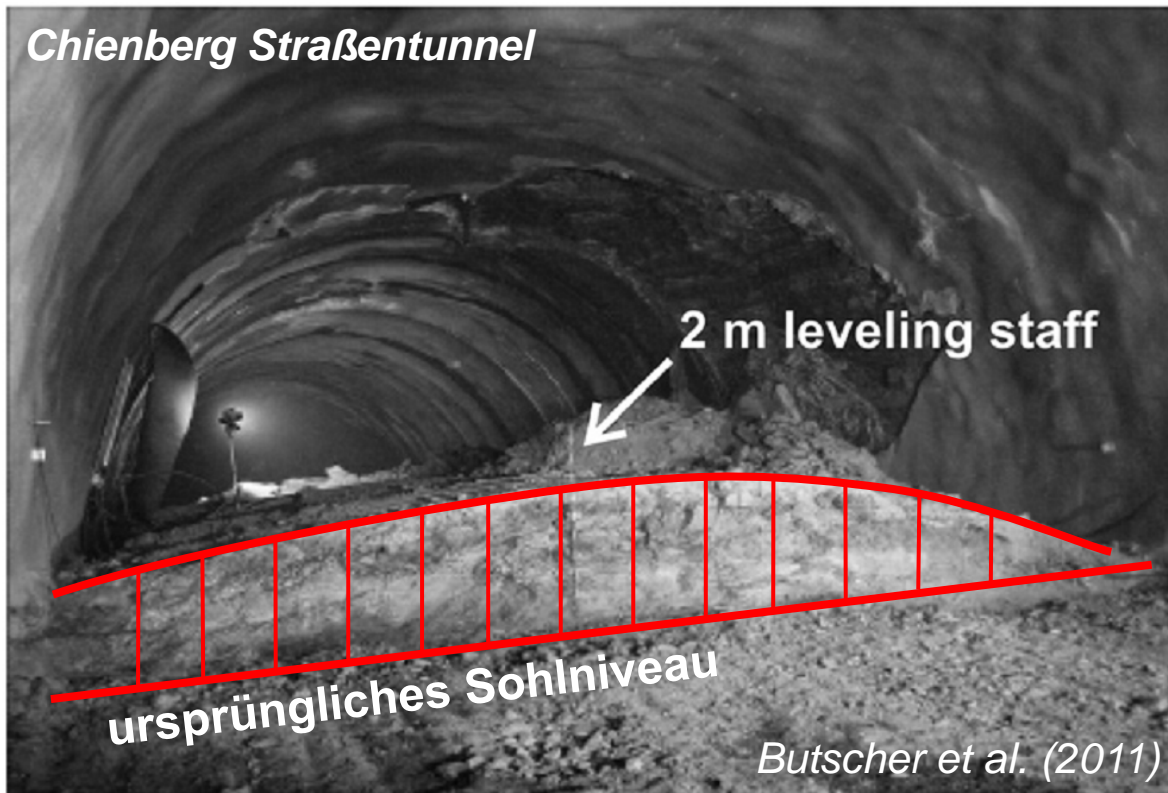
Arbeitsgruppe Numerische Geotechnik
Institut für Bodenmechanik und Grundbau
Technische Universität Graz

Thomas Marcher

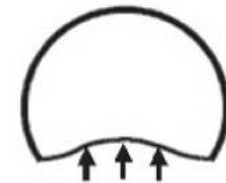
ILF Beratende Ingenieure ZT GmbH

Quellvorgänge im Tunnelbau

- große, teils extrem langanhaltende Sohlhebungen
- Schäden am Ausbau bis zur Zerstörung der Tunnelschale
- typische Gesteinsarten: Tonstein und Anhydrit



Nachgiebiger Ausbau:



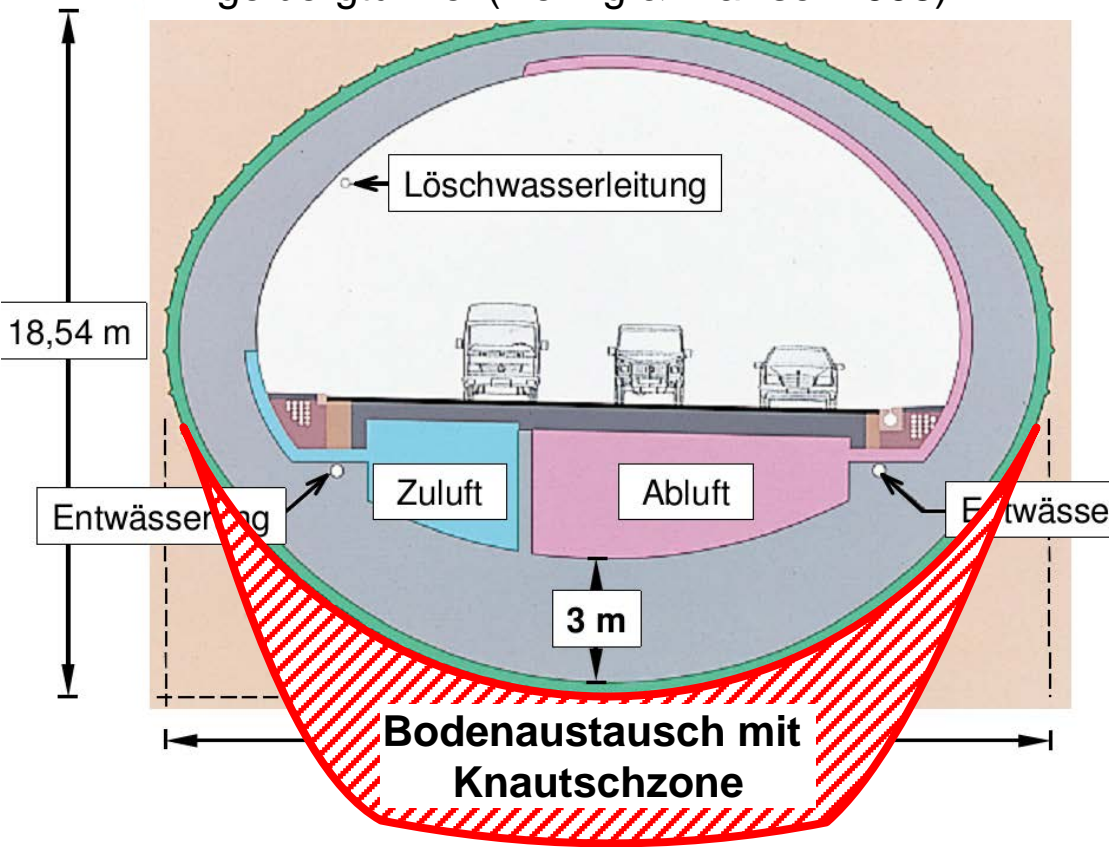
Steifer Ausbau, seichter Tunnel:



Bemessung im quellenden Gebirge

- **Widerstandsprinzip:** Innenschale auf Quelldruck bemessen
- **Ausweichprinzip:** Quellverformungen zulassen

Engelbergtunnel (Hering & Walliser 1998):



Stuttgarter Nachrichten, 23.07.2012:

Im 1999 eröffneten Engelbergtunnel hat es von Anfang an Probleme gegeben. Schon 2002 wurde bekannt, dass [] Tunnelsegmente um bis zu zwei Zentimeter auseinandergedriftet waren. Es kam zu Verwerfungen der Fahrbahn und ersten Rissen im Beton.

