

MAGS EP6:

THM:C gekoppelte Untersuchungen zu Mechanismen und freigesetzten Deformationsenergien der seismischen Ereignisse in der Reservoirstimulations- und Betriebsphase

-

Abschlussworkshop

Michael Z. Hou, Tobias Kracke, Lei Zhou, Yang Gou, Gang Li

Hannover, 17. September 2013

Inhalt

- Induzierte Seismizität: Mechanismen
- Numerische Simulationskonzepte und Erstellung eines synthetischen seismischen Katalogs in Kooperation mit EP4
- Fallstudie 1: GeneSys-Projekt in Hannover
- Fallstudie 2: DHM-Projekt in Basel
- Fallstudie 3: Unterhaching-Projekt
- Zusammenfassung
- Erste Empfehlungen zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität

Induzierte Mikroseismizität weltweit

Lokation	Nutzung	M_{\max}	Ursache	Tiefe [m]	natürl. Seismizität / Störung
Ashtabula, USA	Abfallentsorg.	3,6	Injektion	~ 2.000	ja / ja
Denver, USA	Abfallentsorg.	5,5	Injektion	~4.000	nein / ja
Coalinga, USA	Erdölprod.	6,5	Produktion	~1.200	ja / ja
Zagros Belt, Iran	Erdöl/-gasprod.	5	Injektion, Produktion	~5.000	ja / ja
Koyna, Indien	Staudamm	6,3	Auflast	-	nein / ja
The Geysers, USA	Geothermie	5	Injektion, Produktion	~1.500-3.000	ja / ja
Berlín, El Salvador	Geothermie	4,4	Inj., Prod., Alteration	700-2.500	ja / ja
Kawerau, Neuseeland	Geothermie	2,4	Injektion	~1.000-2.500	ja / ja
Cooper Basin, Australien	Geothermie	3,7	Stimulation	4.200-4.400	nein / ja

Mechanismen induzierter Seismizität bei hydraulischen Stimulationen

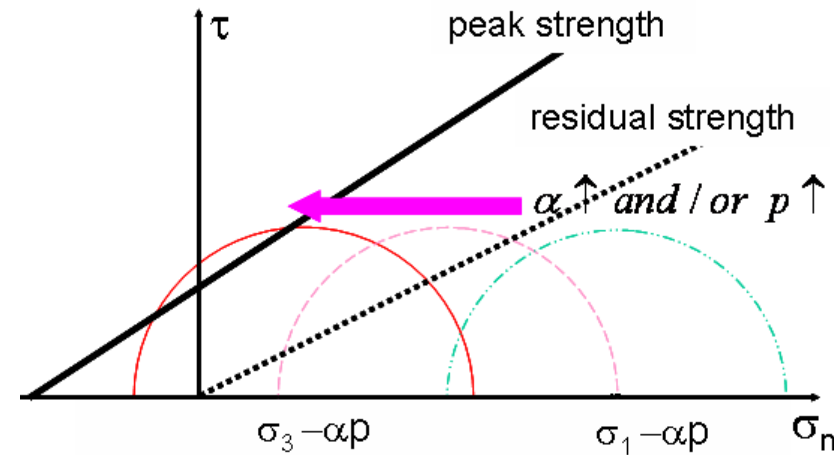
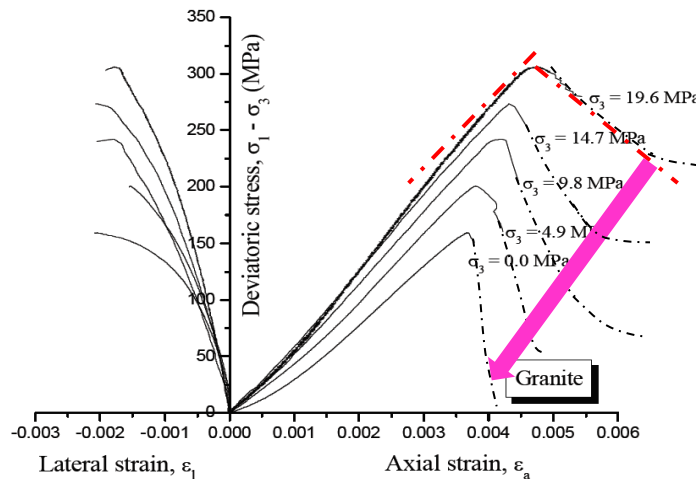
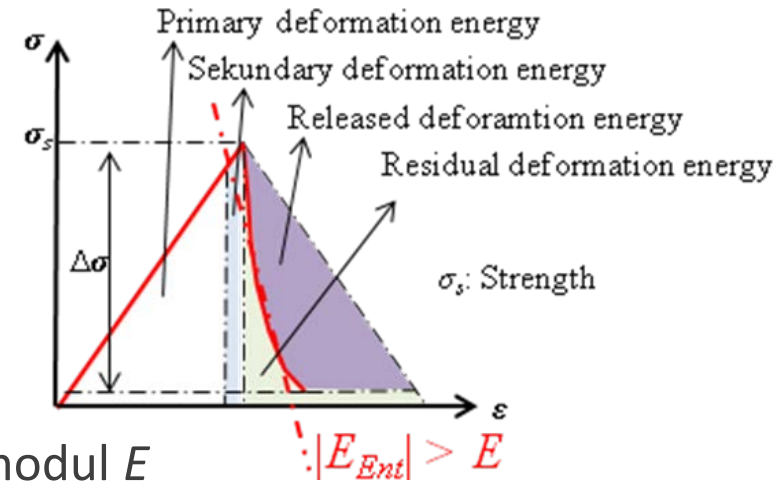
Zwei Bedingungen müssen für die spontane Freisetzung von Deformationsenergie erfüllt werden:

1. Notwendige Bedingung:

- Spannung (σ) übersteigt Gesteinsfestigkeit (σ_s)

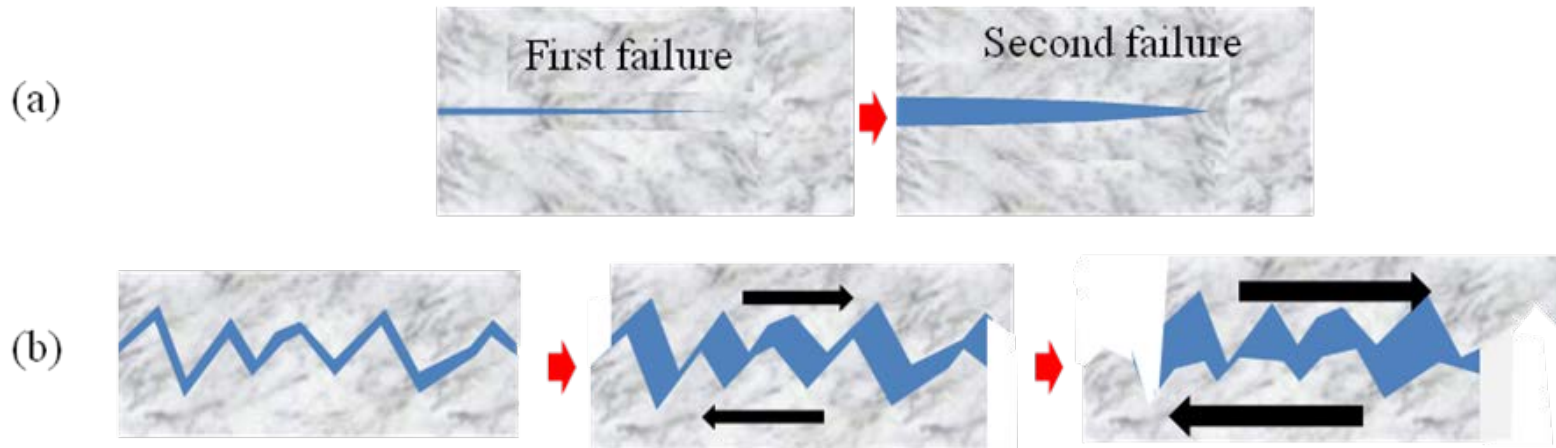
2. Hinreichende Bedingungen:

- Spannungsabbau $\Delta\sigma > 0$
- Entfestigungsmodul ($|E_{Ent}|$) größer als Auflastmodul E



Mechanismen induzierter Seismizität bei hydraulischen Stimulationen

Gesteinsbruchkriterien



$$\begin{cases} \sigma_3' < \sigma_t' & \text{(a) Zugbruch} \\ \sigma_1' > \sigma_{1f}' = N_\phi \cdot \sigma_3' + 2c\sqrt{N_\phi} & \text{(b) Scherbruch (Mohr-Coulomb)} \end{cases}$$

c = Kohäsion [MPa]

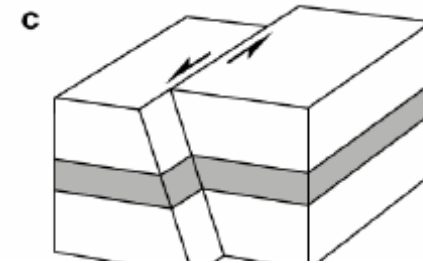
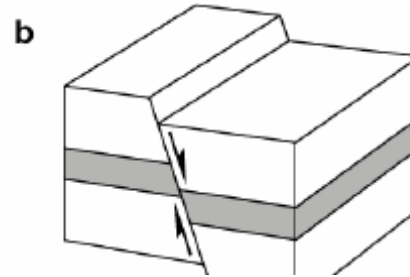
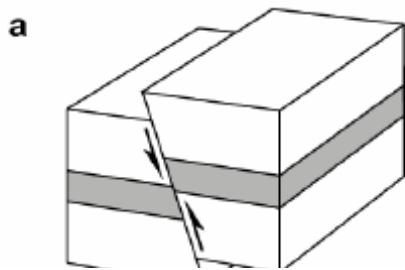
\mathcal{A} = Reibungswinkel [°]

$N_{\mathcal{A}} = (1 + \sin \mathcal{A}) / (1 - \sin \mathcal{A})$ [-] $\tilde{\mathcal{A}} =$ Zugfestigkeit [MPa]

Mechanismen induzierter Seismizität bei hydraulischen Stimulationen: Beziehung zum Primärspannungszustand

North German Basin

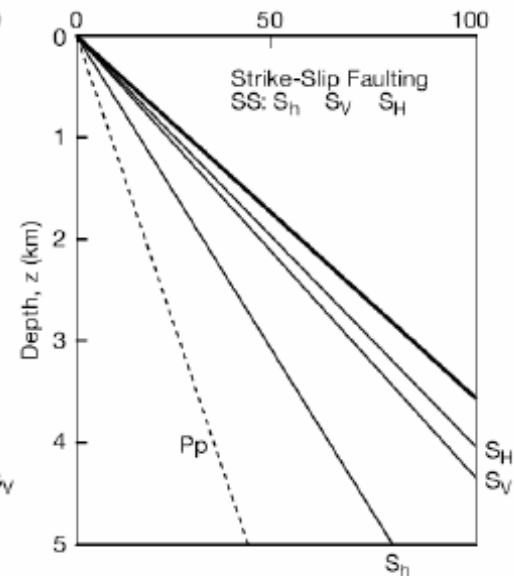
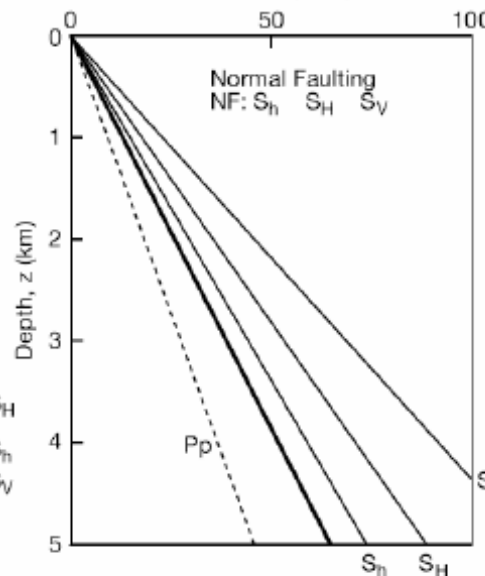
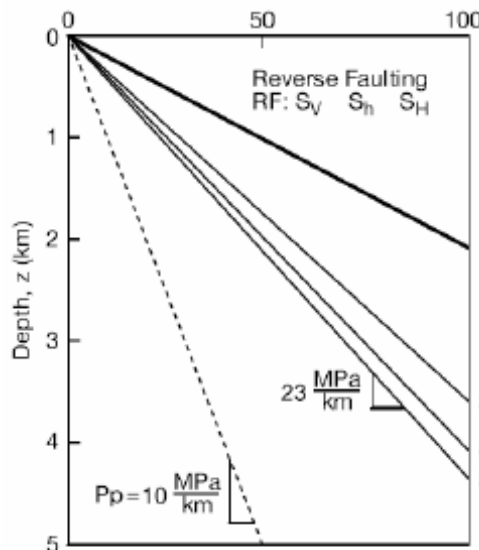
ORG



Domi. Mechanismus: Scherbruch

Zugbruch

Scherbruch



— Limiting value of principal stress from frictional faulting, Eq. (5.9)

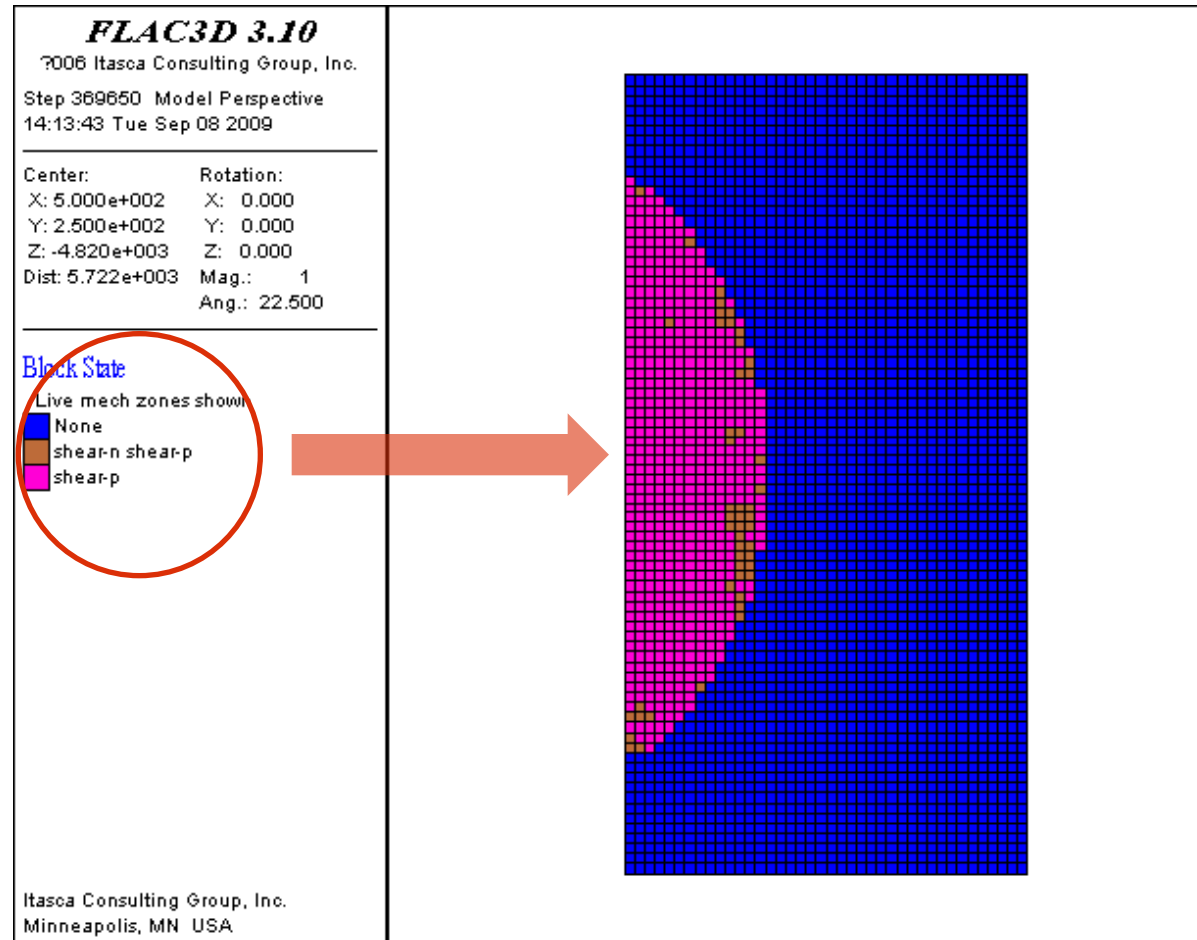
After Zoback et al. (2003)

Mechanismen induzierter Seismizität bei der Stimulation tiefengeothermischer Reservoirs

Stimulationssimulation
in FLAC3D unter
kompressiven
Spannungsbedingungen

$$(\sigma_H > \sigma_v \geq \sigma_h):$$

Scherbrüche,
insbesondere sekundäre
Scherbrüche hinter aber
nahe an der Bruchfront



Bestimmungsmethoden induzierter Seismizität infolge hydraulischer Stimulation in FLAC3D^{plus} – 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

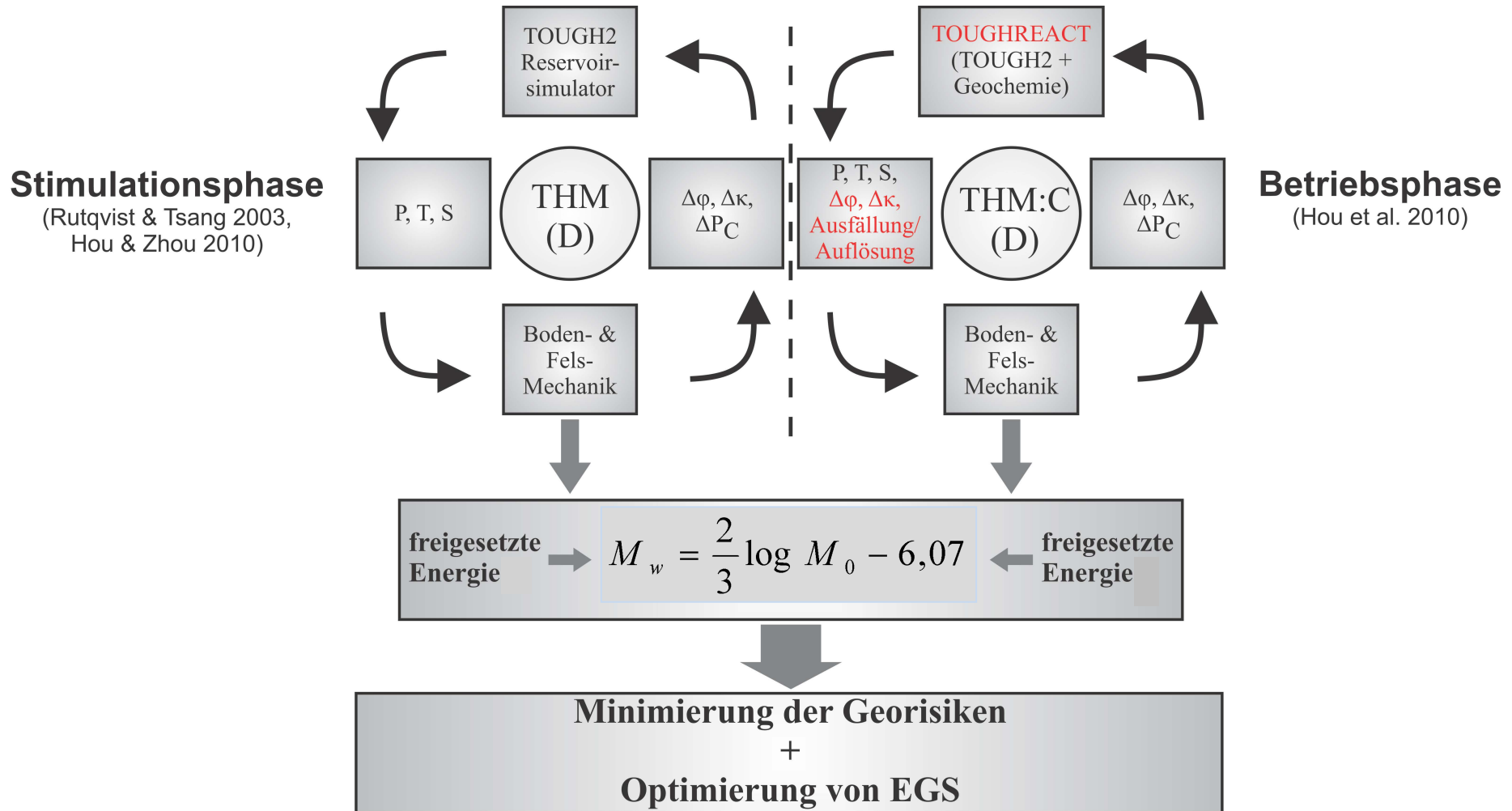
M_0 wird in FLAC3D^{plus} zeitabhängig über eine implementierte FISH-Funktion berechnet:

