

Wie entsteht ein Tsunami ?



Friedemann Wenzel

Geophysikalisches Institut der Universität Karlsruhe



Wie entsteht ein Tsunami ?

- Ursachen von Tsunamis
- Tsunami vom 26. Dezember 2004
- Physik von Wasserwellen
- Wirkungen und Schäden
- Frühwarnung

Ursachen von Tsunamis

Störung im Meer, die große Wassermassen schnell aus ihrem Gleichgewicht bringt

- Explosive massive Vulkanausbrüche:
- Große Meteoriteneinschläge
- Massive Erdrutsche
- Erdbeben mit Tiefen < 50 km unter dem Meeresspiegel und $M > 7$

→ Tsunami sind seltene Ereignisse: ca. 200 seit Mitte des 19. Jhdt.

Tsunamis durch Vulkanausbrüche

92 Tsunamis in Zusammenhang mit Vulkanausbrüchen, davon:

16.5 % durch tektonische Beben in Verbindung mit dem Vulkanausbruch

20% durch Rutschungen in den Ozean

14% durch Unterwasser-Ausbrüche

7% durch Einsturz des Vulkans



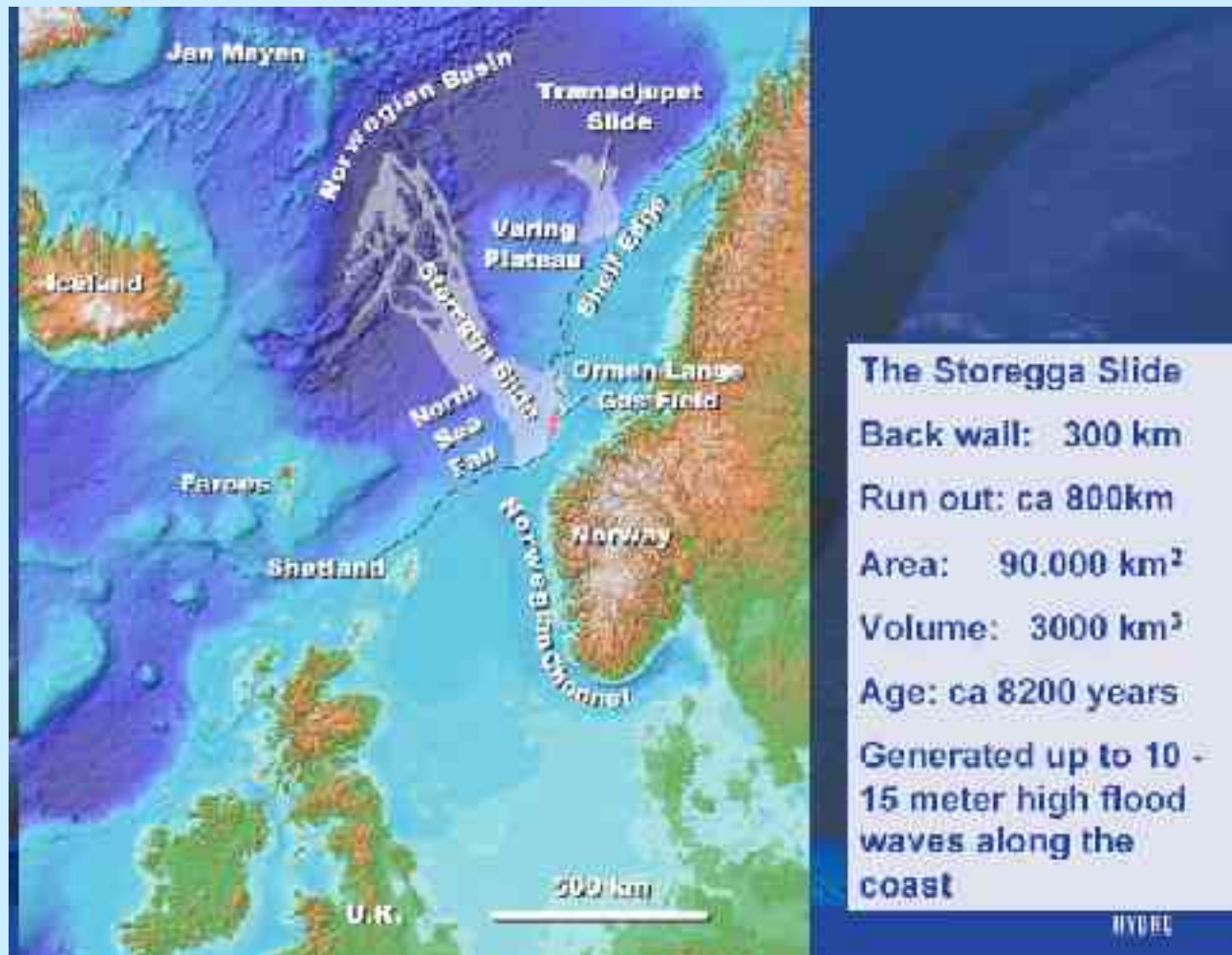
From Simkin and Fiske, 1983

Explosion des Krakatau 1883

100 km/h,
40 m hoch an der Küste

3600 Tote im Umkreis von 80 km
295 Orte zerstört

Tsunamis durch Rutschungen





Meteoriteneinschlag

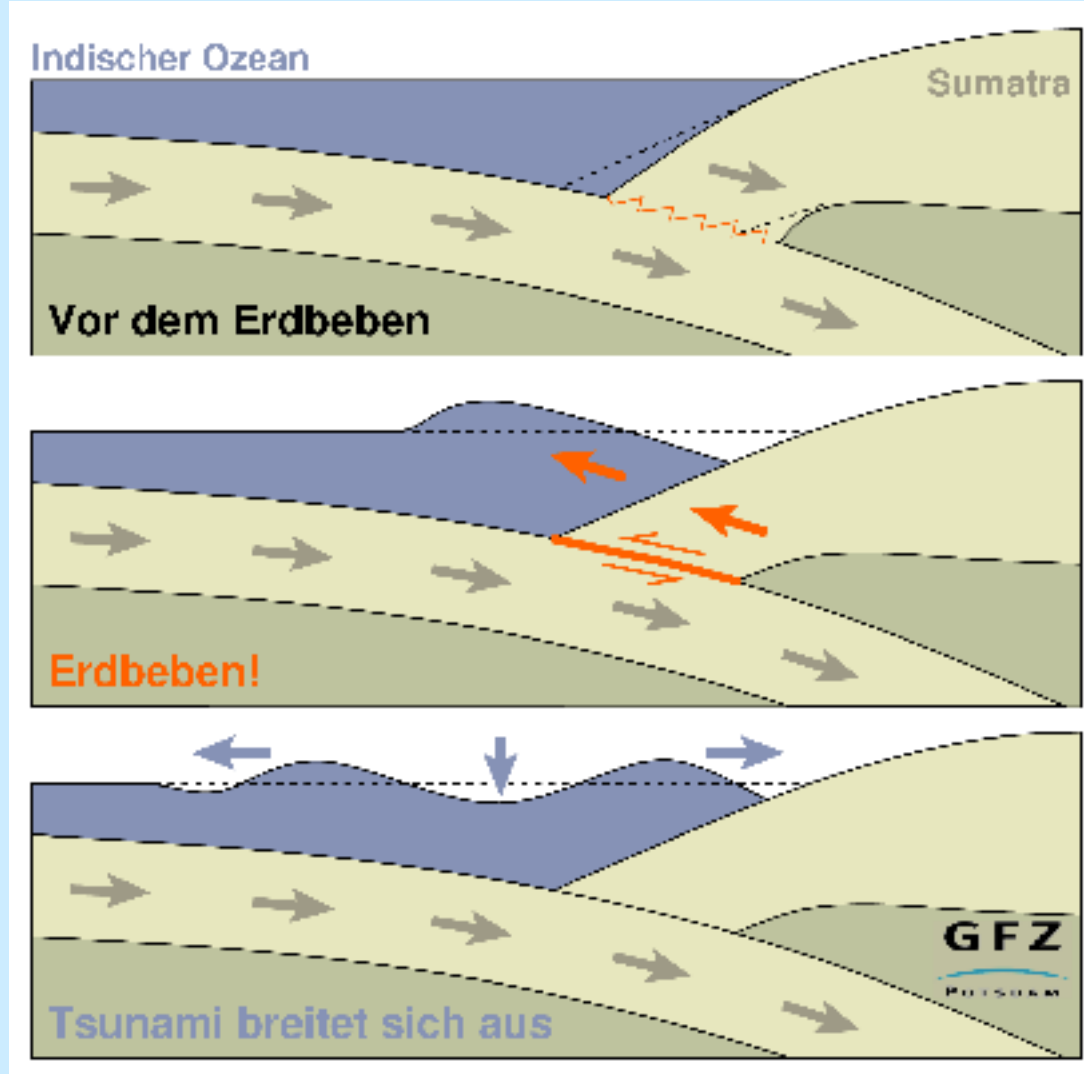
Auf der Erde:

- ca. 150 Impaktkrater, nicht nur Ozeane
- Meist jünger als 500 Millionen Jahre.

