

MAGS2 EP6:

THM-gekoppelte Simulation von der Geothermie Unterhaching

—

Offener Workshop

Michael Z. Hou, Martina J. Weichmann, Yang Gou

Mainz, 30. September 2015

Inhaltverzeichnis

- Einleitung
- Das THM-gekoppelte Modell
- THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching
- Zusammenfassung und Ausblick

Inhaltverzeichnis

- **Einleitung**
- Das THM-gekoppelte Modell
- THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching
- Zusammenfassung und Ausblick

1. Einleitung

Arbeitsplan MAGS2 – EP6 – Aktueller Arbeitsfortschritt

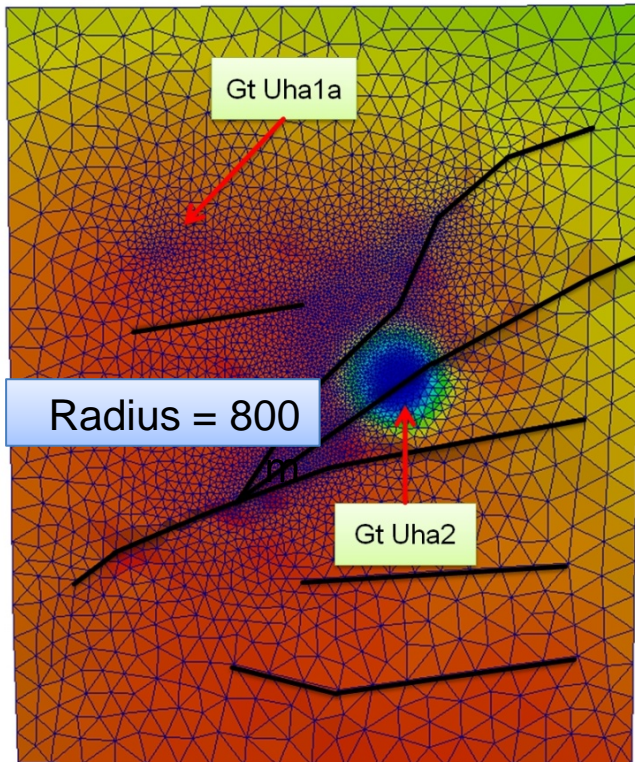
- AP1** Ergänzung der bestehenden Datensätze
bzgl. THM:C-Modellierung und Evaluation von Literaturdaten
bzgl. geplanter Labormessungen
- AP2** Laborversuche: Bestimmung Biot- und Skemptonkoeffizienten
- AP3** Methodische Weiterentwicklung von Programmcodes
sowie deren Integrierung
- AP4** Numerische Gefährdungseinschätzung komplexer
Geothermiefelder: Südpfalz, Großraum München
- AP5** *Numerische Gefährdungseinschätzung vor Bohrbeginn*
- AP6** Gemeinsame Entwicklung eines Kriterien-/ Maßnahmenkatalogs
für Betreiber und Behörden, Veröffentlichung von Ergebnissen

1. Einleitung

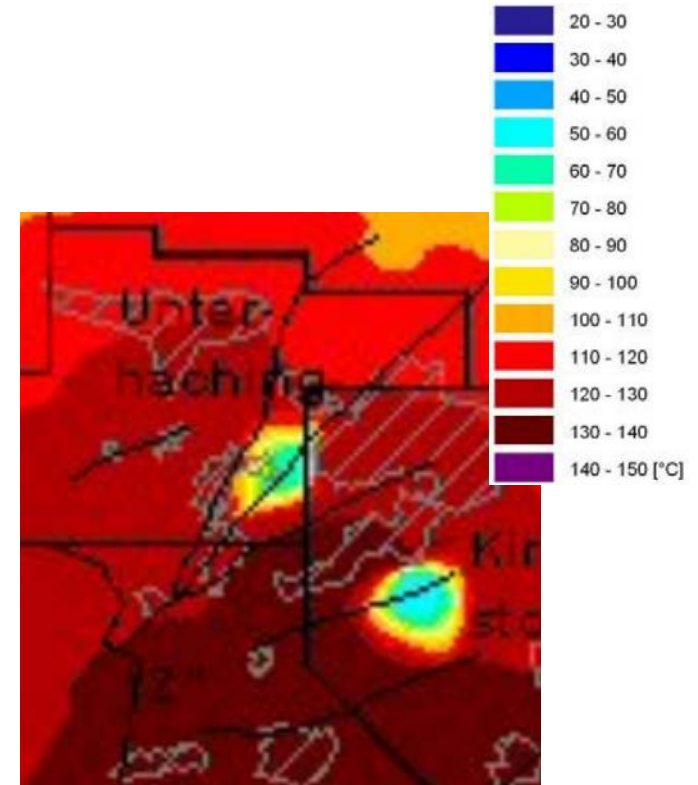
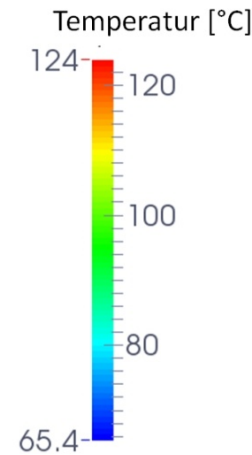
Vorherige Arbeit: TH-gekoppelte Simulation

Simulation von 60-jährigem Betrieb (**ohne Berücksichtigung von Störungen**) und Vergleich mit den Ergebnissen aus FEFLOW (Schulz et al. 2012)

$z = -2871 \text{ m}$



$z = -2735 \text{ m}$



$z = -3653 \text{ m}$

$z = -3604 \text{ m}$

Inhaltverzeichnis

- Einleitung
- **Das THM-gekoppelte Modell**
- THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching
- Zusammenfassung und Ausblick

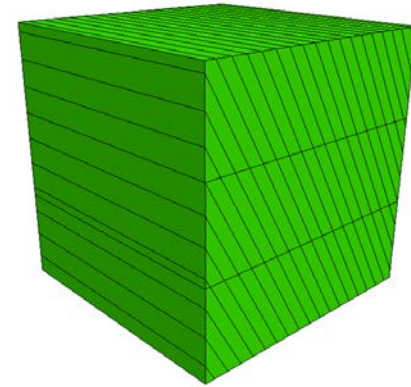
2. Das THM-gekoppelte Modell

1). Das mechanische Modell für eine geklüftete Gesteinsmasse (M)

Der elastische Anteil nach **Huang et al. 1995**

$$\Delta \varepsilon_{ij} = C_{ijkl} \Delta \sigma_{kl} \quad C_{ijkl} = C_{ijkl}^I + C_{ijkl}^J$$

$$C_{ijkl}^I = \begin{pmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & \frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{E} & \frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G} \end{pmatrix}$$



$$C_{ijkl}^J = \sum_{m=1}^M n_i^m L_{jj}^m C_{jL}^m L_{Li}^m n_k^m \frac{1}{S^m}$$

$$C_{jL} = \begin{pmatrix} \frac{1}{K_n} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{K_{sx}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{K_{sz}} \end{pmatrix}$$

2. Das THM-gekoppelte Modell

1). Das mechanische Modell für eine geklüftete Gesteinsmasse (M)

Beschreibung des plastischen Anteils (anisotrop):

- Schubbruch **intakten Gesteins** mit dem Mohr-Coulomb Modell
- Schubbruch einer **Kluftgruppe** mit dem Modell nach **Jing et al. 1994**

Fließfunktion
$$F = \sqrt{\left(\frac{\tau_x}{\mu_x}\right)^2 + \left(\frac{\tau_z}{\mu_z}\right)^2} + \sigma_n - C$$

$$\mu_x = \tan(\phi_r + \alpha_x)$$

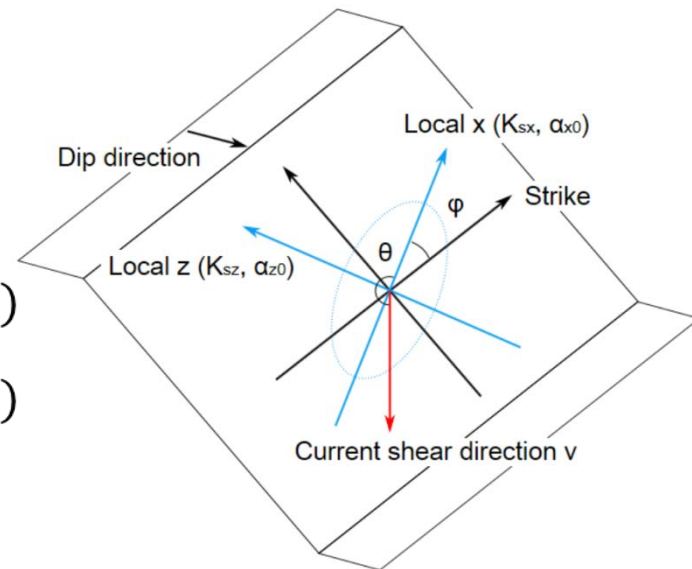
$$\mu_z = \tan(\phi_r + \alpha_z)$$

Potenzialfunktion
$$Q = \sqrt{\left(\frac{\tau_x}{\mu_x}\right)^2 + \left(\frac{\tau_z}{\mu_z}\right)^2} + \sigma_n \sin \alpha$$

Dilatanz:

$$\alpha = \sqrt{\alpha_x^2 \cos^2 \theta + \alpha_z^2 \sin^2 \theta} \quad d\varepsilon_j^p = \begin{cases} 0 & (F < 0) \\ \lambda \frac{\partial Q}{\partial \sigma_j} & (F \geq 0) \end{cases}$$

$$\alpha_x = \alpha_{x0} e^{-DW_p} \quad \alpha_z = \alpha_{z0} e^{-DW_p} \quad dW^p = \sigma_j du_j^p$$



2. Das THM-gekoppelte Modell

1). Das mechanische Modell für eine geklüftete Gesteinsmasse (M)

Der plastische Anteil (Sonderfall: isotrope Schubfestigkeit)

