

Seismologie - Erdbeben

- Was sind die Aufgaben eines **Erdbebendienstes**?
- Wie kann man die **Herdzeit** eines Erdbebens bestimmen?
- Wie das **Epizentrum** und **die Tiefe** eines Erdbebens?
- Wie kann man die Stärke eines Erdbebens abschätzen (**Richter Skala**)?
- Wie kann man die durch Erdbeben verursachten Schäden kategorisieren (**seismische Intensität, Mercalli Skala**)?
- Erdbebenvorhersage, Erdbebengefährdung

Literatur: Mussett und Khan, Kapitel 5
Shearer, Kapitel 9

Cooler www sites

- Bayerischer Erdbebendienst - www.erdbebendienst.de
- NEIC (United States Geological Survey)
earthquake.usgs.gov/regional/neic
- GFZ Potsdam - geofon.gfz-potsdam.de
- EMSC (Event info) - www.emsc-csem.org
- ORFEUS (continuous data) - www.orfeus-eu.org
- globalquakemodel.org -> seismic risk

Erdbebenlokalisierung

Was beobachten wir?

- Ankunftszeiten von P und S Wellen an verschiedenen Stationen

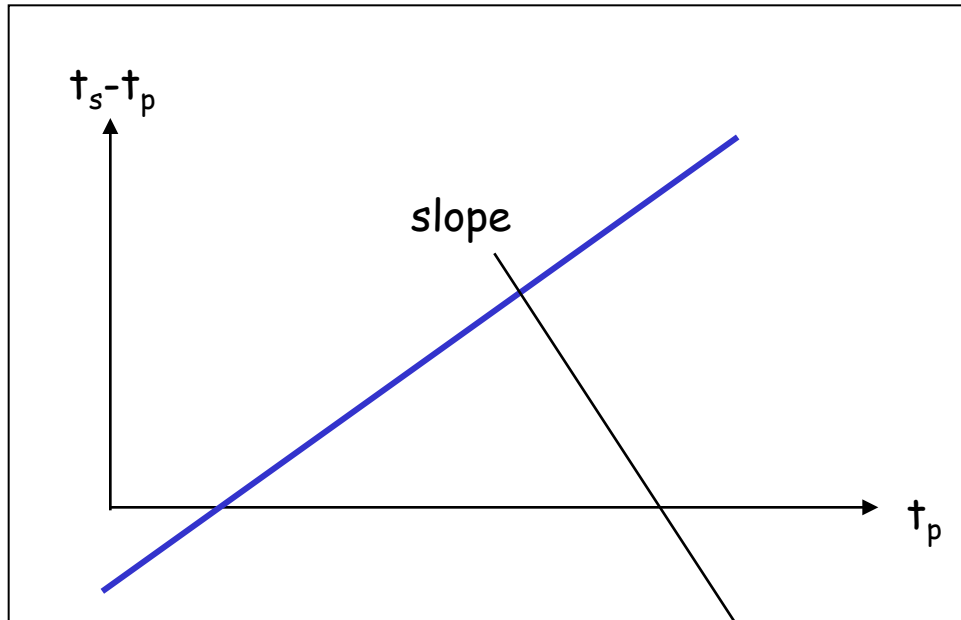
Was wollen wir wissen?

- Herdzeit des Erdbebens
- Epizentrum und Tiefe

Wir nehmen an, das Erdbeben passiert zur Zeit t_0 und wir kennen die seismischen Eigenschaften des (homogenen) Mediums v_p (Wellen) und v_s (Wellen). Für eine Station mit der Distanz D gilt:

$$v_P = \frac{\Delta}{t_P - t_0}, \quad v_S = \frac{\Delta}{t_S - t_0}$$

Wadati Diagramm



... nach kurzer Rechnung ...

$$(t_s - t_p) = \left(\frac{v_P}{v_S} - 1\right)(t_p - t_0)$$

$$y = a \quad x$$

Erdbebenlokalisierung

Mit der Steigung $v_p/v_s - 1$ des Diagrams können wir v_p/v_s bestimmen. Damit ergibt sich für die Herdzeit:

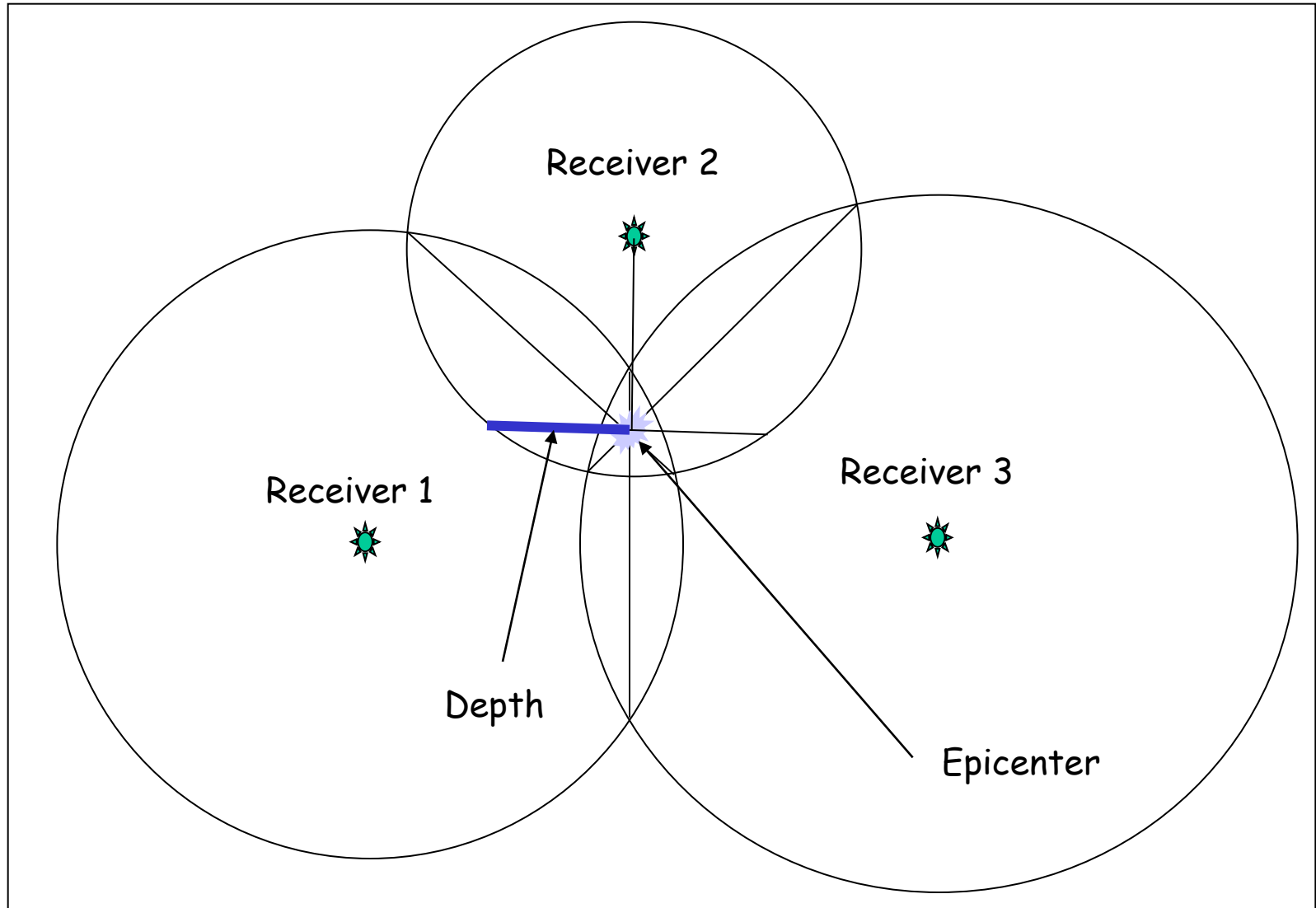
$$t_0 = t_P - \frac{t_S - t_P}{\frac{v_P}{v_S} - 1}$$

Und die Entfernung des Erdbebens von der Station i mit P Ankunftszeit t_{Pi}

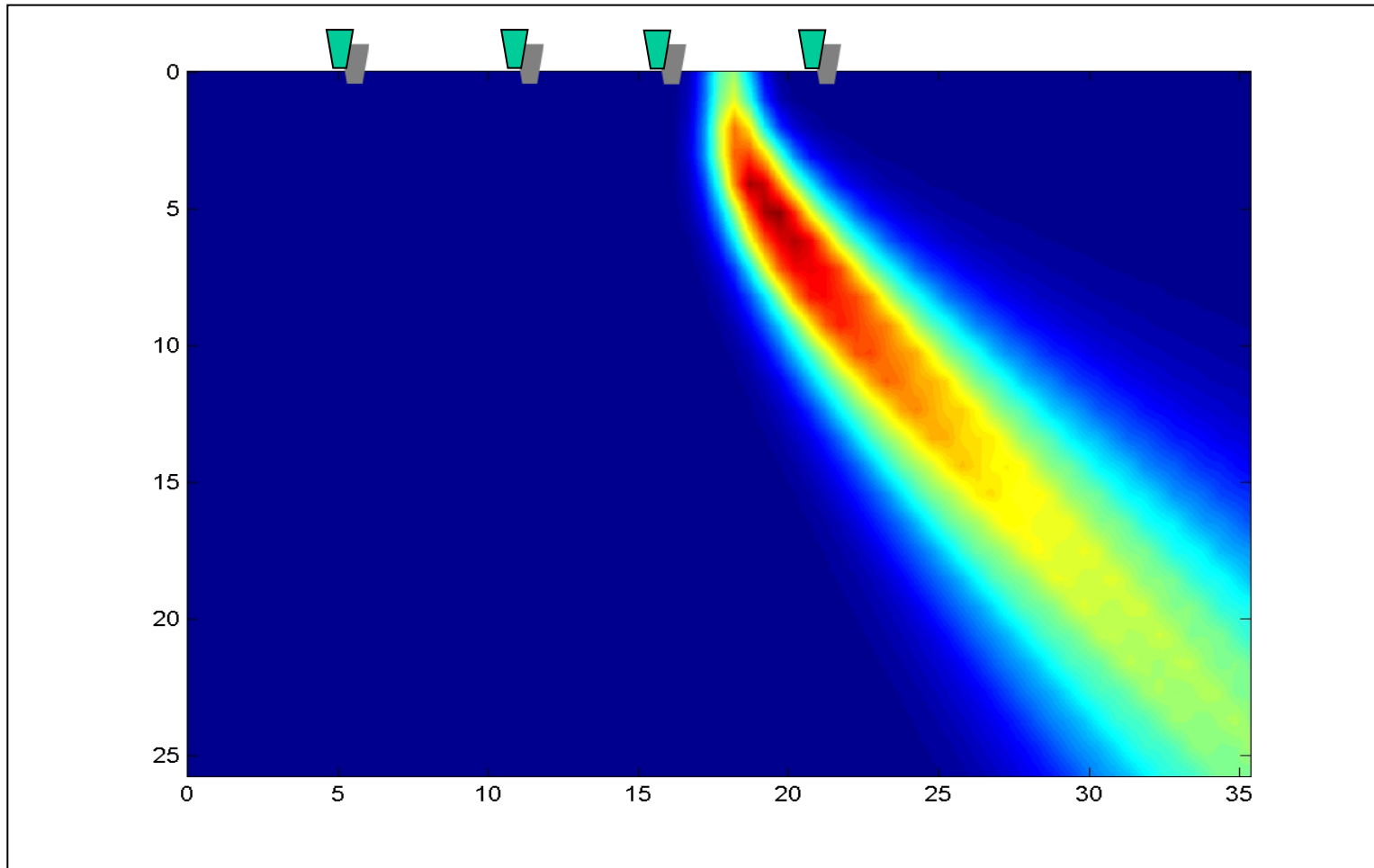
$$\Delta_i = v_P (t_{Pi} - t_0)$$

Wie können wir Epizentrum und Tiefe bestimmen?

Epizentrum und Herdtiefe

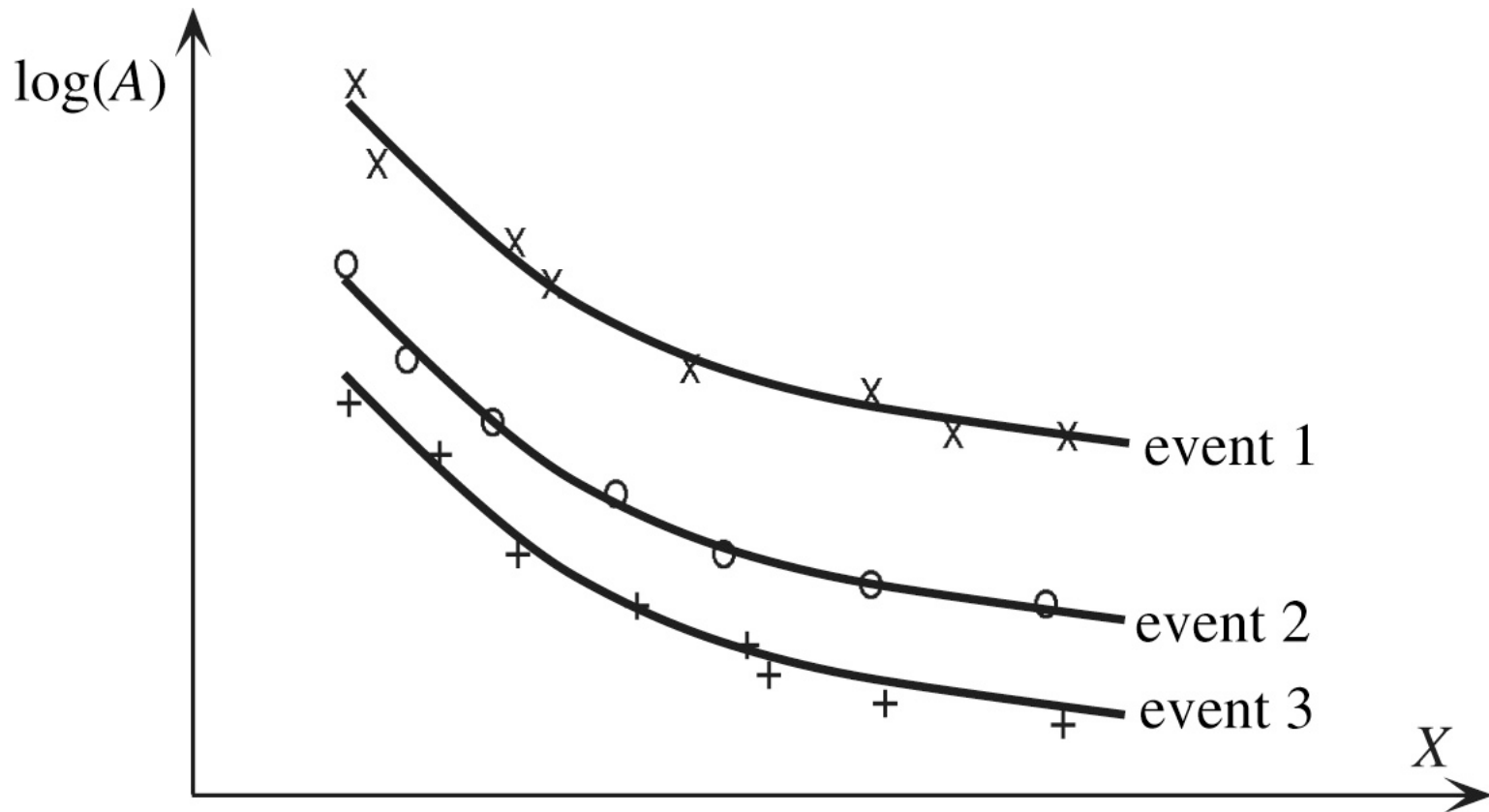


Lokalisierung mit Wahrscheinlichkeiten



Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion einer Erdbebenlokalisierung.
Rot – hohe Wahrscheinlichkeit, blau – geringe Wahrscheinlichkeit

Magnitude – Richter Skala



Maximalamplituden als Funktion des Abstands für Beben in Kalifornien

Die Amplituden nehmen systematisch ab mit der Distanz von der Quelle.

