Die seismische Unruhe der Erde
- wo kommt sie her und was lernen wir aus ihr?

Christoph Sens-Schönfelder und Tom Richter

GeoForschungsZentrum Potsdam

Inhalt

1. Das Seismische Rauschen
   - Eigenschaften
   - Quellen
2. Seismische Interferometrie
   - Korrelationstechnik
   - Kodainterferometrie
3. Anwendungen des seismischen Monitorings
   - Vulkan Piton de la Fournaise
   - Subduktionszone in Nord-Chile
   - Anwendung auf Apollo Daten

GFZ Helmholtz Centre Potsdam

Inhalt

1 Das Seismische Rauschen
- Eigenschaften
- Quellen

2 Seismische Interferometrie
- Korrelationstechnik
- Kodainterferometrie

3 Anwendungen des seismischen Monitorings
- Vulkan Piton de la Fournaise
- Subduktionszone in Nord-Chile
- Anwendung auf Apollo Daten

Inhalt

1. Das Seismische Rauschen
   - Eigenschaften
   - Quellen
2. Seismische Interferometrie
   - Korrelationstechnik
   - Kodainterferometrie
3. Anwendungen des seismischen Monitorings
   - Vulkan Piton de la Fournaise
   - Subduktionszone in Nord-Chile
   - Anwendung auf Apollo Daten

Motivation

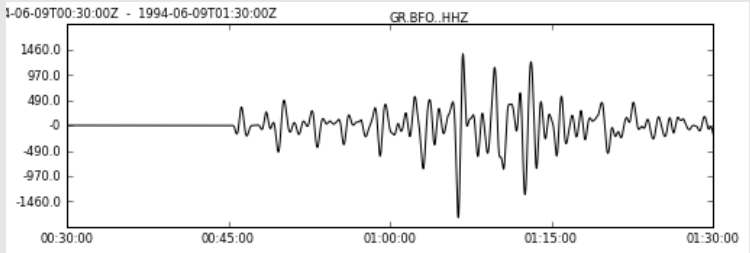
Komplexe Wellenfelder in der Seismologie

Motivation

Komplexe Wellenfelder in der Seismologie

Kompliziert $\Longleftrightarrow$ Komplex

50s Periode



tieffrequentes Wellenfeld

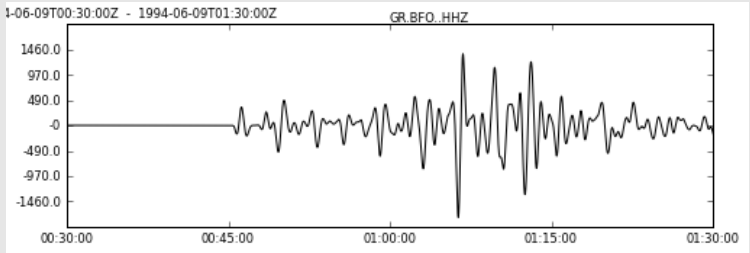
- Wellenform modellierbar

Motivation

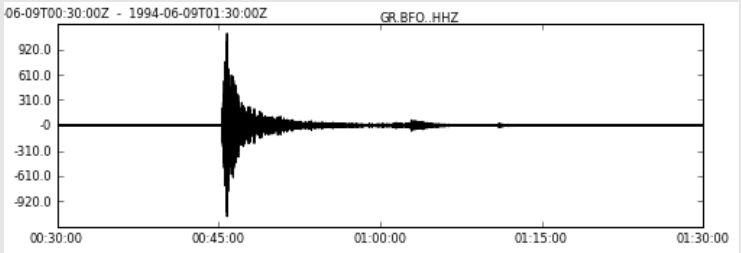
Komplexe Wellenfelder in der Seismologie

Kompliziert $\Longleftrightarrow$ Komplex

50s Periode



1Hz



tieffrequentes Wellenfeld

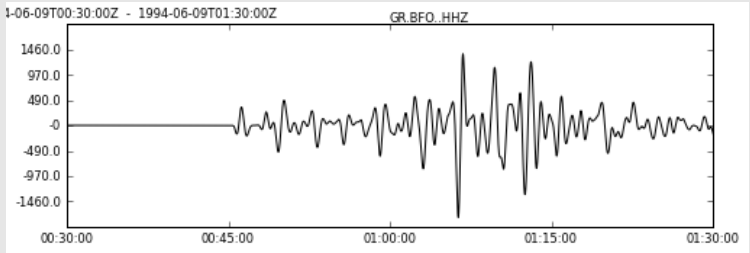
- Wellenform modellierbar

Motivation

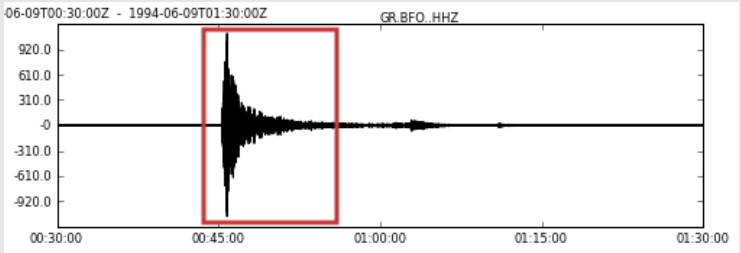
Komplexe Wellenfelder in der Seismologie

Kompliziert $\Longleftrightarrow$ Komplex

50s Periode



1Hz



tieffrequentes Wellenfeld

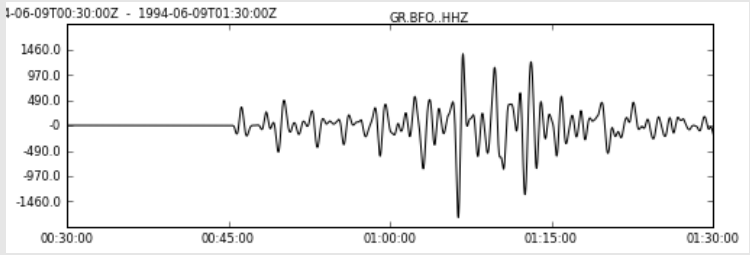
- Wellenform modellierbar

Motivation

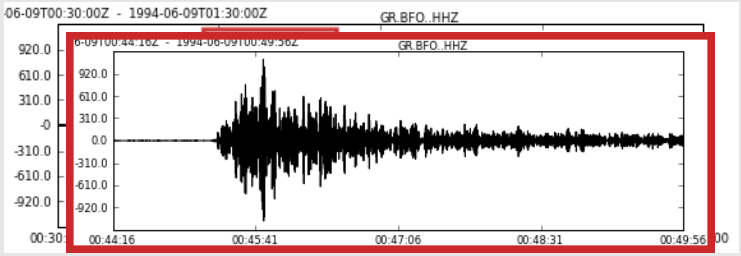
Komplexe Wellenfelder in der Seismologie

Kompliziert $\Longleftrightarrow$ Komplex

50s Periode



1Hz



tieffrequentes Wellenfeld

- Wellenform modellierbar

seismische Coda

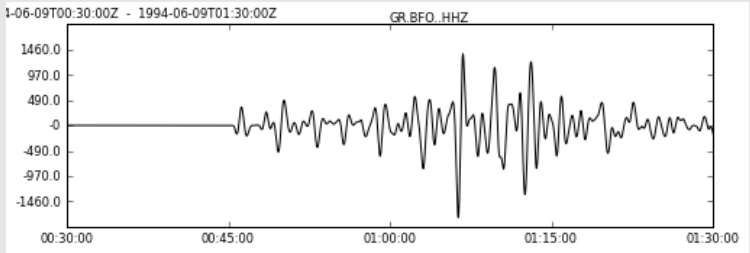
- nicht deterministisch beschreibbar

Motivation

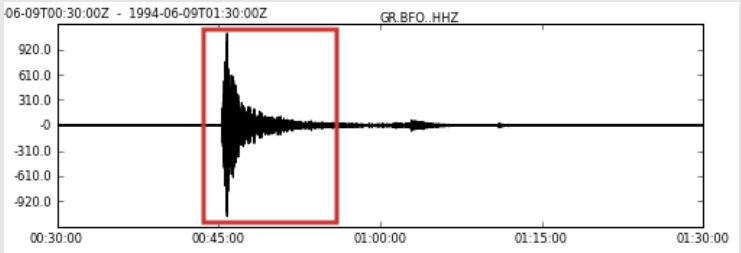
Komplexe Wellenfelder in der Seismologie

Kompliziert $\Longleftrightarrow$ Komplex

50s Periode



1Hz



tieffrequentes Wellenfeld

- Wellenform modellierbar

seismische Coda

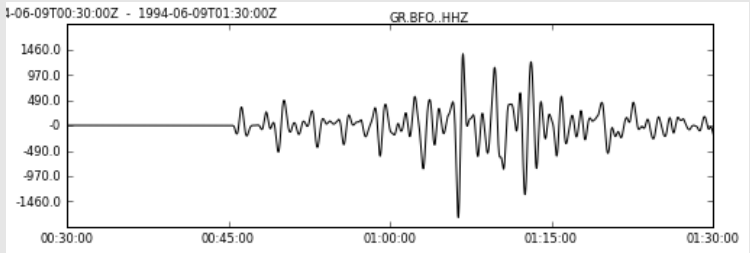
- nicht deterministisch beschreibbar

Motivation

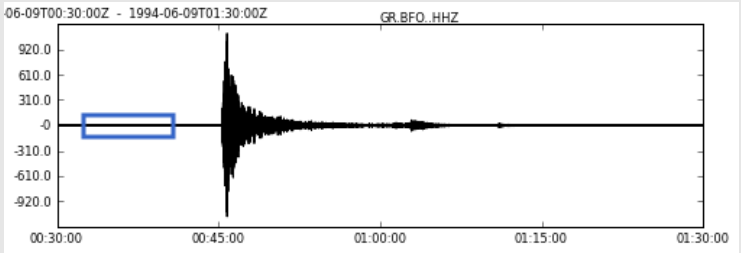
Komplexe Wellenfelder in der Seismologie

Kompliziert $\Longleftrightarrow$ Komplex

50s Periode



1Hz



tieffrequentes Wellenfeld

- Wellenform modellierbar

seismische Coda

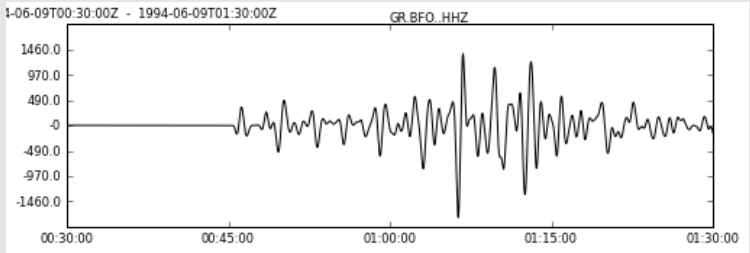
- nicht deterministisch beschreibbar

Motivation

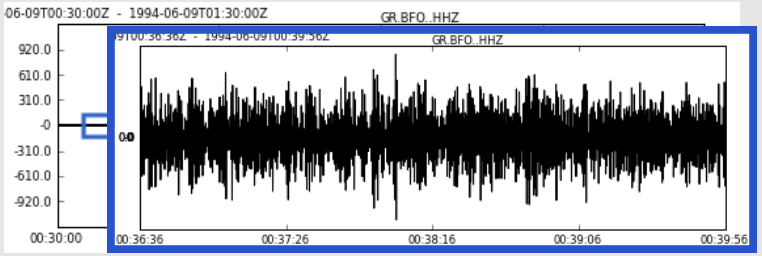
Komplexe Wellenfelder in der Seismologie

Kompliziert $\Longleftrightarrow$ Komplex

50s Periode



1Hz



tieffrequentes Wellenfeld

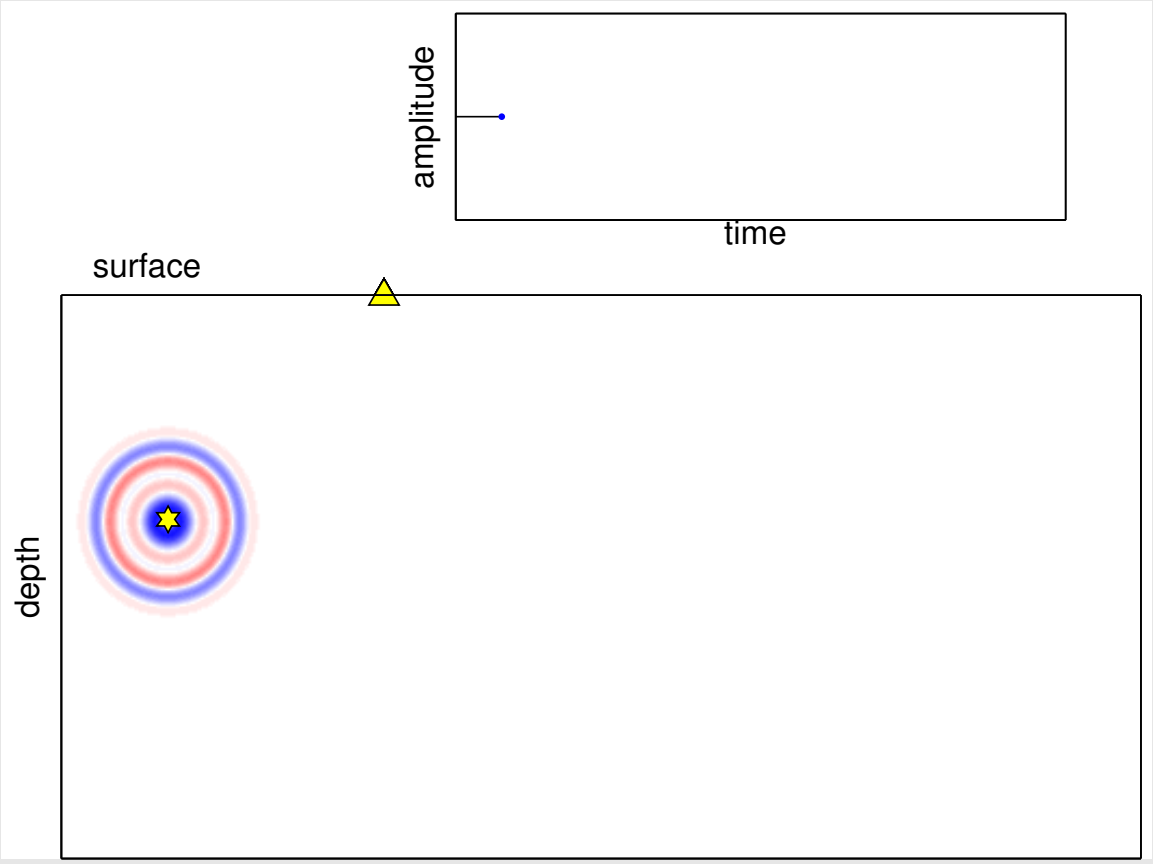
- Wellenform modellierbar

seismische Coda und seismisches Rauschen

- nicht deterministisch beschreibbar

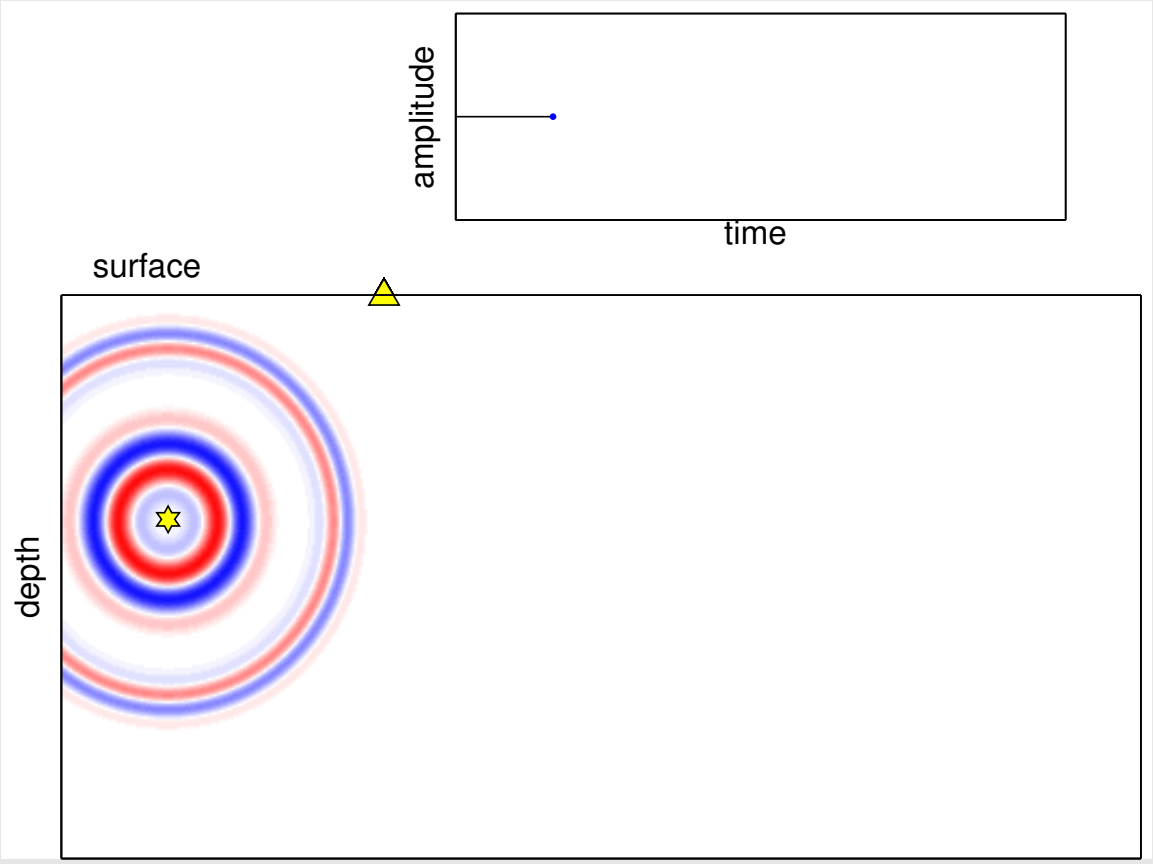
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

homogenes Medium



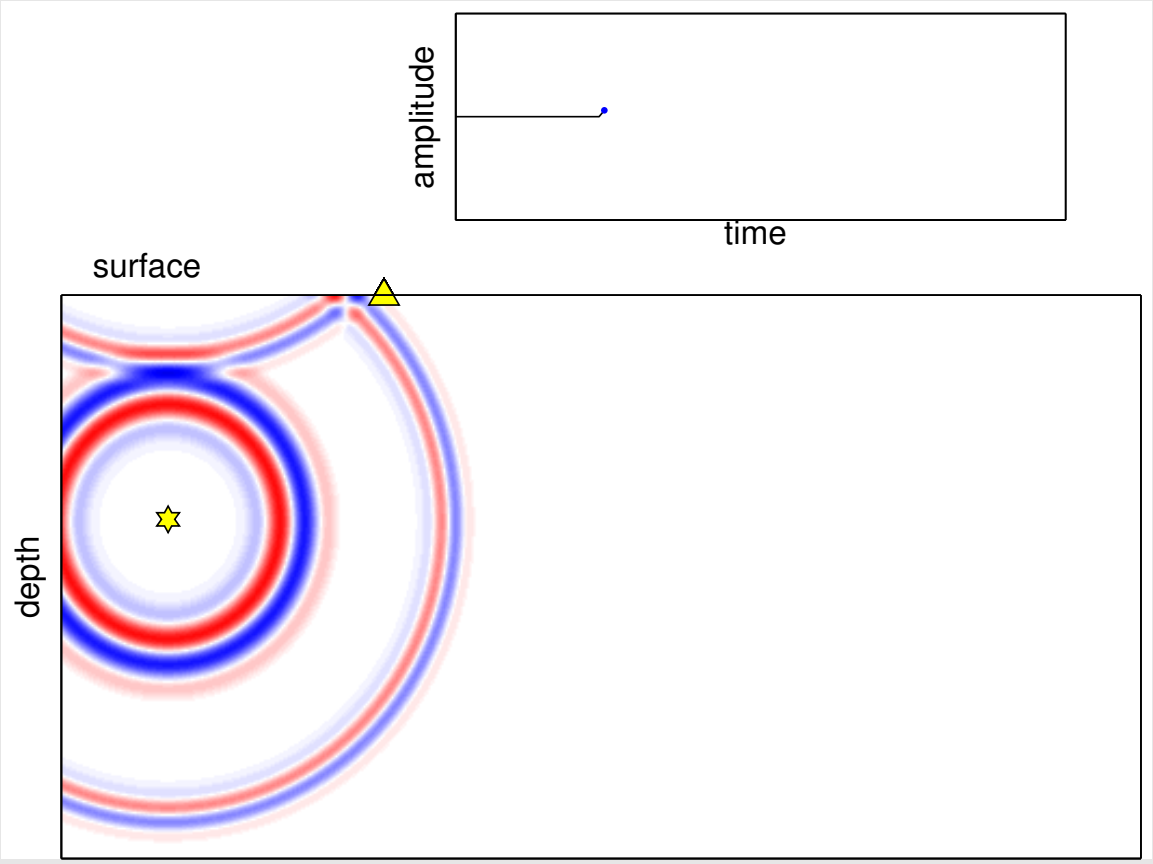
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

homogenes Medium



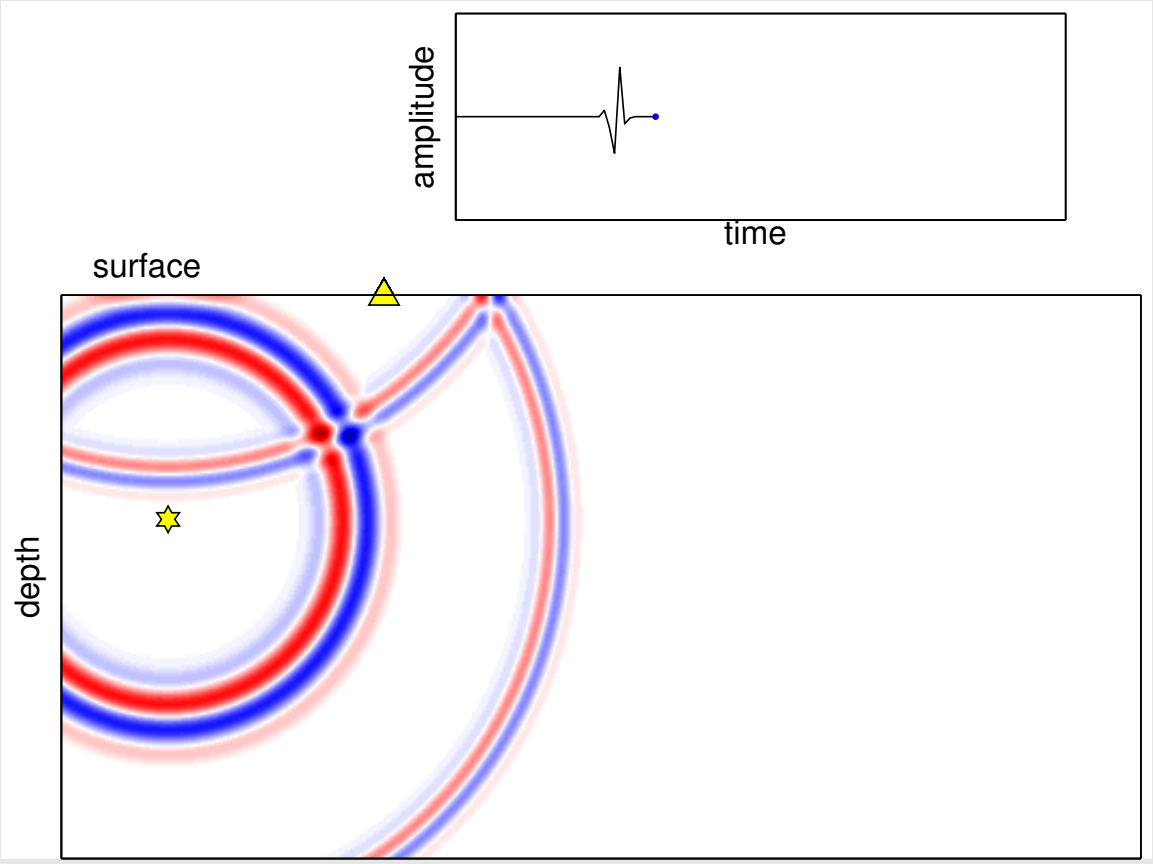
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

homogenes Medium



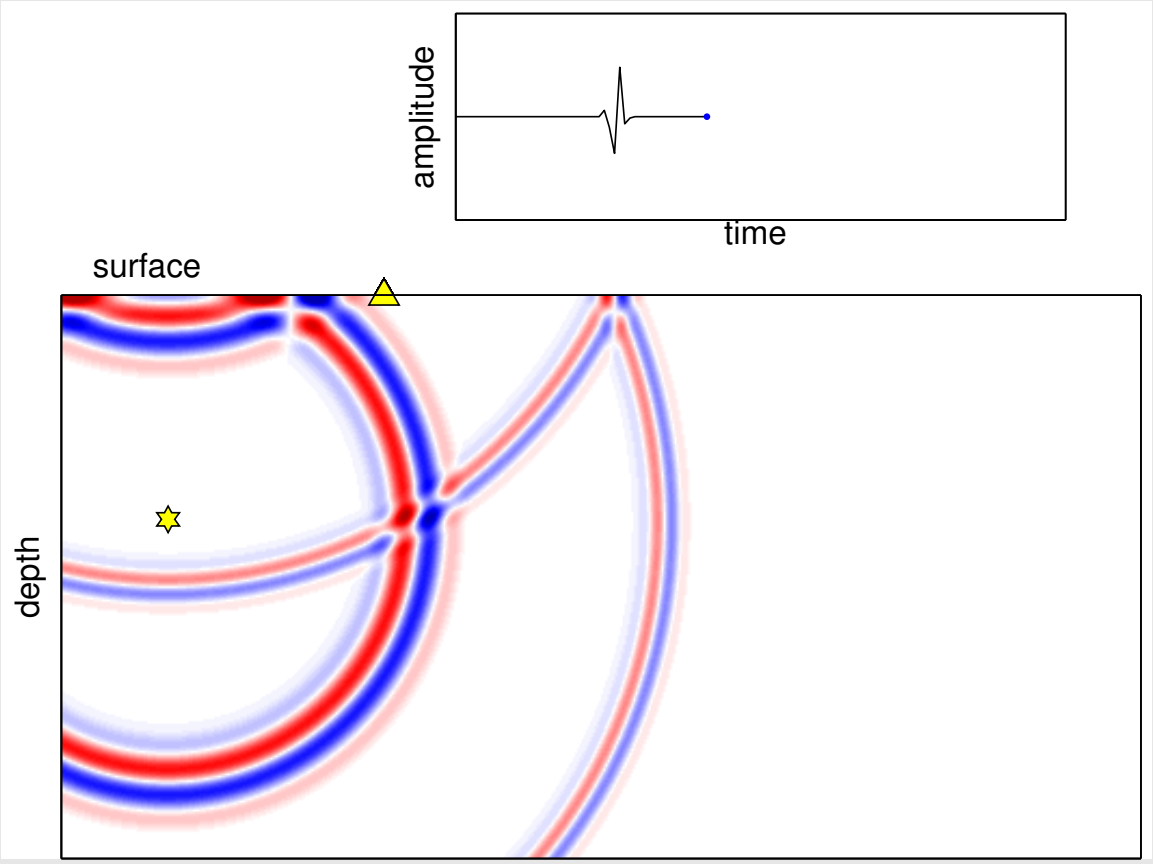
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

homogenes Medium



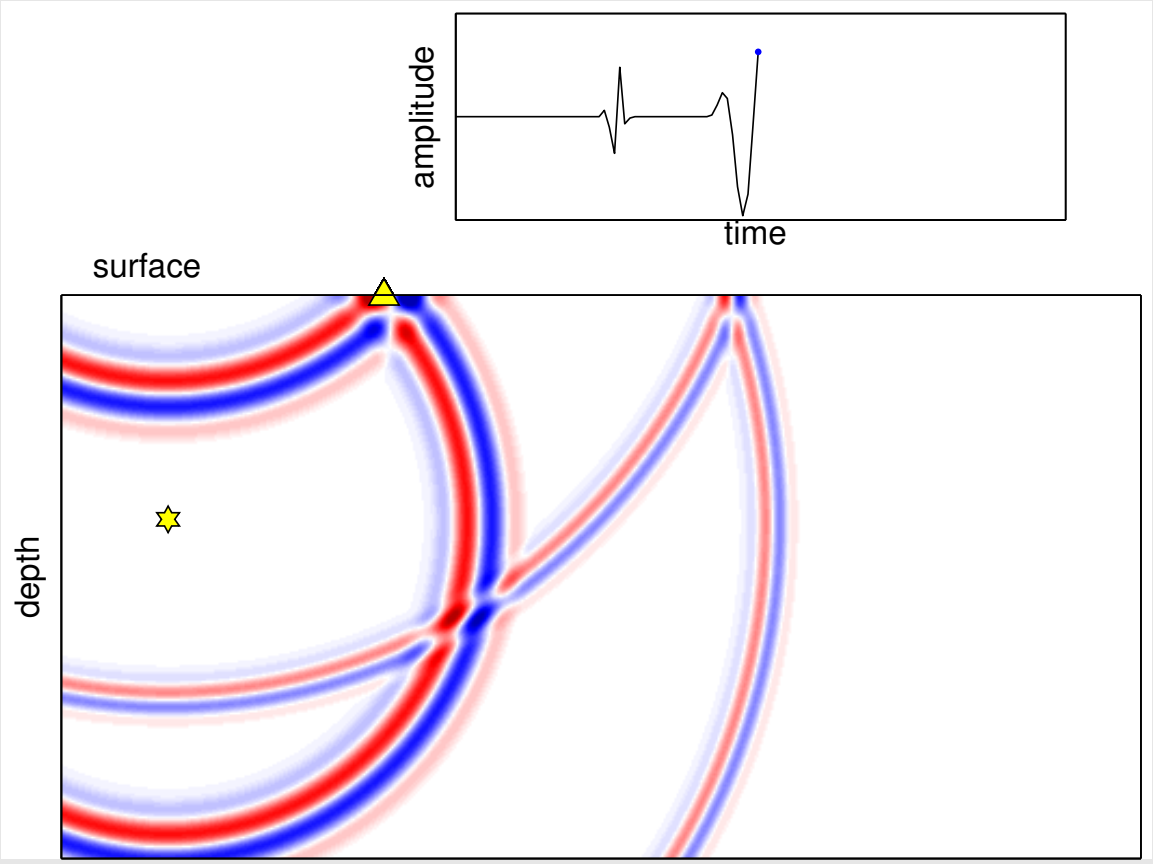
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

homogenes Medium



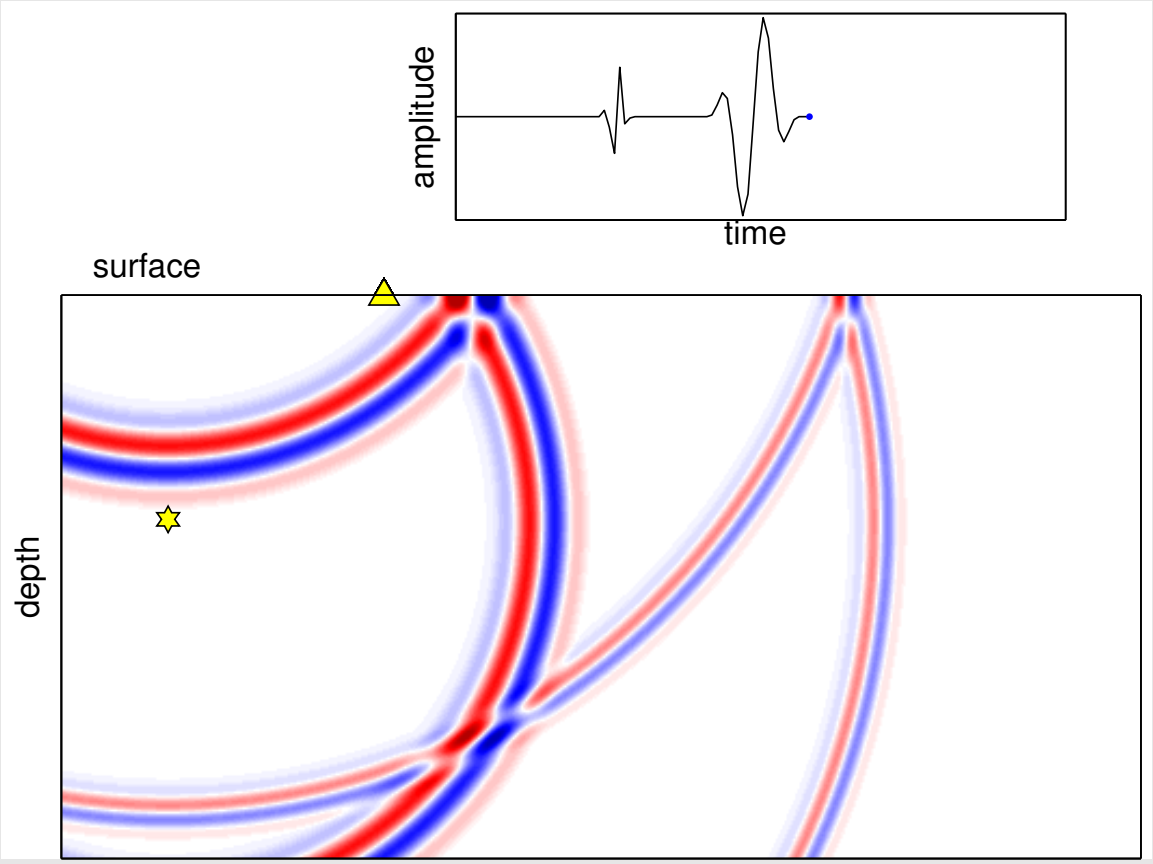
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

