

GPS ist mehr als Navigation – Das Erfassen der Erde mit Millimetergenauigkeit

Markus Rothacher

**Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
ETH Zürich**

**Physikalische Gesellschaft Zürich
27. Februar 2014, Zürich**

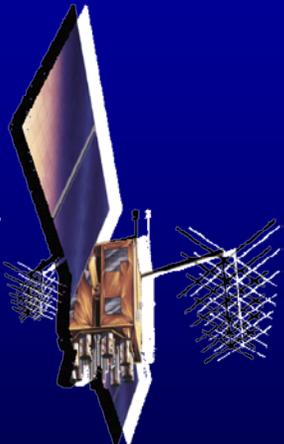
Übersicht

- **GNSS: Global Navigation Satellite Systems**
- **Motivation: schnelle und langsame Prozesse**
- **Plattentektonik** ← → **Erdbeben**
- **Klima** ← → **Wettervorhersage**
- **Meeresspiegeländerungen** ← → **Tsunami**
- **Blick in die Zukunft**
- **Schlussfolgerungen**

GNSS: Global Navigation Satellite Systems

GNSS: Global Navigation Satellite Systems

- **Global Positioning System (GPS):** USA , 31 Satelliten
- **Global Navigation Satellite System (GLONASS):** russisches Pendant, 24 Satelliten
- **GALILEO:** europäisches Satellitennavigationsystem, 2 Testsatelliten, 4 IOV-Satelliten
- **BEIDOU/COMPASS:** chinesisches System, 6 GEO, 5 IGSO, 5 MEO
- ... japanisches System, indisches System, etc.



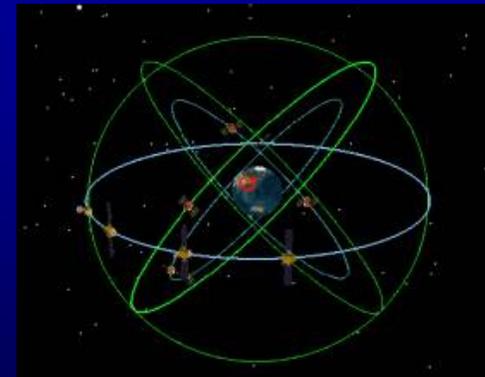
GPS



GLONASS



GALILEO



BEIDOU/COMPASS

...

GPS im täglichen Leben

Empfänger im Taschenformat

Casio PRO TREK
Satellite Navi 2



Ab Lager-lieferbar
EGATIME



Navigation: Code-Genauigkeit ca. **3-10 Meter**

Erdmonitoring: Phasen-Genauigkeit ca. **1-2 Millimeter**, 1-2 Frequenzen

Beobachtungsgleichung für GNSS

$$c \cdot \Delta t_{sta}^{sat} = \|\mathbf{r}_i^{sat} - \mathbf{R} \cdot \mathbf{r}_{e,sta}\| + c \cdot \delta t^{sat} - c \cdot \delta t_{sta} + \delta \rho_{trp} + \delta \rho_{ion} + \delta \rho_{rel} + \dots + \epsilon$$

Δt_{sta}^{sat}

Laufzeitmessung ($c \cdot \Delta t_{sta}^{sat} \sim$ Distanz in Längeneinheiten)

\mathbf{r}_i^{sat}

Satellitenposition im raumfesten System: *Bahnparameter, Koeffizienten des Gravitationsfeldes*

$\mathbf{r}_{e,sta}$

Stationsposition im erdfesten System: *Stationskoordinaten*

\mathbf{R}

Drehmatrix der Erdrotation: *Erdrotationsparameter*

c

Lichtgeschwindigkeit

δt^{sat}

Satellitenuhrfehler

δt_{sta}

Stationsuhrfehler: *Zeittransfer*

$\delta \rho_{trp}$

Troposphärische Verzögerung: *Troposphärenparameter*

$\delta \rho_{ion}$

Ionosphärische Verzögerung: *Ionosphärenparameter*

$\delta \rho_{rel}$

Relativistische Korrektur

ϵ

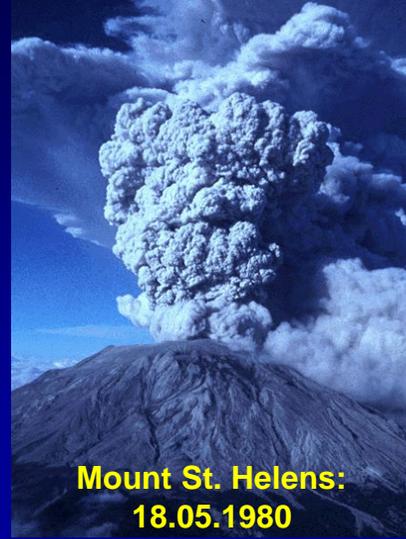
Messfehler

Motivation:
Verstehen wir das System Erde ?
Schnelle und langsame Prozesse ...

Prozesse: Millionen von Jahre, Bruchteile von Sekunden



Erdbeben von Kobe: 17.01.1995



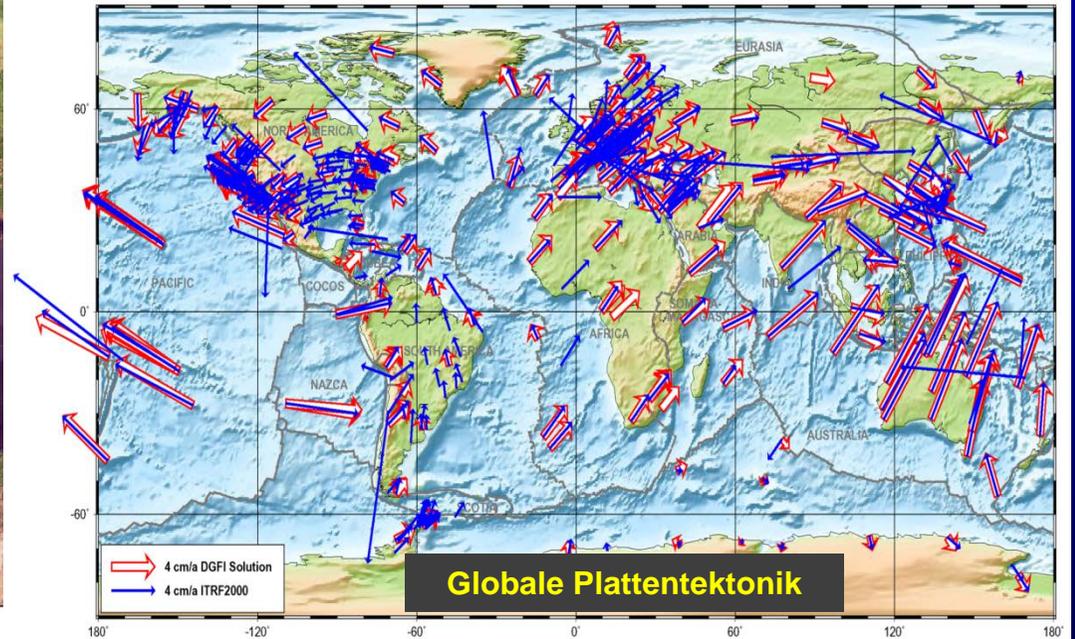
Mount St. Helens:
18.05.1980



Abschmelzen der Eiskappen in Grönland und der Antarktis



Tsunami in Sumatra:
26.12.2004



Auch in der Schweiz ...



**Erdbeben von Basel 1356
(Historienmaler Karl Jauslin)**

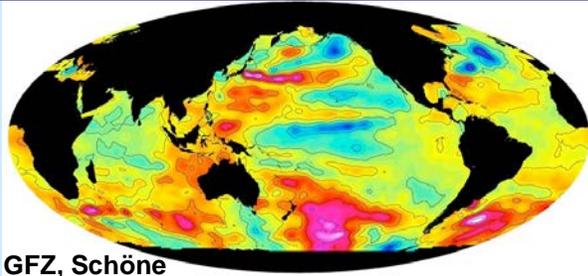
- Auftauen der Permafrostböden
- Abschmelzen der Gletscher

Überschwemmungen in Laufen (BL) von 2005



sf augenzeuge / andre rem

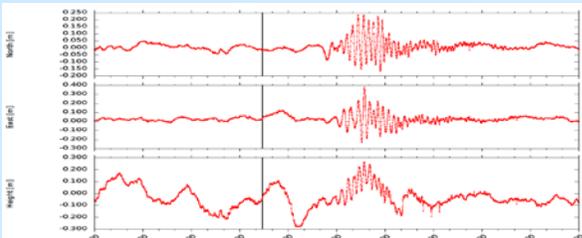
Herausforderungen an das Monitoring des Systems Erde



GFZ, Schöne

Meeresspiegel: Altimetrie

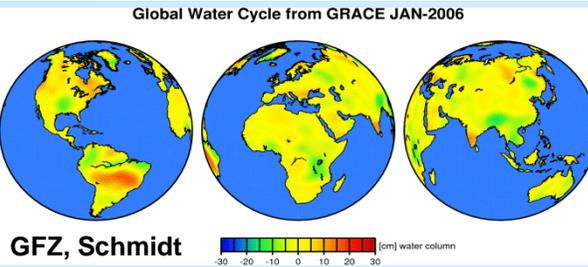
- **Zuverlässige Detektion von kleinsten Langzeittrends:** lange Zeitserien, homogene Reprozessierung von Daten



GFZ, Bartsch

Erdbeben: GPS (Nias)

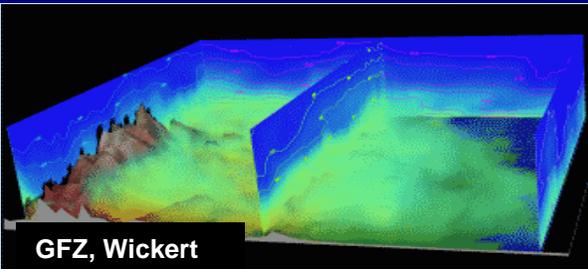
- **Schnelle Reaktion und Quantifizierung von Ereignissen:** Echtzeit Verarbeitung für Frühwarnsysteme (Tsunami, Rutschungen)



GFZ, Schmidt

Wasserzyklus: GRACE

- **Integration und Separation:** Sensor-Kombination; Auftrennung von Signalen / Prozesse mit komplementären Datensätzen



GFZ, Wickert

Wasserdampf: GPS / VLBI

- **Information exploitation:** Portale, riesige Datenbanken, neue Methoden der Visualisierung, Wissensmanagement

Plattentektonik \leftrightarrow Erdbeben

- 1) Plattentektonik
- 2) Überwachung des Dirru- Blockgletschers
- 3) Erdbeben von Tohoku-Oki in Japan (Fukushima)

Geometrie und Deformation der Erde

- Problem und Faszination der Geometrie der Erde:

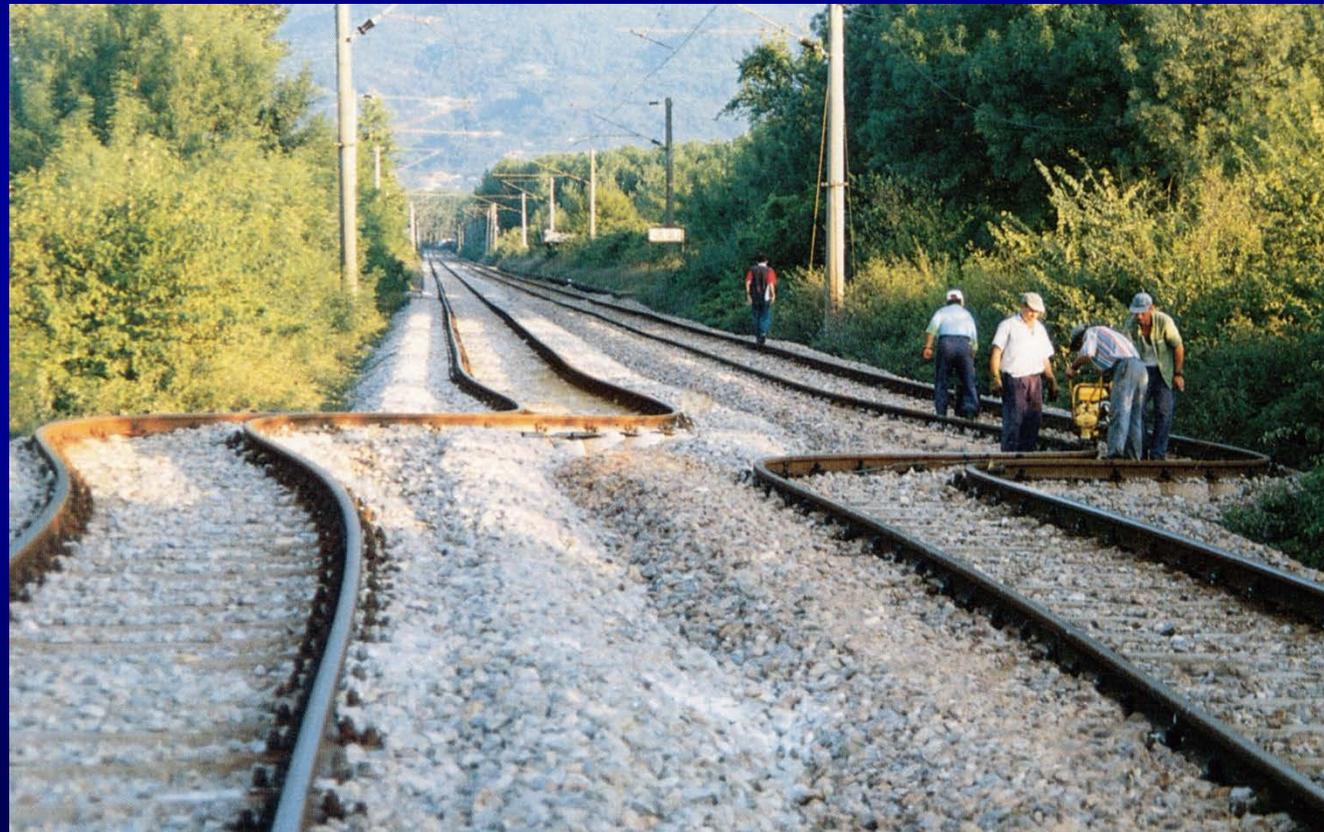
Alles bewegt sich !

- Monitoring heute vor allem mit GPS-Permanentnetzen

- Beispiele:

- Plattenbewegung
- Feste Erdzeiten (durch Sonne und Mond verursacht)
- Auflast-Phänomene (Eis, Ozean, Atmosphäre)
- Erdbeben ...

