



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, W. Friederich, T. Meier

Goslar, 16.04.2013



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

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

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

RUB



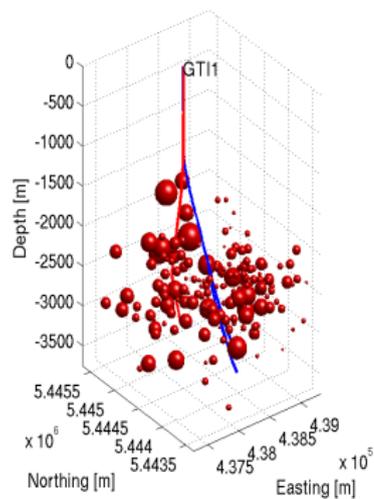
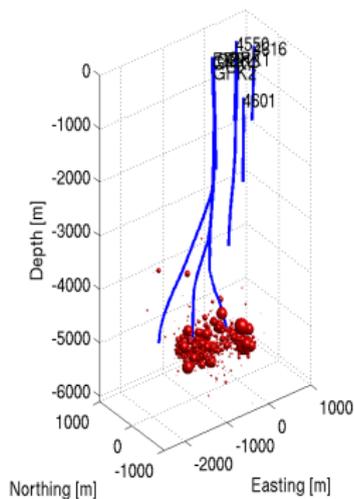
Dr. L. Küperkoch
BESTEC GmbH
Landau

Charakterisierung seismischer Ereignisse ist grundlegende, seismologische Aufgabenstellung, jedoch:

- Große Datensätze (Soulz-Stimulation mehrere tausend Ereignisse, Inbetriebnahme Insheim mehrere hundert Ereignisse)

Problemstellung

Soultz- (links) und Insheim-Ereignisse (rechts)



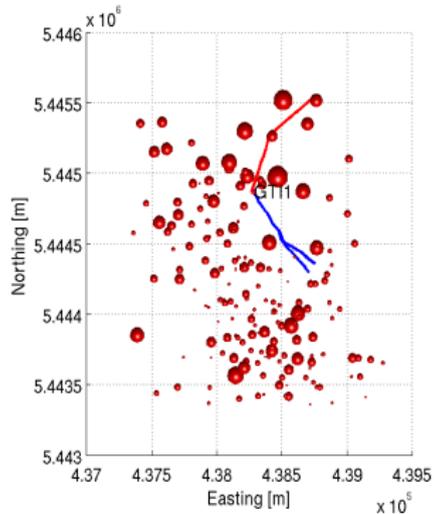
Grundlegende, seismologische Fragestellungen, jedoch:

- Große Datensätze (Soulitz-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")

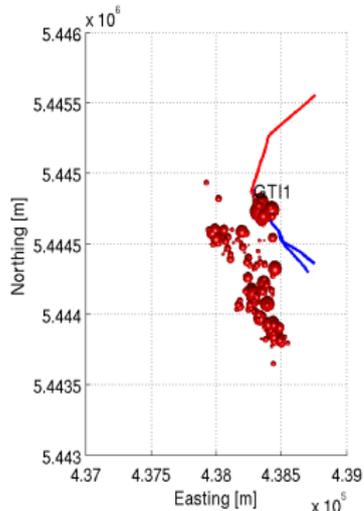
\Rightarrow Verbesserung von Präzision und Genauigkeit der Lokalisierungen notwendig!

