

MAGS2 EP6:

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

—
Offener Workshop

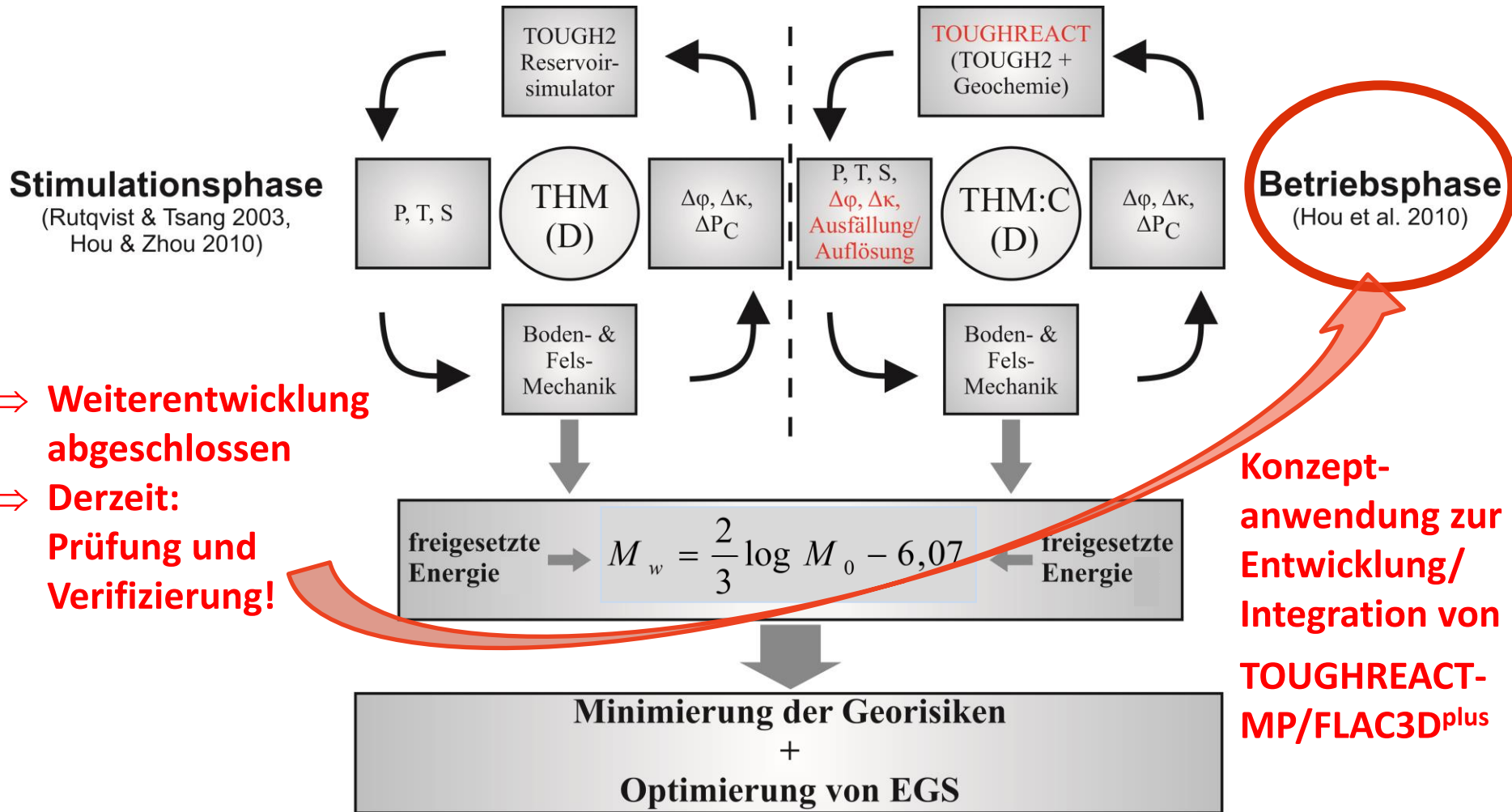
Michael Z. Hou, Martina J. Weichmann, Yang Gou, Xuan Luo

München, 15. Oktober 2014

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

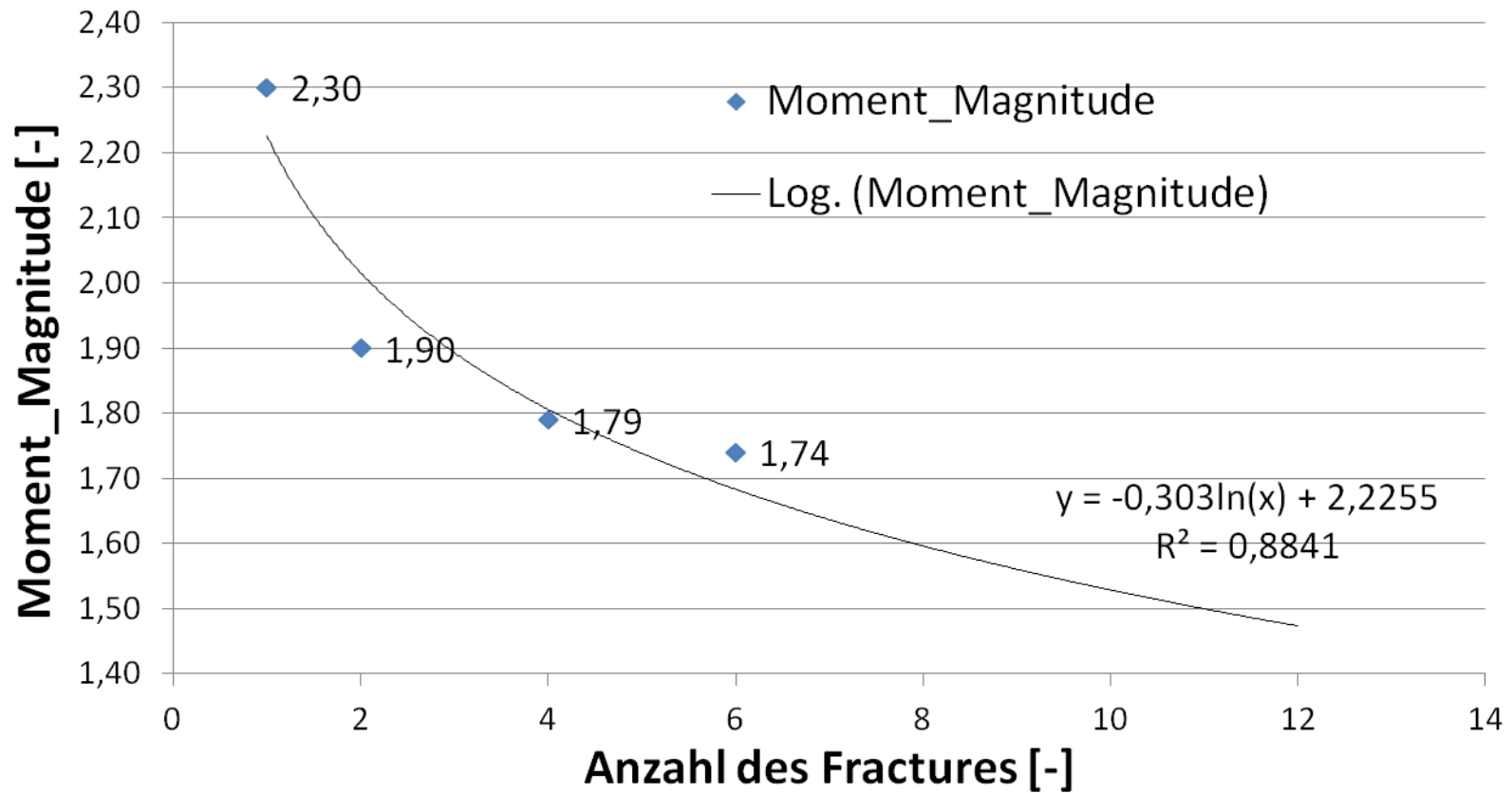
AP3: THM- und THM:C-Kopplung/Integration TOUGHREACT-MP und FLAC3D^{plus}



AP3: Bohrlochströmungsmodul — 1

- **Implementierung des Bohrlochströmungsmoduls in TOUGH2MP/EOS3**
 - Simulator ermöglicht
 - gleichzeitige Berücksichtigung von Strömung und Wärmetransport
 - in porösen Gesteinsformationen
und
 - in Bohrlöchern
 - Ermöglicht die gleichzeitige Untersuchung von
 - Multiphasen-Fluss
 - Multi-Flusstypen
= Poren, Risse und Rohr
 - Multiskalen-Problem
= von sehr kleinen Bohrlöchern bis zu sehr großen Reservoirs.

AP3: DHM (Basel) – Fiktive Optimierung des Multifrac-Erschließungskonzeptes (Injektionsvolumen unverändert)



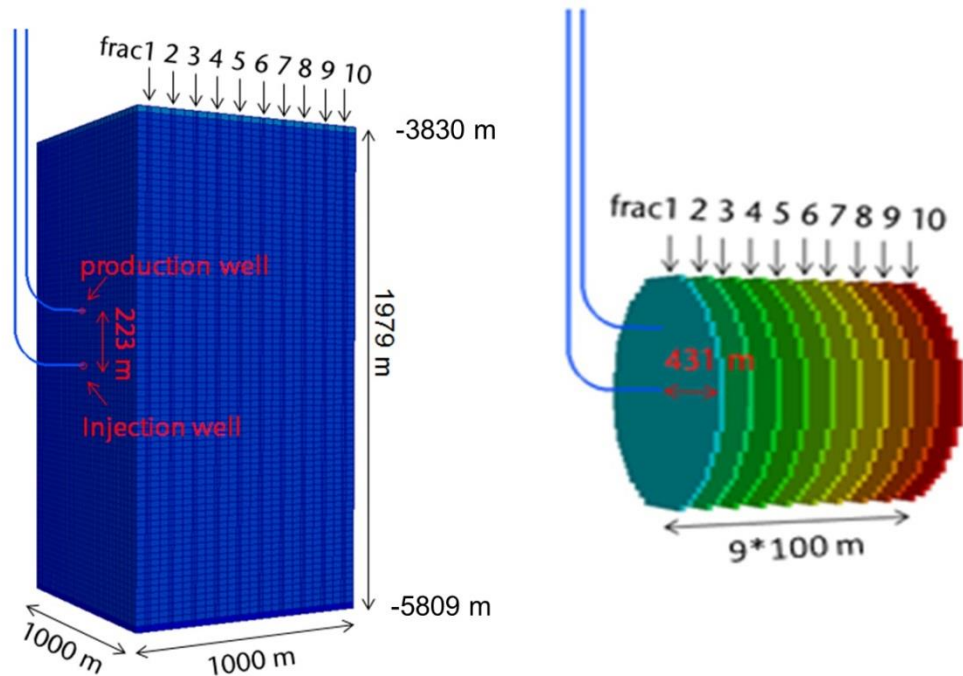
➤ Schlussfolgerung

Multifrac-Erschließungskonzept führt zur **Reduzierung der maximalen Momentmagnitude**:
Je größer die Fracanzahl desto deutlicher die Reduzierung.