homogenes Medium



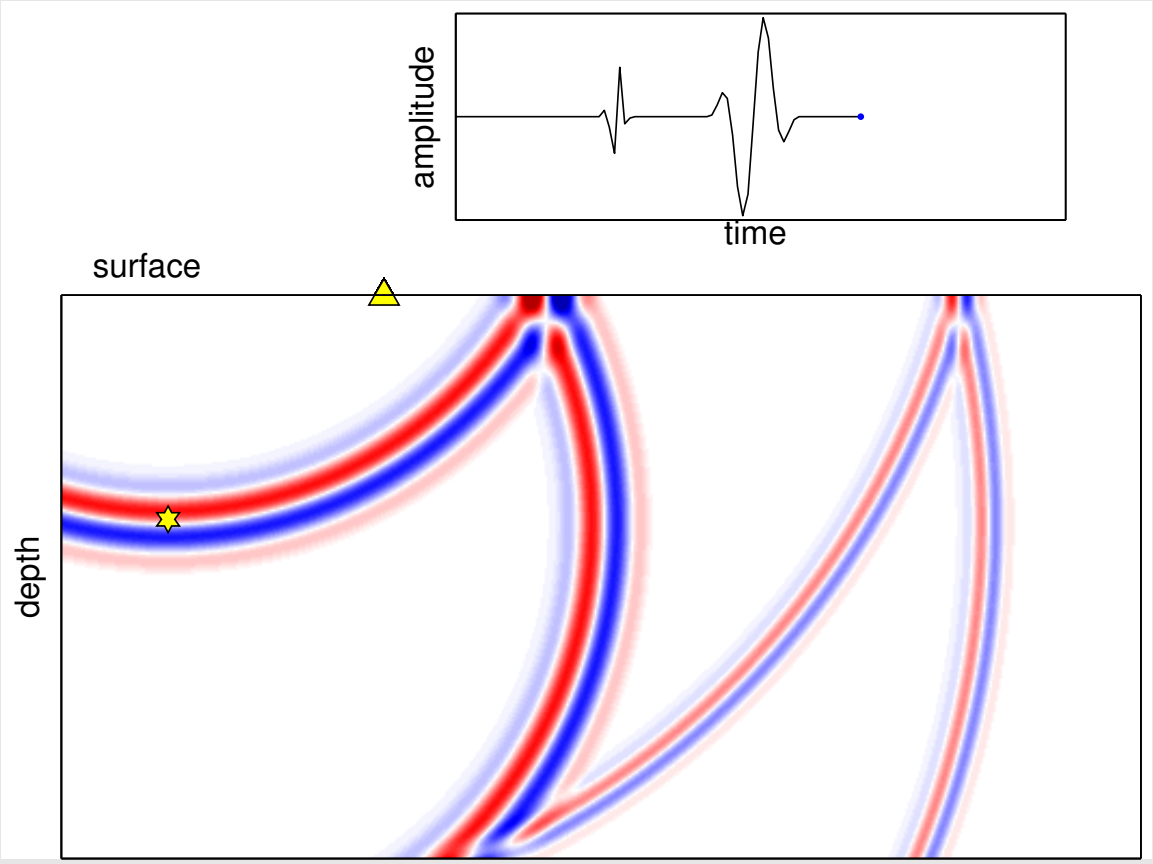
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

homogenes Medium



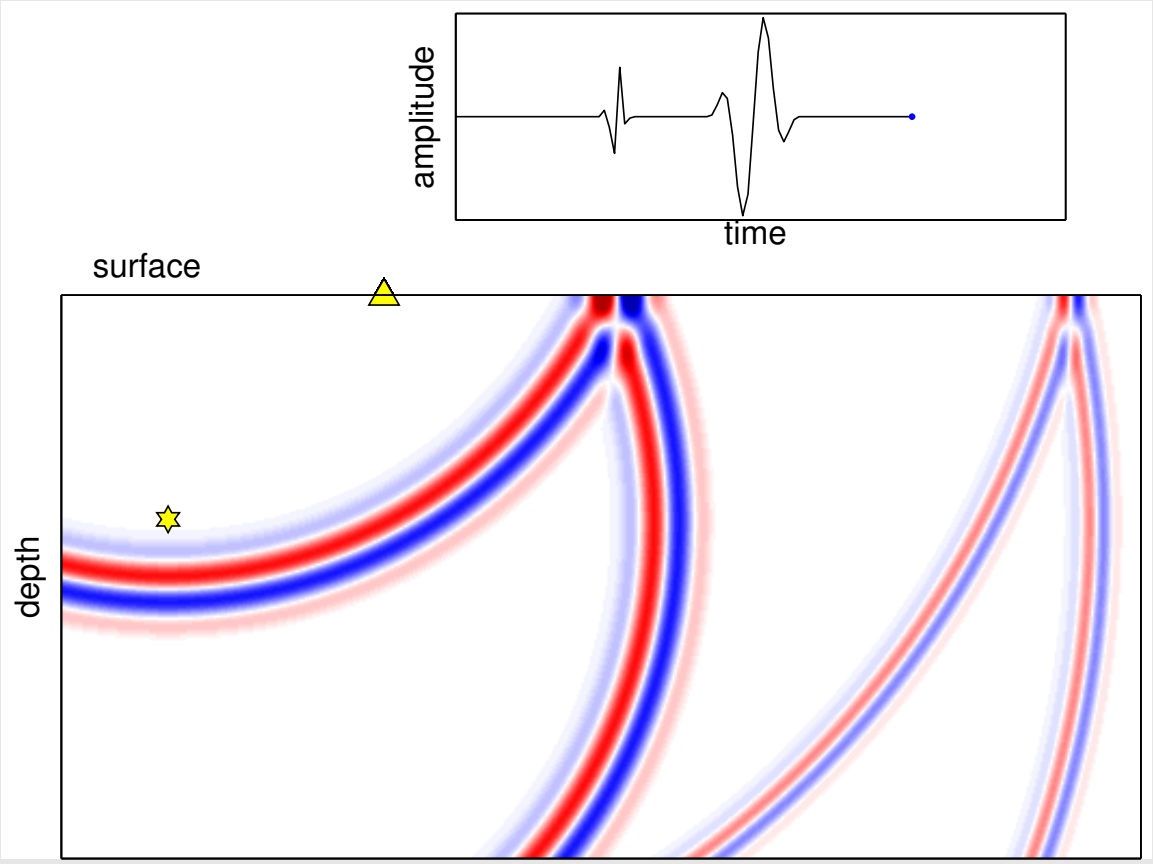
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

homogenes Medium



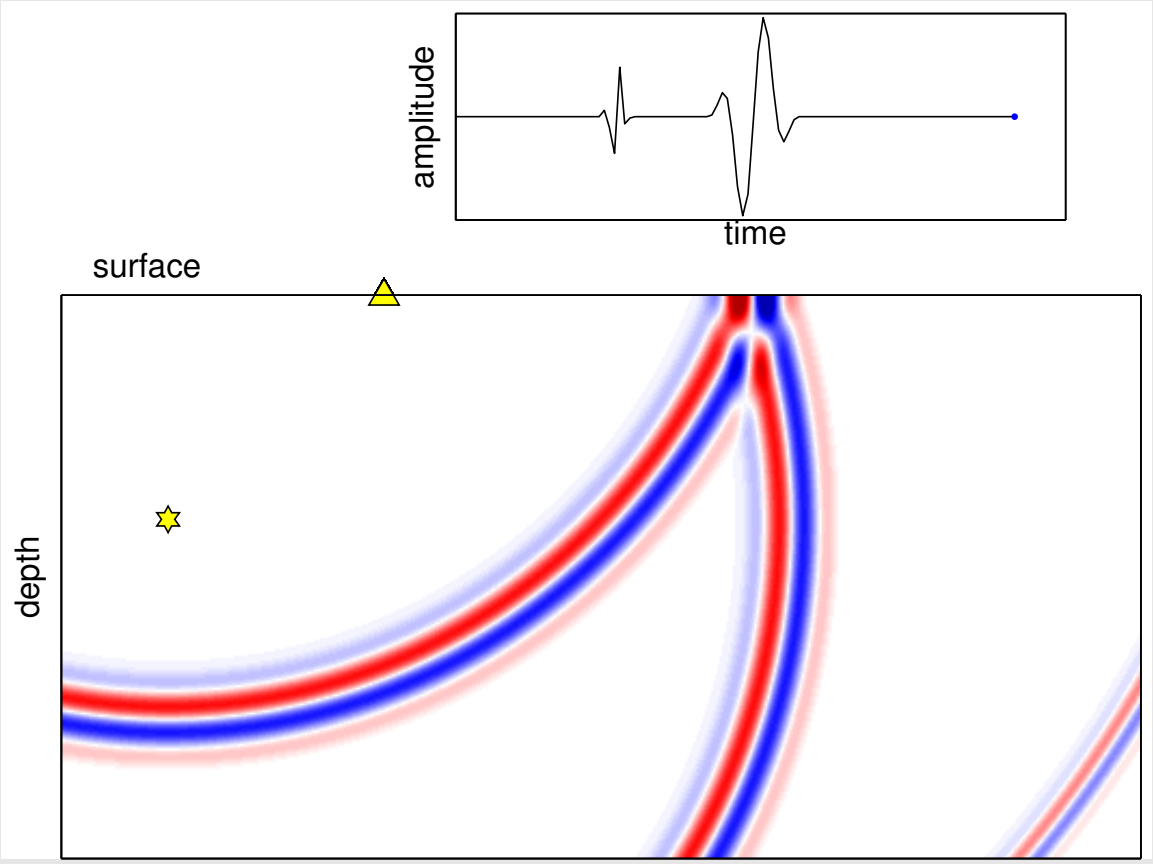
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

homogenes Medium



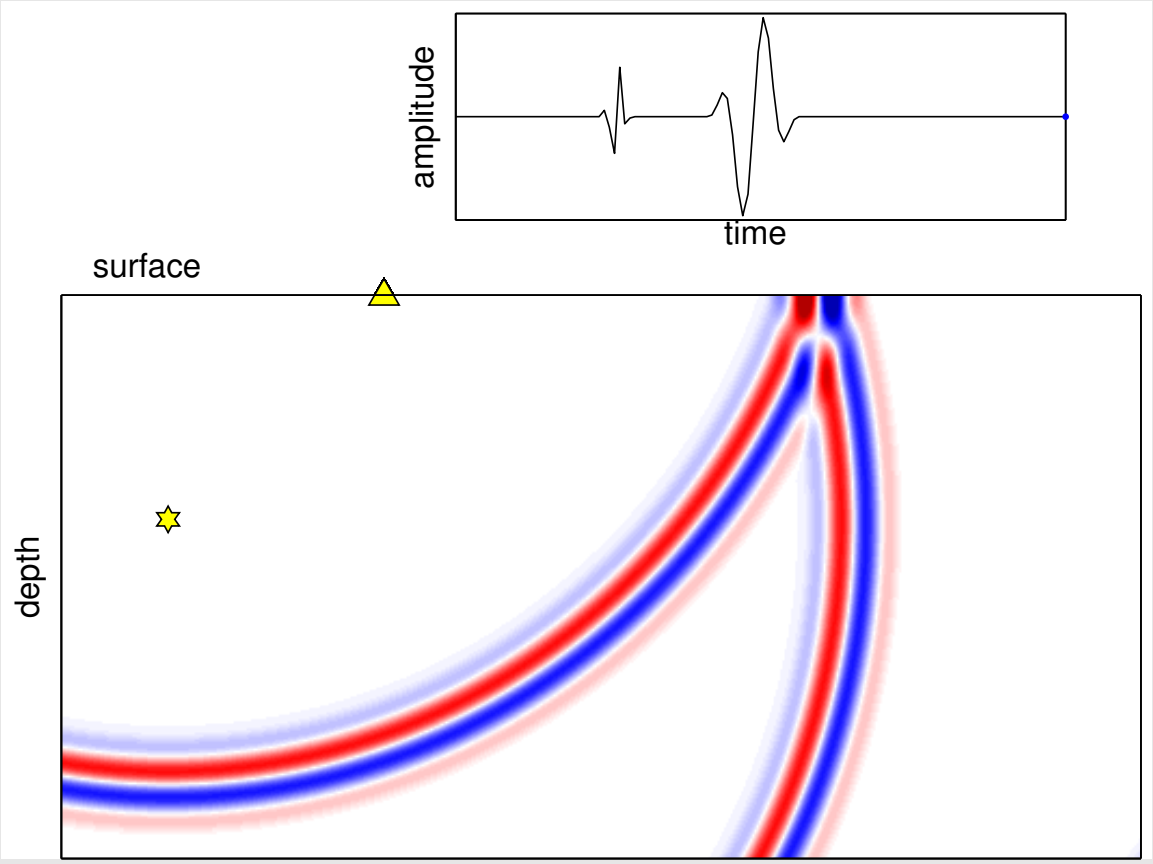
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

homogenes Medium



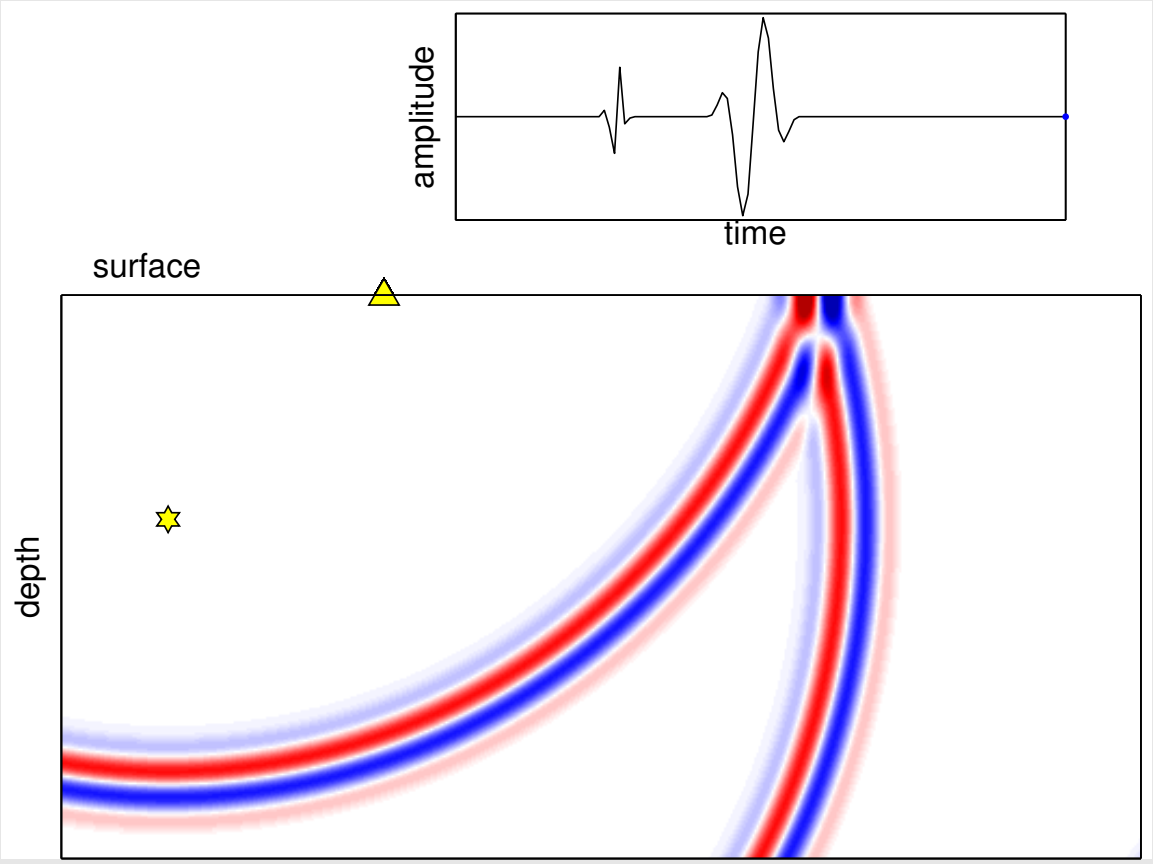
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

homogenes Medium



Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

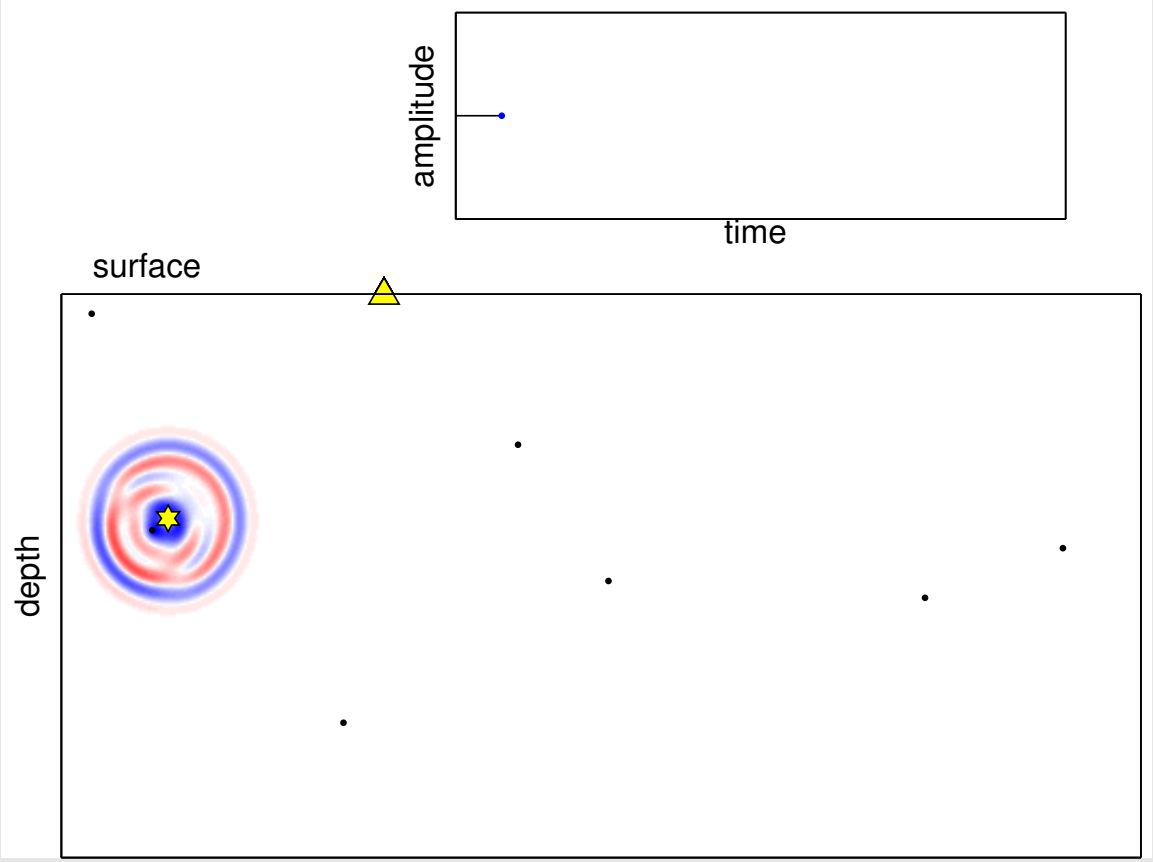
homogenes Medium



Struktur kann auf relevanten Skalen bestimmt werden.

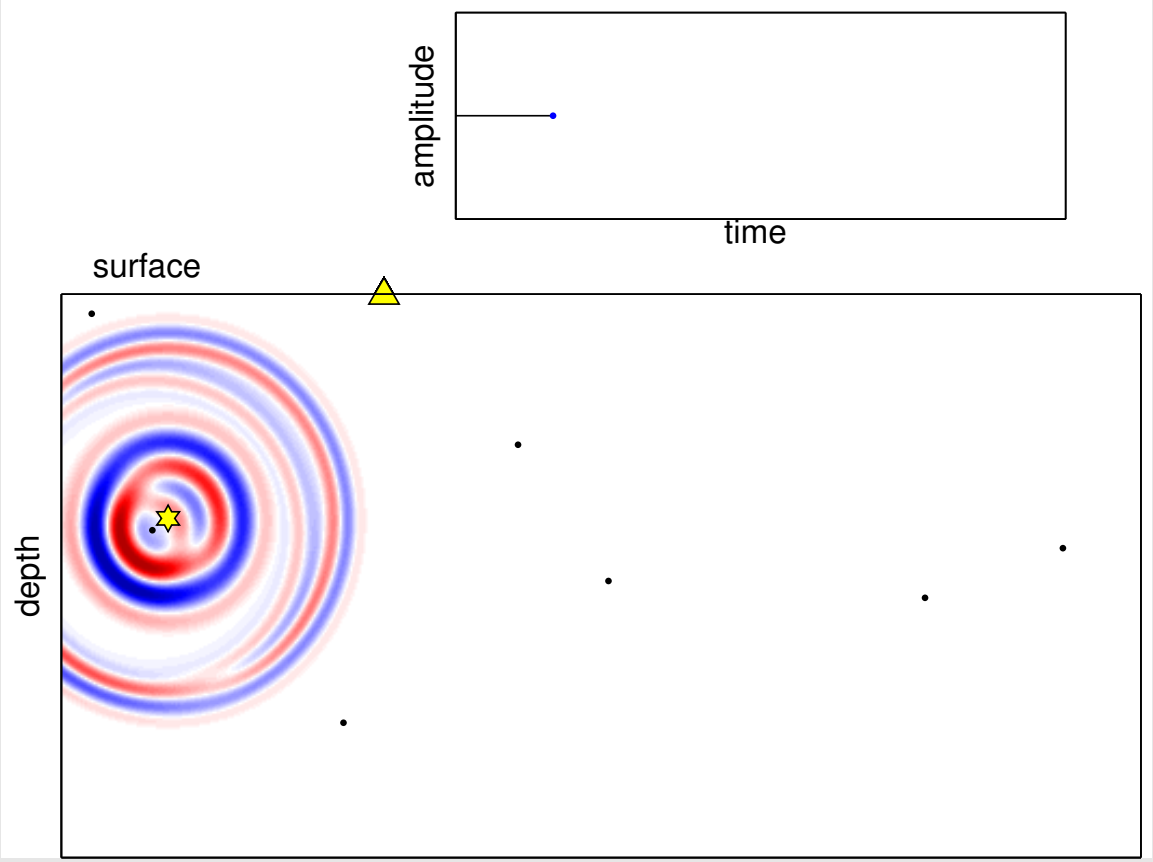
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

heterogenes Medium



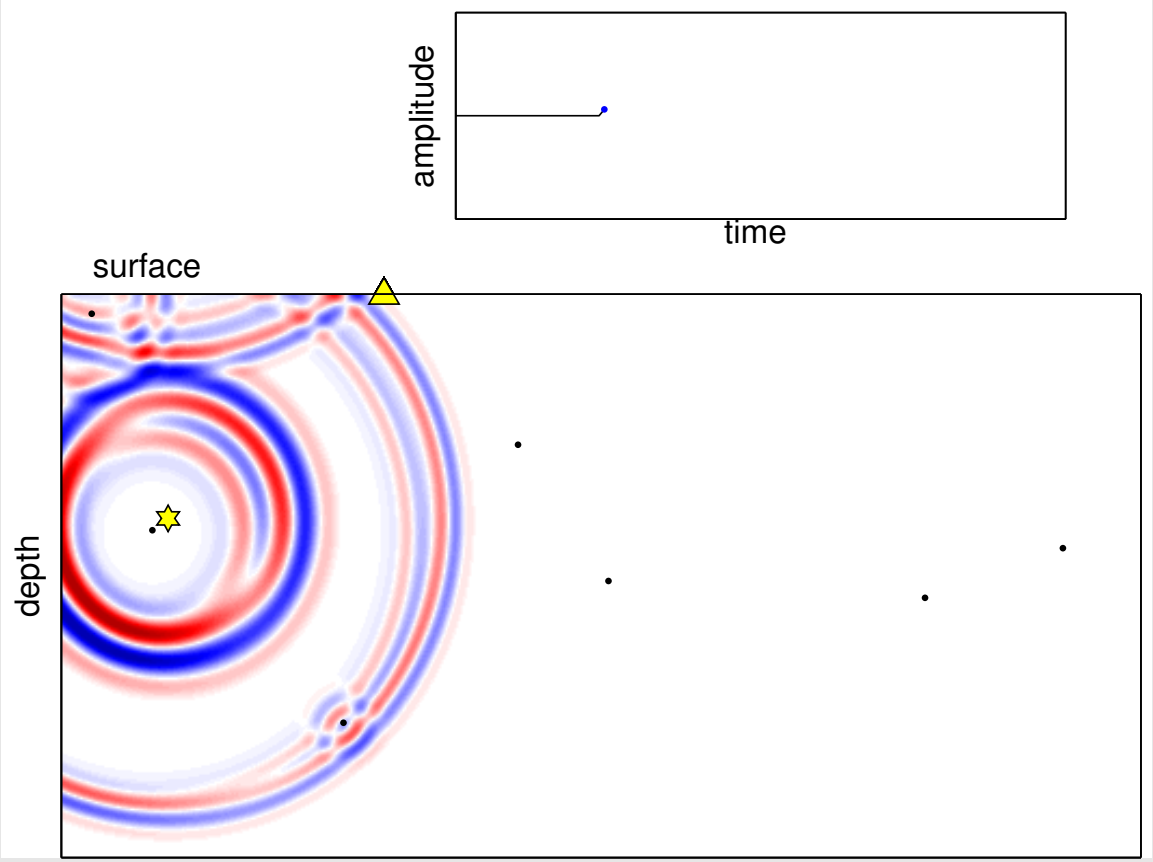
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

heterogenes Medium



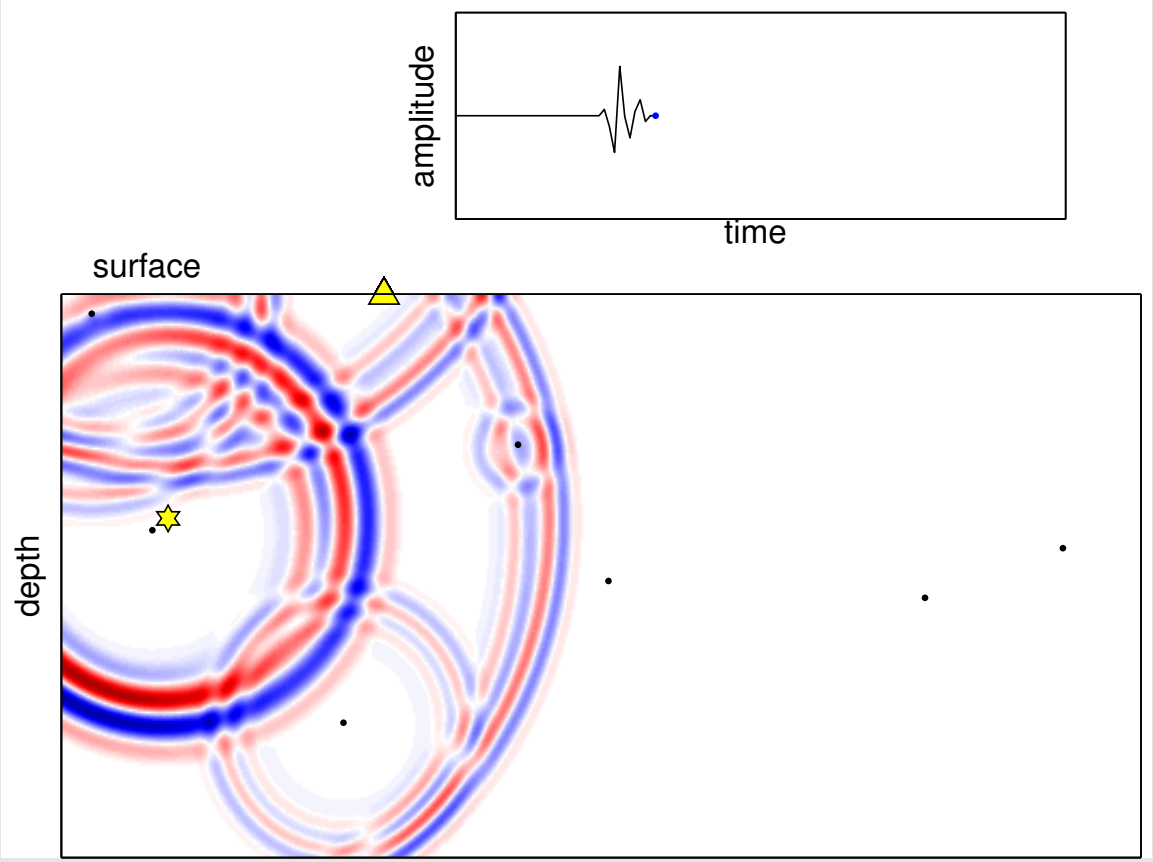
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

heterogenes Medium



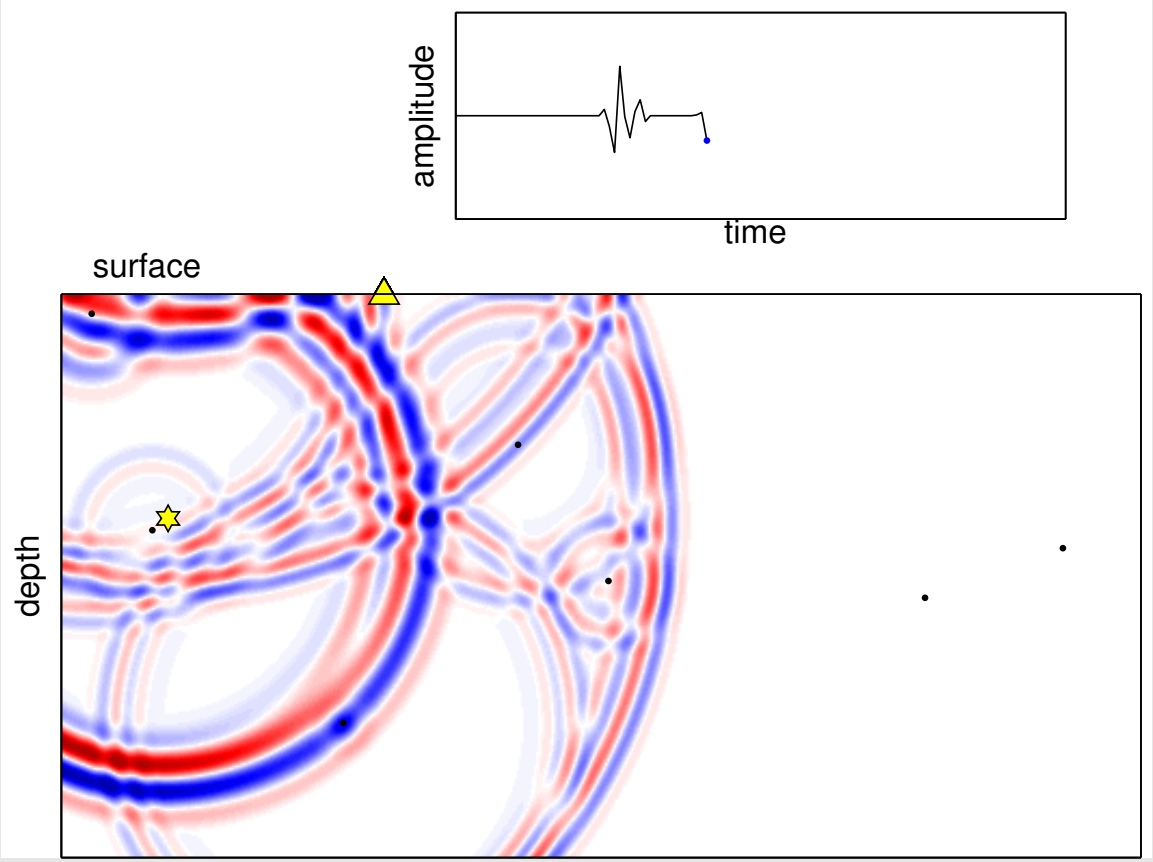
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

heterogenes Medium



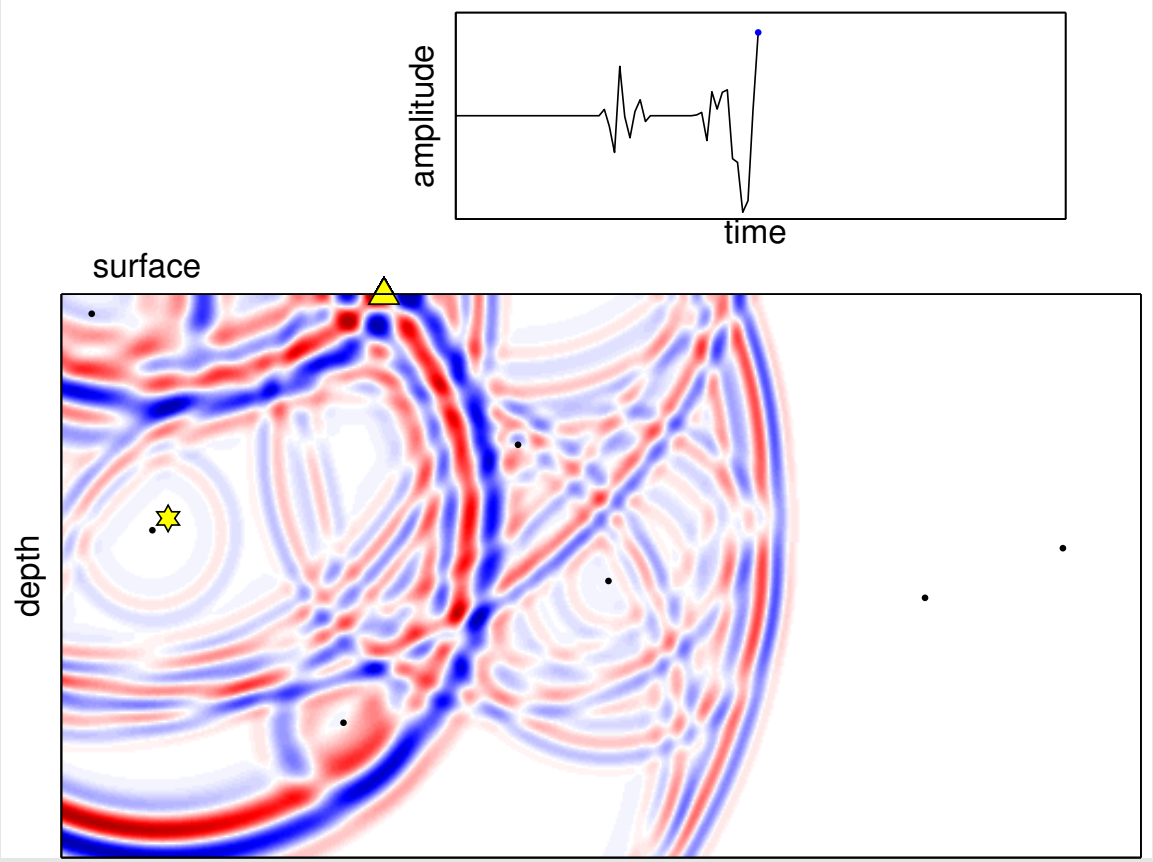
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

