



Mikroseismische Aktivität geothermischer Systeme 2 (MAGS 2) - Vom Einzelsystem zur großräumigen Nutzung

EP3: Entwicklung eines Verfahrens zur hochauflösenden, manuellen und automatischen Ortung und Charakterisierung induzierter, seismischer Ereignisse in Tiefengeothermieprojekten

L. Küperkoch, S. Wehling-Benatelli, W. Friederich, K. Olbert & T. Meier

Goslar, 16.04.2013



RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB



Prof. Dr. M. Meier
K. Olbert
Christian-Albrechts-Universität Kiel
Institut für Geowissenschaften

Prof. Dr. W. Friederich
S. Wehling-Benatelli
Ruhr-Universität Bochum
Insitut für Geologie, Mineralogie
und Geophysik

Dr. L. Küperkoch
BESTEC GmbH
Landau

Charakterisierung seismischer Ereignisse ist grundlegende, seismologische Fragestellungen, jedoch:

- Große Datensätze (Soultz-Stimulation mehrere tausend Ereignisse, Inbetriebnahme Insheim mehrere hundert Ereignisse)
- Häufig von mehreren Auswertern bearbeitet \Rightarrow inkonsistente Phasenersteinsätze und unzureichende Fehlerabschätzung
- Unzureichendes Geschwindigkeitsmodell ("gekoppeltes Problem Hypozentrumsbestimmung - Geschwindigkeitsmodell")

\Rightarrow Verbesserung von Präzision und Genauigkeit der Lokalisierungen notwendig!

Entwicklung eines Softwarepakets zur umfassenden Charakterisierung seismischer Ereignisse (offline!)

Charakterisierung:

- Präzise und genaue Bestimmung von Ort und Zeit des seismischen Ereignisses
- Lokalisierungsfehler
- Magnitude (Stärke)
- Herdmechanismus
- Herdradius
- Spannungsabfall
- abgestrahlte seismische Energie

Lösungsstrategie

manueller Referenzdatensatz I ⇒ Optimierung Parameter Automatik
PyLoT
(Di Stefano et al., 2006;
Diehl et al., 2009)

manueller Referenzdatensatz II ⇒

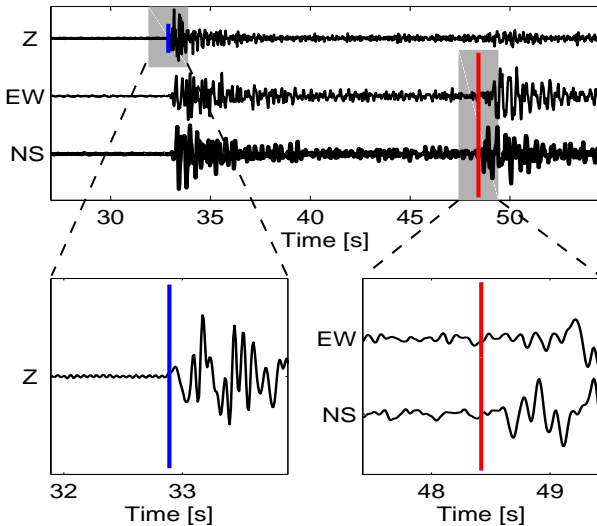
Automatik testen
(autoPyLoT)

Bearbeitung kompletter Datensatz
mittels Automatik

"Minimum-1D-
Geschwindigkeitsmodell"

Relokalisierung gesamter Datensatz, Herdparameter,
Ähnlichkeits-/Clusteranalyse, Relativlokalisierungen

"Picking"



- Pro Phasenersteinsatz drei Picks:
 - frühestmöglicher Ersteinsatz
 - spätestmöglicher Ersteinsatz
 - wahrscheinlichster Ersteinsatz
- Einheitliche Filterung
- Seismogrammvergrößerung ("Pickfenster") abhängig vom SNR

⇒ Die automatisch bestimmten Ersteinsätze samt zugehöriger Fehlerintervalle müssen innerhalb der so bestimmten Fehlergrenzen liegen!