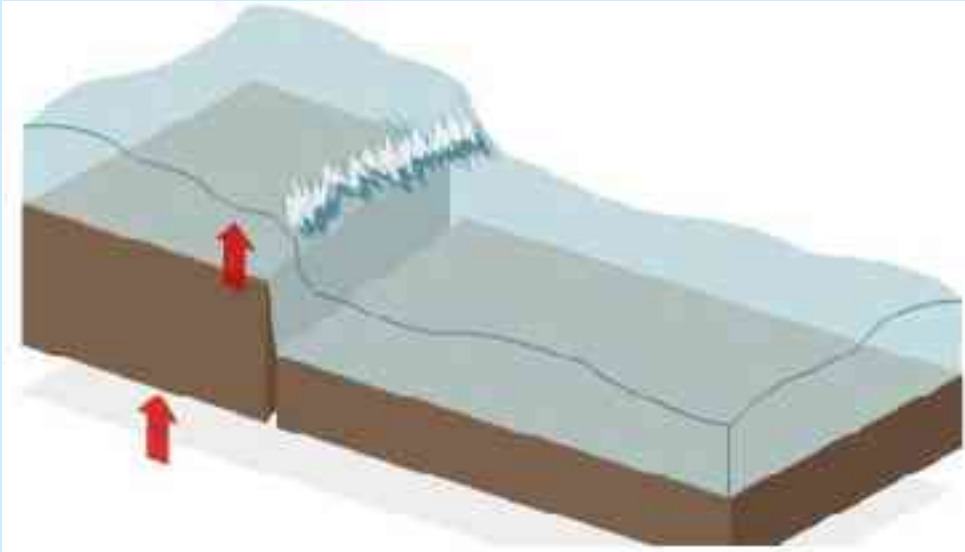
Asteroiden Durchmesser	Wellenhöhe in 1000 km Entfernung vom Impact
200 m	< 5 m
500 m	< 10 m
1000 m	6-35 m

Crawford and Mader,
1998, Hills and Goda,
1998

Tsunamis durch Erdbeben

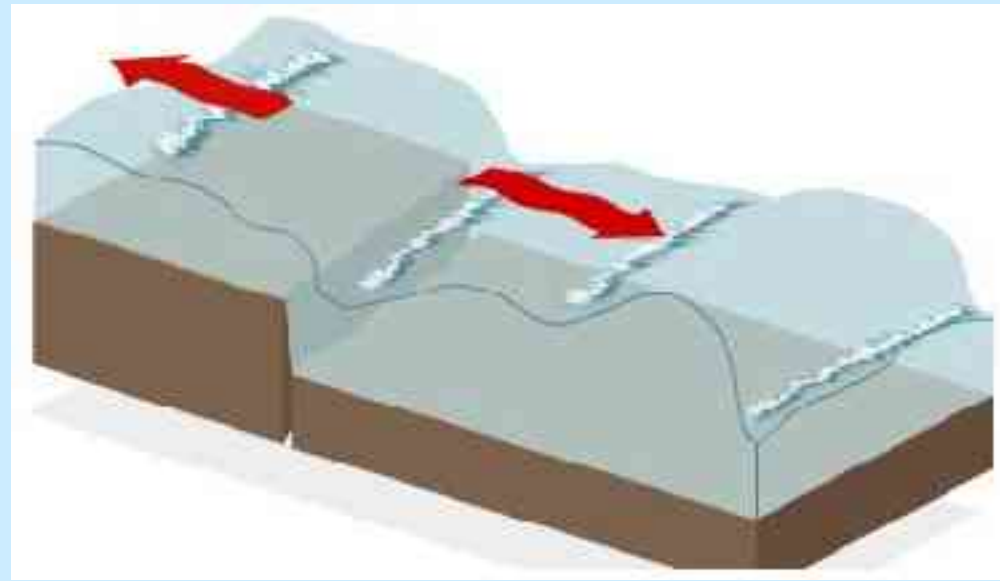


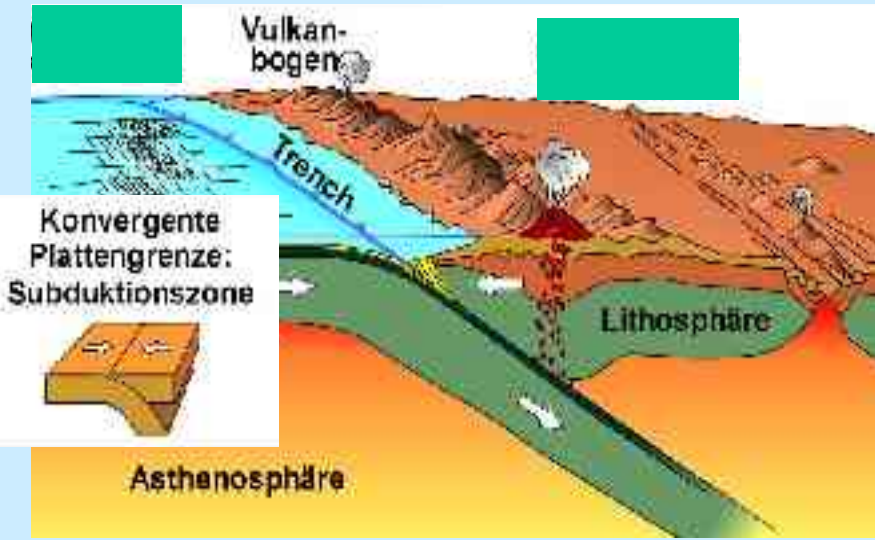
Tsunami Erzeugung



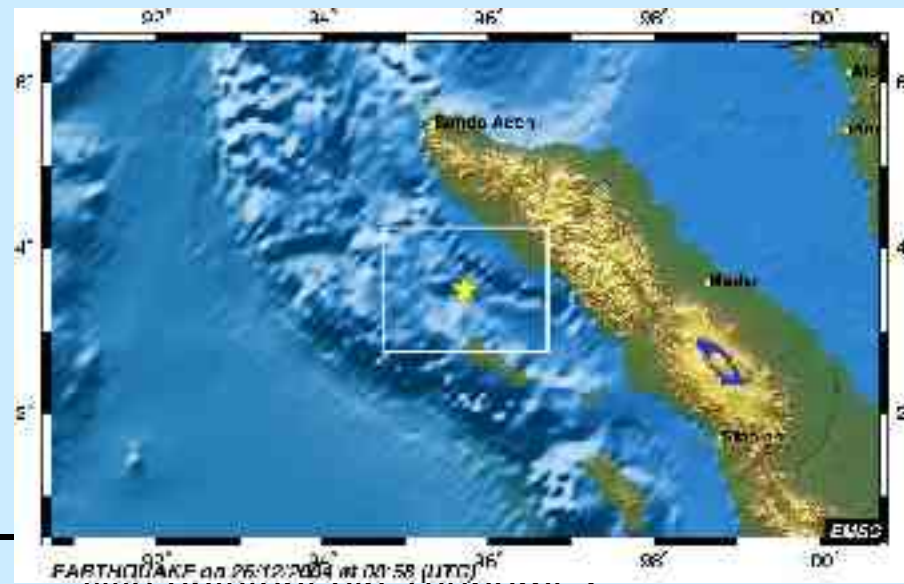
Erdbeben erzeugt
Vertikalversatz am
Meeresboden, der das
Wasser verdrängt

Langperiodische Wellen
breiten sich aus

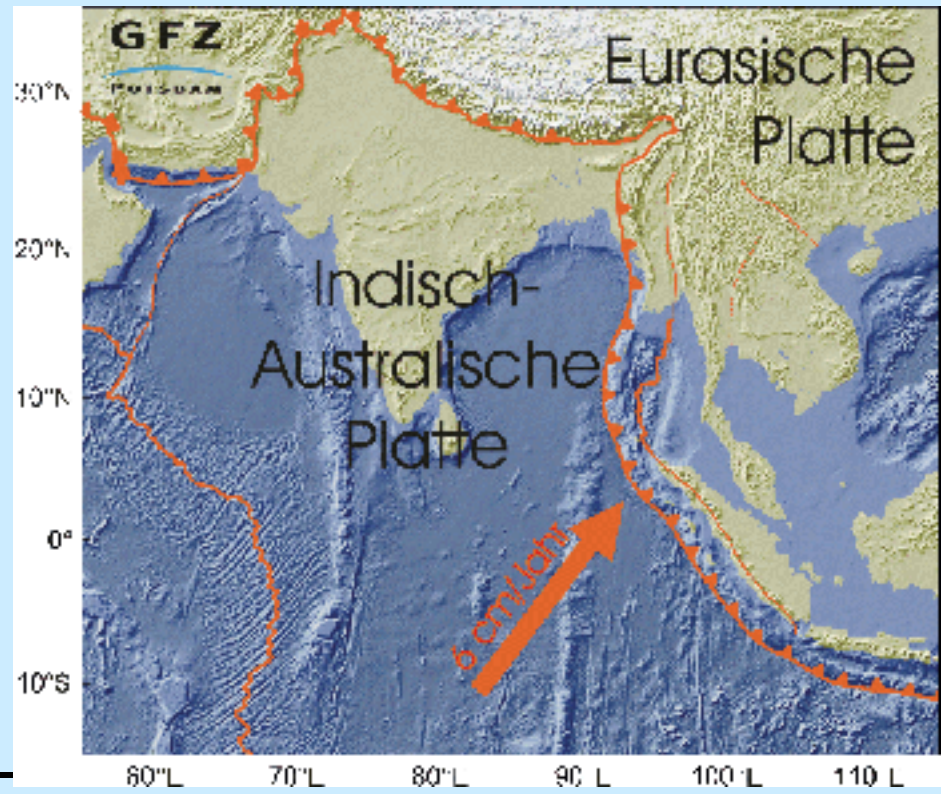




Subduktion der indischen Platte unter die Burma-Platte als Teil Eurasiens mit 6 cm/Jahr



