

## **MAGS2 EP6:**

Entwicklung numerischer Analysemodelle zur lokalen seismischen Gefährdungseinschätzung vor Bohrbeginn und langfristige Bewertung von Geothermiefeldern unter Berücksichtigung THM:C gekoppelter Prozesse

—  
Abschlussworkshop

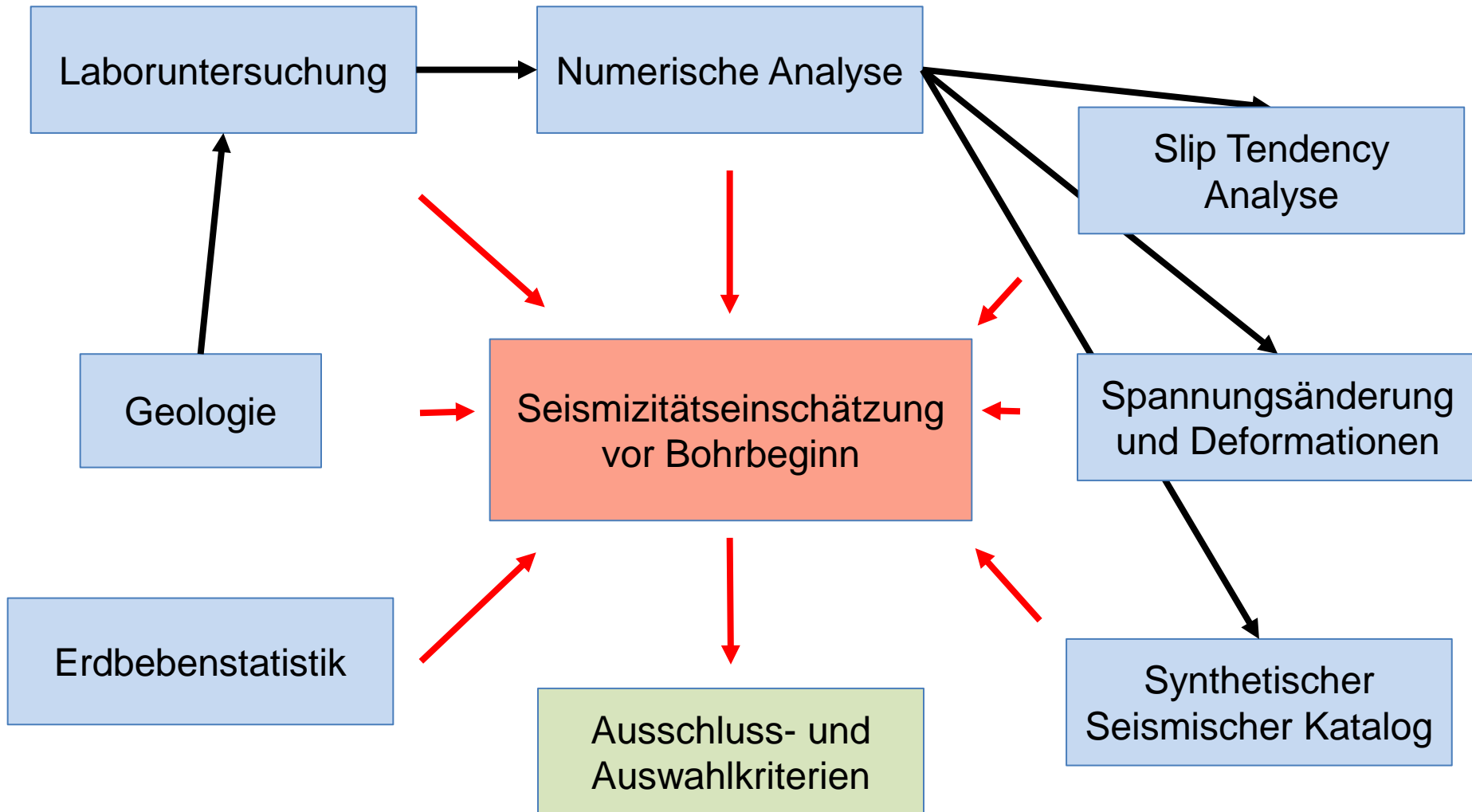
Michael Z. Hou, Yang Gou, Wentao Feng, Wei Xing, Frank Fiedler

Bochum, 4-5 Oktober 2016

# Inhalt

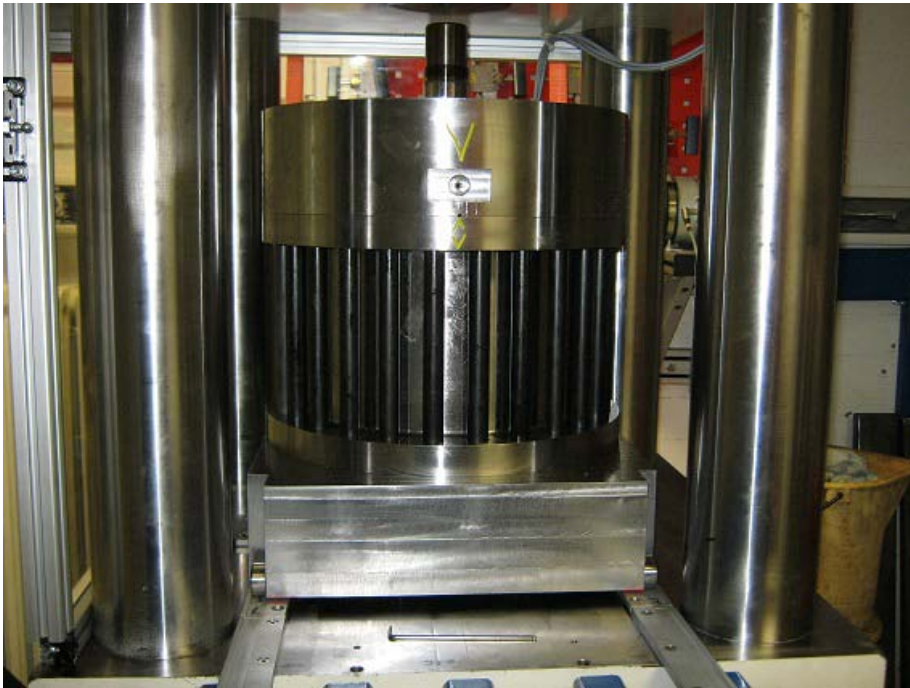
- Methoden zur Seismizitätseinschätzung vor Bohrbeginn
- Laboruntersuchung
- Methodische Entwicklung
- Betrachtung komplexer Geothermiefelder
  - Fallbeispiel 1: Unterhaching und Kirchstockach (Großraum München)
  - Fallbeispiel 2: Landau (Südpfalz)
- Zusammenfassung

# Methoden zur Seismizitätseinschätzung vor Bohrbeginn



# Laboruntersuchung

Bestimmung von Gesteinsparametern möglichst nahe am Reservoirdruck und an Temperatur → Eingangsparemeter für die Modellierungen



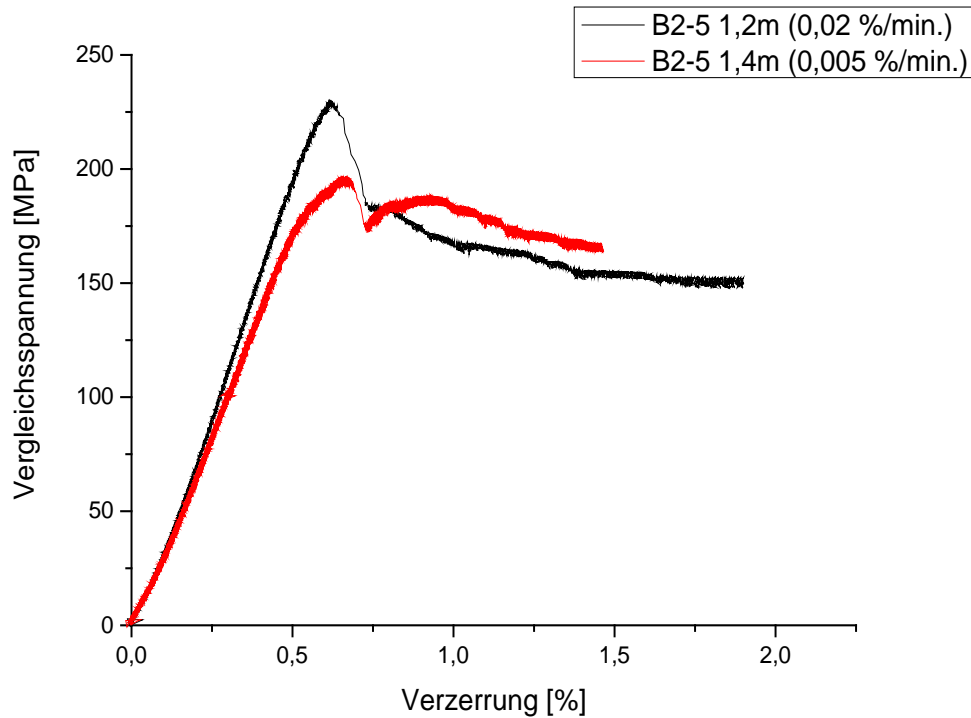
Versuchsgerät



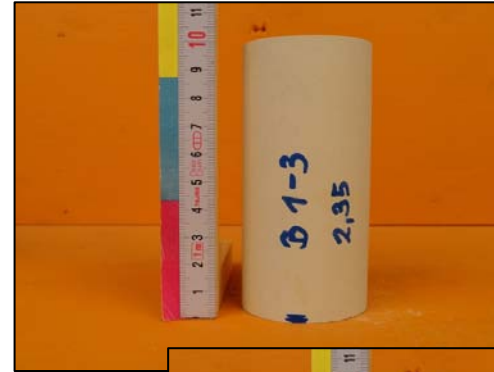
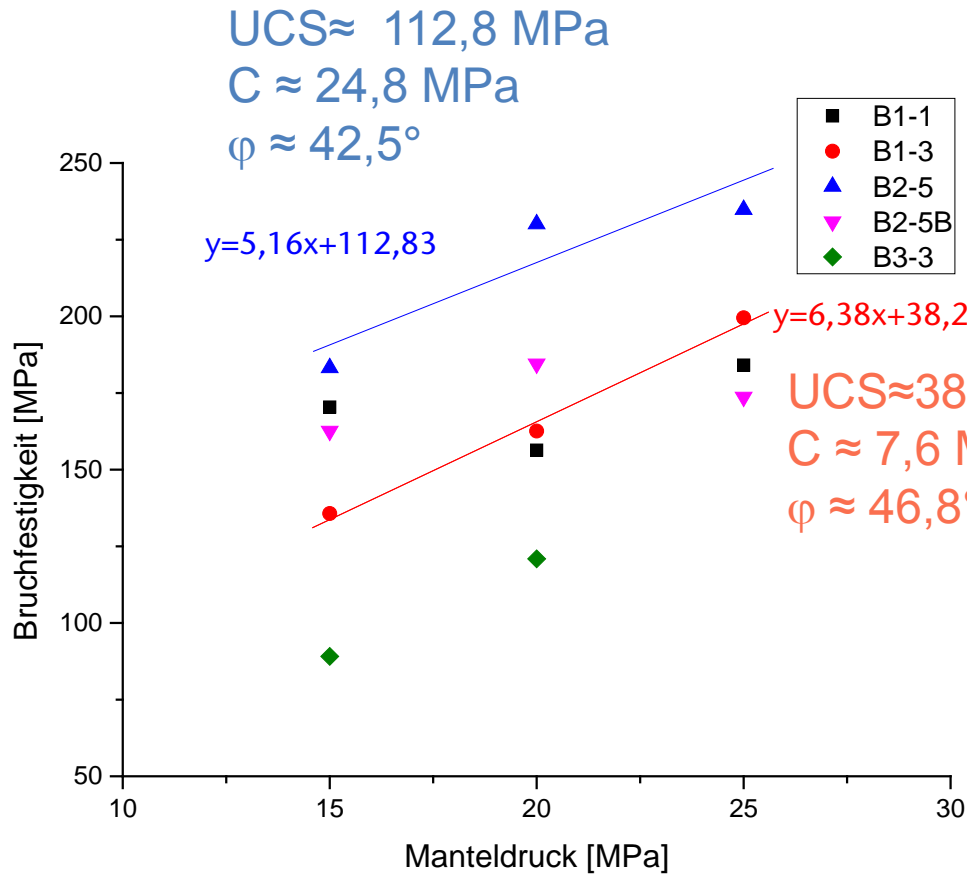
Gesteinsprobe (Kalkstein)

# Laboruntersuchung

## Einfluss der Verformungsrate auf Festigkeit (TC-Versuch)

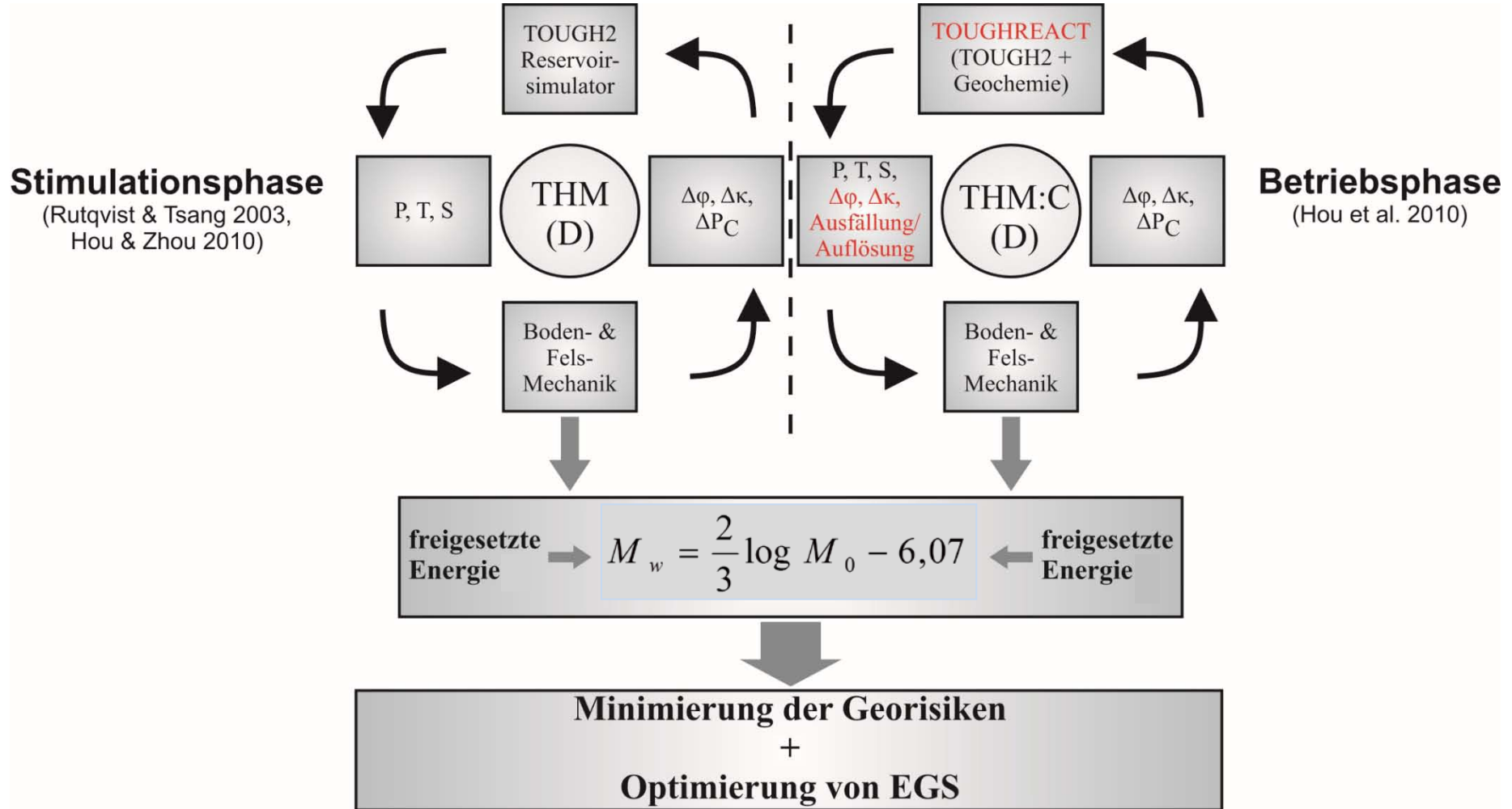


# Laboruntersuchung



# Methodische Entwicklung

## Konzept



# Methodische Entwicklung

Entwicklung des **THM-Kopplungsmodells** basierend auf Klufftensormechanisches Modell für geklüftete Gesteinsmassen

