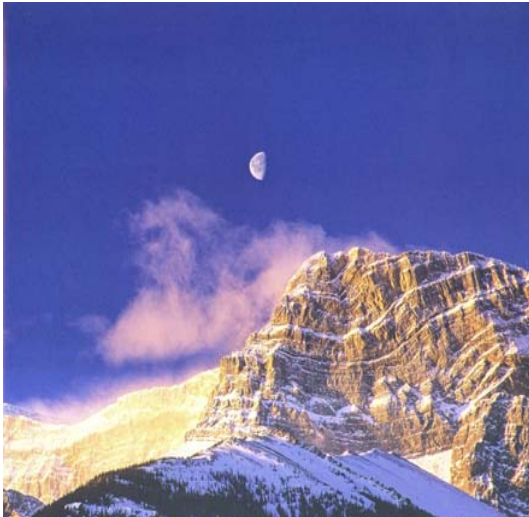


# ***Monitoring und Modellierung von Bewegungen und Deformationen der Erdkruste***

**Bernhard Heck, Geodätisches Institut, KIT Karlsruhe**  
[bernhard.heck@kit.edu](mailto:bernhard.heck@kit.edu)

**Mit Beiträgen von J. Ritter, T. Hergert, M. Westerhaus, A. Schenk u.a.**



# Alfred Wegener 1880-1930

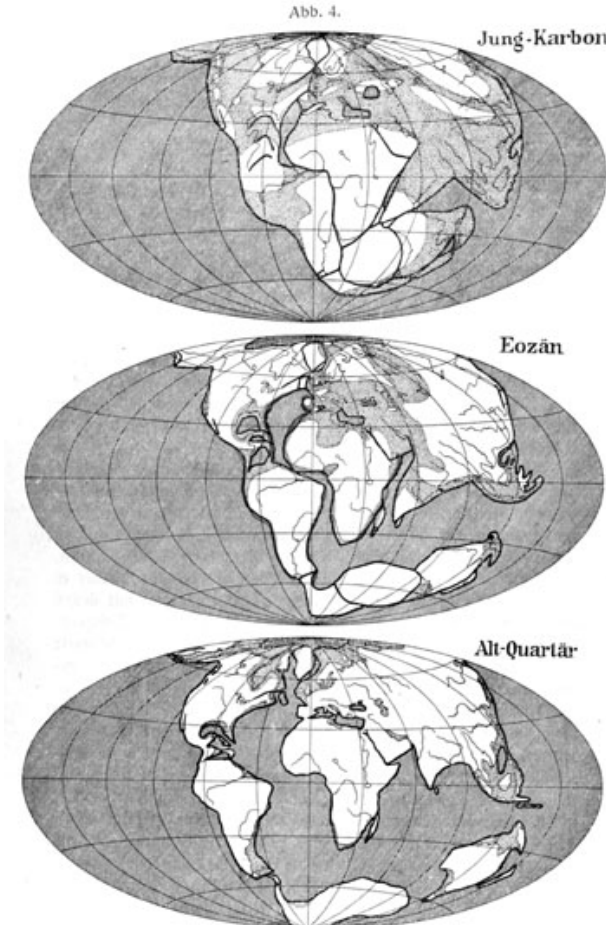


1910

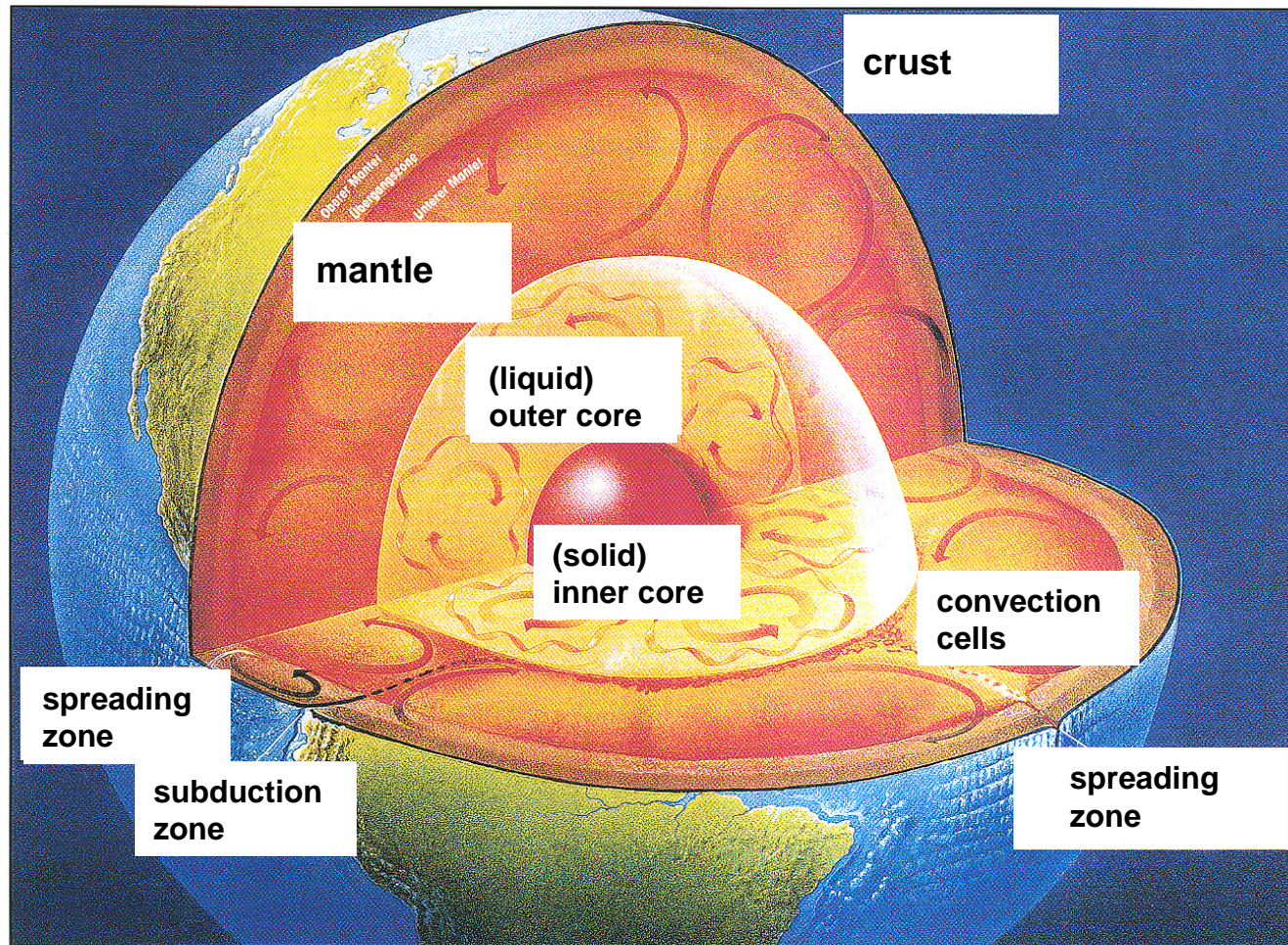


1912/13 in Grönland

Kontinentalverschiebungs-Theorie,  
Vortrag 06.06.1912,  
Geologische Vereinigung,  
Frankfurt/M.



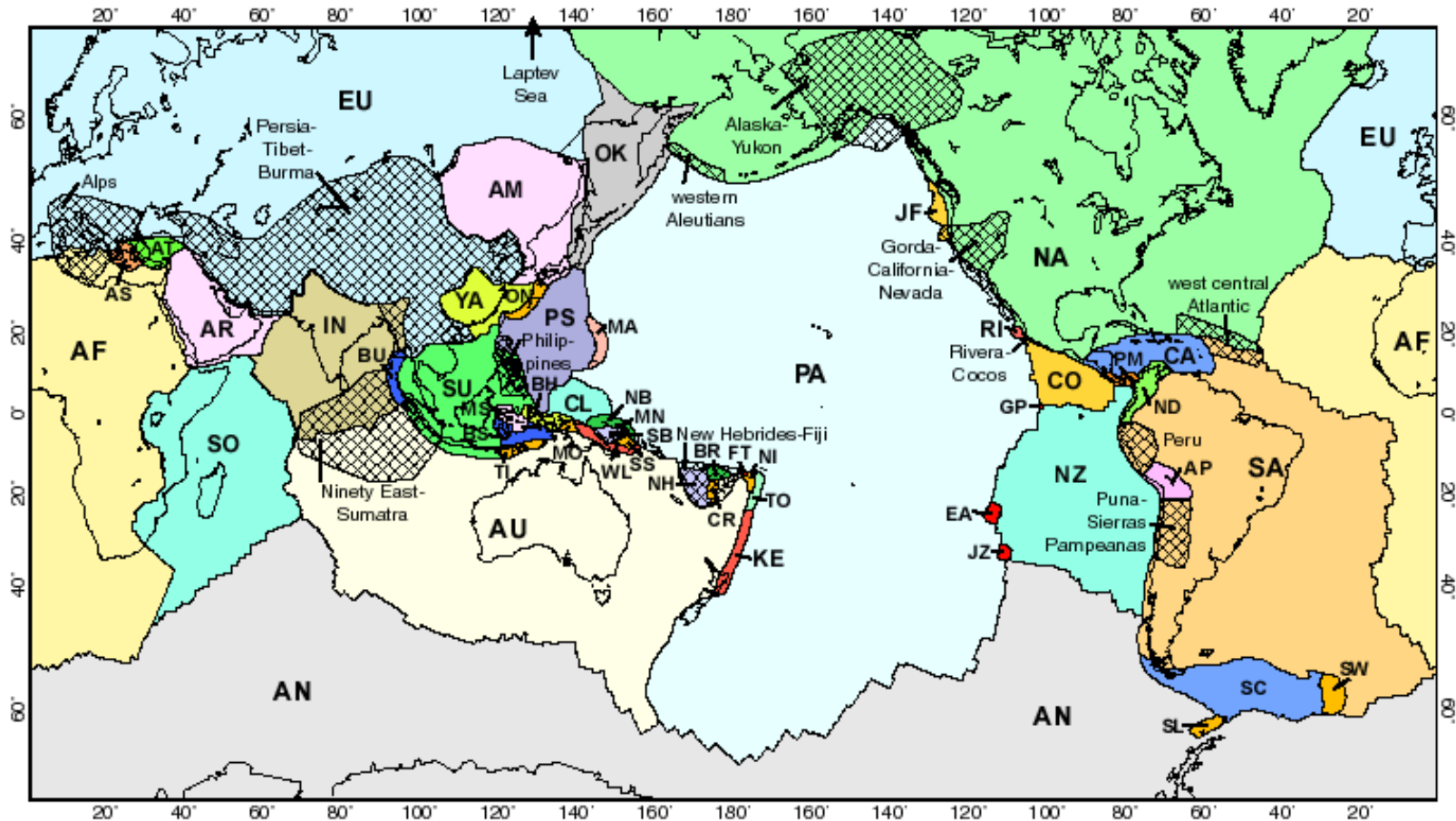
# Geodynamische Prozesse - Plattentektonik



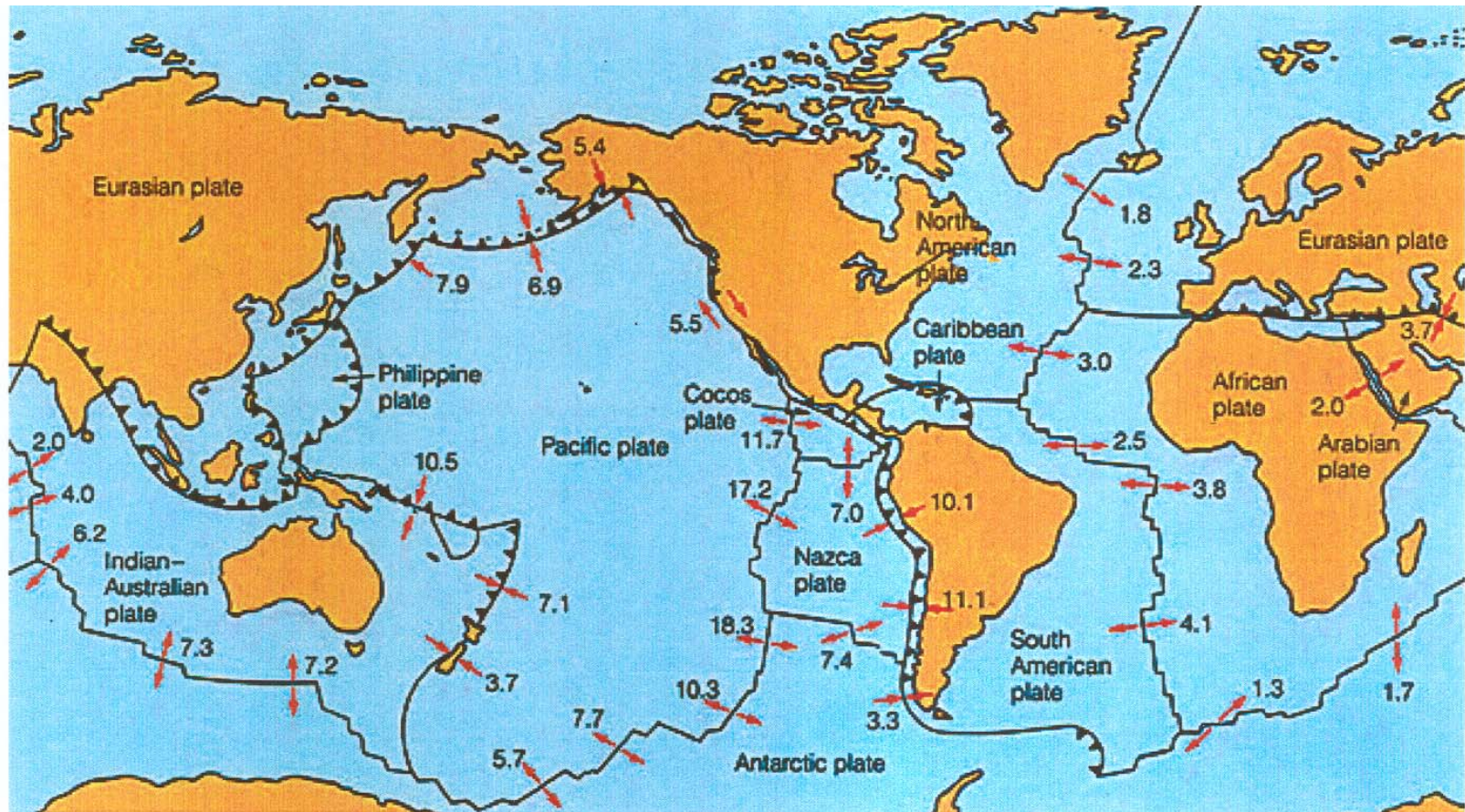
## The interior of the Earth and its dynamics

# Plattentektonisches Modell PB2002

(Bird, 2003, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4(3), 1027)

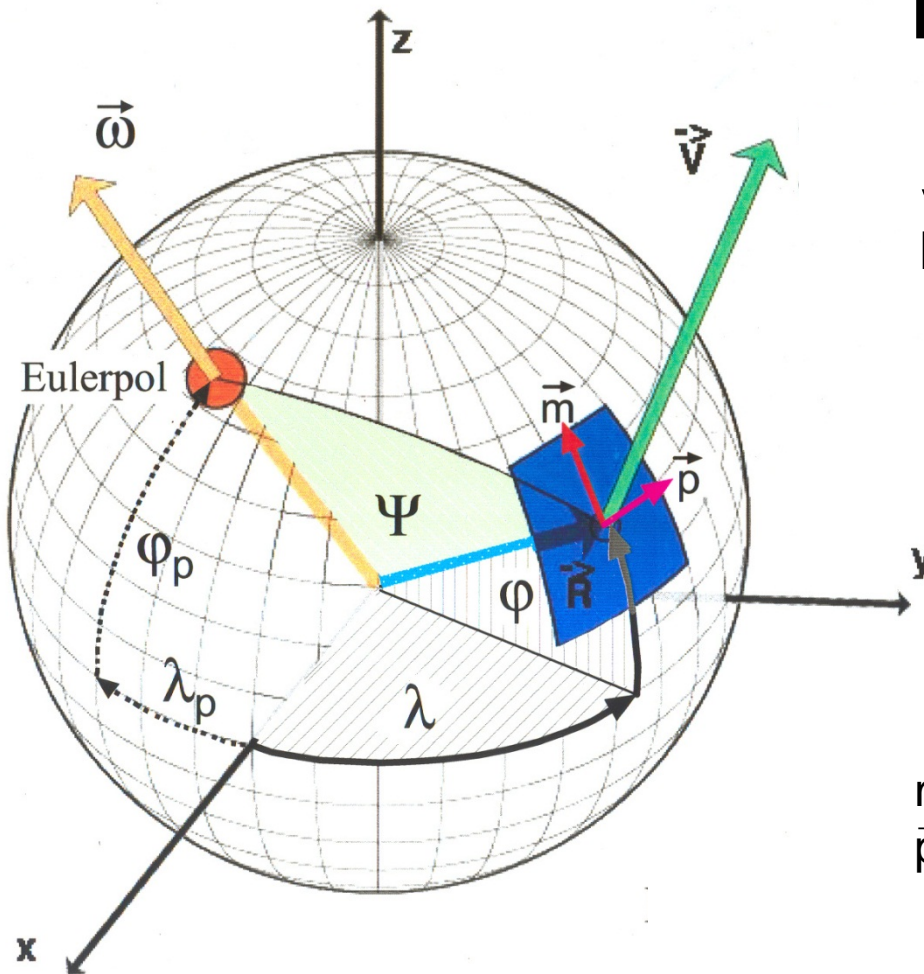


52 Platten; schraffierte Bereiche: „Orogene“, i.e. Bereiche mit komplexen Bewegungsmustern bzw. internen Deformationen



Plattenbewegungen [cm/yr]

# Eulerian rotation

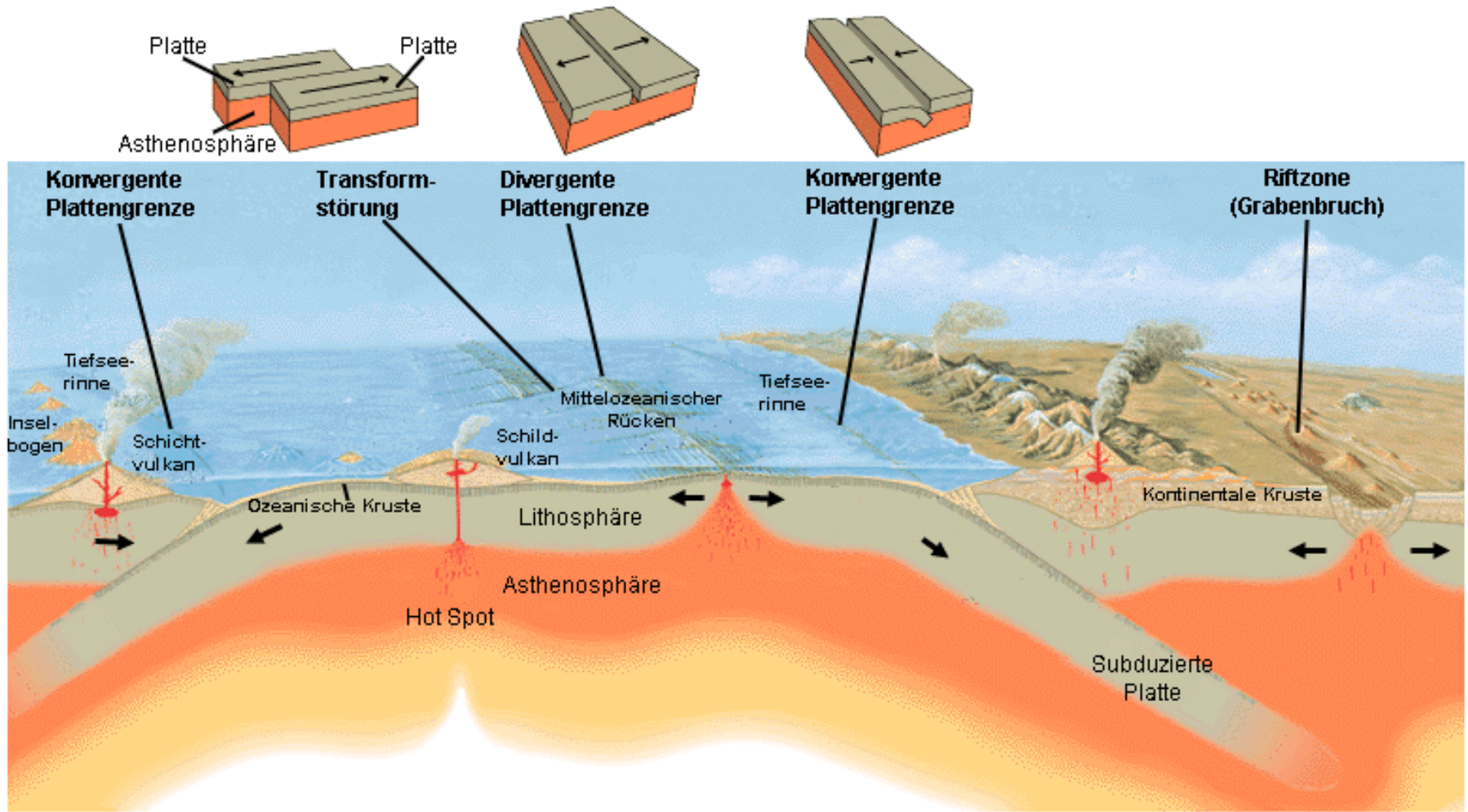


$\vec{v}$  horizontal velocity  
 $\vec{R}$  position vector

$$\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{R}$$

$\vec{m}$  = meridian direction  
 $\vec{p}$  = prime vertical direction

# Plattentektonik: Klassifikation von Plattengrenzen

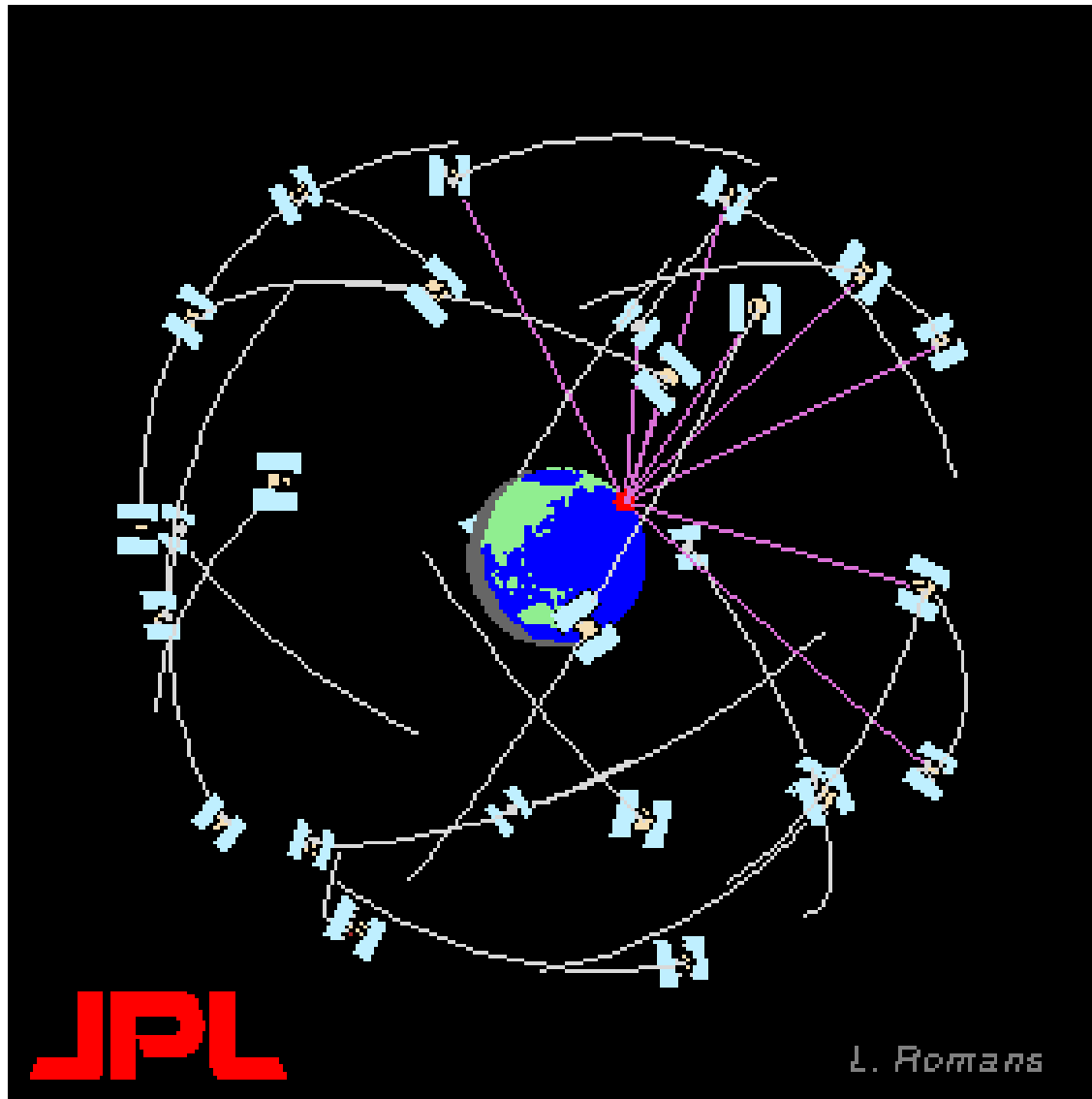


Deformationszonen an Plattenrändern!

