



# 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    ⇒   

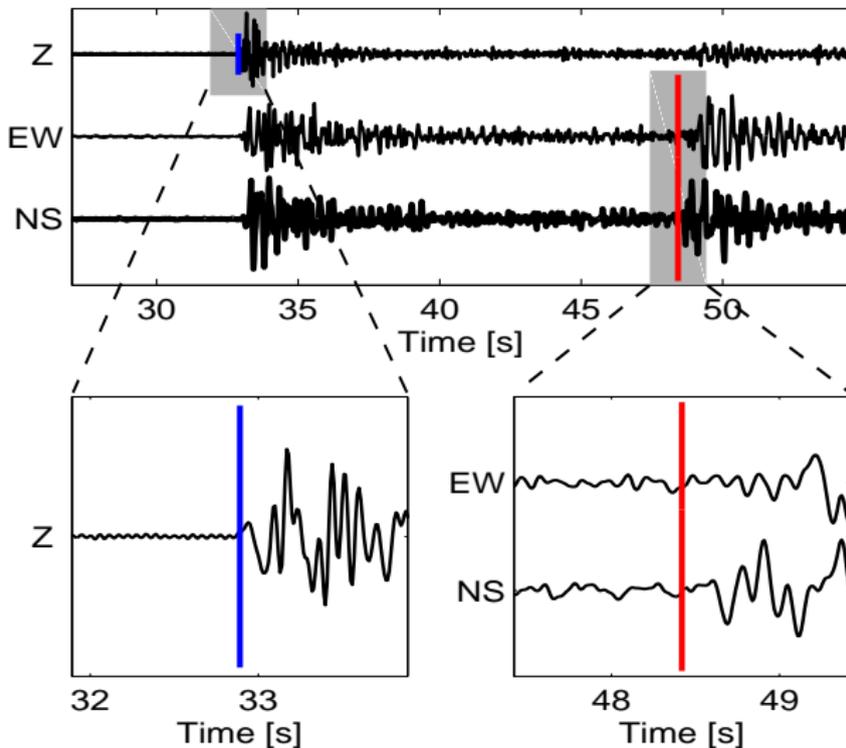
Automatik testen  
(autoPyLoT)

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

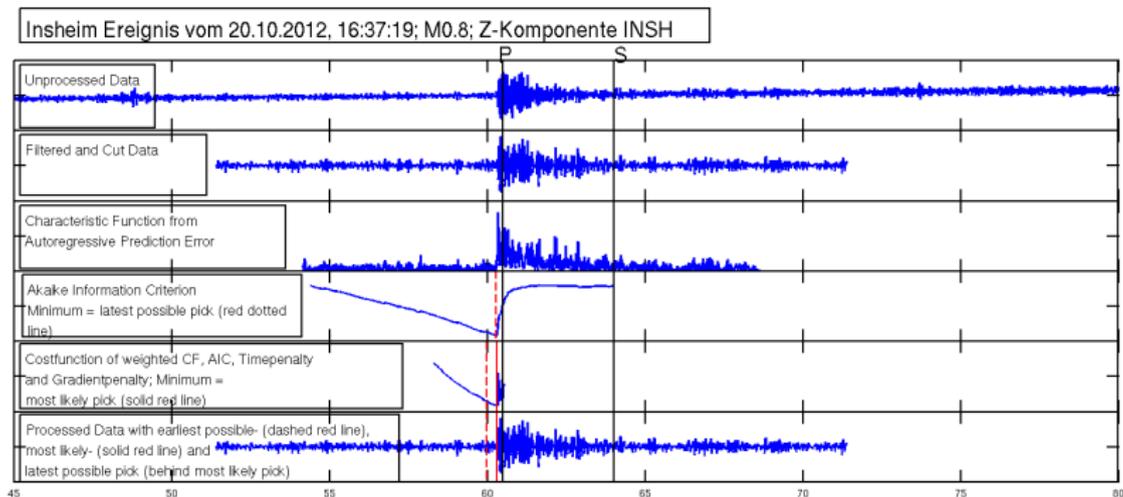


- Umschreiben von MatLab<sup>TM</sup> nach Python!
- Entwicklung von PILOT/autoPILOT in MatLab<sup>TM</sup> ist ausgelaufen
- Substantielle Modifikationen von PyLoT/autoPyLoT:  
Kompatibilität zu weiteren seismologischen Datenstandards,  
Handling unterschiedlicher Sensoren, Integration von  
GPS-Statusinformationen, 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