PILOT/autoPILOT \Rightarrow PyLoT/autoPyLoT

PyLoT - The Python picking and Location Tool

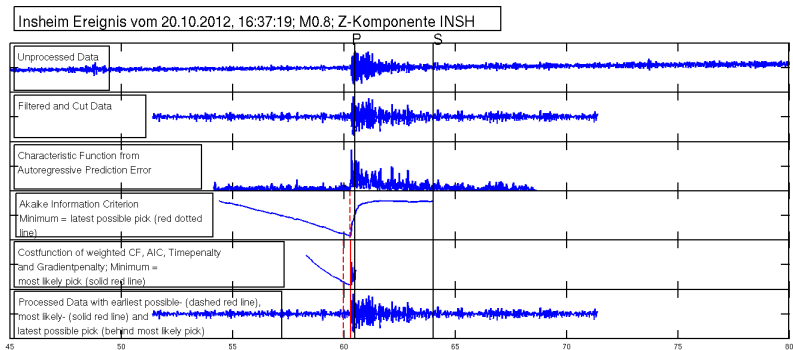


- Umschreiben von MatLab™ nach Python!
- Entwicklung von PILOT/autoPILOT in MatLab™ ist ausgelaufen
- Substantielle Modifikationen von PyLoT/autoPyLoT:
Kompatibilität zu weiteren seismologischen Datenstandards,
Handling unterschiedlicher Sensoren, Integration von
GPS-Statusinformationen, Umgang mit zeitversetzten
Komponentenaufzeichnungen, ...
- Nahtlose Verknüpfung der Prozesskette PyLoT/autoPyLoT -
VELEST - hypoDD - NLLoc - HASH
- **Objektorientierte Programmiersprache!**
- Plattform-Unabhängig (Unix, Mac OS X, Windows)
- Flexibel (Online-Datenprotokolle von ObsPy verwendbar)
- Lizenzierte Distribution des Softwarepakets

Automatische Bestimmung der P- und S-Phasen

K. Olbert, CAU

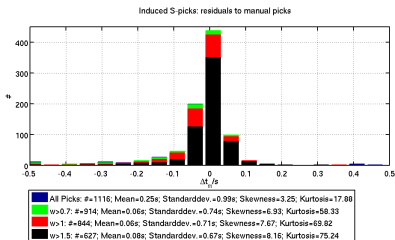
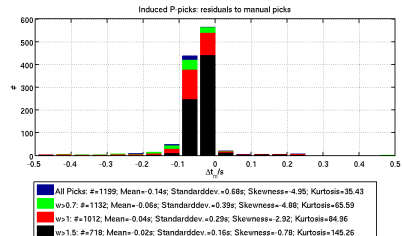
- Akaike-Informations-Kriterium zur Phasenidentifikation
- Wellenlaufzeit aus Minimum von Kostenfunktion (CF+AIC+Nebenbedingungen)
- Qualitätsmaß aus S/N und Slope von CF und Spur



Automatische Bestimmung der P- und S-Phasen (CAU)

erste Ergebnisse & Ausblick

Ergebnisse für Testlauf mit 473 Events von 03.2012-12.2013



Ausblick:

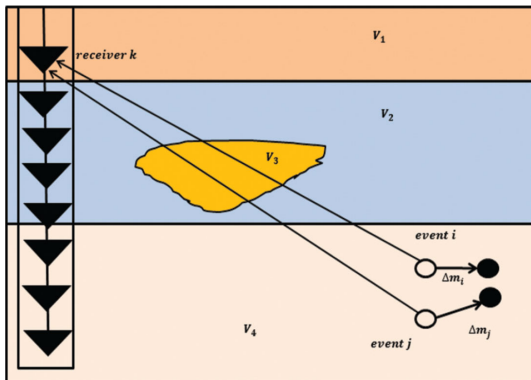
- kompletten Datensatz durchprozessieren
- Sensitivitätsanalyse
- Relokalisierungen mit automatisch bestimmten Einsatzzeiten
- Entwicklung und Testen eines Kreuzkorrelationsdetektors

- FORTRAN77-Routine, um 1D-Geschwindigkeitsmodelle und initiale Referenz-Geschwindigkeitsmodelle für seismische Tomografie abzuleiten
- Löst iterativ das gekoppelte, nicht-lineare Problem Hypozentrumsbestimmung - Geschwindigkeitsmodell
- Iteration:
 - Lösung des Vorwärtsproblems (Berechnung der Ankunftszeiten für direkte, refraktierte und reflektierte Welle mittels Ray-Tracer)
 - Lösung des inversen Problems (Bestimmung des Geschwindigkeitsmodells) durch vollständige Inversion der Least-Squares- (Jacobi-) Matrix
- Durch Iteration Lösung des nicht-linearen Problems