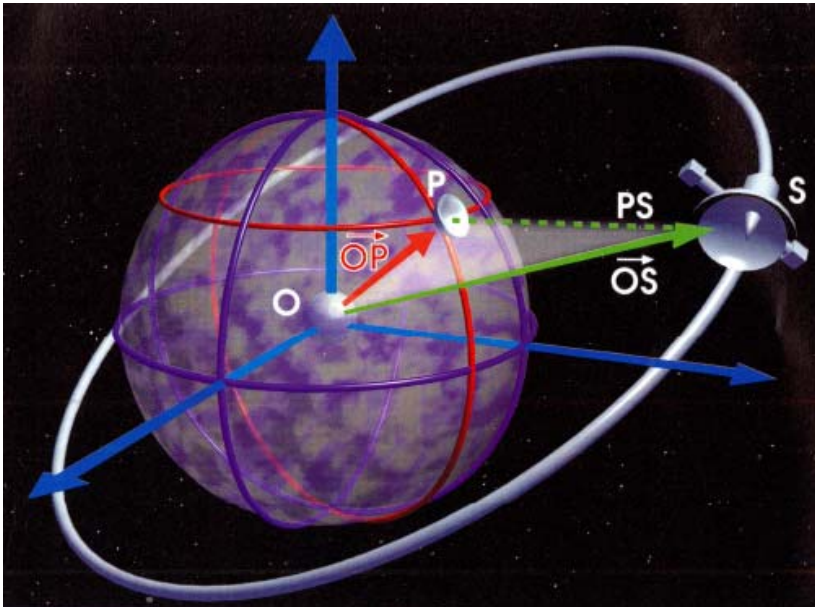


# Monitoring von Bewegungen der Erdoberfläche mit geodätischen Beobachtungsverfahren

# GNSS: Raumsegment



# GNSS-Messprinzip



## GPS-Satellit

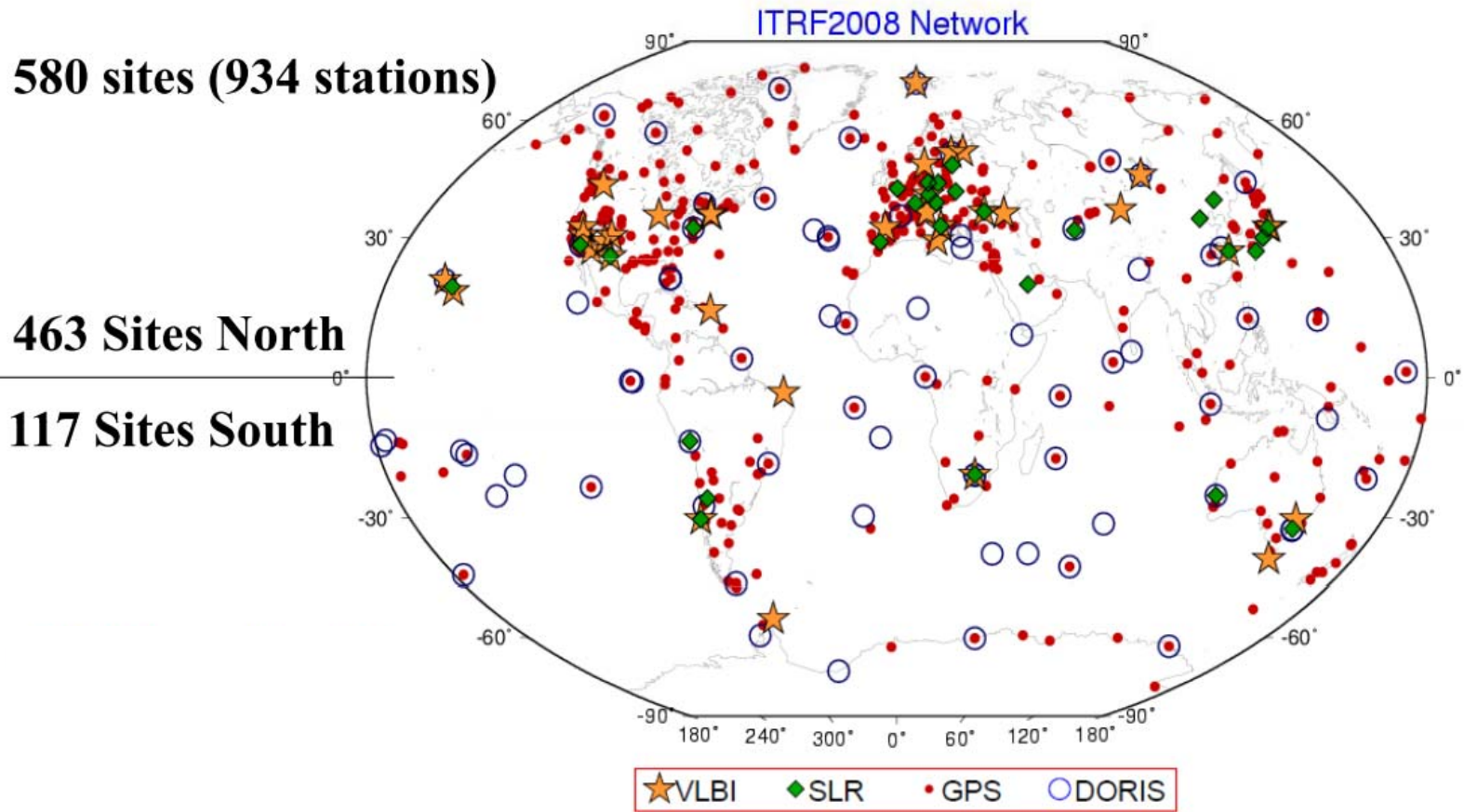
Block II-Satellit

840 kg,

solar panels 7m<sup>2</sup>

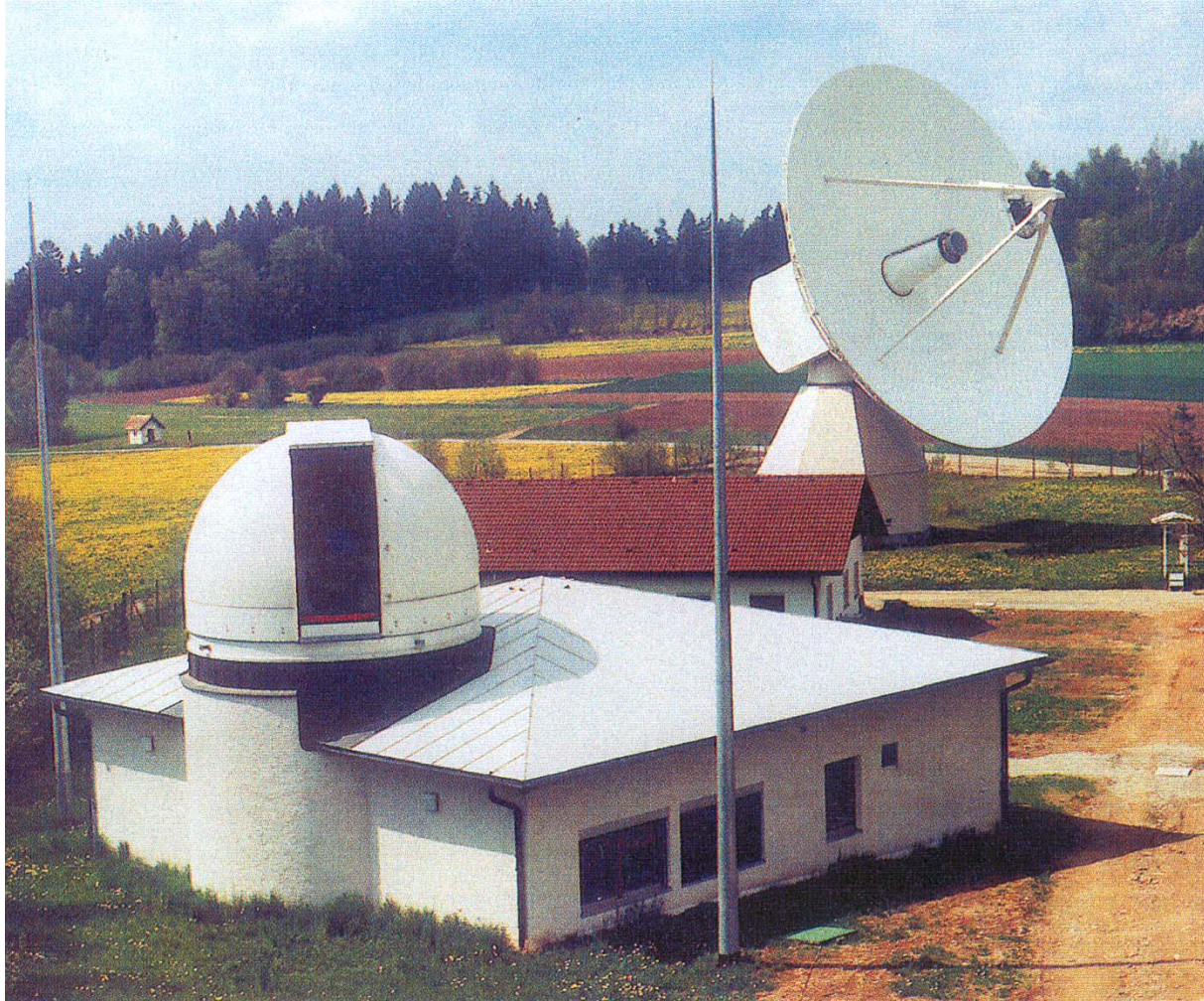


# ITRF: International Terrestrial Reference Frame



IERS: International Earth Rotation & Reference Systems Service

# Geodätische Fundamentalstation Wettzell



# Aktuelle ITRF-Variante des DGFI\*

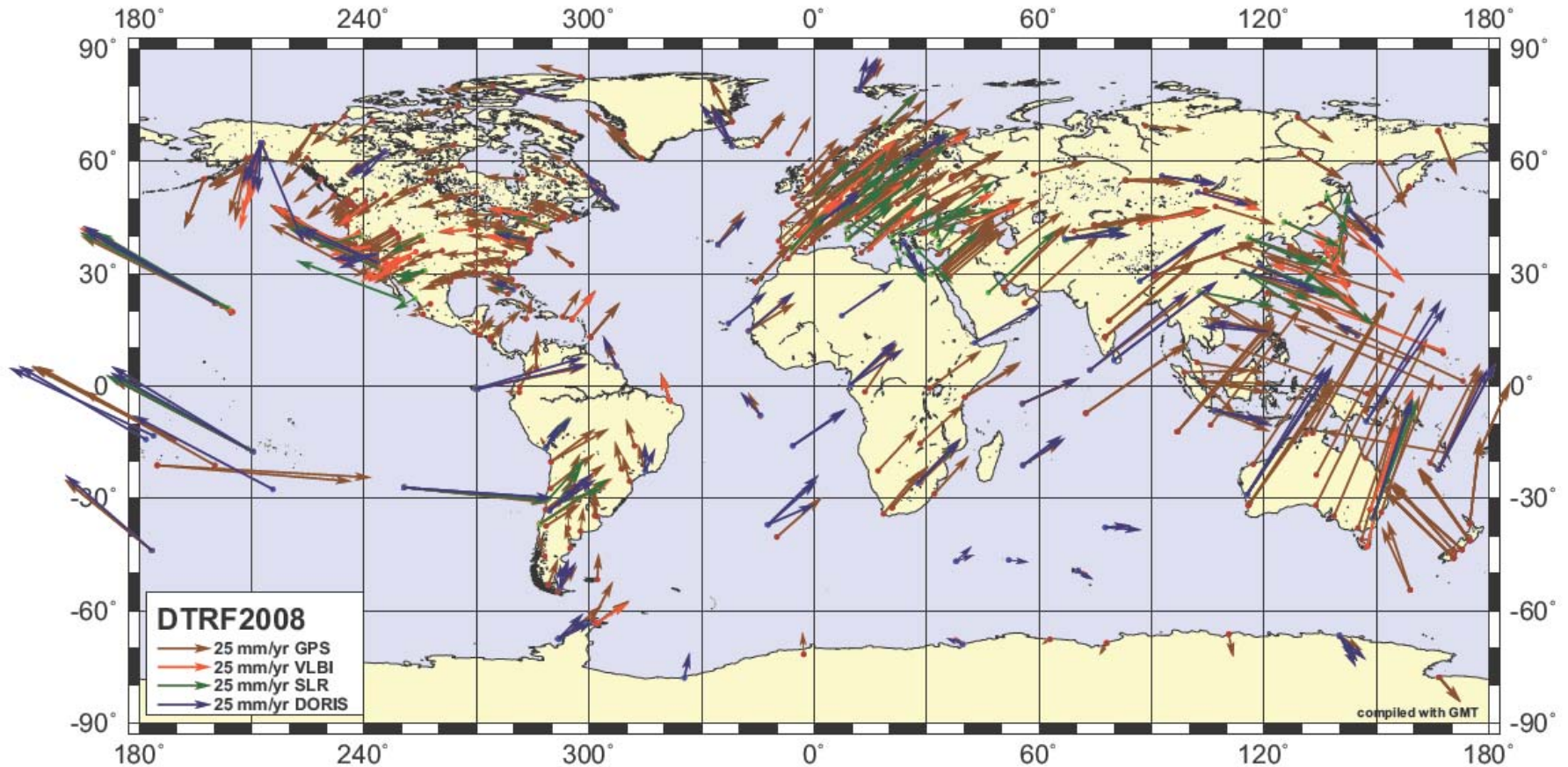
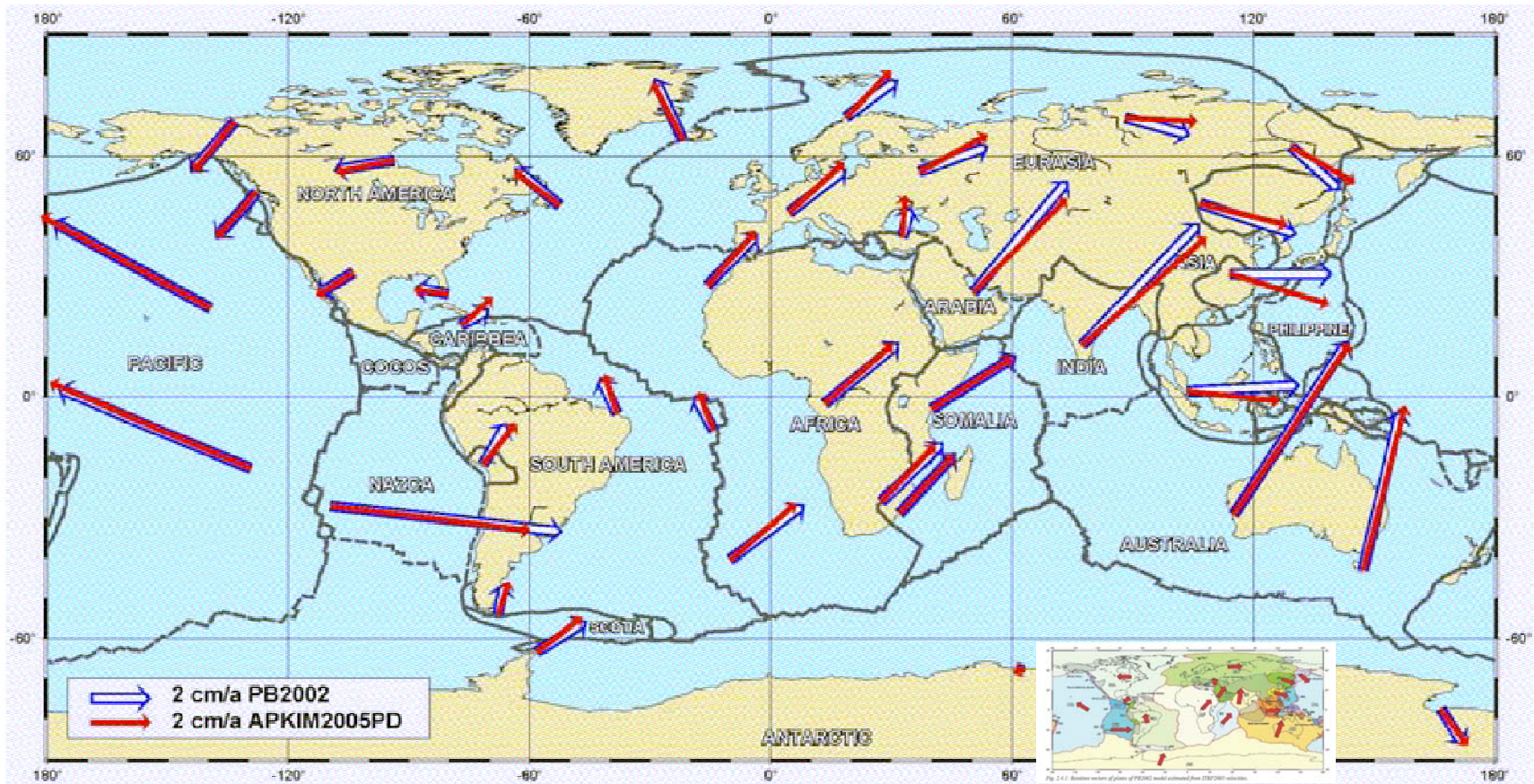


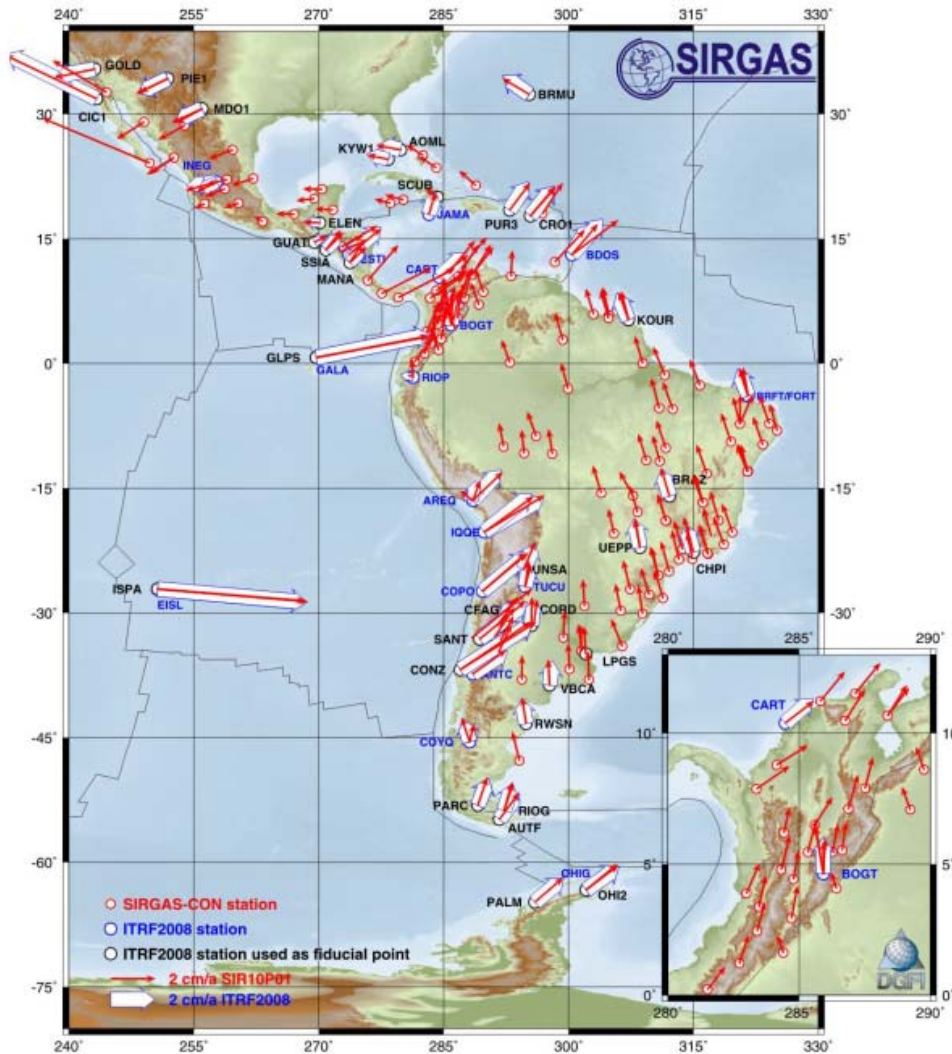
Fig. 3.1.4: Horizontal station velocities of DTRF2008

\*Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, München

# Vergleich APKIM2005 und PB2002



Vergleich der aktuellen Version APKIM2005 mit dem geophysikalischen Modell PB2002, das für die Hauptplatten dem Modell NNR-NUVEL 1A entspricht. Umrechnung ist möglich durch Rotation von APKIM2005 mit  $\omega = 0.016 \pm 0.003$  %/Myr um einen Pol bei  $-24$  °N /  $144$  °E (DGFI, Report 2007).



## SIRGAS-CON Geschwindigkeiten

Horizontal-Geschwindigkeiten  
 abgeleitet aus dem  
 IGS RNAAC SIR  
 Netz (Lösung: SIR10P01)

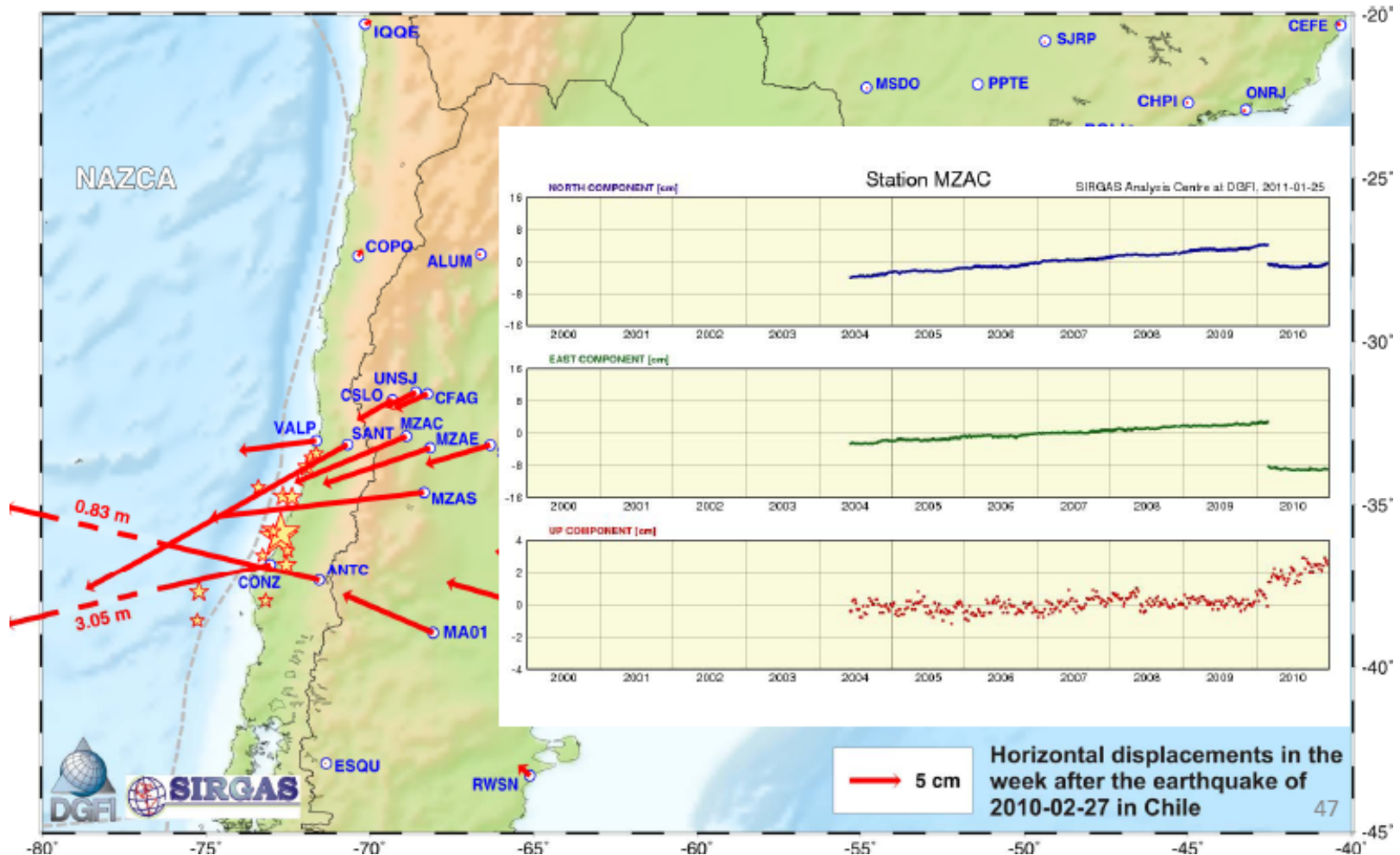


# SIRGAS-CON Geschwindigkeiten

Vertikal-Geschwindigkeiten  
 abgeleitet aus dem  
 IGS RNAAC SIR  
 Netz (Lösung : SIR10P01)

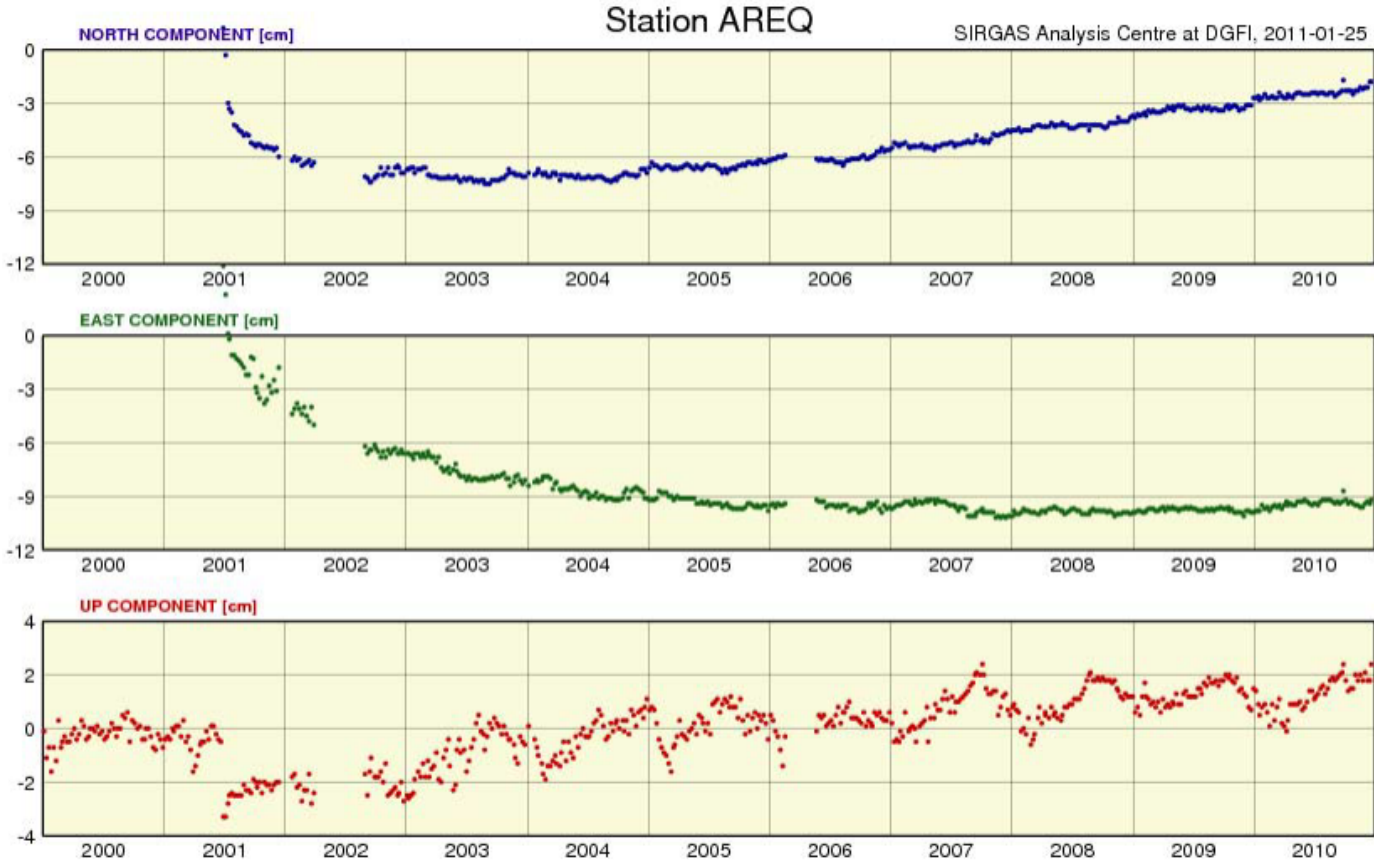


## Horizontale Versetzungen der SIRGAS-Stationen



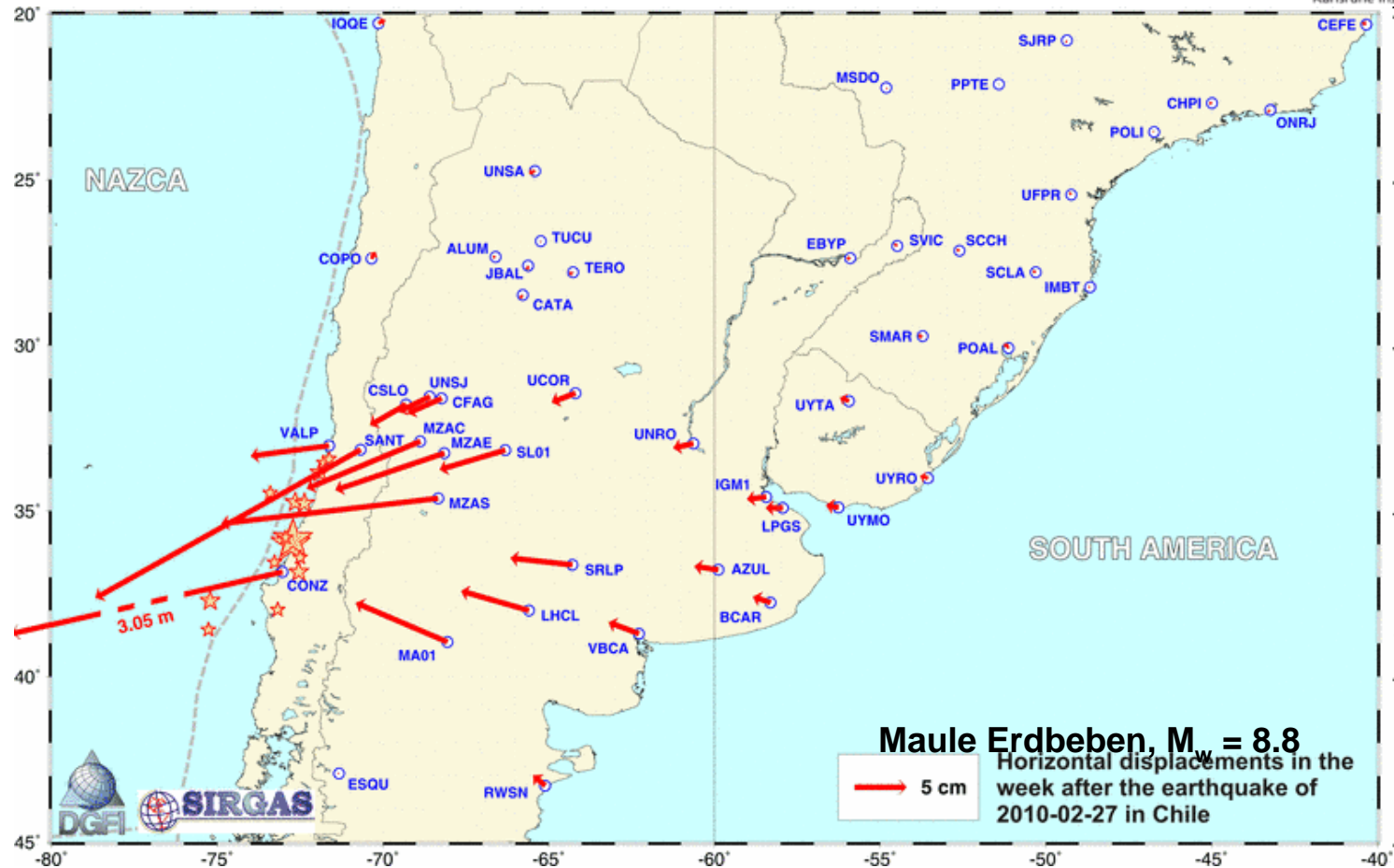
# Deformationen durch Erdbeben (co-/post-seismisch)