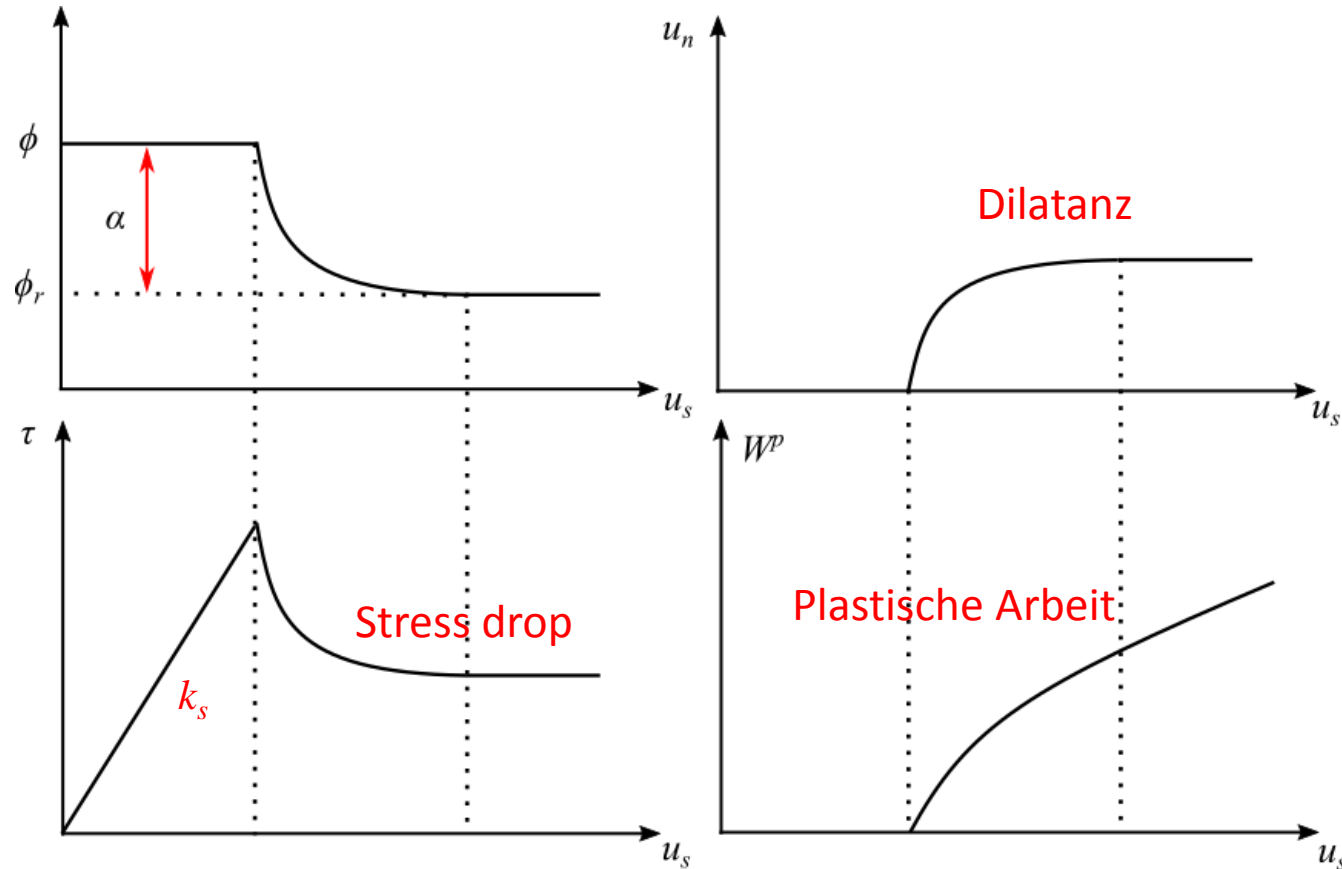
$$F = \frac{\tau}{\mu} + \sigma_n - C$$

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

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

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

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



Typische Kurve für einen direkten Schubtest

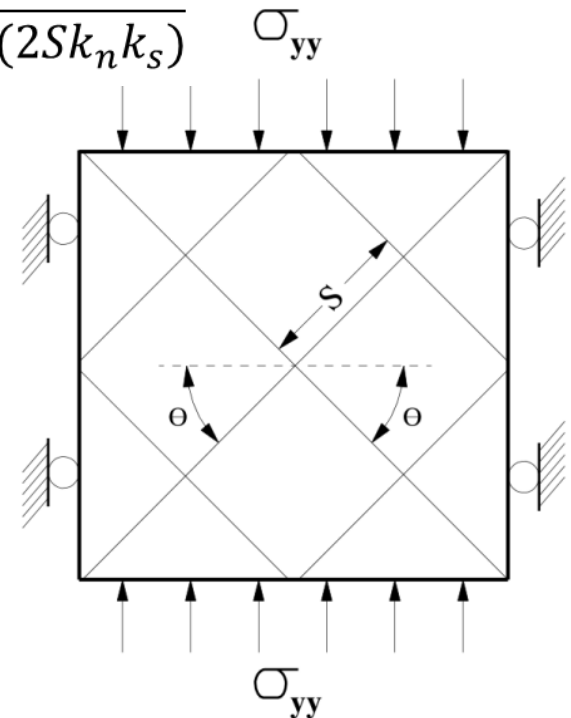
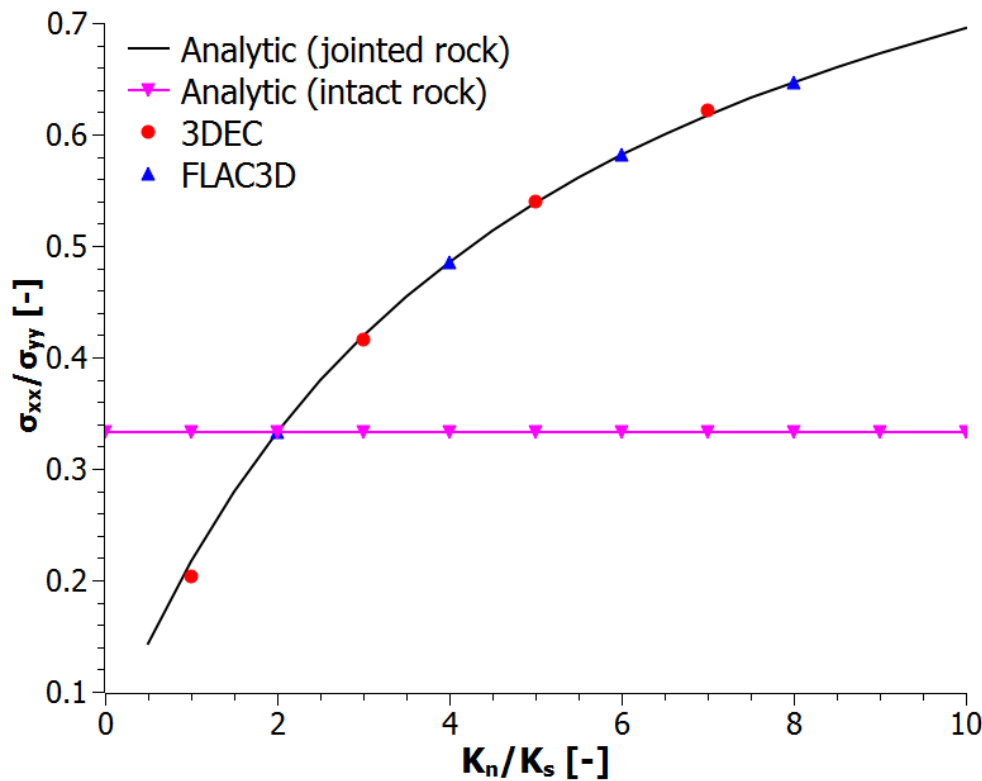
2. Das THM-gekoppelte Modell

2). Verifikation des mechanischen Modells

Beispiel 1: Poisson-Effekt einer geklüfteten Gesteinsmasse

$$\frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{yy}} = \frac{\nu}{(1 - \nu)}$$

$$\frac{\sigma_{xx}}{\sigma_{yy}} = \frac{\nu(1 + \nu)/E + (k_n - k_s)/(2Sk_nk_s)}{(1 - \nu)(1 + \nu)/E + (k_n + k_s)/(2Sk_nk_s)}$$

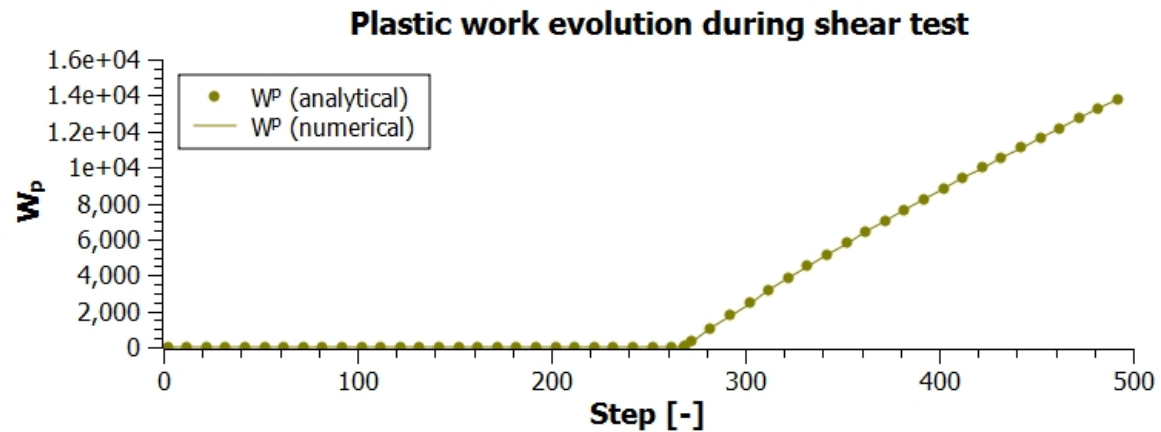
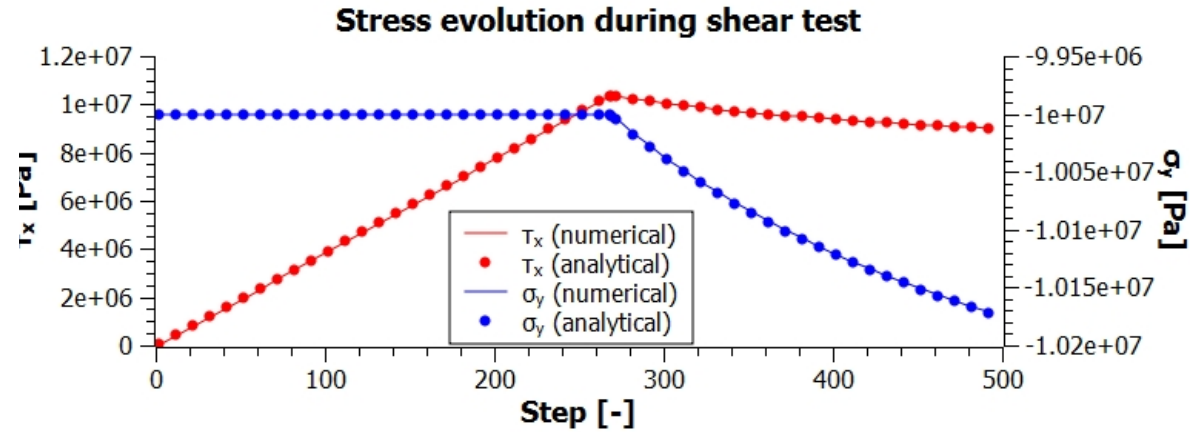
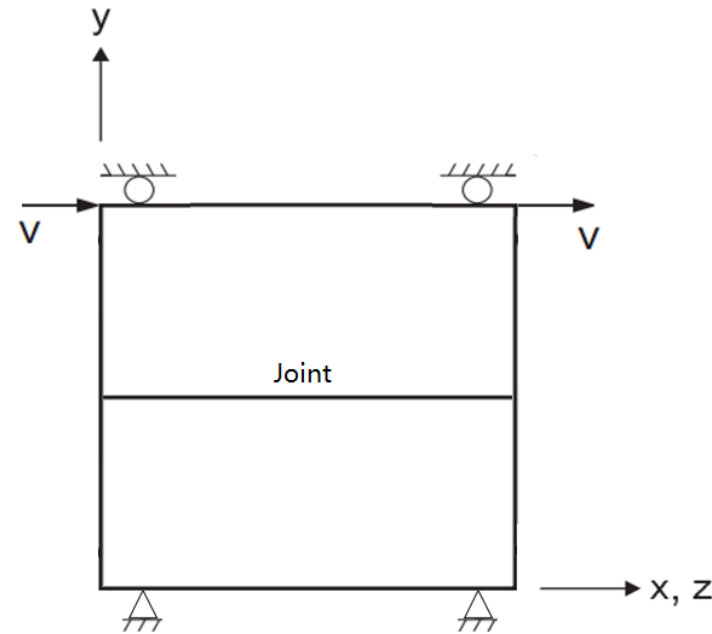