- **Kontinuierliche Langzeitüberwachung unabdingbar**

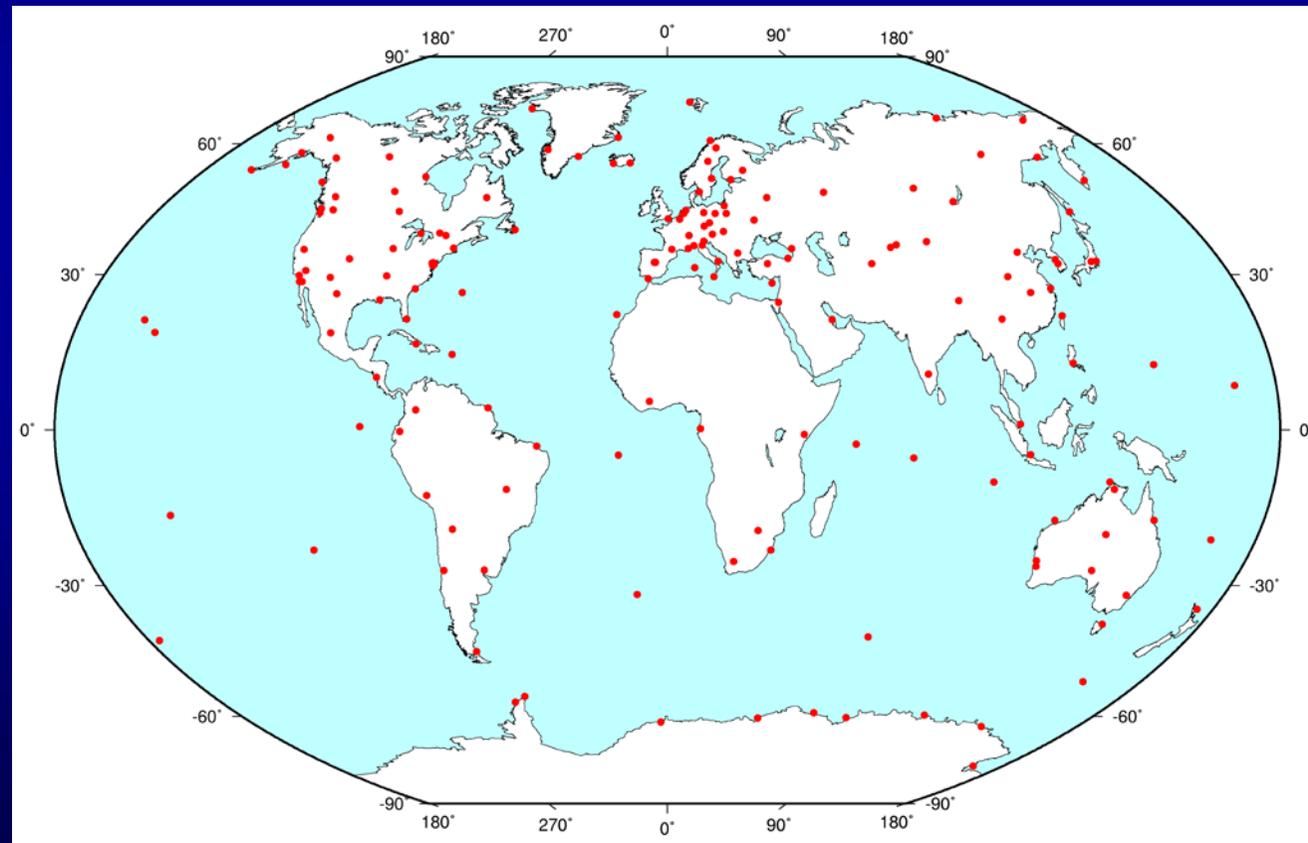


Langsame Prozesse: Analyse der globalen GPS-Daten

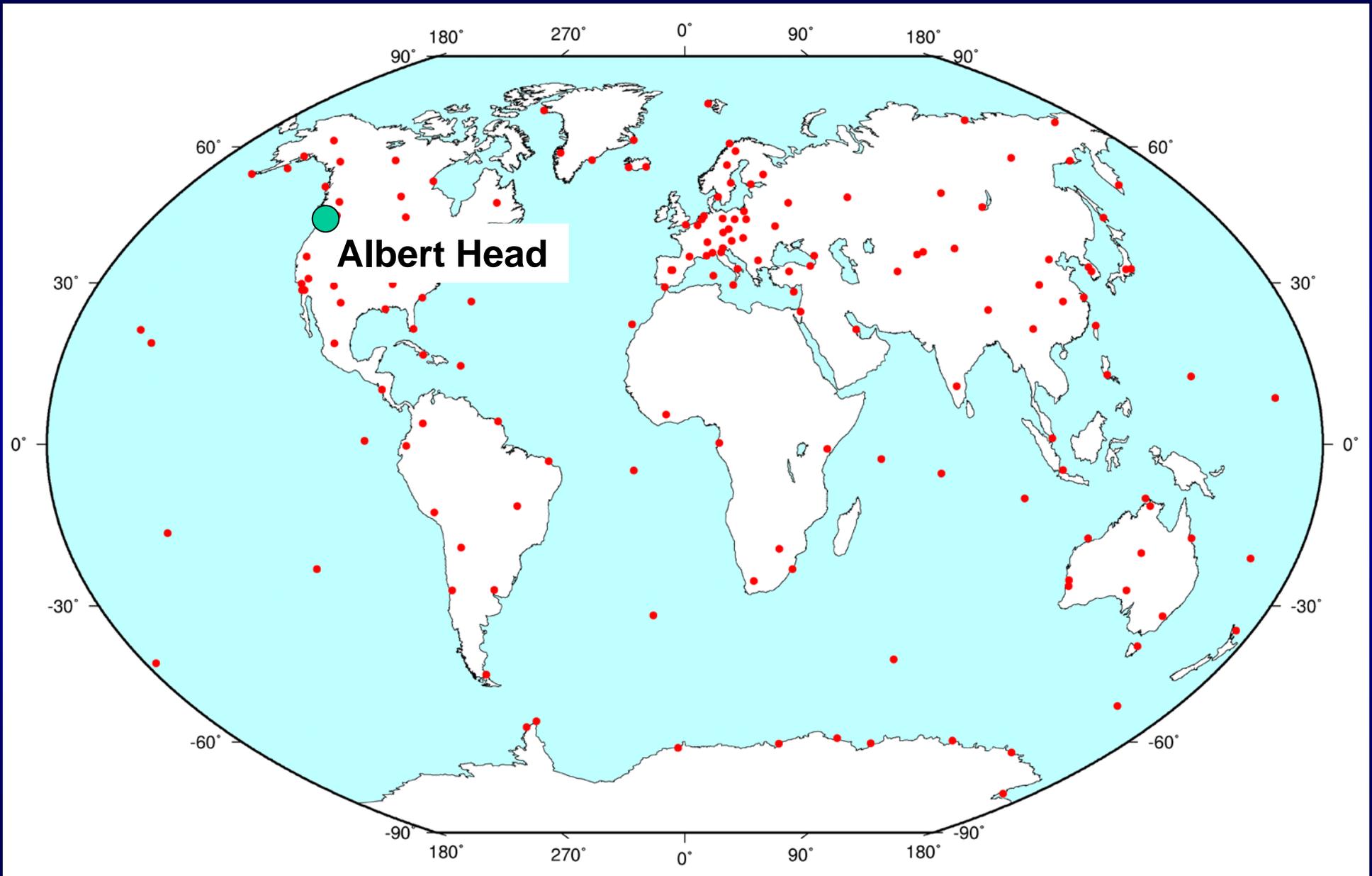
- 11 Jahre Daten: 1994 – 2005; globales Netz von 200 Stationen
- 3500 Parameter und 500'000 Beobachtungen pro Tag
- Verarbeitung in 1 Woche CPU-Zeit: LINUX-Cluster mit 32 Knoten
- Kooperation mit der TU Dresden, Institut für Planetare Geodäsie

Resultat:

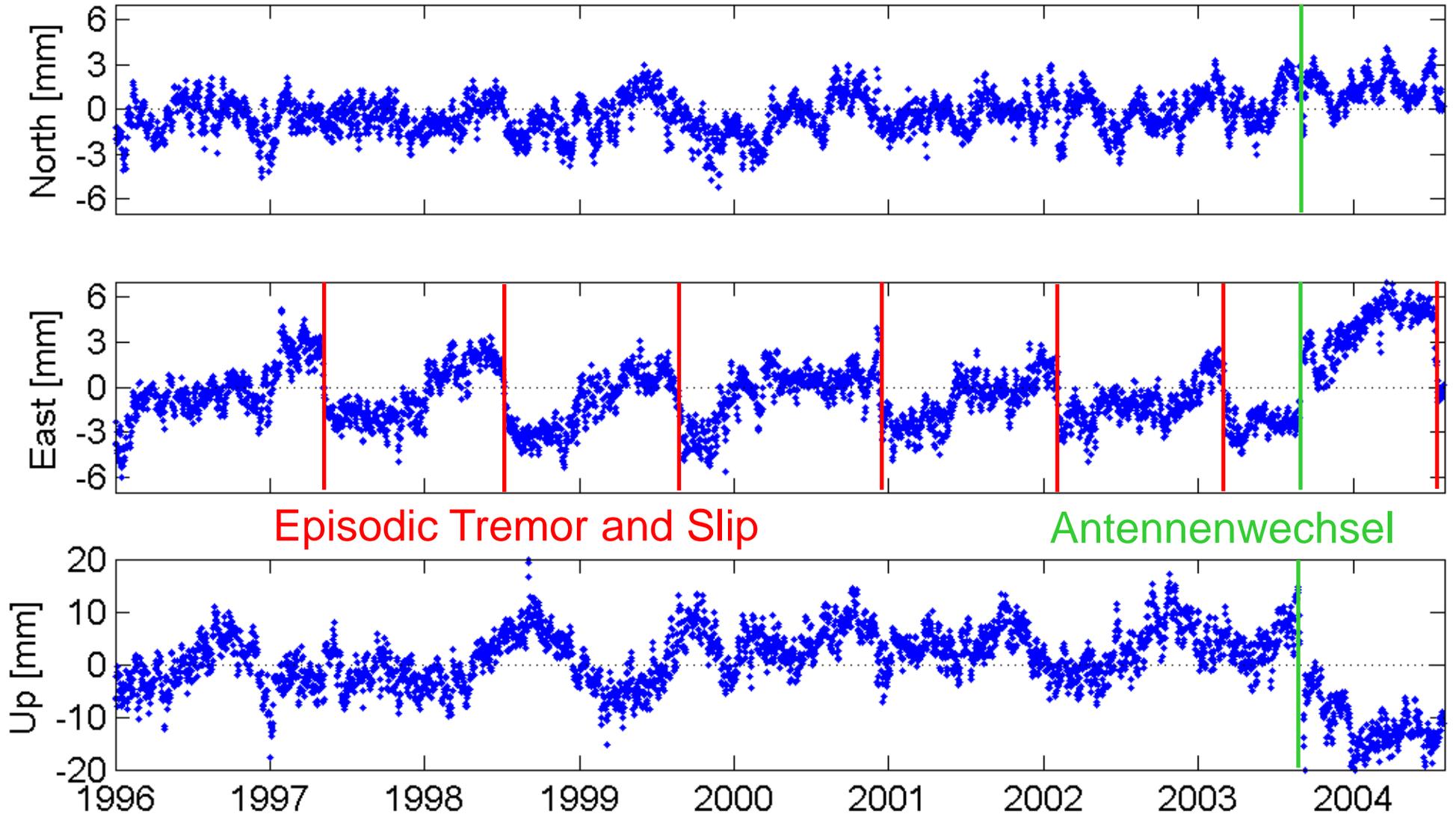
Zeitreihen von Stationskoordinaten mit grosser Homogenität und Genauigkeit



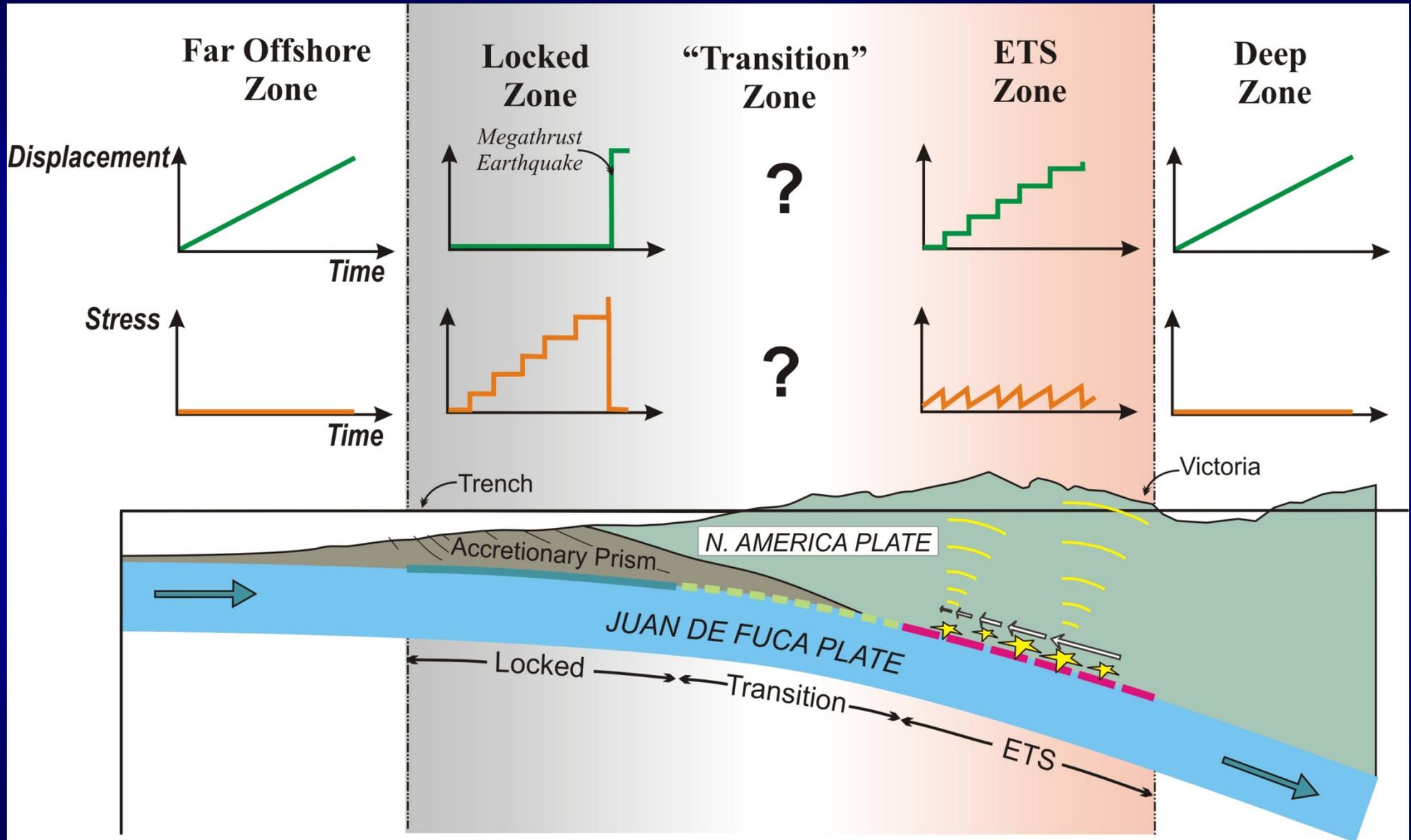
Globales GPS-Netz (Permanentstationen)



Station Albert Head (Kanada)



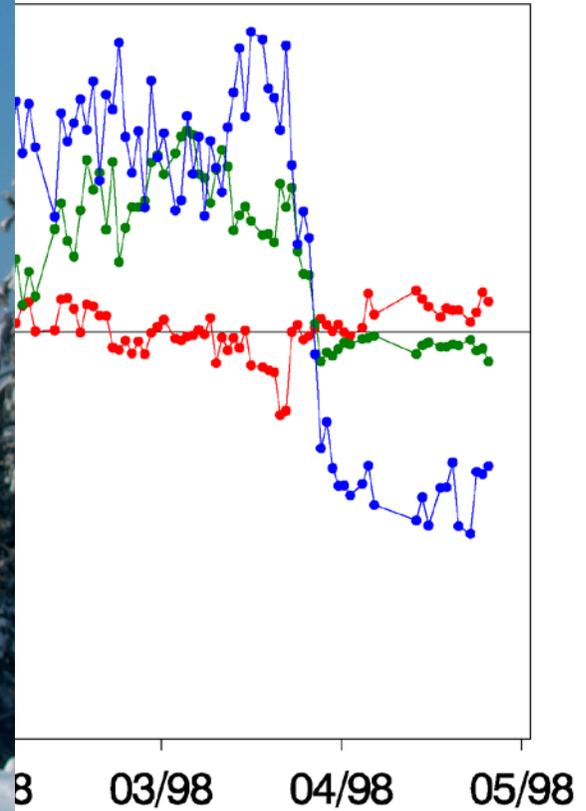
Episodic Tremor & Slip (ETS)



Station Sodankyla in Finnland

Globale Koordinaten aus GPS – Lösungen
Station Sodankyla (Finnland)