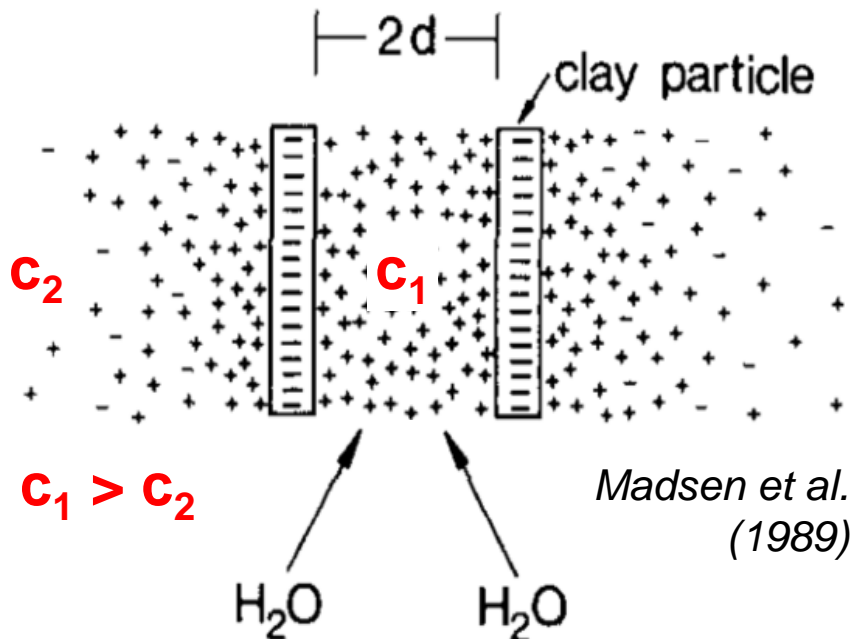
*...
Zwischendurch wurde auch mal ein Stahlnetz eingehängt, um von der **Decke bröckelnden Beton** aufzufangen. Und nach Wassereinbrüchen im Winter mussten für Autofahrer gefährliche Eiszapfen von der Decke geschlagen werden.*

*..
Wenn die Messungen im Inneren des Berges beendet und ausgewertet sind, dürfte es noch einmal richtig teuer werden. Denn danach [] soll der Engelbergtunnel saniert werden. [] Mit einem „zweistelligen Millionenbetrag ist zu rechnen“.*

Chemo-mechanische Prozesse

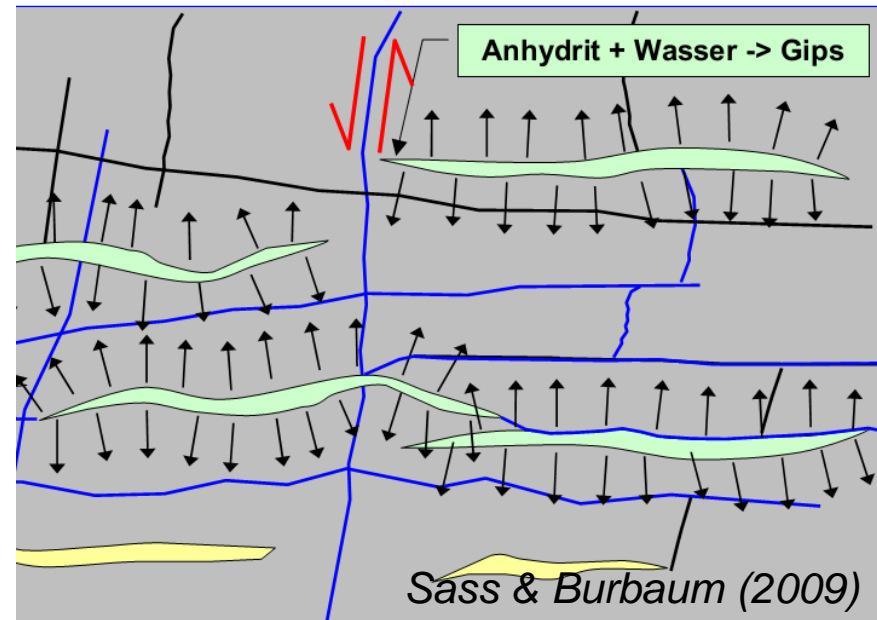
Tonquellen:

- osmotisches Quellen
- verursacht durch unterschiedliche Kationen-Konzentrationen
- Wasser wird an Tonpartikel gebunden \rightarrow Volumenzunahme



Anhydritquellen:

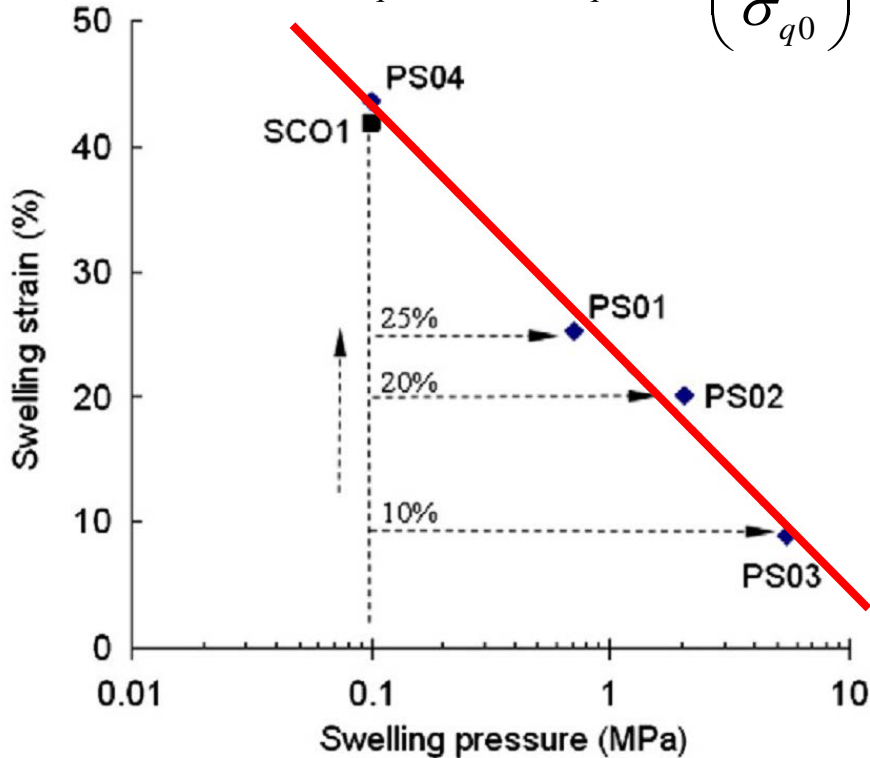
- chemische Reaktion von Anhydrit + Wasser \rightarrow Gips unter $\sim 60\%$ Volumenzunahme
- Gips gelöst in Porenwasser
- Auskristallisation in vorhandenen Rissen und Makroporen