AP3: Bohrlochströmungsmodul — 2

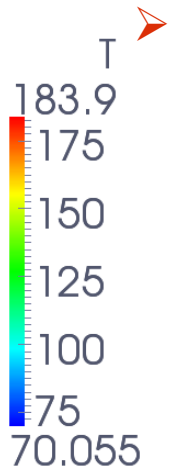
- **Rechenbeispiel**

- Frac-Anzahl: 10
- Frac-Radius: 431 m
- Frac-Abstand: 100 m
- Injektion: 500 l/s, 70° C
- Bohrlochradius: 0,25 m

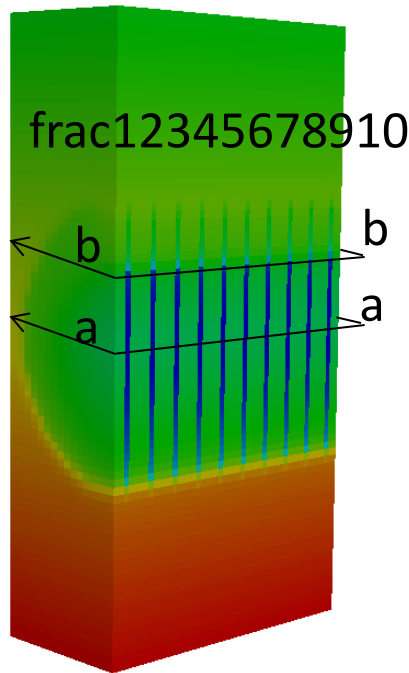


AP3: Bohrlochströmungsmodul — 3

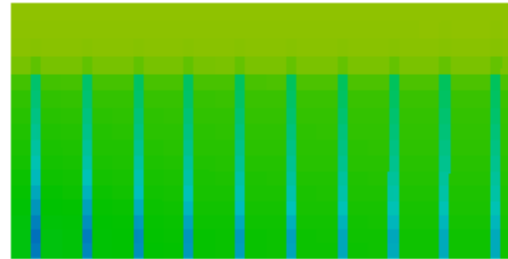
- **Berechnungsergebnisse**



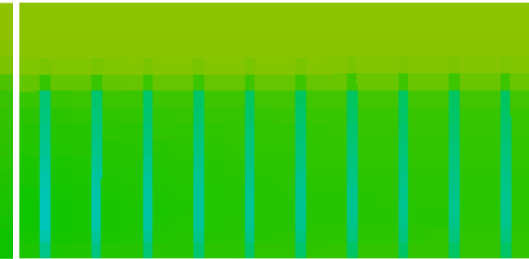
➤ Temperaturverteilung (t = 20 a)



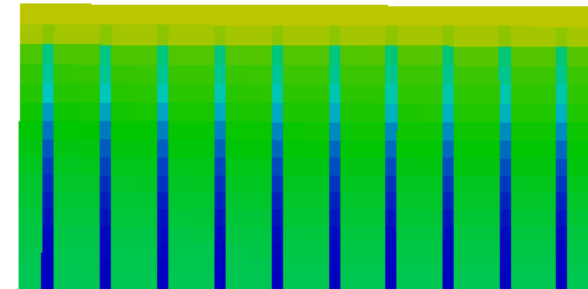
c-c: t = 0,
Initialtemperatur 147°C



b-b: Horizontalschnitt
Produktionsbohrung



c-c: Horizontalschnitt
24,7 m oberhalb b-b



a-a: Horizontalschnitt
Injektionsbohrung



AP3: Synthetischer seismischer Katalog

Seismisches Moment & Momentenmagnitude

- Seismisches Moment M_0**

$$M_0 = \begin{cases} G \cdot \bar{D} \cdot A & \text{(shear failure)} \\ (G + \lambda) \cdot \bar{D} \cdot A & \text{(tensile failure)} \end{cases}$$

G = Shear modulus in Pa, λ = Lamé's parameter in Pa
 A = Area of shear/tensile failure in m^2
 \bar{D} = Average displacement of shear/tensile area
- M_0 Berechnung FLAC3D^{plus}: zeitabhängig über implementierte FISH-Funktion**

$$M_0 = \begin{cases} \sum_{i=1}^n G_i \cdot \Delta \bar{D}_i \cdot A_i & \text{(shear failure)} \\ \sum_{i=1}^n (G_i + \lambda_i) \cdot \Delta \bar{D}_i \cdot A_i & \text{(tensile failure)} \end{cases}$$

$\Delta \bar{D}_i$: Average displacement of failure area in one second
- Momentenmagnitude M_w**

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 6,07$$

AP3: Synthetischer seismischer Katalog

Katalogparameter

1. Laufende Nummerierung und Zeiterfassung (relative und Echtzeit)
2. Lokalisierung (X, Y, Z)
3. Berechnungsintervall
4. Schermodul, Lamé-Parameter
5. Bruchmechanismus
6. Bruchfläche/Rissfläche, Dislokationsvektor, durchschnittliche Rissweite
7. Seismisches Moment M_0
8. Momentmagnitude M_w
9. Anzahl der Bruchelemente und stimuliertes Reservoirvolumen
10. **Zeitliche b-Werte & M_{wmax}** (abgeleitet aus diesem Katalog)

→ **Verifizierung**

= **Vergleich mit aus Monitoring abgeleitetem seismischem Katalog**

→ **Gefährdungsabschätzung: vor Bohrbeginn, Stimulation u. Betrieb**

AP3: Synthetischer seismischer Katalog

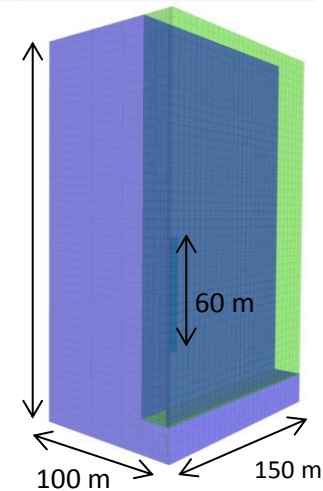
Gitterelementeinfluss — 1

| Elementgröße $x \times y \times z$ [m ³] | Max. Fracfläche [m ²] | % ⁽¹⁾ | Max. Fracvolumen [m ³] | % ⁽²⁾ | Seismische Gesamtenergie [J] |
|---|--------------------------------------|------------------|---------------------------------------|------------------|------------------------------------|
| 1×0,5×1 | 2,62E+04 | 72,65% | 1,31E+04 | 1,82% | 8,960 |
| 2×0,5×2 | 2,37E+04 | 65,83% | 1,19E+04 | 1,65% | 9,127 |
| 3×0,5×3 | 2,20E+04 | 61,11% | 1,10E+04 | 1,53% | 9,218 |
| 4×0,5×4 | 2,11E+04 | 58,56% | 1,21E+04 | 1,68% | 9,283 |
| 5×0,5×4 | 1,76E+04 | 48,75% | 1,15E+04 | 1,59% | 9,207 |
| 6×0,5×6 | 2,21E+04 | 61,30% | 1,80E+04 | 2,50% | 9,287 |
| 8×0,5×8 | 2,41E+04 | 67,01% | 2,25E+04 | 3,13% | 9,249 |
| 10×0,5×10 | 1,53E+04 | 42,50% | 1,84E+04 | 2,56% | 9,905 |

| | |
|---|---------|
| Gesamte Fracfläche [m ²] | 36.000 |
| Gesamtes Fracvolumen [m ³] | 720.000 |

Aspekt Ratio :

Verhältnis zwischen längster
und kürzester Zonenkante 260 m



- (1) Prozentanteil der maximalen Fracfläche an der Gesamtfläche
- (2) Prozentanteil des maximalen Fracvolumens am Gesamtvolumen

➤ Je größer die Gitterelemente, desto kleiner die max. Rissfläche und desto größer die gesamte seismische Energie.

AP3: Synthetischer seismischer Katalog

Gitterelementeinfluss — 2

| | Max. Fracfläche [m ³] | % ⁽¹⁾ | Max. Fracvolumen [m ³] | % ⁽²⁾ | Seismische Gesamtenergie [J] |
|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------|---------------------------------------|------------------|---------------------------------|
| für alle Daten (x) | | | | | |
| Mittelwert | 2,15E+04 | 59,71% | 1,48E+04 | 2,06% | 9,28E+00 |
| Standardabweichung | 3,55E+03 | 9,86% | 4,25E+03 | 0,59% | 0,27 |
| %⁽³⁾ | 17% | 16,51% | 29% | 28,75% | 3% |
| für Daten bis 4×0,5×4 (√) | | | | | |
| Mittelwert | 2,32E+04 | 64,54% | 1,20E+04 | 1,67% | 9,15E+00 |
| Standardabweichung | 2,23E+03 | 6,19% | 8,43E+02 | 0,12% | 0,14 |
| %⁽³⁾ | 10% | 9,59% | 7% | 7,01% | 2% |

-
- (1) Prozentanteil der maximalen Fracfläche an der Gesamtfläche
 - (2) Prozentanteil des maximalen Fracvolumens am Gesamtvolumen
 - (3) Standardabweichung: Mittelwert

- Elementgröße hat deutlichen Einfluss auf Simulationsergebnisse und Aspekt Ratio.
Empfehlung für numerische Simulation:
Aspekt Ratio der Hauptzone 8 soll wg. zu großer Abweichung nicht überschritten werden.

AP3: Synthetischer seismischer Katalog

Zeitschritteinfluss — 1

Elementgröße 2m×0,5m×2m

| Zeitschritt | Max. Fracfläche [m ²] | % ⁽¹⁾ | Max. Fracvolumen [m ³] | % ⁽²⁾ |
|-------------|-----------------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|
| 6 s | 2,35E+04 | 60,3% | 1,18E+04 | 0,30% |
| 12 s | 2,48E+04 | 63,7% | 1,24E+04 | 0,32% |
| 18 s | 2,37E+04 | 60,8% | 1,19E+04 | 0,30% |
| 24 s | 2,37E+04 | 60,9% | 1,19E+04 | 0,30% |
| 30 s | 2,29E+04 | 58,7% | 1,14E+04 | 0,29% |
| 60 s | 2,38E+04 | 60,9% | 1,19E+04 | 0,30% |
| 180 s | 2,11E+04 | 54,2% | 1,06E+04 | 0,27% |

| | |
|---------------------------------|----------|
| Gesamtfläche [m ²] | 3,60E+04 |
| Gesamtvolumen [m ³] | 7,20E+06 |

- (1) Prozentanteil der maximalen Fracfläche an der Gesamtfläche
 (2) Prozentanteil des maximalen Fracvolumens am Gesamtvolumen

➤ Einfluss der zeitlichen Diskretisierung kann als vernachlässigbar angesehen werden.