Schnee auf der Antenne



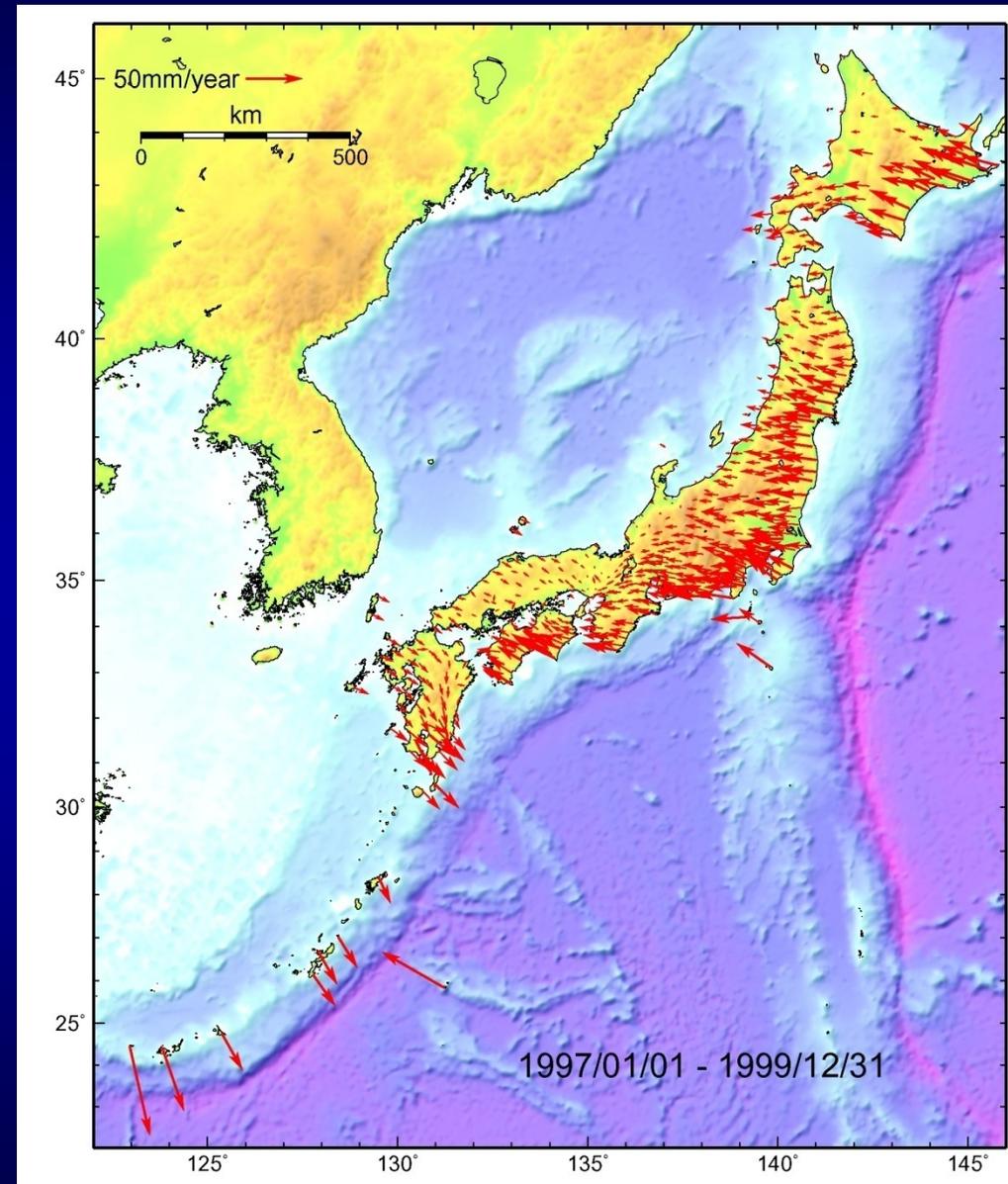
Breite

Länge

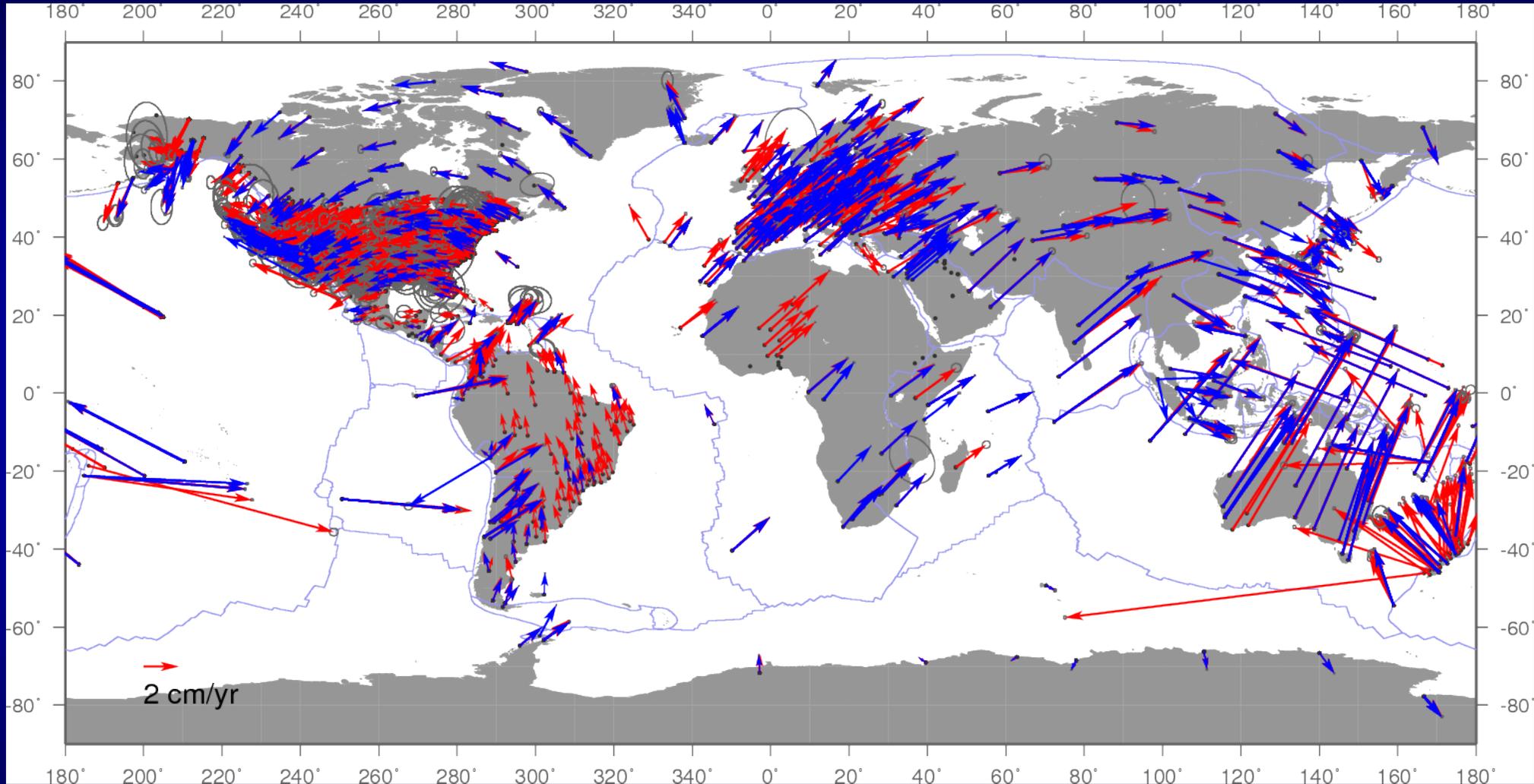
Höhe

Langzeit-Trends (Plattentektonik): GPS-Netz in Japan

- Dichtes Netz mit ca. 1600 GPS-Stationen
- Erdbebenforschung, Meteorologie, Klimatologie
- 24 CPUs, Installation der Bernese GPS Software in 1996
- Processing von 23'000'000 GPS-Observationen pro Tag
- Schätzen von 3600 Stationskoordinaten, 7200 Troposphärenkorrekturen, 84'000 andere Parameter



Das globale Bild: Geschwindigkeitsfeld und Plattentektonik



Globales Netz

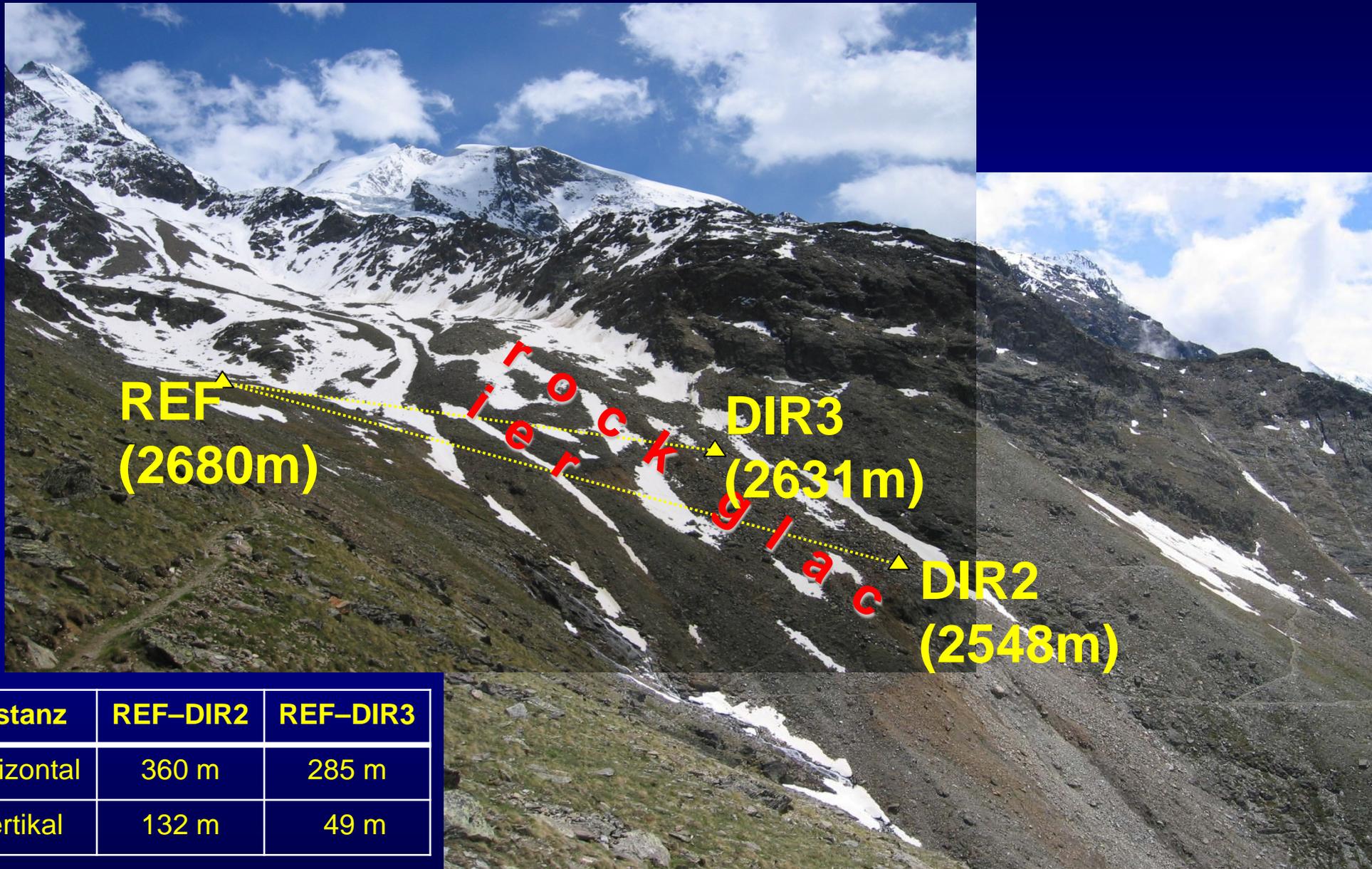
GPS-Regionalnetze

Bruyninx et al., 2011, IAG WG on
Regional Dense Velocity Fields

Plattentektonik \leftrightarrow Erdbeben

- 1) Plattentektonik
- 2) Überwachung des Dirru- Blockgletschers
- 3) Erdbeben von Tohoku-Oki in Japan (Fukushima)

GPS-Netz auf dem Dirru-Blockgletscher im Mattertal

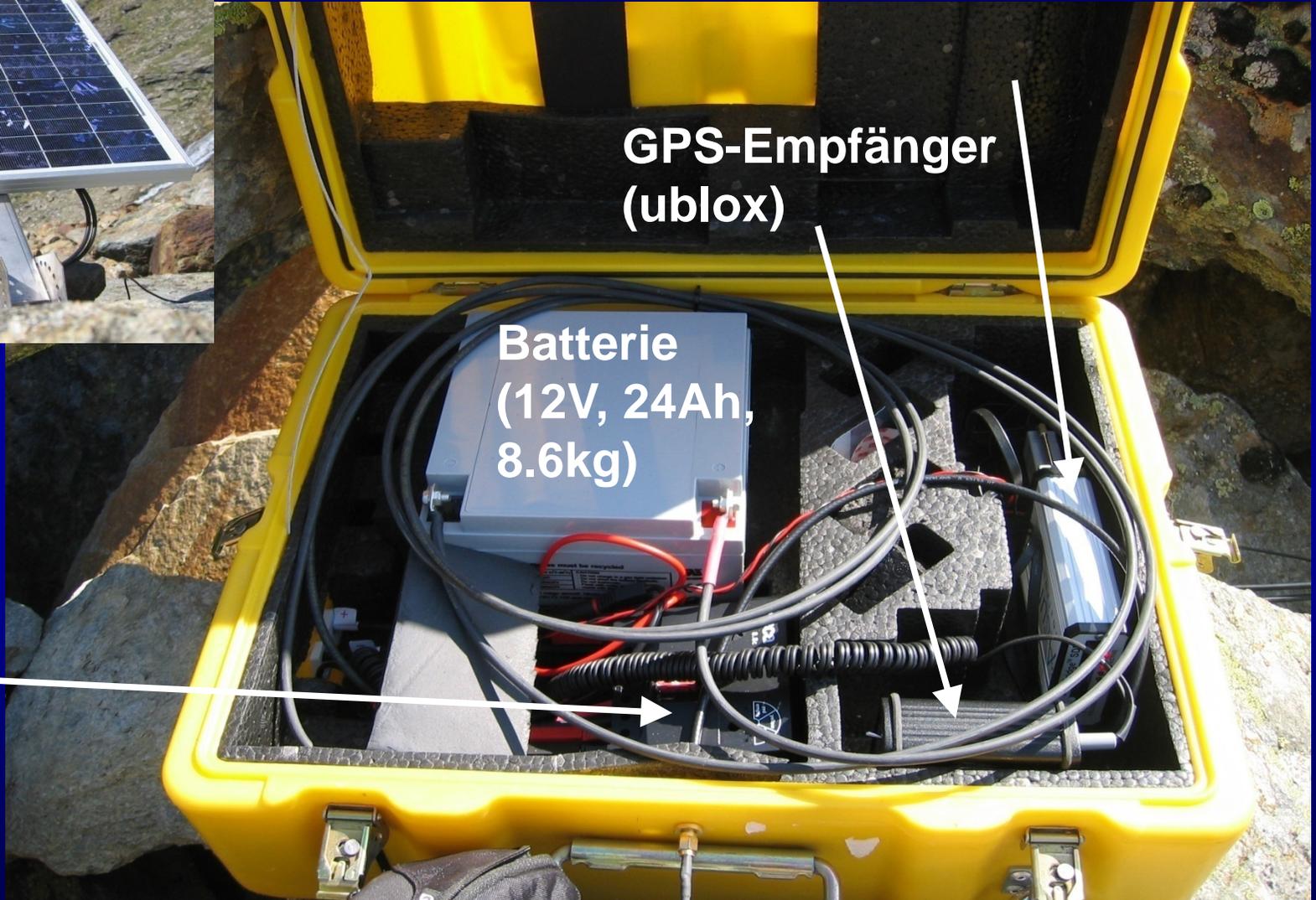


Dichte Netze mit günstigen GPS L1-Empfänger (~ 2000 CHF)



Solar-Fläche
(24W, 12V,
50x50cm)

Batterie-
Ladekontrolle
(max 8A)



Data logger

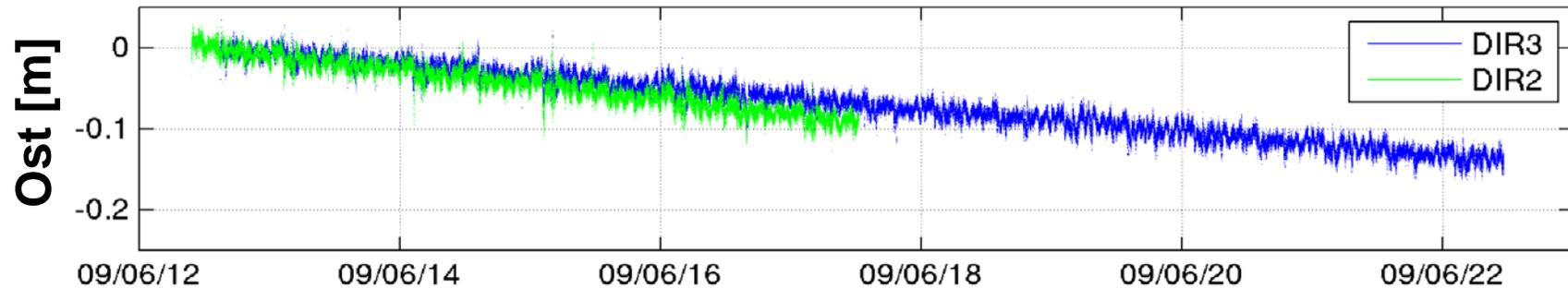
GPS-Empfänger
(ublox)

Batterie
(12V, 24Ah,
8.6kg)

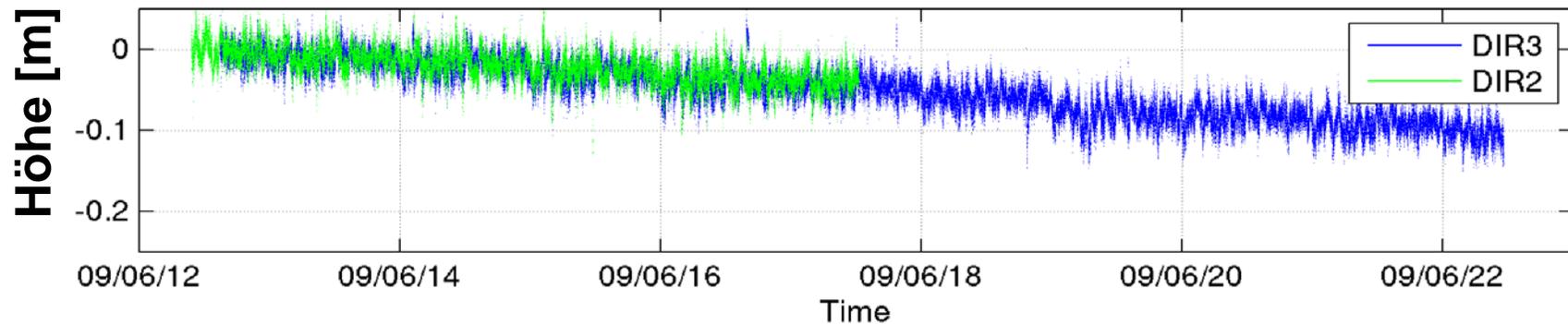
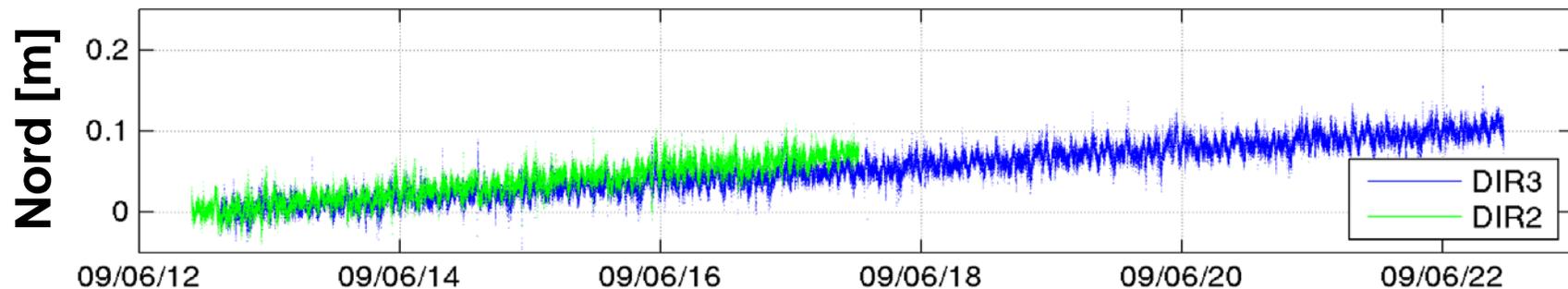
Spitze des Dirru Blockgletschers