Problemstellung

Status Insheim-Lokalisierungen



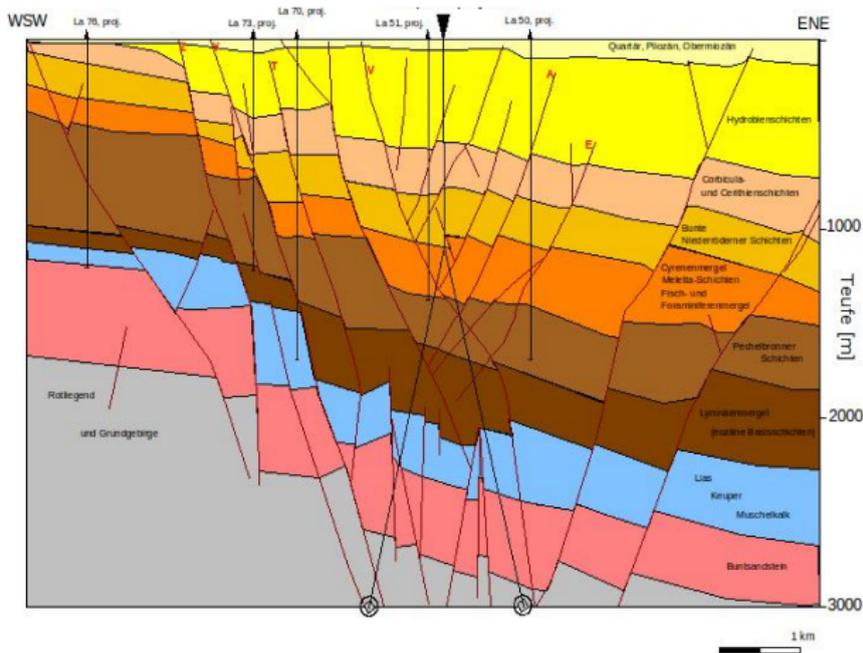
HYPOSAT



HYPODD

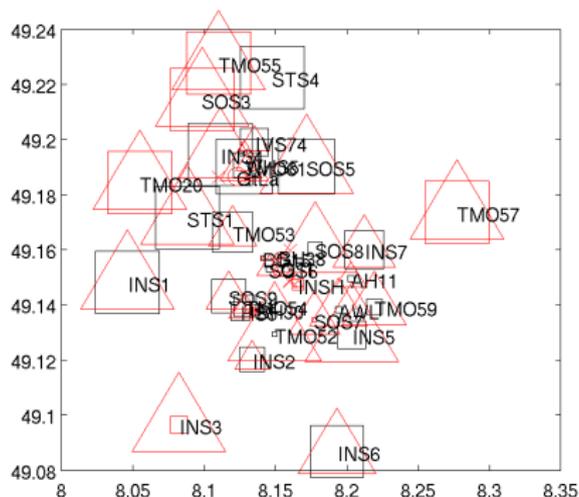
Problemstellung

Komplexe 3D-Untergrundstrukturen



Problemstellung

Stationsresiduen Insheim



- △ ≡ negatives RMS-Laufzeitresiduum S-Phase ≡ zu hohe Geschwindigkeiten (Modell!)
- △ ≡ positives RMS-Laufzeitresiduum S-Phase ≡ zu geringe Geschwindigkeiten
- ≡ negatives RMS-Laufzeitresiduum P-Phase ≡ zu hohe Geschwindigkeiten
- ≡ positives RMS-Laufzeitresiduum P-Phase ≡ zu geringe Geschwindigkeiten

Größe der Symbole \propto Residuumsamplitude

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

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

manueller Referenzdatensatz II ⇒

↓

Automatik testen

↓

Bearbeitung kompletter Datensatz
mittels Automatik

↓

"Minimum-1D-
Geschwindigkeitsmodell"

