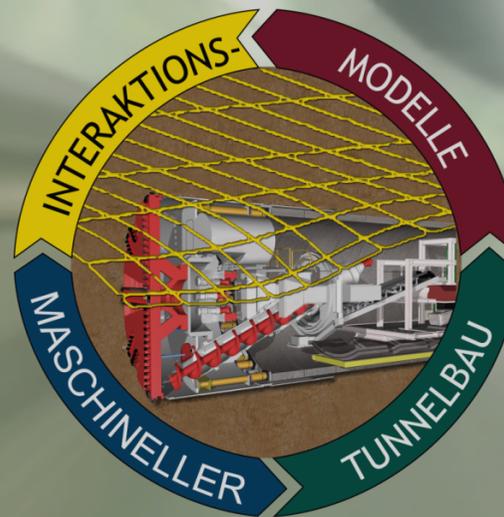


Collaborative Research Center  
SFB 837

Interaction Modeling in Mechanized Tunneling



**D:** Informationsmangement,  
Unschärfe- und Risikomodelle

**A:** Baugrund &  
Vortriebsmaschine

Vorauserkundung  
Baugrundverhalten

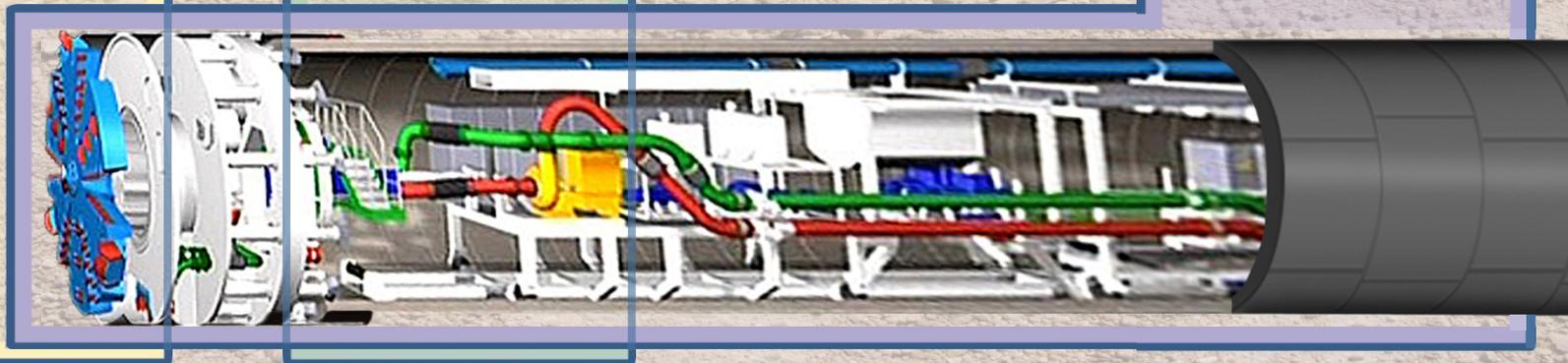
**B:** Ausbau &  
Stützmaterialien

Ausbau  
Ringspaltstützung

Risikobewertung  
Bebauung  
Unschärfemodelle  
Modellintegration

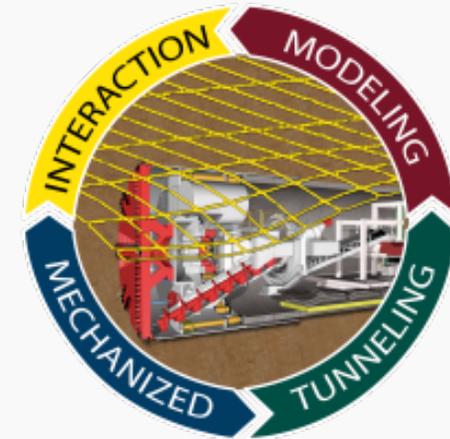
**C:** Vortriebsmaschine &  
Prozessmodellierung

Verfahrenstechnischer  
Ablauf  
Vortriebs- und  
Abbauprozess

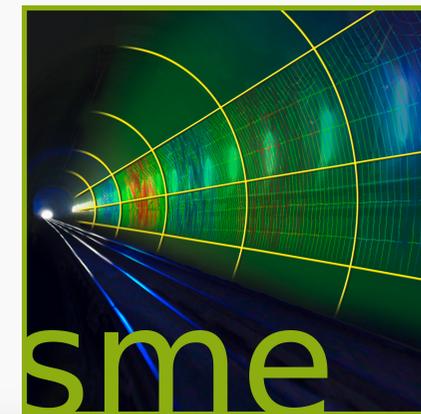


# Forschung im Bereich unterirdisches Bauen an der RUB

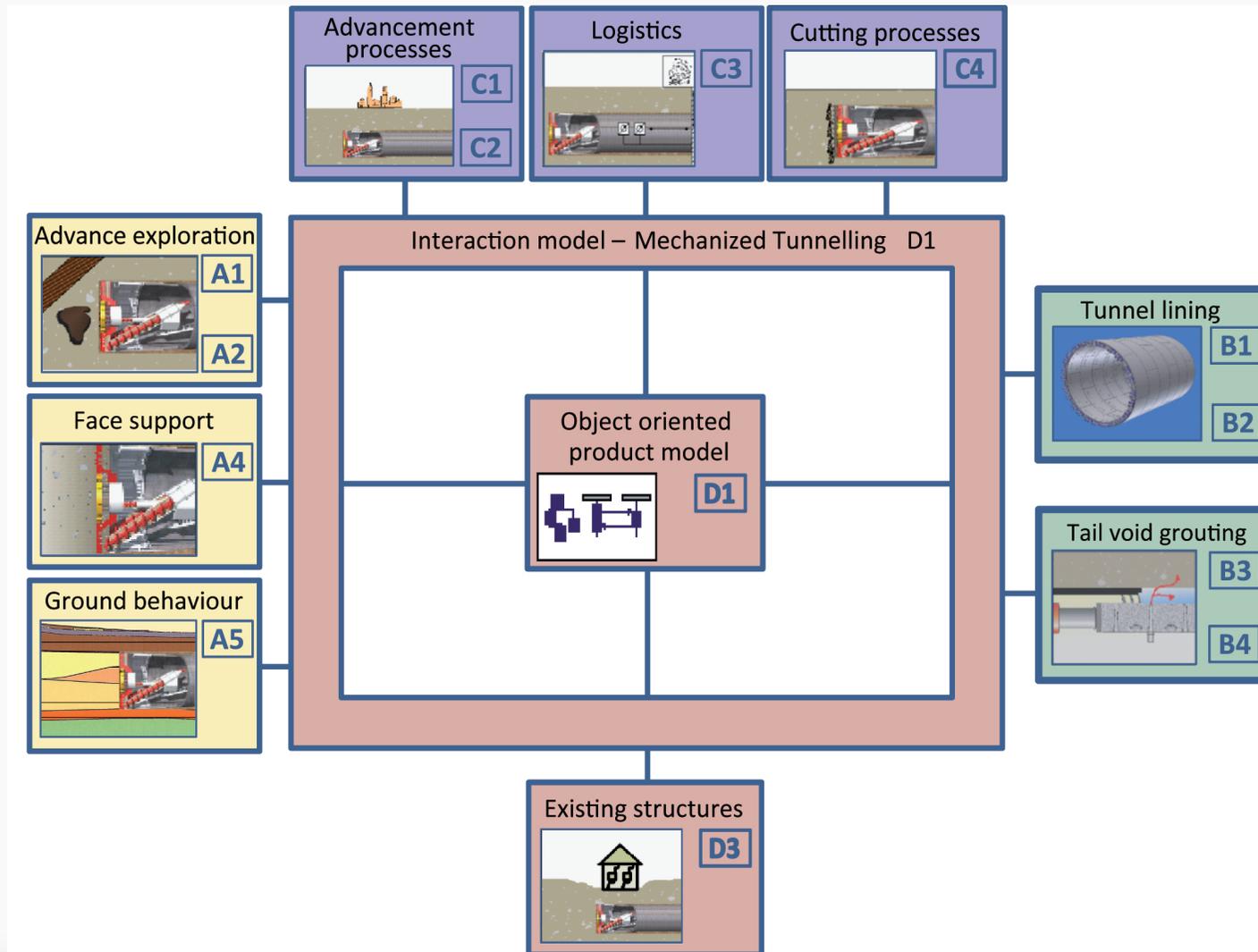
## DFG Sonderforschungsbereich „Interaktionsmodelle im maschinellen Tunnelbau“



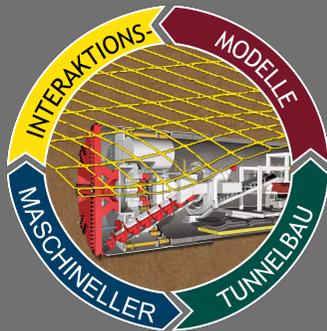
Research Department „*Subsurface Modeling and Engineering*“: Fakultätsübergreifender Forschungsschwerpunkt der Ruhr-Universität Bochum



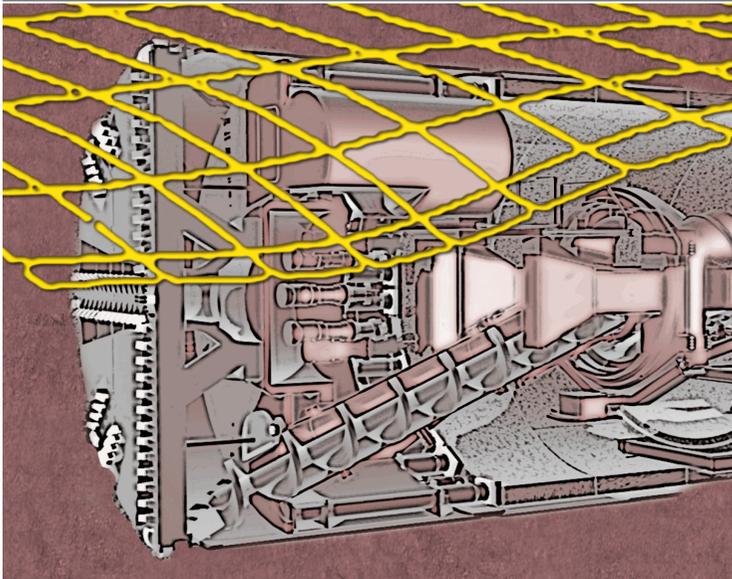
# SFB 837 Project areas and partial projects



– SFB 837 –  
Interaktionsmodelle für den  
maschinellen Tunnelbau



# ABBAUPROZESS, ORTSBRUSTSTÜTZUNG EPB SCHILDE UND RINGSPALTVERPRESSUNG



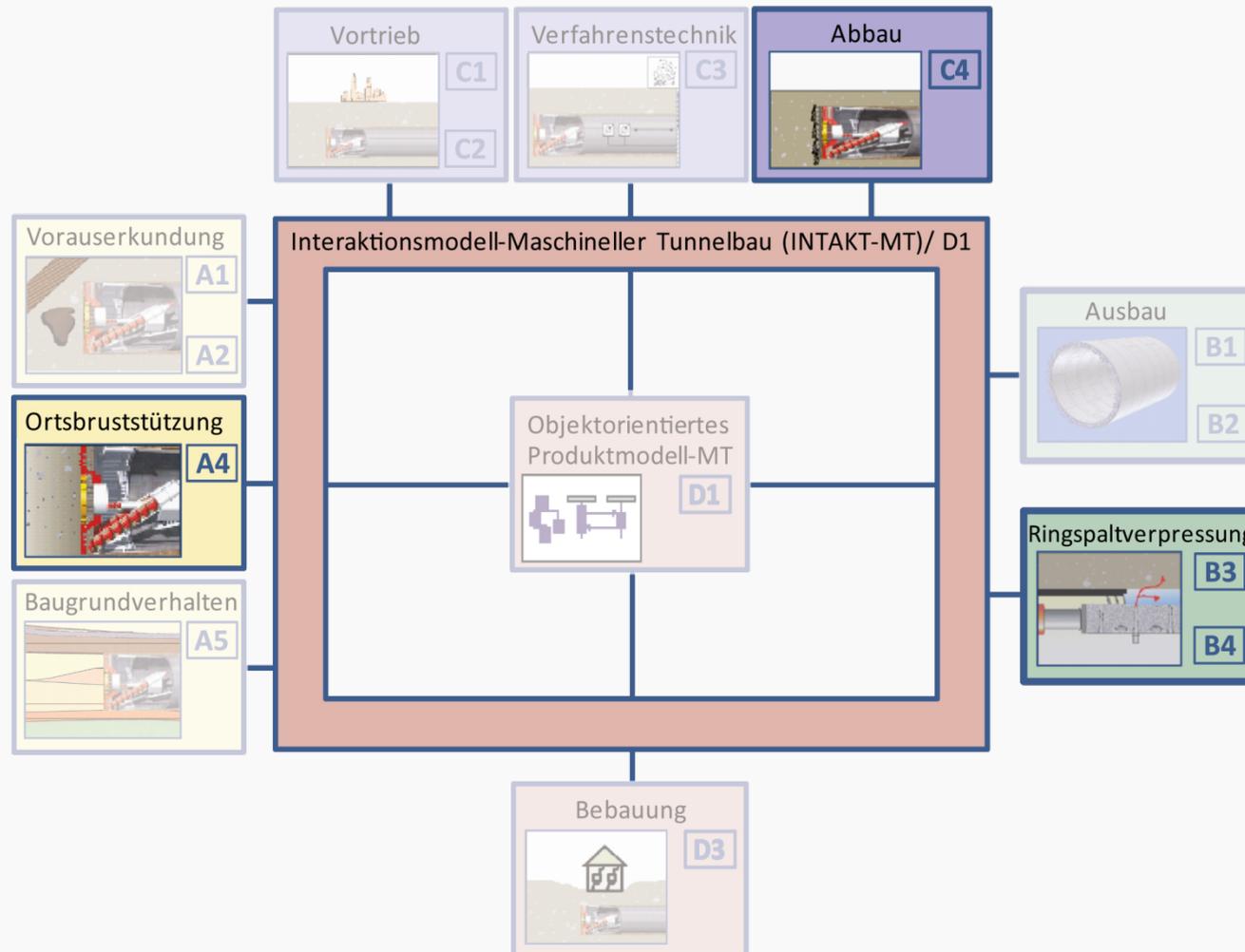
C. Becker, R. Breitenbücher, T.S. Dang, M. Galli,  
K. Hackl, A. Özarmut, G. Meschke, A. Schaufler,  
H. Steeb, M. Thewes, N. Wessels, B.Y. Youn



SFB  
837

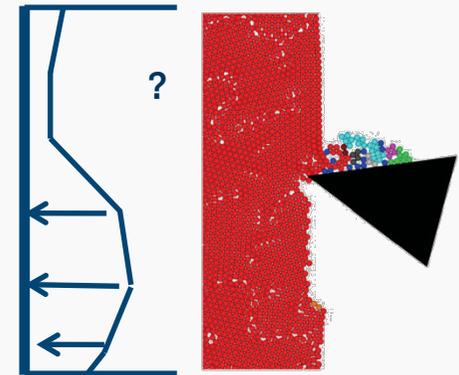
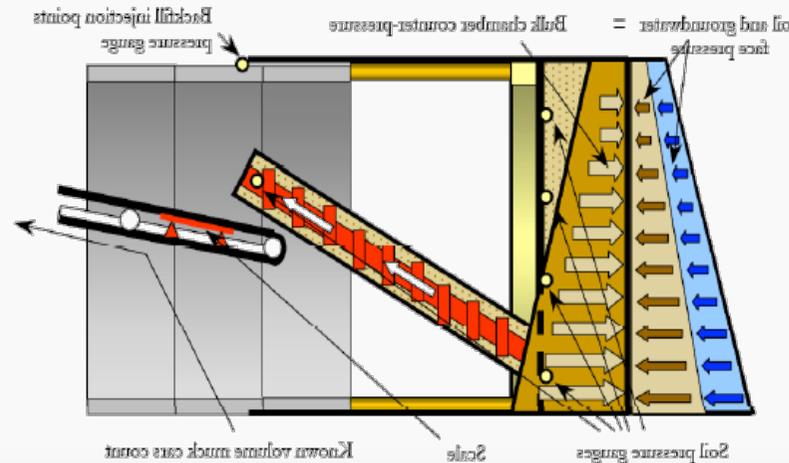
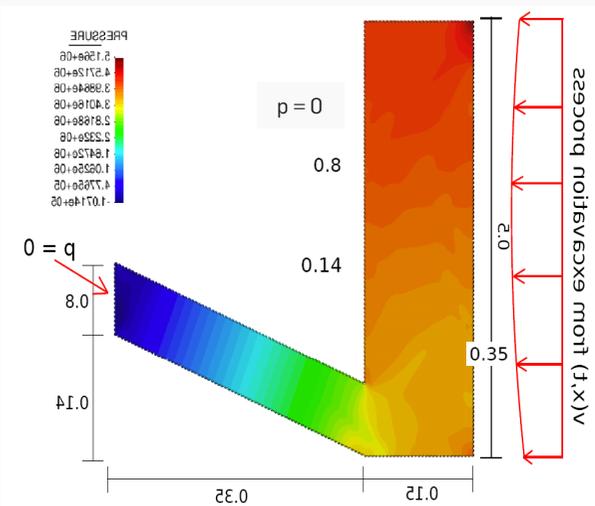
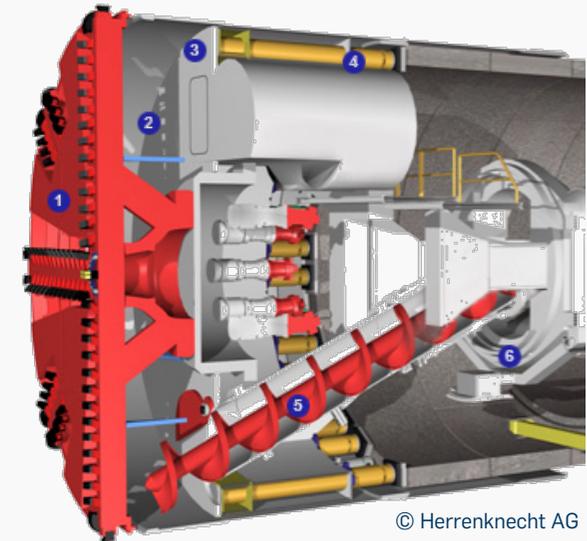
Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau

# Beteiligte Teilprojekte



# Ortsbrust/Abbaukammer: Abbau und Transport

- EPB-Schilde: Tatsächliche Stützdruckverteilung unbekannt
- Einblicke in Transportverhalten in Abbaukammer, Förderschnecke
- Kopplung zweier Simulationsstrategien:
  - Abbau an Ortsbrust mittels Discrete Element Method
  - Transport mittels Fluidsimulationen

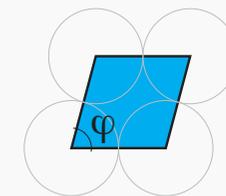
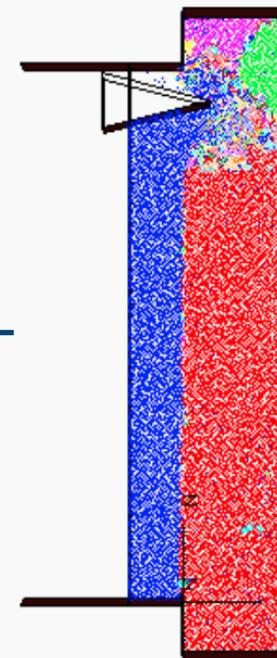
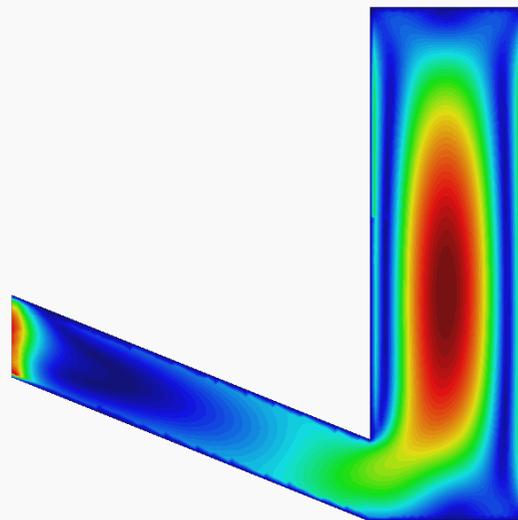


# Ortsbrust/Abbaukammer: Gekoppelte numerische Simulation

Strömungssimulation  
des viskosen Erdbreis  
(Zweiphasenströmung)

Räumlich-zeitliche Verteilung  
des Massenflusses aus DEM  
Simulation – Randbedingung  
für Fluidsimulation

Abbausimulation  
mittels DEM



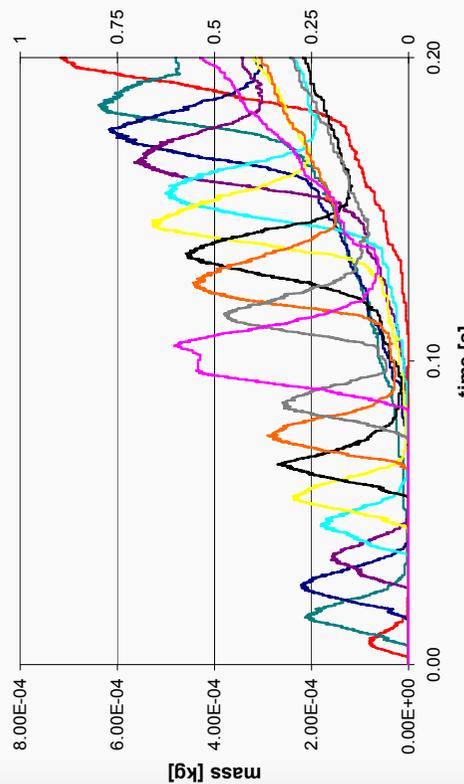
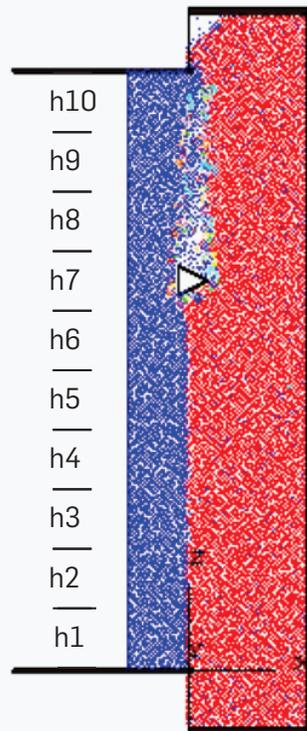
Rheologie für unterschiedliche Schaum-  
konzentrationen aus Laborversuchen