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

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

daraus ergibt sich die Momentenmagnitude M_w :
$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 6,07$$

THM- bzw. THM:C-Kopplungskonzept zur Modellierung der mikroseismischen Ereignisse



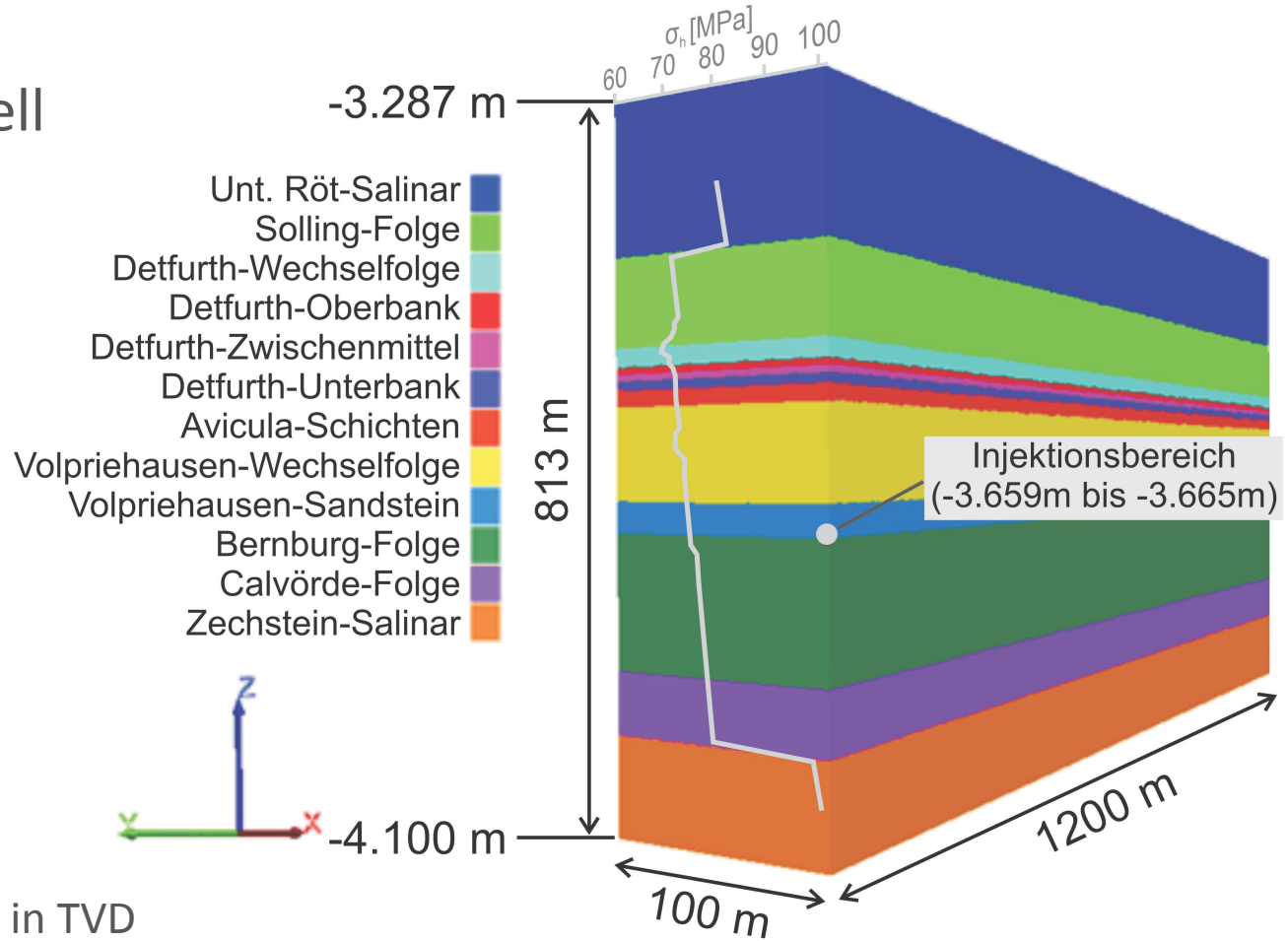
Katalogparameter

1. laufende Nummerierung und Zeiterfassung (relativ und Echtzeit)
2. Lokalisierung (X, Y, Z)
3. Berechnungsintervall
4. pro Zeitschritt aufgenommene/freigesetzte Deformationsenergie
5. kumulativ aufgenommene/freigesetzte Deformationsenergie
6. Schermodul, Lamé Parameter
7. *Bruchmechanismus*
8. Bruchfläche, Dislokationsvektor, seismisches Moment M_0
9. Momentmagnitude M_w
10. Anzahl der Bruchelemente
11. durchschnittliche Rissweite

**=> Verständnis und Verifizierung der Simulation
+ Input für Gefährdungsabschätzung**

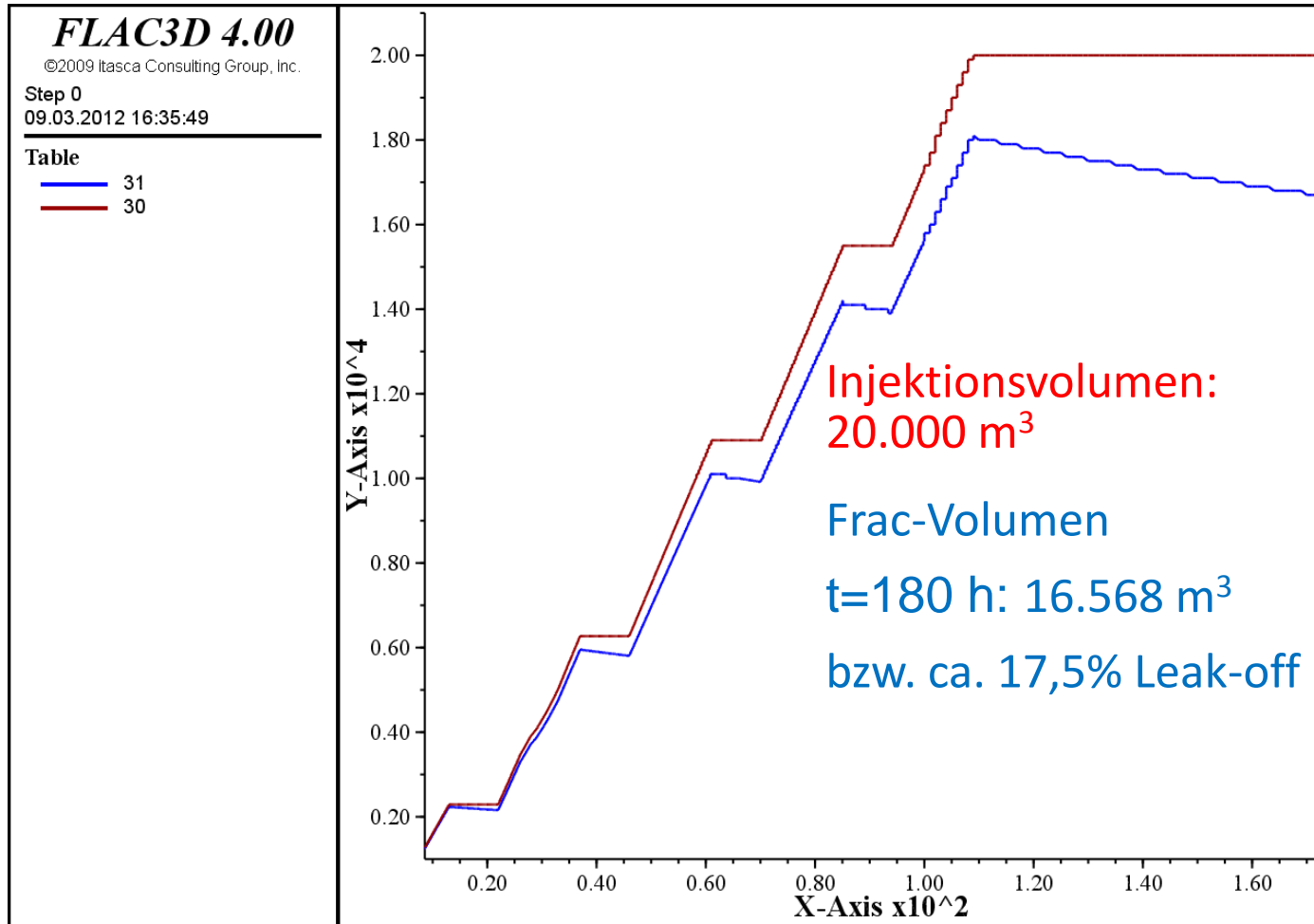
GeneSys - Modellaufbau

GeneSys – ¼ Modell



Teufenangaben in TVD

GeneSys – Stand 2012



Injektionsvolumen und berechnetes Frac-Volumen

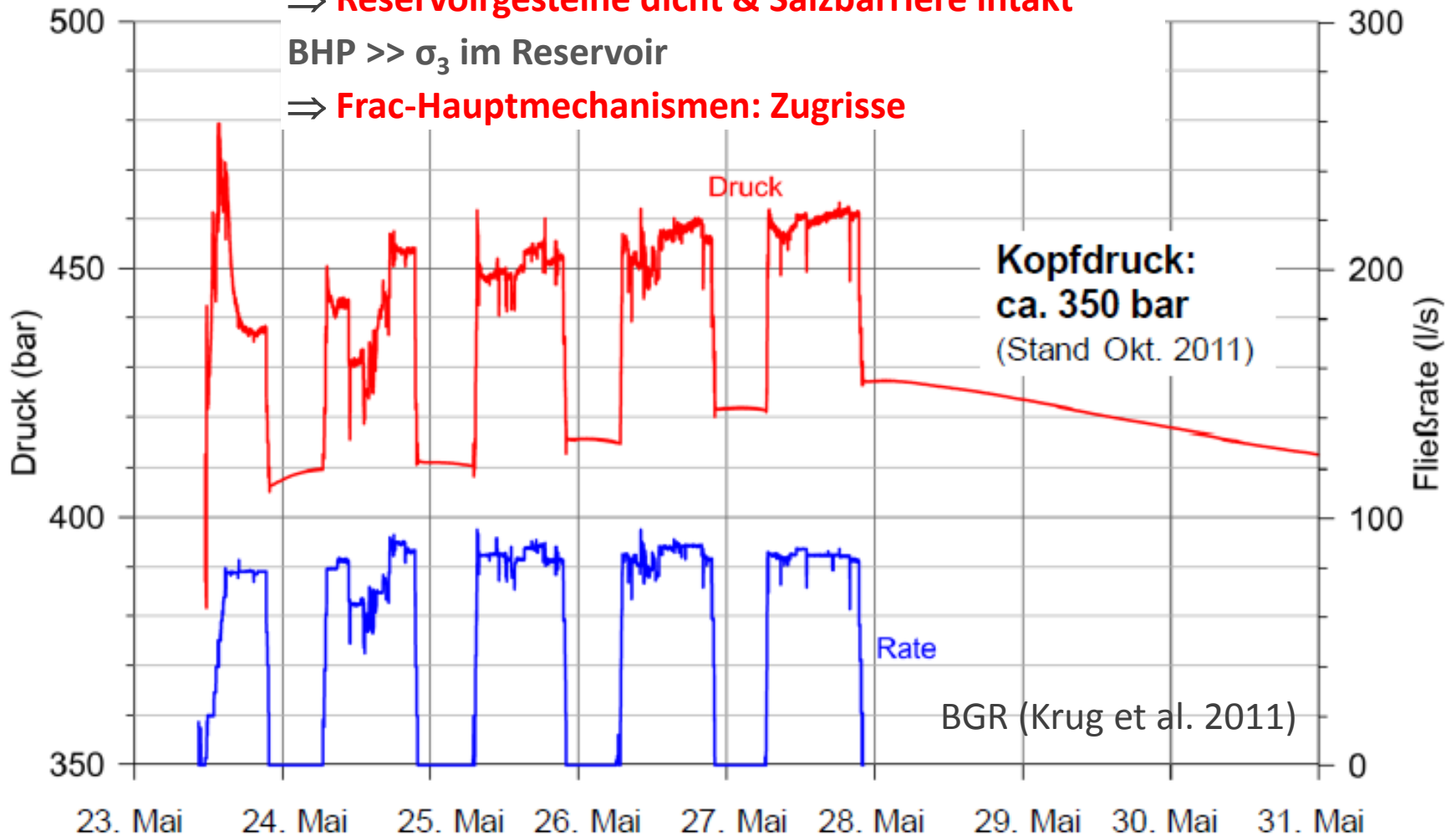
GeneSys – Stand 2012

kaum Druckabfall während der Injektionspausen

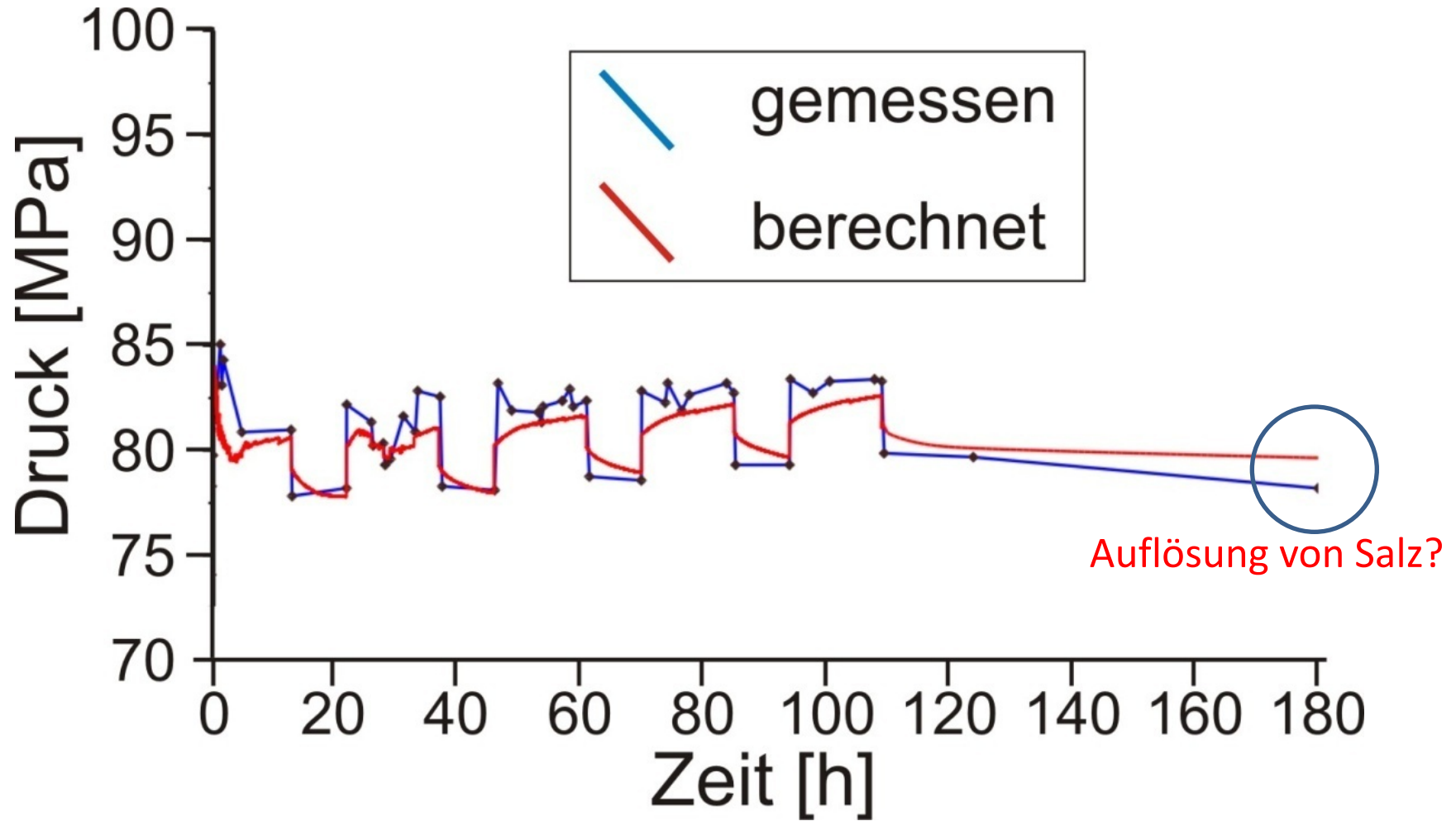
⇒ **Reservoirgesteine dicht & Salzbarriere intakt**