FLAC3D: Ein Element
3DEC: Mehrere Blöcke

2. Das THM-gekoppelte Modell

2). Verifikation des mechanischen Modells

Beispiel 2: direkter Scherversuch ohne normale Verschiebung



2. Das THM-gekoppelte Modell

3). Das hydro-mechanisch gekoppelte Modell (HM)

Die Verzerrungsabhängige Porosität (Chin et al. 2005)

- Die verzerrungsabhängige Porosität (Chin et al. 2005)

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

- Der Permeabilitätstensor

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

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

Anteil aus der Kluftgruppe (Oda et al. 1984) $k_{ij}^J = \frac{1}{12} (F_{kk} \delta_{ij} - F_{ij})$

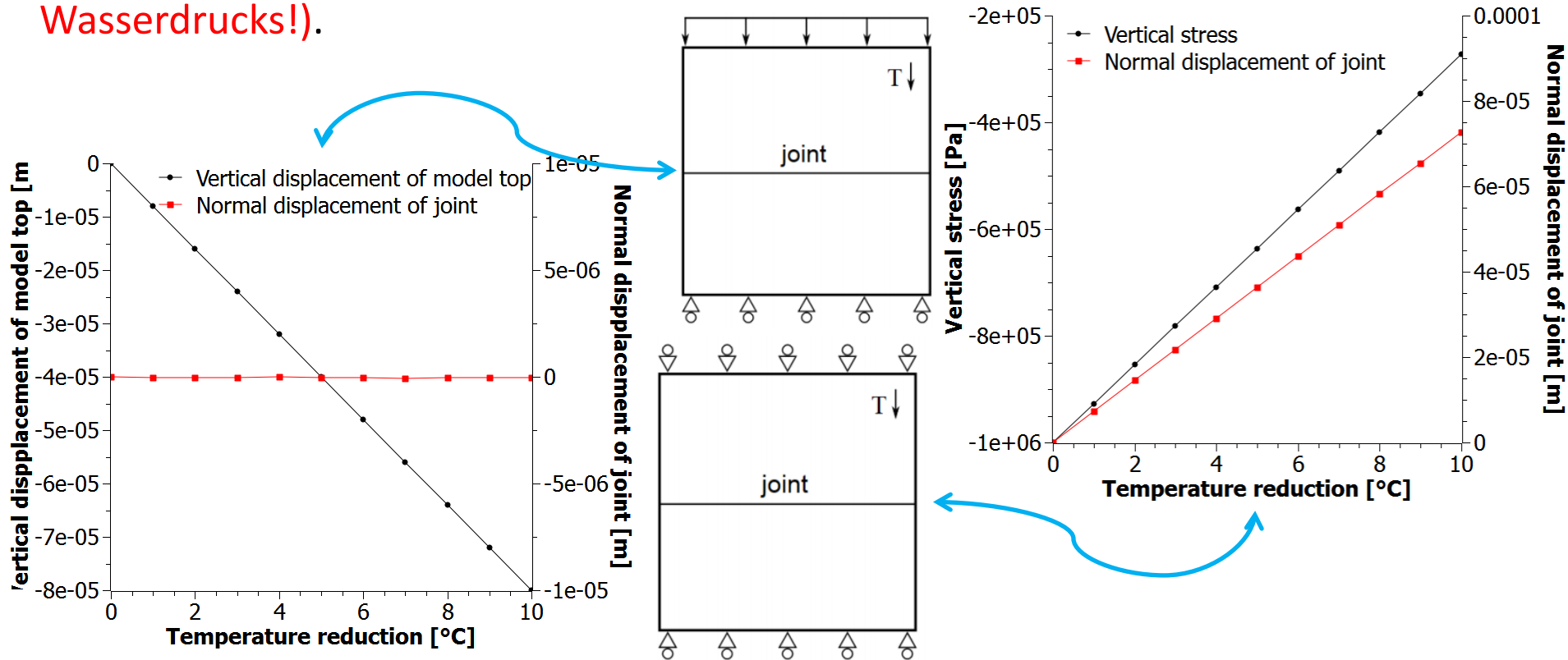
$$F_{ij} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{S_k} b_k^3 n_{ik} n_{jk} \quad b = b_0 + \Delta b = b_0 + f \Delta u_n$$

Klufttensor

2. Das THM-gekoppelte Modell

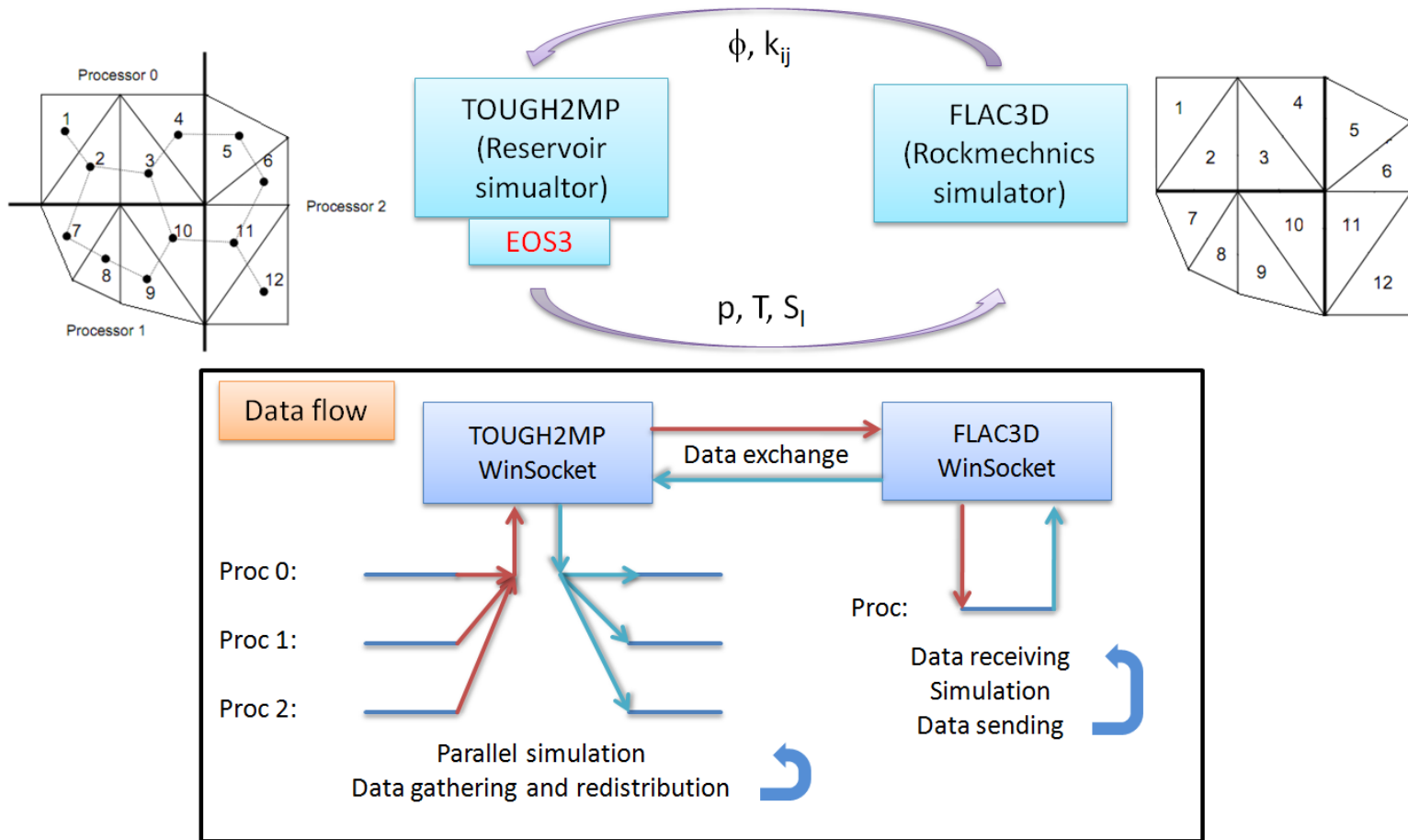
4). Das thermo-mechanisch gekoppelte Modell (TM)

Für die geklüftete Gesteinsmasse führt die Temperaturänderung **nur zur Verformung des intaktem Gesteins**. Als Folge dieser Verformung bzw. der verursachten Spannungsänderung ändert sich die entsprechende Kluftbreite (**anders als die Wirkung des Wasserdrucks!**).



2. Das THM-gekoppelte Modell

5). Das thermo-hydro-mechanisch gekoppelte Modell (THM)