AP3: Synthetischer seismischer Katalog

Zeitschritteinfluss — 2

Elementgröße 2m×0,5m×2m

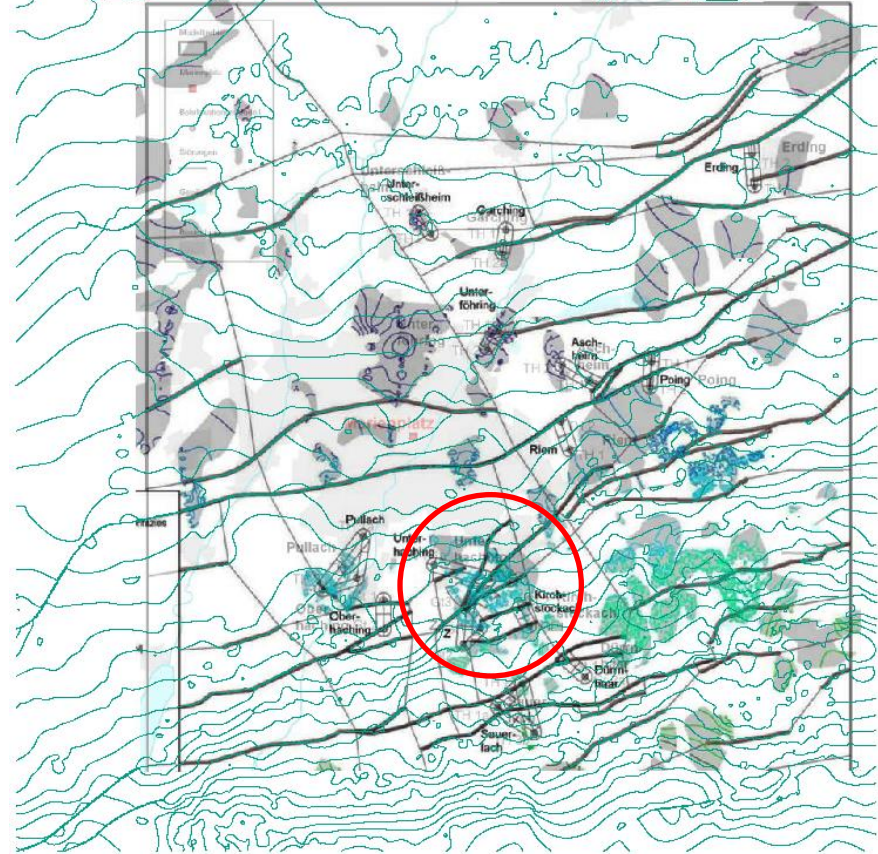
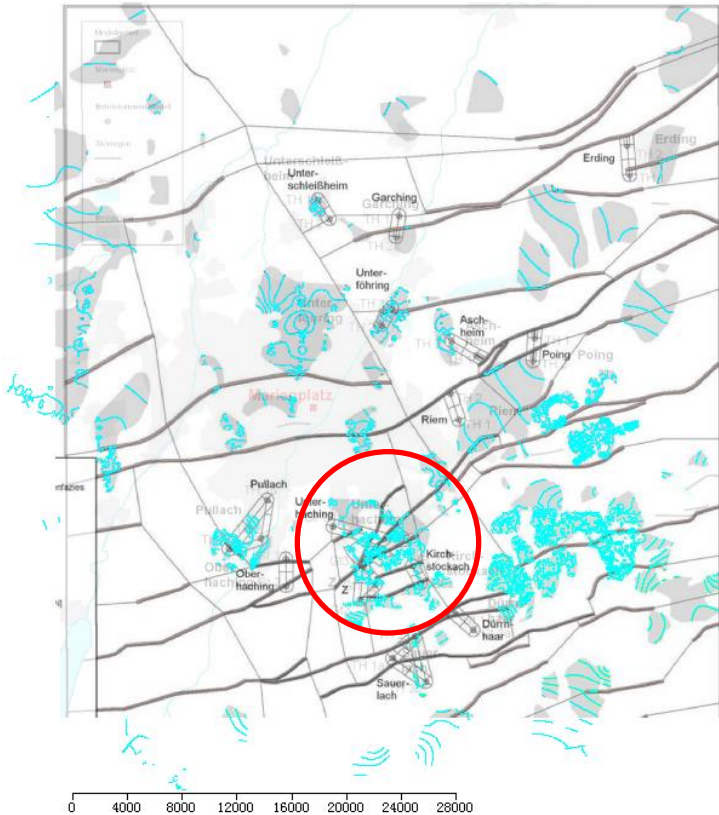
| | Max. Fracfläche [m ²] | % ⁽¹⁾ | Max. Fracvolumen [m ³] | % ⁽²⁾ |
|---------------------------|-----------------------------------|------------------|------------------------------------|------------------|
| Mittelwert | 2,85E+04 | 60,9% | 1,19E+04 | 0,3% |
| Standardabweichung | 6,27E+02 | 1,6% | 3,13E+02 | 0,008% |
| %⁽³⁾ | 2% | 3% | 3% | 3% |

-
- (1) Prozentanteil der maximalen Fracfläche an der Gesamtfläche
 - (2) Prozentanteil des maximalen Fracvolumens am Gesamtvolumen
 - (3) Verhältnis Standardabweichung : Mittelwert

➤ Einfluss der zeitlichen Diskretisierung kann als vernachlässigbar angesehen werden.

AP4: Generierung des 3D-Simulationsmodells — 1

- Georeferenzen und 2D-Gitter im Großraum München

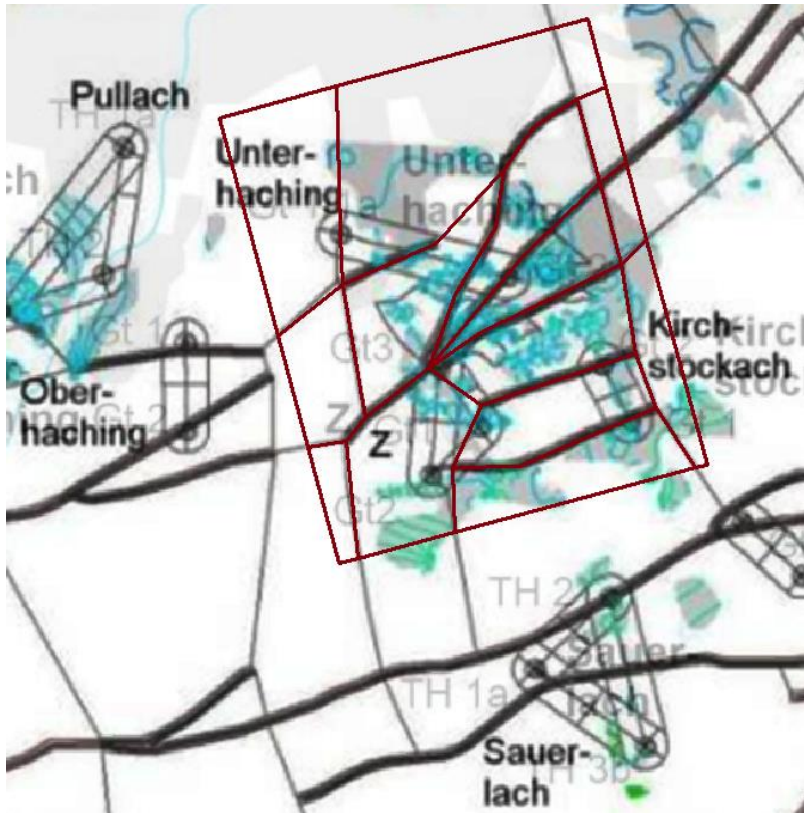


➤ Lokation der Bohrung/Verwerfung und Faziesmodell

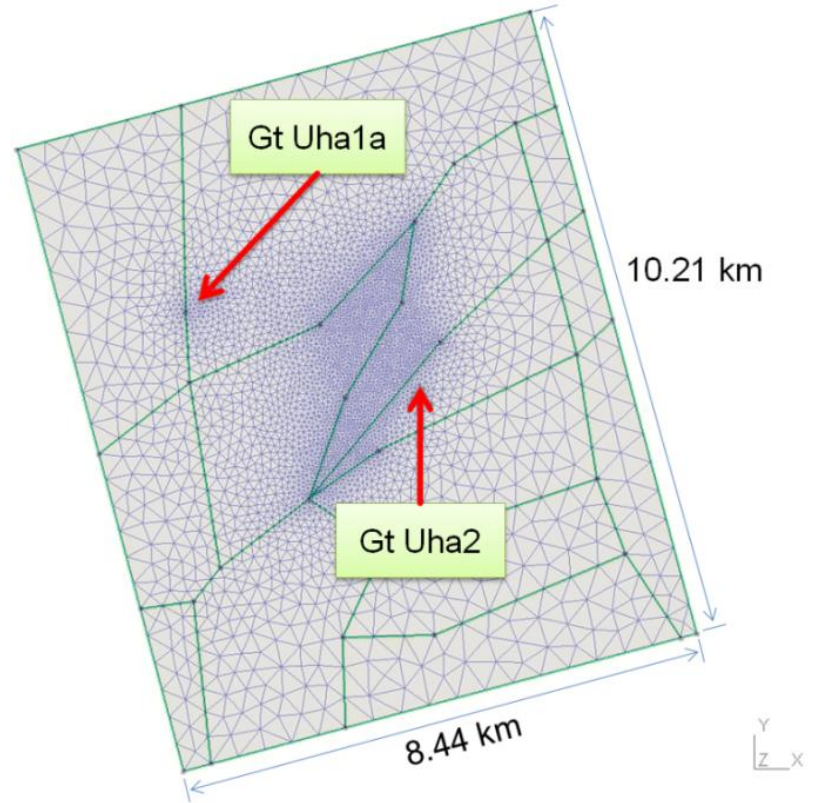
➤ Lokation der Bohrung/Verwerfung und strukturelles Modell