BHP $\gg \sigma_3$ im Reservoir

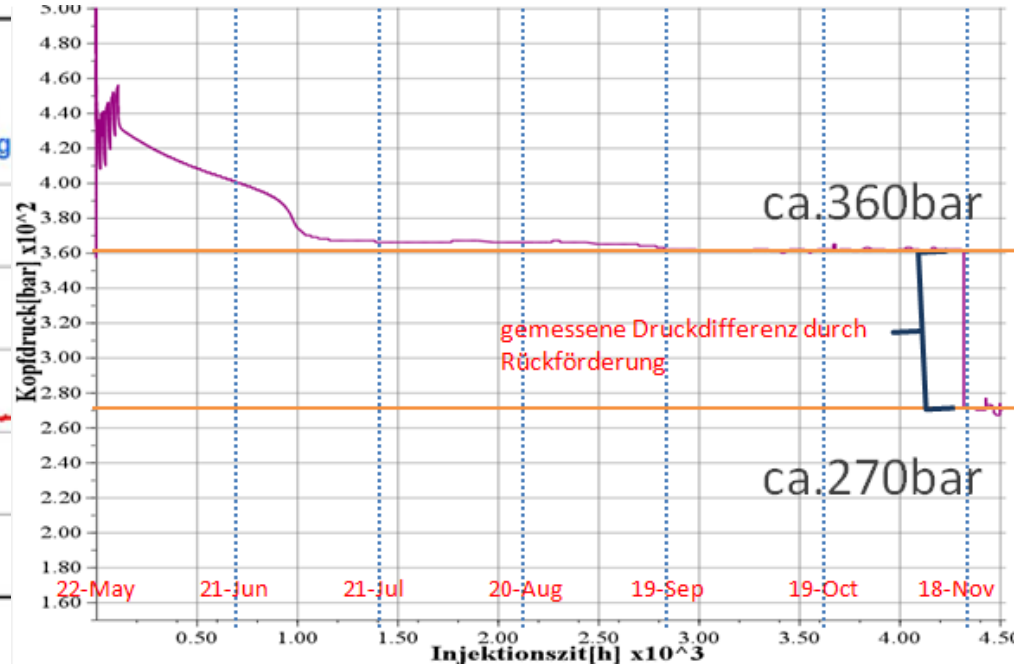
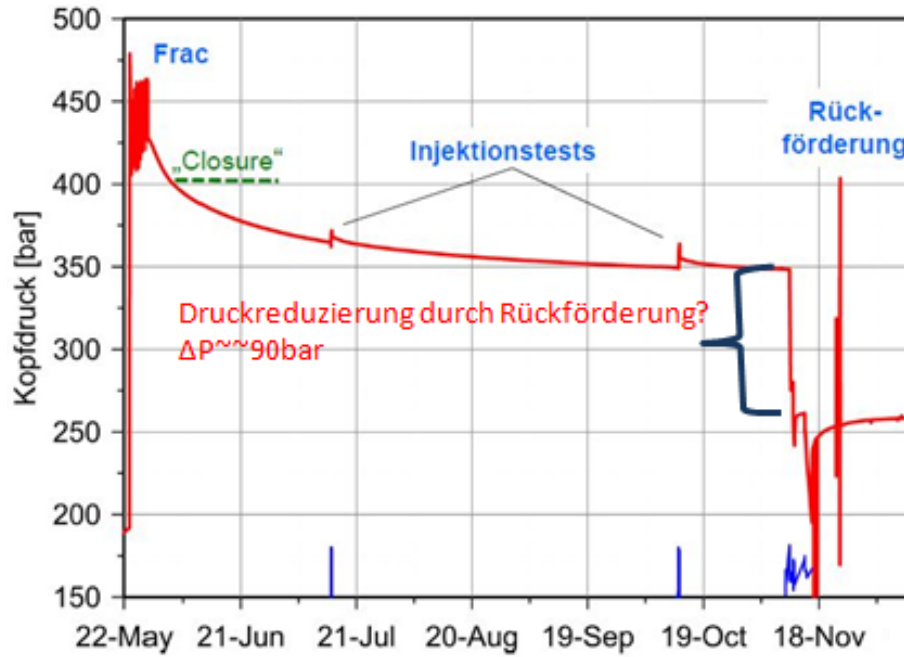
⇒ **Frac-Hauptmechanismen: Zugrisse**



GeneSys – Stand 2012



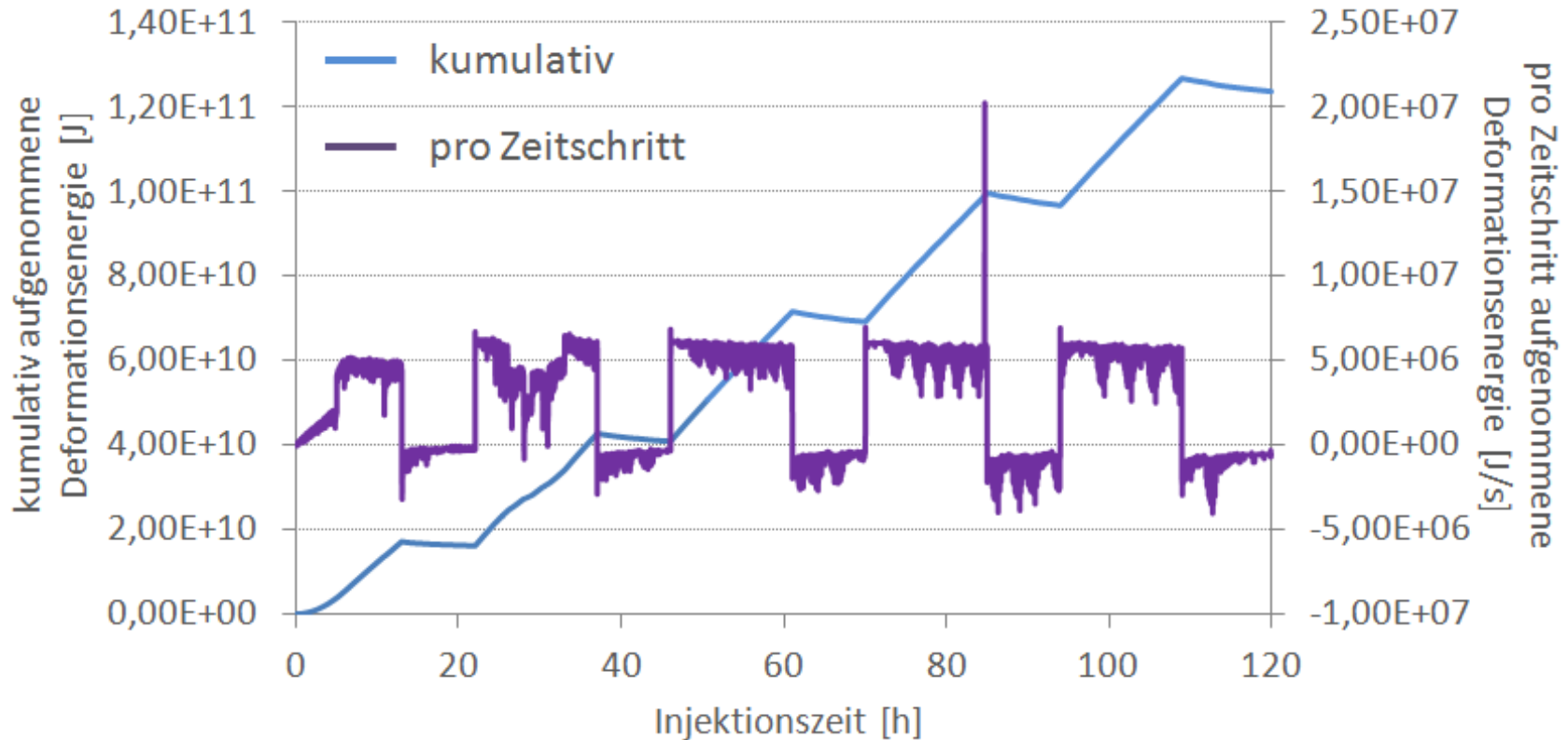
GeneSys – Stand 2012



gemessene Druckkurve nach
Tischner et al. 2012
**aktueller Stand (Nov. 2012):
konstant etwa noch 250bar**

berechneter Druckverlauf
bis 4534h nach Injektions-
beginn ca. Ende November
2012: **konstant etwa
noch 260bar**

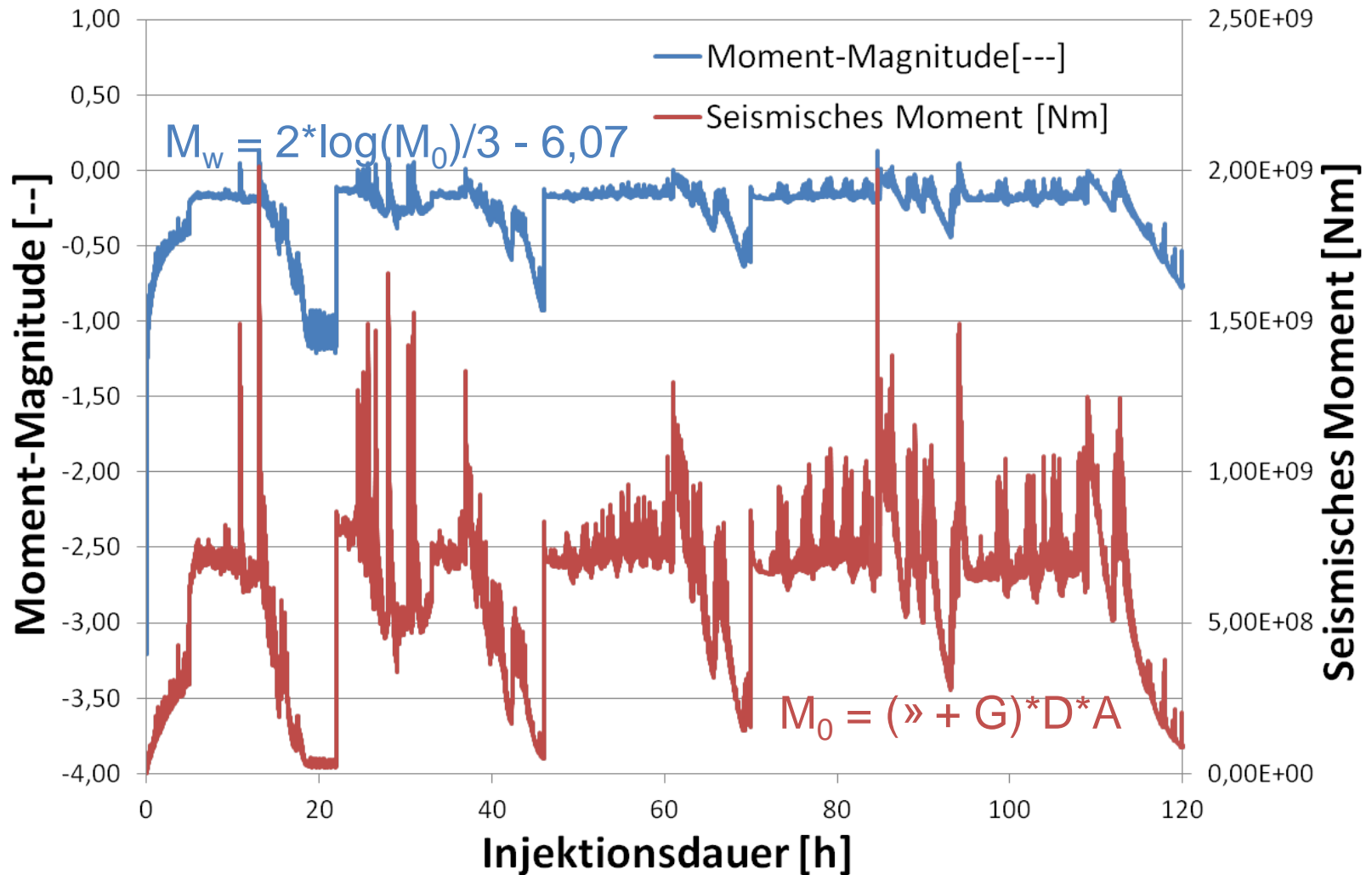
GeneSys - Deformationsenergie



Aufnahmeverhalten von Deformationsenergie durch das Gebirge:

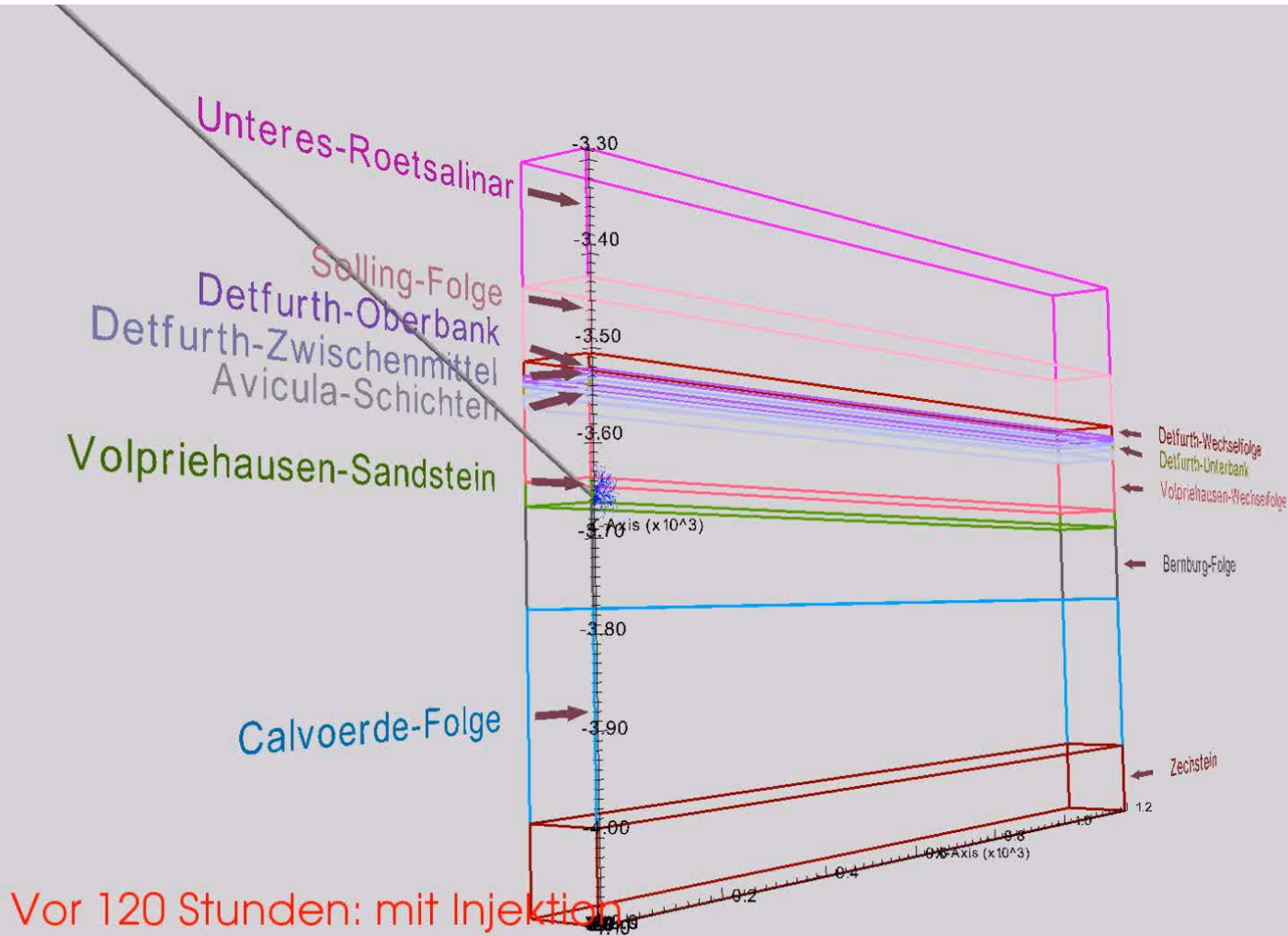
- **Abbau von Deformationsenergie während der Injektions-Ruhephasen**
- > dadurch Verringerung des seismischen Risikos möglich!
- > **Schlussfolgerung: zyklische Injektionsstrategie**

GeneSys - berechnete Seismizität



-> Schlussfolgerung: zyklische Injektionsstrategie

GeneSys - berechnete Seismizität



räumlich-zeitliche Frac-Ausbreitung

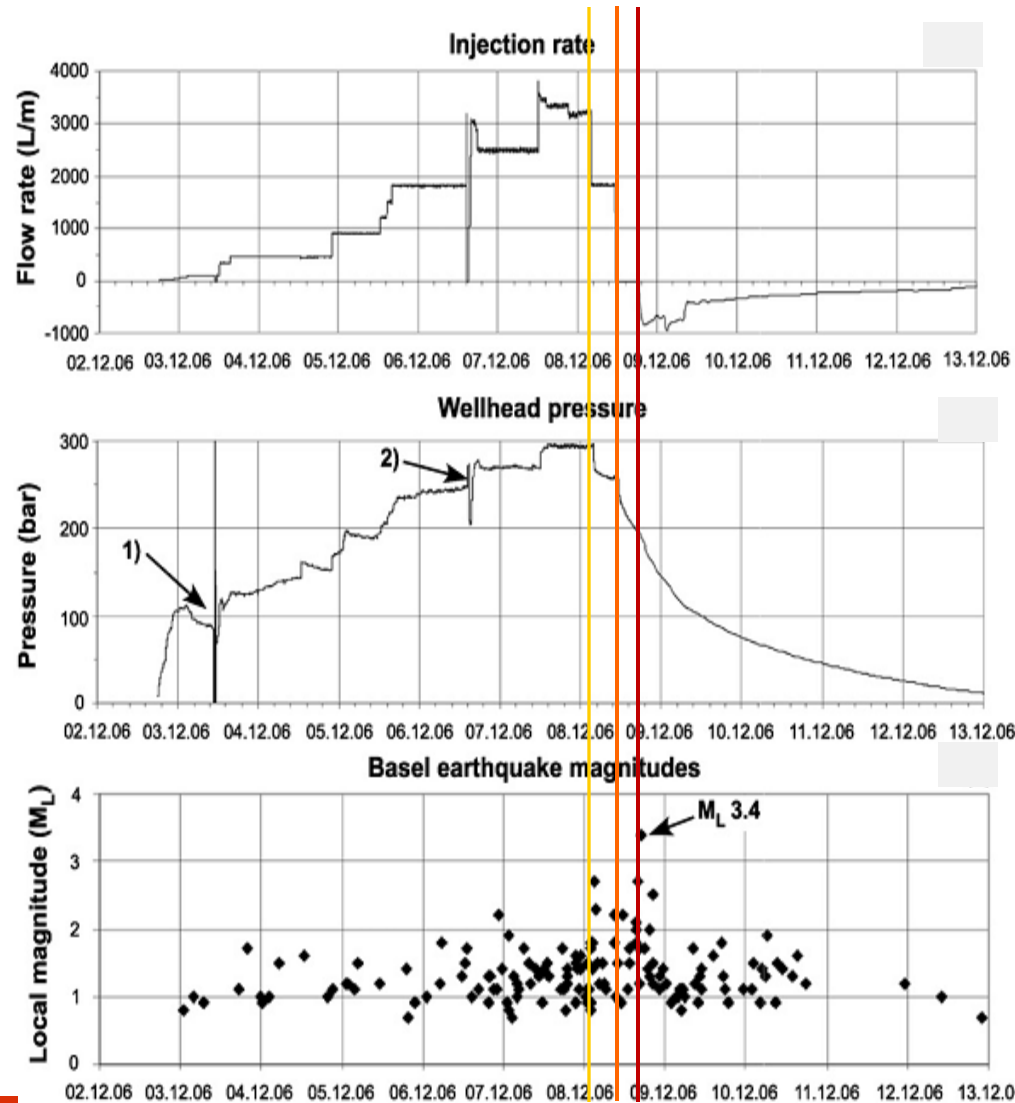
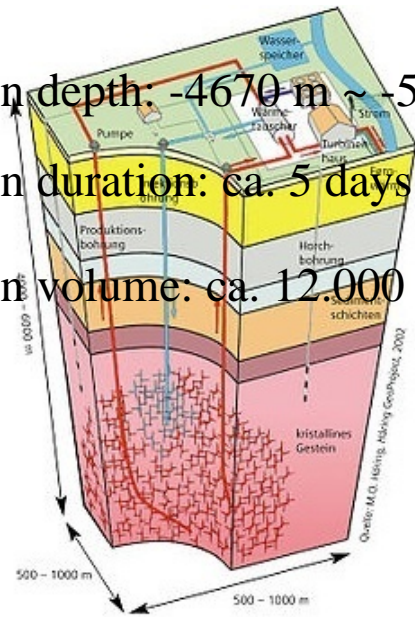
DHM (Basel) – Rissausbreitung und Seismizität