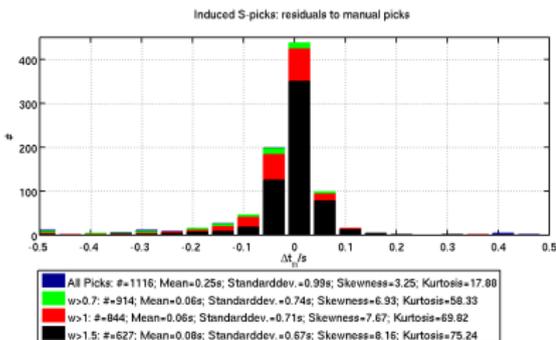
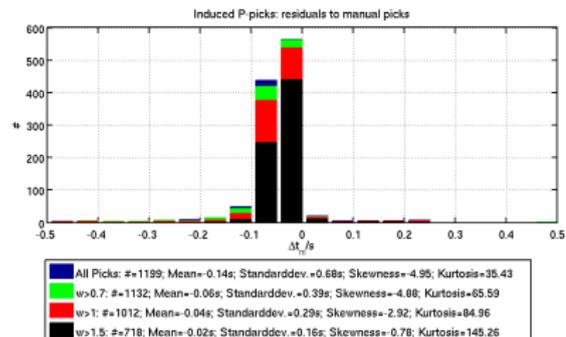
- Akaike-Informations-Kriterium zur Phasenidentifikation
- Wellenlaufzeit aus Minimum von Kostenfunktion (CF+AIC+Nebenbedingungen)
- Qualitätsmaß aus S/N und Slope von CF und Spur



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

## erste Ergebnisse & Ausblick

### Ergebnisse für Testlauf mit 473 Events von 03.2012-12.2013



### Ausblick:

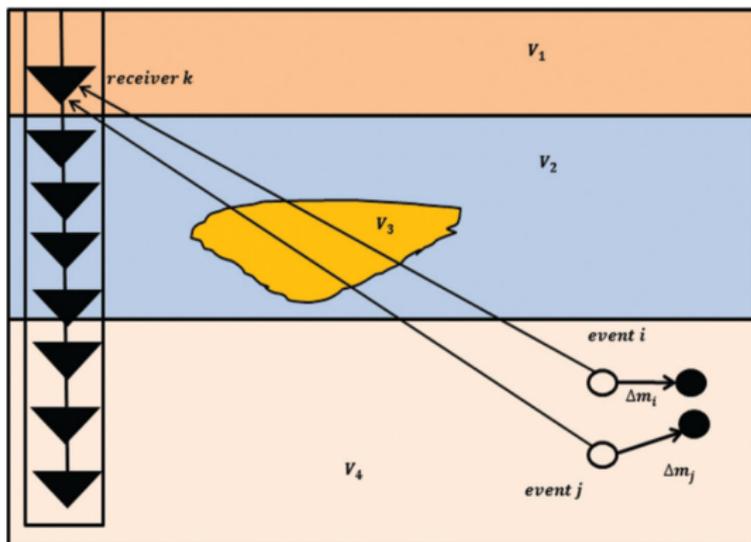
- kompletten Datensatz durchprozessieren
- Sensitivitätsanalyse
- Relokalisierungen mit automatisch bestimmten Einsatzzeiten
- Entwicklung und Testen eines Kreuzkorrelationsdetektors