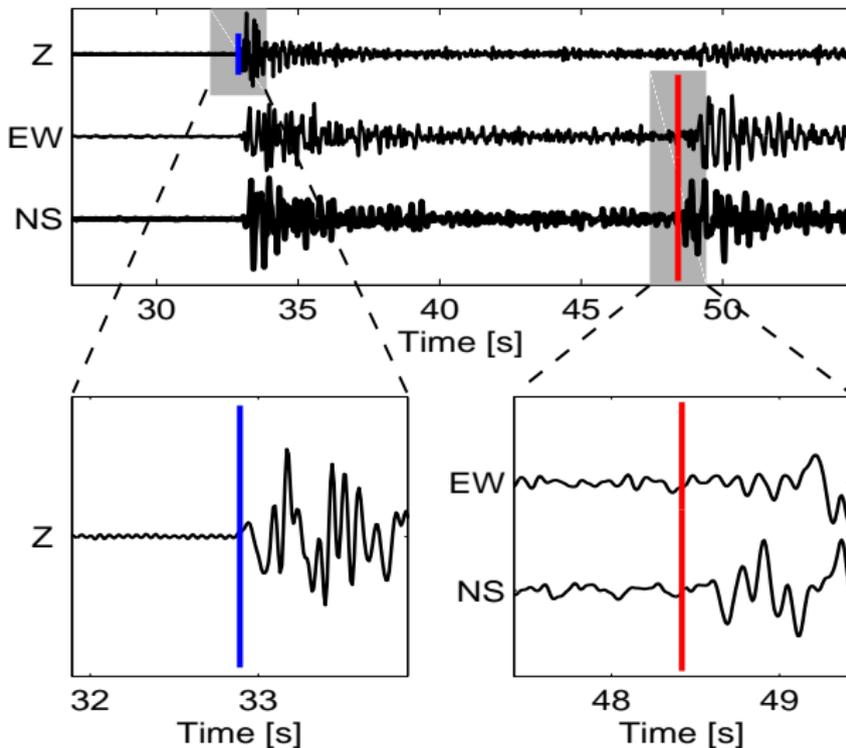
↓

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

Di Stefano, R., Aldersons, F., Kissling, E., Baccheschi, P., & Chirabba, C., 2006. Automatic seismic phase picking and consistent observation error assessment: application to the Italian seismicity, *Geophys. J. Int.* 165, 121-134.

Diehl, T., Kissling, E., Husen, S., & Aldersons, F., 2009. Consistent phase picking for regional tomography models: application to the Greater Alpine region, *Geophys. J. Int.* 176, 542-554.

"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!

- Erstellung der Referenzdatensätze mittels PILOT (**P**icking and **L**ocation **T**ool): Entwickelt an der RUB unter Beteiligung der Antragsteller, auf komfortabler Benutzeroberfläche werden auf hochkonsistenter Weise Phasenersteinsätze und deren Fehlerintervalle abgelesen und in Standardformaten festgehalten für Weiterverarbeitung
- Automatische Bearbeitung des Gesamtdatensatzes mittels autoPILOT, ebenfalls an der RUB von Antragstellern entwickelt, benutzt Statistiken höherer Ordnung und autoregressive Vorhersage der Wellenform (Küperkoch et al., 2010; Küperkoch et al., 2012)
- Erstellung des Minimum-1D-Geschwindigkeitsmodells mittels VELEST (Kissling et al., 1994), bestmögliche Approximation der 3D-Untergrundstrukturen mit einem 1D-Geschwindigkeitsmodell

Kissling, E., Ellsworth, W. L., Eberhart-Phillips, D., and U. Kradolfer: Initial reference models in local earthquake tomography, *J. Geophys. Res.*, 99, 19'635-19'646, 1994.

Küperkoch, L., Meier, T., Lee, J., Friederich, W. & EGELADOS working group, 2010. Automated determination of P-phase arrival times at regional and local distances using higher order statistics, *Geophys. J. Int.* 181, 1159-1170.

Küperkoch, L., Meier, T., Brüstle, A., Lee, J., Friederich, W. & EGELADOS working group, 2012. Automated determination of S-phase arrival times using autoregressive prediction: application to local and regional distances, 188, 687-702.

Charakterisierung der seismischen Ereignisse

Basierend auf optimiertem Geschwindigkeitsmodell:

- Relokalisierung der seism. Ereignisse mittels des nicht-linearen Verfahrens NLLoc (Lomax, 2000)
- Präzisierung der Lokalisierungen und Erfassung kleinster Ereignisse mittels Wellenformähnlichkeitsanalyse
- Aus Azimut und Auftauchwinkel (NLLoc) und Ersteinsatzpolaritäten (PILOT, autoPILOT) Berechnung von Herdmechanismen mittels HASH (Hardebeck & Shearer, 2002)
- Für ausgewählte Ereignisse Bestimmung von Herdmechanismen mittels Wellenformanpassung
- Bestimmung kinematischer und dynamischer Herdparameter (M_0 , M_W , R , $\Delta\sigma$, E_S)
- Aus Vielzahl unabhängiger Herdflächenlösungen Spannungstensor und Ableitung des Spannungsfeldes