## Arequipa, 2001-06-23, M = 7,9



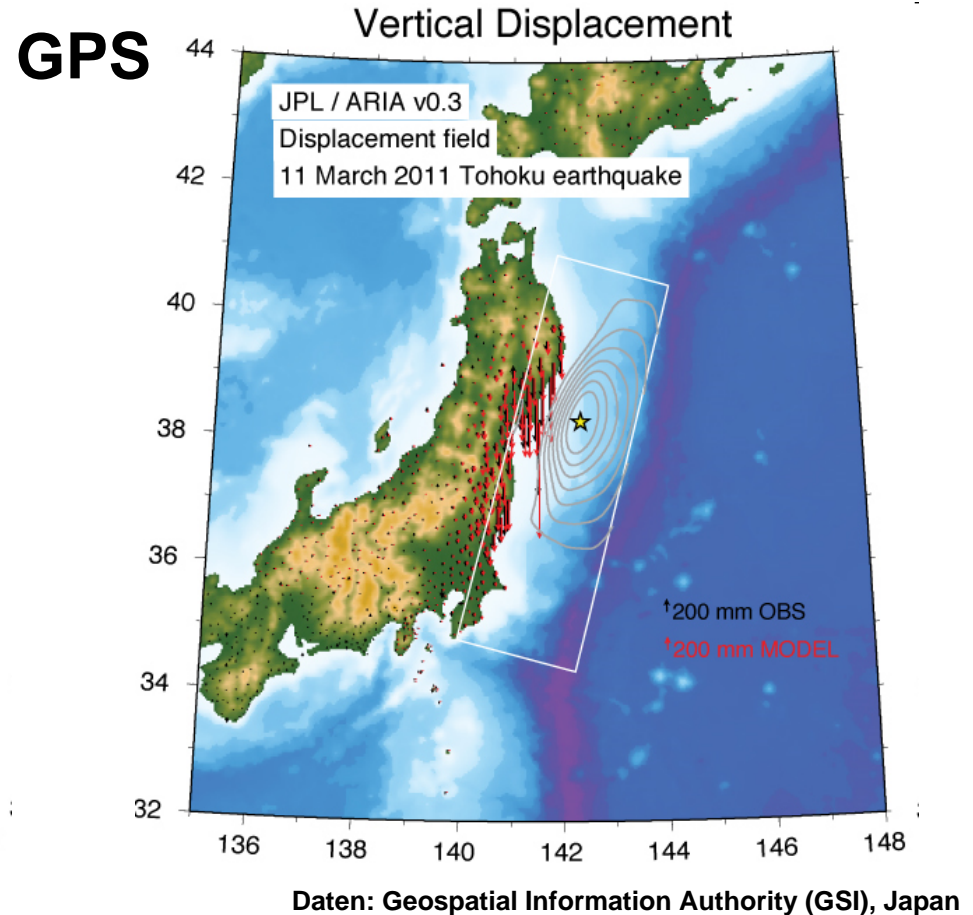
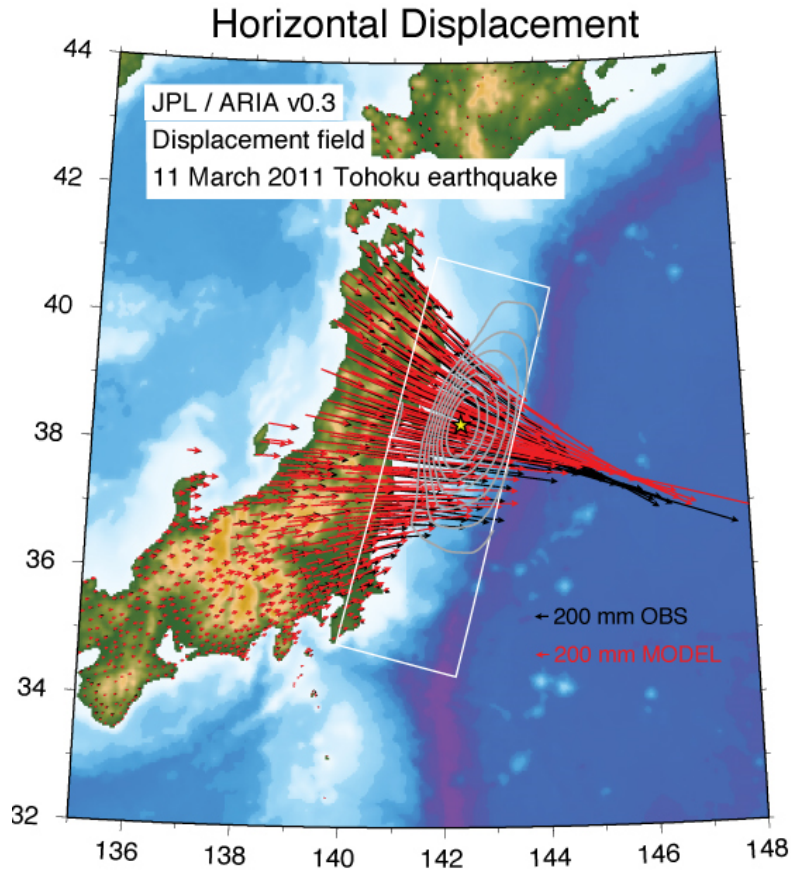
Source: Drewes (2011)

# Deformationen bei starken Erdbeben



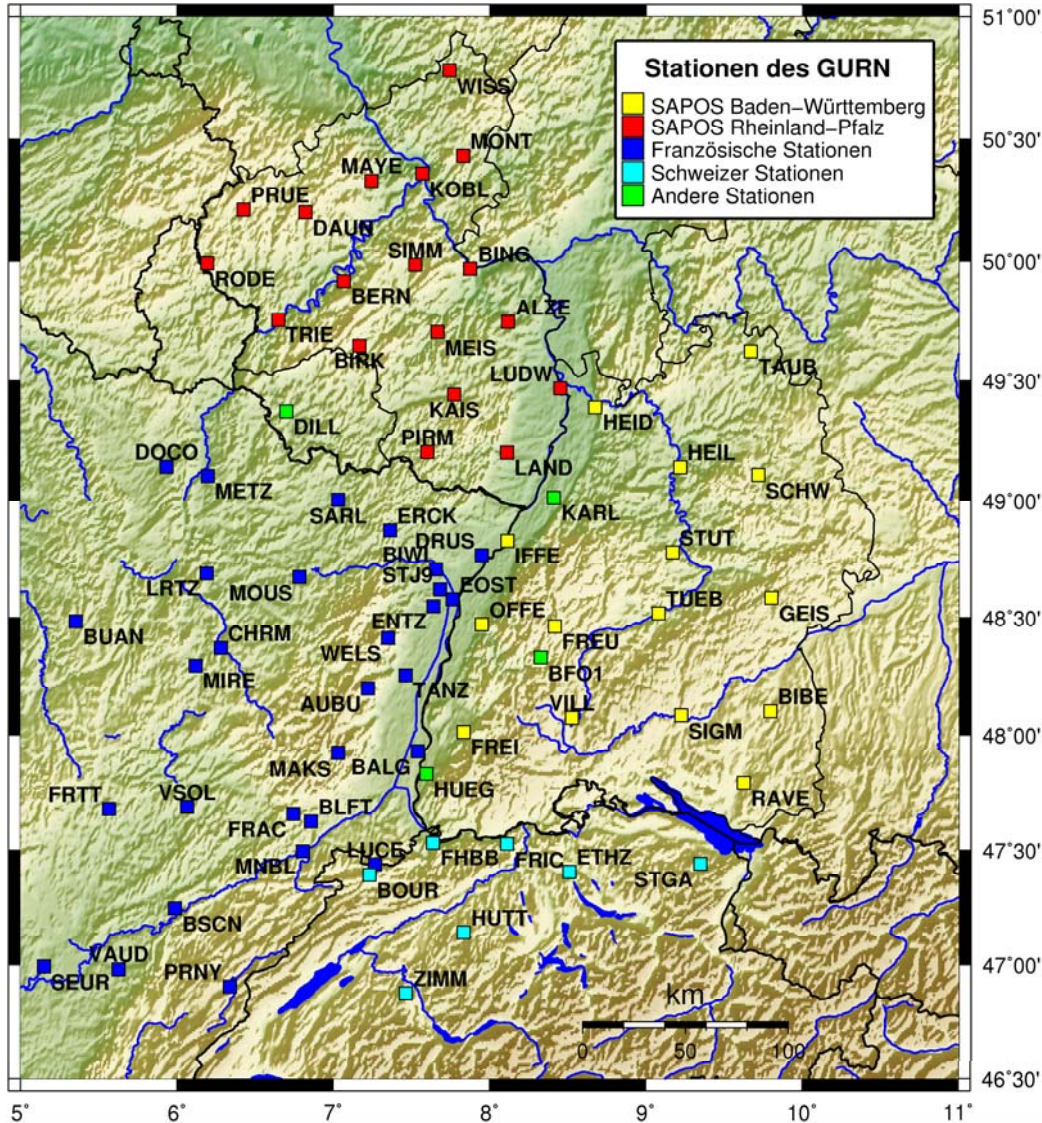
Annähernd die **gesamte** Platte wird von den Deformationen durch die Kräfte an den Plattengrenzen erfasst.

# Beispiel Japan: Honshu-Erdbeben, 11.03.2011, M=9.0



Die Nordostküste Japans bewegte sich um bis zu 4 Meter nach Osten und sank um etwa 0.5 m ab (Quelle: USGS)

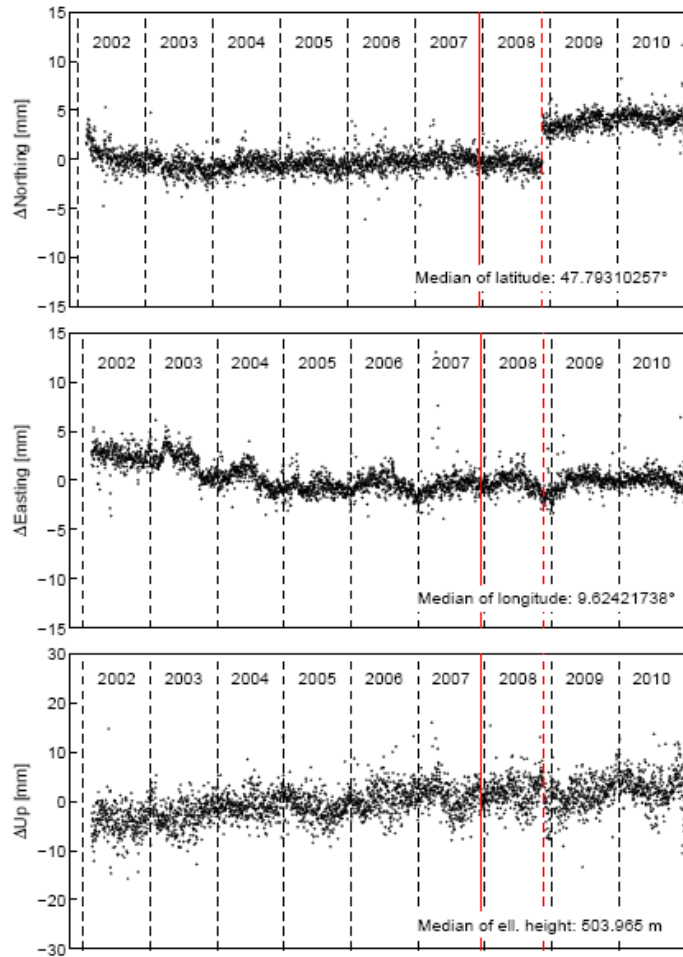
# GURN: GNSS Upper Rhine Graben Network



- Kooperation GIK, EOST Strasbourg, swisstopo
- Ca. 75 permanent betriebene GNSS-Stationen (D,F,CH)
- Daten seit 2002, tlw. weiter zurückliegend
- Erweiterung nach Norden geplant

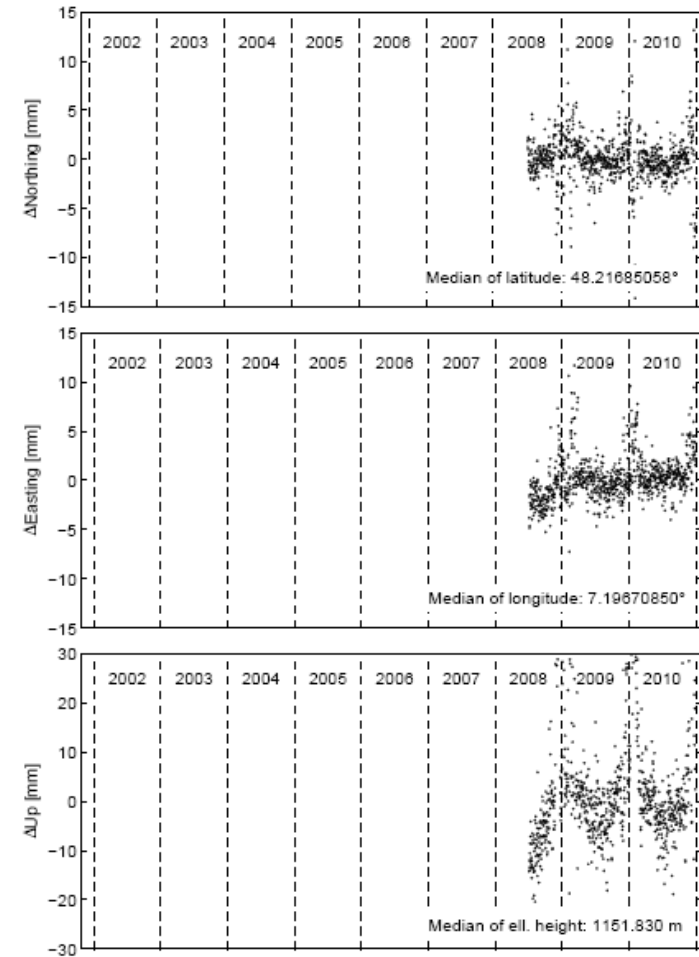
# GURN: Erste Ergebnisse: Zeitreihen

## Site RAVE

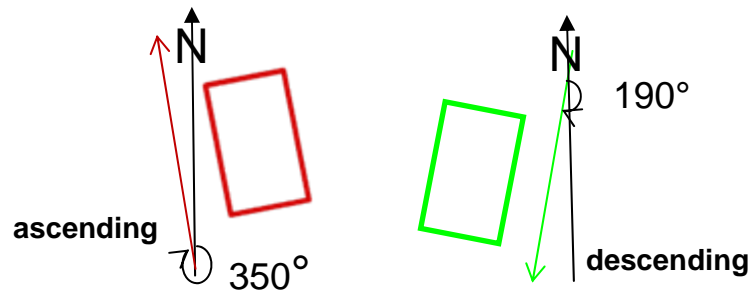
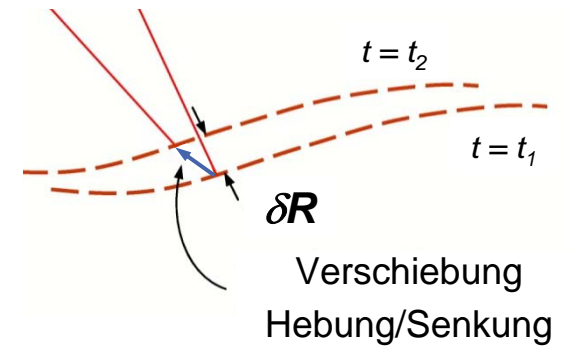
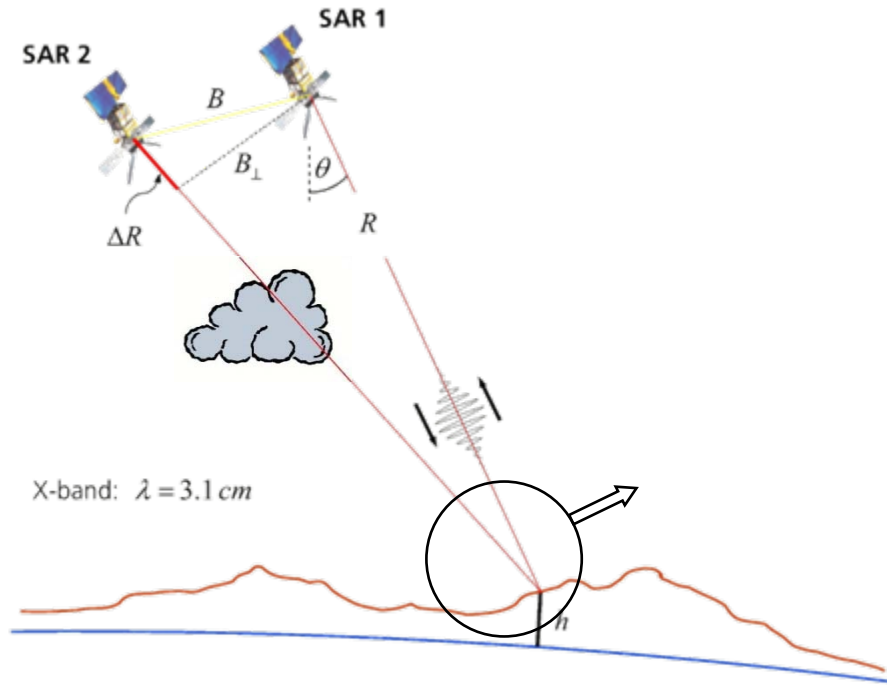


## Site AUBU

Karlsruhe Institute of Technology

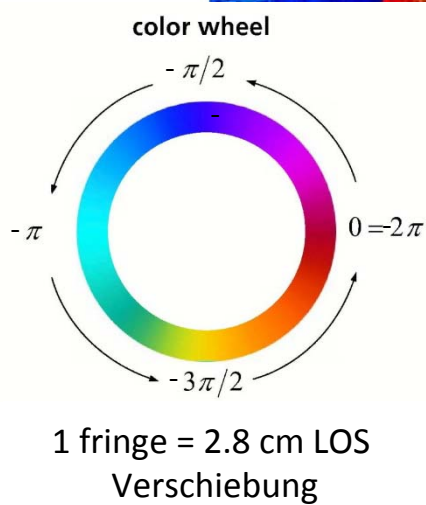
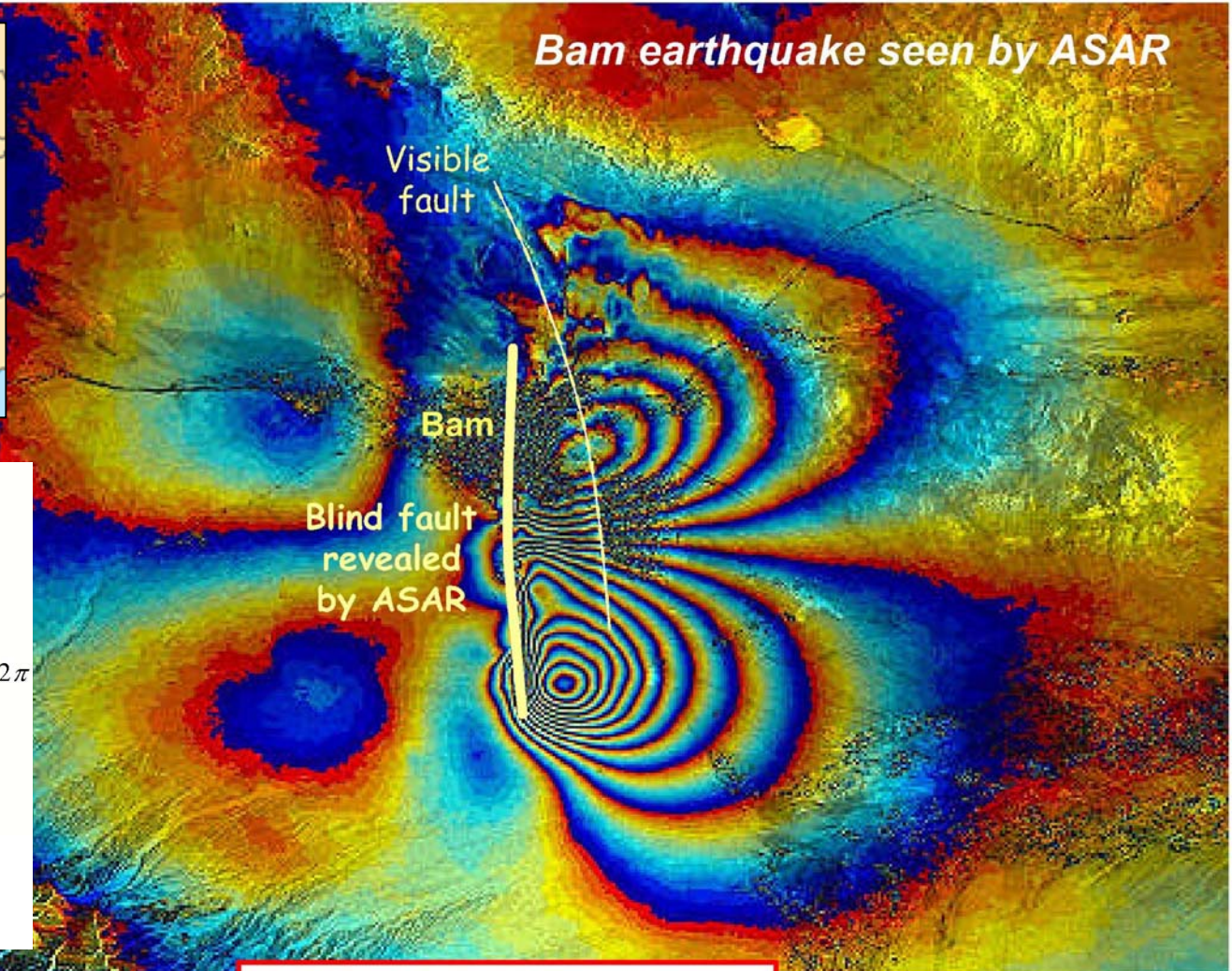


# SAR-Interferometrie



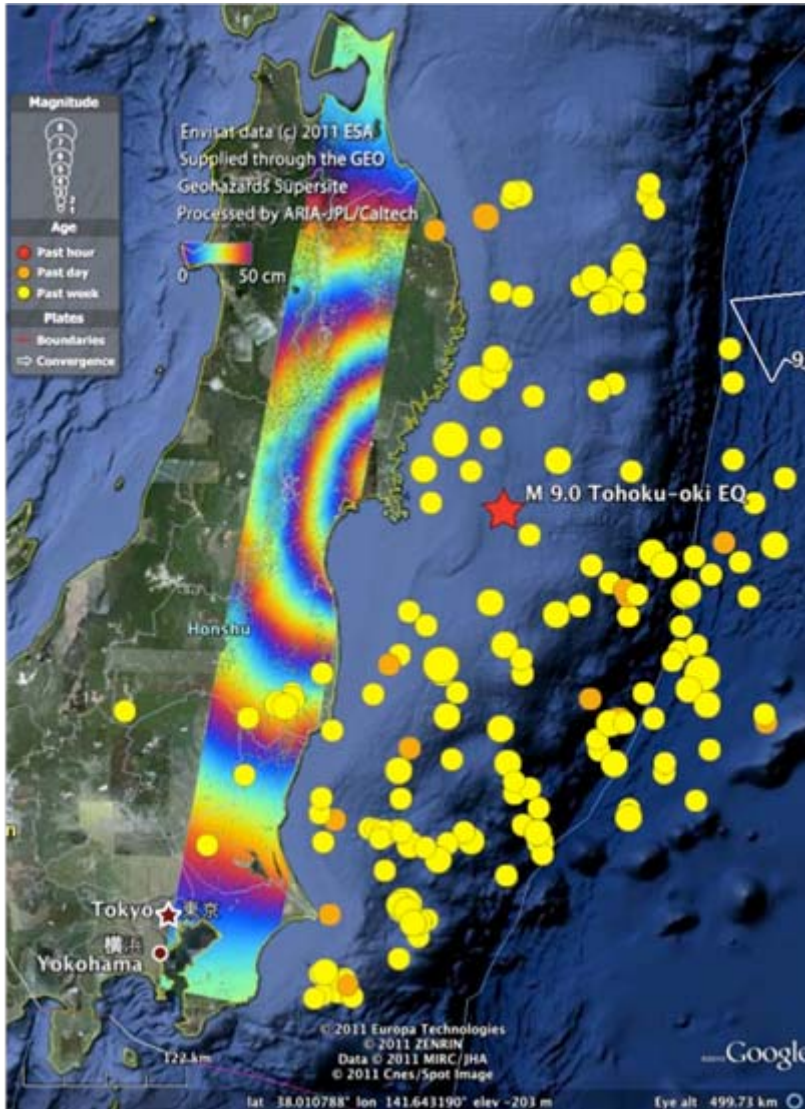


# Beispiel: Bam-Erdbeben, Iran, 26. Dezember 2003



Courtesy of A.Monti-Guarnieri, POLIMI, I

# Beispiel: Honshu-Erdbeben, 11. März 2011



Envisat ASAR Track 347

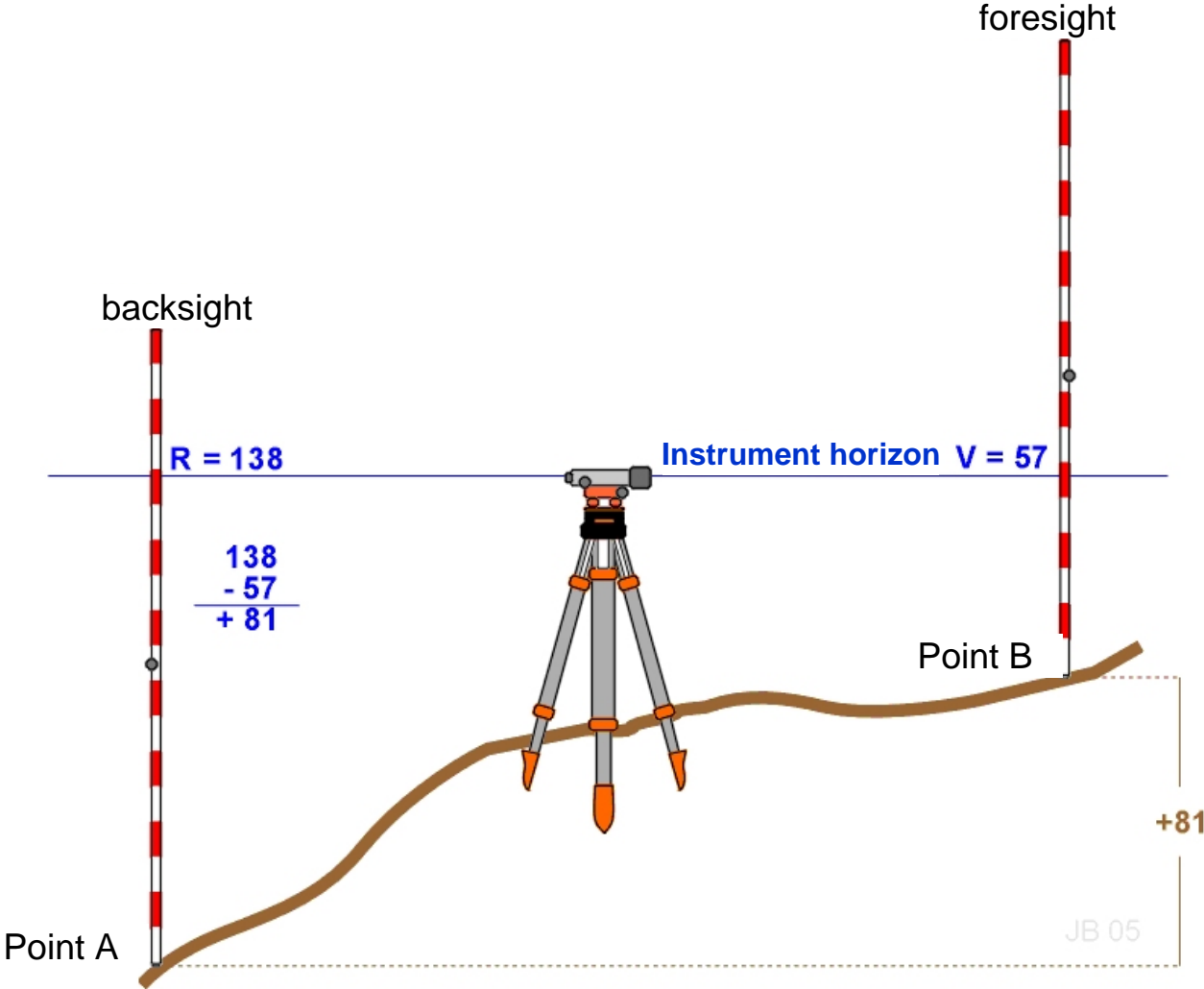
Interferogramm

19.02.11/21.03.11

Ein Farbzyklus entspricht ca. 35  
cm Verschiebung am Boden

Punkte: Seismizität

# Nivellement: Messprinzip



$$dH_{AB} = R - V$$

JB 05

# Modellierung geodynamischer Prozesse

# Grundlegende Annahmen:

- Newtonsche Mechanik//Kontinuumsmechanik

$$\frac{d}{dt}(m \cdot v_i) = \kappa_i \quad i = 1, 2, 3$$

Kleine Geschwindigkeiten; Volumen- und Flächenkräfte

⇒ Differentielle Formulierung

$$\partial_i \sigma_{ij} + \rho f_i = 0$$

$\rho$  Massendichte

$f_i$  spezifische Kraft

$\sigma_{ij}$  Spannungstensor

- Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \partial_i (\rho \cdot v_i) = 0$$

## ■ Rheologie/Stoffgesetze (Stress-Strain-Beziehung)

- Lineare Elastizität → Hookescher Körper

$$\sigma_{ij} = \lambda \cdot \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}$$

$\lambda, \mu$  Lamé-Parameter

$\varepsilon_{ij}$  Verzerrungstensor

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\partial_i u_j + \partial_j u_i) \quad , u_i \text{ Verschiebung}$$

- Maxwell-Rheologie → Biotsches Korrespondenzprinzip,  $\lambda(\omega), \mu(\omega)$   
Viskosität

# Besonderheiten bei geodynamischen Prozessen:

- Hoher Druck, Hooke ungültig

⇒ Gravitativ vorgespanntes Material; Störungsrechnung

Linearisierung bzgl. eines Gleichgewichtszustands

(SNREI)  $\rho_0, \Phi_0$  mit  $\Delta\Phi_0 = -4\pi G\rho_0$

Inkrementelle Größen  $\rho_1, \Phi_1$

$$\partial_i \sigma_{ij} - \partial_i (\rho_0 g_o u_r) + \rho_1 \partial_i \Phi_0 + \rho_0 \partial_i \Phi_1 + \rho_0 \partial_i \Phi_e = 0$$
$$\Delta\Phi_1 = -4\pi G\rho_1$$

