



seit 1527

# Der Blick in unsere Erde:

Messverfahren  
in der Geophysik

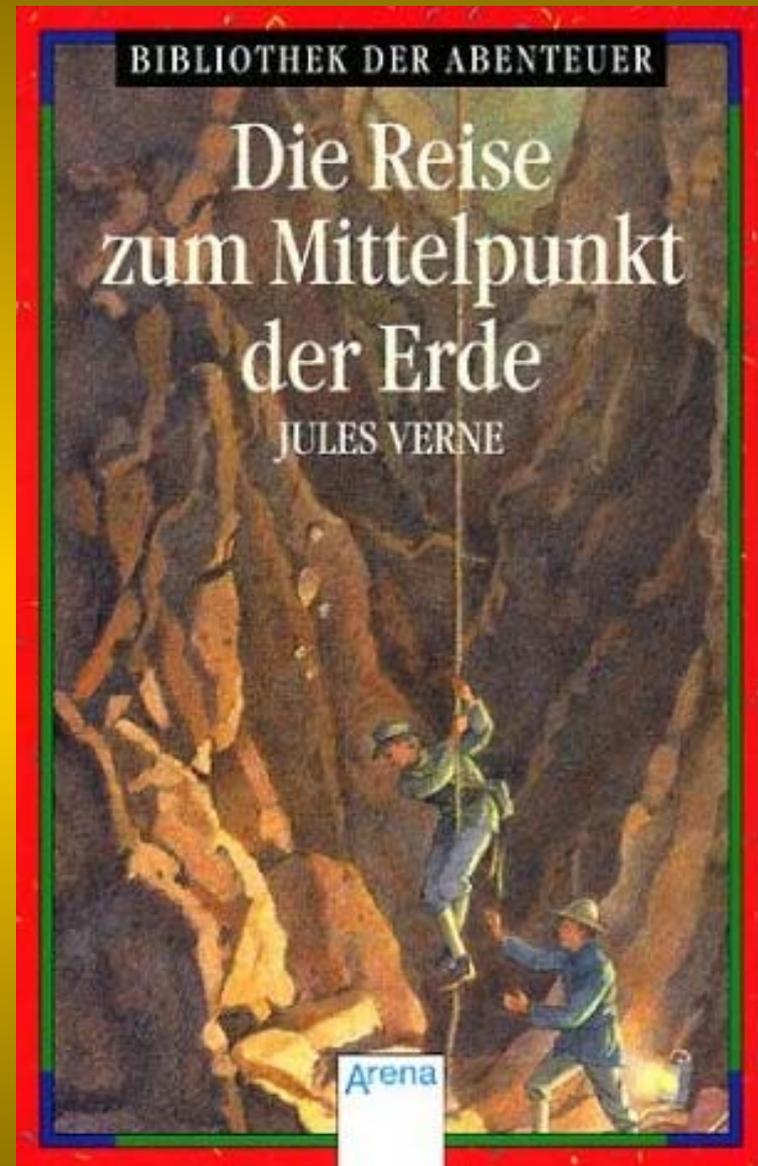
von

Thomas Jahr

Geodynamisches Observatorium Moxa  
der  
Friedrich-Schiller-Universität Jena

## Inhalt:

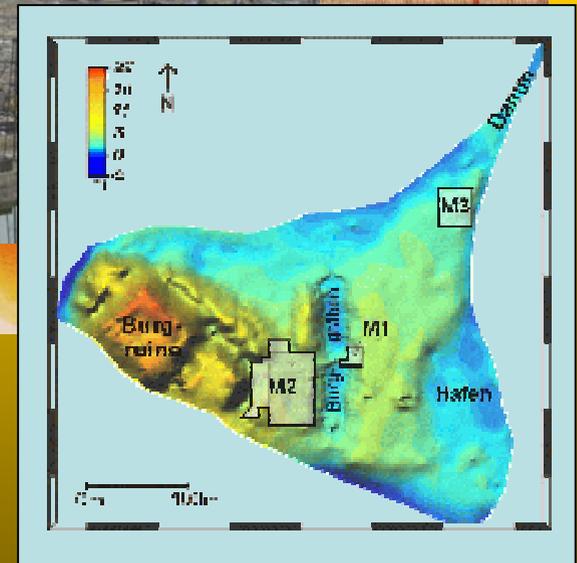
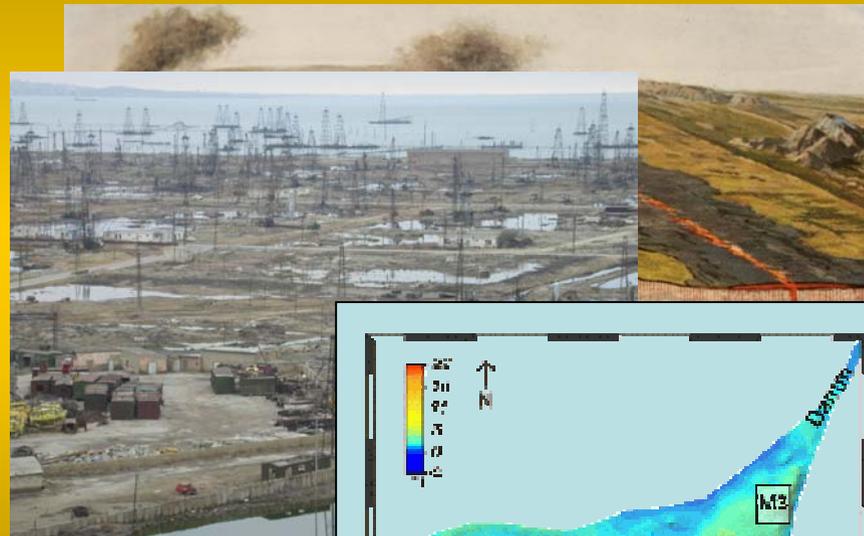
- Motivation
- Geophysikalische Messverfahren
- Aufbau und Struktur der Erde
- Dynamik des Erdkörpers
- Fazit



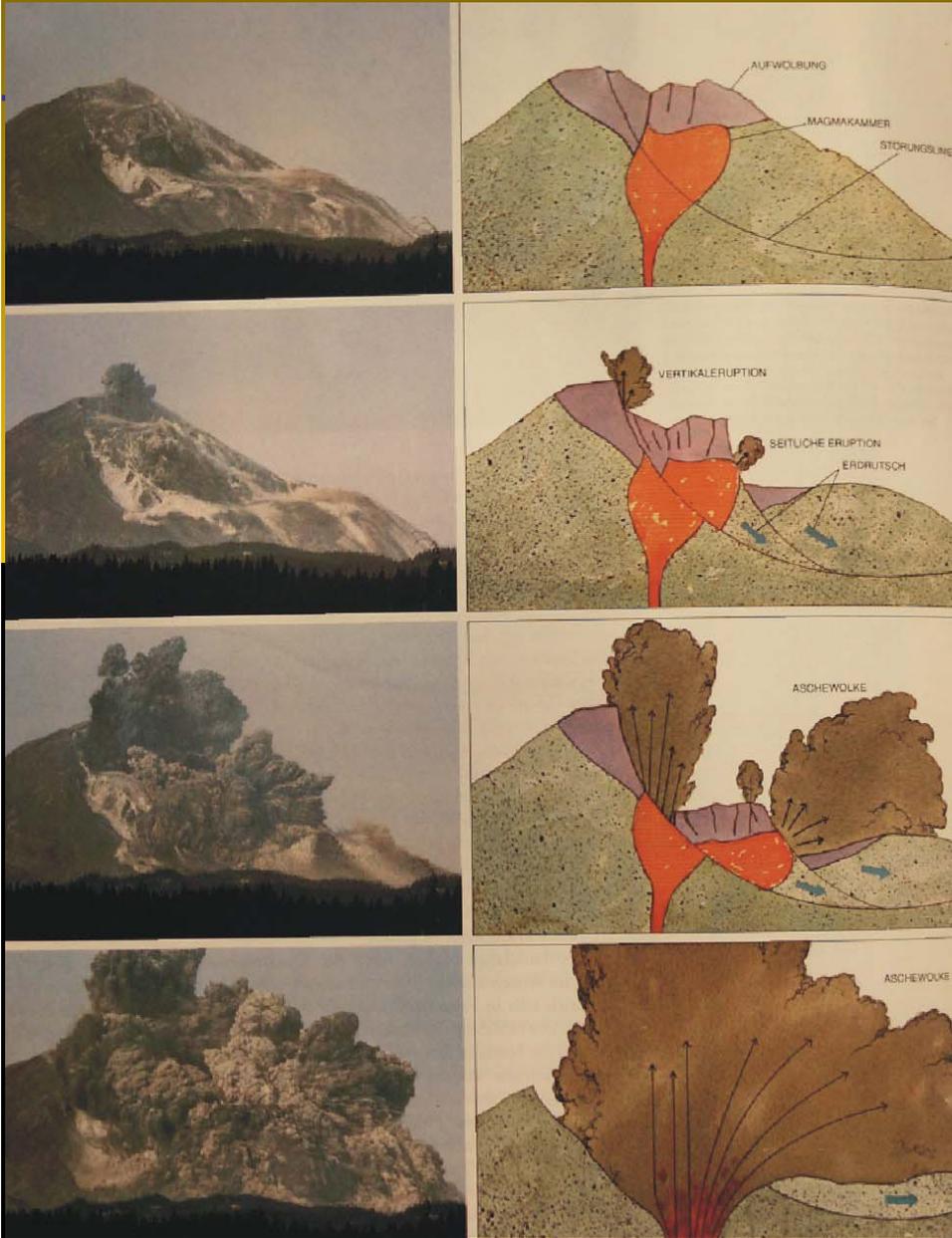
Warum wollen wir den Aufbau der Erde möglichst gut erforschen und die im Erdinnern stattfindenden Prozesse besser verstehen?

- **Aufbau und Struktur der Erde:**

- Grundlagenforschung
- Geologische Strukturen
- Lagerstätten
- Baugrund
- Archäologie
- Altlasten / Umwelt



# Motivation



Wann und woher  
Woher und wie  
Wie und warum  
Warum und wann  
Woher und wann  
Woher und wie  
Woher und warum  
Woher und wann

Wann und woher  
Woher und wie  
Wie und warum  
Warum und wann  
Woher und wann  
Woher und wie  
Woher und warum  
Woher und wann

Wann und woher  
Woher und wie  
Wie und warum  
Warum und wann  
Woher und wann  
Woher und wie  
Woher und warum  
Woher und wann

Wann und woher  
Woher und wie  
Wie und warum  
Warum und wann  
Woher und wann  
Woher und wie  
Woher und warum  
Woher und wann

## • Dynamik des Erdkörpers:

- Grundlagenforschung
- Plattentektonik
- Tiefseegräben
- Erdbeben / Tsunamis
- Vulkane
- Hydrogeophysik

Warum wollen wir den Aufbau der Erde möglichst gut erforschen und die im Erdinnern stattfindenden Prozesse besser verstehen?

- **Aufbau und Struktur der Erde:**

- Grundlagenforschung
- Geologische Strukturen
- Lagerstätten
- Baugrund
- Archäologie
- Altlasten / Umwelt

- **Dynamik des Erdkörpers:**

- Grundlagenforschung
- Plattentektonik
- Tiefseegräben
- Erdbeben / Tsunamis
- Vulkane
- Hydrogeophysik

# Geophysikalische Messverfahren

## Angewandte Geophysik:

- Struktur-Erkundung

- Seismik
- ~~Geoelektrik~~
- ~~Magnetik~~
- Gravimetrie
- ~~Bohrungen~~

- 3D-Struktur Modellierungen

## Geodynamik:

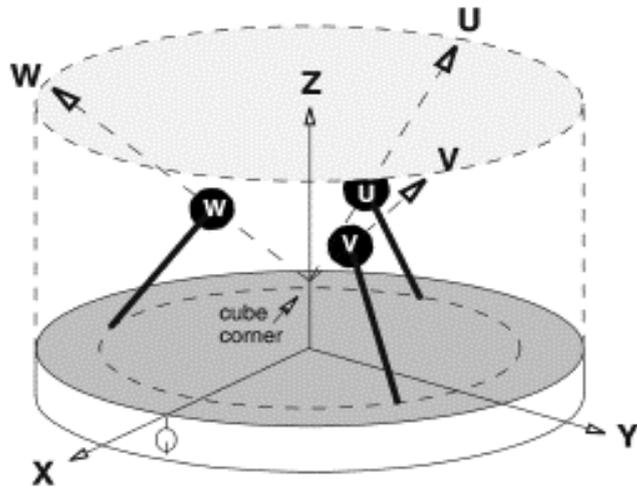
- Observatorien

- Seismologie
- ~~Schwerefeldvariationen~~
- Präzisionsgravimetrie
- ~~Hydro-Beobachtungen~~
- Umweltparameter (Meteorologie, Auflasten...)
- Neigungsmessungen