Hardebeck, J., Shearer, P., 2002. A new method for determining first-motion focal mechanisms, BSSA, 92(6), 2264-2276)

Lomax, A., J. Virieux, P. Volant and C. Berge, 2000. Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear locations, in Advances in Seismic Event Location Thurber, C.H., and N. Rabinowitz (eds.), Kluwer, Amsterdam, 101-134. Waldhauser, F. & Ellsworth, W.L., 2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the Northern Hayward Fault, California, BSSA, 90(6), 1353-1368.

- Umschreiben von Matlab™ nach Python!

Neu- und Weiterentwicklung von PILOT! Ursprünglich entwickelt unter MatLabTM!

Wie kann PILOT der gesamten seismologischen Community zugänglich gemacht werden?

!!Python!!

Warum Python?

- Plattform-Unabhängig (Unix, Mac OS X, Windows)
- Flexibel (Online-Datenprotokolle von ObsPy verwendbar)
- Lizenzierte Distribution des Softwarepakets

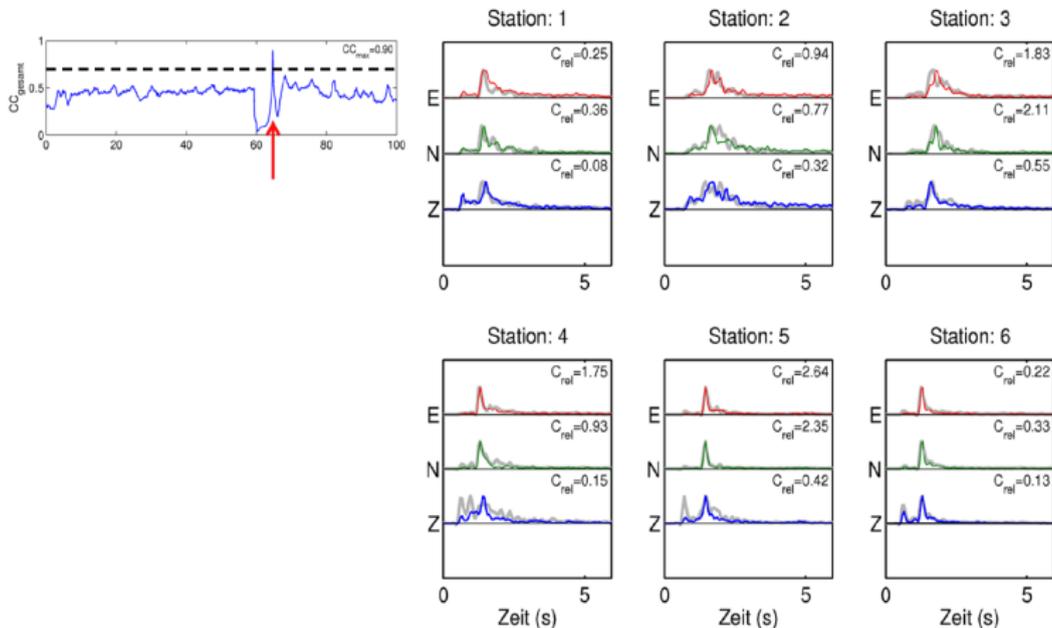
PILOT/autoPILOT \Rightarrow PyLoT/autoPyLoT

PyLoT - The Python picking and Location Tool



- Umschreiben von MatLabTM nach Python!
- Entwicklung von PILOT/autoPILOT in MatLabTM wird auslaufen
- 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
PILOT//PyLoT/autoPILOT//autoPyLoT - VELEST - NLLoc -
HASH
- Optimierung des automatischen S-Pickers (AR-Vorhersage,
Polarisationsanalyse), frühest-, spätest- und wahrscheinlichster Pick
- Kreuzkorrelationsdetektion und Clusteranalyse