heterogenes Medium



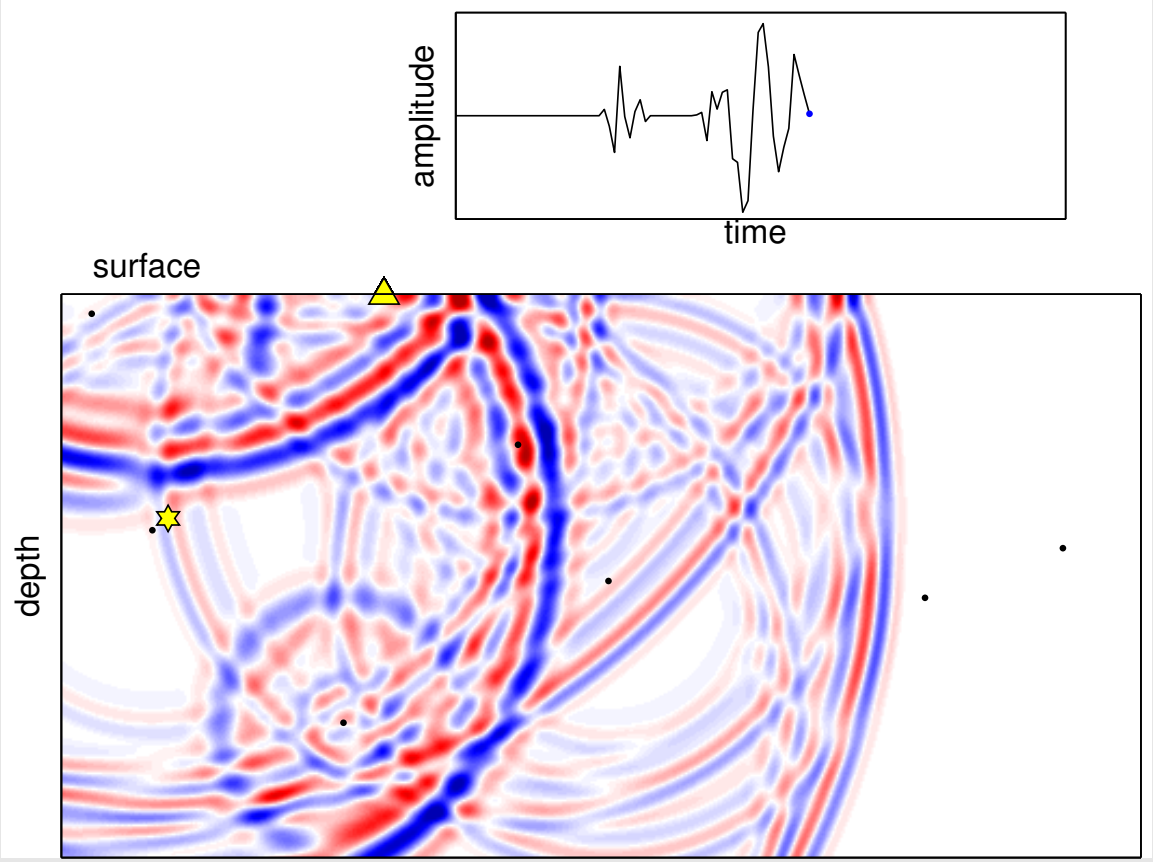
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

heterogenes Medium



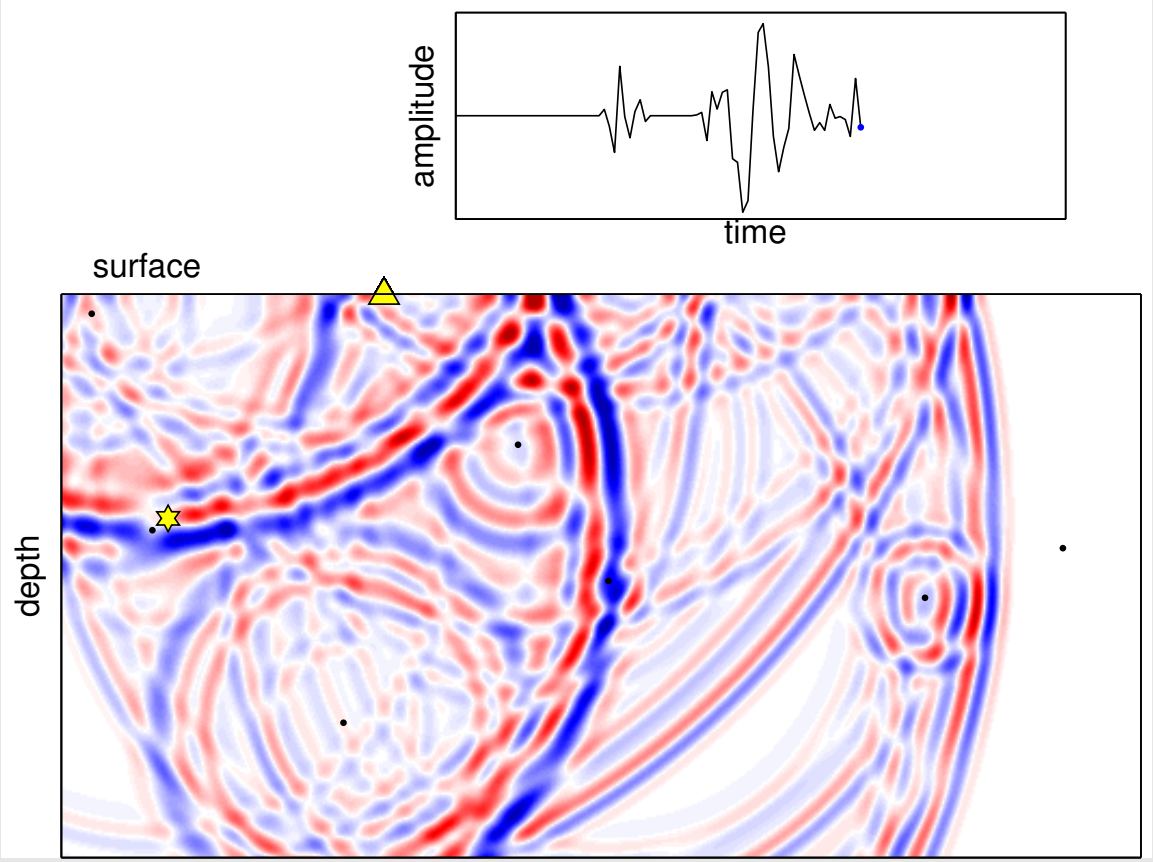
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

heterogenes Medium



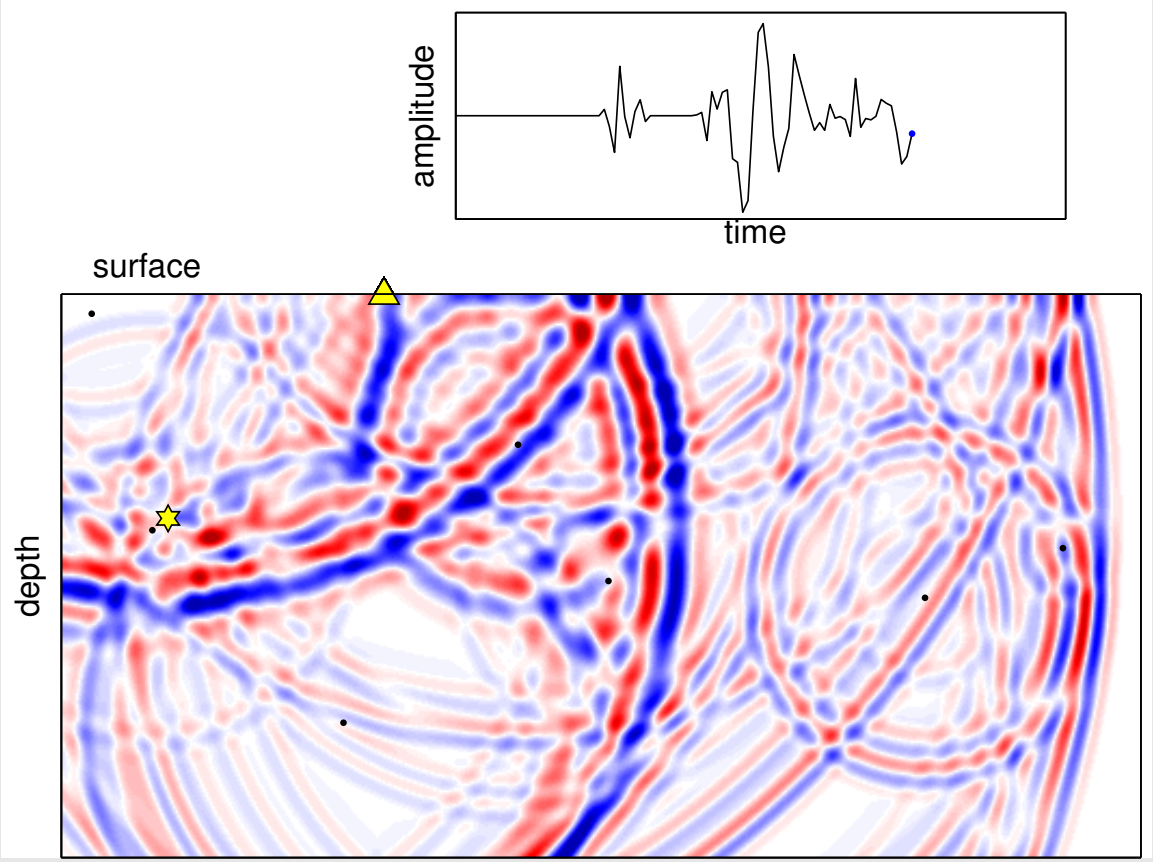
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

heterogenes Medium



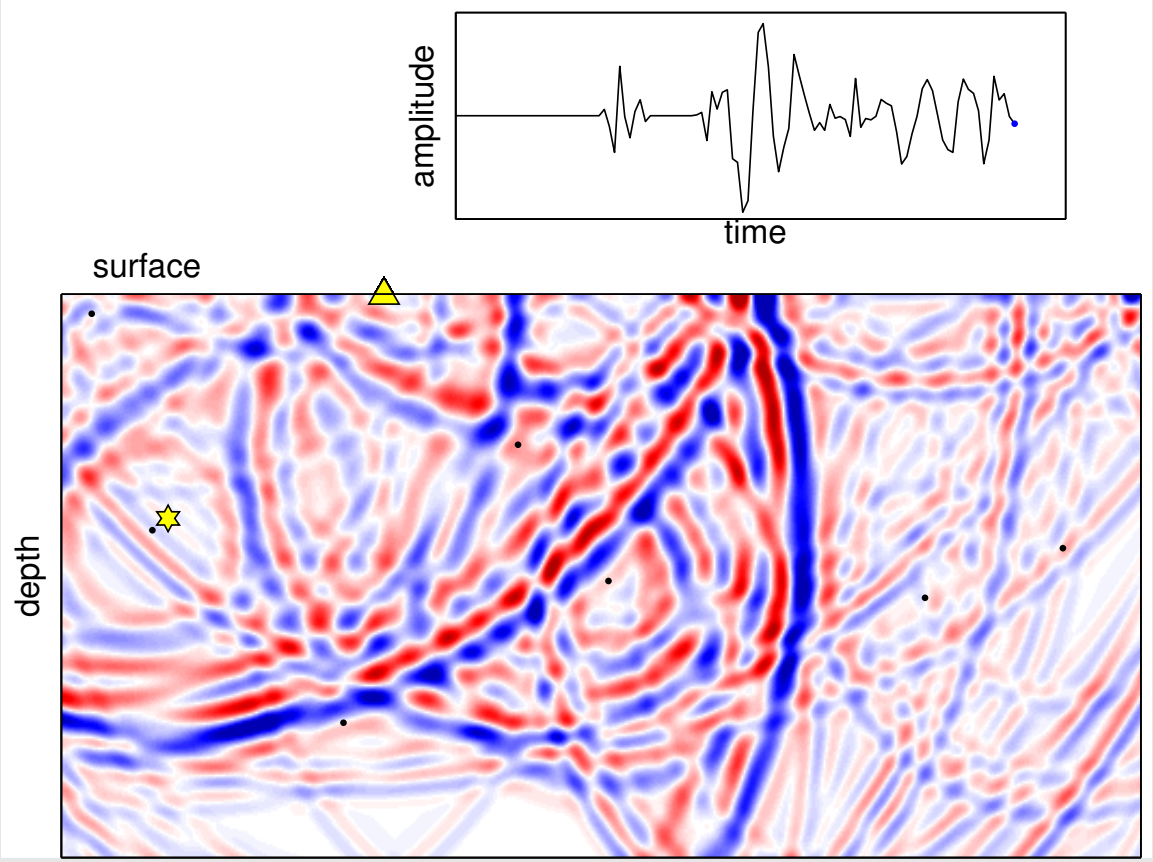
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

heterogenes Medium



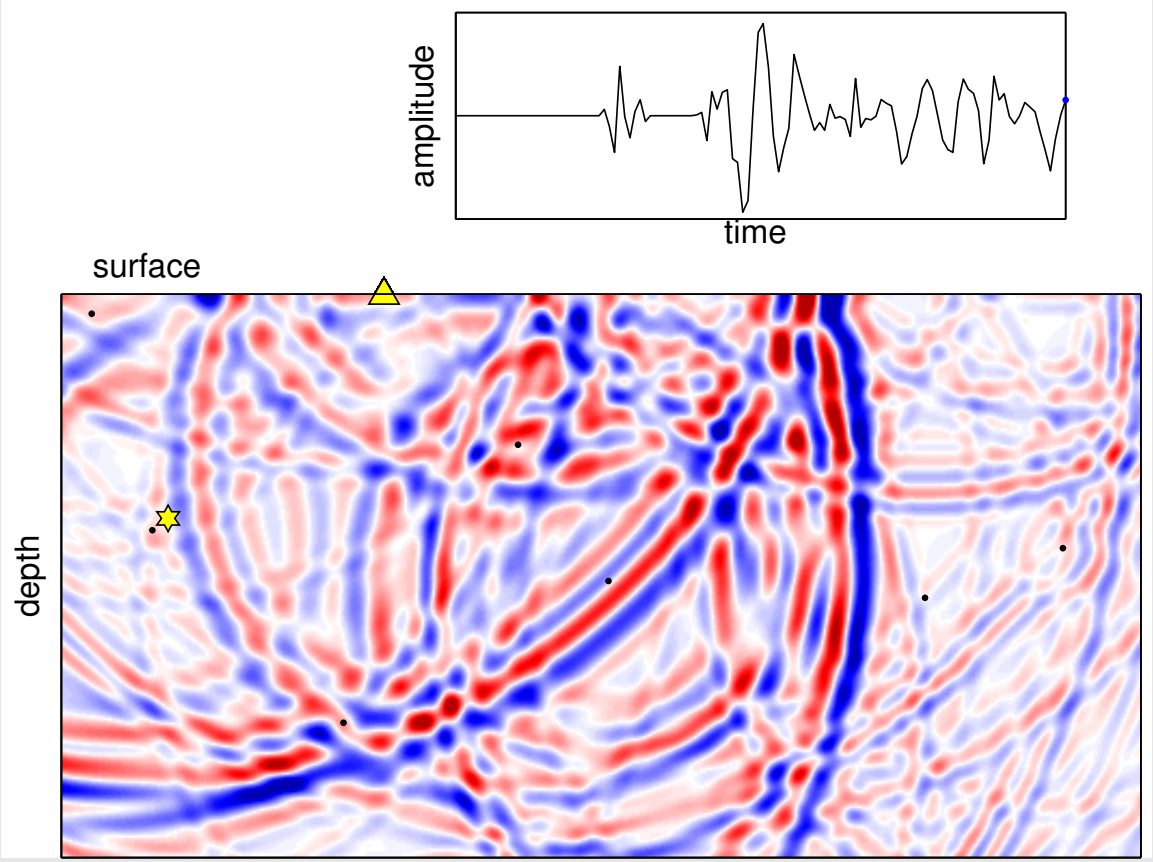
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

heterogenes Medium



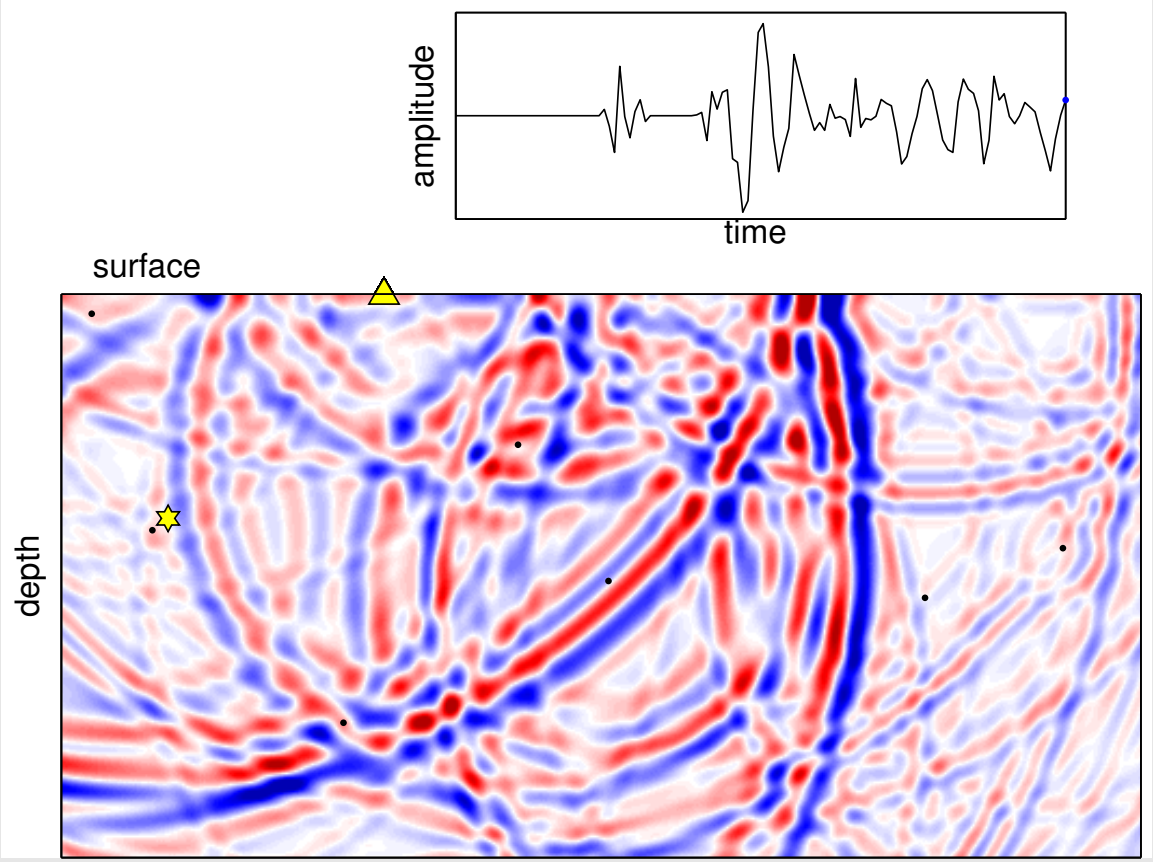
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

heterogenes Medium



Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

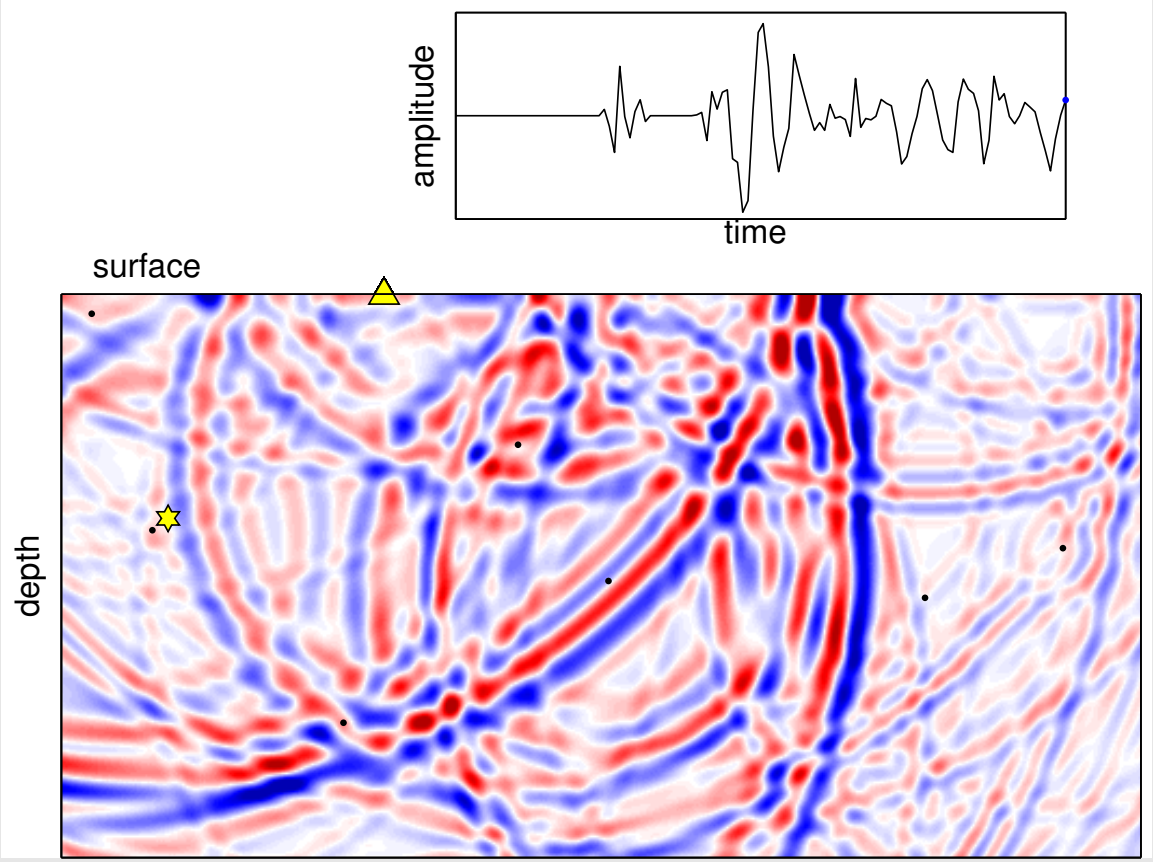
heterogenes Medium



Kleinskalige Struktur kann nicht bestimmt werden (Auflösungsgrenzen).

Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

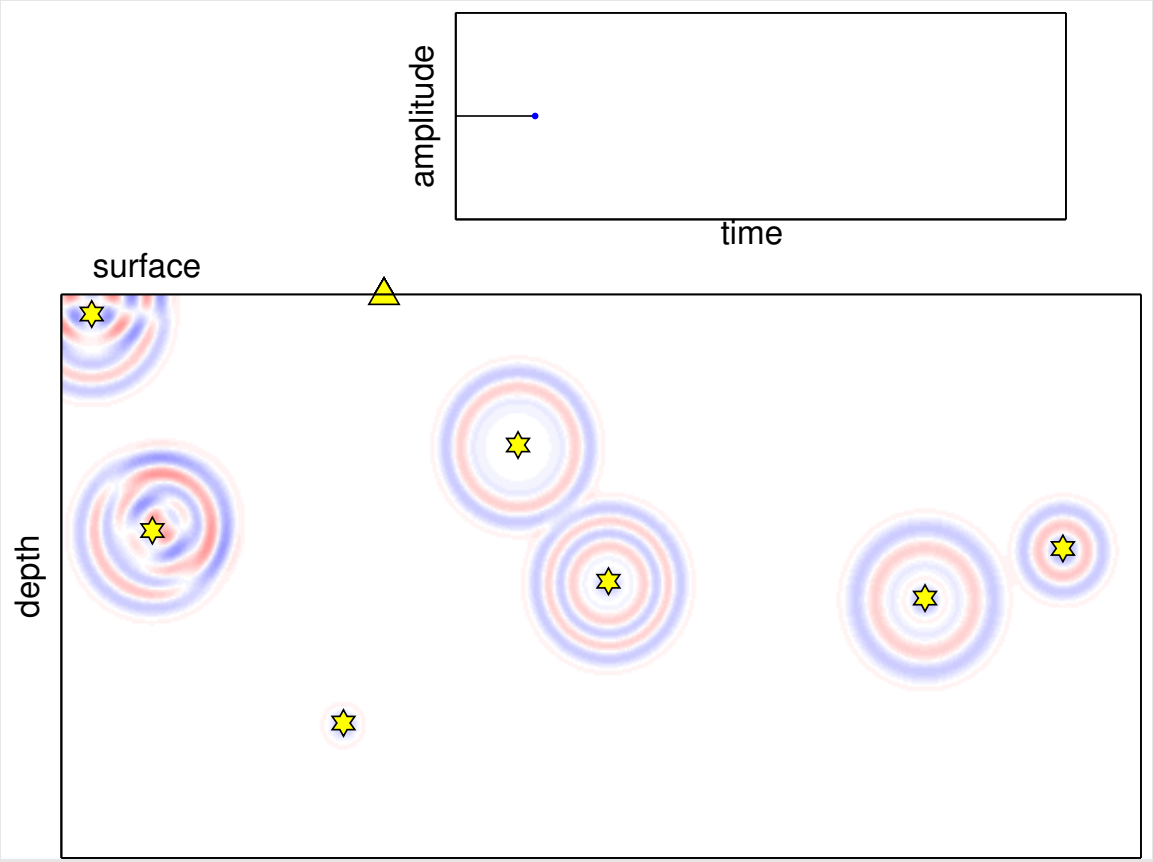
heterogenes Medium



Kleinskalige Struktur kann nicht bestimmt werden (Auflösungsgrenzen).

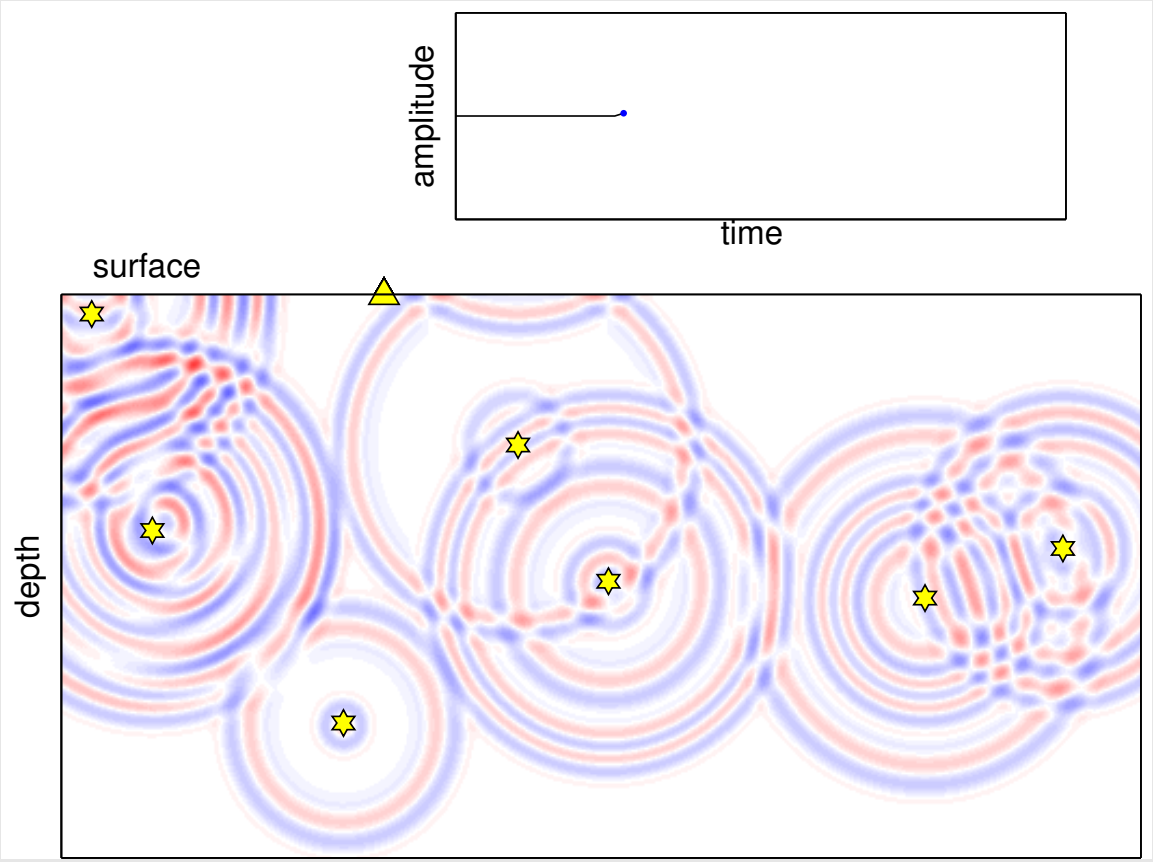
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

seismisches Rauschen



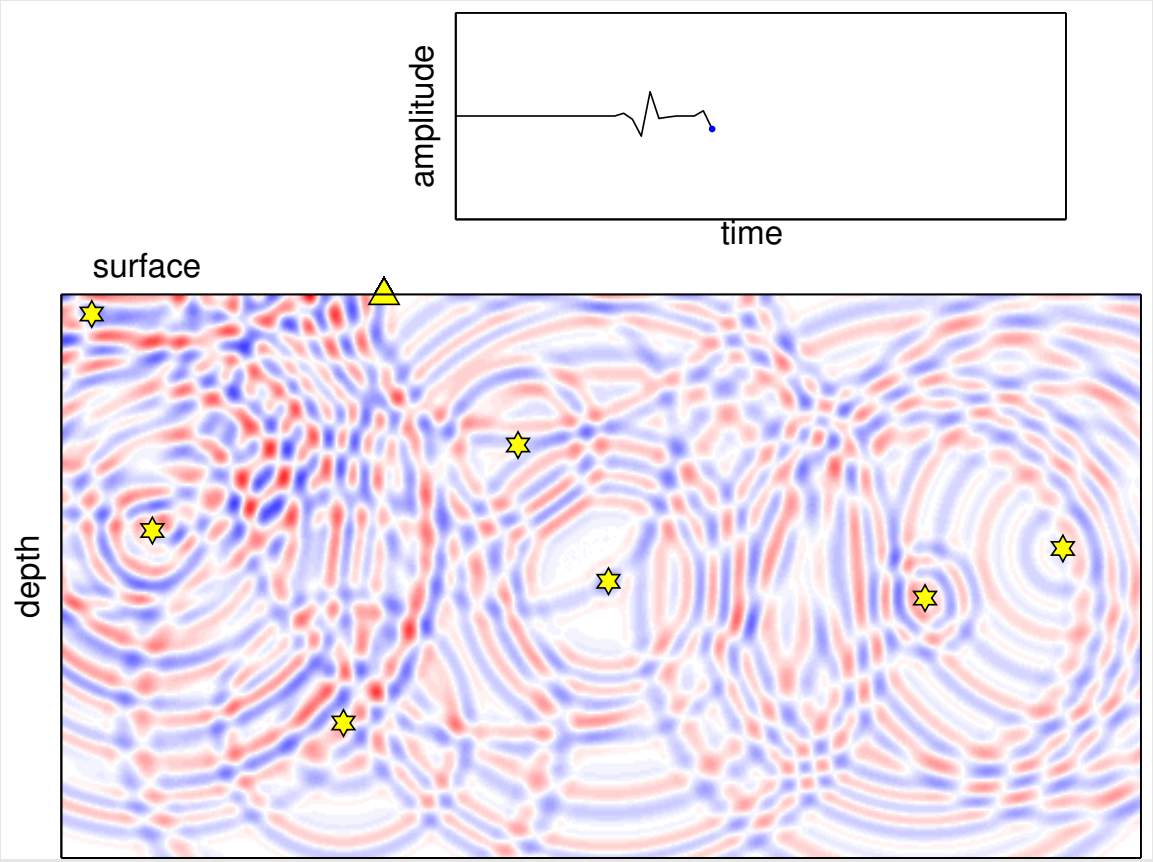
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

seismisches Rauschen



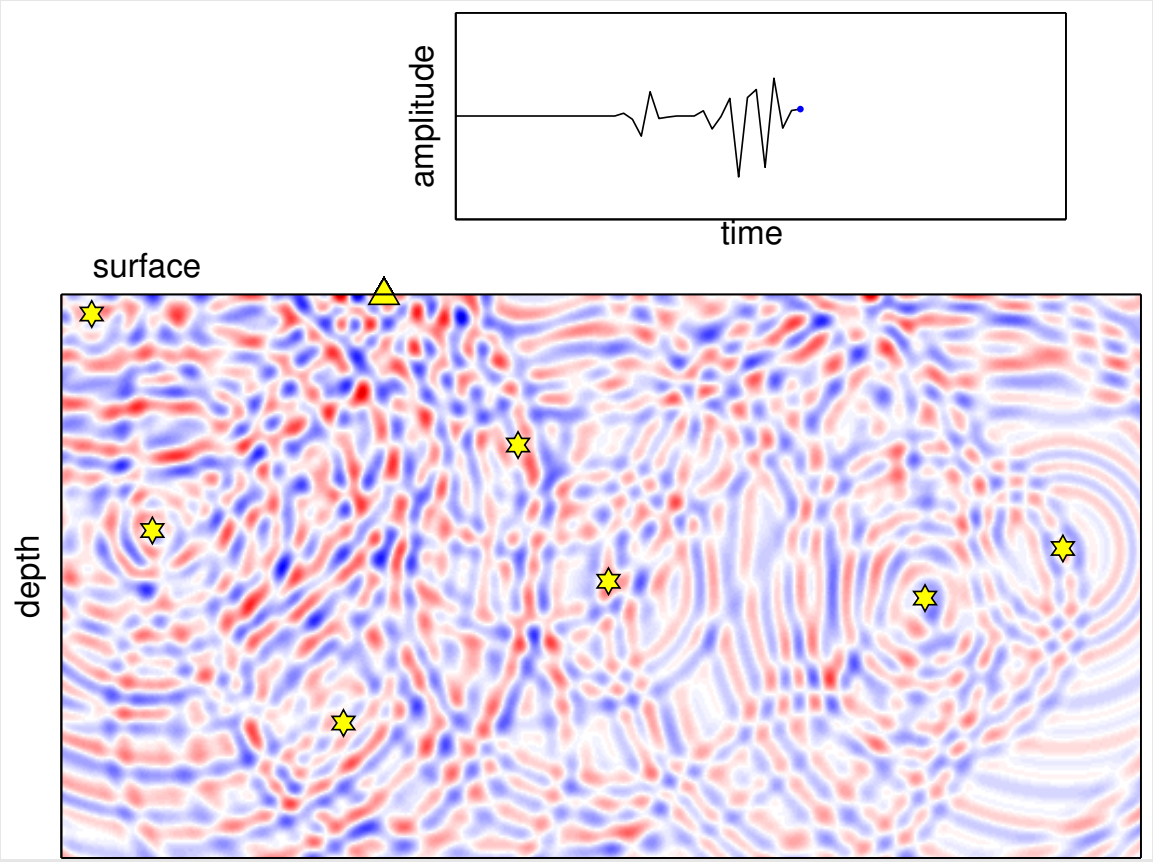
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