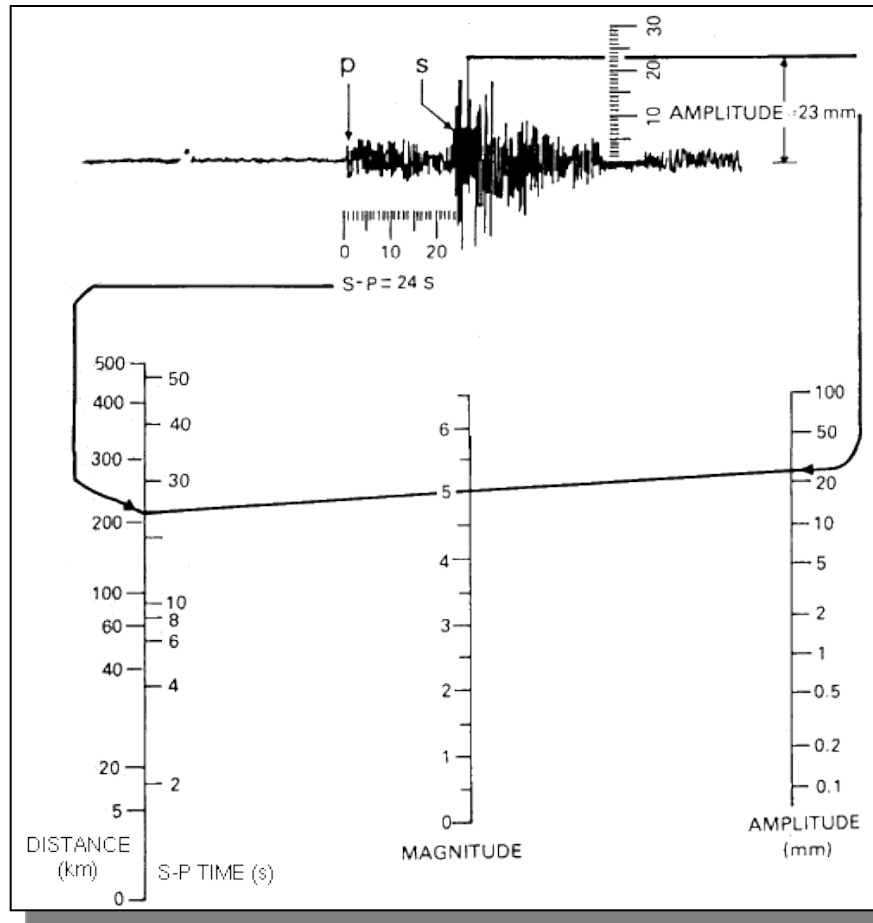
Richter Skala - Definition

$$\frac{A_2}{A_1} = \text{const.}$$

$$\log \frac{A_2}{A_1} = \log A_2 - \log A_1 = \text{const}$$

Definition: Ein Beben – aufgezeichnet mit einem Wood-Anderson Seismometer in einer Distanz von 100km erzeugt eine Amplitude von 1mm bei einer Magnitude $M_L=3$.

Richter Skala



Grafische
Bestimmung der
Magnitude

$$M_L = \log_{10} A(mm) + (\text{Distance correction factor})$$

Magnituden Skalen - allgemein

$$M = \log(A/T) + f(\Delta, h) + C_s + C_r$$

M seismische Magnitude

A Amplitude

T Periode

f Korrektur für Distanz

c_s Korrektur für Standort

c_r Korrektur für Empfänger

M_L Local magnitude

M_b body-wave magnitude

M_s surface wave magnitude

M_w energy release

Magnituden Skala – Richter und andere

Local Magnitude M_L

$$M_L = \log A - \log A_0$$

$$M_L = \log A + 0.003R + 0.7$$

$-\log A_0$ from tables or
R distance in km, A in mm
Domain: $R < 600\text{km}$

Surface wave magnitude M_S

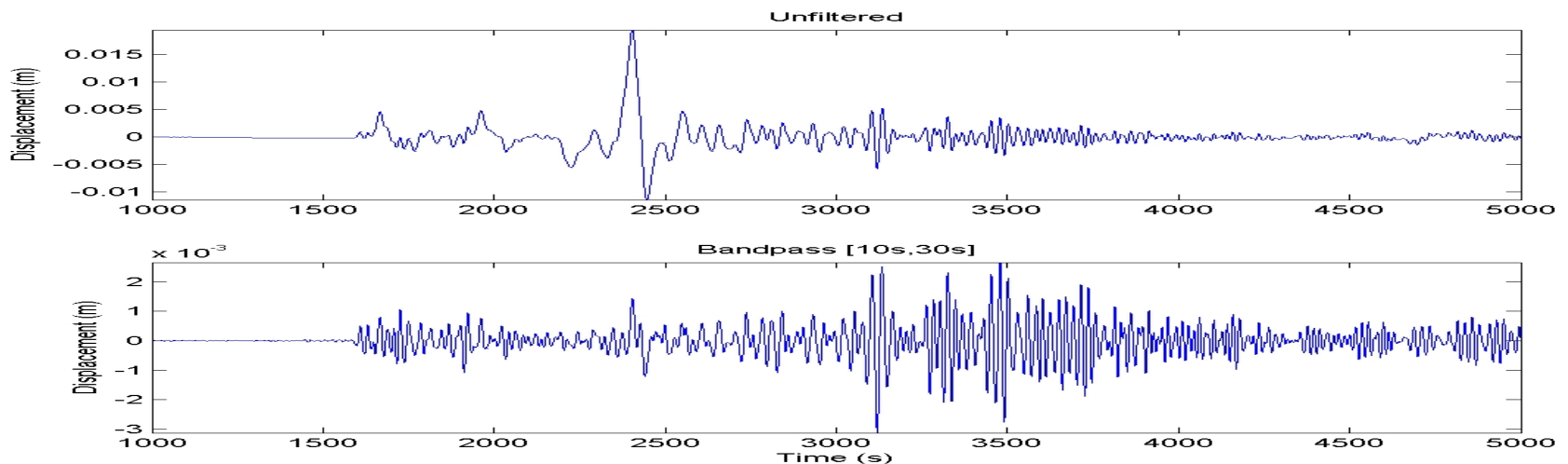
$$M_S = \log(A/T) + 1.66 \log D + 3.3$$

$T=18\text{-}22\text{s}$, $D=20\text{-}160^\circ$, $h < 50\text{km}$

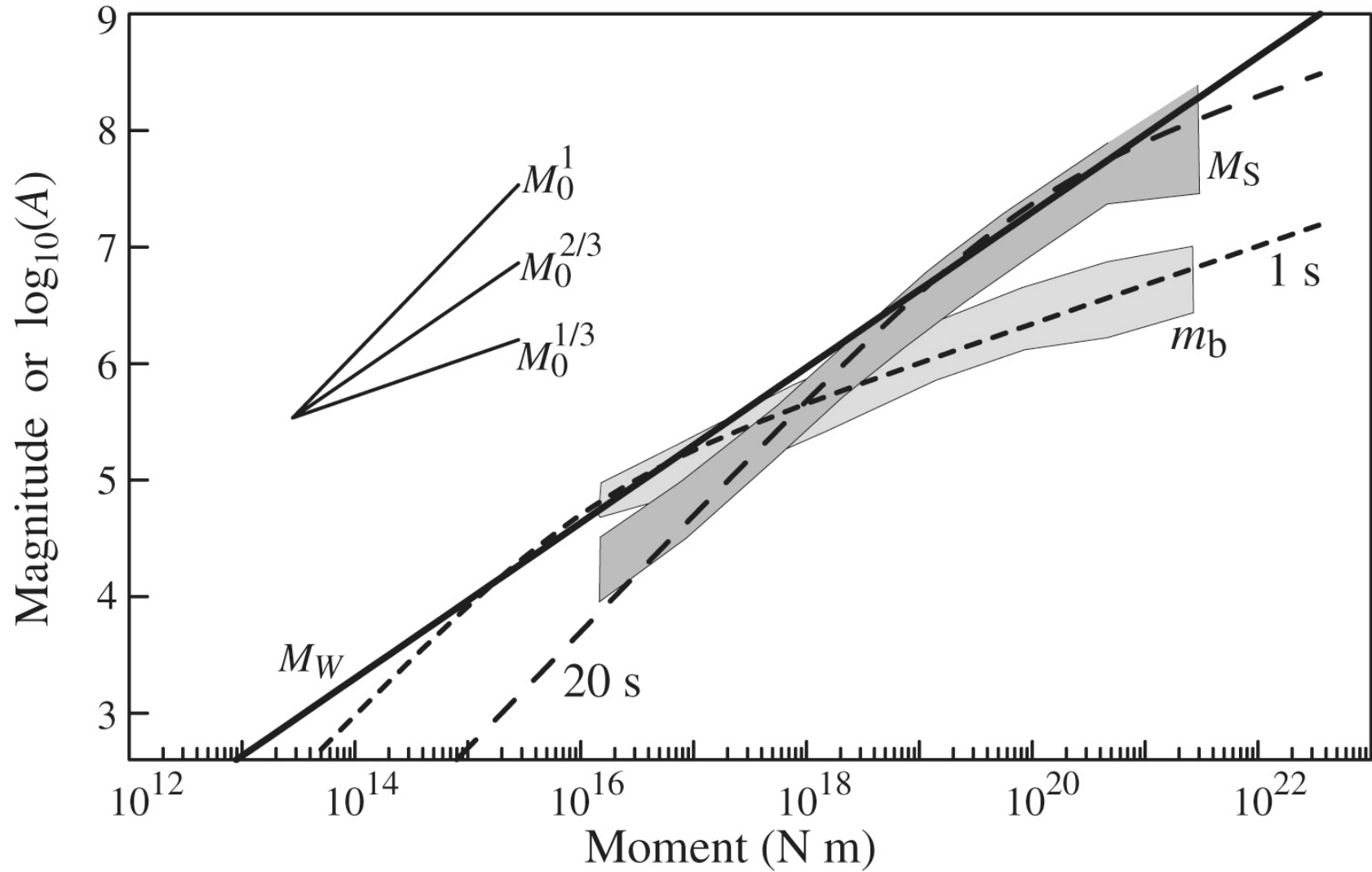
Body wave magnitude M_b

$$M_b = \log(A/T) + Q(D, h)$$

$T=0.1\text{-}3.0\text{s}$



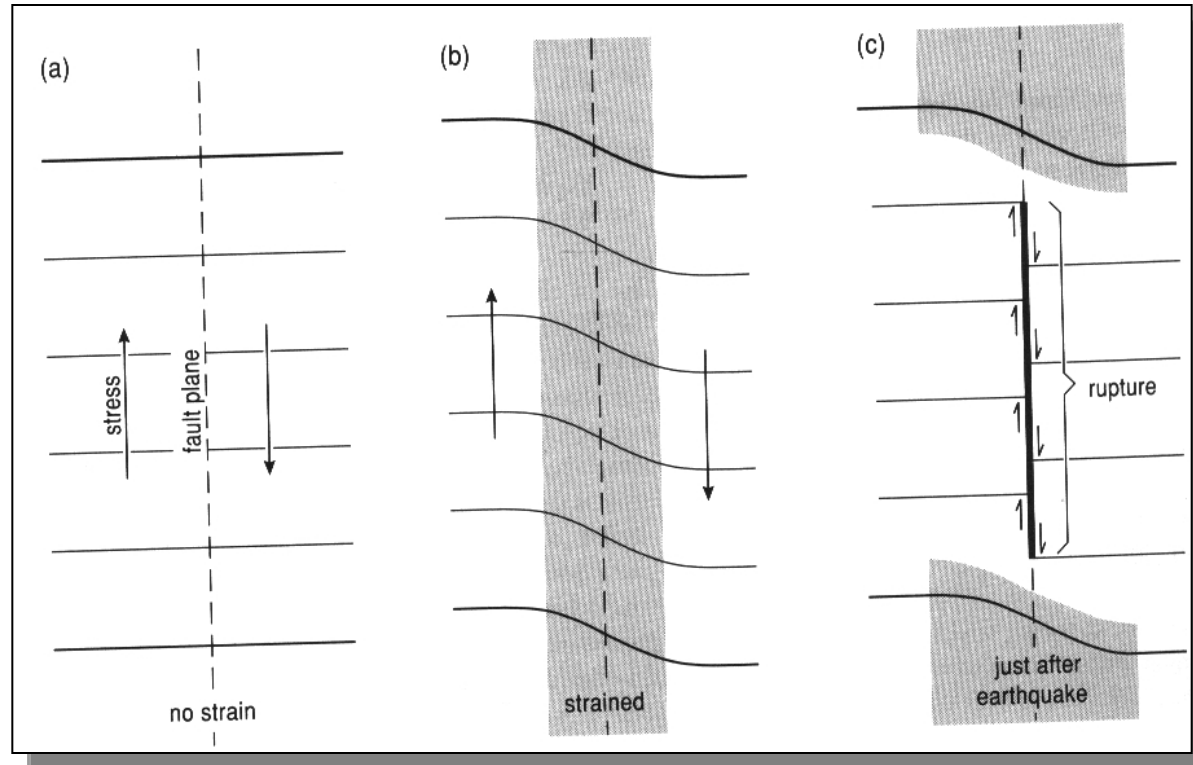
Magnitudensättigung



Was ist ein Erdbeben?