- Der elastische Anteil nach Huang et al. 1995

$$\Delta \varepsilon_{ij} = C_{ijkl} \Delta \sigma_{kl} \quad C_{ijkl} = C_{ijkl}^I + C_{ijkl}^J \quad C_{ijkl}^J = \sum_{m=1}^M n_i^m L_{jj}^m C_{jL}^m L_{Li}^m n_k^m \frac{1}{S^m}$$

- Der plastische Anteil nach Mohr-Coulomb Modell und Jing et al. 1994

$$F = \sqrt{\left(\frac{\tau_x}{\mu_x}\right)^2 + \left(\frac{\tau_z}{\mu_z}\right)^2} + \sigma_n - C \quad Q = \sqrt{\left(\frac{\tau_x}{\mu_x}\right)^2 + \left(\frac{\tau_z}{\mu_z}\right)^2} + \sigma_n \sin \alpha \quad dW^p = \sigma_j du_j^p$$

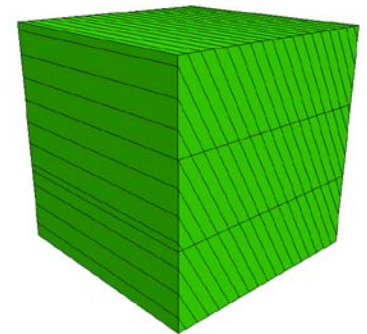
$$\mu_x = \tan(\phi_r + \alpha_x) \quad \mu_z = \tan(\phi_r + \alpha_z) \quad \alpha_x = \alpha_{x0} e^{-DW^p} \quad \alpha_z = \alpha_{z0} e^{-DW^p}$$

- Das hydro-mechanisch gekoppelte Modell

$$\phi = 1 - (1 - \phi_i) \cdot e^{-\varepsilon_v} \quad k_{ij} = k_{ij}^I + k_{ij}^J = k^I \delta_{ij} + k_{ij}^J$$

$$k^I = k_i^I \left(\frac{\phi}{\phi_i}\right)^n \quad k_{ij}^J = \frac{1}{12} (F_{kk} \delta_{ij} - F_{ij}) \quad F_{ij} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{S_k} b_k^3 n_{ik} n_{jk}$$

$$b = b_0 + \Delta b = b_0 + f \Delta u_n$$





# Methodische Entwicklung

Mechanisches Modell für eine geklüftete Gesteinsmasse (M)

Der plastische Anteil (Sonderfall: isotrope Schubfestigkeit)

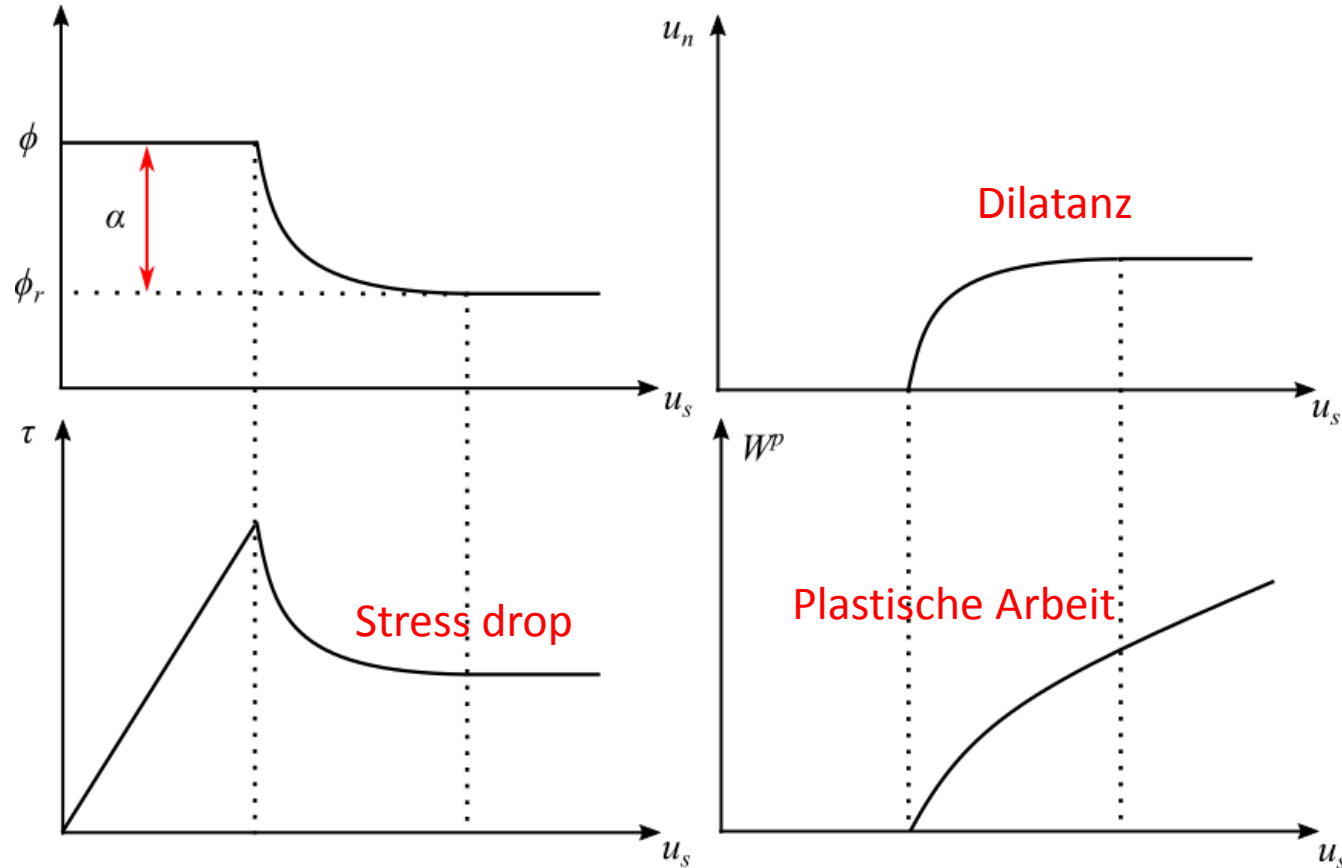
$$F = \frac{\tau}{\mu} + \sigma_n - C$$

$$Q = \frac{\tau}{\mu} + \sigma_n \sin \alpha$$

$$\mu = \tan(\phi_r + \alpha)$$

$$\alpha = \alpha_0 e^{-DW_p}$$

$$dW^p = \sigma_j du_j^p$$



Typische Kurve für einen direkten Schubtest

# Methodische Entwicklung

Berechnung der Slip-Tendency der Störungen, Magnitude der seismischen Ereignisse sowie Herstellung des synthetischen Katalogs

➤ Slip-Tendency der Störungen 
$$\eta = \frac{\tau(\sigma_{ij}, n_i)}{\tau_f(\sigma_{ij}, n_i, \varphi, c)} \quad 0 \leq \eta \leq 1$$

➤ seismischer Momententensor (Aki & Richards 2002) 
$$M_{ij} = G(n_i s_j + n_j s_i) + \lambda \delta_{ij} \bar{s} \cdot \bar{n}$$

• das skalare seismische Moment (Shearer 2009) 
$$M_0 = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{ij} M_{ij}^2}$$

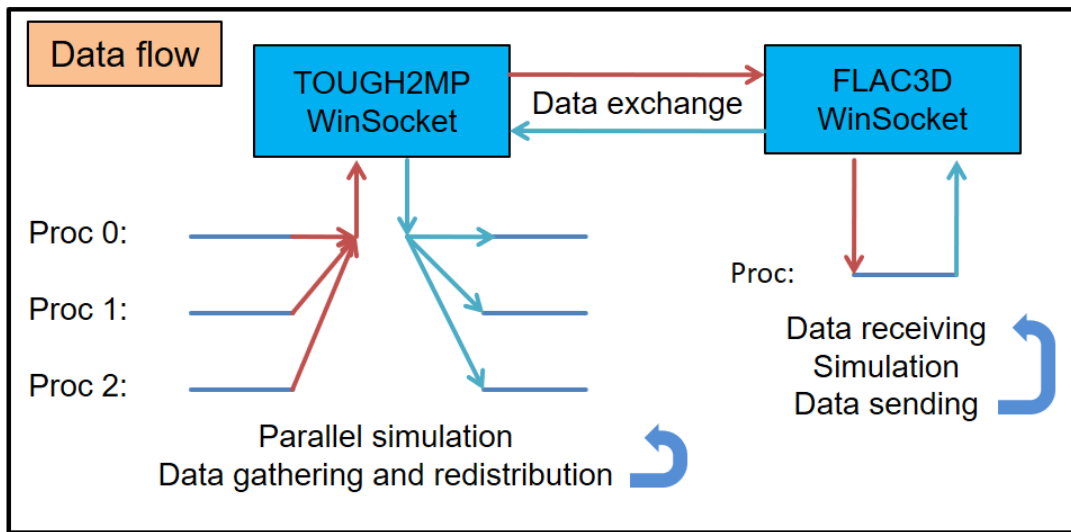
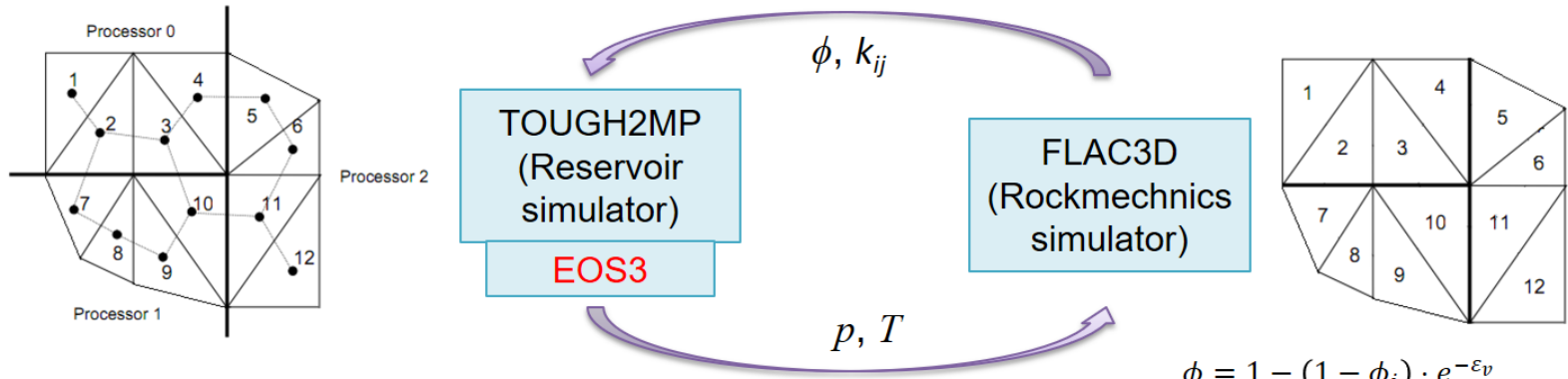
• das gesamte seismische Moment in einem Zeitschritt 
$$M = \sum_i M_0^i$$

• Momentmagnitude 
$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10} M - 6.07$$

$\tau$  Schubspannung auf der Störungsebene,  $\sigma_{ij}$  Spannungstensor,  
 $n_i$  Flächennormal der Störung,  $\varphi$  &  $c$  Schubfestigkeitsparameter der Störung  
 $G$  Schubmodul,  $s_i$  plastische Verschiebung der Störung,  $\lambda$  Lamé-Konstante

