

# MAGS2 - EP5

## Einfluss der Geometrie und Grösse von geothermischen Systemen und geothermischen Feldern auf die statistischen Eigenschaften fluid-induzierter Seismizität im Produktionsbetrieb

FU Berlin, FR Geophysik

05. Oktober 2016



# Zielstellung und Schwerpunktthemen

Erarbeitung eines Modellierungsansatzes zur Vorhersage von Magnituden-Auftretenswahrscheinlichkeiten im Produktionsbetrieb

## Schwerpunkt 1

Simulation des Produktionsbetriebs unter Verwendung von analytischen/numerischen Modellierungen zur Berechnung von Spannungsänderungen und synthetisch generierte Ereigniskataloge

## Schwerpunkt 2

Magnitudenstatistik in finiten seismisch-aktiven Volumen und Seismogenic Index in geothermischen Feldern

# Übersicht

1. Statistische Analyse beobachteter Seismizität und Statistische Modellierung
  - ▶ Wartezeiten-Statistik
  - ▶ Entklustern der Kataloge
  - ▶ ETAS Modellierungen
2. Modellierung von Spannungsänderungen, Synthetische Ereignisse
  - ▶ Porendruck-Modellierung
  - ▶ poroelastische Modellierung
3. Magnitudenstatistik in finiten seismisch-aktiven Volumen
  - ▶ Effekt der Geometrie auf die Magnitudenstatistik
  - ▶ Vorhersage von Magnituden mit Seismogenen Index
  - ▶ McGarr Beziehung

Teil 1:  
Statistische Analyse und Modellierung

# Poisson-Prozess (PP)

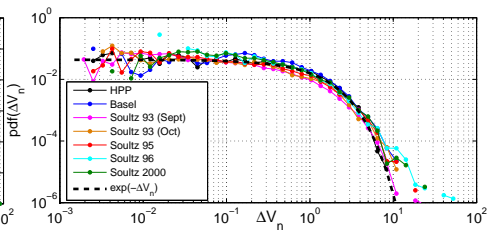
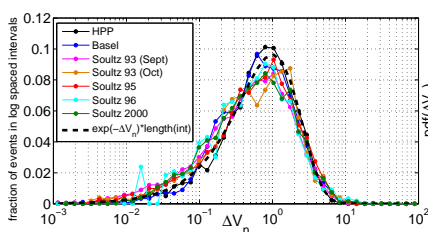
- ▶ Poisson-Prozess ist ein Prozess der nur unabhängige Ereignisse enthält
- ▶ Analyse der Wartezeiten aufeinanderfolgender fluid-induzierter Ereignisse:
  - ▶ während Phasen konstanter Aktivität → Homogener PP
  - ▶ im gesamten Katalog (zeit-abhängig) → Inhomogener PP

# Poisson-Prozess (PP)

- ▶ Poisson-Prozess ist ein Prozess der nur unabhängige Ereignisse enthält
- ▶ Analyse der Wartezeiten aufeinanderfolgender fluid-induzierter Ereignisse:
  - ▶ während Phasen konstanter Aktivität → Homogener PP
  - ▶ im gesamten Katalog (zeit-abhängig) → Inhomogener PP
- ▶ Analyse im Fluidvolumen-Bereich → Homogener PP

$$Prob(n, \lambda_{V_I}, V_I) = \frac{(\lambda_{V_I} V_I)^n}{n!} e^{-\lambda_{V_I} V_I}$$

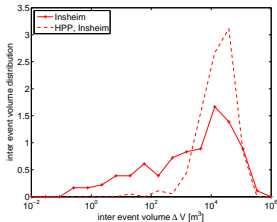
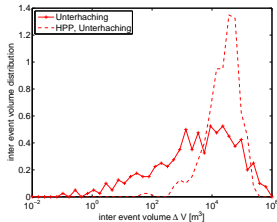
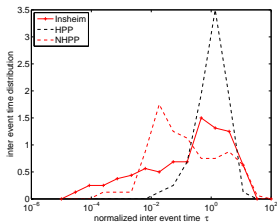
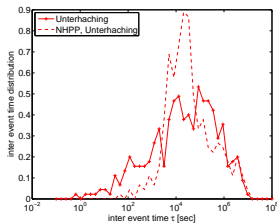
$$pdf(\Delta V_I) = e^{-\Delta V_I}$$



- ⇒ aufeinanderfolgende Ereignisse stehen in keiner kausalen Beziehung zueinander
- ⇒ Änderungen in der Seismizitätsrate als Folge von Änderungen in der Fließrate

# Unterhaching und Insheim - Wartezeiten-Statistik

## ► Wartezeiten-Verteilung im Zeit- und Fluidvolumen-Bereich



Unterhaching

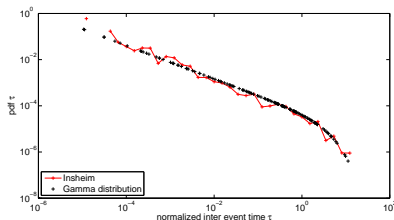
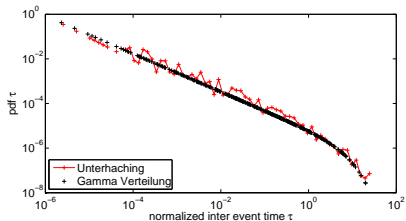
⇒ Kein Poisson Prozess

Insheim

⇒ Kein Poisson Prozess

# Unterhaching und Insheim - Wartezeiten-Statistik

- ▶ Wahrscheinlichkeitsdichte-Funktion der Wartezeiten-Verteilung im Zeit-Bereich  $\Rightarrow$  Gamma-Verteilung (Hainzl et al., 2006)

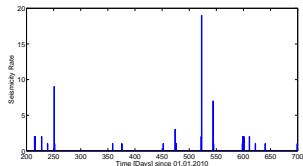
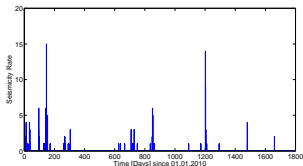
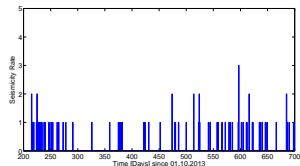
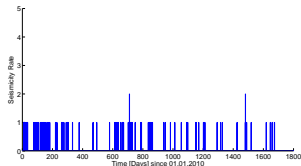
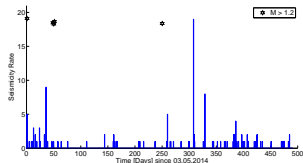
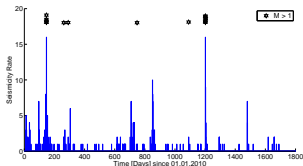


- ▶ Indiz für die Kombination aus induzierten (main shock) und getriggerten (after shock) Ereignissen im Katalog
- ▶ Entklustern der Kataloge  $\rightarrow$  Entfernen der Nachbarereignisse  
 $\Rightarrow$  Kataloge enthalten nur induzierte Ereignisse  
 $\Rightarrow$  Wartezeiten-Statistik = Poisson Prozess



# Unterhaching und Insheim - Entklustern der Kataloge

- ▶ magnitudenabhängige Raum-Zeit Fenster (Gardener & Knopoff, 1974)

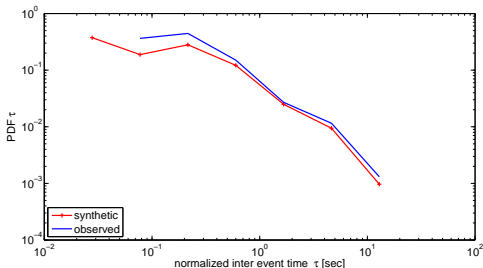
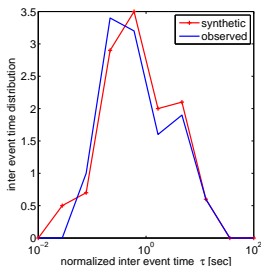
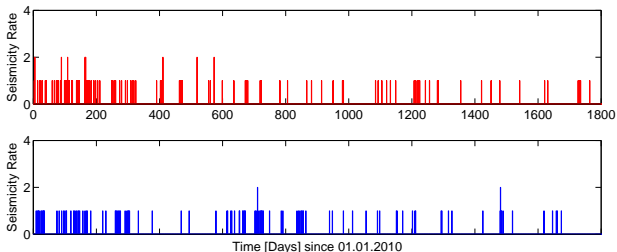


Unterhaching: 42 Prozent main shocks  
⇒ induzierte Ereignisse

Insheim: 56 Prozent main shocks  
⇒ induzierte Ereignisse

# Unterhaching - Vergleich Beobachtung und Simulation

- ▶ Ereignisrate und Wartezeiten-Statistik im entklusterten Katalog (blau) und im synthetischen Katalog (rot) auf Grundlage von Porendruck-Modellierung



# ETAS Modellierung

Epidemic Type After Shock Modell eingeführt von Ogata (1985, 1986, 1988)

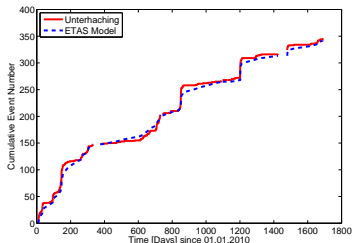
- ▶ selbsterregendes Punkt Prozess Modell für geklusterte Ereignisse (Hawkes, 1974)
- ▶ definiert in Form einer konditionalen Intensitätsfunktion
- ▶ jedes Erdbeben kann Nachbeben auslösen
- ▶ ETAS Modell beschrieben durch 5 Parameter (main shock Aktivität, Magnitudensensitivität, after shock Abklingcharakteristik)

Vorgehensweise:

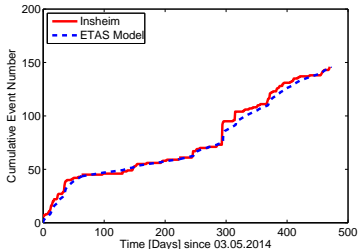
1. Bestimmung der ETAS Parameter in grober Näherung mit Verwendung des entklusterten Katalogs
2. Inversion des finalen ETAS Modells über Maximum-Likelihood und Akaike Information Criterion (AIC)

# Unterhaching und Insheim - ETAS Modell

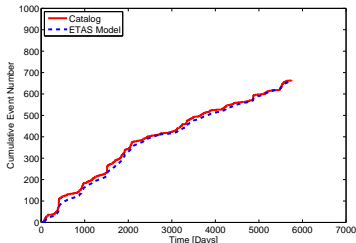
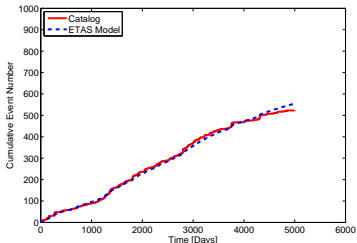
► Unterhaching:



Insheim:



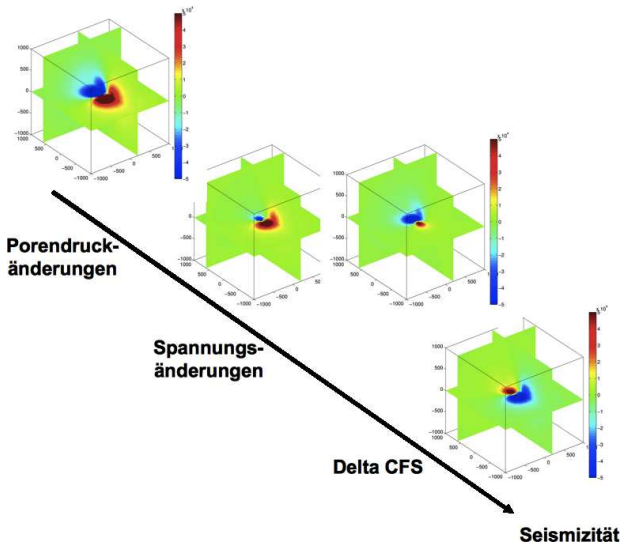
► geothermisches Feld in Italien, hydrothermales System :



Teil 2:  
Modellierung von Spannungsänderungen

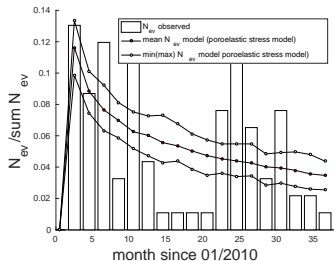
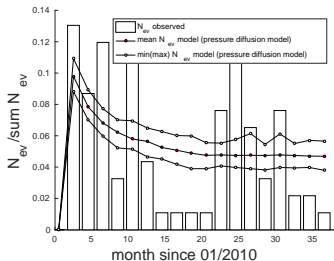
# Modellierung von Spannungsänderungen

Schematische Darstellung: Berechnung von Porendruck- und poroelastischen Spannungsänderungen für eine Dublette (Injektionsbohrung - Förderbohrung)

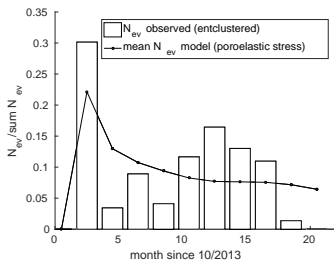
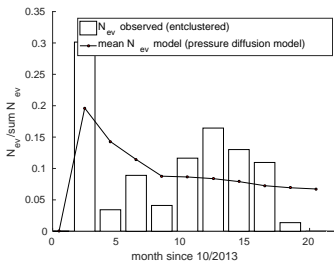


# Vergleich synthetische und beobachtete Seismizität

Unterhaching



Insheim



(Porendruck, Darcy)

(Poroelastisch)

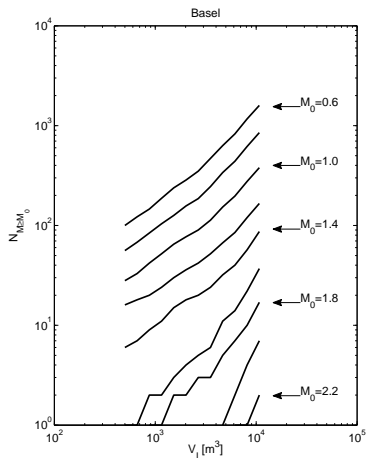
Teil 3:  
Magnitudenstatistik in finiten seismisch-aktiven Volumen



# Geometrie und Größe des Perturbierten Gesteinsvolumen

## Beobachtung (Basel):

Unterrepräsentierung  $M > 1.4$



## Effekt der Geometrie:

Wahrscheinlichkeit  $W_F$  der Verteilung von Bruchflächen der Größe  $L$ :

$$W_F(L) \propto L^{-(2b+1)}$$

führt zu Gutenberg-Richter Magnituden-Verteilung in unbegrenzten Volumen

Produkt aus  $W_F$  und der Wahrscheinlichkeit dass Bruchfläche mit perturbierten Volumen interagiert:

$$W_F(L) W_{Geo}(L)$$

führt zu Gutenberg-Richter Magnituden-Verteilung in finiten Volumen

# Geometrie und Größe des Perturbierten Gesteinsvolumen

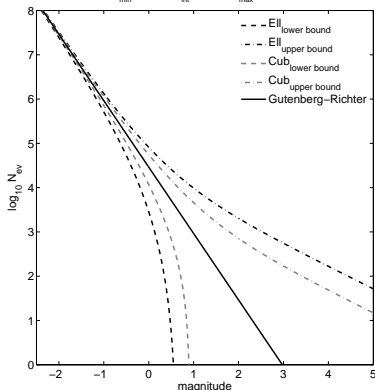
## Geometrie des perturbierten Gesteinsvolumen:

theoretische Magnitudenhäufigkeiten



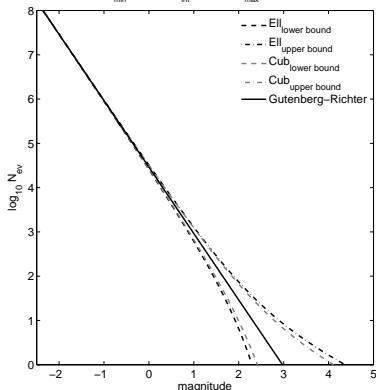
### hydro-fracking

$L_{min}=10.00m$   $L_{int}=50.00m$   $L_{max}=400.00m$



### hydraulische Stimulation

$L_{min}=150.00m$   $L_{int}=250.00m$   $L_{max}=400.00m$



Größe und Geometrie (zeitabhängig) des perturbierten Reservoirvolumen  
⇒ Einfluss auf die Magnitudenstatistik (b-Wert und  $M_{max}$ )

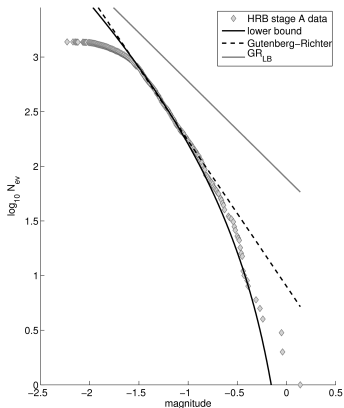
# Geometrie und Größe des Perturbierten Gesteinsvolumen

## 2 Datenbeispiele:

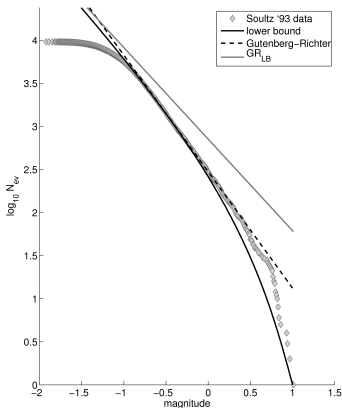
beobachtete Magnitudenhäufigkeiten



hydro-fracking



hydraulische Stimulation



Größe und Geometrie (zeitabhängig) des perturbierten Reservoirvolumen  
⇒ Einfluss auf die Magnitudenstatistik (b-Wert und  $M_{max}$ )

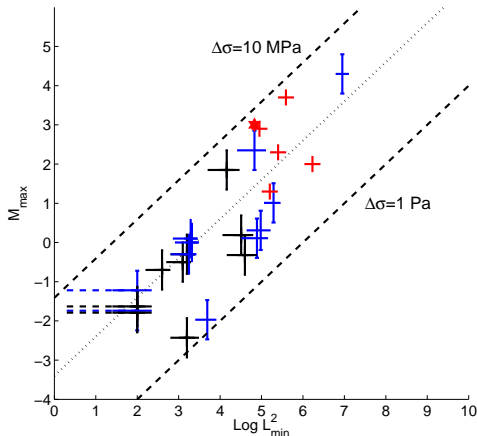
# Geometrie und Größe des Perturbierten Gesteinsvolumen

## Magnituden-kontrollierende geometrische Größe

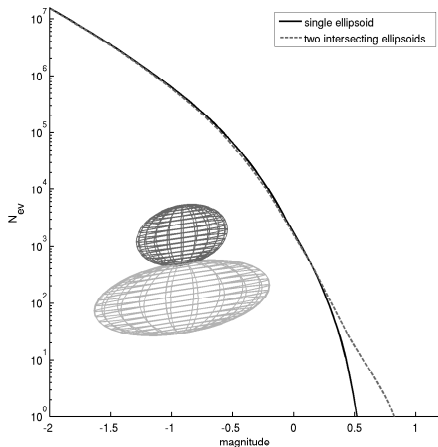
$$M(L) = \log_{10} L^2 + (\Delta\sigma - \log_{10} C)/1.5 - 6.07$$

$$M_{\max}(M_{\max}) \approx \log_{10} L_{\min}^2 - 1$$

(für stress drop  $\Delta\sigma \sim 10 \text{ MPa}$ )



# Geometrie und Größe des Perturbierten Gesteinsvolumen



## Approximation geothermische Felder

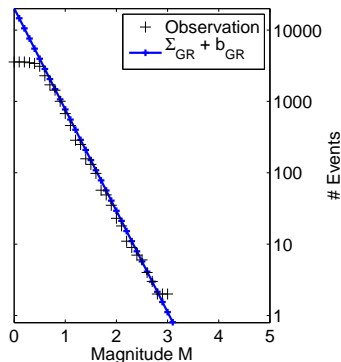
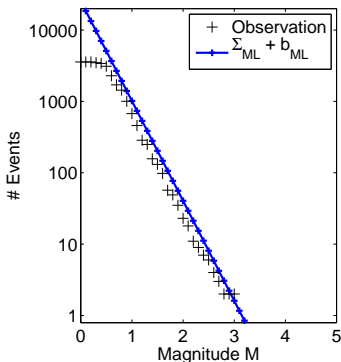
perturbiertes Volumen in Form  
zwei sich schneidender Ellipsoide und  
entsprechende theoretische  
Magnituden-Häufigkeitskurve

# Vorhersage I - Magnitudenhäufigkeit

## Test Stimulation:

- ▶ großes Fluidinjektionsvolumen  
⇒ großes perturbiertes Gesteinsvolumen
- ▶ Basel EGS Stimulation:  
 $V_I, \Sigma, b, \rho$

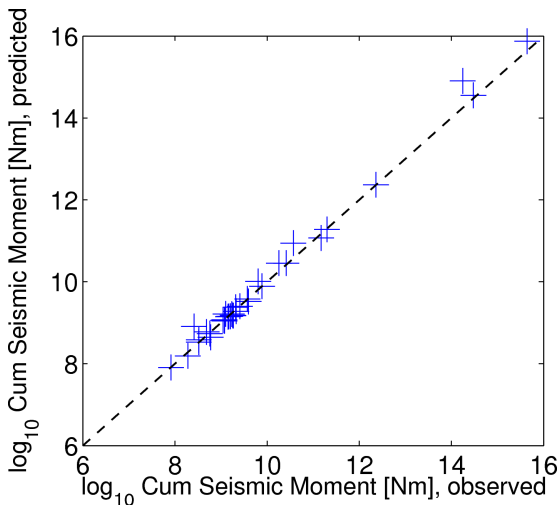
## berechnete und beobachtete Magnitudenhäufigkeit



(ML: maximum likelihood Methode, GR: least square Methode)

# Vorhersage II - Seismisches Moment

Berechnung kumulatives seismisches Moment und Vergleich mit tatsächlich freigesetztem kumulativen seismischen Moment für 34 Fluidinjektionen



# Vorhersage III - Auftretenswahrscheinlichkeit

- ▶ Grundlage: Statistisches Modell = Poisson Prozess

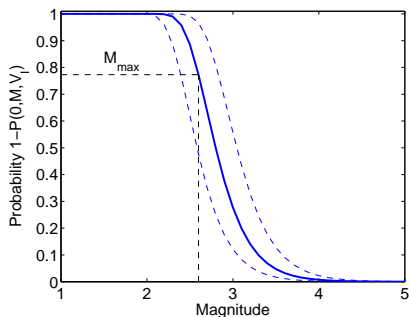
- ▶ während der Injektion ( $t \leq t_0$ ):

$$1 - \text{Prob}(0, M, V_I) = 1 - \exp(-V_I \cdot 10^{\Sigma - bM}) = 1 - \exp(-N_{\geq M})$$

- ▶ plus Zeiten nach dem shut-in der Injektion ( $t > t_0$ ):

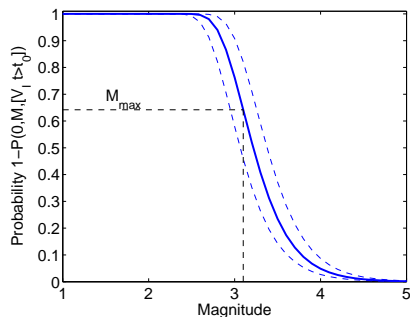
$$1 - \text{Prob}(0, M, [V_I t > t_0]) = 1 - \exp(-N_{\geq M} \cdot (1 + P_0))$$

mit  $P_0 = (1 - (\frac{t}{t_0})^{1-p}) / (p - 1)$



$t \leq t_0$

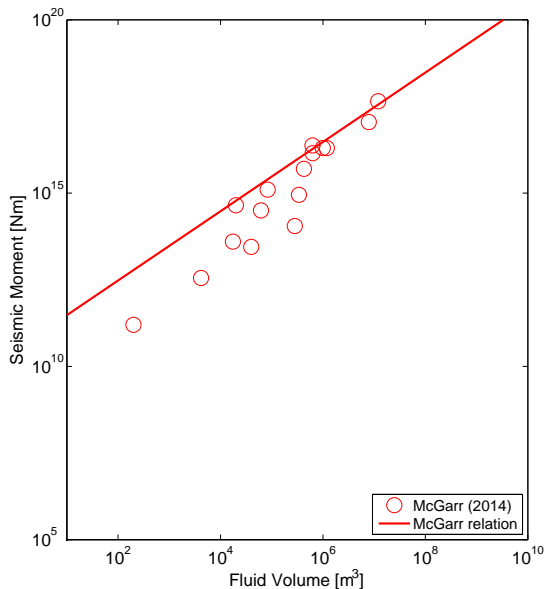
Basel EGS



$t \leq 2t_0$



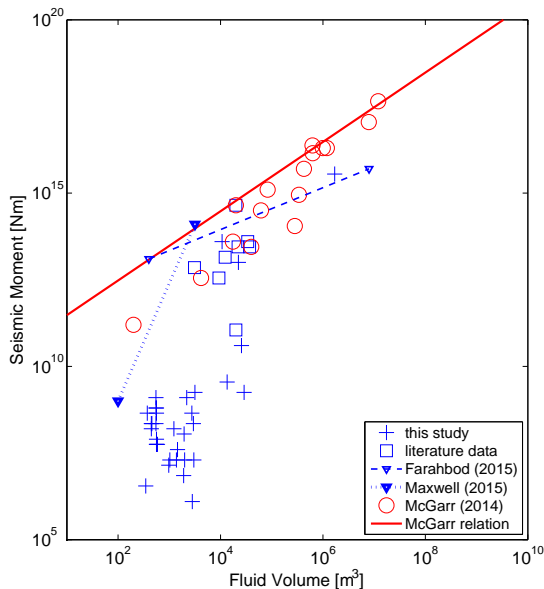
# Fluidvolumen und maximal mögliche Magnitude



McGarr (1976, 2014):  
empirische Beziehung  
zwischen maximalen  
seismischen Moment und  
injiziertem Fluidvolumen:

$$M_0(max) = G \Delta V$$

# Fluidvolumen und maximal mögliche Magnitude



McGarr (1976, 2014):  
empirische Beziehung  
zwischen maximalen  
seismischen Moment und  
injiziertem Fluidvolumen:

$$M_0(max) = G \Delta V$$

# Fluidvolumen und maximal mögliche Magnitude

Shapiro et al. (2011, 2013):

$$M_{max} = \log_{10} L_{min}^2 + \frac{2}{3} \log_{10} \Delta\sigma - 6.07$$

- ▶ Seismogener Index Modell:
  - ▶ Ereignisse werden induziert durch Perturbationen des Porendrucks (Diffusionsprozess)
  - ▶ Größe des perturbierten Gesteinsvolumen beeinflusst die Magnitudenstatistik und kontrolliert die maximale Magnitude

# Fluidvolumen und maximal mögliche Magnitude

Shapiro et al. (2011, 2013):

$$M_{max} = \log_{10} L_{min}^2 + \frac{2}{3} \log_{10} \Delta\sigma - 6.07$$

- ▶ Seismogener Index Modell:
  - ▶ Ereignisse werden induziert durch Perturbationen des Porendrucks (Diffusionsprozess)
  - ▶ Größe des perturbierten Gesteinsvolumen beeinflusst die Magnitudenstatistik und kontrolliert die maximale Magnitude
- ▶ Hypothese: perturbiertes Gesteinsvolumen  $V_P$  proportional zum injiziertem Fluidvolumen  $V_I$

# Fluidvolumen und maximal mögliche Magnitude

Shapiro et al. (2011, 2013):

$$M_{max} = \log_{10} L_{min}^2 + \frac{2}{3} \log_{10} \Delta\sigma - 6.07$$

- ▶ Seismogener Index Modell:
  - ▶ Ereignisse werden induziert durch Perturbationen des Porendrucks (Diffusionsprozess)
  - ▶ Größe des perturbierten Gesteinsvolumen beeinflusst die Magnitudenstatistik und kontrolliert die maximale Magnitude
- ▶ Hypothese: perturbiertes Gesteinsvolumen  $V_P$  proportional zum injiziertem Fluidvolumen  $V_I$
- ▶ Annahmen: homogene und isotrope Bedingungen, konstante Fließrate und konstanter Spannungsabfall  $\Delta\sigma = 3MPa$

lineare Diffusion:

$$V_P \propto V_I^{3/2}$$

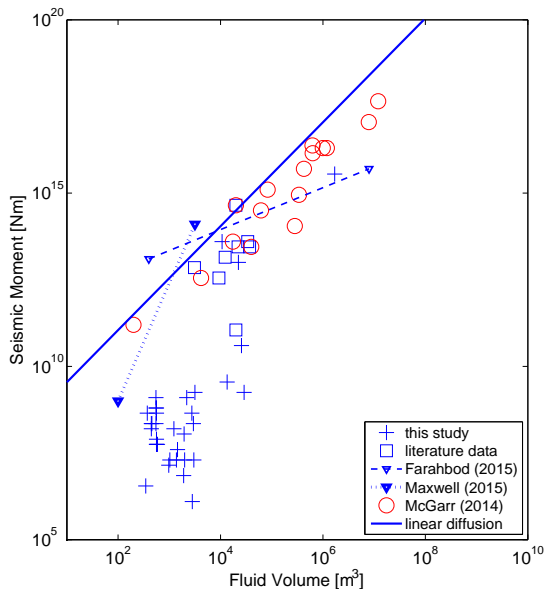
$$\log_{10} M_{0_{max}} = \frac{3}{2} (\log_{10} V_I + C) + 6.47$$

nichtlineare Diffusion:

$$V_P \propto V_I$$

$$\log_{10} M_{0_{max}} = (\log_{10} V_I + C) + 6.47$$

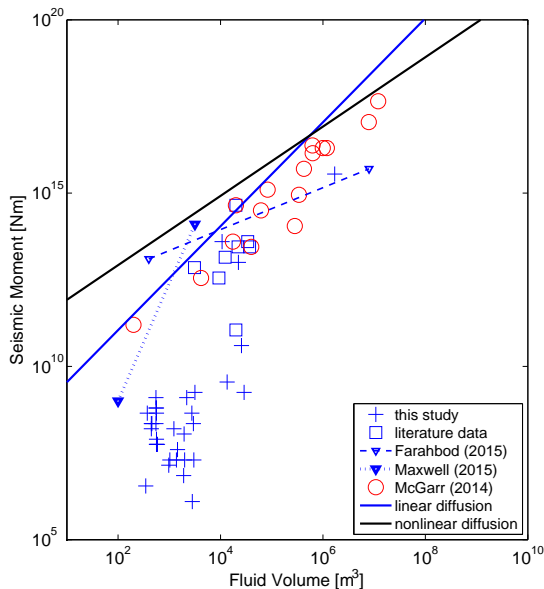
# Fluidvolumen und maximal mögliche Magnitude



► lineare Diffusion

$$\log_{10} M_{0_{max}} = \frac{3}{2}(\log_{10} V_l + 1.05) + 6.47$$

# Fluidvolumen und maximal mögliche Magnitude



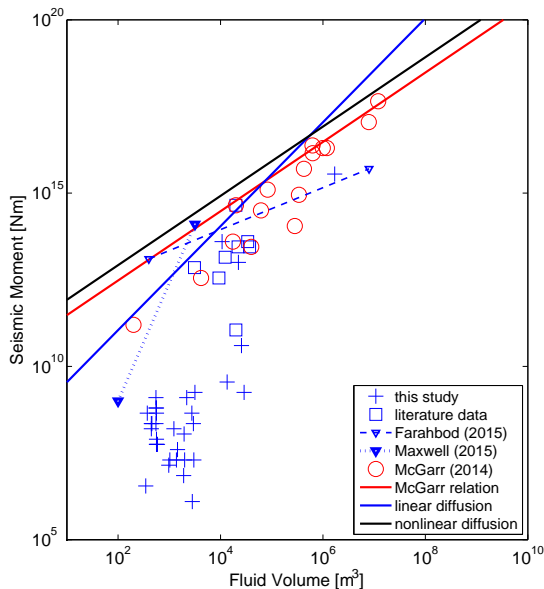
- ▶ lineare Diffusion

$$\log_{10} M_{0_{max}} = \frac{3}{2}(\log_{10} V_I + 1.05) + 6.47$$

- ▶ nichtlineare Diffusion

$$\log_{10} M_{0_{max}} = (\log_{10} V_I + 4.45) + 6.47$$

# Fluidvolumen und maximal mögliche Magnitude



- ▶ lineare Diffusion

$$\log_{10} M_{0_{max}} = \frac{3}{2}(\log_{10} V_I + 1.05) + 6.47$$

- ▶ nichtlineare Diffusion

$$\log_{10} M_{0_{max}} = (\log_{10} V_I + 4.45) + 6.47$$

- ▶ McGarr Beziehung:

$$M_0(max) = G \Delta V$$



# Zusammenfassung EP5

- ▶ **Statistische Analyse Seismizität: Auftreten von induzierten (main shock) und getriggerten (after shock) Ereignissen → Entklustern**
- ▶ **Simulation des Produktionsbetriebs: synthetischer Ereigniskatalog zeigt gute Übereinstimmung mit entklustertem Katalog**
- ▶ **nicht-stationäre ETAS Modelle zur Beschreibung der main shock - after shock Aktivität**
- ▶ **Magnitudenstatistik in finiten seismisch-aktiven Volumen: Beeinflussung der Magnitudenhäufigkeitsverteilung,  $b$ -Wert und Seismogenic Index**
- ▶ **geometrie-beeinflusster  $b$ -Wert und Seimogenic Index geeignet zur Vorhersage von Magnitudenhäufigkeiten und des freigesetzten seismischen Moments**
- ▶ **empirische Beziehung zwischen Injektionsvolumen und maximale seismischen Moment (McGarr) ergibt sich aus unserem Modell**
- ▶ **Parametrisierung Seismogenic Index, Einbeziehung des Griffith Energy Equilibrium Criterion**

# Danksagung

The joint project **MAGS2** – Microseismic Activity of Geothermal Systems – **From single reservoirs to geothermal fields** is funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy and supervised by the Project Management Jülich.

**FKZ:** 0325662A-G



Project Management for



Federal Ministry  
for Economic Affairs  
and Energy

Wir danken auch allen Daten-Bereitstellern.