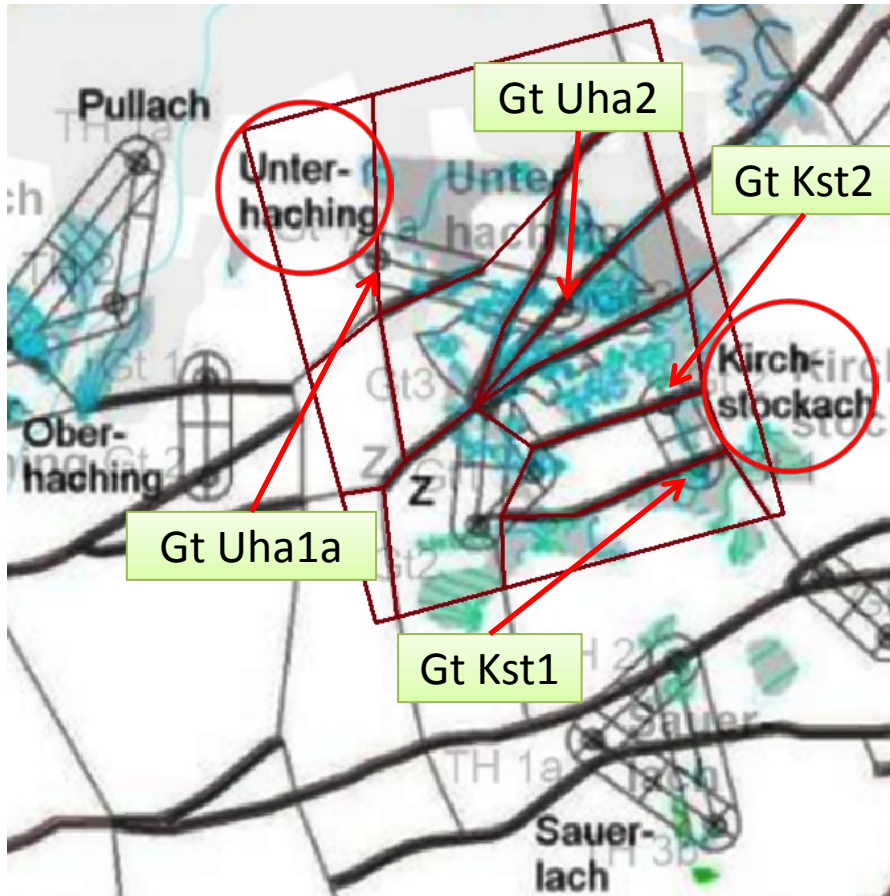


Inhaltverzeichnis

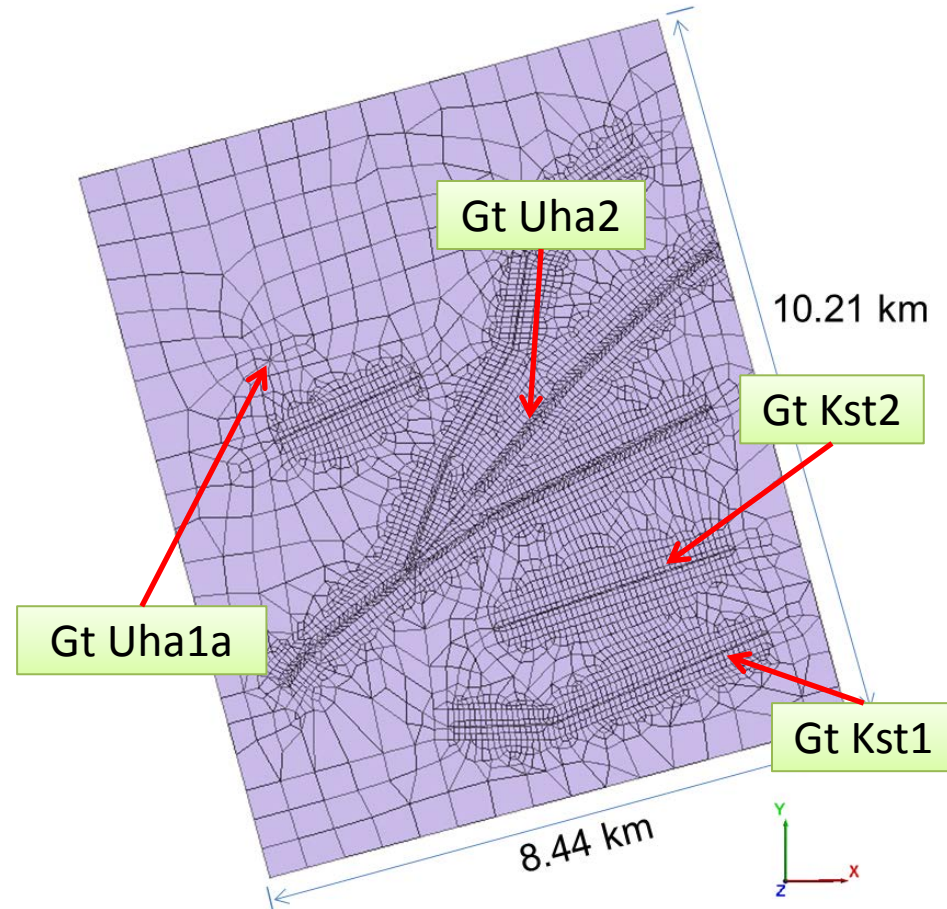
- Einleitung
- Das THM-gekoppelte Modell
- **THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching**
- Zusammenfassung und Ausblick

3. THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching

1). Das neue Modell



Das Untersuchungsgebiet



Das neue 2D-Gitter

3. THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching

1). Das neue Modell

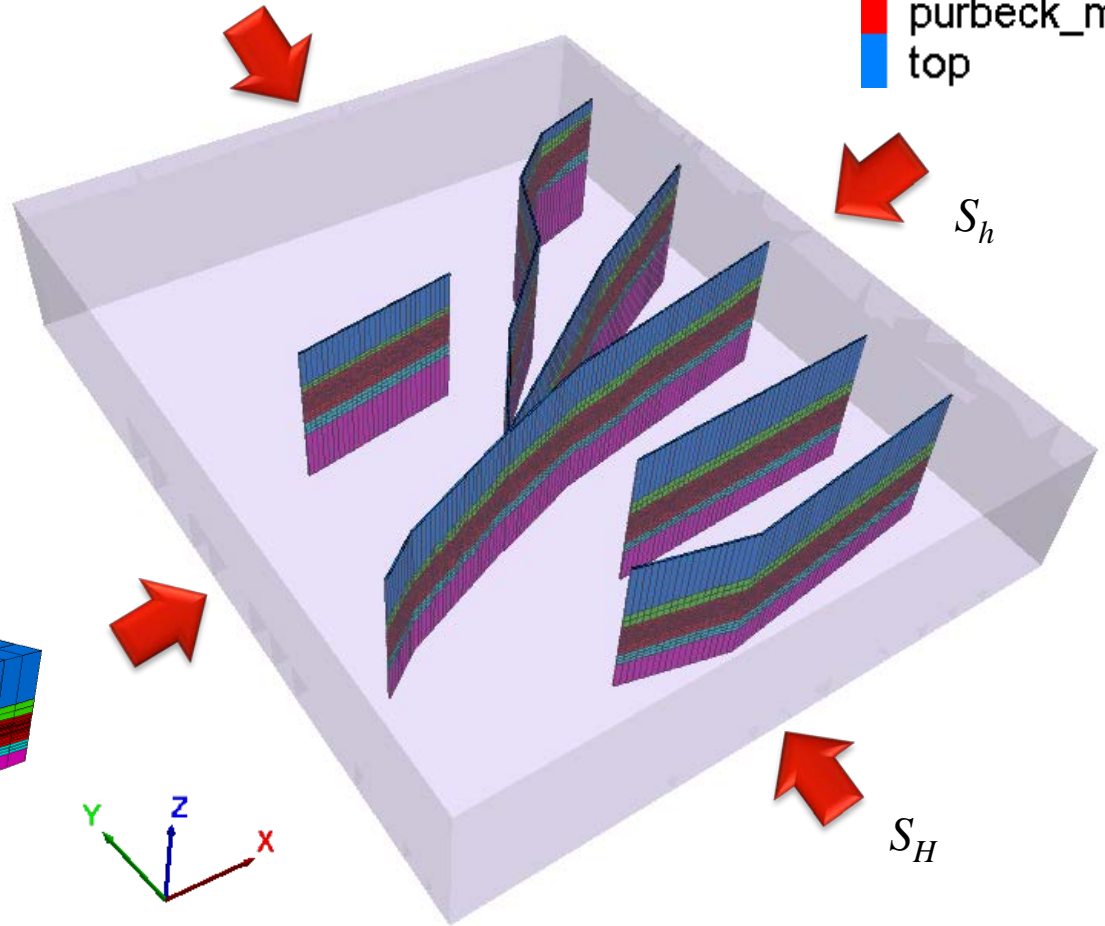
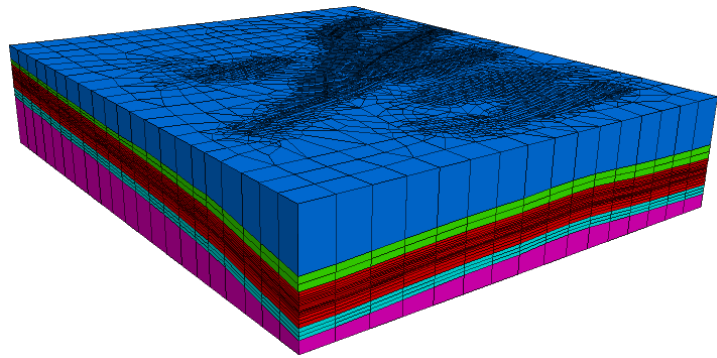
Anzahl der Elemente 118.080 (24 x 4.920)

15 Störungssegmente:

Elementlänge: 80 m

Elementbreite: 20 m

- kristall
- litho
- malmgam
- purbeck_malm
- top



3. THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching

1). Das neue Modell (Gesteinsformationenen)

Gruppe		Anzahl der Schichten	Mittlere Tiefe	Mittlere Dicke	Petrographie
Top		1	-2360 ~ -2832 m	472 m	Kies, Kalksandstein, Tonmergel
Litho		2	-2832 ~ -2991 m	159 m	Kalkstein, Kalkmergel
Purbeck /Malm	Purbeck	1	-2991 ~ -3482 m	491 m	Kalkmergel, Dolomit
	Malm ¶	3			
	^{1st} Haupteinströmungszone	2			
	Malm μ + Malm ¶	4			
	^{2nd} Haupteinströmungszone	2			
	Malm ´	5			
Malmgam		3	-3482 ~ -3654 m	172 m	Kalkstein, Kalkmergel, Tonstein
Kristall		1	-3654 ~ -4360 m	706 m	Paragneis, Granite
Zusammenfassung		24	-2360 ~ -4360 m	2000 m	-

3. THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching

2). Parameterbestimmung

Hydraulischer Parameter

Gruppe		Dichte [kg/m ³]	Porosität [-]	Permeabilität [m ²]	Wärmeleitfähigkeit [W/m/K]	Spezifische Wärme- kapazität [J/kg/K]
Top		2500	0,01	$2,5 \times 10^{-18}$	2,6	958
Litho		2500	0,01	$2,5 \times 10^{-18}$	2,6	885
Purbeck /Malm	Purbeck	2700	0,01	$2,5 \times 10^{-18}$	2,6	852
	Malm ¶		0,075	$4,3 \times 10^{-14}$	2,8	
	1 st Haupteinströmungszone		0,15	$3,8 \times 10^{-13}$	4,0	
	Malm μ + Malm ¶		0,075	$4,3 \times 10^{-14}$	2,8	
	2 nd Haupteinströmungszone		0,15	$3,8 \times 10^{-13}$	4,0	
	Malm ´		0,01	$6,6 \times 10^{-17}$	2,8	
Malmgam		2700	0,01	$2,5 \times 10^{-18}$	2,6	852
Kristall		2750	0,01	$2,5 \times 10^{-18}$	2,6	836

3. THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching

2). Parameterbestimmung

Mechanische Parameter (Intaktes Gestein)

Gruppe	E [GPa]	ν [-]	α [°]	c [MPa]	UCS [MPa]	a [1/K]
Top	10	0,25	30	17	60	$1,0 \times 10^{-5}$
Litho	20	0,31	30	23	80	$8,0 \times 10^{-6}$
Purbeck/Malm	40	0,28	30	46	160	$9,0 \times 10^{-6}$
Malmgam	40	0,31	30	46	160	$8,0 \times 10^{-6}$
Kristall	55	0,2	30	58	200	$6,0 \times 10^{-6}$

Mechanische Parameter (Störung)

k_n [GPa]	100
k_s [GPa]	100

$\tilde{\sigma}_r$ [°]	24
\pm [°]	7
C [MPa]	0
D [-]	0,01
\tilde{A}_t [MPa]	0

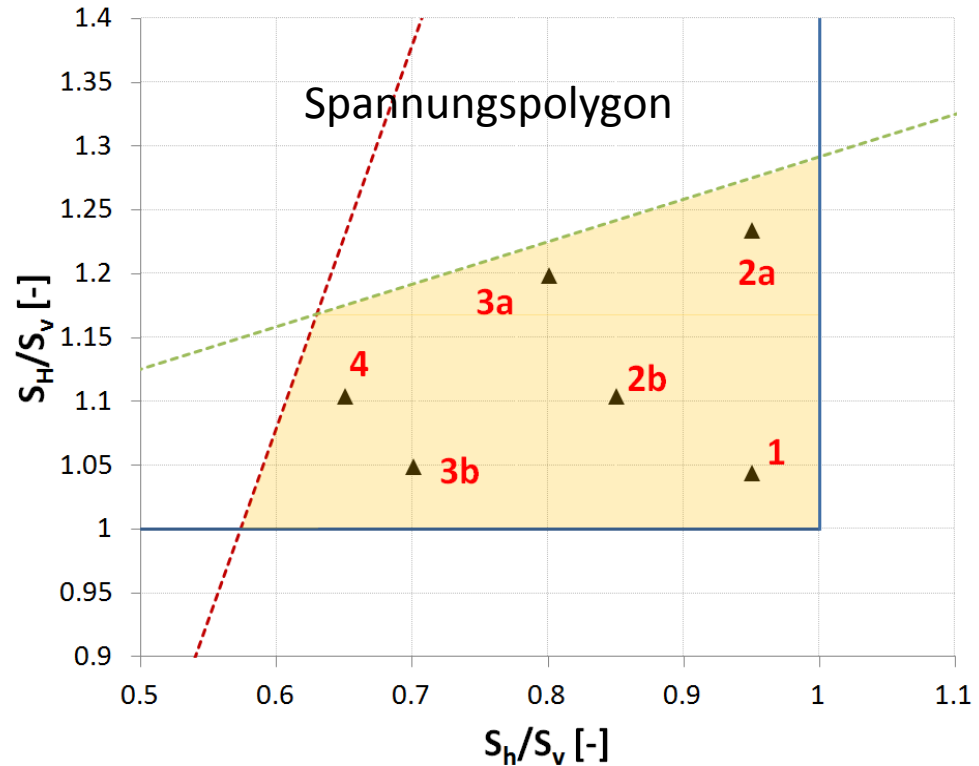
3. THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching

3). Spannungsabschätzung und Basissimulation

In situ-Spannungen ($S_H > S_v > S_h$)

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

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



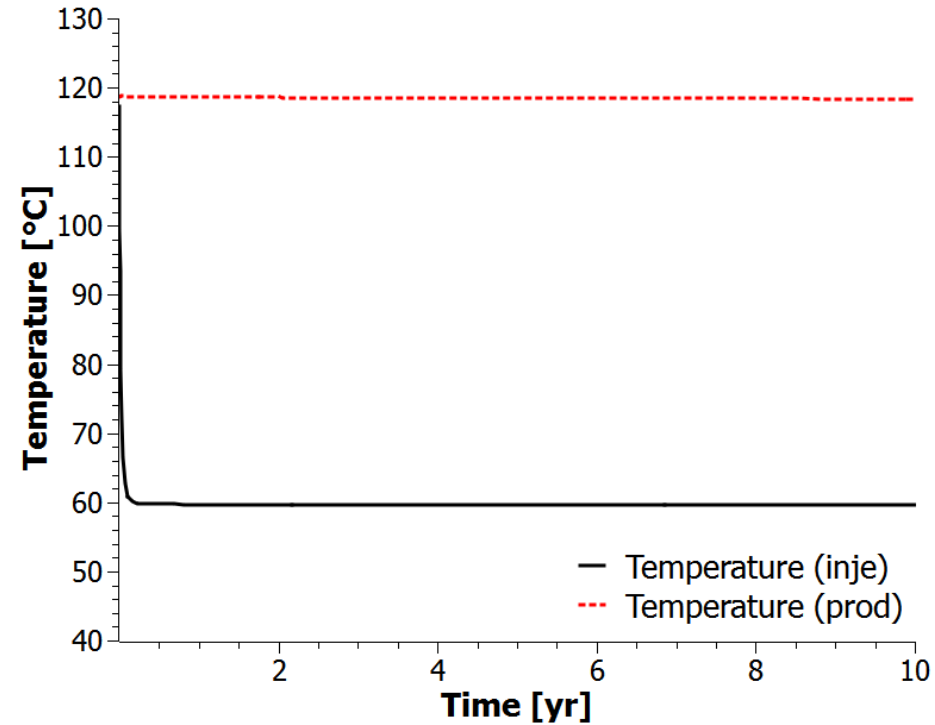
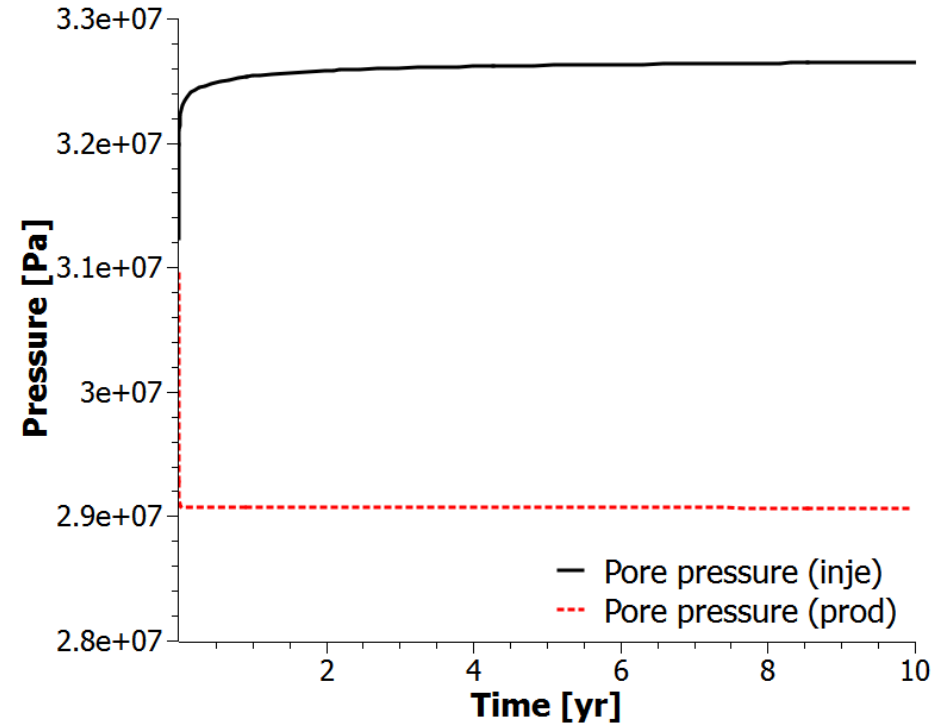
Basis (nicht history-matching!):

- Injektion- bzw. Produktionsrate: 120 l/s x 10 a (Injektionstemperatur: 60 °C)
- In situ-Spannungen: $K_H = 1,07$, $K_h = 0,92$ (fast isotrop!)

3. THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching

4). Simulationsergebnisse (Basis)

Temperatur- und Porendruckverlauf der Injektions-/Produktionszone



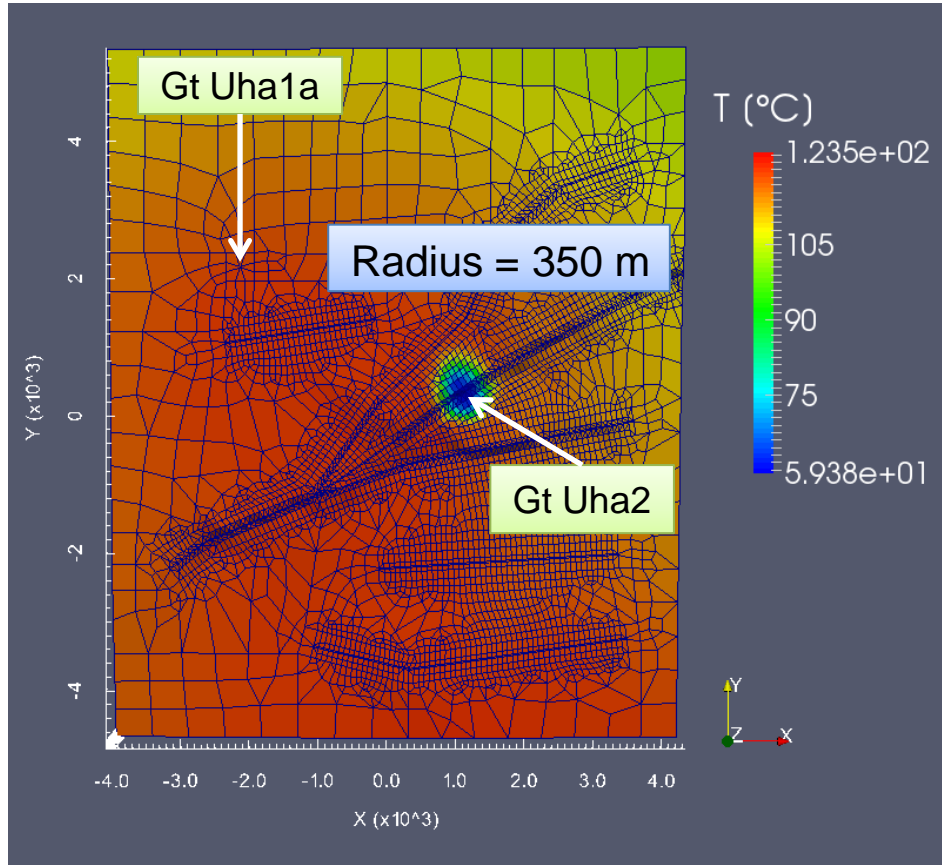
⇒ Porendruckveränderung ist **nicht groß** (± 2 MPa)

⇒ Temperatur des Produktionswassers noch **nicht geändert**

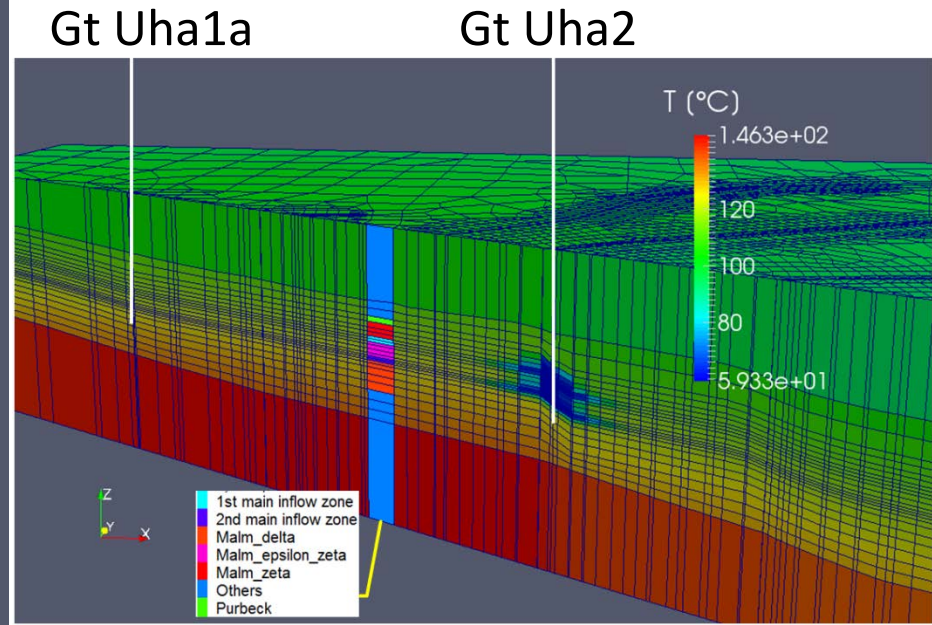
3. THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching

4). Simulationsergebnisse (Basis)

Temperaturverteilung (t = 10 a)