AP4: Generierung des 3D-Simulationsmodells — 2

- Georeferenzen und 2D-Gitter



Tiefe: 2.060 m bis 4.560 m



➤ Kartenkante rund 15 x 15 km²

➤ Numerische Modellgröße

AP4: Generierung des 3D-Simulationsmodells — 3

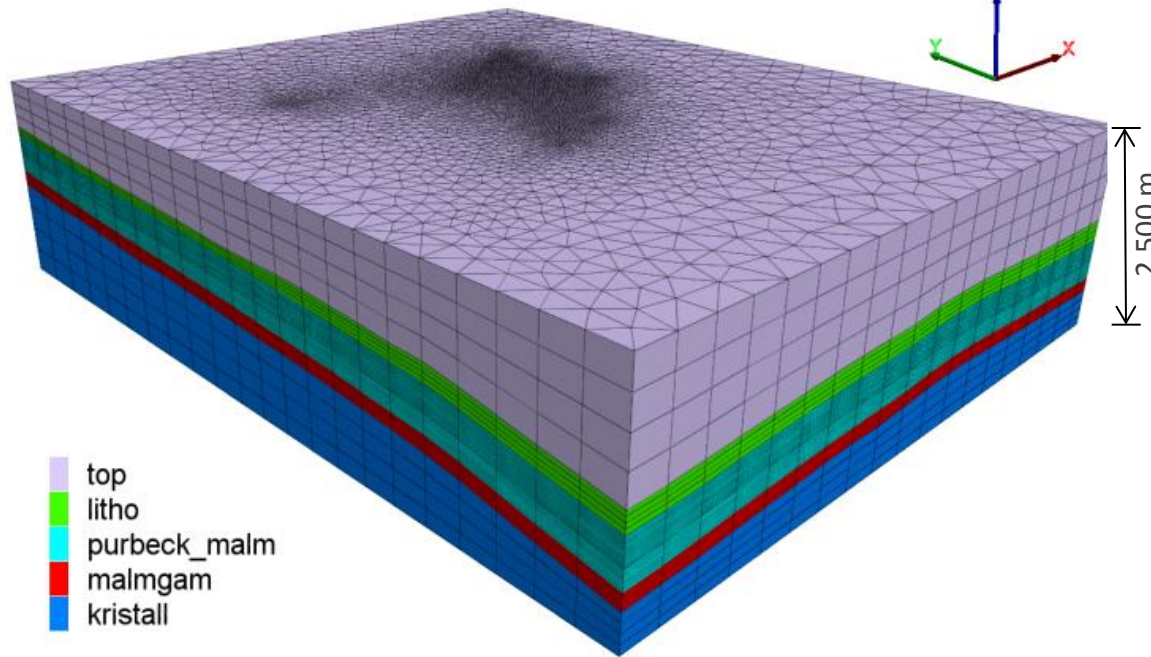
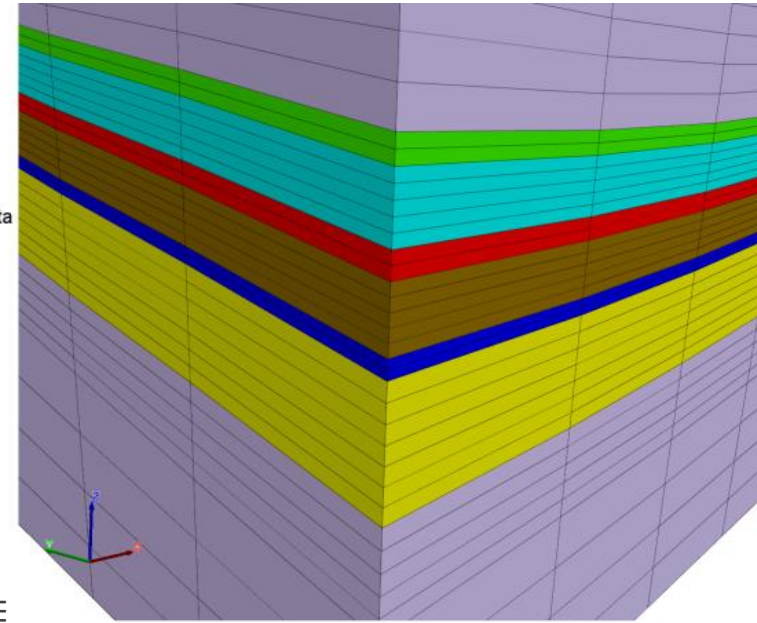
| Gruppe in FLAC3D | | Anzahl der vertikalen Gitterelemente | Mittlere Tiefe | Mittlere Dicke | Petrographie |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------------|------------------|----------------|---------------------------------|
| Top | | 4 | -2.060 - 2.832 m | 772 m | Kies, Kalksandstein, Tonmergel |
| Litho | | 4 | -2.832 - 2.921 m | 159 m | Kalkstein, Kalkmergel |
| Purbeck/ Malm | Purbeck | 2 | -2.991 - 3.482 m | 491 m | Kalkmergel, Dolomit |
| | Malm ζ | 5 | | | |
| | 1. Haupteinströmungszone | 2 | | | |
| | Malm ϵ + Malm ζ | 5 | | | |
| | 2. Haupteinströmungszone | 2 | | | |
| | Malm δ | 7 | | | |
| Malmgam | | 5 | -3.482 - 3.654 m | 172 m | Kalkstein, Kalkmergel, Tonstein |
| Kristallin | | 4 | -3.654 - 4.560 m | 906 m | Paragneis, Granit |
| Zusammenfassung | | 40 | -2.060 - 4.560 m | 2.500 m | - |

AP4: Generierung des 3D-Simulationsmodells — 4

- **3D-Modell**

- Anzahl der Elemente:
325.280 (40 x 8.132)

purbeck
malm_zeta
Hauptzufluss_1
malm_epsilon_zeta
Hauptzufluss_2
malm_delta

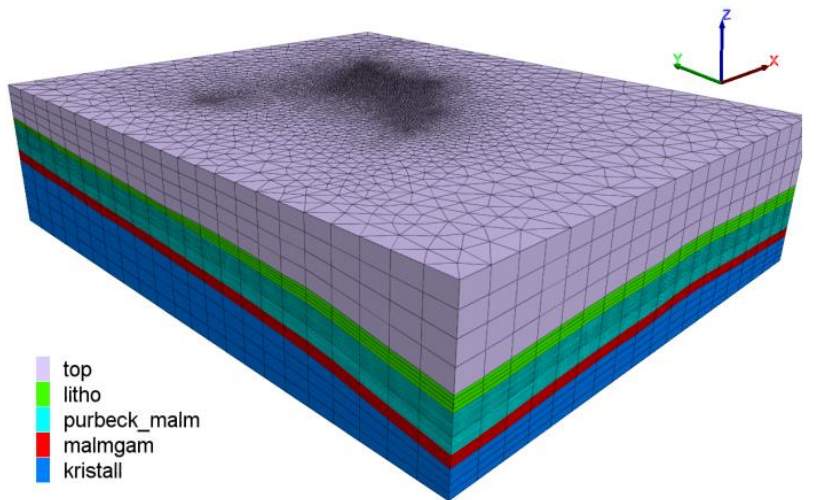


top
litho
purbeck_malm
malmgam
kristall

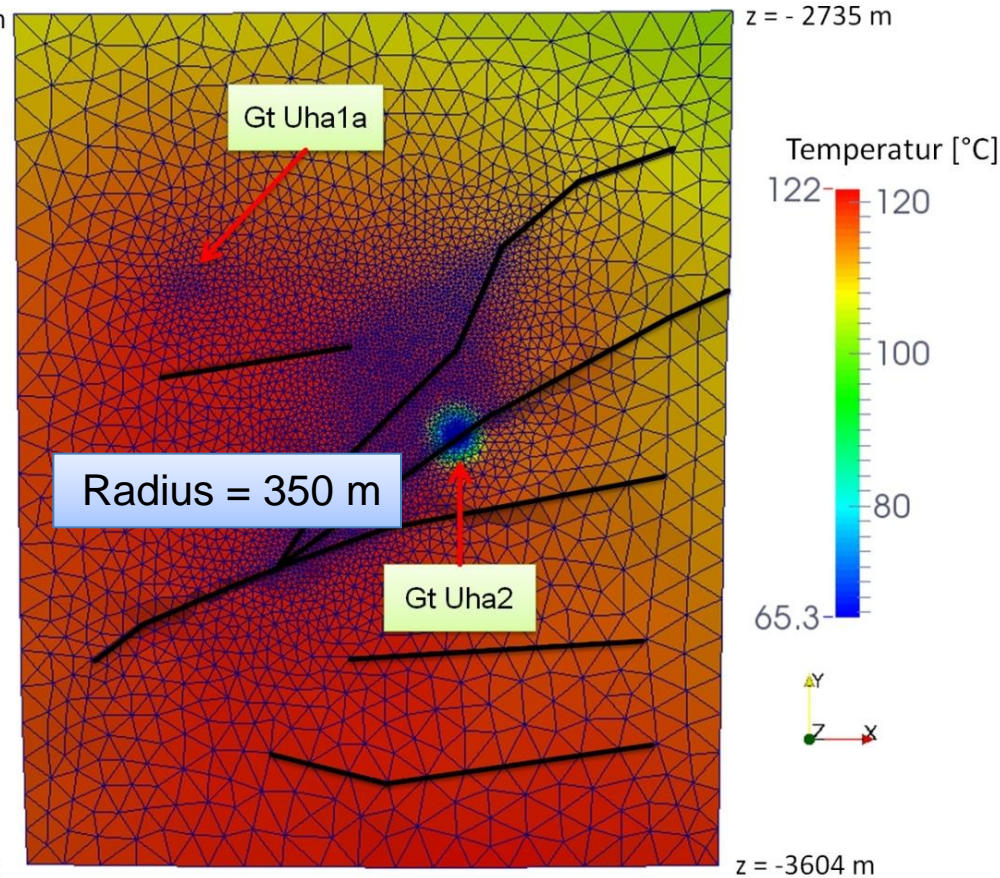
AP4: Ergebnis der TH-gekoppelten Simulation