- 3D-Prozess Modellierungen

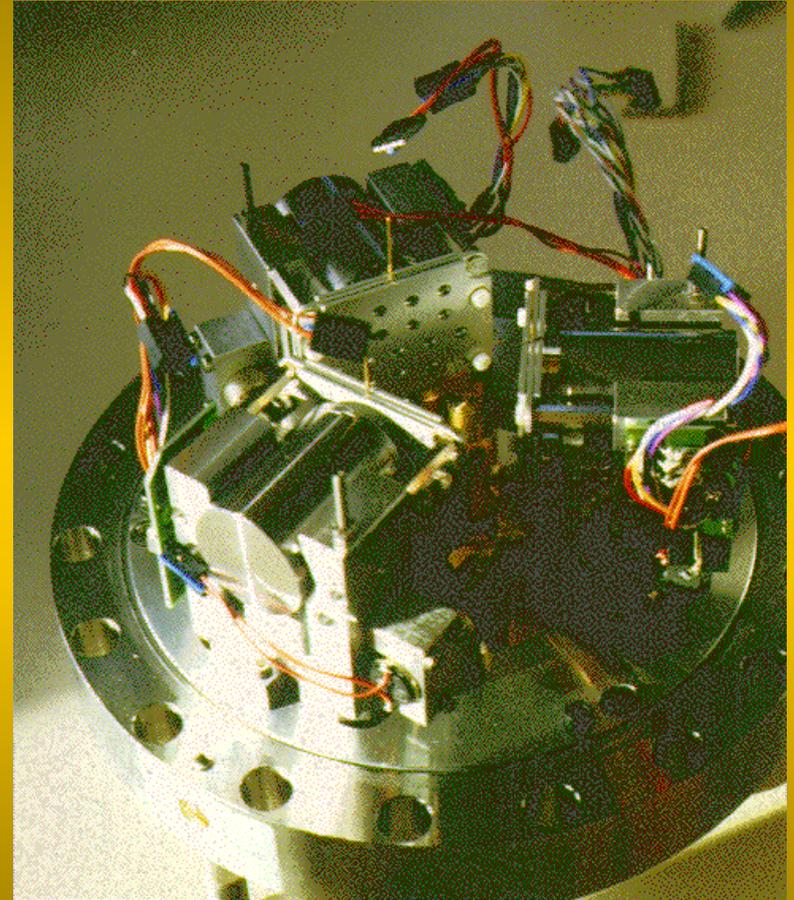
**Seismik-**  
**Seismologie**

# Seismik - Seismometer - Geophone



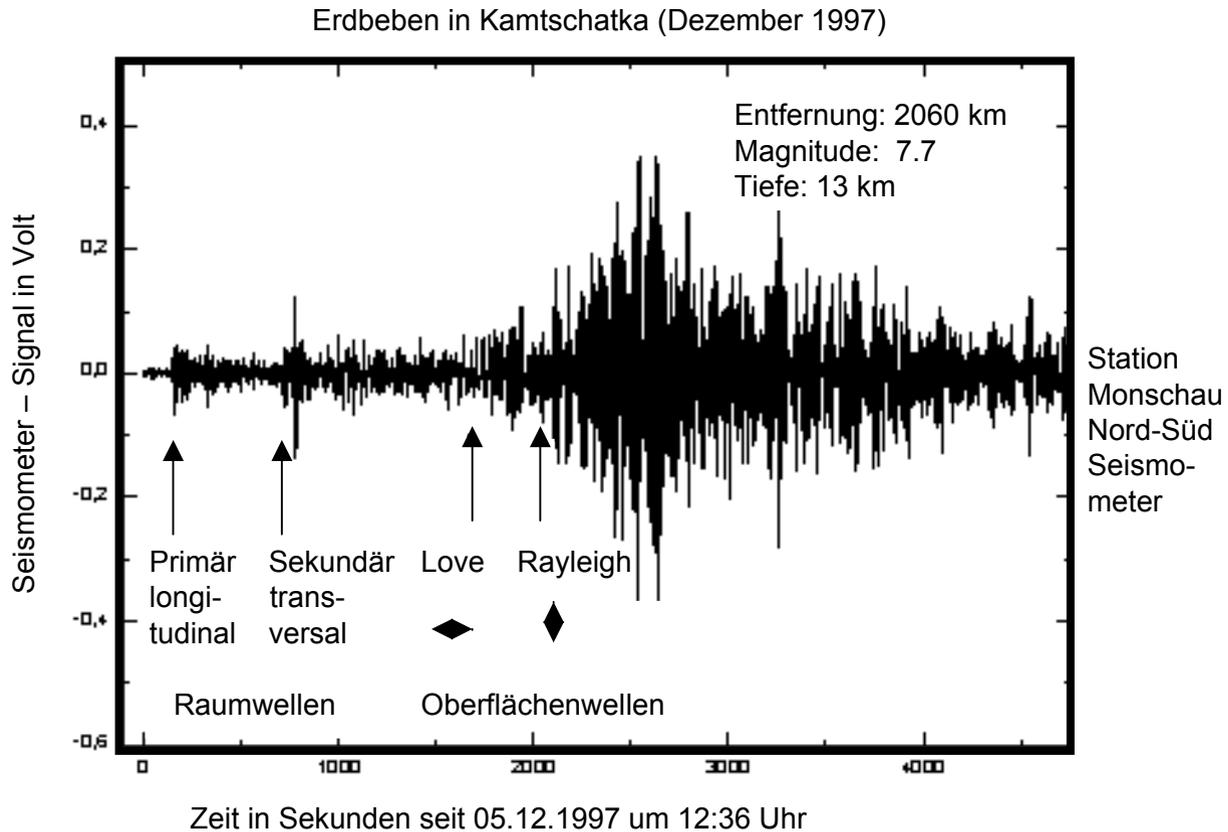
The homogeneous triaxial geometry of the STS2 seismometer

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix}$$



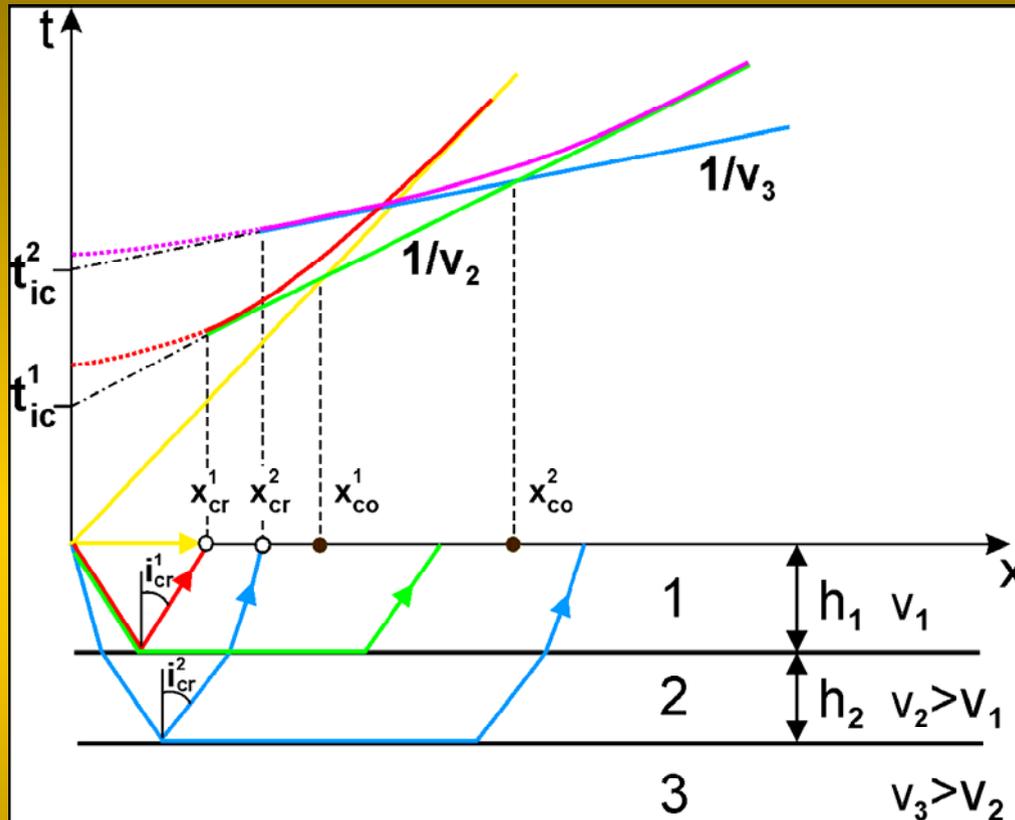
**STS-2** Seismometer des Deutschen Regionalen Seismischen Netzes (GRSN)

# Seismik - Seismische Spur



Surface wave

# Seismik - Seismologie - Seismogramm

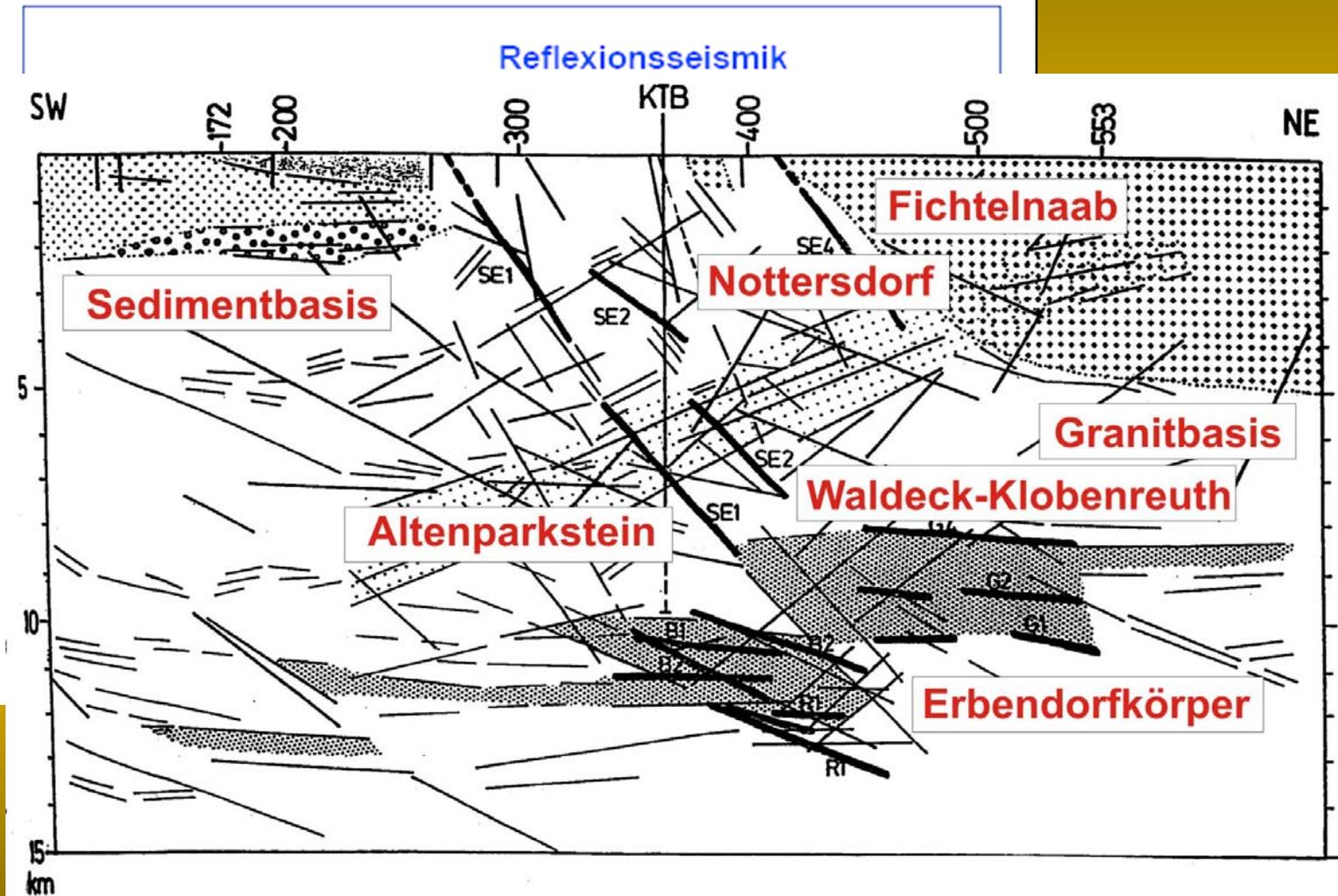


die gelbe Linie zeigt die „direkte Welle“: sie läuft mit  $v_1$  von der Quelle zum Geophon und ergibt im Seismogramm eine Gerade.

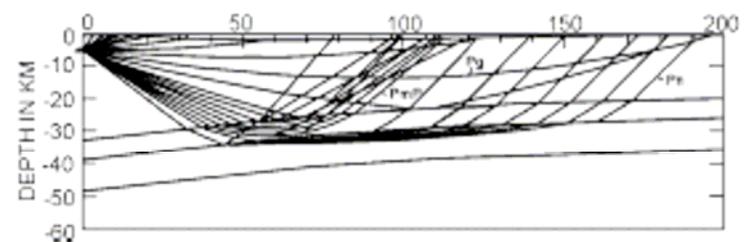
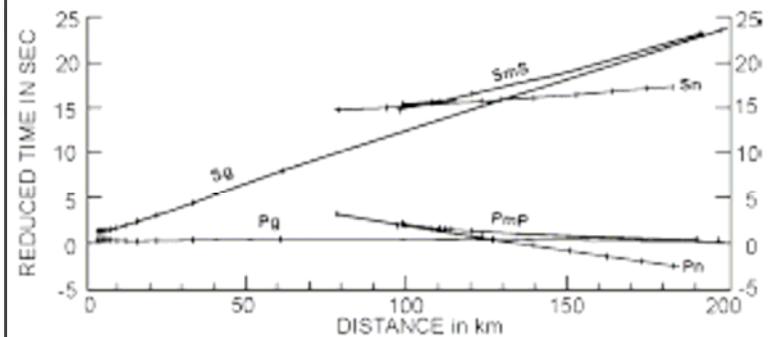
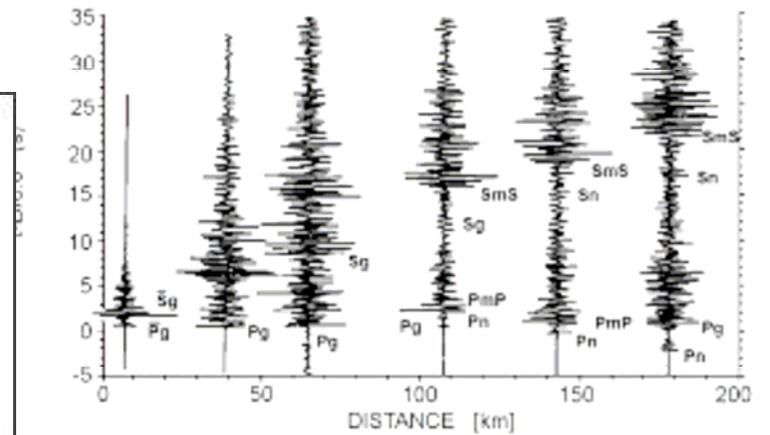
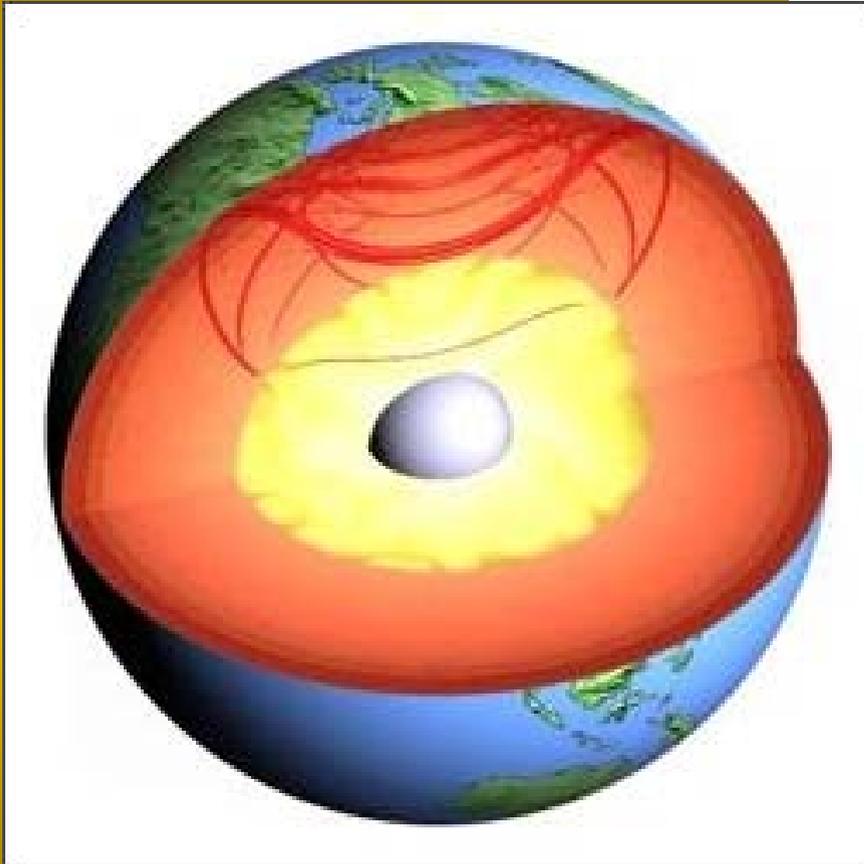
- die rote Linie zeigt die „reflektierte Welle“: sie ergibt eine Hyperbel, die „Reflektionshyperbel“
- die grüne Linie zeigt die „Mintrop-Welle“: sie läuft an der oberen Schichtgrenze und ermöglicht die Bestimmung von  $v_2$ .
- die blaue Linie zeigt die „Mintrop-Welle“ für die untere Schicht: aus ihr wird  $v_3$  berechnet.