Elastic rebound (Reid, 1910)



Wir wollen die beobachtete Verschiebung an der Oberfläche mit der Stärke (Magnitude) eines Bebens in Zusammenhang bringen!
Wie können wir die Stärke quantifizieren?

Dislokationsquelle “Double Couple” (Scherbruch)

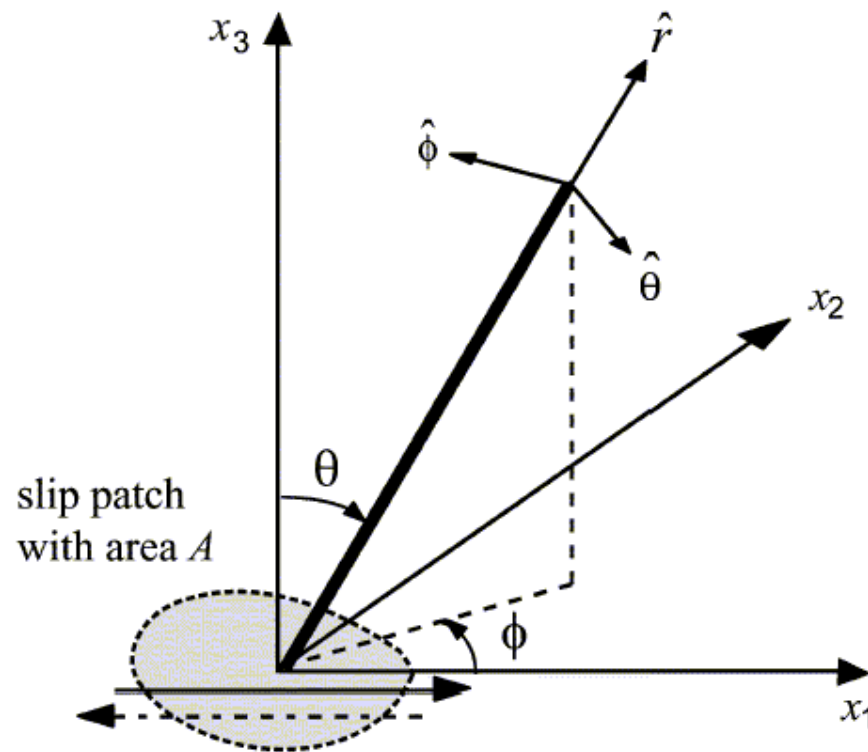
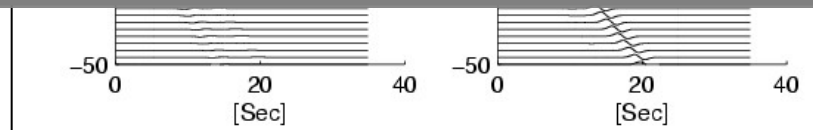
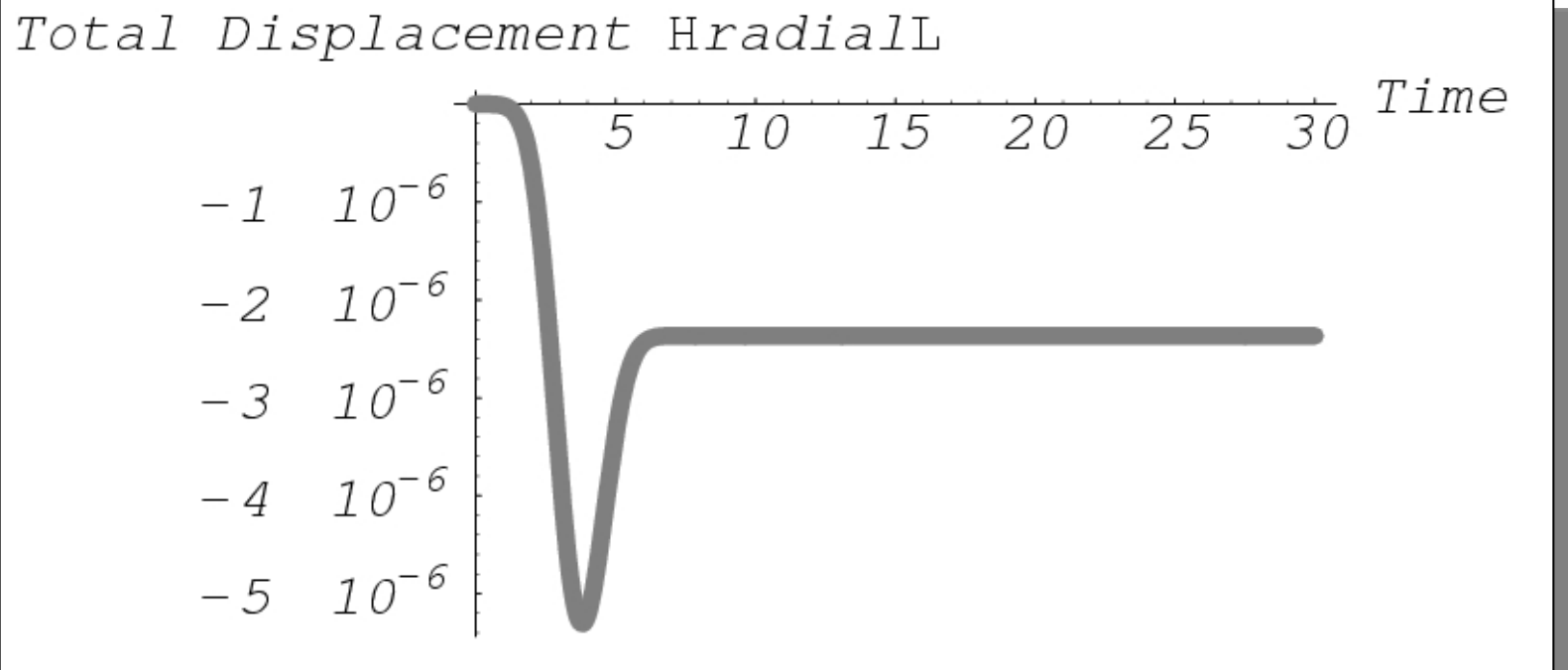
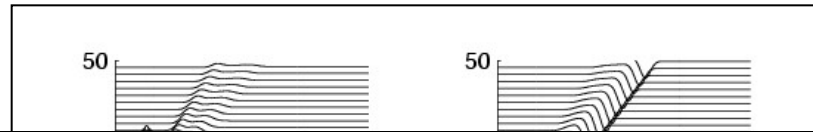
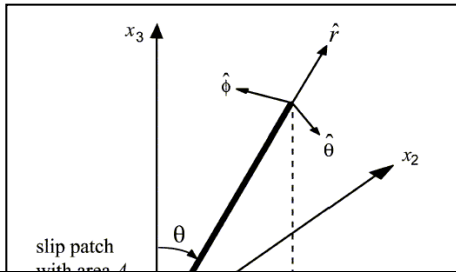


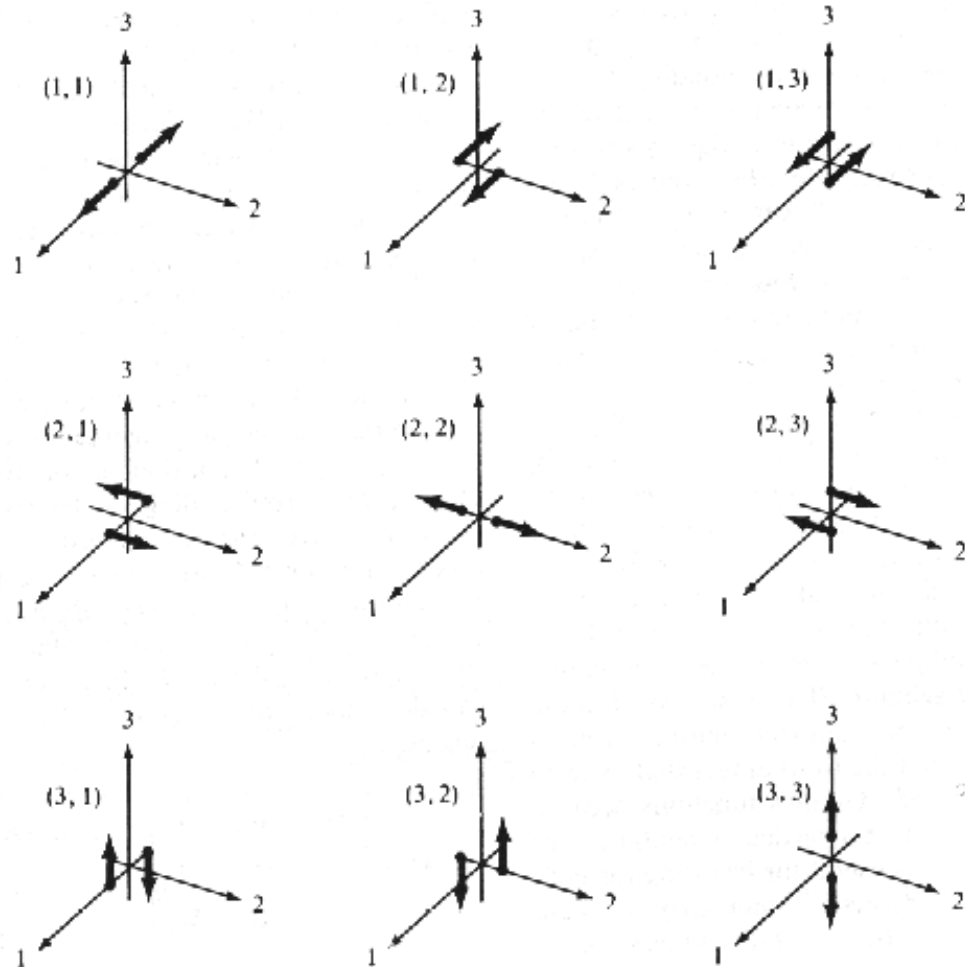
FIGURE 5 Cartesian and polar coordinate systems for analysis of radiation by a slip patch with area A and average slip $\langle \Delta u(t) \rangle$.

Velocity seismograms-M6.5 point source

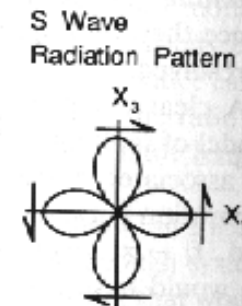
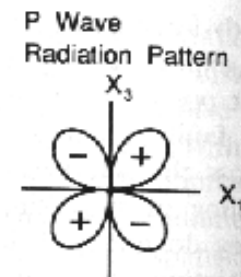
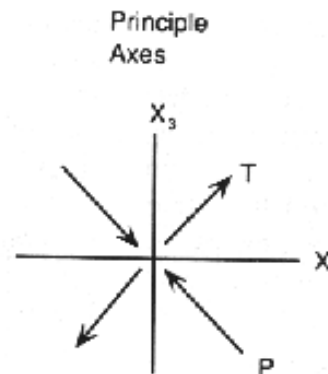
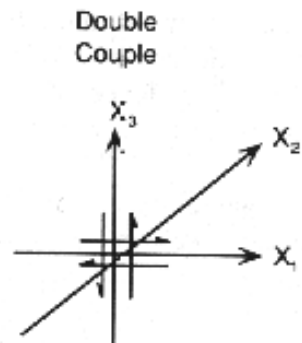
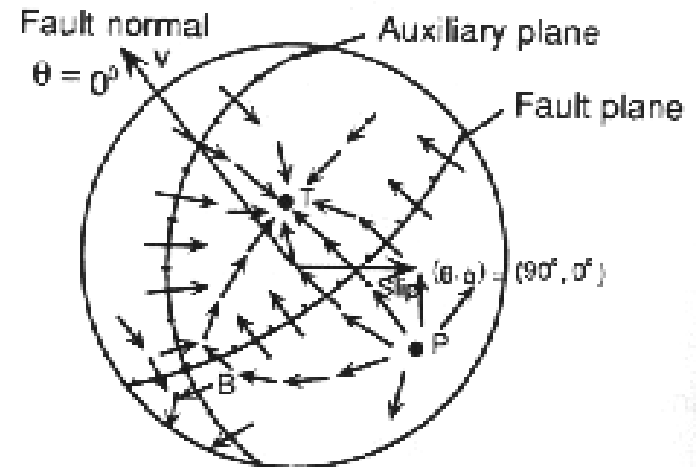
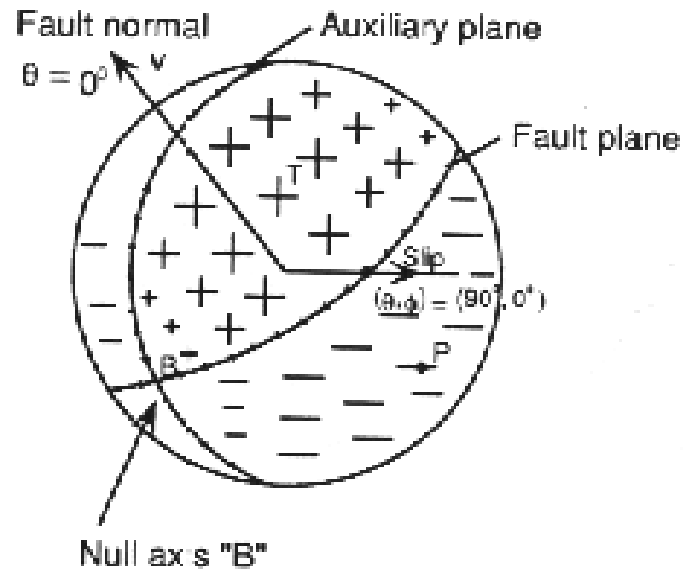