- Temperaturverteilung nach 10 Jahren

- 1. Haupteinströmungszone

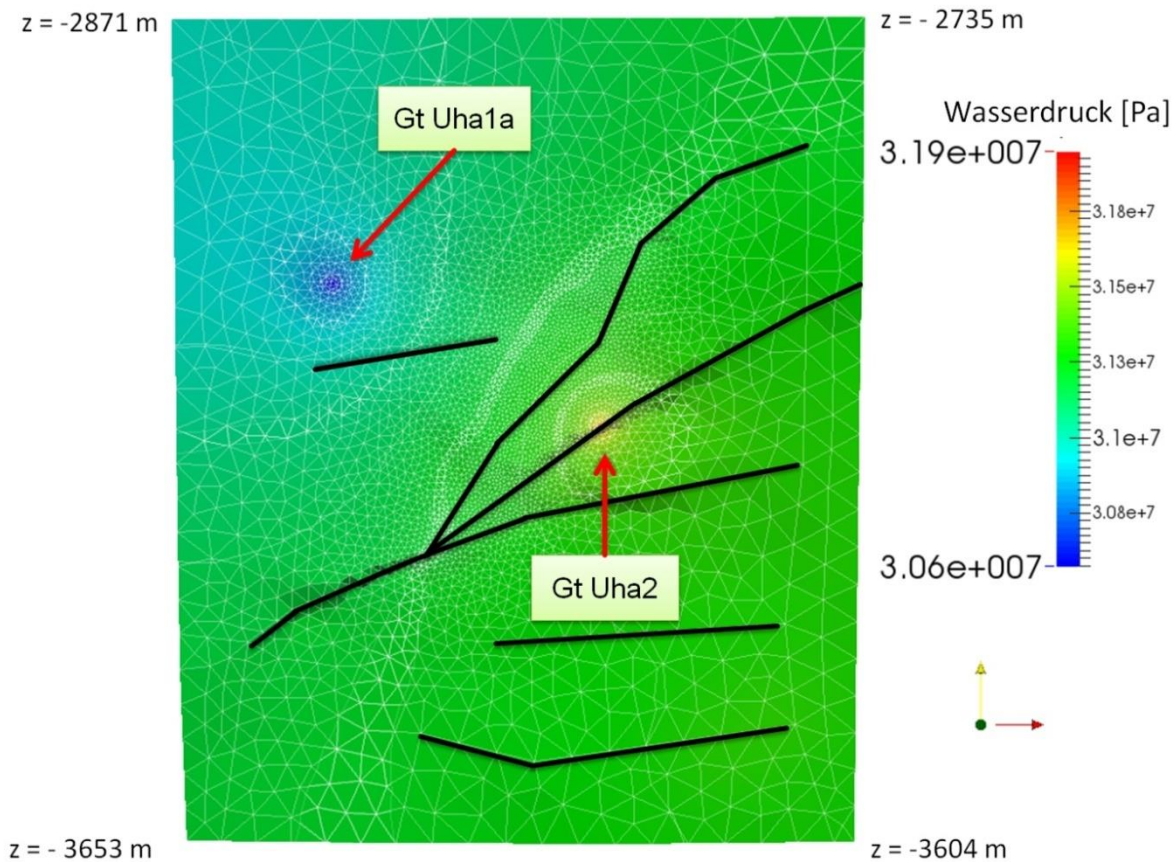


z = - 3653 m



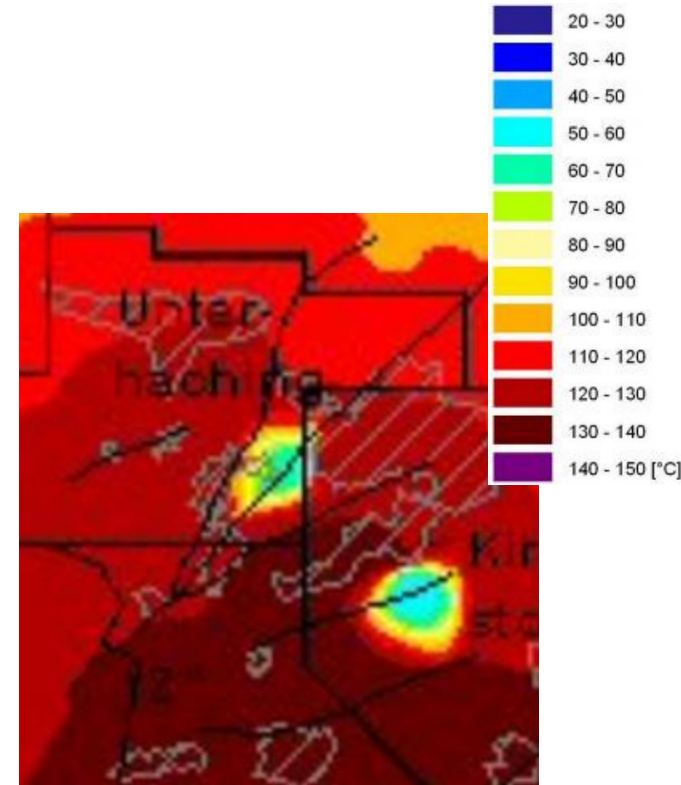
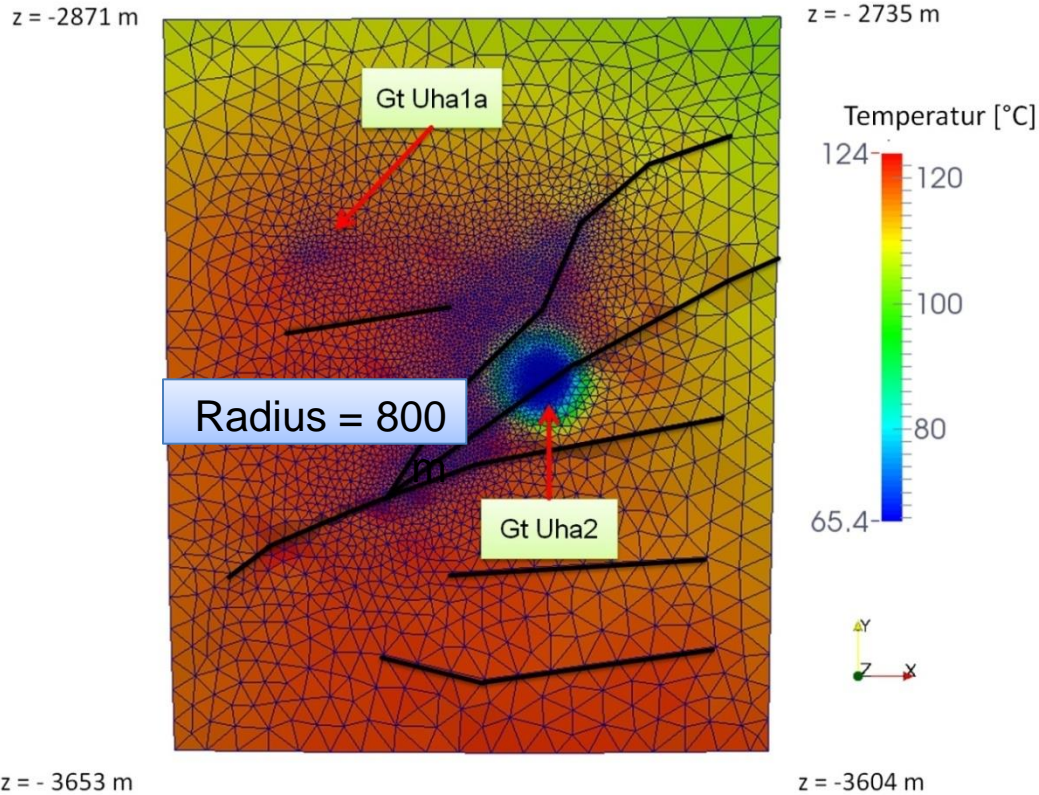
AP4: Ergebnis der TH-gekoppelten Simulation

- Porenwasserdruckverteilung nach 10 Jahren
 - 1. Haupteinströmungszone



AP4: Ergebnis der TH-gekoppelten Simulation

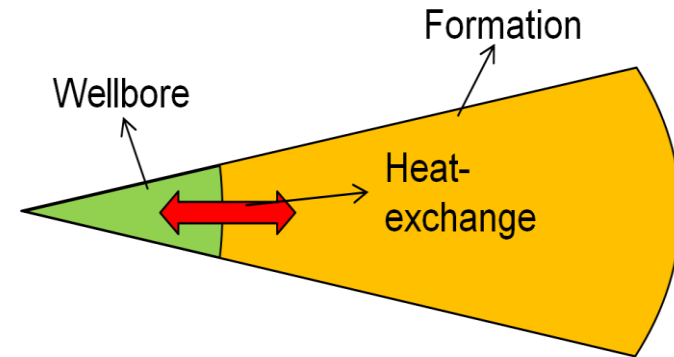
- Temperaturverteilung nach 60 Jahren
 - 1. Haupteinströmungszone



AP4: 2D-THM-Simulation Unterhaching — 1

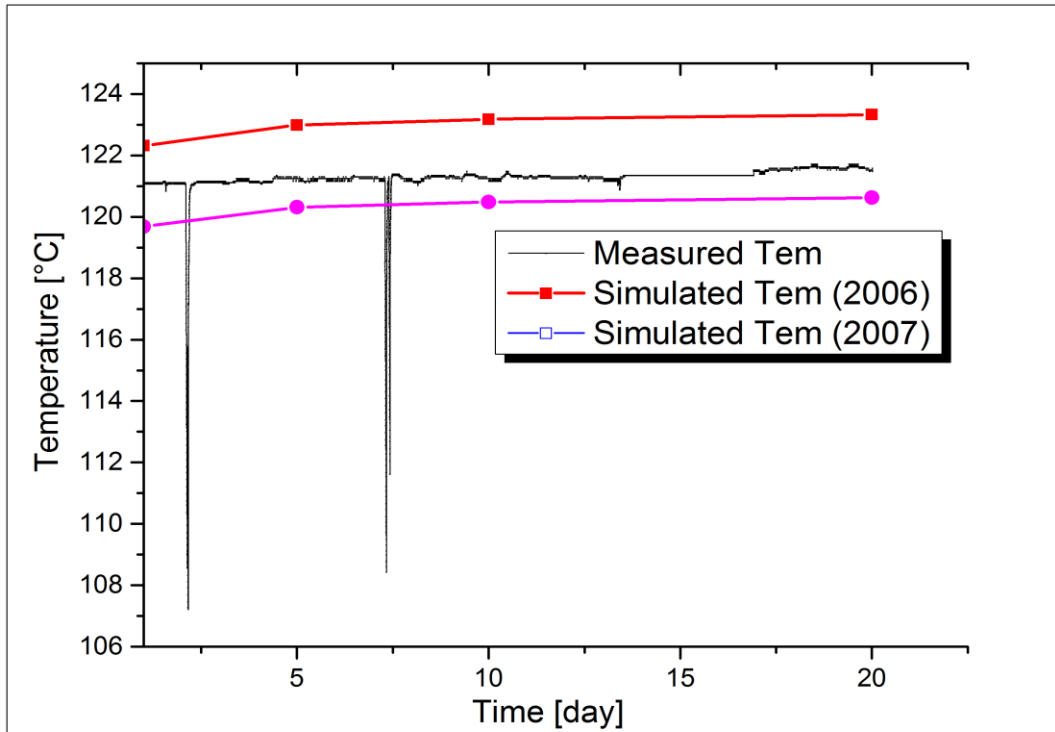
- Neu entwickelte Simulationsmethode
 - Simultanberechnung Temperaturprofil in Bohrloch und Formation
 - Bestimmung zugehöriger Änderungen im nahen Spannungsfeld

| Wellbore r_w | Formation ($r =$ distance to wellbore center) |
|----------------|--|
| W_0 | F_0 |
| W_1 | F_1 |
| W_2 | F_2 |
| ⋮ | ⋮ |
| W_{n-1} | F_{n-1} |
| W_n | F_n |