# Methodische Entwicklung

## Implementierung des THM-Kopplungsmodells in TOUGH2MP-FLAC3D



$$\phi = 1 - (1 - \phi_i) \cdot e^{-\epsilon_v}$$

$$k^I = k_i^I \left( \frac{\phi}{\phi_i} \right)^n$$

$$k_{ij} = k_{ij}^I + k_{ij}^J = k^I \delta_{ij} + k_{ij}^J$$

$$k_{ij}^J = \frac{1}{12} (F_{kk} \delta_{ij} - F_{ij})$$

$\phi$  porosity

$k_{ij}$  permeability tensor

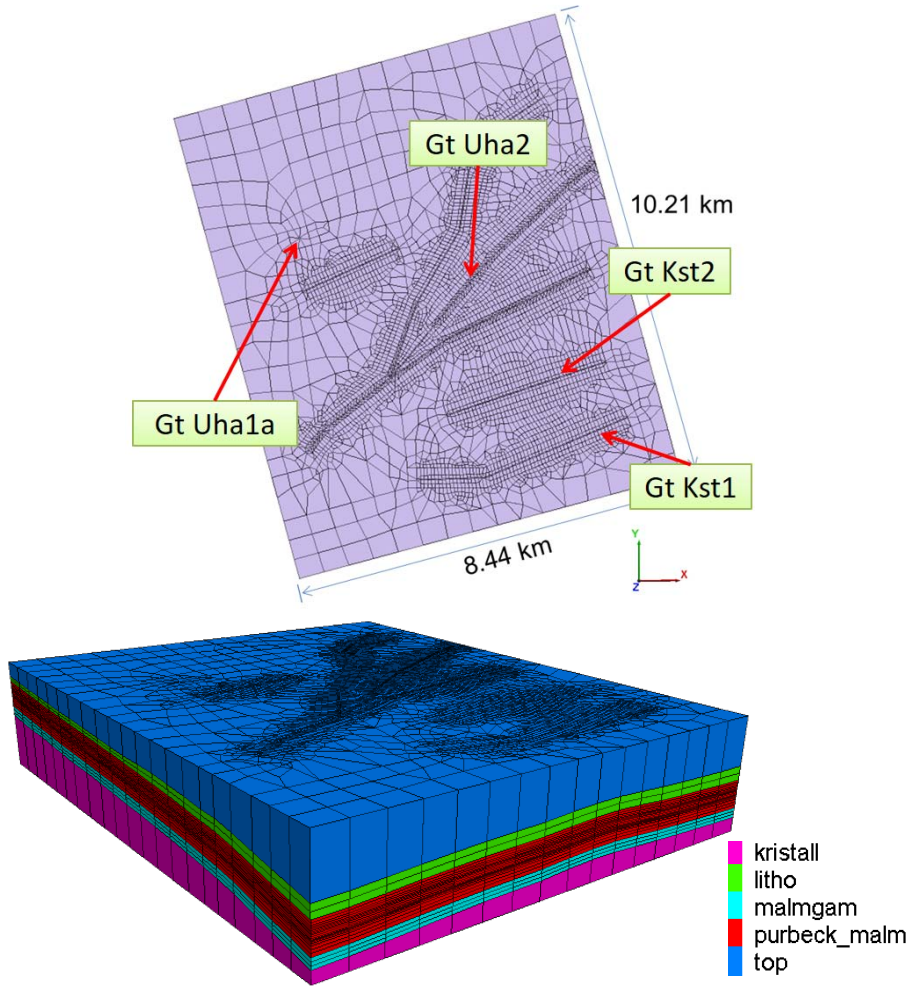
$\epsilon_v$  volumetric strain

$F_{ij}$  crack tensor

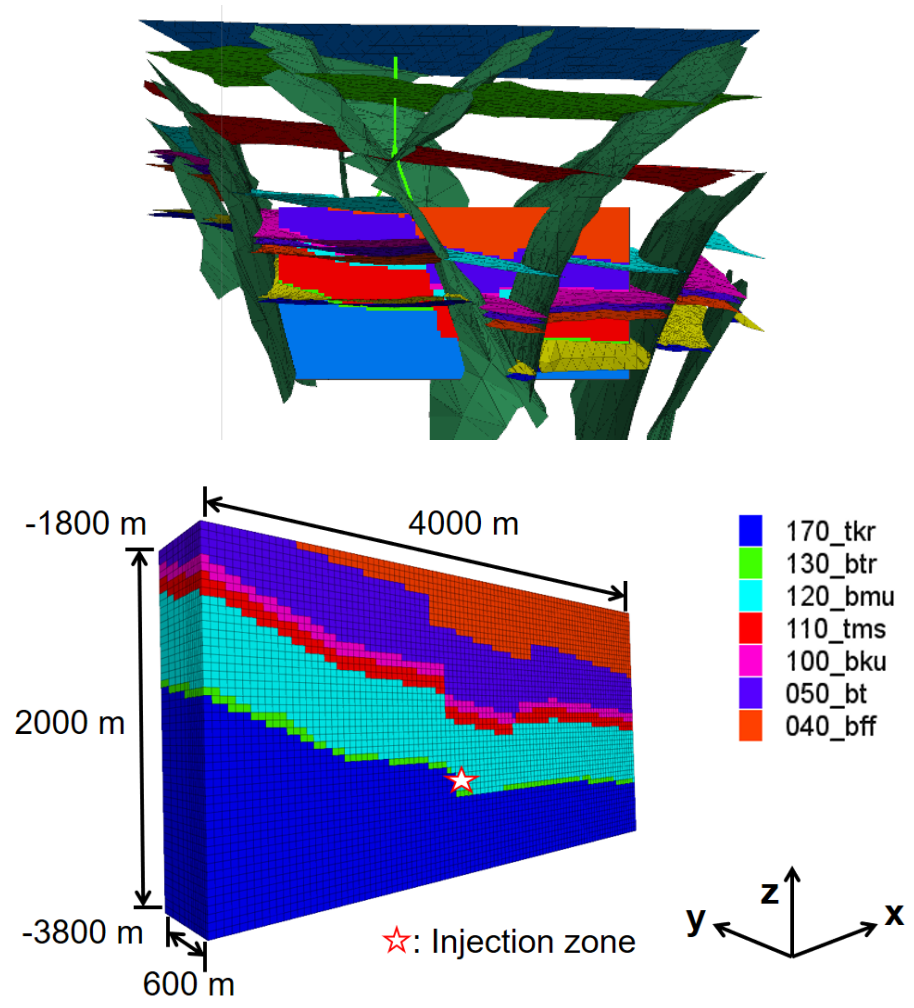
$p$  pore pressure

$T$  temperature

# Betrachtung komplexer Geothermiefelder

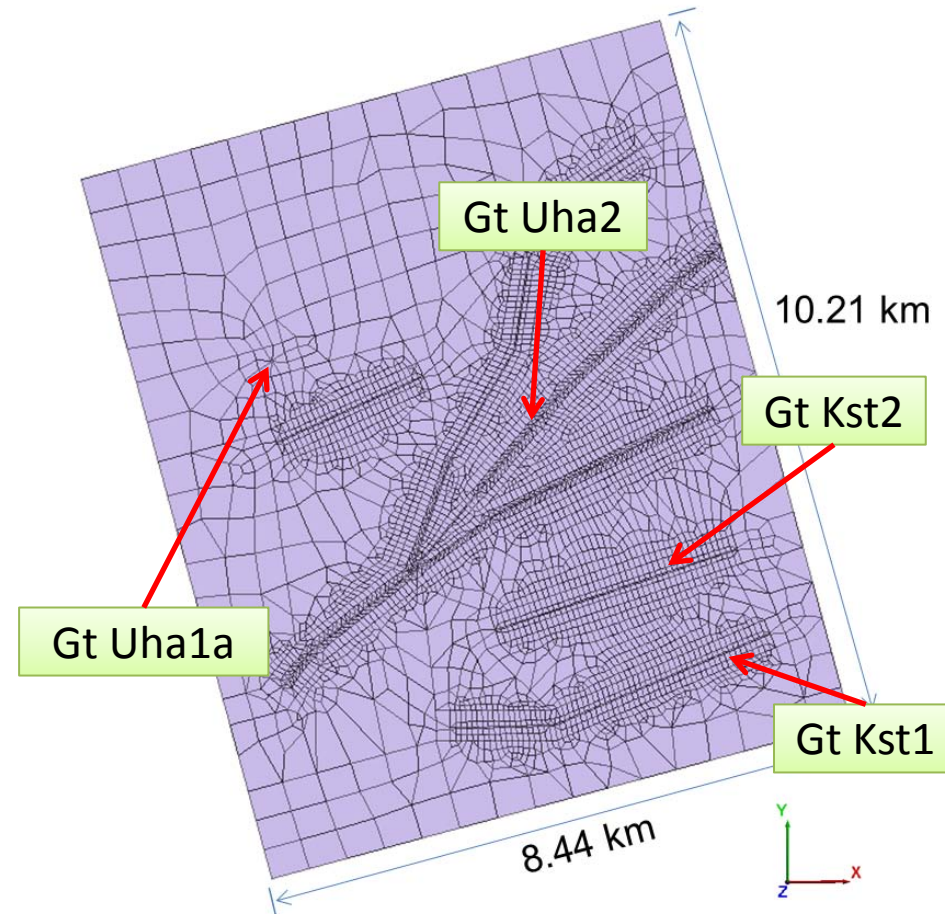
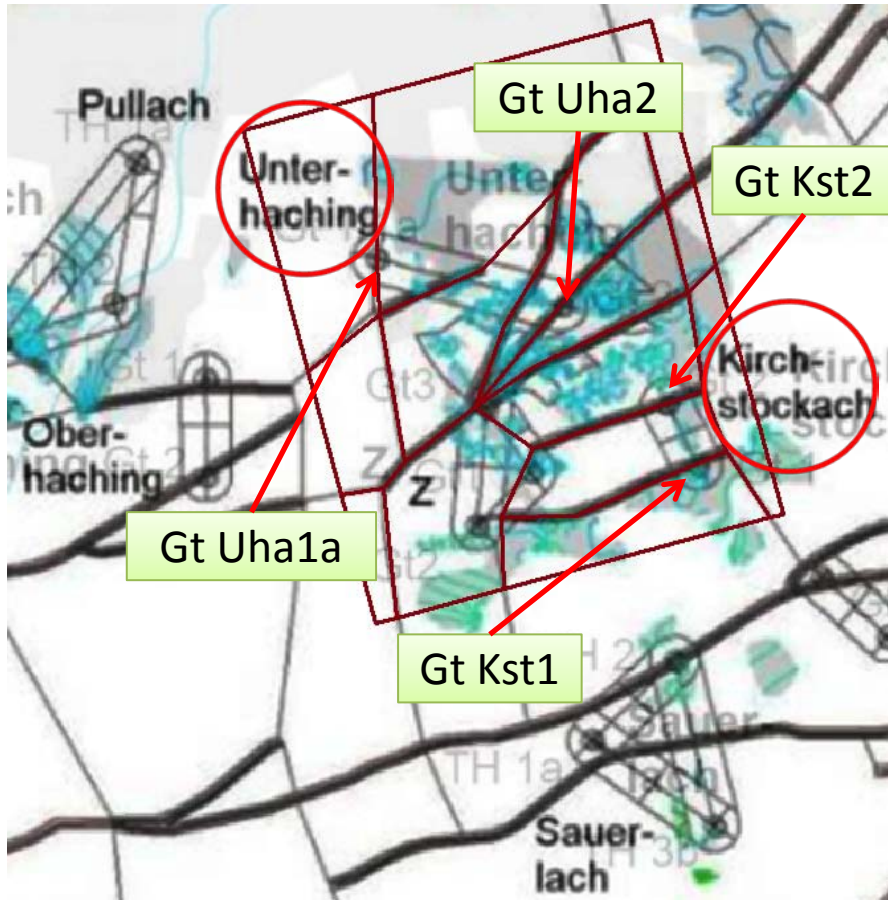


Geothermie Unterhaching + Kirchstockach  
(Großraum München)



Geothermie Landau (Südpfalz)

# Fallbeispiel 1: Unterhaching



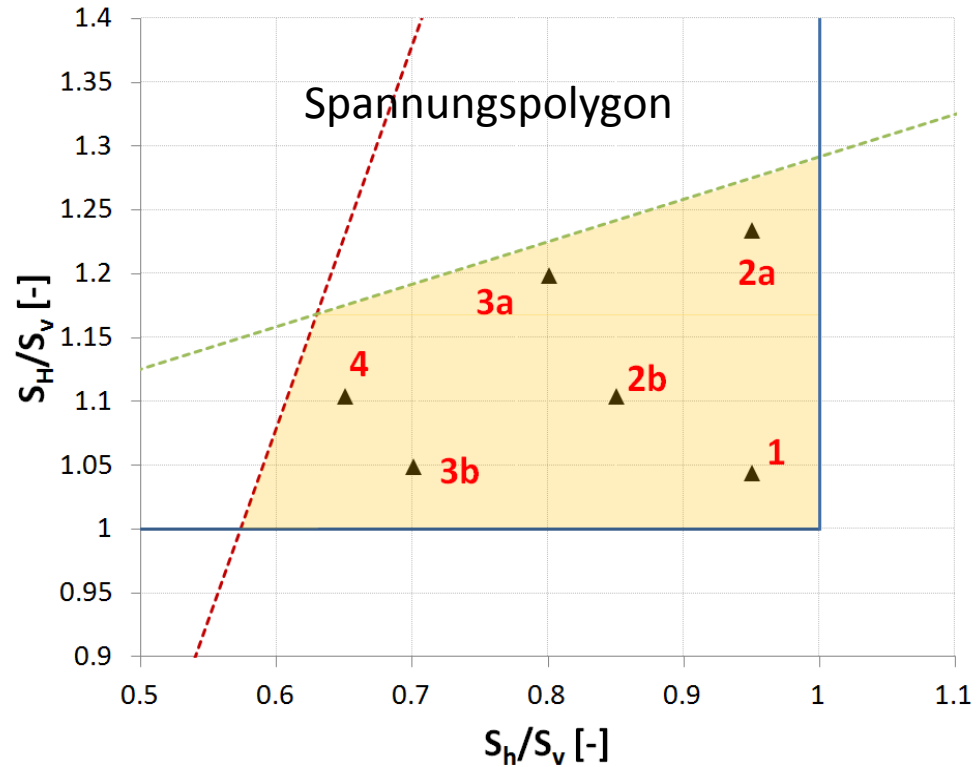
Geothermie Unterhaching + Kirchstockach  
(Großraum München)

# Fallbeispiel 1: Unterhaching

## In-situ Spannungen

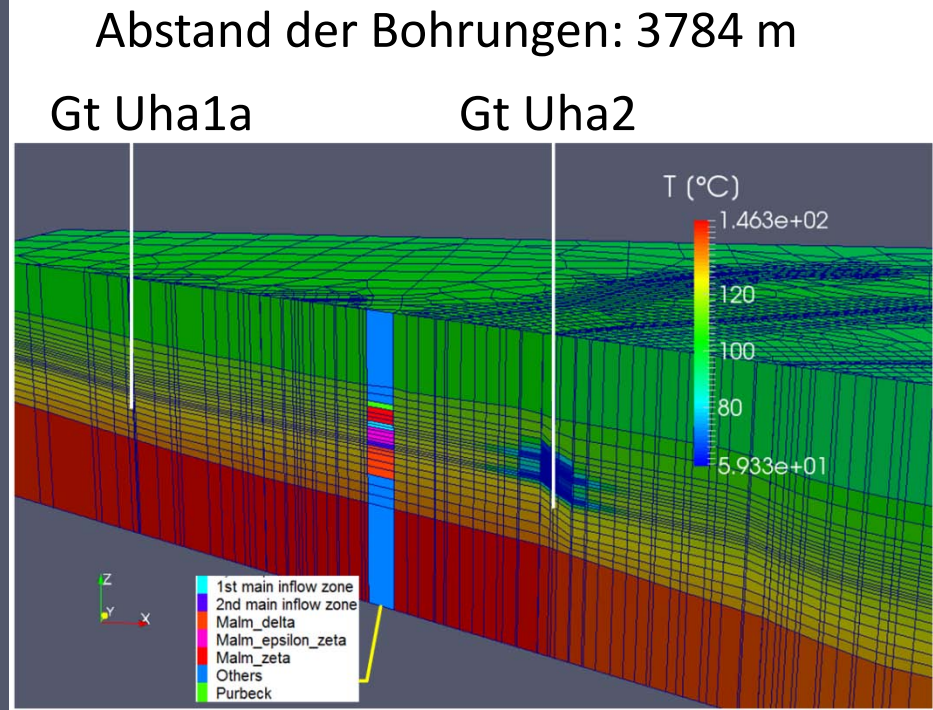
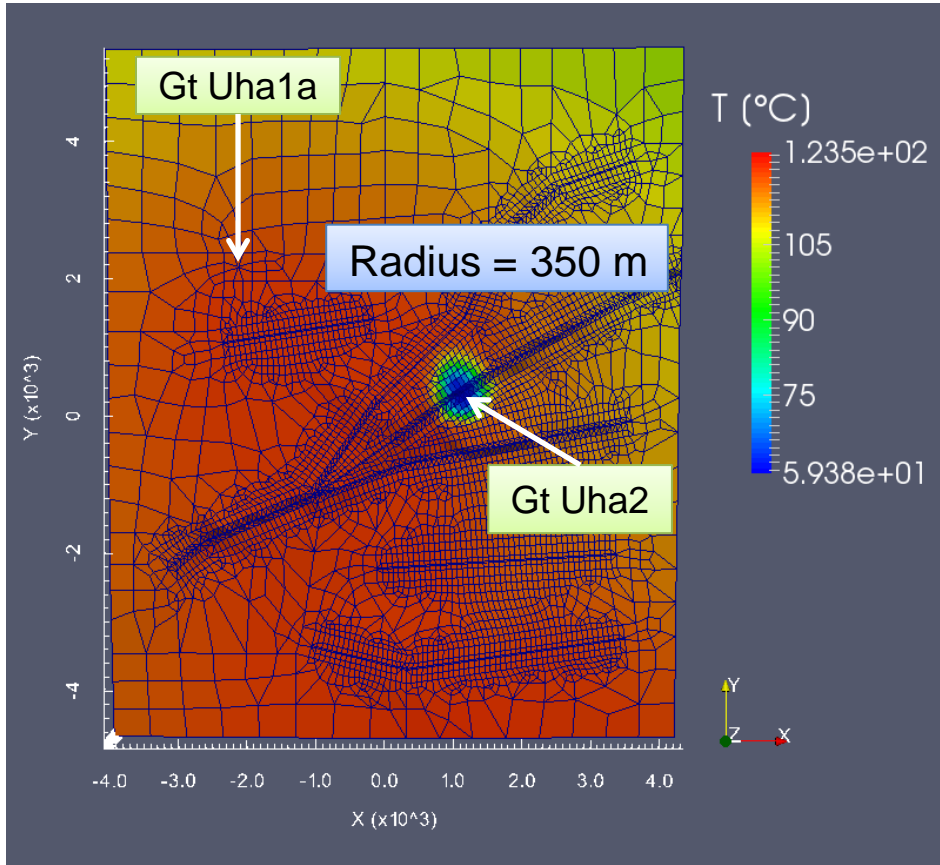
$$K_h = \frac{S'_h}{S'_v} = \frac{S_h - P_p}{S_v - P_p} \quad K_H = \frac{S'_H}{S'_v} = \frac{S_H - P_p}{S_v - P_p}$$

Variationen		$K_H$ [-]	$K_h$ [-]
<b>1 (Basis)</b>		1,07	0,92
<b>2</b>	a	1,37	0,92
	b	1,16	0,77
<b>3</b>	a	1,31	0,69
	b	1,08	0,53
<b>4</b>		1,16	0,45



# Fallbeispiel 1: Unterhaching - Szenarien

Temperaturverteilung nach 10 Jahren (Basis,  $K_H = 1,07$ ,  $K_h = 0,92$ )