4 Dgln. 2.0. ⇒ 3 Komponenten des Verschiebungsvektors

- Reibungsgleiten an Verwerfungsflächen

Gesetz von ByerLee

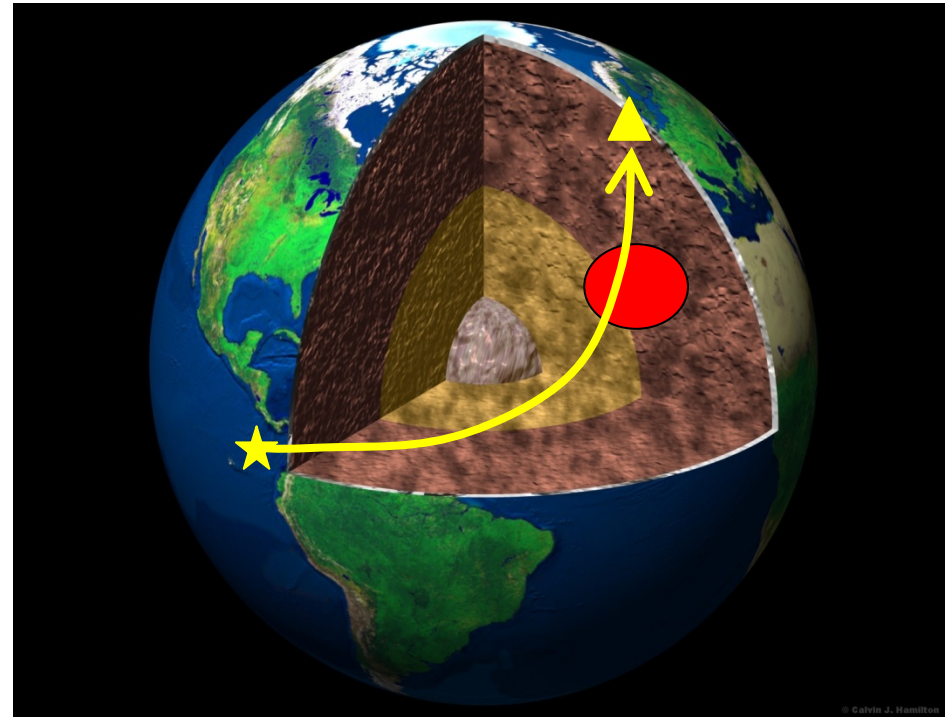
- Bruchverhalten von Gesteinen

Mohr-Coulomb-Kriterium

- Strukturen aus Geologie bzw. seismischer Tomographie

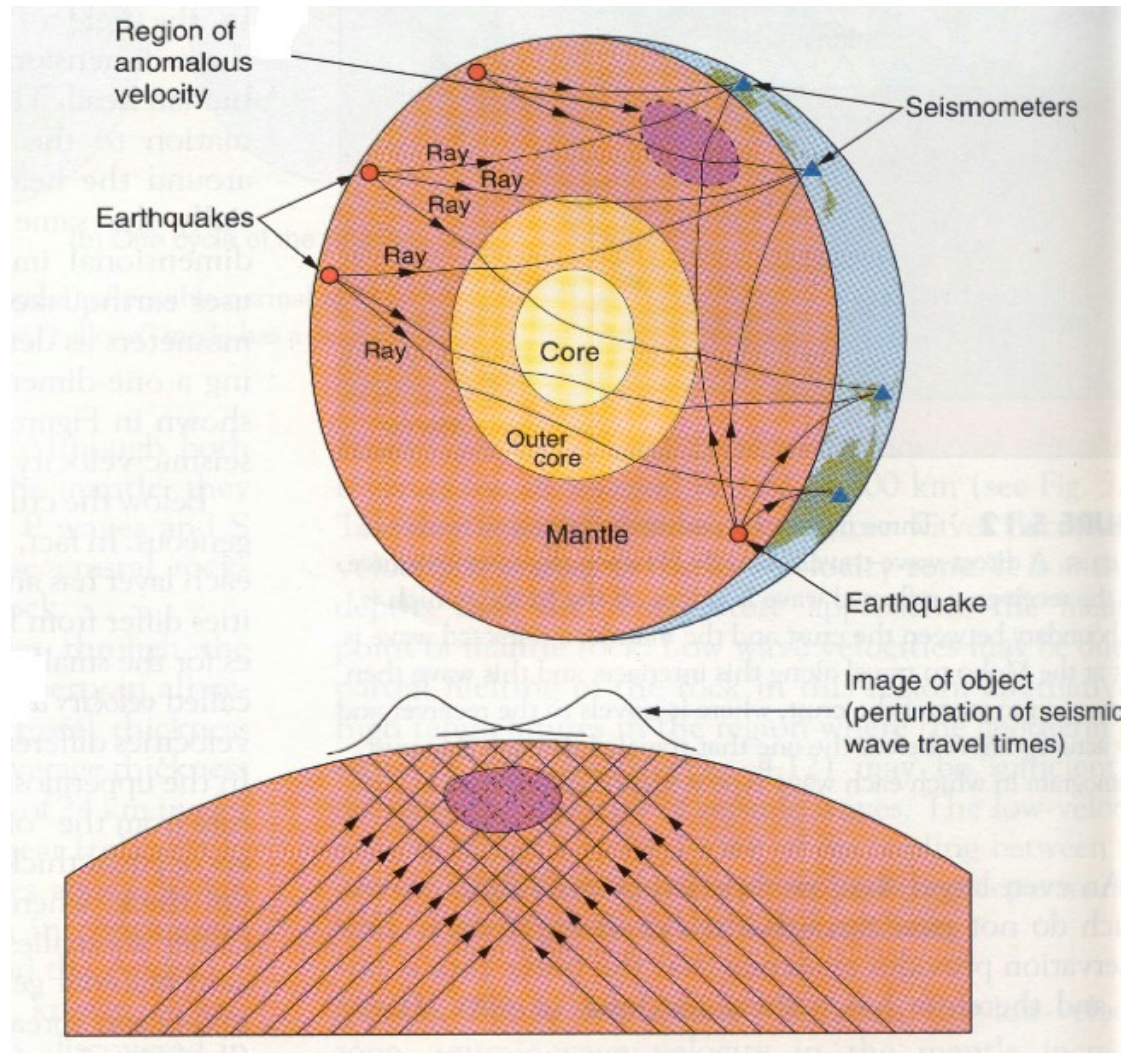
# Seismische Tomographie

- Ähnlich der medizinischen Tomographie:  
Wie sehen Strukturen dreidimensional im Erdinneren aus
- Quelle: Erdbeben oder Sprengungen
- Empfänger: Erdbeben-Messstationen
- Physikalische Größe:  
Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$   
der seismischen Wellen
- Tomogramme zeigen  
Abweichungen von  $v$   
relativ zu einem  
1D Standarderdmodell





# Strukturbestimmung mittels seismischer Tomographie



## **Erstes Beispiel: Geomechanisches Modell im Bereich des Marmara-Meeres**

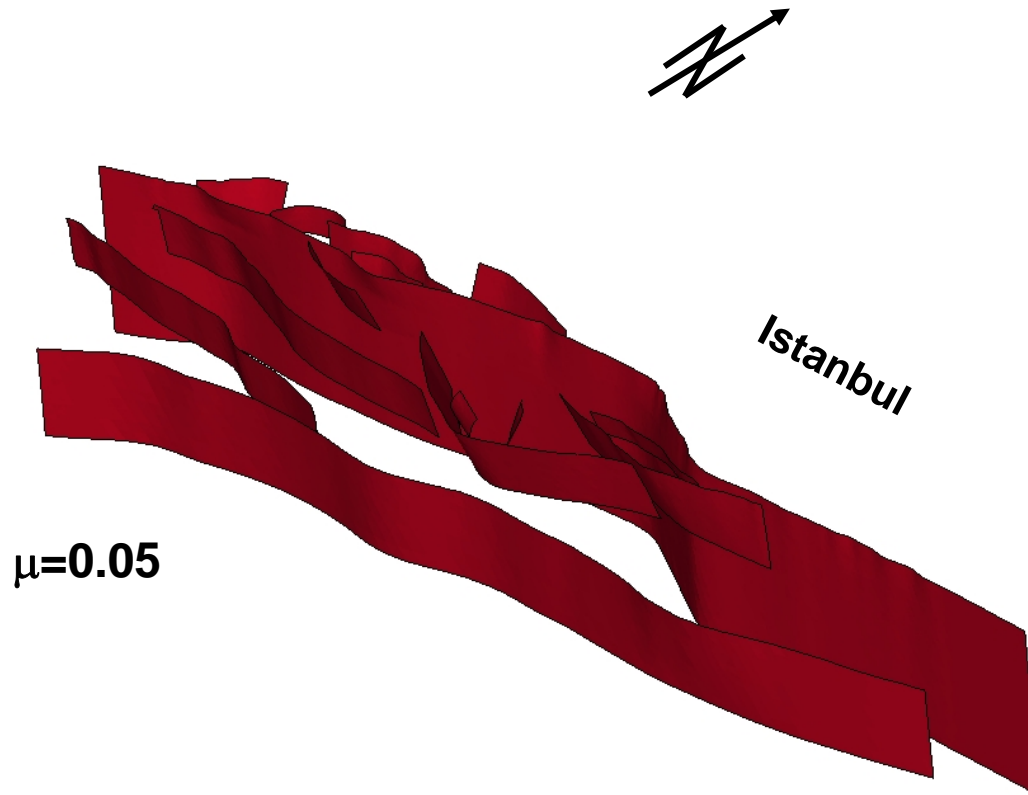
Hergert, T.; Heidbach, O.:

Slip-rate variability and distributed deformation in the Marmara Sea fault system.  
Nature geoscience, online publ. 17 January 2012, doi: 10.1038/NGEO739

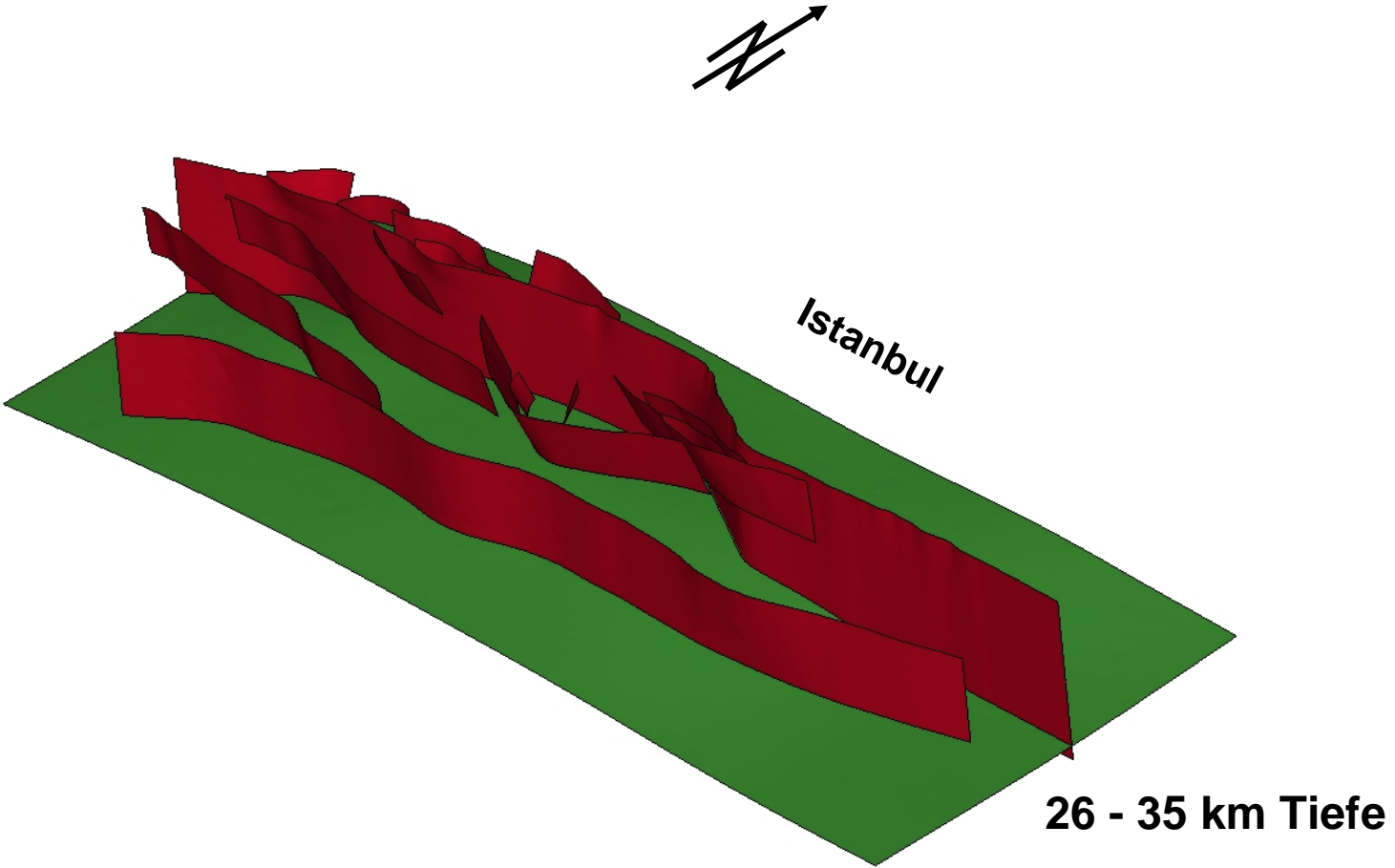
Hergert, T.; Heidbach, O.; Becel, A.; Laigle, M.:

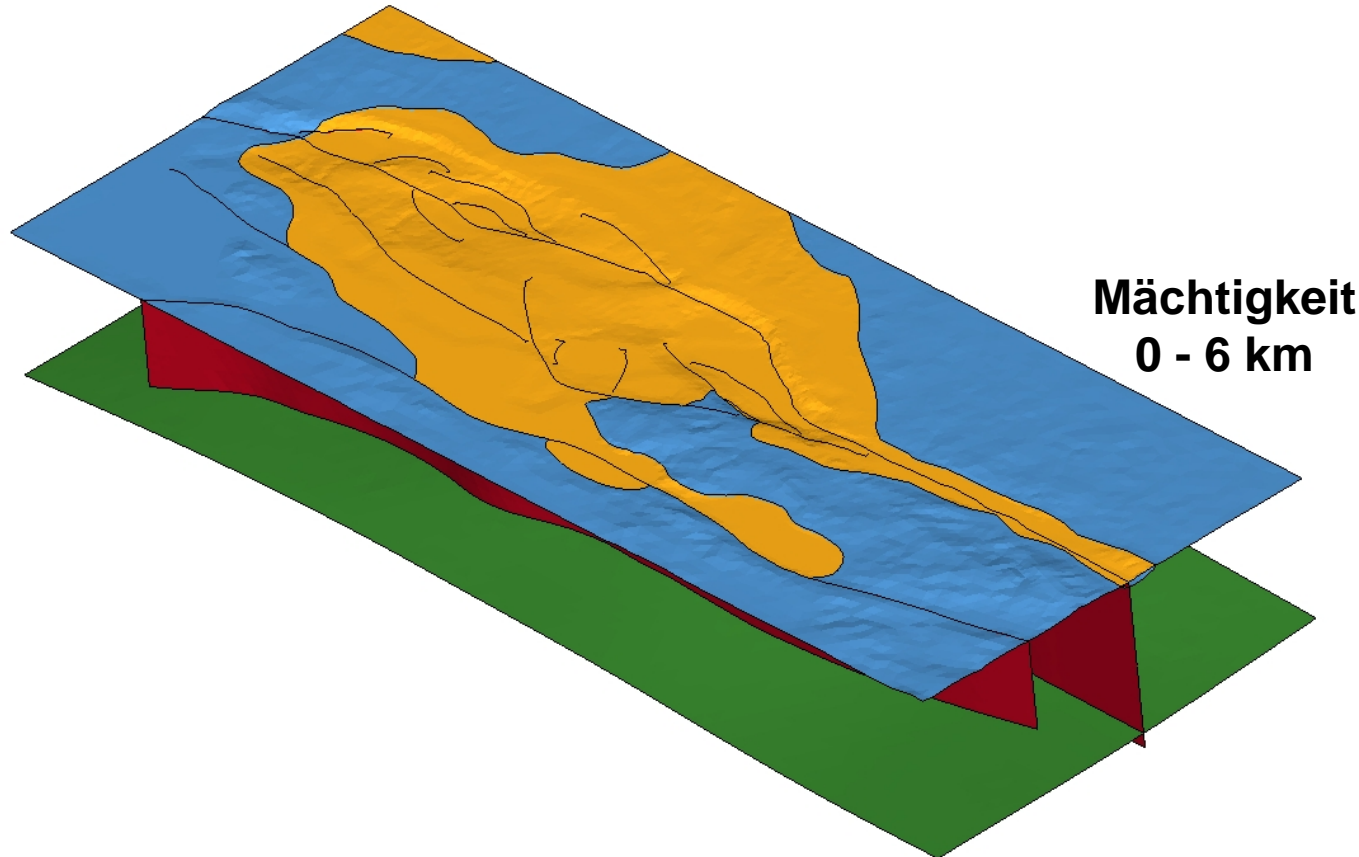
Geomechanical model of the Marmara Sea region – I. 3-D contemporary kinematics.  
Geophysical Journal International, 2011. doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.04991.x