Type: Deep geothermy with HDR
 (Plan: triplet system with one injection and two production boreholes)

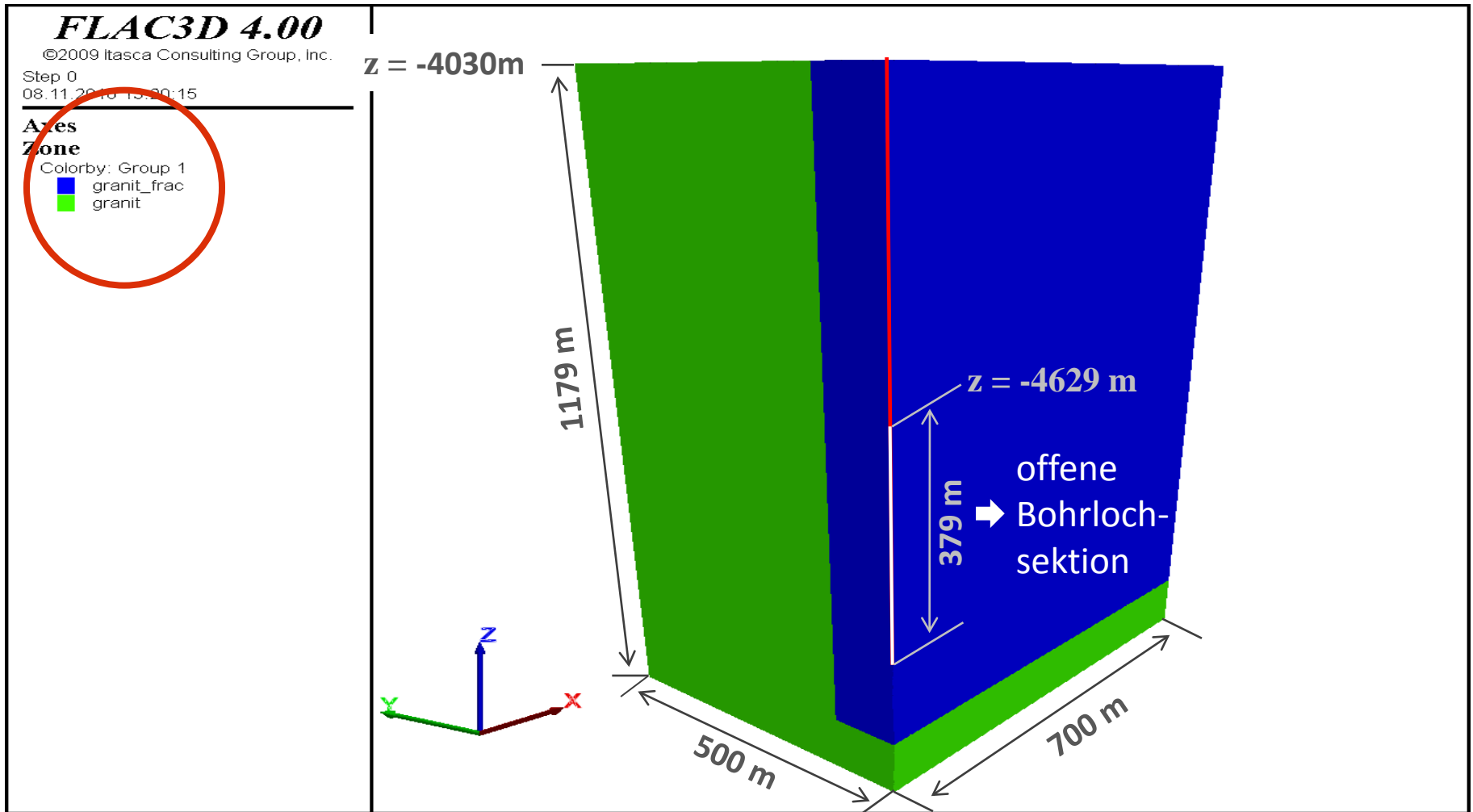
Injection depth: $-4670\text{ m} \sim -5000\text{ m}$

Injection duration: ca. 5 days

Injection volume: ca. 12.000 m^3

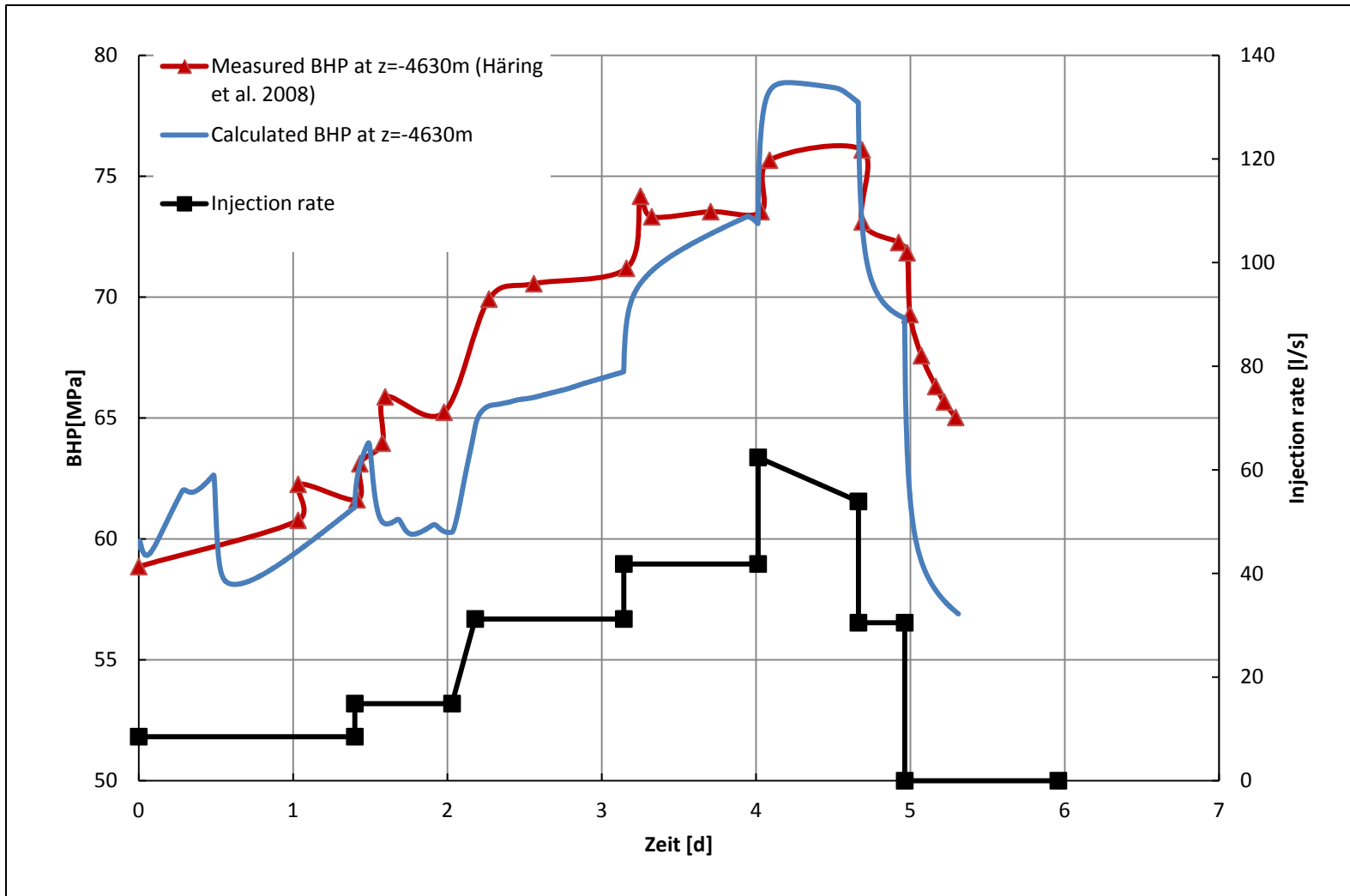


Fallbeispiel: Deep Heat Mining (DHM) Basel - Modellgeometrie



DHM (Basel) – Rissausbreitung und Seismizität

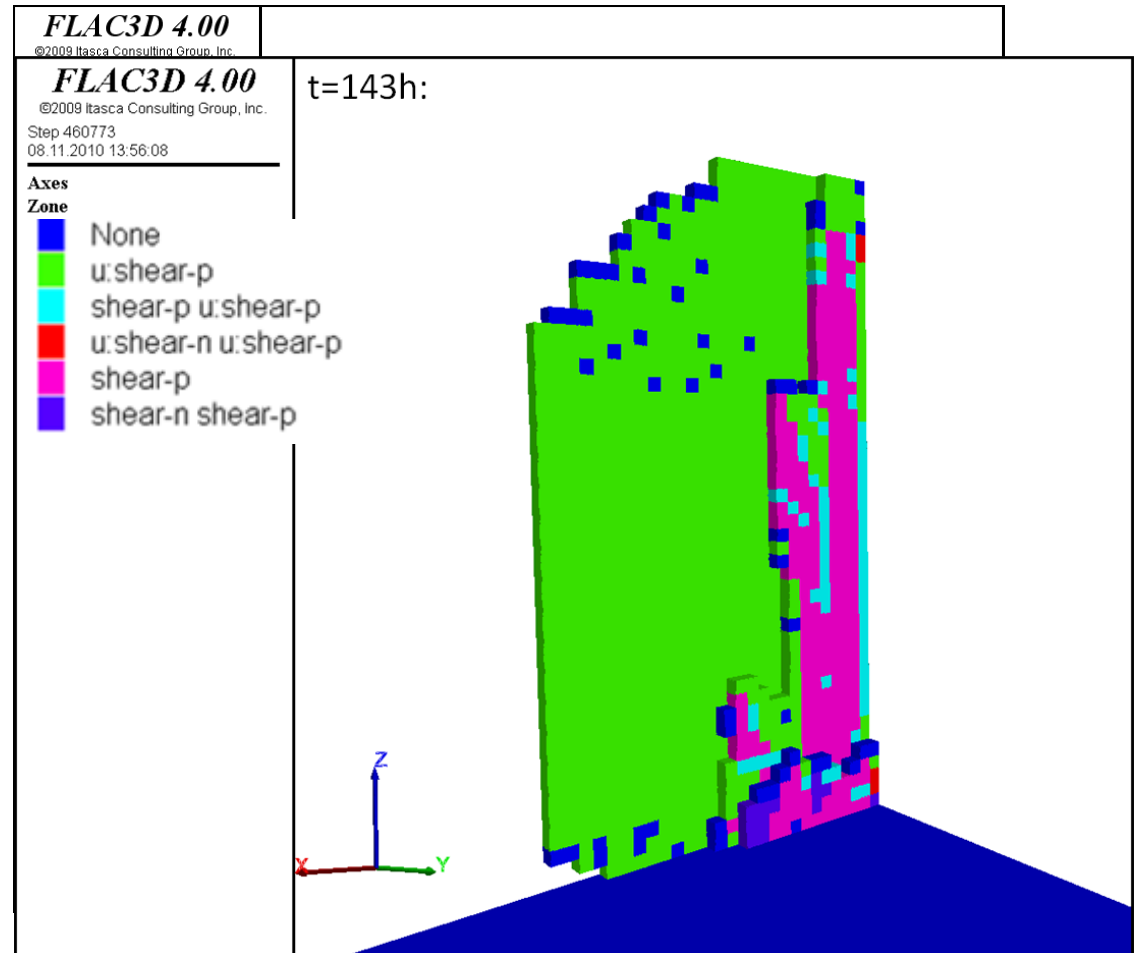
- Bohrlochdruckverlauf (BHP) in 4630m Tiefe



DHM (Basel) – Rissausbreitung und Seismizität

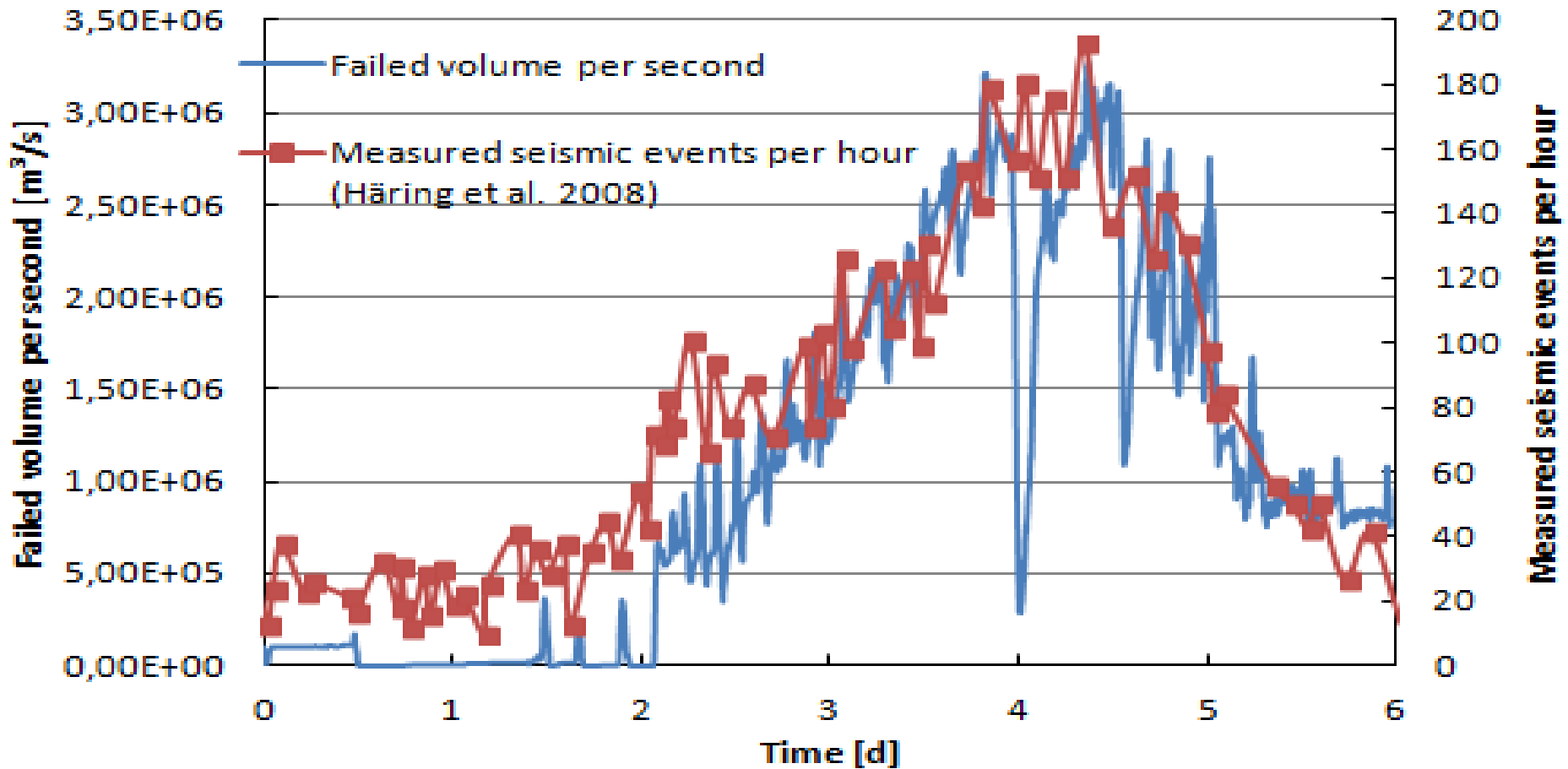
➤ Mechanism of induced seismicity during the fracture treatment in deep geothermy Borehole Basel: **Shear failure, particularly secondary shear failure behind but near the fracture front**

➤ Mechanism of induced seismicity during the fracture treatment in Gas-/Oil- borehole im Norddeutschen Becken: **Tensile failure at the fracture front**



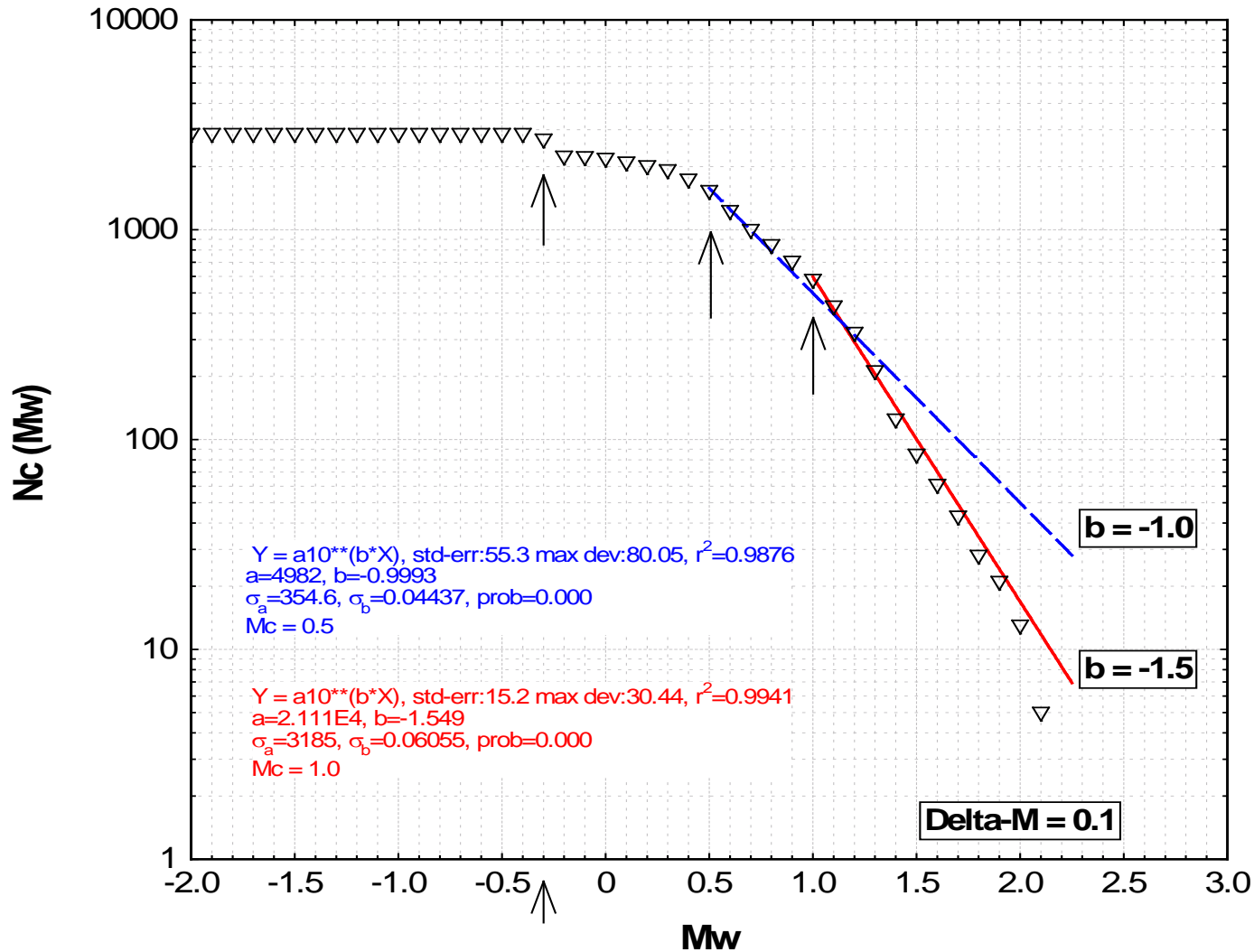
DHM (Basel) – Rissausbreitung und Seismizität