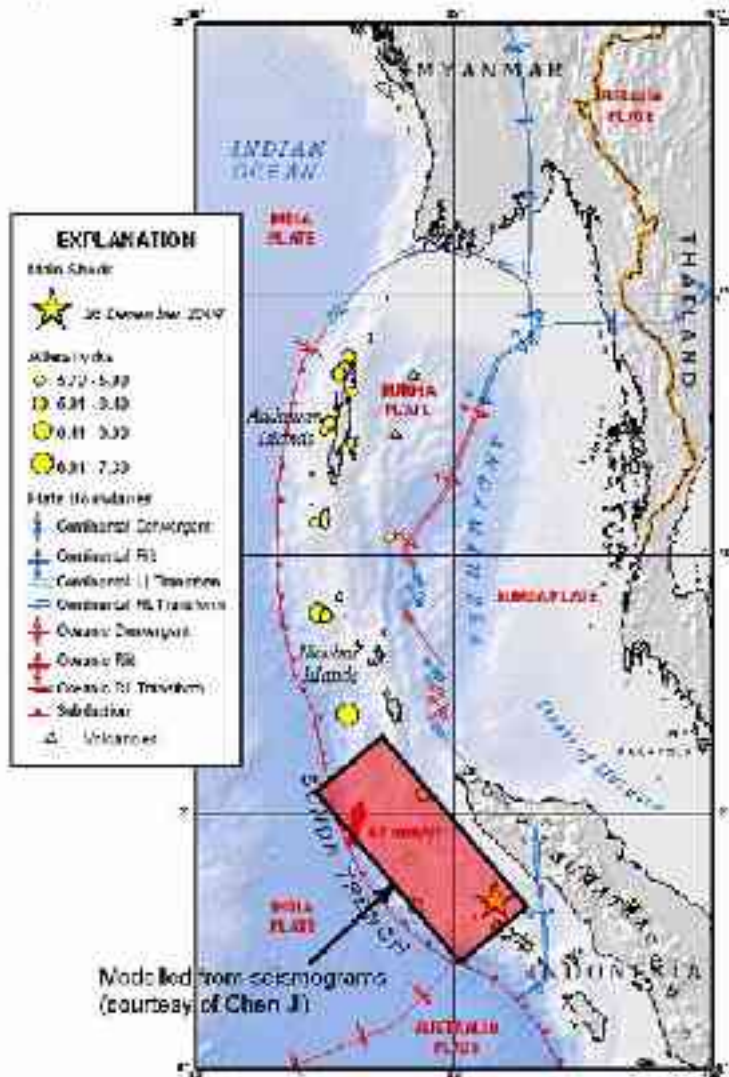
wie entsteht ein Tsunami ?



Karlsruhe 15. Juni 2005

Sumatra-Beben vom 26. Dezember 2004, 00:58:53 GMT (7:58:53 lokal)

Figure 4



Strike=329°; Dip= 8°; Slip= 110°
(Aufschiebung)

Magnitude 9.3

Bruchneigung 10°

Bruchlänge : 1300 km nach N,
100 km in
Neigungsrichtung

Bruchfläche 130,000 km²

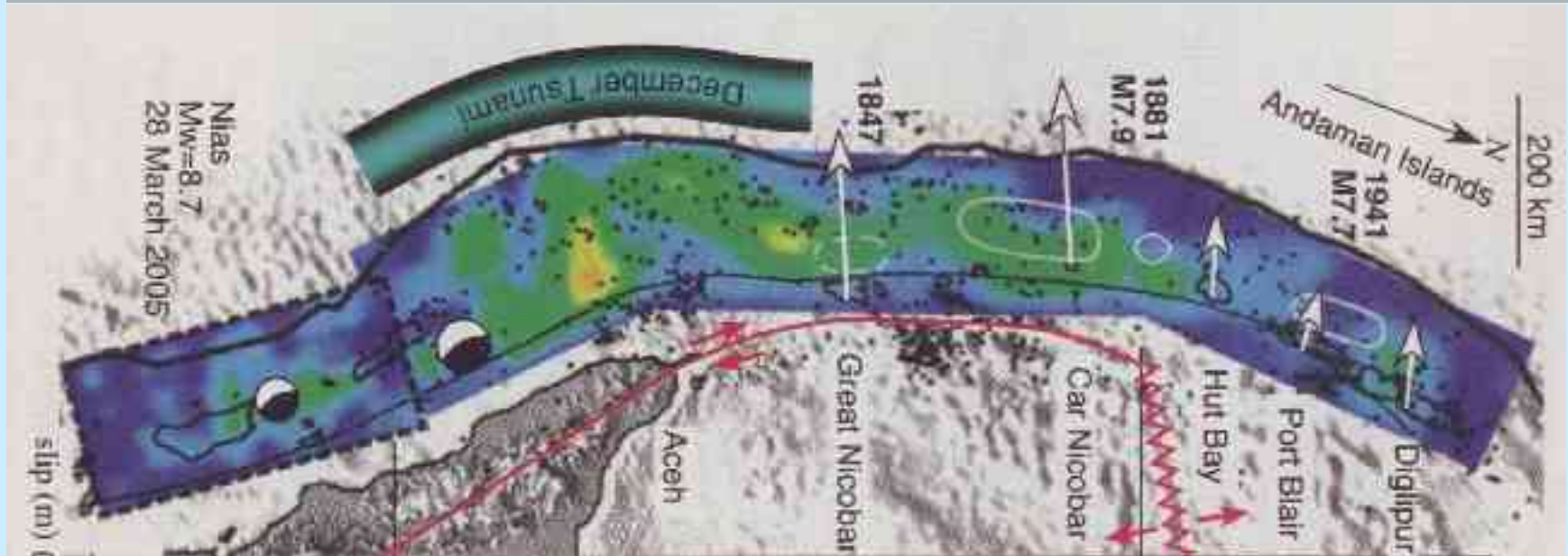
Tsunami Bruchlänge 650 km

Bruchgeschwindigkeit 2.7 km/s in NW-
Richtung

Maximaler Versatz 20 m

Sumatra-Beben vom 26. Dezember 2004

Segmente: Sumatra Nicobar Andaman

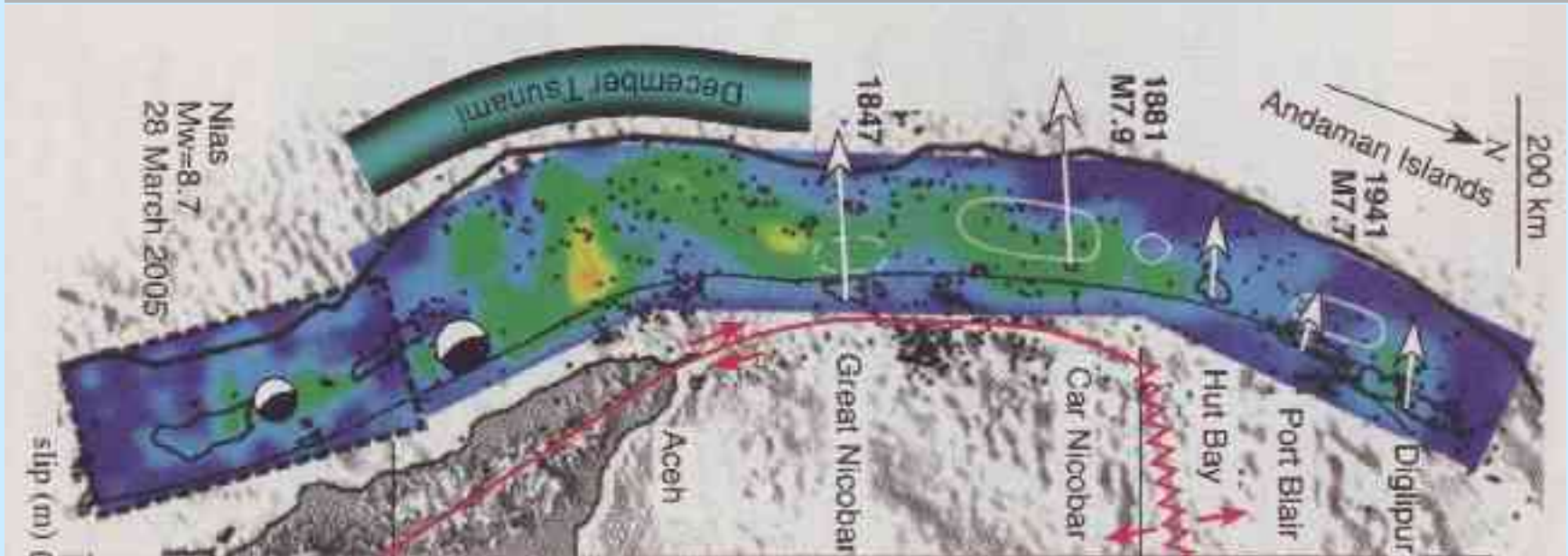


Bruchgeschwindigkeit (km/s)

- 1 Min 1.5 km/s
- 5 Min 3.0 km/s
- 11 Min 2.0 km/s

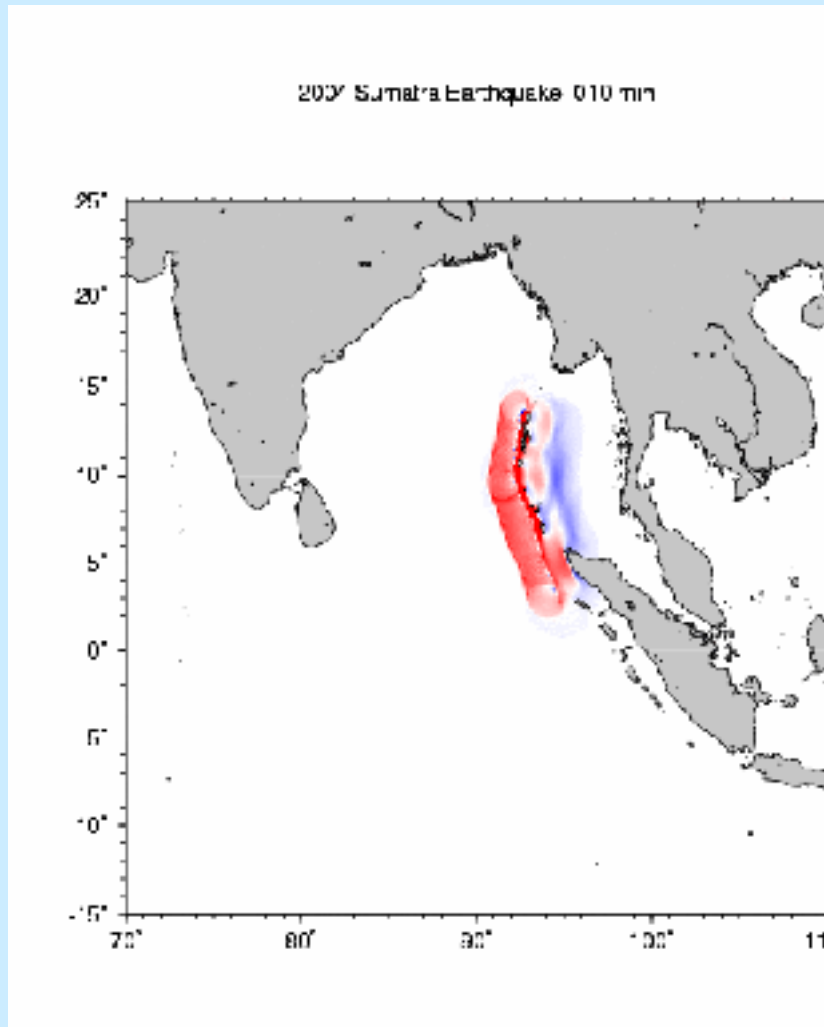
Sumatra-Beben vom 26. Dezember 2004

Segmente: Sumatra Nicobar Andaman



- 50 Sek 1 – 2 m Versatz
- 230 Sek 5 – 20 m Versatz
- 350 Sek 5 m Versatz
- 600 Sek 2 m Versatz
- 3500 Sek 5 m Versatz 5 m Versatz