Spannungs – Dehnungs - Beziehung

Grobs Quellgesetz

$$\varepsilon_q^{(t=\infty)} = -k_q \cdot \log\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{q0}}\right)$$

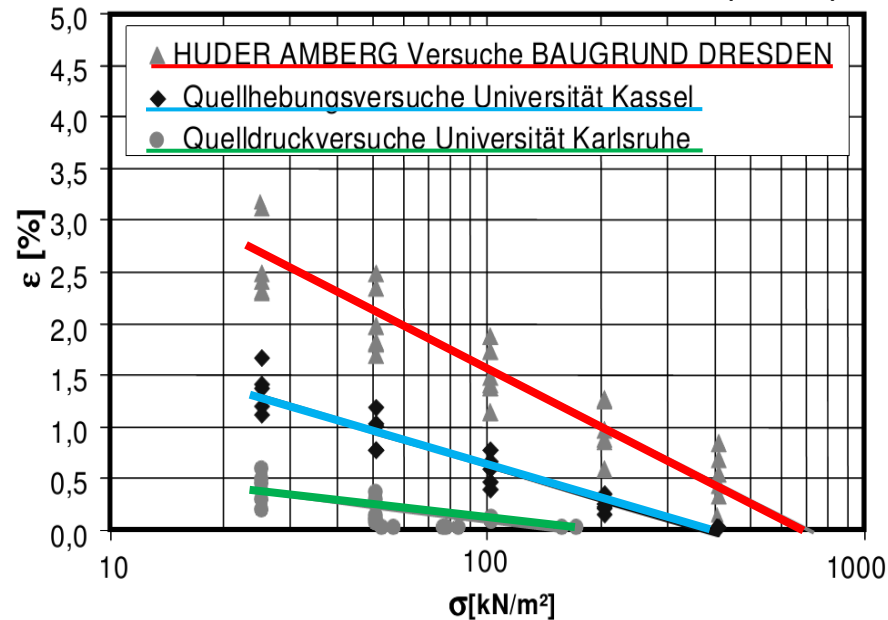


Wang et al. (2012)

Laborversuche

- Quellparameter abhängig von Art des Laborversuches

v. Wolffersdorff & Fritzsche (2004)

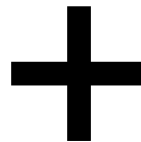
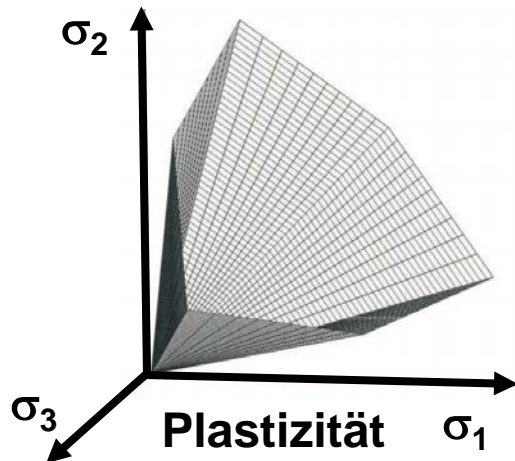
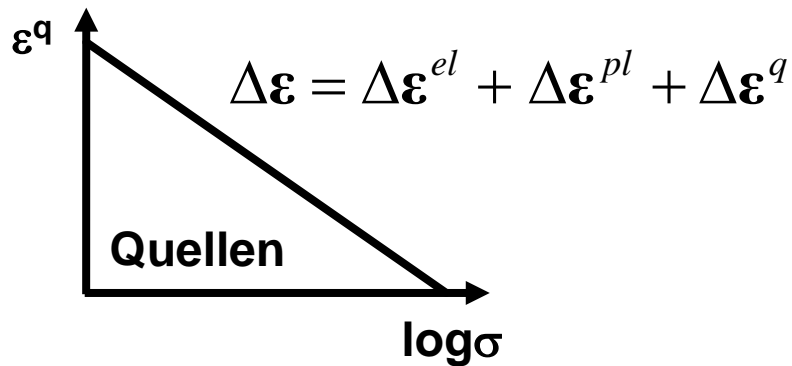


➔ Bedarf an Normung und Standardisierung!