Momententensor M_{ij}

Kräftepaare



Kompression - Dekompression



Beachballs und Momententensoren

Moment Tensor	Beachball	Moment Tensor	Beachball
$\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$		$-\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	
$-\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$		$-\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	

explosion - implosion

vertical strike slip fault

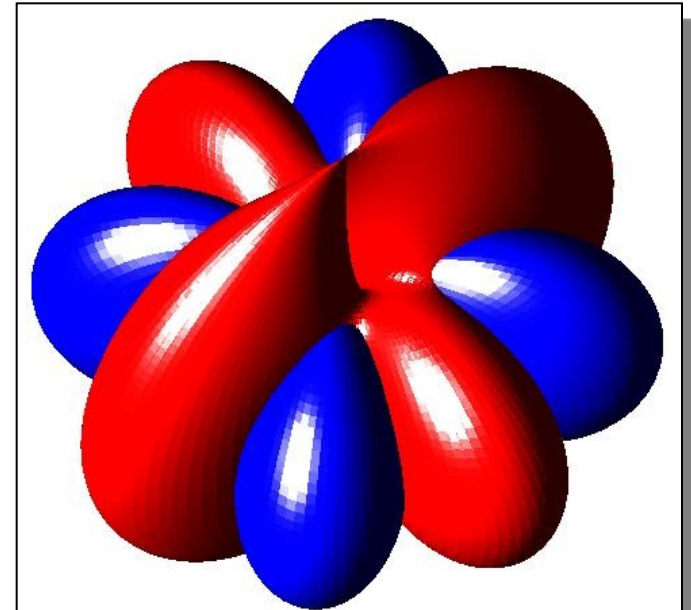
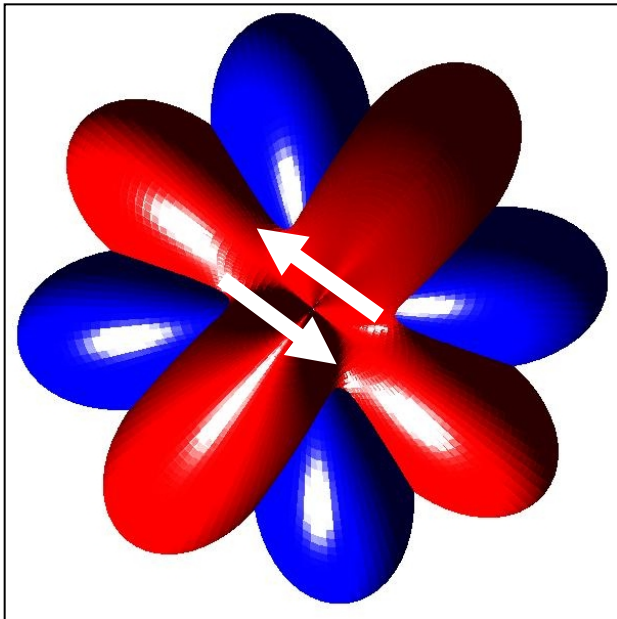
vertical dip slip fault

45° dip thrust fault

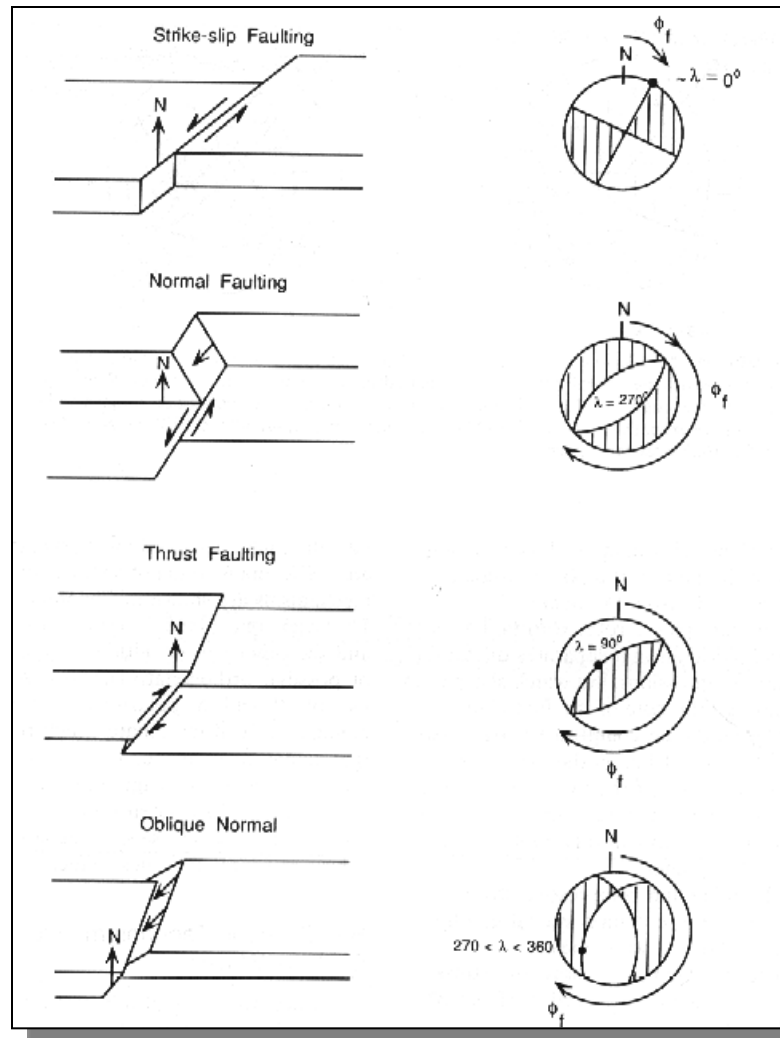
compensated linear vector
dipoles

Abstrahlcharakteristika von Punktquellen

P - blue
S - red

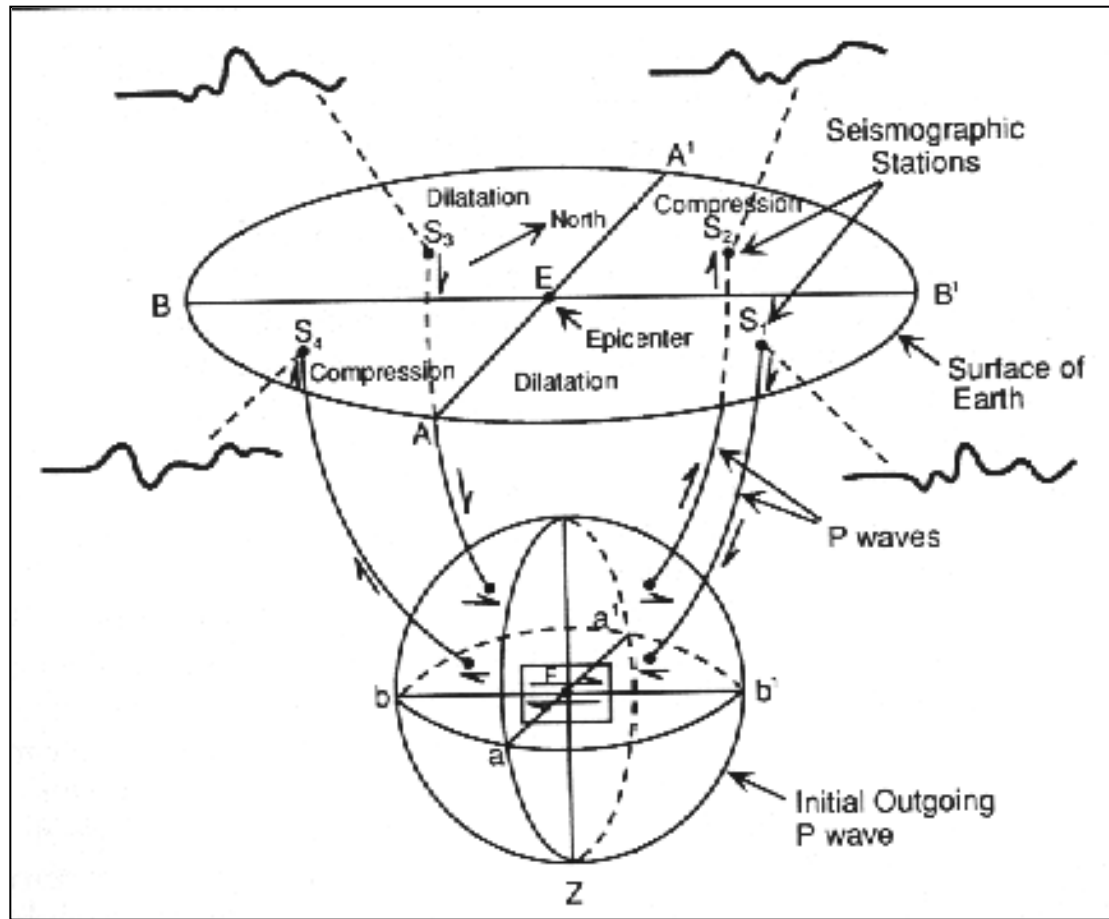


Verwerfungen – Herdmechanismen



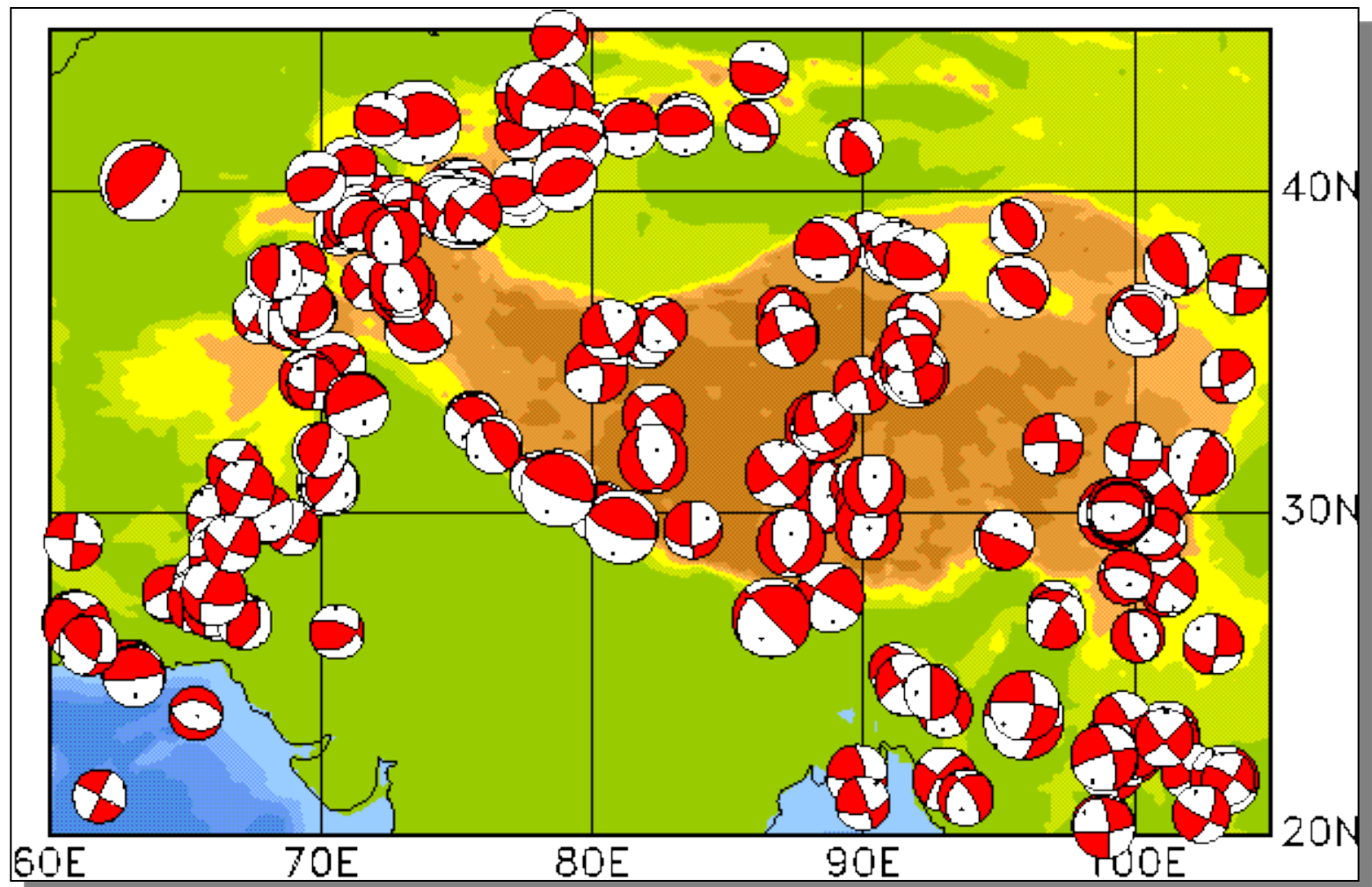
Die Grundtypen der Verwerfungen und die entsprechenden Herdmechanismen. Die dunklen Regionen entsprechen Kompressionen.