Partikelparameter über inverse Identifikation

# Ortsbrust/Abbaukammer: Gekoppelte numerische Simulation

## DEM-Simulation

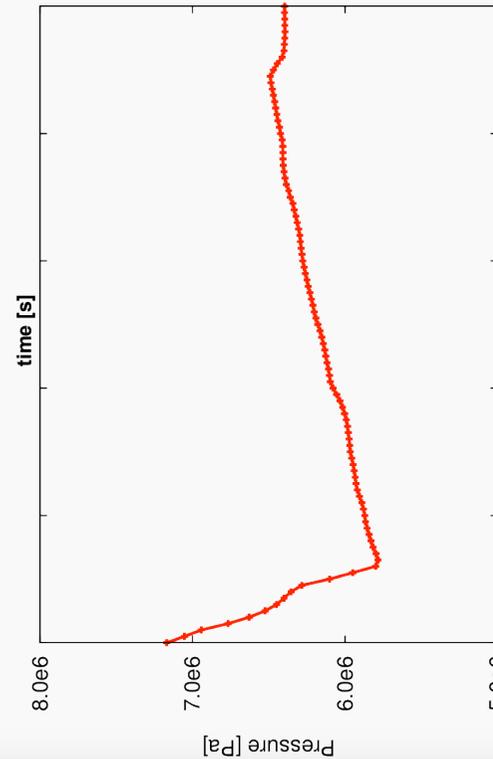
Bodenabbau in einem Abbauzyklus



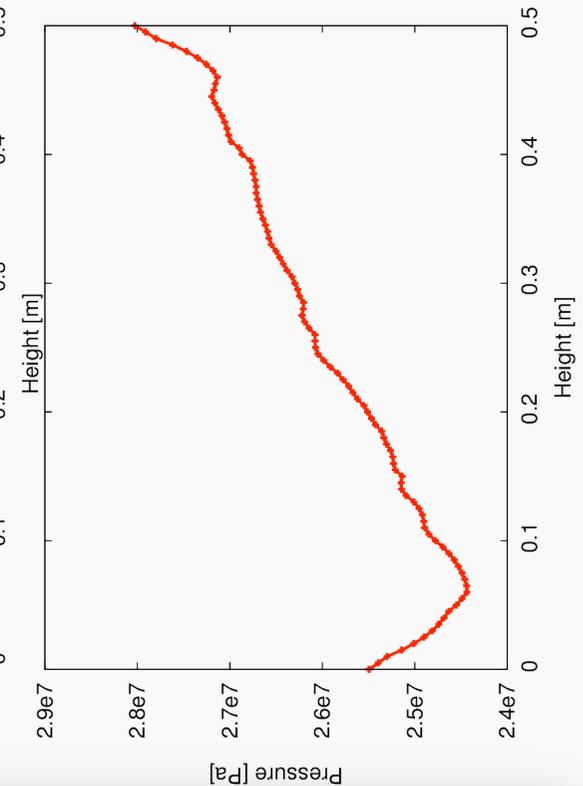
## Fluid-Simulation

Druckverteilung zu 2 Zeitpunkten

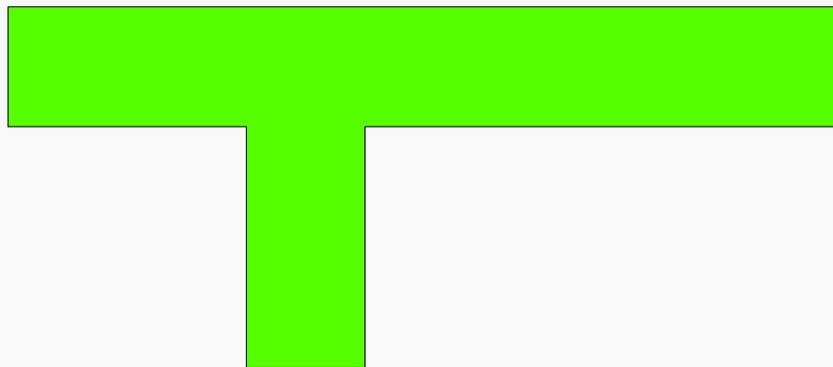
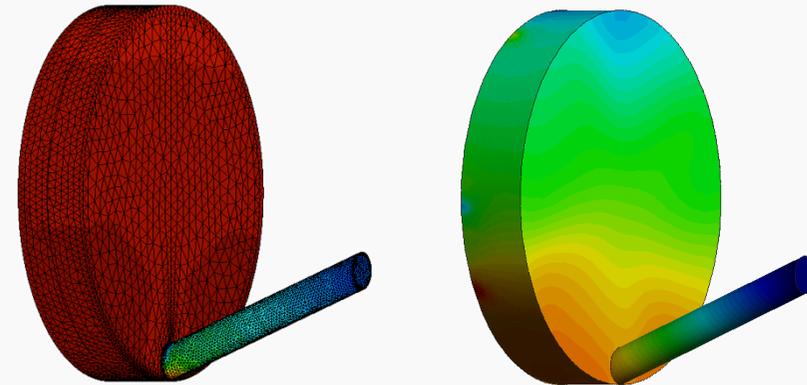
t=0.1 s



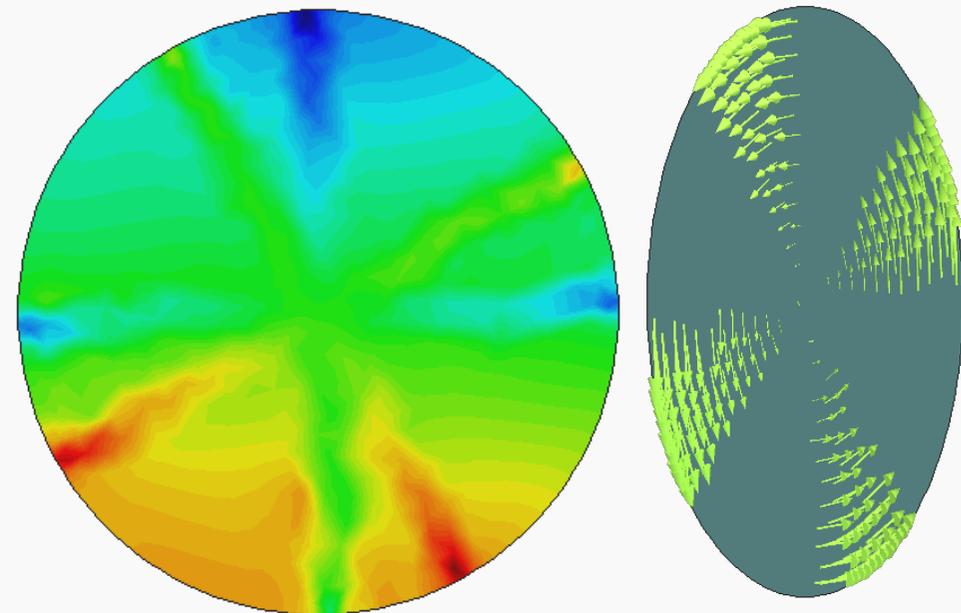
t=0.19 s



# Materialfluss am Schneidrad und in der Abbaukammer



Zweiphasen-Strömung



Einphasen-Strömung

# EPB - Ortsbruststützung – Experimentelle Untersuchungen

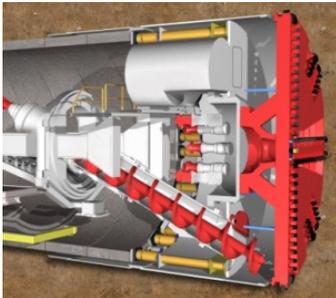
Eigenschaften des Stützmediums unbekannt:

- Fließverhalten, Verarbeitbarkeit / Konsistenz
- Wasserdurchlässigkeit
- Kompressibilität
- Effektiver Wassergehalt

Untersuchungsmethoden

Mikroskala

Makroskala

Rheometer (plate/plate)	Rheometer (mixing cell)	Concrete Rheometer	Cosma	EPB-shield (Reality)
				

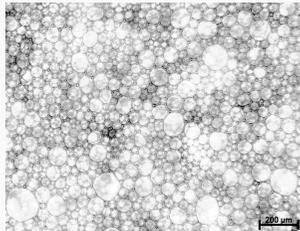
μm

Dimension

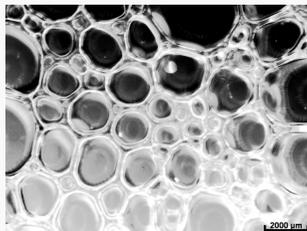
m

# EPB - Ortsbruststützung – Fließverhalten

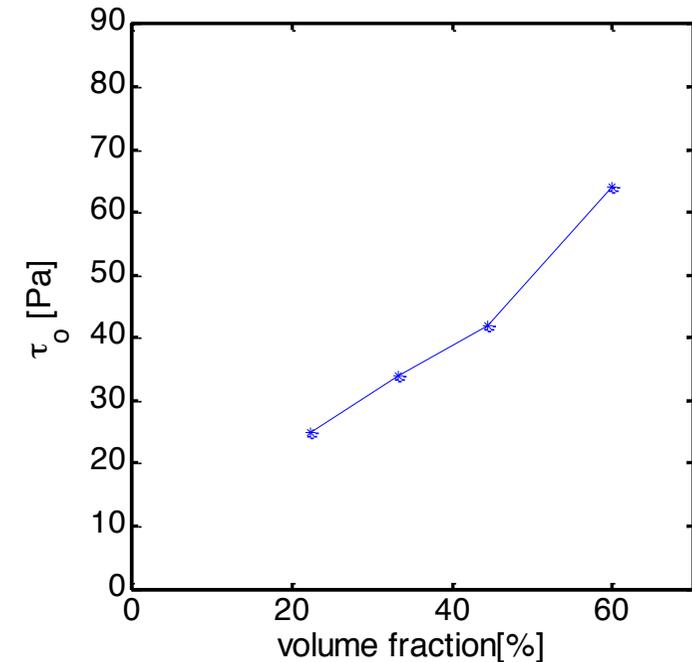
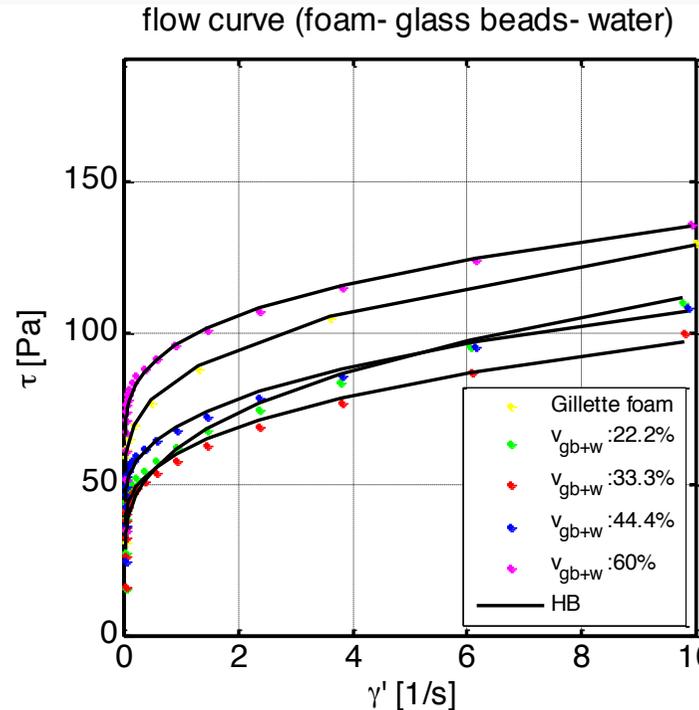
## Rheologische Charakterisierung von Partikel-Schaum-Mischungen (Mikroskala)



a) Tensidschaum, Bläschen-  
durchmesser 40 - 50  $\mu\text{m}$



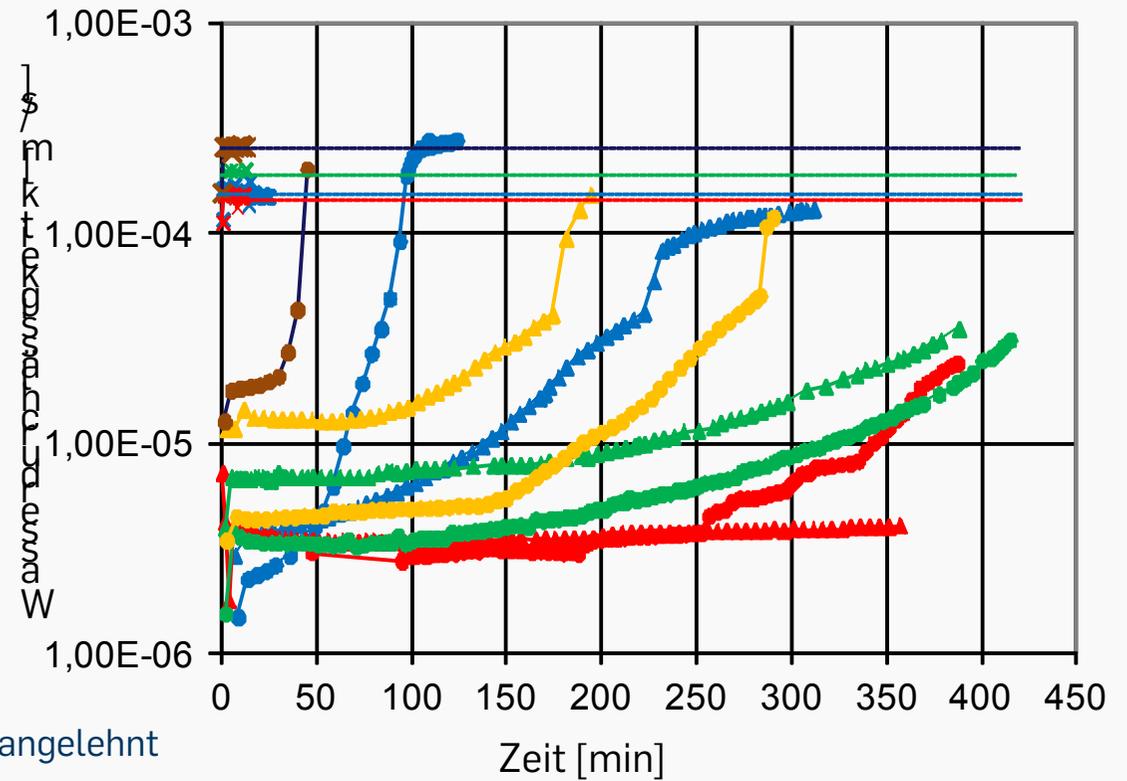
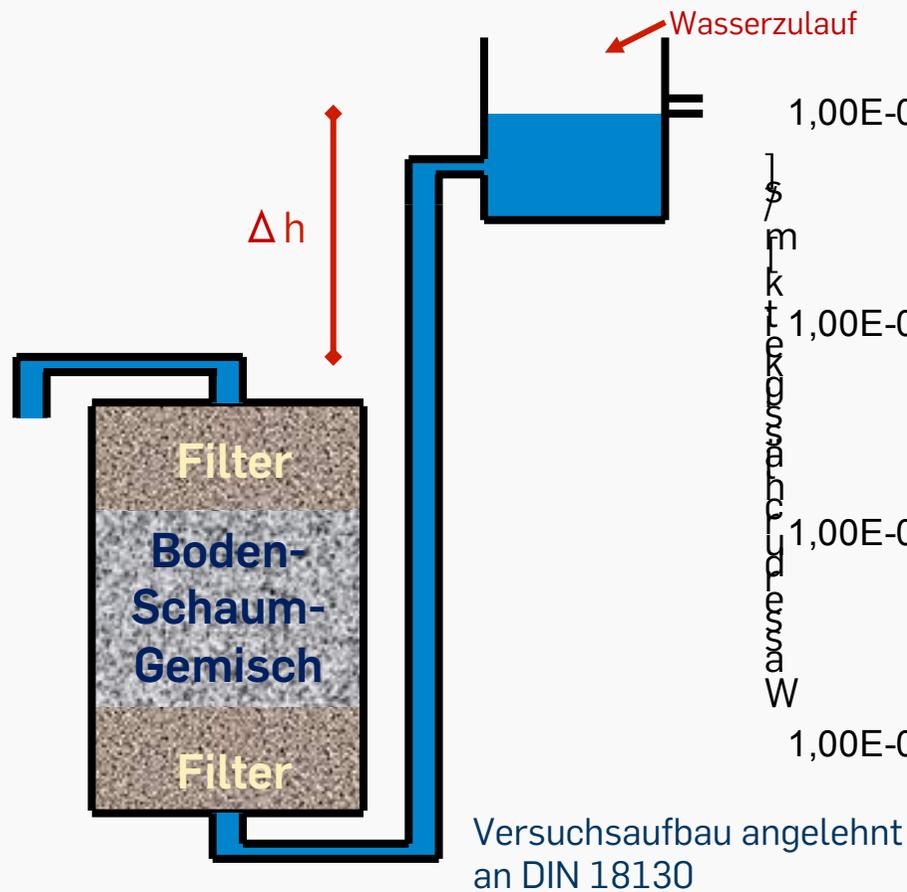
b) Tensidschaum, Bläschen-  
durchmesser 300 - 400  $\mu\text{m}$



Rheologie für nicht-Newtonische Fluide  $\tau = \tau_0 + k(\gamma)^n$

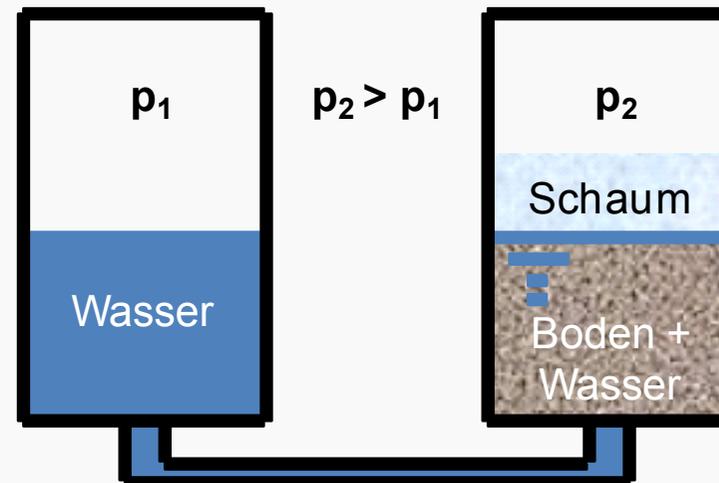
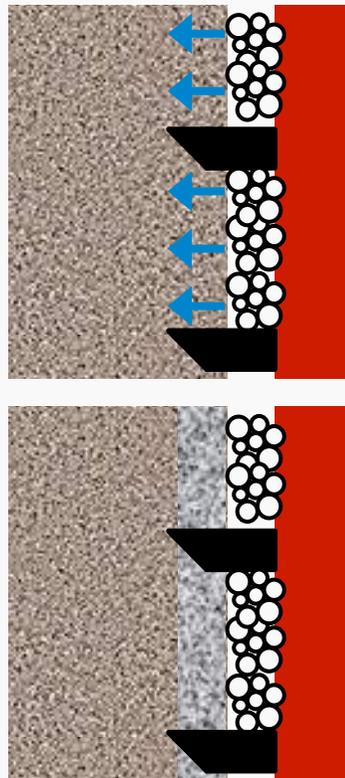
-> Input für Fluidsimulation in Arbeitskammer

# EPB - Ortsbruststützung – Wasserdurchlässigkeit



# EPB - Ortsbruststützung – effektiver Wassergehalt

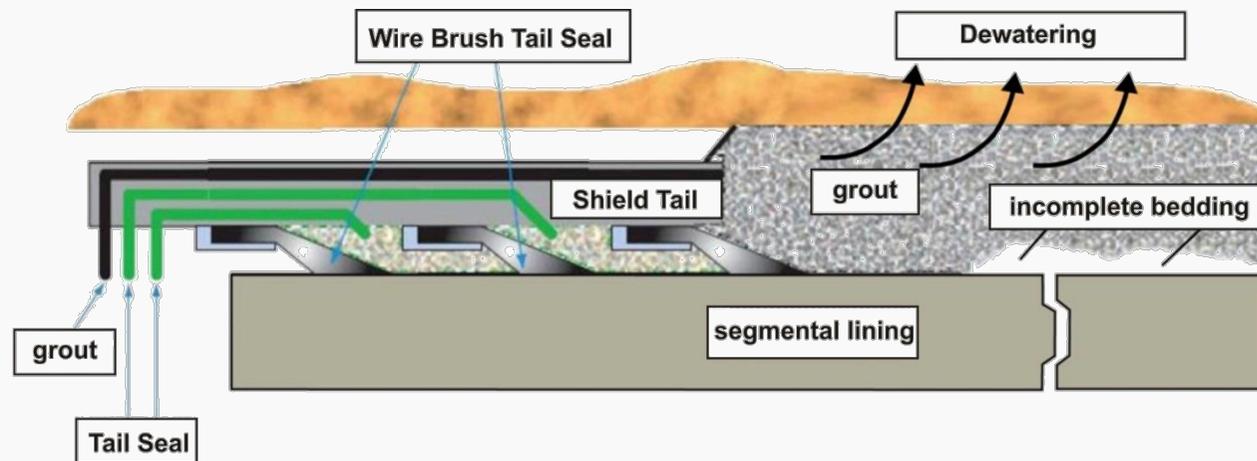
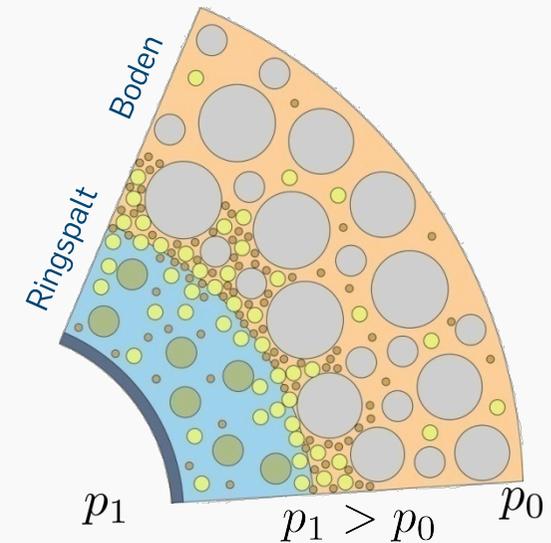
## Schaumpenetrationsversuche



Herabsetzung des Wassergehaltes im Abbaubereich durch Schaumpenetration an der Ortsbrust