1<sup>st</sup> Haupteinströmungszone

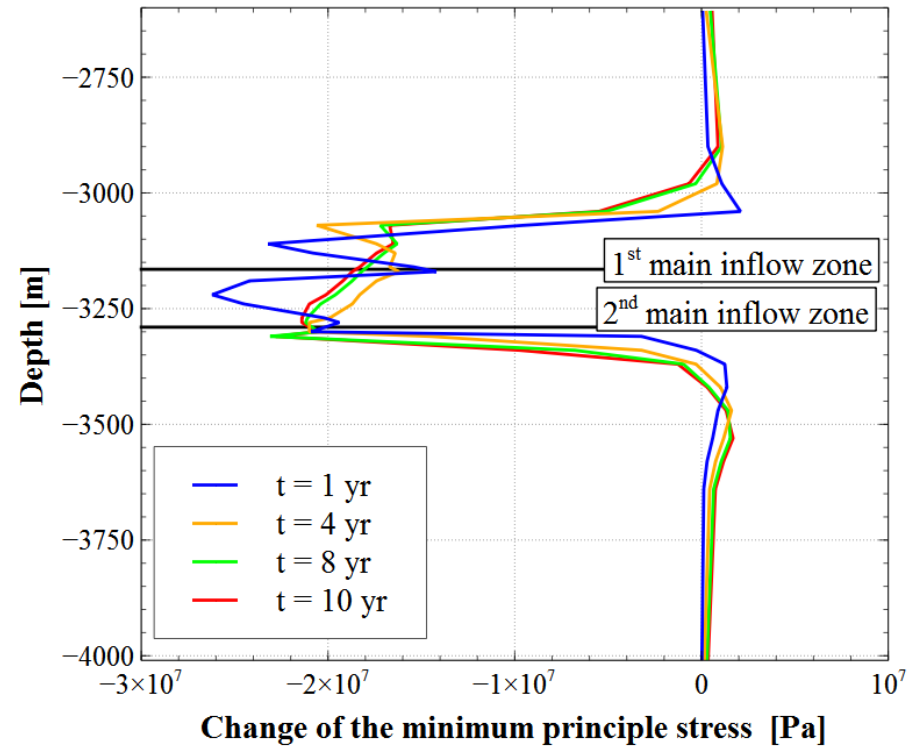
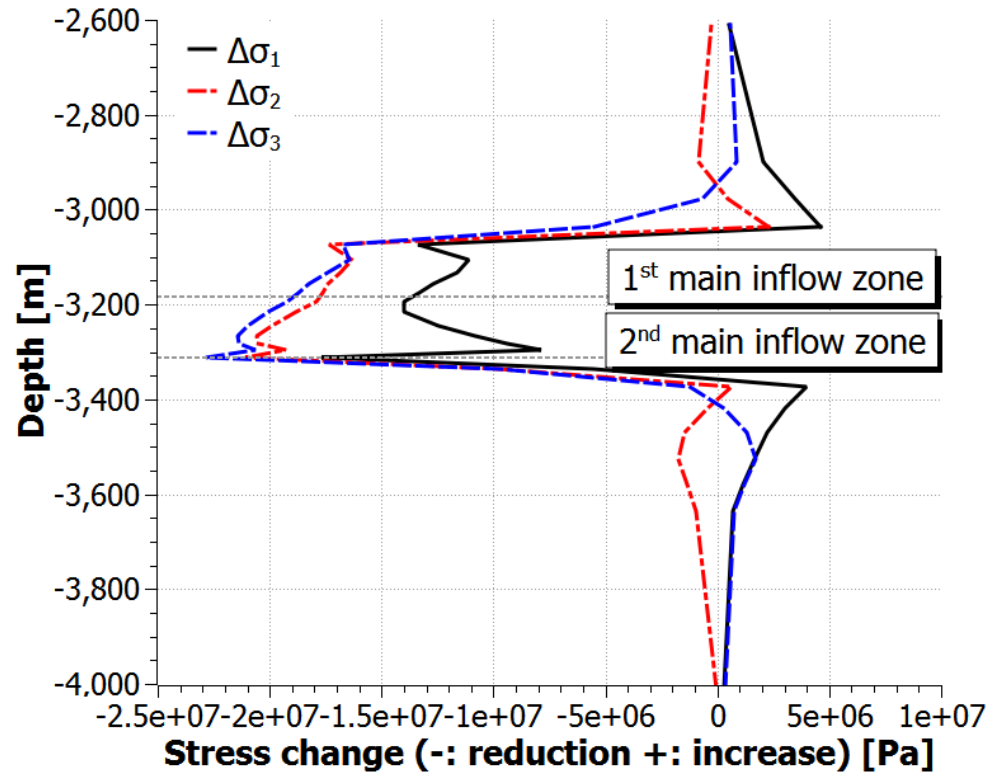
Schnitt durch Injektion- und Produktionsbohrung

# Fallbeispiel 1: Unterhaching - Szenarien

Spannungsänderung entlang der Injektionsbohrung (Basis)

⇒ Große Spannungsreduzierung (-23 MPa bei t= 10a)

⇒ Reduzierung der jeweiligen Komponenten nicht gleichmäßig ( $\Delta\sigma_{2,3} > \Delta\sigma_1$ )





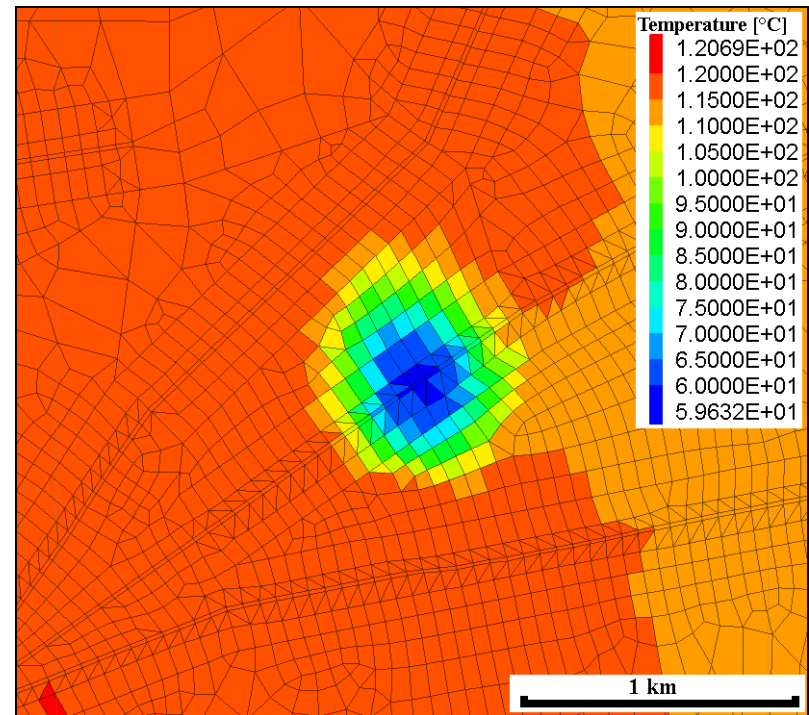
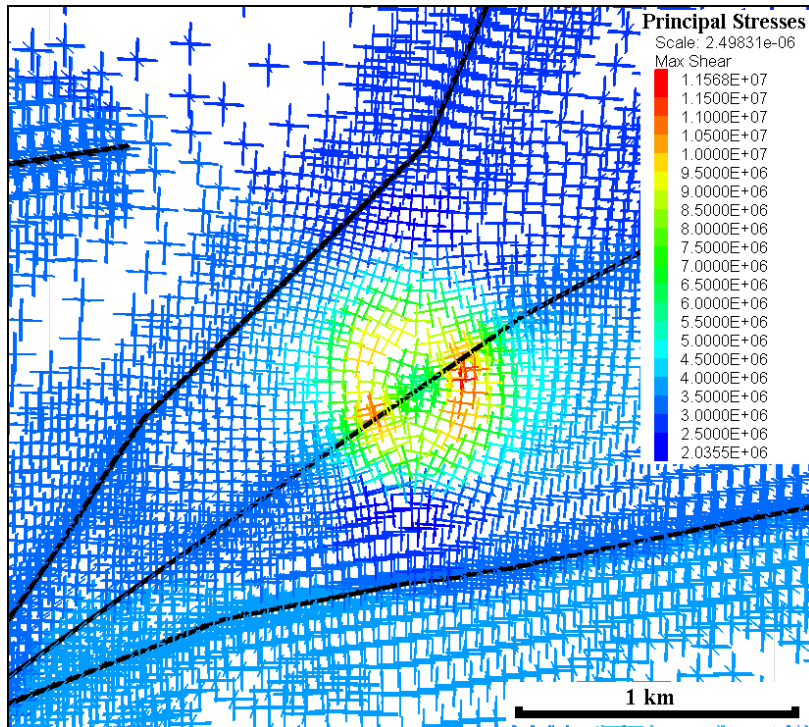
# Fallbeispiel 1: Unterhaching - Szenarien

Kreuze: Hauptspannungen; Farbe: maximale Schubspannung (Basis)

⇒ **Neuausrichtung** der Spannungen

⇒ Schubspannung **vergrößert sich** (maximal 12 MPa)

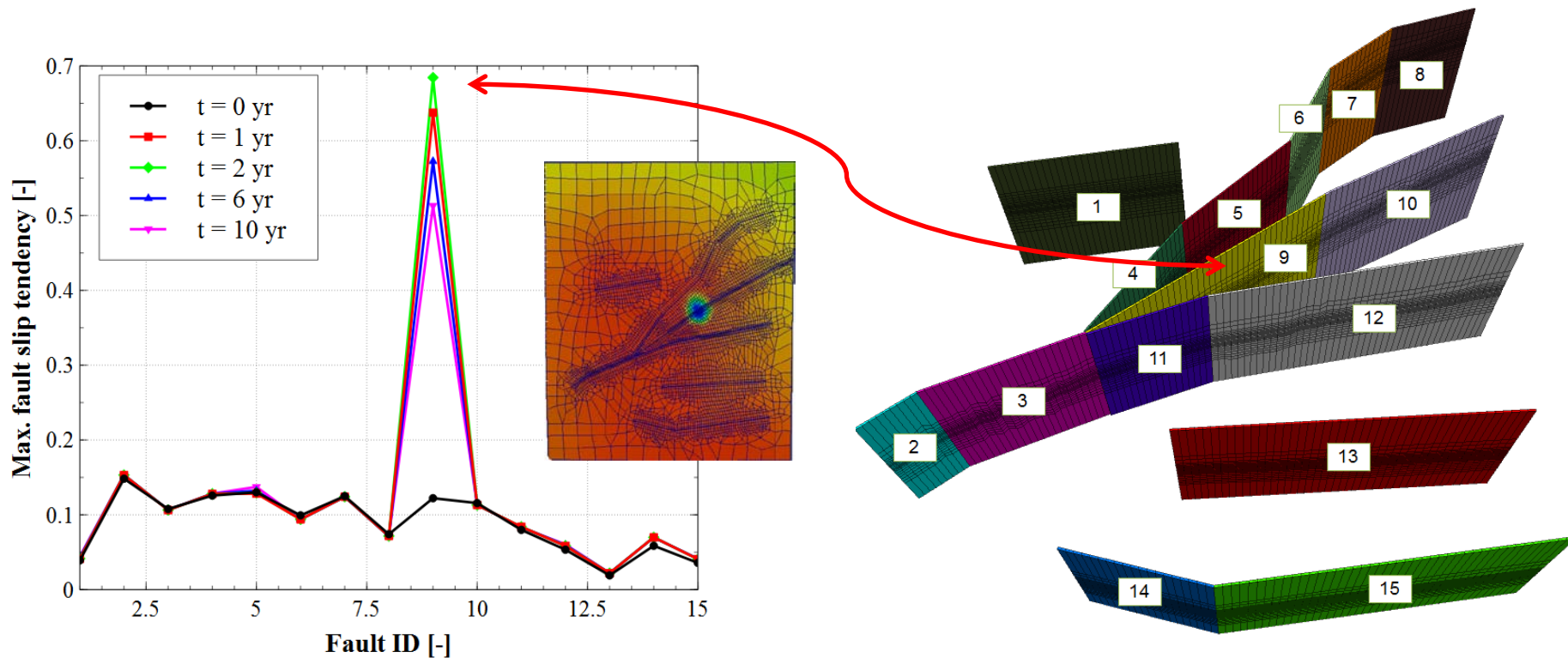
⇒ Max. Schubspannung in der Nähe der Störung, aber nicht in der Injektionszone



# Fallbeispiel 1: Unterhaching - Szenarien

## Slip-Tendency

⇒ Entwicklung der *Slip-Tendency* der, wegen der geringsten Entfernung zur Re-Injektionsbohrung, **risikoreichsten Störung 9** (0,12 → 0,68 → 0,51 , **ohne Versagen**). **Maximale Slip-Tendency** (0,68) tritt **im zweiten Betriebsjahr** auf. **Danach nimmt die Gefährdung wieder ab.**

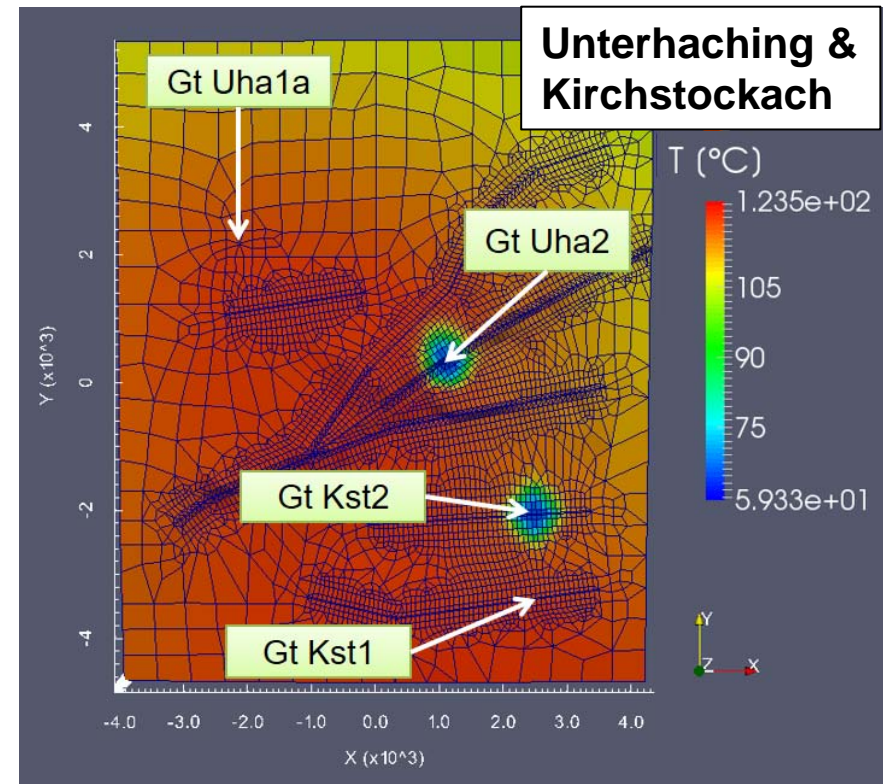
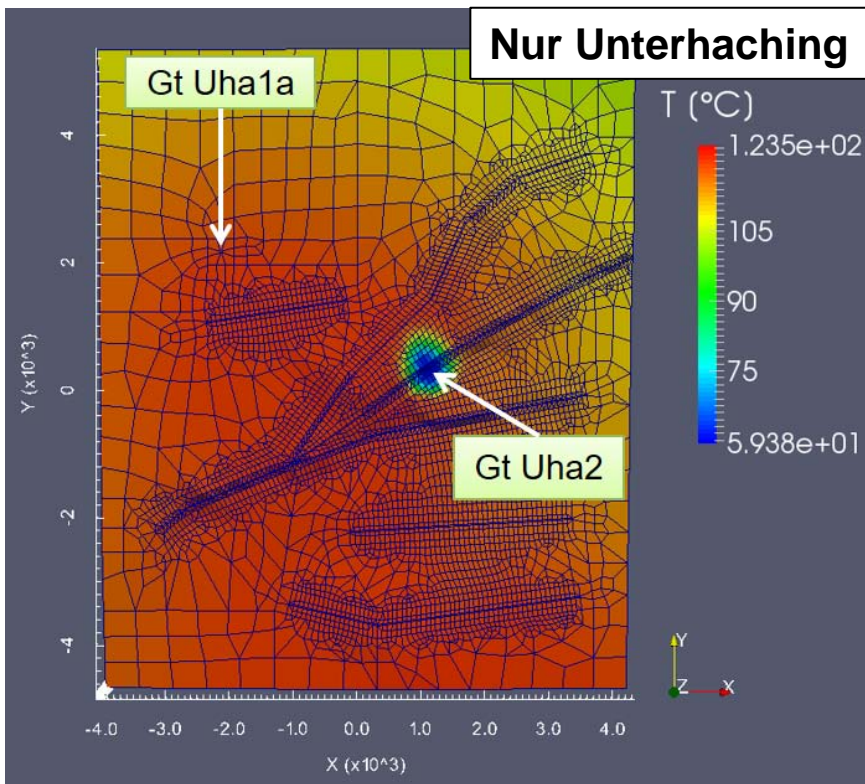