Den drei Geschwindigkeiten lassen sich Materialien (Böden/Gesteine) zuordnen, so dass man ein geologisches Bild des Untergrundes erhält.

# Seismik - Beispiele zur Reflexionsseismik



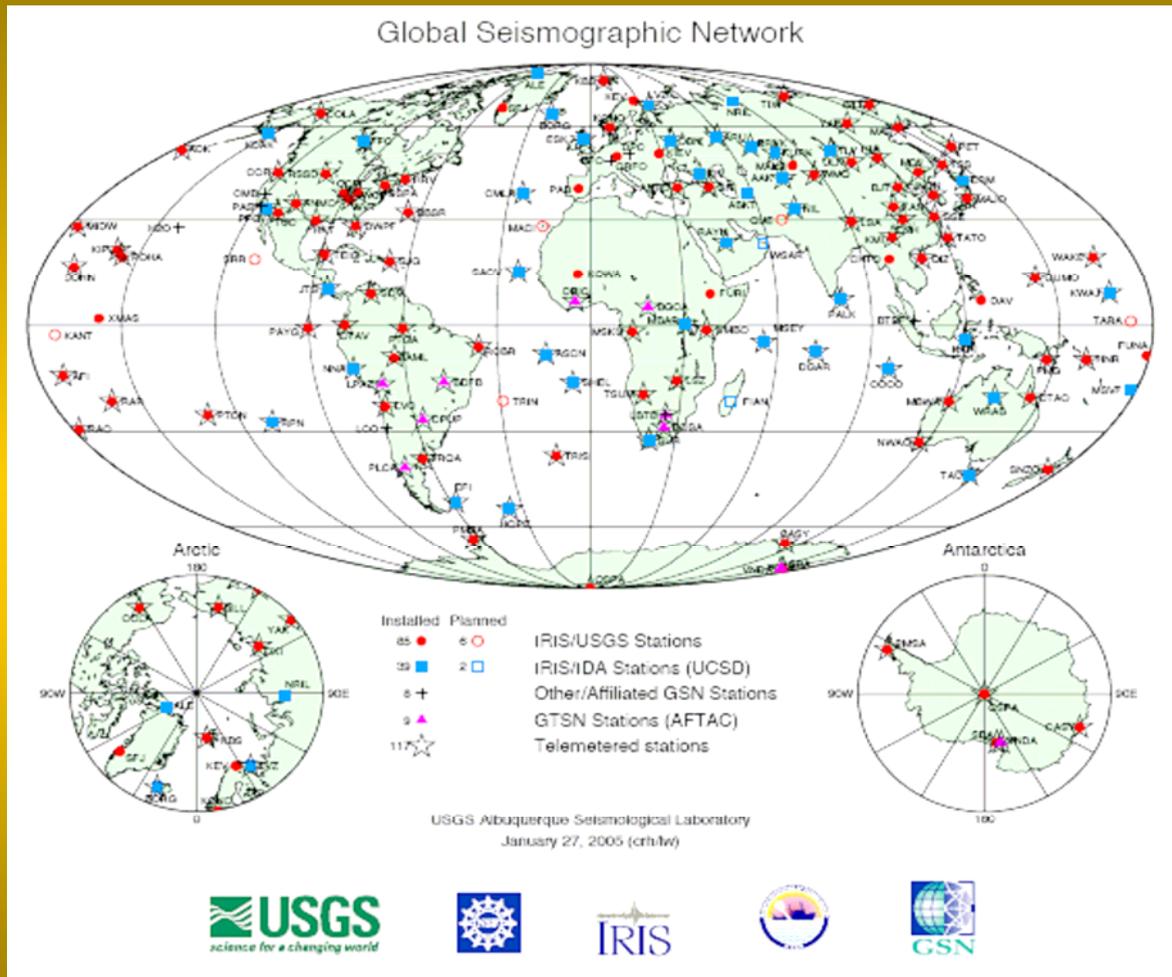
# Refraktionsseismik - Seismologie - „Ray-tracing“



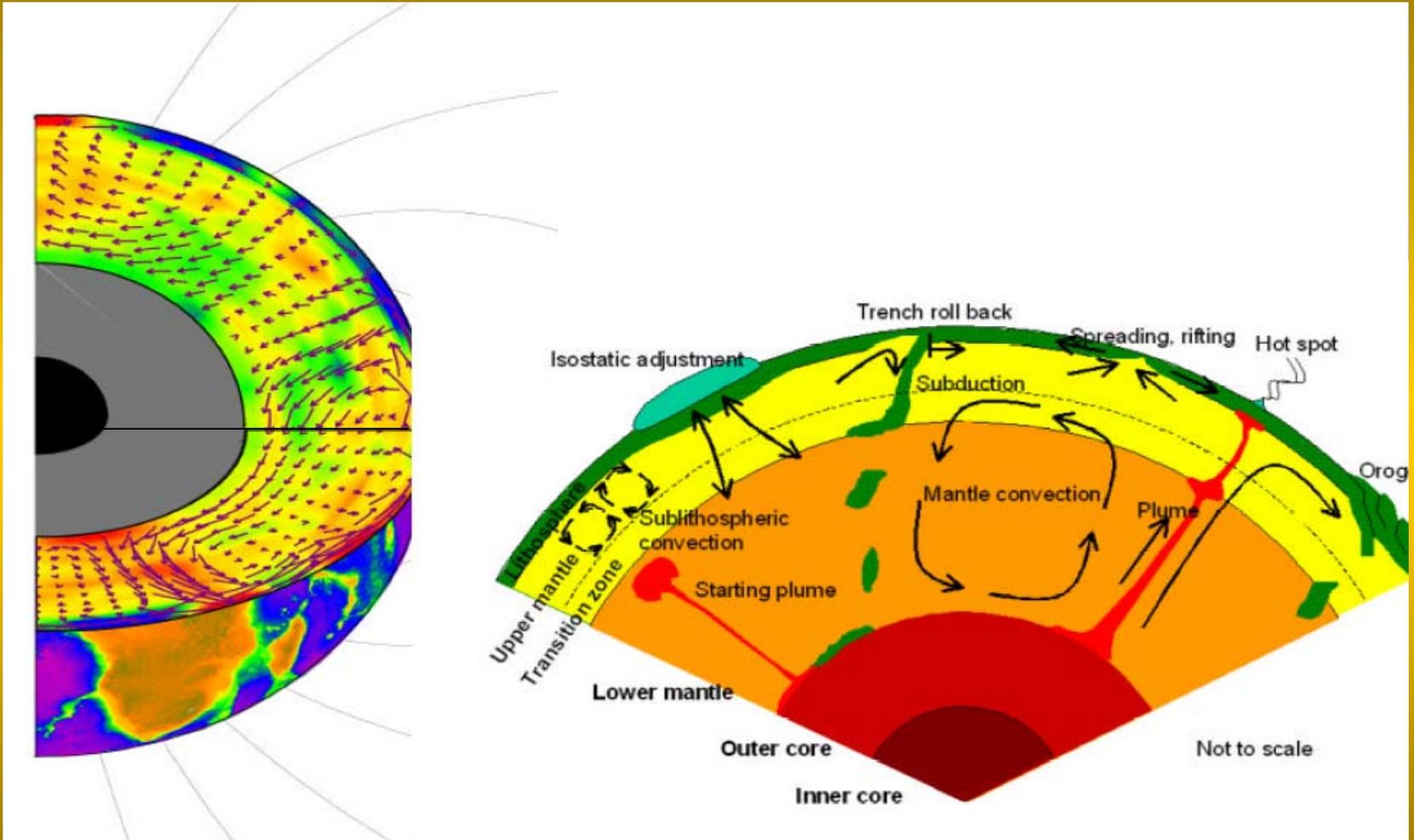
1. **Ausbreitung von seismischen Wellen für ein Erdbeben bei Novy Kostel in Tschechien**
2. **Strahlenverläufe von seismischen Wellen im gesamten Erdkörper**

**Quelle: Dr. Wendt, Collm**

# Seismologie - globales Messnetz - Tomographie



# Seismologie - Tomographie - Plattentektonik



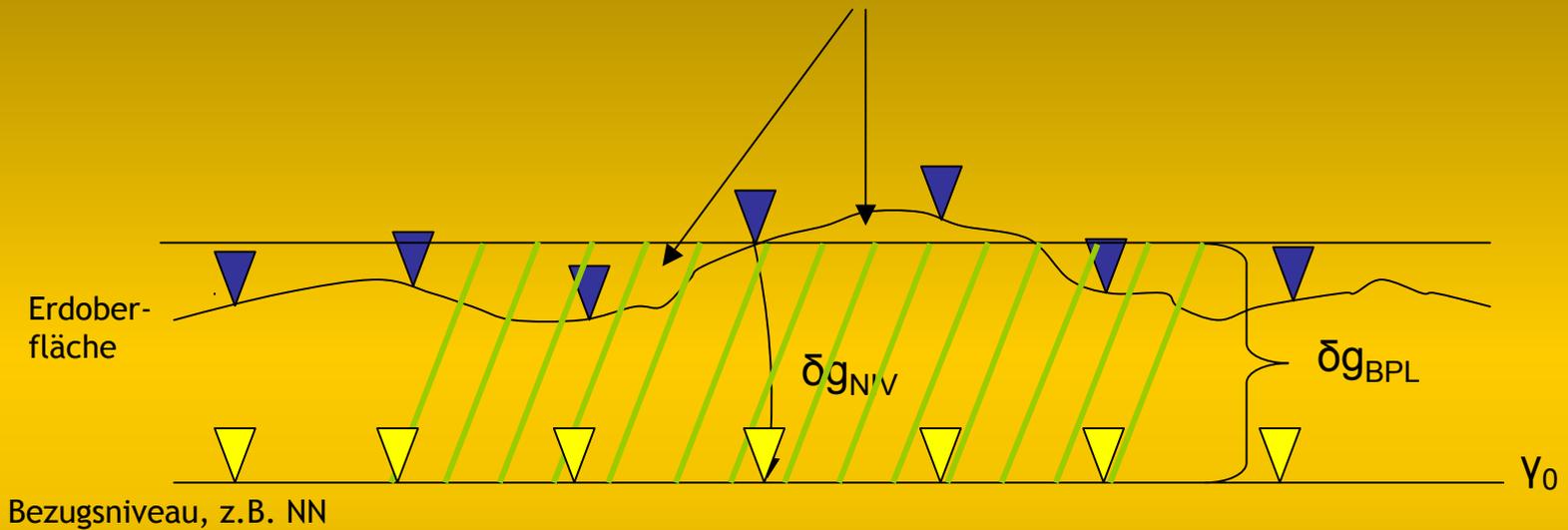
# Angewandte Gravimetrie

**Wie kann man über die Beobachtung  
von Variationen im Schwerefeld (Anomalien)  
in die Tiefe blicken und geologische  
Strukturen interpretieren?**



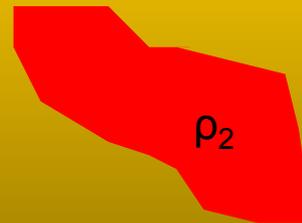
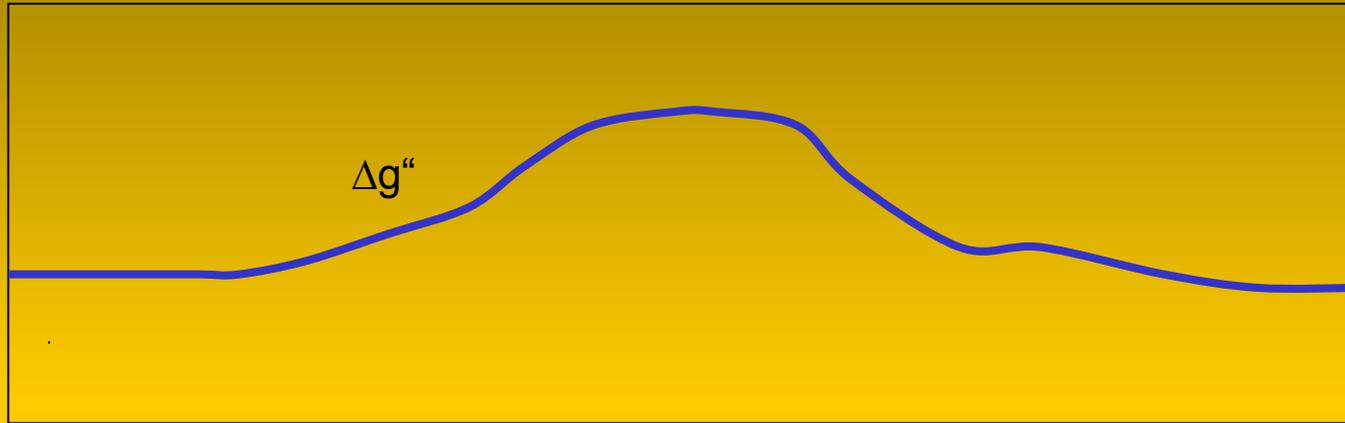
# Angewandte Gravimetrie: Bouguer-Anomalie

$$\Delta g'' = g_{\text{gem}} + \delta g_{\text{NIV}} - \delta g_{\text{BPL}} + \delta g_{\text{TOP}} - \gamma_0$$



# Angewandte Gravimetrie: Bouguer-Anomalie

mGal [ 1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> ]