Kreuzkorrelationsdetektion und Clusteranalyse



Grau: Einhüllende des Master-Ereignis
Farbig: Einhüllende des aktuellen Ereignis

- Umschreiben von MatLab™ nach Python!
- Entwicklung von PILOT/autoPILOT in MatLab™ wird auslaufen
- 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
PILOT//PyLoT/autoPILOT//autoPyLoT - VELEST - NLLoc -
HASH
- Optimierung des automatischen S-Pickers (AR-Vorhersage,
Polarisationsanalyse), frühest-, spätest- und wahrscheinlichster Pick
- Kreuzkorrelationsdetektion und Clusteranalyse
- Anwendung auf Landau-/Insheim-Datensatz: hochaufgelöste
Lokalisierungen, Herdparameter, Herdmechanismen,
Spannungsinversion

EP3

Minimum-1D-Modell	⇒	EP1
relokalisierte Hypozentren	⇒	EP1/4/5/6/7
kin. & dyn. Herdparameter	⇒	EP1/4/5/6/7
Herdmechanismen	⇒	EP1/4/5/6/7
	⇐	Trainingsdatensatz aus EP1
Spannungsfeld	⇒	EP4/5/6
Interpretation Ergebnisse	⇔	EP1/2/4/5/6/7
Softwarepaket	⇔	EP1/2

EP1: Seismische Monitoringkonzepte und bruchmechanische Bewertungen für komplexe Geothermiefelder am Beispiel Südpfz

EP2: Untersuchungen zur optimierten seismischen Überwachung hydrogeothermaler Systeme bei dichter räumlicher Lage der Bohrerlaubnisfelder am Beispiel der Situation im Süden Münchens

EP4: Ermittlung der seismischen Gefährdung bei tiefer geothermischer Energiegewinnung unter Berücksichtigung der regionalen und lokalen geologisch-tektonischen Strukturen

EP5: Einfluss der Geometrie und Größe von geothermischen Systemen und geothermischen Feldern auf die statistischen Eigenschaften fluid-induzierter Seismizität im Produktionsbetrieb

EP6: Entwicklung numerischer Analysemodelle zur lokalen seismischen Gefährdungseinschätzung vor Bohrbeginn und langfristige Bewertung von Geothermiefeldern unter Berücksichtigung TM:C gekoppelter Prozesse

EP7: Methoden zur Abschätzung der induzierten Seismizität durch petrothermale Geothermieranlagen vor Bohrbeginn mittels Laborversuchen und Interpretation über numerische Modell

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



Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit!

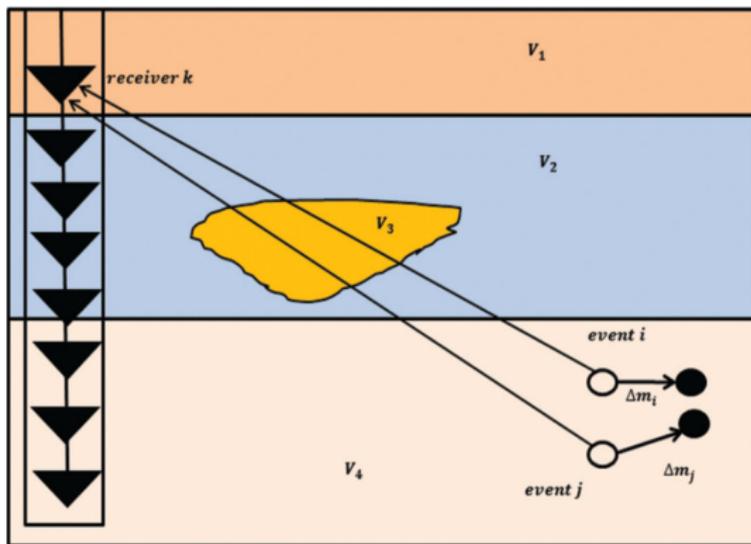
- FORTRAN77-Routine, um 1D-Geschwindigkeitsmodelle und initiale Referenz-Geschwindigkeitsmodelle für seismische Tomografie abzuleiten
- Löst iterativ das gekoppelte, nicht-lineare Problem Hypozentrumsbestimmung - Geschwindigkeitsmodell
- Iteration:
 - Lösung des Vorwärtsproblems (Berechnung der Ankunftszeiten 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