# Fallbeispiel 1: Unterhaching - Szenarien

Numerische Untersuchungen zu der Produktionsphase (Basis)

Szenariobetrachtung: gleichzeitiger Betrieb von 2 Geothermie-Anlagen mit einer Injektions- bzw. Produktionsrate von 120 l/s x 10 Jahren (Re-Injektionstemp.: 60 °C)

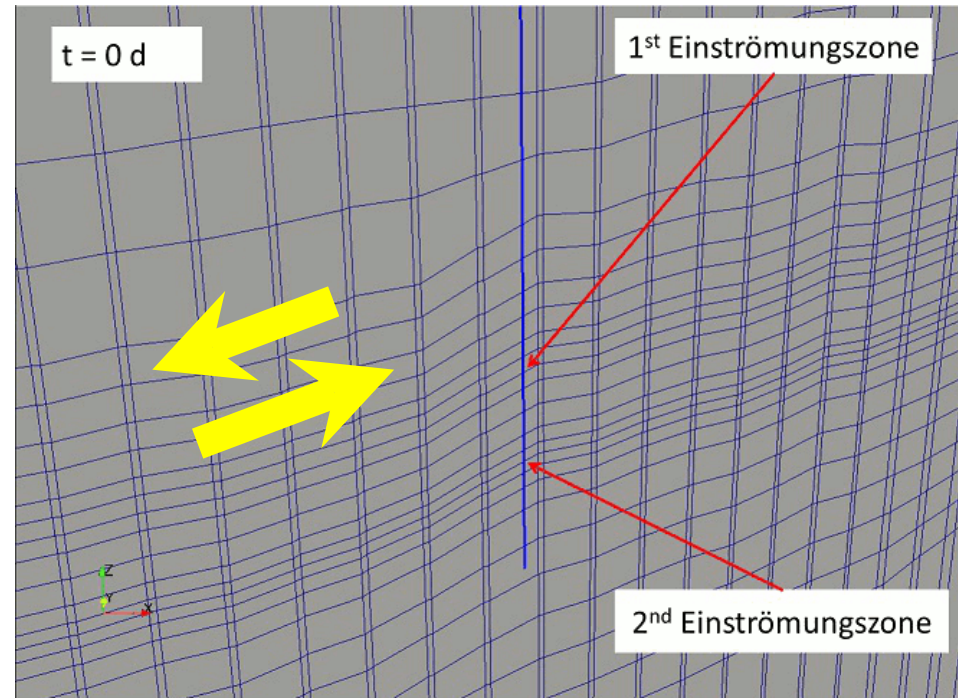
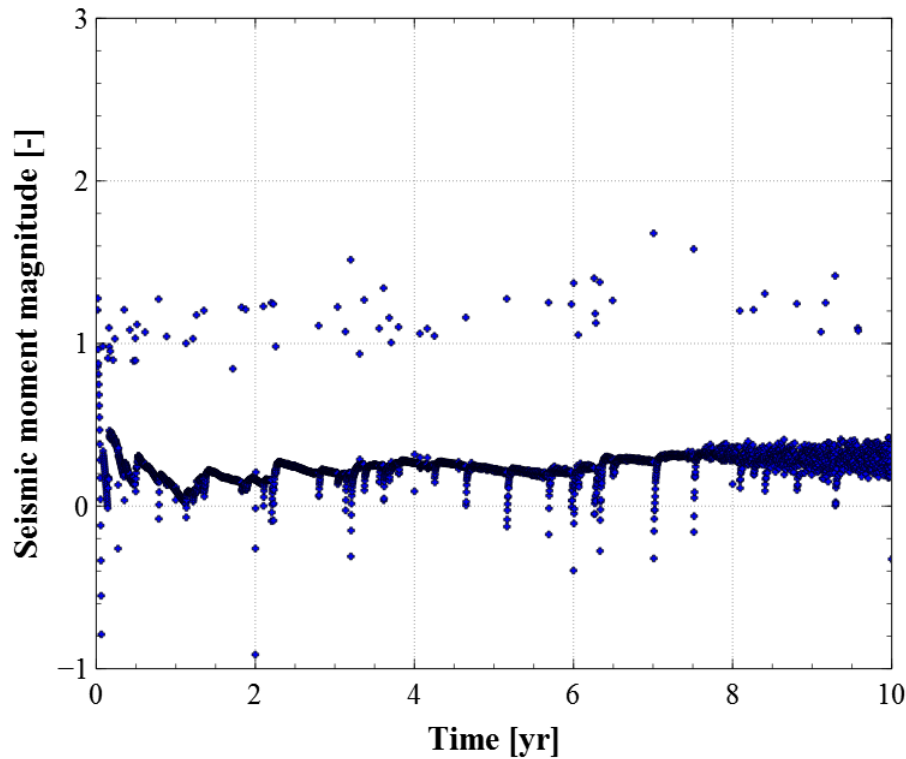
⇒ **Keine gegenseitigen Beeinflussungen** bezogen auf Temperatur



# Fallbeispiel 1: Unterhaching - Szenarien

Zeitliche Momentmagnitude und Mechanismen des Hypozentrums  
(Case 3b;  $K_H = 1,08$ ;  $K_h = 0,53$ )

- ⇒ viele kleine und wenige große Ereignisse (max. Magnitude 1,67 nach 7,0 Jahren)
- ⇒ Mechanismus des Hypozentrums zeigt Slip entlang der Störungszone

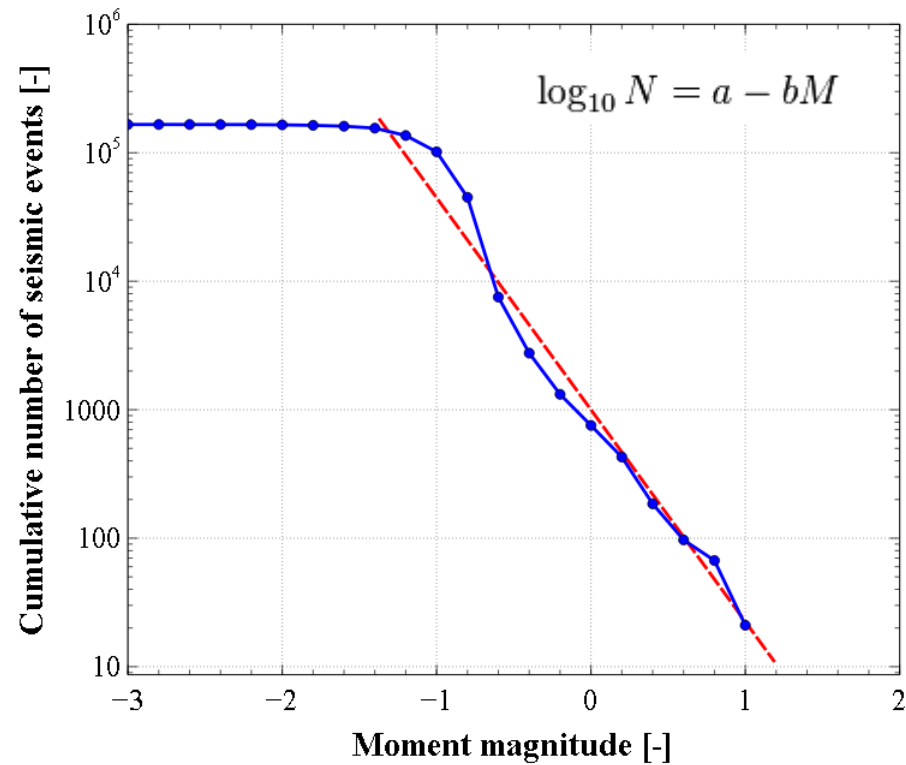
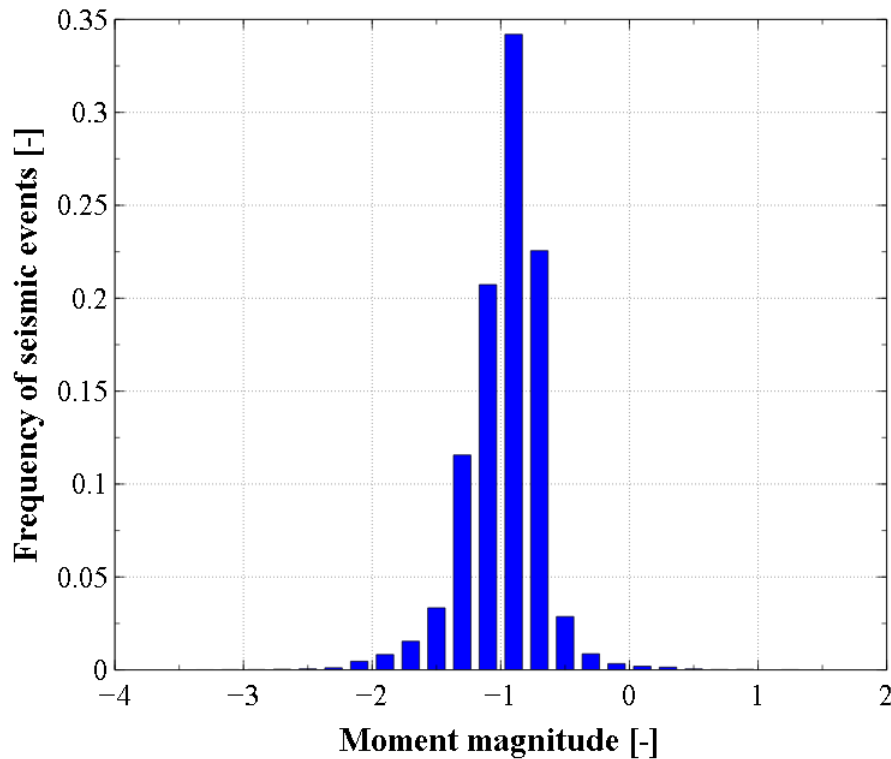


# Fallbeispiel 1: Unterhaching - Szenarien

Häufigkeitsverteilung und Gutenberg-Richter Beziehung  
(Case 3b;  $K_H = 1,08$ ;  $K_h = 0,53$ )

⇒ insgesamt 166.080 Ereignisse; häufigste Magnitude -1.0

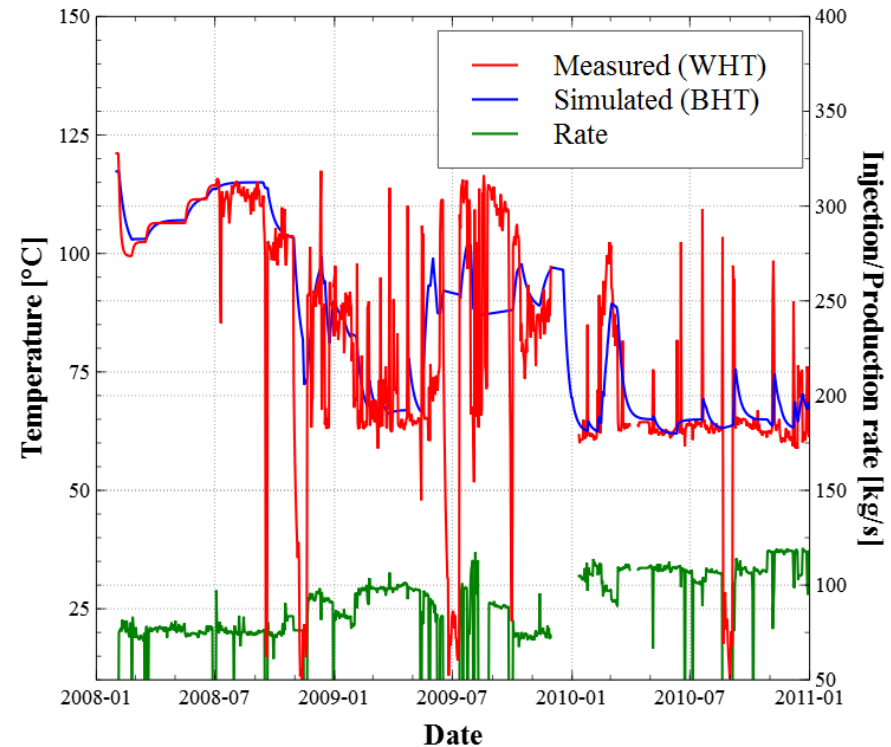
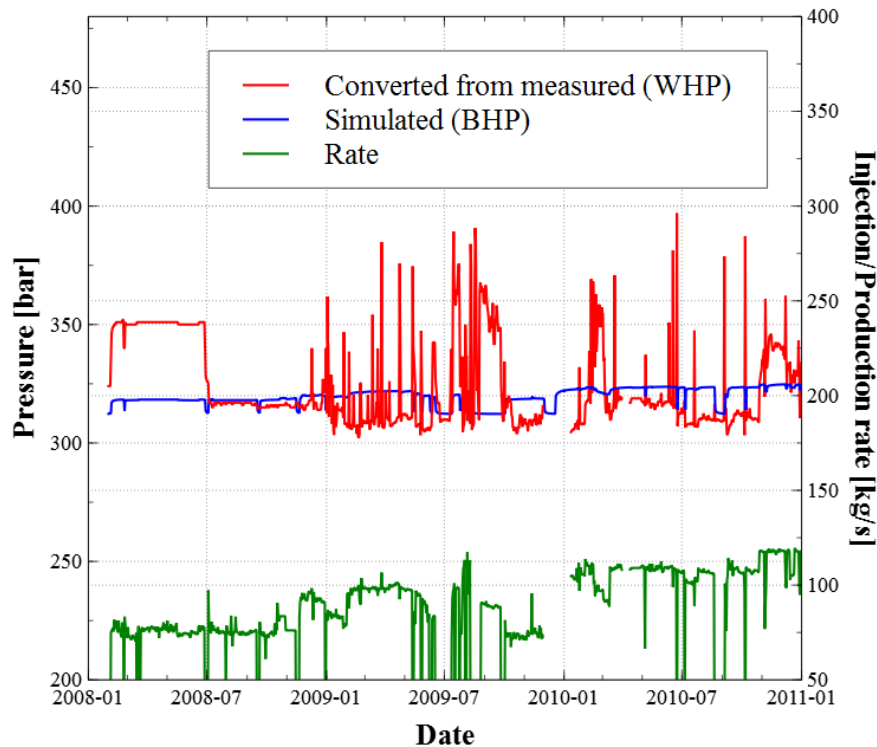
⇒ berechnete  $a$  und  $b$  sind jeweils 3.0 und 1.65