AP4: 2D-THM-Simulation Unterhaching — 2

- Verifizierung der neu entwickelten Simulationsmethode



= Vergleich
der outlet-Temperatur

simuliert und zeitabhängig

mit

gemessen

für die Produktionsbohrung
GT-1a Unterhaching*

* GT-1a Unterhaching

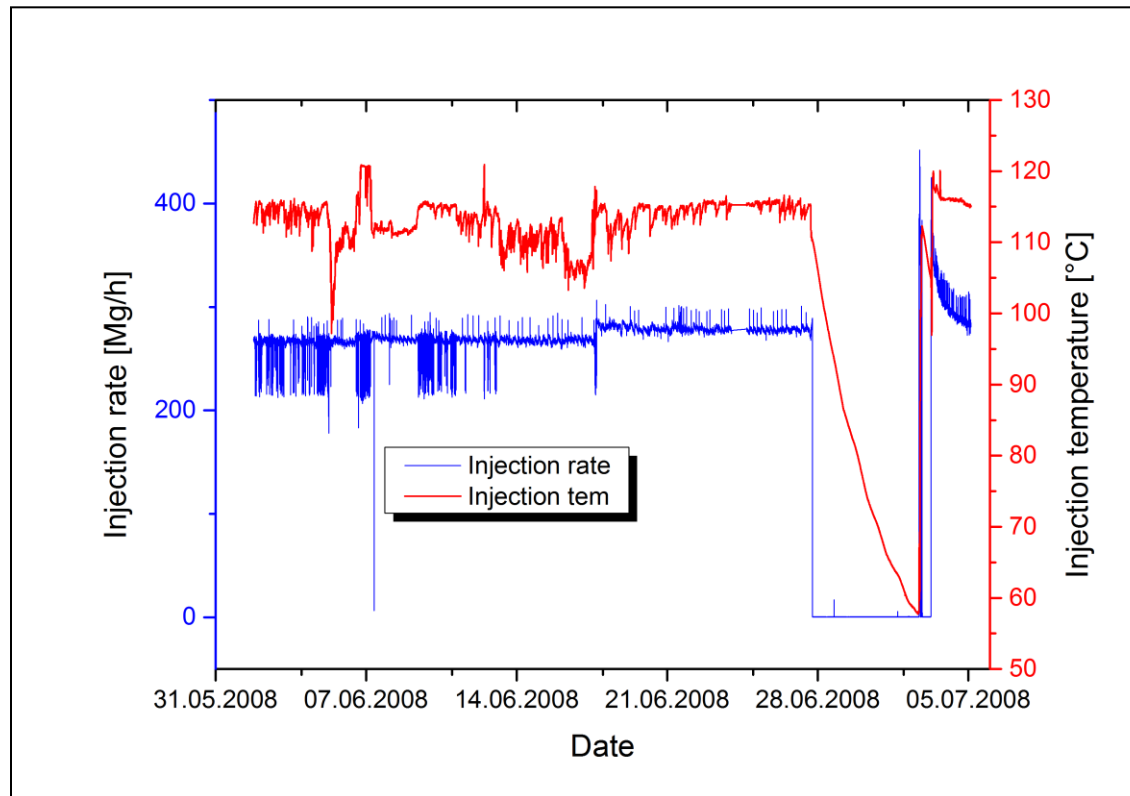
Simulationsergebnisse basieren auf gemessener BHT bei 3.000 m
(124.5 °C in 2006 und 121.7 °C in 2007)

Ø Produktionsrate: rund 79 l/s

AP4: 2D-THM-Simulation Unterhaching — 3

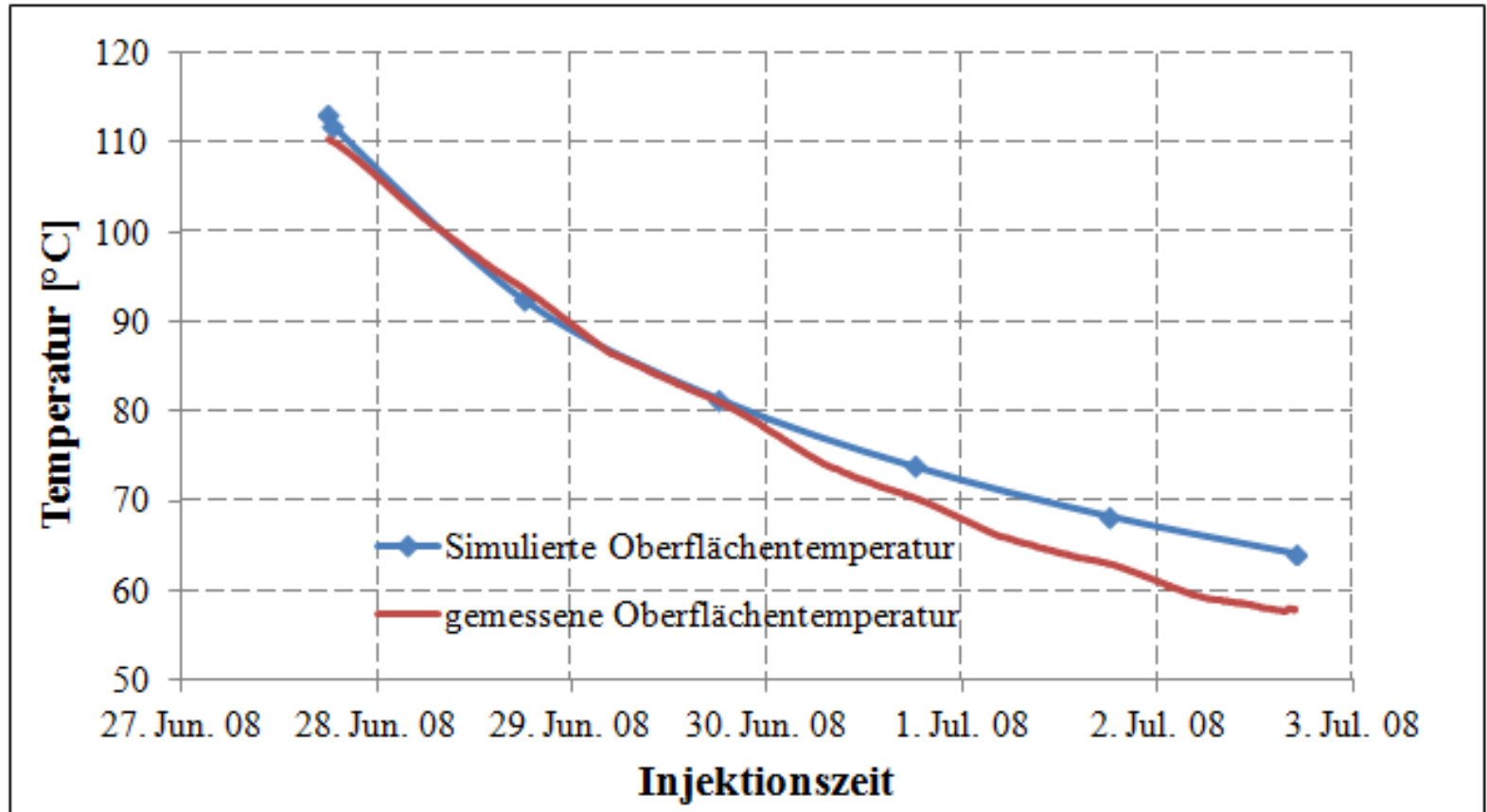
- **Injektionsrate und Injektionstemperatur**

- Betriebsdaten: Juni – Juli 2008



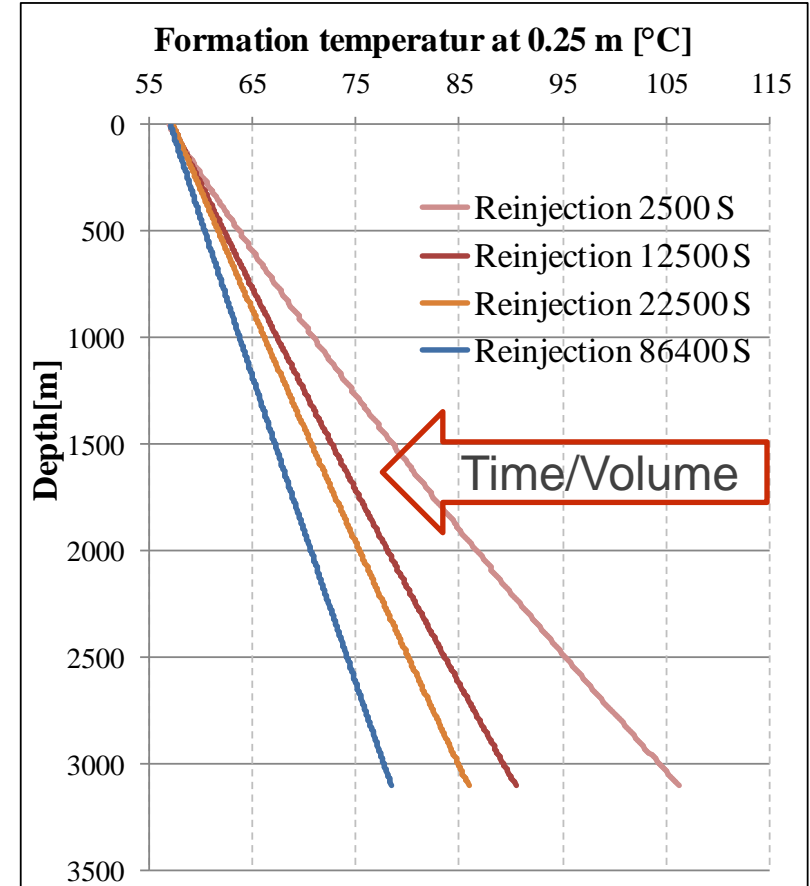
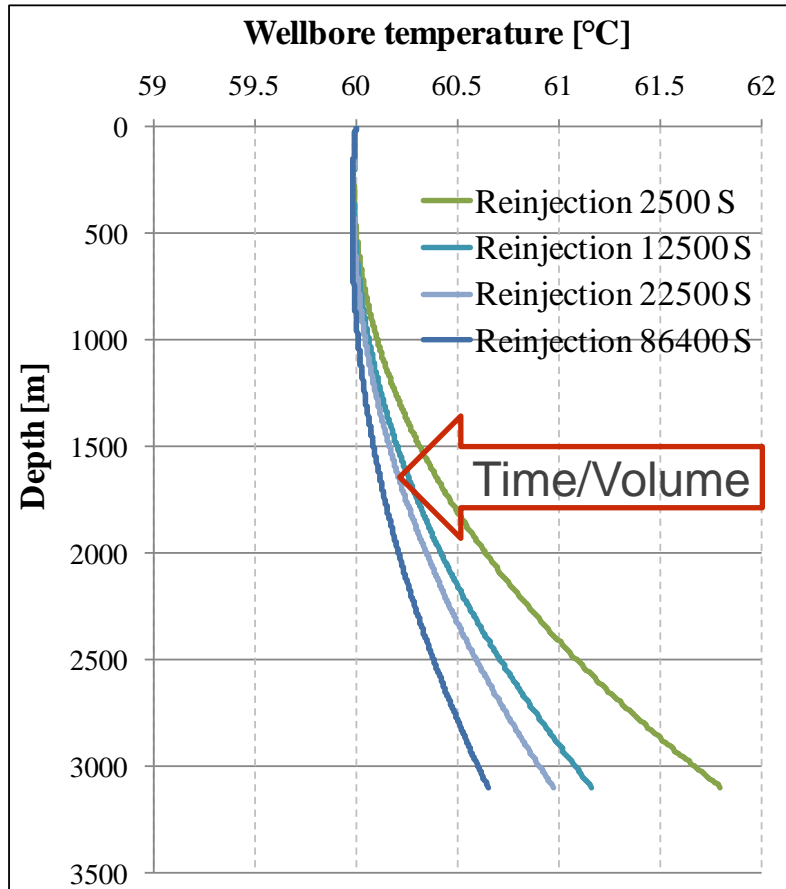
AP4: 2D-THM-Simulation Unterhaching — 4