- 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-Hypozenentrums 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

Double-Difference Location Algorithm



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

Schätzung des zentralen Moments aus einer Stichprobe:

$$\hat{m}_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^k.$$

Schätzung der Varianz, Schiefe und Kurtosis:

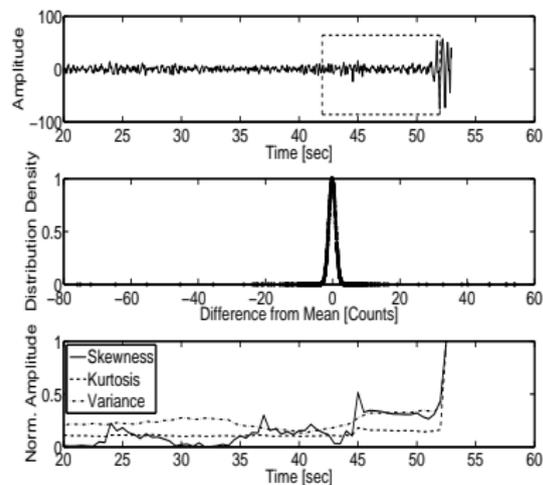
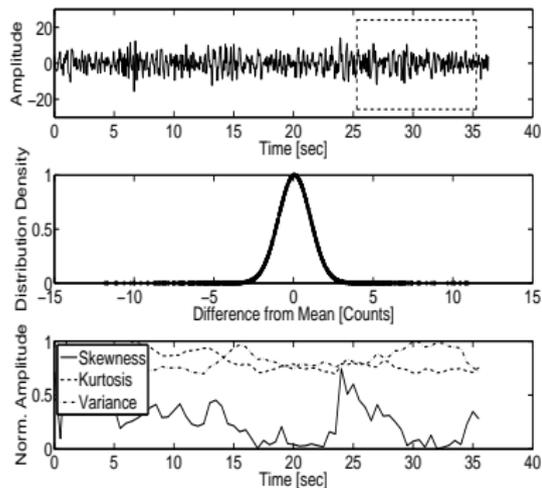
$$\hat{\sigma}^2 = \hat{m}_2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2$$

$$\hat{S} = \frac{\hat{m}_3}{\hat{m}_2^{3/2}}$$

$$\hat{K} = \frac{\hat{m}_4}{\hat{m}_2^2}$$

Automatische Bestimmung der P -Wellenankunftszeiten

Berechnung der CF



- 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 S-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 "voneinanderherlaufenden" 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:

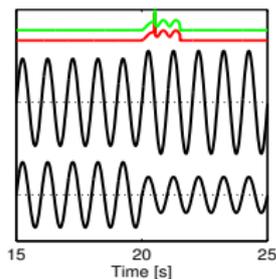
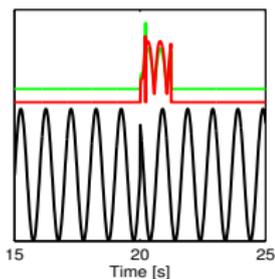
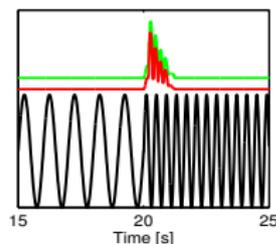
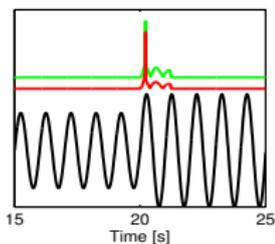
$$CF_I = \sqrt{\sum_{c=1}^M \sum_{i=I}^{I+I_{pred}} (y_{ci} - \hat{y}_{ci})^2}$$

mit den Komponenten c .

Automatische Bestimmung der S-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 S-Wellenankunftszeiten

Autoregressive Vorhersage