Scherdislokation – Bestimmung von Herdmechanismen

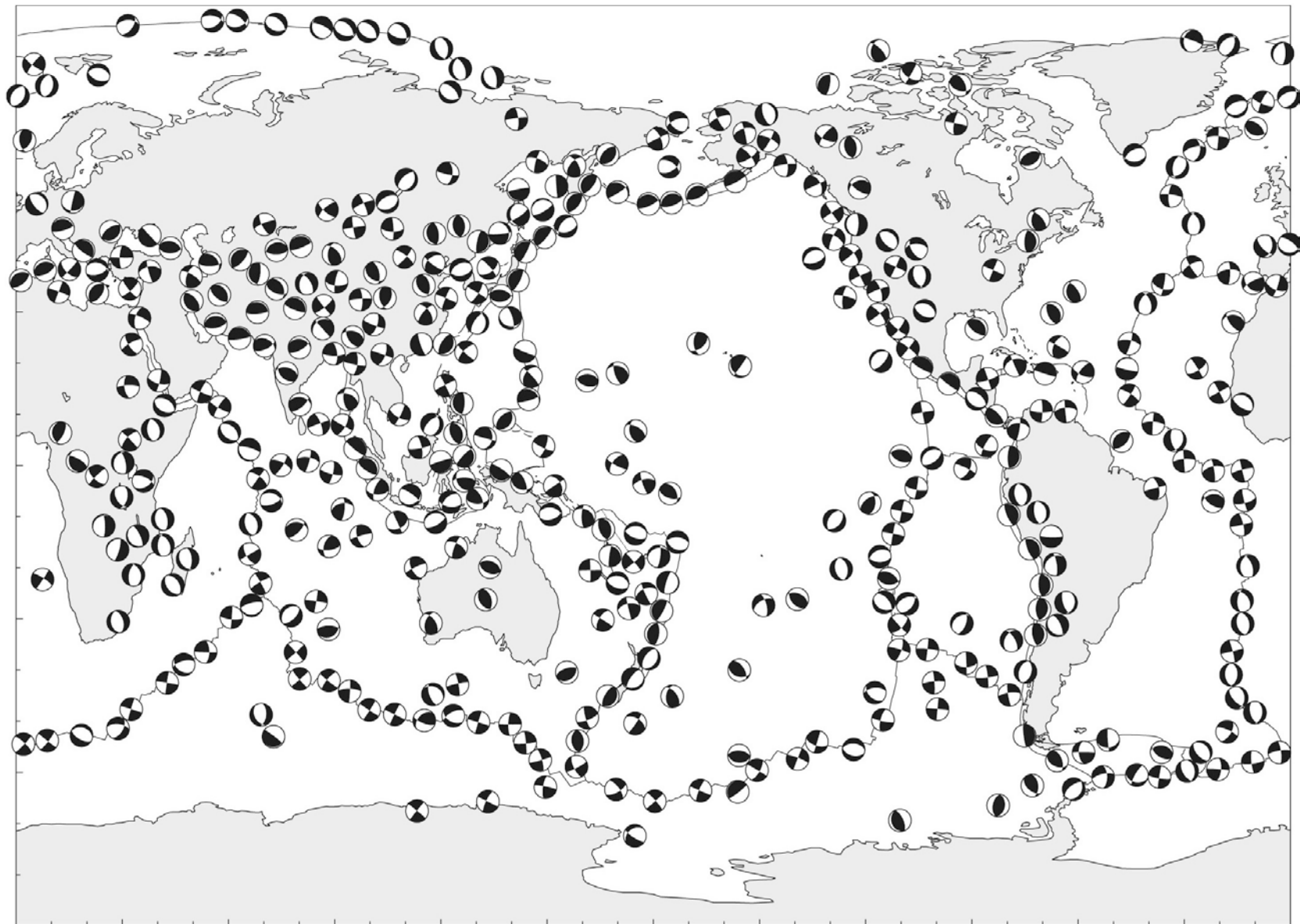


P Polarisationen in verschiedenen Richtungen werden zur Abschätzung der Lage der Verwerfungsfläche herangezogen

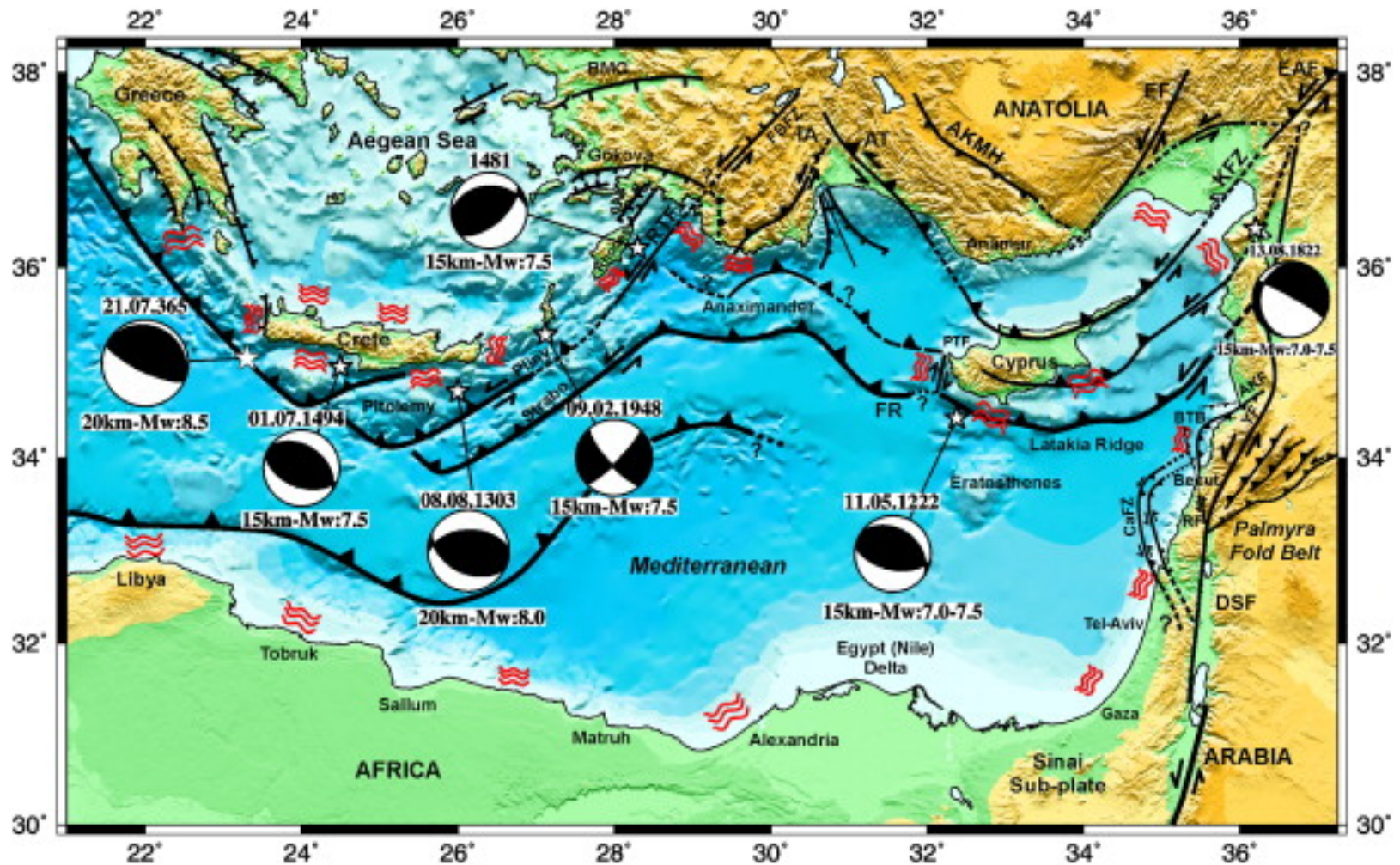
Beachballs - Himalaya



Beachballs - global

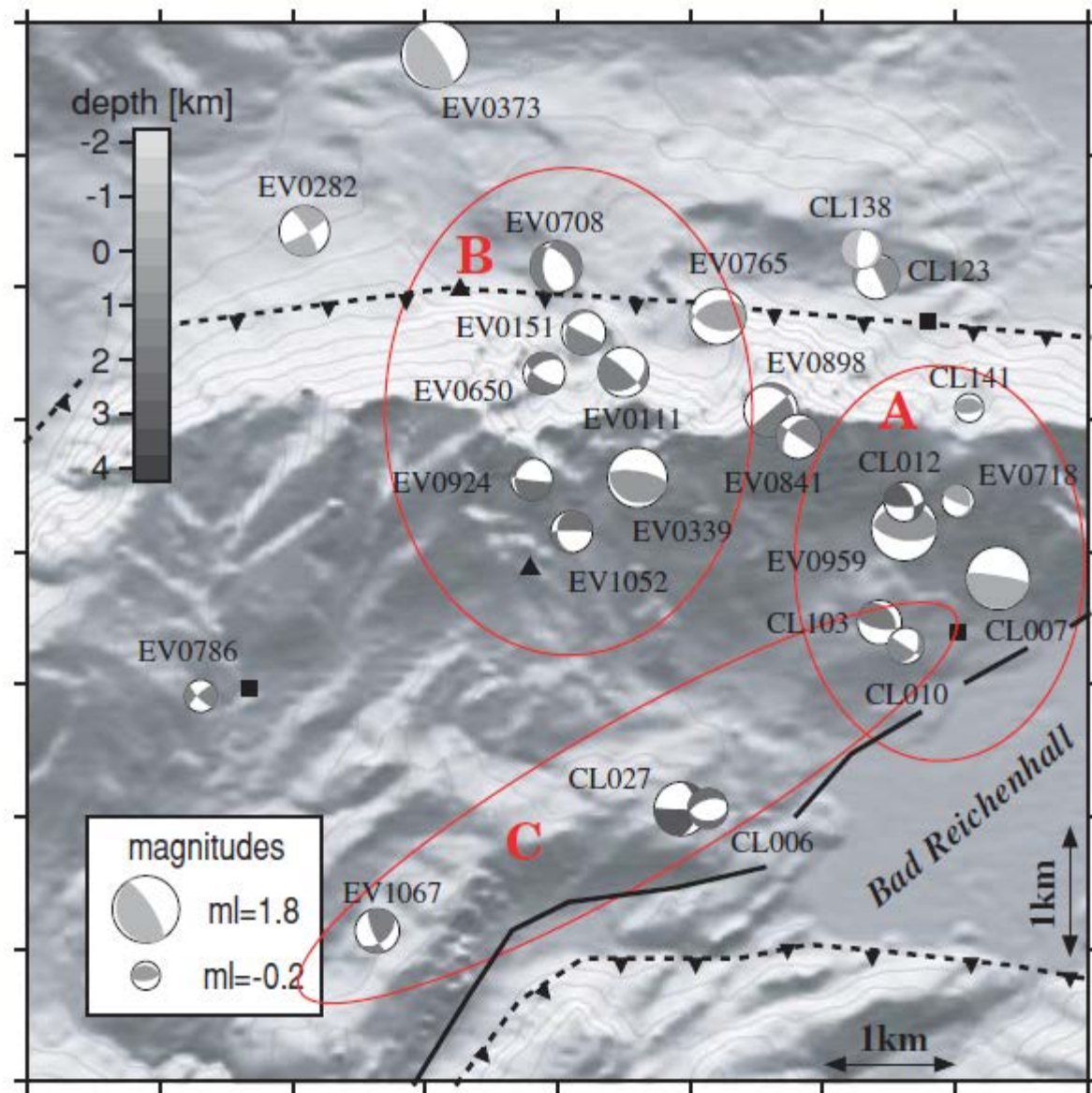


Beispiele für Herdmechanismen



Seda Yolsal-Çevikbilen and Tuncay Tayma (2012)