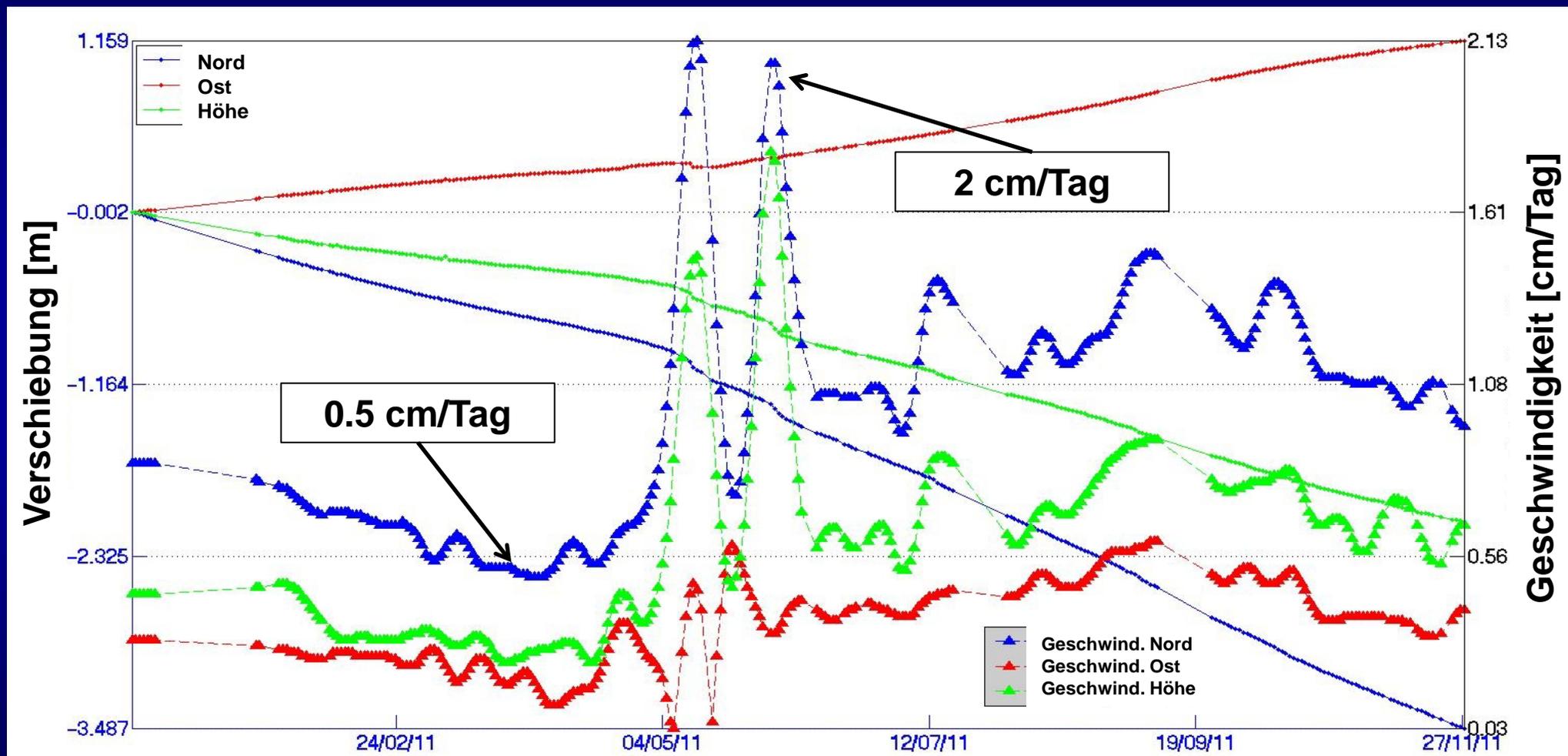
GPS-Überwachung: Bewegung im 5-Sekunden-Takt



Verschiebung ca. 3 cm pro Tag



Verschiebungen und Geschwindigkeiten einer GPS-Station über etwa ein Jahr



→ deutlich grössere Geschwindigkeiten nach Regen

Blockgletscher – Bewegungsanalyse mit Kamera



Sich bewegende
Gesteinsmasse (rot)



- Hochauflösende Kamera in wetterfester Box
- Übertragungsantenne
- GPS zur Positionsüberwachung

Blockgletscher – Bewegungsanalyse mit Kamera

08-Oct-2012

@X-Sense-GGL-IGP-ETHZ,2013

Fabian Neyer



**Vergleich
zweier
Aufnahmen**

**Zeitperiode
zwischen den
Aufnahmen:
288 Tage**

Blockgletscher – Bewegungsanalyse mit Kamera



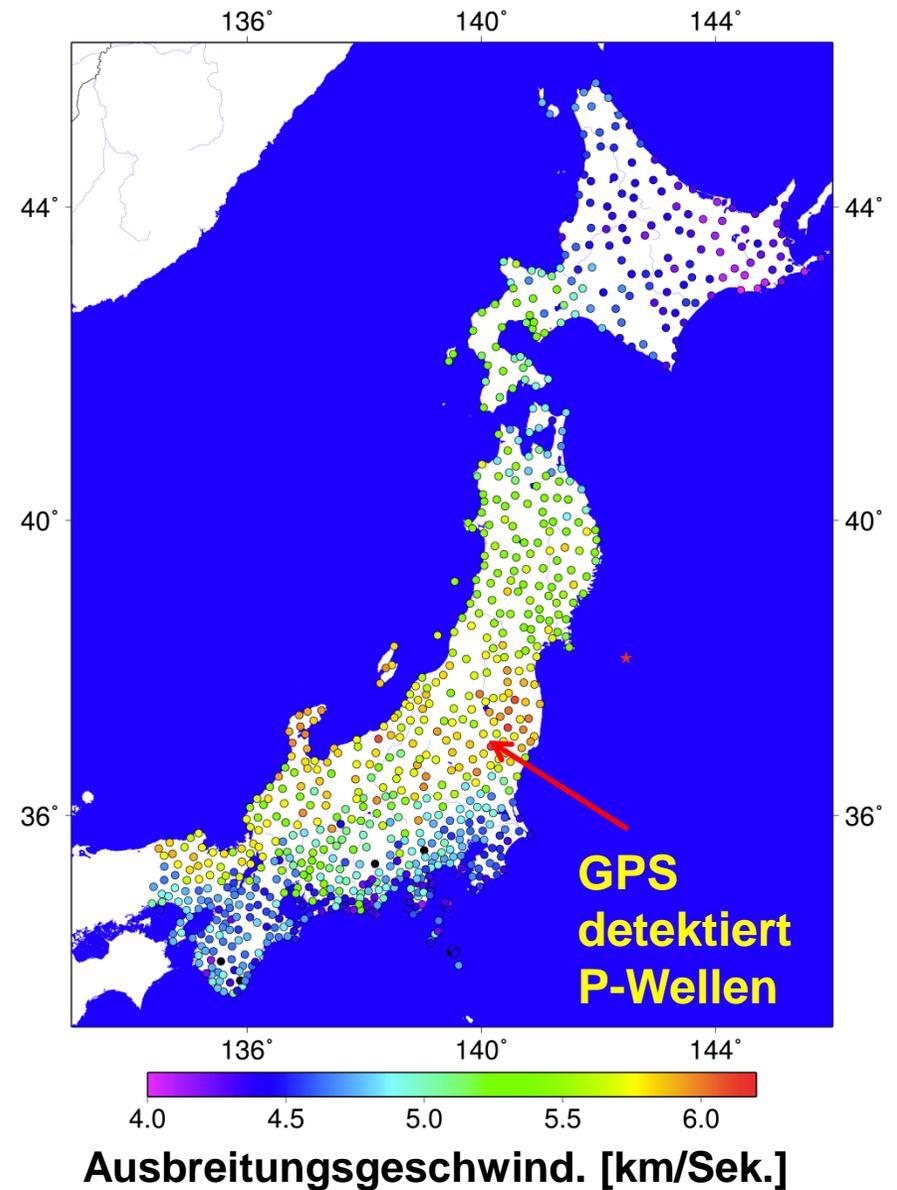
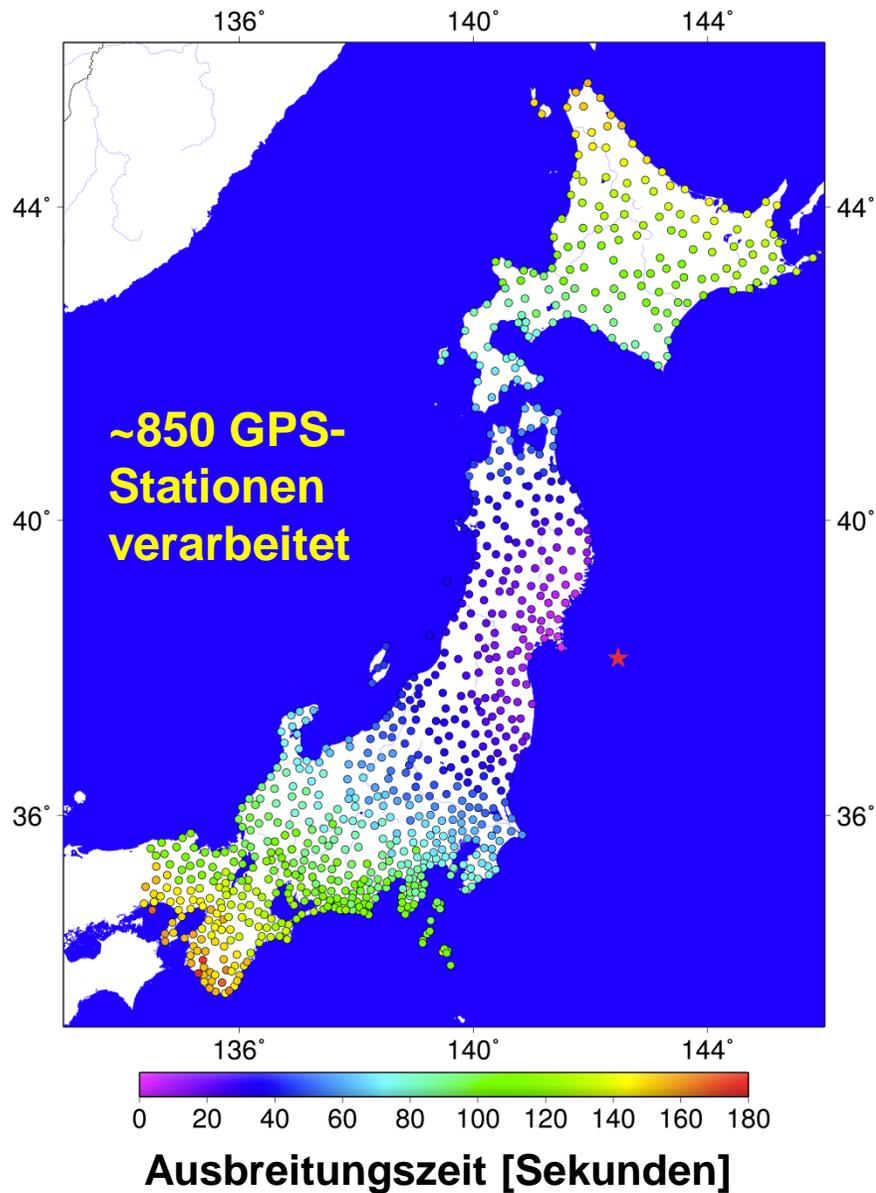
**Bestimmung der
Geschwindig-
keiten**

**Verschiebungen
bis 0.8m wurden
extrahiert**

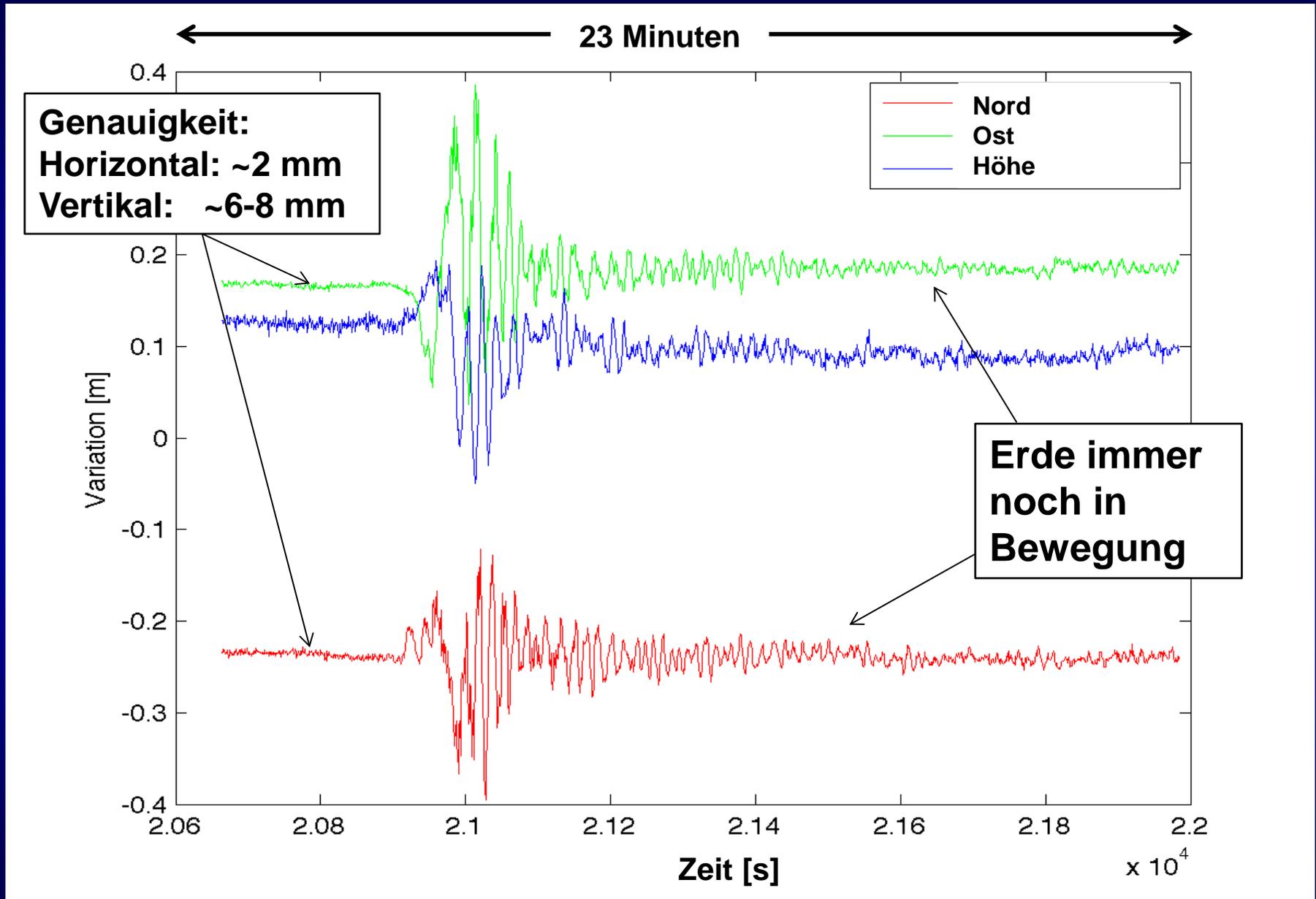
Plattentektonik \leftrightarrow Erdbeben

- 1) Plattentektonik
- 2) Überwachung des Dirru- Blockgletschers
- 3) Erdbeben von Tohoku-Oki in Japan (Fukushima)