Räumliche und zeitliche Tsunami-Ausbreitung



Simulation

06:59 Beginn des Erdbeben vor Sumatra

07:07 PTWC löst Alarm aus

07:14 PTWC Bulletin 1: M = 8.0, keine Gefahr für Pazifische Anlieger

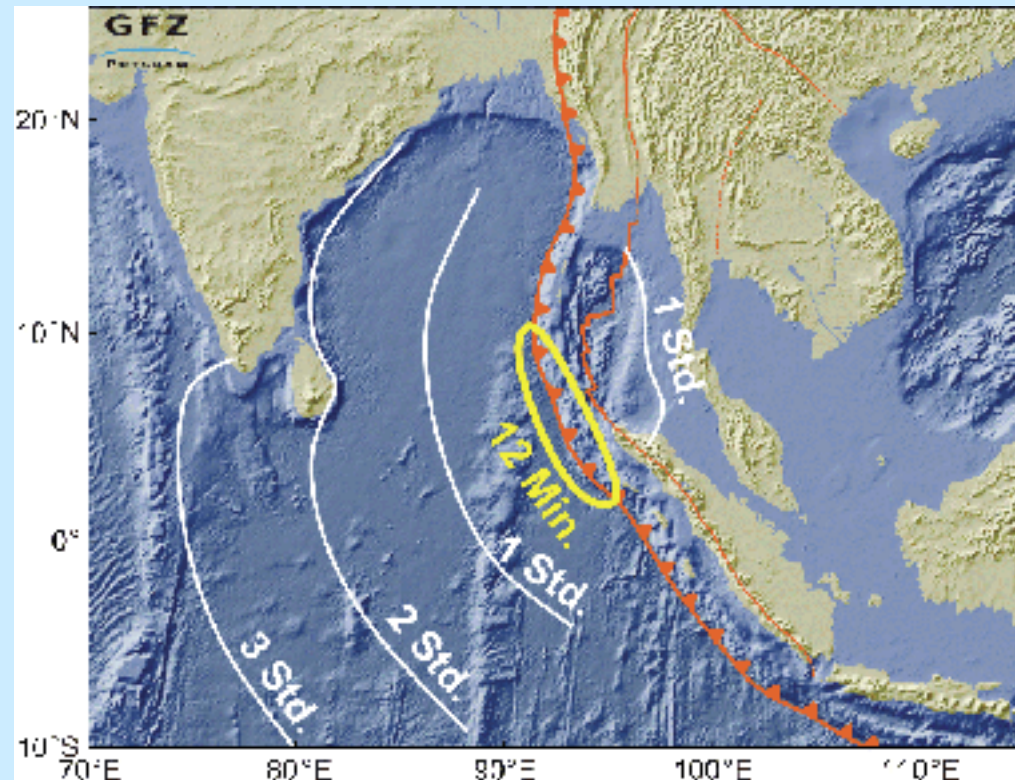
07:30 Tsunami erreicht Sumatra

08:00 PTWC Bulletin 2: M = 8.5, Tsunami Gefahr für indischen Ozean, Warnung an Kollegen erfolglos

Erdbeben vor Sumatra

26. Dezember 2004

M = 9.0



09:00 Tsunami erreicht Sri Lanka

09:15 Tsunami erreicht Indien

10:00 Tsunami erreicht die Malediven

11:30 Harvard Magnitudenberechnung: $M = 8.9$

14:15 PTWC informiert U.S. State Department über Gefahr für Afrika und Madagaskar

14:15 Tsunami erreicht Ostafrika

21:30 PTWC warnt, dass der Tsunami den Pazifik erreicht hat



Tsunami Physik



Eigenschaften Tsunami:

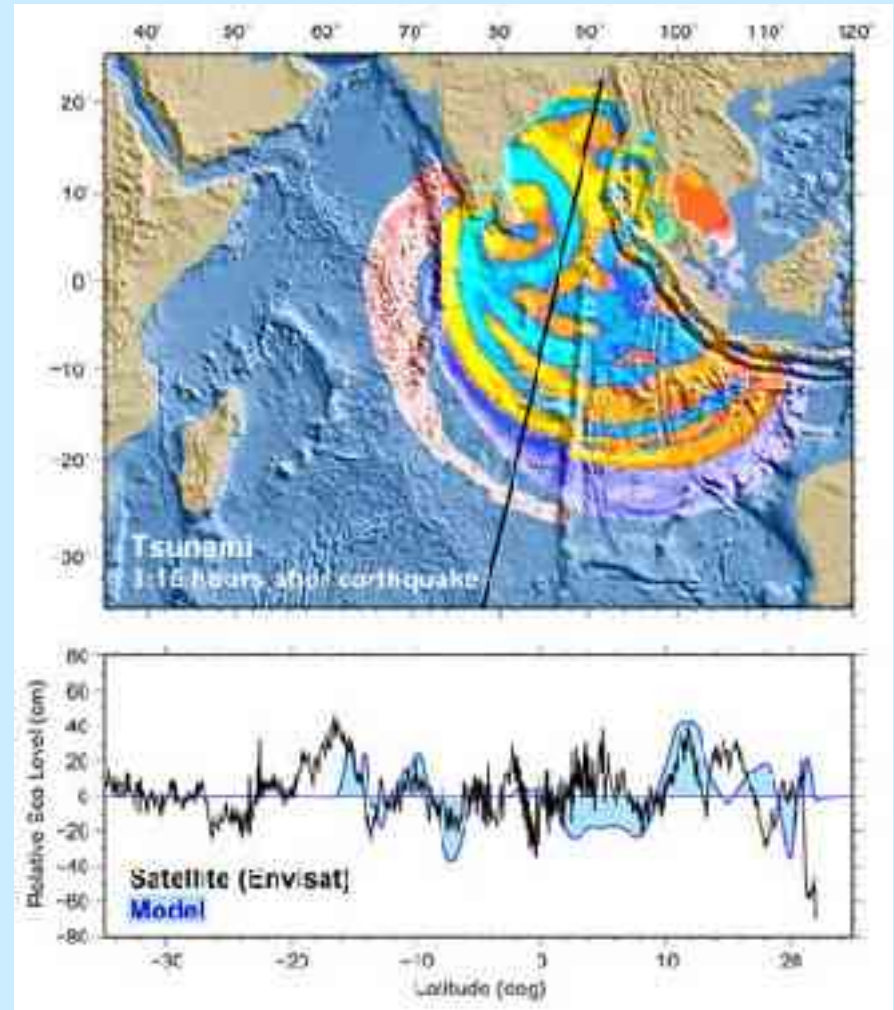
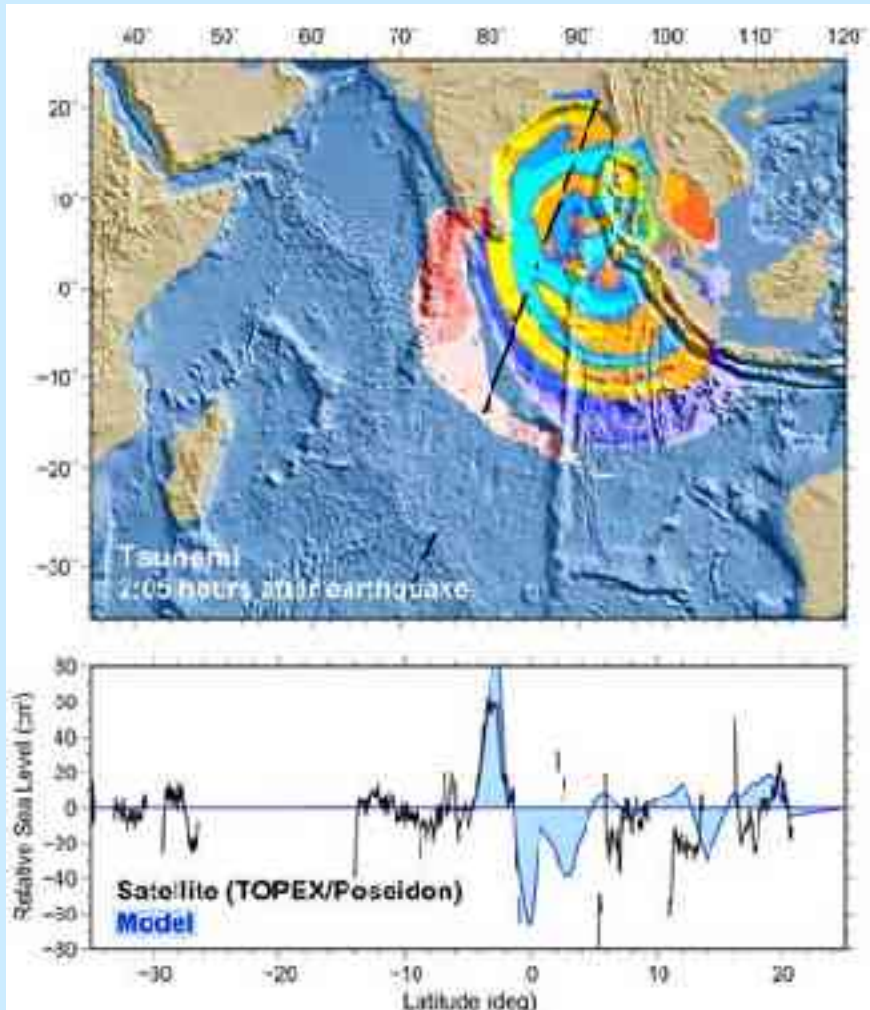
- Geschwindigkeit: 600-900 km/h oder 160-250 m/s auf offener See
→ Wellenlängen : 10-500 km,
- Wellenhöhe im offenen Meer \approx m
- 30-40 km/h an der Küste
- Perioden: 100-2000 s (33 Min.)