Schwarmbeben – Bad Reichenhall



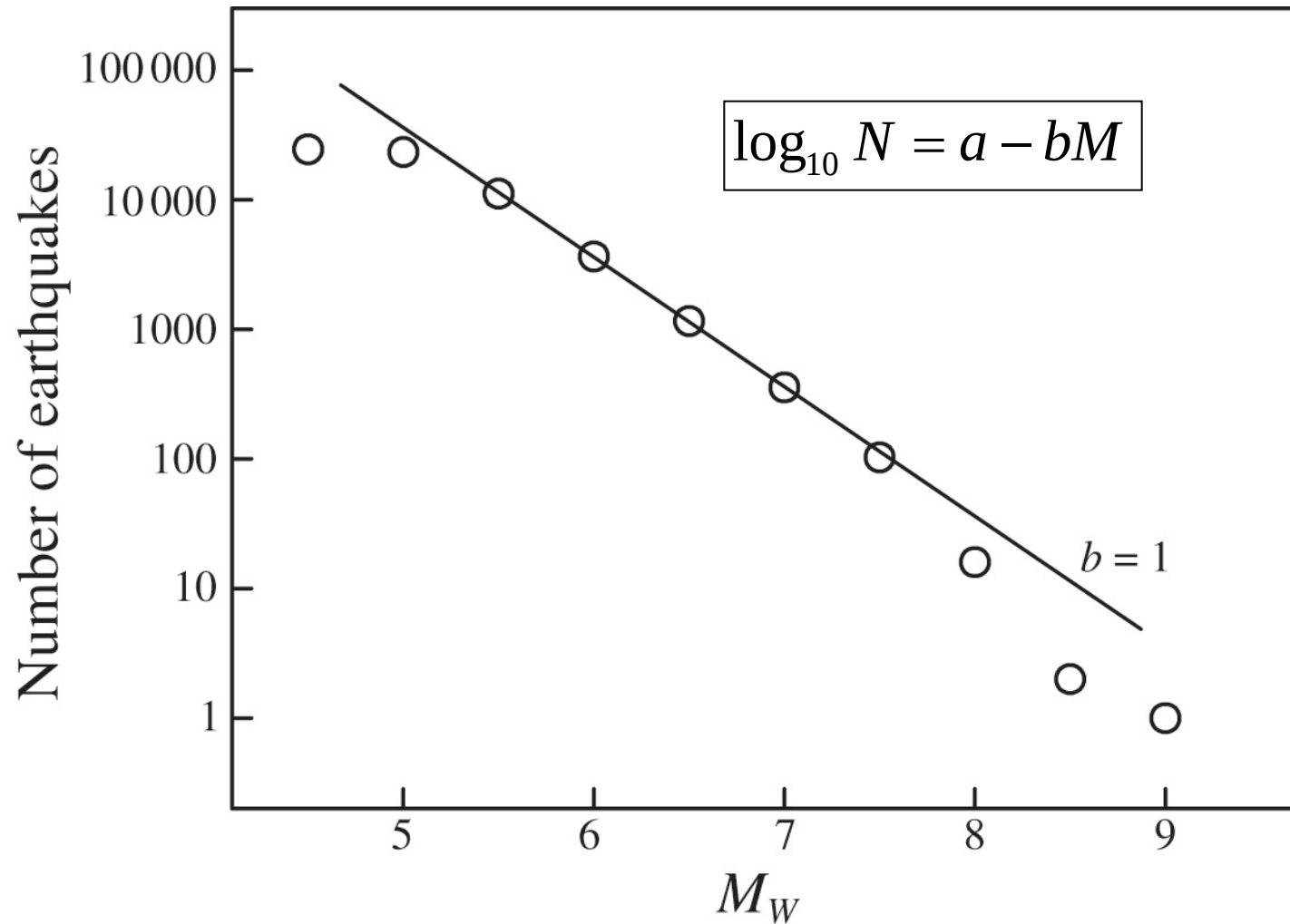
Erdbebenstatistik

Gutenberg-Richter Gesetz

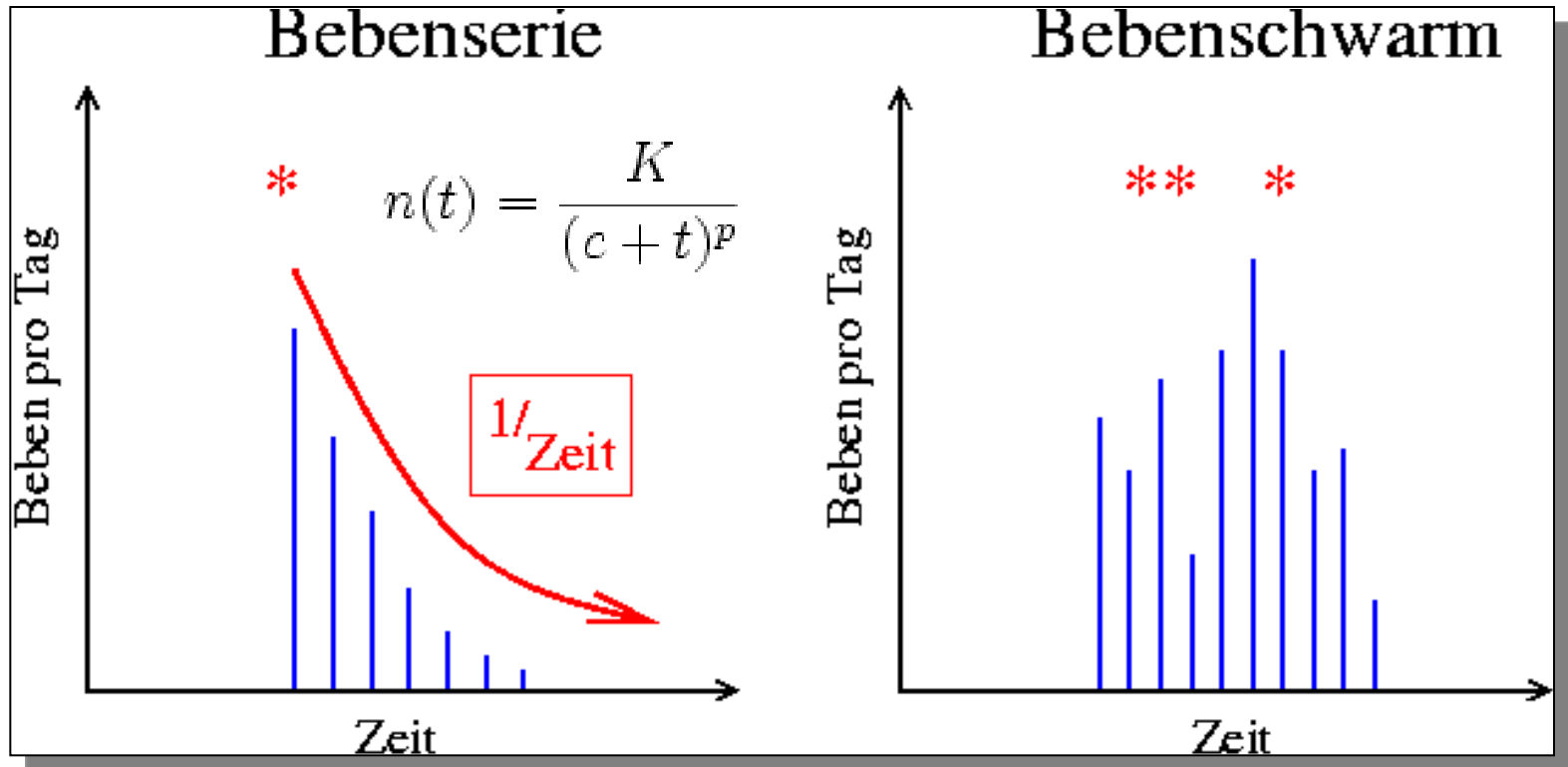
Omori Gesetz

Bath's Gesetz

Gutenberg – Richter Gesetz



Schwarmbeben – Omori's Law

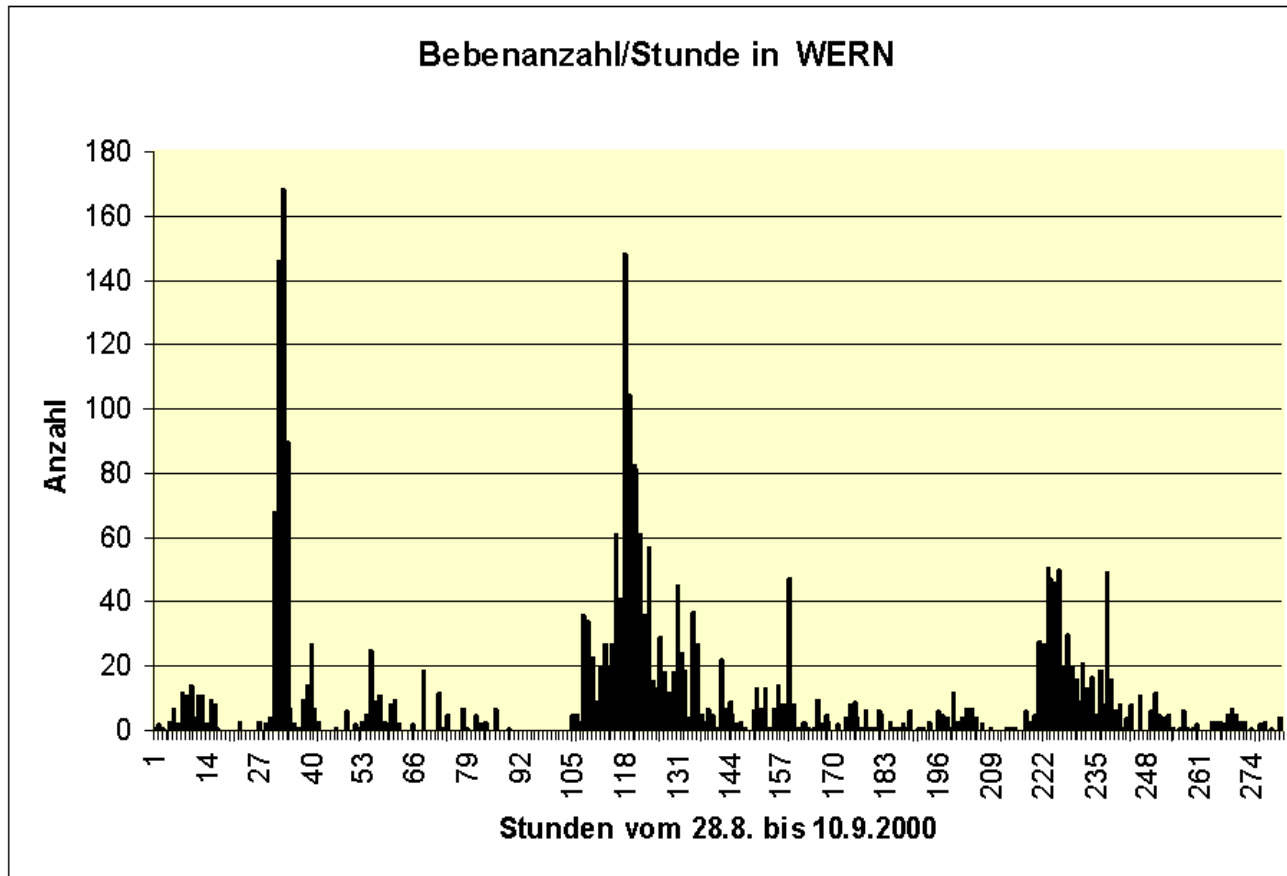


Omori Gesetz: K Amplitude, $n(t)$ Event rate, c Zeitverzögerung, p Exponent

Bath's Gesetz: Größtes Nachbeben ca. 1Magnitude geringer als Hauptbeben

Was sind Schwarmbeben?