Korrelation zwischen den gemessenen seismischen Ereignissen und dem berechneten Bruchvolumen



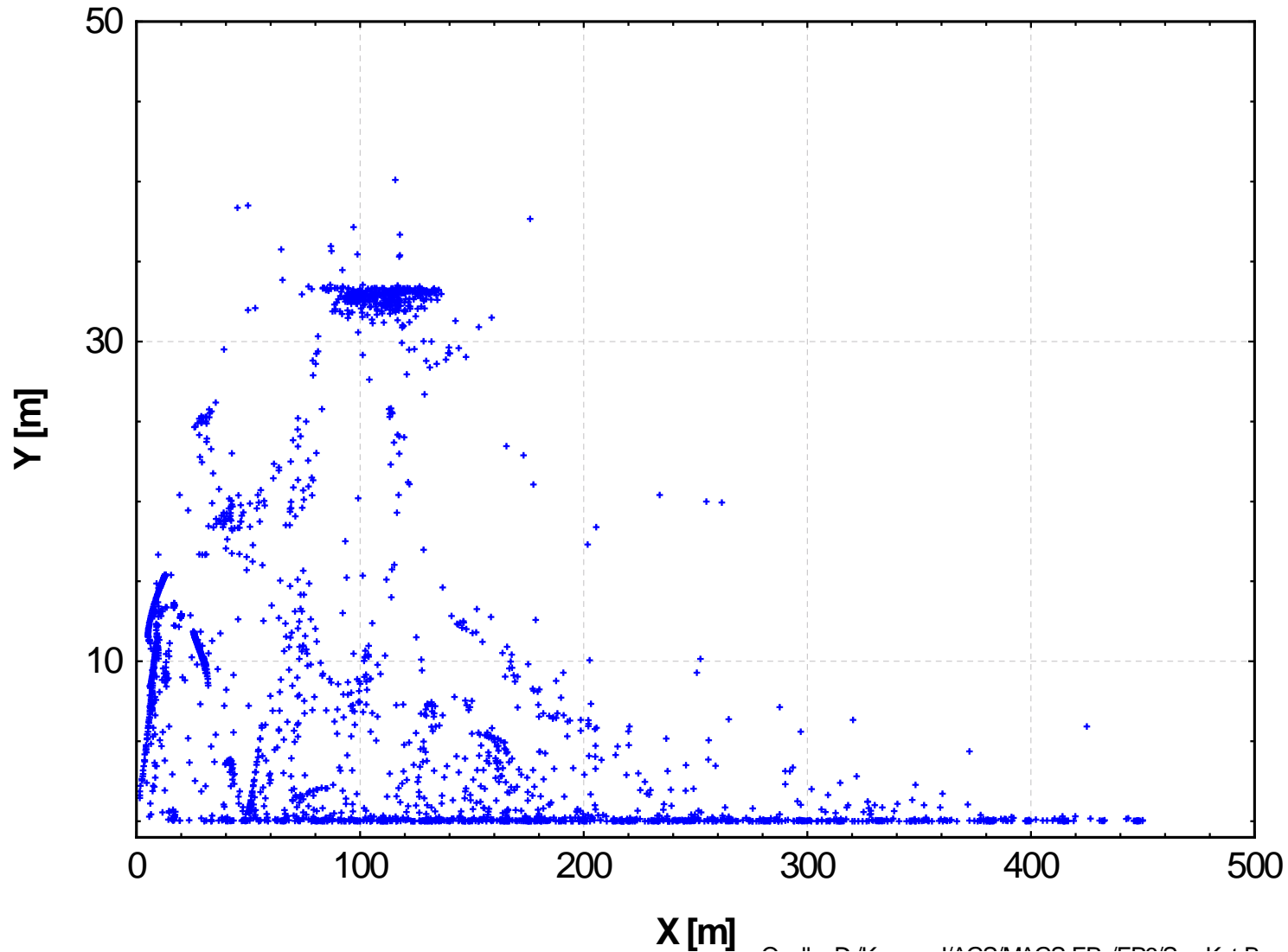
DHM (Basel) – Seismizität

kumulative Magnitude – Häufigkeitsverteilung



im Vergleich zu
GeneSys realistische
b-Werte

DHM (Basel) – Seismizität

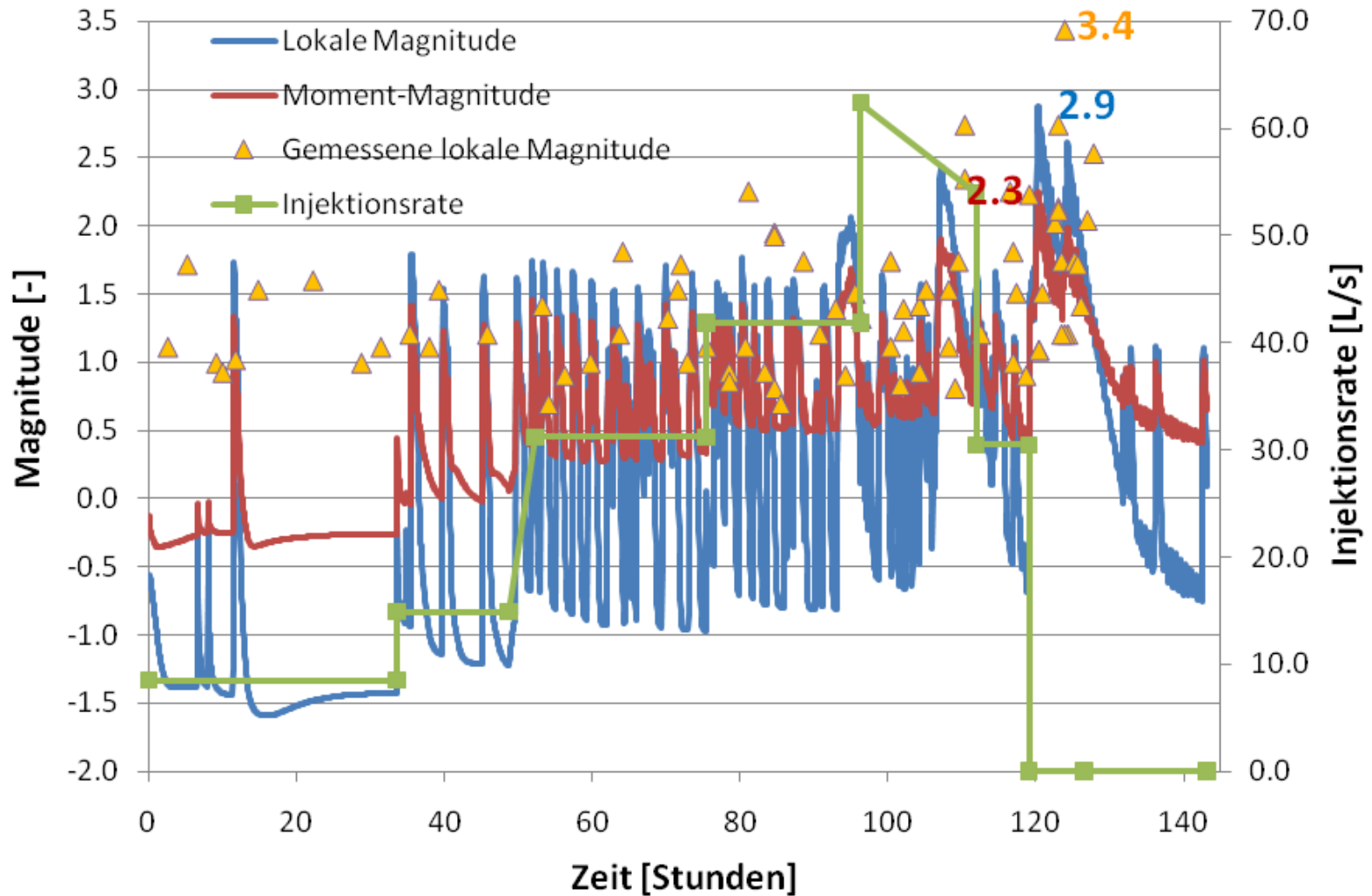


im Vergleich zur GeneSys-Simulation kann hier eine breite Scherzone abgeleitet werden

Darstellung 1/4 - Modell

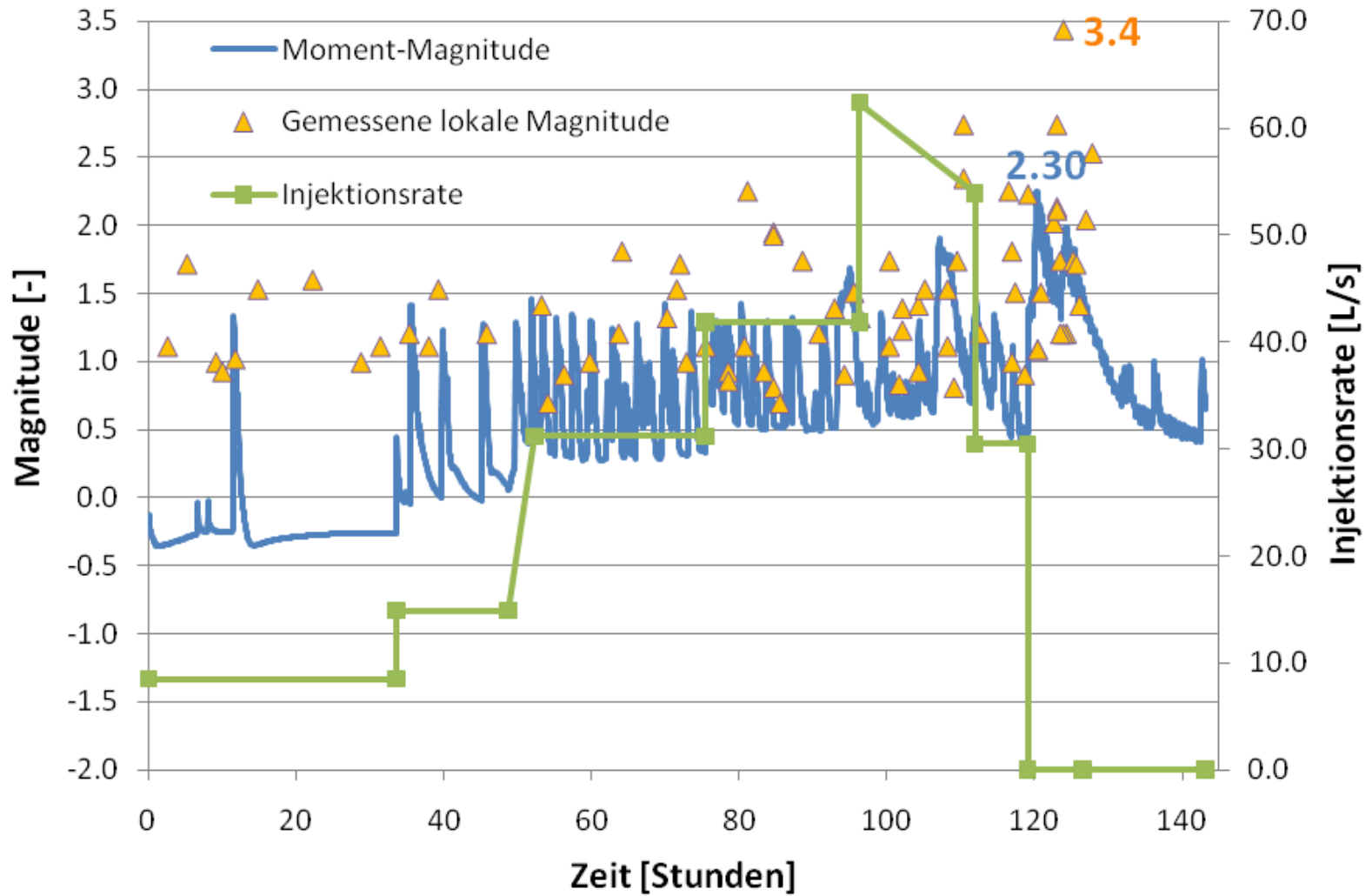
DHM (Basel) – Rissausbreitung und Seismizität

Injektionsverfahren: DHM Projekt



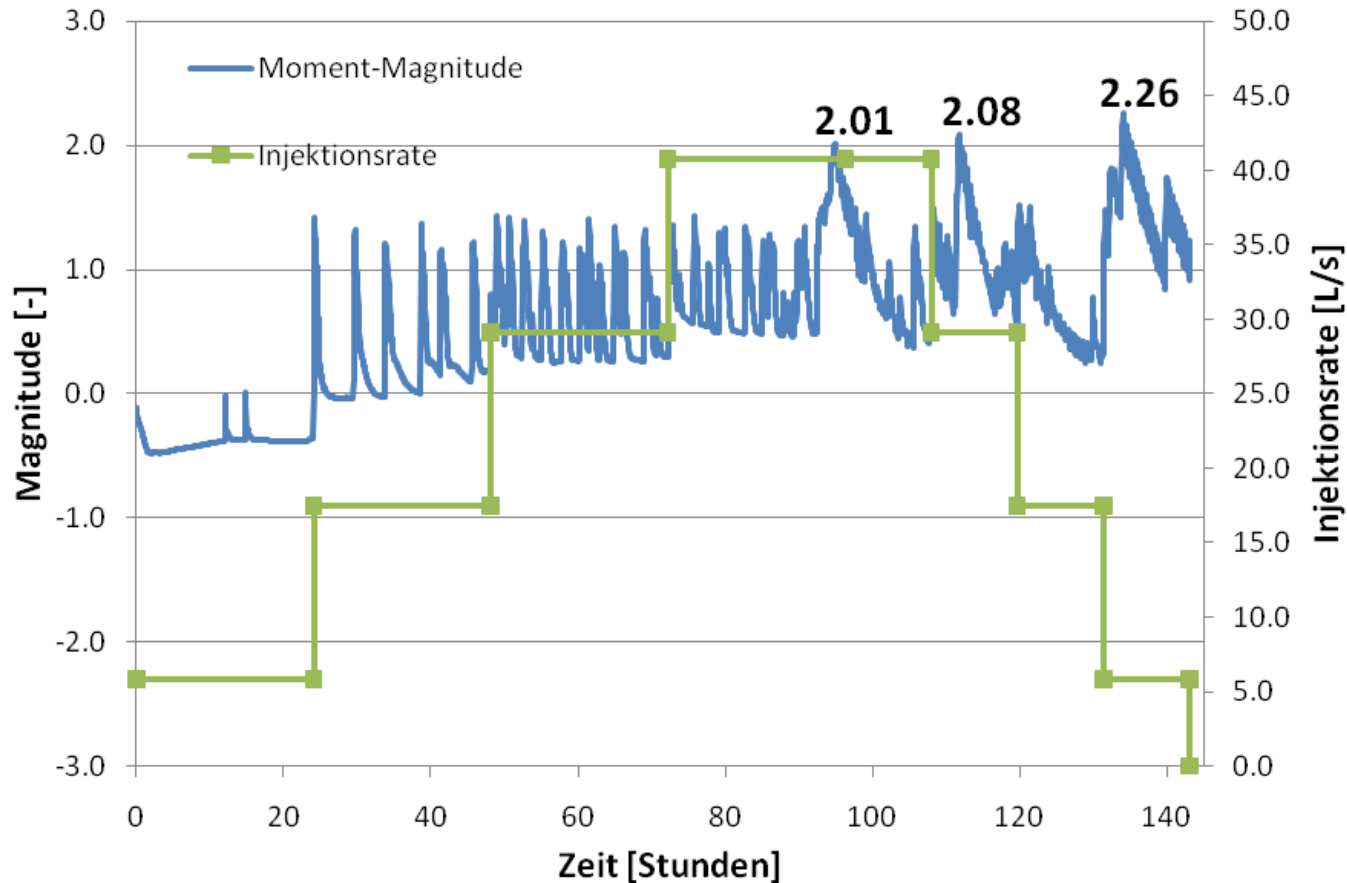
DHM (Basel) – Rissausbreitung und Seismizität

Injektionsverfahren: DHM Projekt



DHM (Basel) – Fiktive Optimierung des Injektionsverfahrens (Volumen und Dauer unverändert)