Kissling et al., 1994: Initial reference models in local earthquake tomography, J. Geophys. Res., 99, 19635-19646

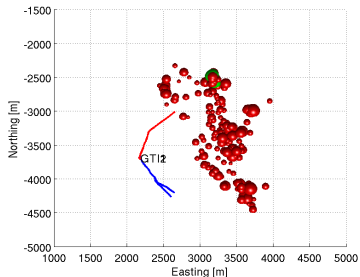
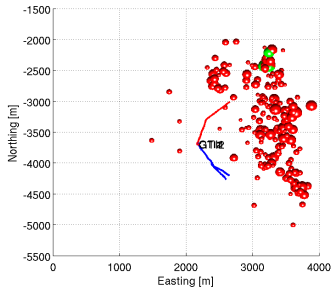
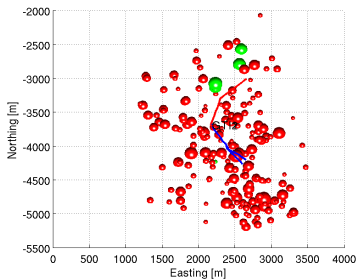
Akkurate Lokalisierungen der Inheim-Ereignisse

hypoDD, Double-Difference Location Algorithm

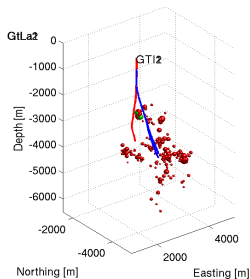
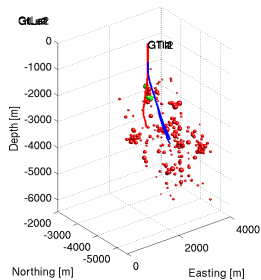
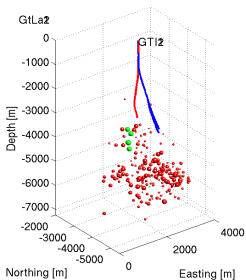


- Ereignisse nah beieinander, Annahme homogener Geschwindigkeiten in Herdregion
- Hypozentrenabstände \ll Abstand Herd/Empfänger

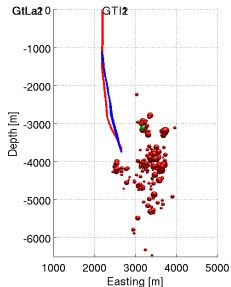
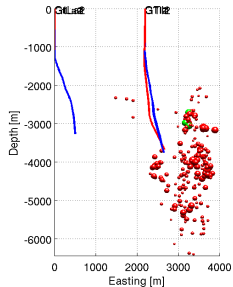
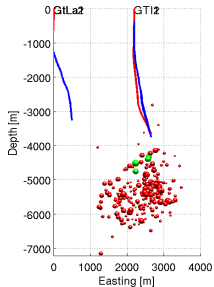
Auf dem Weg zu akkuraten Lokalisierungen: HYPOSAT \Rightarrow VELEST \Rightarrow hypoDD



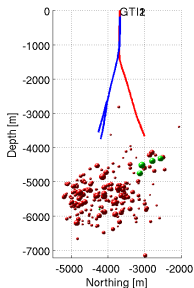
Auf dem Weg zu akkuraten Lokalisierungen: HYPOSAT \Rightarrow VELEST \Rightarrow hypoDD



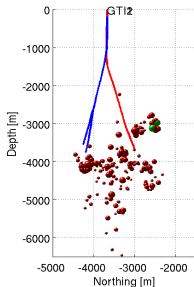
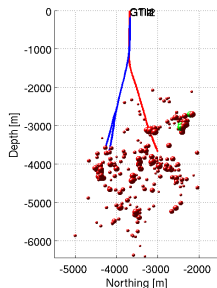
Auf dem Weg zu akkuraten Lokalisierungen: HYPOSAT \Rightarrow VELEST \Rightarrow hypoDD



Auf dem Weg zu akkuraten Lokalisierungen: HYPOSAT \Rightarrow VELEST \Rightarrow hypoDD