Abstand der Bohrungen: 3784 m



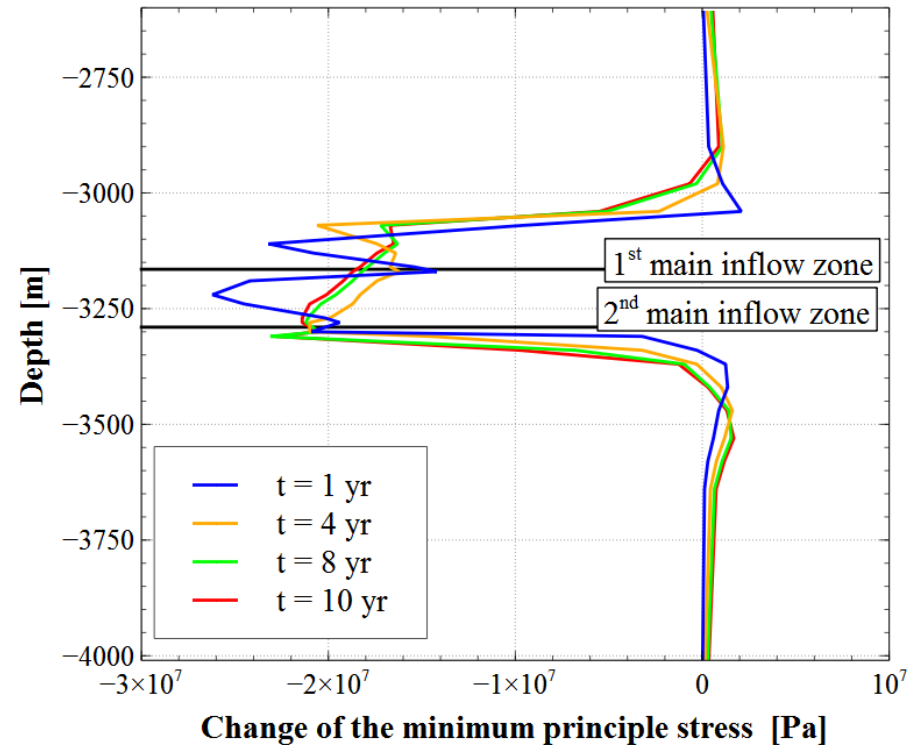
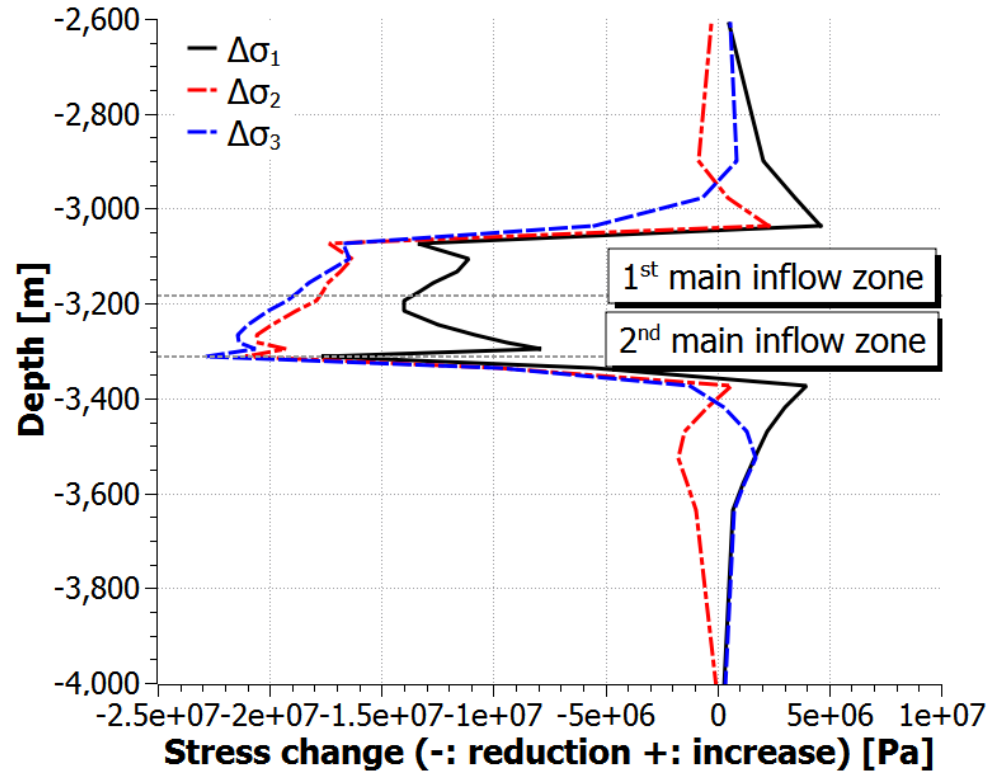
1st Haupteinströmungszone

Schnitt durch Injektion- und Produktionsbohrung

3. THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching

4). Simulationsergebnisse (Basis)

Spannungsänderung entlang der Injektionsbohrung



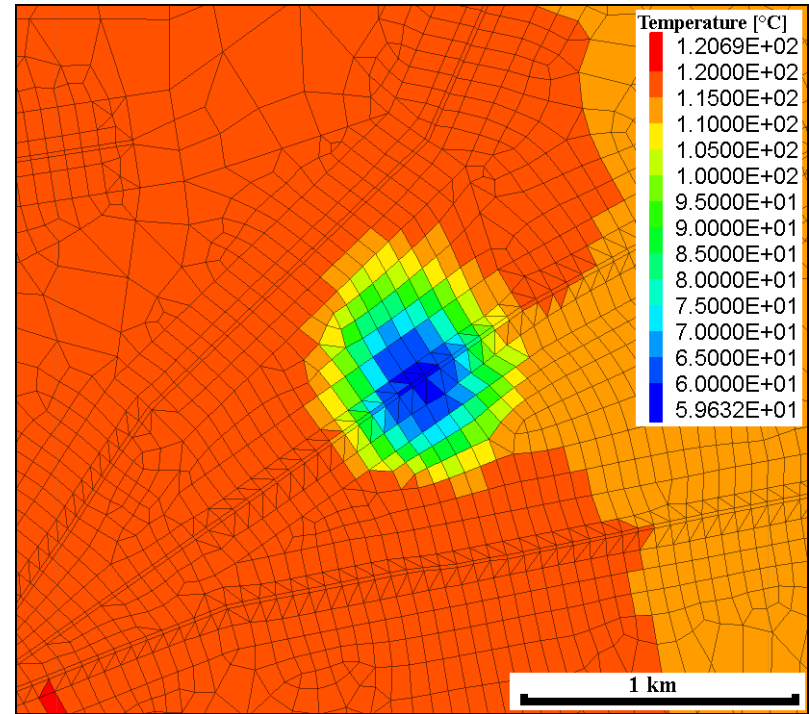
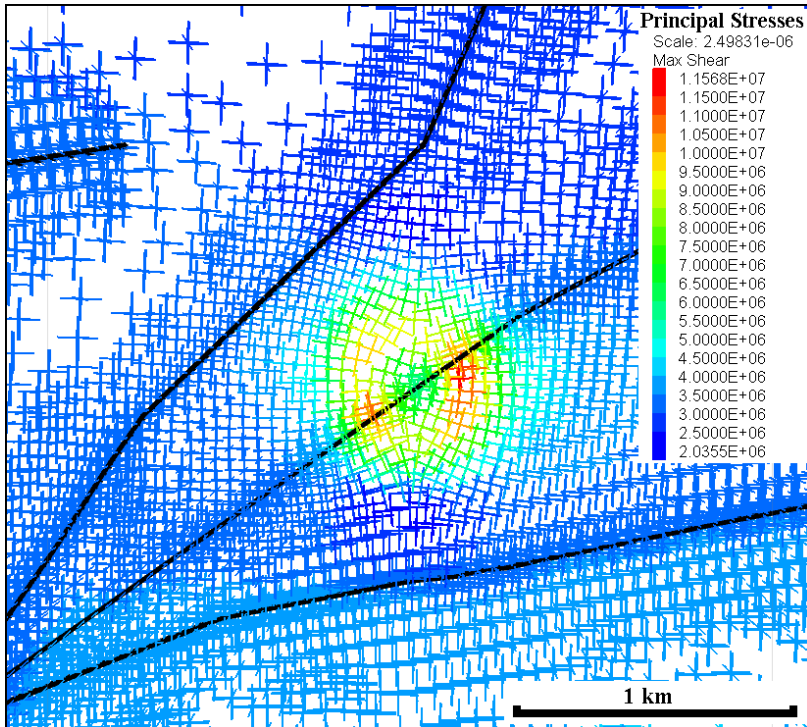
⇒ Große Spannungsreduzierung (-23 MPa bei t= 10a)

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

3. THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching

4). Simulationsergebnisse (Basis)

Hauptspannungen (Kreuze)/maximale Schubspannung (Farbe)

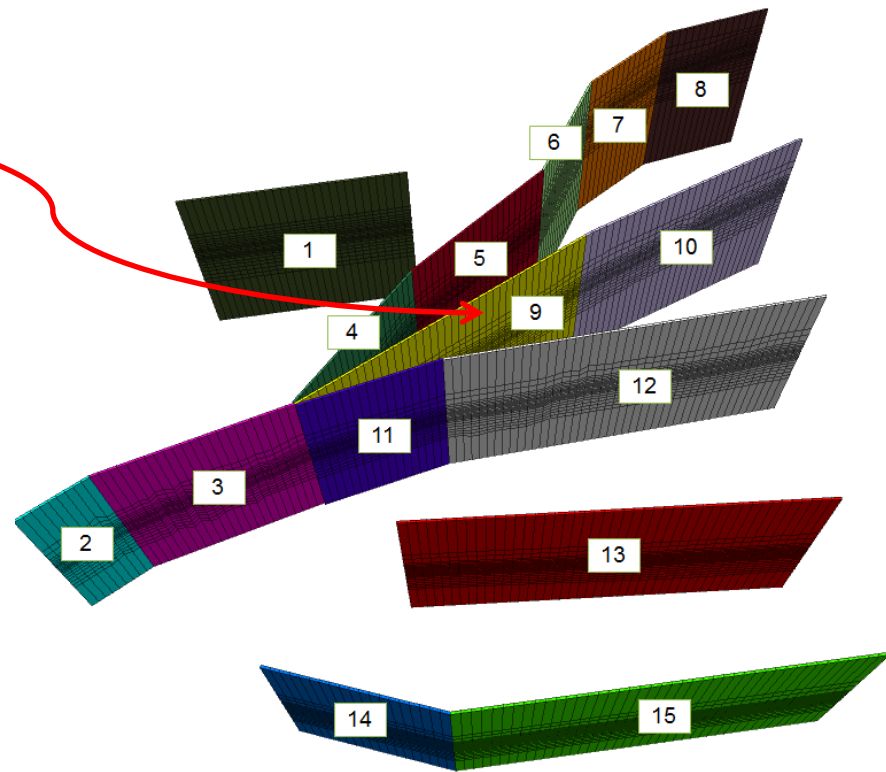
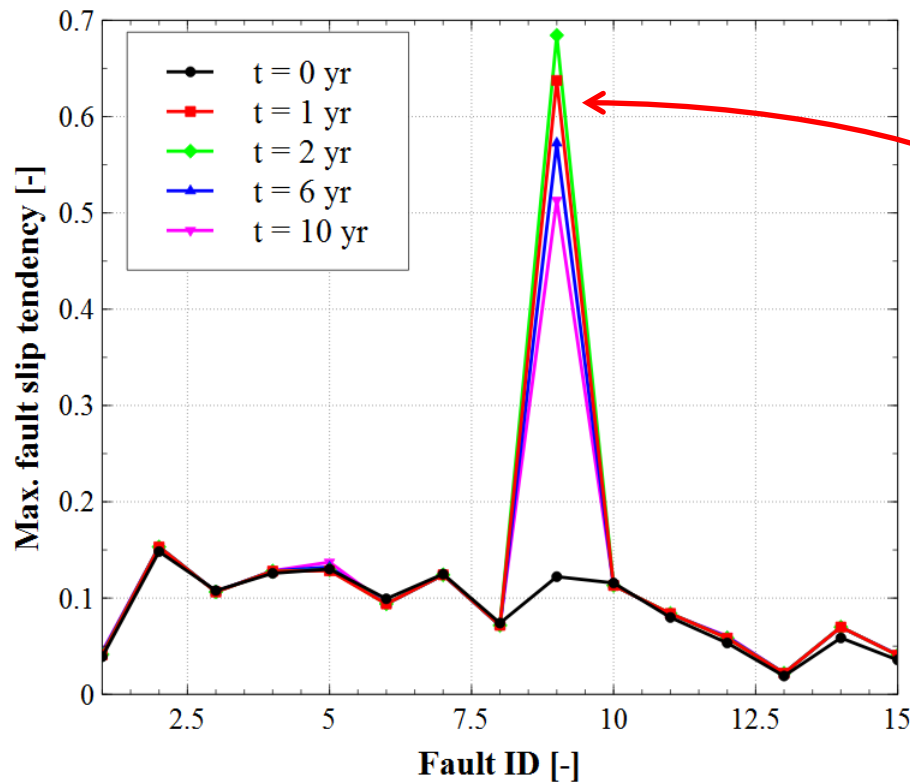