seismisches Rauschen



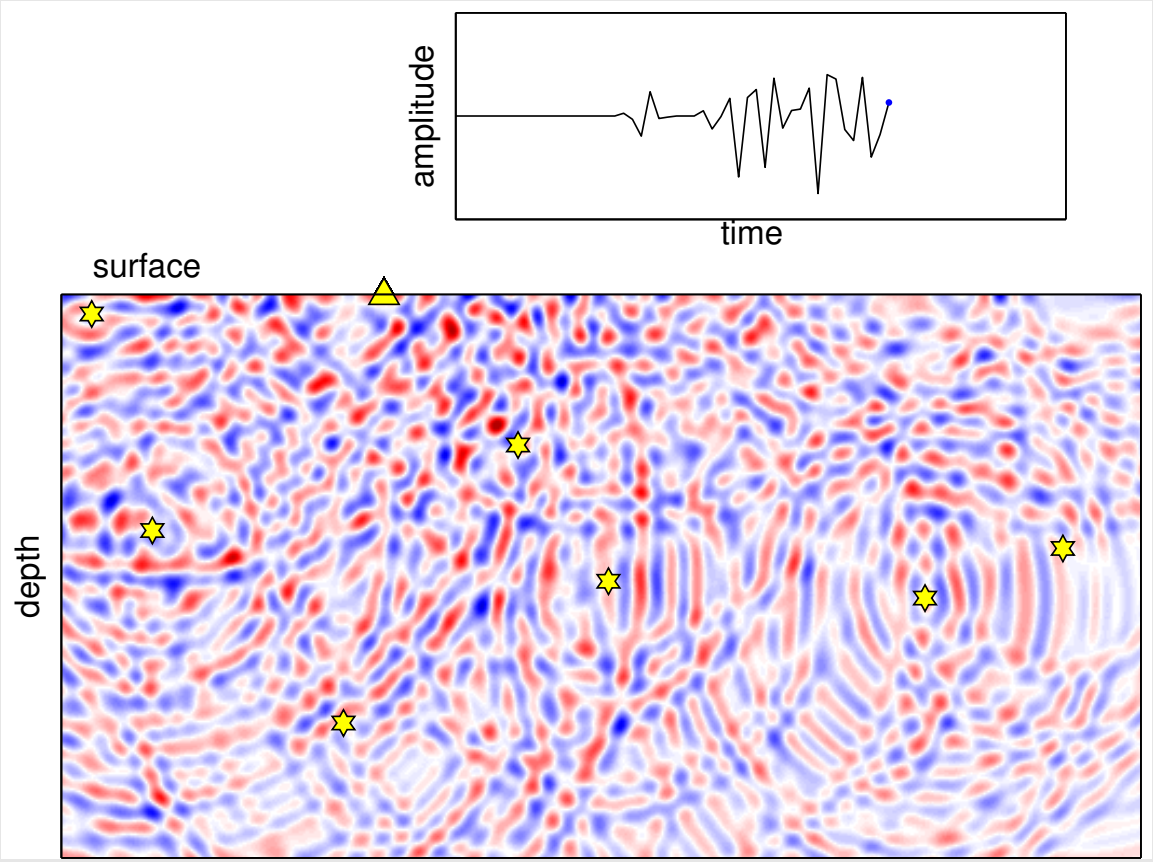
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

seismisches Rauschen



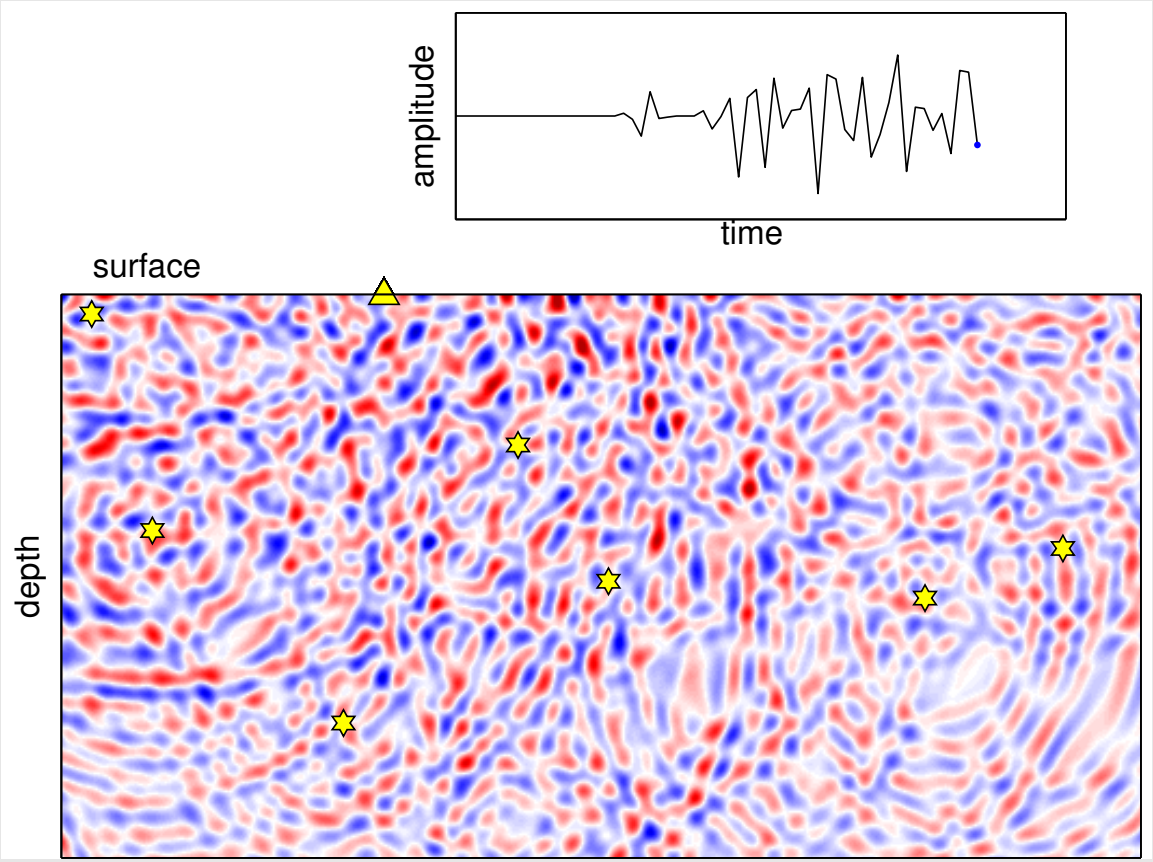
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

seismisches Rauschen



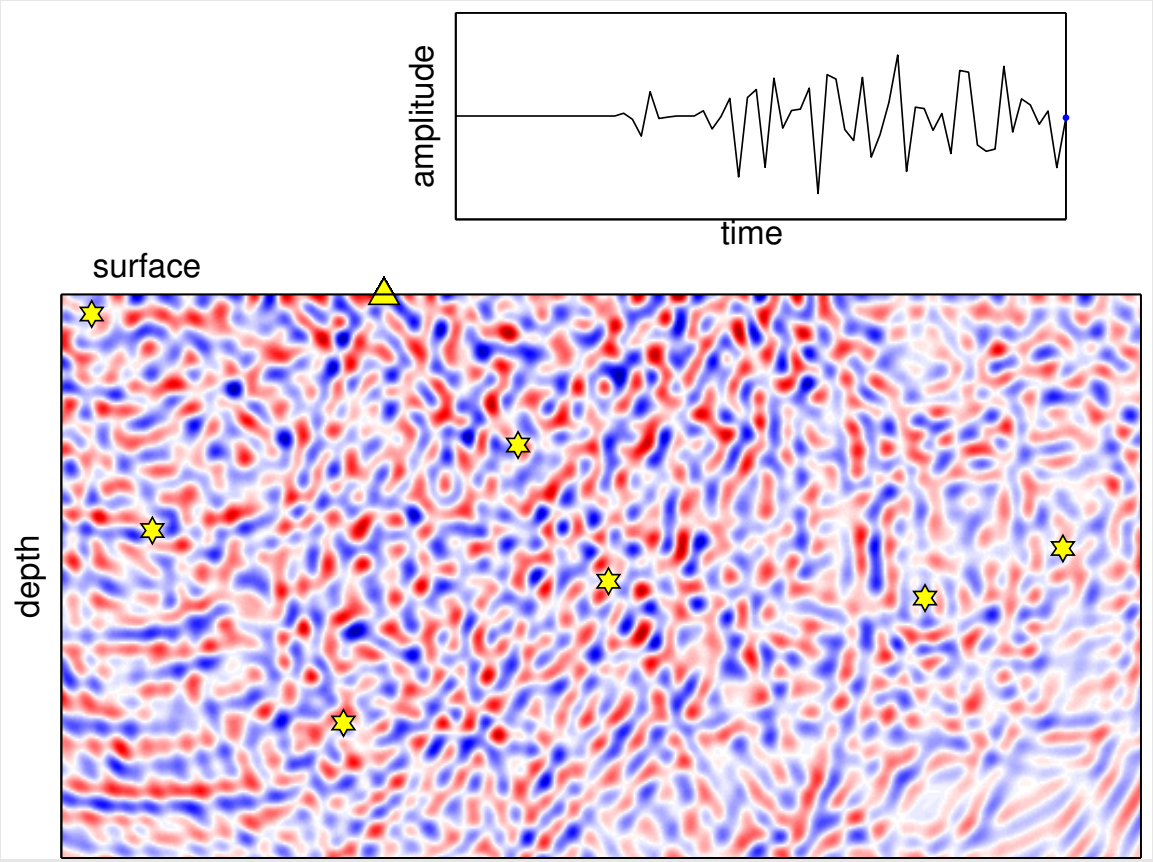
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

seismisches Rauschen



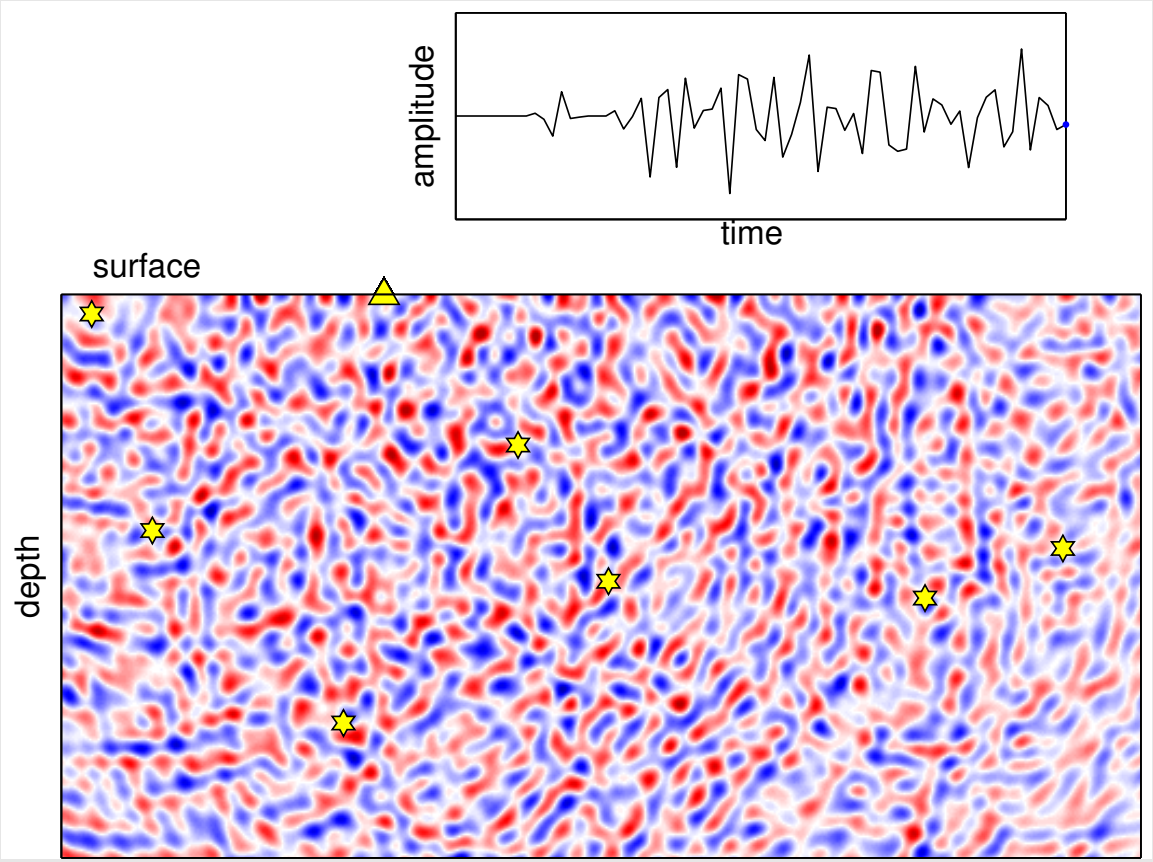
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

seismisches Rauschen



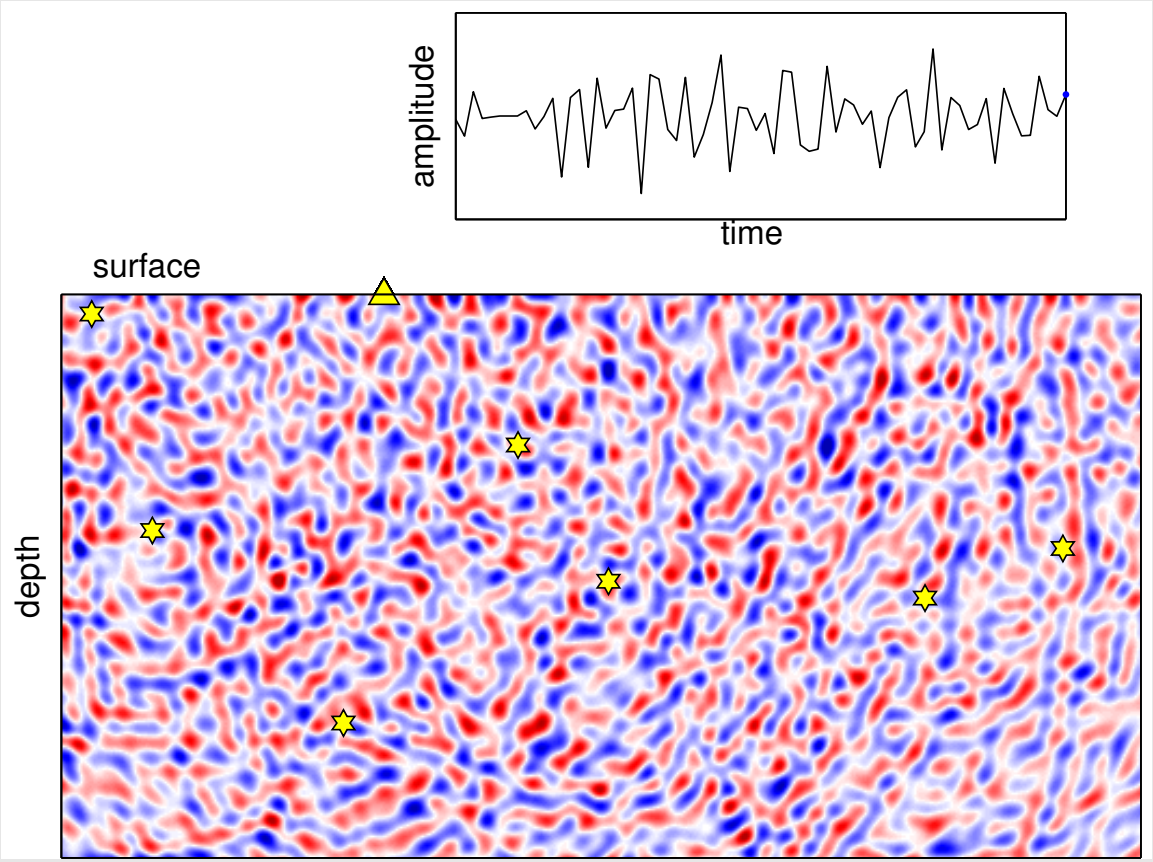
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

seismisches Rauschen



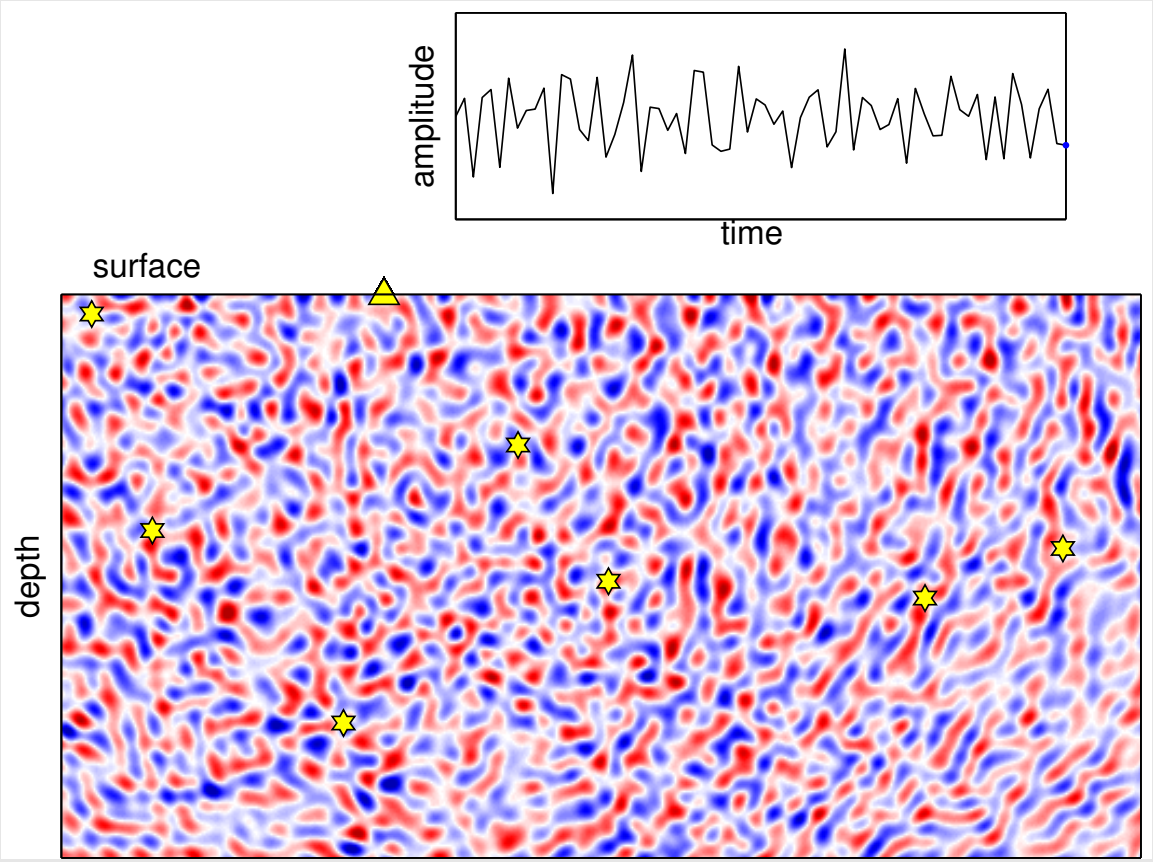
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

seismisches Rauschen



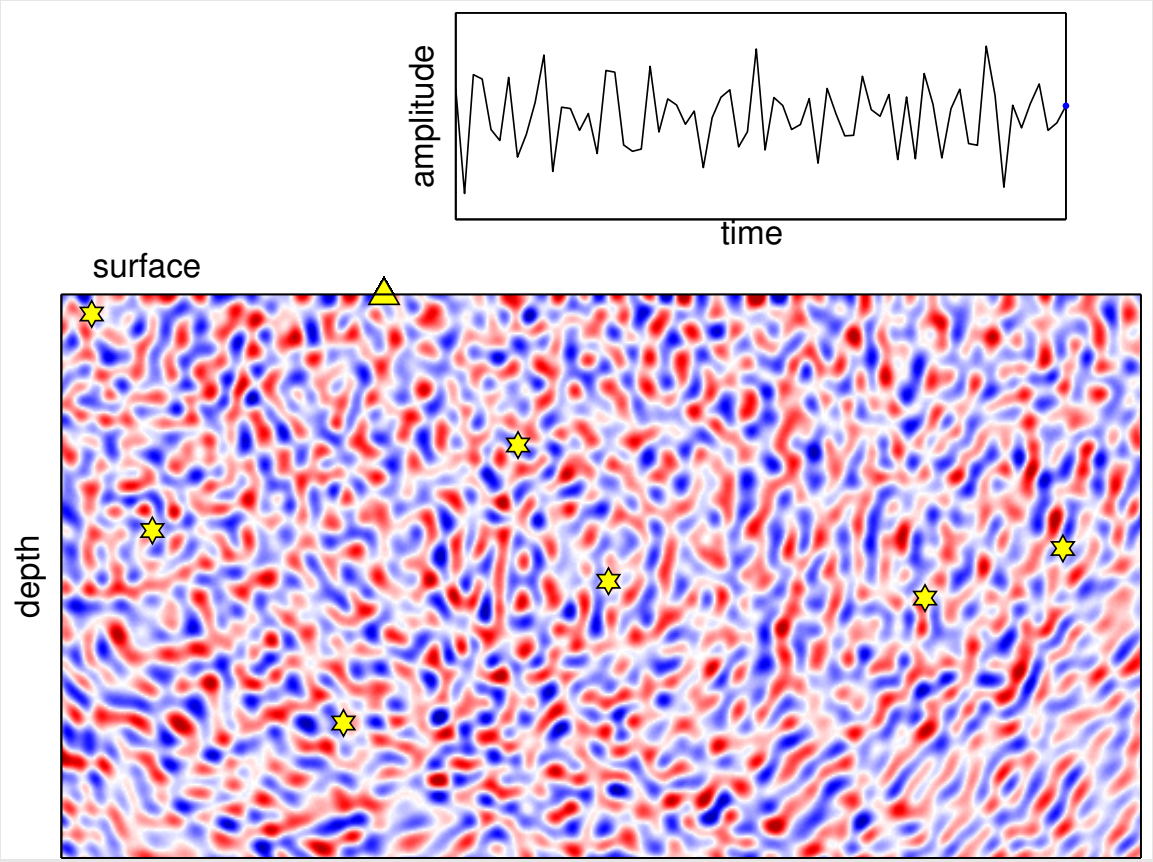
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

seismisches Rauschen



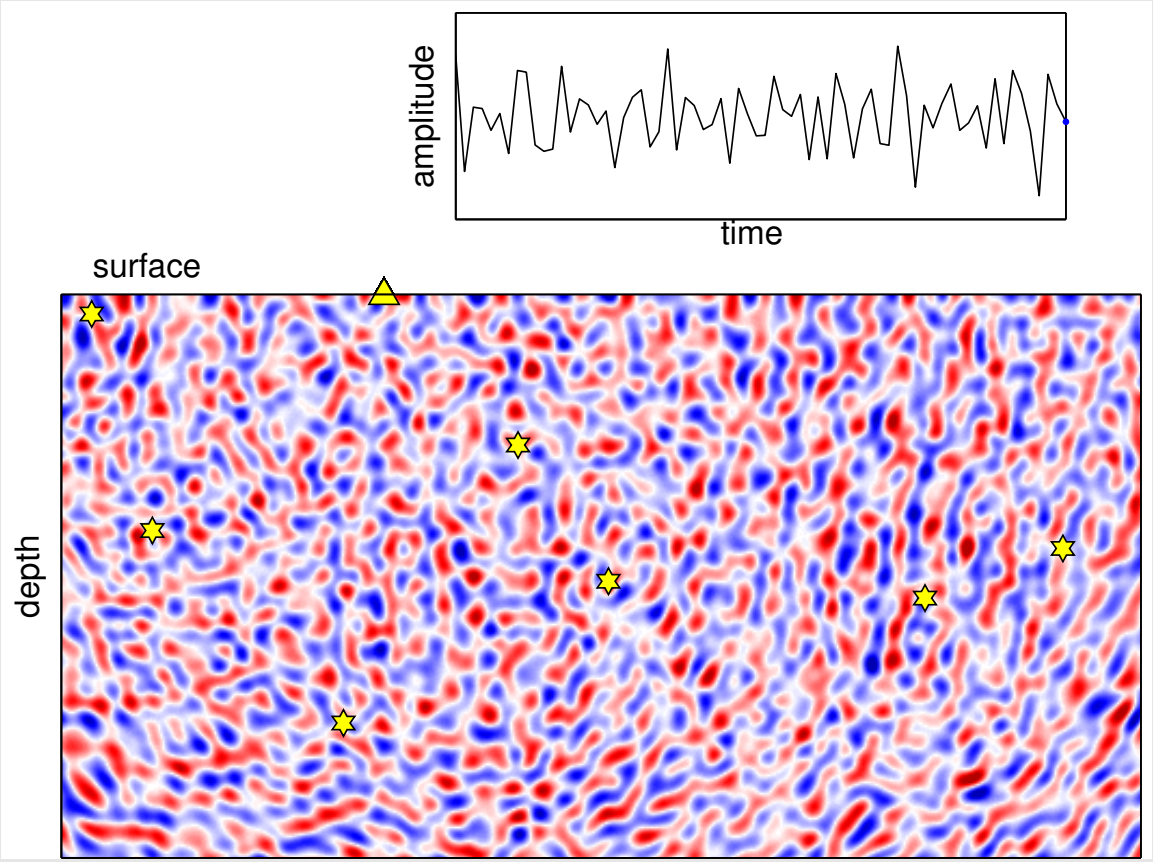
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

seismisches Rauschen



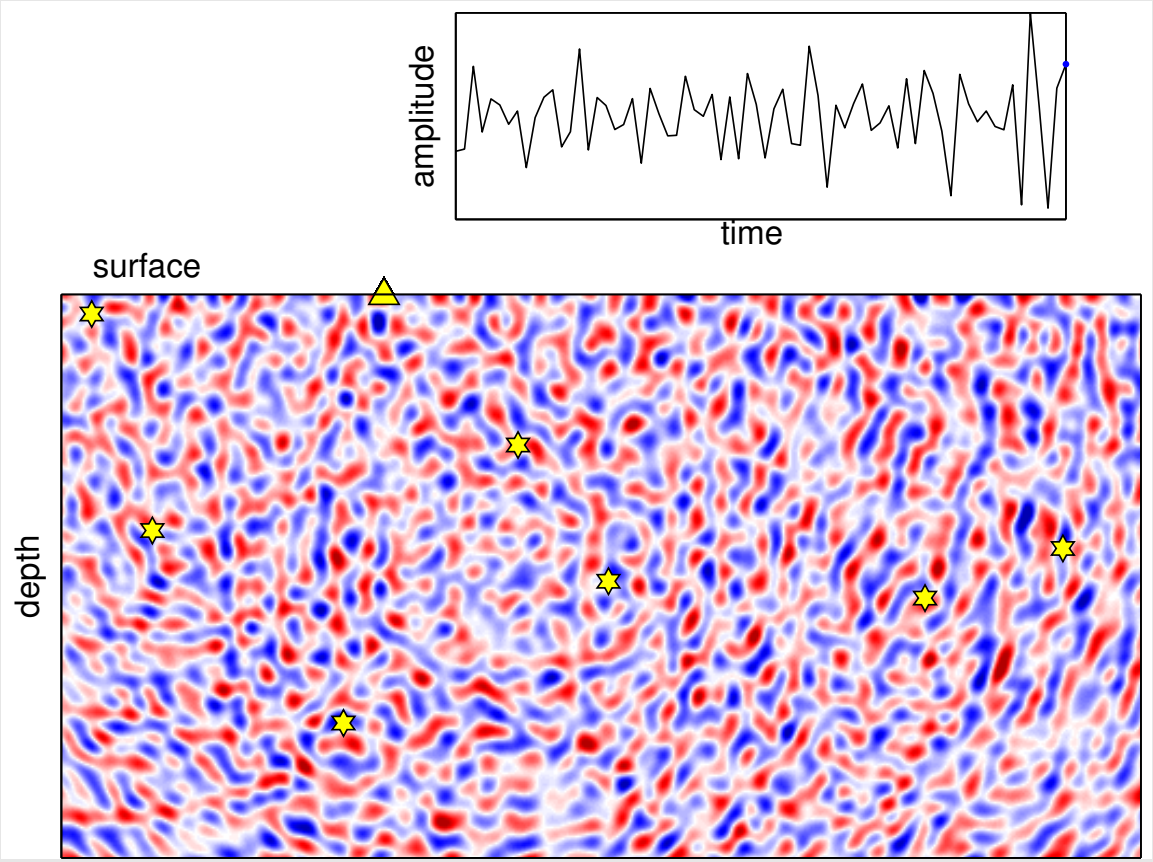
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

seismisches Rauschen



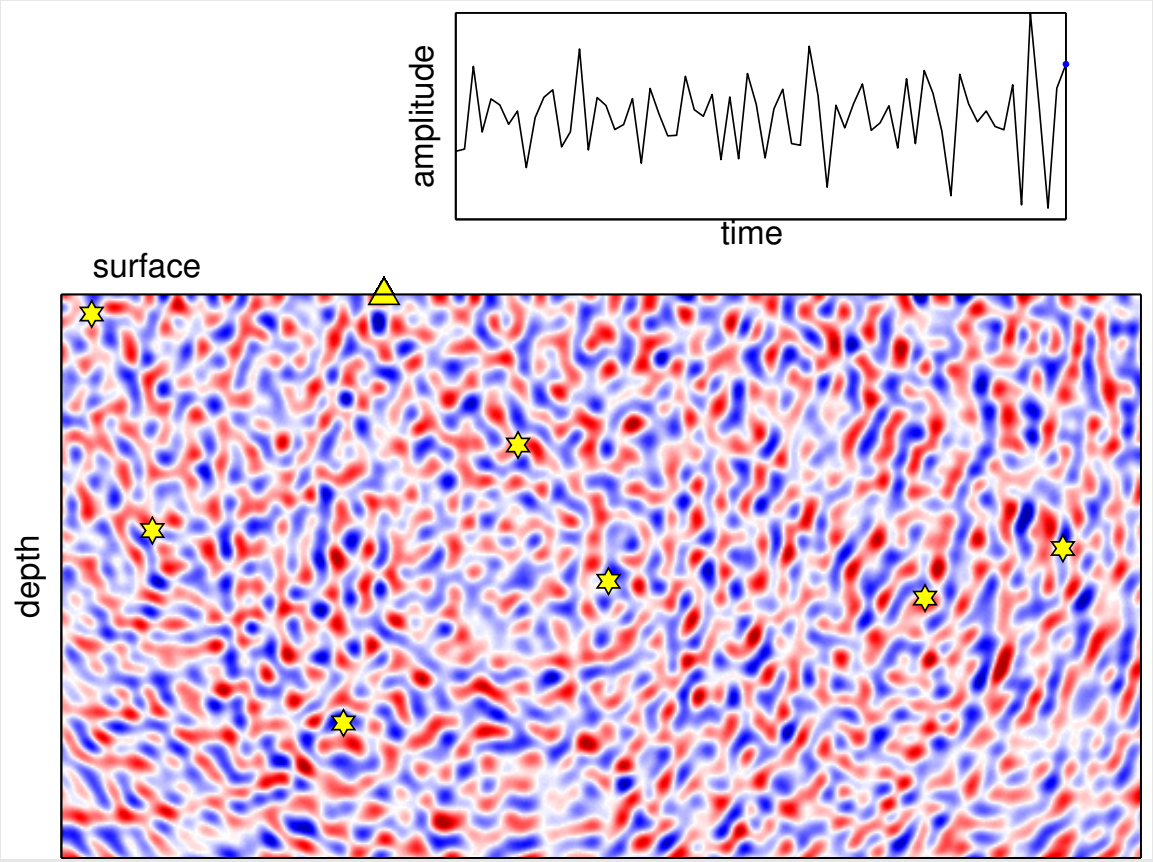
Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

seismisches Rauschen



Ursachen der Komplexität seismischer Wellenfelder

seismisches Rauschen



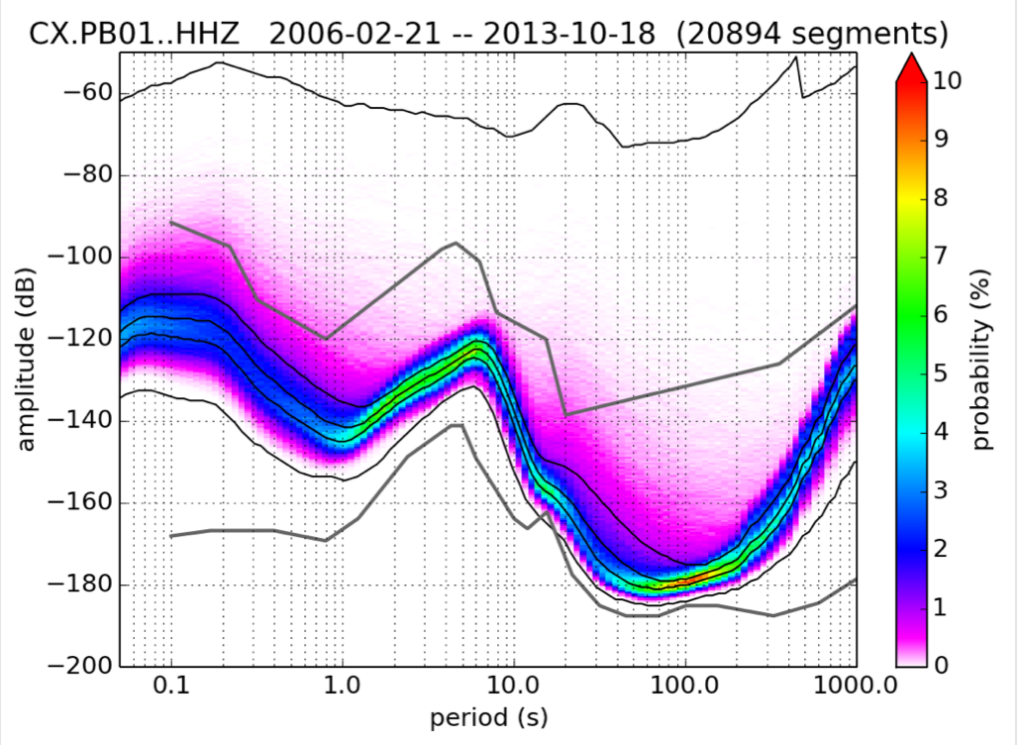
Rauschquellen sind kontinuierlich aktiv.