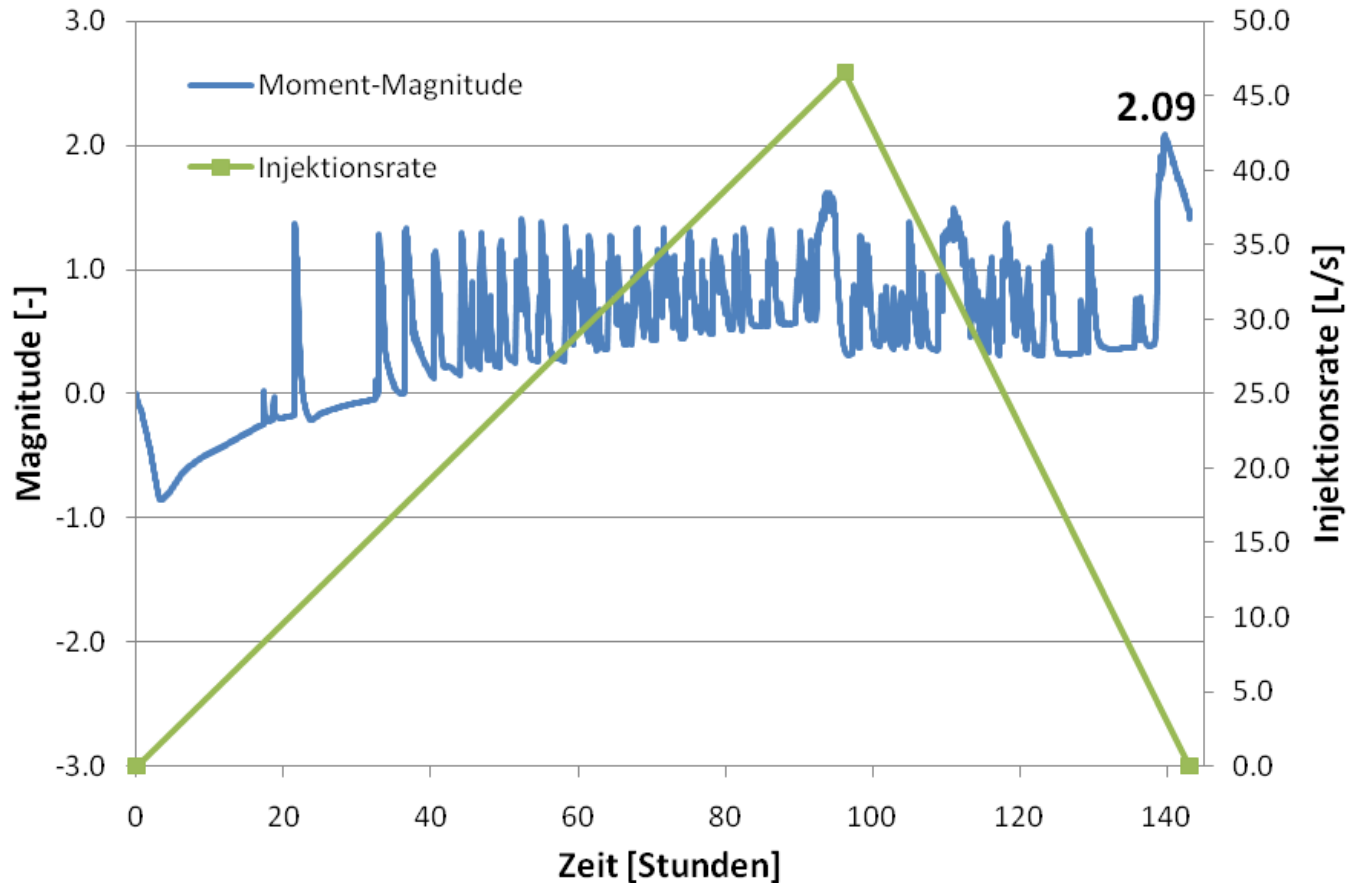
Injektionsverfahren: 4 Stufen Zu- und Abnahme der Injektionsrate



-> **Schlussfolgerung: Max. Momentmagnitude erst in der Spätphase der Reduzierung der Injektionsrate**

DHM (Basel) – Fiktive Optimierung des Injektionsverfahrens (Volumen und Dauer unverändert)

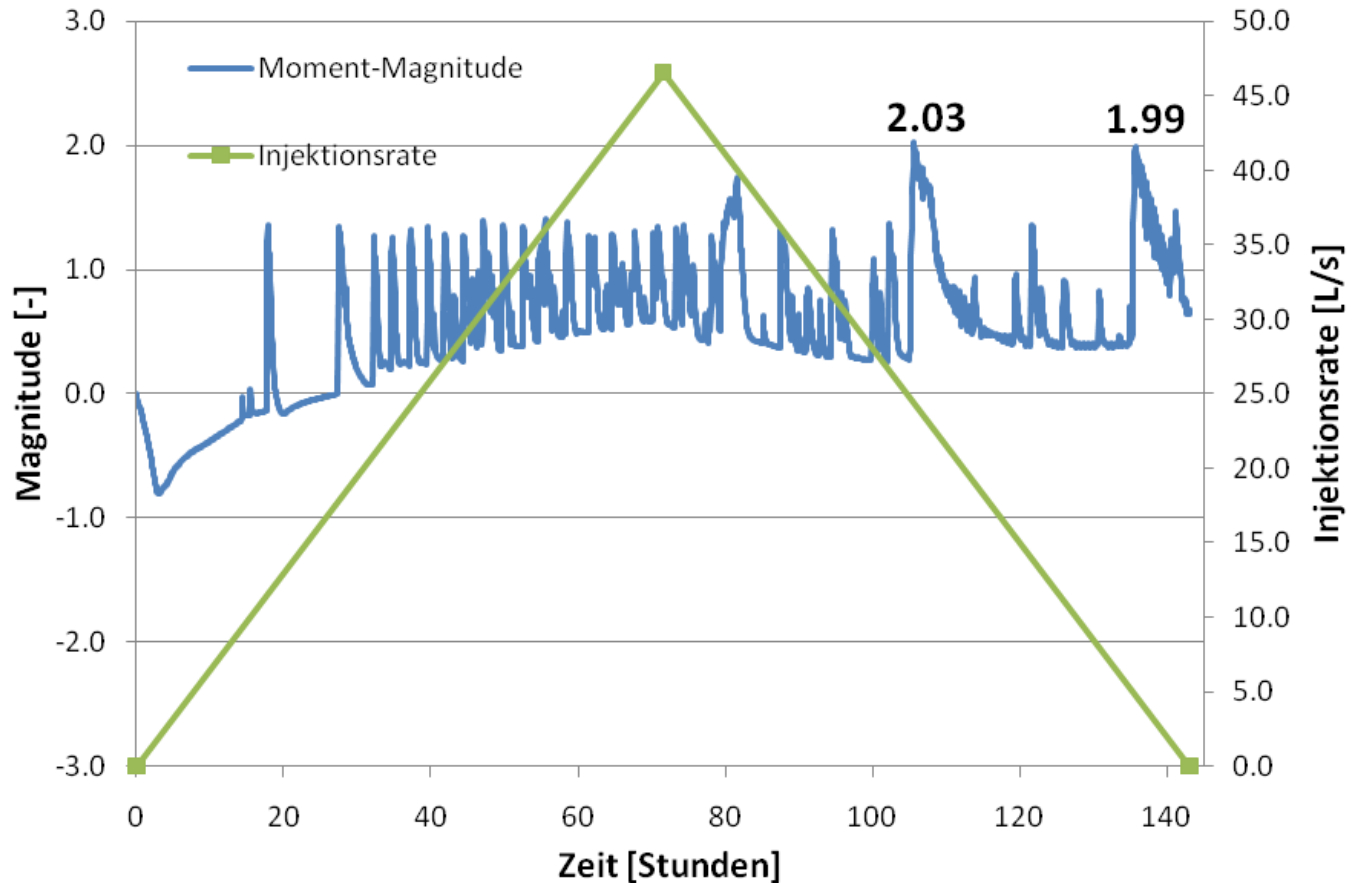
Injektionsverfahren: linear 2/3



-> **Schlussfolgerung: Max. Momentmagnitude erst in der Spätphase der Reduzierung der Injektionsrate**

DHM (Basel) – Fiktive Optimierung des Injektionsverfahrens (Volumen und Dauer unverändert)

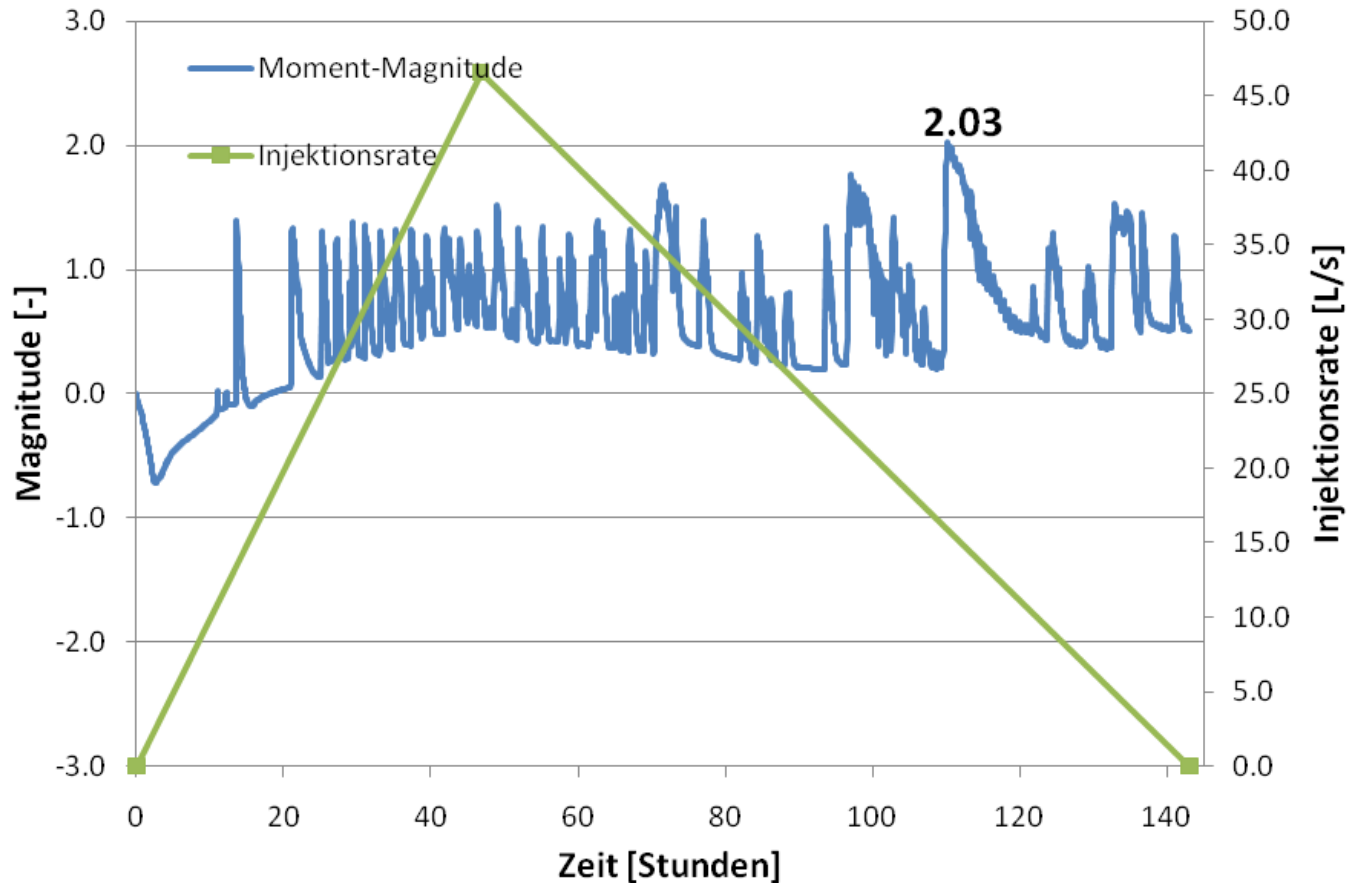
Injektionsverfahren: linear 1/2



-> **Schlussfolgerung: Max. Momentmagnitude erst in der Spätphase der Reduzierung der Injektionsrate**

DHM (Basel) – Fiktive Optimierung des Injektionsverfahrens (Volumen und Dauer unverändert)

Injektionsverfahren: linear 1/3



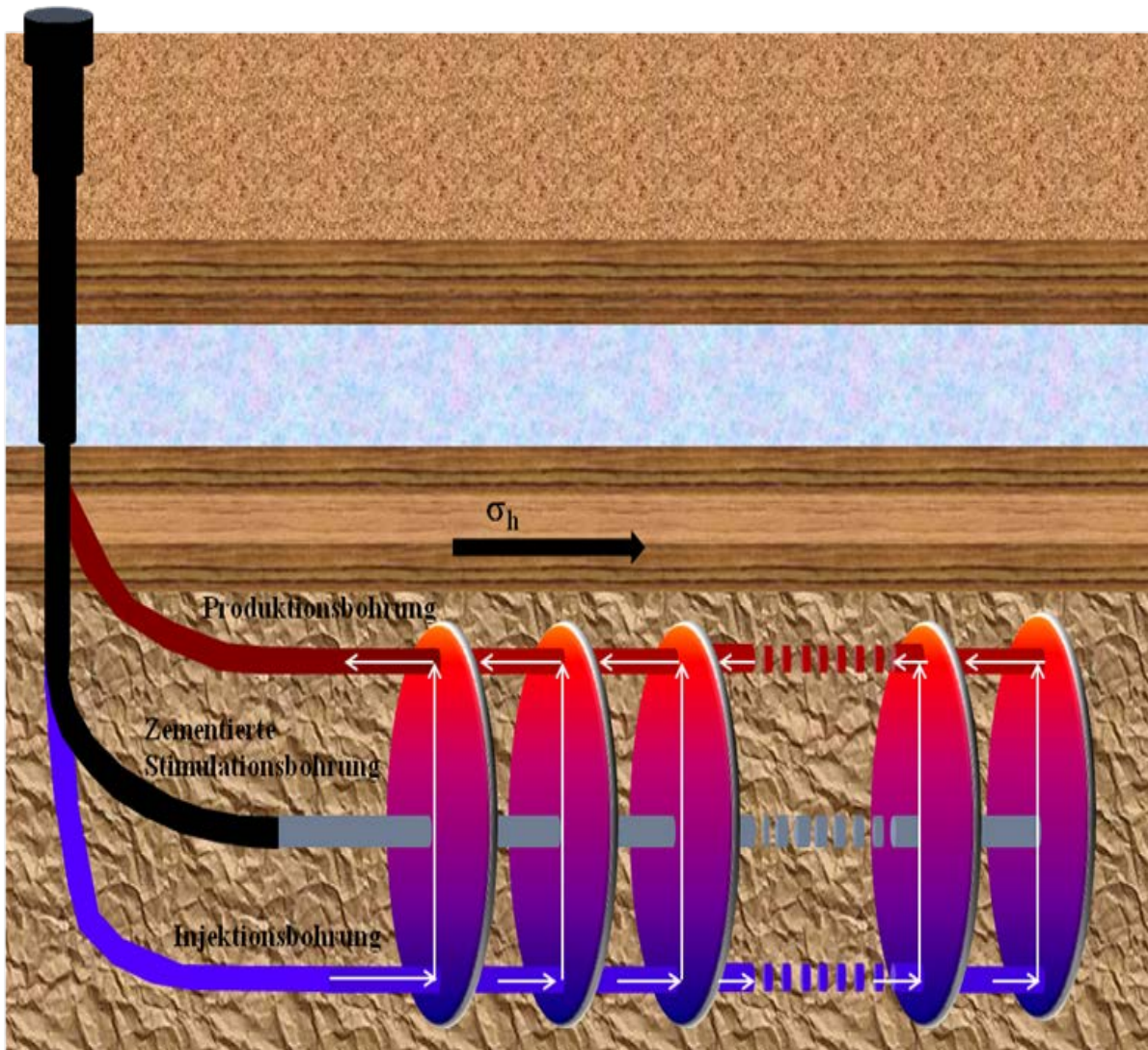
-> **Schlussfolgerung: Max. Momentmagnitude erst in der Spätphase der Reduzierung der Injektionsrate**

DHM (Basel) – Fiktive Optimierung des Injektionsverfahrens (Volumen und Dauer unverändert)

Injektionsverfahren	Summe seismische Energie	Max. Bruchfläche	berechnete Max. Moment Magnitude
Realdaten vom DHM Projekt	$1,08 \times 10^4$ J	0,66 km ²	2.30
4 Stufen Zu- und Abnahme der Rate	$1,03 \times 10^4$ J	0,65 km ²	2.26
Lineare Zu- und Abnahme, max. Rate zum Zeitpunkt der 2/3 Dauer	$9,49 \times 10^3$ J	0,65 km ²	2.09
max. Rate zum Zeitpunkt der 1/2 Injektionsdauer	$9,83 \times 10^3$ J	0,69 km ²	2.03
max. Rate zum Zeitpunkt der 1/3 Injektionsdauer	$1,02 \times 10^4$ J	0,71 km ²	2.03

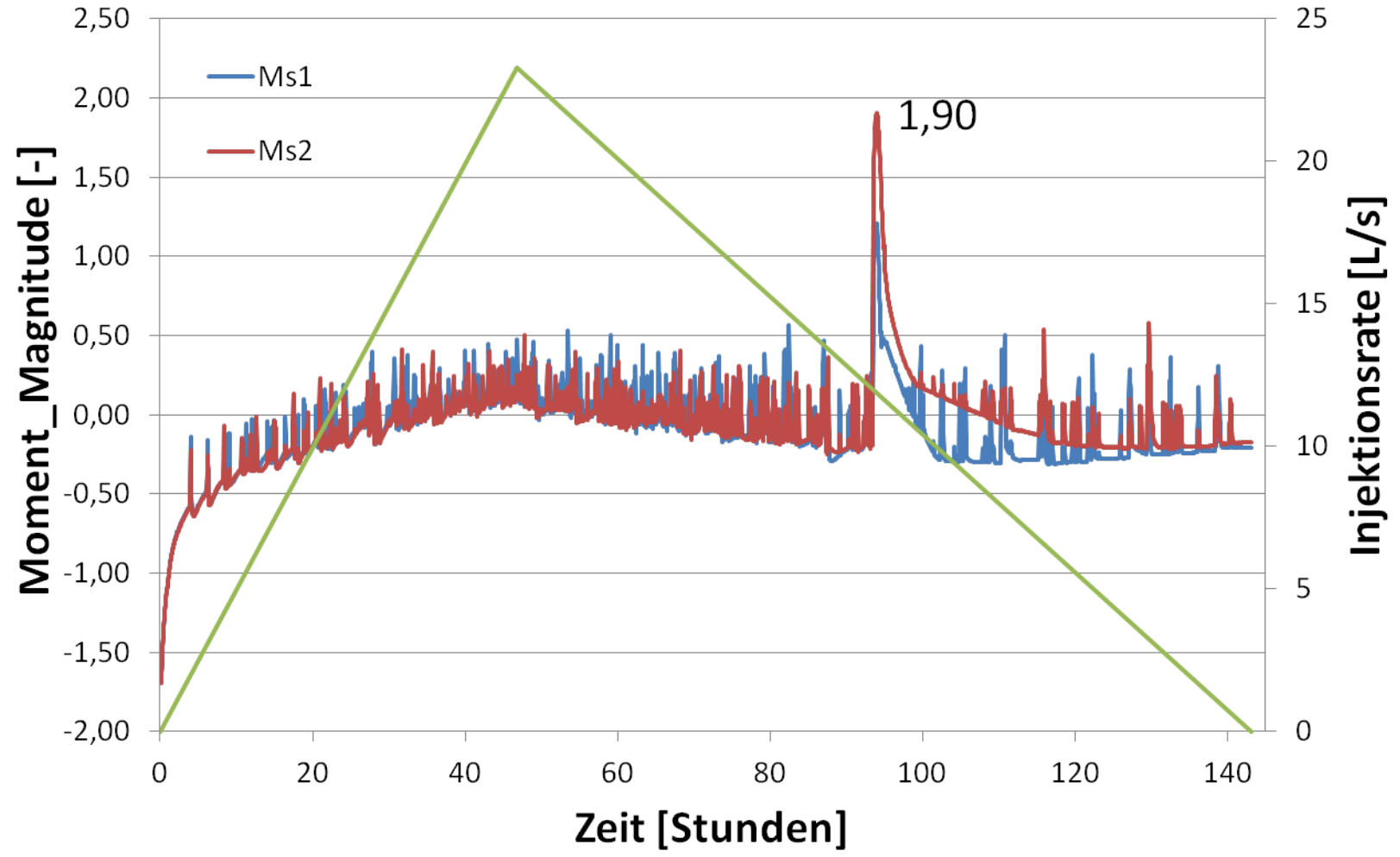
-> Schlussfolgerung: langsame und langdauernde Reduzierung der Injektionsrate