Eigenschaften Windwellen:

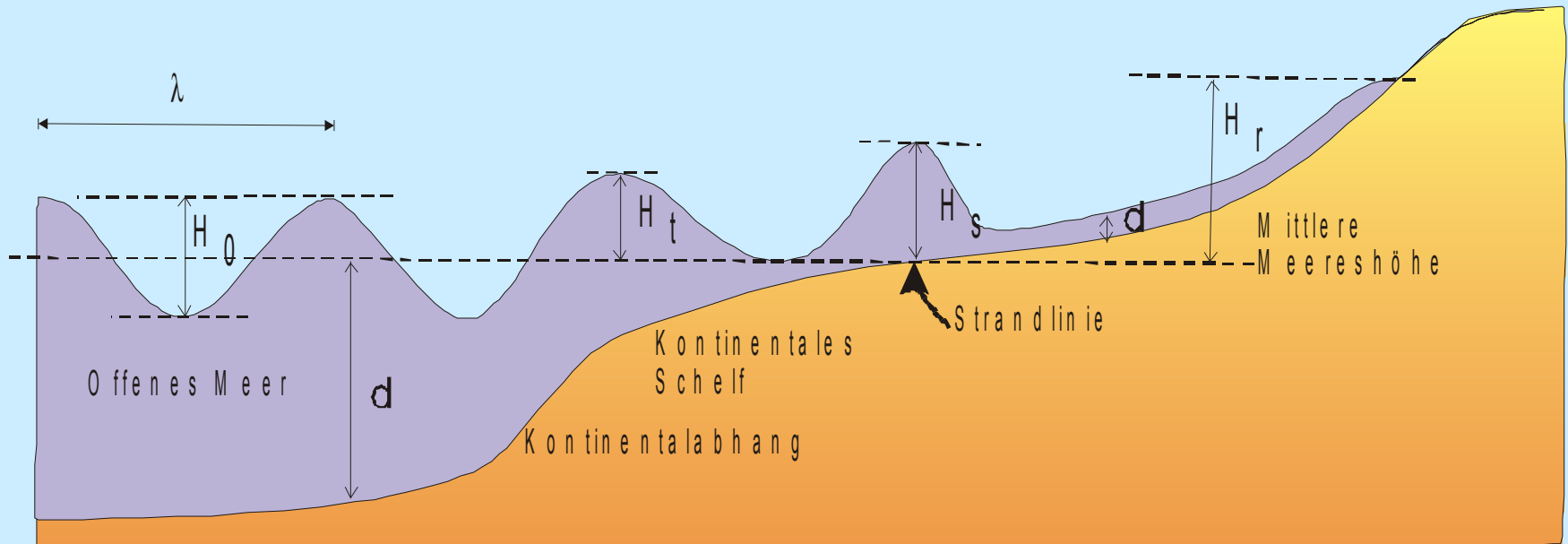
- Geschwindigkeit: ca. 90 km/h oder 25 m/s auf offener See
→ Wellenlängen : 100-200 m
- Wellenhöhe bis 10er m
 - Perioden: 5-20 s

Tsunamis dauern sehr lange im Vergleich zu Erdbeben

Ausbreitung des Tsunamis



Tsunami Wellen



H_r leicht zu messen, H_0 , H_t , H_s schwierig zu beobachten

Strömungsmechanik I

Impulserhaltung

Navier Stokes Gleichung

Annahme: Strömung ist reibungsfrei

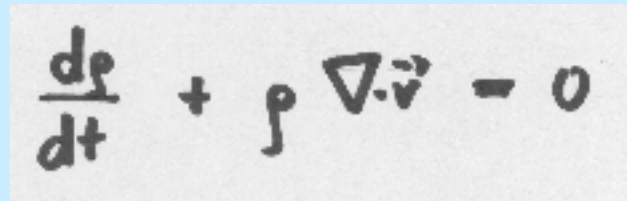
$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla p + \rho \vec{g}$$

$$\vec{v} = (u, v, w)^T$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla$$

Strömungsmechanik II

Massenerhaltung


$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \vec{v} = 0$$

Annahme: Material ist inkompressibel

Folgen: Keine Schallwellen

Strömung ist wirbelfrei

Nur kinetische und potenzielle
Energie als Energieformen

Strömungsmechanik III

Potenzialströmung (Laplace Gleichung)

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0$$

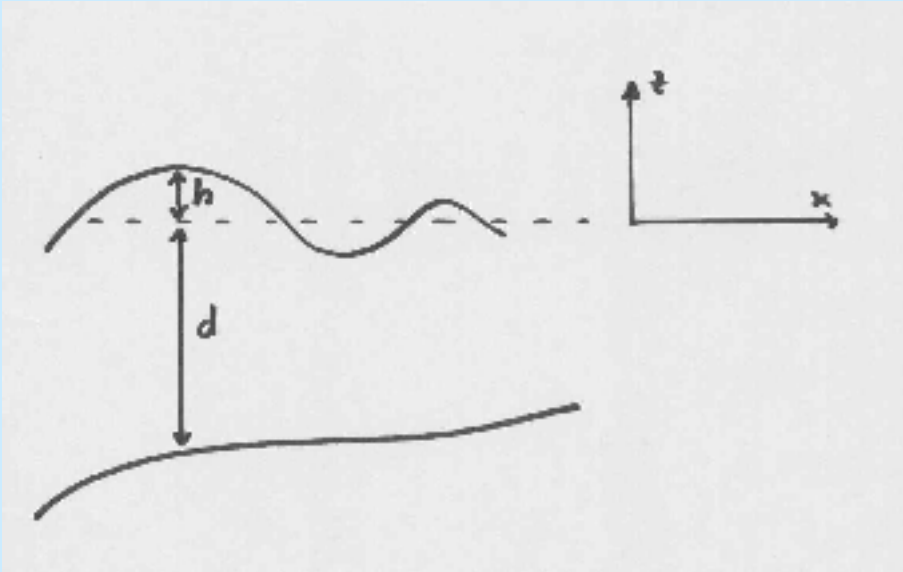
$$\nabla \times \vec{v} = 0$$

$$\vec{v} = \nabla \phi$$

$$\nabla^2 \phi = 0$$

$$\phi(x, y, z, t)$$

Strömungsmechanik IV



Strömung folgt der Laplace –
Gleichung **und**
Randbedingungen

$$z = h(x, y, t) \quad p = p_0 - \rho g z$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 + g h = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

$$z = d(x, y, t) \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial d}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial d}{\partial y} \frac{\partial \phi}{\partial y} = - \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

Langwellen Approximation im flachen Wasser

$$\frac{h}{D} \ll 1 \quad \frac{D}{L} \ll 1$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (h+d) + \frac{\partial}{\partial x} (u(h+d)) + \frac{\partial}{\partial y} (v(h+d)) = 0$$

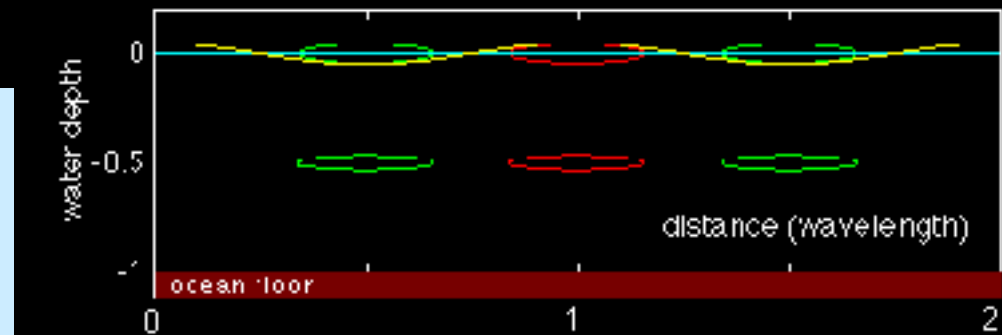
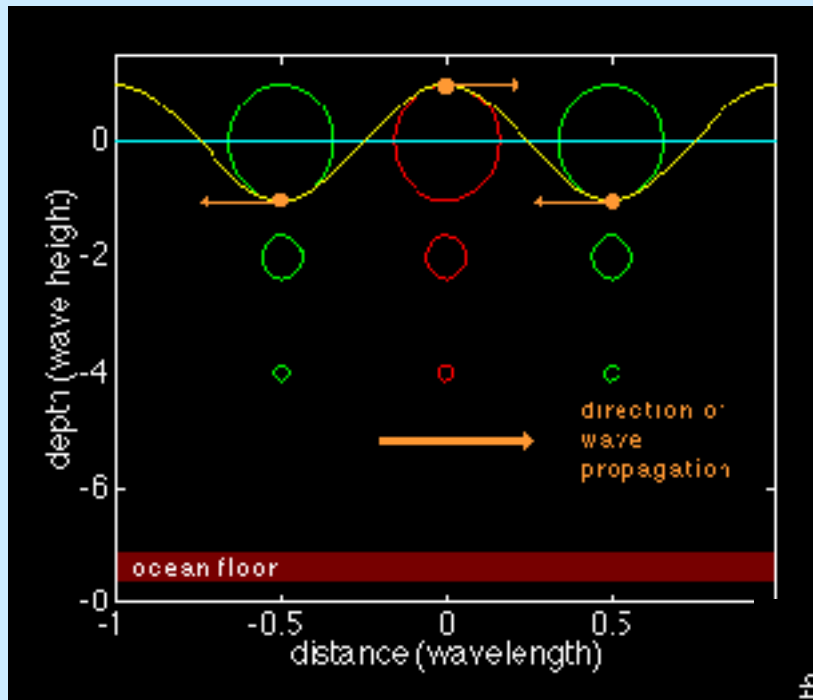
Physik der Tsunamis