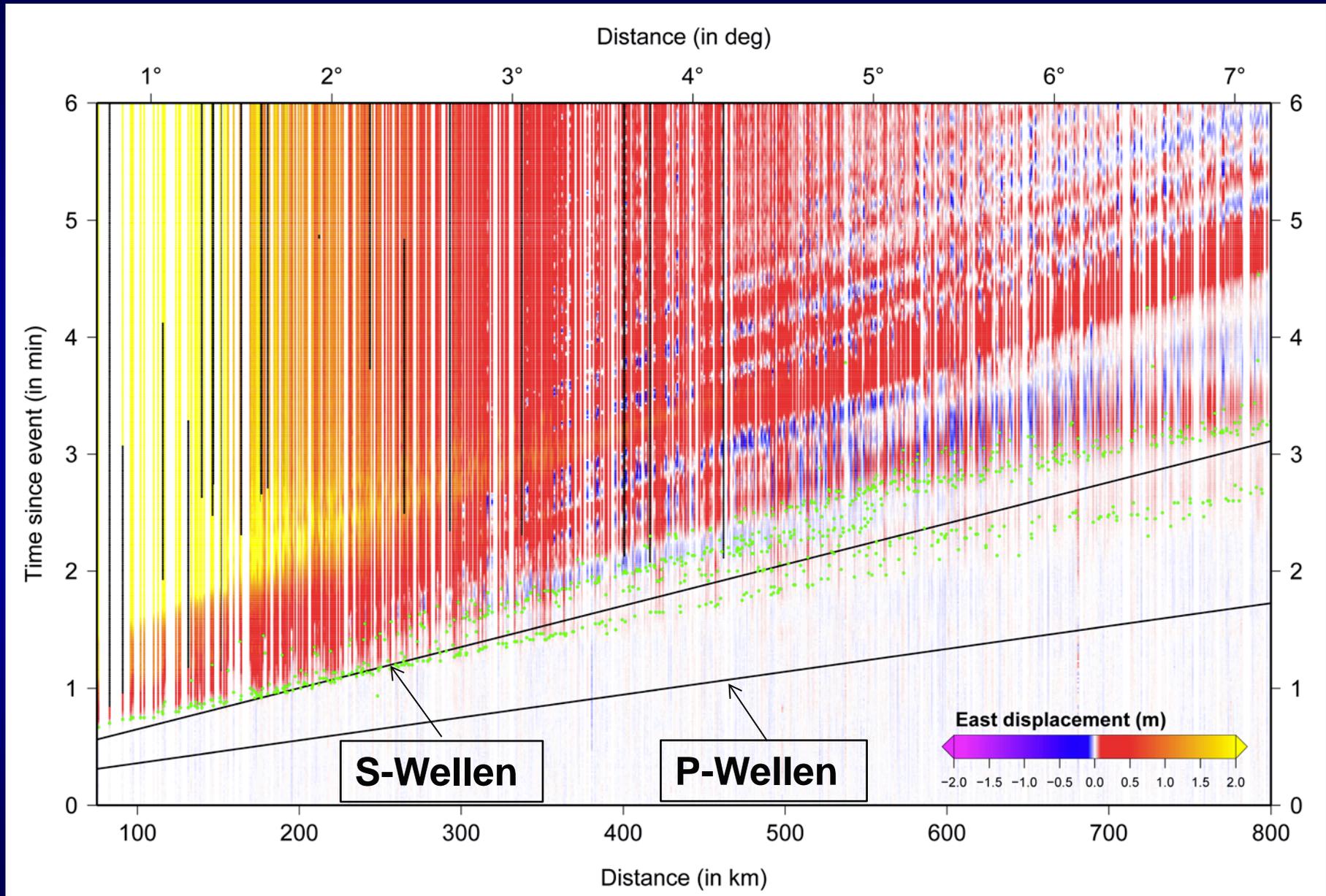
Tohoku-Oki Erdbeben: Wellenausbreitung aus GPS-Daten



Beispiel: aus GPS bestimmte Erdbeben-Bewegungen

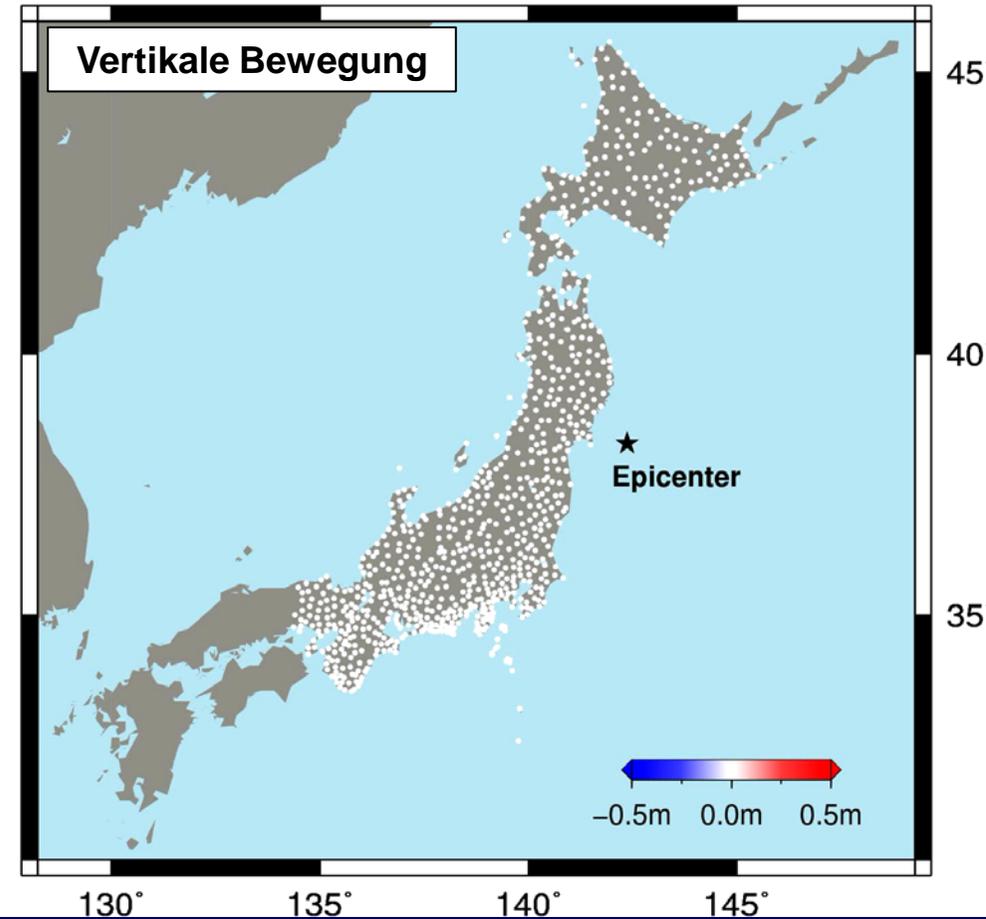
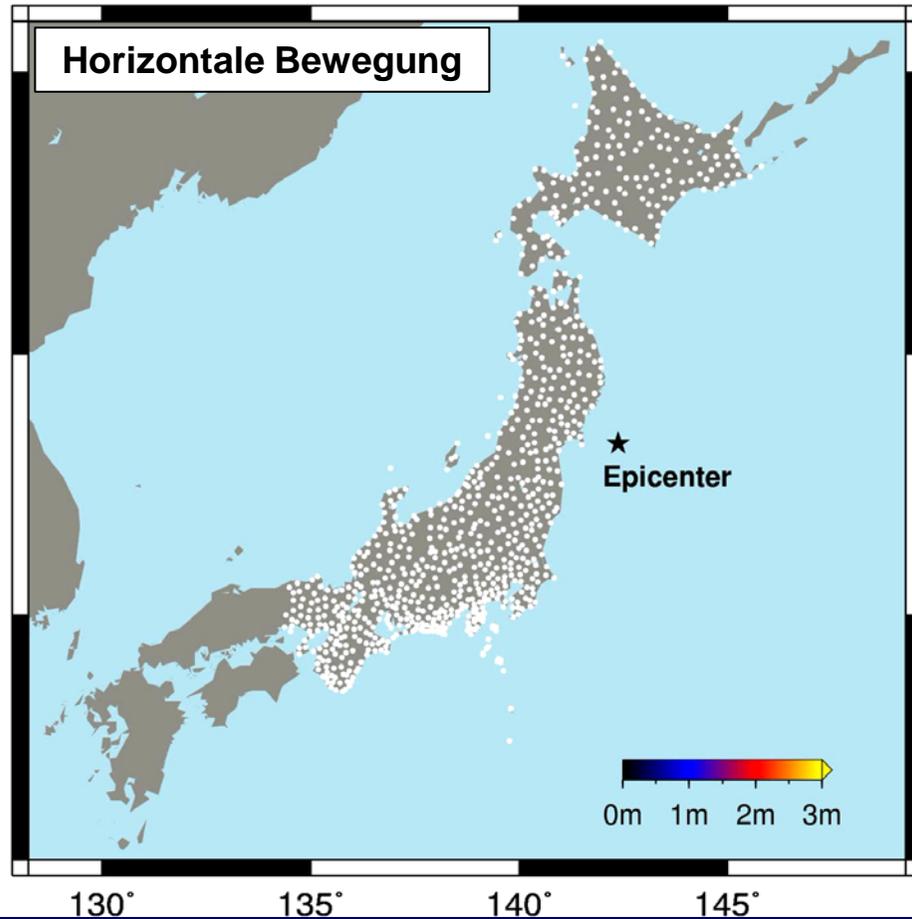


Tohoku-Oki Erdbeben: Verschiebung in Ost-Richtung



Erfassen der Erdbebenwellen und Verschiebungen mit GPS

Time since earthquake: 00 m 00 s

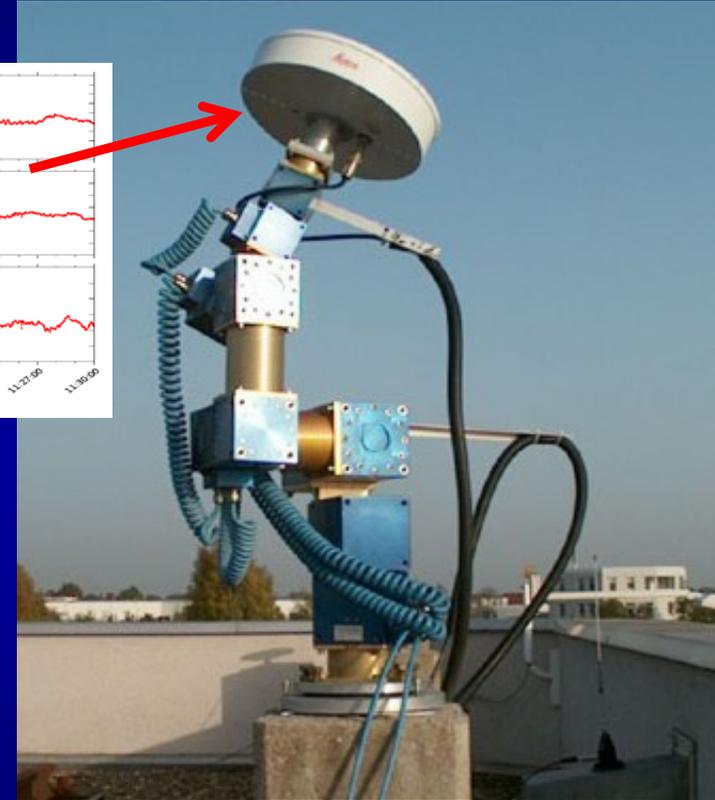
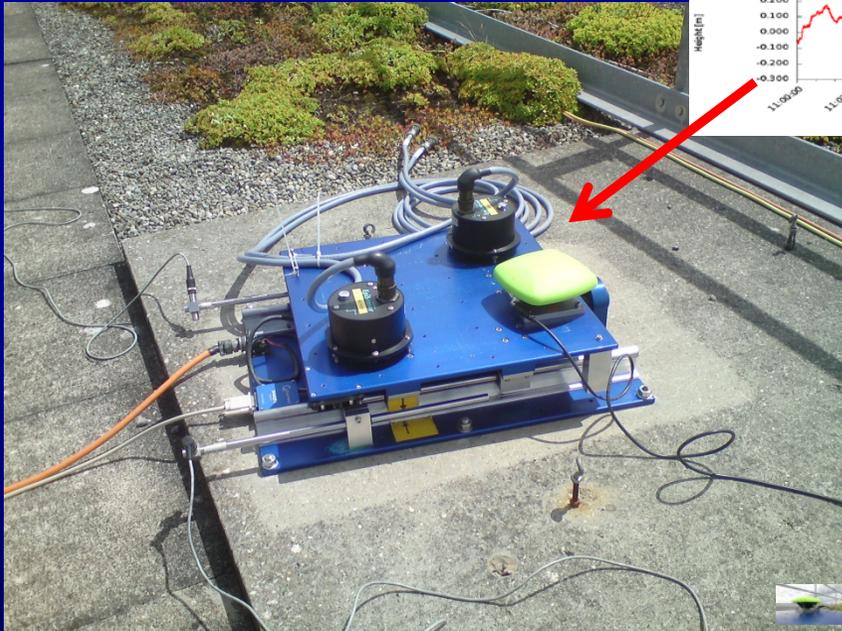
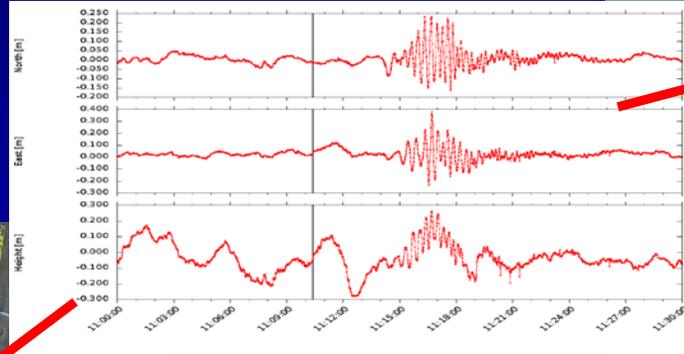


GPS 1-Sekunden-Messungen des Tohoku-Oki Erdbebens

Validierung der GPS-Seismologie: Erdbebensimulation



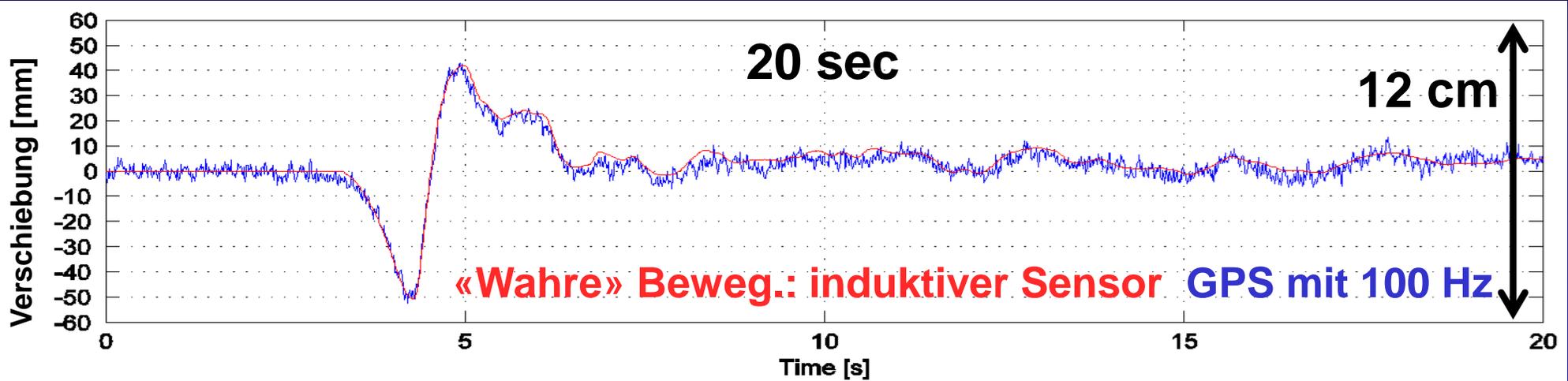
3 Javad-Empfänger und Antenne:
GPS, GLONASS, GALILEO; 100Hz