- ⇒ **Neuaustrichtung** der Spannungen
- ⇒ Schubspannung **vergrößert sich** (maximal 12 MPa)
- ⇒ Max. Schubspannung in der Nähe der Störung, aber nicht in der Injektionszone

3. THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching

4). Simulationsergebnisse (Basis)

Die maximale slip tendency der Störungen



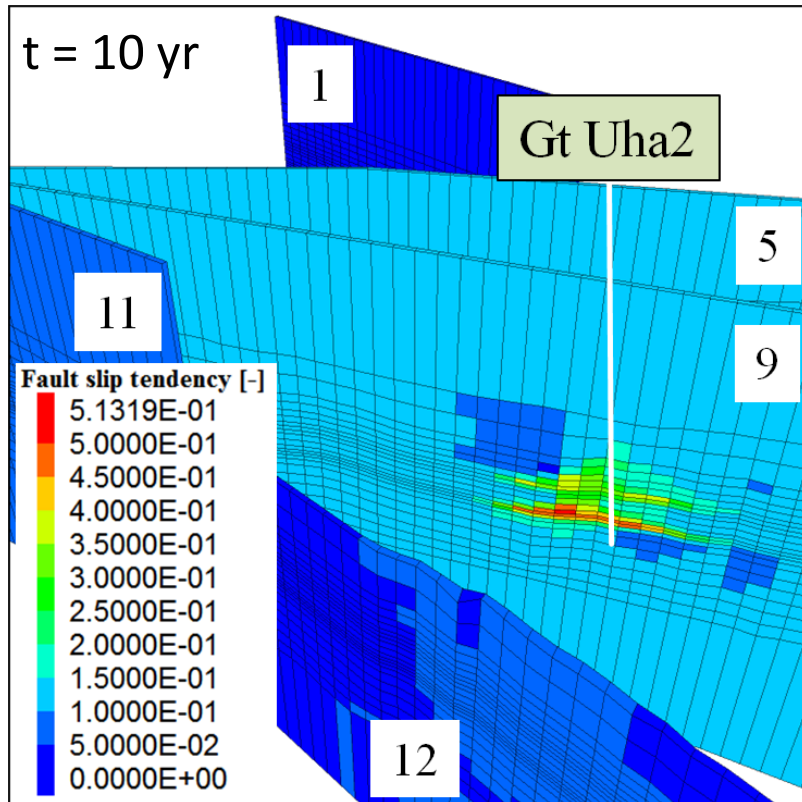
⇒ Die slip tendency der Störung 9 **vergrößert** (0,12→0,68→0,51, **ohne Versagen**)

⇒ Die max. slip tendency tritt **im zweiten Jahr** auf (0,68), nimmt dann ab

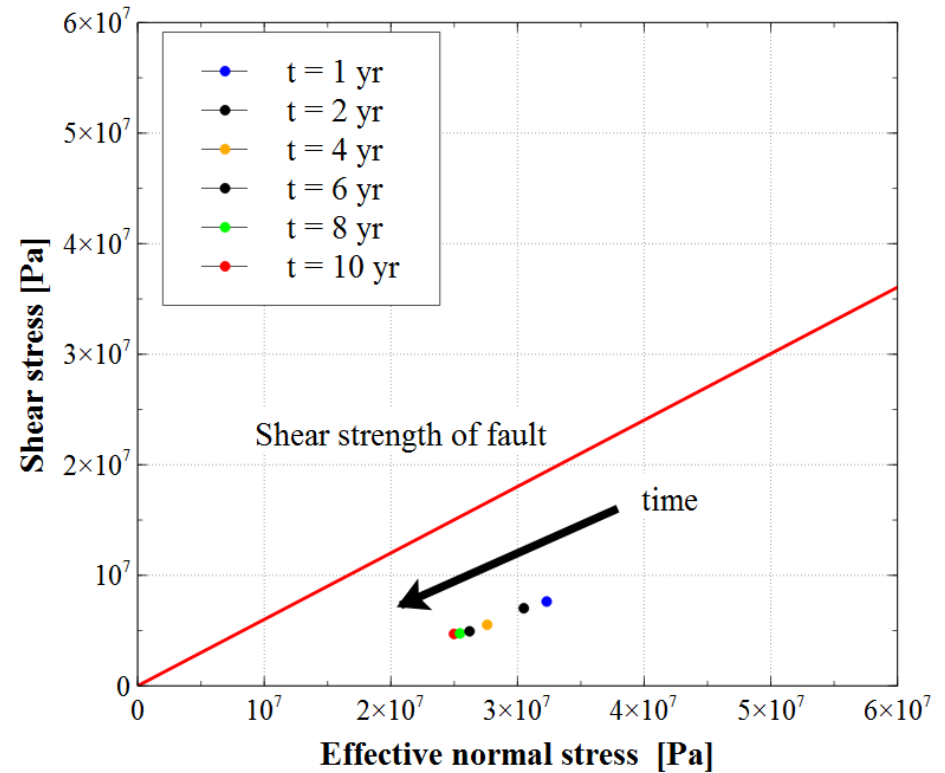
3. THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching

4). Simulationsergebnisse (Basis)

Verteilung von slip tendency und Spannungszustand der Injektionszone



⇒ Position mit max. slip tendency
nicht fixiert sondern verändert sich

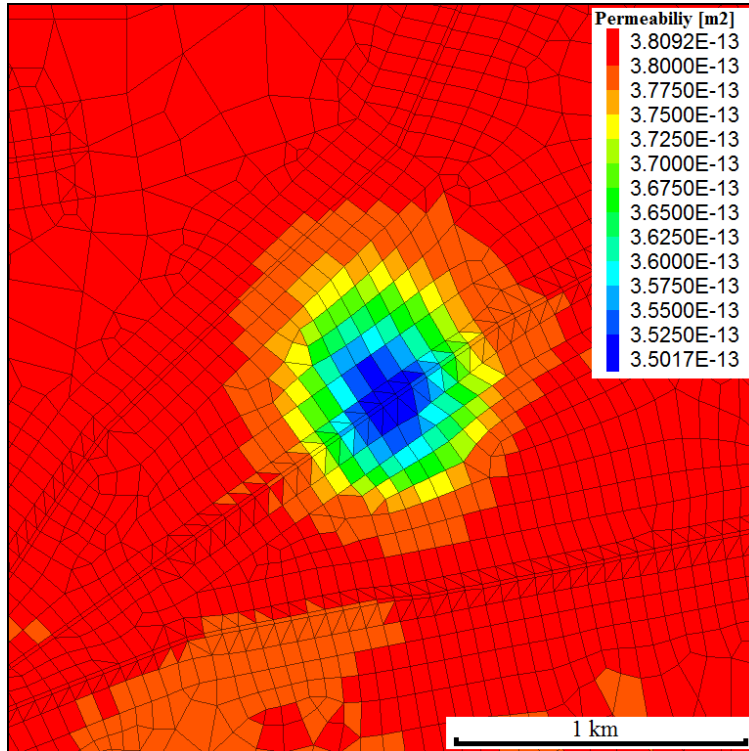


⇒ Schubspannung der Injektionszone
verkleinert sich im Laufe des Betriebs

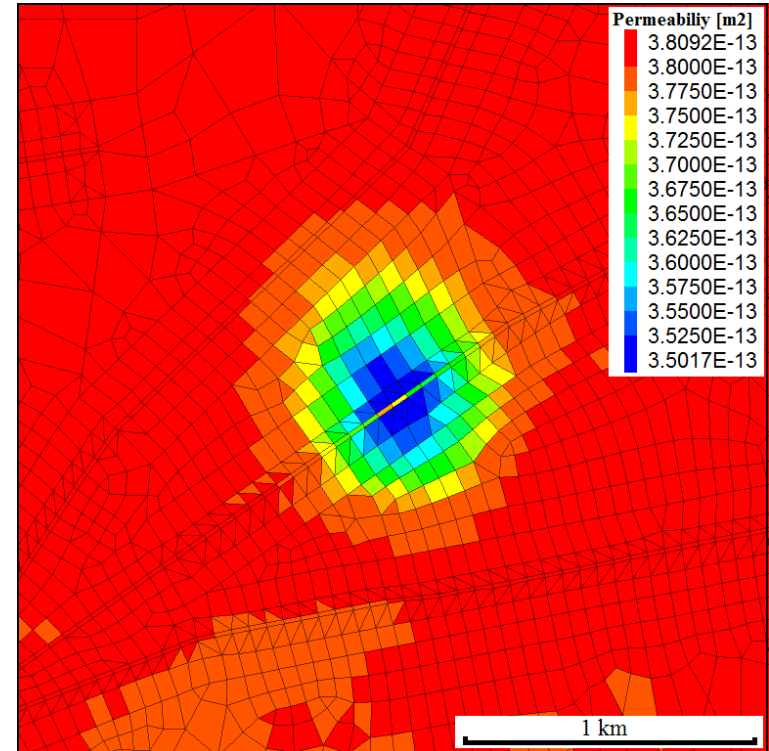
3. THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching

4). Simulationsergebnisse (Basis)

Temperatureffekt: Permeabilität des intaktem Gesteins und gesamte mittlere Permeabilität aus drei Richtungen $(k_{11} + k_{22} + k_{33})/3.0$ ($t = 10$ a)



⇒ Permeabilität des intaktem Gesteins **reduziert sich** durch Schrumpfen



⇒ Permeabilität der Kluft **nimmt zu**

3. THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching

5). Variationssimulationen

- Injektions- bzw. Produktionsrate: 120 l/s x 10 a (Injektionstemperatur: 60 °C)
- In situ-Spannungen ($S_H > S_v > S_h$)

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

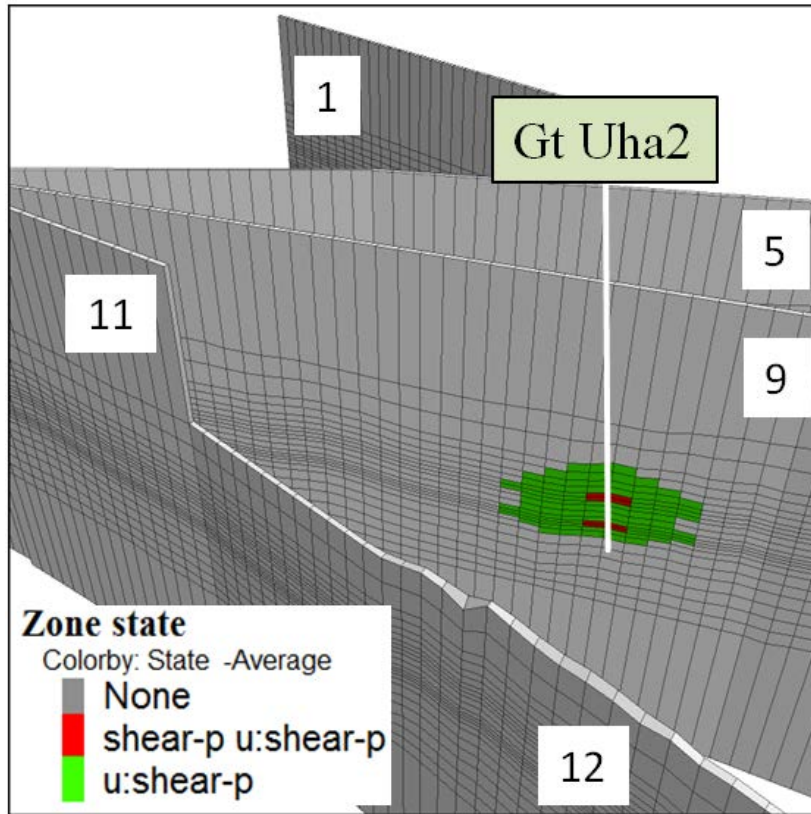
Variationen	K_H [-]	K_h [-]
1 (Basis)	1,07	0.92
2	a	1,37
	b	1,16
3	a	1,31
	b	1,08
4	1,16	0.45

- Außerdem werden **Injektionsrate** und **Störungsparameter** variiert.
- Der **gleichzeitige Betrieb** von Unterhaching und Kirchstockach wird simuliert.