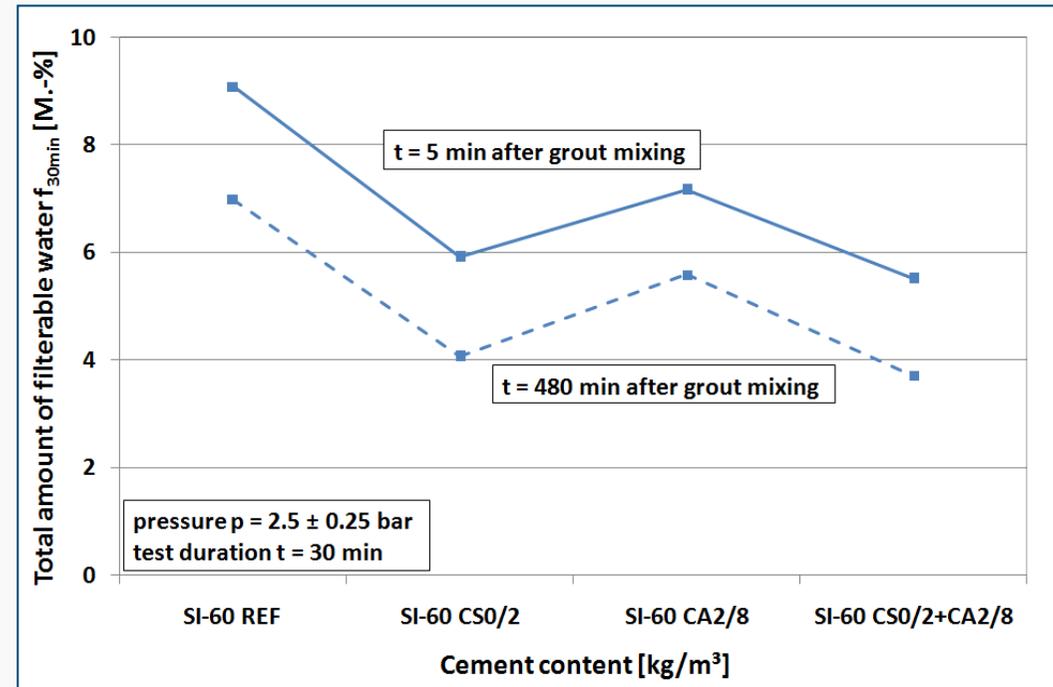
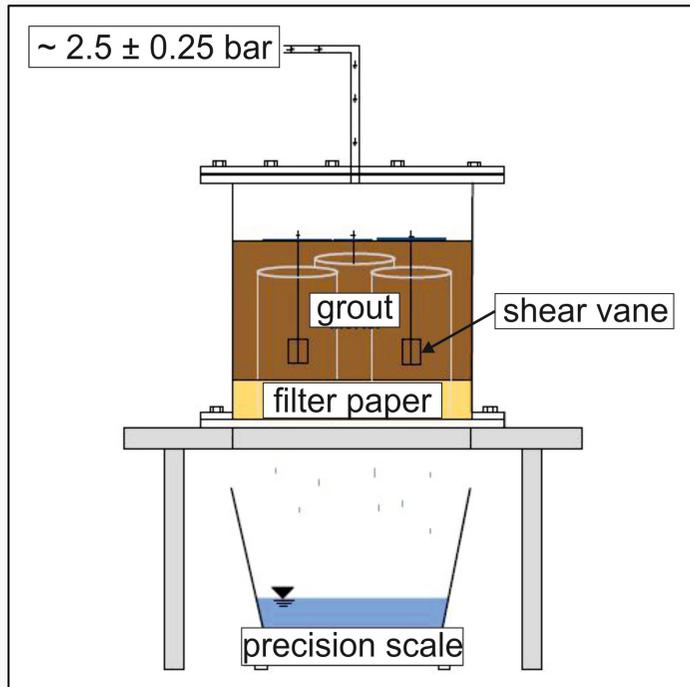
# Experimentelle und numerische Untersuchungen für Ringspaltmörtel

- Eigenschaften des Ringspaltmörtels (Performance) bei definierten äußeren Randbedingungen
- Untersuchung des Infiltrationsprozesses beim Verpressen
  - Veränderung der hydraulischen Eigenschaften (z.B. Permeabilitäten)
  - Veränderung der mechanischen Eigenschaften (Steifigkeiten)



# Experimente Ringspaltmörtel - Entwässerungsverhalten

Beispiel: Variation der Gesteinskörnung / Kornform (rund, gebrochen)



„Modifizierte Filterpresse“ zur praxisnahen Simulation des Ringspalts (18 cm)

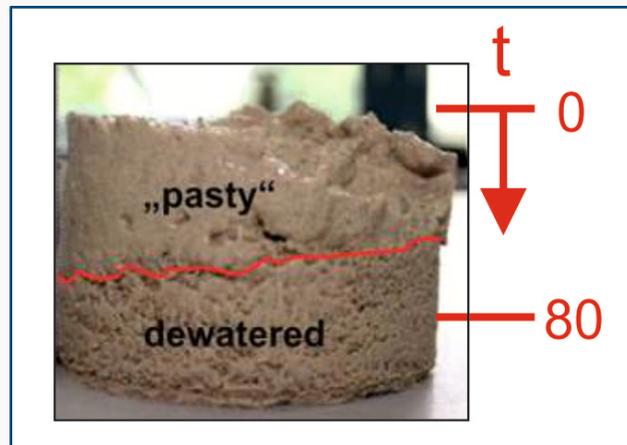
Beispiel: Hohe spezifische Oberfläche (gebrochene Gesteinskörnung)

- Wasseranspruch steigt
- geringere Filtratwasserabgabe

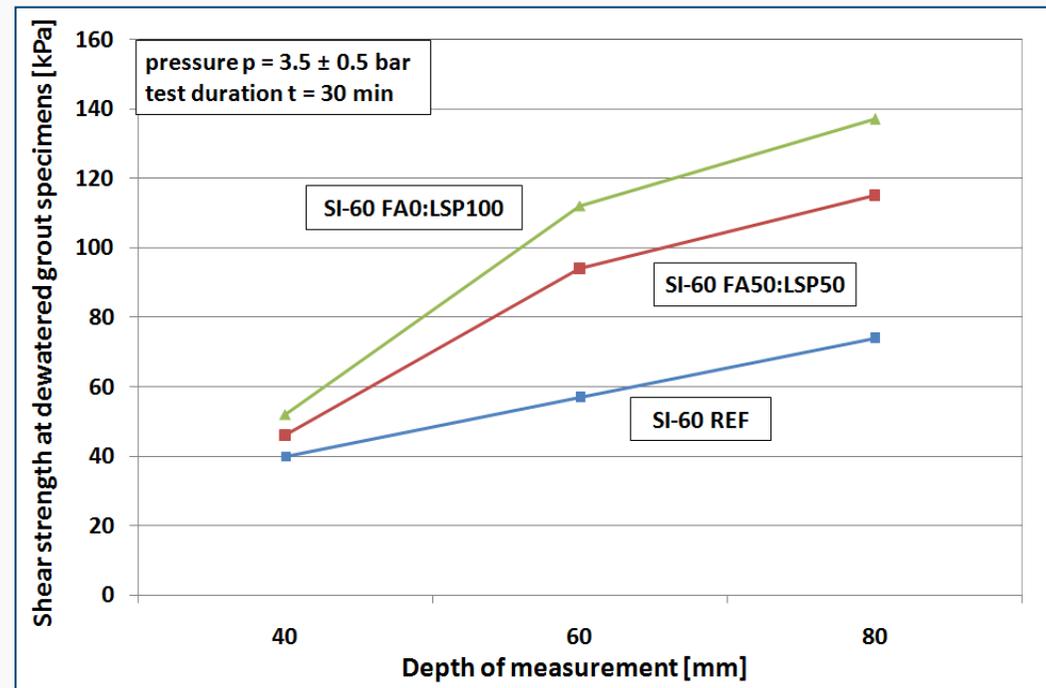
# Experimente Ringspaltmörtel - Scherfestigkeit

## Beispiel: Variation des Flugasche-Kalksteinmehl-Verhältnisses

- SI-60 REF: 100% Flugasche,  
0% Kalksteinmehl
- FA0:LSP100: keine Flugasche,  
100% Kalksteinmehl
- FA50:LSP50: 50% Flugasche,  
50% Kalksteinmehl



ungleichmäßige Entwässerung bei zu hohem Feinstanteil



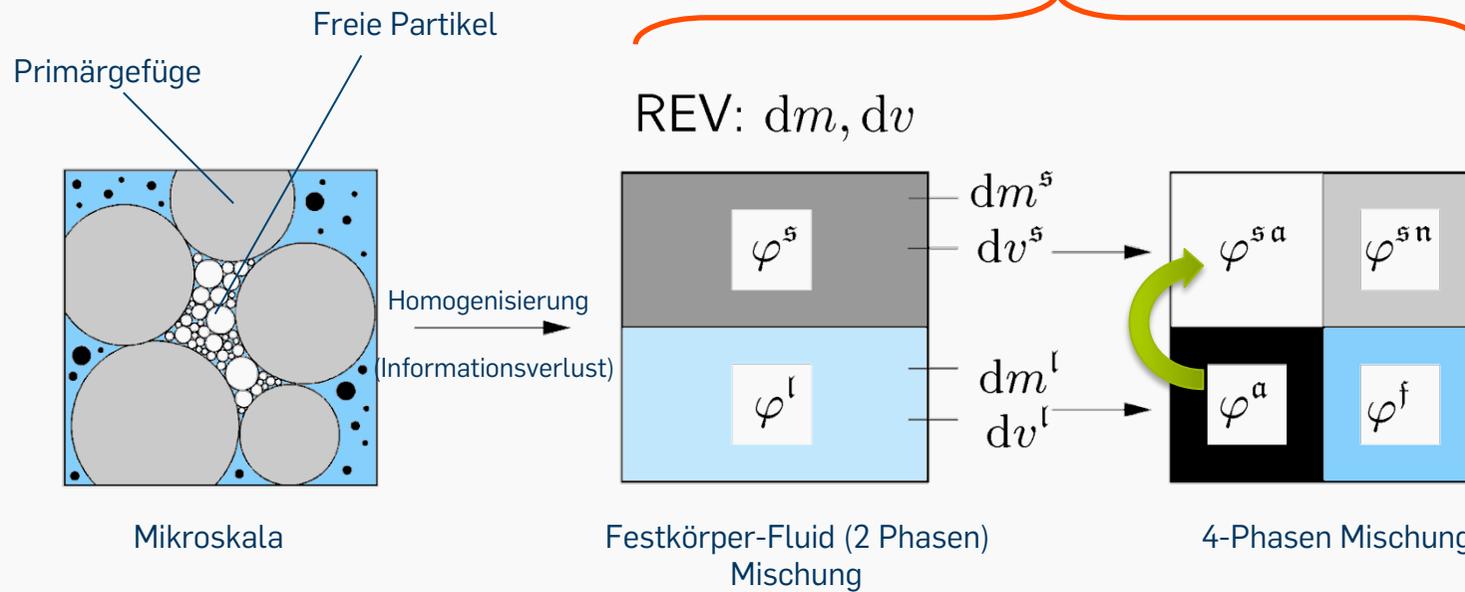
Erkenntnis: Scherfestigkeit steigt mit:

- zunehmendem Feinstanteil
- zunehmender Entwässerungstiefe (Gradient)

# Numerische Simulation: Infiltration

## Mehrphasenmodellierung:

### Kontinuumsmodell



$$n^\alpha = \{n^s, n^l\}$$

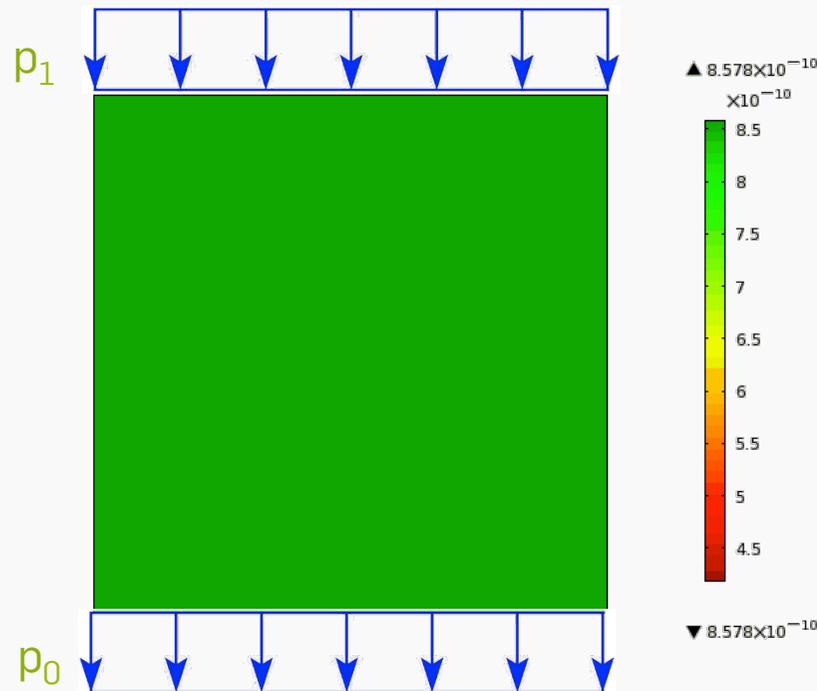
$$n^\alpha = \{n^{sa}, n^{sn}, n^a, n^f\}$$

$$n^s = n^{sa} + n^{sn}$$

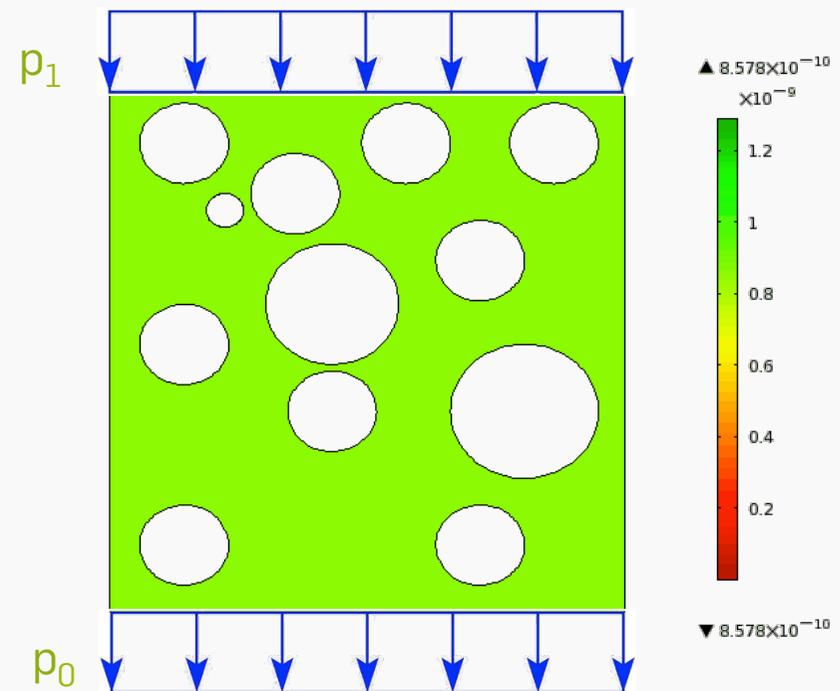
$$n^l = n^a + n^f$$

# Numerische Simulation: Infiltration

Mehrphasenmodellierung:



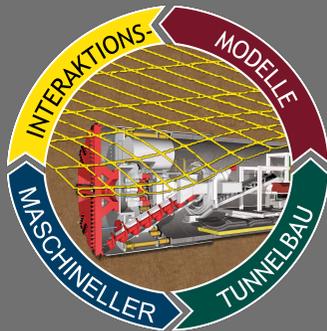
distribution of permeability  $k^s(x)$



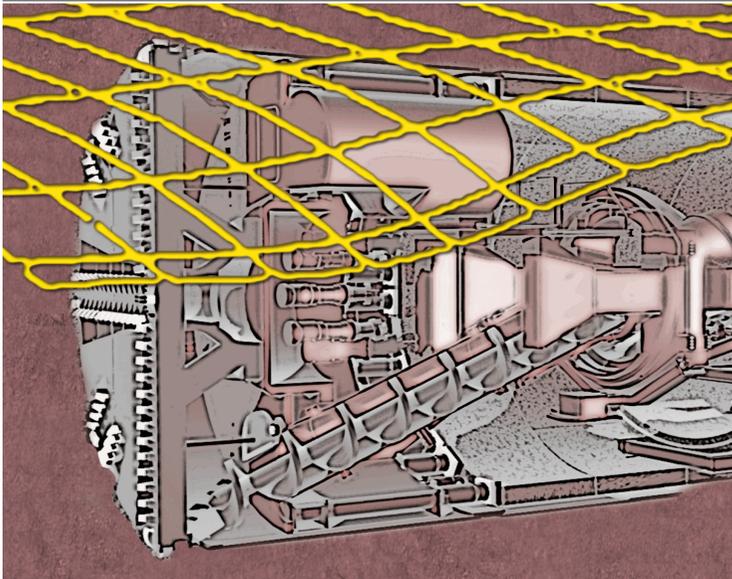
distribution of permeability  $k^s(x)$

Infiltration feiner Partikel in homogenen (links) und stark heterogenen (rechts) Böden

– SFB 837 –  
Interaktionsmodelle für den  
maschinellen Tunnelbau



# EXPERIMENTELLE UND NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR ENTWICKLUNG ROBUSTER TÜBBINGS



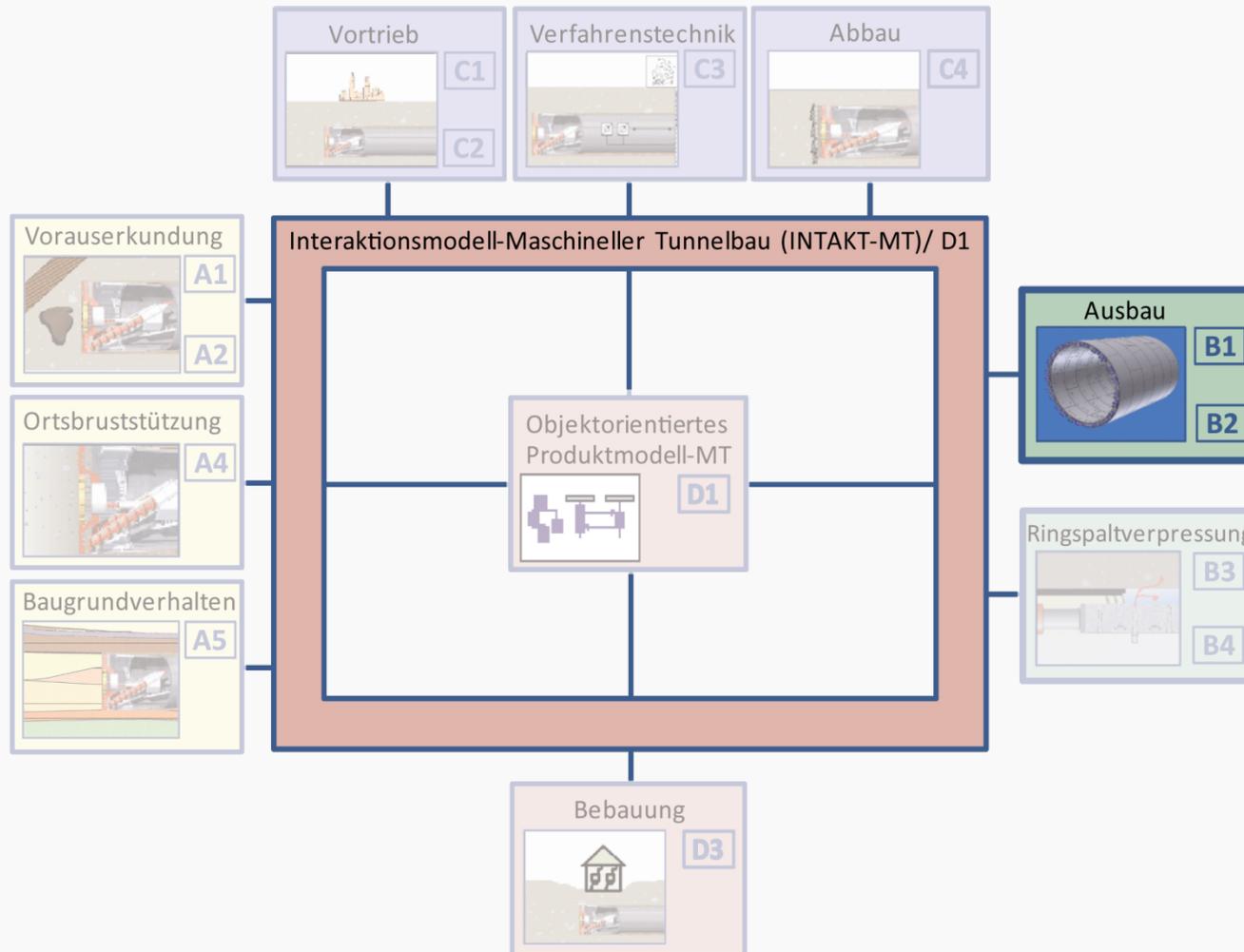
R. Breitenbücher P. Mark, G. Meschke, T. Putke, Y. Zhan