Wasserwellen sind
Oberflächenwellen

Kurzwellig

Wassertiefe $d \gg l$

normale Dispersion



Langwellig

Wassertiefe $d \ll l$

$$V_g = V_p \approx \sqrt{g \cdot d}$$



nicht dispersiv

Dispersion von Wasserwellen

v_g : Gruppengeschwindigkeit

ω Frequenz

Oberflächenspannung des Wassers

d Wassertiefe

v_p : Phasengeschwindigkeit

g Schwere

λ Wellenlänge

$$\lambda \gg d \quad v_p = \sqrt{g \cdot d} \quad v_g = v_p \text{ keine dispersion}$$

$$1.7 \text{ cm} < \lambda \ll d \quad v_p = \frac{g}{\omega} \quad v_g = \frac{1}{2} v_p \text{ normale dispersion } v_g < v_p \text{ und } \frac{dv_p}{d\omega} < 0$$

$$\lambda \ll 1.7 \text{ cm} \quad v_p = \sqrt[3]{\sigma \cdot \omega} \quad v_g = \frac{3}{2} v_p \text{ anomale dispersion}$$

Oberflächenspannung von Wasser

$$T \cdot k = \Delta p$$

$$T = 7 \cdot 10^{-2} \text{ kg/s}^2$$

$$\sigma = \frac{T}{\rho} = 7 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}^2}$$

Form der Tsunamiwellen

Sinusförmige Wellen: Lineare Wellen

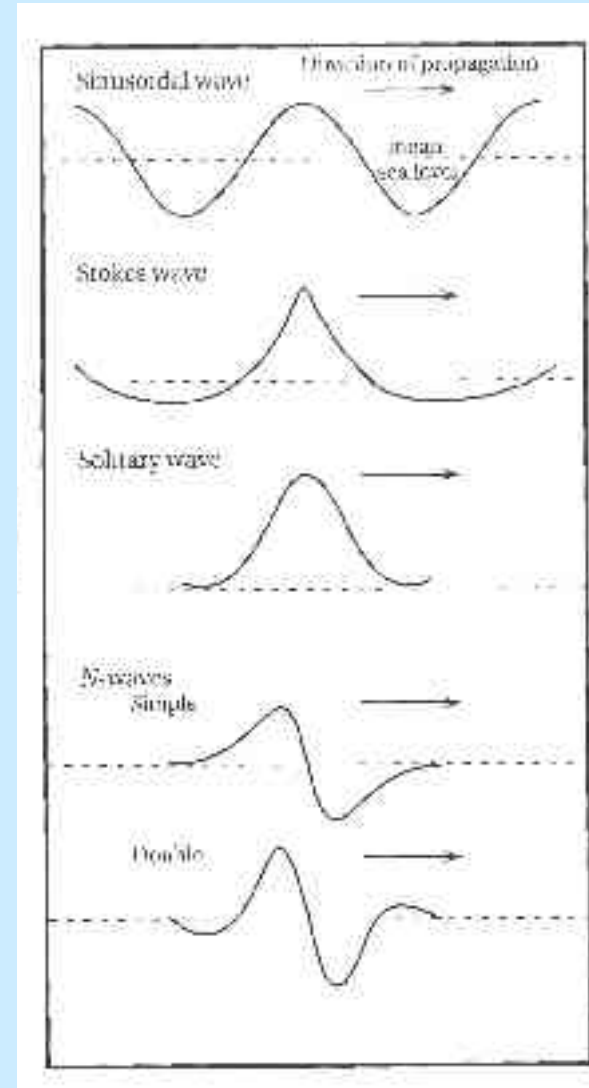
Stokes Wellen: Nichtlineare Wellen

Solitonen: Geschwindigkeit von
Amplitude
abhängig

Beobachtungen:

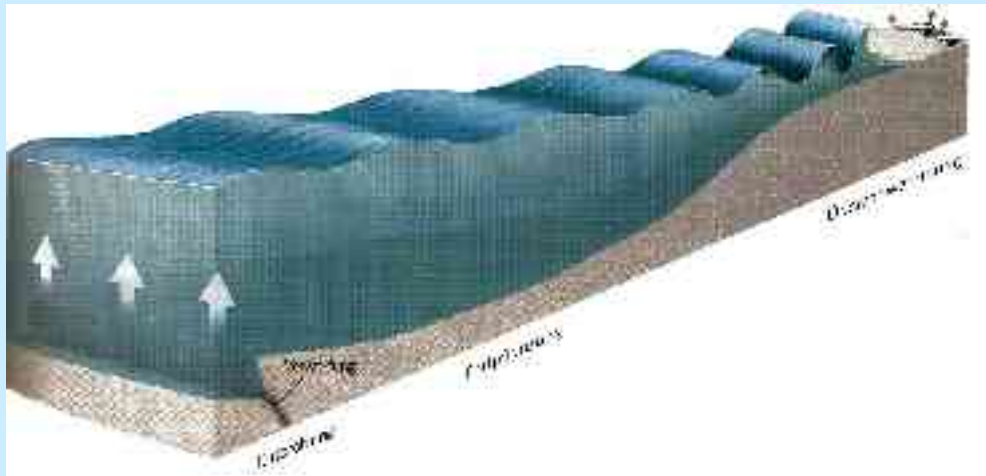
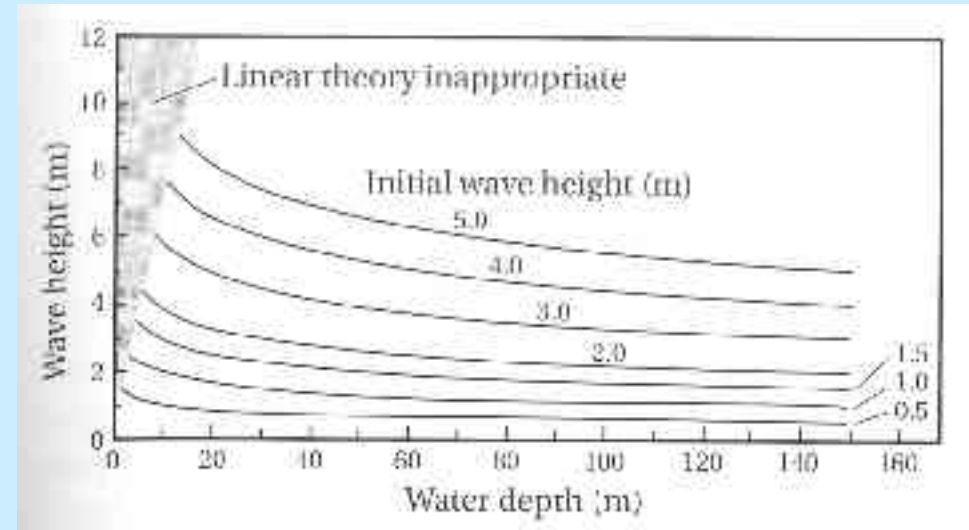
Wellen brechen oft nicht

Zurückweichen des Wassers vor
Ankunft des Wellenberges



Tsunami in Küstennähe

- Aufsteilen von Tsunami-Wellen in Küstennähe
- Hinzu kommen nichtlineare und Resonanzeffekte



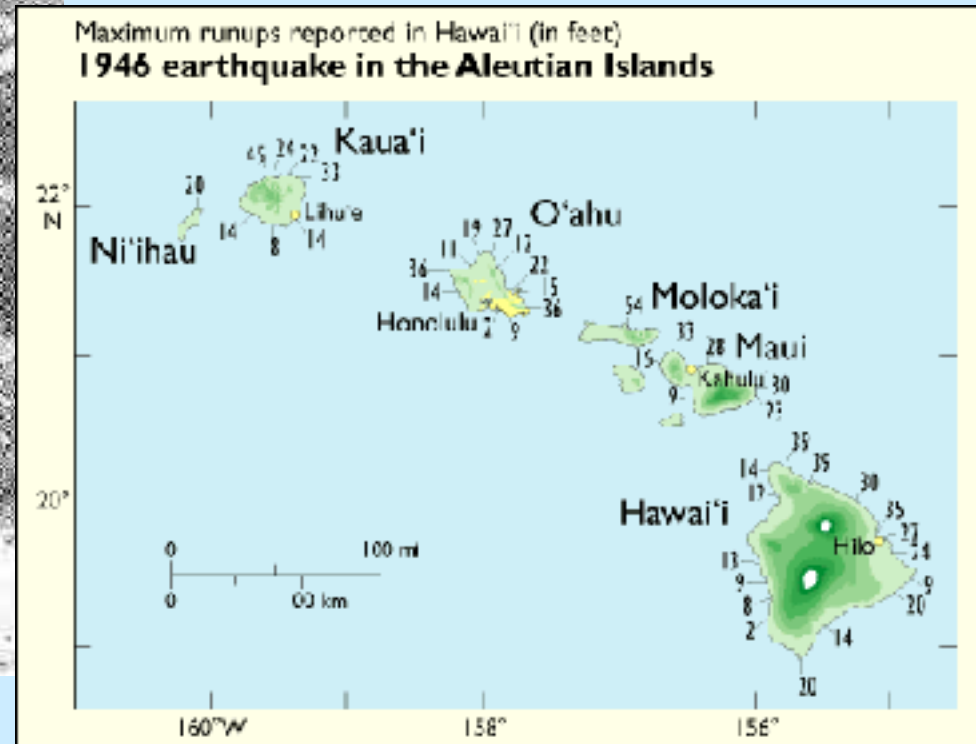
H_t und H_s im Vergleich zu H_0

Run-up Höhe

Die Run-up Höhe (H_r) kann ein Mehrfaches der Wellenhöhe am Strand (H_s) sein.