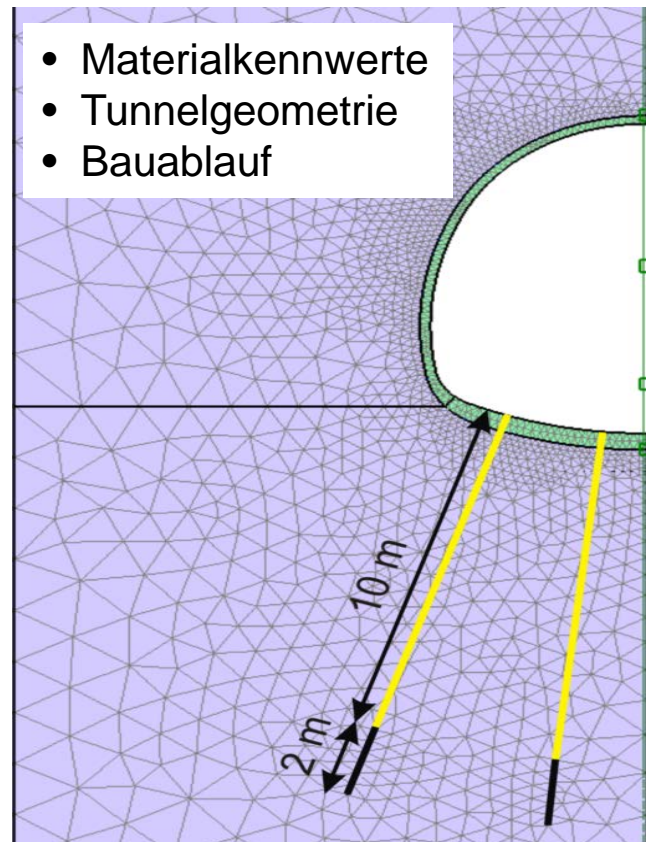
Quelldruckermittlung – Variante 1

- komplette numerische Berechnung

Stoffgesetz



Numerisches Modell

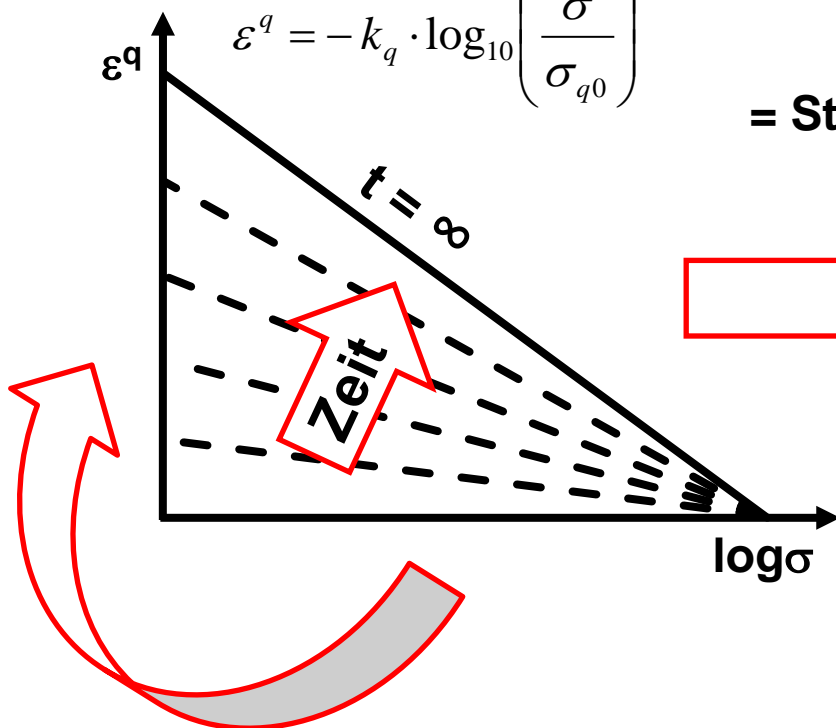


Quelldruckermittlung – Variante 2

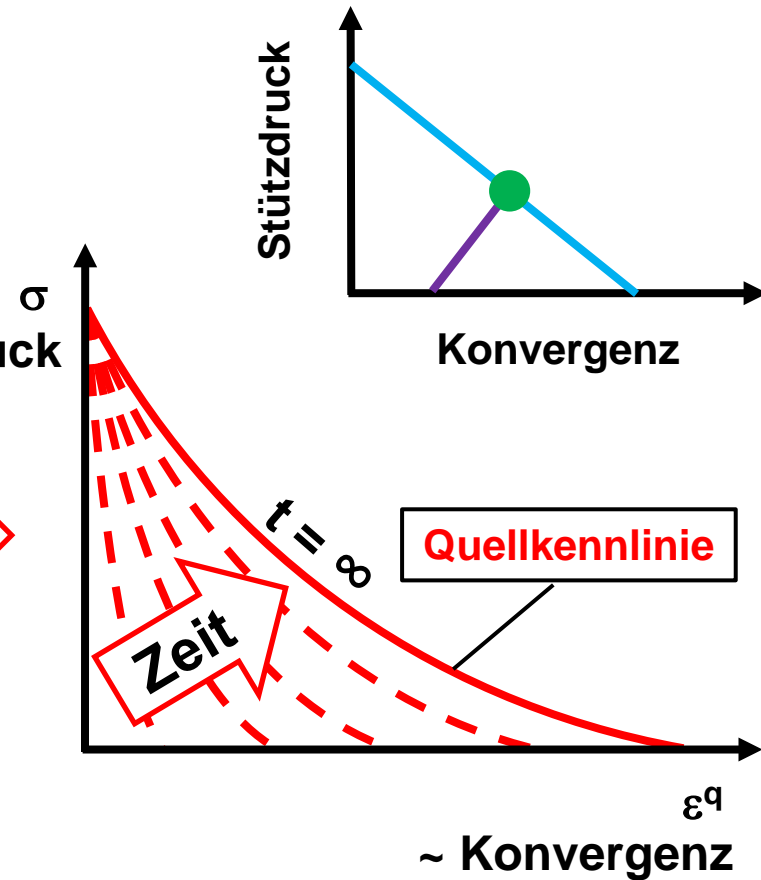
- Verknüpfung mit Gebirgskennlinie

Grobs Quellgesetz

$$\varepsilon^q = -k_q \cdot \log_{10} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{q0}} \right)$$