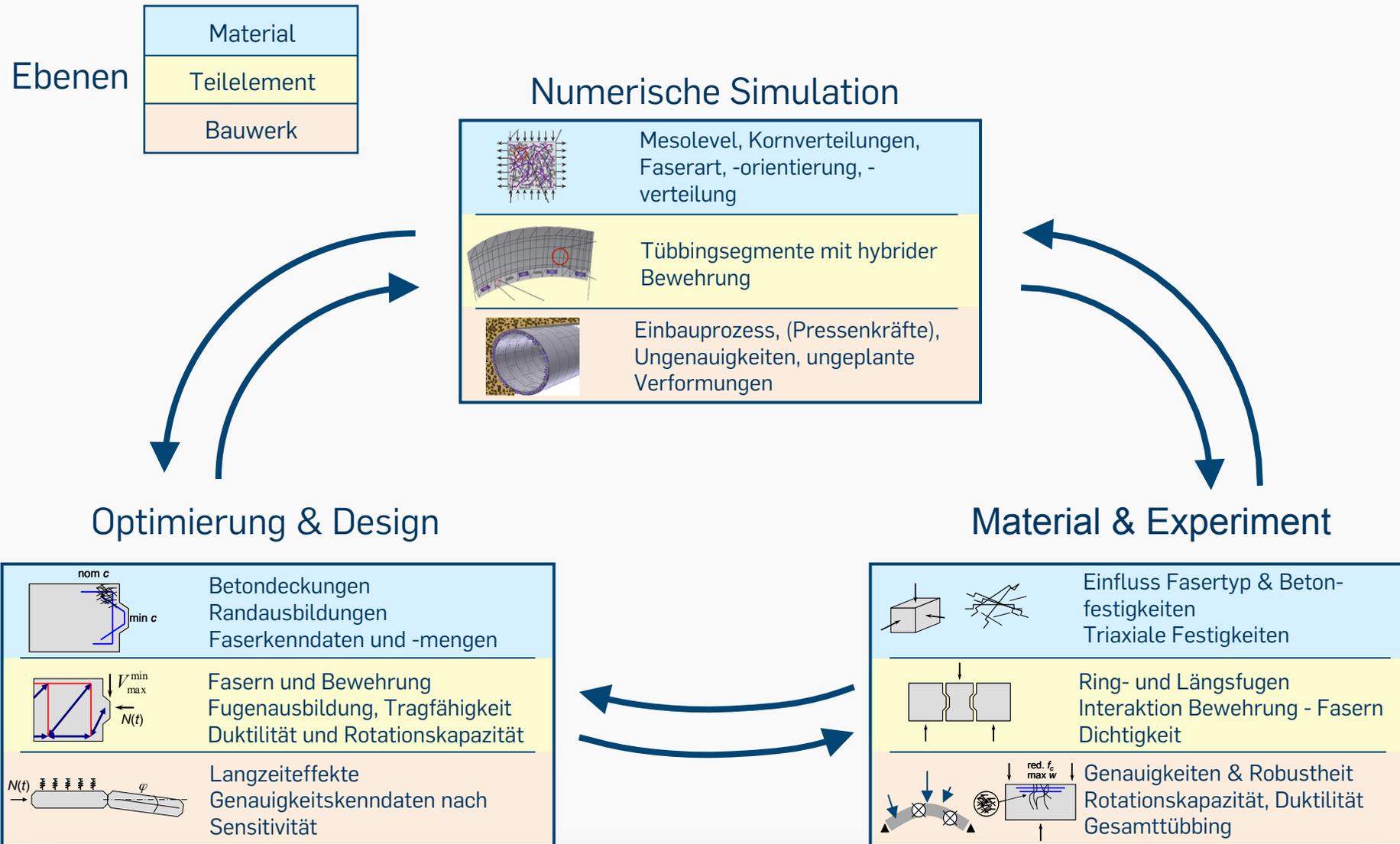
SFB  
837

Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau

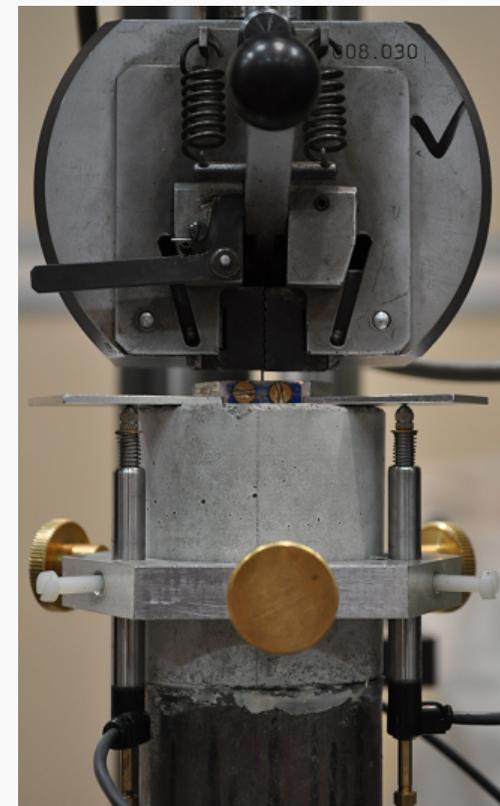
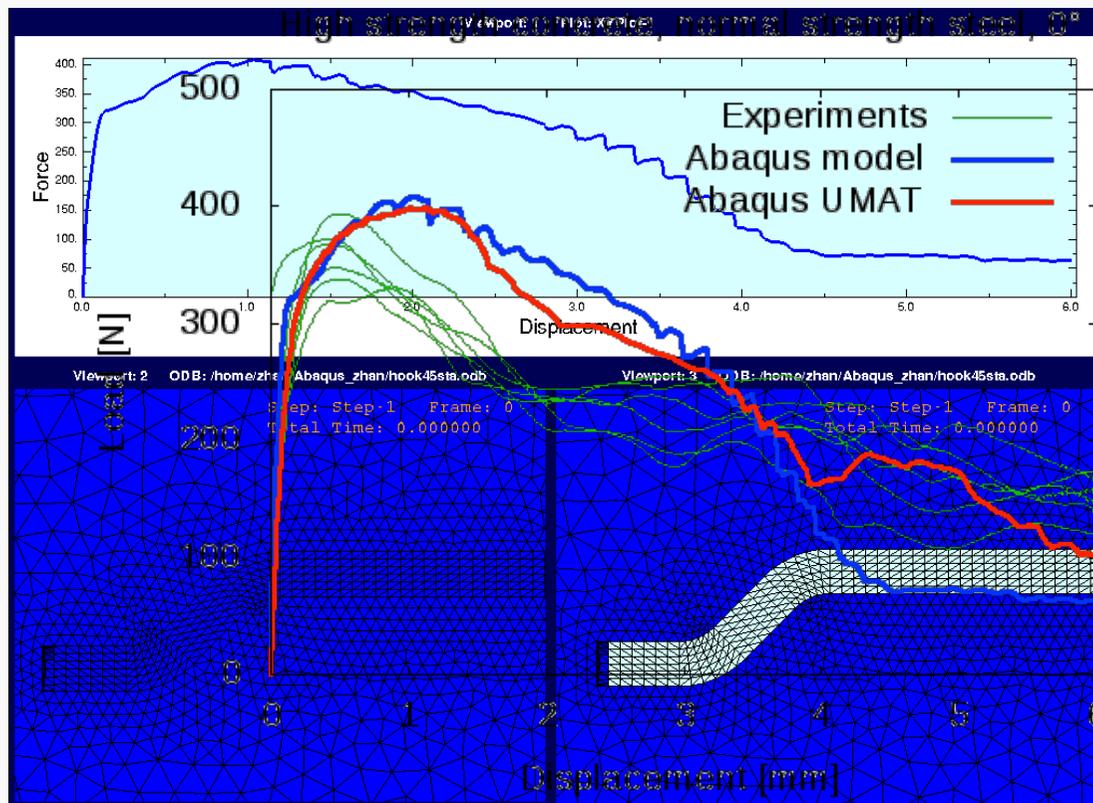
# Beteiligte Teilprojekte



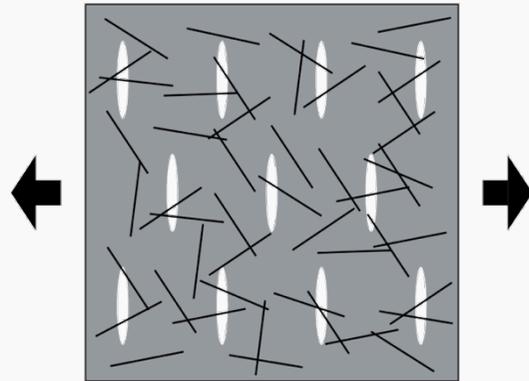
# Hybride Tübbings: Mehrskalen-Modellierung & Laborversuche



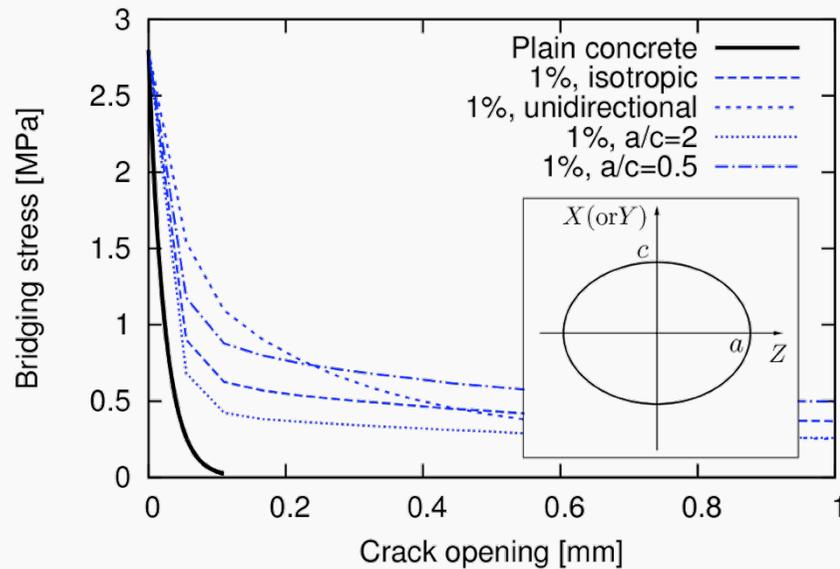
Einfluss von Fasertyp und Betonqualität (ohne, mit Endverankerung, normal, schräg zum Riss)



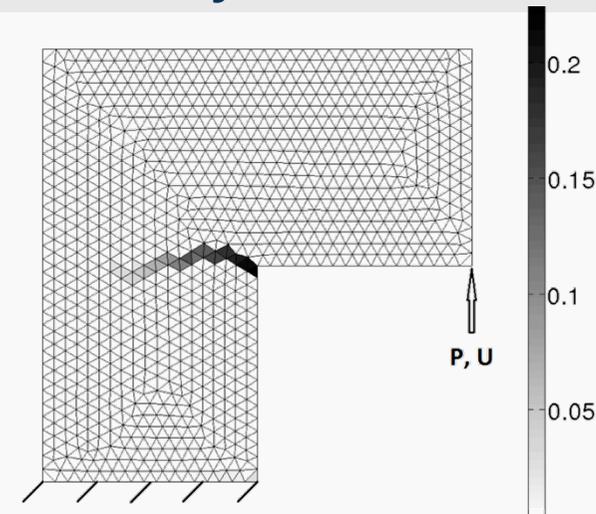
# Modellierung Rissüberbrückung und Strukturanalyse



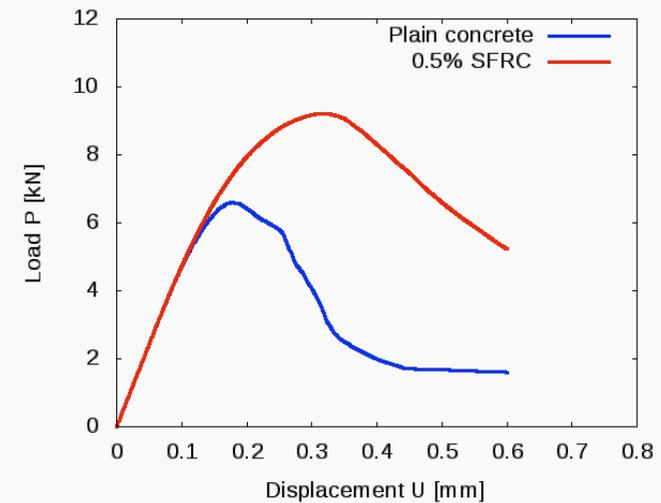
Normal strength concrete, normal strength steel



Rissüberbrückung für unterschiedliche Faserorientierungen



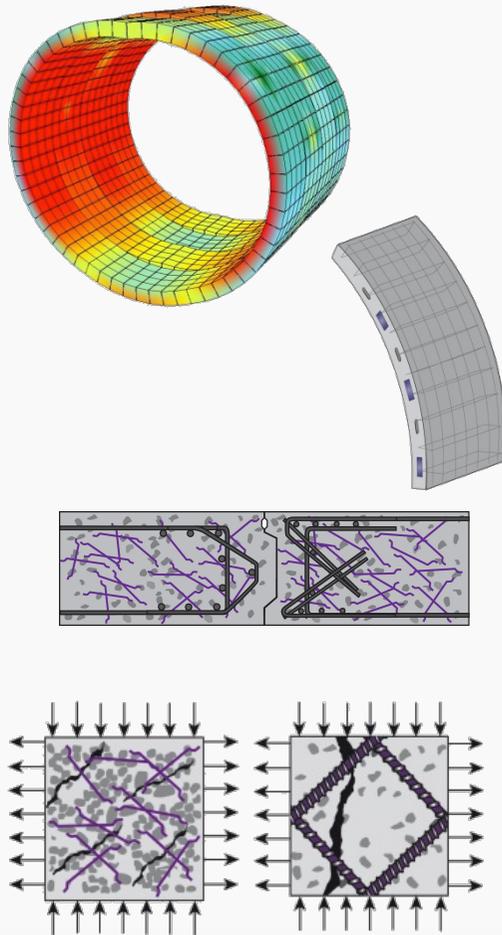
FEM: Embedded Crack Elements



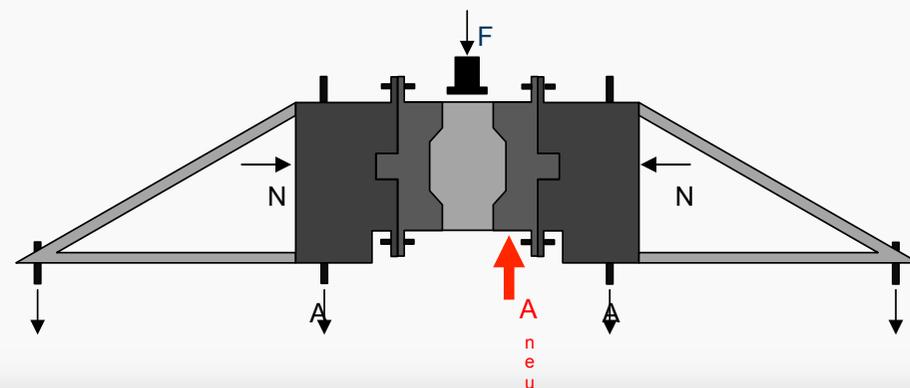
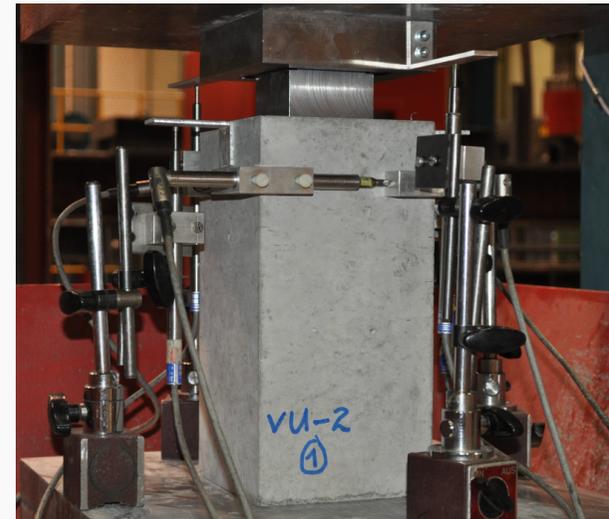
Benchmark-Analyse mit und ohne Fasern

# Experiment & Numerik – Tübbingelemente - Tübbingsysteme

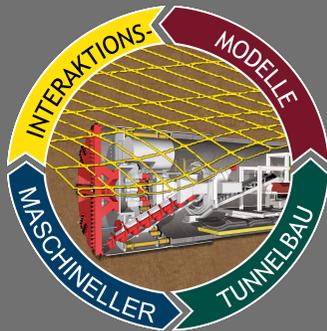
Simulationsbasierte Optimierung



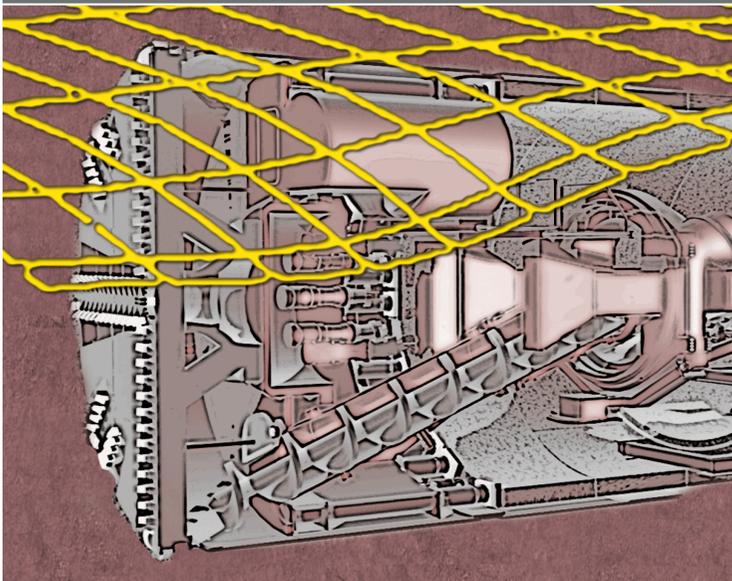
Belastungsversuche: Teilflächenversuche, Tübbingkomponenten



– SFB 837 –  
Interaktionsmodelle für den  
maschinellen Tunnelbau



# SIMULATION DER PRODUKTIONS- UND LOGISTIKPROZESSE IM MASCHINELLEN TUNNELBAU



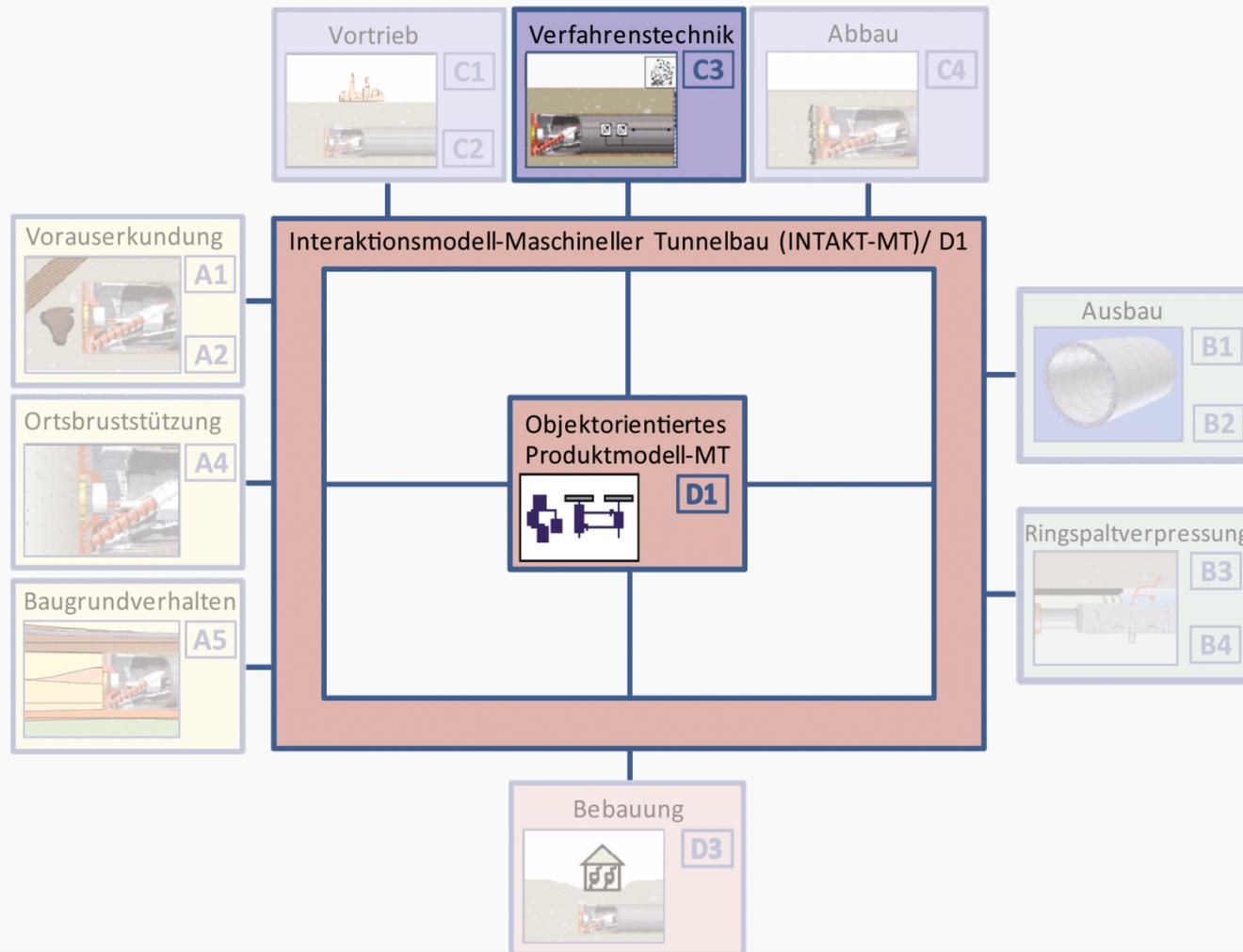
F. Hegemann, C. Koch, M. König, K. Lehner, P. Manickam,  
K. Sadri, T. Rahm, M. Thewes,



SFB  
837

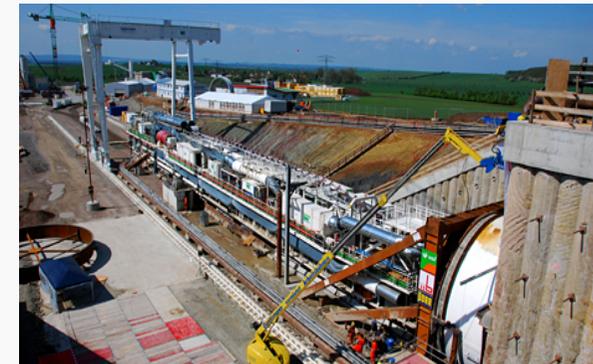
Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau

# Beteiligte Teilprojekte



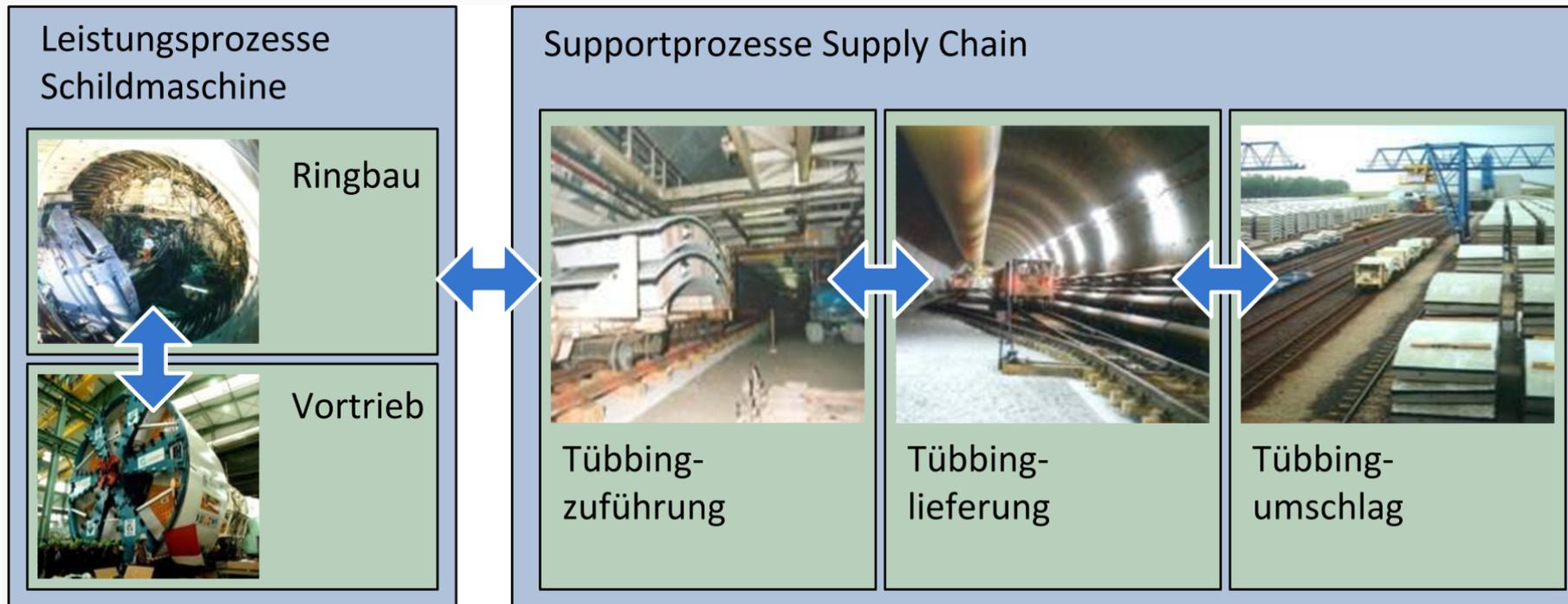
## Fokus: Baubetriebliche Prozesse

- Komplexe Interaktionskette „Vortrieb-Ausbau-Supply Chain“
- Erreichbare Leistung abhängig vom Zusammenspiel aller baubetrieblicher Kernprozesse
- Unzureichende Analyse unsicherer Randbedingungen und Störeinflüsse
- Häufiger Stillstand infolge sensibler Logistikprozesse

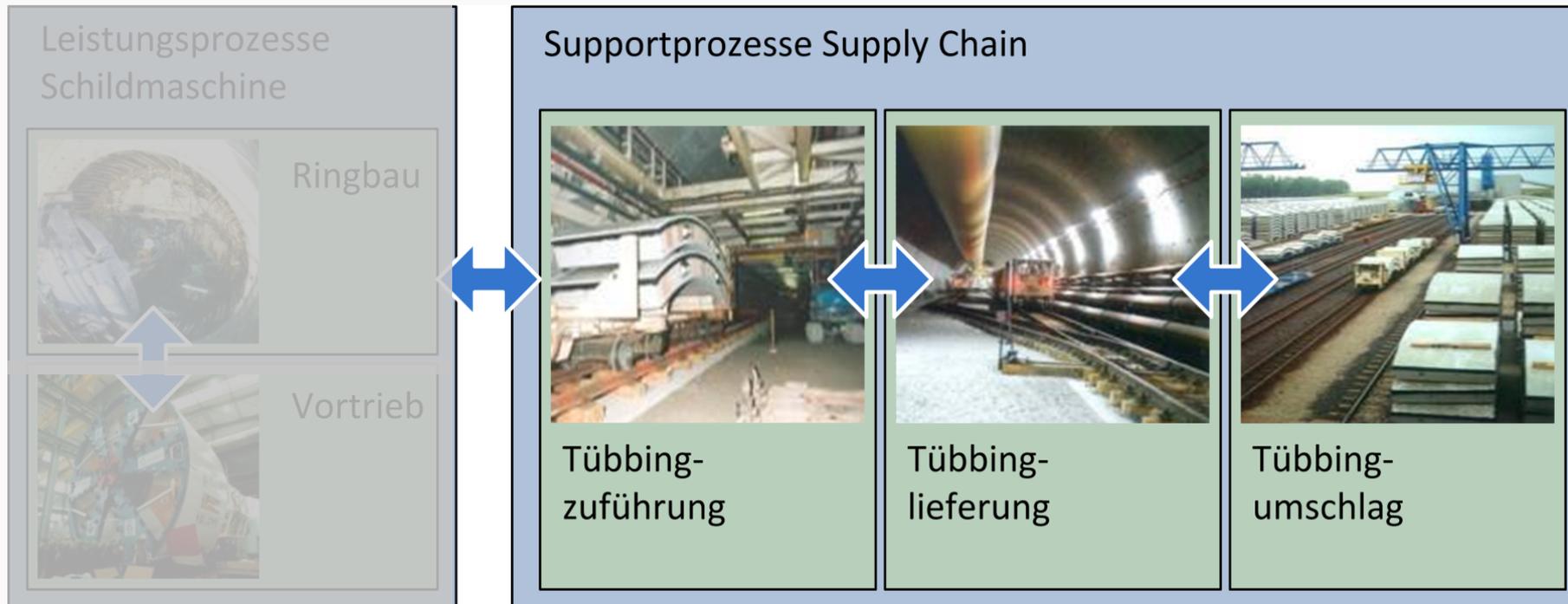


Quelle: Verkehrsprojekt der Deutschen Einheit 8.2 Finnetunnel

# Zerlegung in Simulationsbausteine



# Zerlegung in Simulationsbausteine



# Beispiel: Simulationsbaustein: Supply Chain

Simulation - AnyLogic Professional

**cuttingWheel**  
 VolumeSegment 65.62  
 outputCW

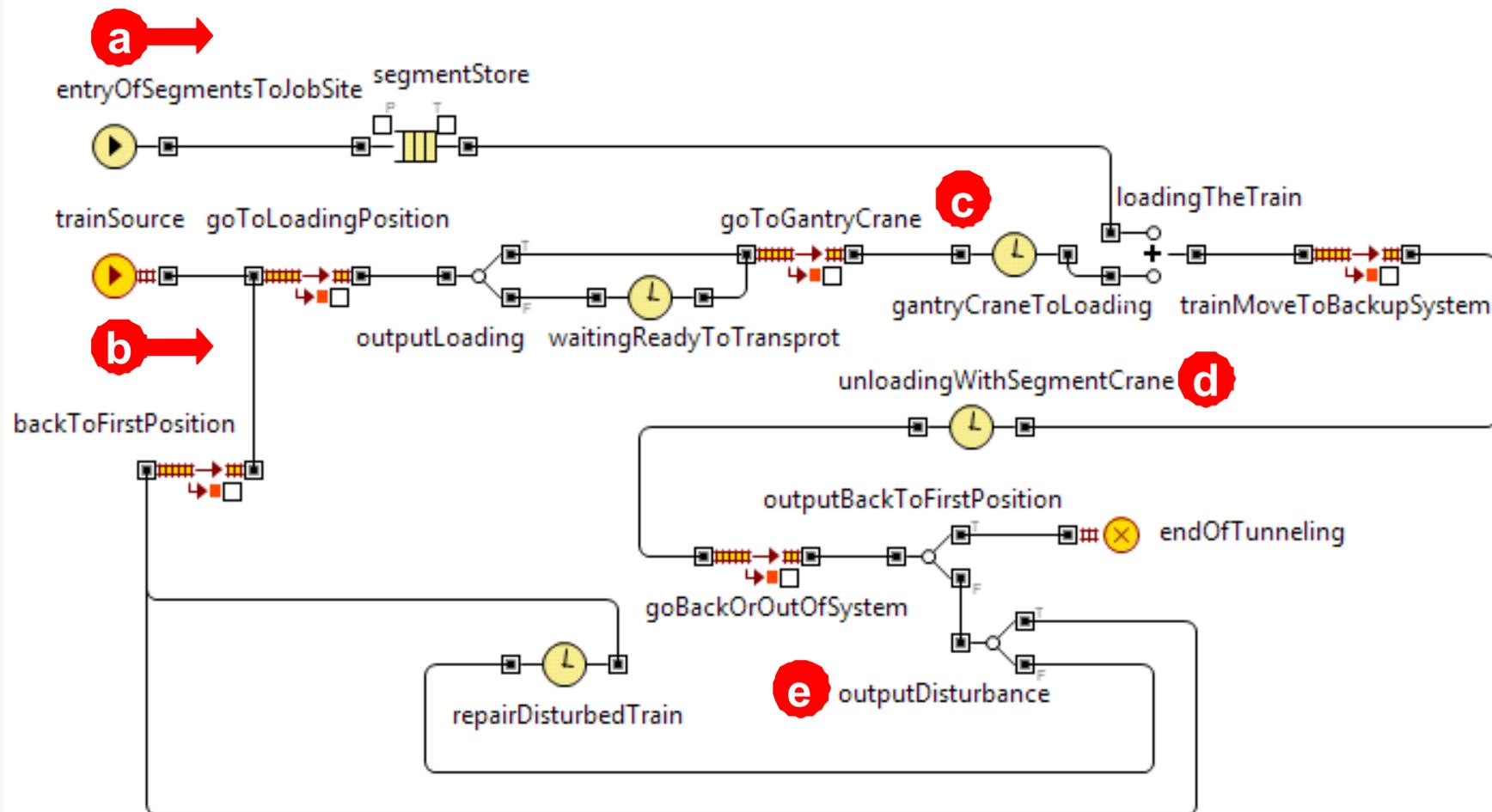
**excavationChamber**  
 ContentOfEC 39.379  
 inputCW outputEC

**screwConveyor**  
 Total 79,096.118  
 inputEC

- mainDrive MainDrive
- erector Erector
- train TunnelTrain
- cylinder Cylinder
- subSoil SubSoil
- tunnel Tunnel
- ConsiderDowntime true
- NumberOfDowntimes 12
- results File name: D:/Dokumente/03\_A...

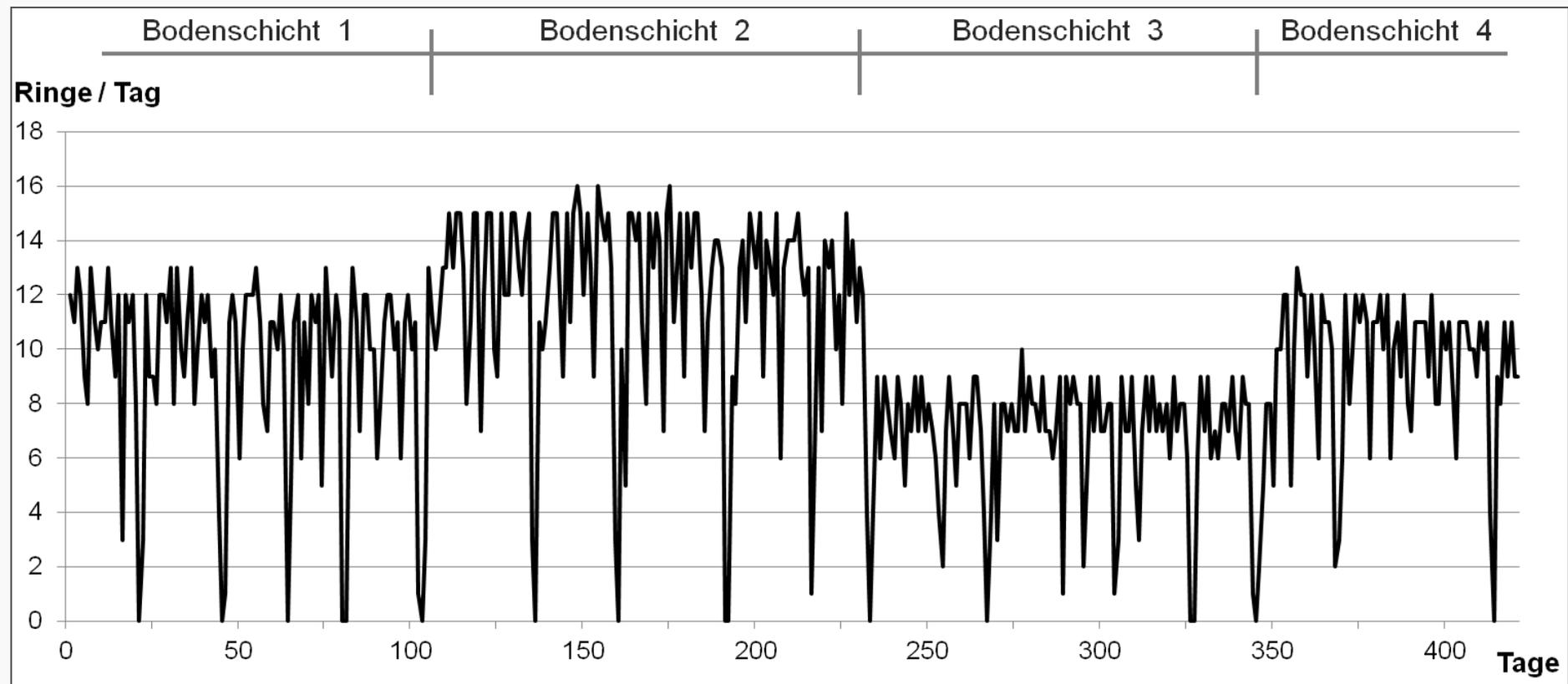
0 Paused | Time: 1052.04 | Simulation: Stop time not set

# Beispiel: Simulationsbaustein: Supply Chain



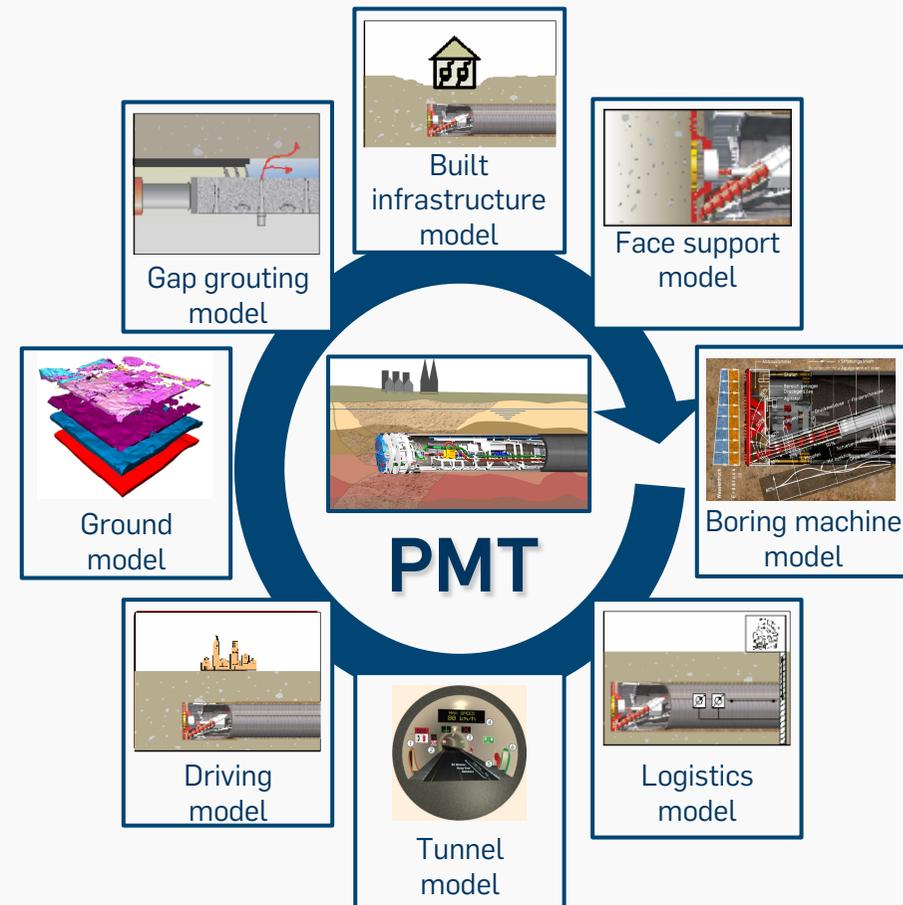
# Beispiel Logistiksimulation: Tägliche Vortriebsleistung

- Einfluss von Störungen
- Berücksichtigung unterschiedlicher Bodenparameter

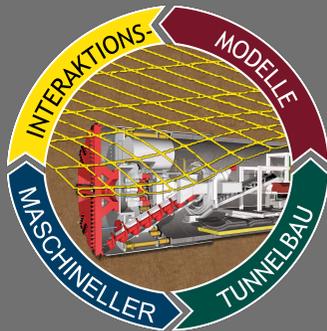


## Objektorientiertes Produktmodell MT (PMT)

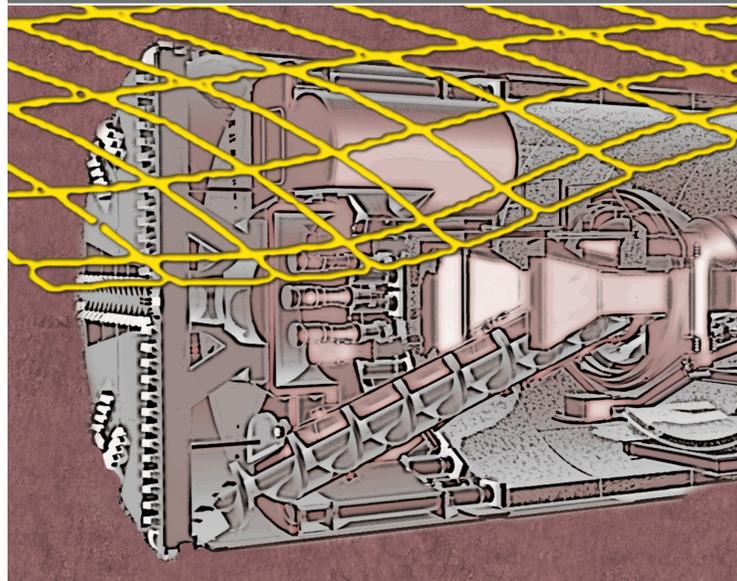
- Integration projektrelevanter Informationen
  - Baugrund
  - Tunnel
  - Maschine
  - Gebaute Infrastruktur
  
- Heterogenität hinsichtlich
  - Modelltyp
  - Modellmaßstab
  - Projektphase



– SFB 837 –  
Interaktionsmodelle für den  
maschinellen Tunnelbau



# ENTWICKLUNG EFFEKTIVER KONZEPTE DER VORAUERKUNDUNG IM TUNNELBAU MITTELS AKUSTISCHER VERFAHREN



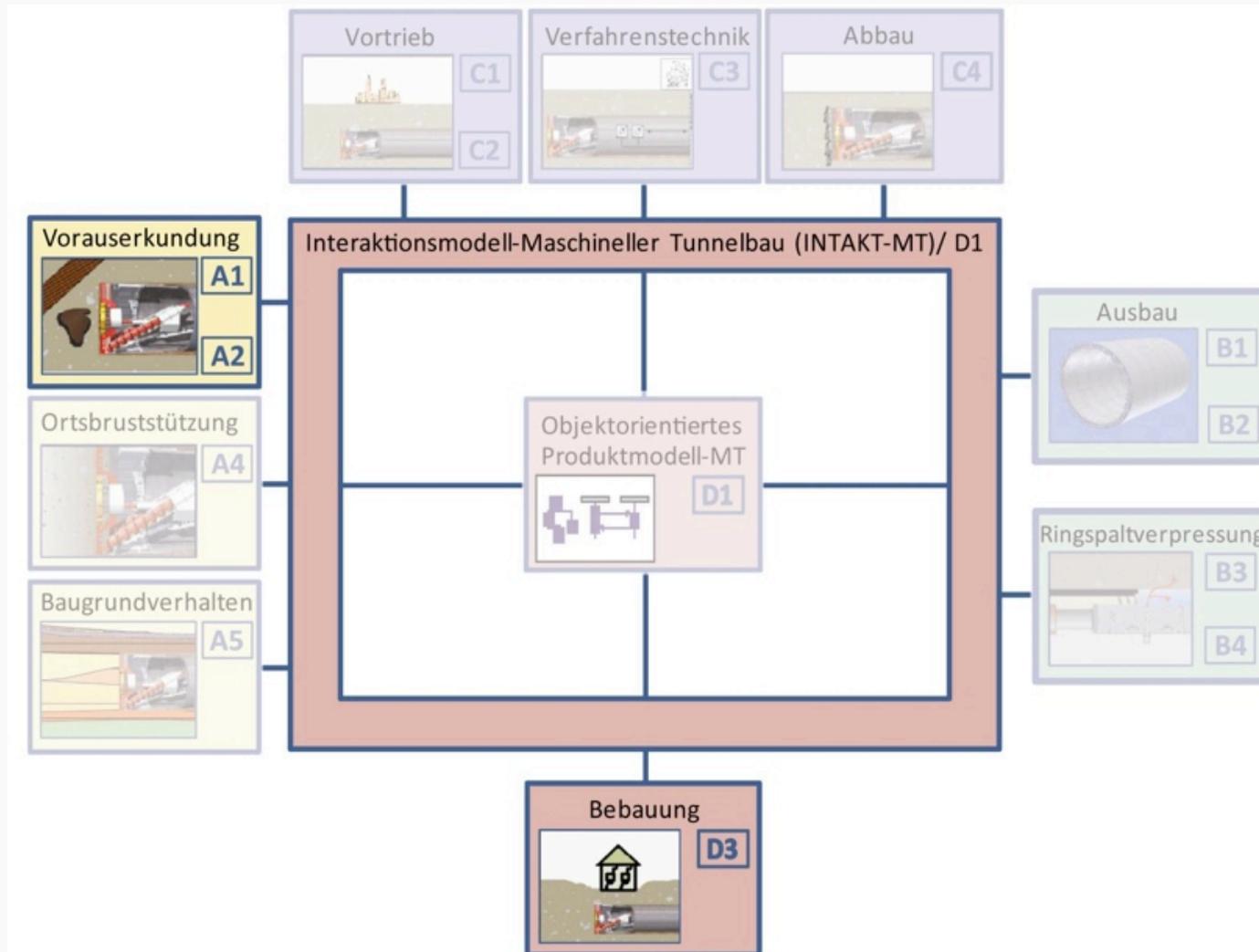
W. Friederich, K. Hackl, L. Lambrecht,  
T. Nguyen, K. Musayev, T. Nestorovic



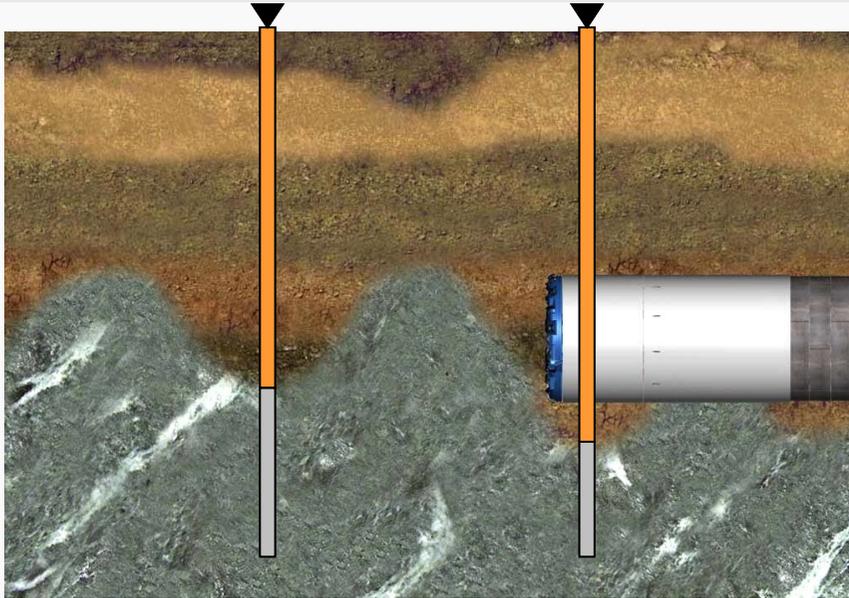
SFB  
837

Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau

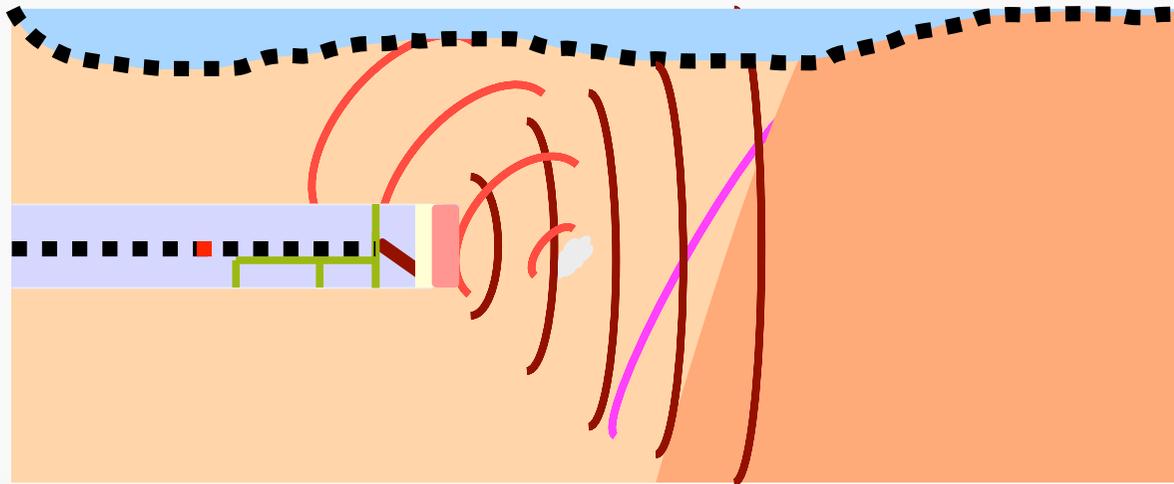
# Beteiligte Teilprojekte



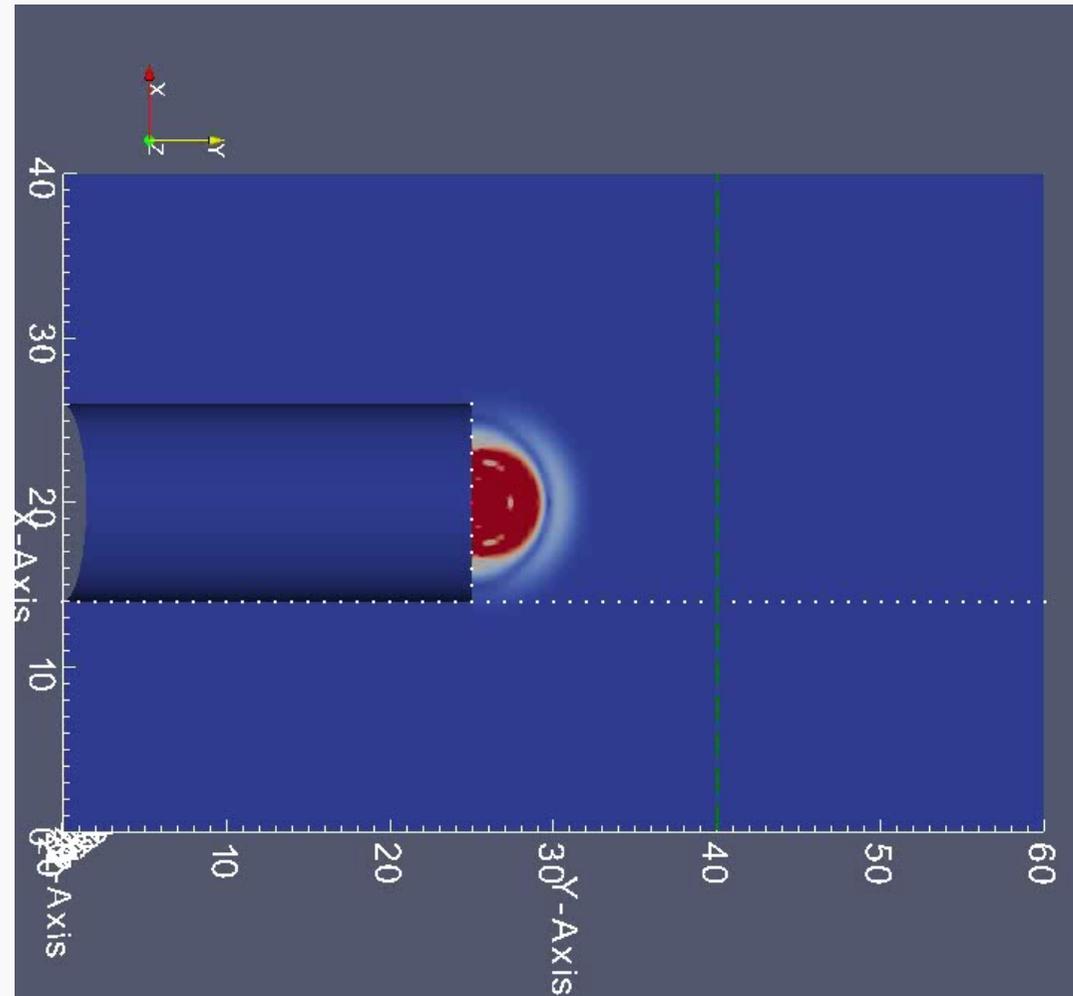
# Vorauserkundung: Wellenausbreitung und Identifikation von Störungen



- Erkennung geologischer Anomalien vor dem Tunnel
- Vorwärtsproblem:
  - FEM im Verschiebungsraum (DG-Methode, Spektrale FEM)
  - FEM im Frequenzraum
- Inverse Analyse



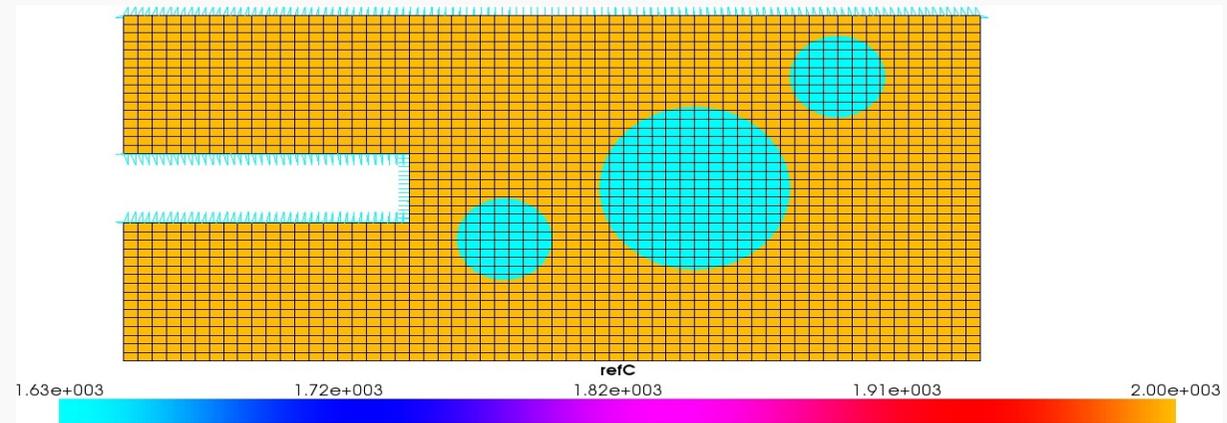
# Vorauserkundung: Vorwärtsanalyse



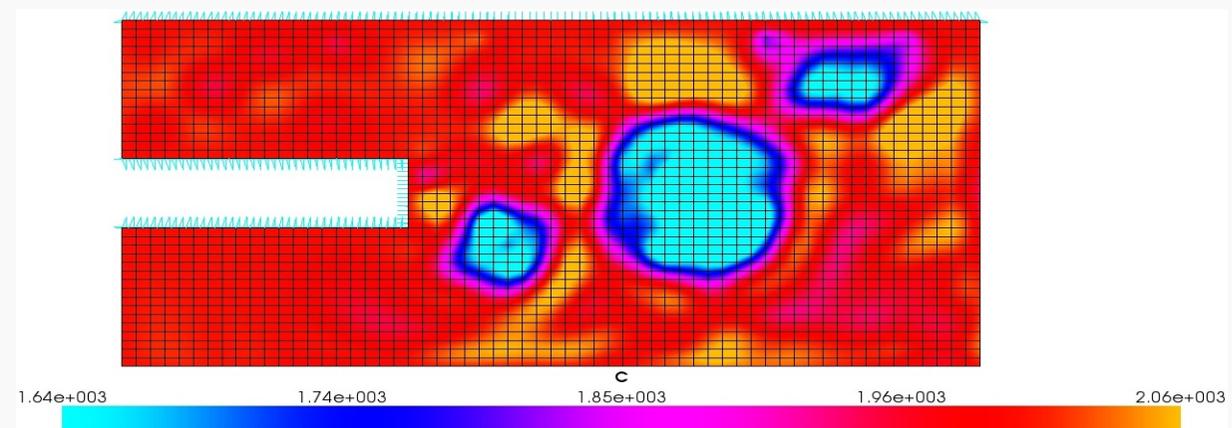
# Vorauserkundung: Inverse Identifikation

Frequency Domain Discrete Adjoint Method

Synthetic Model

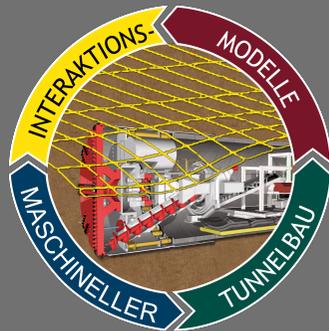


Identification



– SFB 837 –

Interaktionsmodelle für den  
maschinellen Tunnelbau



# PROZESSORIENTIERTE SIMULATION MASCHINELLER SCHILDVORTRIEBE IM LOCKERGESTEIN

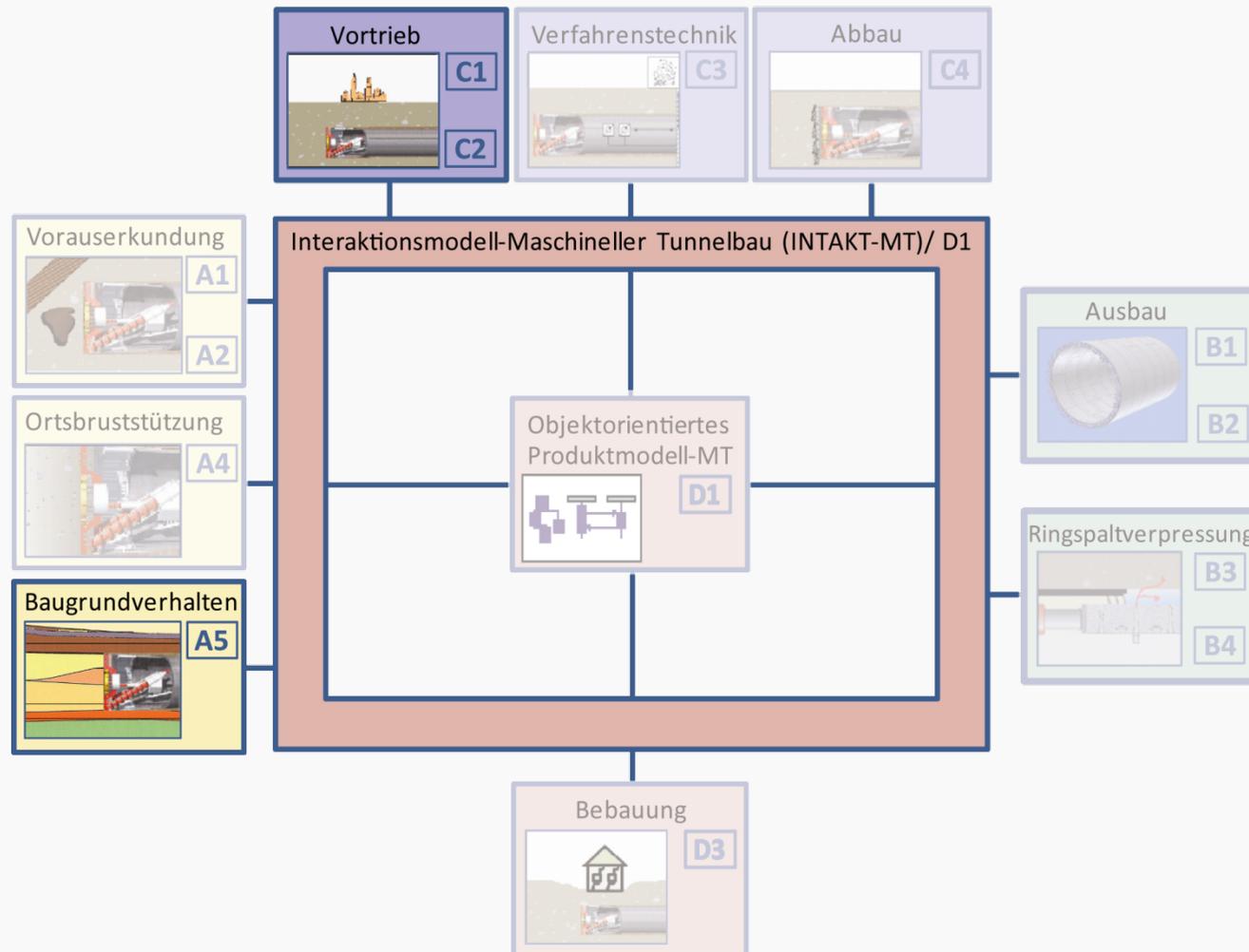
A. Alsahly, T. Barciaga, M. Datcheva, G. Meschke,  
N. Müthing, S. Miro, J. Ninić, T. Schanz, J. Stascheit, K.  
Vakili, V. Zarev



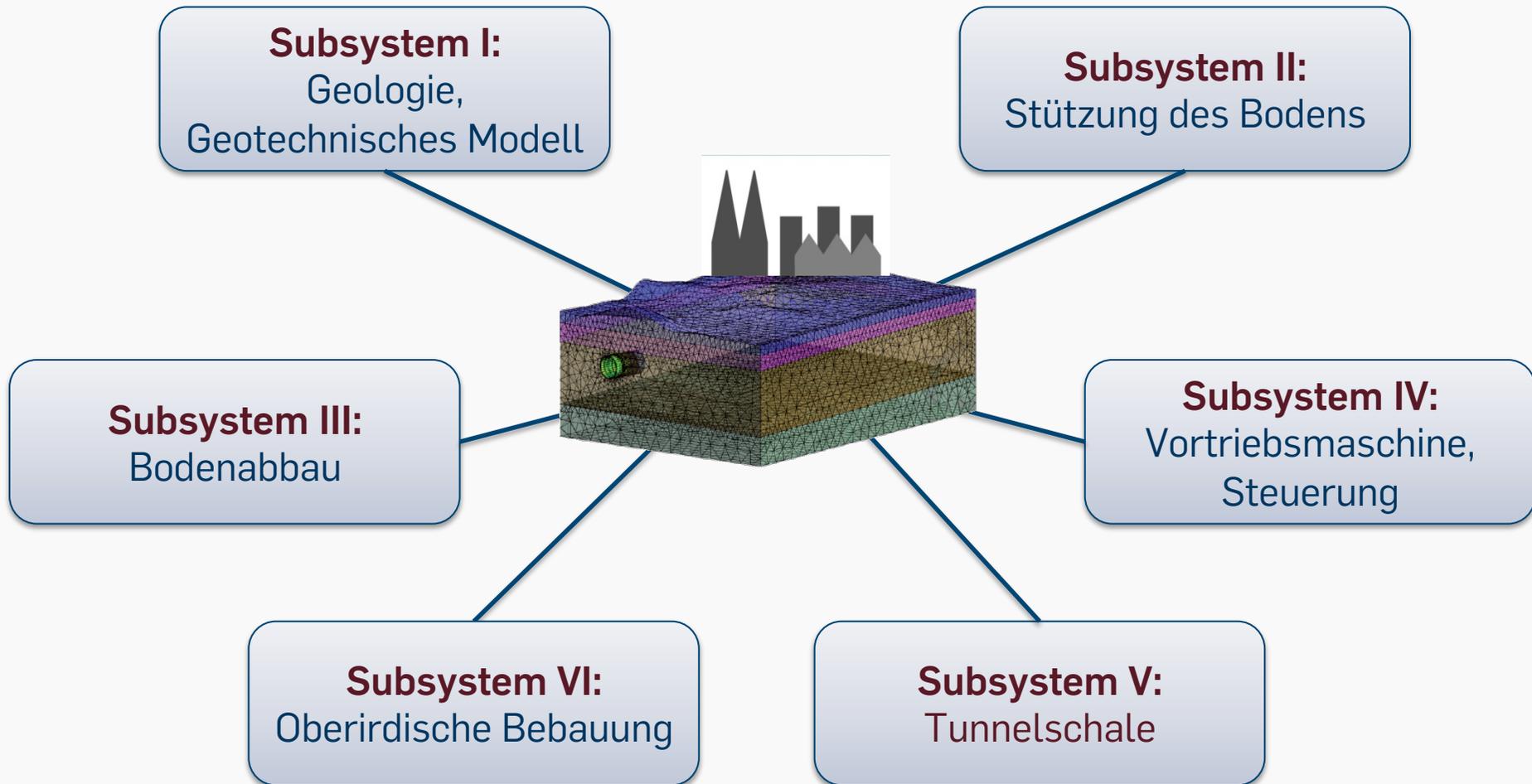
SFB  
837

Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau

# Beteiligte Teilprojekte



# Maschinelles Tunnelbau: Komplexes, interagierendes System

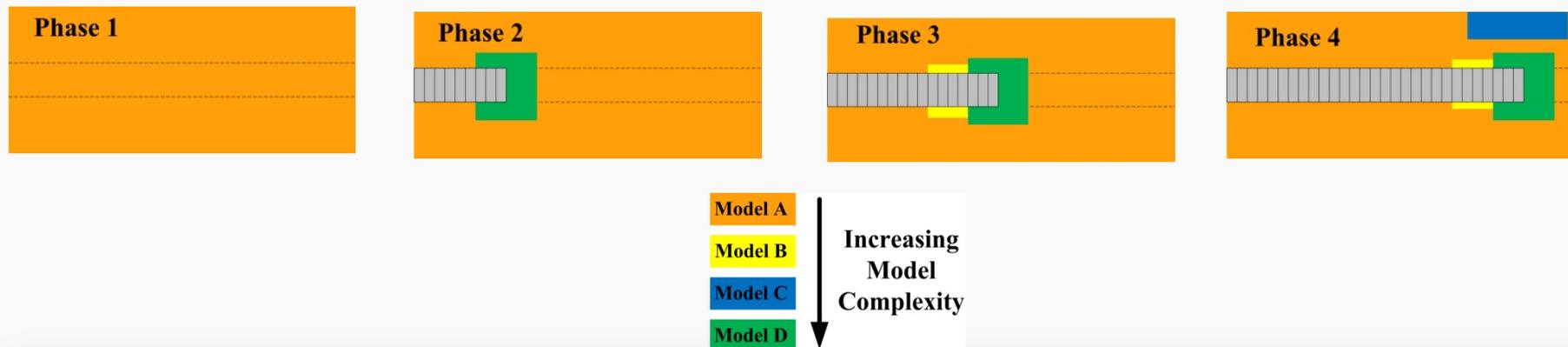


# Bodenmodell: Hierarchische Materialmodellierung

- Einfache Modelle
  - Wenige Parameter – gute Verfügbarkeit
  - Starke Idealisierung der Baugrundverhältnisse

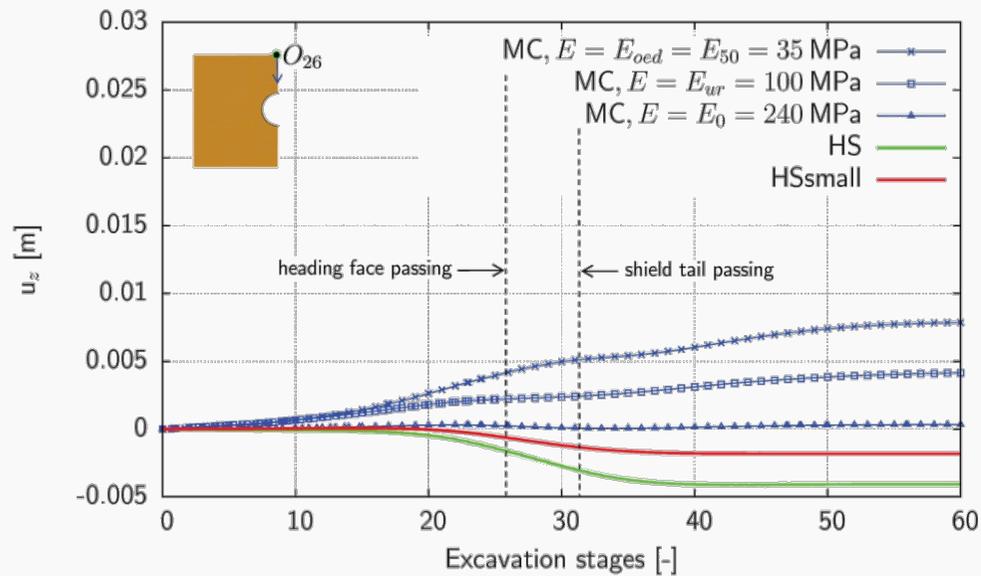
→ Ausreichend in Bereichen weit vor oder hinter der Ortsbrust
- Komplexe Modelle
  - Hoher numerischer Aufwand, lange Rechenzeiten
  - Mehr Parameter, schwieriger zu beschaffen
  - Gute Abbildung der Realität

→ Notwendig in Bereichen komplexen Spannungs-Dehnungsverhaltens und bei komplexen Spannungspfaden