Tsunami Run-up nach dem Alaska-Beben 1964



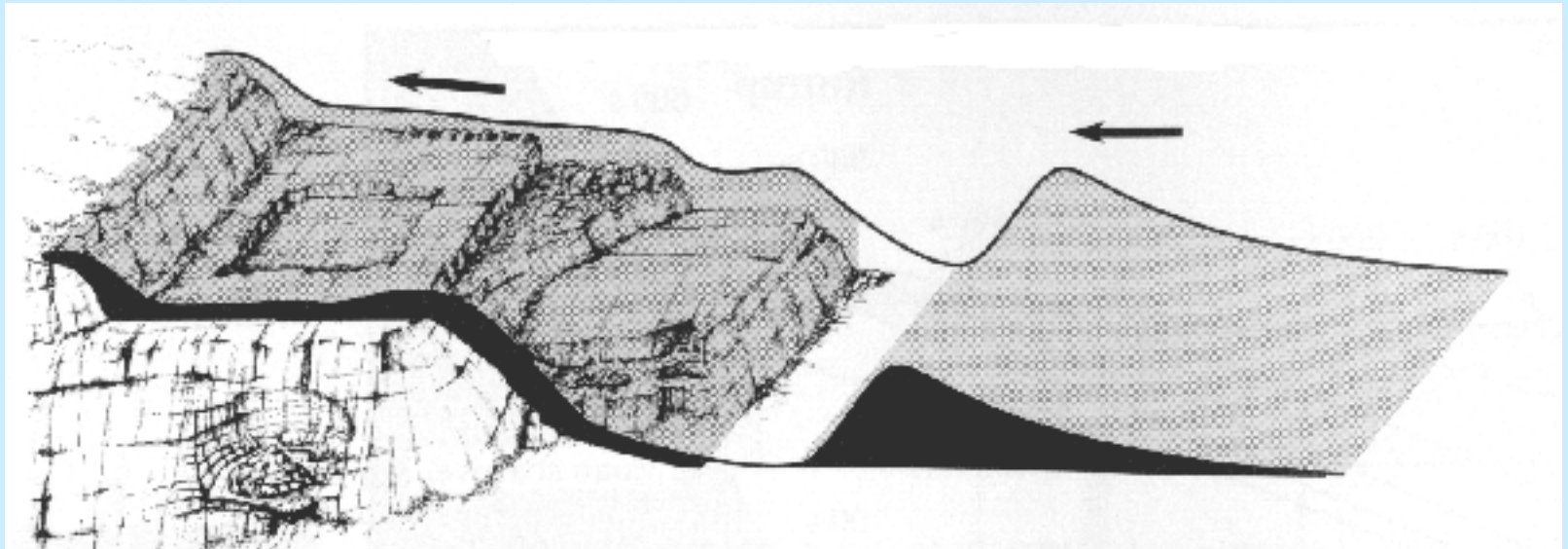
Eindringtiefe (Innudation)

$$x_{\max} = 0.06 \cdot H_s^{1.33} \cdot n^{-2}$$

$n = 0.015$ für flaches Weideland

$n = 0.03$ für bebautes Land

$n = 0.07$ für dicht bewaldetes Land



Stahlbeton-Rahmenbau

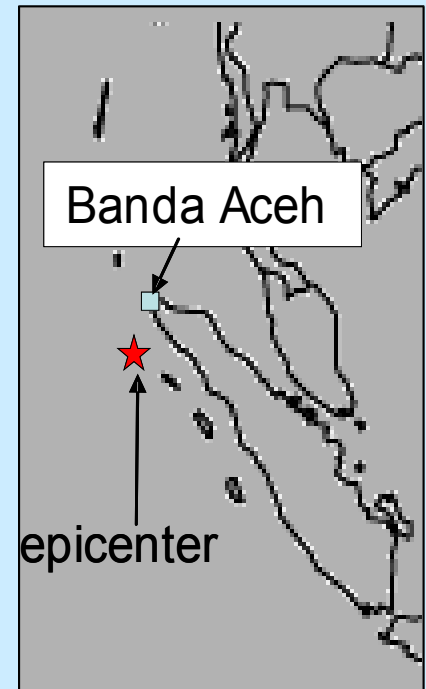


Photo: Murat Saatcioglu, Ahmed Ghobarah, Ioan Nistor

Beton Rahmenbau



Photos: Murat Saatcioglu, Ahmed Ghojarah, Ioan Nistor

Tsunami Schäden



Ort: Lhoknga, Indonesia

10. Januar 2003



29. Dezember 2004

Tsunami Schäden



12. April 2004



2. Januar 2005

Tsunami Schäden



Photo: Jose Borrero



Tsunami Schäden



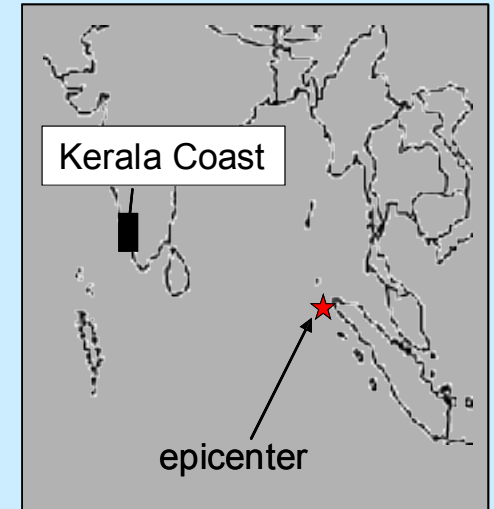
Photo: Curt Edwards

Naval Base building

Kao Lak Resort



Tsunami Schäden



Schadenswirkung

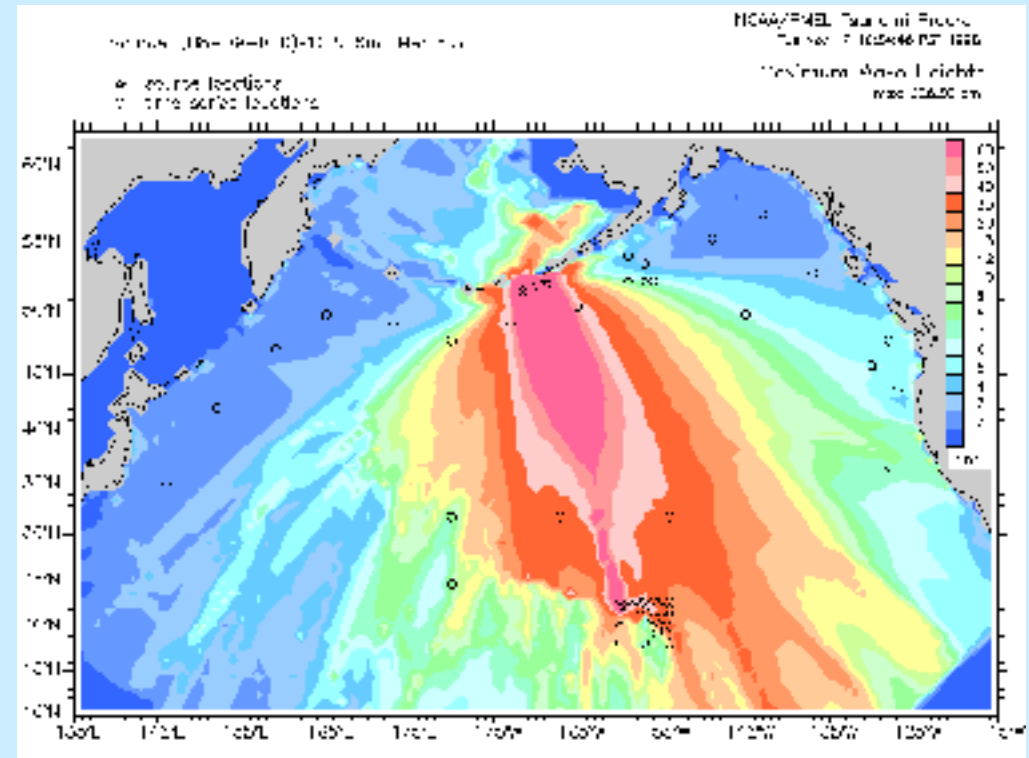




Vier Komponenten der Frühwarnung

- Monitoring- und Kommunikationssysteme
- Prognosetools
- Warnung
- Nutzung der Information