- **Simulierter und gemessener Temperaturverlauf**
am Kopf der Injektionsbohrung



AP4: 2D-THM-Simulation Unterhaching — 5

Injektionsrate von 102,7 l/s und -temperatur von 60 °C

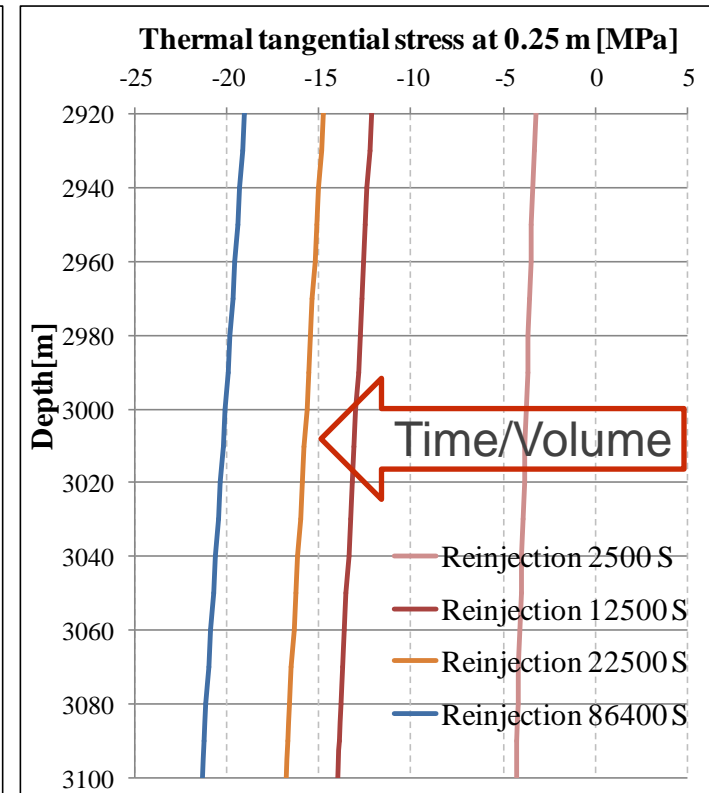
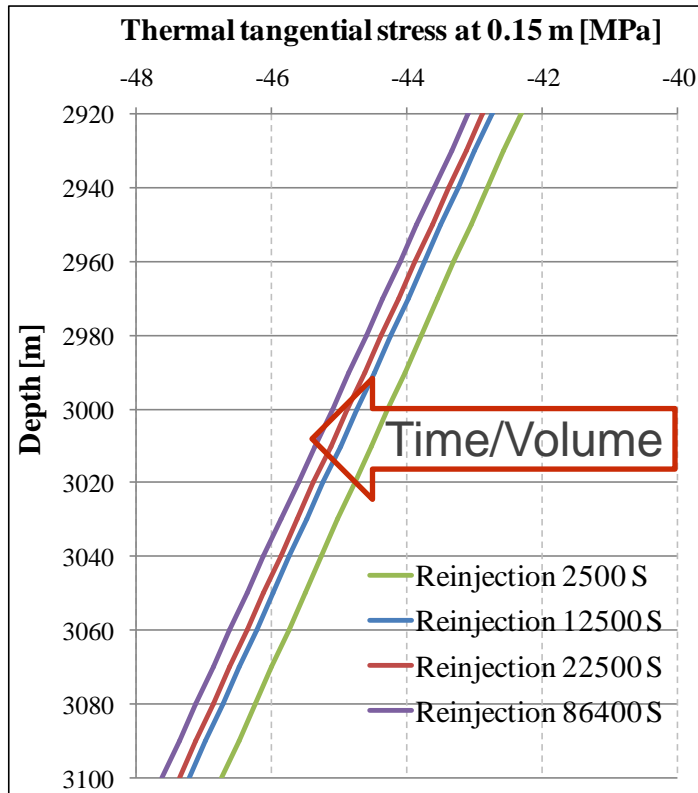


➤ Schlussfolgerung

Reservoirabkühlung (rechts) ↑ deutlich mit Injektionszeit/-volumen ↑.
Bohrlochtemperatur (links) ≈ konstant.

AP4: 2D-THM-Simulation Unterhaching — 6

Injektionsrate von 102,7 l/s und -temperatur von 60 °C



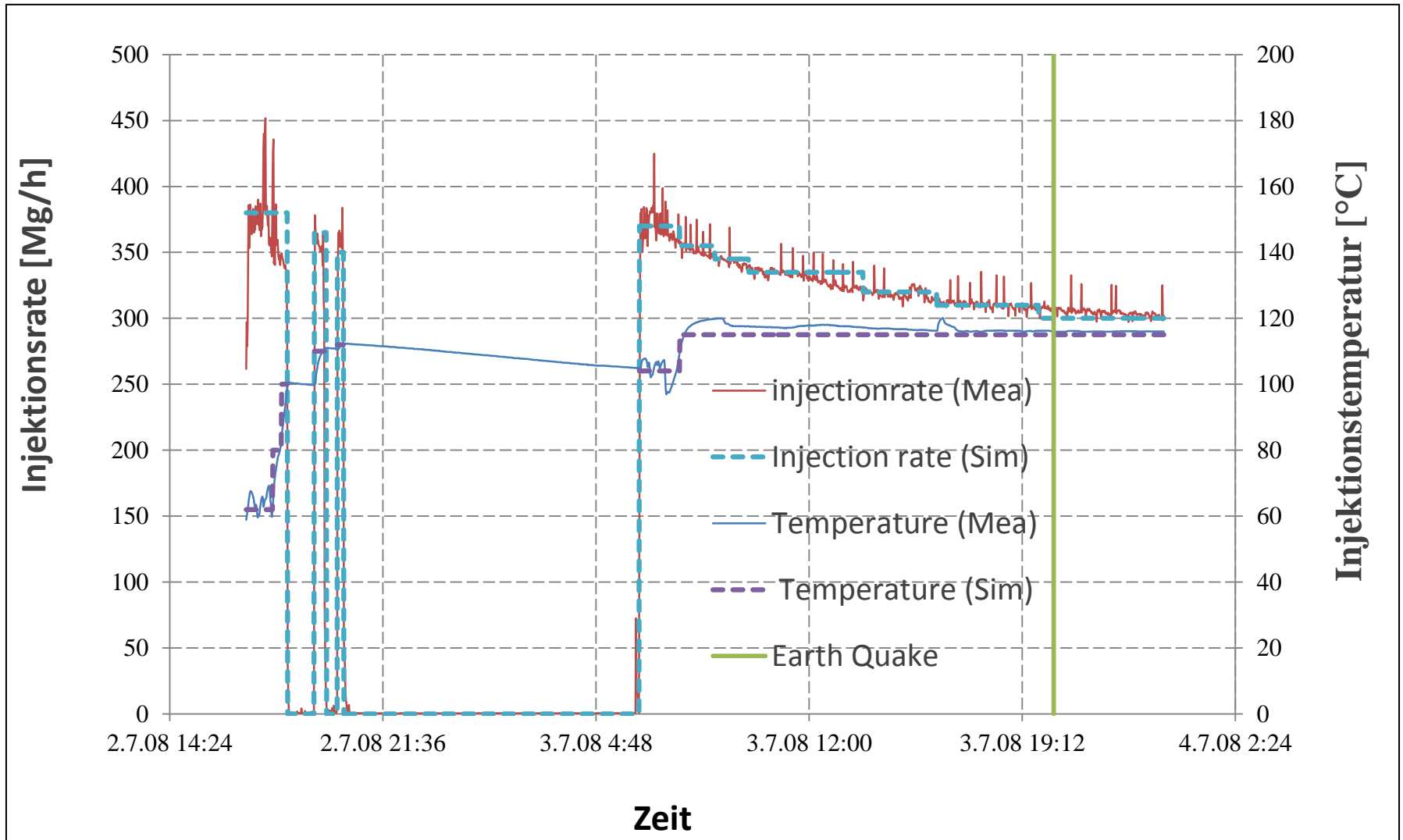
➤ Schlussfolgerung

Thermische Zugspannung im Reservoir (rechts) ↑ mit Injektionszeit/-volumen ↑
bzw. Reservoirabkühlung.

Die dadurch entstandene Spannungsumlagerung/Verwerfung ins Grundgebirge
könnten größere **Mikrobenen** induzieren.

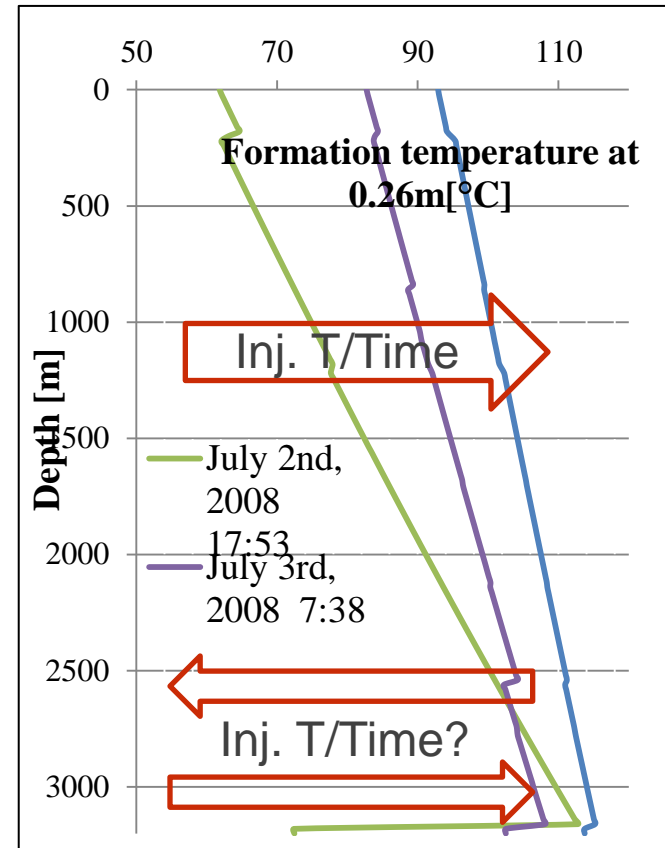
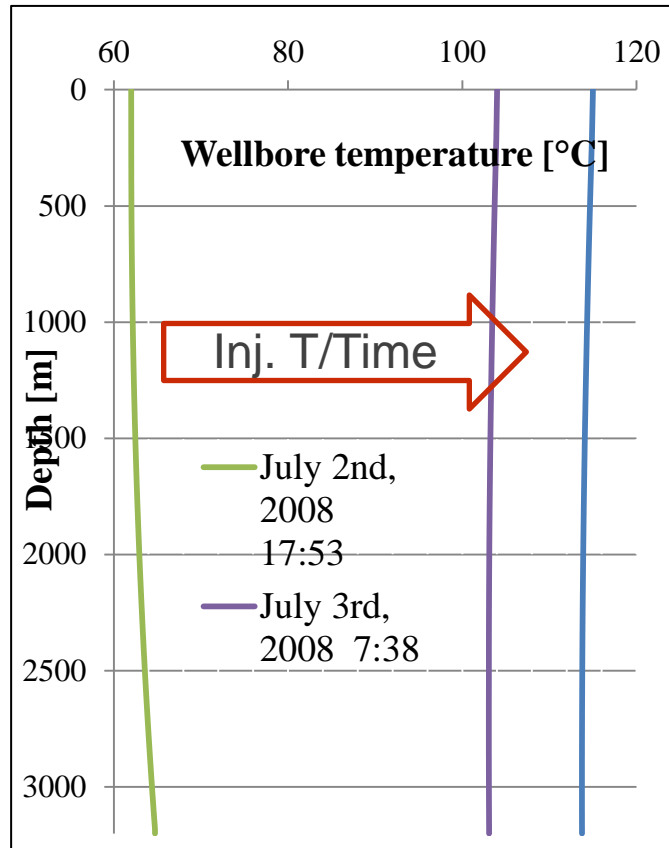
AP4: 2D-THM-Simulation Unterhaching — 5