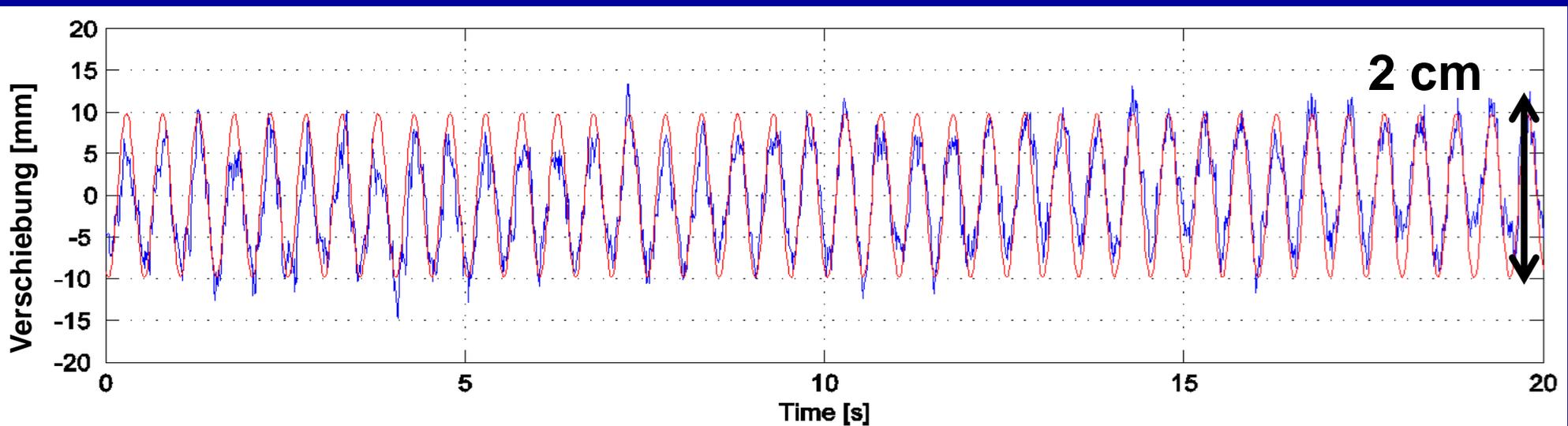
Rütteltisch für 1-D Erdbebensimulation

Roboter für 3-D
Erdbeben-Bewegungen

Rütteltisch- Resultate: 100 Hz Messungen



Realistisches Erdbeben, $M = 6.0$, in der Schweiz



Schwingung mit 2 Hz, 1 cm Amplitude

→ mit Seismologen

Klima \leftrightarrow Wettervorhersage

- 1) Troposphäre: Wasserdampfbestimmung aus GPS
- 2) Ionosphäre: Elektronendichte aus GPS
- 3) Atmosphäre/Ozeane: Einfluss auf die Erdrotation

Beobachtungsgleichung für GNSS

$$c \cdot \Delta t_{sta}^{sat} = |\mathbf{r}_i^{sat} - \mathbf{R} \cdot \mathbf{r}_{e,sta}| + c \cdot \delta t^{sat} - c \cdot \delta t_{sta} + \delta \rho_{trp} + \delta \rho_{ion} + \delta \rho_{rel} + \dots + \epsilon$$

| | |
|------------------------|---|
| Δt_{sta}^{sat} | Laufzeitmessung ($c \cdot \Delta t_{sta}^{sat} \sim$ Distanz in Längeneinheiten) |
| \mathbf{r}_i^{sat} | Satellitenposition im raumfesten System: <i>Bahnparameter, Koeffizienten des Gravitationsfeldes</i> |
| $\mathbf{r}_{e,sta}$ | Stationsposition im erdfesten System: <i>Stationskoordinaten</i> |
| \mathbf{R} | Drehmatrix der Erdrotation: <i>Erdrotationsparameter</i> |
| c | Lichtgeschwindigkeit |
| δt^{sat} | Satellitenuhrfehler |
| δt_{sta} | Stationsuhrfehler: <i>Zeittransfer</i> |
| $\delta \rho_{trp}$ | Troposphärische Verzögerung: <i>Troposphärenparameter</i> |
| $\delta \rho_{ion}$ | Ionosphärische Verzögerung: <i>Ionosphärenparameter</i> |
| $\delta \rho_{rel}$ | Relativistische Korrektur |
| ϵ | Messfehler |

Monitoring der Atmosphäre

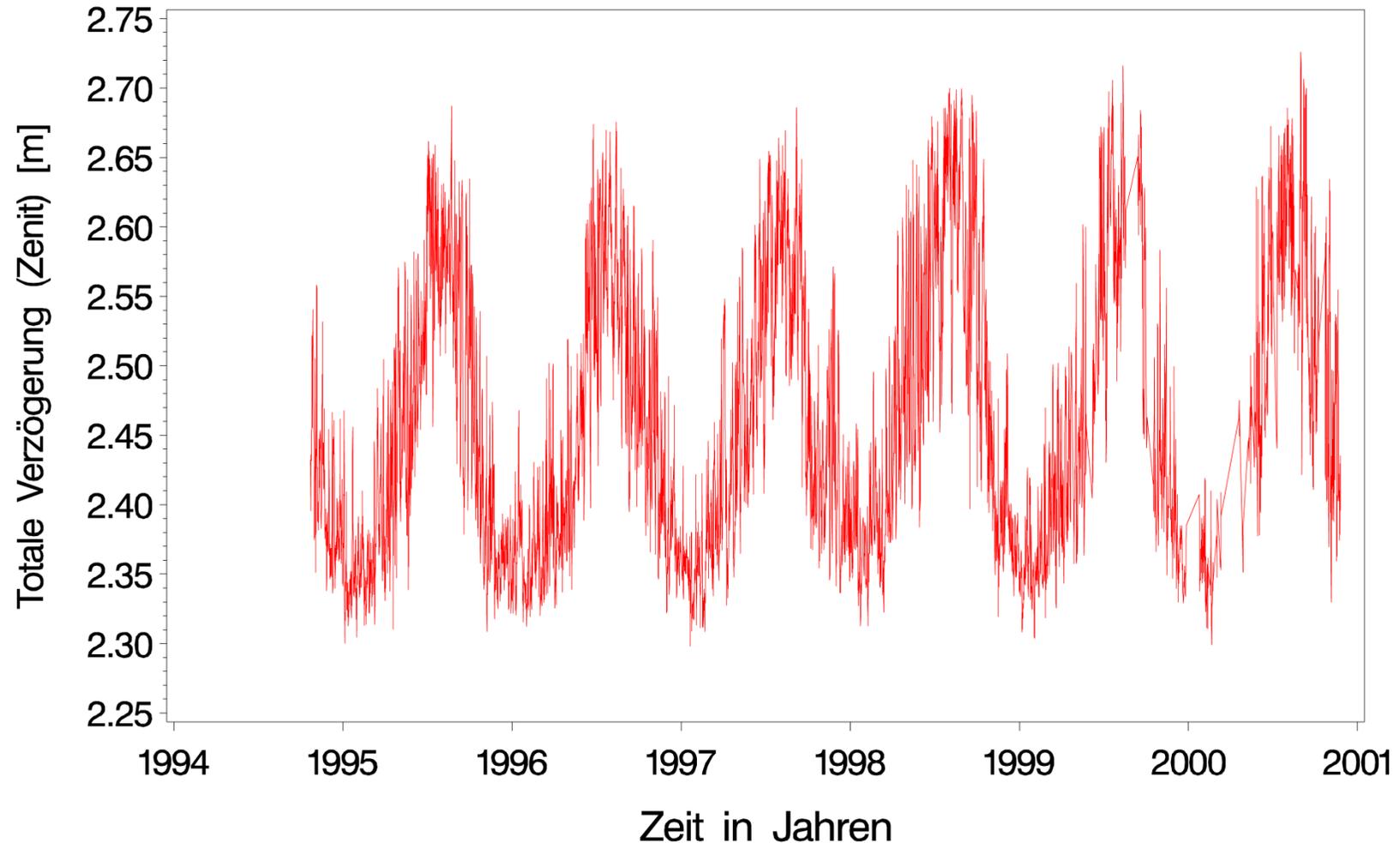
- **Zwei Bereiche der Atmosphäre verzögern die Ausbreitung von Mikrowellensignalen (GPS, VLBI, DORIS):**
 - **Troposphäre (neutrale Atmosphäre): Ausdehnung bis 10 km Höhe. Die Verzögerung der Mikrowellen ist nicht dispersiv, d.h. frequenzunabhängig. Verzögerung ca. 2.4 m (8 ns) im Zenit.**
 - **Ionosphäre erstreckt sich von etwa 50-1000 km Höhe (CHAMP fliegt in der Ionosphäre (ca. 400 km). Verzögerung ca. 1-20 m (3-60 ns). Die Ionosphäre ist dispersiv, d.h. die Signale der zwei Frequenzen bei GPS, DORIS oder VLBI werden unterschiedlich verzögert:**

$$\delta\rho_{ion} = -\frac{a}{f^2} E$$

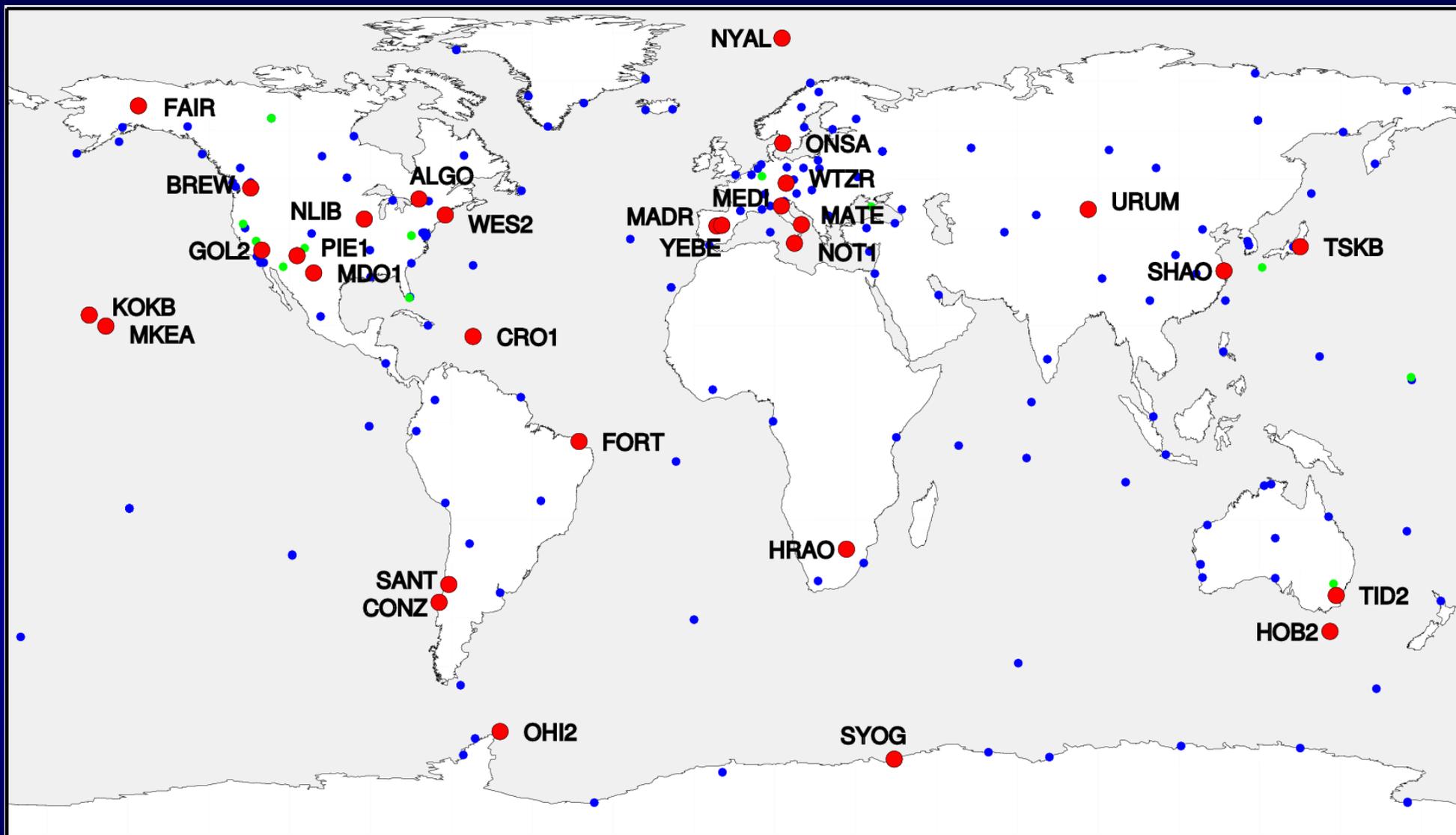
- **Elektronendichte E (in TECU), Frequenz f und Konstante a**
- **Monitoring beider Bereiche mit geodätischen Weltraumverfahren mit Bodenstationen und Satelliten (Okkultationen): Wasserdampf und Elektronendichte**

Troposphärenverzögerung aus GPS-Daten bestimmt

Totale Troposphärenverzögerung für Tsukuba (Japan)
aus globalen GPS-Lösungen von CODE



Langzeit Wasserdampf aus dem GPS-Stationsnetz



GPS Stations

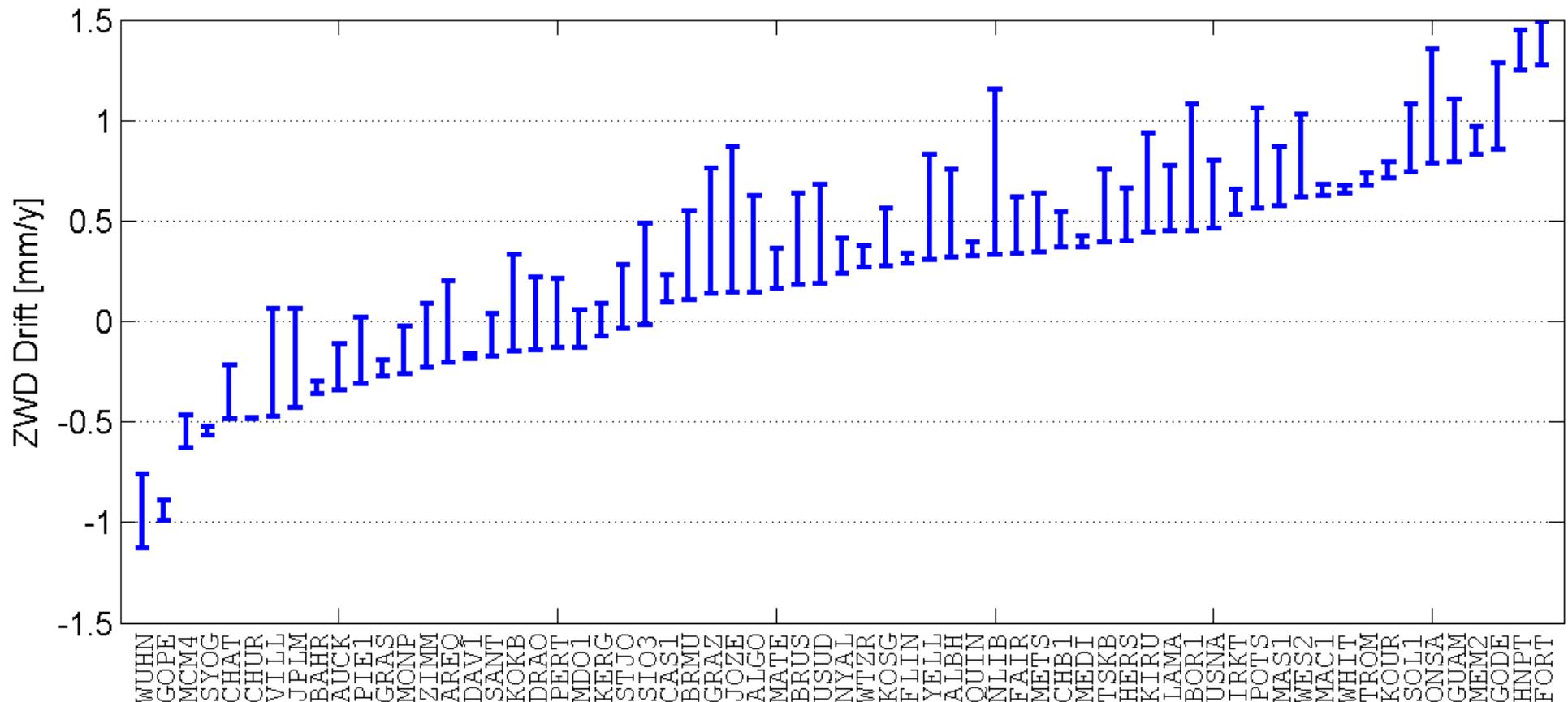
VLBI Stations

GPS/VLBI Co-locations

Globale Erwärmung ?