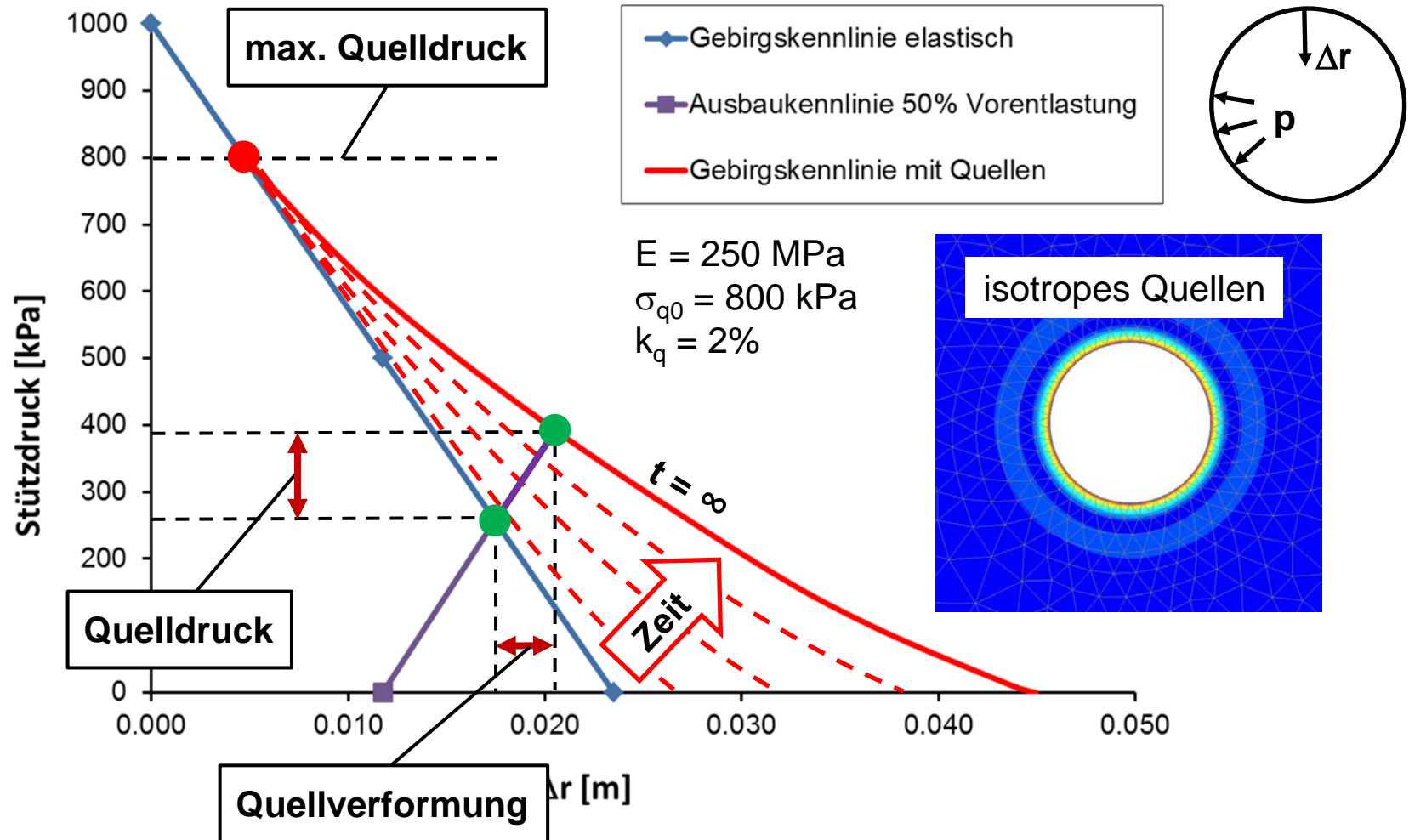


= Stützdruck



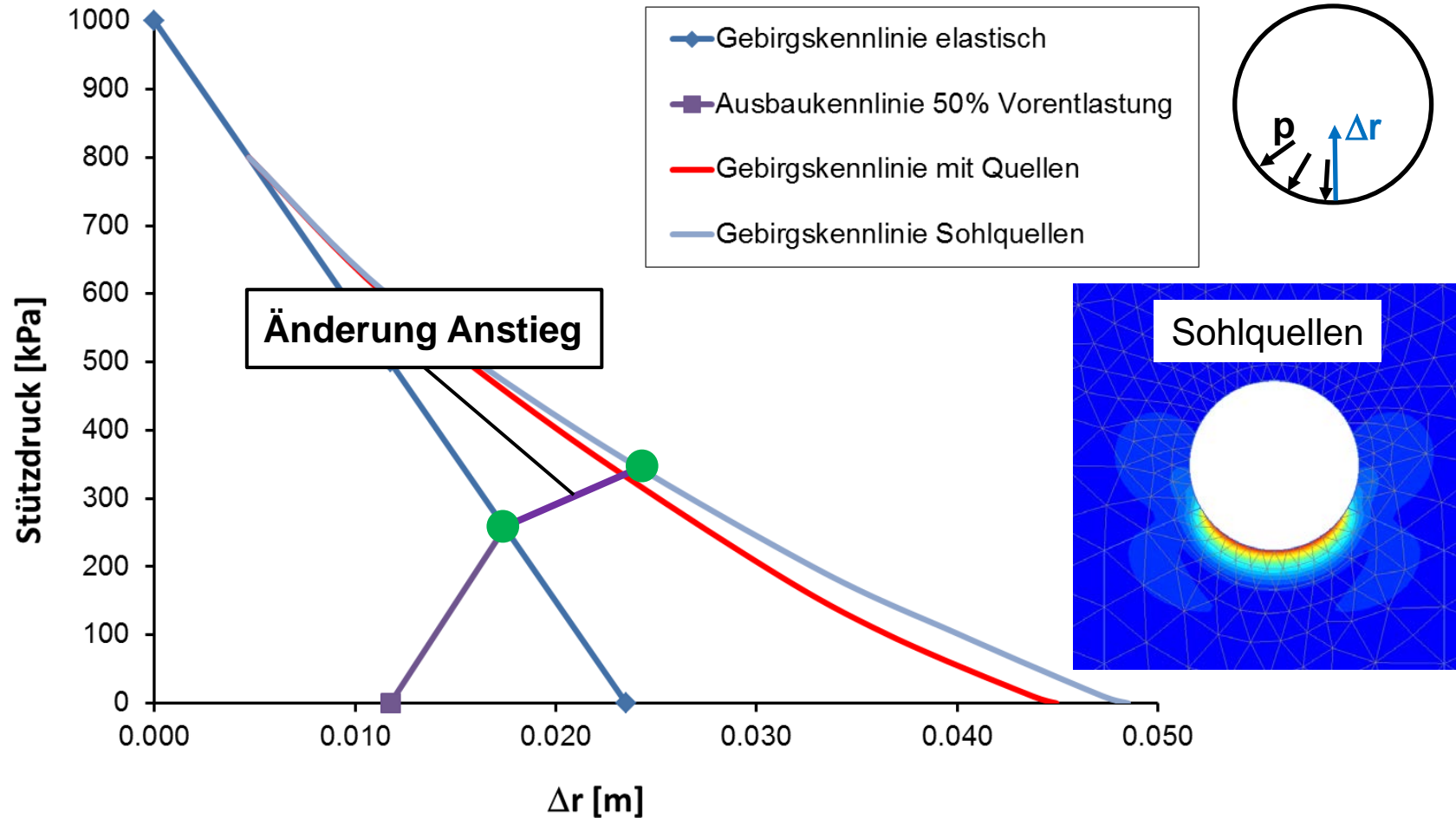
Quelldruckermittlung – Variante 2

- Beispiel: Kreisquerschnitt $d = 10\text{m}$, isotropes Quellen, linear elastisches Gebirge