- 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

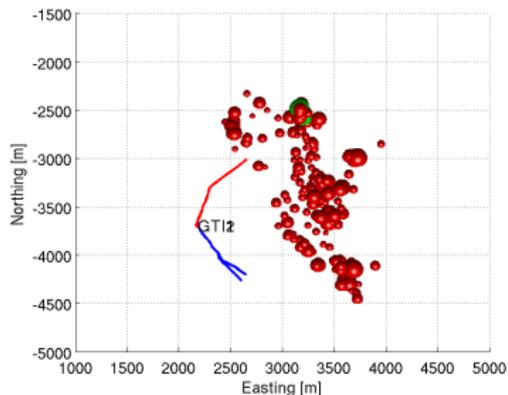
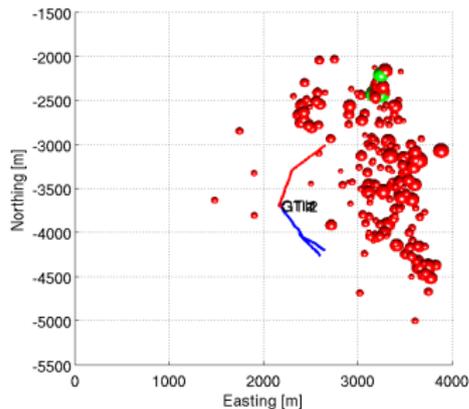
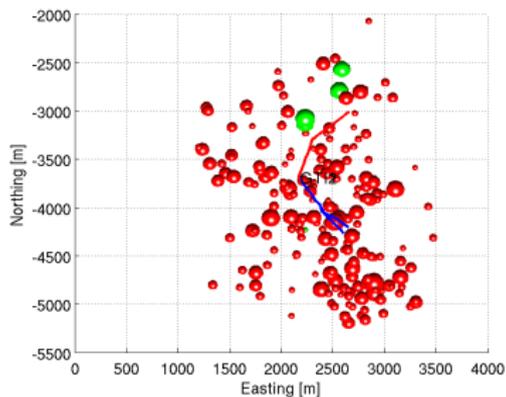
# Akkurate Lokalisierungen der Inheim-Ereignisse

hypoDD, Double-Difference Location Algorithm

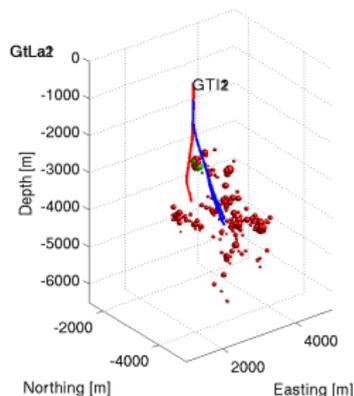
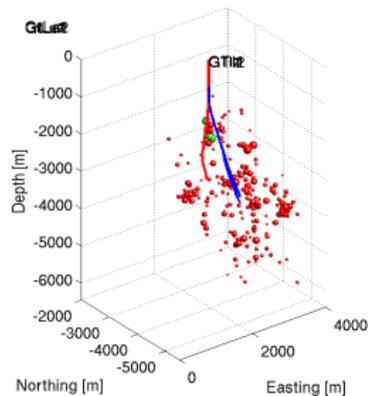
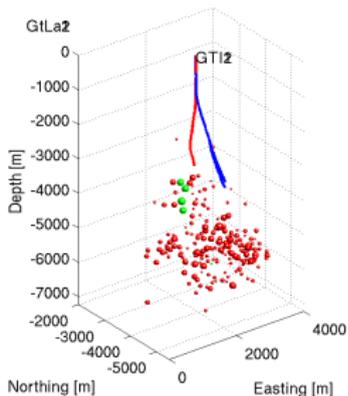


- Ereignisse nah beieinander, Annahme homogener Geschwindigkeiten in Herdregion
- Hypozentrenabstände  $\ll$  Abstand Herd/Empfänger

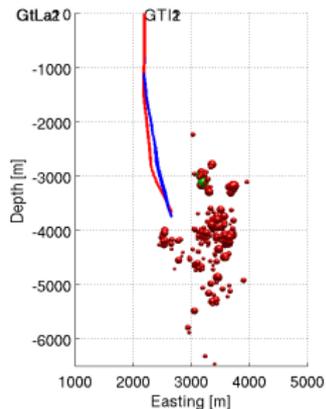
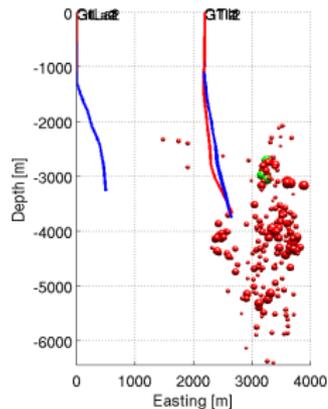
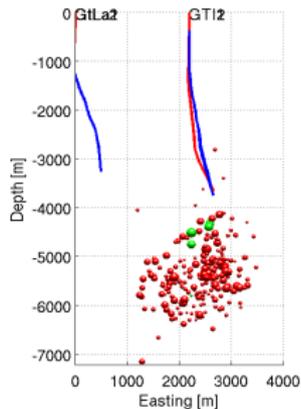
# Auf dem Weg zu akkuraten Lokalisierungen: HYPOSAT $\Rightarrow$ VELEST $\Rightarrow$ hypoDD