# Modell Geometrie - Störungssystem

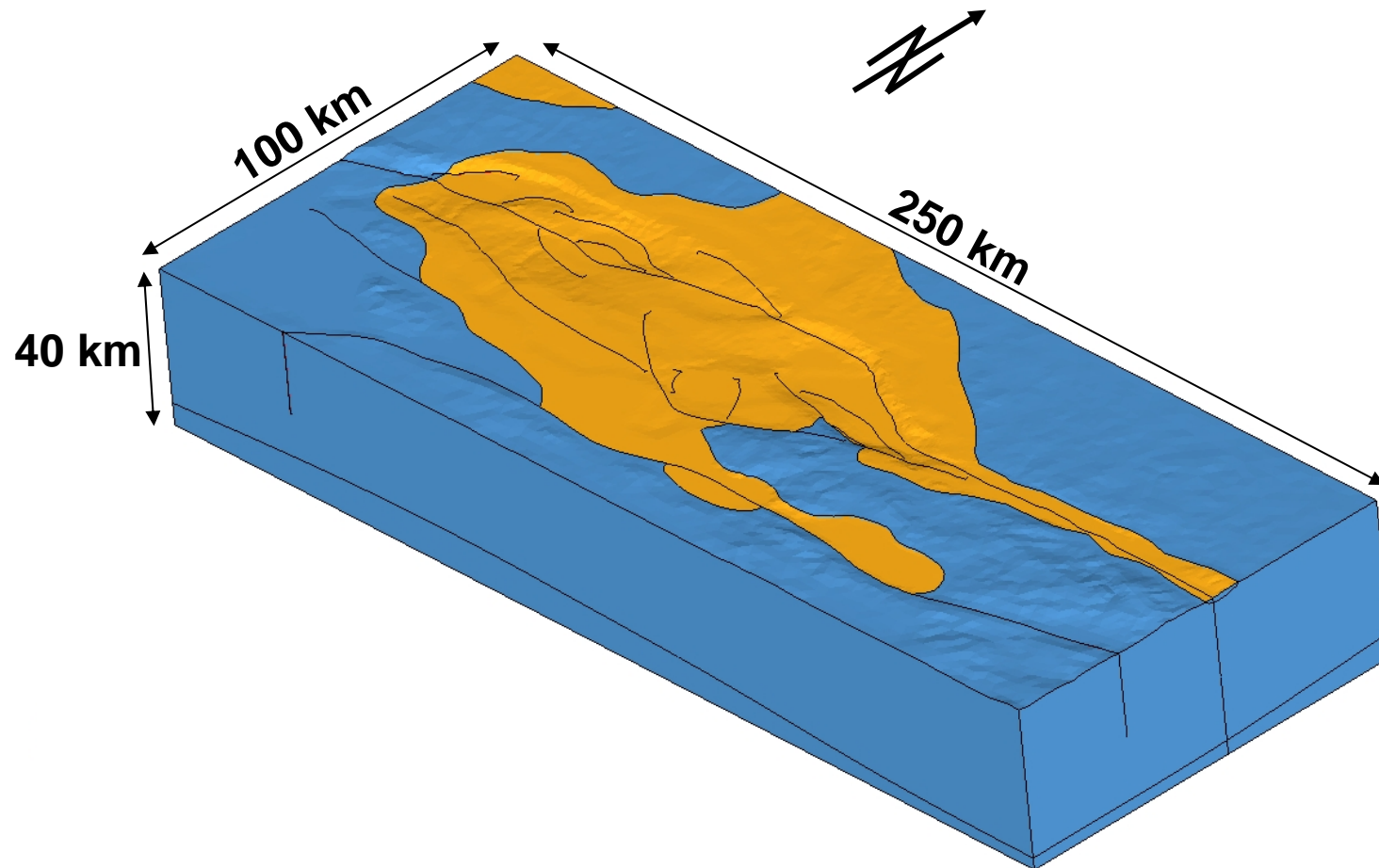


# Modell Geometrie - Moho

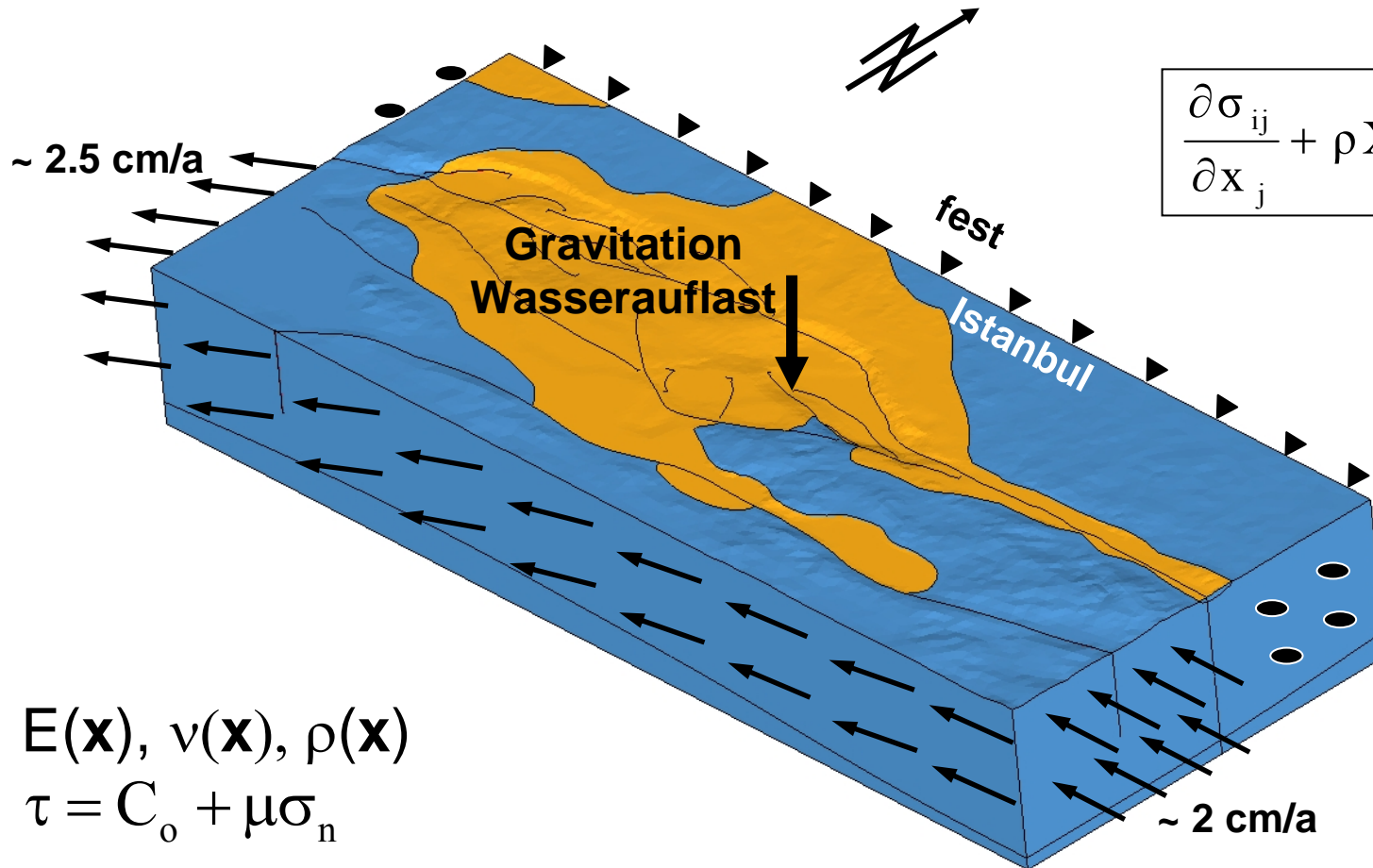


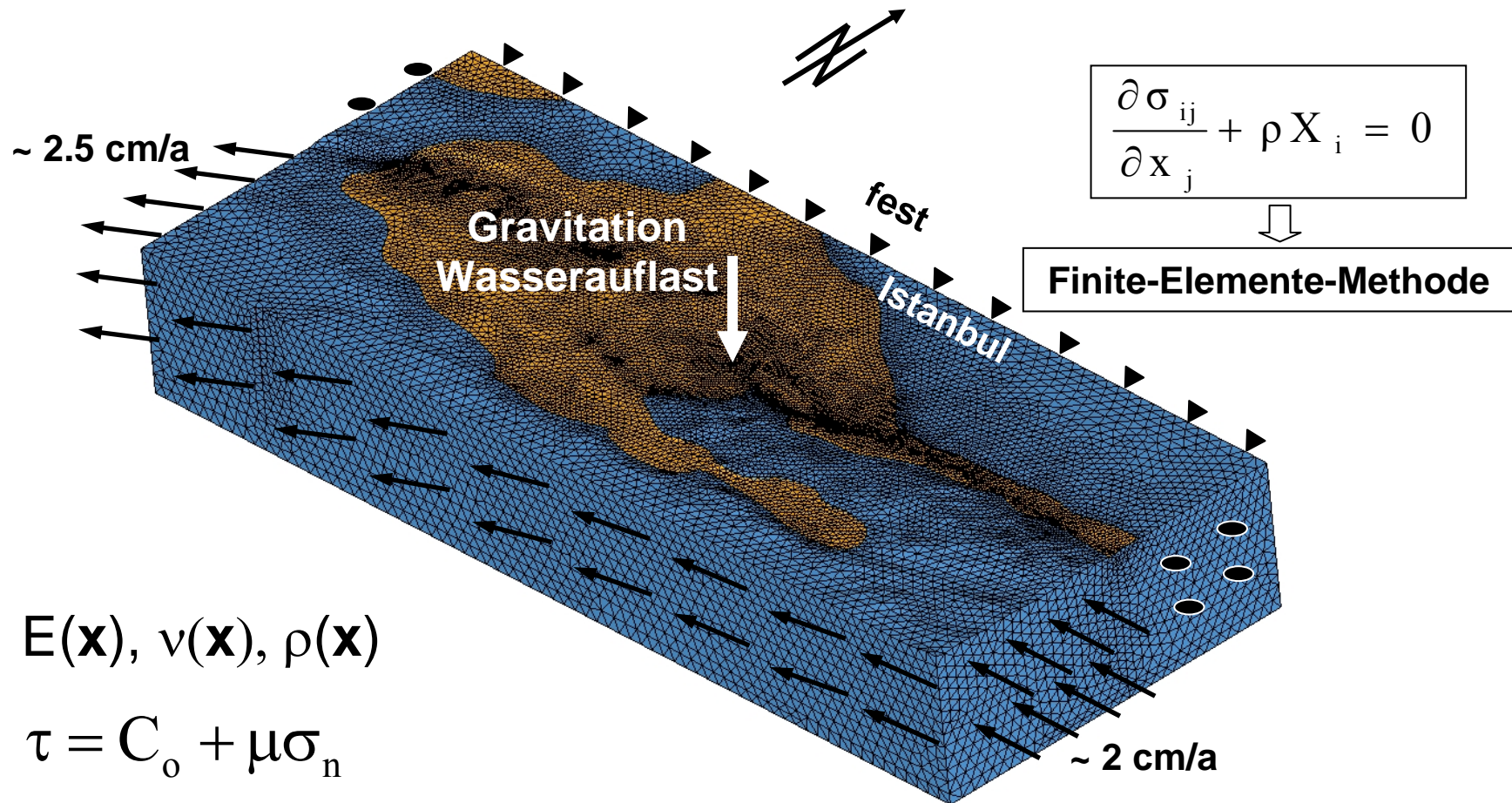


# Modell Geometrie – Modellränder



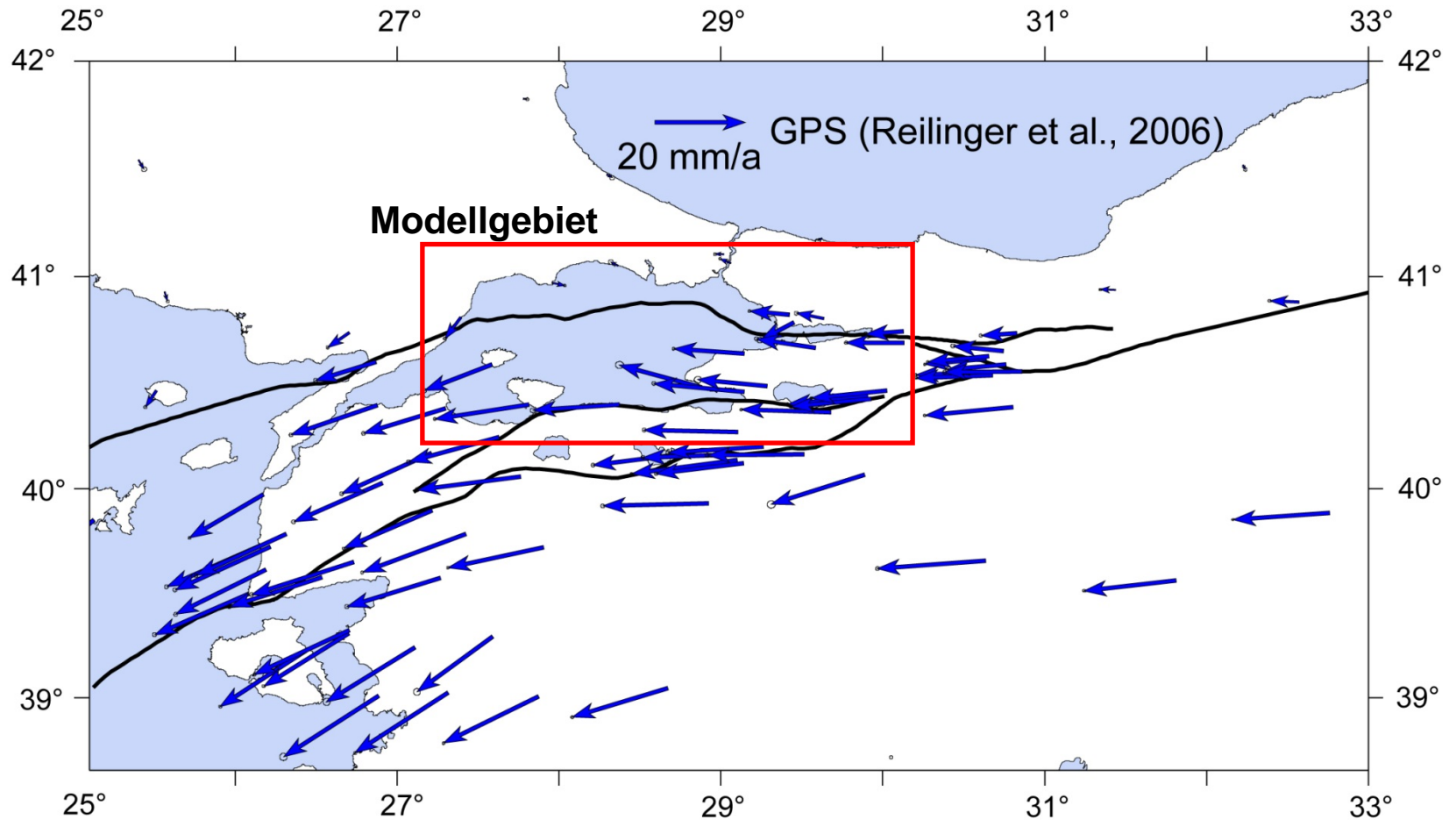
# Lasten & Randbedingungen



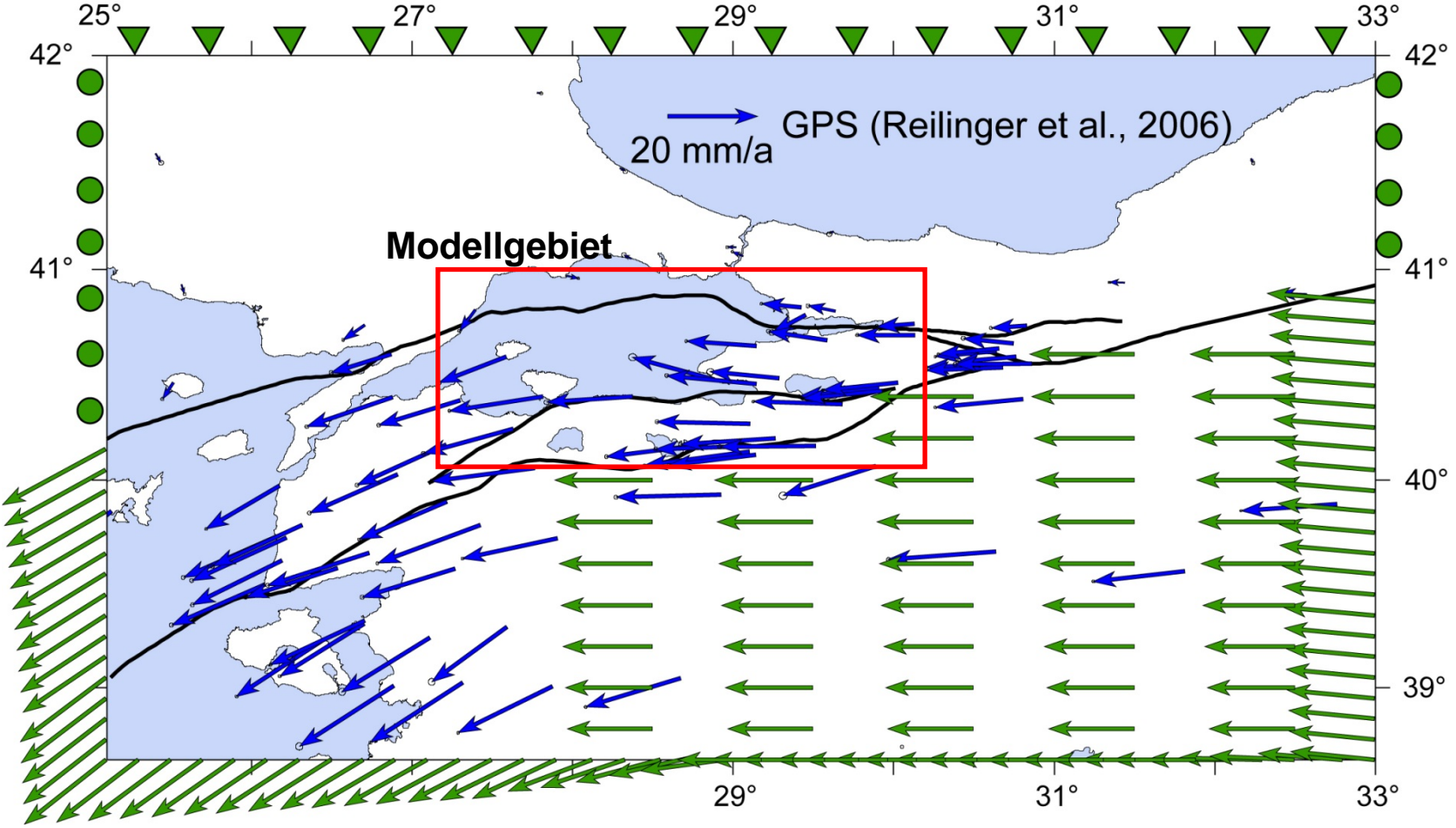




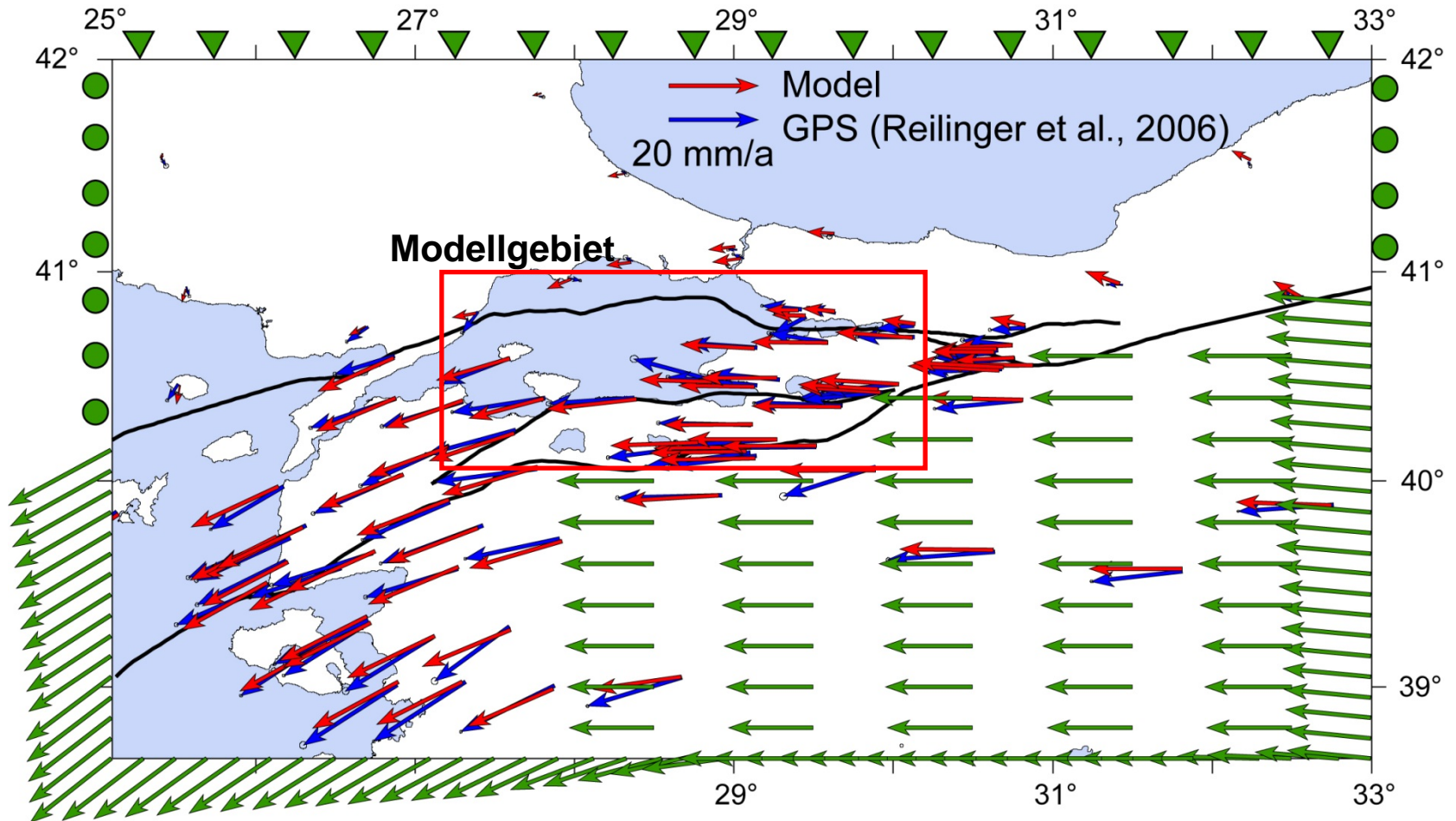
# Kinematische Randbedingungen



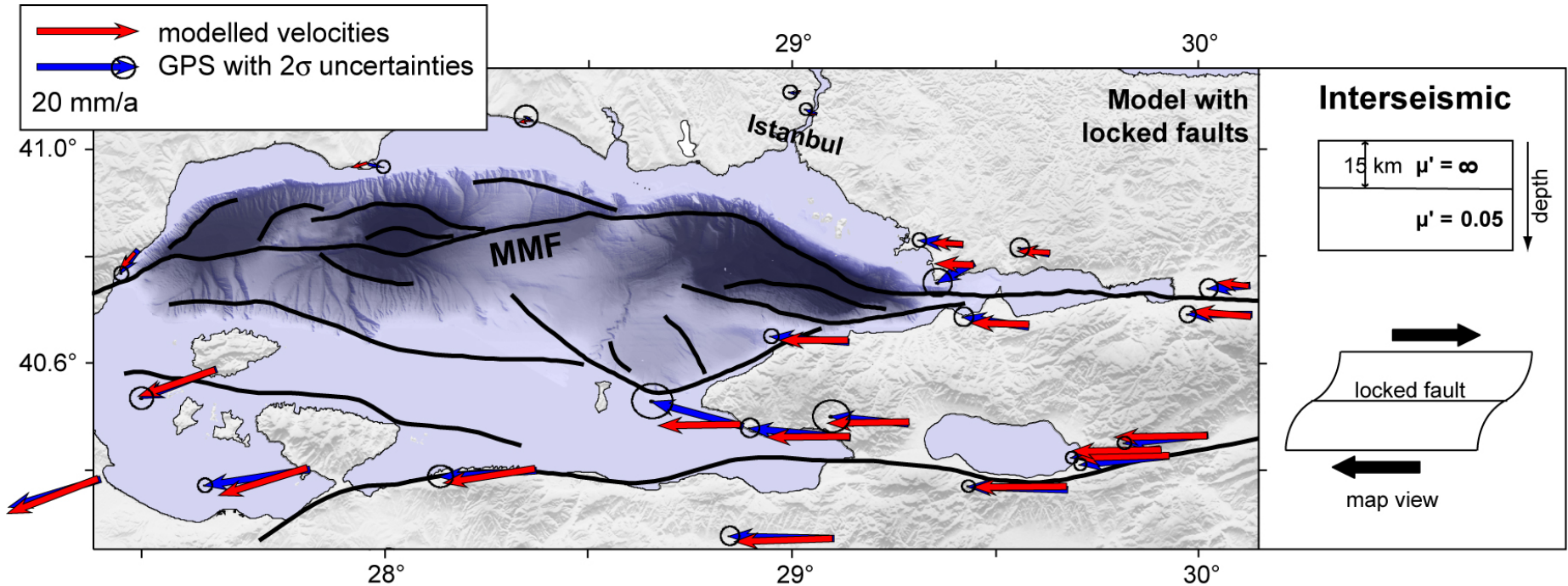
# Kinematische Randbedingungen



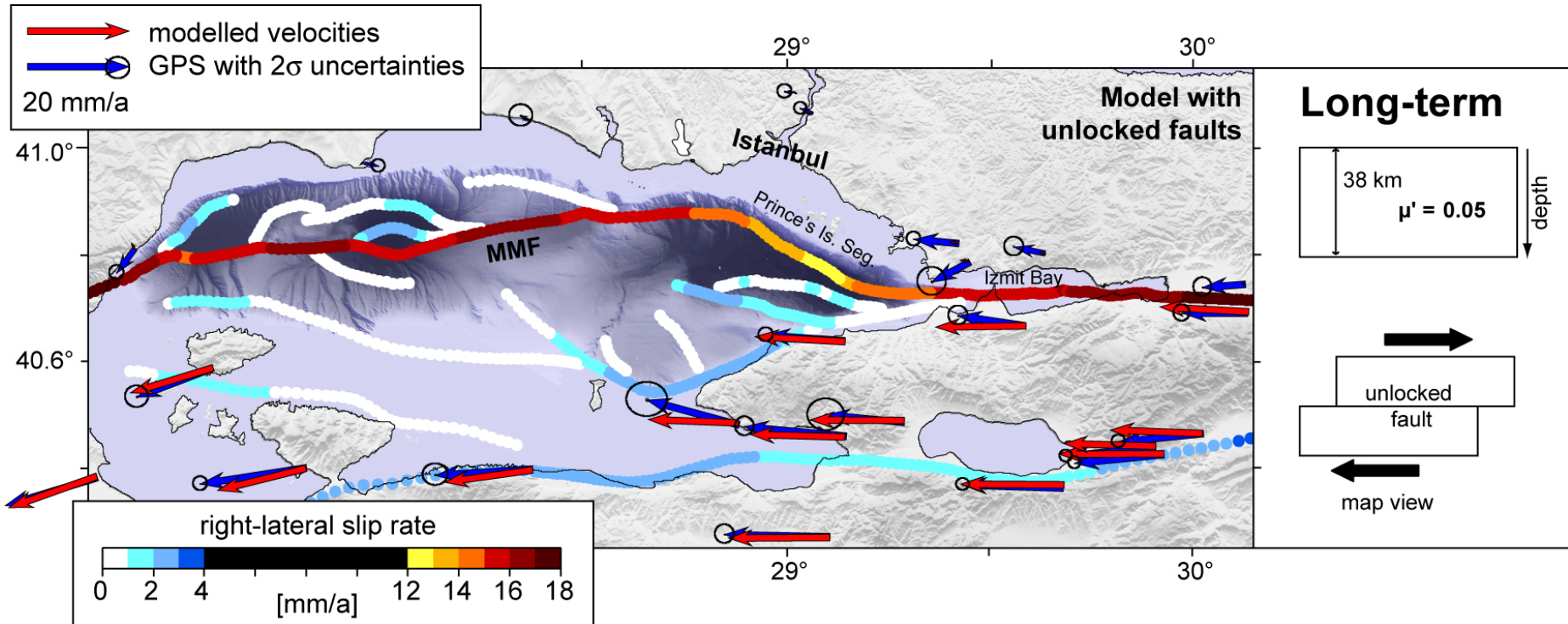
# Kinematische Randbedingungen



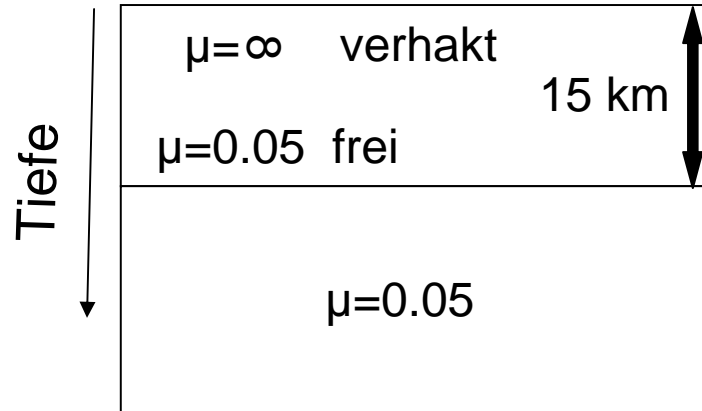
# Modelliertes vs. beobachtetes Geschwindigkeitsfeld



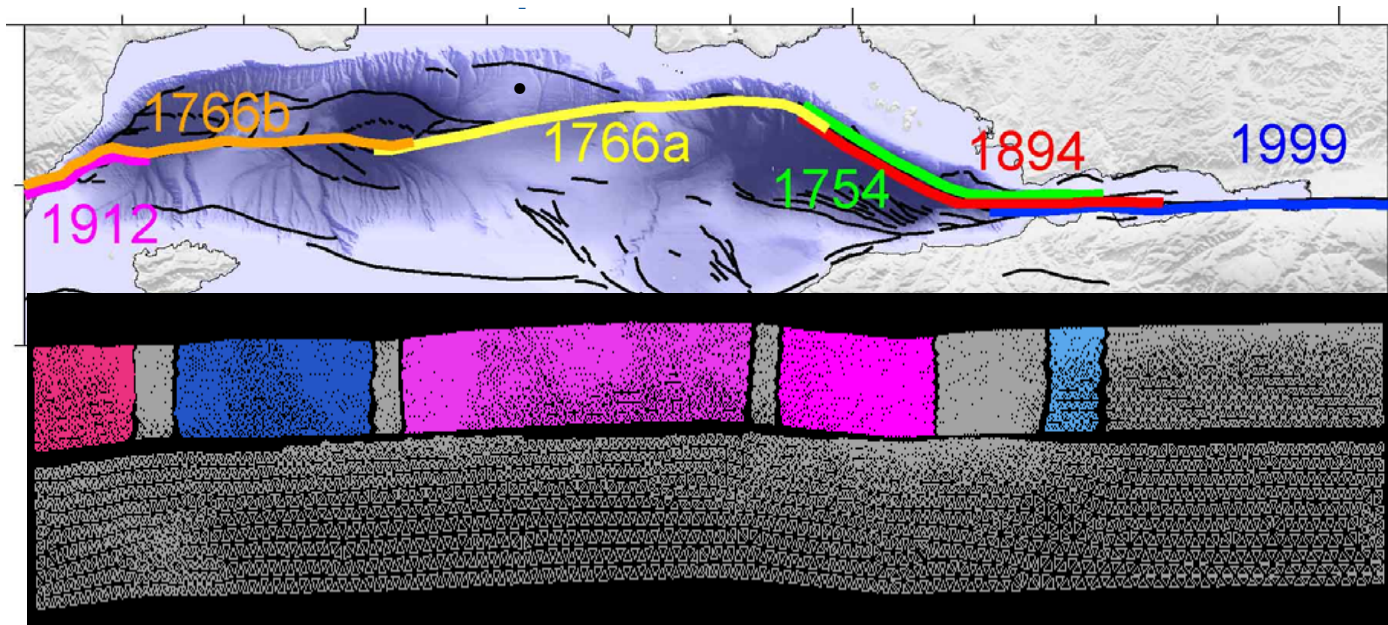
# Relativbewegung an den Störungen



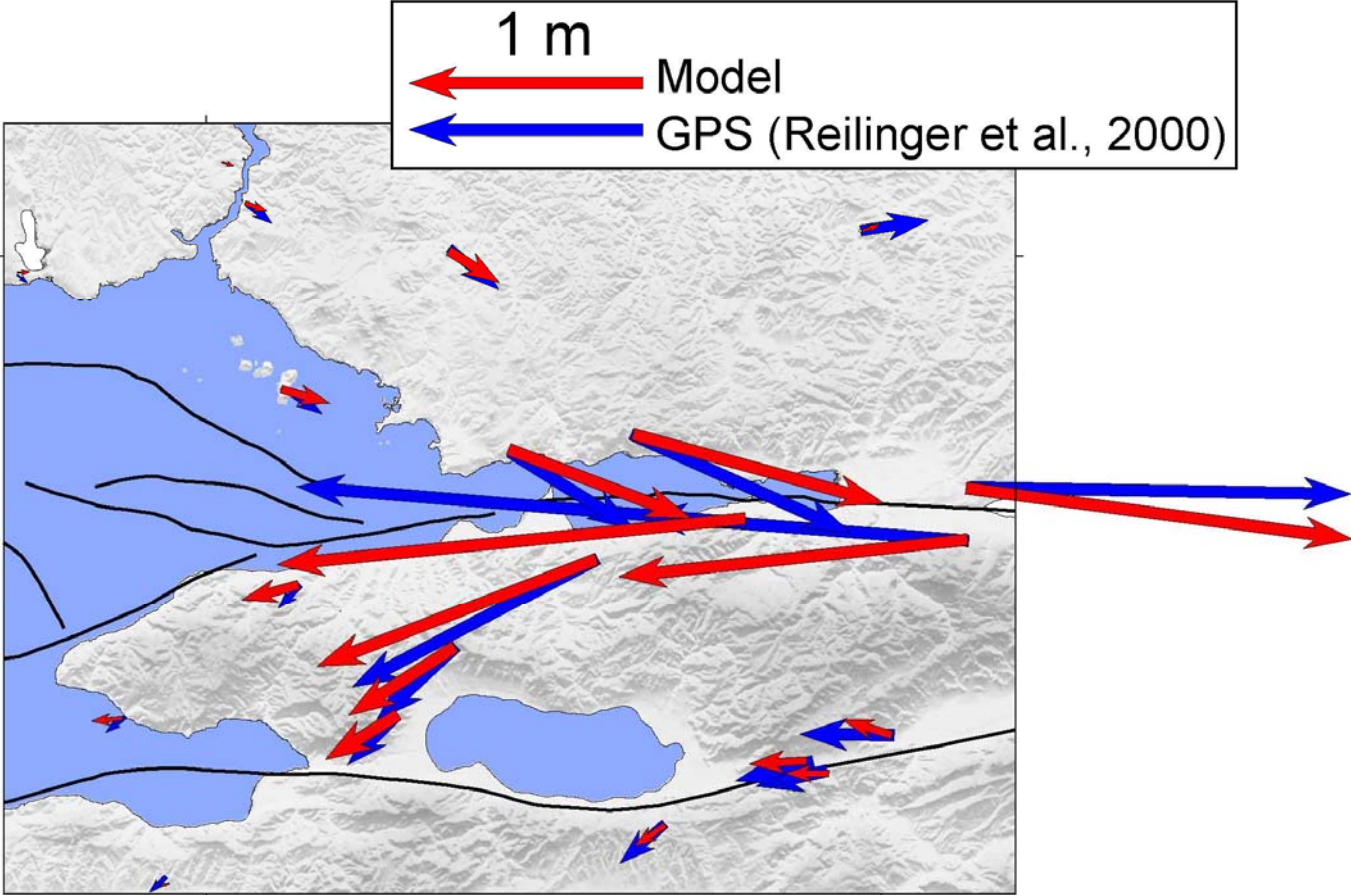
# Einfügen des seismischen Zyklus



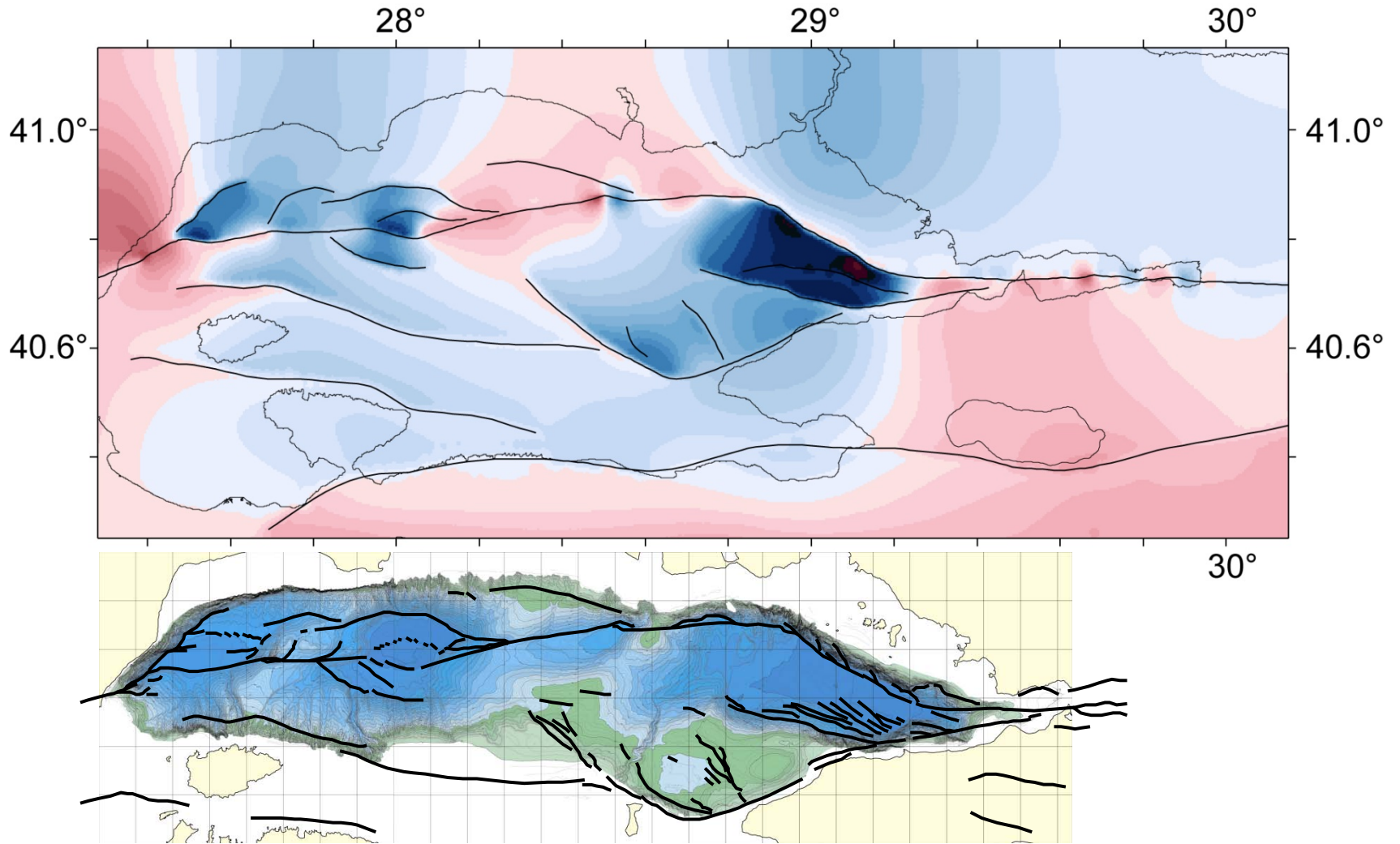
- Verhaken ab 1719 ( $\mu = \infty$ )
- Kontinuierliche kinematische RB.
- Zwischenzeitl. Freilassen der angesammelten Scherspannung zu Zeiten von historischen Erdbeben an den entsprechenden Störungssegmenten ( $\mu = 0.05$ )
- Direkt danach wieder Verhaken



# Izmit Erdbeben 1999



# Vertikalbewegung

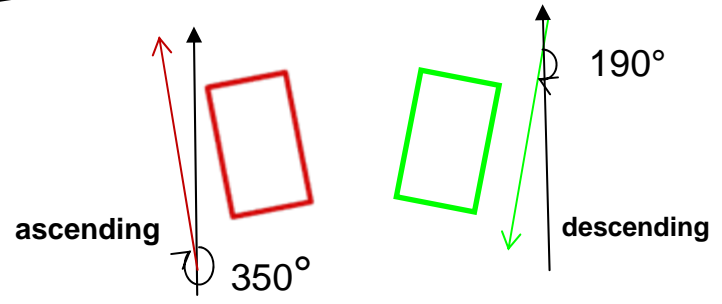
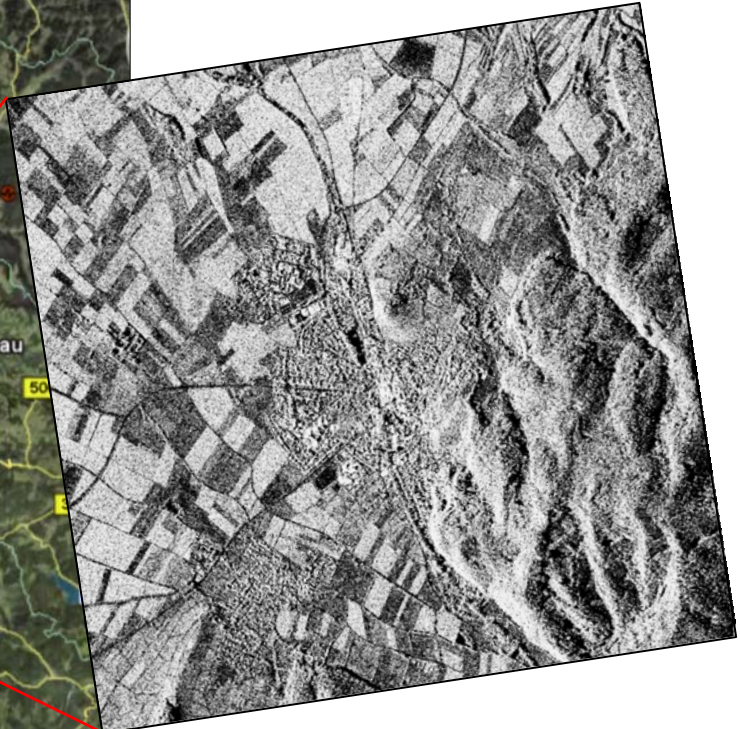
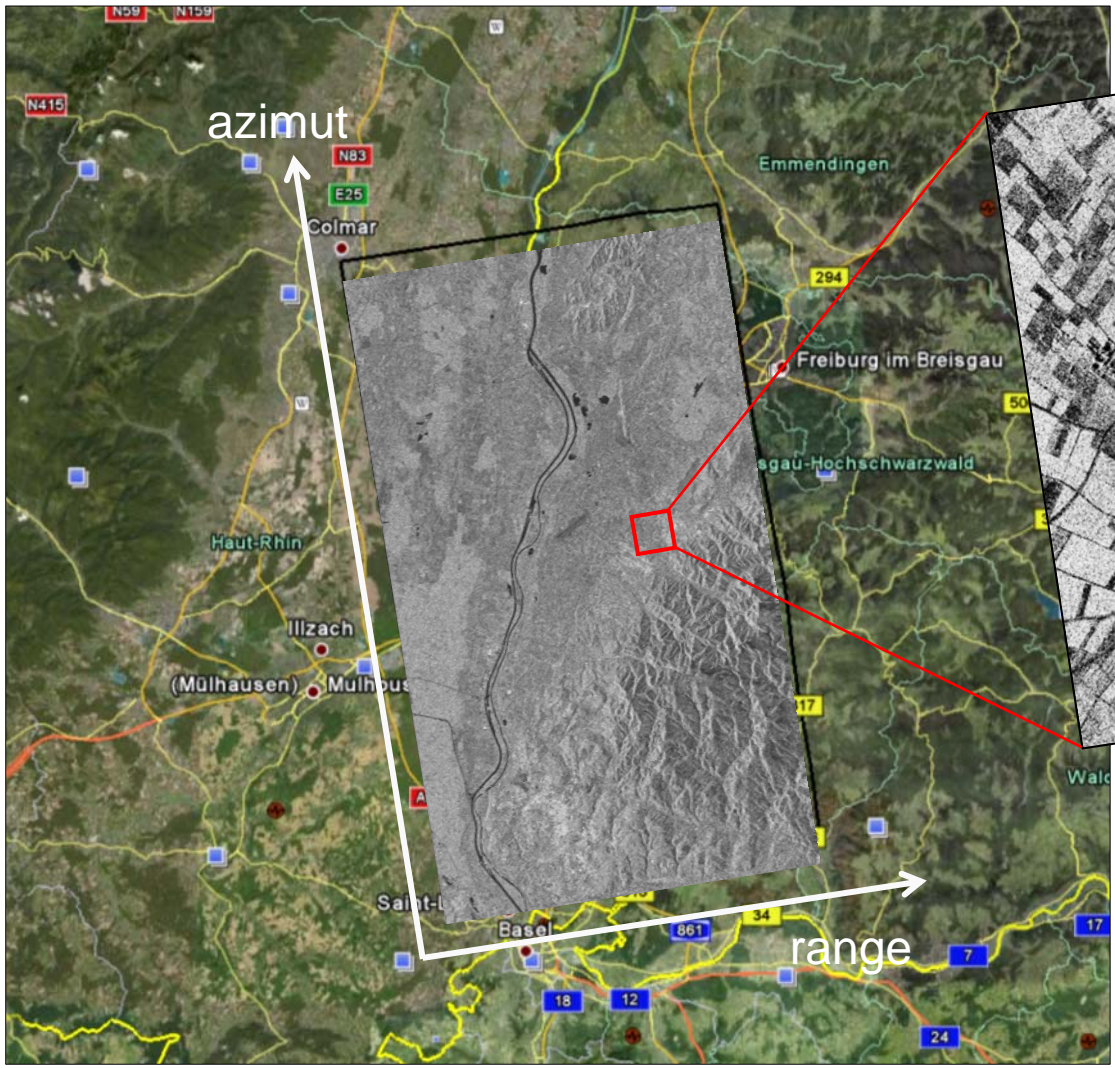