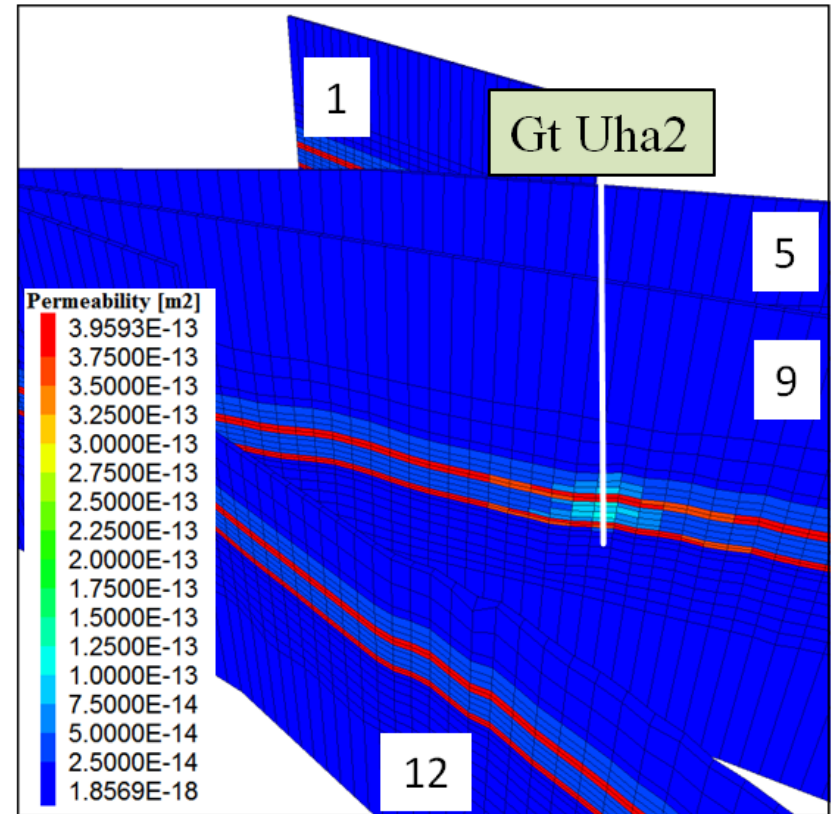
3. THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching

5). Simulationsergebnisse (Variation 4, $K_H = 1,16$, $K_h = 0,45$)

Schubzonen und vertikale Permeabilität (t = 10 a)



⇒ Schubversagen tritt in der Nähe der Injektionszone auf

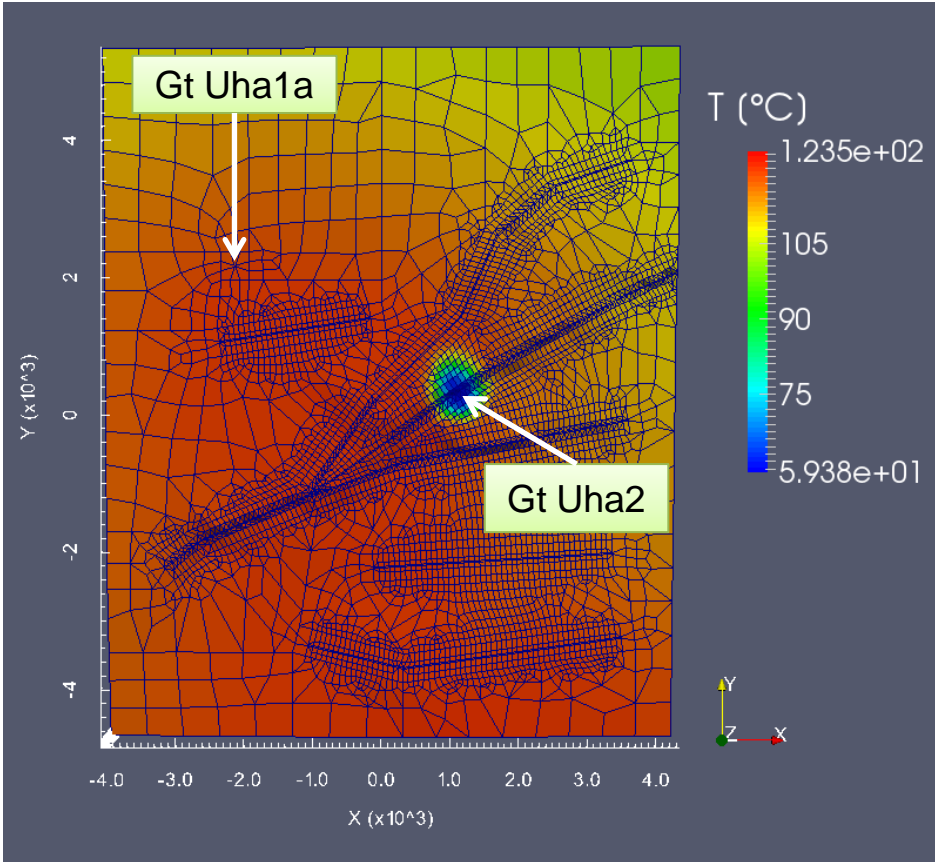


⇒ Vertikale Verbindung zwischen zwei Haupteinströmungszonen

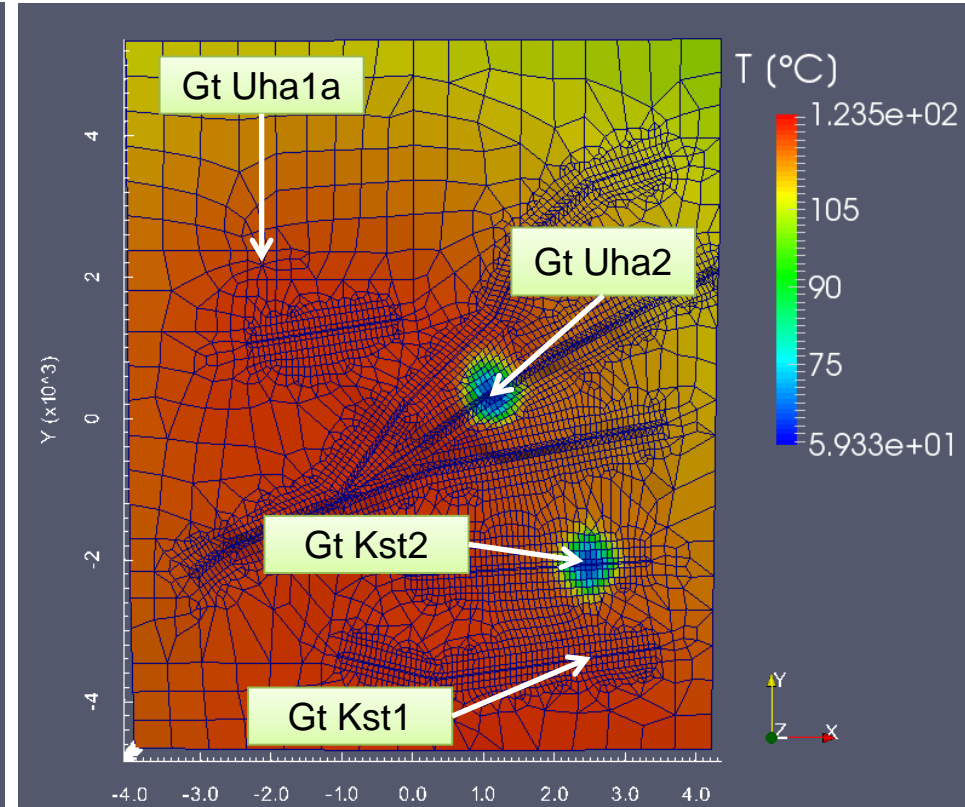
3. THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching

5). Simulationsergebnisse (Gleichzeit. Betrieb: 2 Geothermieranlagen)

Temperaturverteilung der 1. Haupteströmungszone (t = 10 a)



⇒ Keine gegenseitigen Einflüsse



Abstand der Injektionsbohrungen in diesem geothermischen Feld: 2844 m

Inhaltverzeichnis

- Einleitung
- Das THM-gekoppelte Modell
- THM-gekoppelte Simulation von Geothermie Unterhaching
- Zusammenfassung und Ausblick

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die folgenden Untersuchungsarbeiten wurden durchgeführt:

- Das THM-gekoppelte Modell wurde in TOUGH2MP-FLAC3D implementiert. Das Modell gilt für Einzel-/Mehrklufsysteme.
- Das 3D Modell für Geothermie Unterhaching wurde neu gebaut, mit Berücksichtigung der Störungszone. Einige numerische Simulationen wurden schon durchgeführt.

Die Simulation (Basis) zeigt:

- Porendruckveränderung ist **nicht groß** (± 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** ($\tilde{\sigma}_{2,3} > \tilde{\sigma}_1$). Es gibt eine **Neuausrichtung** der Spannungen. Die Schubspannung vergrößert sich insbesondere in der Nähe von Störung (maximal 12 MPa).

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Simulation (Basis) zeigt:

Entwicklung der slip tendency der **risikoreichsten Störung 9**

- Risikoreich wegen der geringsten Entfernung zur Re-Injektionsbohrung
- 0,12→0,68→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 Position der max. slip tendency wurde in der Simulation nicht fixiert, sondern verändert sich, analog der Ausbreitung der Temperatur.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Variationssimulationen zeigen:

- Wenn der Unterschied zwischen den beiden horizontalen Spannungen sehr groß ist, ist es gefährlicher. In Variation 4 ($K_H = 1,16$, $K_h = 0,45$) tritt schon (Schub) Versagen auf (**Die in-situ Spannungen spielen eine große Rolle**)
- **Vertikale Verbindung** entsteht zwischen Formationsschichten wegen der Öffnung von Störungen
- Bei gleichzeitigem Betrieb von Geothermie Unterhaching und Kirchstockach gibt es **keine gegenseitige Beeinflussungen**

Ausblick:

- Weitere Variationssimulationen von der Geothermie Unterhaching
- Weitere Untersuchungen zu der induzierten Seismizität in Tiefenbereich 5000 m der Geothermie Unterhaching

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