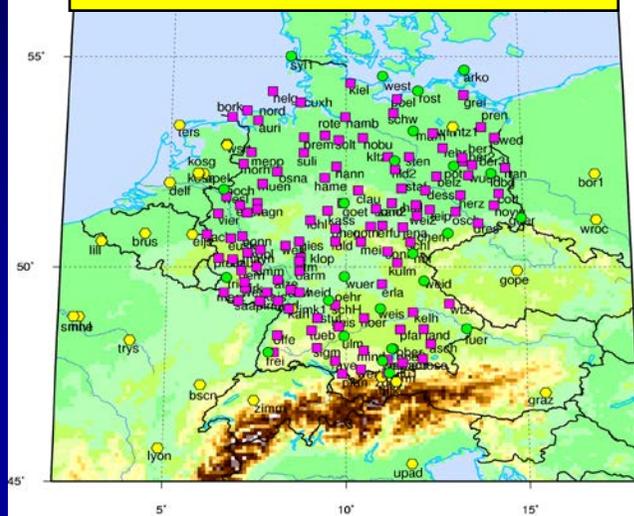
Stabilität der Langzeit-Trends in der Troposphäre

Drift-Bestimmung mit verschiedenen Zeitintervallen für GPS-Stationen mit $N_{ZD} > 40,000$



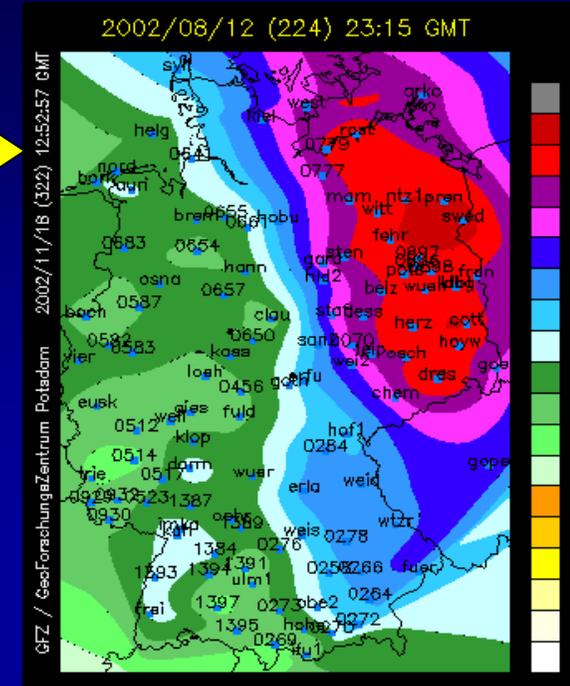
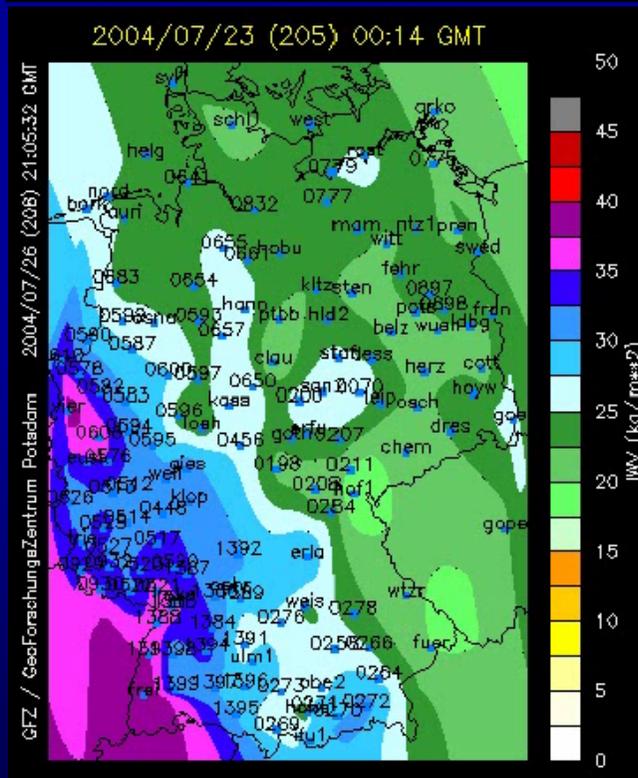
Schnelle Wasserdampfbestimmung mit GPS

Deutsches GPS-Netz



Wasserdampfverteilung zur Zeit des Elbe-Hochwassers im August 2002

Wetterfronten



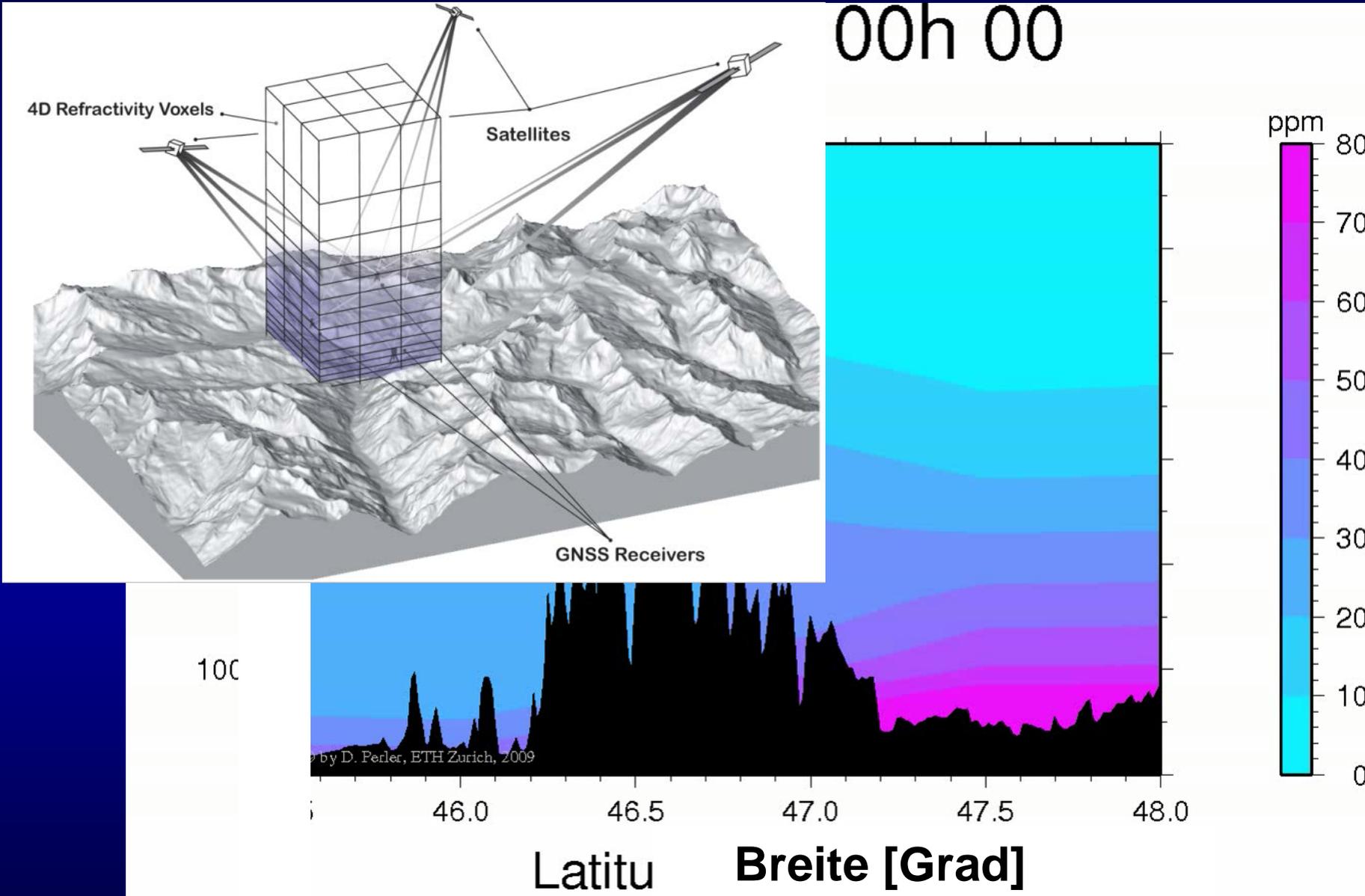
Wasserdampf über der Station aus den GPS-Signalverzögerungen:

- 250 Stationen
- Resultat nach 40 min
- Assimilation für Wettervorhersage

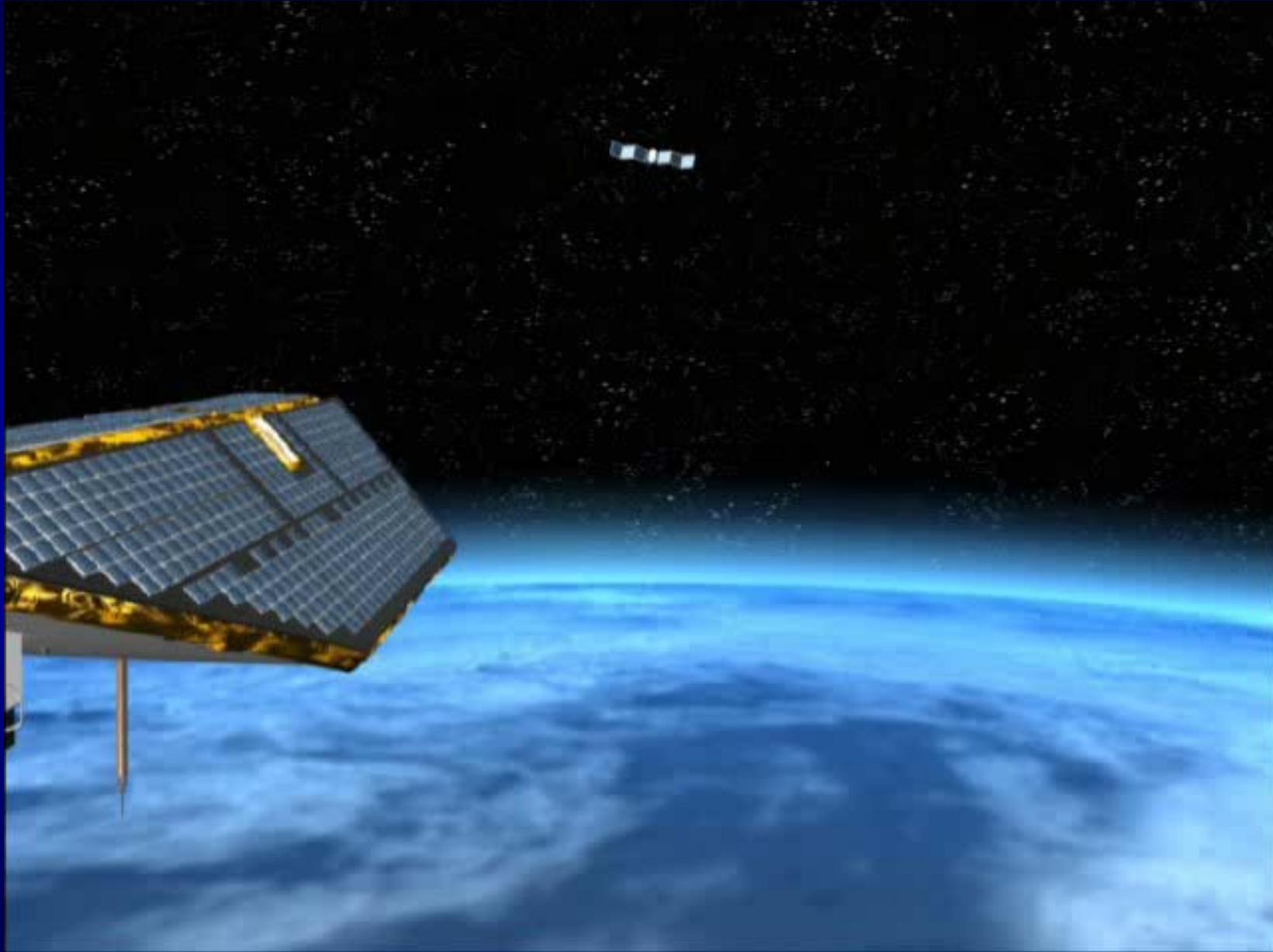
Wettervorhersage



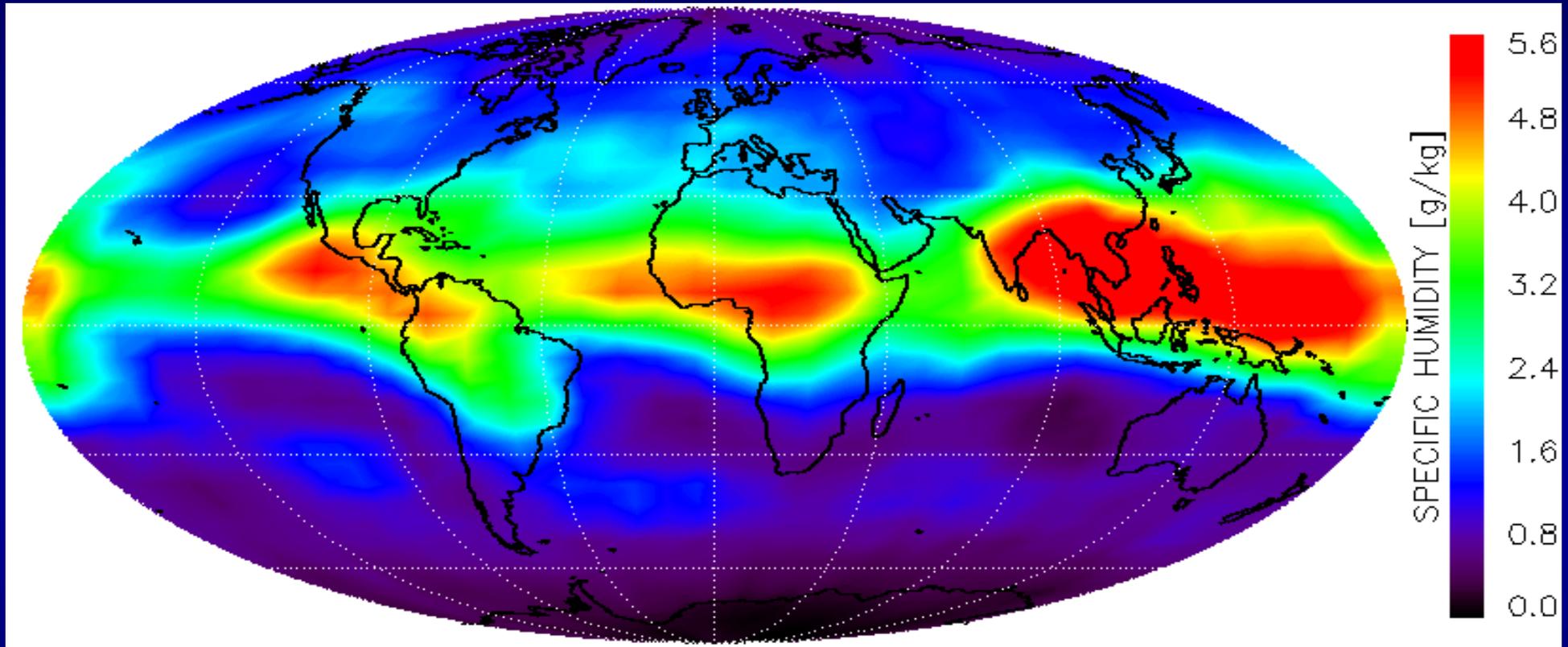
Wasserdampftomographie mit GPS



Atmosphäre: GPS-Okkultationsmessungen mit CHAMP

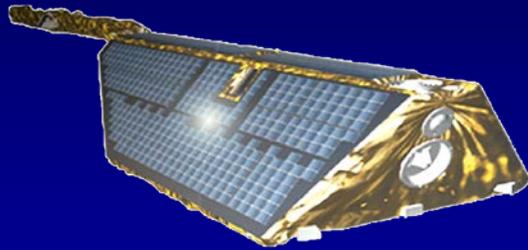


Globale Wasserdampfverteilung: CHAMP und GRACE

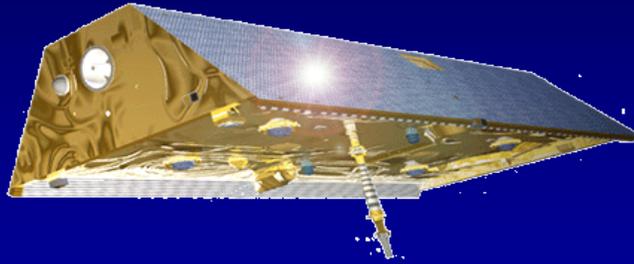


**Mittlere Wasserdampfverteilung in 4 km Höhe
aus CHAMP- und GRACE-Daten (September 2006)**

Satelliten mit GPS-Okkultationsmessungen



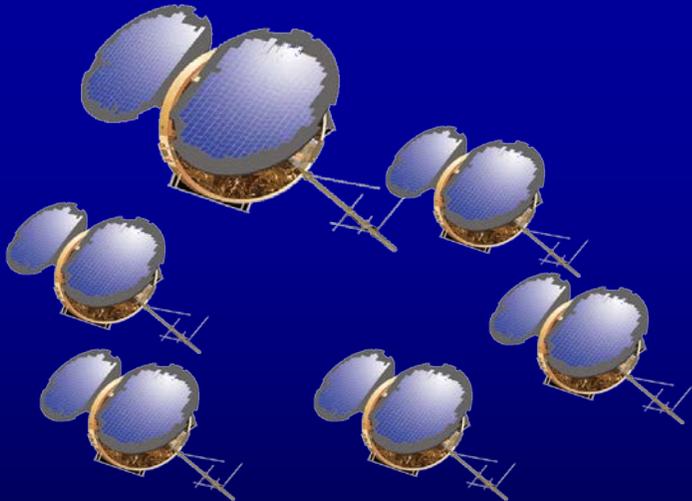
CHAMP (since 2000)



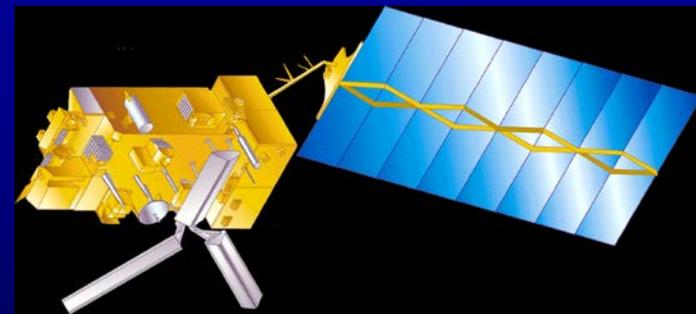
GRACE (since 2002)