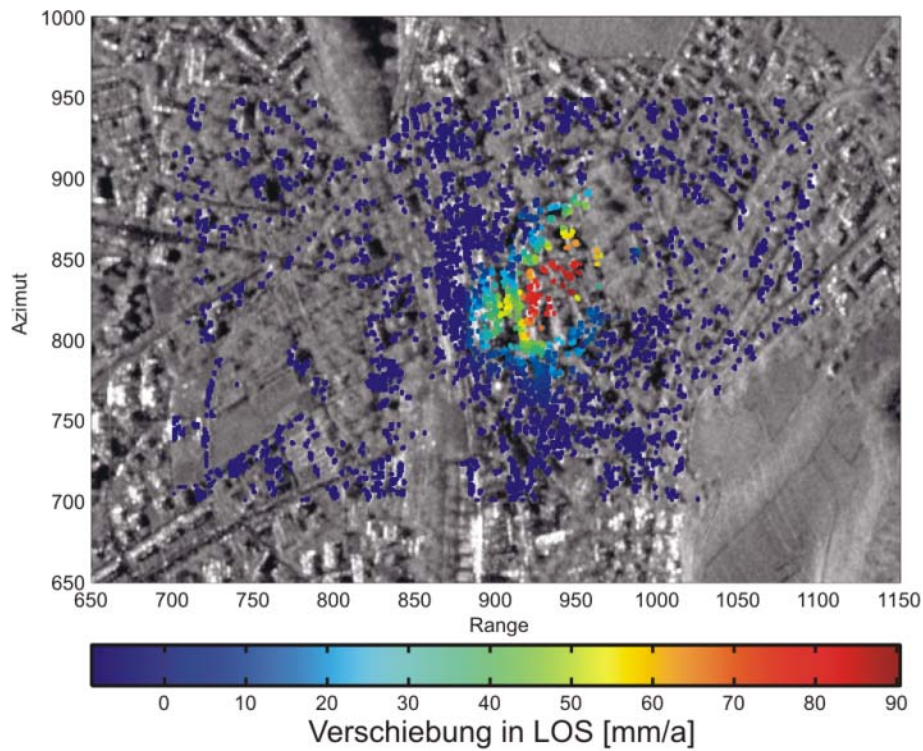
## Zweites Beispiel: Staufen



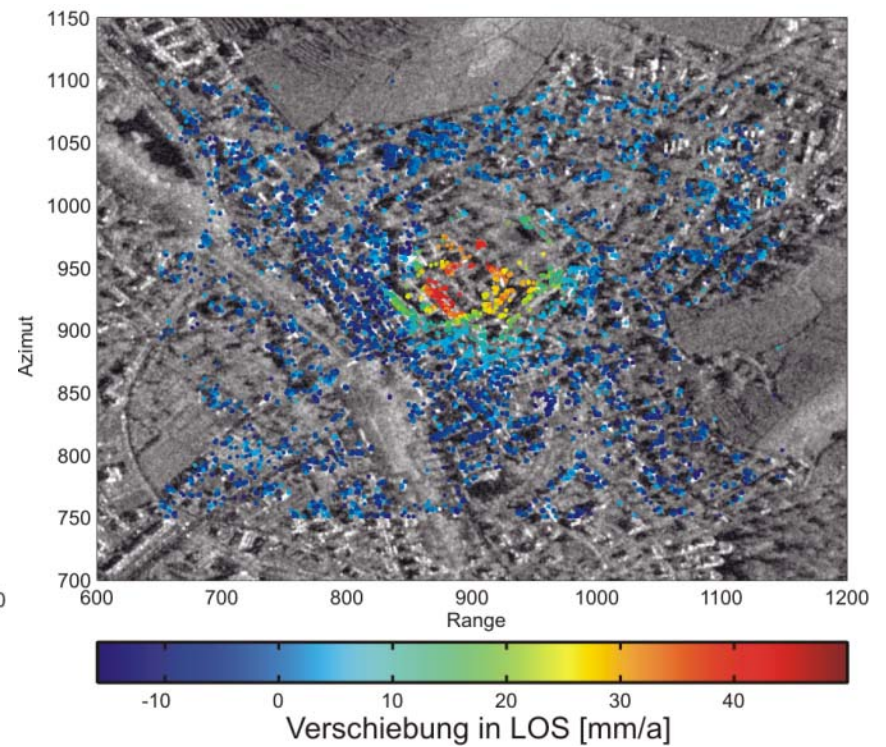
# Lage SAR-Szenen



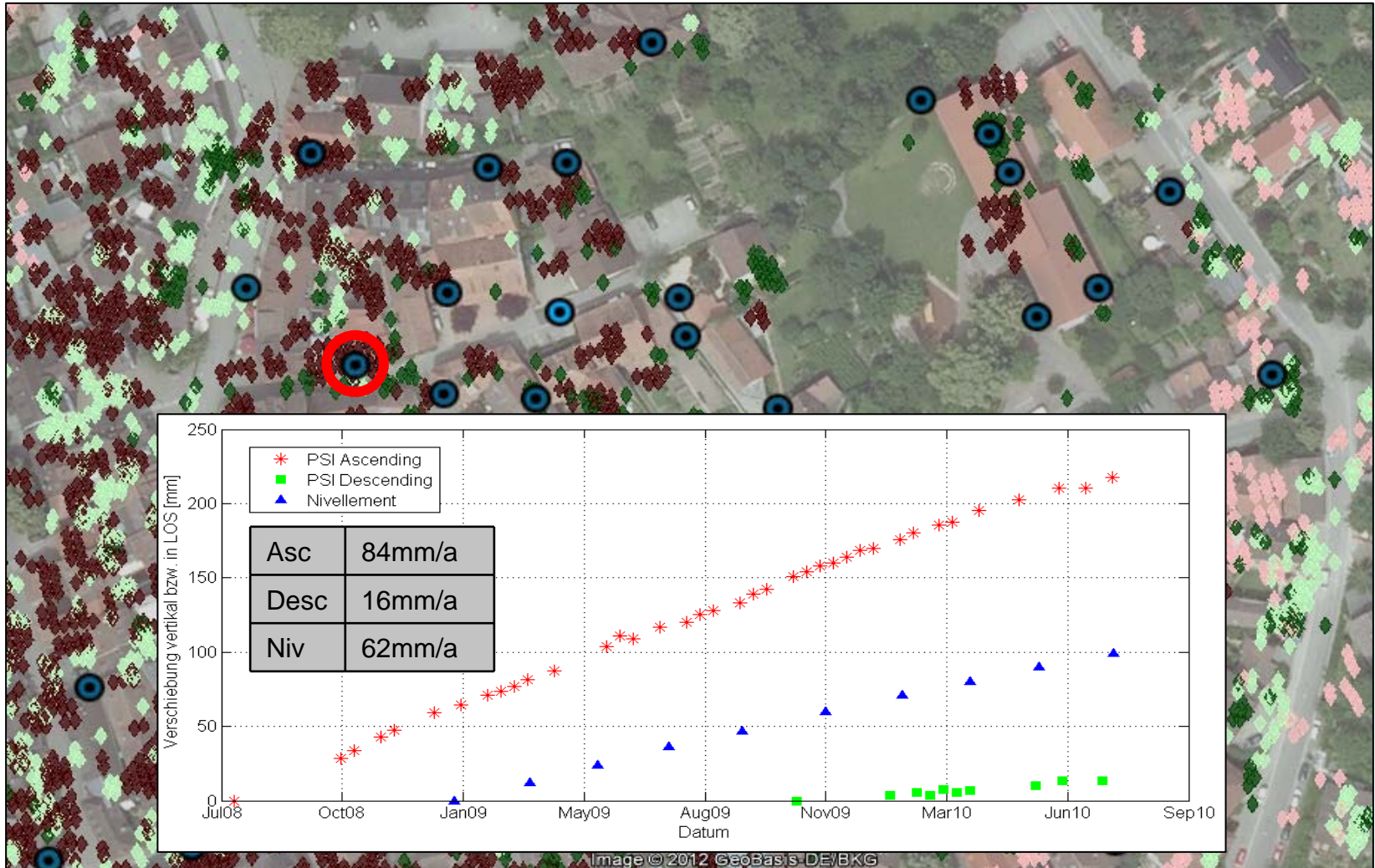
## Ascending



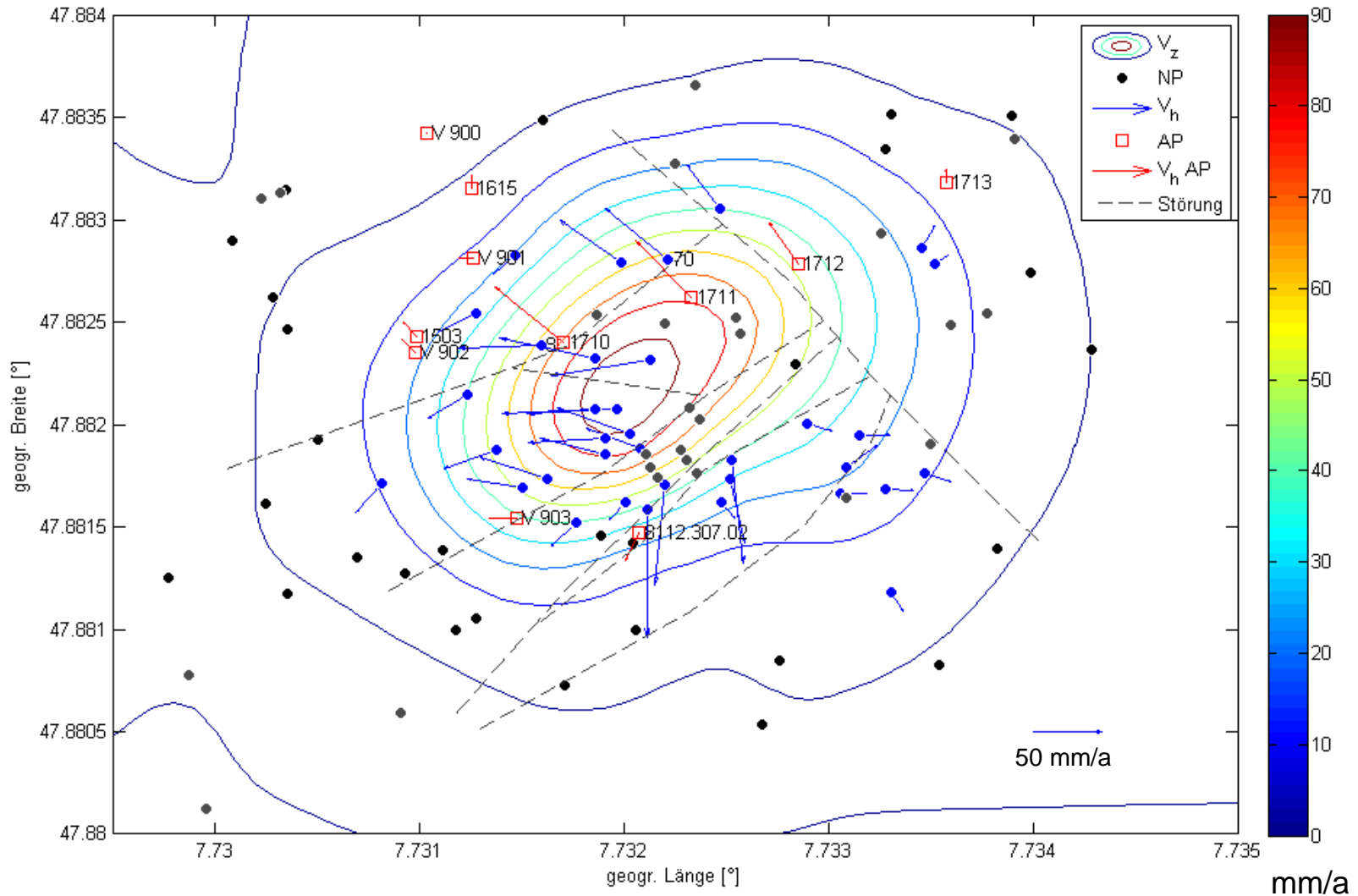
## Descending



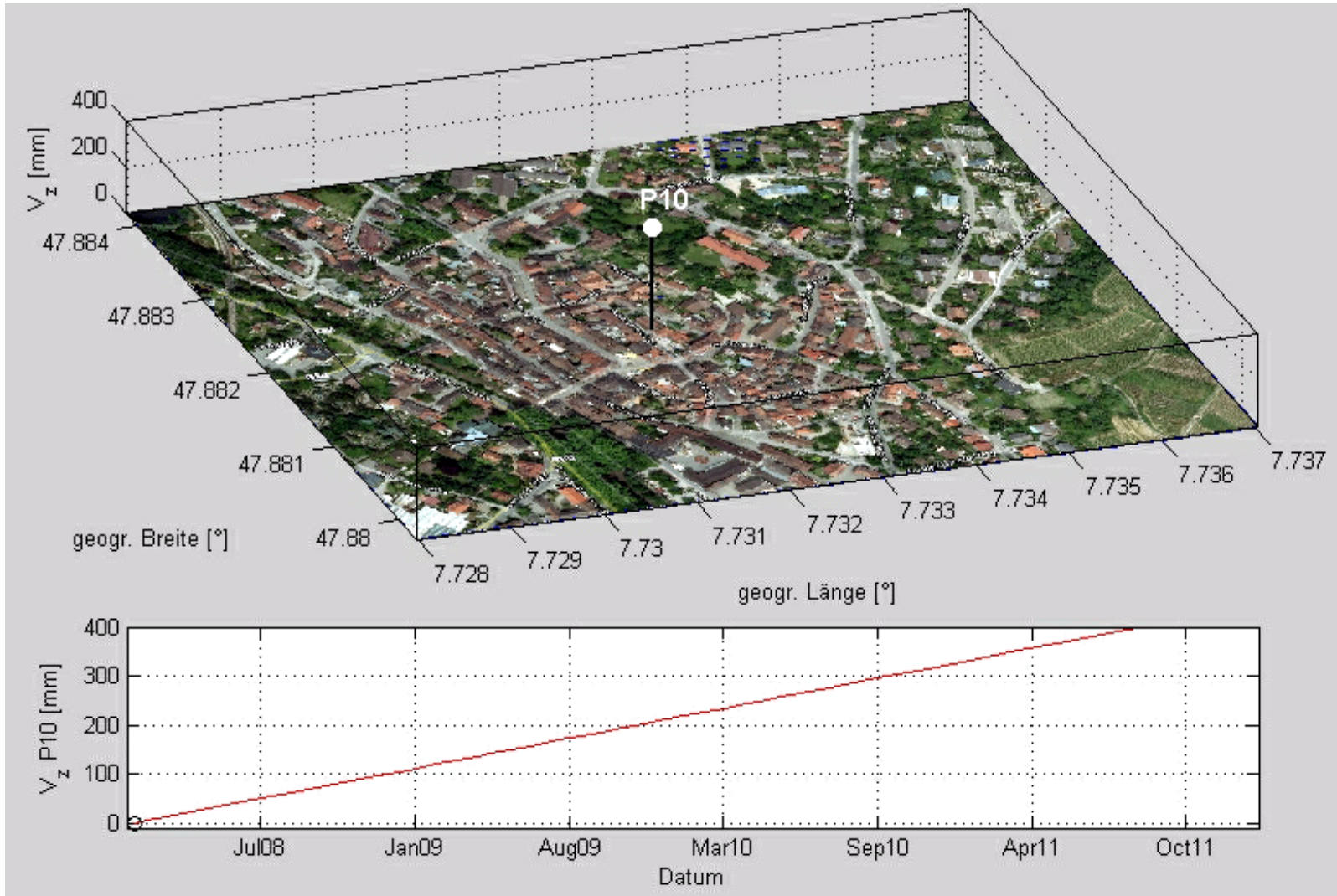
# PSI + Nivellement



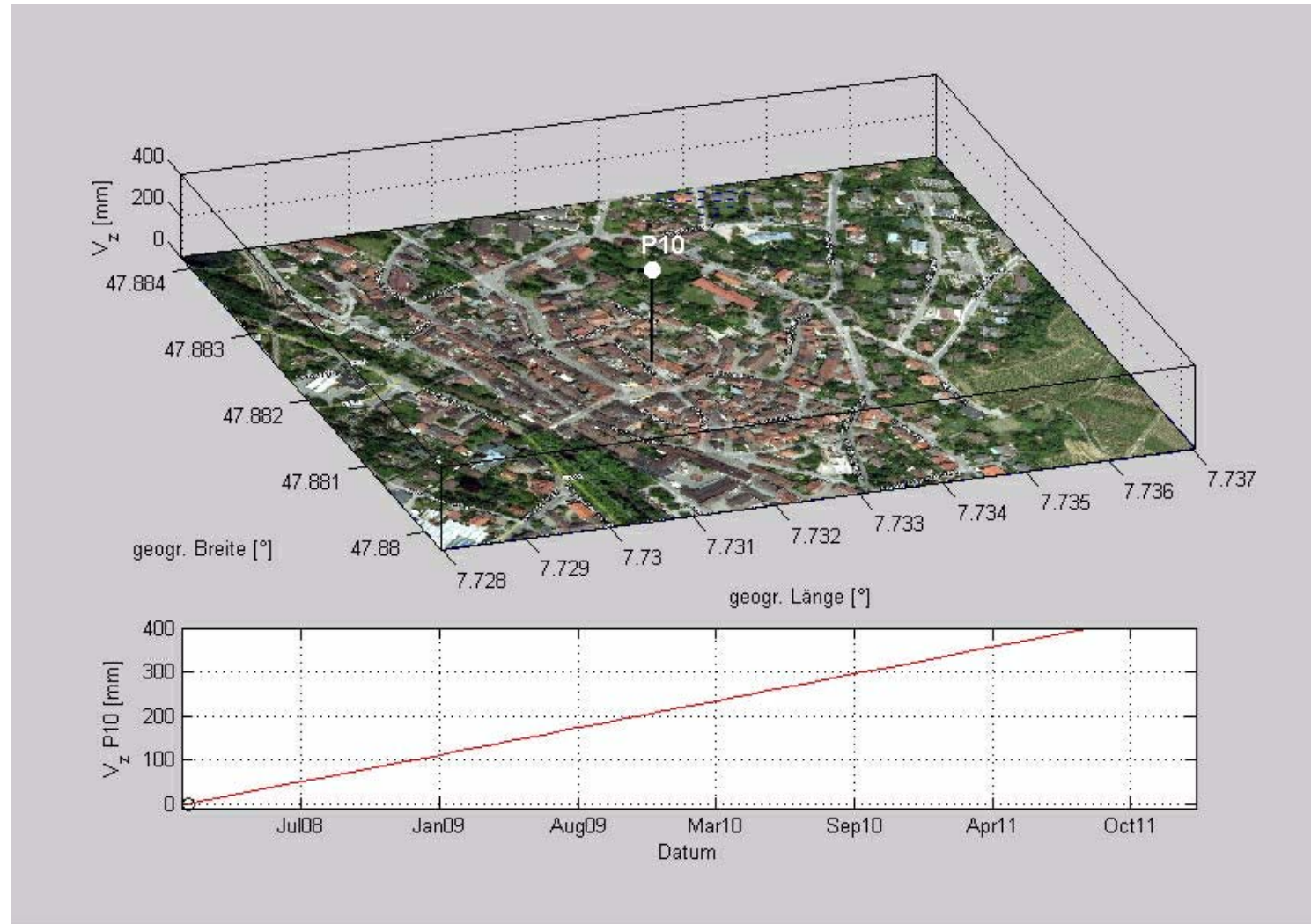
# Ergebnis



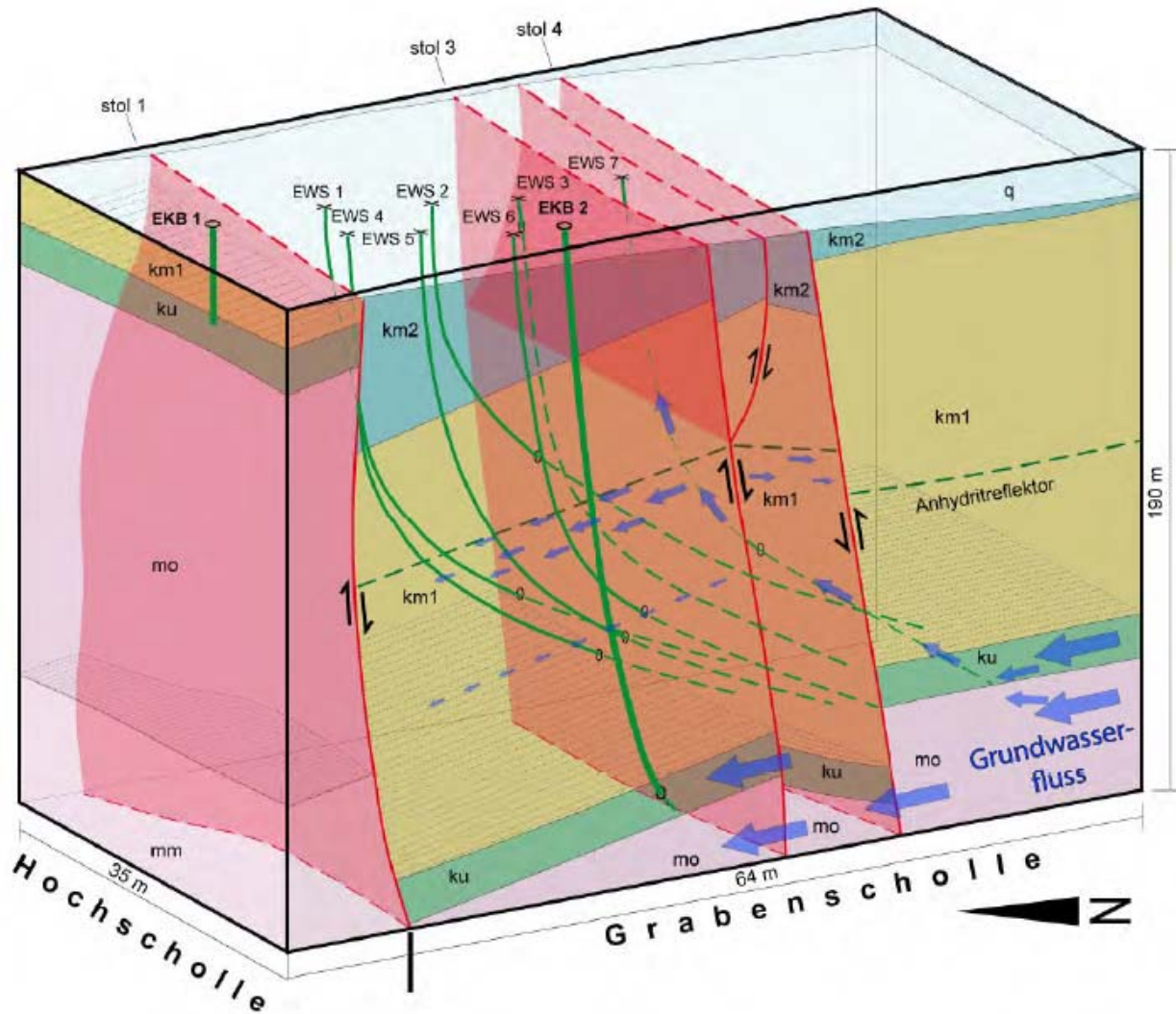
# Räumlich-zeitliche Interpolation



# Kinematische Modellierung



# Geomechanisches Modell Staufen



Quelle LGRB, Sachstandsbericht Staufen

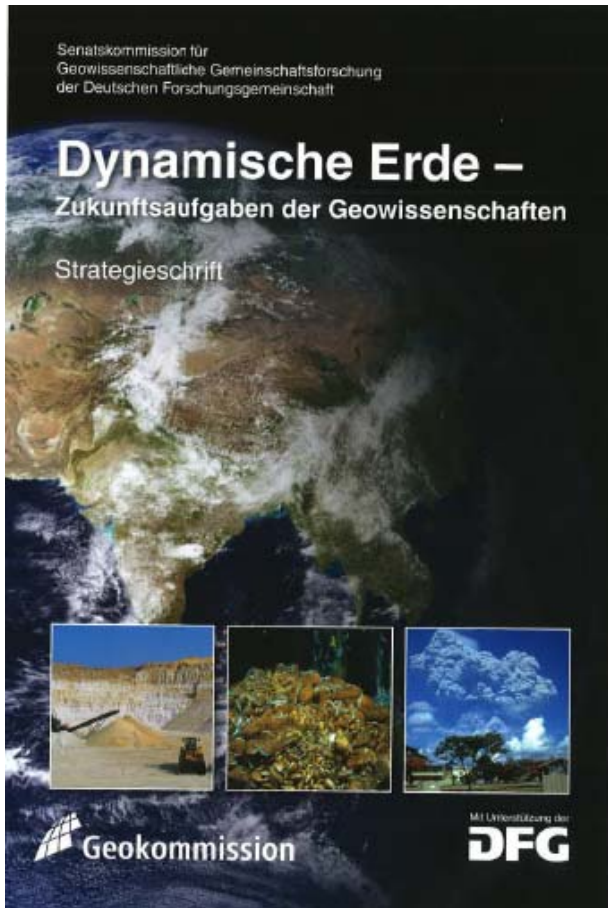


# Ausblick

# Herausforderungen

- Integration unterschiedlicher Datensätze zur Ermittlung raum-zeitlicher Bewegungen und Deformationen  $\Rightarrow$  Randwerte
- Gewinnung von Strukturparametern mit hoher Auflösung
- Skalenübergreifende Modellierung geodynamischer Prozesse

# Wissenschaftliche Fragestellungen: Lithosphärendynamik



- Abtauchen kontinentaler Kruste  
im Mantel
- Prozesse an der Grenze  
Lithosphäre-Asthenosphäre,  
Rolle von Wasser
- Scherlokalisierung in der Kruste
- Aufbau und Entwicklung  
kontinentaler Plattenränder
- Sedimentbecken
- Vulkanismus

# Natürliche geodynamische Laboratorien

## ■ MAGNUS-Experiment (GPI, J. Ritter)

Mantle Ivestigations of Norwegian Uplift Structures

“Wieso existiert heute das südsandinavische Gebirge?”