DHM (Basel) – Fiktive Optimierung des Multifrac-Erschließungskonzeptes (Volumen unverändert)

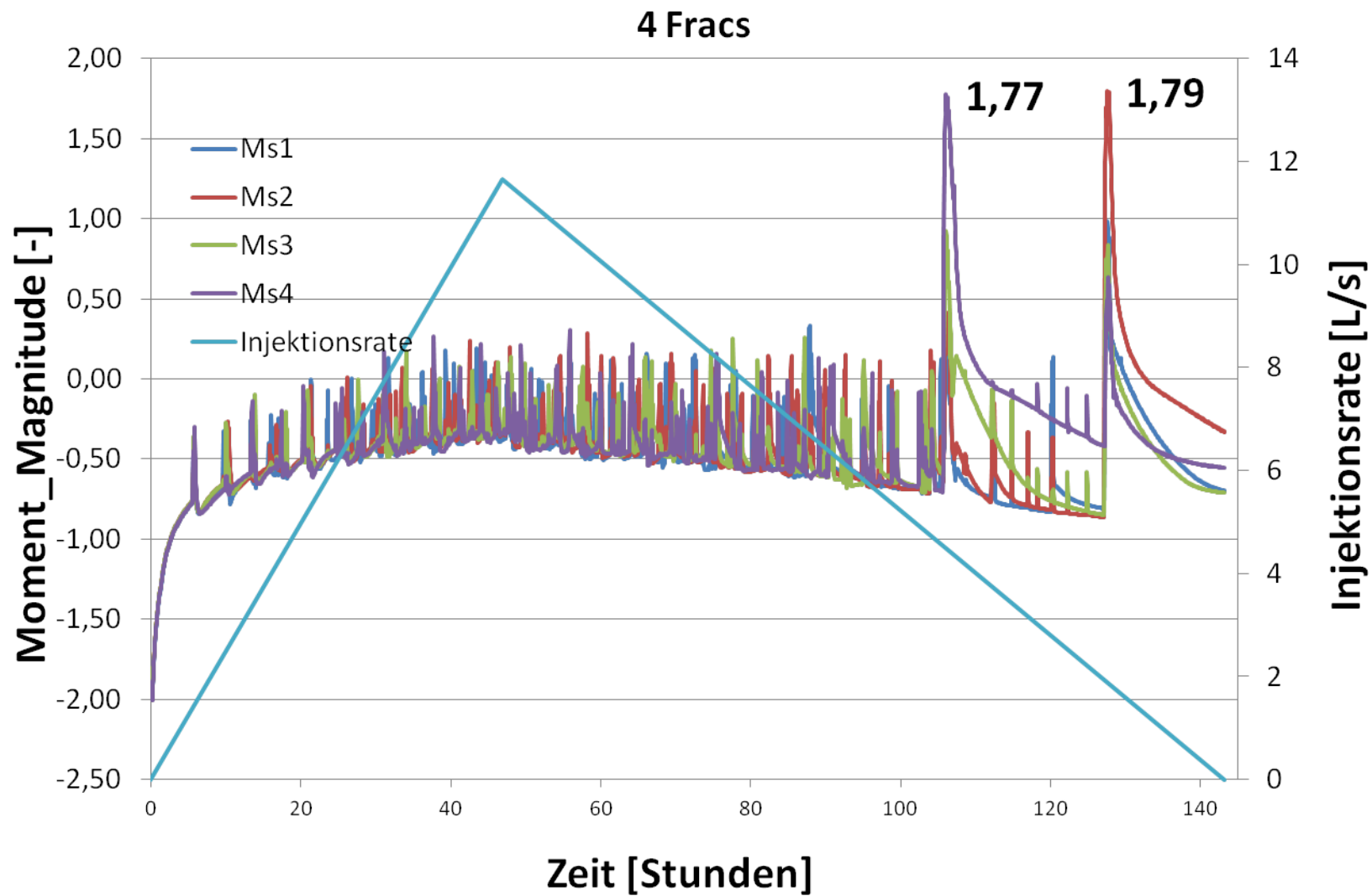


DHM (Basel) – Fiktive Optimierung des Multifrac-Erschließungskonzeptes (Volumen unverändert)

2 Fracs

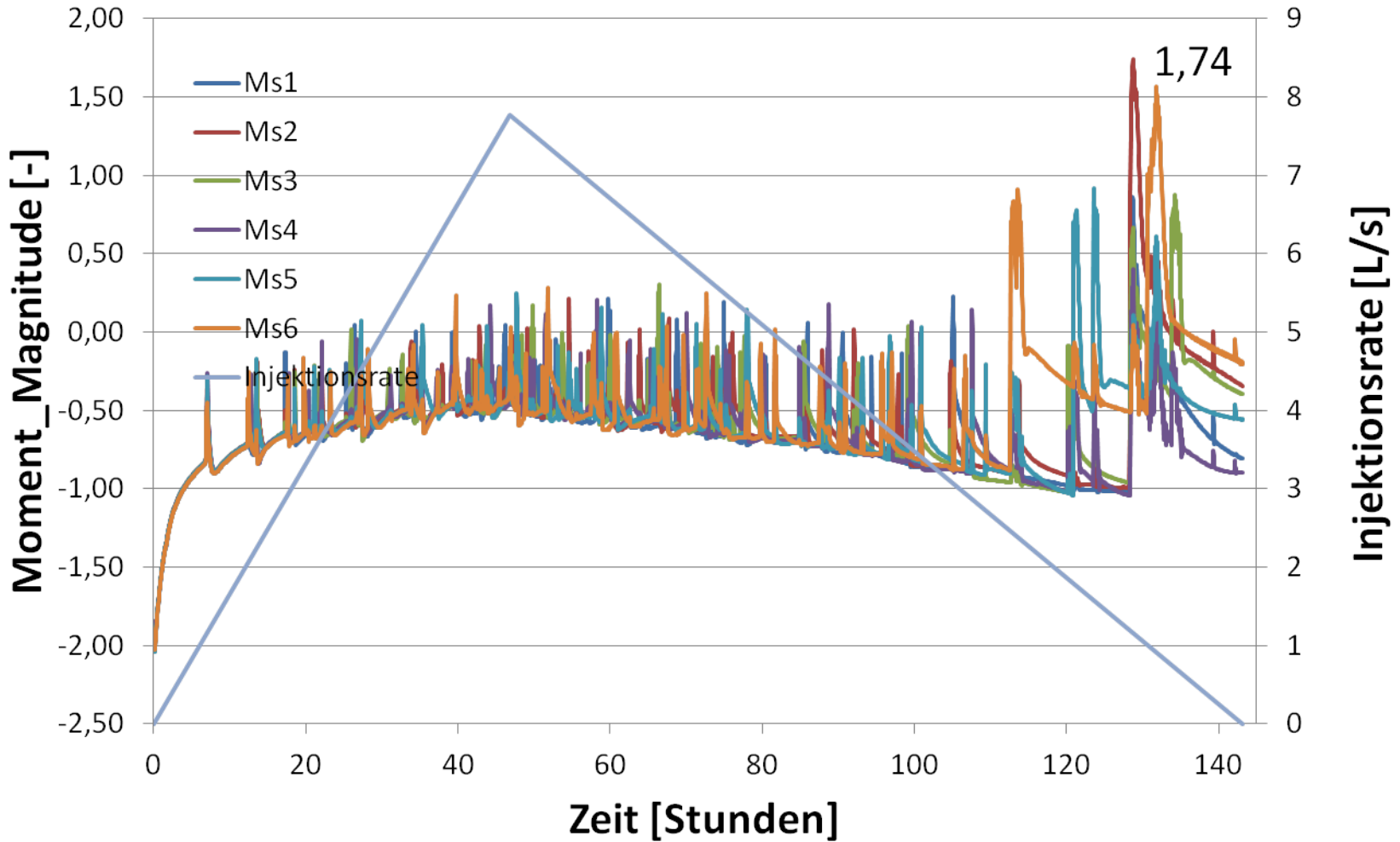


DHM (Basel) – Fiktive Optimierung des Multifrac-Erschließungskonzeptes (Volumen unverändert)

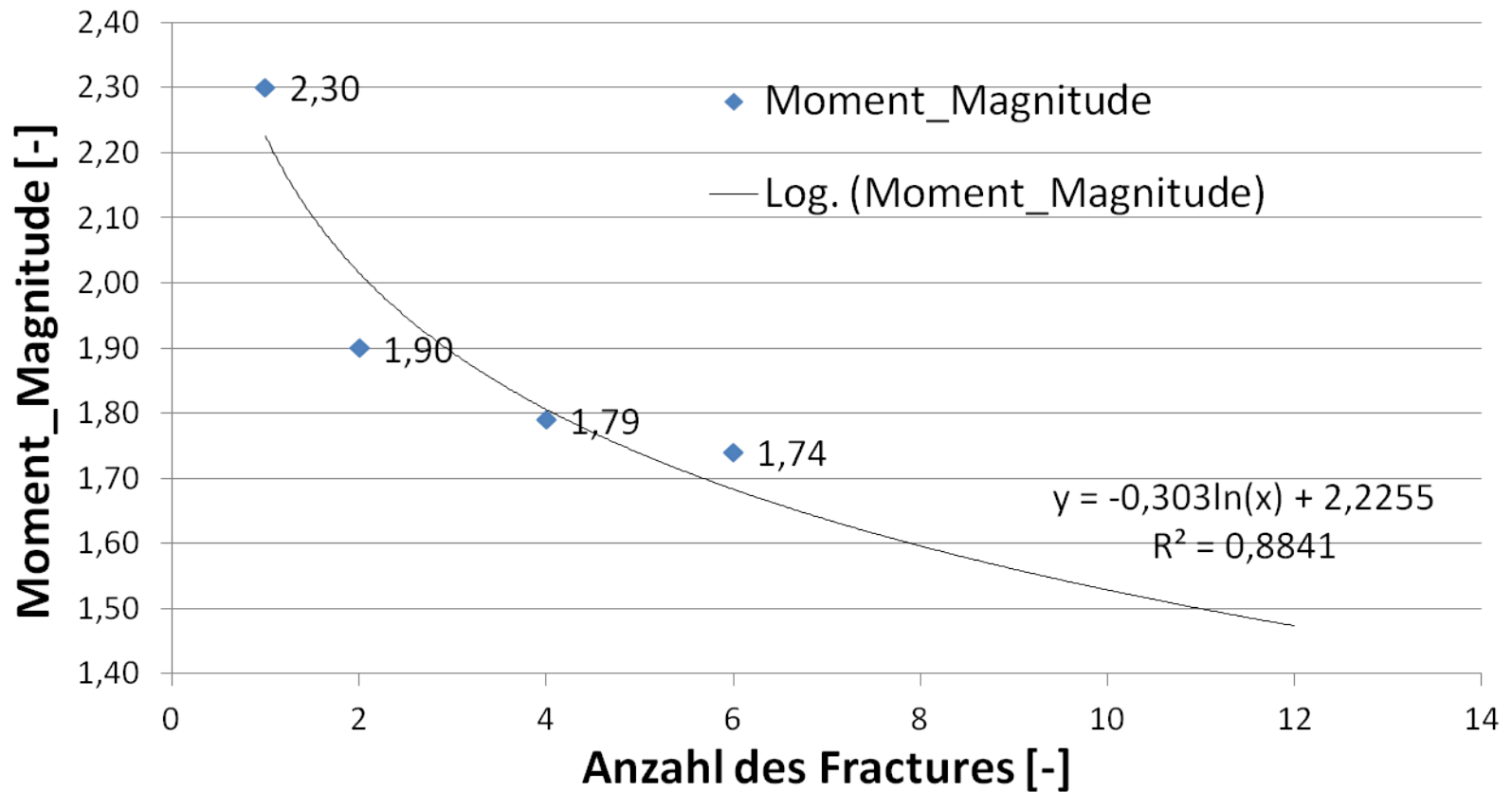


DHM (Basel) – Fiktive Optimierung des Multifrac-Erschließungskonzeptes (Volumen unverändert)

6 Fracs



DHM (Basel) – Fiktive Optimierung des Multifrac-Erschließungskonzeptes (Volumen unverändert)



-> Schlussfolgerung: Multifrac-Erschließungskonzept führt zur Reduzierung der max. Momentmagnitude, zwar je mehr desto deutlicher.

GeneSys

Vergleich

DHM

Sandstein

Reservoirgestein

Granit

20.000m³

Injektionsvolumen

12.000m³

-

gemessene M_{Lmax}

3,4

0,0

berechnete M_{wmax}

2,3

extensional

Spannungsregime

kompessiv

$(\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h)$

$(\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h)$

Zugbruch

vorherrschender
Bruchmechanismus

Scherbruch

keine

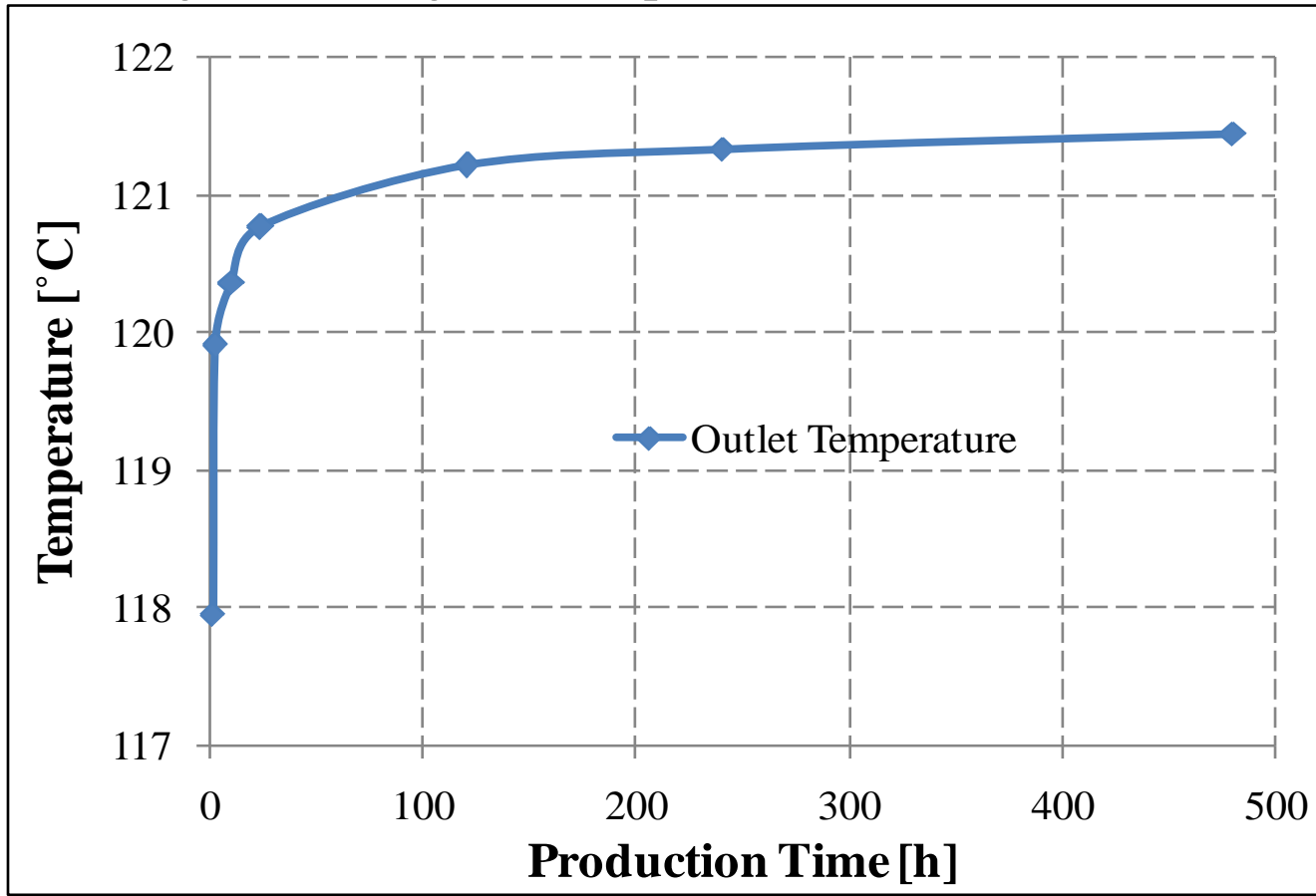
Tektonik/Störungen

vorhanden

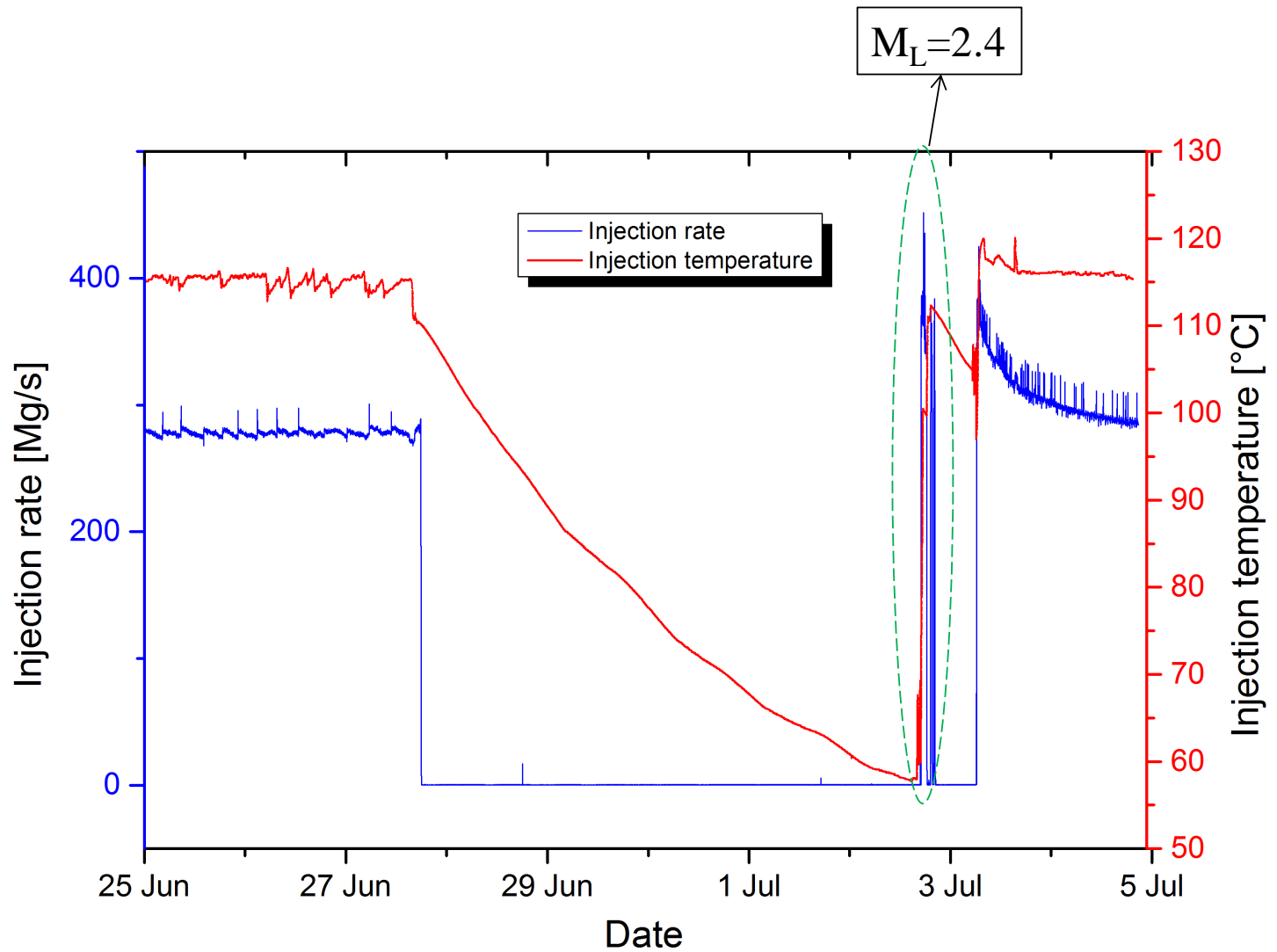
➤ **Spannungsregime (Bruchmechanismen), Tektonik/ Störungen, Gesteinstyp und Entfestigungsverhalten/ Energiefreisetzung**