$\rho_1$

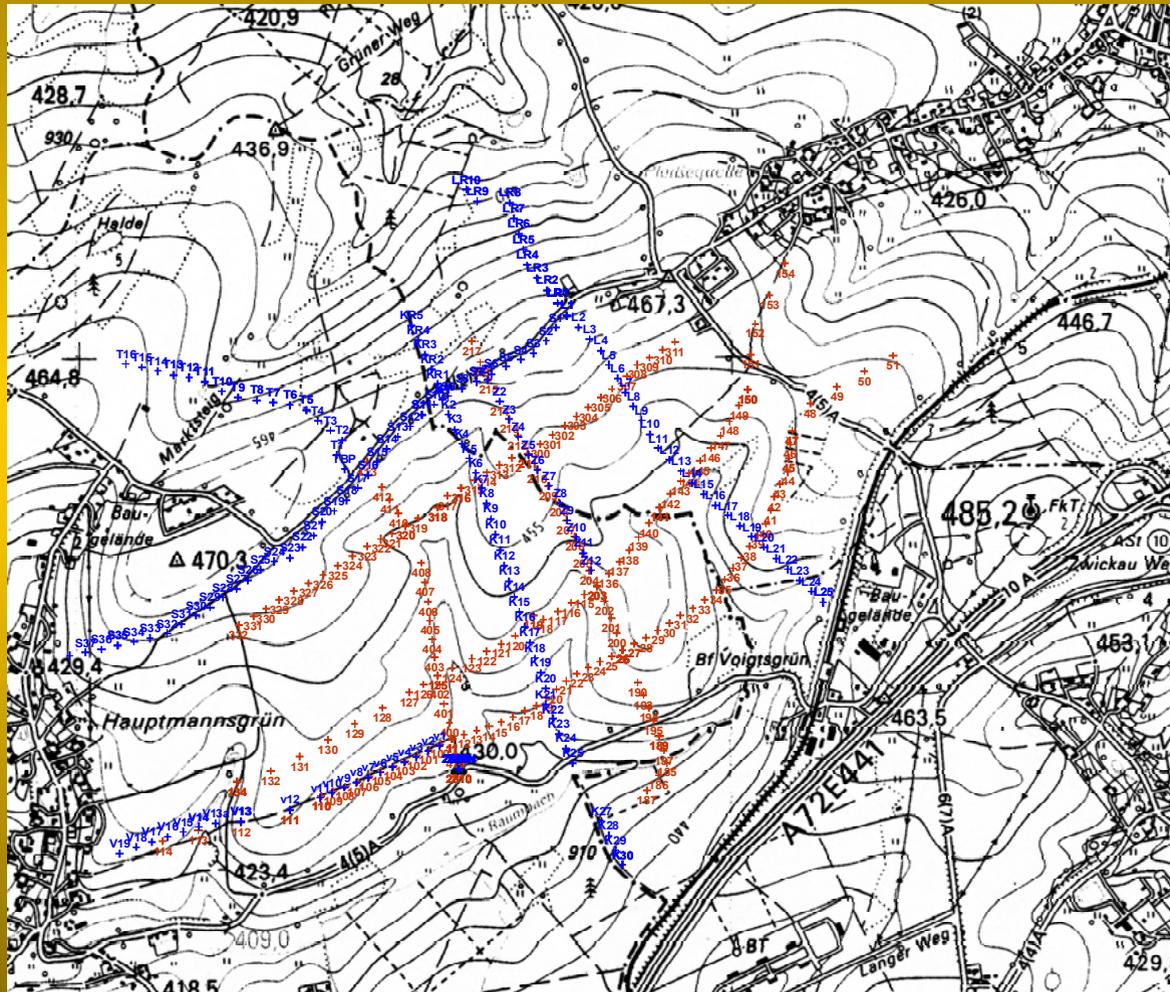
$$\rho_1 < \rho_2$$

# Angewandte Gravimetrie: Messung im Gelände



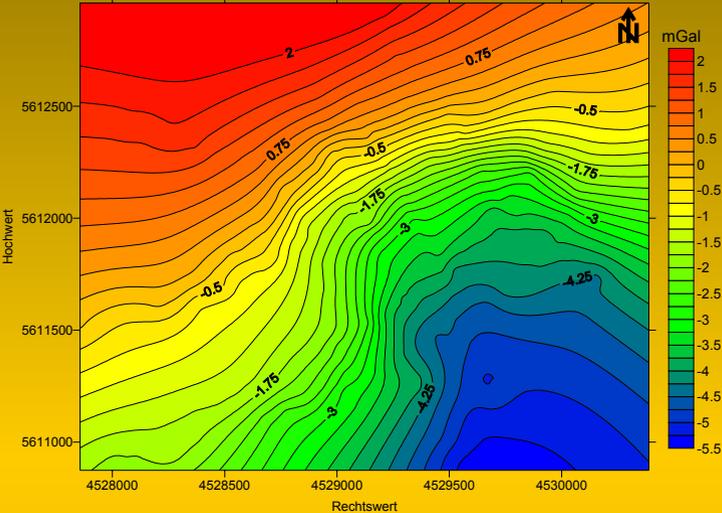
# Angewandte Gravimetrie: vermessene Profile

Messpunktverteilung rot: 2004; blau: 2006



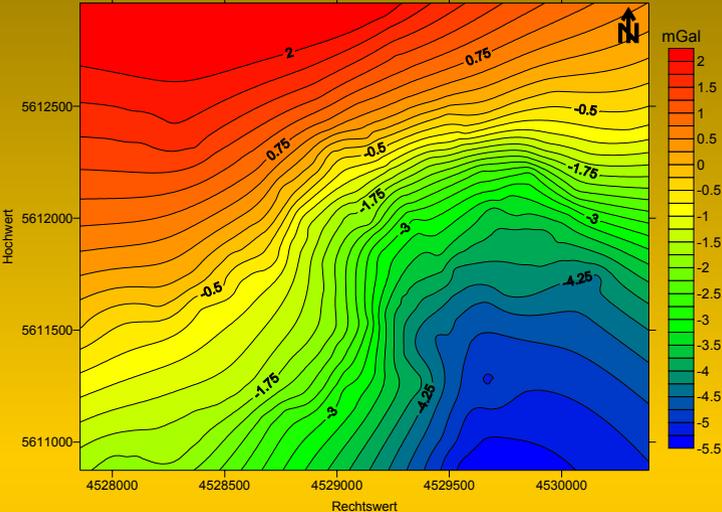
# Angewandte Gravimetrie: Bouguer-Karte

Beobachtete Bouguer-Karte

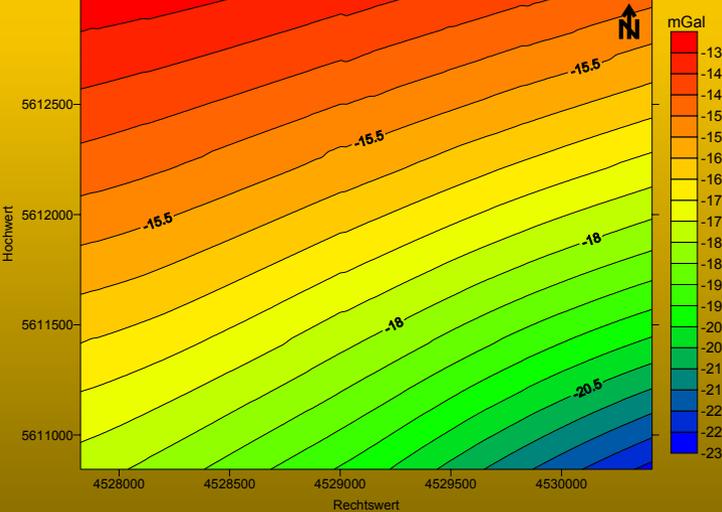


# Angewandte Gravimetrie: Bouguer-Karte

Beobachtete Bouguer-Karte

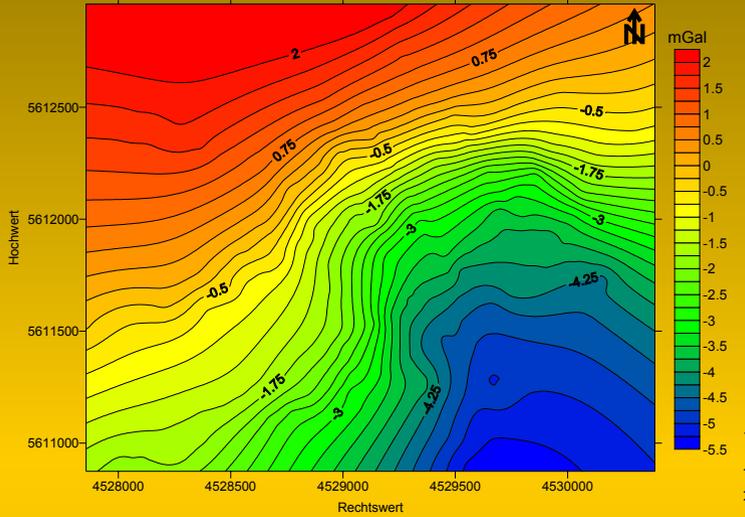


Regionalfeld

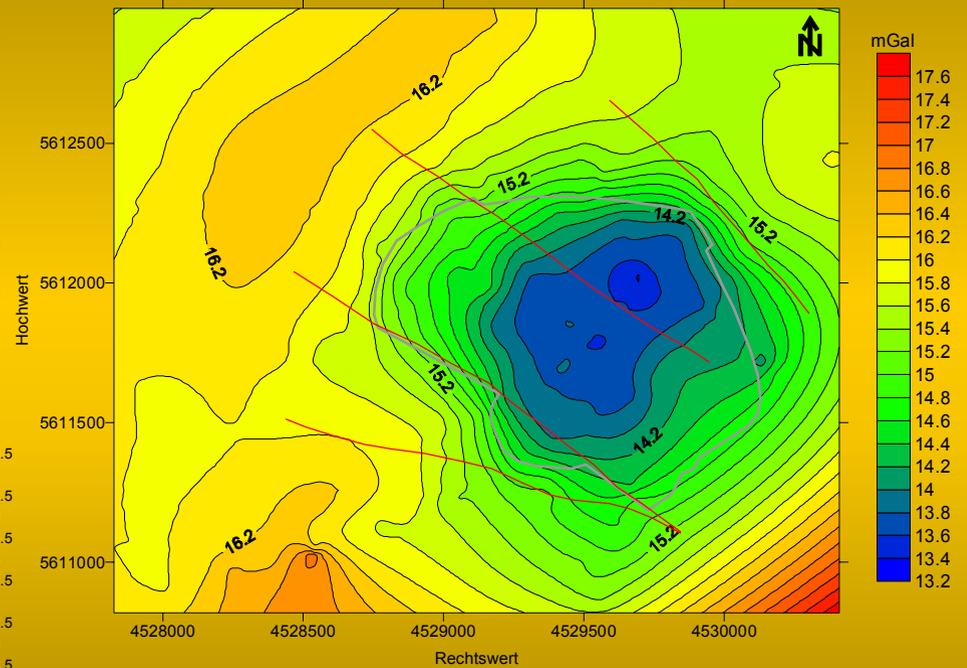


# Angewandte Gravimetrie: Bouguer-Karte

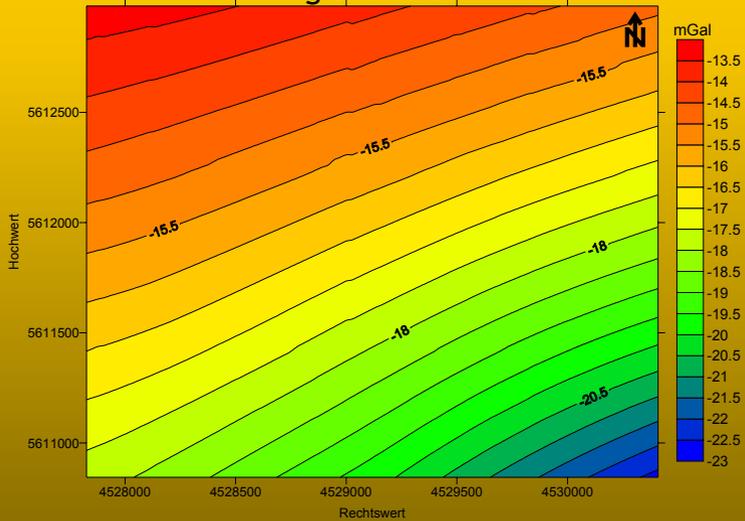
## Beobachtete Bouguer-Karte



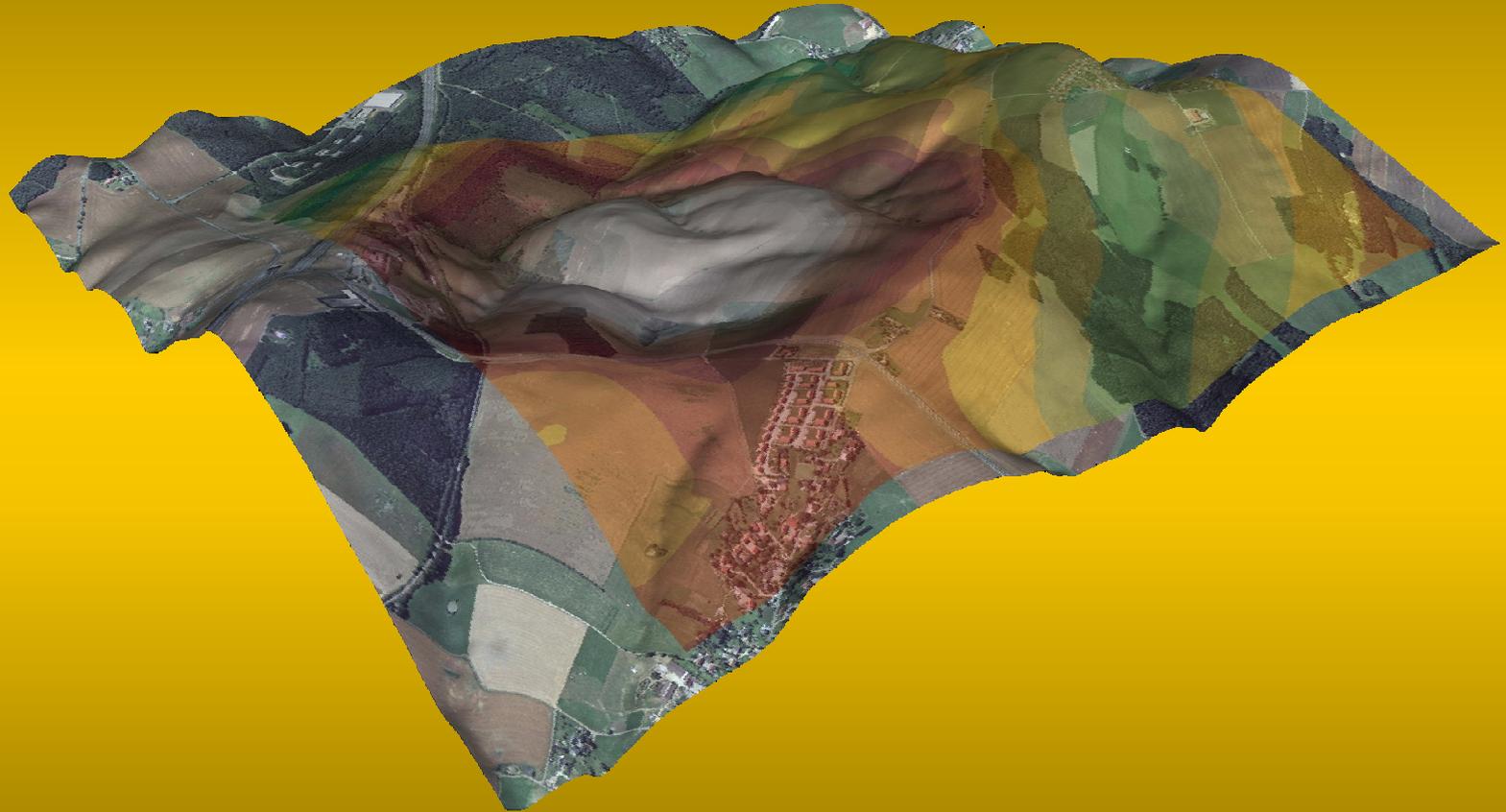
## Lokale Bouguer-Karte



## Regionalfeld



# Angewandte Gravimetrie: Bouguer-Karte im Luftbild



# Angewandte Gravimetrie: 2-dimensionale Modellierung

$$g_{2D} = \sum_{i=1}^n \Delta g_i \quad (20)$$

$$\Delta g_i = 2G\rho \left[ a_i \sin \Phi_i \cos \Phi_i \left( \Theta_i - \Theta_{i+1} + \tan \Phi_i \ln \frac{\cos \Theta_i (\tan \Theta_i - \tan \Phi_i)}{\cos \Theta_{i+1} (\tan \Theta_{i+1} - \tan \Phi_i)} \right) \right] \quad (21)$$