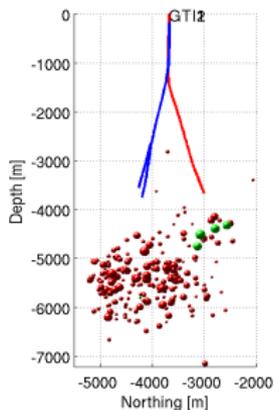
# Auf dem Weg zu akkuraten Lokalisierungen: HYPOSAT $\Rightarrow$ VELEST $\Rightarrow$ hypoDD



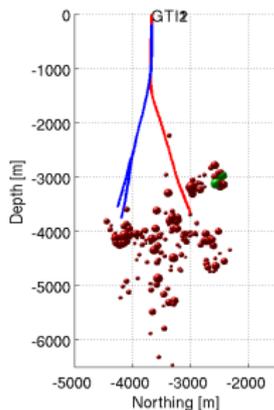
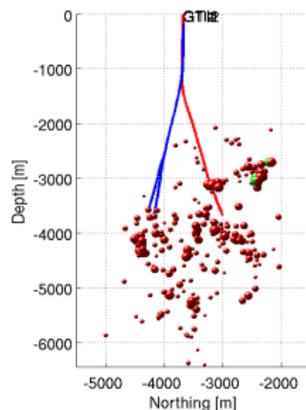
# Auf dem Weg zu akkuraten Lokalisierungen: HYPOSAT $\Rightarrow$ VELEST $\Rightarrow$ hypoDD



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

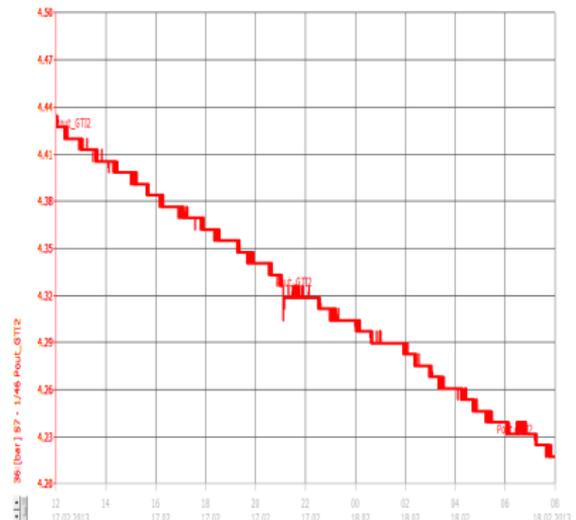
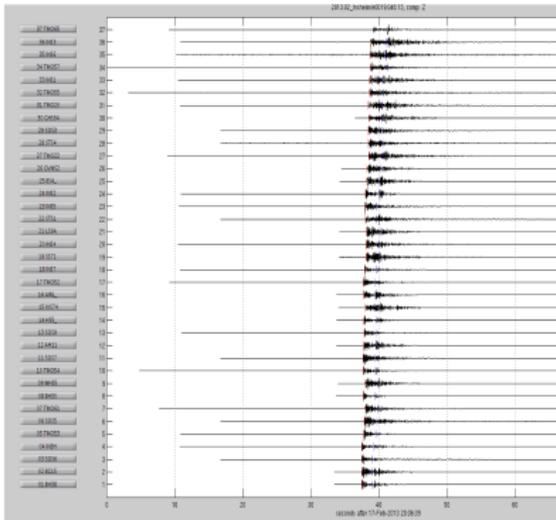


GiLa2



# Seismisches Ereignis vom 17.02.2013

Induziertes Ereignis verursachte hydraulische Signatur in Bohrlochkopfaufzeichnungen  
Produktionsbohrung