Inhalt

1. Das Seismische Rauschen
   - Eigenschaften
   - Quellen
2. Seismische Interferometrie
   - Korrelationstechnik
   - Kodainterferometrie
3. Anwendungen des seismischen Monitorings
   - Vulkan Piton de la Fournaise
   - Subduktionszone in Nord-Chile
   - Anwendung auf Apollo Daten

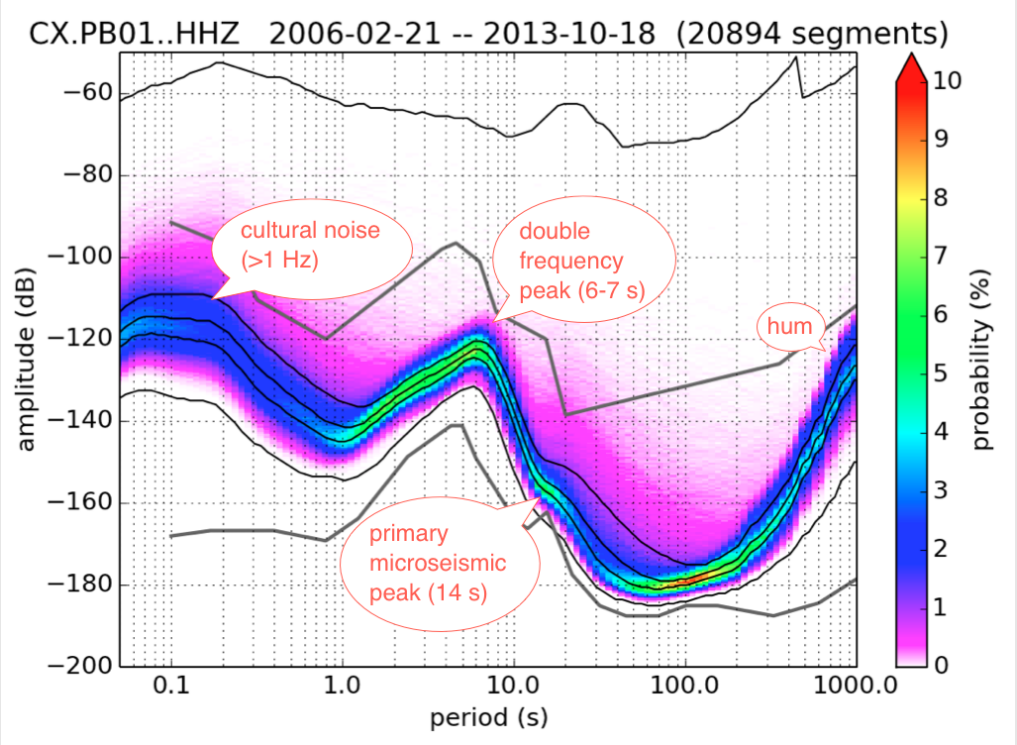
Die Quellen des seismischen Rauschens

Frequenzgehalt



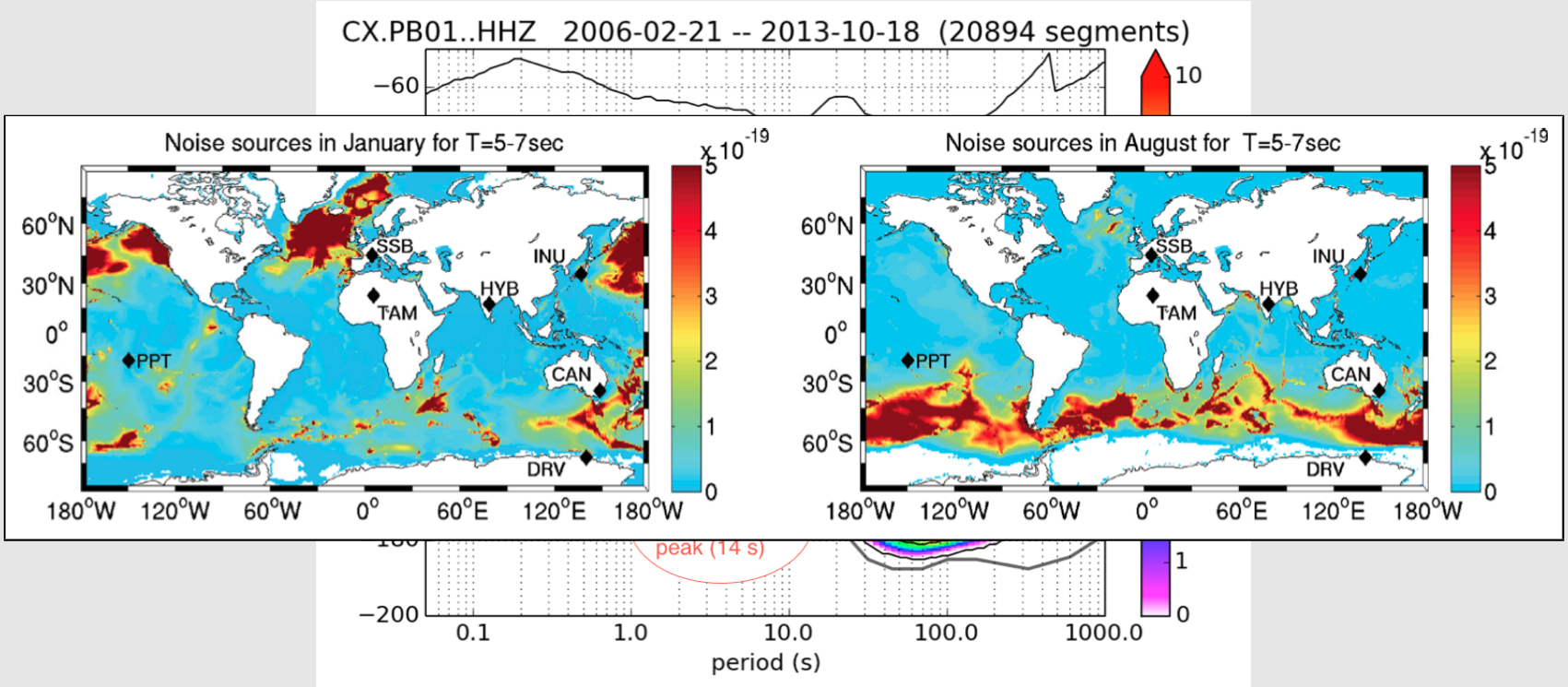
Die Quellen des seismischen Rauschens

Frequenzgehalt



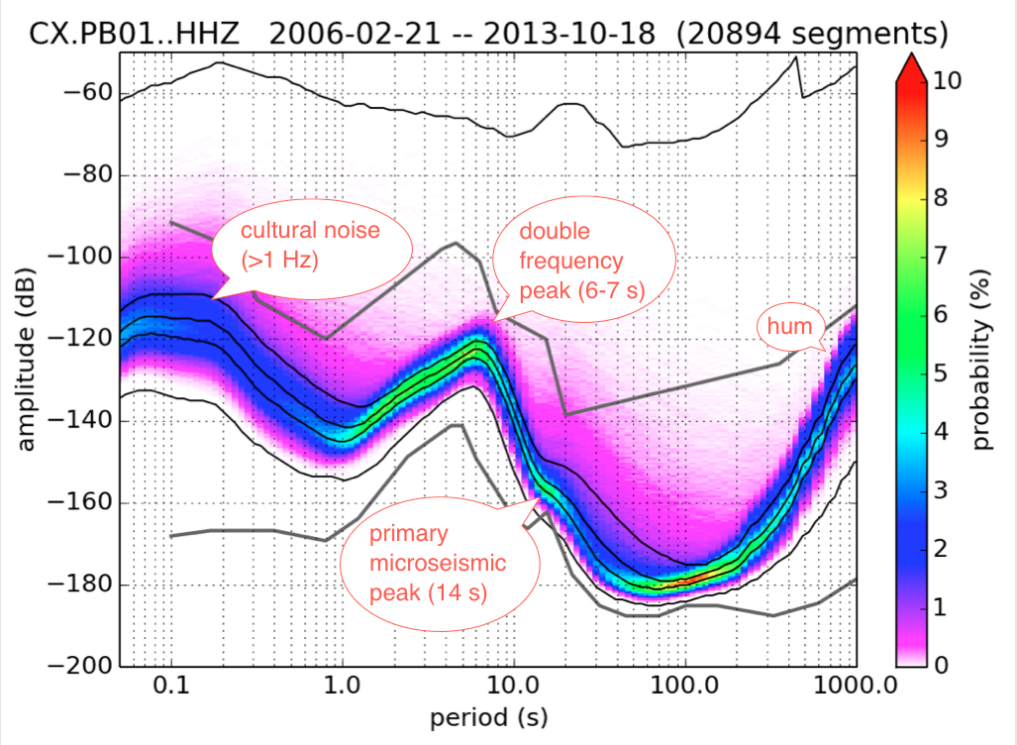
Die Quellen des seismischen Rauschens

Frequenzgehalt



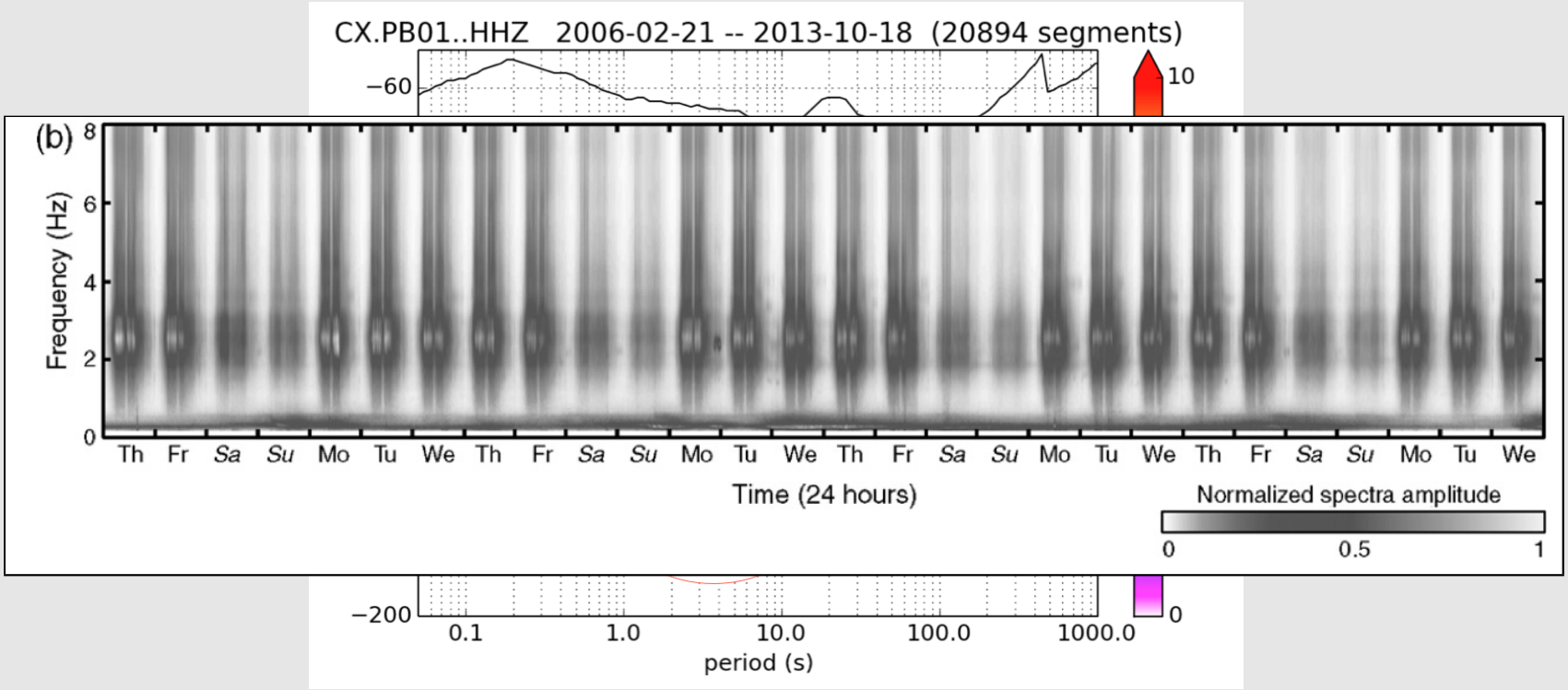
Die Quellen des seismischen Rauschens

Frequenzgehalt



Die Quellen des seismischen Rauschens

Frequenzgehalt



Inhalt

1 Das Seismische Rauschen
- Eigenschaften
- Quellen

2 Seismische Interferometrie
- Korrelationstechnik
- Kodainterferometrie

3 Anwendungen des seismischen Monitorings
- Vulkan Piton de la Fournaise
- Subduktionszone in Nord-Chile
- Anwendung auf Apollo Daten

Inhalt

1 Das Seismische Rauschen
- Eigenschaften
- Quellen

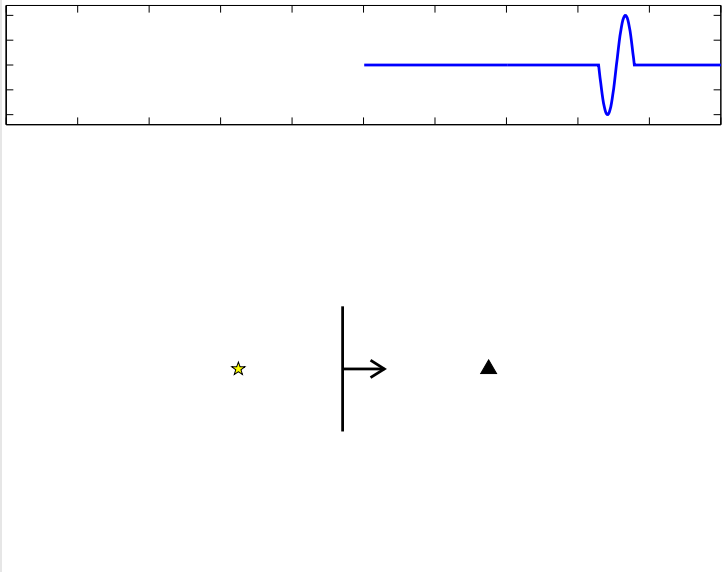
2 Seismische Interferometrie
- Korrelationstechnik
- Kodainterferometrie

3 Anwendungen des seismischen Monitorings
- Vulkan Piton de la Fournaise
- Subduktionszone in Nord-Chile
- Anwendung auf Apollo Daten

Grundlagen der Seismischen Interferometrie

Vergleich mit konventionellen Messungen

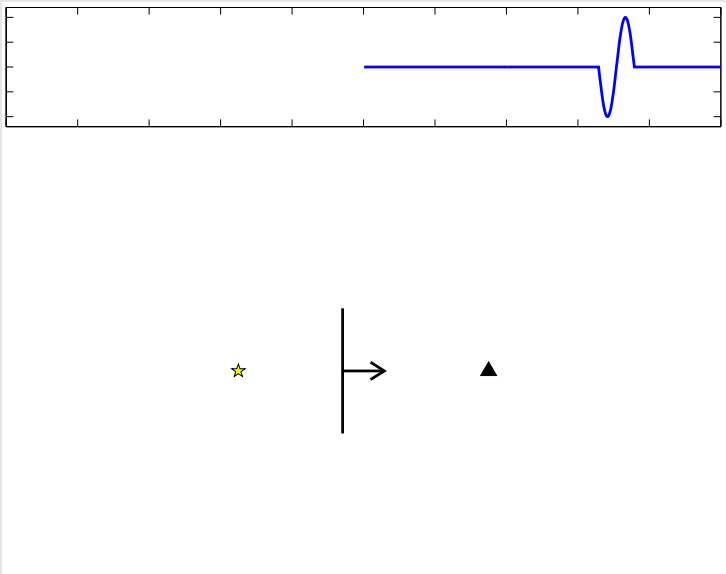
aktives Experiment



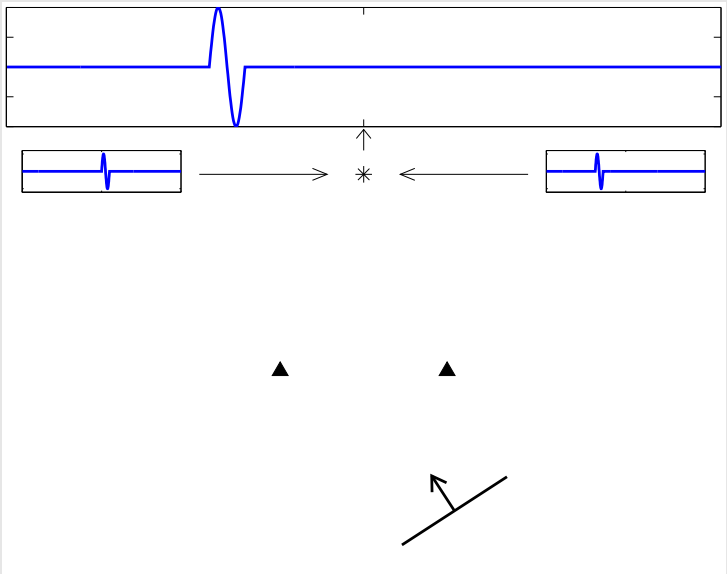
Grundlagen der Seismischen Interferometrie

Vergleich mit konventionellen Messungen

aktives Experiment



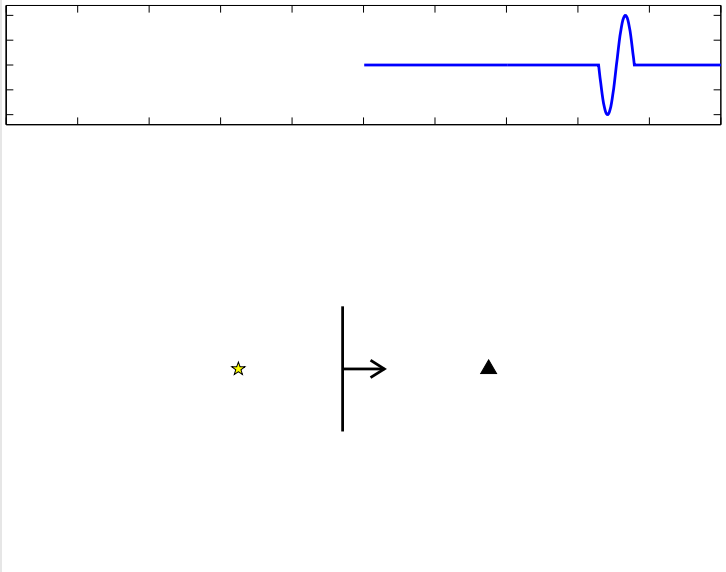
passives Experiment



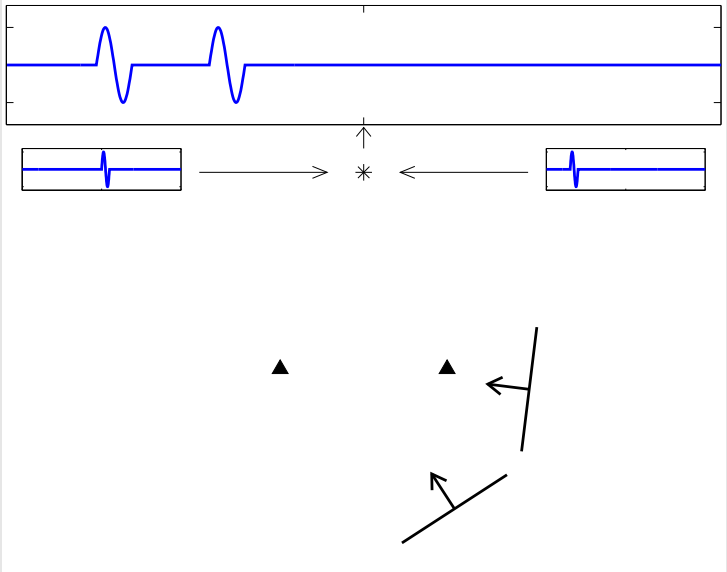
Grundlagen der Seismischen Interferometrie

Vergleich mit konventionellen Messungen

aktives Experiment



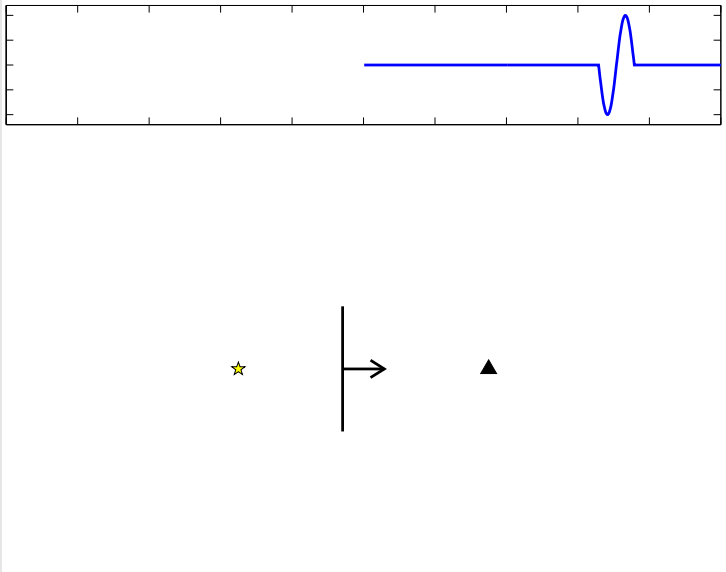
passives Experiment



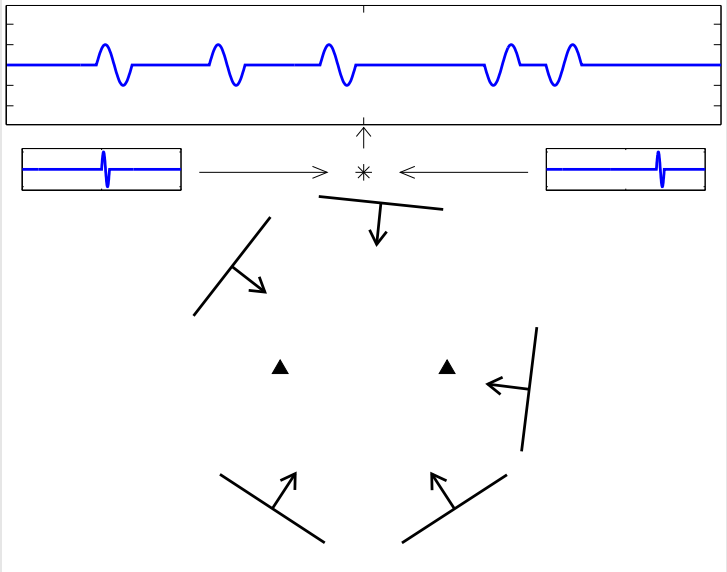
Grundlagen der Seismischen Interferometrie

Vergleich mit konventionellen Messungen

aktives Experiment



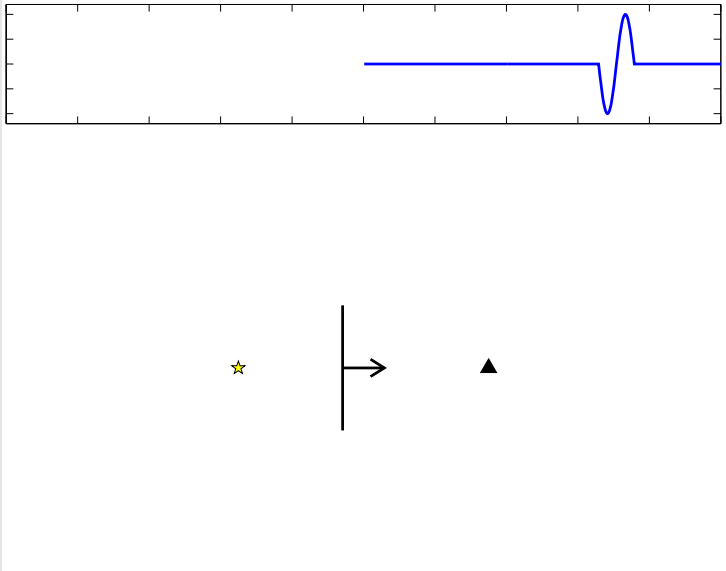
passives Experiment



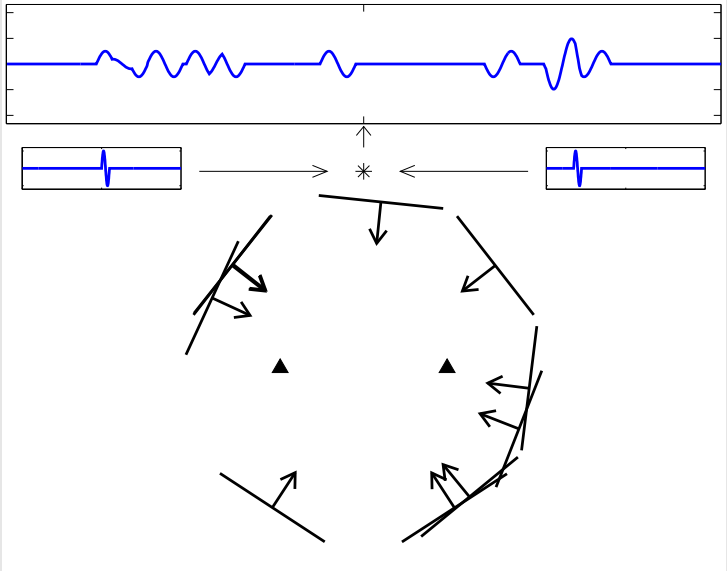
Grundlagen der Seismischen Interferometrie

Vergleich mit konventionellen Messungen

aktives Experiment



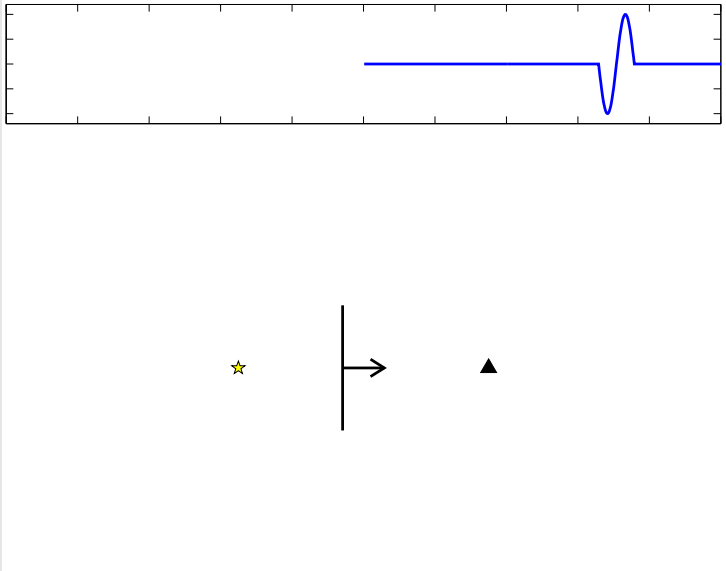
passives Experiment



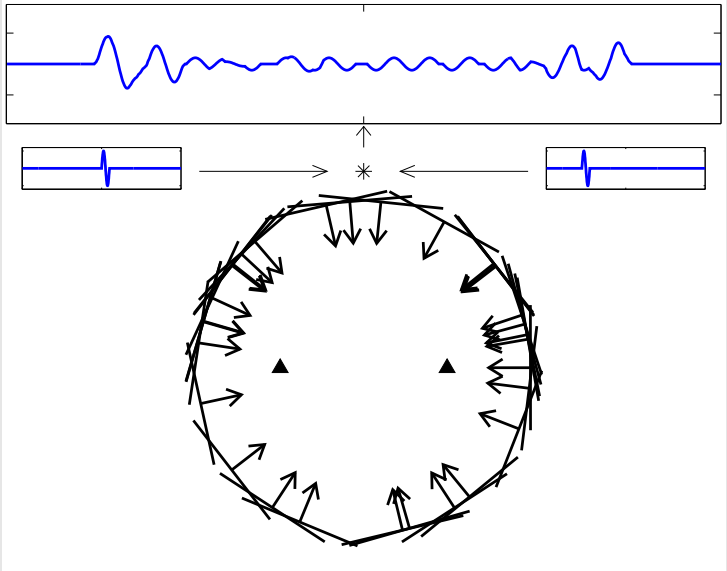
Grundlagen der Seismischen Interferometrie

Vergleich mit konventionellen Messungen

aktives Experiment



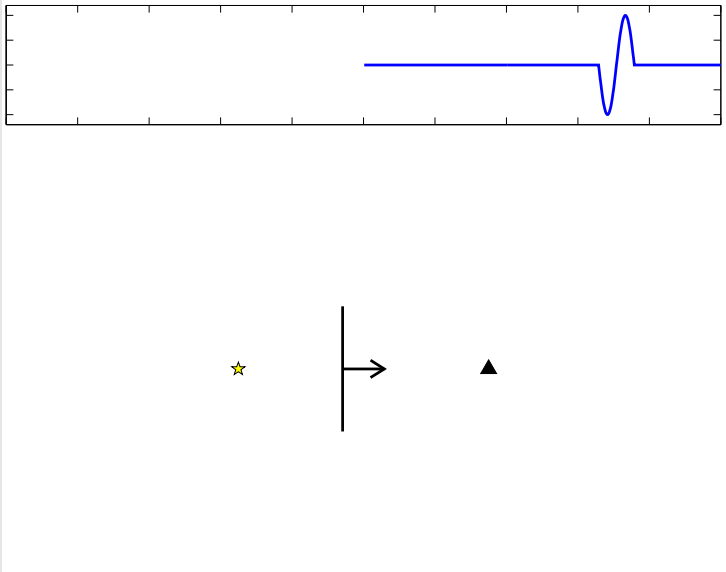
passives Experiment



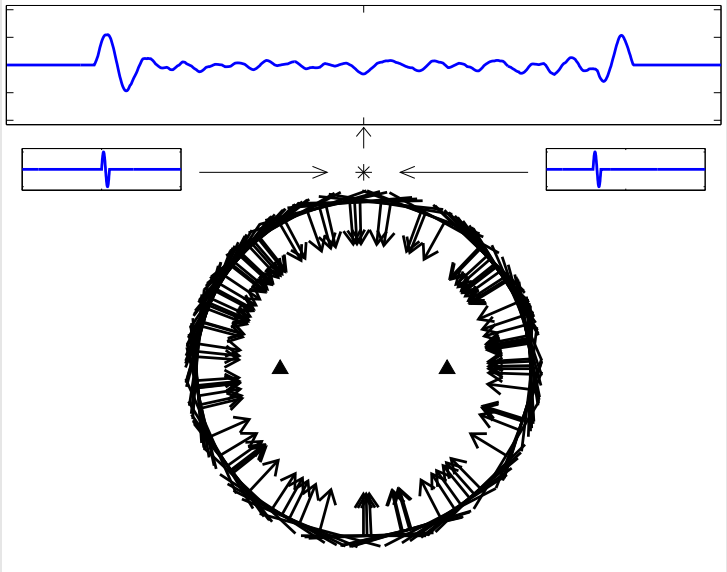
Grundlagen der Seismischen Interferometrie

Vergleich mit konventionellen Messungen

aktives Experiment



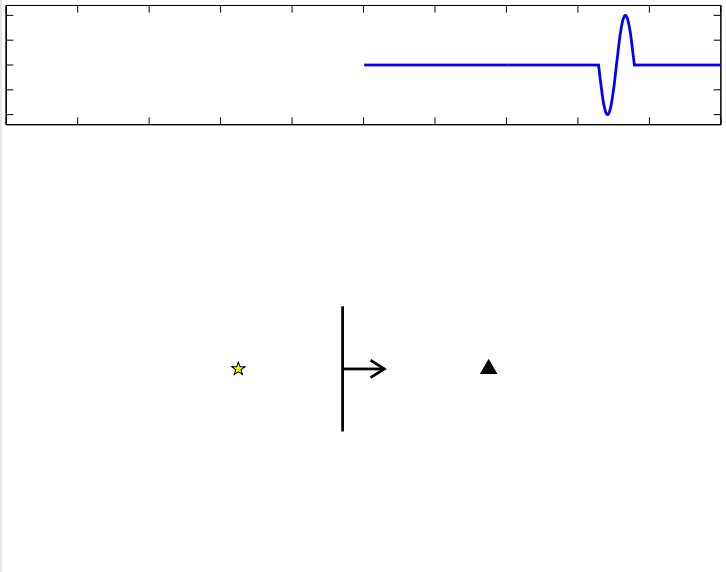
passives Experiment



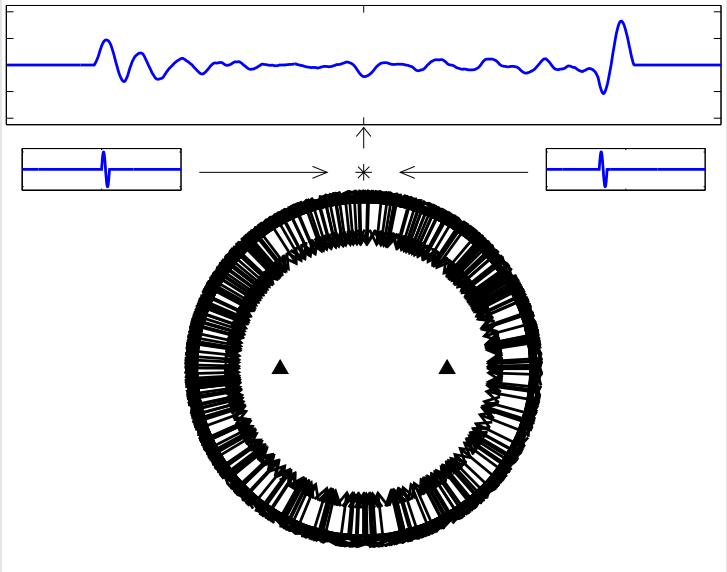
Grundlagen der Seismischen Interferometrie