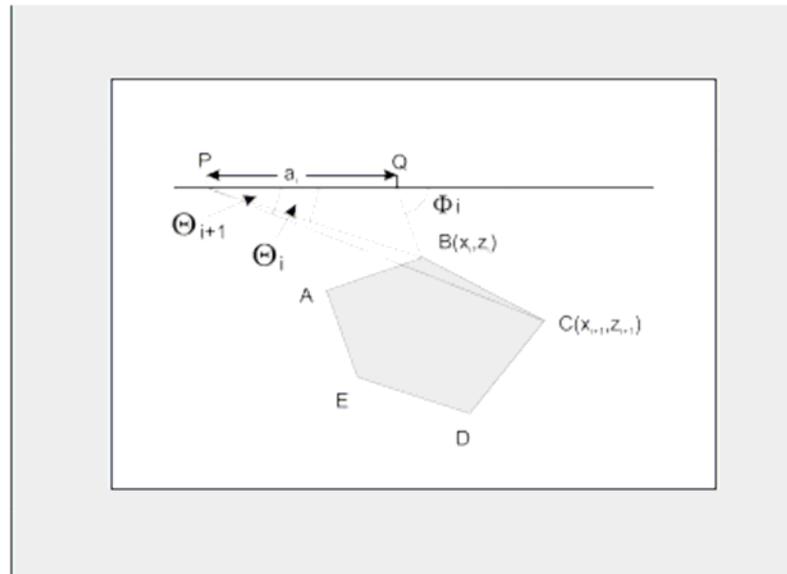
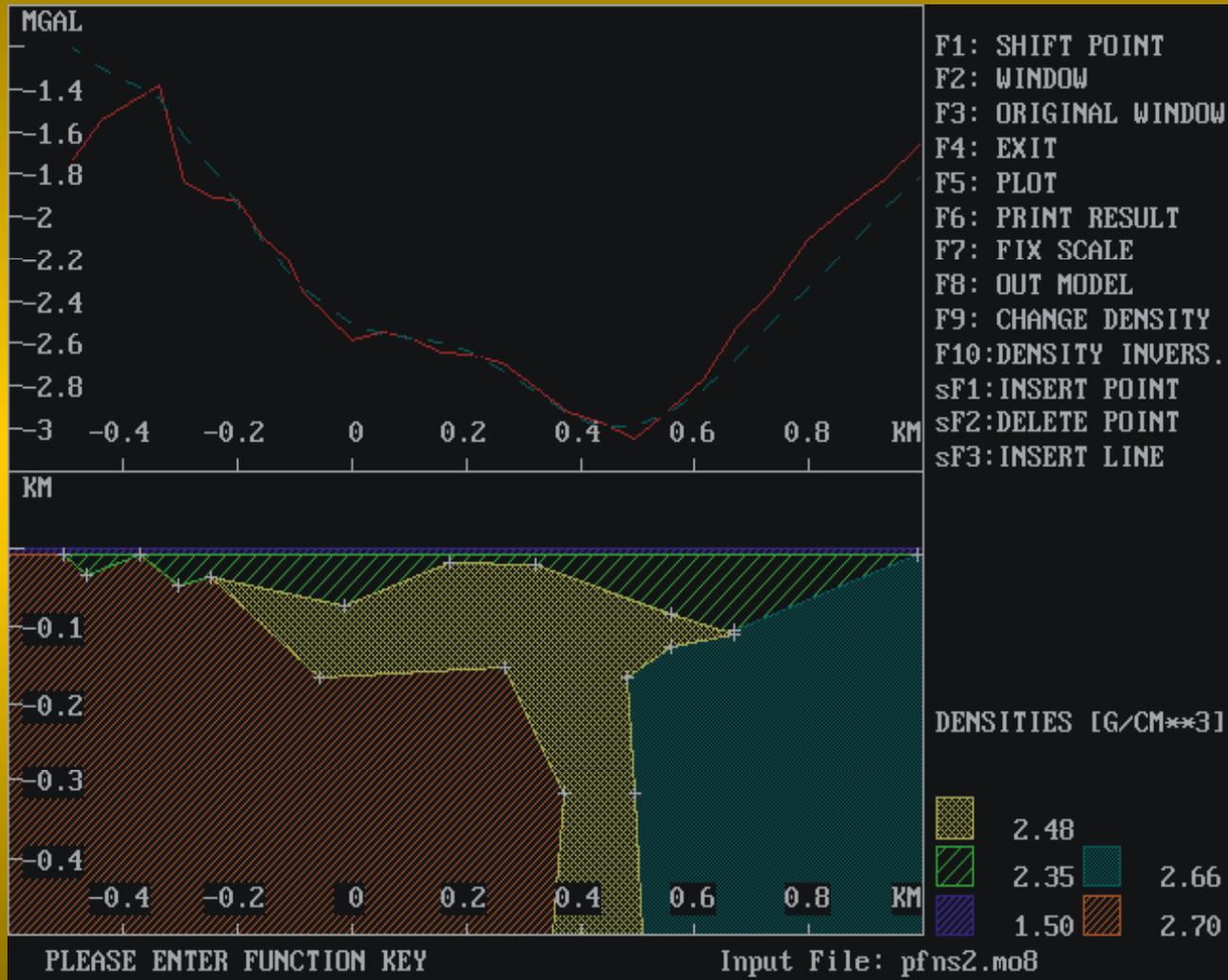


Abb. 7.3: Zur Berechnung eines Polygonzuges mit dem Talwani-Algorithmus.

Durch systematische Variation der Geometrie (Anzahl und Lage der Eckpunkte des Polygons) sowie der Dichte des Modellkörpers und seiner Umgebung wird das Modell soweit verändert, bis die berechnete Anomalie  $g_{2D}$  mit der beobachteten Bouguer-Anomalie  $\Delta g_B$  möglichst gut übereinstimmt.

Eine geologische Struktur ist nach Jung (1961) dann als zweidimensional anzusehen, wenn ihre Länge etwa das drei- bis vierfache der Breite beträgt. Nur in diesem Fall und unter Berücksichtigung anderer geophysikalischer Randbedingungen ist eine 2D-Modellierung berechtigt. Ist die Voraussetzung nicht erfüllt, muß dreidimensional modelliert werden (Götze, 1984; Götze & Lahmeyer, 1988).

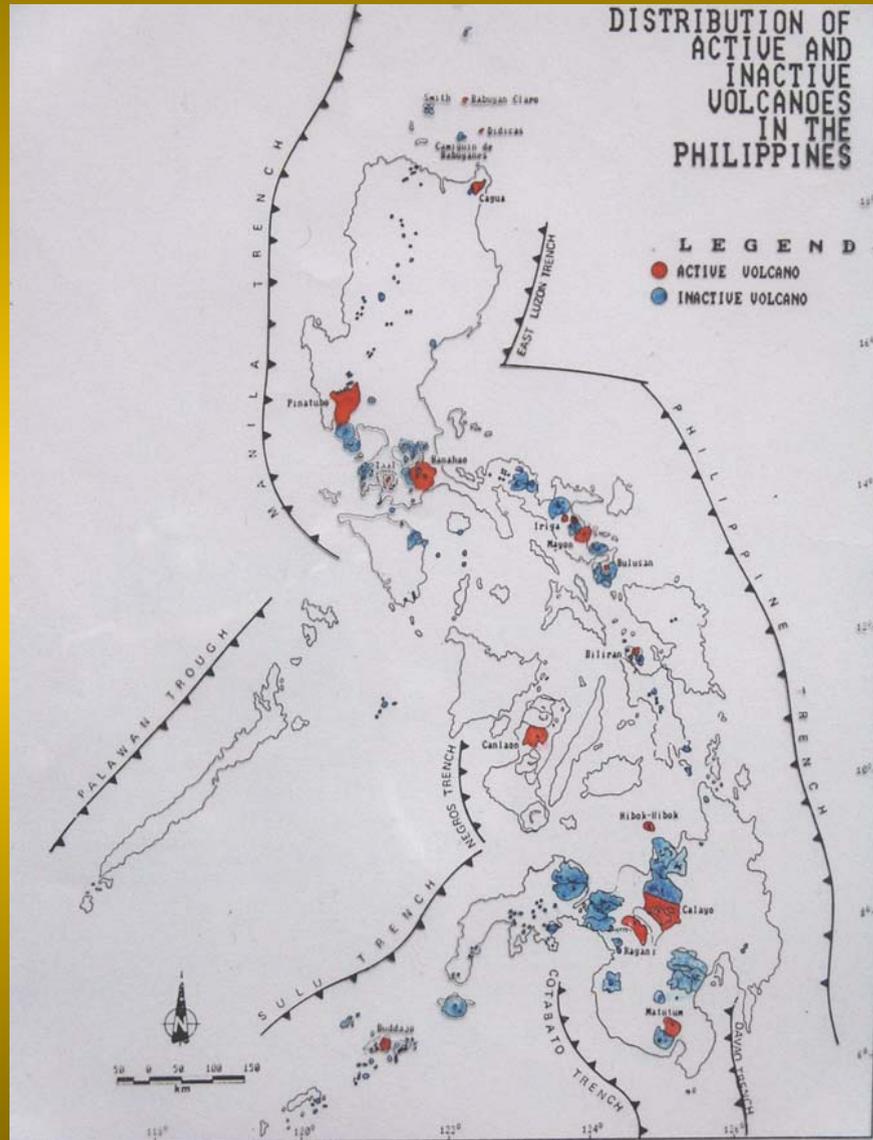
# Angewandte Gravimetrie: 2-dimensionale Modellierung



**Geodynamik -  
Präzisionsgravimetrie**

Beobachtung von  
Schweredifferenzen  
am Mayon Vulkan  
auf den  
Philippinen  
(1992 bis 1995)