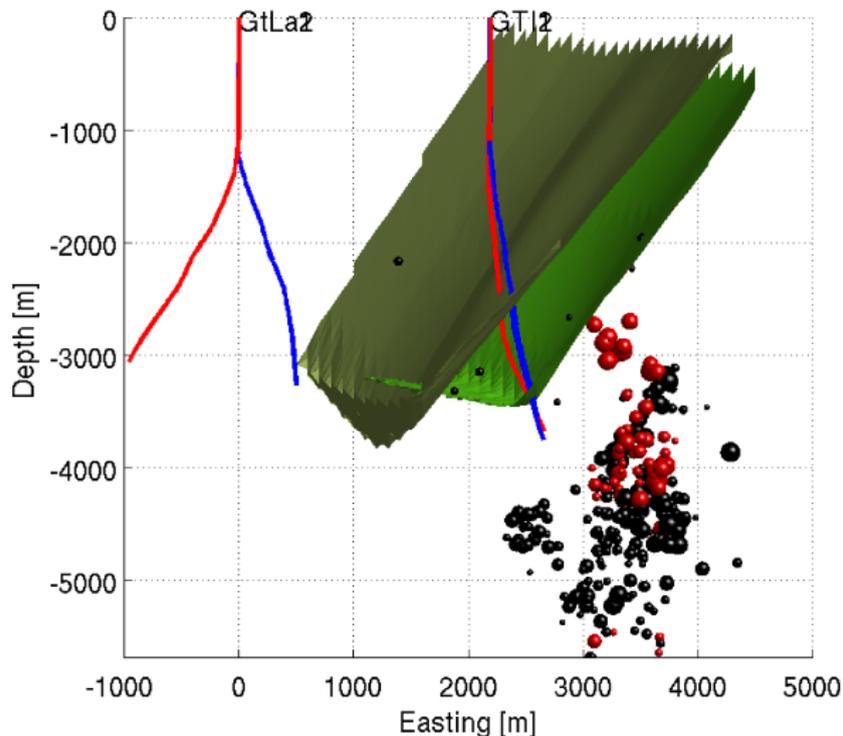


Seismisches Ereignis muss in der Nähe der Produktionsbohrung  
stattgefunden haben!

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:

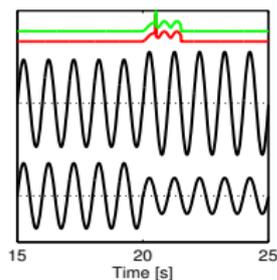
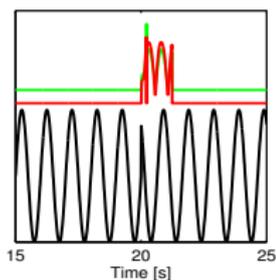
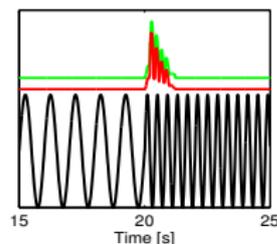
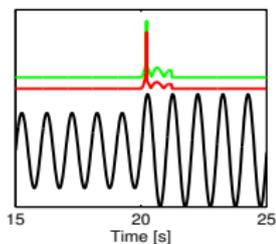
$$CF_I = \sqrt{\sum_{c=1}^M \sum_{i=I}^{I+I_{pred}} (y_{ci} - \hat{y}_{ci})^2},$$

mit den Komponenten  $c$ .

# Automatische Bestimmung der Wellenankunftszeiten

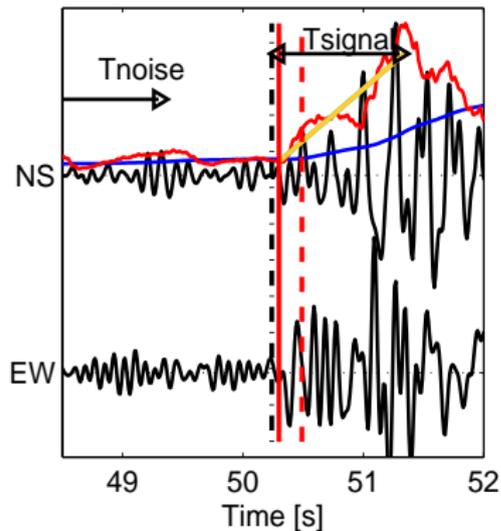
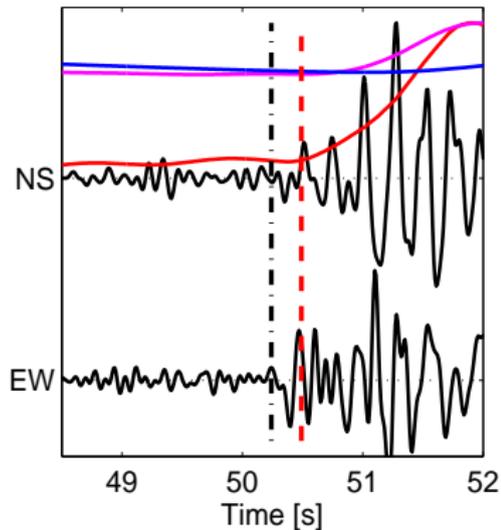
## Autoregressive Vorhersage

⇒ 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.