Verlauf der Injektionsrate und -temperatur: 02.-03.07.2008



AP4: 2D-THM-Simulation Unterhaching — 6

Temperaturprofile in Bohrloch und Formation: 02.-03.07.2008



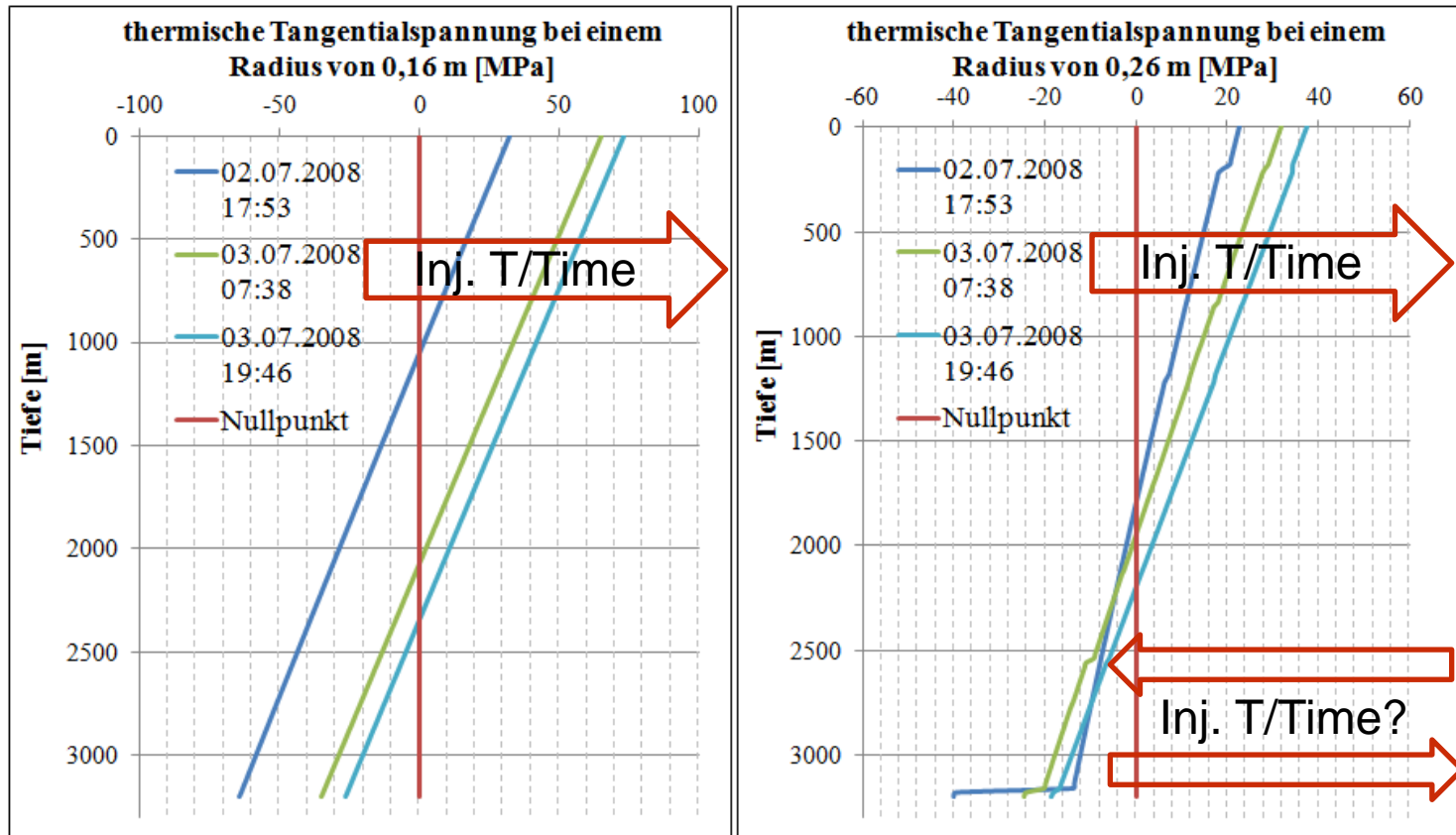
➤ Schlussfolgerung

Reservoirwiedererwärmung (links) ↑

Mit Injektionstemperatur/-zeit/-volumen: langsames ↑ und Zeitverschiebung.

AP4: 2D-THM-Simulation Unterhaching — 7

Thermische Zugspannungen: 02.-03.07.2008



➤ Schlussfolgerung

Im Reservoir **aufgebaute** Zugspannung ↓ mit Injektionstemperatur ↑/Reservoirerwärmung.

Allerdings mit **Zeitverschiebung**:

Je größer der Abstand zum Bohrloch, desto größer die Zeitverschiebung.

AP3 und AP4: Schlussfolgerung und Ausblick

- **Schlussfolgerung**

- Weitentwicklung und Integrierung von TOUGHREACT-MP und FLAC3D^{plus}
 - weitgehend abgeschlossen.
- Sensibilität der Seismizität gegenüber Gitterelementen (deutlich) und Zeitschritt (vernachlässigbar).
- 3D-Modell (10,21×8,44×2,5 km³) für Geothermie Unterhaching aufgebaut.
- TH-gekoppelte Simulation durchgeführt und 3D-TH-Modell verifiziert:
 - Simulationsergebnisse vergleichbar Ergebnissen von Schulz et al. (2012) = Großes FEFLOW Modell mit 2.8 Mio. Elementen.
 - Modell erweiterbar/anwendbar für THM-gekoppelte Simulation.

- **Ausblick**

- Mitberücksichtigung von Störungseinflüssen = hydraulisch und mechanisch.
- THM-gekoppelte Simulation mit FLAC3D-TOUGH2MP.
- Erweiterung zum Geothermiefeld.

AP5: Seismizitätseinschätzung vor Bohrbeginn — 1

- **Stimulation**

- **Identifizierte Untergrundparameter:**

- Reservoirgesteinstyp (Sprödigkeit)
- Nachbruchverhalten
- Primäres Spannungsregime/tektonische Spannung
- Störungen
- TH-Parameter

- ➔ **Mechanismen**

b-Wert & M_{wmax}

Spannungsänderung

Bedingungen einer Triggerung

- ➔ **Auswahlkriterienkatalog als Empfehlung**

- ➔ **Allgemeine Empfehlungen:**

Optimierte Injektionsstrategie

und

Multifrac-Erschließungskonzept

AP5: Seismizitätseinschätzung vor Bohrbeginn — 2

- **Produktion**

- **Identifizierte Untergrundparameter:**

- Reservoir-/Grundgebirgsgesteinstyp (Sprödigkeit)
- Nachbruchverhalten
- Primäres Spannungsregime/tektonische Spannung
- Störungen
- TH-Parameter

- **Identifizierte Betriebsparameter:**

- Produktionsrate, Re-Injektionstemperatur und Druckgefälle
- Änderungsrate obengenannter Betriebsparameter
- Dauer der Injektionsunterbrechung
- Abstand der Bohrungen in einem Feld

→ **b-Wert & M_{wmax}**

Spannungsänderung

Bedingungen einer Triggerung

→ **Empfehlung:**

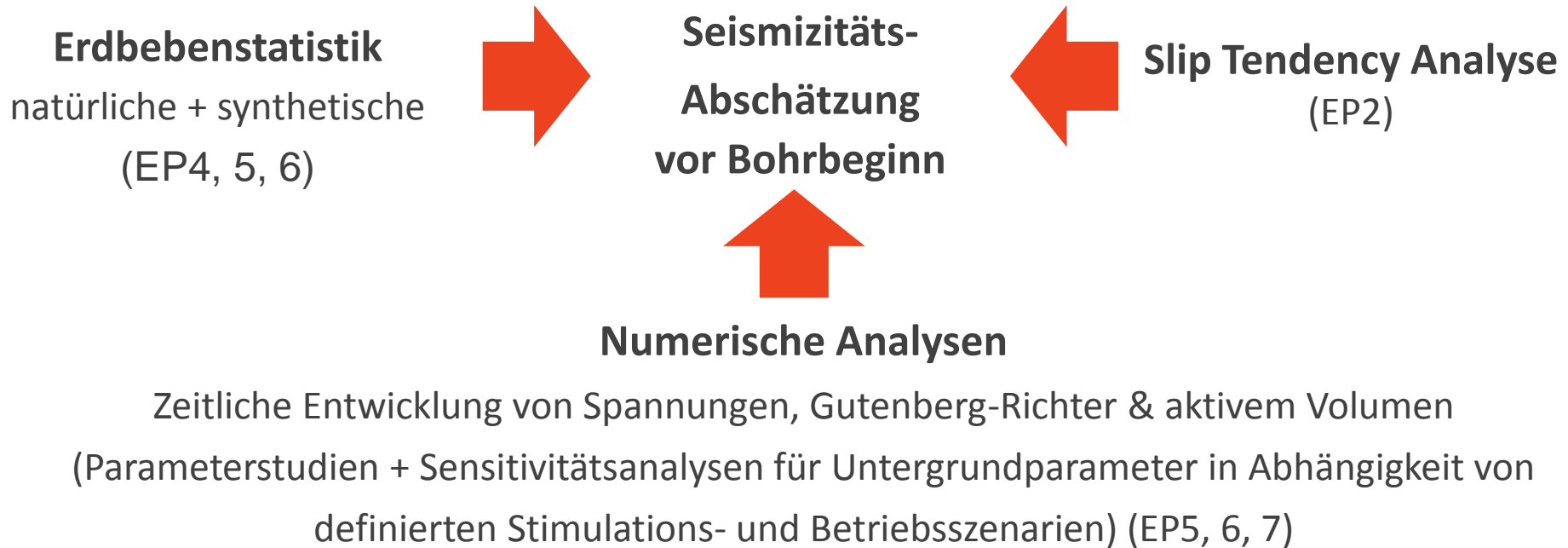
**Auswahlkriterienkatalog
und**

Maßnahmenkatalog

Methoden zur Seismizitätsabschätzung vor Bohrbeginn

Standortbezogenes Prozessverständnis

MAGS1, eigene Labordaten bzgl. Gesteinscharakteristika (EP1, 2, 3, 6, 7)



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