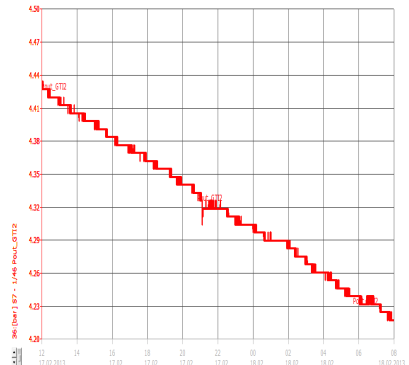
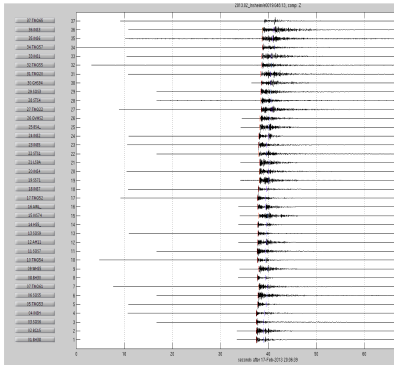


GiLa2



Seismisches Ereignis vom 17.02.2013

Induziertes Ereignis verursachte hydraulische Signatur in Bohrlochkopfaufzeichnungen
Produktionsbohrung

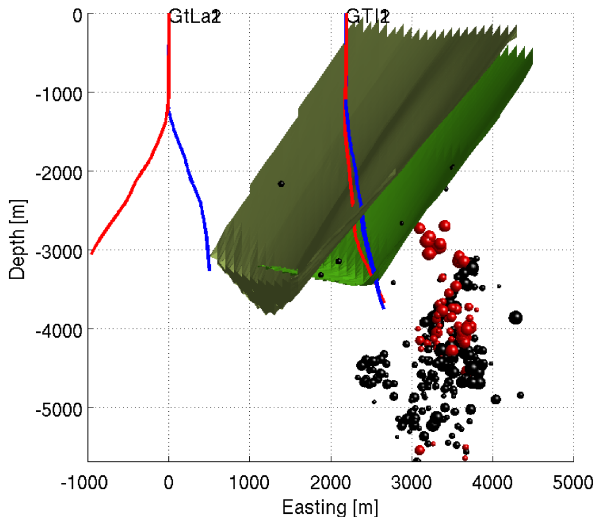


Seismisches Ereignis muss in der Nähe der Produktionsbohrung
stattgefunden haben!

5 Ereignisse mit $CC \geq 0.9$ bilden räumliches Cluster

- e0035.310.12
- e0057.026.13
- e0019.048.13
- e0009.124.13
- e0001.275.13

Auf dem Weg zu akkuraten Lokalisierungen: VELEST (schwarz), hypoDD (rot) und Geologie



Das Verbundprojekt **MAGS2** - Mikroseismischen Aktivität geothermischer Systeme - **Vom Einzelsystem zur großräumigen Nutzung** wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert und betreut vom Projektträger Jülich.

Förderkennzeichen: 0325662A-G



Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit!

- Programm aus dem Softwarepaket "NonLinLoc" (A. Lomax)
- Probabilistische Formulierung des inversen Problems (Tarantola & Valette, 1982)
- Direkte, analytische Berechnung einer Maximum-Likelihood-Herdzeit, womit 4D-Problem (x, y, z, t) auf 3D-Problem (x, y, z) reduziert wird
- Bestimmung eines Maximum-Likelihood-Hypozentrums bzw. eines globalen Minimums der Misfit-Funktion der Lokalisierungs-Likelihoodfunktion durch Gitternetz-Suchalgorithmen (z.B. "Oct-Tree-Importance-" Algorithmus)

Tarantola, A. and Valette, B., 1982, Inverse problems = quest for information., J. Geophys., 50, 159-170.