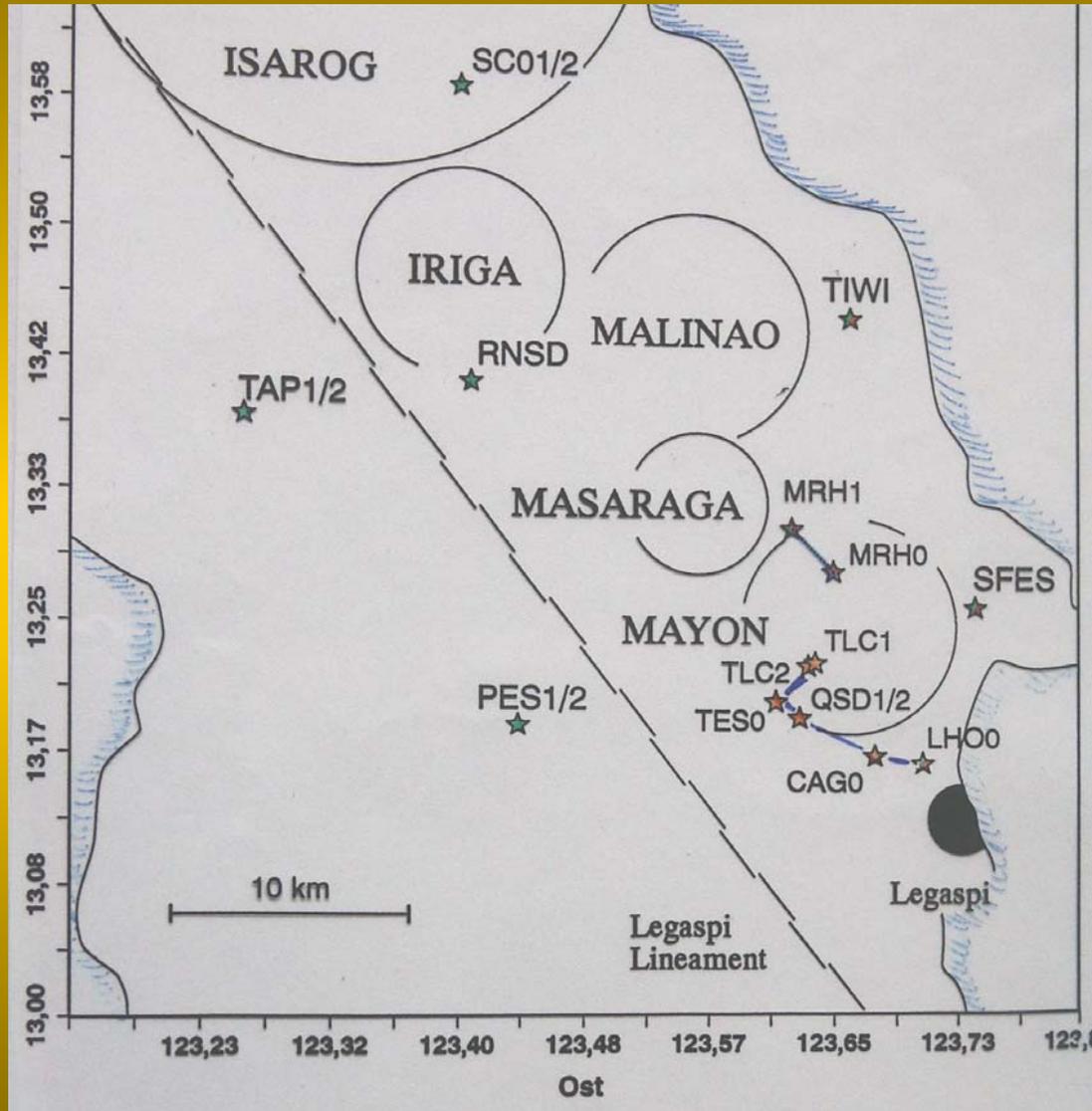
# Geodynamik: Präzisionsgravimetrie







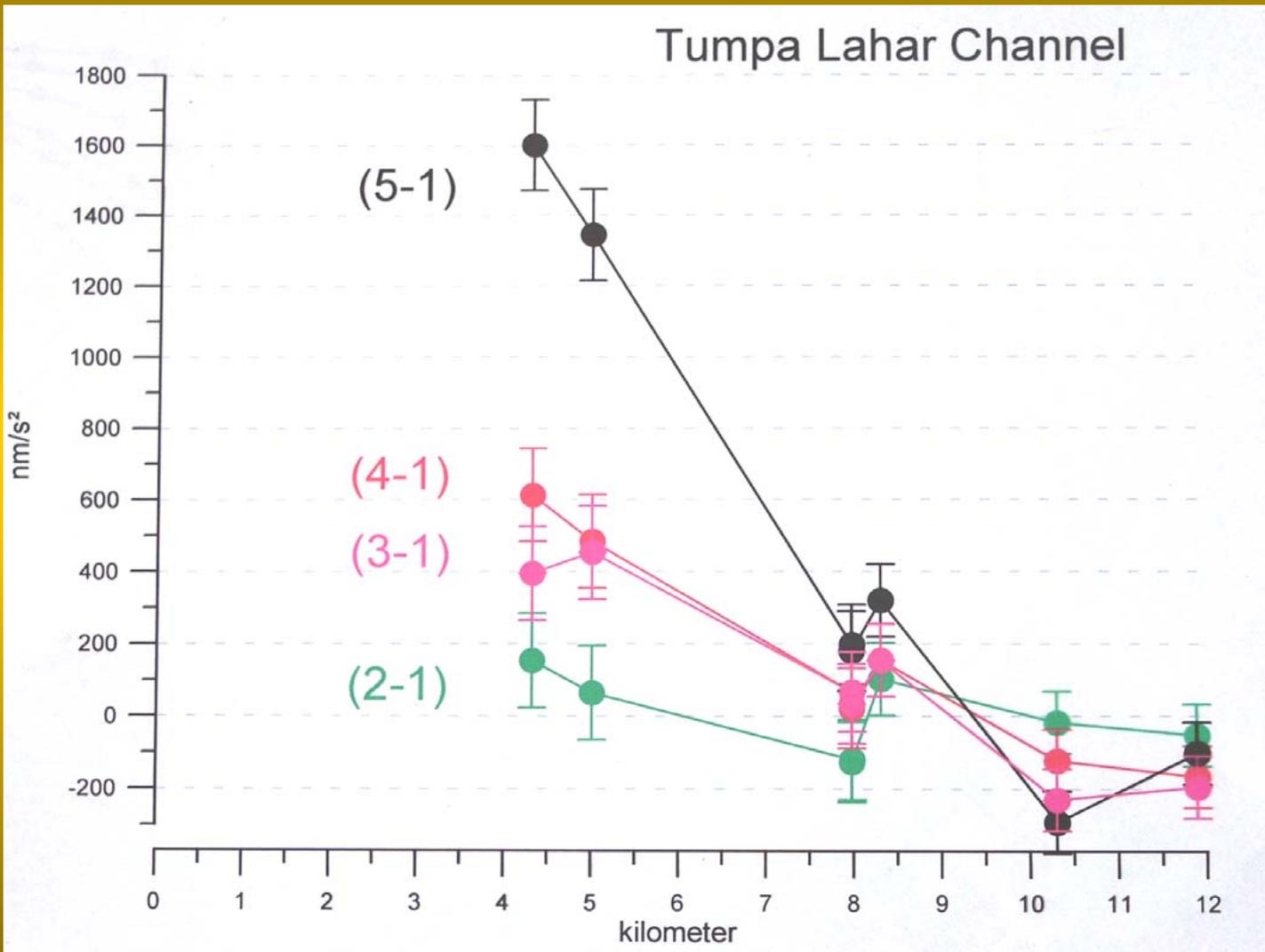
# Geodynamik: Präzisionsgravimetrie



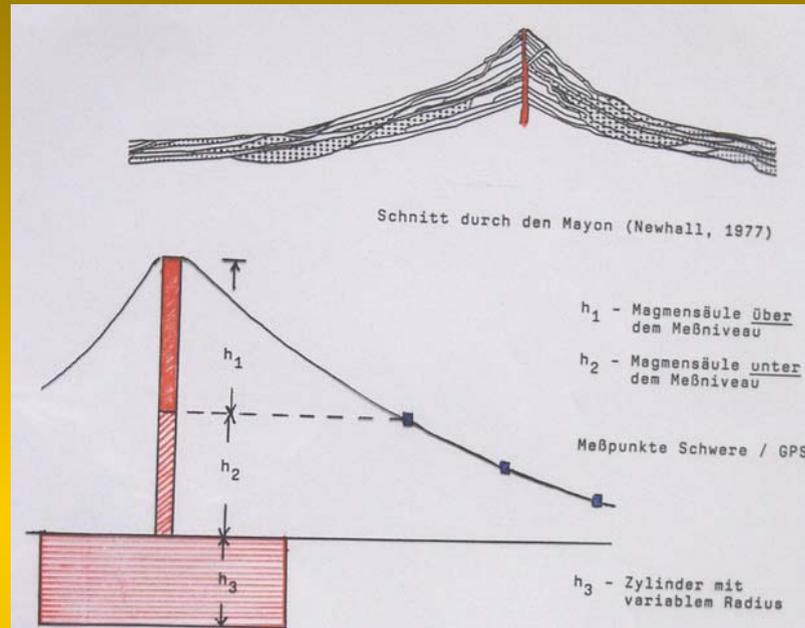
# Präzisionsgravimetrie: Geländearbeit



# Präzisionsgravimetrie: Beobachtete Schwereänderungen



# Präzisionsgravimetrie: Modellvorstellung



Modellannahmen im Falle fehlender Höhenänderungen:

Nach dem Abklingen der Aktivitäten sinkt die Magmensäule ab, und eine Dichteverringerung um  $\Delta\rho$  tritt ein. Das Magma wird in Mikrorisse gepreßt, die unterhalb des Vulkans innerhalb eines Zylinders liegen und dort die mittlere Dichte erhöhen.

Die einzelnen Schwereanteile werden aufsummiert:

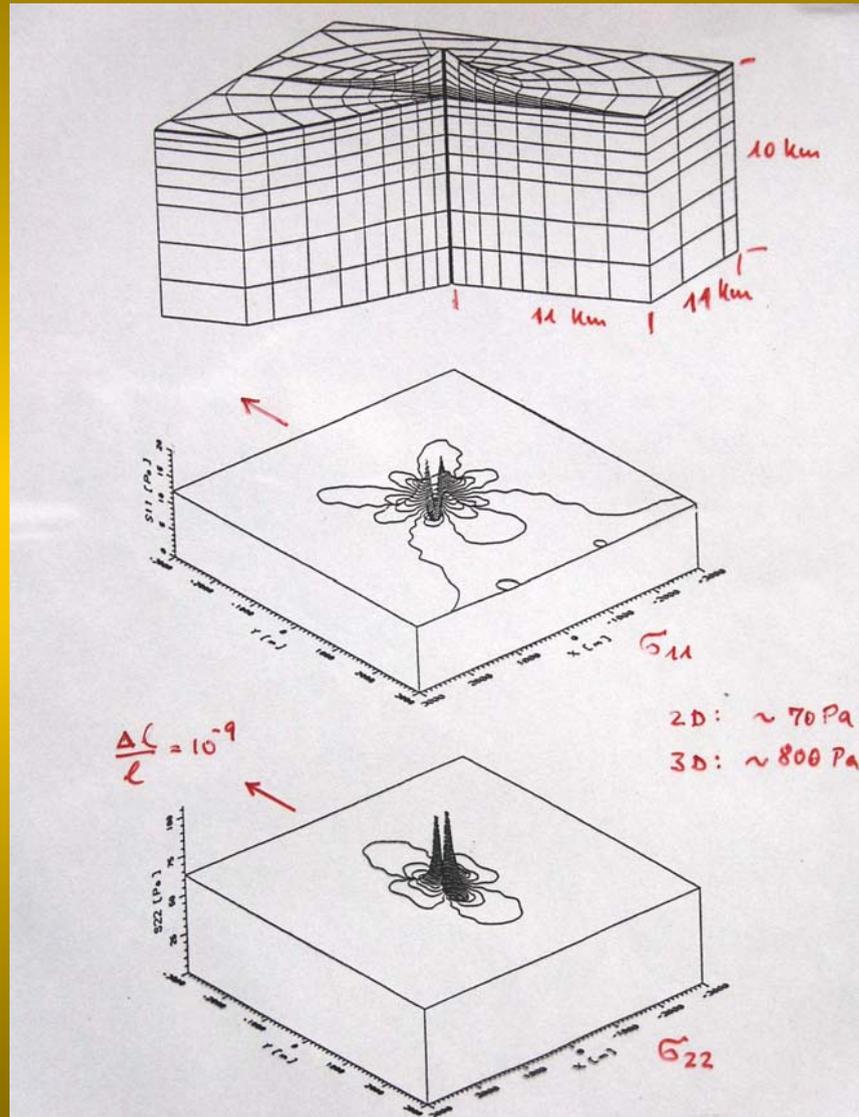
$\Delta g_1$ : Massenanteil über dem Meßniveau bewirkt Anstieg;

$\Delta g_2$ : Massenanteil unter diesem Niveau bewirkt Verringerung;

$\Delta g_3$ : der Zylinder unterhalb des Vulkans bewirkt eine Vergrößerung der Schwere.

Dieses Modell erklärt prinzipiell die Beobachtung, nach der das Abklingen vulkanischer Aktivitäten durch einen Anstieg der Schwere begleitet wird.

# Präzisionsgravimetrie: 3D-Modellierung (FEM)



# Geodynamik. Neigungsmessungen

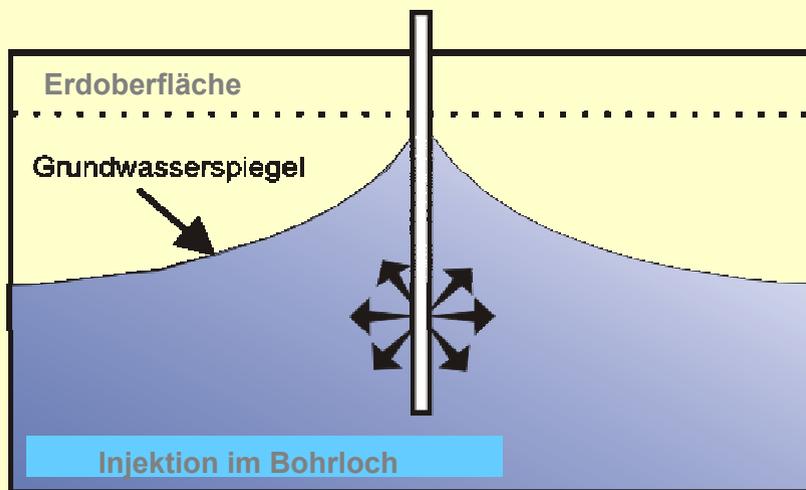
## Dynamik des Erdkörpers: Neigungsmessungen

Beim Spannungsaufbau vor Erdbeben spielen Fluide (Gase und Flüssigkeiten) in der Erdkruste eine wesentliche Rolle.

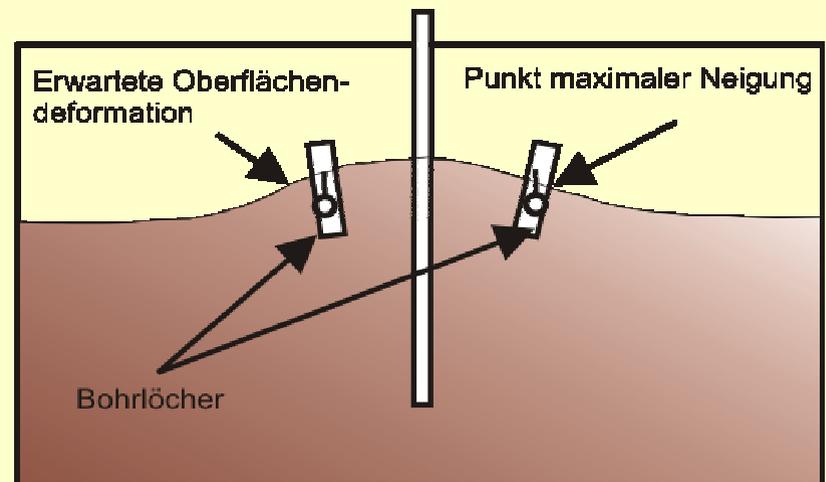
Wie kann man über die Beobachtung von großräumigen Deformationen, die durch eine Tiefeninjektion hervorgerufen werden, die fluidgesteuerten Prozesse in der Erdkruste grundlegend erforschen?