Vergleich mit konventionellen Messungen

aktives Experiment



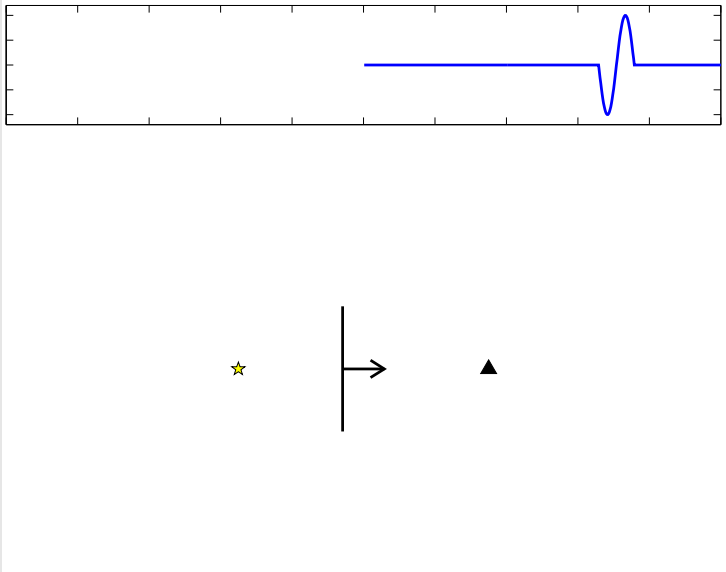
passives Experiment



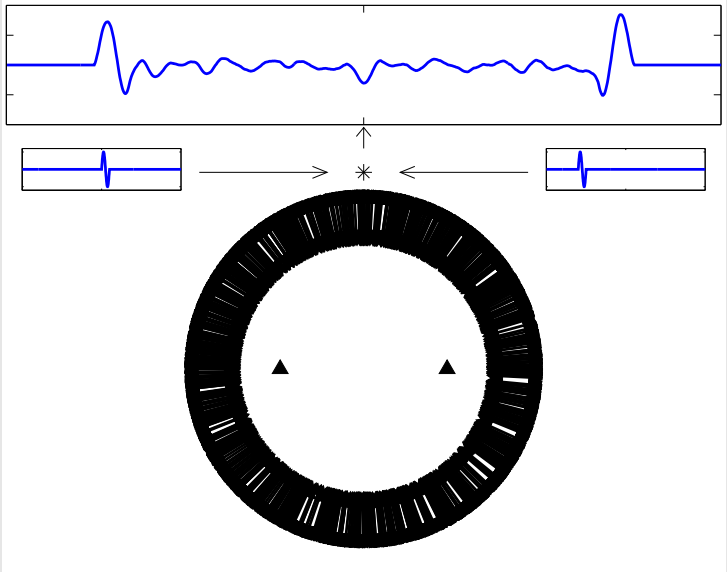
Grundlagen der Seismischen Interferometrie

Vergleich mit konventionellen Messungen

aktives Experiment



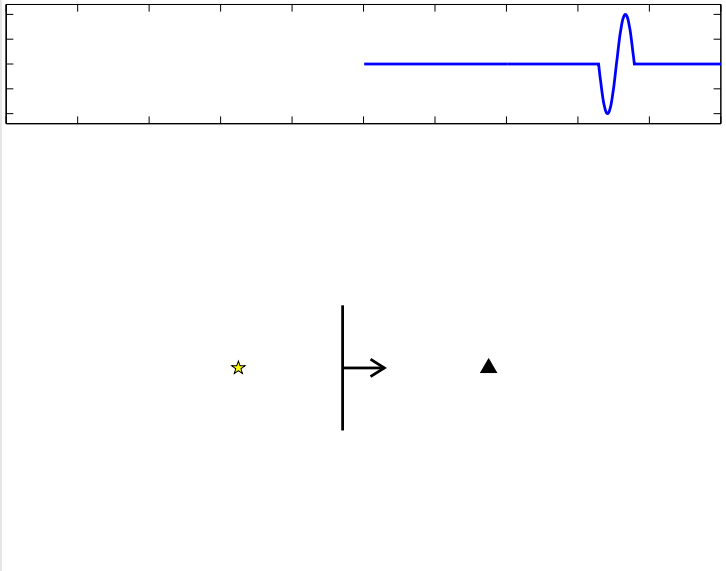
passives Experiment



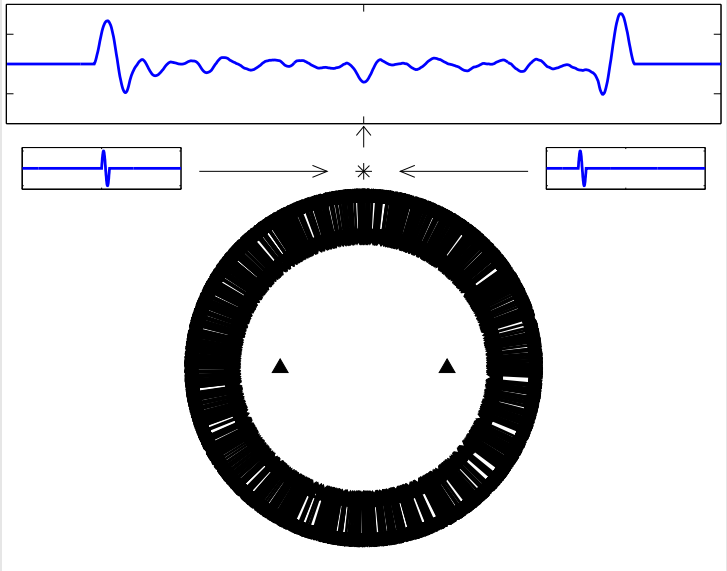
Grundlagen der Seismischen Interferometrie

Vergleich mit konventionellen Messungen

aktives Experiment



passives Experiment

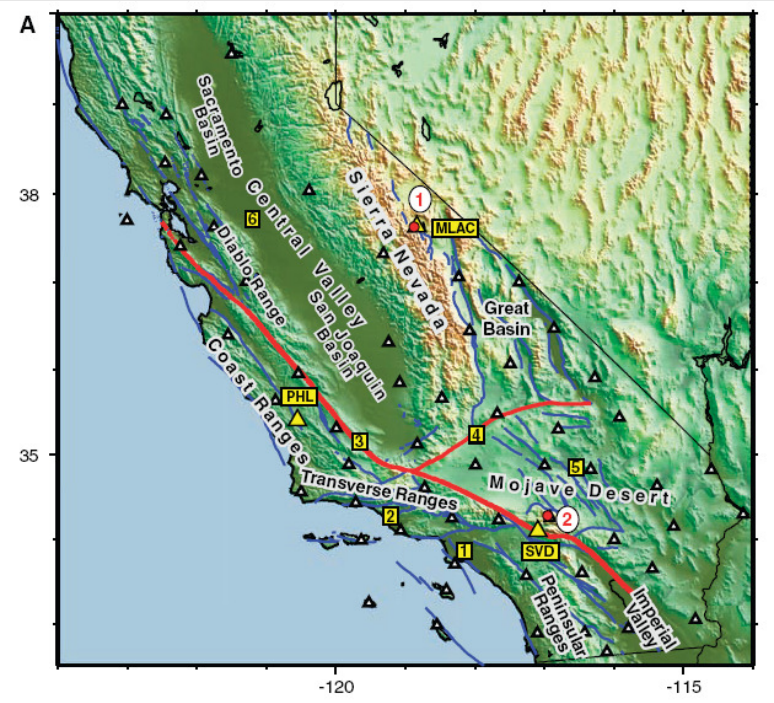


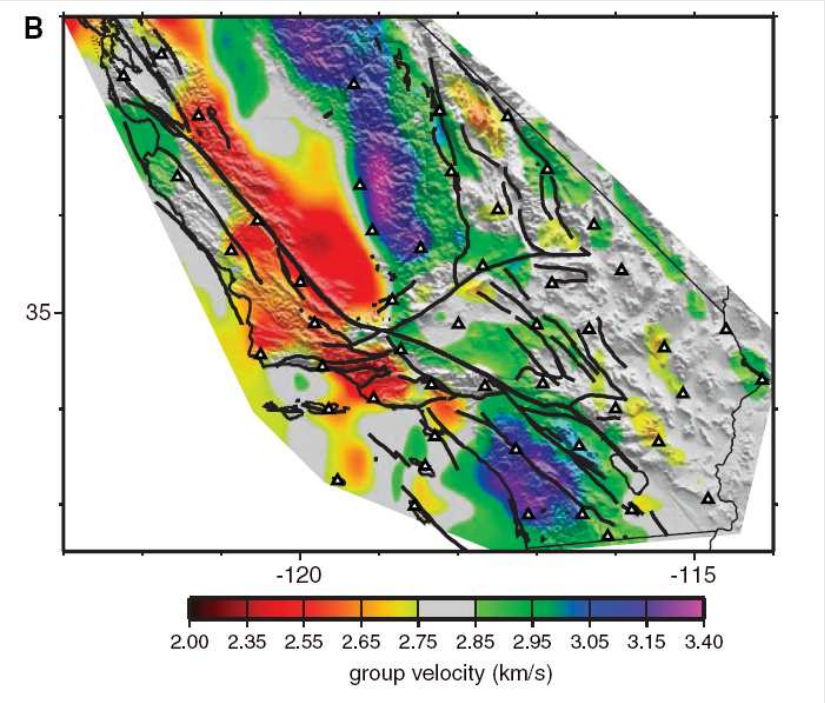
Sensor $\Longleftrightarrow$ Quelle

Nutzung der seismischen Interferometrie zur Strukturabbildung

Anwendung in der Tomographie

- Erhöhung der tomographischen Auflösung durch virtuelle Quellen





Shapiro et al. (2005)

Inhalt

1 Das Seismische Rauschen
- Eigenschaften
- Quellen

2 Seismische Interferometrie
- Korrelationstechnik
- Kodainterferometrie

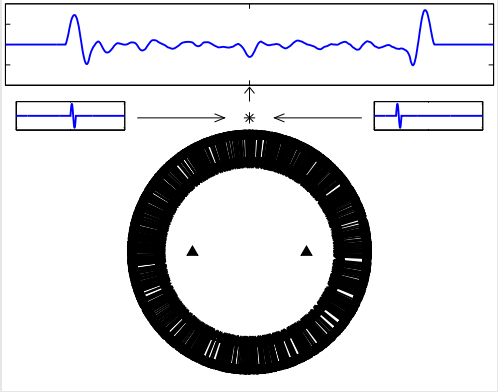
3 Anwendungen des seismischen Monitorings
- Vulkan Piton de la Fournaise
- Subduktionszone in Nord-Chile
- Anwendung auf Apollo Daten

Nutzung der seismischen Interferometrie zum Monitoring

Idee

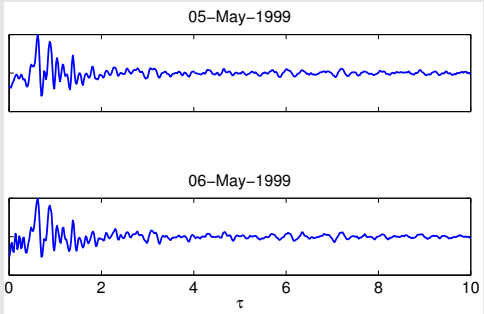
Sens-Schönfelder and Wegler (2006)

- kontinuierliche Informationen durch permanentes Signal (SI)



Beispiel in Indonesien

interferometrische Signale

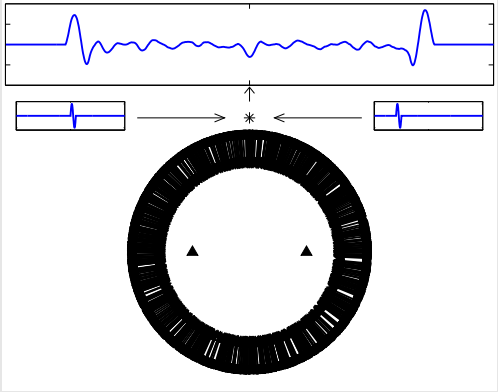


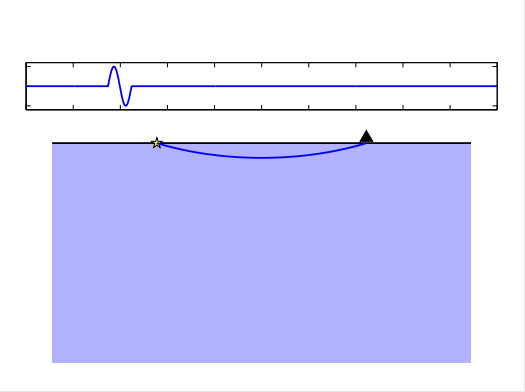
Nutzung der seismischen Interferometrie zum Monitoring

Idee

Sens-Schönfelder and Wegler (2006)

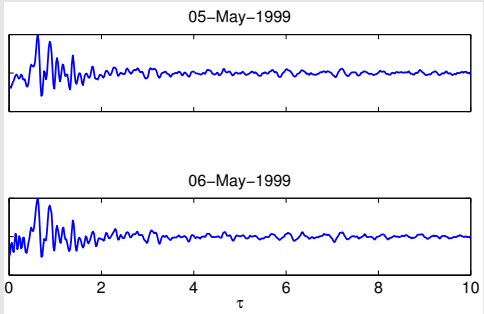
- kontinuierliche Informationen durch permanentes Signal (SI)
- hohe Präzision durch Nutzung gestreuter Wellen (Streutheorie)





Beispiel in Indonesien

interferometrische Signale

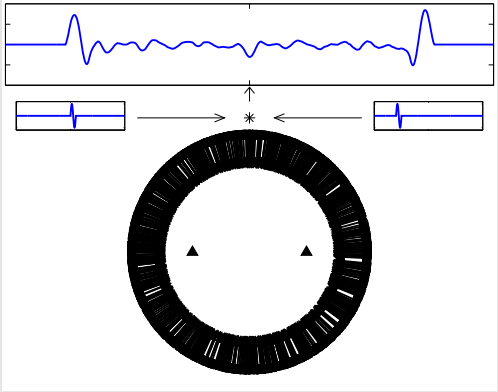


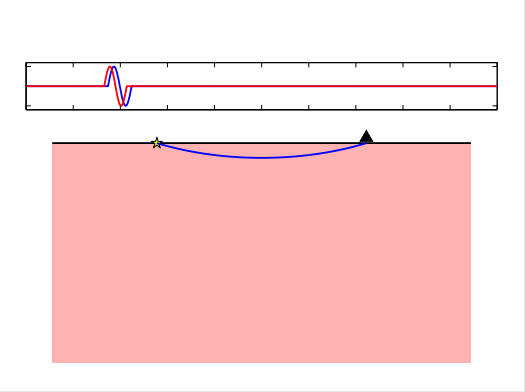
Nutzung der seismischen Interferometrie zum Monitoring

Idee

Sens-Schönfelder and Wegler (2006)

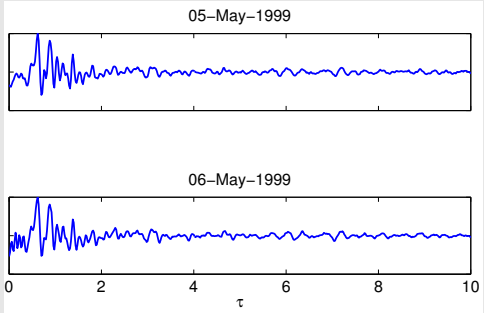
- kontinuierliche Informationen durch permanentes Signal (SI)
- hohe Präzision durch Nutzung gestreuter Wellen (Streutheorie)





Beispiel in Indonesien

interferometrische Signale

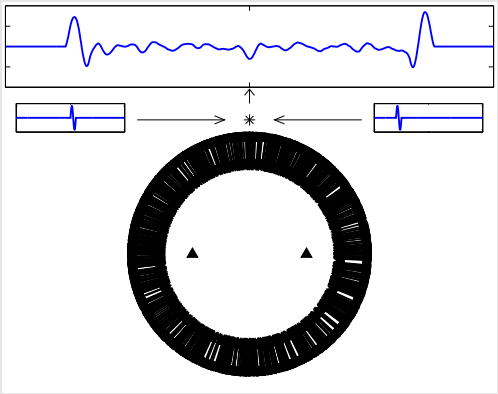


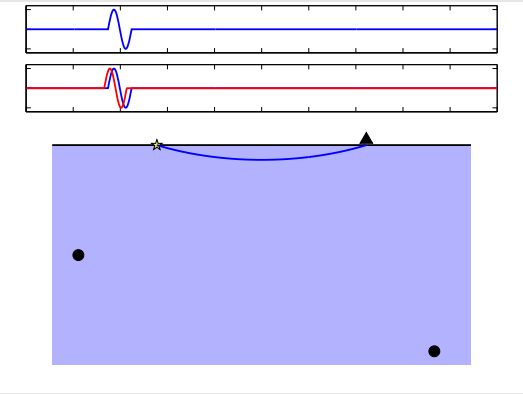
Nutzung der seismischen Interferometrie zum Monitoring

Idee

Sens-Schönfelder and Wegler (2006)

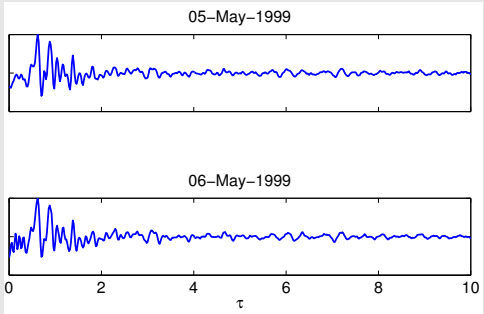
- kontinuierliche Informationen durch permanentes Signal (SI)
- hohe Präzision durch Nutzung gestreuter Wellen (Streutheorie)





Beispiel in Indonesien

interferometrische Signale

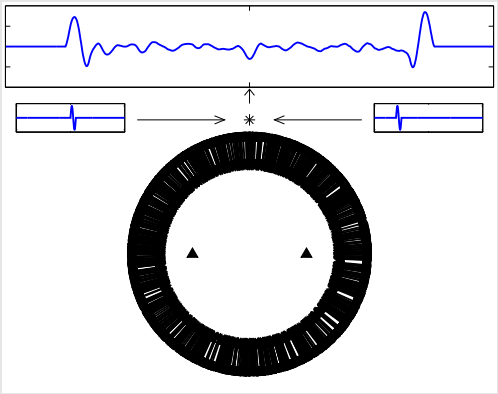


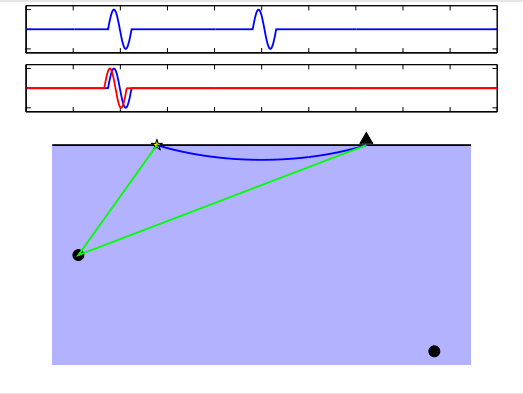
Nutzung der seismischen Interferometrie zum Monitoring

Idee

Sens-Schönfelder and Wegler (2006)

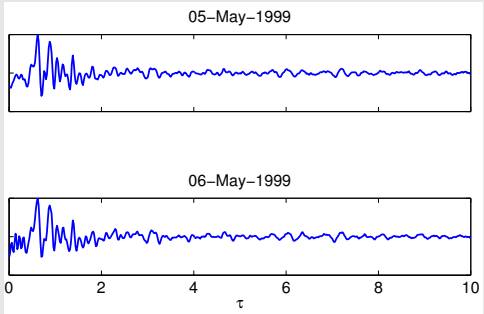
- kontinuierliche Informationen durch permanentes Signal (SI)
- hohe Präzision durch Nutzung gestreuter Wellen (Streutheorie)





Beispiel in Indonesien

interferometrische Signale

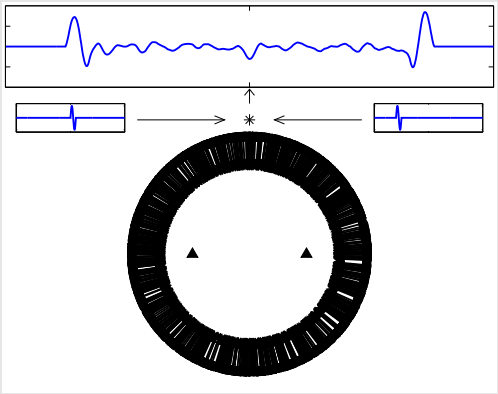


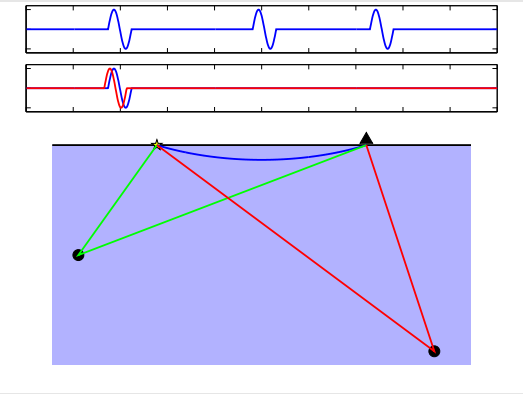
Nutzung der seismischen Interferometrie zum Monitoring

Idee

Sens-Schönfelder and Wegler (2006)

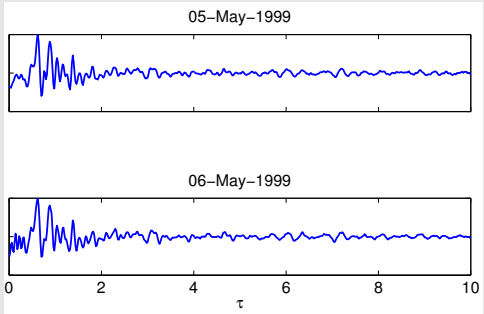
- kontinuierliche Informationen durch permanentes Signal (SI)
- hohe Präzision durch Nutzung gestreuter Wellen (Streutheorie)





Beispiel in Indonesien

interferometrische Signale

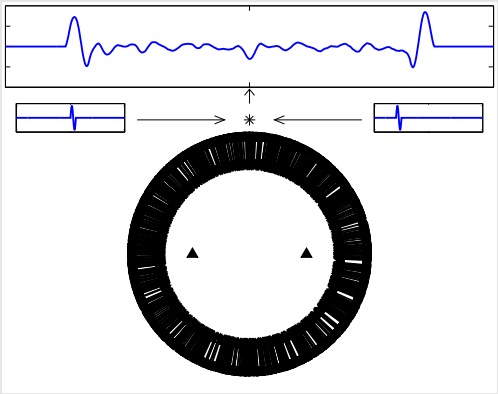


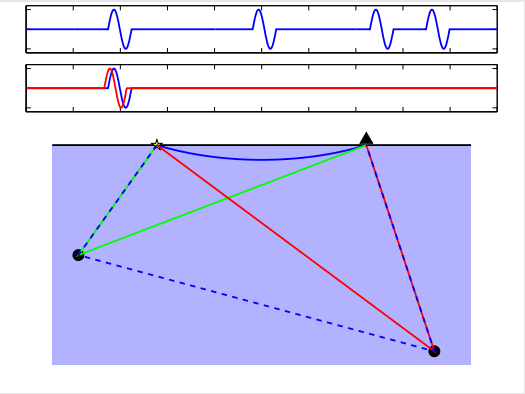
Nutzung der seismischen Interferometrie zum Monitoring

Idee

Sens-Schönfelder and Wegler (2006)

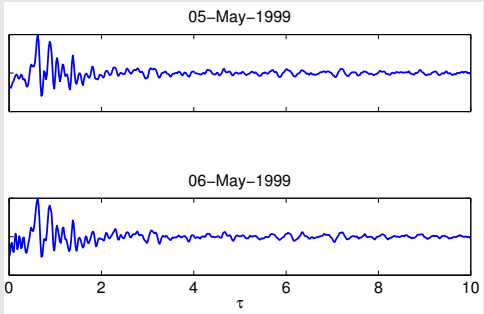
- kontinuierliche Informationen durch permanentes Signal (SI)
- hohe Präzision durch Nutzung gestreuter Wellen (Streutheorie)





Beispiel in Indonesien

interferometrische Signale

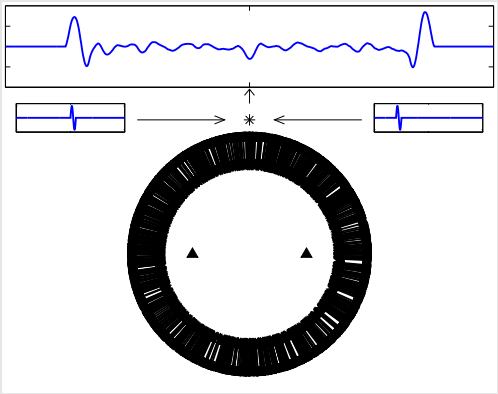


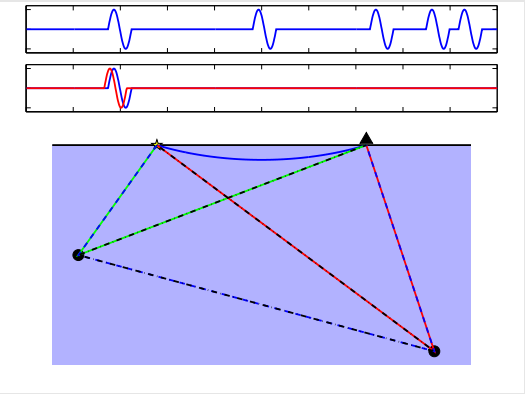
Nutzung der seismischen Interferometrie zum Monitoring

Idee

Sens-Schönfelder and Wegler (2006)

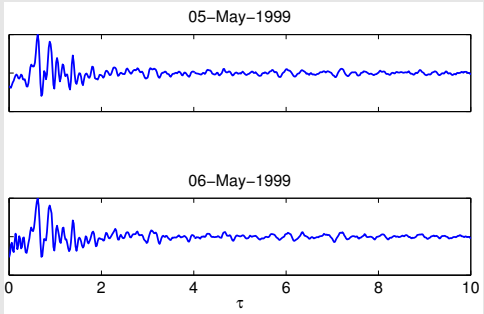
- kontinuierliche Informationen durch permanentes Signal (SI)
- hohe Präzision durch Nutzung gestreuter Wellen (Streutheorie)





Beispiel in Indonesien

interferometrische Signale

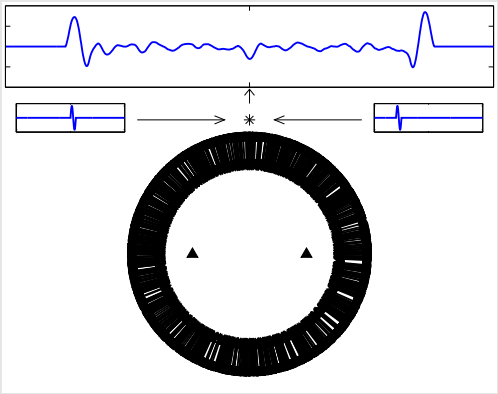


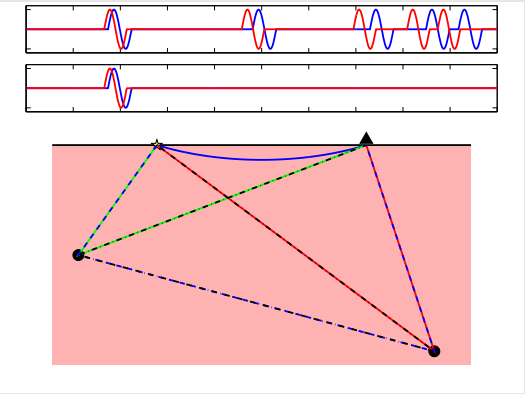
Nutzung der seismischen Interferometrie zum Monitoring

Idee

Sens-Schönfelder and Wegler (2006)

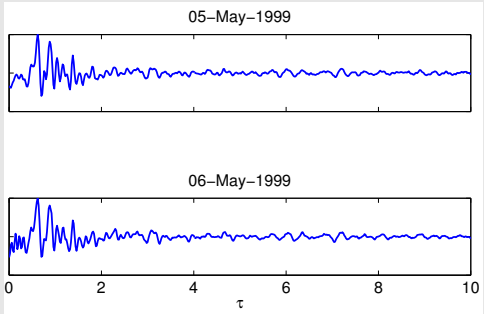
- kontinuierliche Informationen durch permanentes Signal (SI)
- hohe Präzision durch Nutzung gestreuter Wellen (Streutheorie)





Beispiel in Indonesien

interferometrische Signale

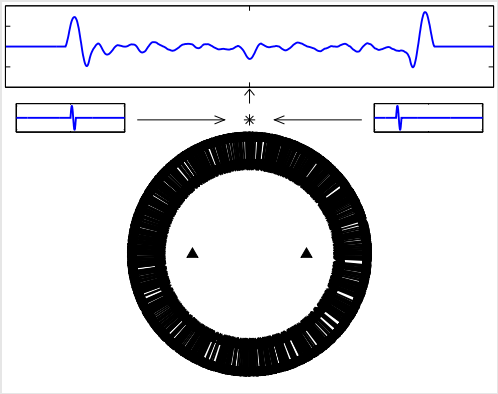


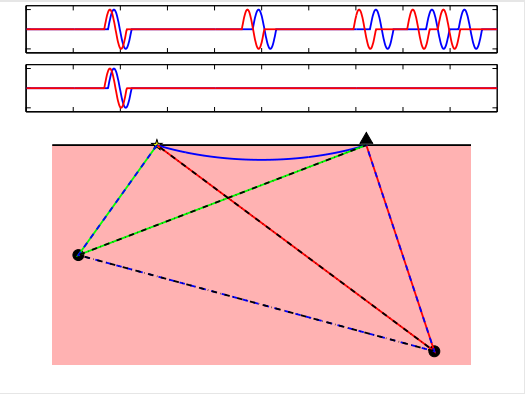
Nutzung der seismischen Interferometrie zum Monitoring

Idee

Sens-Schönfelder and Wegler (2006)

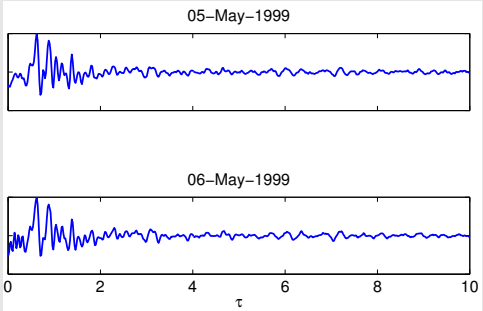
- kontinuierliche Informationen durch permanentes Signal (SI)
- hohe Präzision durch Nutzung gestreuter Wellen (Streutheorie)



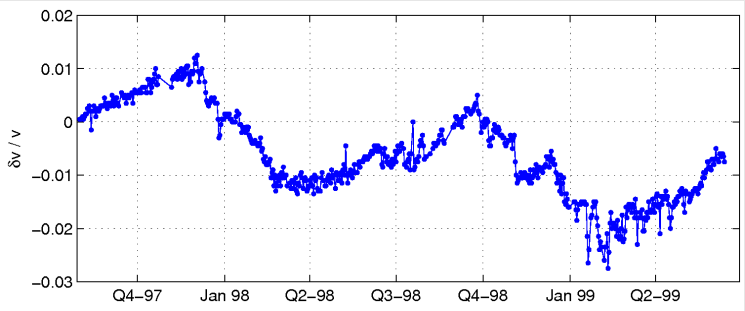


Beispiel in Indonesien

interferometrische Signale



Geschwindigkeitsvariationen

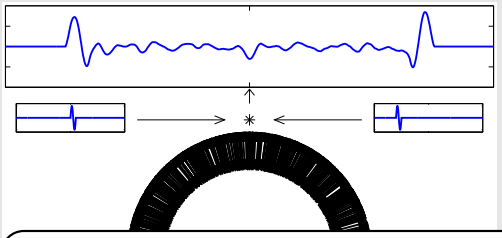


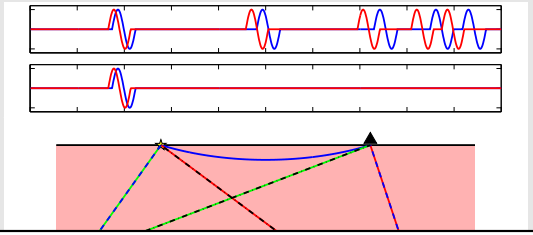
Nutzung der seismischen Interferometrie zum Monitoring

Idee

Sens-Schönfelder and Wegler (2006)

- kontinuierliche Informationen durch permanentes Signal (SI)
- hohe Präzision durch Nutzung gestreuter Wellen (Streutheorie)

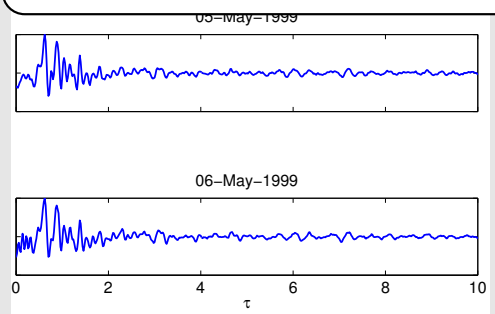


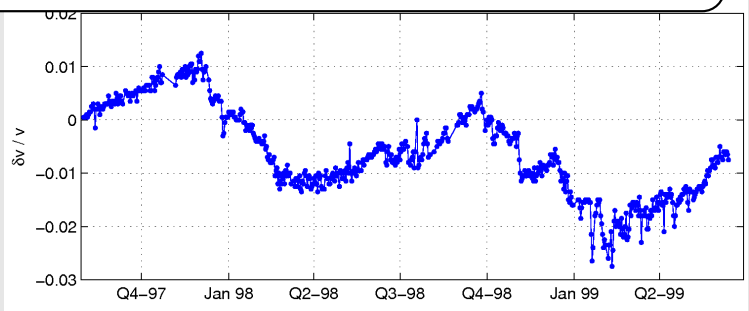


$\Rightarrow$ neuartige Möglichkeit zum kontinuierlichen Prozessmonitoring mit seismischen Wellen