Unterhaching-Projekt – Verifizierung des Temperaturmodells anhand der Betriebsdaten

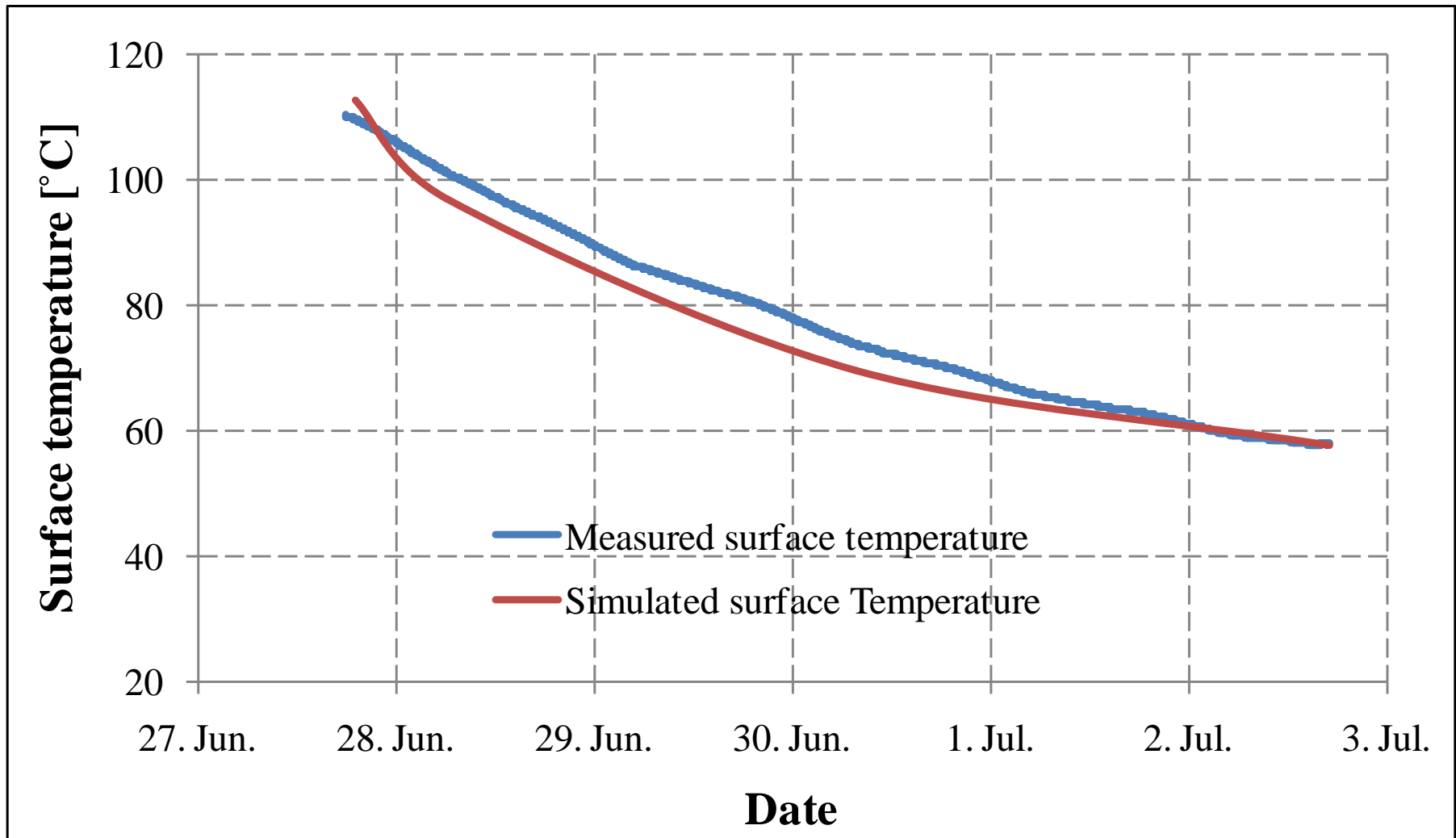
Die berechnete Temperatur am **Kopf der Produktionsbohrung** bleibt nach 200 Stunden der Produktion bei einer Rate von 95 l/s fast konstant (121,52 °C). Zum Vergleich beträgt der entsprechende Messwert von 121,7 °C .



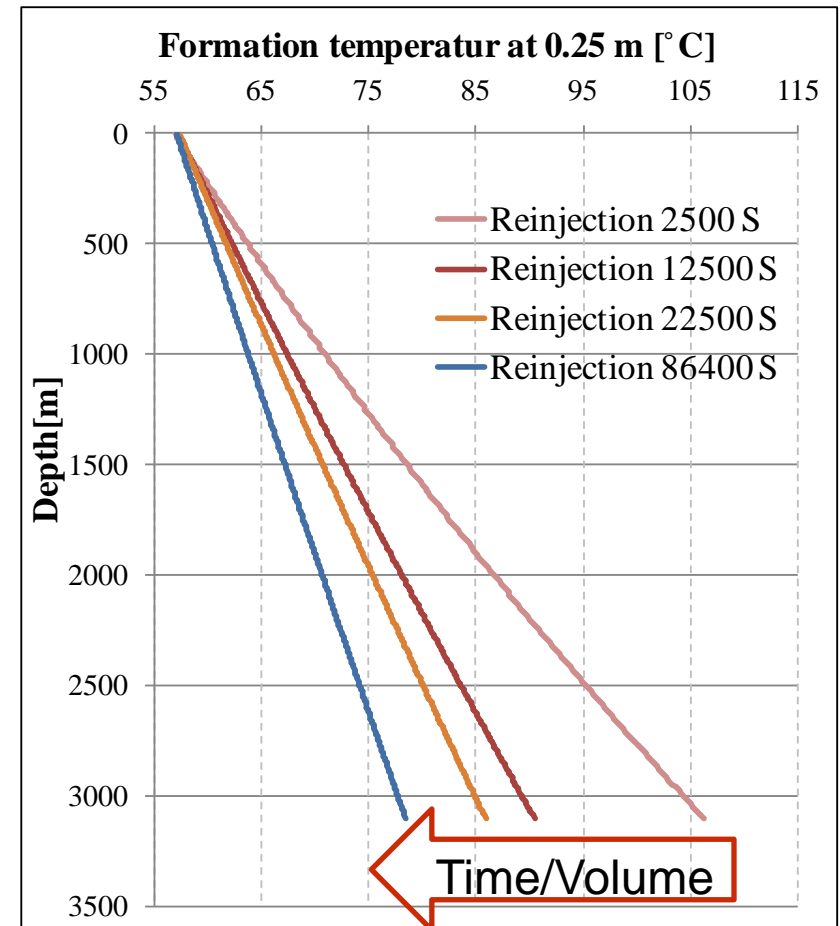
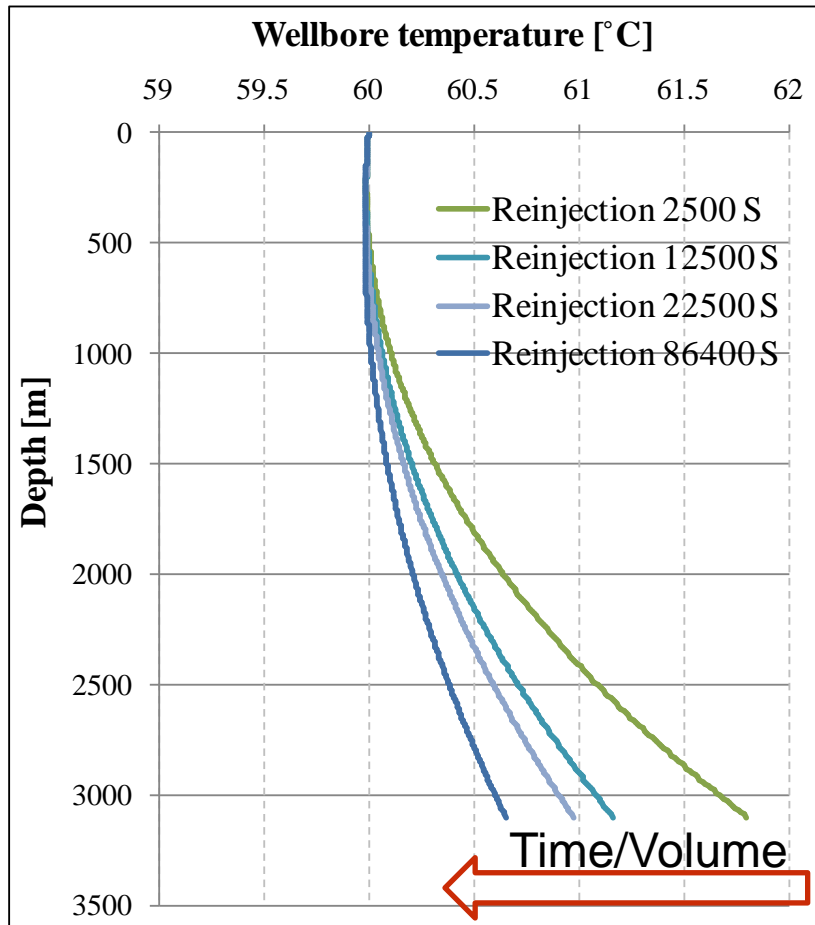
Unterhaching-Projekt – Betriebsdaten Juni – Juli 2008



Unterhaching-Projekt – simulierter und gemessener Temperaturverlauf am Kopf der Injektionsbohrung

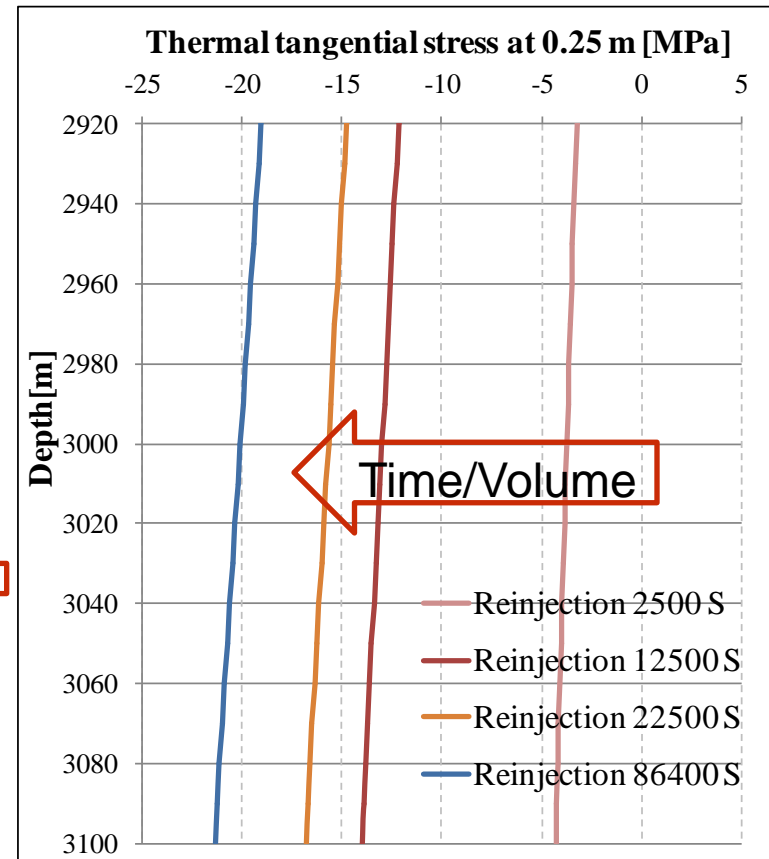
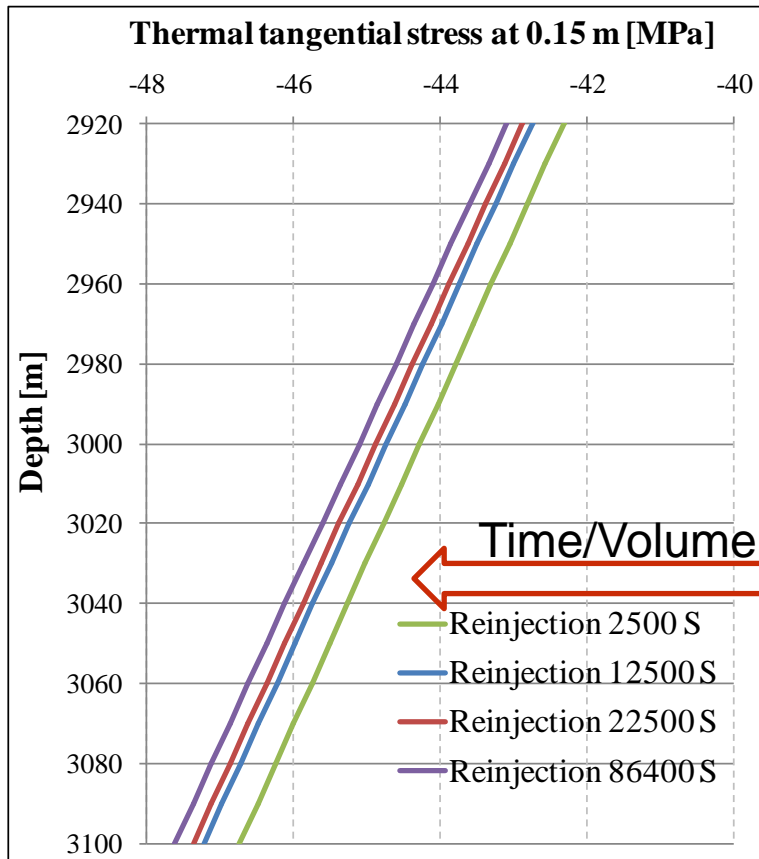


Unterhaching-Projekt – Temperaturprofile bei Injektionsrate von 102,7 l/s u. -temperatur von 60 °C



-> **Schlussfolgerung: Die Abkühlung des Reservoirs (rechts) nimmt mit Injektionszeit/-volumen deutlich zu, während die BT (links) etwa konstant bleibt.**

Unterhaching-Projekt – Thermische Zugspannungen bei Injektionsrate von 102,7 l/s u. -temperatur von 60 °C



-> **Schlussfolgerung:** Thermische Zugspannung im Reservoir (rechts) nimmt mit Injektionszeit/-volumen bzw. Abkühlung des Reservoirs deutlich zu. Die dadurch entstandene Spannungsumlagerung sowie die Verwerfung ins Grundgebirge könnten größere Mikrobeben induzieren.

Zusammenfassung: Frac-Mechanismen

- Scherbruch, insbesondere sekundäre großflächige Scherbrüche hinter aber nahe an der Bruchfront (z.B. DHM Basel)
- Zugbruch an und hinter der Bruchfront (z.B. GeneSys Hannover)
- sehr große und immer zunehmende Thermo- und Zugspannung mit der Abkühlung des Reservoirs bzw. dadurch entstandene Spannungsumlagerung im Grundgebirge sowie die relevante Verwerfung ins Grundgebirge (z.B. Unterhaching)

⇒ Hauptfaktoren zum unterschiedlichen Frac-Mechanismen:
Primärspannungszustand, Aufnahmeverhalten von Deformationsenergie und insbesondere Entfestigungsverhalten der Formationsgesteine, Injektionsrate, ggf. Aktivierung von existierenden Verwerfungen, Injektionsdauer und Volumen, Unterschied zwischen Injektions- und Gebirgstemperatur sowie Abkühlung des Reservoirs

Zusammenfassung

- Die numerisch gekoppelte THM(D)-Modellierung inklusive Erstellung eines seismischen Katalogs hat das Potential, synthetische Magnituden von Mikrobrüchen aufgrund einer Reservoir-Stimulation in Abhängigkeit von den Standortverhältnissen zu berechnen.
- Damit könnte künftig die Bewertung des seismischen Gefährdungspotentials eines geplanten Geothermiestandortes bereits im Genehmigungsprozess (also vor Bohrbeginn) vorgenommen werden. ⇒ Phase II
- Der erstellte synthetische seismische Katalog bedürft allerdings der Verifizierung durch real gemessene Daten:
 - die Datengrundlage für das DHM-Projekt (Basel) gewährleistet dies,
 - bei GeneSys konnte diese Verifizierung aufgrund fehlender Messdaten nicht erfolgen.

Erste Empfehlungen des EP6 zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität **in der Stimulationsphase**

- Schlussfolgerungen bzw. Ausgangsbasis
- ✓ Max. Momentmagnitude erst nach dem Shut-In oder in der Spätphase der Reduzierung der Injektionsrate
- ✓ Multifrac-Erschließungskonzept führt zur Reduzierung der max. Momentmagnitude, zwar je mehr desto deutlicher
- Optimierte Injektionsstrategie
- ✓ zyklische Injektionsstrategie
- ✓ je mehr Injektionsvolumen bzw. je später, desto länger die Pause
- ✓ schnelle Injektion in der Anfangsphase
- ✓ langsame und langdauernde Reduzierung der Injektionsrate
- Multifrac-Erschließungskonzept auch zur Erhöhung der Frac-Fläche
- Optimierte Injektionsstrategie + Multifrac-Erschließungskonzept



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Danke dem BMU und dem Pt-J für die
Finanzierung und Begleitung des MAGS-
Projektes!

Danke allen EPs insbesondere dem EP4 für
die gute Zusammenarbeit!

Das Verbundprojekt **MAGS** - Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität bei der energetischen Nutzung geothermischer Systeme im tiefen Untergrund - wird finanziert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und betreut vom Projektträger Jülich.

Förderkennzeichen: 0325191A-F

Projektträger für



**Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit**