

MAGS2 Einzelprojekt 5

Einfluss der Geometrie und Größe von geothermischen Systemen und geothermischen Feldern auf die statistischen Eigenschaften fluidinduzierter Seismizität im Produktionsbetrieb

Freie Universität Berlin
FR Geophysik

3. Dezember 2013



Rückblick MAGS - Resultat

Analyse beobachteter
fluidinduzierter Seismizität

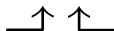


Simulationen fluid-
induzierter Seismizität



Erarbeitung eines Modellierungsansatzes zur Vorhersage der
Magnituden-Auftretenswahrscheinlichkeit

1. Skalierungsrelationen



2. kontrollierende Parameter

- ▶ mod. Gutenberg-Richter - Gesetz
- ▶ mod. Omori - Gesetz
- ▶ Poisson-Prozess

- ▶ Fluidvolumen
(bzw Fließrate)
- ▶ Seismogenic Index

Rückblick MAGS - Resultat

Analyse beobachteter
fluidinduzierter Seismizität

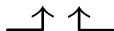


Simulationen fluid-
induzierter Seismizität



Erarbeitung eines Modellierungsansatzes zur Vorhersage der
Magnituden-Auftretenswahrscheinlichkeit

1. Skalierungsrelationen



2. kontrollierende Parameter

- ▶ mod. Gutenberg-Richter - Gesetz
- ▶ mod. Omori - Gesetz
- ▶ Poisson-Prozess

- ▶ Fluidvolumen
(bzw Fließrate)
- ▶ Seismogenic Index

Implementierung als Modul in SeisComP3: Echt-Zeit Überwachung
BGR - Detektionsalgorithmus + FU - Vorhersage-Modell

MAGS → MAGS 2

MAGS → **MAGS 2**

hydraulische Stimulation → **Produktionsbetrieb**

MAGS → **MAGS 2**

hydraulische Stimulation → **Produktionsbetrieb**

geothermisches Reservoir → **geothermisches Feld**

MAGS → **MAGS 2**

hydraulische Stimulation → **Produktionsbetrieb**

geothermisches Reservoir → **geothermisches Feld**

Unterhaching



Bayerische Molasse

Landau



Südpfalz

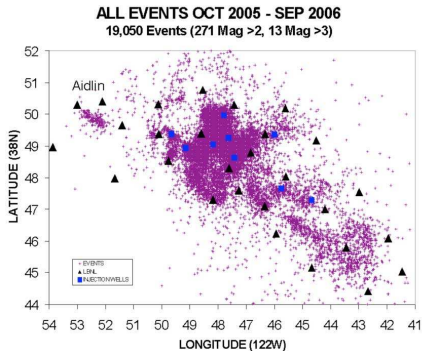
MAGS → MAGS 2

hydraulische Stimulation → **Produktionsbetrieb**

geothermisches Reservoir → **geothermisches Feld**

Unterhaching
↓
Bayerische Molasse

Landau
↓
Südpfalz



The Geysers, USA, Geothermiefeld
22 Kraftwerke
Produktion seit 1960
(Quelle: Berkeley Lab)

Zielstellung

Erarbeitung eines Modellierungsansatzes zur Vorhersage von Magnituden-Auftretenswahrscheinlichkeiten im Produktionsbetrieb

kontrollierende Betriebsparameter und statistische Skalierungsrelationen induzierter seismischer Ereignisse

- ▶ langfristige Zirkulation von Fluid, multiple Anzahl von Injektions- und Förderbohrungen
- ▶ mögliche poroelastische Kopplungseffekte der Porendruck-Änderung, Temperatureffekte
- ▶ begrenzte Größe und Geometrie geothermischer Systeme
- ▶ räumliche Variation des Seismogenic Index in geothermischen Feldern

→ Beitrag zur Bewertung der seismischen Gefährdung

Schwerpunktt Themen

Erarbeitung eines Modellierungsansatzes zur Vorhersage von Magnituden-Auftretenswahrscheinlichkeiten im Produktionsbetrieb

Schwerpunkt 1

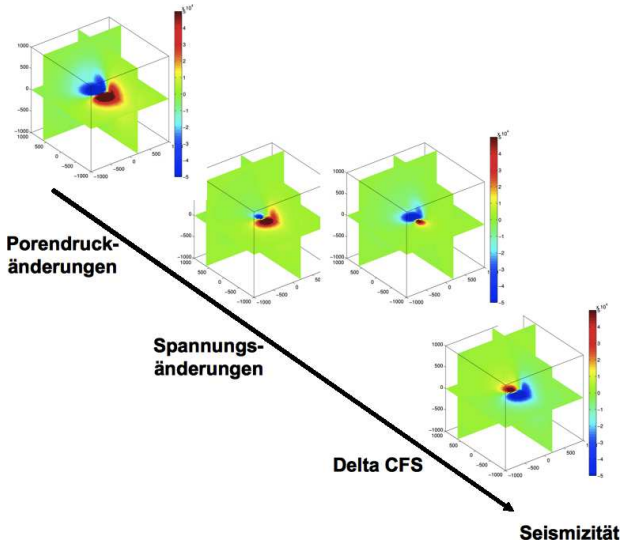
Simulation des Produktionsbetriebs unter Verwendung von analytischen/numerischen Modellierungen zur Berechnung von Spannungsänderungen und synthetisch generierte Ereigniskataloge

Schwerpunkt 2

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

Schwerpunkt 1 - Simulationen

Berechnung von Porendruck- und poroelastischen Spannungsänderungen
Dublette (Injektionsbohrung - Förderbohrung), Beispiel Unterhaching



Schwerpunkt 1 - Simulationen

Berechnung von Porendruck- und poroelastischen Spannungsänderungen
Dublette (Injektionsbohrung - Förderbohrung), Beispiel Unterhaching

- ▶ Analytische Modellierung - Lösungen von Rudnicki (1986), modifiziert für:
 - ▶ Injektionsquellen + Förderquellen
 - ▶ Anisotropie der Permeabilität
 - ▶ (Variable Fließrate - Stufenfunktion)
 - ▶ (Post-Injektionszeit)

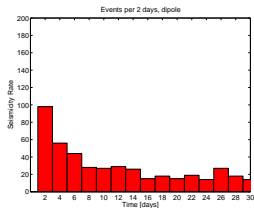
Abmessung x, y, z , Sampling	8000 m, 160 m
Abstand Dipol Δ_{Dipol}	3798 m
Zeit	$t = 30 d, \Delta_t = 2 d$ bis $t = 10 yr, \Delta_t = 1 yr$
Permeabilität, anisotrop	$\kappa = \text{diag}(6, 600, 6) \cdot 10^{-16} m^2$
Fließrate	$q = 110 l/s$
Young Modul	$E = 47 GPa$
Bulk Modul, grain material	$K_{gr} = 76 GPa$
Wasser	$K_{fl} = 2.25 GPa$
Viskosität	$\eta = 1.9 \cdot 10^{-4} Pa s$
Porosität	$\phi = 0.1$
Poisson Zahl	$\nu = 0.297$

(Rock Physics Handbook, Geschwindigkeit-Porosität Beziehung
Geschwindigkeit-Dichte Beziehung)

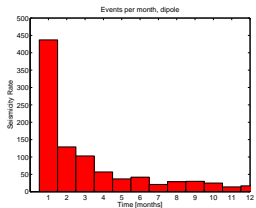
Reservoir im Produktionsbetrieb: Ergebnisse

Seismizitätsrate:

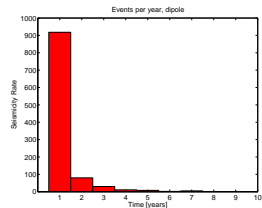
Monat 1



Jahr 1



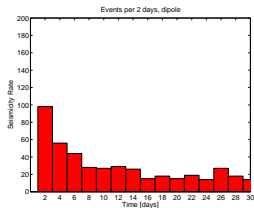
Jahr 1-10



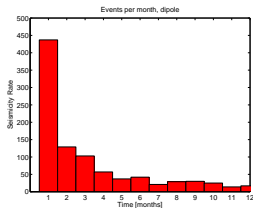
Reservoir im Produktionsbetrieb: Ergebnisse

Seismizitätsrate:

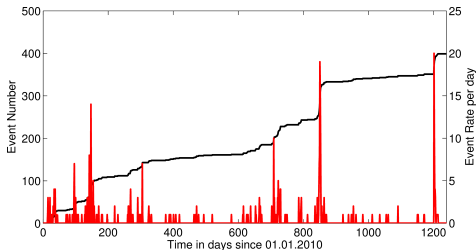
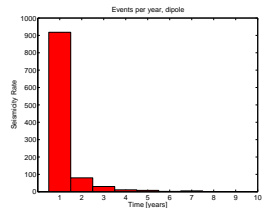
Monat 1



Jahr 1



Jahr 1-10



Unterhaching (Katalog LMU):

Seismische Aktivität als Folge von:

- ▶ Änderungen in Fließraten
- ▶ Pumpenstillstand
- ▶ Änderungen in Fluidtemperatur

Schwerpunkt 1 - Simulationen

Temperatur-Einfluss \rightarrow thermisch induzierte Spannungsänderungen

$$\frac{\sigma_{i,j}^{thermo}}{\sigma_{i,j}^{poro}} = \frac{K \lambda \Delta T}{\alpha \Delta p}$$

[Segall und Fitzgerald, 1998]

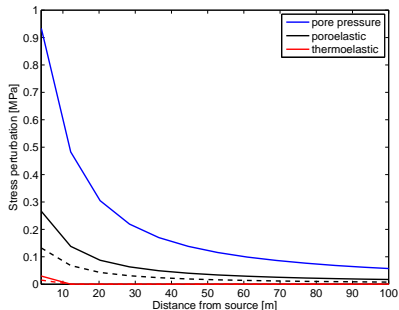
Realisierung:

- ▶ Δp Diffusion Porendruck
- ▶ ΔT Diffusion Temperatur
- ▶ Kompressionsmodul $K = 39 \text{ GPa}$
- ▶ Biot-Koeffizient $\alpha = 0.49$
- ▶ Wärmeausdehnungskoeffizient
 $\lambda = 1.6 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

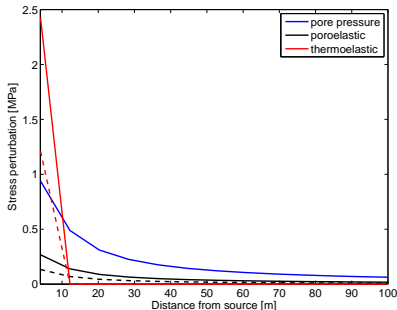
Schwerpunkt 1 - Simulationen

Temperatur-Einfluss → thermisch induzierte Spannungsänderungen

4 Tage



30 Tage



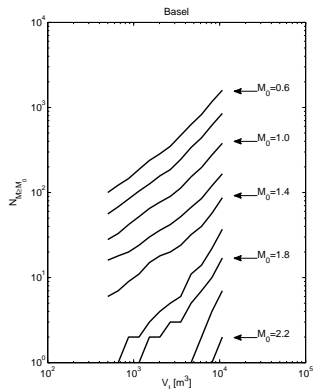
Injektion	Porendruck	σ_1^{poro}	σ_3^{poro}	σ_1^{thermo}	σ_3^{thermo}
4 Tage	1 MPa	0.27 MPa	0.13 MPa	0.03 MPa	0.015 MPa
30 Tage	1 MPa	0.27 MPa	0.13 MPa	2.4 MPa	1.2 MPa

(Maximalwerte, Entfernung zur Quelle 5 m)

Schwerpunkt 2 - Finites Volumen

Beobachtung (Basel):

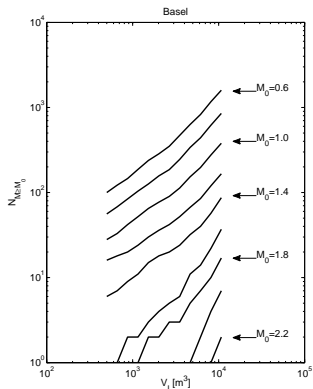
Unterrepräsentierung größerer
Magnituden



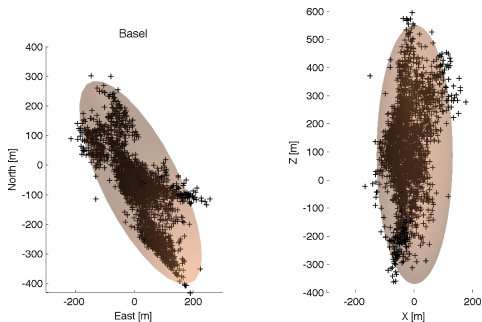
Schwerpunkt 2 - Finites Volumen

Beobachtung (Basel):

Unterrepräsentierung größerer
Magnituden



Erklärung:



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

Schwerpunkt 2 - Finites Volumen

Effekt der Geometrie

Wahrscheinlichkeit W_F der Verteilung von Bruchflächen mit 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 dem perturbierten Volumen interagiert:

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

führt zu Gutenberg-Richter Magnituden-Verteilung in begrenzten Volumen

Schwerpunkt 2 - Finites Volumen

Effekt der Geometrie

Wahrscheinlichkeit W_F der Verteilung von Bruchflächen mit der Größe L :

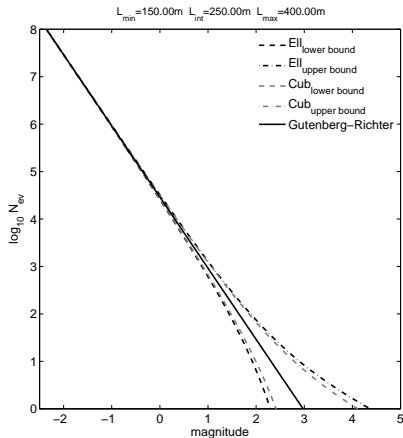
$$W_F(L) \propto L^{-(2b+1)}$$

führt zu Gutenberg-Richter Magnituden-Verteilung in unbegrenzten Volumen

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

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

führt zu Gutenberg-Richter Magnituden-Verteilung in begrenzten Volumen

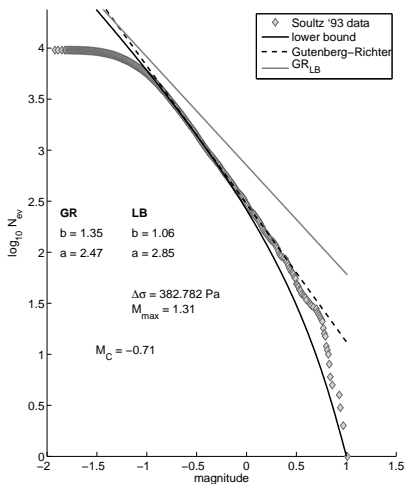


theoretische Magnituden-Häufigkeitsverteilung

Schwerpunkt 2 - Finites Volumen

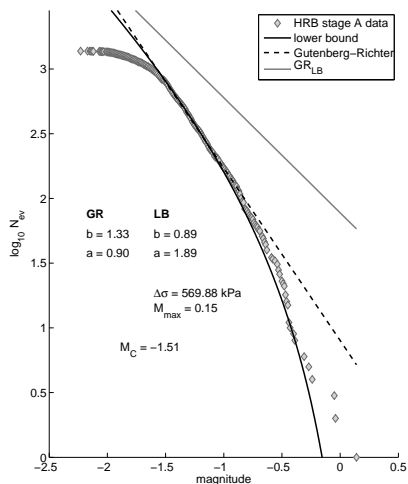
2 Datenbeispiele

Stimulation, Granit



$$b_{GR} = 1.35 \rightarrow b_{LB} = 1.06$$

Fracking, Schiefer



$$b_{GR} = 1.33 \rightarrow b_{LB} = 0.89$$

Schwerpunkt 2 - Finites Volumen

Magnituden-kontrollierende geometrische Größe

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

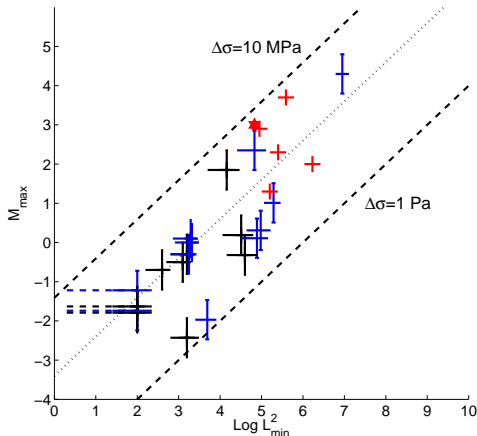
Schwerpunkt 2 - Finites Volumen

Magnituden-kontrollierende geometrische Größe

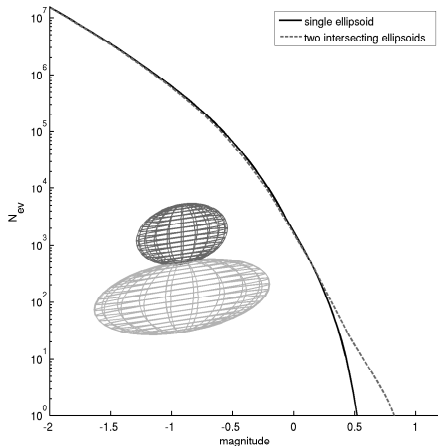
$$M(L) = \log_{10} L^2 + (\Delta\sigma - \log_{10} C)/1.5 - 6.07$$

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

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



Schwerpunkt 2 - Finites Volumen



Approximation geothermische Felder

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

Literatur

Rudnicki, J.W., 1986, Fluid mass sources and point forces in linear elastic diffusive solids, *Mechanics of Materials*, **5**, 383-393.

Segall, P. & S.D. Fitzgerald, 1998, A note on induced stress changes in hydrocarbon and geothermal reservoirs, *Tectonophysics*, **289**, 117-128.

Shapiro, S.A., O.S. Krüger, C. Dinske & C. Langenbruch, 2011, Magnitudes of induced earthquakes and geometric scales of fluid-stimulated rock volumes, *Geophysics*, **76**, WC53-WC61.

Shapiro, S.A., O.S. Krüger & C. Dinske, 2013, Probability of inducing given-magnitude earthquakes by perturbing finite volumes of rocks, *Journal of Geophysical Research*, **118**, 3557-3575.

Danksagung

Das Verbundprojekt **MAGS2** - Mikroseismischen Aktivität geothermischer Systeme - **Vom Einzelsystem zur großräumigen Nutzung** wird finanziert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und betreut vom Projektträger Jülich.

Förderkennzeichen: 0325662A-G



Projektträger für



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

Datenkataloge wurden zur Verfügung gestellt von:

Basel: M. Häring
Soultz: A. Jupe & G.E.I.E.)
Unterhaching: J. Wassermann
und den Sponsoren des *PHASE* Projektes.