Beispiel: Vogtland



Erdbeben und Regen

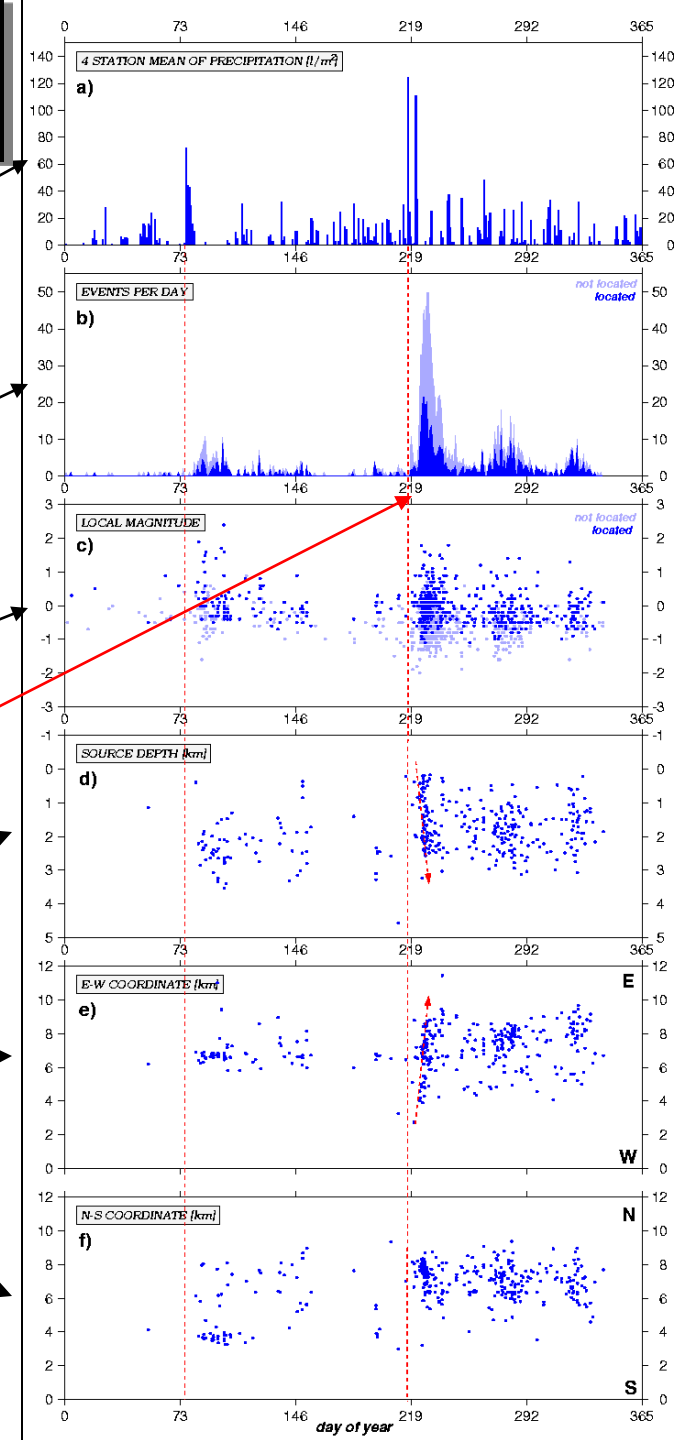
Regen 2002

Erdbeben 2002

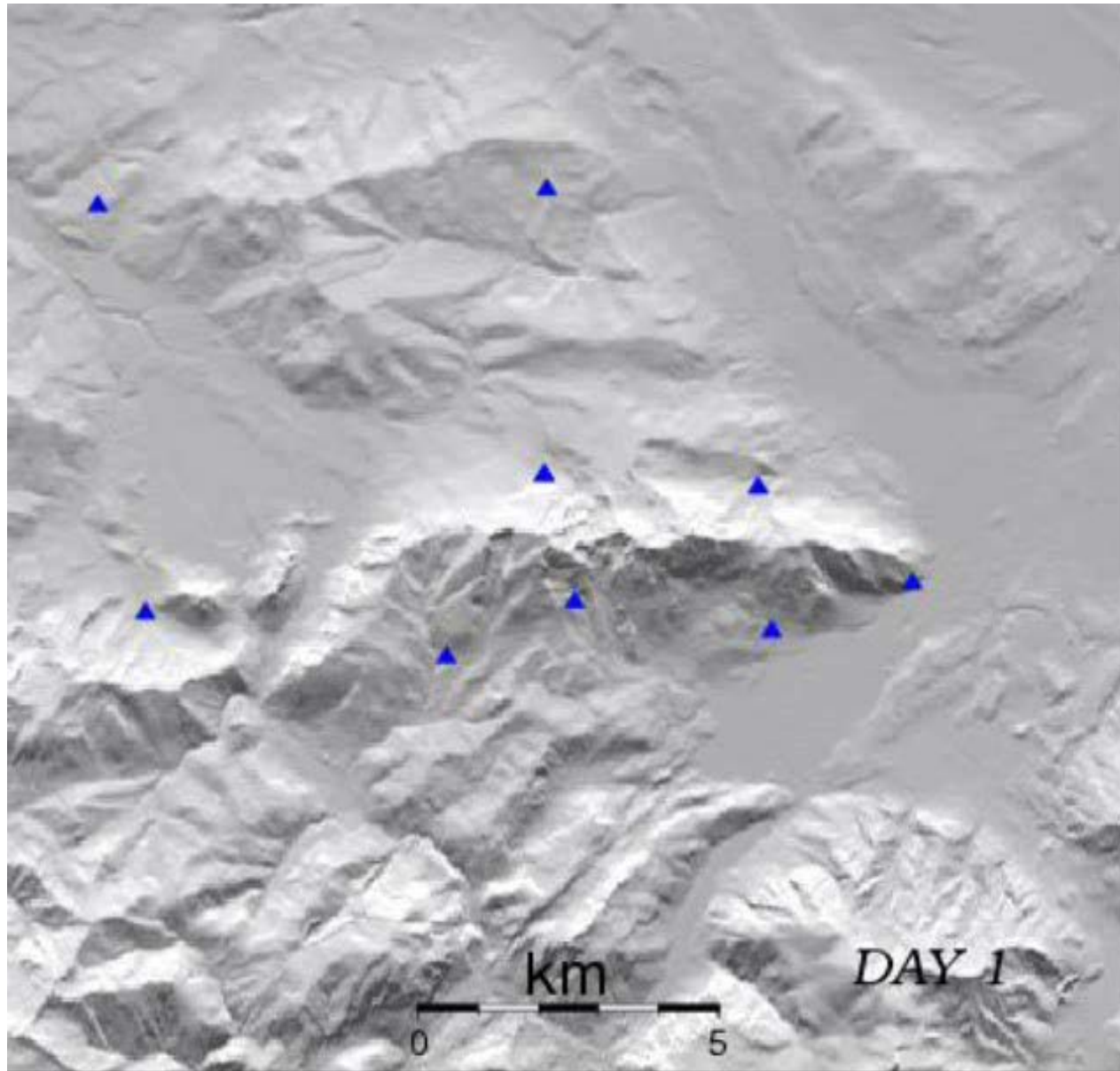
Magnituden

Beginn des Hochwassers

Herdkoordinaten



Seismizität - Schwarmbeben



Verwerfung – Fault scarps



Fault scarps

California



Fault scarps



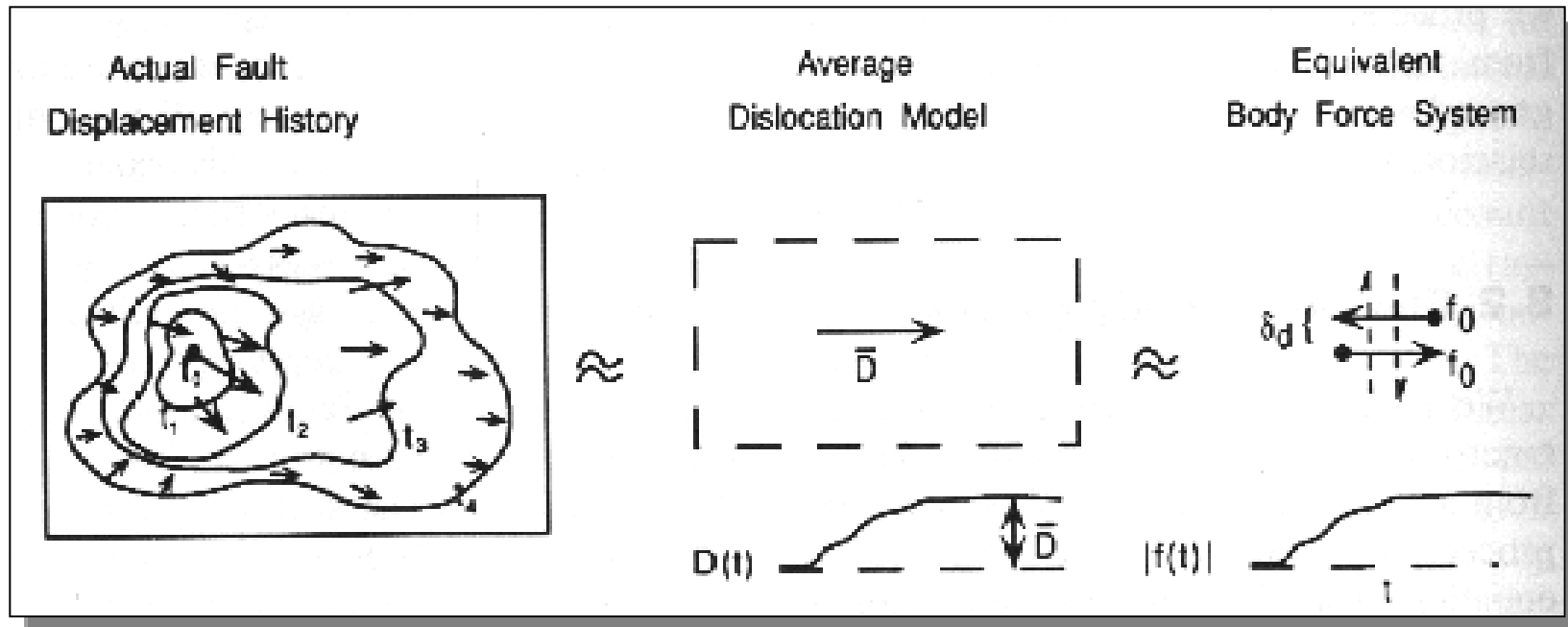
California

Fault scarps



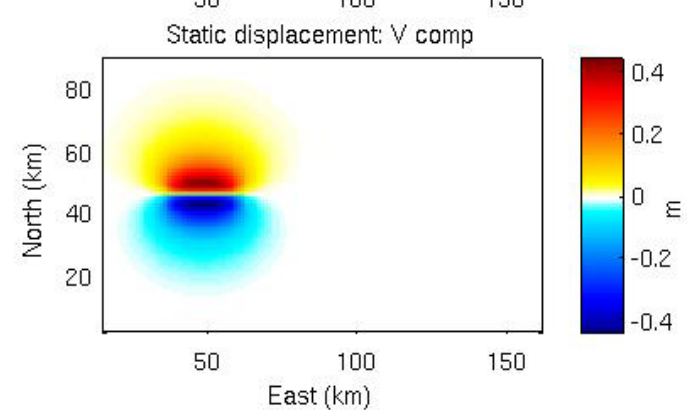
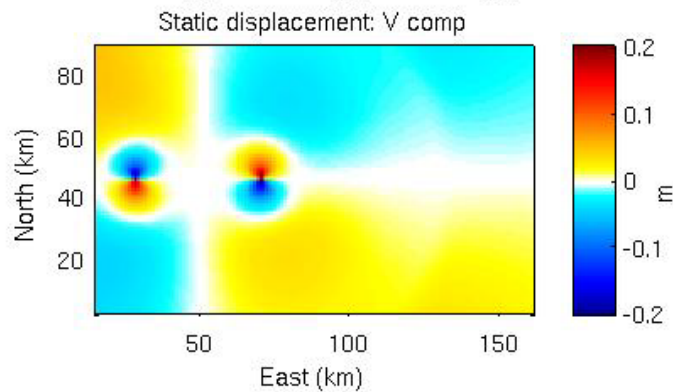
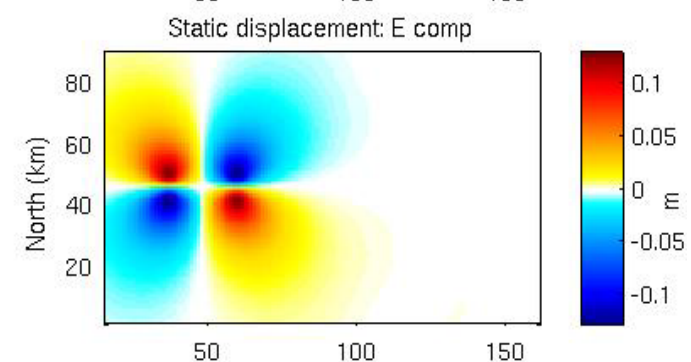
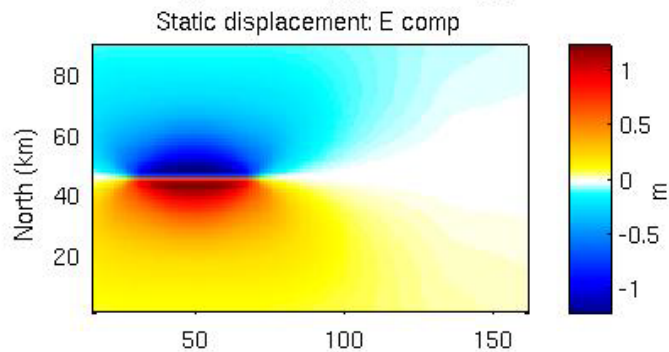
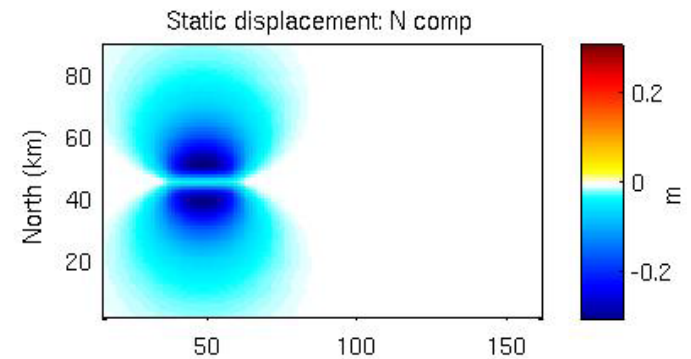
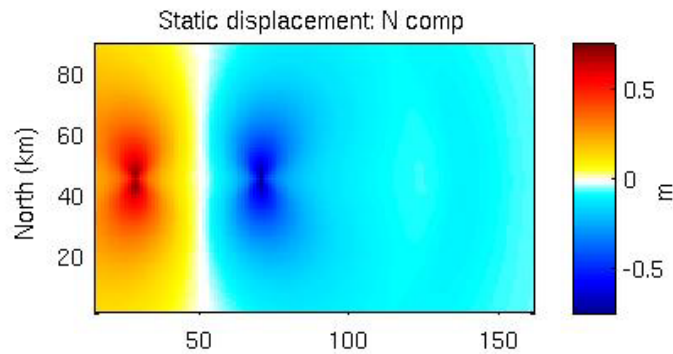
Taiwan

Punktquelle – finite (große) Quellen

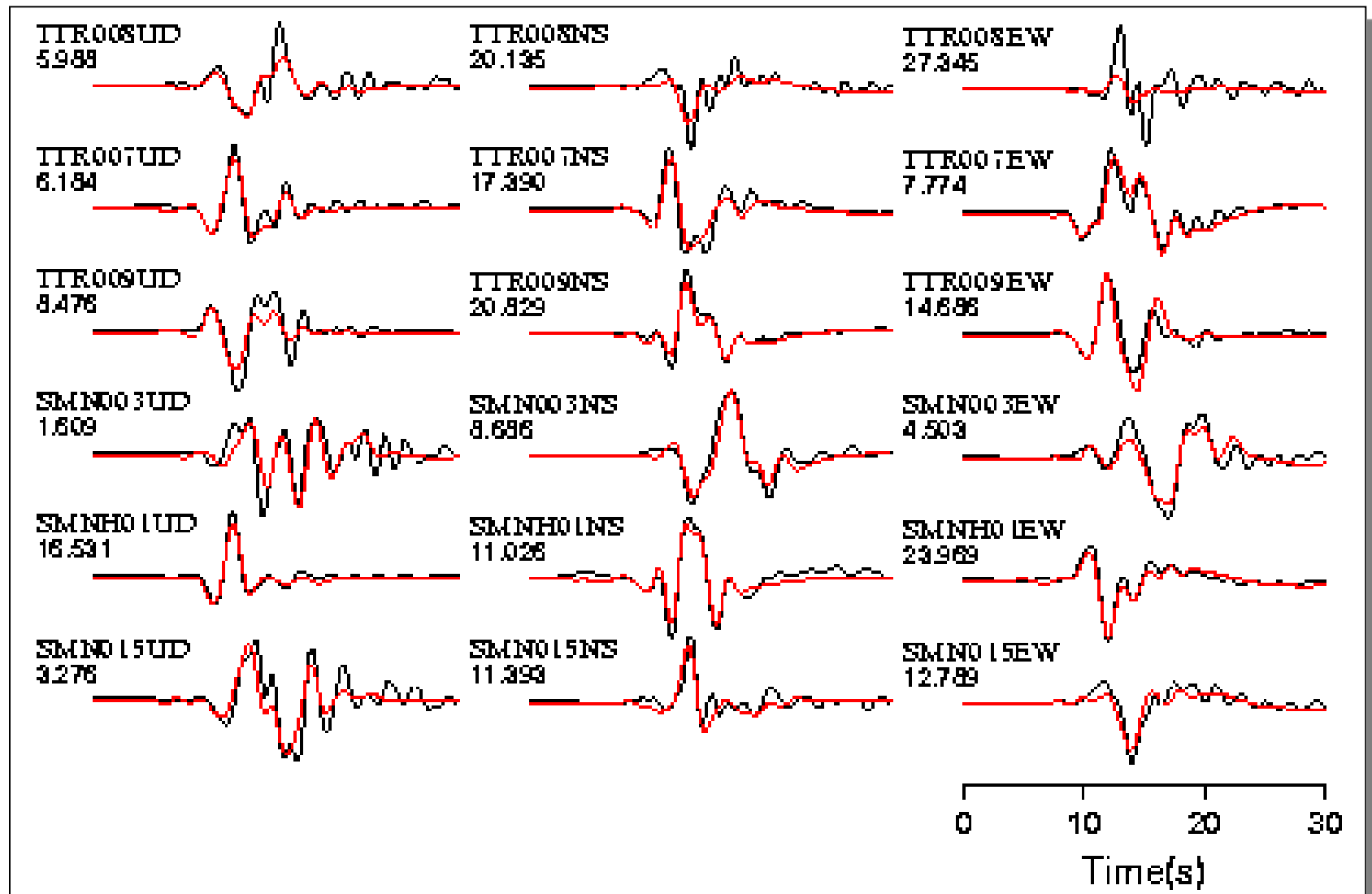


The actual slip process is described by superposition of equivalent forces acting in space and time.