# Fallbeispiel 1: Unterhaching - Betriebsdaten

Numerische Untersuchungen zu der Produktionsphase

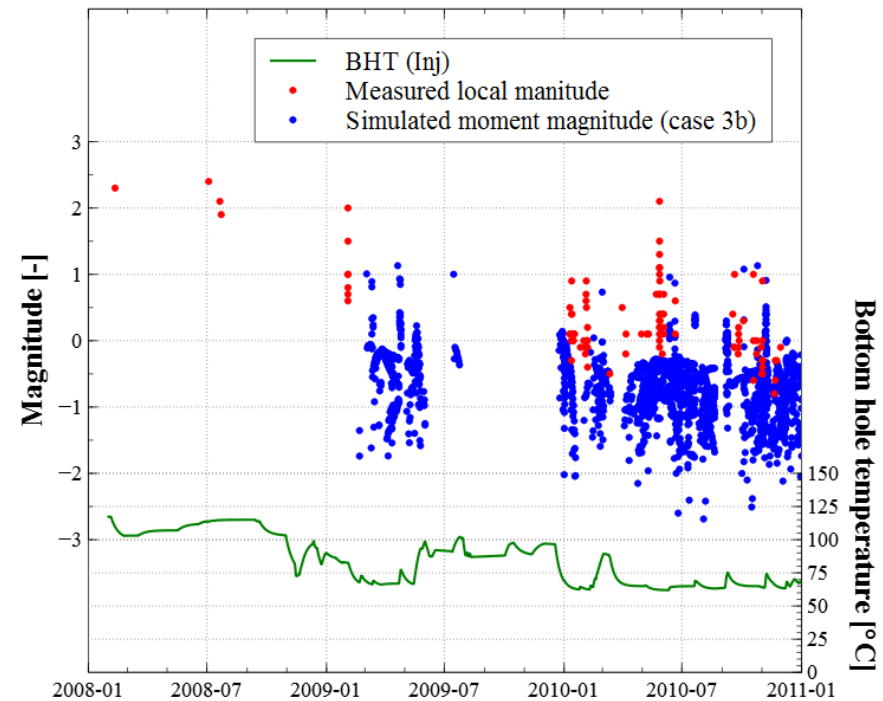
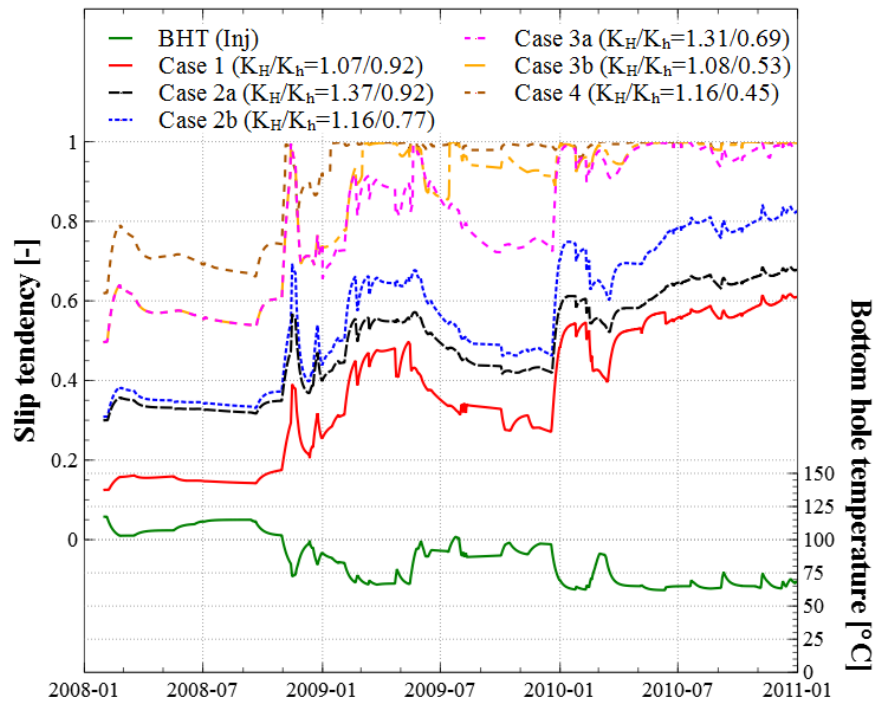
⇒ Die gemessene zeitliche Entwicklung von Druck (BHP) und Temperatur (BHT) der Injektionszone von **Februar 2008 bis Dezember 2010** wurde gematched.



# Fallbeispiel 1: Unterhaching - Betriebsdaten

## Numerische Untersuchungen zu der Produktionsphase (Variation)

- ⇒ Bei Reduzierung der Injektionstemperatur erhöht sich die max. Slip-Tendency. Case 1, 2a, 2b **keine** Ereignisse bis Ende 2010 ⇒ Spannungszustand ist entscheidend
- ⇒ Die simulierten seismischen Ereignisse von **Case 3b** ( $K_H/K_h = 1,08/0,53$ ) sind vergleichbar mit den gemessenen Ereignissen (Megies & Wassermann 2014). Eine Reduzierung der Magnitude ist zu erkennen. **(Die Gefährdung nimmt ab.)**

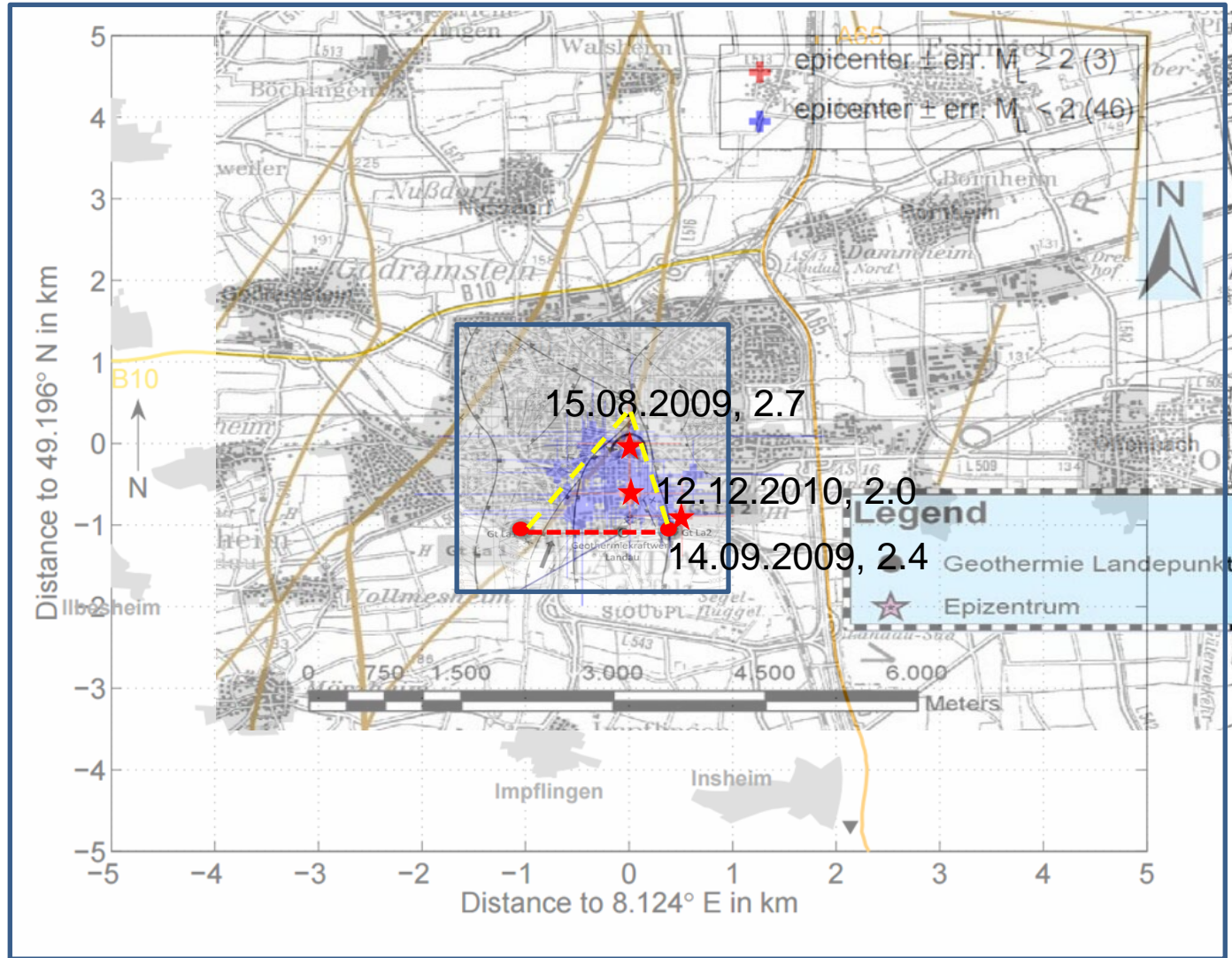
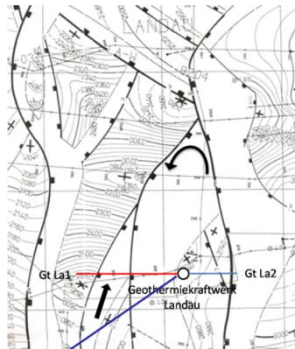
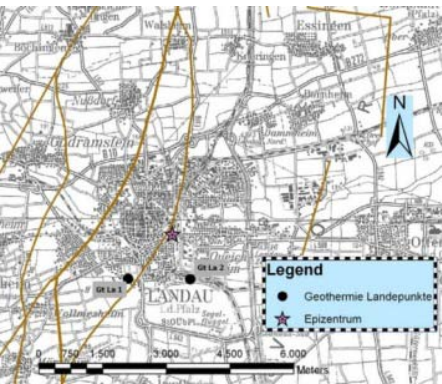
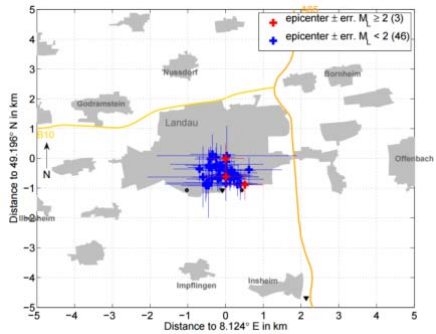


# Fallbeispiel 2: Landau

- Numerische Untersuchung zu der Stimulationsphase
- Numerische Untersuchung zu der Produktionsphase



# Fallbeispiel 2: Landau



# Fallbeispiel 2: Landau

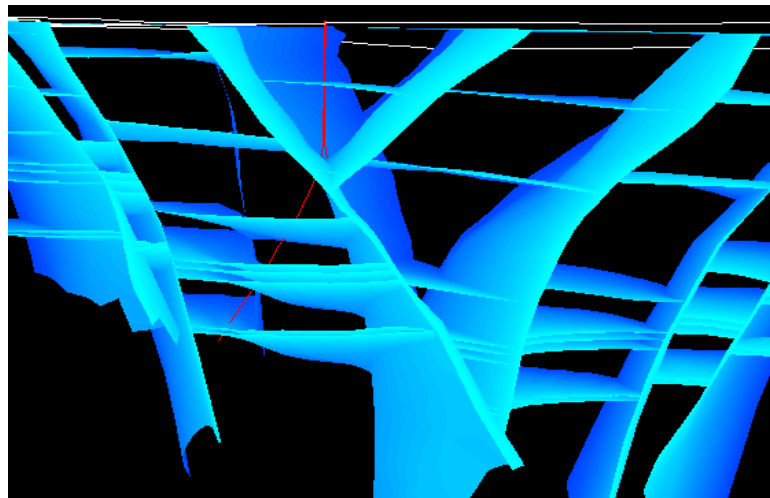
## Störungen und Schicht

12.12.2010, 2.0,  
3.04±1.425km



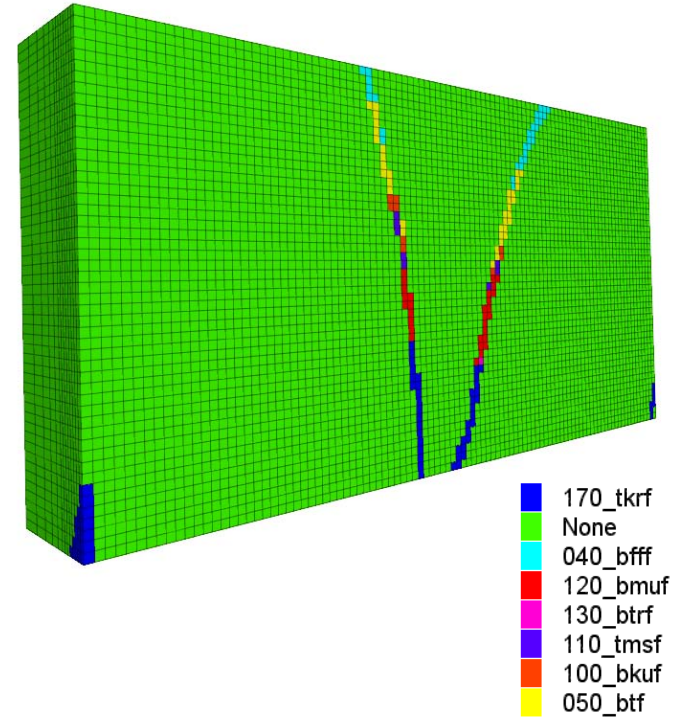
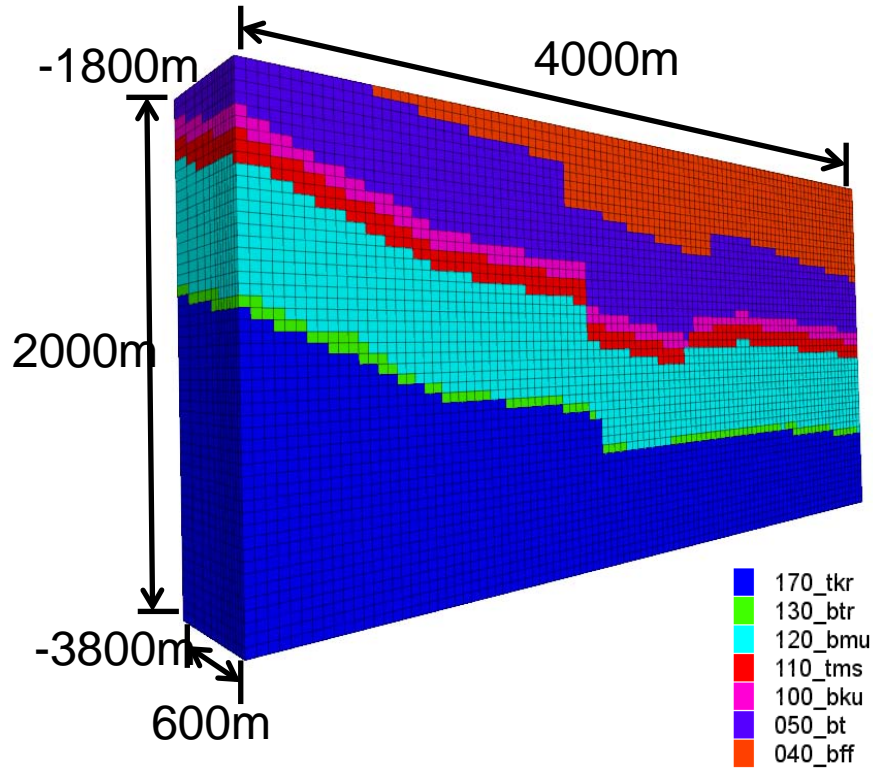
15.08.2009, 2.7,  
2.8±0.5km