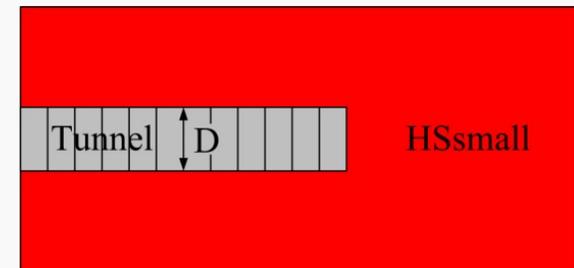
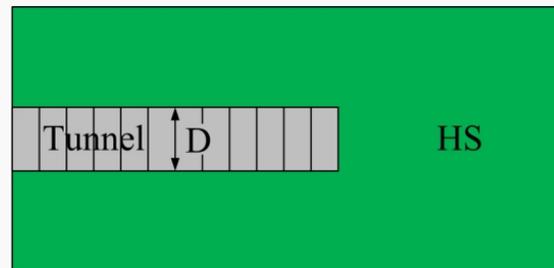
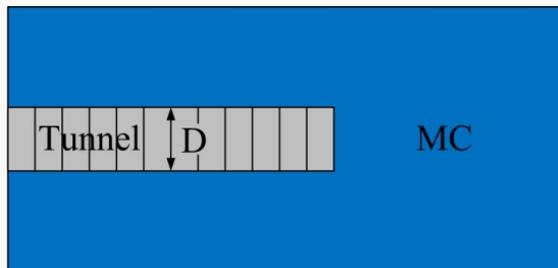


# Einfluss der Modellkomplexität

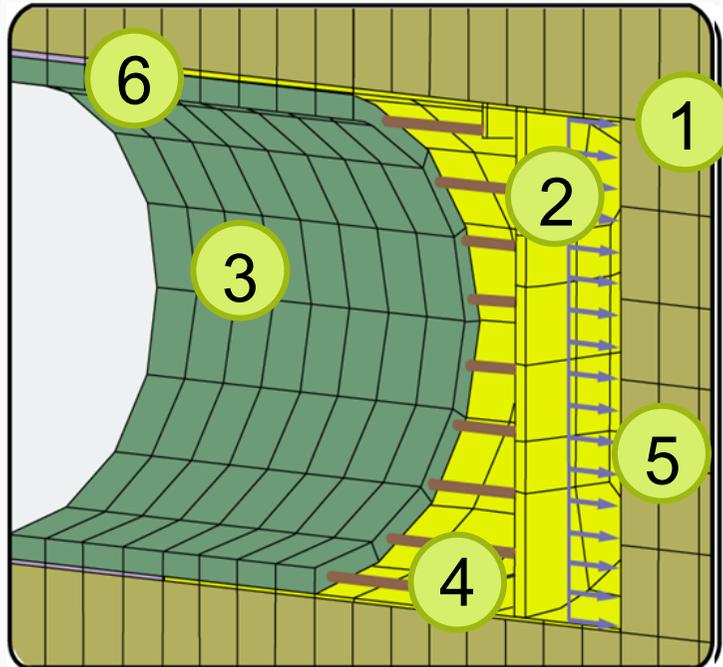
## Verformungsberechnungen mit unterschiedlichen Konstitutivmodellen



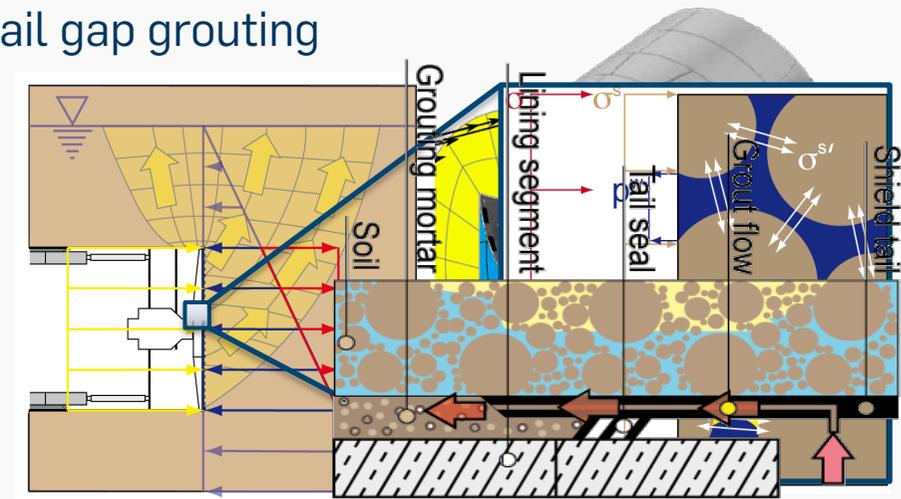
Vertikale Verschiebung an der Geländeoberkante



# Komponenten eines prozessorientiertes Simulationsmodells – ekate

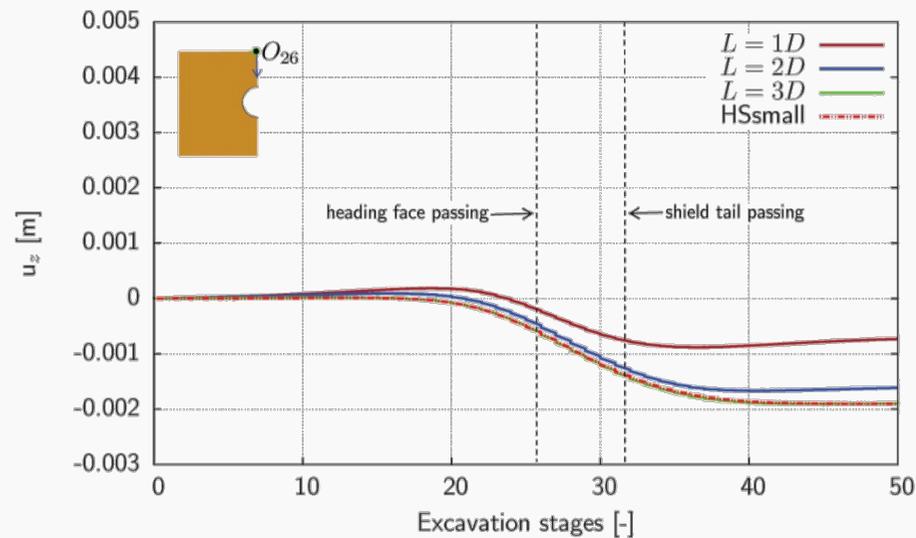


- ① surrounding underground
- ② shield machine
- ③ lining
- ④ hydraulic jacks
- ⑤ heading face support
- ⑥ tail gap grouting

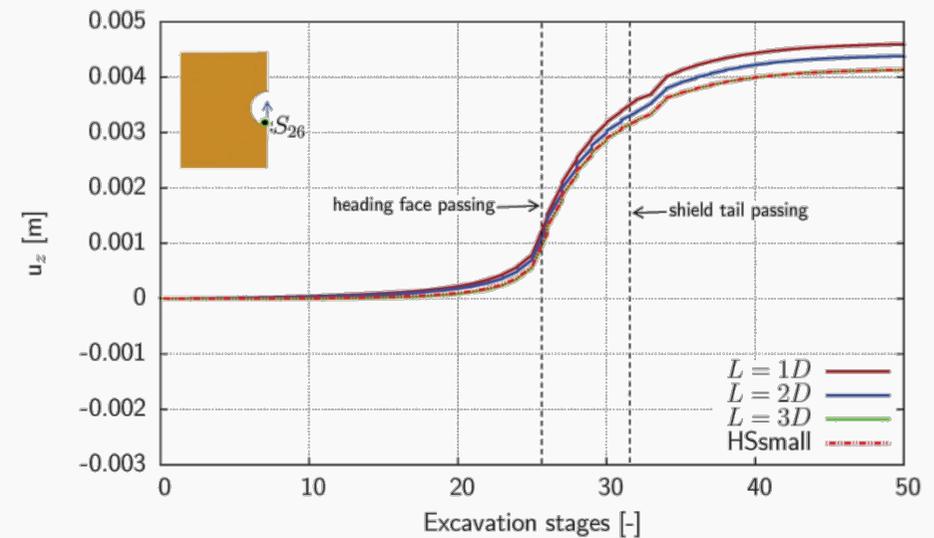


# Einfluss der Modellkomplexität – Lokal - Global

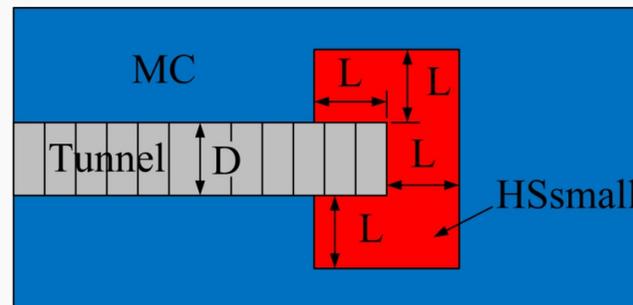
## Kriterium zur Wahl der Modellkomplexität: Verformungsberechnungen



Vertikale Verschiebung an der Geländeoberkannte

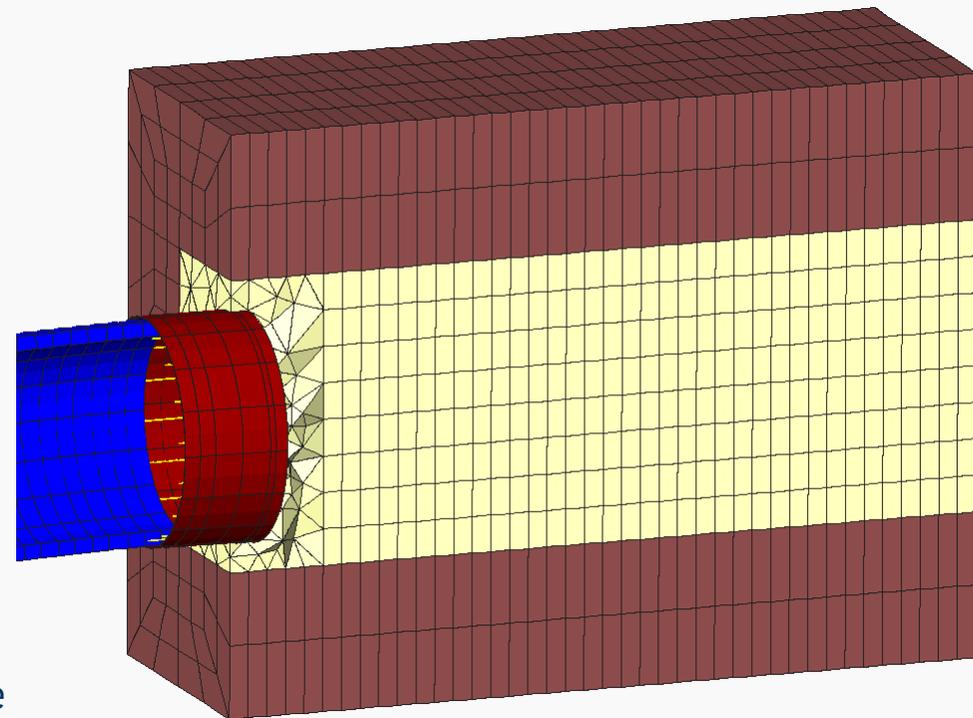
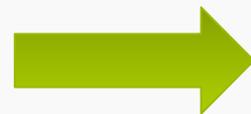
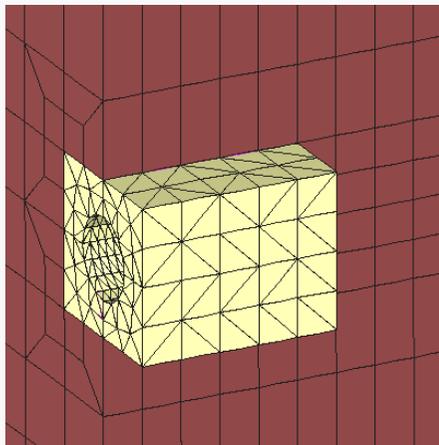


Vertikale Verschiebung der Tunnelsohle



# Adaptive Modellierung der Ortsbrustzone

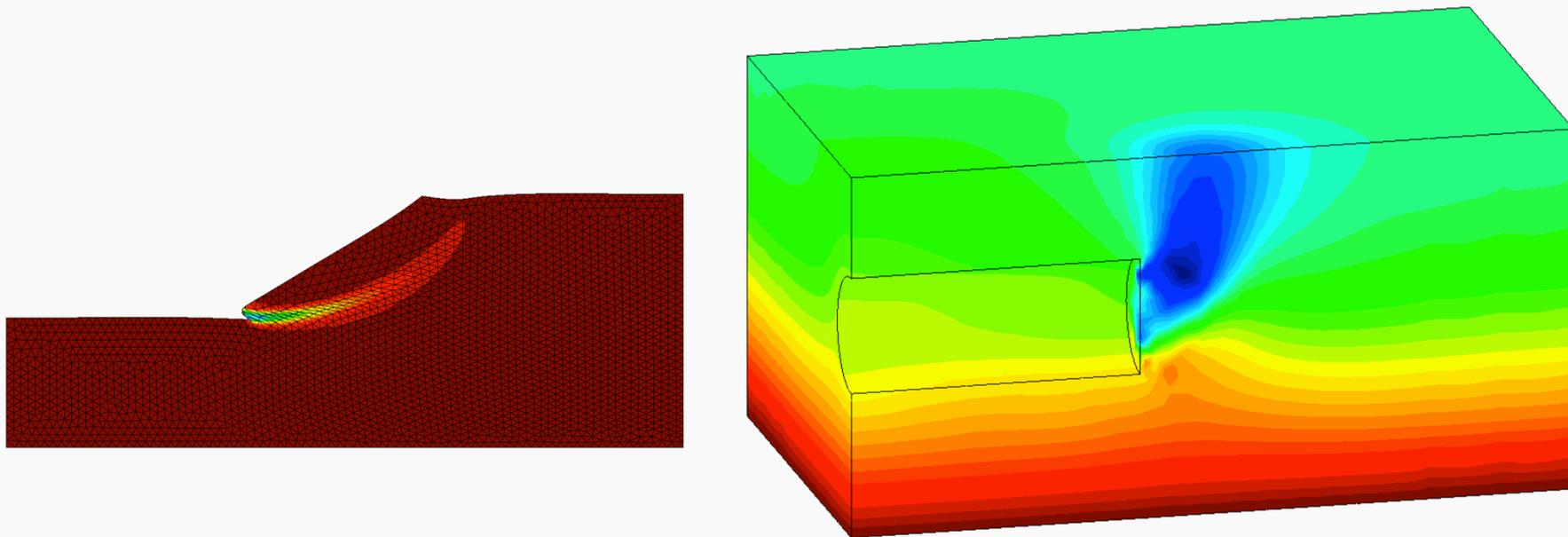
- Modellierung des Bereiches erhöhter Modellkomplexität
- Kurvenfahrt und Abweichung des Schildpfades von der Tunneltrasse
- Fehlerbasierte Adaptivität zur Modellierung von Scherversagen



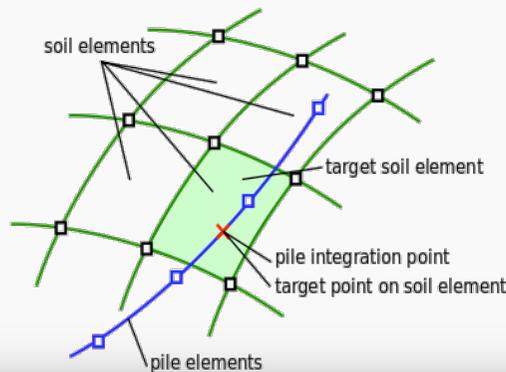
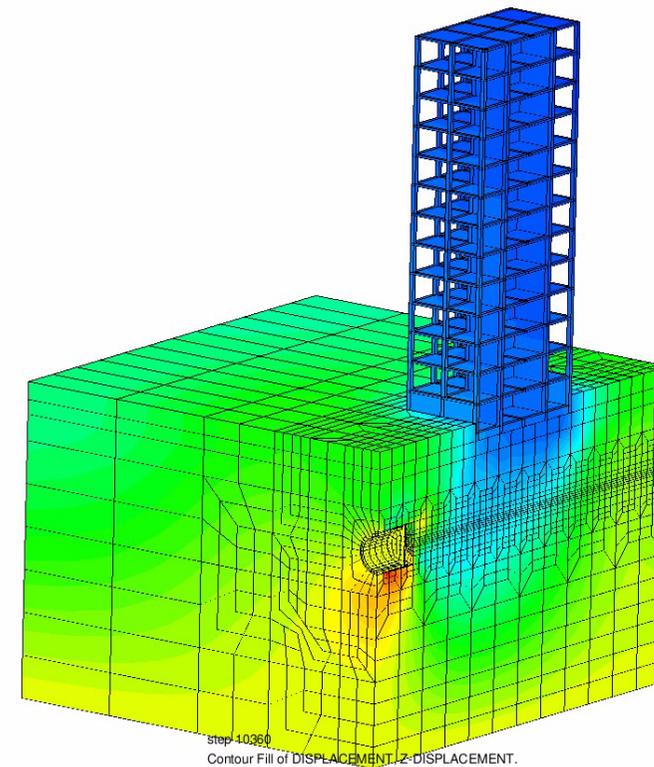
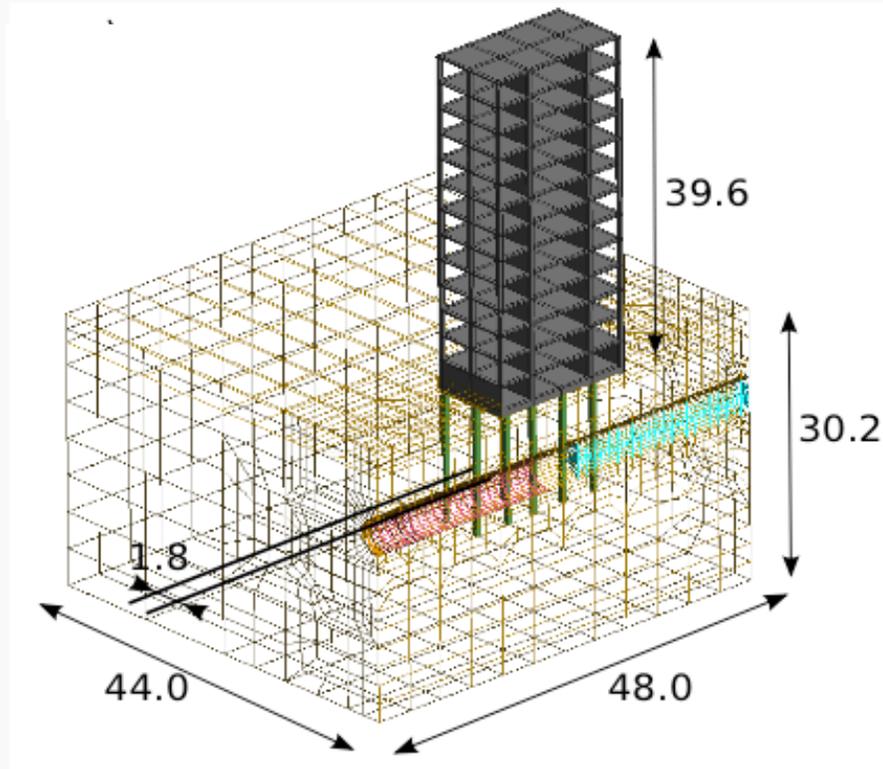
Hybride,  
Geometrieadaptive  
Neuvernetzung

# Adaptive Modellierung der Ortsbrustzone

- Modellierung des Bereiches erhöhter Modellkomplexität
- Kurvenfahrt und Abweichung des Schildpfades von der Tunneltrasse
- Fehlerbasierte Adaptivität zur Modellierung von Scherversagen



# Interaktion mit existierender Bebauung

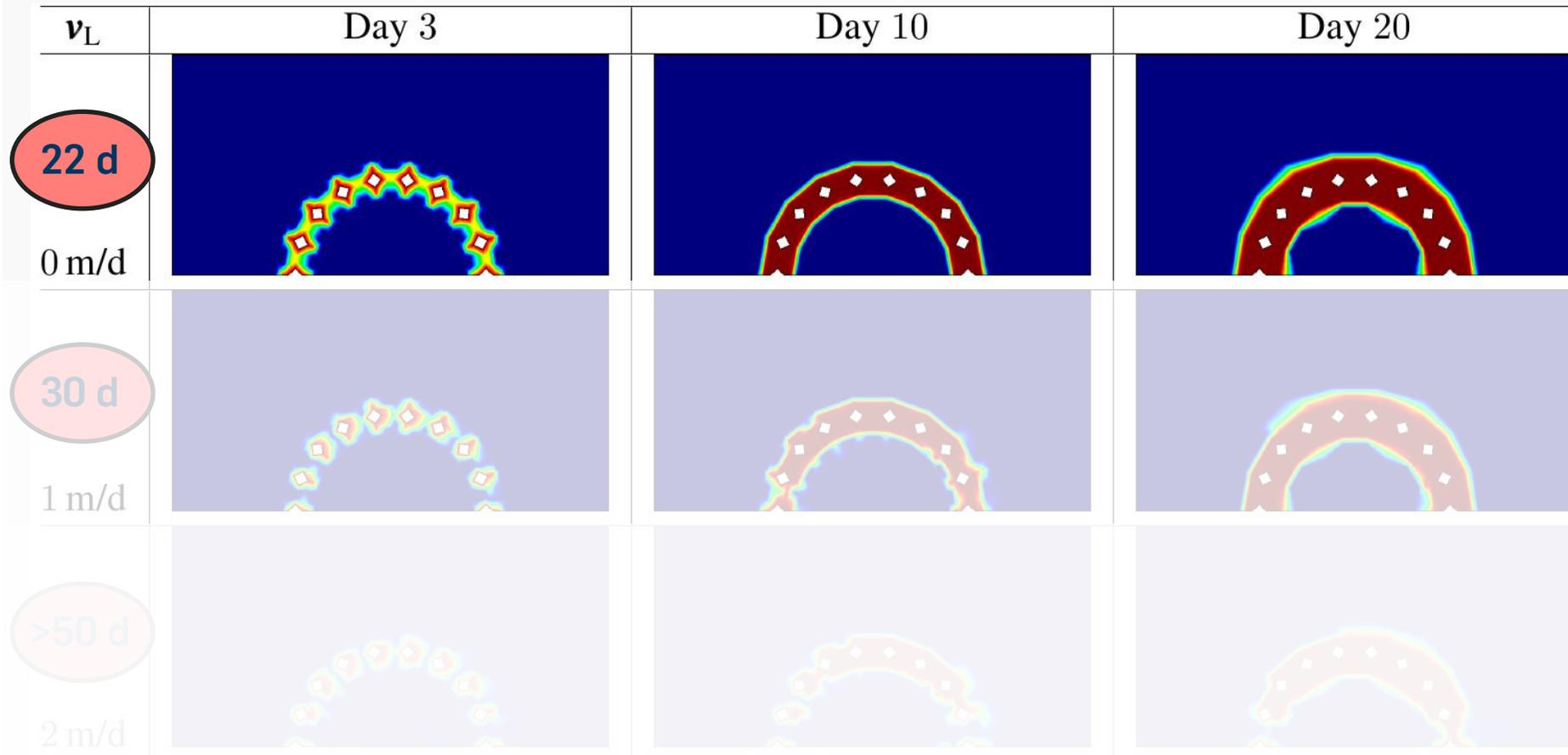


## Neuentwickeltes Element für Pfahlgründungen

- Unabhängig von der Vernetzung des Bodens
- Beliebige Anzahl, Orientierung pro Element
- Pfahlmantelreibung, Pfahlspitzenwiderstand