# Großskaliges Injektionsexperiment an der KTB

Bohrloch für den Injektionstest

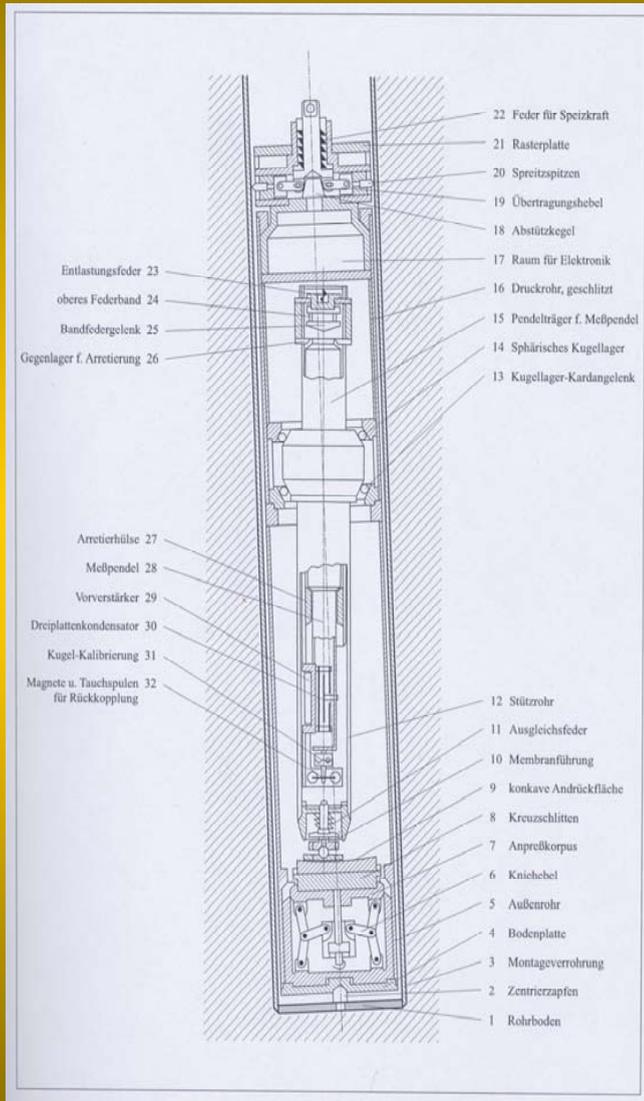


Bohrloch für den Injektionstest

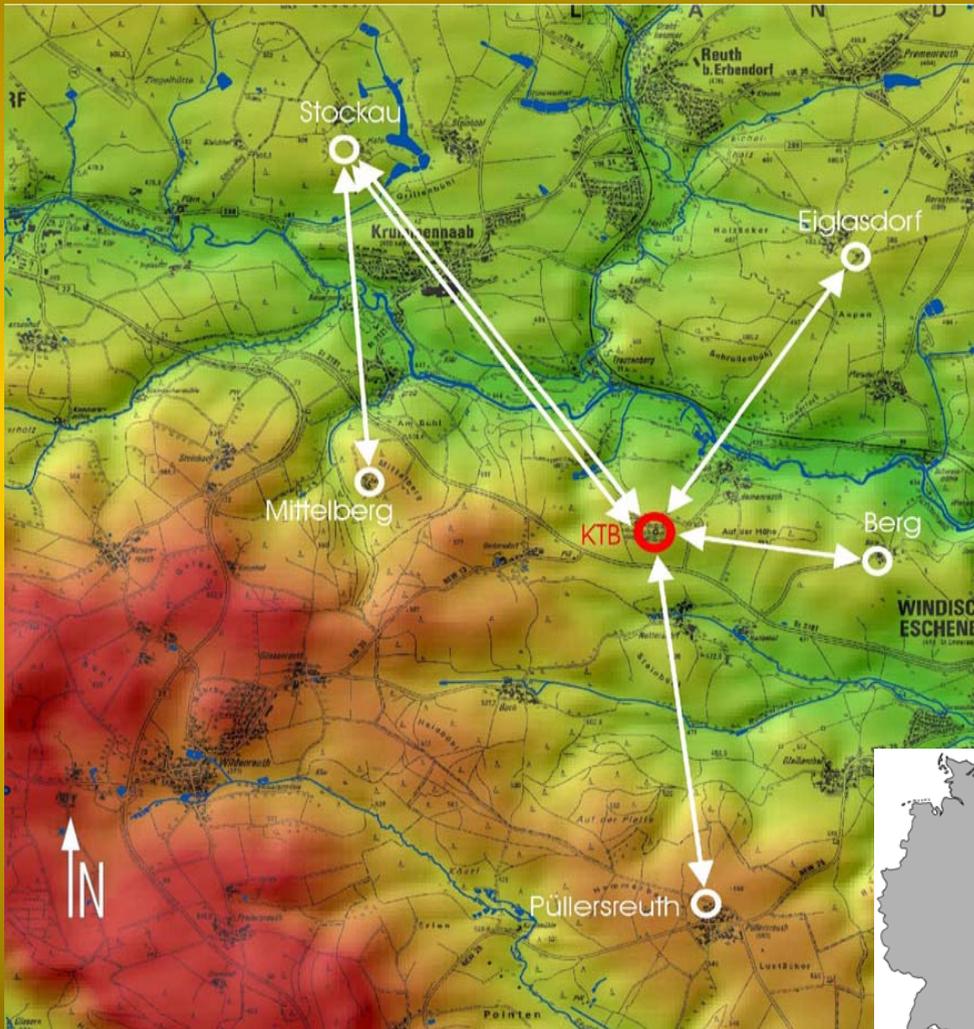


Injektion in 4 km Tiefe (Vorbohrung)  
ca. 200 l / Minute  
ca. ein Jahr kontinuierlich

# Injektion an der KTB: ASKANIA Bohrloch-Neigungsmesser



# Injektion an der KTB: Messnetz der Bohrloch-Neigungsmesser



Entfernung zur KTB:

Berg	1.59 km
Eiglasdorf	2.39 km
Stockau	3.23 km
Mittelberg	1.87 km
Püllersreuth	2.60 km

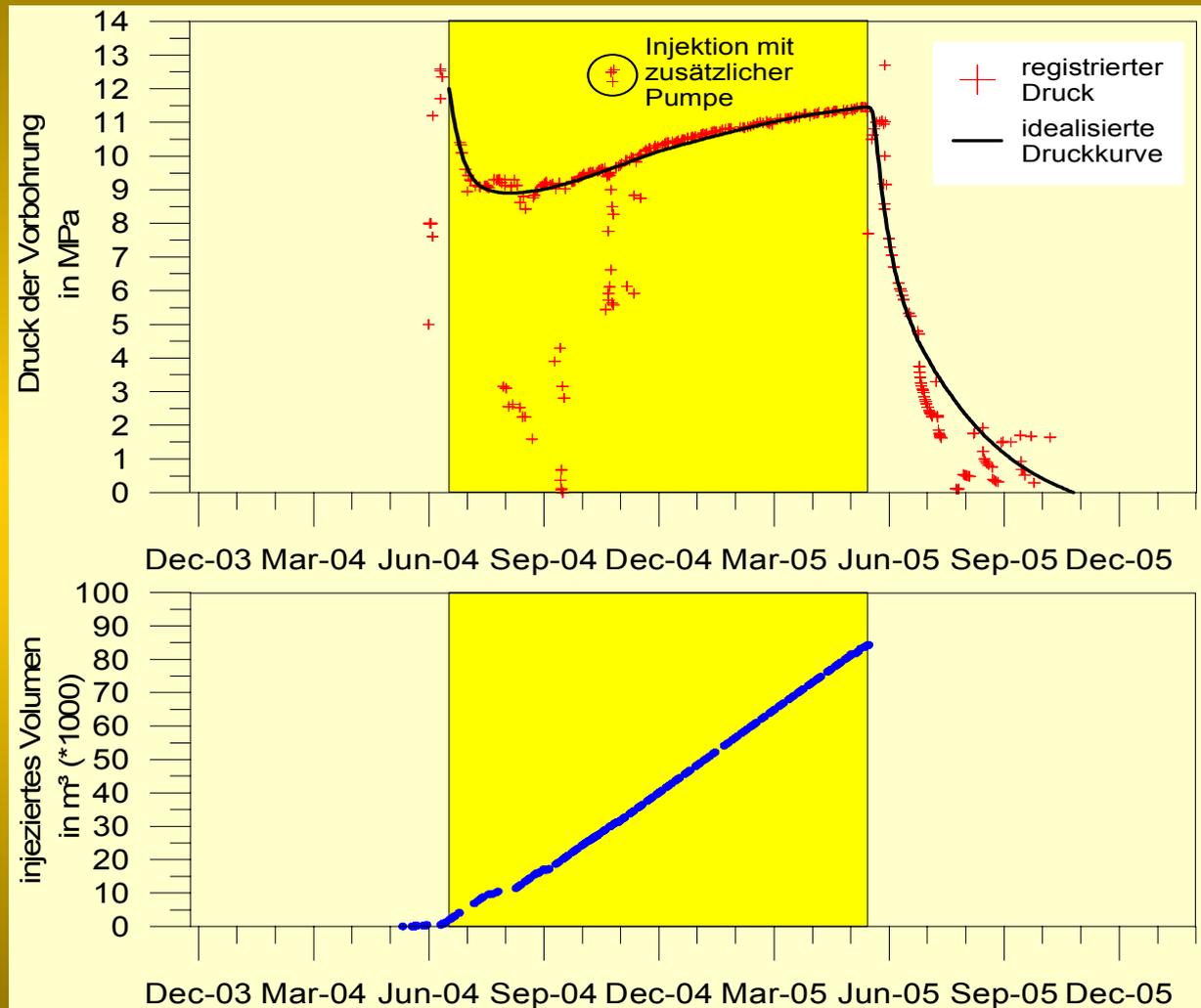
Installationstiefen:

25.5 m - 45.0 m

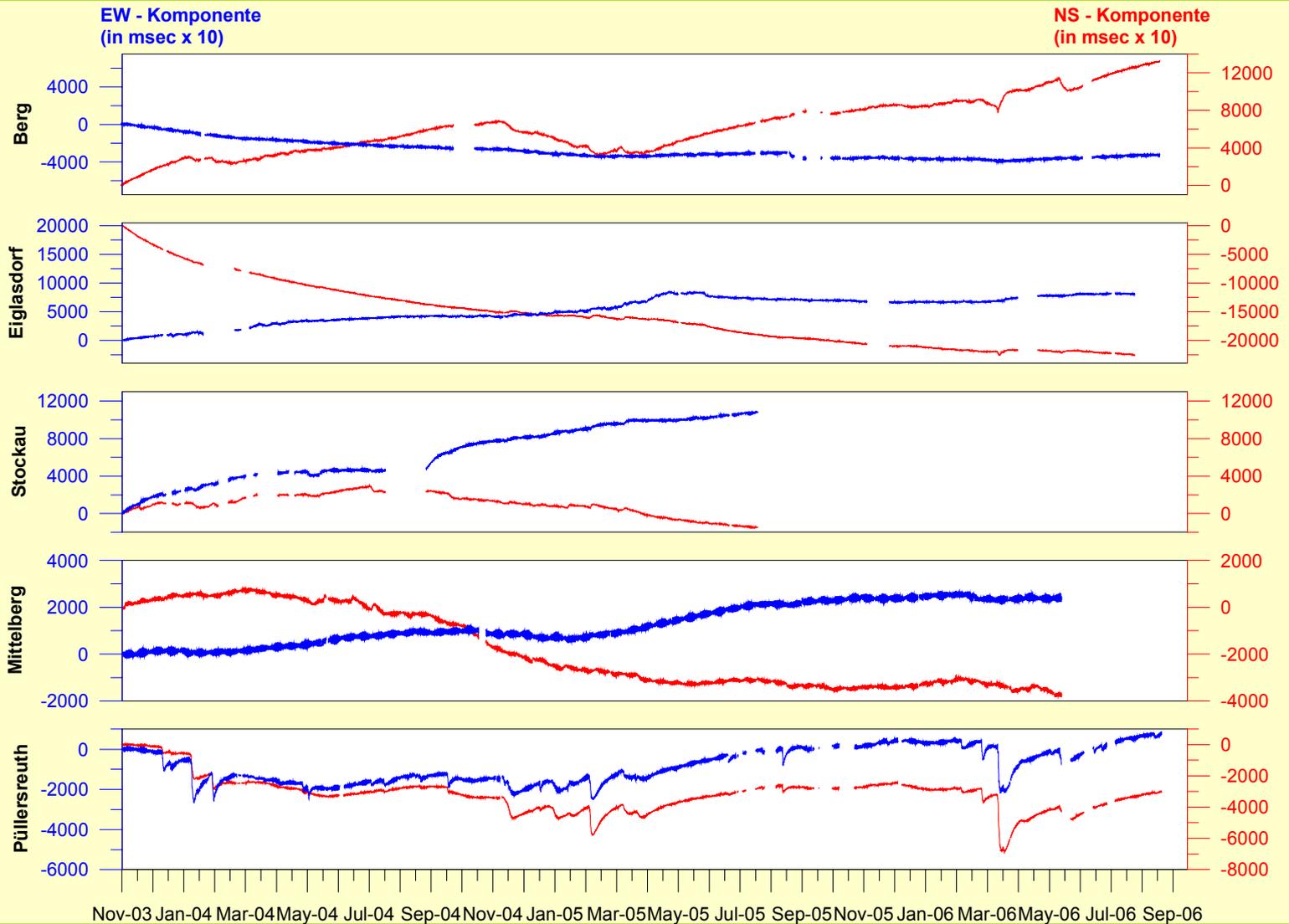
# Injektion an der KTB: Installation eines Neigungsmessers



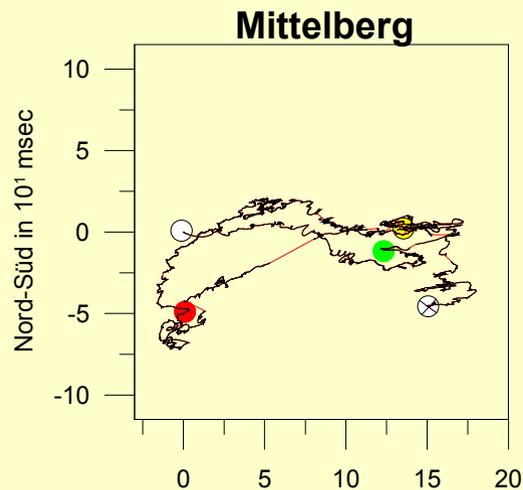
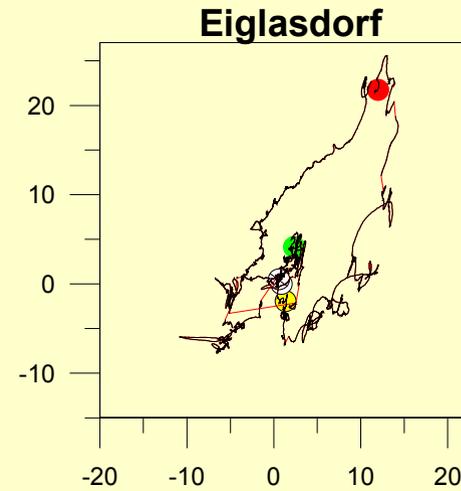
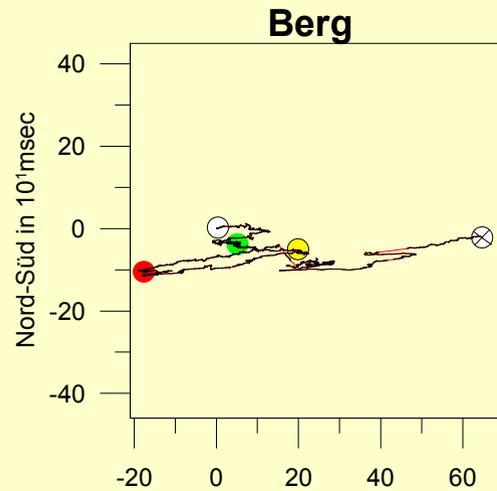
# Injektion an der KTB