$\Rightarrow$ relative Geschwindigkeitsänderungen im $^{0}/_{00}$ Bereich detektierbar

Beispiel





Inhalt

1 Das Seismische Rauschen
- Eigenschaften
- Quellen

2 Seismische Interferometrie
- Korrelationstechnik
- Kodainterferometrie

3 Anwendungen des seismischen Monitorings
- Vulkan Piton de la Fournaise
- Subduktionszone in Nord-Chile
- Anwendung auf Apollo Daten

GFZ Helmholtz Centre Potsdam

Inhalt

1 Das Seismische Rauschen
- Eigenschaften
- Quellen

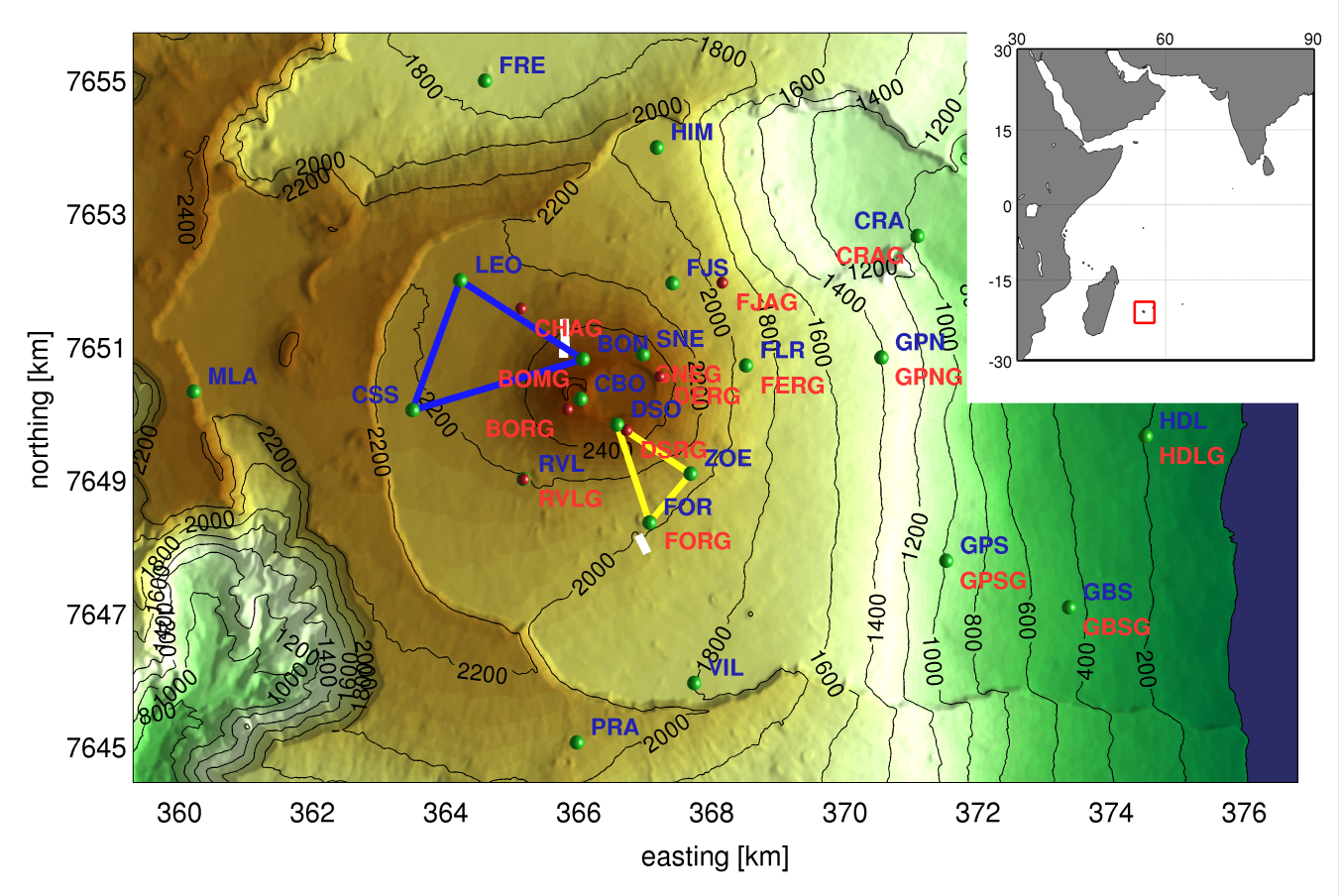
2 Seismische Interferometrie
- Korrelationstechnik
- Kodainterferometrie

3 Anwendungen des seismischen Monitorings
- Vulkan Piton de la Fournaise
- Subduktionszone in Nord-Chile
- Anwendung auf Apollo Daten

Piton de la Fournaise volcano

Location on La Reunion island

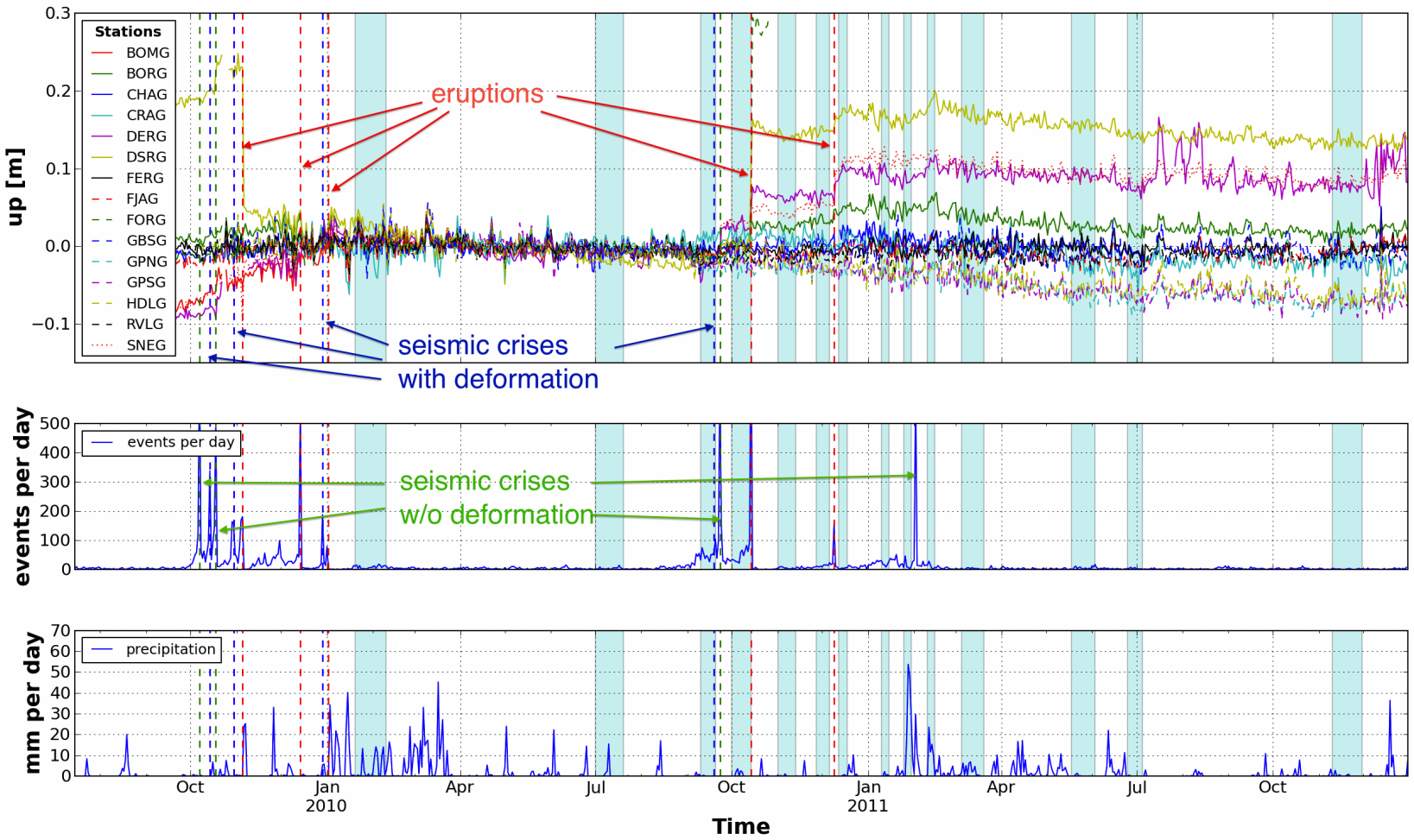
Daten



UnderVolc Experiment (IPGP/ISTerre): 21 Breitband Seismometer, 15 GPS Stationen

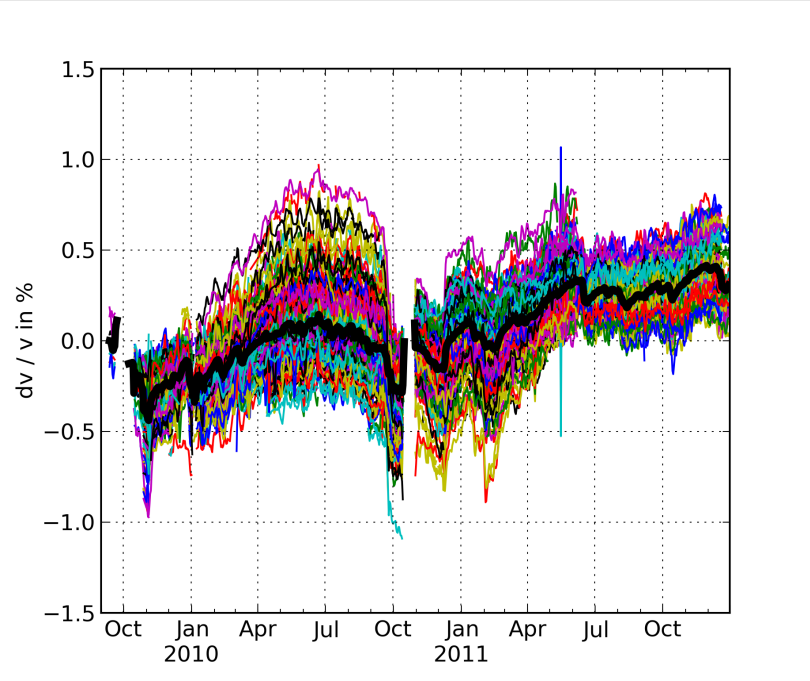
Daten

Dynamik



Zeitliche Veränderungen

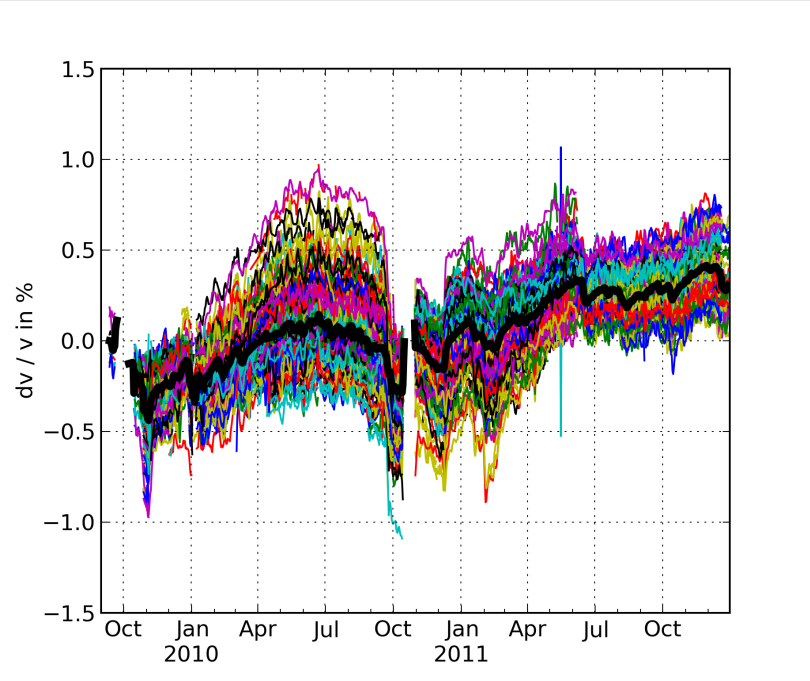
Geschwindigkeitsveränderungen an allen 210 Stationspaaren

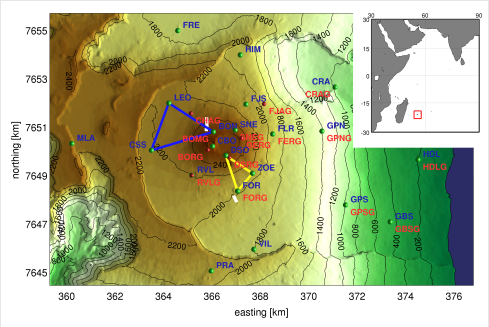


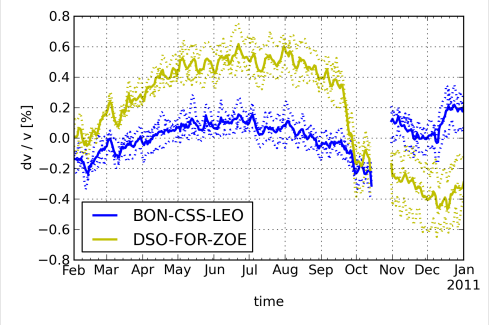
- Lang andauernde Zunahme (Folge des Calderakollpas' von 2007)

Zeitliche Veränderungen

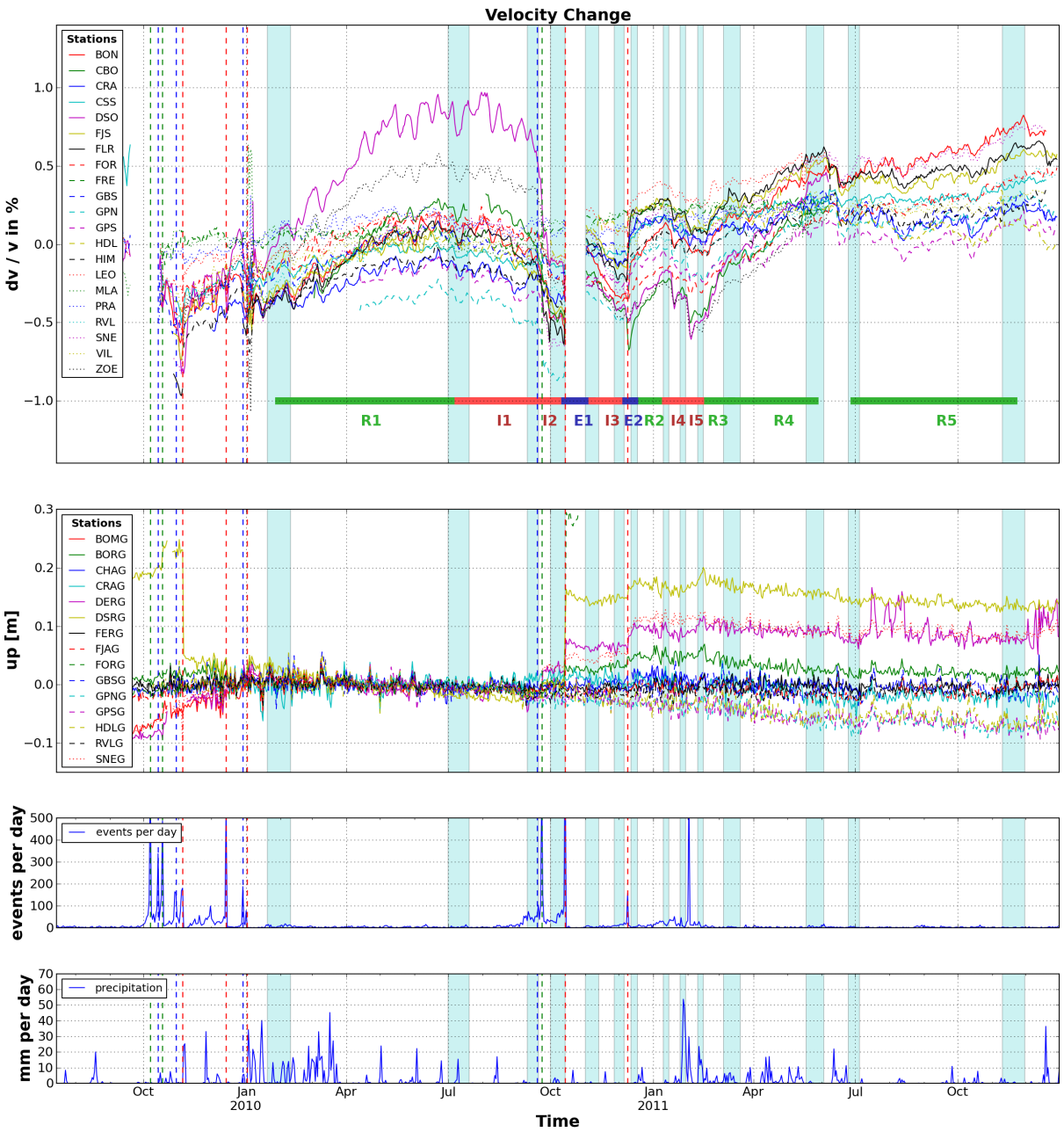
Geschwindigkeitsveränderungen an allen 210 Stationspaaren







- Lang andauernde Zunahme (Folge des Calderakollpas' von 2007)
- Konsistente Abhängigkeit der Geschwindigkeitsänderungen vom Ort der Stationen.



R : Relaxation

- weder seismische Aktivität noch Deformation

I : Nicht-eruptive Intrusion

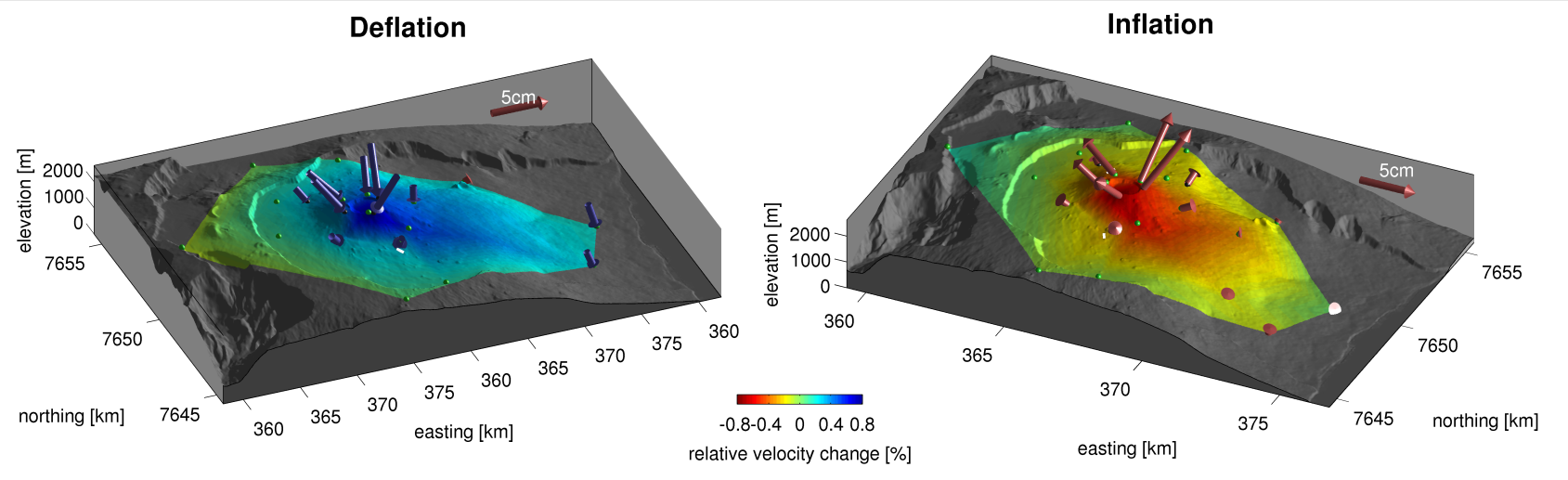
- Seismische Krise
- (Oberflächen Verschiebungen)

E : Eruption

- Oberflächen Verschiebungen
- Seismische Kriese
- Eruption

GFZ Helmholtz Centre Potsdam

Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen



Sens-Schönfelder et al. (2014)

- Charakteristische Veränderungen für unterschiedliche Aktivität
  - primar deformationsbedingt

⇒ Komplementäre Beobachtung zum traditionellen Monitoring

Inhalt

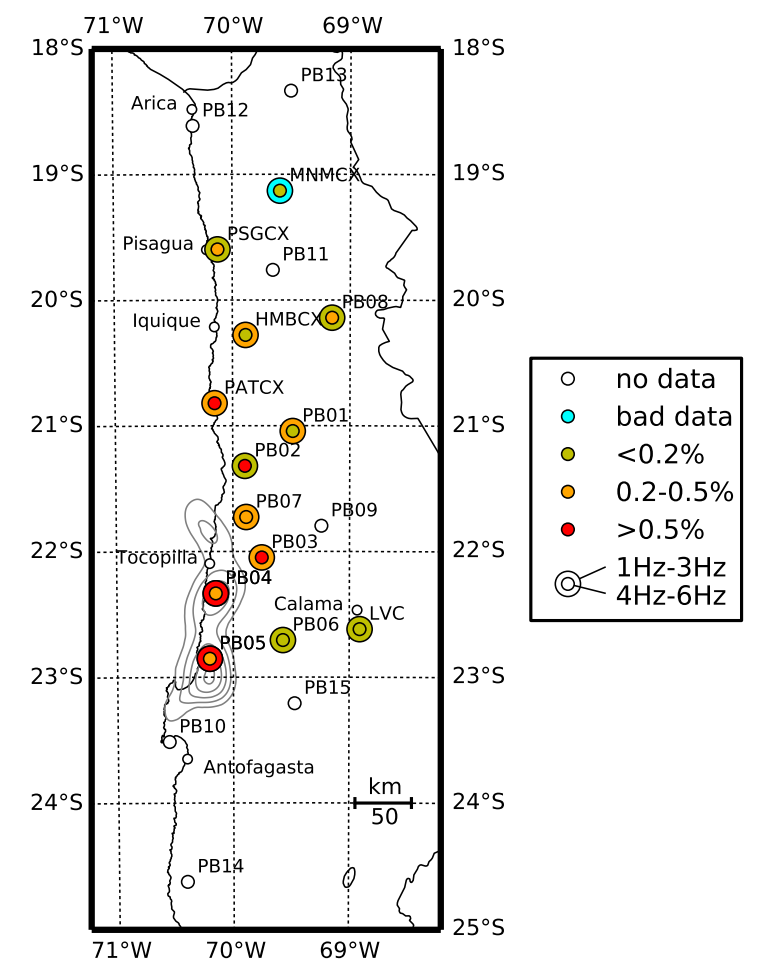
1 Das Seismische Rauschen
- Eigenschaften
- Quellen

2 Seismische Interferometrie
- Korrelationstechnik
- Kodainterferometrie

3 Anwendungen des seismischen Monitorings
- Vulkan Piton de la Fournaise
- Subduktionszone in Nord-Chile
- Anwendung auf Apollo Daten

Chile: $M_w = 7.7$ Tocopilla

Ko-seismische Geschwindigkeitsabnahme



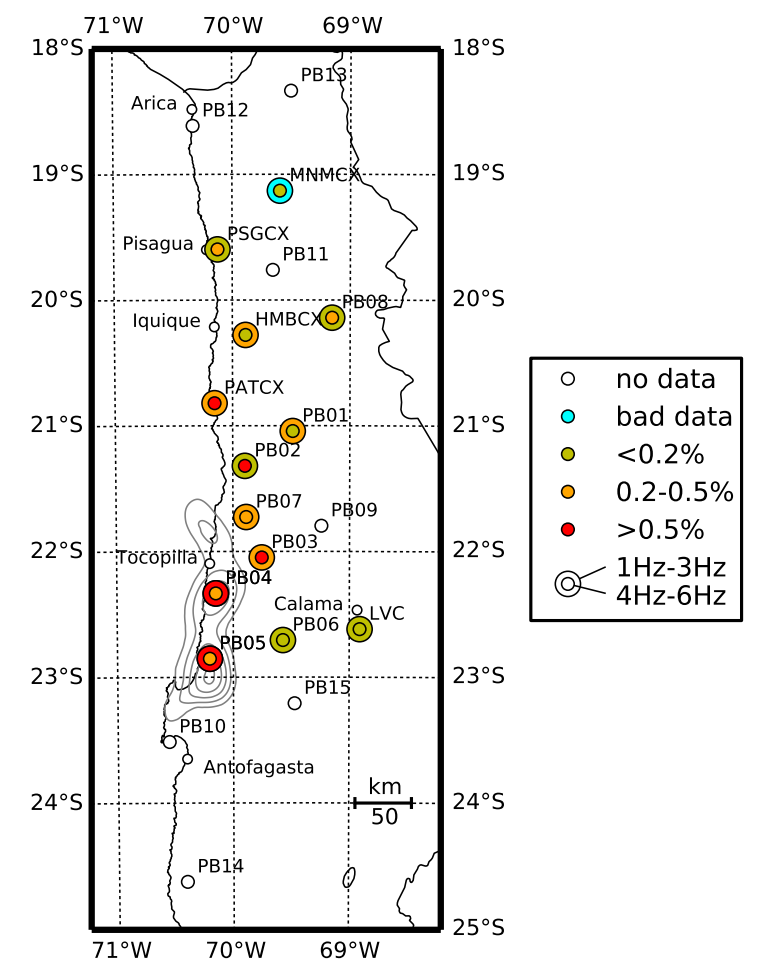
durch Erschütterung hervorgerufene Schädigung des Untergrundes

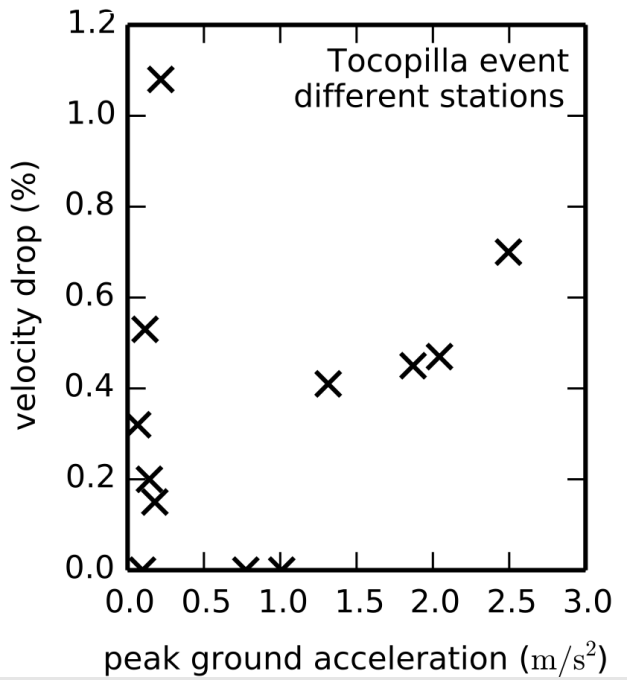
- Abnahme der seismischen Geschwindigkeit an fast allen Stationen
- keine Zunahme beobachtet
- keine eindeutige Beziehung zum Abstand von der Verwerfung

Richter et al. (2013)

Chile: $M_w = 7.7$ Tocopilla

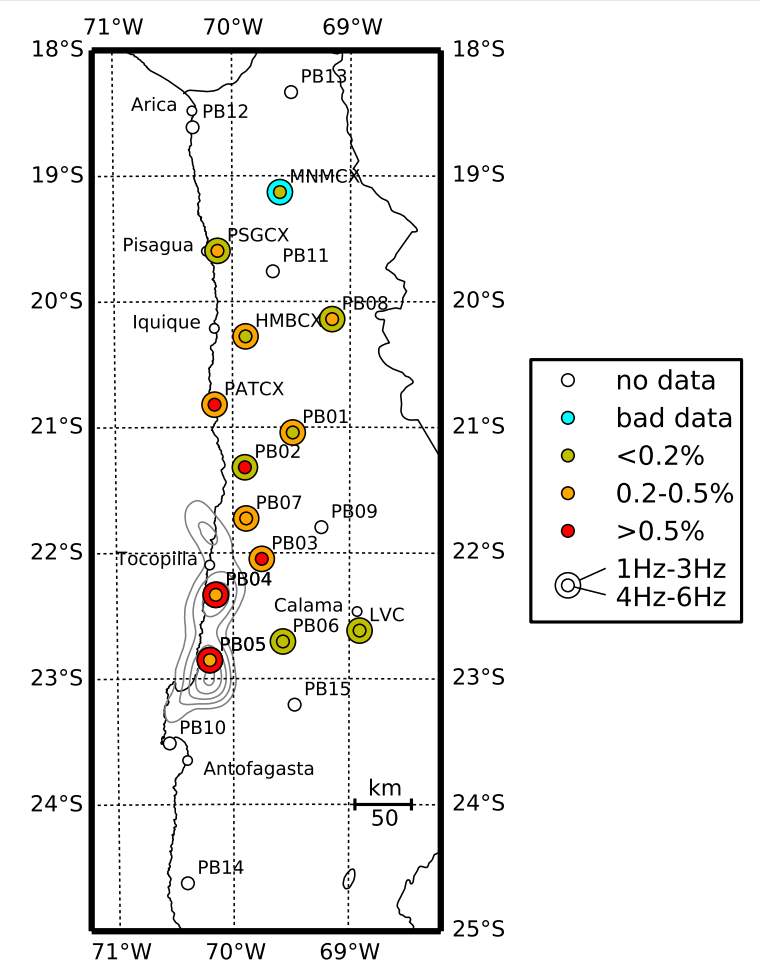
Ko-seismische Geschwindigkeitsabnahme





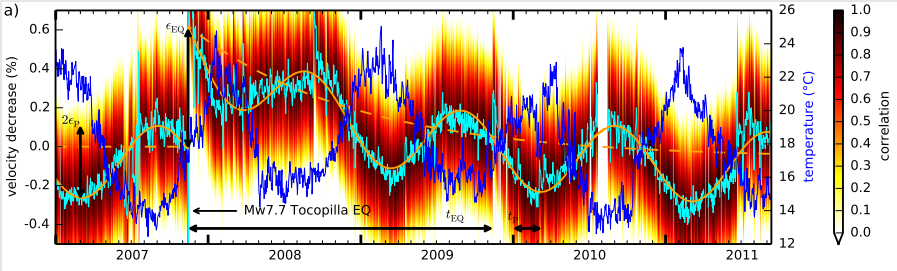
Grad der Schädigung hängt vom Untergrund ab.