14.09.2009, 2.4,  
2.8±0.6km



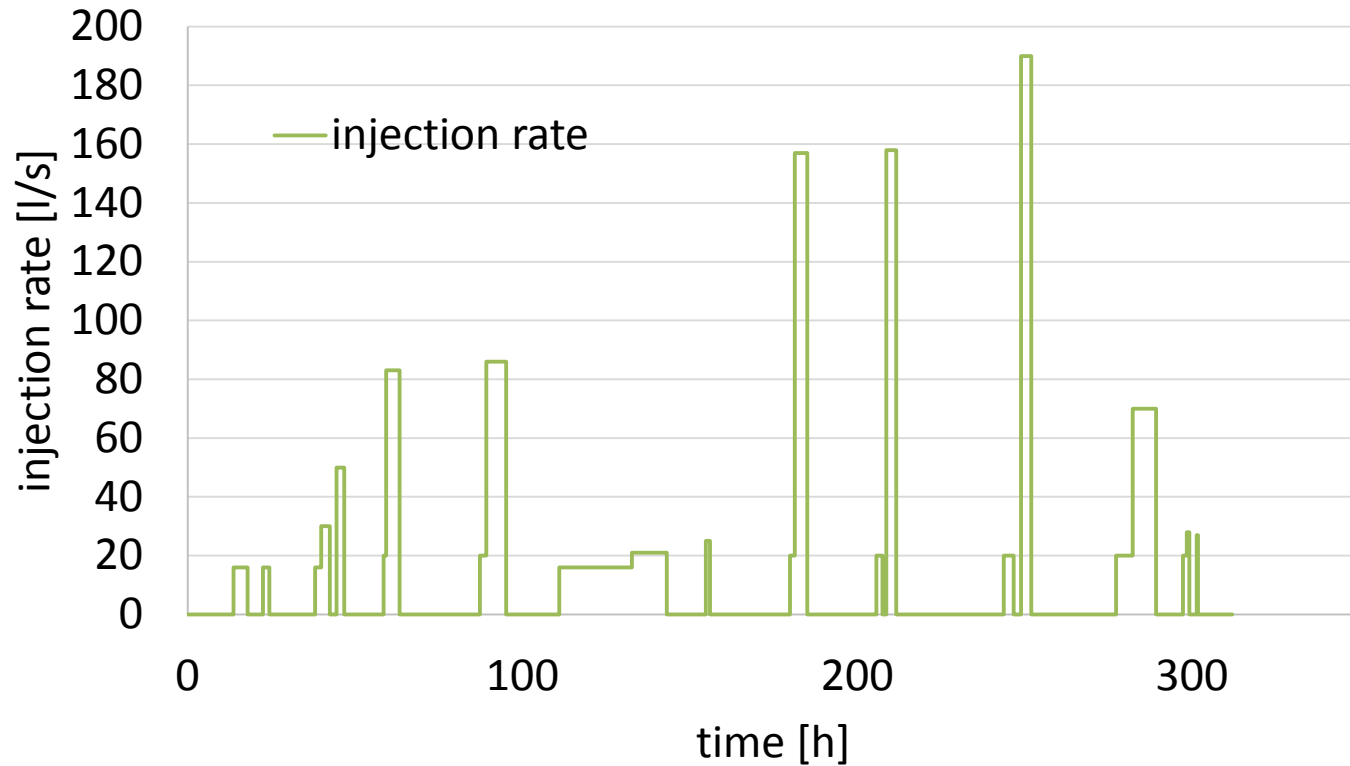
# Fallbeispiel 2: Landau

## Simulationsmodell



# Fallbeispiel 2: Landau - Stimulation

## Injektionsplan (Stimulationsphase)

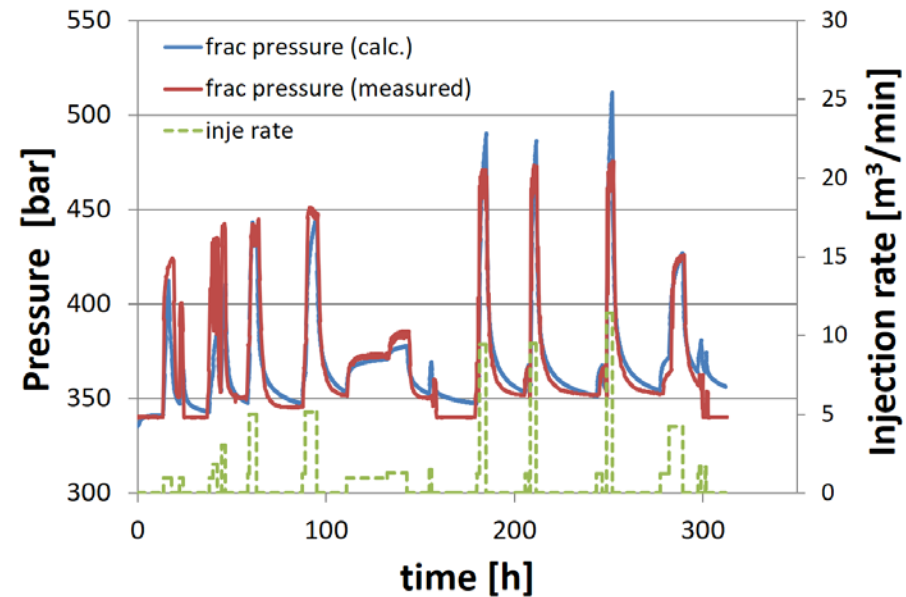
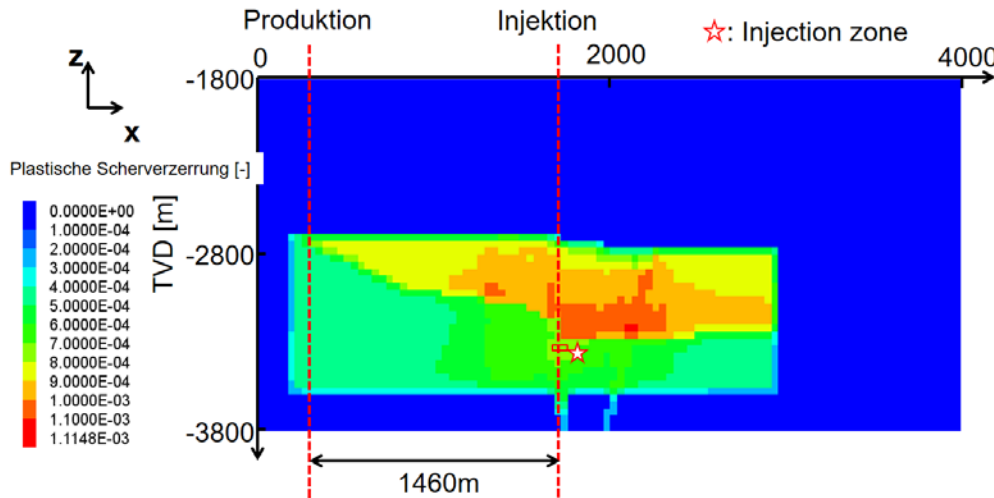


# Fallbeispiel 2: Landau - Stimulation

Numerische Untersuchungen zu der Stimulationsphase

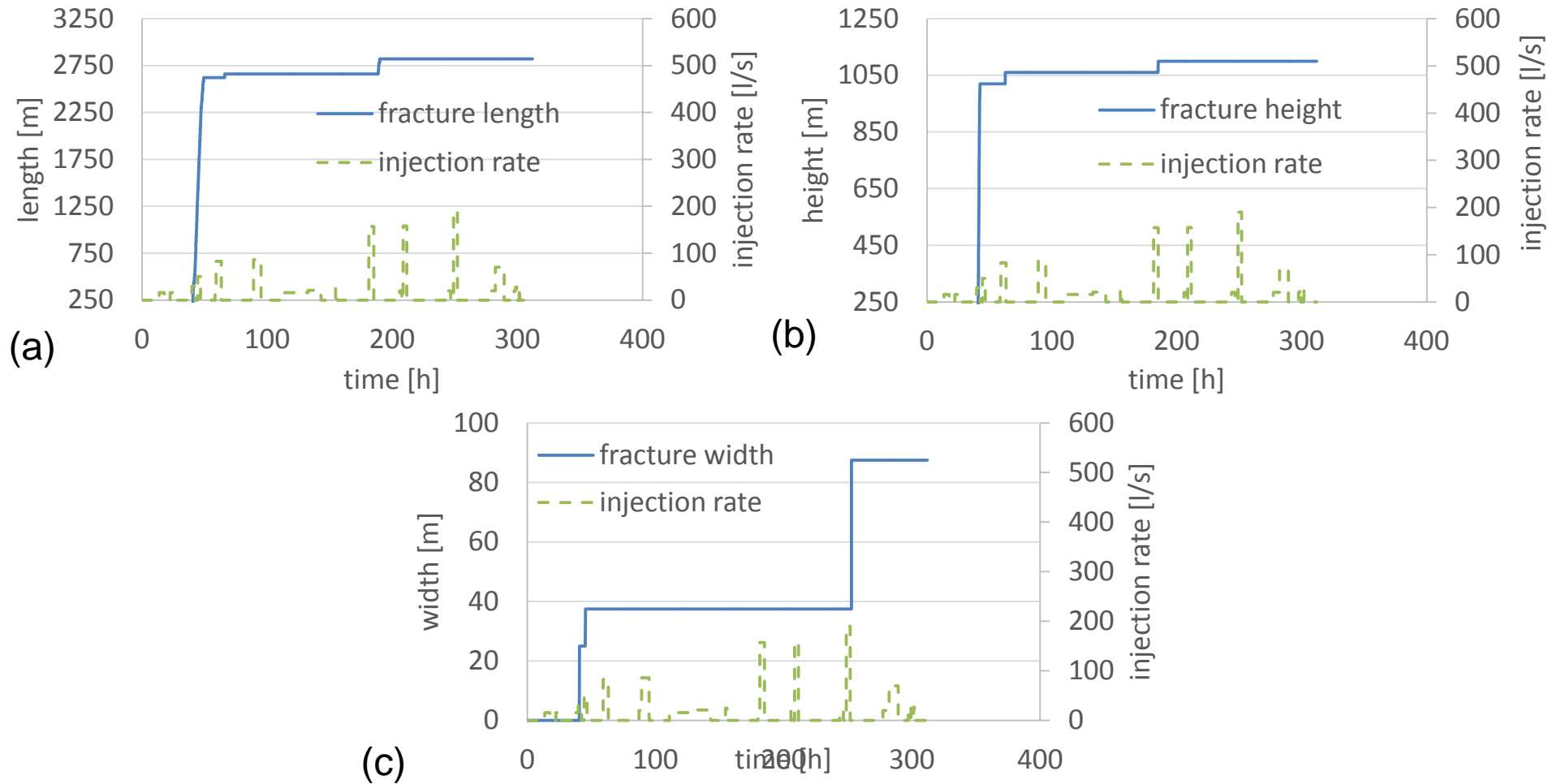
⇒ Die gemessene zeitliche Entwicklung des Wasserdrucks während der Stimulationsphase wurde gematched (Historiematching).

⇒ Geometrie der Scherzone: 2.780 m × 90 m × 1.070 m



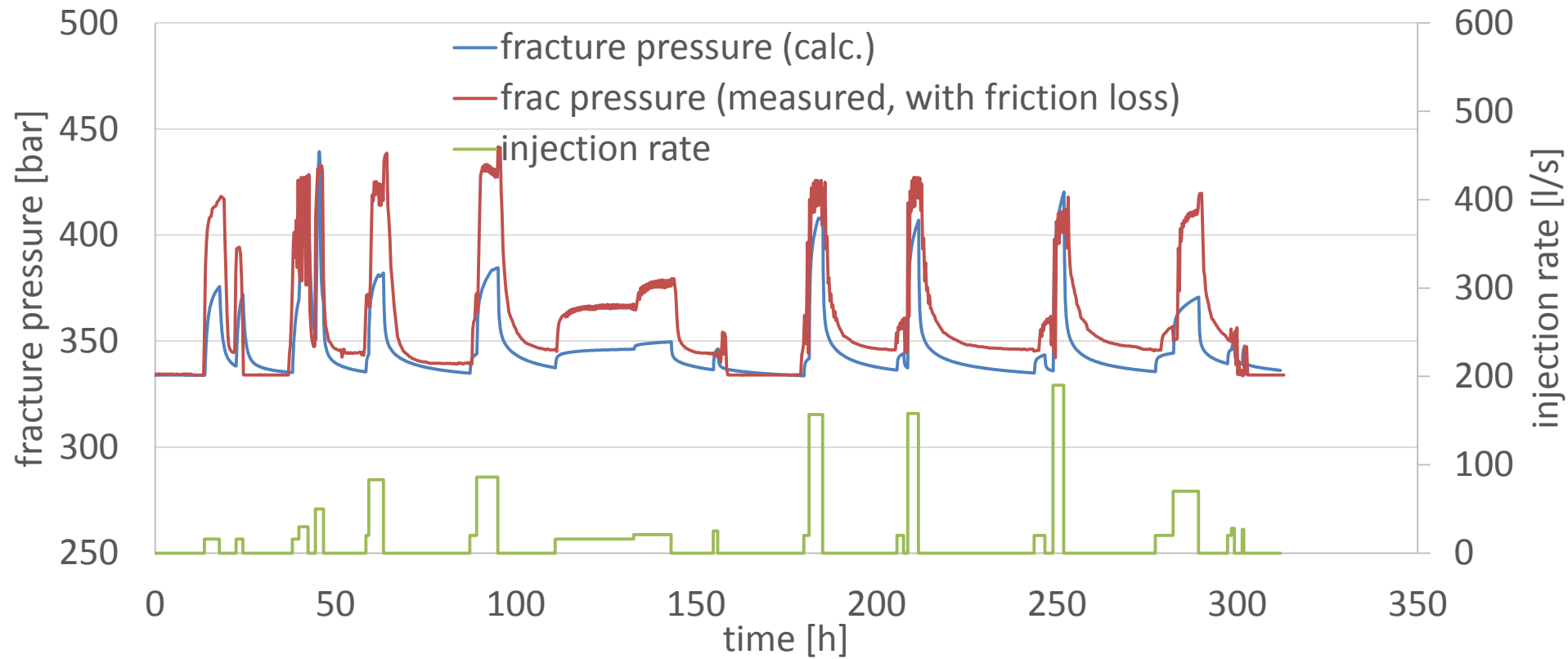
# Fallbeispiel 2: Landau - Stimulation

Entwicklung der Länge, Höhe und Breite der plastischen Zone (Stimulation)



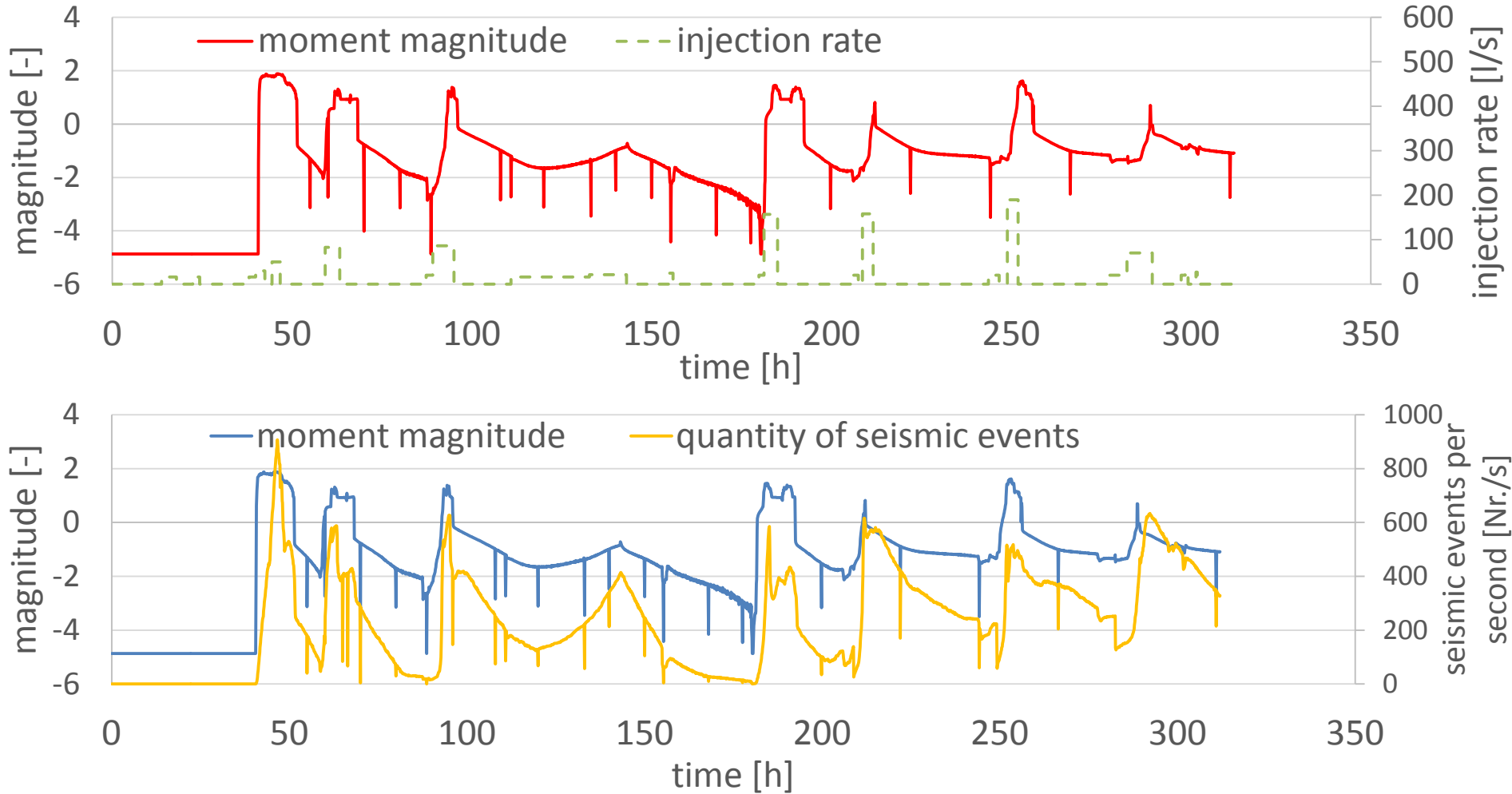
# Fallbeispiel 2: Landau - Stimulation

Entwicklung des Drucks in der Kluft (Stimulation)



# Fallbeispiel 2: Landau - Stimulation

Entwicklung der seismischen Ereignisse und Magnitude (Stimulation)