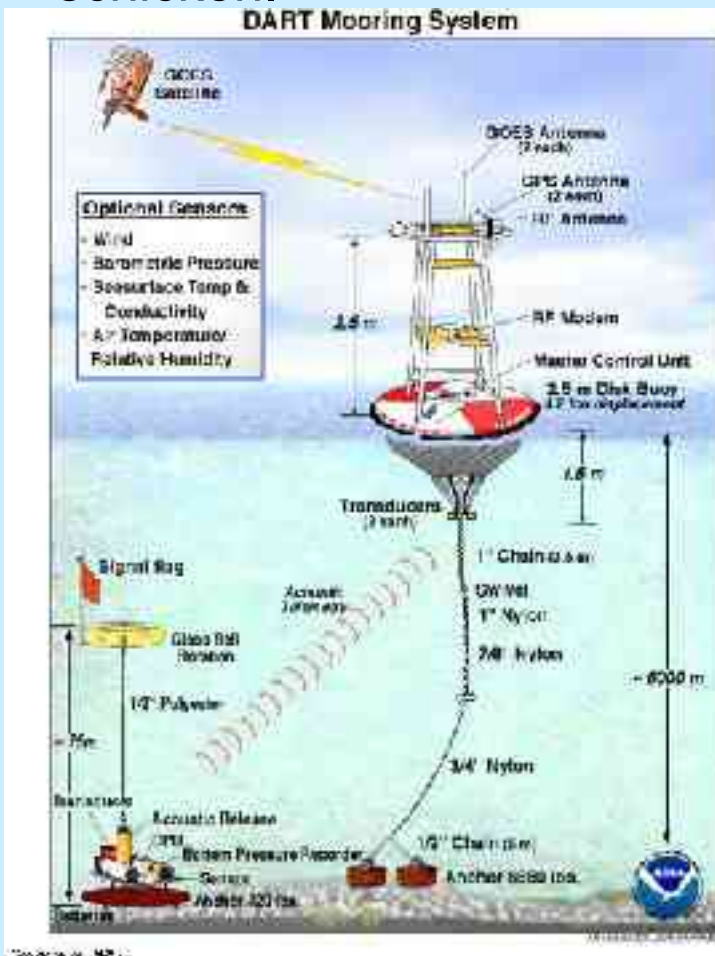
Prognose: modellierte Wellenhöhe



Pacific Tsunami Warning Center (PTWC)

- Gegründet 1949
- Warnungen zunächst nur für USA (Westküste und Hawaii)
- Ab 1960 Warnungen ausgedehnt auf alle Pazifischen Anrainer
- 1965 Einrichtung als Internationales Zentrum (International Tsunami Information Center) auf Initiative der UNESCO mit heute 26 Mitgliedsstaaten
- Prozedur:
 1. Seismologische Magnituden-Bestimmung
 2. Falls $6.5 < M_w < 7.5$ (Aleuten 7.0) Tsunami Information Bulletin an Teilnehmer
 3. Falls $M_w > 7.5$ (Aleuten 7.0)
 4. Tsunami Warning /Watch Bulletin an Institutionen der Teilnehmer
 5. Analyse ob Ereignis einen Tsunami auslösen kann
 6. Beobachtung der Wasserstandsmessungen im Pazifik
 7. Informationen an die Institutionen der Teilnehmer
 8. Kommunikation:Internet, Satellit, Fax/Telex
 9. Weiterleitung der Warnung an die Bevölkerung erfolgt nach nationalen Katastrophenplänen (Radio, Fernsehen, E-mail, etc.)

Im Rahmen des Programms Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis (DART) wurden bis 2001 im Pazifik 6 Druckmesser mit Bojen verankert, die via Satellit Daten an das National Data Buoy Center der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) schicken.



West Coast/Alaska Tsunami Warning Center (WC/ATWC)

Operation:

- (1) Auslösen eines internen Alarms durch ausgesuchte seismische Stationen
- (2) Automatische Herdparameter- und Magnitudenbestimmung
- (3) Manuelle Kontrolle durch Wissenschaftler

Echtzeit Seismisches Netz von ca. 150 Stationen

Automatische Detektion von M_b , M_L , M_S und M_W aus Oberflächenwellen

Eine erste Warnung erfolgt wenn $M > 7.0$ inklusive der ungefähren Ankunftszeit eines Tsunamis

- (4) Anfordern von Wasserstandsdaten im Pazifik (inklusive DART Daten)

Wenn Ablesungen an Wasserstandsmessern (etwa 100 verfügbar plus 6 DART Stationen) vermuten lassen, dass die Tsunami Welle höher als 50 cm ist werden die Warnungen fortgesetzt, ansonsten entwarnt.

(5) Verifizierung eines Tsunamis und Vergleich mit Modellen

Tsunami-Amplituden außerhalb der Entstehungsregion, auf der Basis von Modellen und Beobachtungen erfolgen bislang nur intern.

(6) Information an Katastrophenschutz

Warnungen enthalten:

Erdbebenparameter

Erdbebenbeschreibung

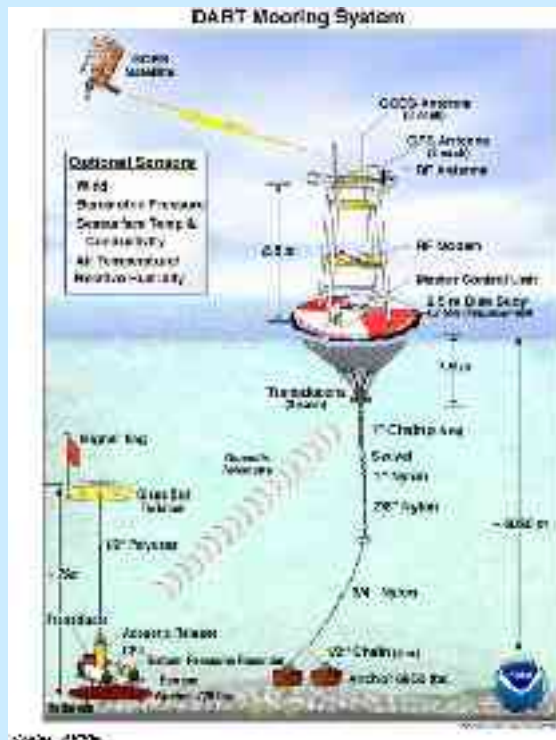
Ankunftszeit des Tsunamis

für 24 Orte der Westküste und Alaskas

Warnungen und Entwarnungen erfolgen in Abstimmung mit dem PTWC

Seit 1980 erfolgten 11 Warnungen nach 8 bis 14 Minuten

Komponenten eines Frühwarnsystem im Indischen Ozean



- + Echtzeit Erdbebenklassifizierung (GEOFON)
- + Ozeanboden Drucksensoren
- + Messung der Meereswellen mit GPS – Bojen
- + Modellierung der Tsunami-Ausbreitung

Vorbeugen ist besser als Wiederaufbau

Schutzmassnahmen:

Gefährdungsanalysen

Raumplanung

- Bewaldung von Küsten
- Schutzwälle
- Stahlbetonbauten

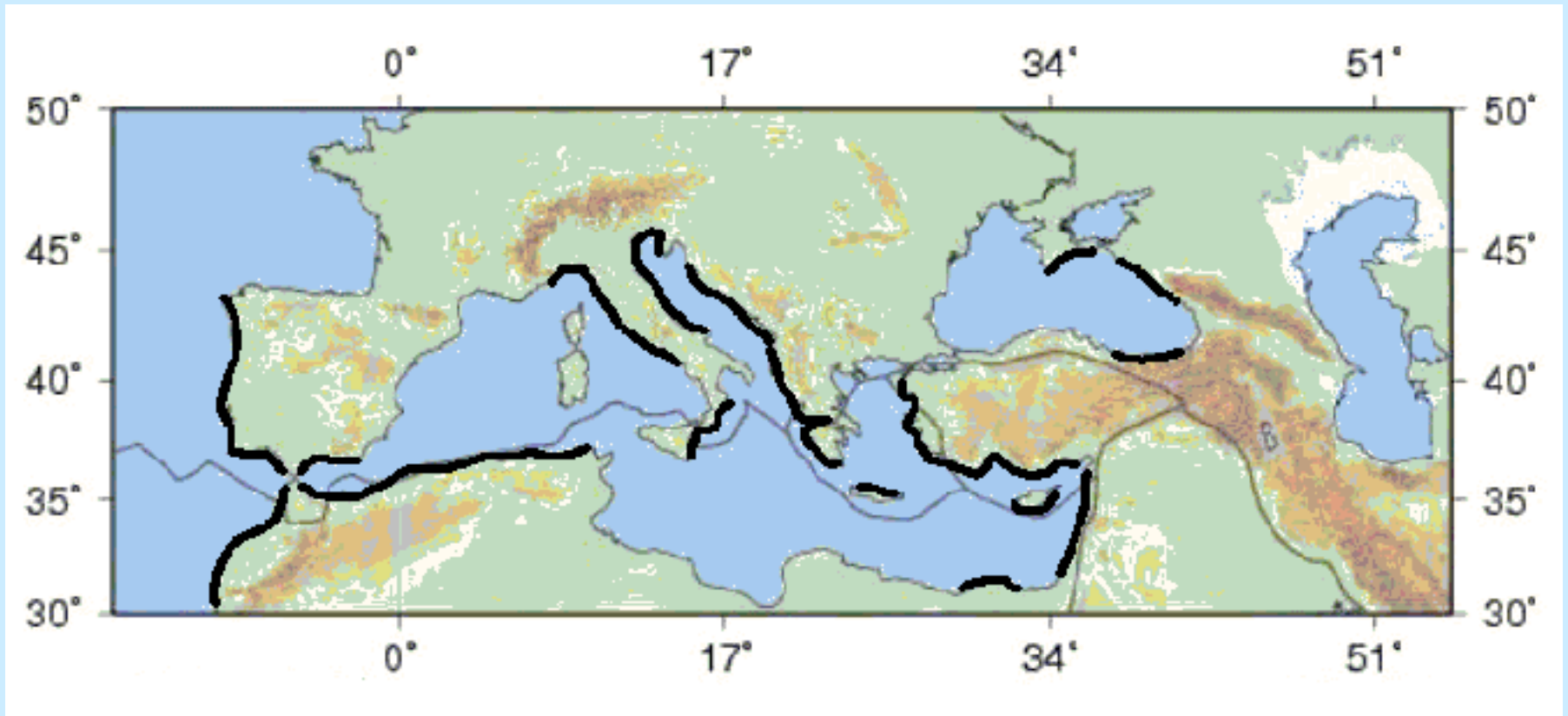
Frühwarnung



Schulung



Gefährdung durch Tsunamis im südlichen Europa und Nordafrika



nach Munich Re, 2000

Tsunami Gefährdung

Wiederkehr (in Jahren) von run-ups

Region	5 Meter	10 Meter
Nordatlantik	200	>1000
Westl. Mittelmeer	100	500
Adria	200	>1000
Östl. Mittelmeer	100	300
Schwarzes Meer	200	>1000

Benfield Greig Hazard Research Centre, London