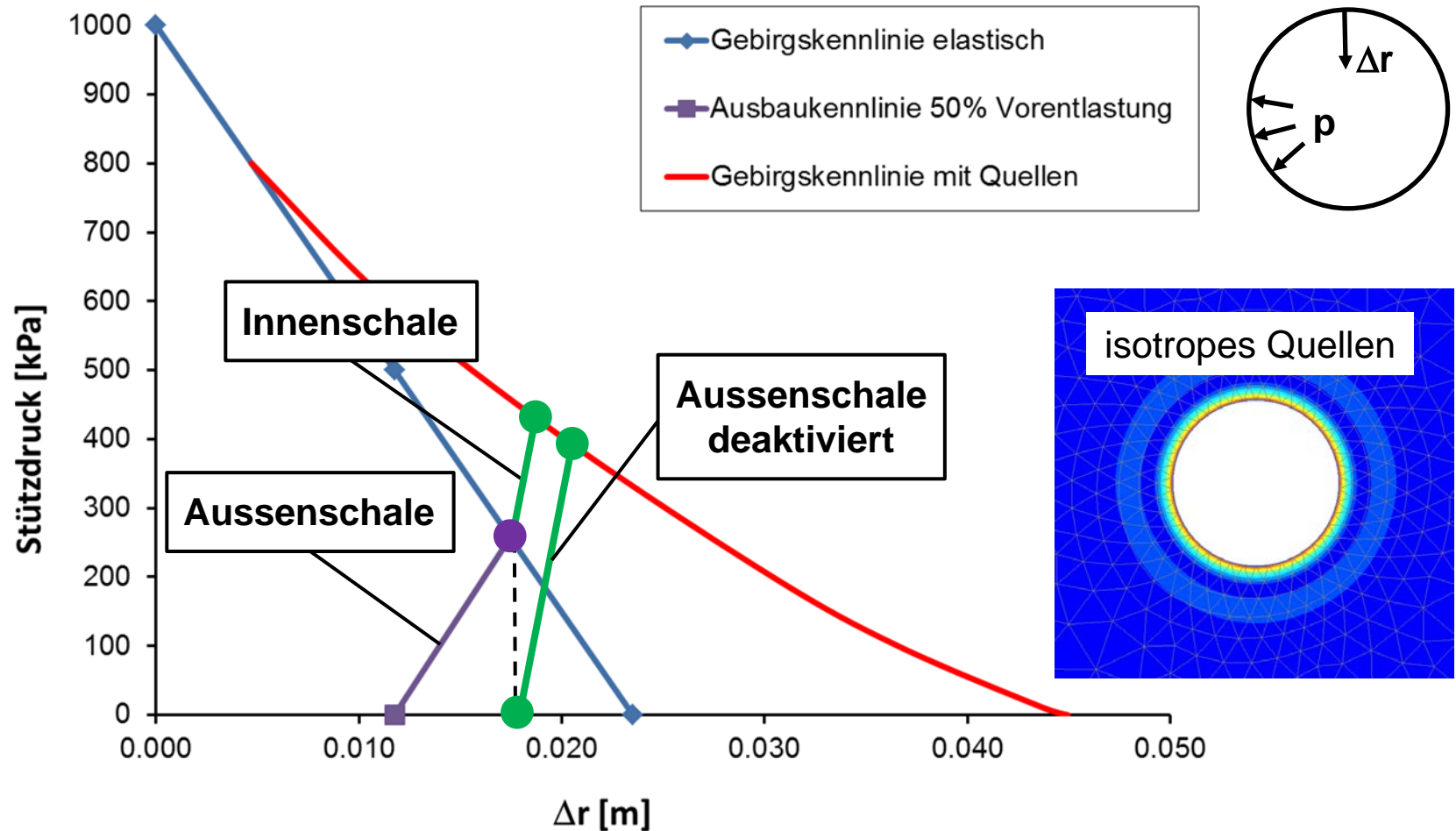
Quelldruckermittlung – Variante 2

- Sohlquellen → nicht-isotrope Belastung der Tunnelschale



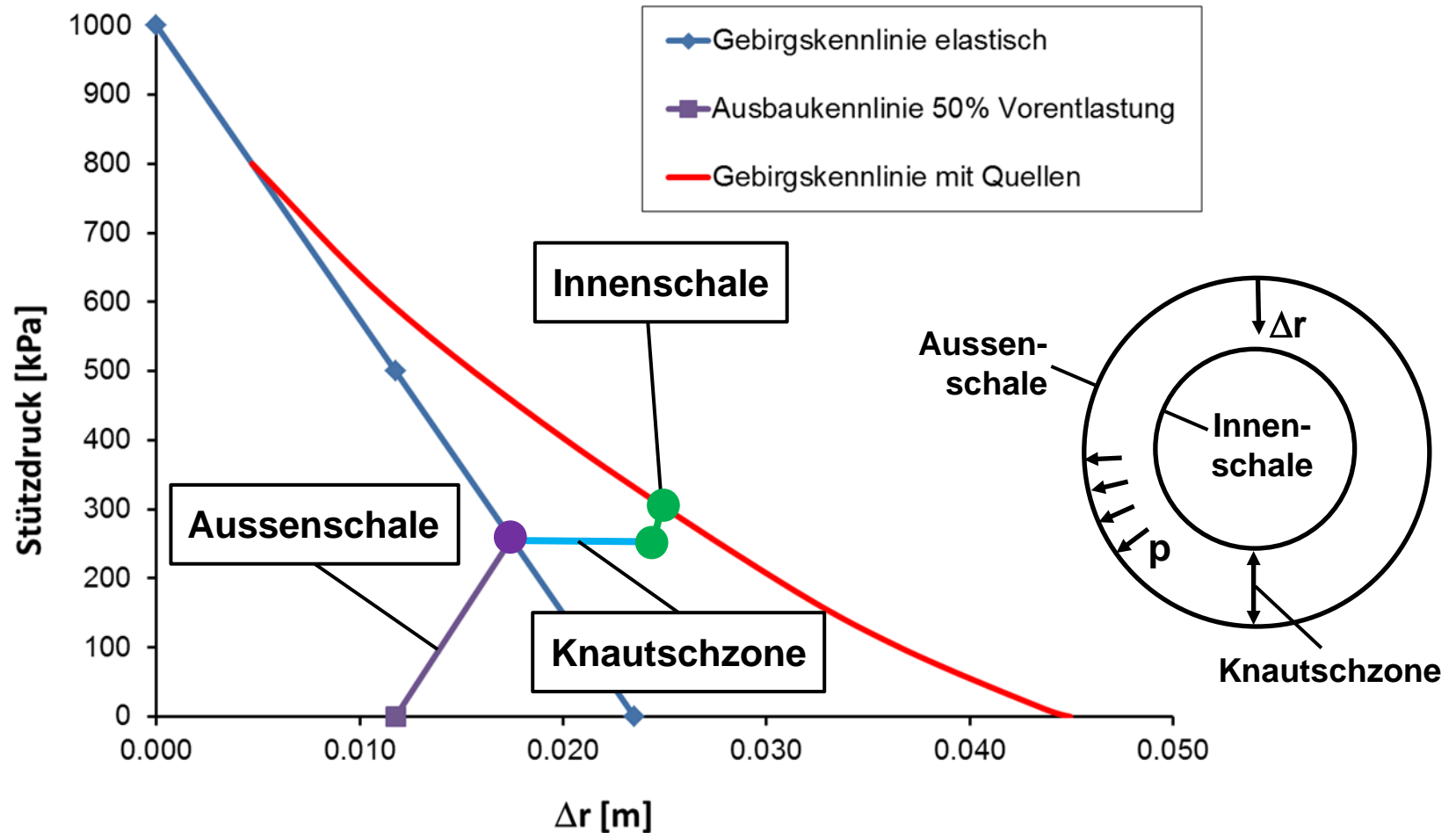
Quelldruckermittlung – Variante 2

- Änderung Ausbauwiderstand (Einbau Innenschale)



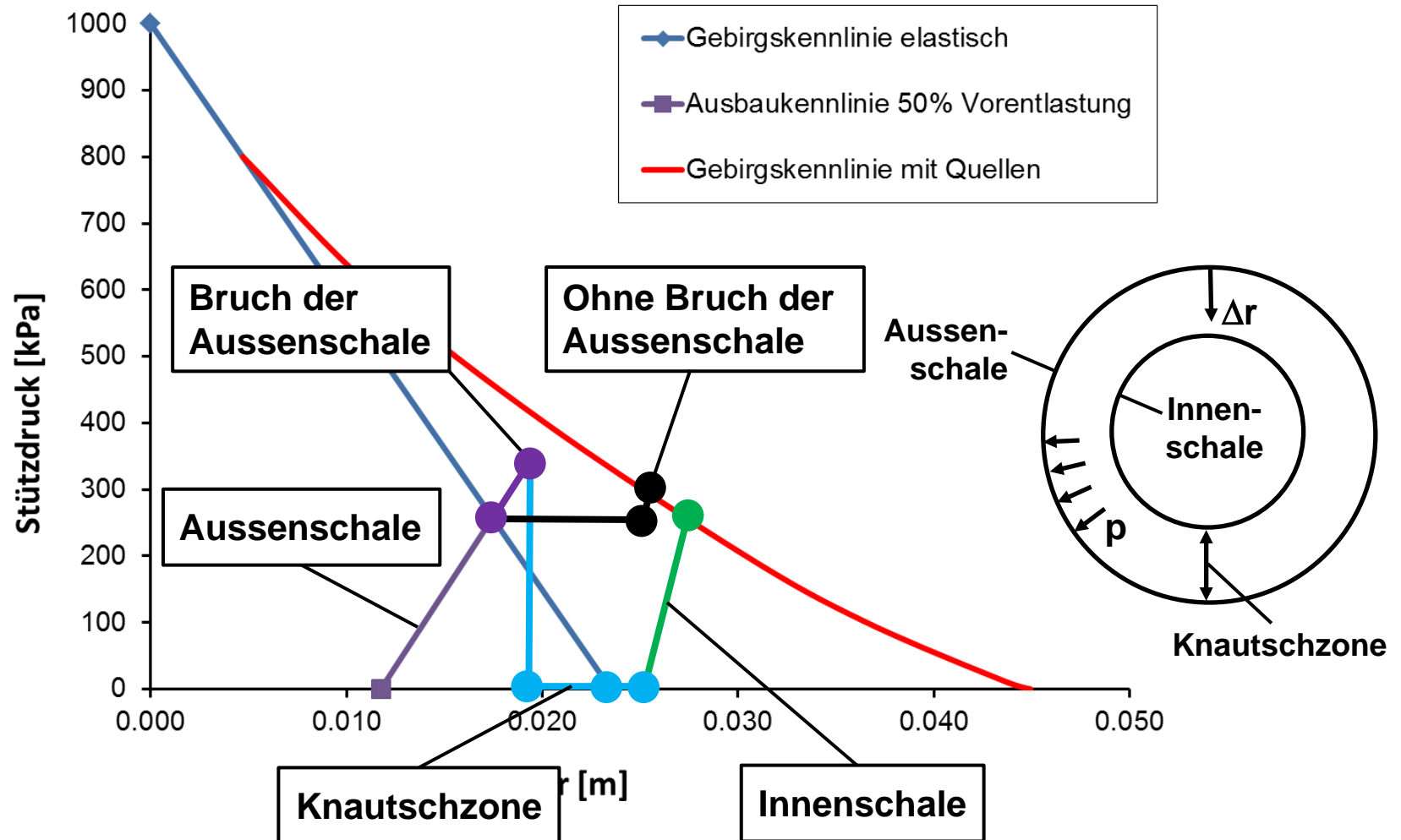
Quelldruckermittlung – Variante 2

- Berücksichtigung Knautschzone (Ausweichprinzip) **ohne Versagen der Aussenschale**



Quelldruckermittlung – Variante 2

- Berücksichtigung Knautschzone (Ausweichprinzip) **mit Versagen der Aussenschale**



Quellbemessung

▪ Bedeutung der Quelldruckbemessung

- Zeitabhängige Verformungen (Quellen/Kriechen) ergeben (oft) maßgebende Bemessungsgrößen
→ realistische Vorgabe von Quelldrücken entscheidend (Bemessungquelldrücke)
- Geologisch/geotechnische Gutachten geben oft unrealistische Quelldrücke vor; Gründe:
 - falsch ausgeführte Tests
 - falsch interpretierte Tests
 - falsches Verständnis der Quellprozesse
- die Überschätzung der Quelldrücke führt schnell zu „go / no go criteria“
- Maßgebender Faktor für Wirtschaftlichkeit / Effizienz