## ■ AlpArray

Kollisionsprozesse, Reorganisation von Lithosphärenplatten

Alpen und Vorland

## ■ Forschungscampus Initiative

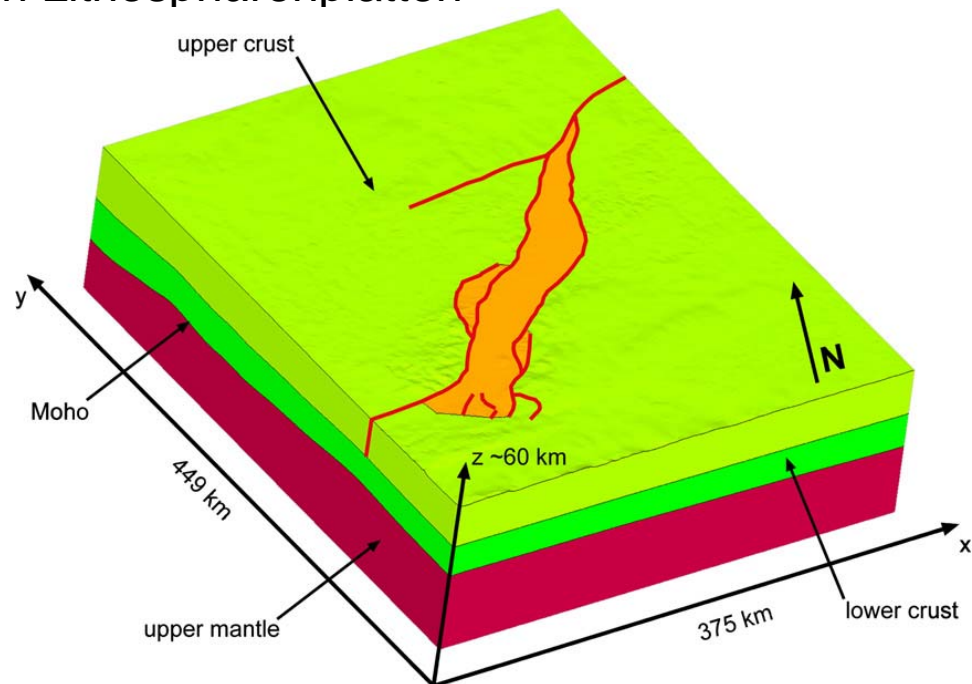
Dynamik des Oberrheingrabens,

S-Deutschland

[Buchmann & Connolly, 2007]

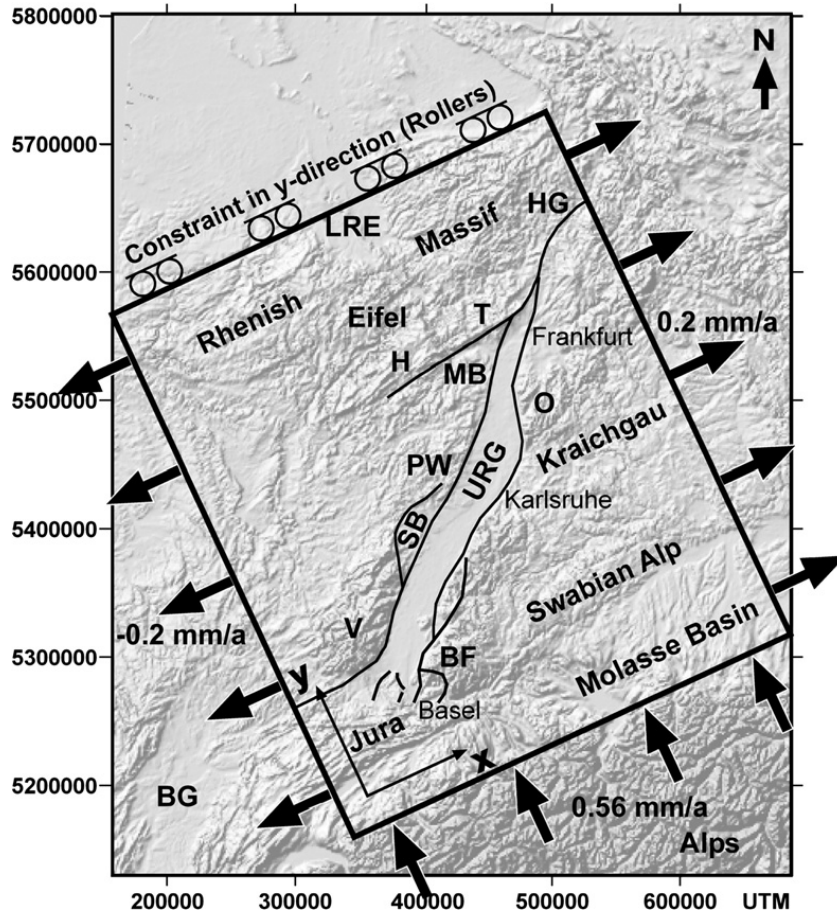
Gefährdungspotential

(Seismizität; Endlager; Geothermie)





# Existierende FE-Modelle im ORG



T.J. Buchmann, P.T. Connolly / Global and Planetary Change 58 (2007) 287–309

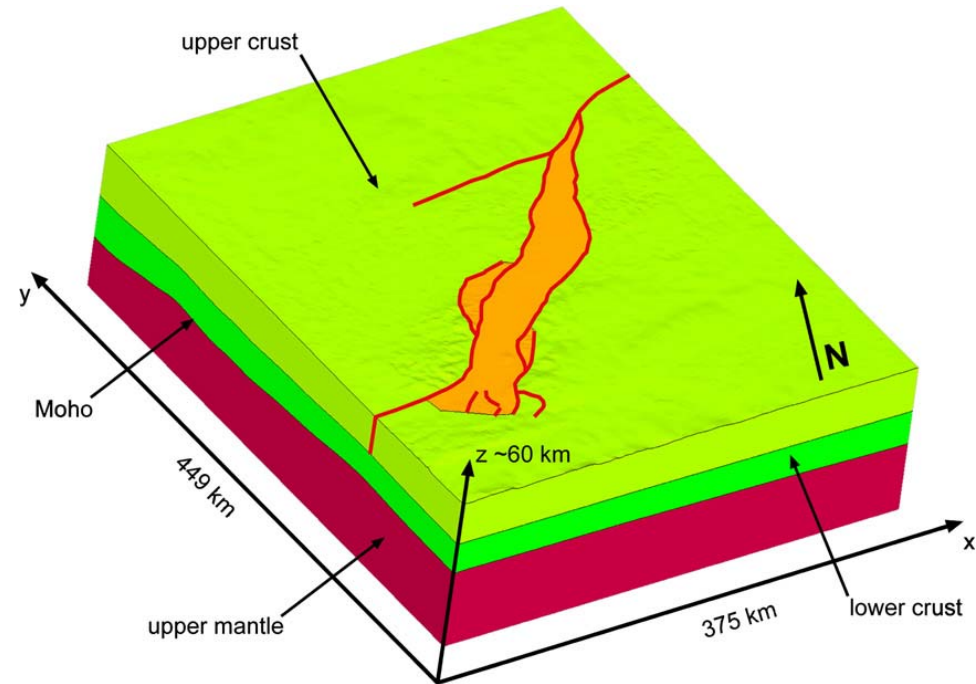


Fig. 2. Map view of the URG model area. The oblique box indicates the FEM extent and the lateral boundary conditions applied in a local coordinate system. The faults included in the model are indicated as black lines. Tectonic units: H, Hunsrück; T, Taunus; MB, Mainz Basin; O, Odenwald; PW, Pfälzerwald; SB, Saverne Basin; V, Vosges Mountains; BF, Black Forest. The topography was created with SRTM30 data available at <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/cbanddataproducts.html>.

Fig. 3. Oblique view of the URG 3D FEM geometry (2x vertical exaggeration). Red lines indicate the faults, which are implemented as frictional contact surfaces. Material properties of the various units are given in Table 2. The size of the model is approx. 449x375x60 km. The maximum element resolution is 1.5 km adjacent to the faults.

Thies J. Buchmann, 2007: 3D multi-scale finite element analysis of the presentday crustal state of stress and the recent kinematic behaviour of the Upper Rhine Graben, PhD, Vrije University Amsterdam

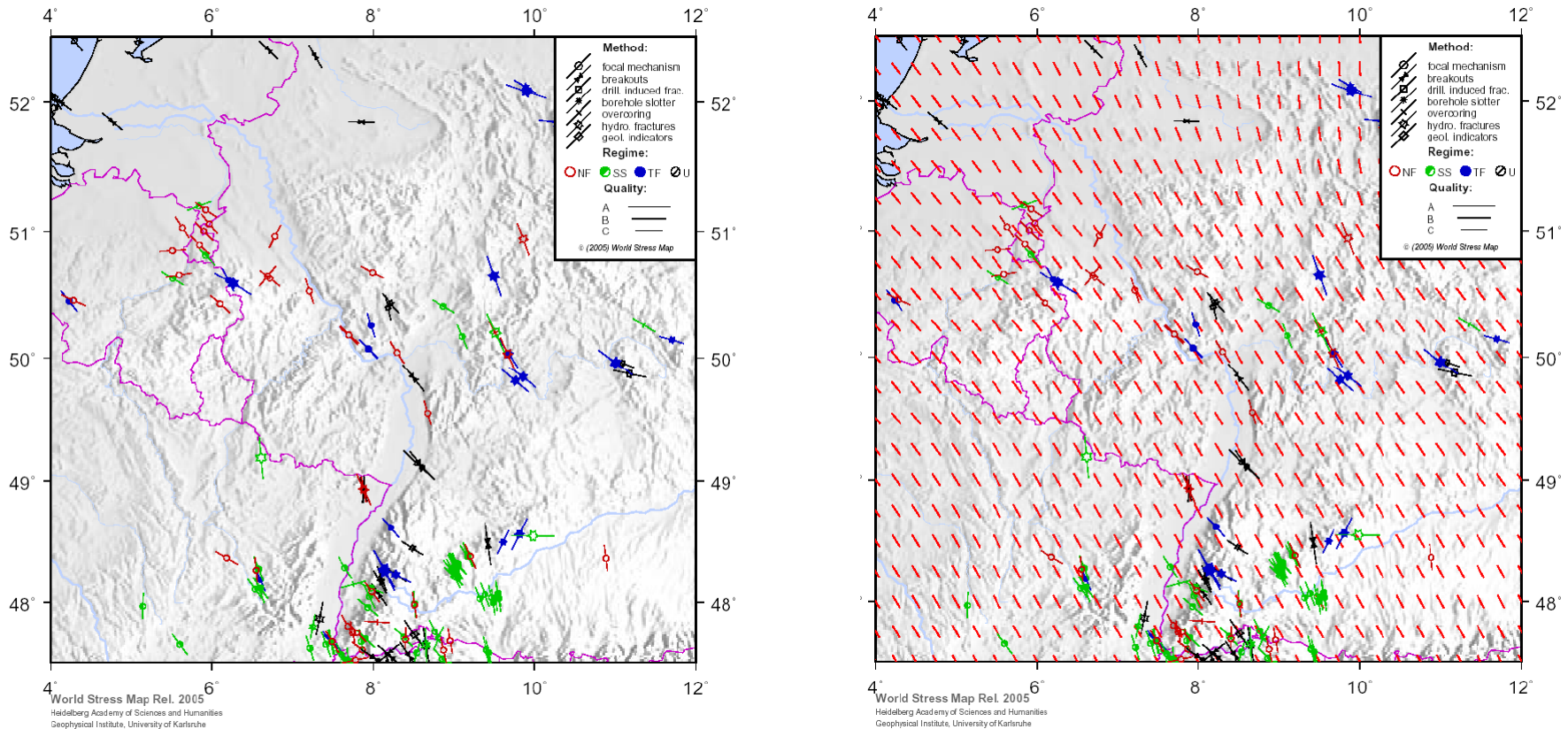
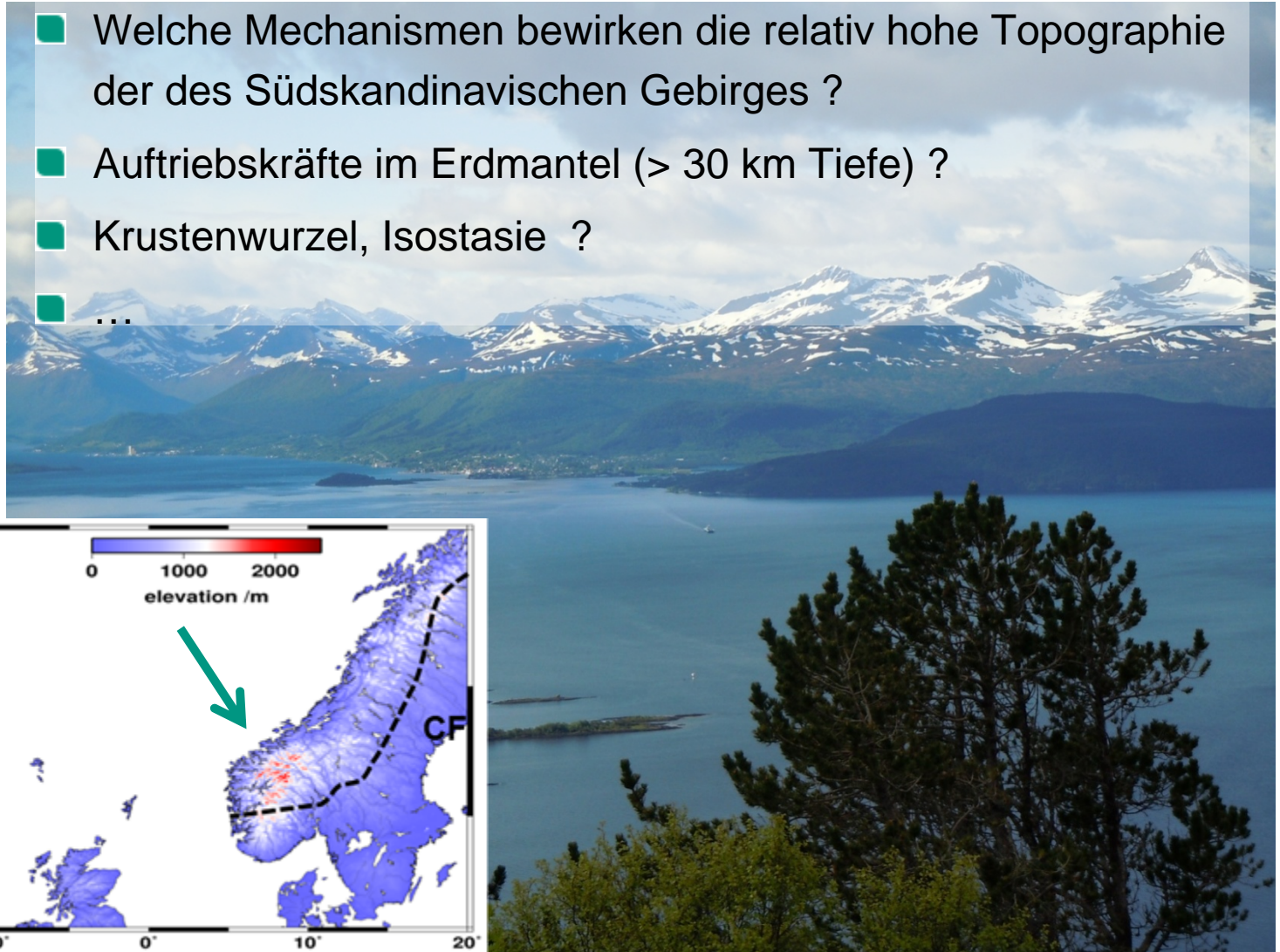
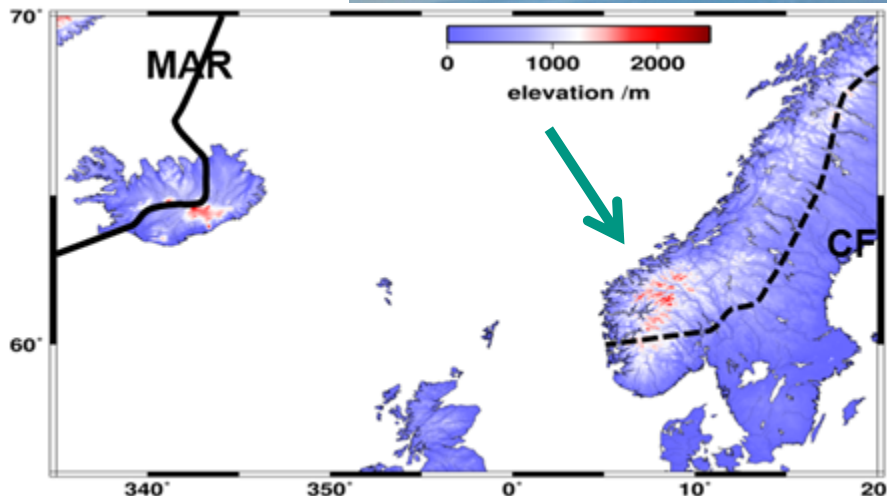


Figure 4.7: Orientation of the maximum horizontal stress component from the WSM data base (left Figure) and the derived smoothed stress field for the modelling area (right Figure; search radius = 250 km, data points 170; provided by O. Heidbach). The smoothed stress field has a mean deviation of  $\pm 19.2^\circ$  whereas the mean error of the data points within the WSM data base is  $\pm 25^\circ$ .

# Fragestellung: Wieso gibt es heute das Skandinavische Gebirge

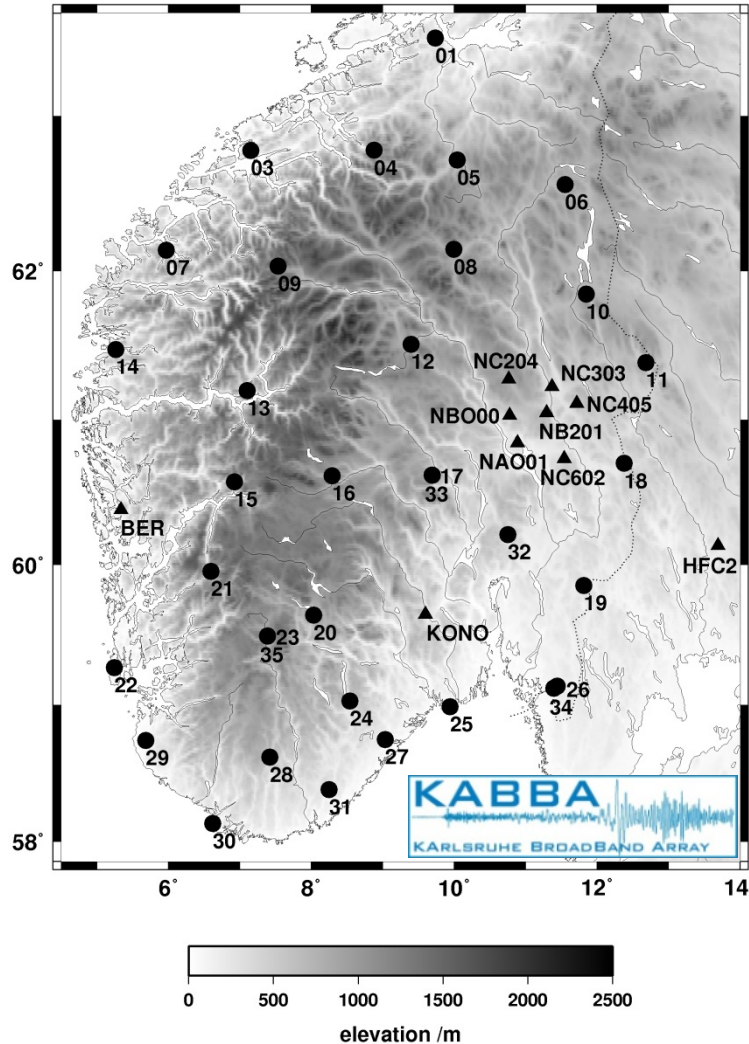
- Welche Mechanismen bewirken die relativ hohe Topographie der des Südschandinavischen Gebirges ?
- Auftriebskräfte im Erdmantel (> 30 km Tiefe) ?
- Krustenwurzel, Isostasie ?
- ...





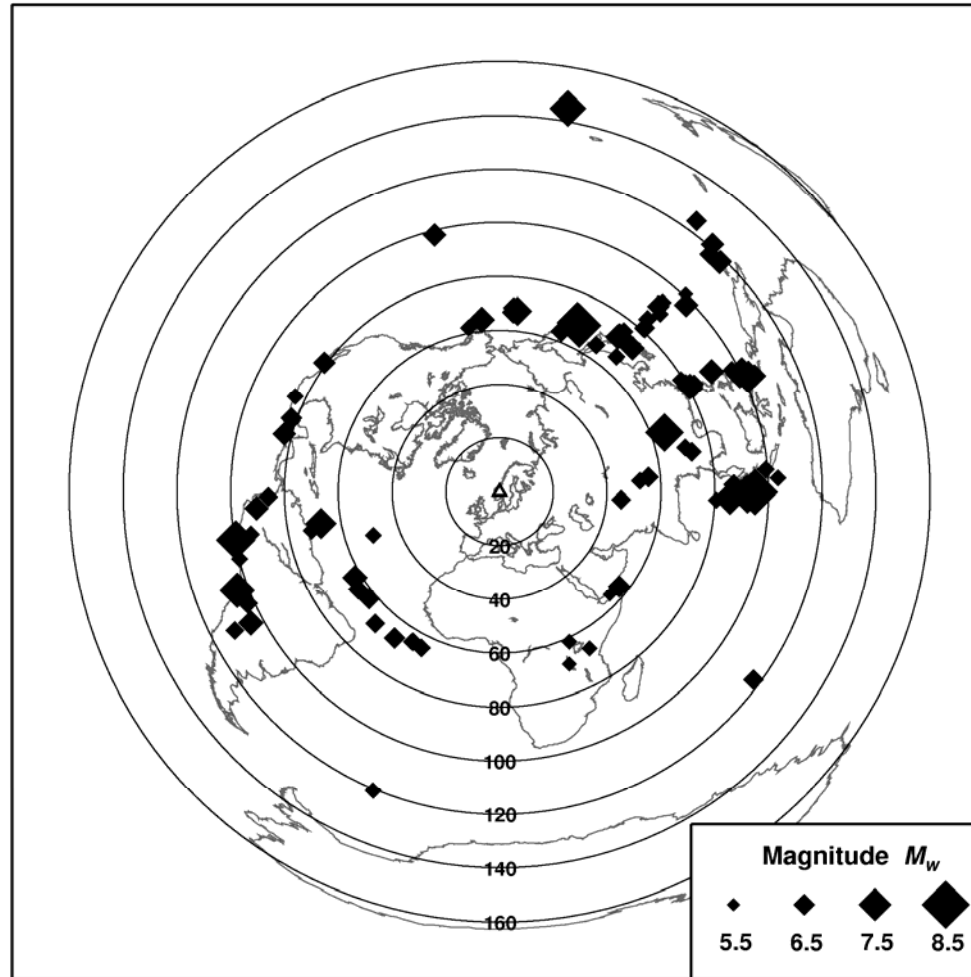
# MAGNUS Experiment (Mantle Investigations of Norwegian Uplift Structures)

- Empfänger-Netzwerk
- Sept. 2006 – July 2008



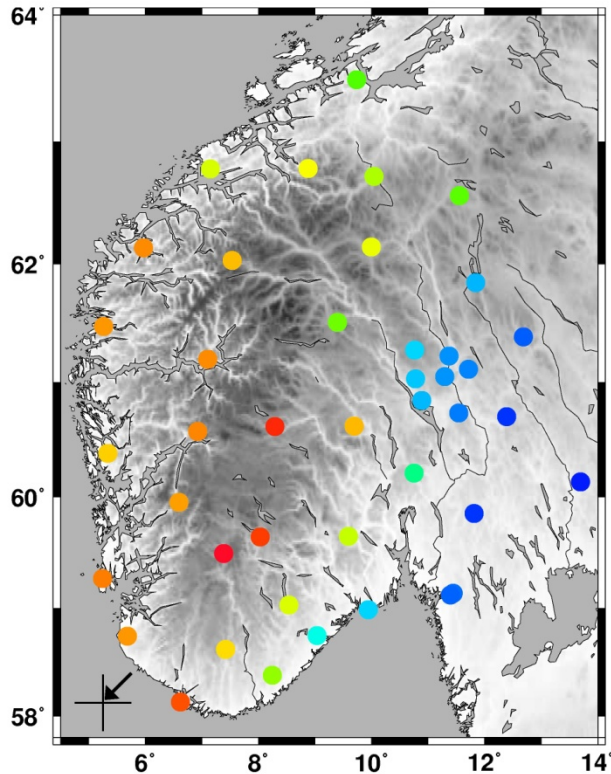
**NORSAR**

# Erdbeben-Verteilung MAGNUS Experiment

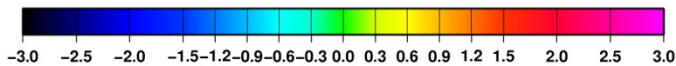


128 teleseismische Erdbeben

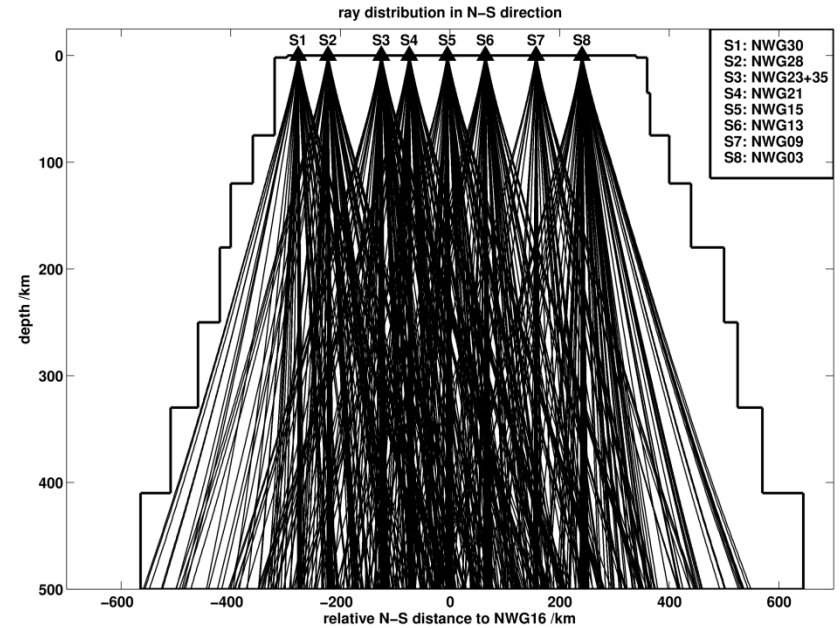
# Daten und Modellraum



average relative travel time residual /s



- Frühe Wellenankünfte im Osten
- Spätere Wellenankünfte im Westen
- $dt \sim \pm 2$  s

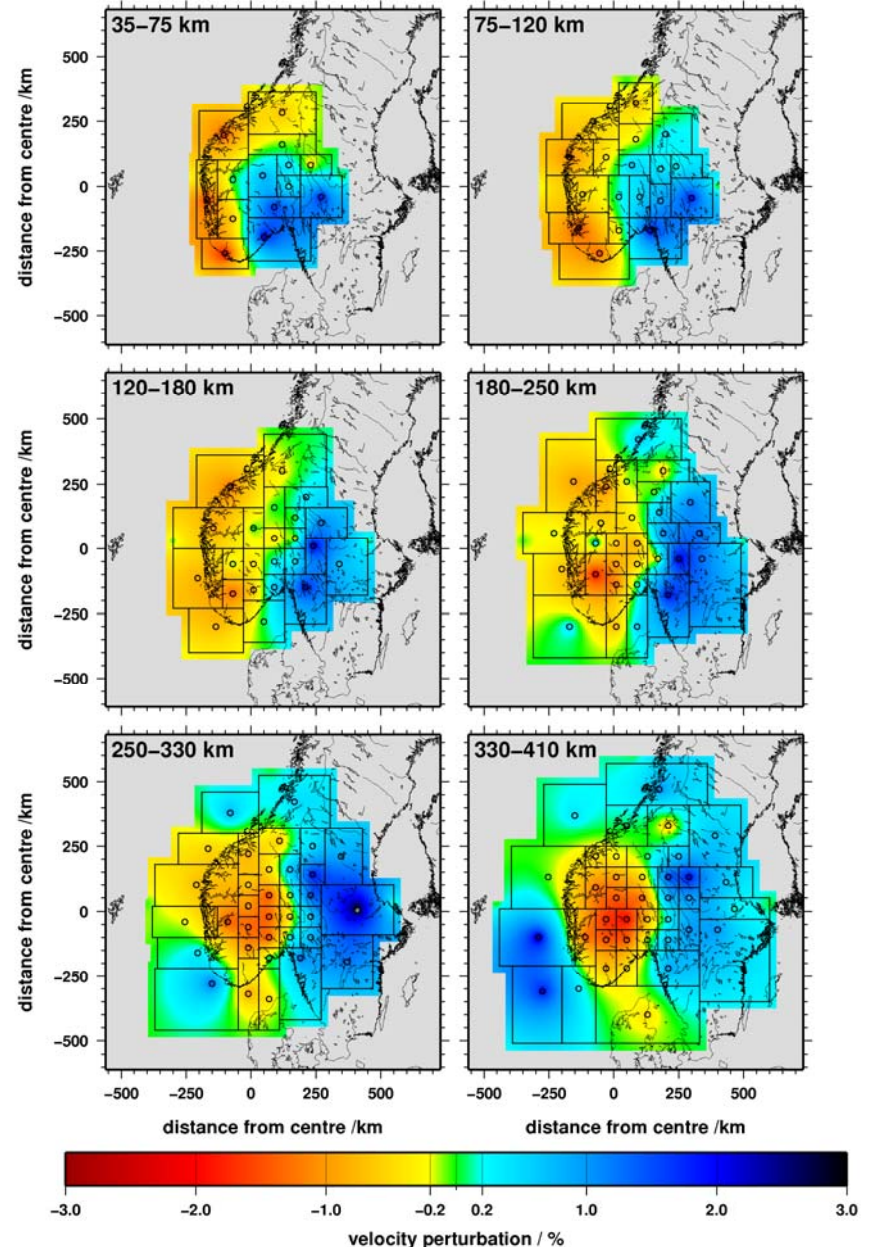


- S1: NWG30
- S2: NWG28
- S3: NWG23+35
- S4: NWG21
- S5: NWG15
- S6: NWG13
- S7: NWG09
- S8: NWG03

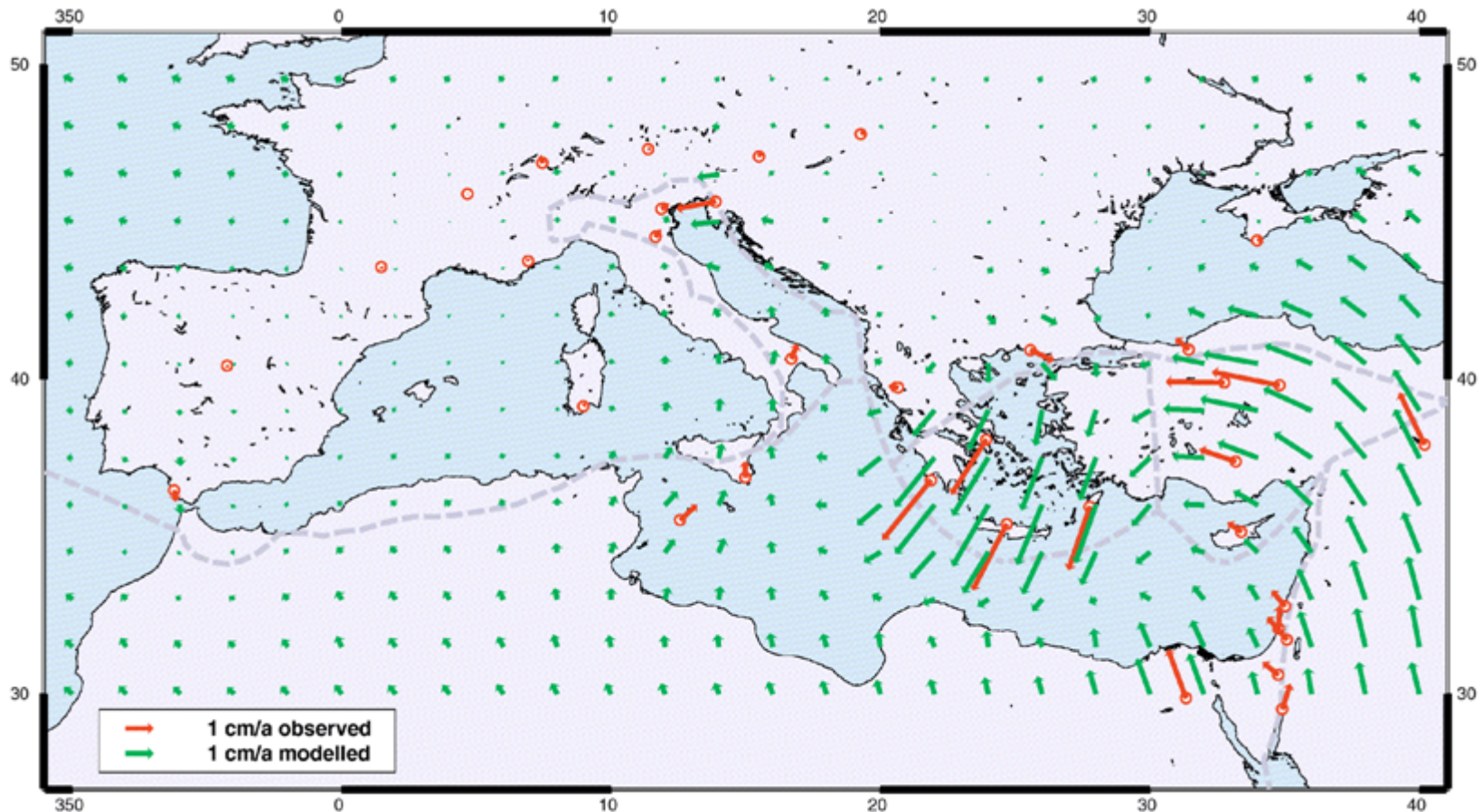
- 4000 Strahlen
- Modell bis 500 km Tiefe
- 9 Schichten / 272 Modellblöcke

# Scherwellen- Geschwindigkeitsmodell *dvs* relativ zu 1D Modell

- 35 - 180 km Tiefe:  
ostwärts einfallende erniedrigte vs
- 180 - 330 km Tiefe:  
erniedrigte vs (-2% to -3%)  
unter dem Skann. Gebirge
- 330 - 410 km Tiefe:  
erniedrigte vs (-3% to -4%)
- Interpretation: erhöhte Temperatur,  
~150 K oder  
wasserhaltige Phasen im Gestein



# Prädizierung des Geschwindigkeitsfeldes aus Modellrechnungen



Beispiel: mit der Finite-Elemente-Methode berechnete Deformationen im Mittelmeerraum. Die abgeleiteten Geschwindigkeiten in dieser Deformationszone gehen als Bestandteil der NNR-Bedingung in das APKIM-Modell ein.