Langfristige Änderungen an der Station PATCX

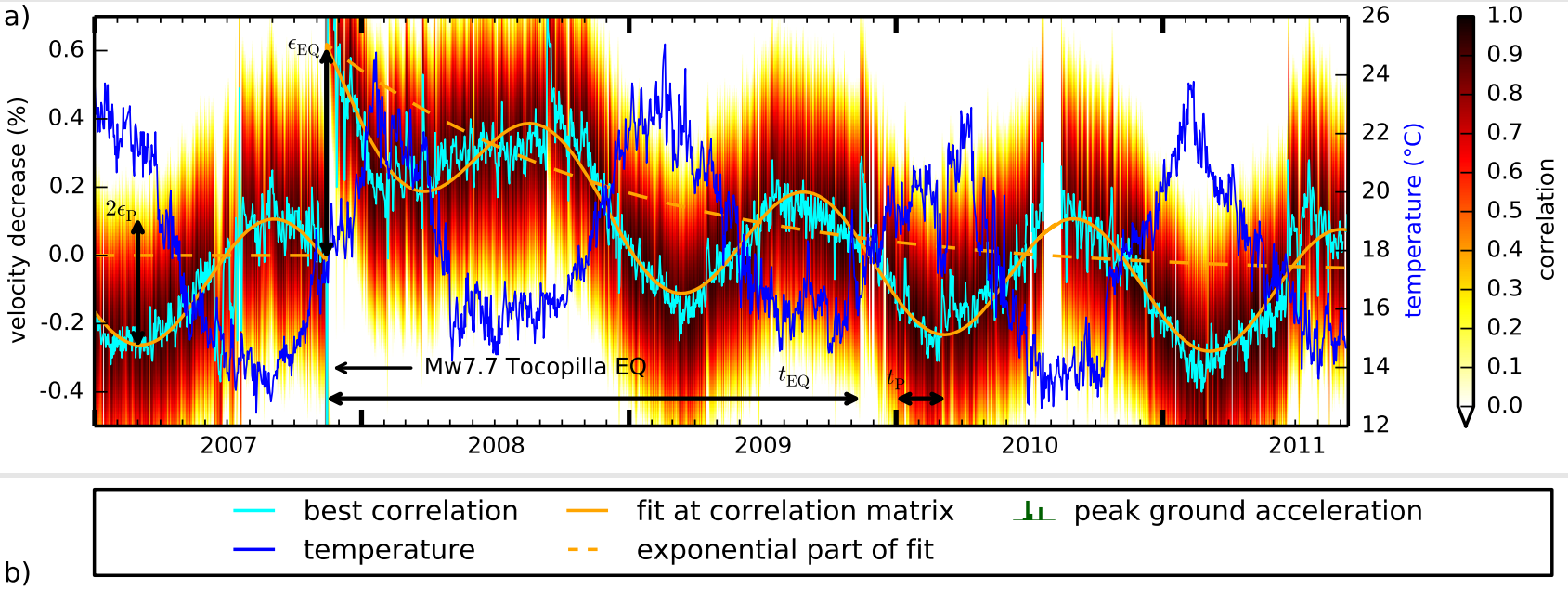


PATCX zeigt:

- ausnehmend hohe ko-seismische Veränderung
- zusätzliche langfristige Veränderungen



Langfristige Änderungen an der Station PATCX

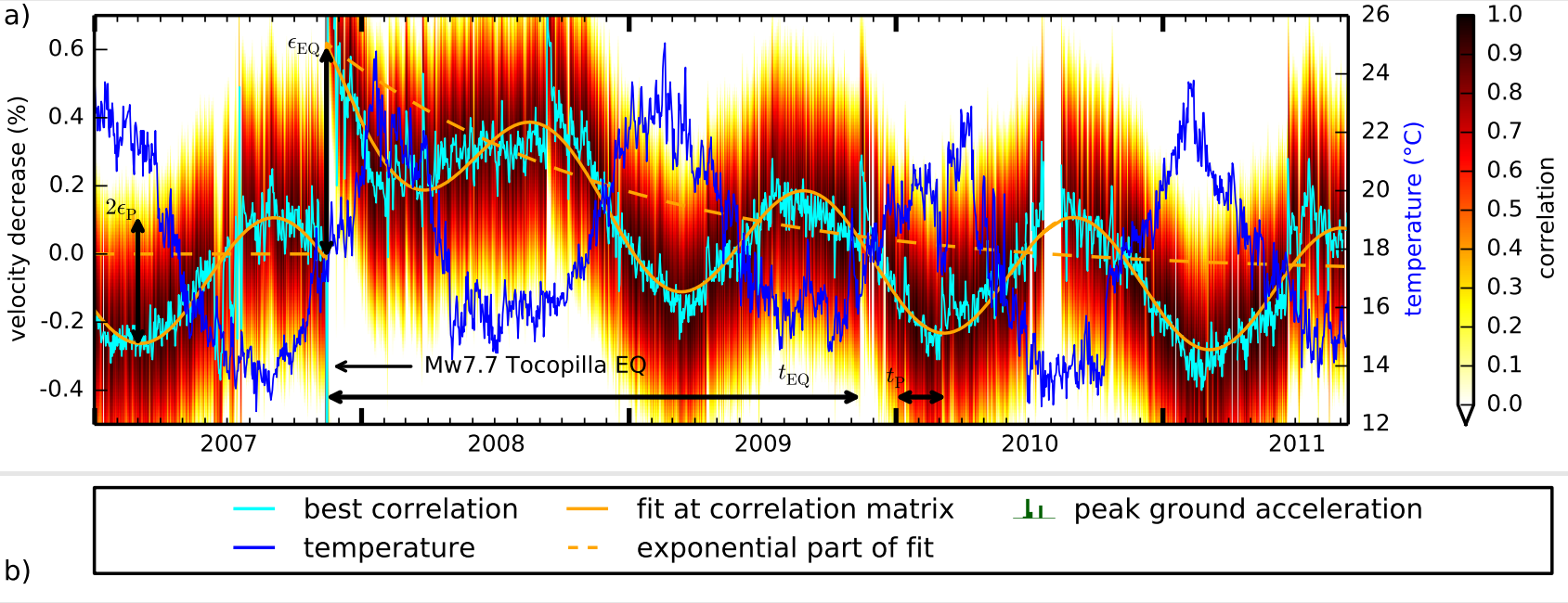


Verschiedene Prozesse:

- starke Geschwindigkeitsabnahme während des Tocopilla Bebens
- Langfristige Erholung binnen 2 Jahren
- Jährliche Änderungen

Periodische Schwankungen

Jährliche Änderungen

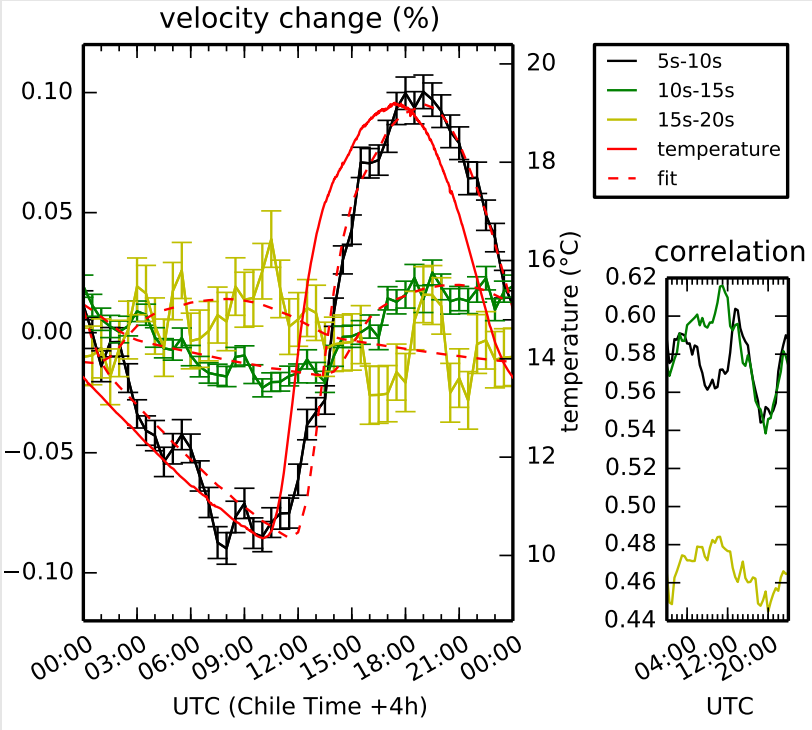


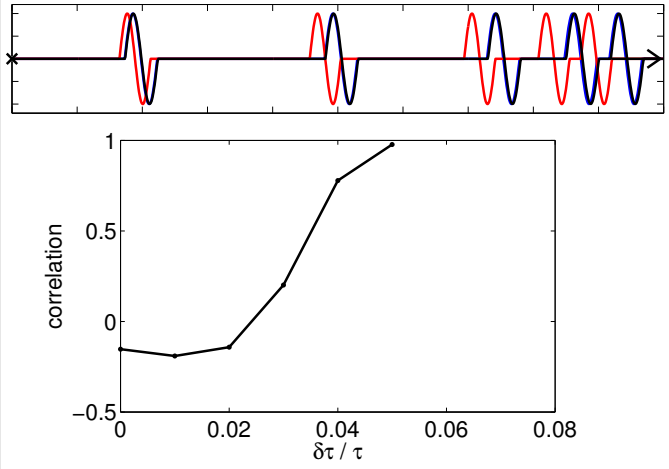
- Korrelation zwischen Geschwindigkeit und Temperatur

⇒ Es gibt auch tägliche Temperaturänderungen. Sieht man dies auch in den Geschwindigkeiten?

Periodische Schwankungen

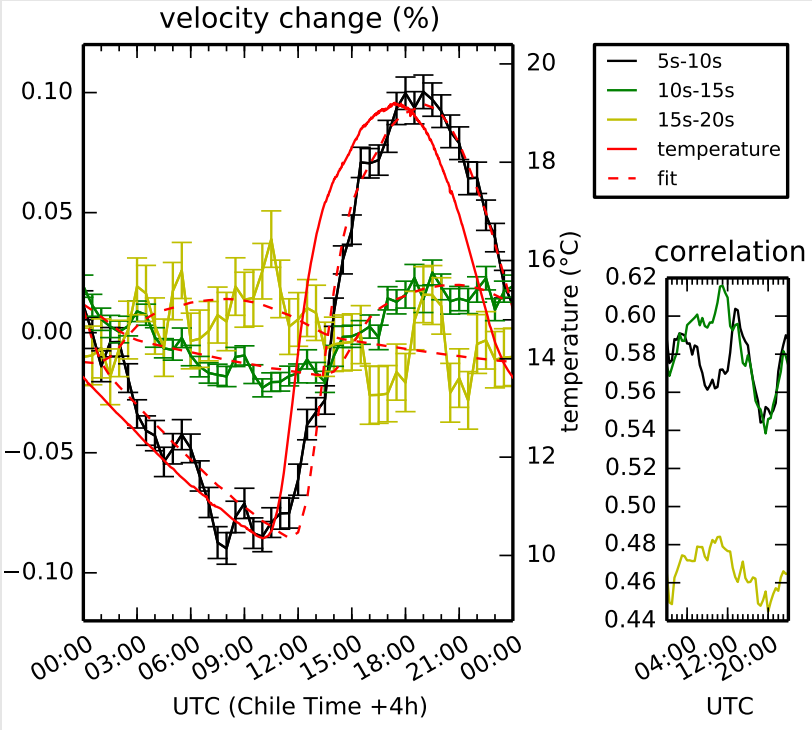
Tägliche Änderungen





Periodische Schwankungen

Tägliche Änderungen



- sehr gute Korrelation mit der Temperatur

⇒ Modellierung
  - thermische Spannungen können die Veränderungen hervorrufen
- Warum nur in PATCX beobachtet?

  ⇒ hohe Sensitivität gegenüber Spannugsänderungen

Inhalt

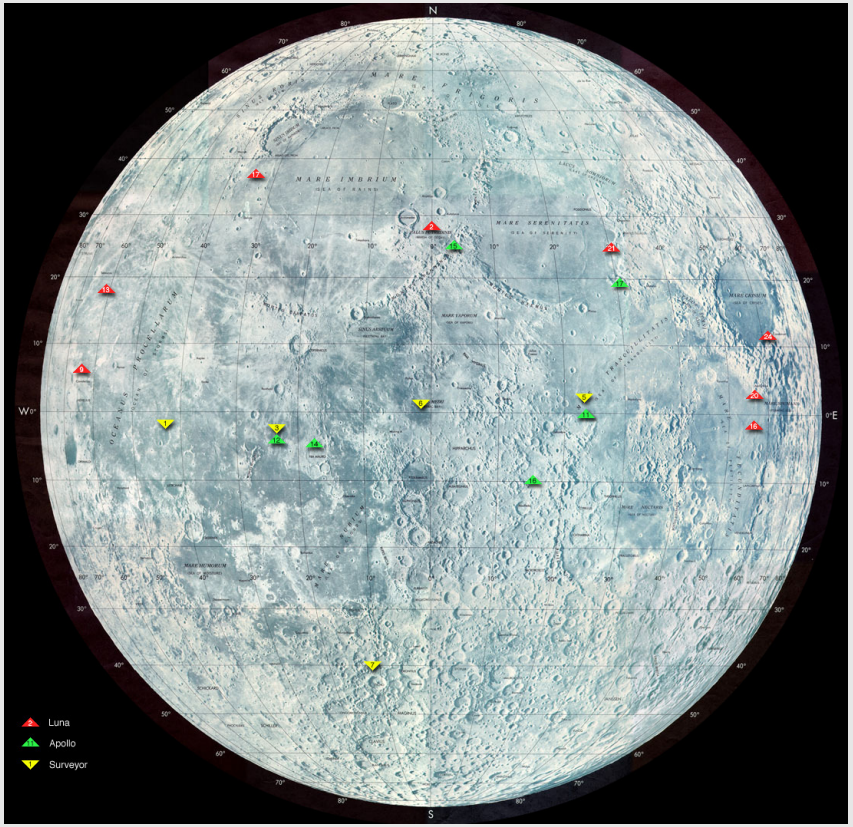
1 Das Seismische Rauschen
- Eigenschaften
- Quellen

2 Seismische Interferometrie
- Korrelationstechnik
- Kodainterferometrie

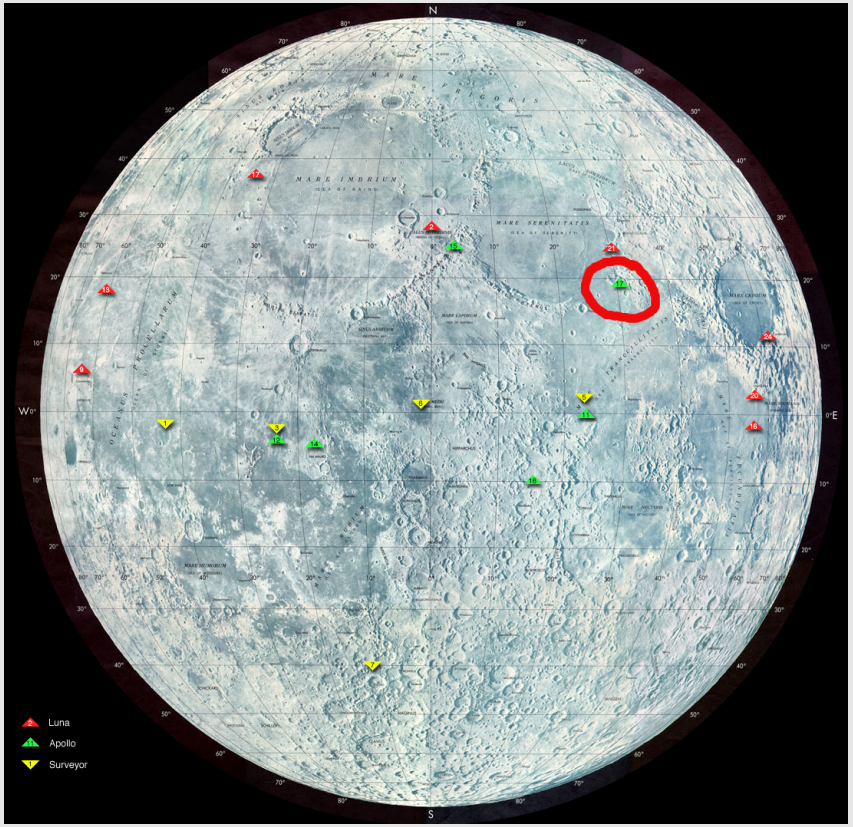
3 Anwendungen des seismischen Monitorings
- Vulkan Piton de la Fournaise
- Subduktionszone in Nord-Chile
- Anwendung auf Apollo Daten

GFZ Helmholtz Centre Potsdam

Lage auf dem Mond

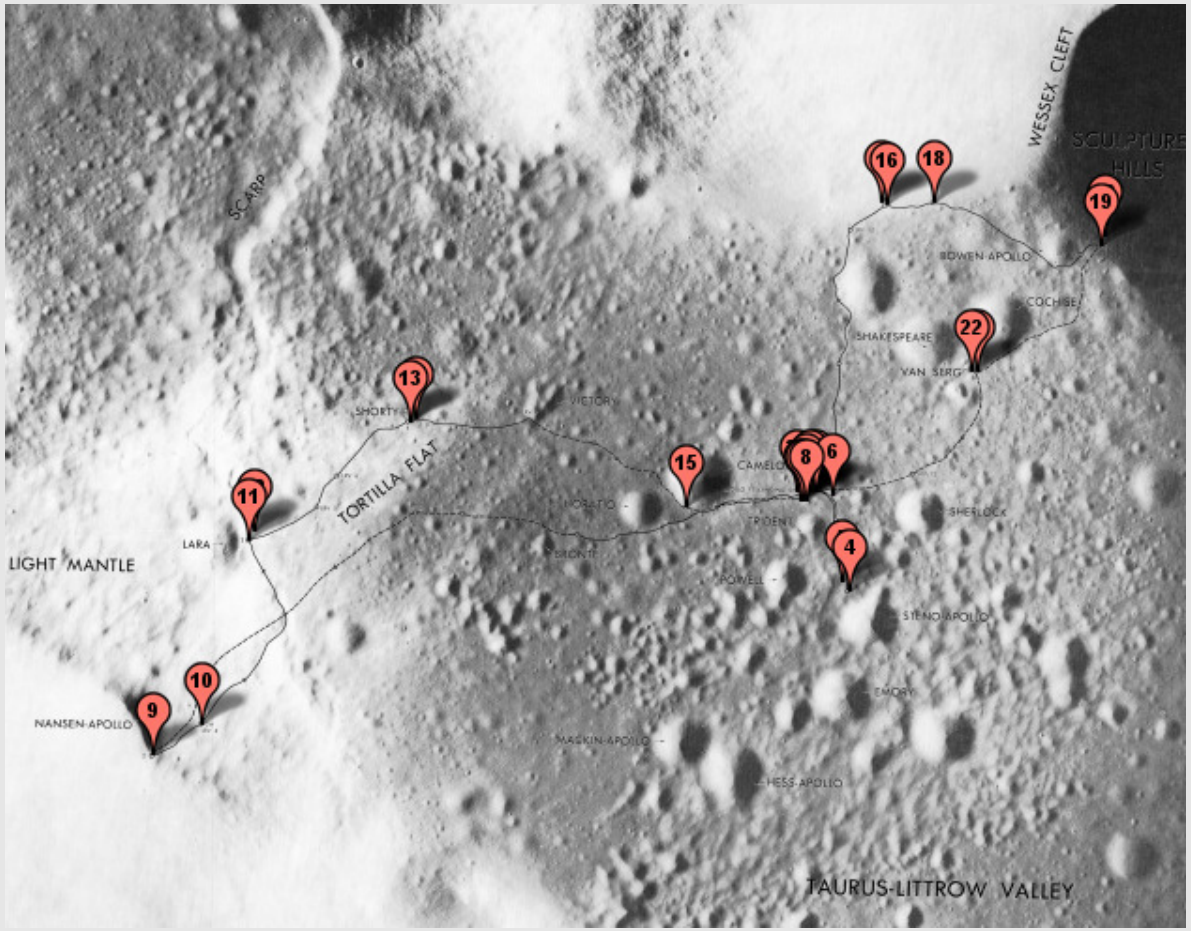


Lage auf dem Mond



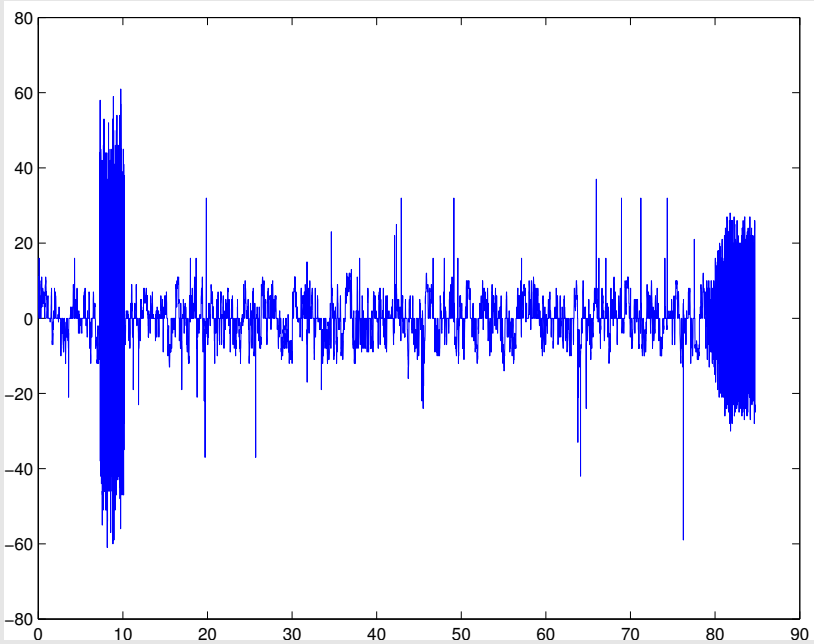
Lage auf dem Mond

Taurus-Littrow Valley (Apollo 17)



Seismisches Rauschen auf dem Mond

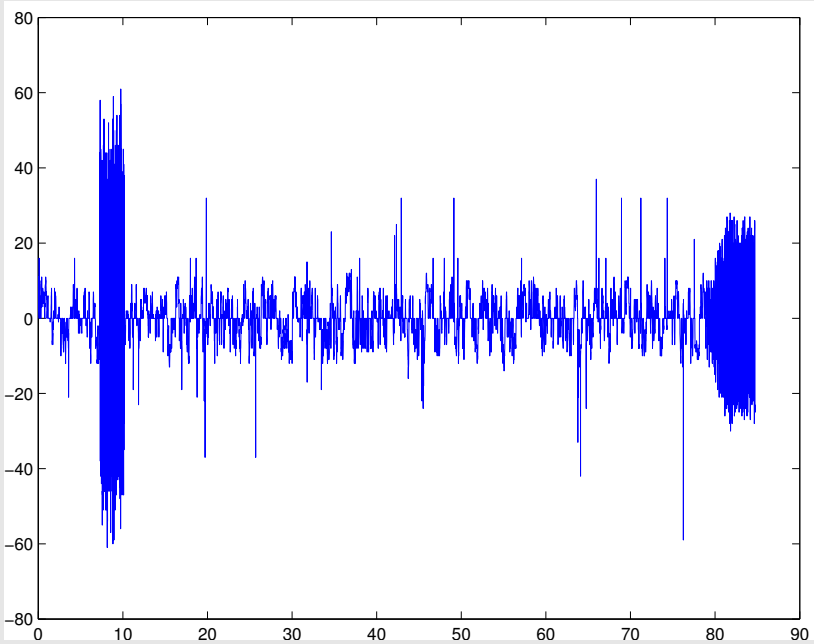
80 s seismisches Rauschen vom Mond



- spikes
- Änderungen in der Signal Verstärkung
- "magnetische" Nulllage

Seismisches Rauschen auf dem Mond

80 s seismisches Rauschen vom Mond

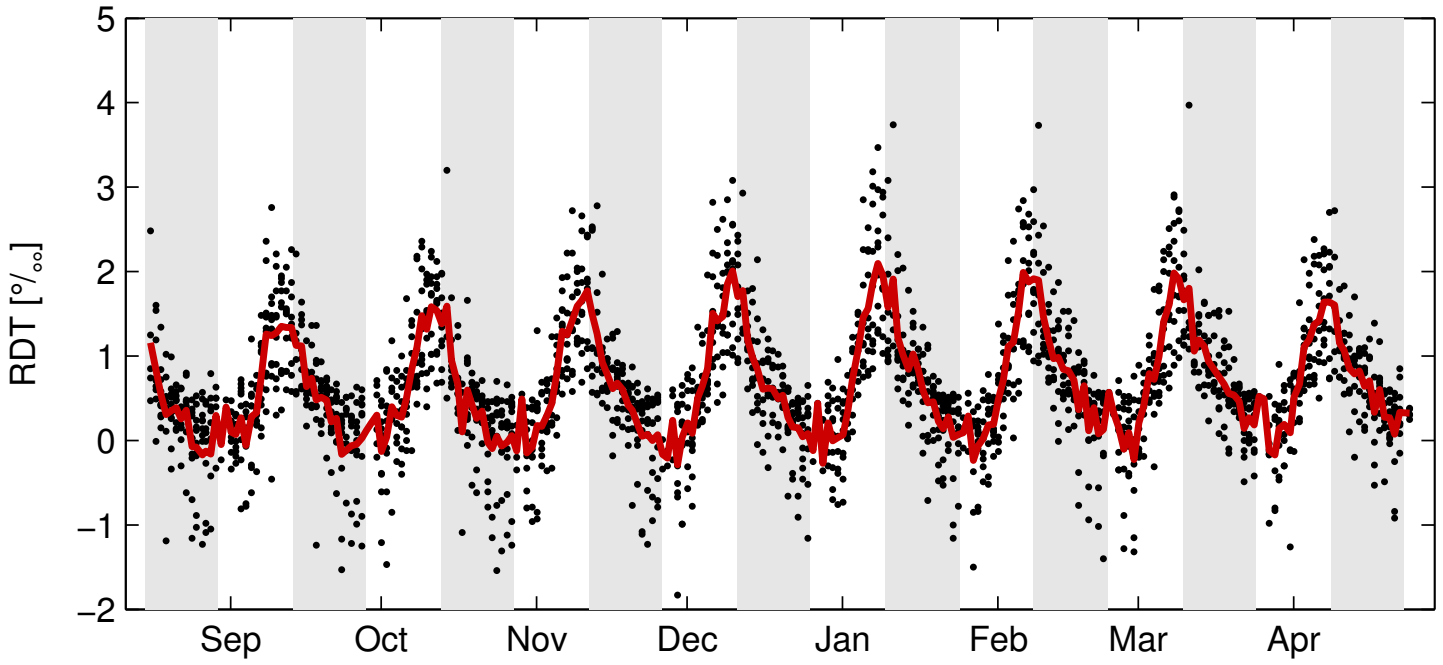


- spikes
- Änderungen in der Signal Verstärkung
- "magnetische" Nulllage

Was ist die Quelle des Rauschens auf dem Mond?

Geschwindigkeitsänderungen

Zeitreihe

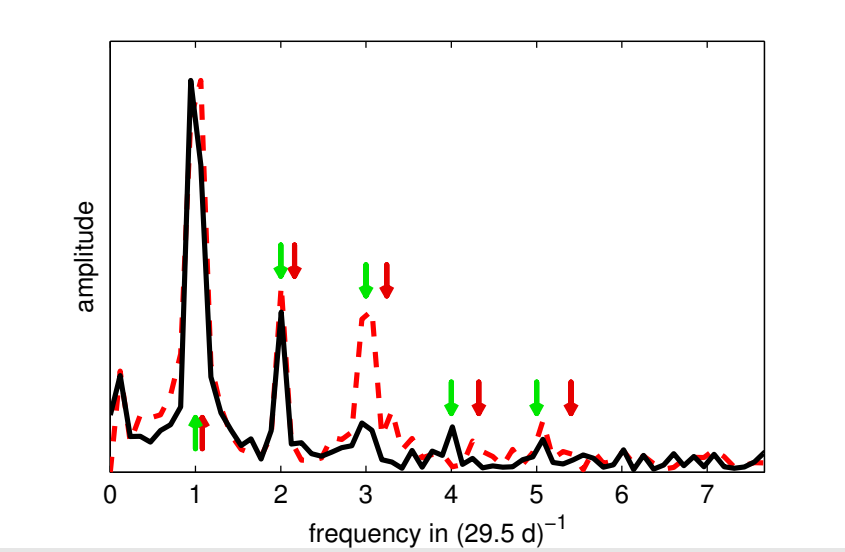


Geschwindigkeitsänderungen

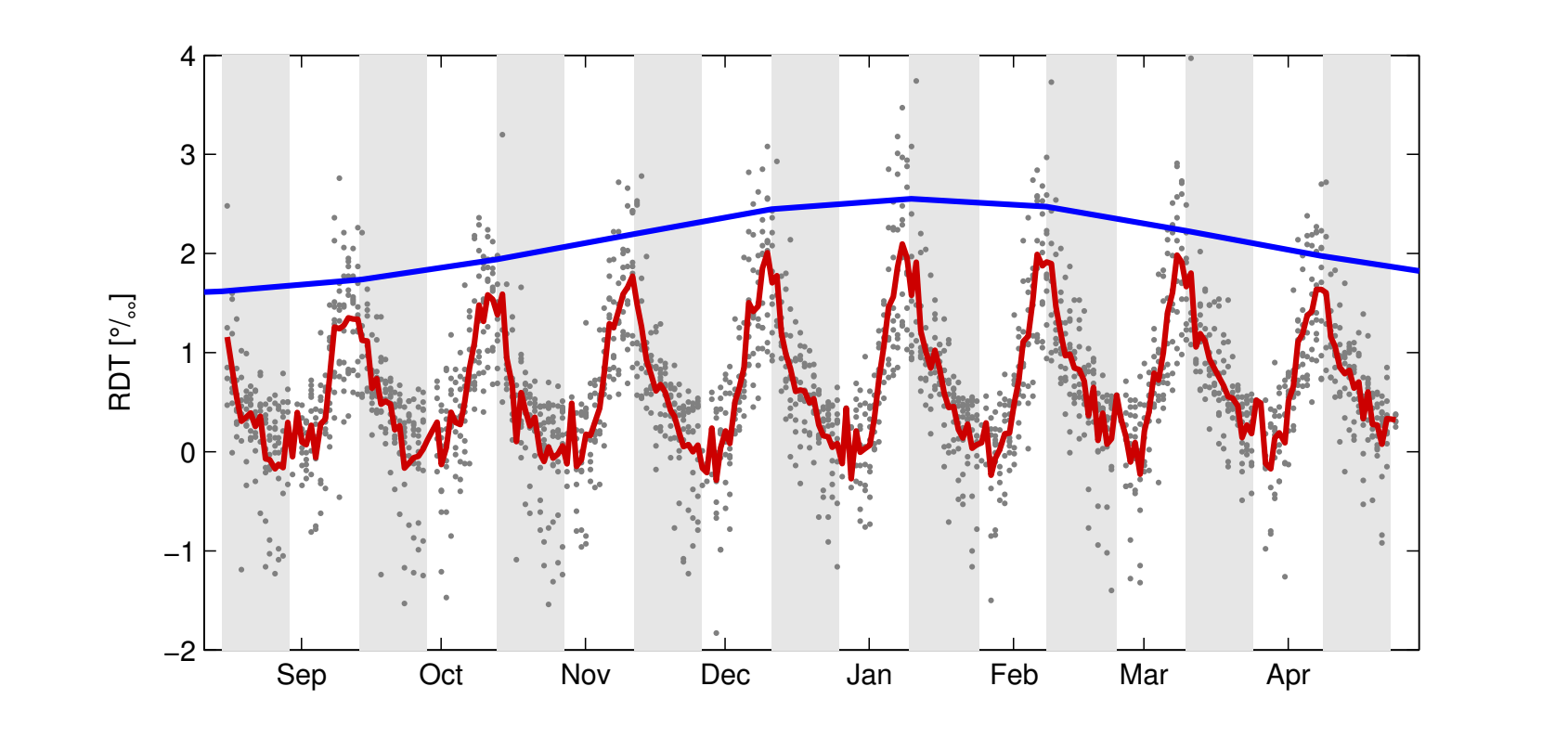
Amplitude Spectrum

- Schwankungen mit der Synodischen Periode von 29.5 Tagen

⇒ durch die Sonne verursacht

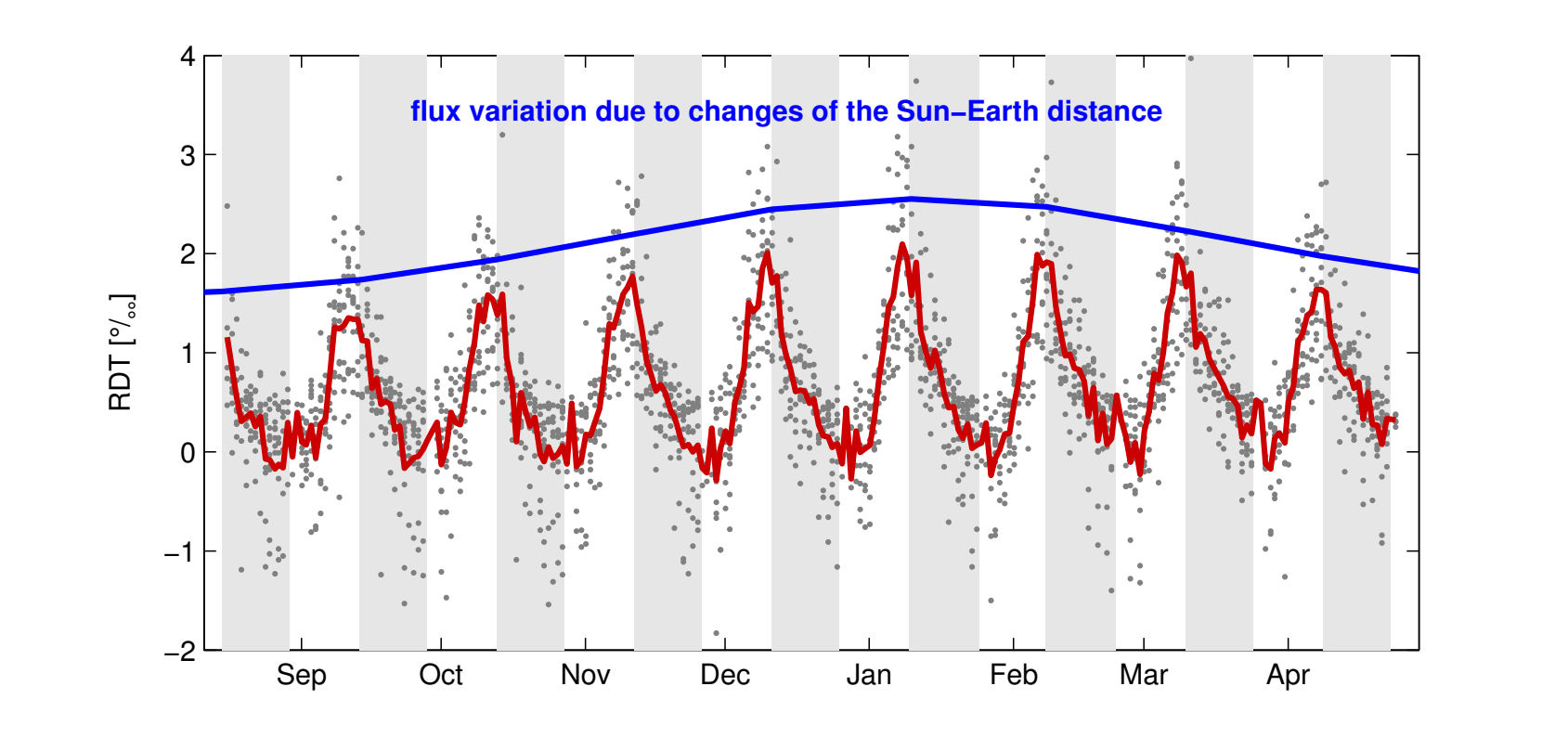


Weitere Beobachtung



Sens-Schönfelder and Larose (2008)

Weitere Beobachtung



Sens-Schönfelder and Larose (2008)

Summary

- Seismisches Rauschen erlaubt kontinuierliche, präzise Überwachung seismischer Geschwindigkeitsänderungen
- Geschwindigkeitsänderungen geben Aufschuss über:
  - Spannungsänderungen und Deformation in Vulkanen
  - Strukturänderungen in Verwerfungszonen
  - Temperaturänderungen an der Mondoberfläche
- Neue Beobachtungsmethode zur Untersuchung von dynamischen Prozessen

GFZ Helmholtz Centre Potsdam

Summary

- Seismisches Rauschen erlaubt kontinuierliche, präzise Überwachung seismischer Geschwindigkeitsänderungen
- Geschwindigkeitsänderungen geben Aufschuss über:
  - Spannungsänderungen und Deformation in Vulkanen
  - Strukturänderungen in Verwerfungszonen
  - Temperaturänderungen an der Mondoberfläche
- Neue Beobachtungsmethode zur Untersuchung von dynamischen Prozessen

Vielen Dank für Ihr Interesse.

GFZ Helmholtz Centre Potsdam

References

Richter, T., Sens-Schönfelder, C., and Kind, R. (2013). Comprehensive observation and modeling of earthquake and temperature related seismic velocity changes in northern chile with passive image interferometry. *J. Geophs. Res.* under review.

Sens-Schönfelder, C. and Larose, E. (2008). Temporal changes in the lunar soil from correlation of diffuse vibrations. *Phys. Rev. E*, 78(4):045601.

Sens-Schönfelder, C., Pomponi, E., and Peltier, A. (2014). Dynamics of Piton de la Fournaise Volcano Observed by Passive Image Interferometry with Multiple References. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 276:32–45.

Sens-Schönfelder, C. and Wegler, U. (2006). Passive image interferometry and seasonal variations of seismic velocities at Merapi Volcano, Indonesia. *Geophys. Res. Lett.*, 33:L21302.

Shapiro, N. M., Campillo, M., Stehly, L., and Ritzwoller, M. H. (2005). High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. *Science*, 307(5715):1615–1618.