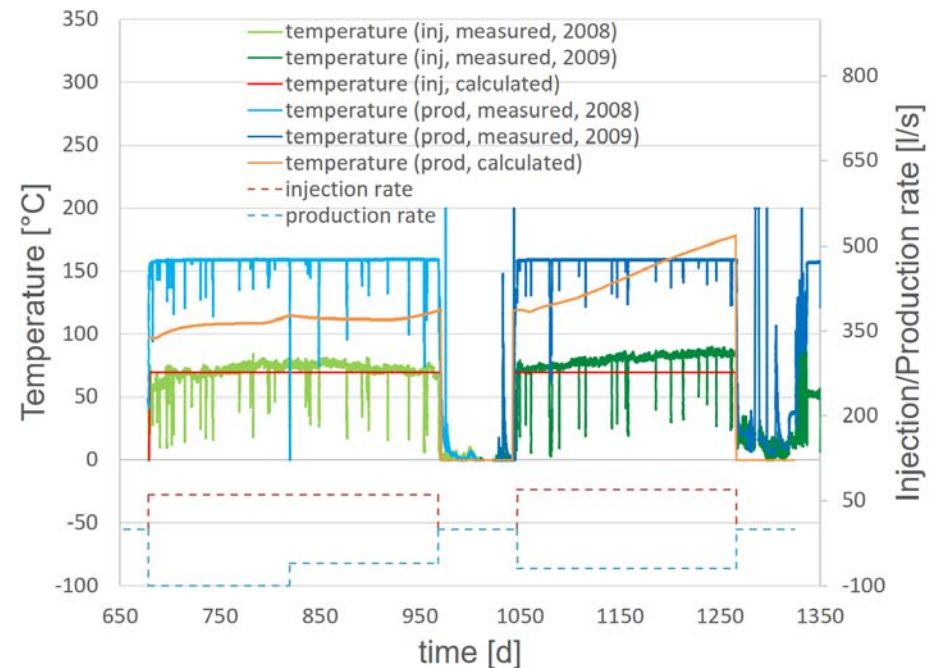
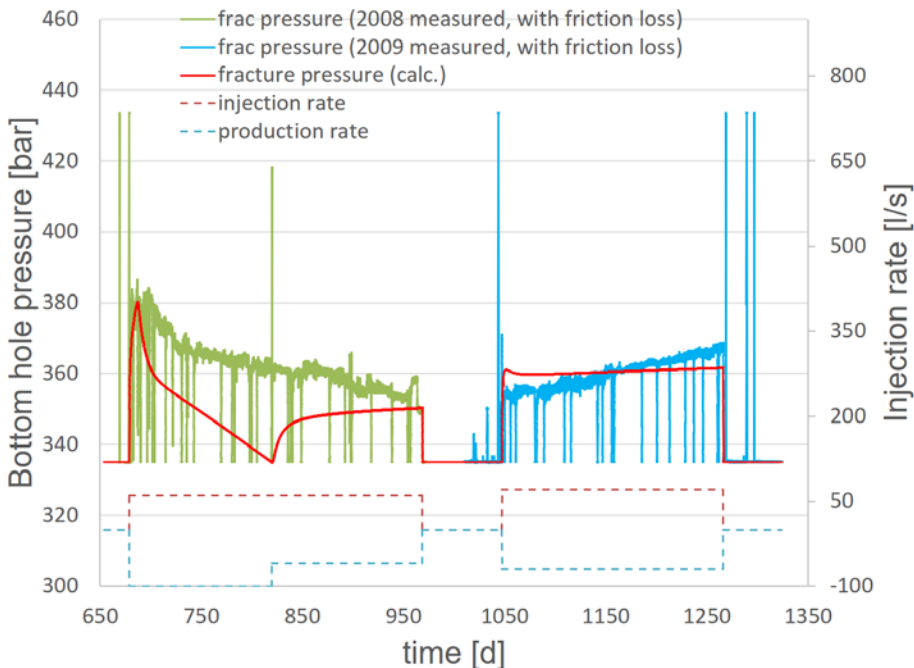




# Fallbeispiel 2: Landau - Produktion

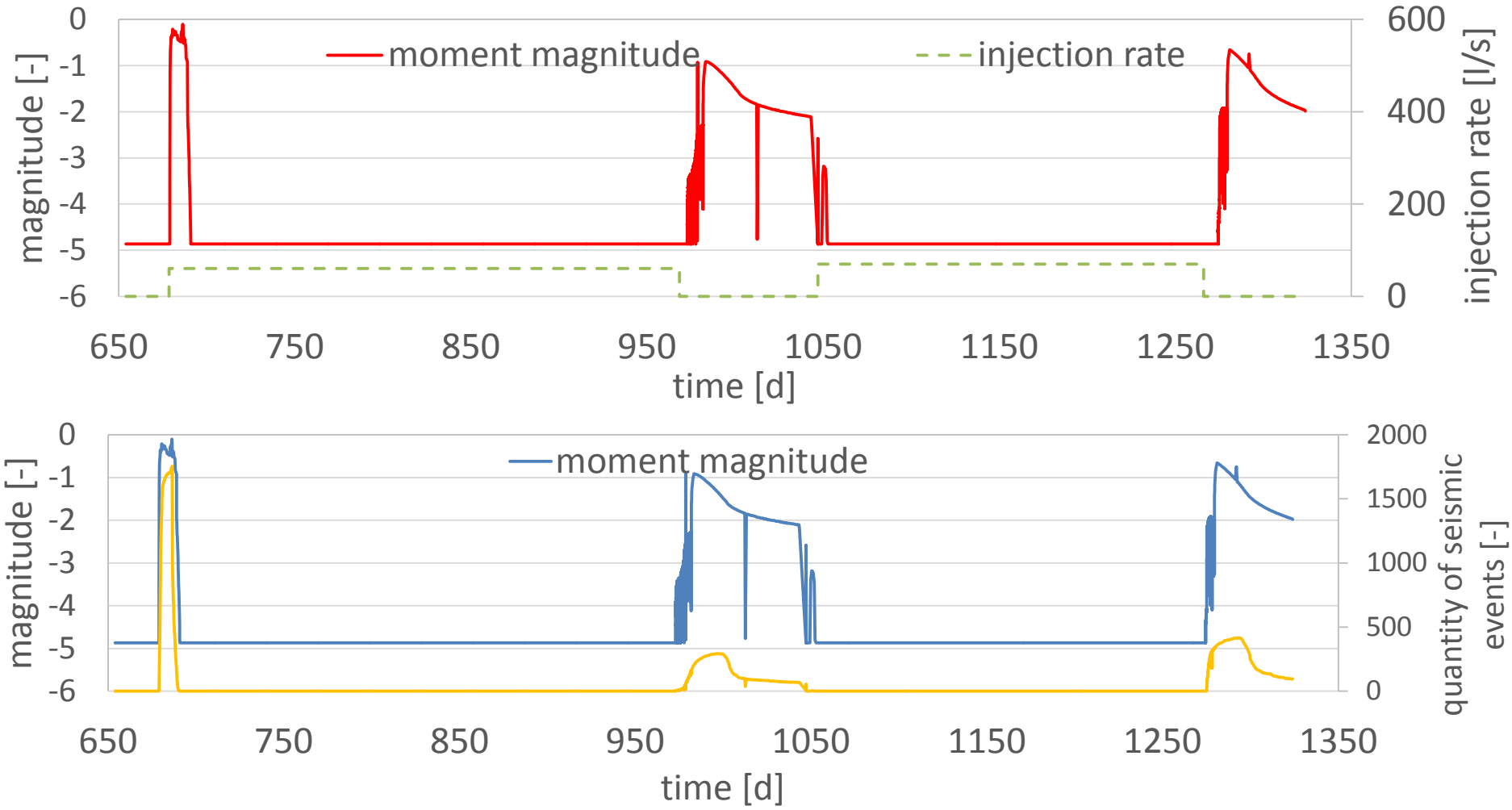
Numerische Untersuchungen zu der Produktionsphase (Betriebsdaten)

⇒ Die gemessene zeitliche Entwicklung von Druck und Temperatur von **März 2008 bis November 2009** wurde gematched.



# Fallbeispiel 2: Landau - Produktion

## Momentmagnitude und seismische Ereignisse



# Fallbeispiel 2: Landau - Produktion

Numerische Untersuchungen zu der Produktionsphase (Variationen)

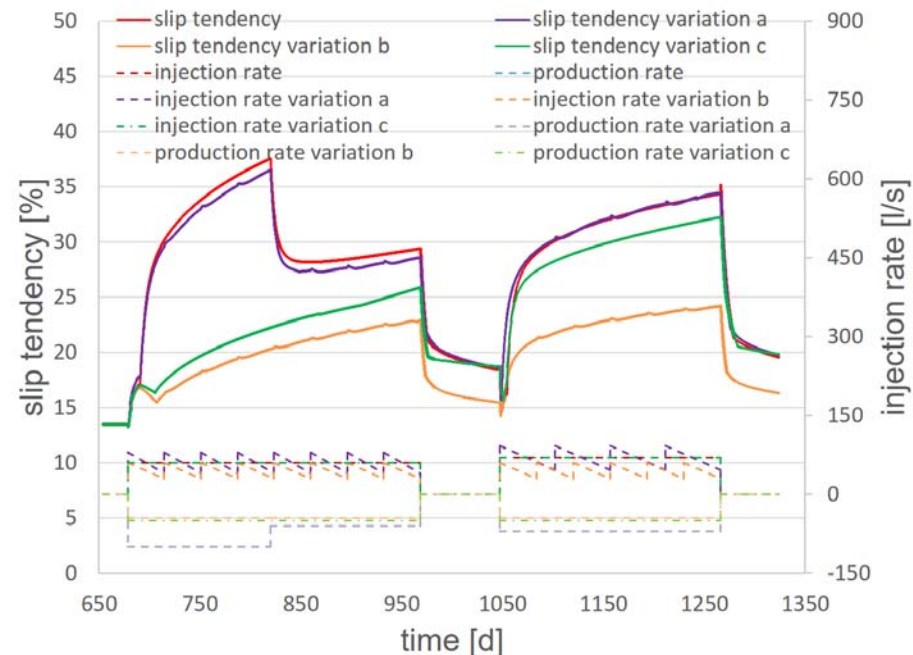
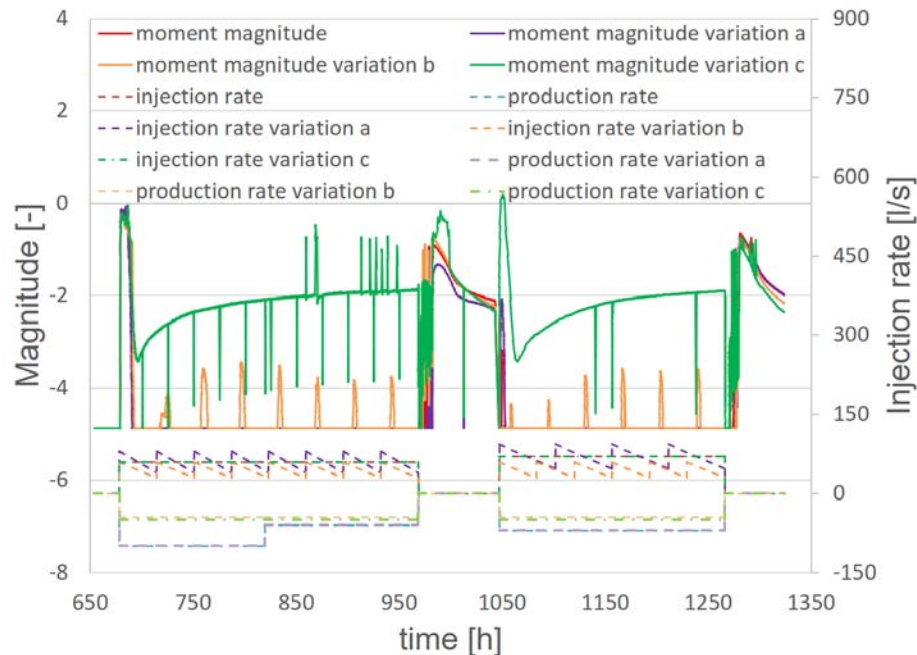
a: nur Injektionsrate reduziert  $\Rightarrow$  Magnitude  $\downarrow$ , Slip-Tendency  $\approx$

b: nur Produktionsrate reduziert  $\Rightarrow$  Magnitude  $\approx$ , Slip-Tendency  $\downarrow$

c: Injektions- und Produktionsrate beide reduzieren  $\Rightarrow$  Magnitude  $\downarrow$ , Slip-Tendency  $\downarrow$

Injektionsrate beeinflusst Magnitude, während Produktionsrate Slip-Tendency beeinflusst !

Gegenmaßnahme aus dem Vergleich mit Basisergebnissen  $\Rightarrow$  Im Problemfall gleichzeitige Reduzierung der Injektions-/Produktionsrate



# Zusammenfassung

- Laboruntersuchung
  - Triaxiale Versuche wurden mit Gesteinsproben aus Aufschluss (Kalkstein) durchgeführt. Parameter, wie  $E$ ,  $UCS$ ,  $C$  und  $\varphi$  wurden ermittelt.
- Methodische Entwicklung
  - Das THM-gekoppelte Modell wurde in TOUGH2MP-FLAC3D implementiert. Das Modell gilt für Einzel-/Mehrklufsysteme.
- Numerische Untersuchung zur Geothermie Unterhaching
  - Porendruckveränderung ist **nicht groß** ( $\pm 2$  MPa). Die kalte Wasserfront ist nach 10 Jahren noch weit von der Produktionsbohrung entfernt und die Temperatur des Produktionswassers ändert sich noch nicht (120 °C).
  - Injektion von kaltem Wasser führt zu **großer Spannungsreduzierung** (-23 MPa). Die Reduzierung der jeweiligen Spannungskomponenten ist **nicht gleichmäßig** ( $\Delta\sigma_{2,3} > \Delta\sigma_1$ ). Es gibt eine **Neuausrichtung** der Spannungen. Die Schubspannung vergrößert sich insbesondere in der Nähe von Störungen (maximal 12 MPa).

# Zusammenfassung

- **Entwicklung** der slip tendency der **risikoreichsten Störung 9** (wegen der geringsten Entfernung zur Re-Injektionsbohrung) ist  $0,12 \rightarrow 0,68 \rightarrow 0,51$ , **ohne Versagen**, jedoch ohne Berücksichtigung sprunghafter Änderungen der Betriebsdaten, **maximale** slip tendency ( $0,68$ ) tritt bei **Störung 9 im zweiten Betriebsjahr** auf, **danach nimmt die Gefährdung wieder ab**.
- **Die in-situ Spannungen spielen eine große Rolle**. In Variation 4 ( $K_H = 1,16$ ,  $K_h = 0,45$ ) tritt schon (Schub) Versagen auf.
- Bei gleichzeitigem Betrieb von Geothermie Unterhaching und Kirchstockach gibt es **keine gegenseitige Beeinflussungen**.
- Die gemessene zeitliche Entwicklung von Druck und Temperatur der Injektionszone von **Februar 2008 bis Dezember 2010** wurde gematched.
- Bei Reduzierung der Injektionstemperatur erhöht sich die max. Slip-Tendency. Case 1, 2a, 2b **keine** Ereignisse bis Ende 2010  $\Rightarrow$  Spannungszustand ist entscheidend
- Die simulierten seismischen Ereignisse von Case 3b ( $K_H/K_h = 1,08/0,53$ ) sind vergleichbar mit den gemessenen Ereignissen. Eine Reduzierung der Magnitude ist zu erkennen. (Die Gefährdung nimmt ab.)

# Zusammenfassung

- Numerische Untersuchung zur Geothermie Landau
  - Die gemessene zeitliche Entwicklung des Wasserdrucks bei der **Stimulationsphase** wurde gematched (Historiematching).
  - Geometrie der stimulierten Scherzone: 2.780 m x 90 m x 1.070 m
  - Die gemessene zeitliche Entwicklung von Druck und Temperatur **von März 2008 bis November 2009** wurde gematched.
  - **Injektionsrate beeinflusst Magnitude, während Produktionsrate Slip-Tendency beeinflusst!**
  - **Gegenmaßnahme aus dem Vergleich mit Basisergebnissen** ⇒ Im Problemfall gleichzeitige Reduzierung der Injektions-/Produktionsrate

# Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Das Verbundprojekt **MAGS2**

— Mikroseismische Aktivität geothermischer Systeme —

**Vom Einzelsystem zur großräumigen Nutzung**

wird finanziert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und betreut durch den Projektträger Jülich.

**Förderkennzeichen: 0325662A-G**

Projektträger für