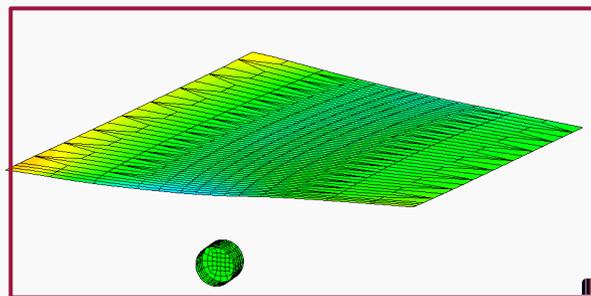
# Simulation von Baugrundstützung mittels Vereisung

## Numerische Simulation: Einfluss der Grundwasserströmung



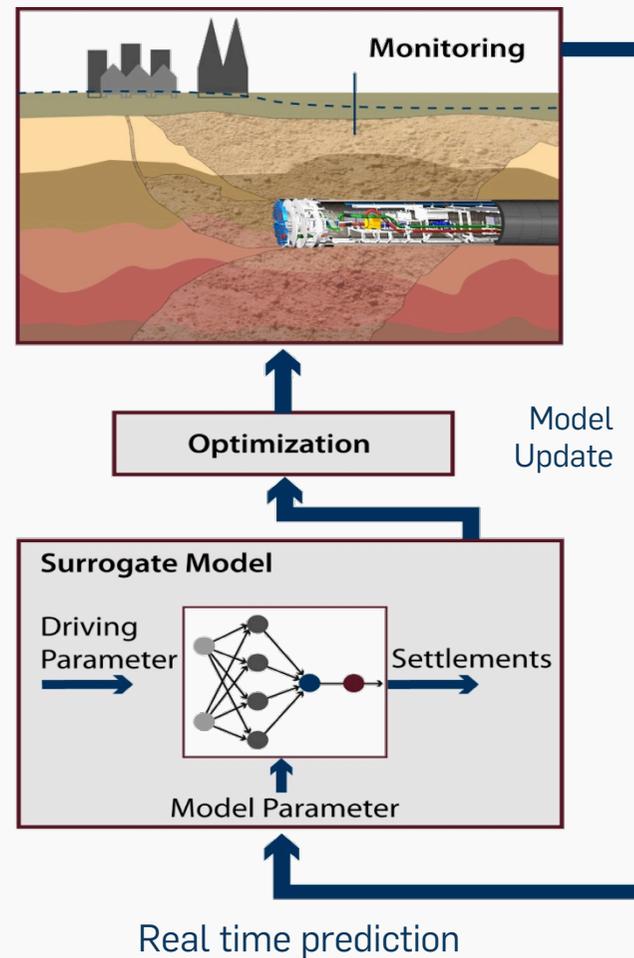
# Monitoring- und simulationsbasierte Prozess-Steuerung

- Unterstützung der TVM-Steuerung in Echtzeit durch begleitende Simulationen
- Prognosen von max/min Setzungen, Sicherheitsniveaus
- Berücksichtigung von Unschärfen



Computational model: large computational effort

Training



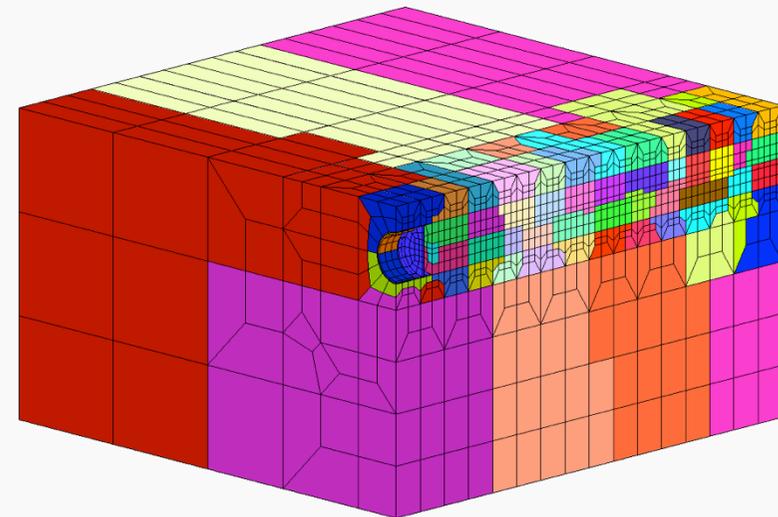
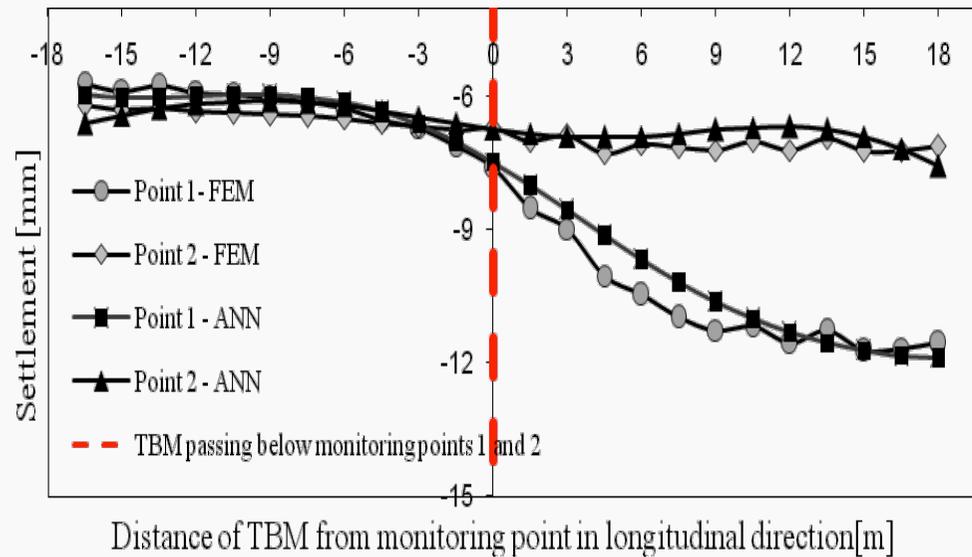
Steering

Real time prediction

Model Update

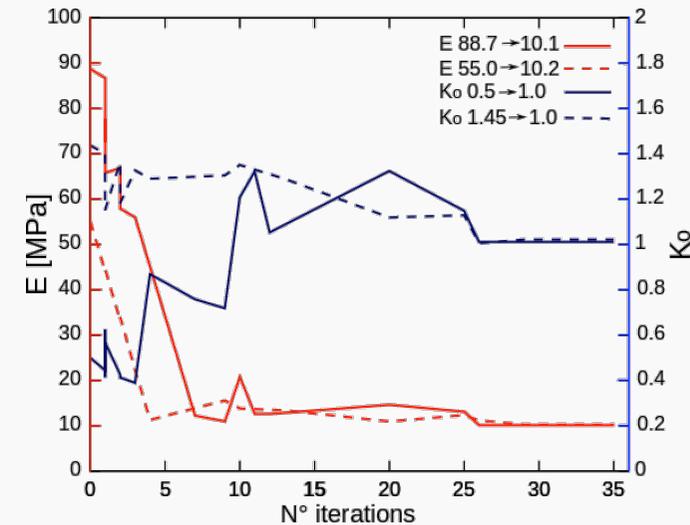
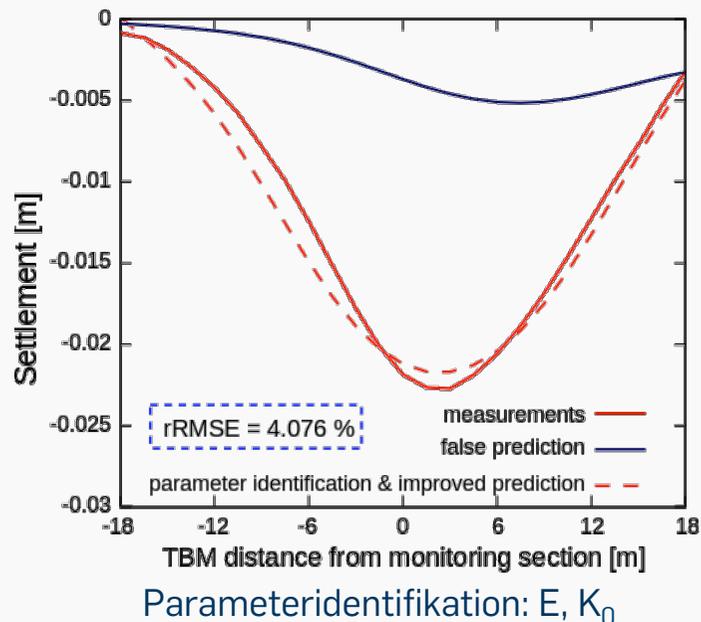
# Herausforderung: Rechenaufwand

- Schnelles Ersatzmodell trainiert auf Basis des Simulationsmodells: ANN
- Tunnelspezifische Parallelisierungsstrategien



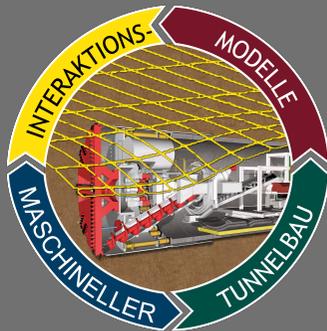
# Parameter Identification

- Schnelles Ersatzmodell trainiert auf Basis des Simulationsmodells: ANN
- Model-update: Particle Swarm Optimization (PSO)

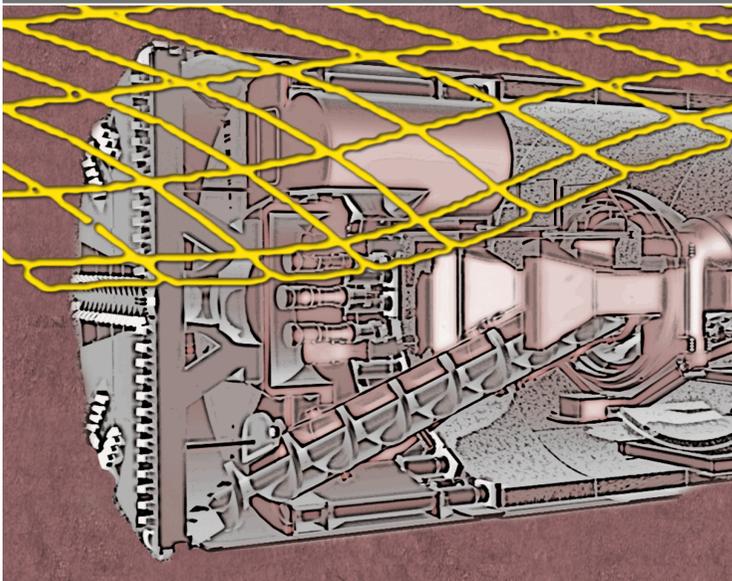


Konvergenz der Parameteridentifikation

– SFB 837 –  
 Interaktionsmodelle für den  
 maschinellen Tunnelbau



# SETZUNGSBASIERTE ANSÄTZE ZUR RISIKOBEWERTUNG OBERIRDISCHER BESTANDSBEBAUUNG BEIM TUNNELBAU



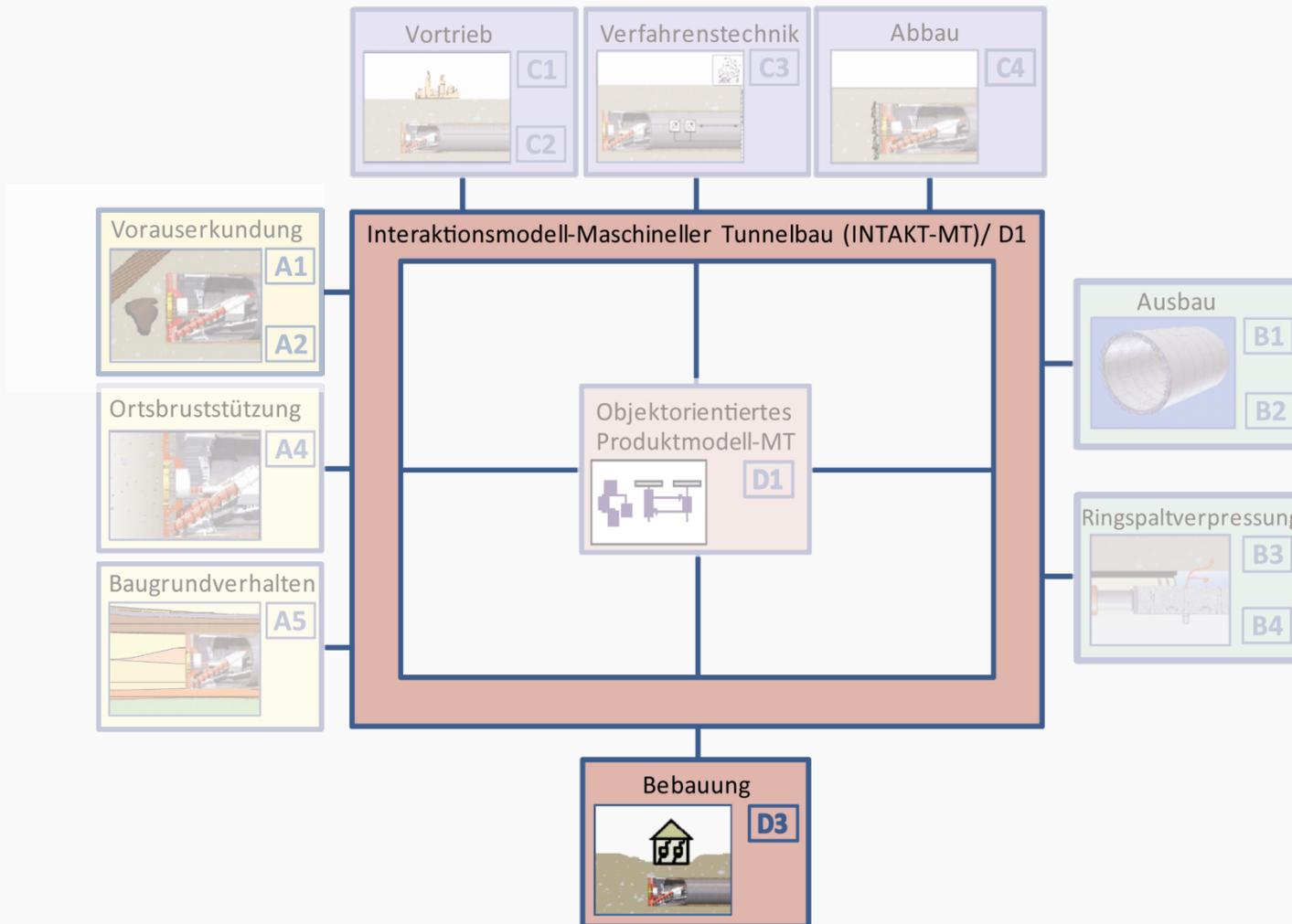
P. Heek, P. Mark, P. Meister, S. Schindler



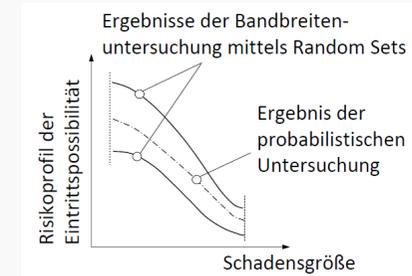
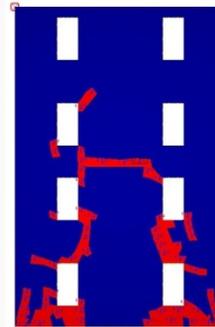
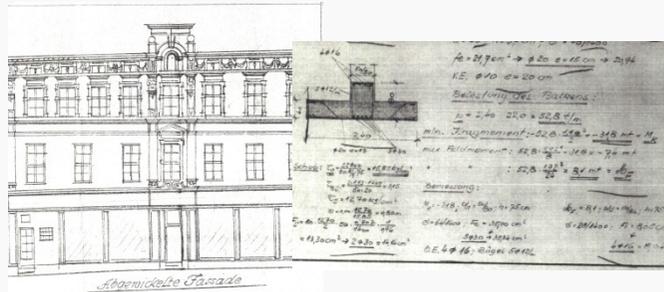
SFB  
 837

Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau

# Beteiligte Teilprojekte



# Risikobewertung - Konzept



**Strukturanalysen**

**Vulnerabilitäts-analysen**

**Unsicherheit**

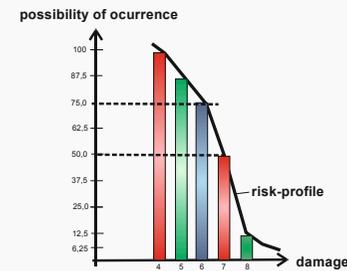
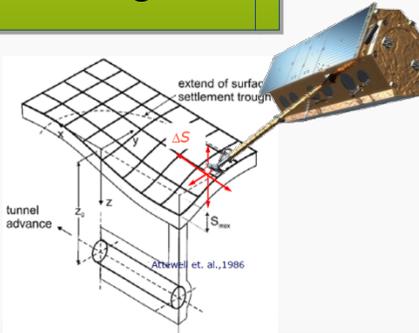
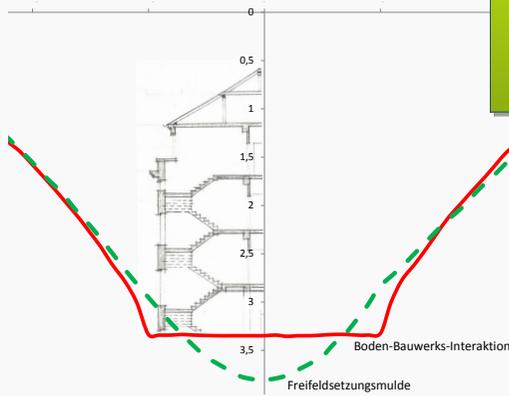
**Motivation**

**Zeit**

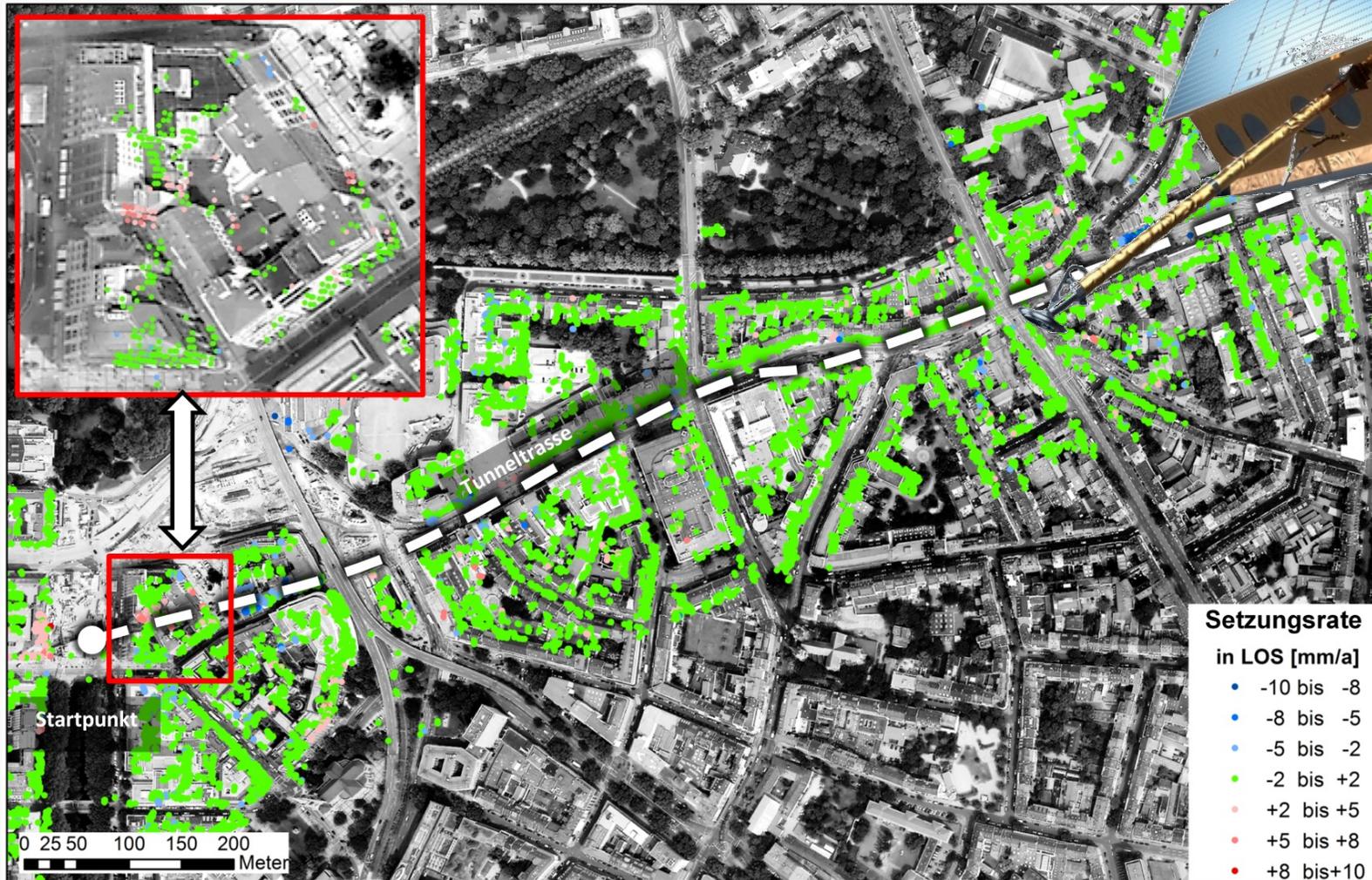
**Ziel**

**Einfluss der Setzungen**

**Risikosimulation**



# Radar-Interferometrie an der Wehrhahn-Linie





A photograph showing the interior of a tunnel. The tunnel is dimly lit, with a series of bright, rectangular lights mounted along the right side of the wall, creating a strong perspective effect. The floor is covered with tracks, likely for a train or tram. The walls are dark and appear to be made of concrete or rock. The overall atmosphere is dark and industrial.

**Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit!**