# Injektion an der KTB: Beobachtete Neigungszeitreihen

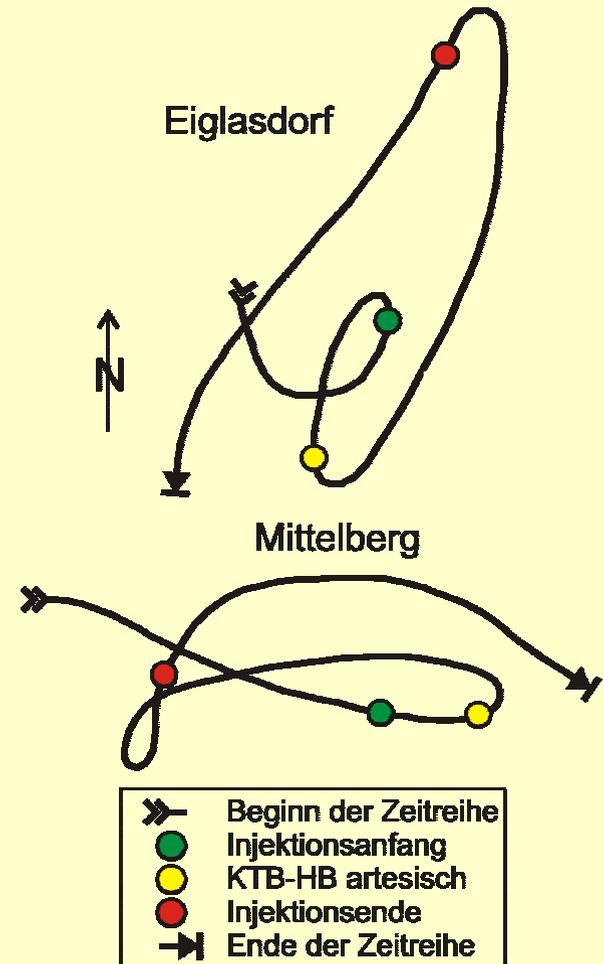
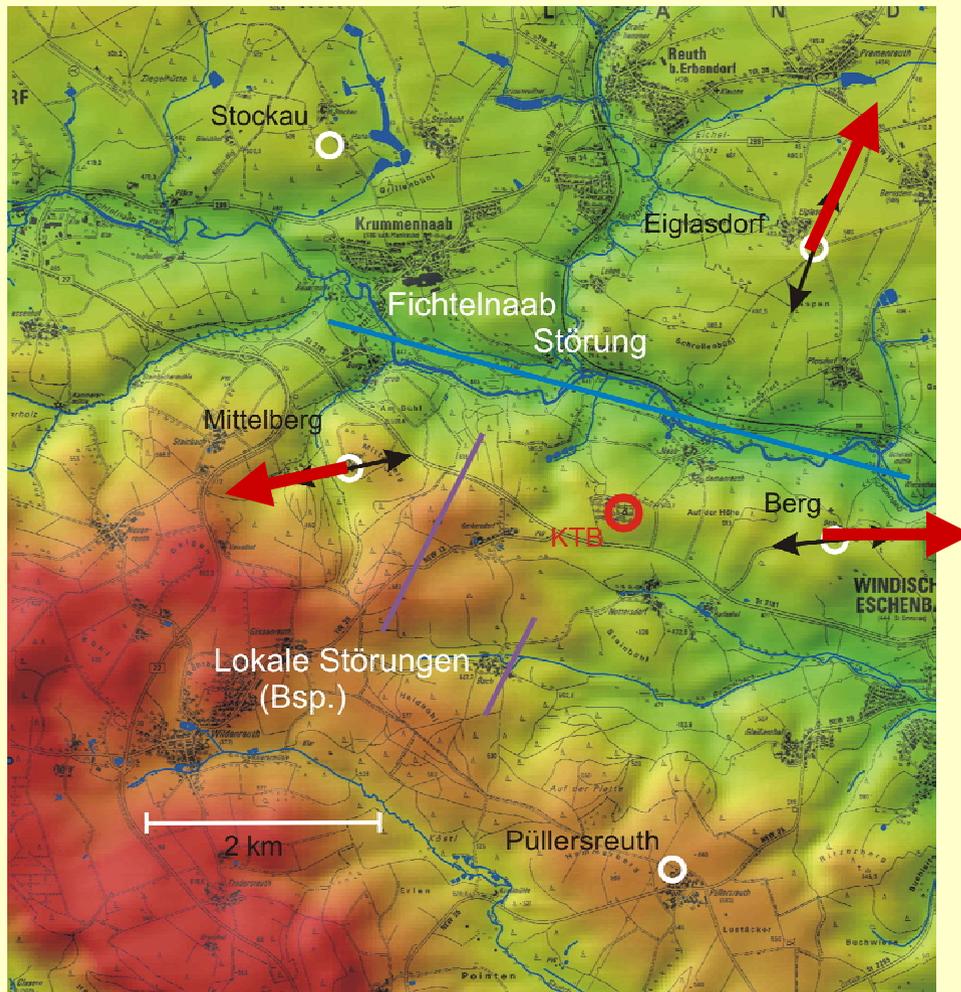


# Injektion an der KTB: Hodogramme (Pendelspitze über Grund)

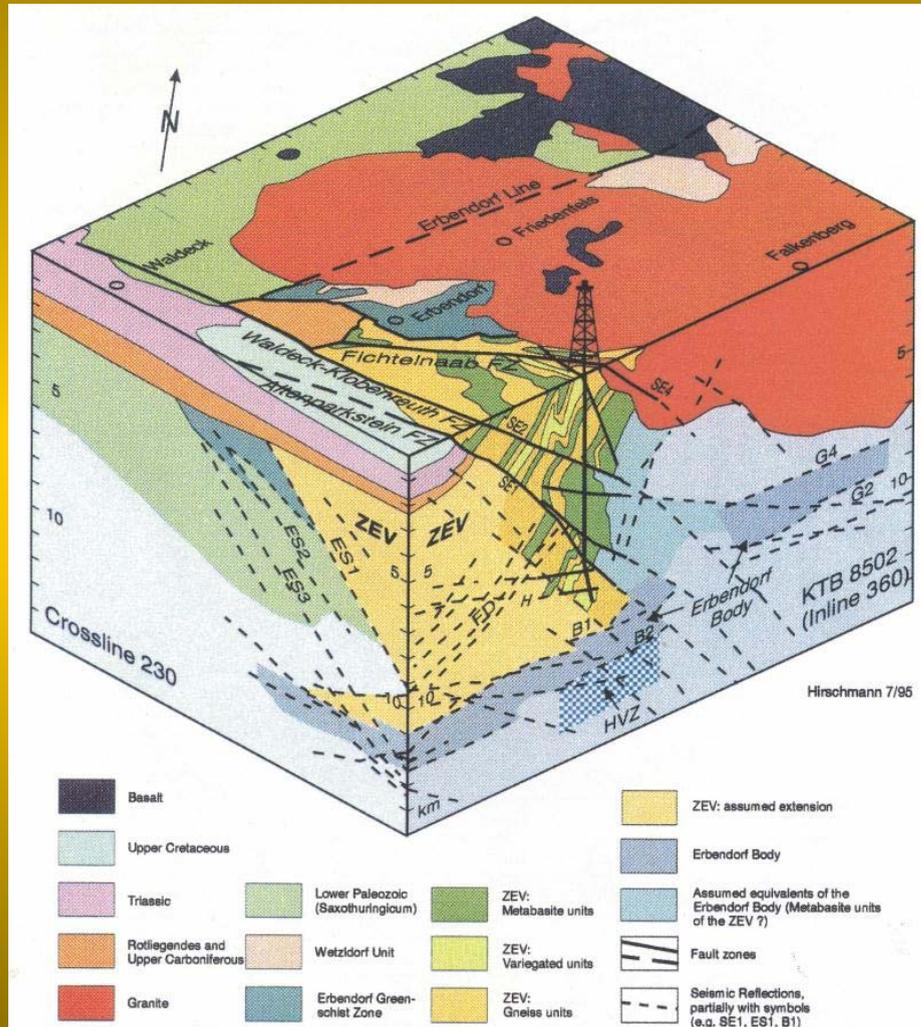


- Anfang der Zeitreihe, November 2003
- Beginn der Injektion, Juni 2004
- KTB-HB artesisch, Oktober 2004
- Ende der Injektion, Mai 2005
- ⊗ Ende der Zeitreihe, September 2006
- Lücken
- vorhandene Werte

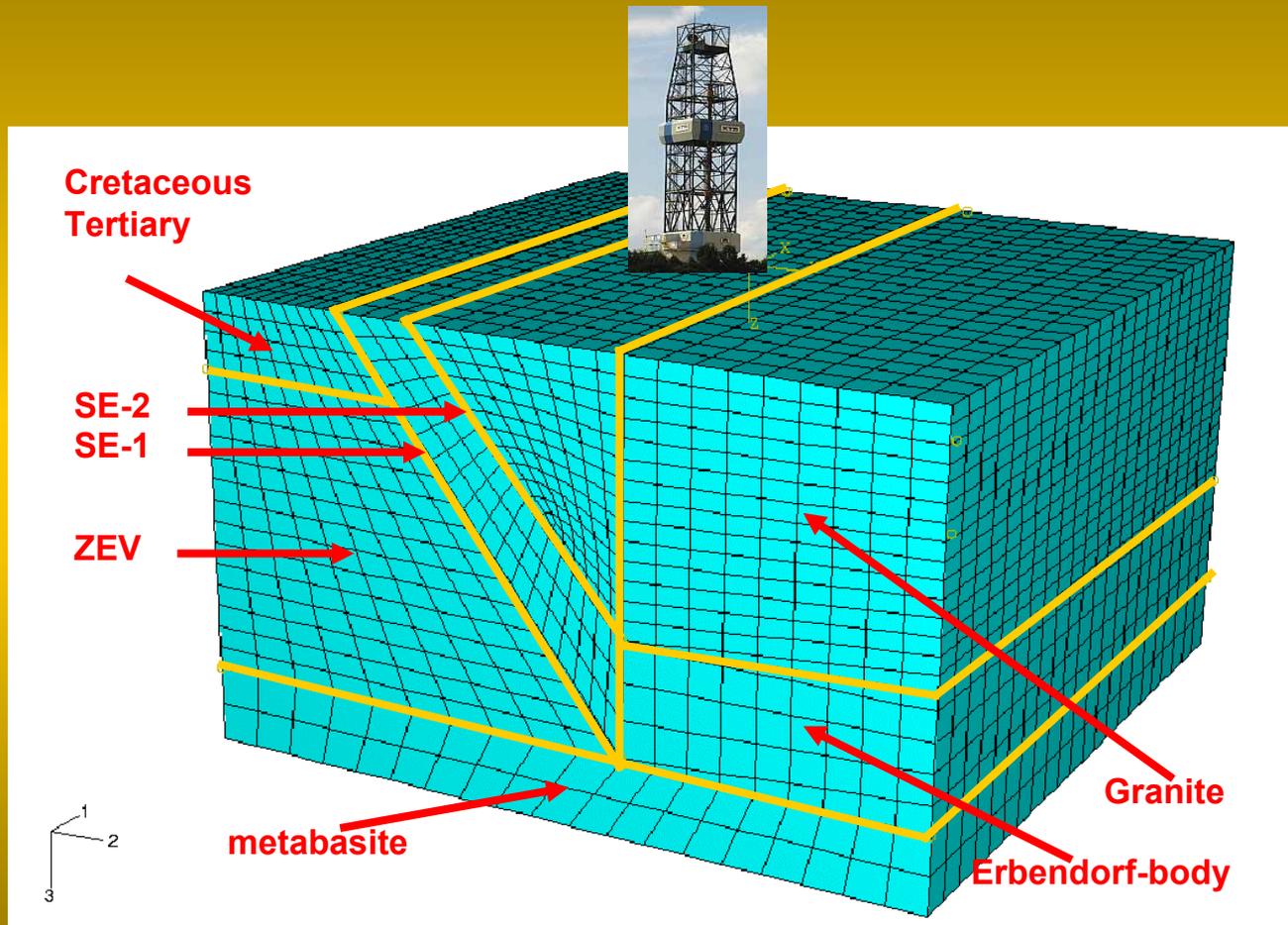
# Injektion an der KTB: Hodogramme (Pendelspitze über Grund)



# Injektion an der KTB: 3D-Modellierung des Injektionsprozesses



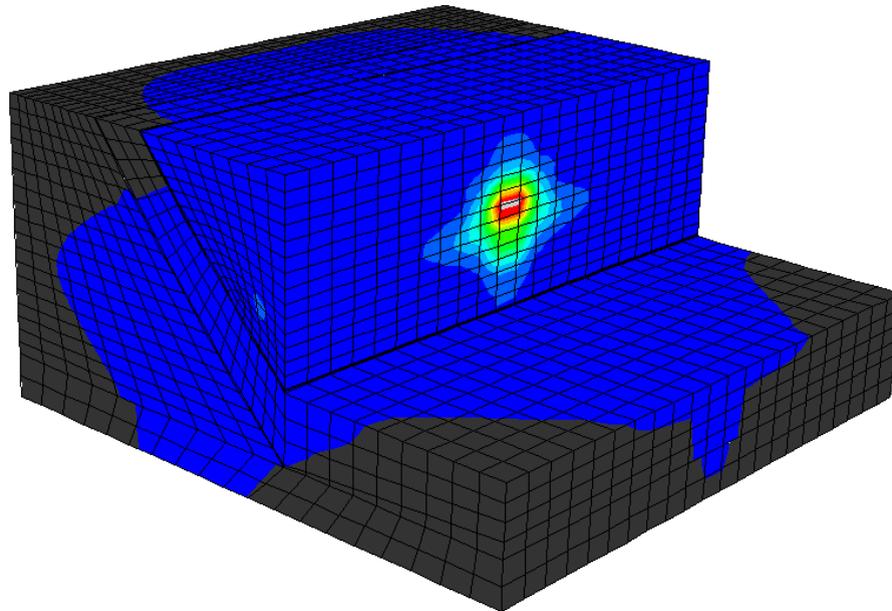
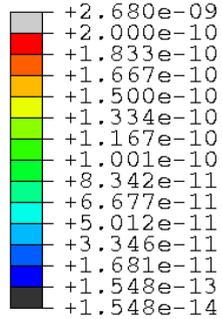
# Injektion an der KTB: 3D-Modellierung des Injektionsprozesses



# Injektion an der KTB: 3D-Modellierung des Injektionsprozesses

Viewport: 1 ODB: /home/jahr/Job-5a.odb

FLVEL, Magnitude  
(Ave. Crit.: 75%)



1  
2  
3

ODB: Job-5a.odb ABAQUS/Standard 6.3-5 Tue Jun 28 16:01:02 CEST 2005

Step: INJECTION, Injektion von Fluid  
Increment 6: Step Time = 3.1500E+07  
Primary Var: FLVEL, Magnitude  
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +7.203e+01

## Fazit:

- **Geophysikalische  
Messverfahren**
- **Seismik - Seismologie  
Aufbau und Dynamik der Erde**
- **Gravimetrie - Präzisionsgravimetrie  
Massenverteilung - bewegung**
- **Neigungsmessungen  
Fluidgesteuerte Prozesse**
- **Ausblick: Numerische  
Modellierungen,  
Satellitenbeobachtungen**



*Vielen Dank für  
die Aufmerksamkeit*

**Kontakt:**

**thomas.jahr@uni-jena.de  
[www.geo.uni-jena.de/geophysik](http://www.geo.uni-jena.de/geophysik)**