# Prädizierung des Geschwindigkeitsfeldes aus Messungen

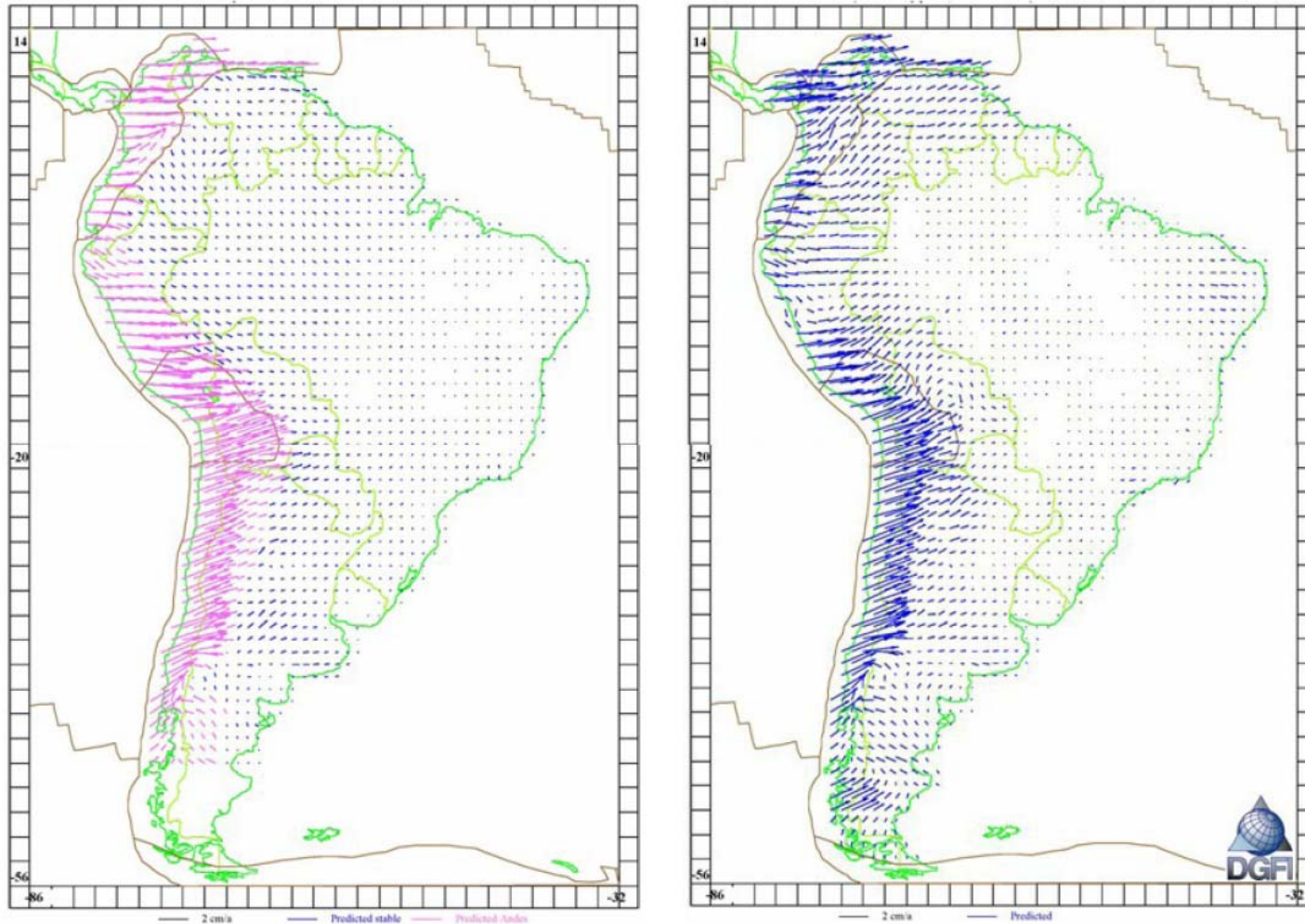


Fig. 2.4.1: Deformation models VEMOS 2003 (left) and VEMOS 2008 (right)

## Ascending

## Nivellement

## Descending

**3968 Punkte**  
**LOS Geschwindigkeit  $v_a$**

**98 Punkte**  
**vert. Geschwindigkeit  $v_v$**

**2925 Punkte**  
**LOS Geschwindigkeit  $v_d$**

TPS Approximation an  
 Nivellementpunkten

TPS Approximation an  
 Nivellementpunkten

Verwerfen räumlich entfernter Punkte ( $d > 1 \times 10^{-4} \text{°}$ )  
 und

Bestimmung des Geschwindigkeitsvektors

**69 Punkte**  
**Geschwindigkeitsvektore**  
 **$n$**   
 $\mathbf{v} = (v_{x1}, v_{x2}, v_{x3})^T$

- Minimierung der gewichteten Summe  $pE(f) + (1 - p)R(f)$

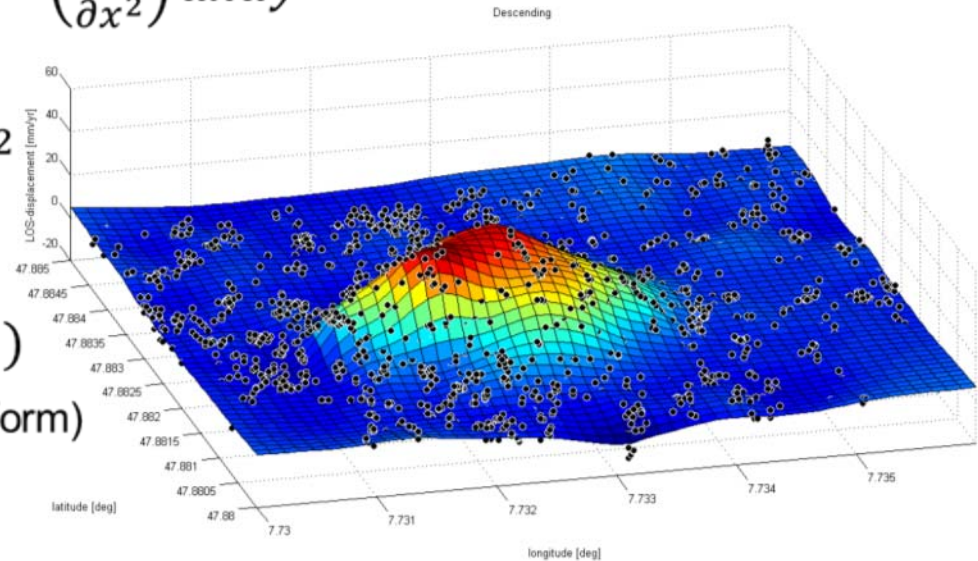
$$R(f) = \iint \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right)^2 dx dy$$

$$E(f) = \sum_{j=1}^n |y_j - f(x_j)|^2$$

$$f(x) = \sum_{j=1}^n w_j U(|t - x_j|)$$

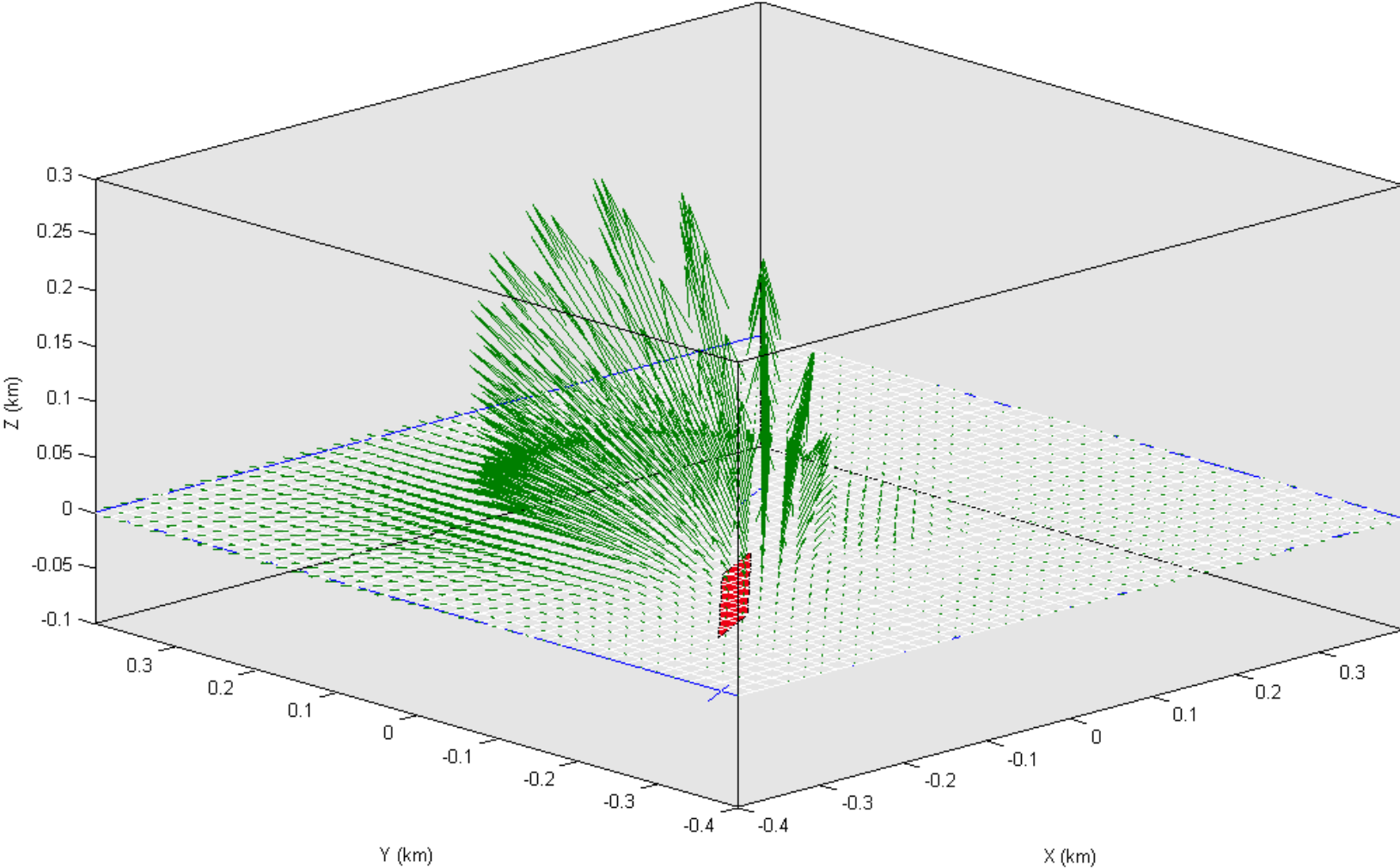
„scattered translates form“ (stform)

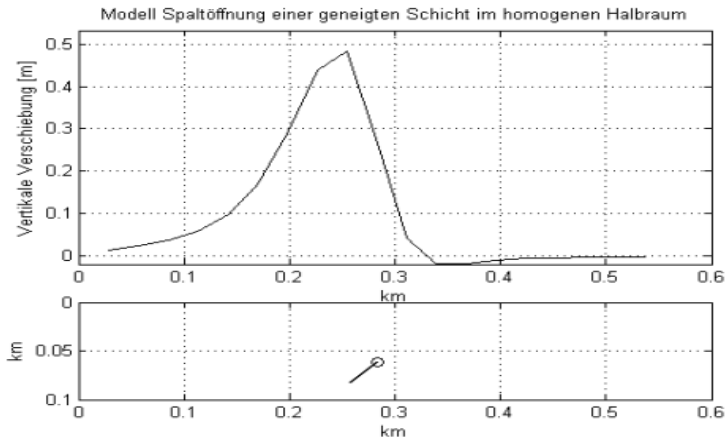
$$U(r) = r^2 \log(r^2)$$





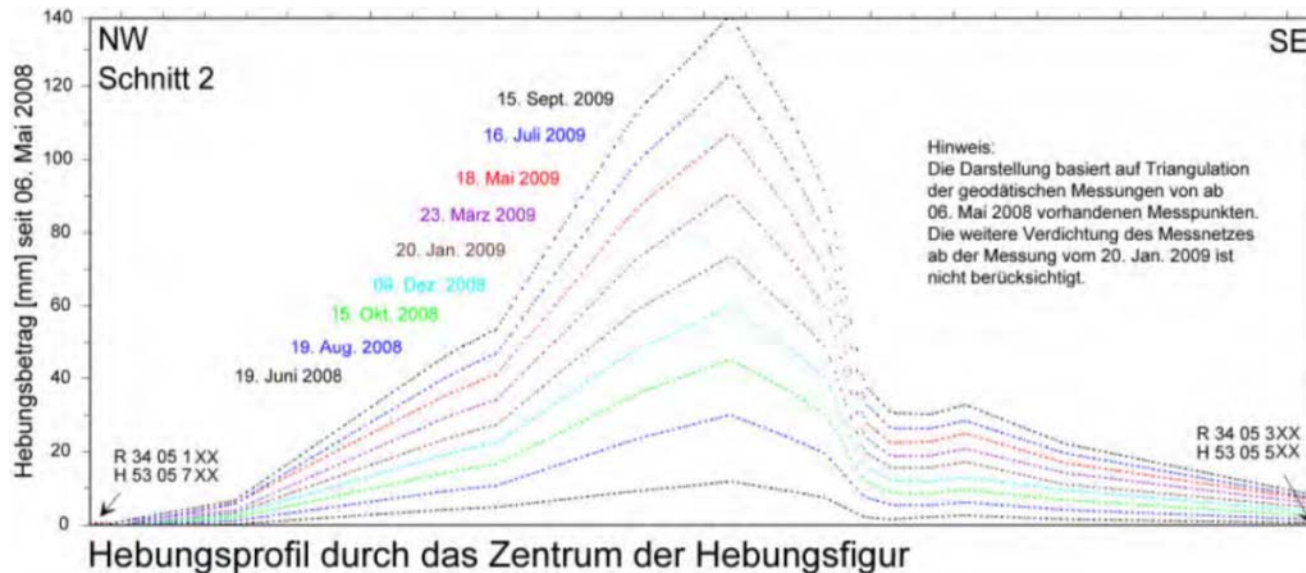
3D displacement vectors

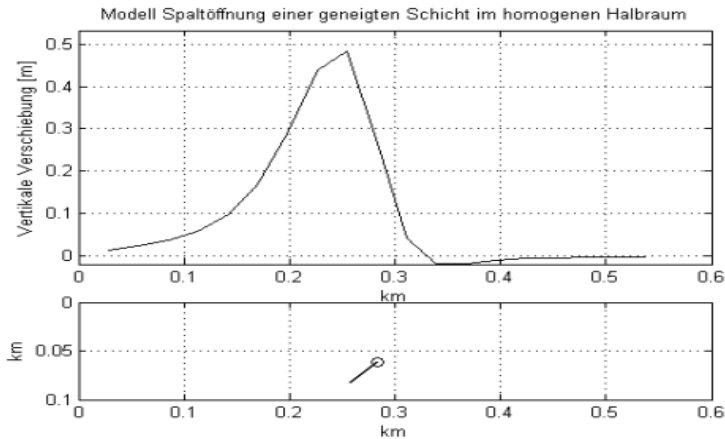




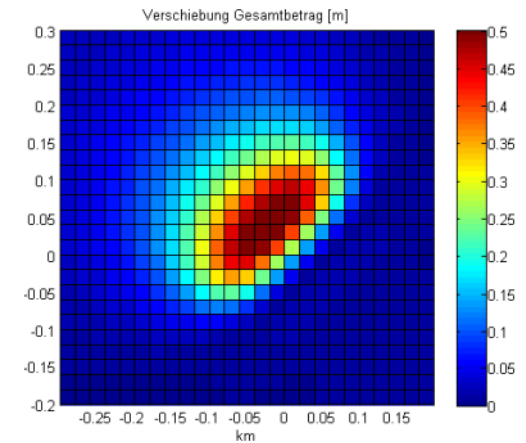
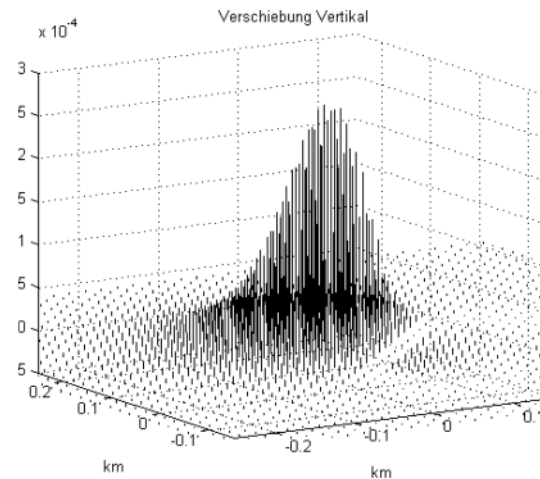
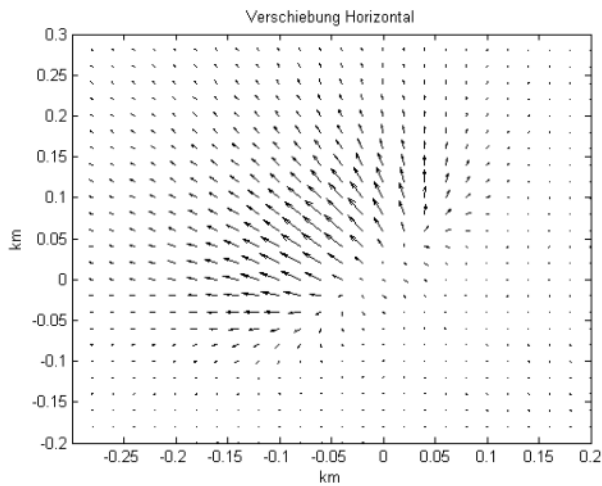
## ■ Modellierung mit Dislokationsmodell Coulomb

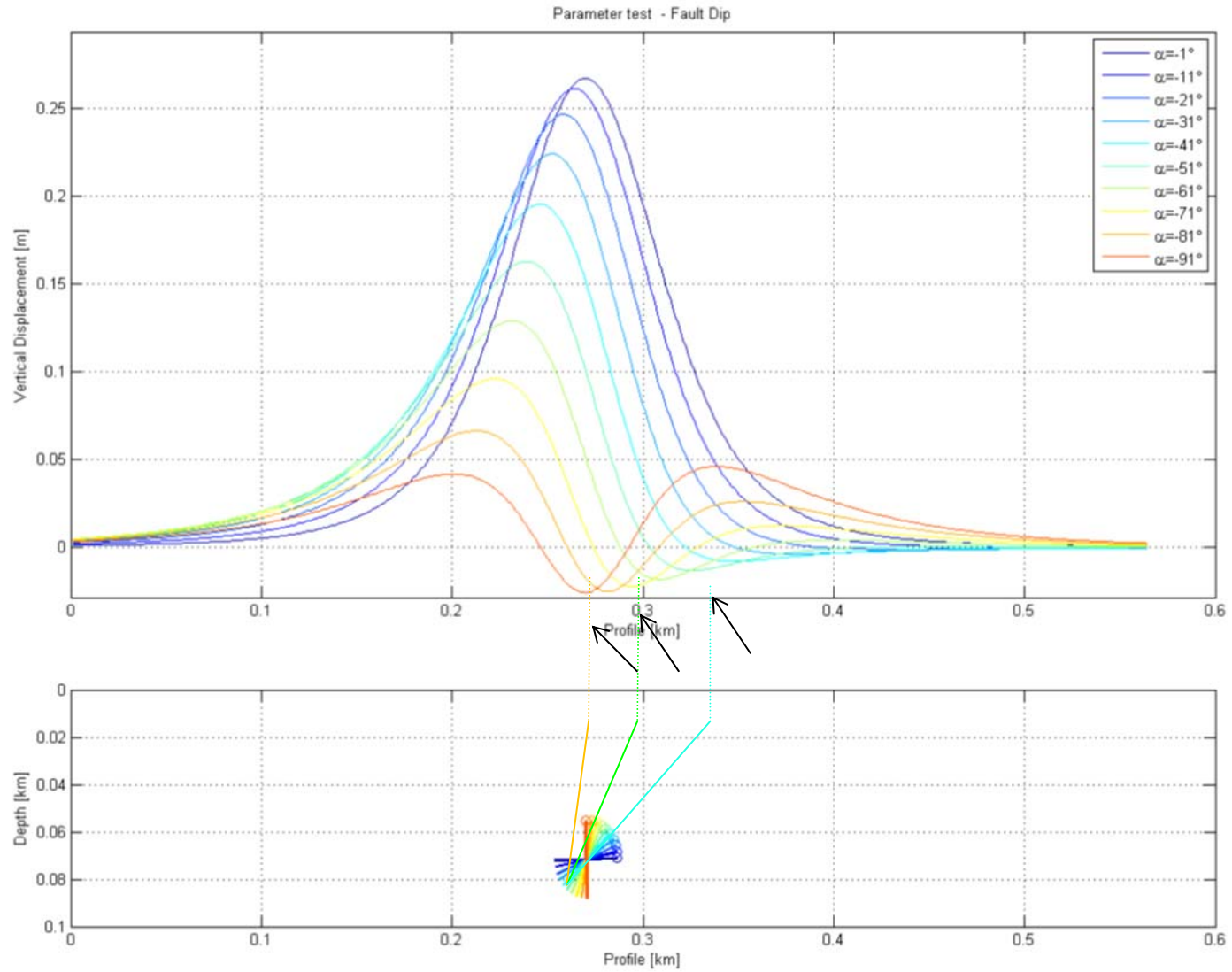
- Einfaches Modell einer sich öffnenden Spalte im homogenen Halbraum
- Analytische Lösung
- 45° Streichen, 40° Einfallen nach NW
- → 48cm max. Hebung an der Oberfläche
- → 30cm max. Horizontalbewegung an der Oberfläche

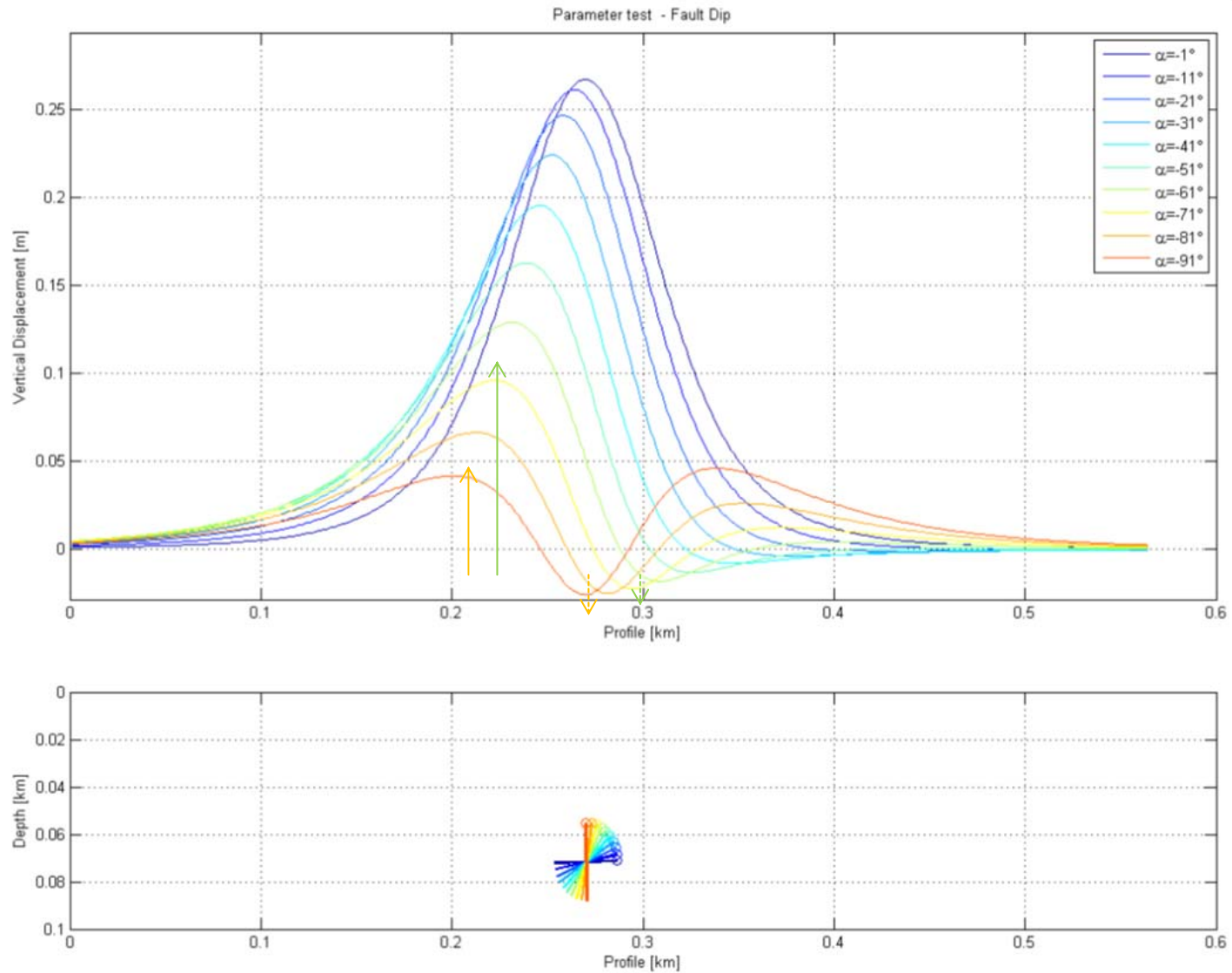




- Modellierung mit Coulomb für strukturelles Verständnis
  - Einfaches Modell einer sich öffnenden Spalte im homogenen Halbraum
  - Analytische Lösung
  - 45° Streichen, 40° Einfallen nach NW
  - → 48cm max. Hebung an der Oberfläche
  - → 30cm max. Horizontalbewegung an der Oberfläche







# Vergleich von rezenten geodätischen Plattenmodellen (ITFR2000, APKIM2000) mit dem geologisch geophysikalischen Modell NNR-NUVEL 1A