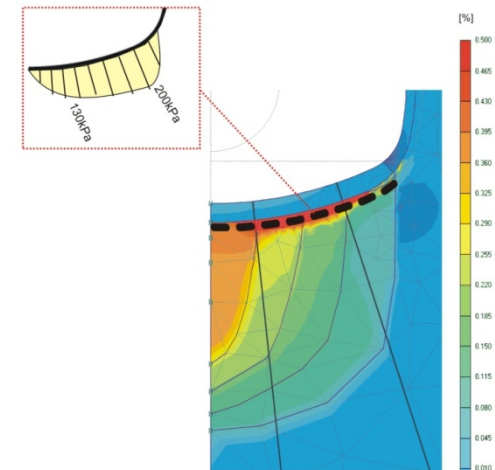


Quellbemessung

▪ Bedeutung der Quelldruckbemessung

- Quelldrücke definiert in Abhängigkeit:
 - Gesteinsmineralogie
 - Gesteinskennwerte
 - in-situ Spannungszustand
 - Wasserhaushalt

- Weitere Faktoren die den Quelldruck beeinflussen:
 - Vortriebsmethode
 - Bauablauf
 - Ausbau / Stützmittel
 - Tunnelgeometrie

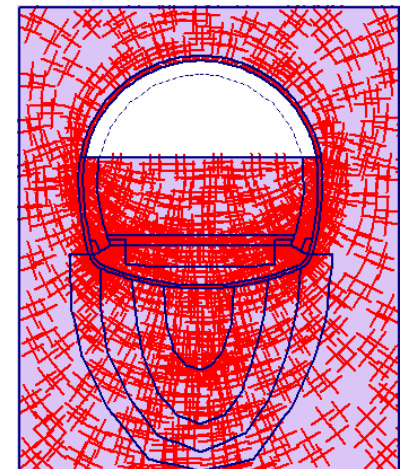
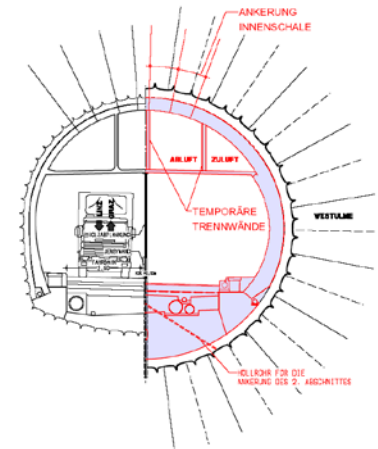


Quellbemessung

■ Bemessungsregeln für Quelldrücke

Allgemeine Richtlinien

- bei den Quelldrücken (radiale Verteilung) handelt es sich in der Regel um Bemessungslasten
→ keine Reduktion durch Nachgiebigkeit oder 3D-Effekte des Systems
- Gebirgsdruck, Wasserdruck und Quelldruck werden in Kombination nicht addiert
→ nur der größte Wert maßgebend

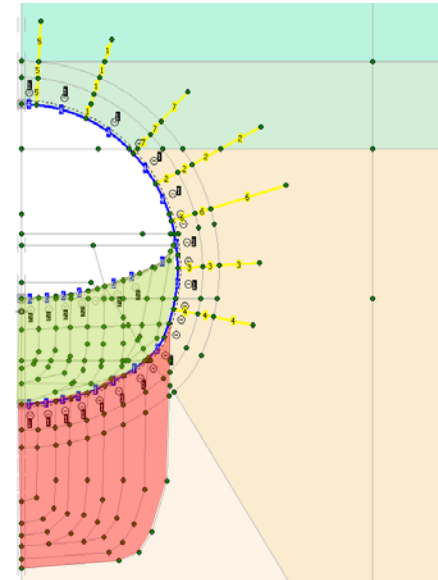


Quellbemessung

■ Bemessungsregeln für Quelldrücke

Außenschalenbemessung

- Quelldruck wird wie Gebirgsdruck charakteristisch behandelt
 - Bemessung der Spritzbetonschale
- Größenordnung des Quellens auf AS abhängig von
 - zeitlicher Verlauf des Quellprozesses
 - Bauablauf / Bauzeit
- Quelldruck wirkt vorwiegend in der Sohle
 - üblicherweise sichelförmige Verteilungen
 - Tiefe der aktiven Quellzone von $\frac{1}{2}$ bis 1 D
 - oft Verwendung von Ersatzlasten oder Volumenquellen

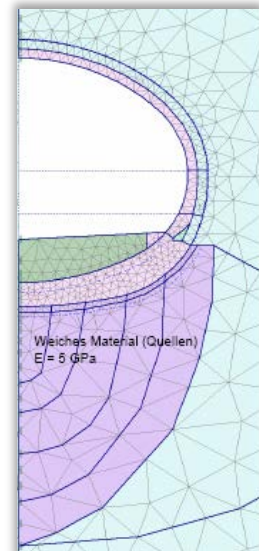
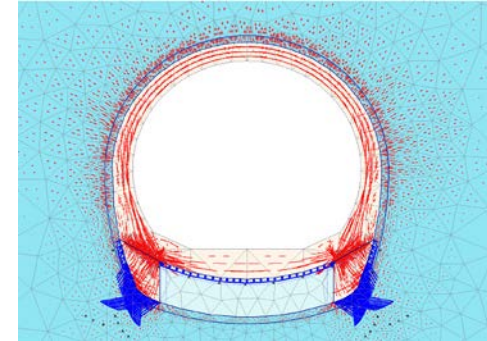


Quellbemessung

■ Bemessungsregeln für Quelldrücke

Innenschalenbemessung

- Größenordnung des Quellens auf IS abhängig von
 - zeitlichem Verlauf des Quellprozesses
 - Bauablauf / Bauzeit
- Nachgiebigkeitsprinzip: zusammendrückbare Schichten
 - mittels FE-Analysen wird die Reaktionen aus den Betonschultern auf das Innenschalengewölbe ermittelt
 - weitere Berechnung üblicherweise am Stabwerk
- Quelldrücke werden wie Gebirgsdrücke behandelt
 - ständige Einwirkung, TSF (LF1) = 1,35
- Quelldruck kann im zweischaligen Ausbau ohne Gebirgsdruck auftreten



Zusammenfassung

- **Quellverhalten von Tonstein und Anhydrit**
 - grundlegend unterschiedliche chemo-mechanische Prozesse
 - in beiden Fällen von Wasserzufuhr abhängig
- **Laboruntersuchungen**
 - Quellparameter abhängig von Untersuchungsmethode → Bedarf an Standardisierung der Laborversuche
- **Numerische Beschreibung**
 - Spannungs-Quelldehnungs-Verhältnis durch semi-logarithmische Beziehung beschreibbar (Diskussion)
- **Ermittlung des Quelldrucks**
 - 1. Variante: Komplette numerische Modellierung mit geeignetem Stoffgesetz → vielfältige Geometrien und Belastungsbilder abbildbar
 - 2. Variante: Kombination von Quellkennlinie und Gebirgskennlinie → ermöglicht Interpretation von verschiedenen Ausbaukonzepten