Statische Deformation – GPS Messungen

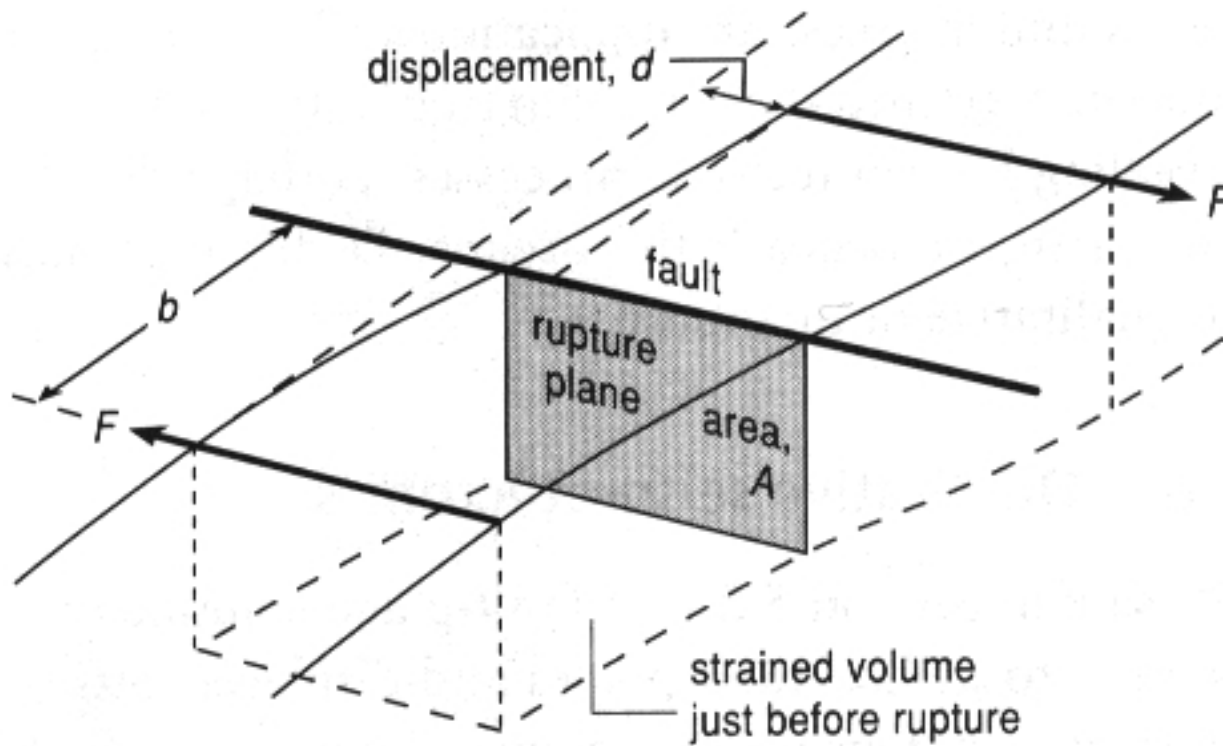


Finite Quellen aus Seismogramm Information



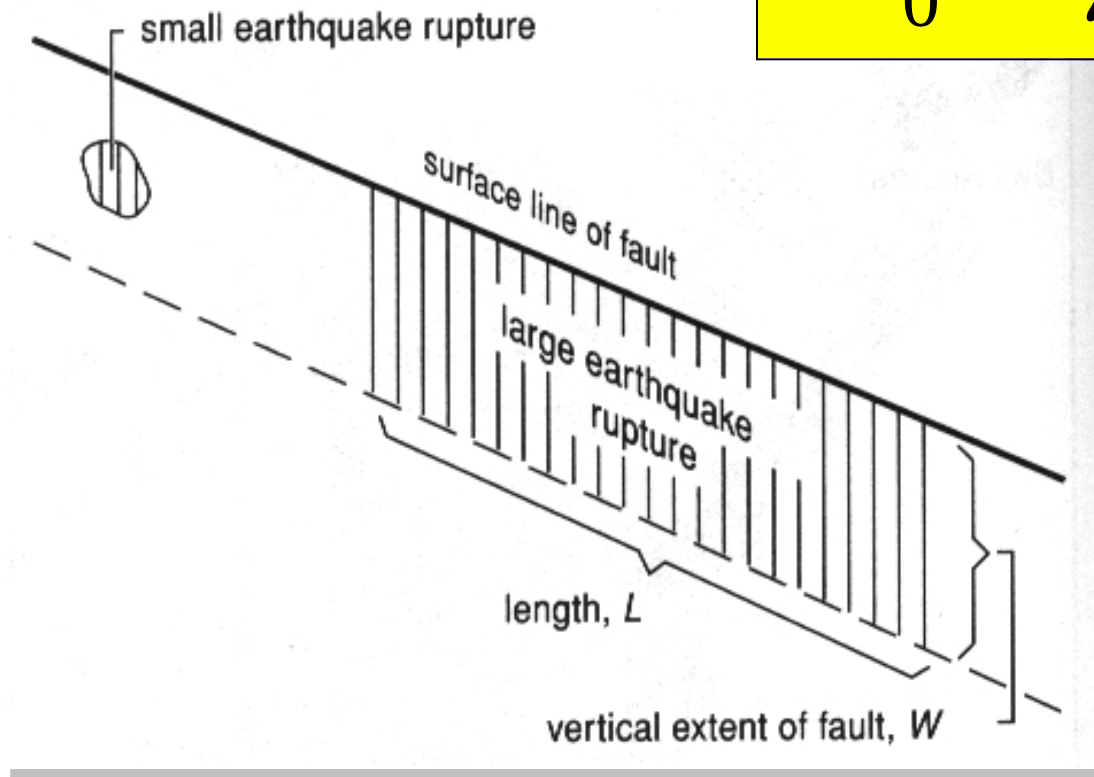
Das seismische Moment

$$M_0 = \mu A d$$



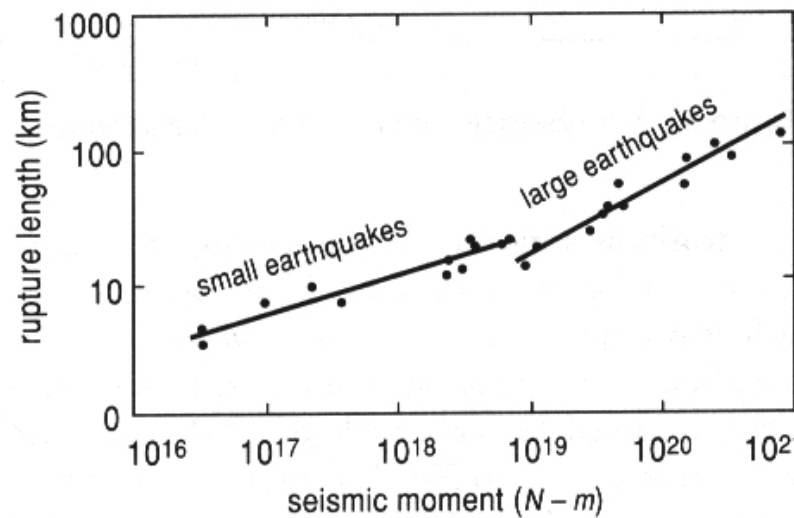
Das seismische Moment M_0 und Magnitude M_w

$$M_0 = \mu A d$$

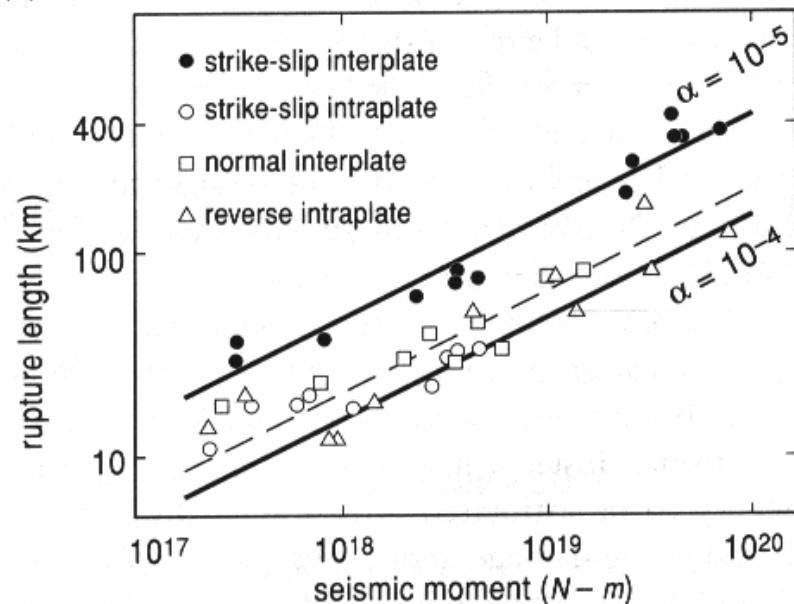


$$M_w = \frac{2}{3} \left(\log_{10} \frac{M_0}{\text{N} \cdot \text{m}} - 9.1 \right) = \frac{2}{3} \left(\log_{10} \frac{M_0}{\text{dyn} \cdot \text{cm}} - 16.1 \right)$$

Seismic moment



(c)



$$M_0 = \mu A d$$

Intraplattenbeben:
Größerer Spannungsabfall

Interplattenbeben:
Geringerer Spannungsabfall

Warum?

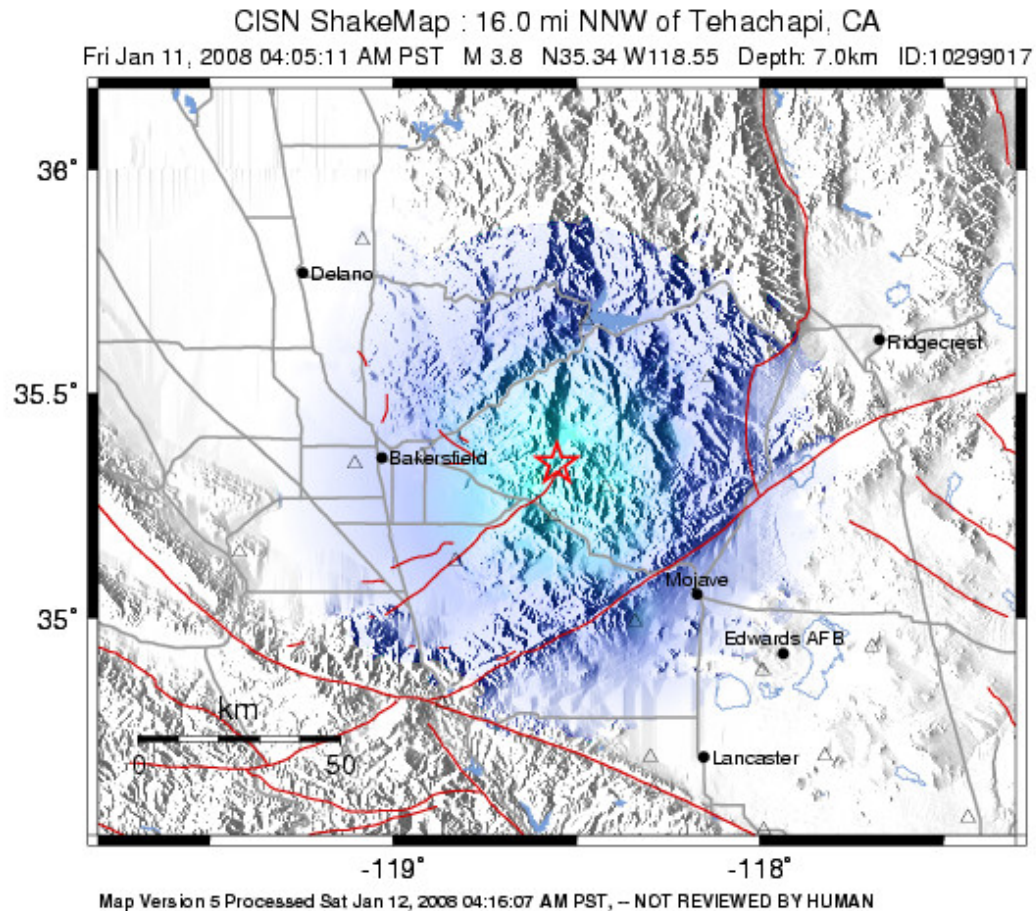
Seismische Energie

Richter Magnitude	TNT for Seismic Energy Yield	Example (approximate)
-1.5	6 ounces	Breaking a rock on a lab table
1.0	30 pounds	Large Blast at a Construction Site
1.5	320 pounds	
2.0	1 ton	Large Quarry or Mine Blast
2.5	4.6 tons	
3.0	29 tons	
3.5	73 tons	
4.0	1,000 tons	Small Nuclear Weapon
4.5	5,100 tons	Average Tornado (total energy)
5.0	32,000 tons	
5.5	80,000 tons	Little Skull Mtn., NV Quake, 1992
6.0	1 million tons	Double Spring Flat, NV Quake, 1994
6.5	5 million tons	Northridge, CA Quake, 1994
7.0	32 million tons	Hyogo-Ken Nanbu, Japan Quake, 1995; Largest Thermonuclear Weapon
7.5	160 million tons	Landers, CA Quake, 1992
8.0	1 billion tons	San Francisco, CA Quake, 1906
8.5	5 billion tons	Anchorage, AK Quake, 1964
9.0	32 billion tons	Chilean Quake, 1960
10.0	1 trillion tons	(San-Andreas type fault circling Earth)
12.0	160 trillion tons	(Fault Earth in half through center, OR Earth's daily receipt of solar energy)

Mercalli Intensität und Richter Magnitude

Magnitude	Intensity	Description
1.0-3.0	I	I. Not felt except by a very few under especially favorable conditions.
3.0 - 3.9	II - III	II. Felt only by a few persons at rest, especially on upper floors of buildings. III. Felt quite noticeably by persons indoors, especially on upper floors of buildings. Many people do not recognize it as an earthquake. Standing motor cars may rock slightly. Vibrations similar to the passing of a truck. Duration estimated.
4.0 - 4.9	IV - V	IV. Felt indoors by many, outdoors by few during the day. At night, some awakened. Dishes, windows, doors disturbed; walls make cracking sound. Sensation like heavy truck striking building. Standing motor cars rocked noticeably. V. Felt by nearly everyone; many awakened. Some dishes, windows broken. Unstable objects overturned. Pendulum clocks may stop.
5.0 - 5.9	VI - VII	VI. Felt by all, many frightened. Some heavy furniture moved; a few instances of fallen plaster. Damage slight. VII. Damage negligible in buildings of good design and construction; slight to moderate in well-built ordinary structures; considerable damage in poorly built or badly designed structures; some chimneys broken.
6.0 - 6.9	VII - IX	VIII. Damage slight in specially designed structures; considerable damage in ordinary substantial buildings with partial collapse. Damage great in poorly built structures. Fall of chimneys, factory stacks, columns, monuments, walls. Heavy furniture overturned. IX. Damage considerable in specially designed structures; well-designed frame structures thrown out of plumb. Damage great in substantial buildings, with partial collapse. Buildings shifted off foundations.
7.0 and higher	VIII or higher	X. Some well-built wooden structures destroyed; most masonry and frame structures destroyed with foundations. Rails bent. XI. Few, if any (masonry) structures remain standing. Bridges destroyed. Rails bent greatly. XII. Damage total. Lines of sight and level are distorted. Objects thrown into the air.

Shakemap



PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK AOC.(%g)	<.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL.(cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Zusammenfassung – Seismologie

- Die Herdzeit von Erdbeben kann über die Differenzlaufzeit von P und S Wellen berechnet werden (**Wadati Diagramm**)
- Das Epizentrum eines Bebens und dessen Tiefe kann graphisch ermittelt werden über die Distanzen der Seismometer von der Quelle
- Die **Magnitude** eines Erdbebens wird über den Log der lokalen Verschiebung und einer Distanzkorrektur berechnet (**Richter Skala**)
- Der Erdbebenherd wird charakterisiert über die **Orientierung der Verwerfungsfläche und die Richtung der Verschiebung**
- Diese Information lässt sich aus den **Polaritäten der P** und S Wellen (Abstrahlcharakteristik) abschätzen
- Die Häufigkeit von Erdbeben als Funktion der Magnitude ist durch das **Gutenberg-Richter Gesetz** beschrieben
- Die **Mercalli** Skala beschreibt die Auswirkungen eines Erdbebens auf Strukturen (Gebäude)