- FORTRAN77-Routine zur Bestimmung von Double-Couple-Herdmechanismen
- Benutzt Polaritäten der P-Wellen-Ersteinsätz und (optional) S/P-Amplitudenverhältnisse
- Azimute und Auftauchwinkel der seismischen Wellen werden entsprechend der angegebenen Fehler (hier: NLLoc) variiert
- Alle kompatiblen Herdmechanismen werden bestimmt, die Streuung der Mechanismen gibt die Unsicherheit und die damit assoziierte Qualitätsklasse

Automatische Bestimmung der Wellenankunftszeiten

Autoregressive Vorhersage

- AR-Prozeß p -ter Ordnung:

$$y_i = \sum_{j=1}^p b_j y_{i-j} + e_i^f,$$

mit Vorhersagefehler e_i^f zwischen vorhergesagten und tatsächlichen Werten:

$$e_i^f = y_i - \hat{y}_i = y_i - \sum_{j=1}^p b_j y_{i-j} \text{ bzw. } E_l^f = \sum_{i=l-l_{det}}^{l-1} \left(y_i - \sum_{j=1}^p b_j y_{i-j} \right)^2$$

- Bestimmung der p AR-Koeffizienten b_j in einem gleitenden Bestimmungsfenster l_{det} durch Minimierung der Fehlerquadrate führt zu überbestimmtem Gleichungssystem:

$$\frac{\partial E_l^f}{\partial b_k} = 0, \quad 1 \leq k \leq p \Rightarrow \sum_{j=1}^p \hat{b}_j \sum_{i=l-l_{det}}^{l-1} y_{i-j} y_{i-k} = \sum_{i=l-l_{det}}^{l-1} y_i y_{i-k}.$$

- Lösung z. B. mittels LSQ oder QR-Zerlegung.

Automatische Bestimmung der Wellenankunftszeiten

Autoregressive Vorhersage

- Mittels der bestimmten AR-Koeffizienten ist Vorhersage von y_i möglich:

$$\hat{y}_i = \sum_{j=1}^p \hat{b}_j y_{i-j}$$

- Bestimmung und Vorhersage in zwei "voreinanderherlaufenden" Zeitfenstern, Vorhersagefehler ergibt CF:

$$CF_I = \sqrt{\sum_{i=I}^{I+I_{pred}} (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

- Erweiterung auf mehrere Komponenten ergibt folgende CF:

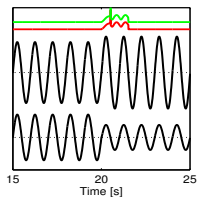
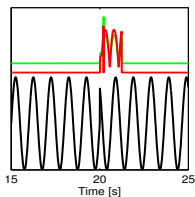
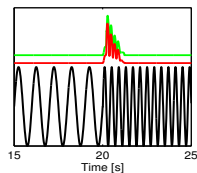
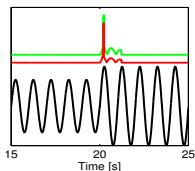
$$CF_I = \sqrt{\sum_{c=1}^M \sum_{i=I}^{I+I_{pred}} (y_{ci} - \hat{y}_{ci})^2}$$

mit den Komponenten c .

Automatische Bestimmung der Wellenankunftszeiten

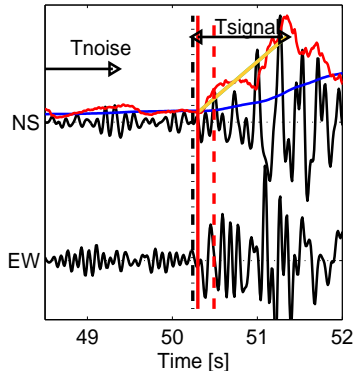
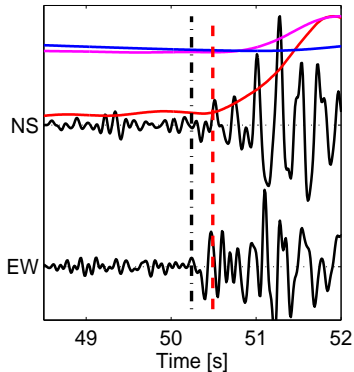
Autoregressive Vorhersage

⇒ 1 AR-Modell für mehrere Komponenten macht Vorhersagefehler sensitiv nicht nur für Änderungen in Amplitude, Phase und Frequenz, sondern auch für Änderungen in Polarisation!



Automatische Bestimmung der Wellenankunftszeiten

Autoregressive Vorhersage



Das Akaike Informationskriterium (AIC)

Statistisches Modellieren

Ein statistisches Modell ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, die mit Hilfe beobachteter Daten die wahre Wahrscheinlichkeitsverteilung zu approximieren versucht. Das Ziel statistischen Modellierens ist es, ein Modell zu finden, welches die wahre Wahrscheinlichkeitsverteilung mittels der beobachteten Daten bestmöglichst approximiert.