**TerraSAR-X (since 2006)
Tandem-X (Plan 2009)**



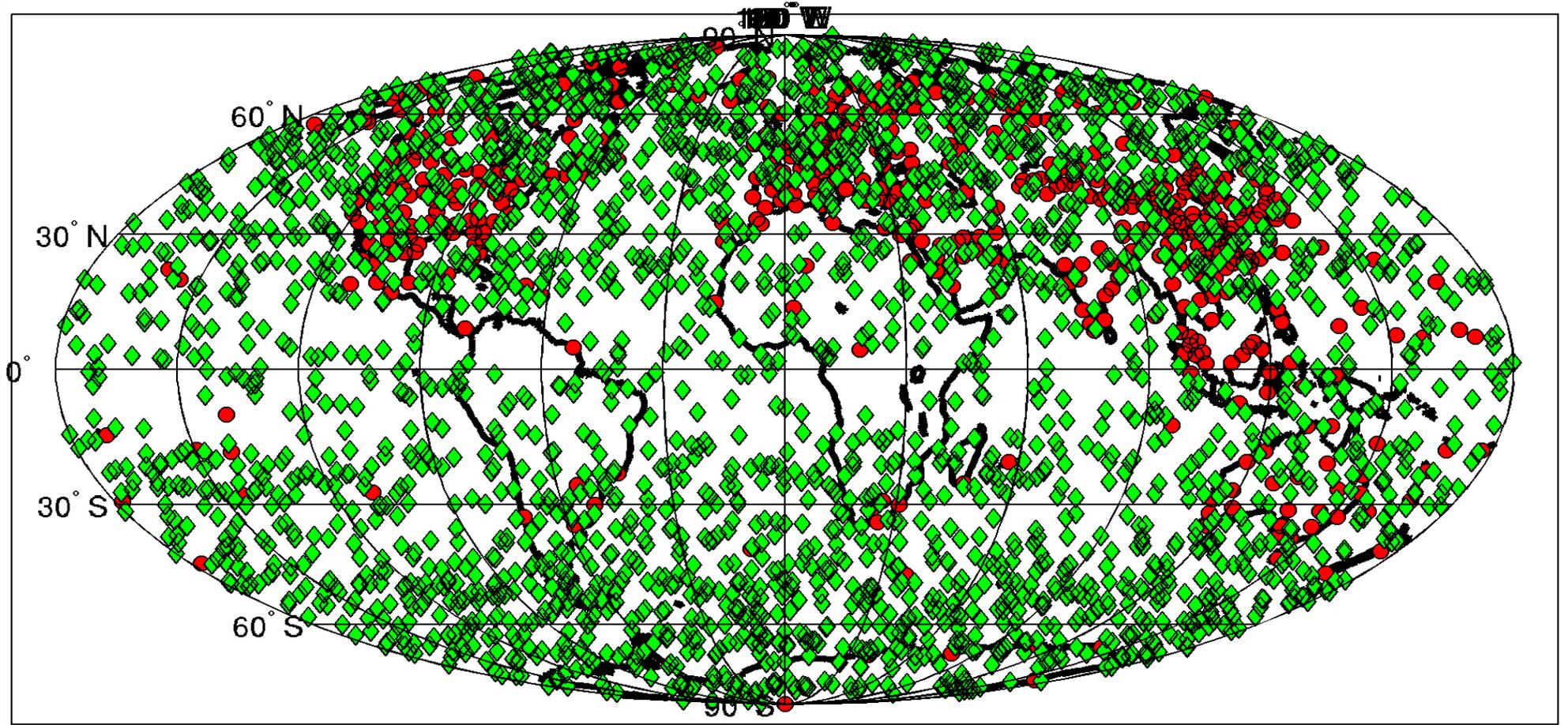
COSMIC (6 satellites; since 2006)



Metop (since 2006)

COSMIC: 2500 Okkultationen pro Tag

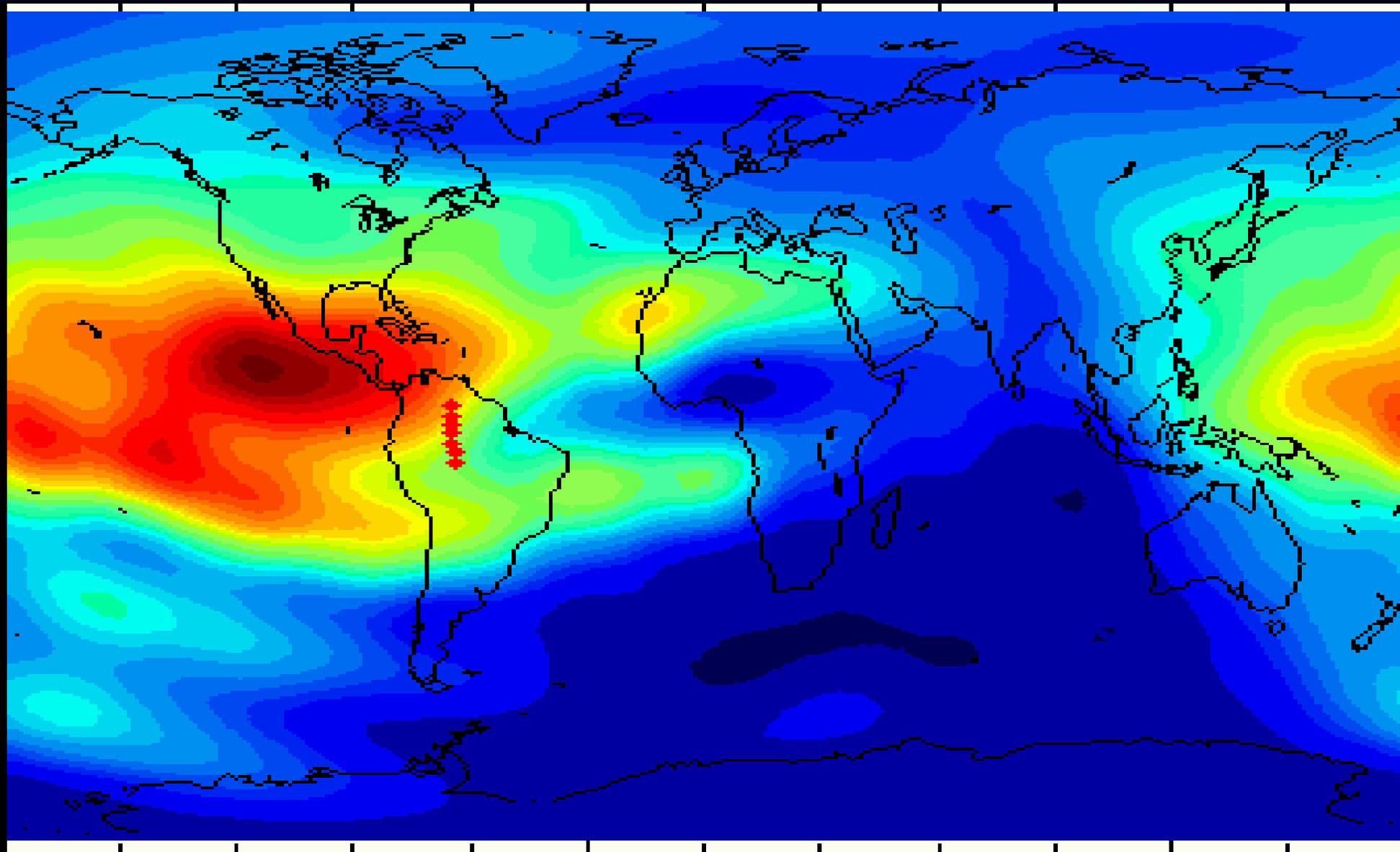
Occultation Locations for COSMIC, 6 S/C, 6 Planes, 24 Hrs



Klima \leftrightarrow Wettervorhersage

- 1) Troposphäre: Wasserdampfbestimmung aus GPS
- 2) Ionosphäre: Elektronendichte aus GPS
- 3) Atmosphäre/Ozeane: Einfluss auf die Erdrotation

Ionosphäre: Globales Ionosphärenmodell aus GPS

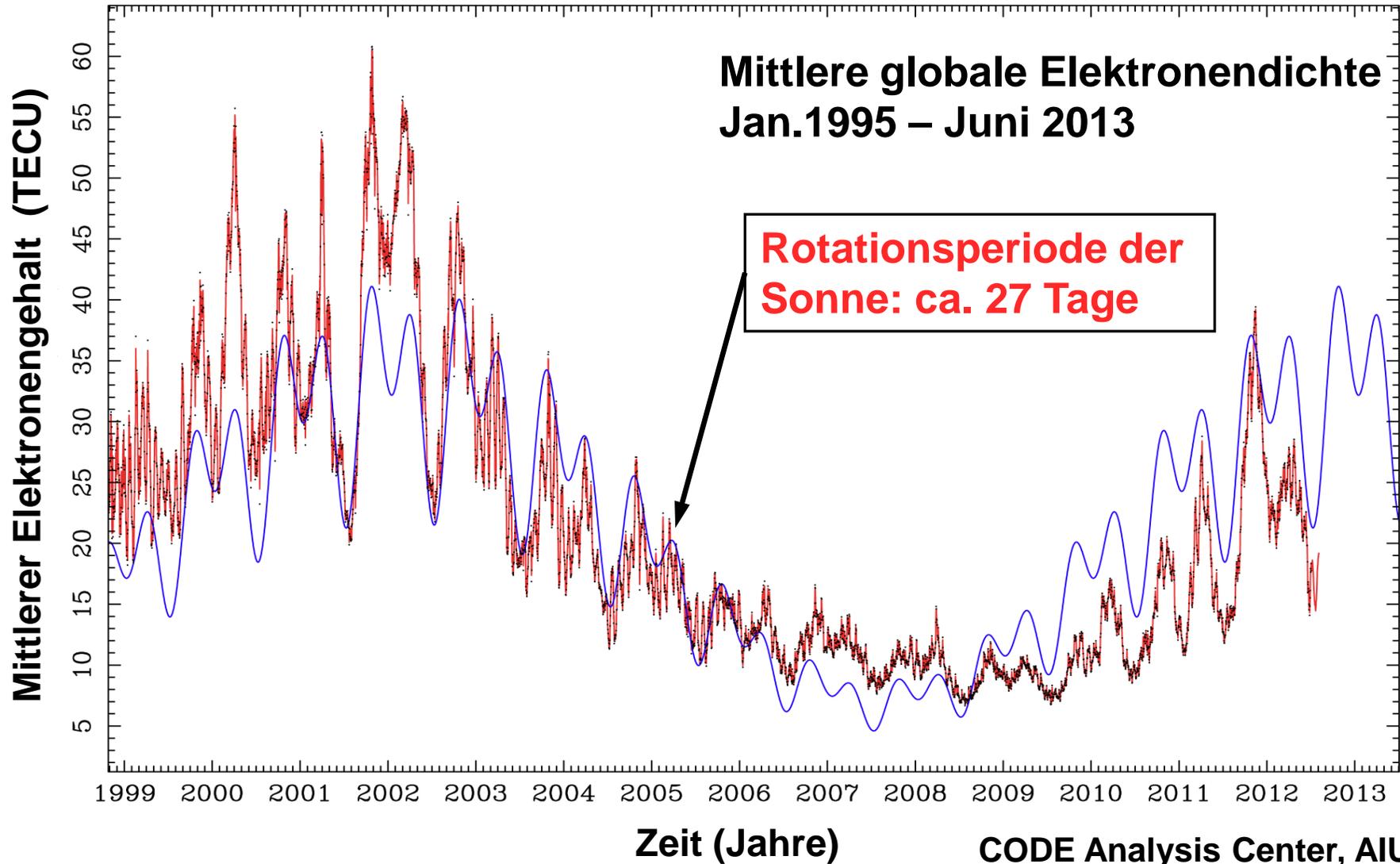


CODE Analysis Center, AIUB

Physikalische Gesellschaft Zürich, 27. Februar 2014

Variationen in der Ionosphäre aus GPS-Daten

CODE GIM time series from 01-Jan-1995 to 03-Jul-2012



Klima \leftrightarrow Wettervorhersage

- 1) Troposphäre: Wasserdampfbestimmung aus GPS
- 2) Ionosphäre: Elektronendichte aus GPS
- 3) Atmosphäre/Ozeane: Einfluss auf die Erdrotation

Euler-Liouvillesche Gleichungen

- Feste Erde, Ozeane, Atmosphäre, etc.: gekoppeltes System.
- Euler-Liouvillesche Gleichungen: Gesamtdrehimpuls des Systems muss erhalten bleiben.

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\omega} + \mathbf{h}) + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I} \cdot \boldsymbol{\omega} + \mathbf{h}) = \mathbf{0}$$

- Massenverschiebungen und Strömungen (Atmosphäre, Ozeane) zeigen sich in der Erdrotation (Stellung der Erdachse, Drehgeschwindigkeit).
- Bestimmung von Erdrotation: Messen des integrierten Effekts aller Massenverlagerungen und Strömungen auf die Rotationsachse und Drehgeschwindigkeit der Erde.

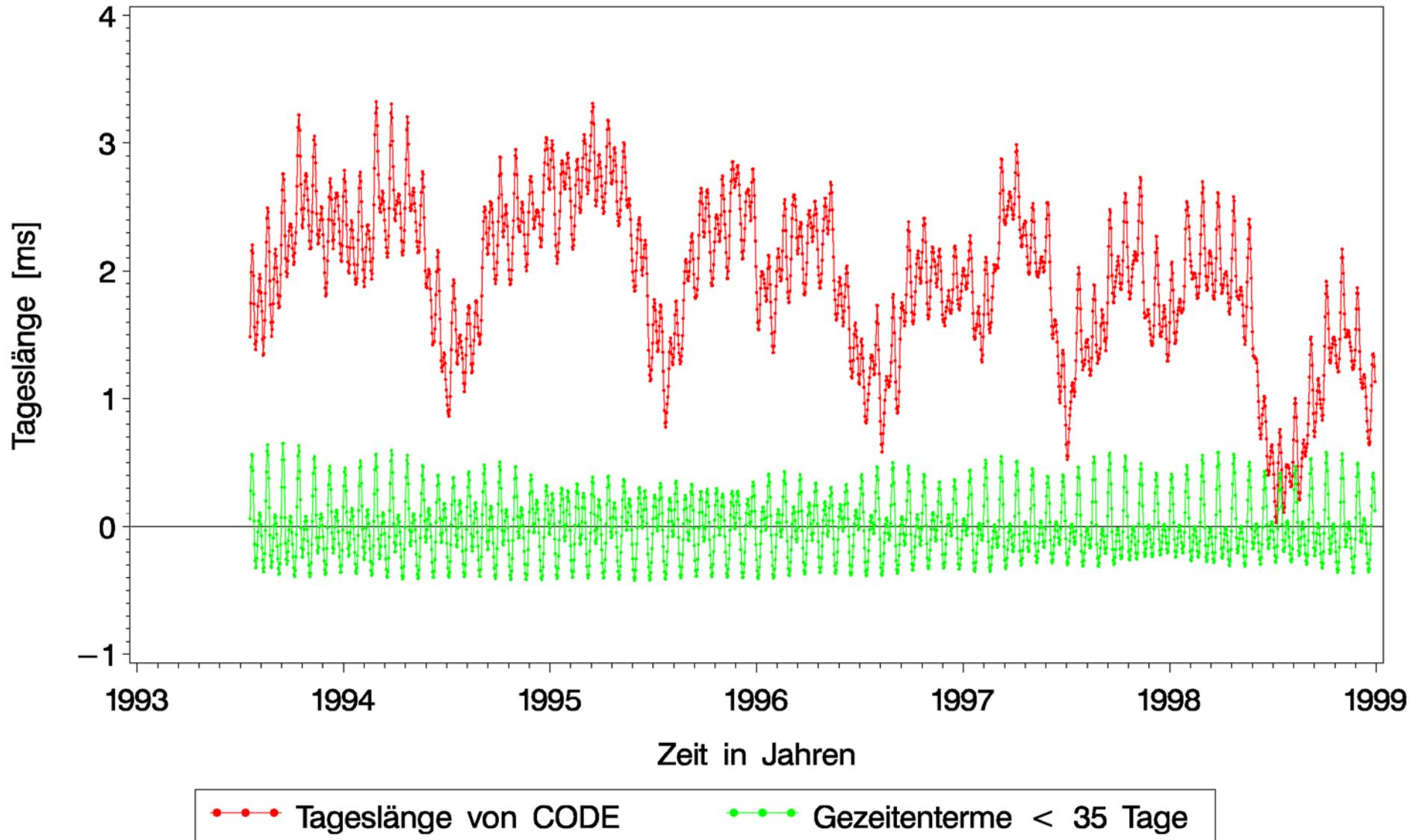
$$\begin{aligned} -y + \frac{\dot{x}}{\gamma(1 - \frac{k}{k_s})\omega_{e0}} &= \chi_2 \\ +x + \frac{\dot{y}}{\gamma(1 - \frac{k}{k_s})\omega_{e0}} &= \chi_1 \\ \dot{\omega} &= -\omega \cdot \chi_3 \end{aligned}$$

Anregungsfunktionen:
(Atmosphäre, Ozeane, ...)

$$\chi_1, \chi_2, \chi_3$$

Polkoordinaten: x, y ,
Tageslänge ω (LOD)

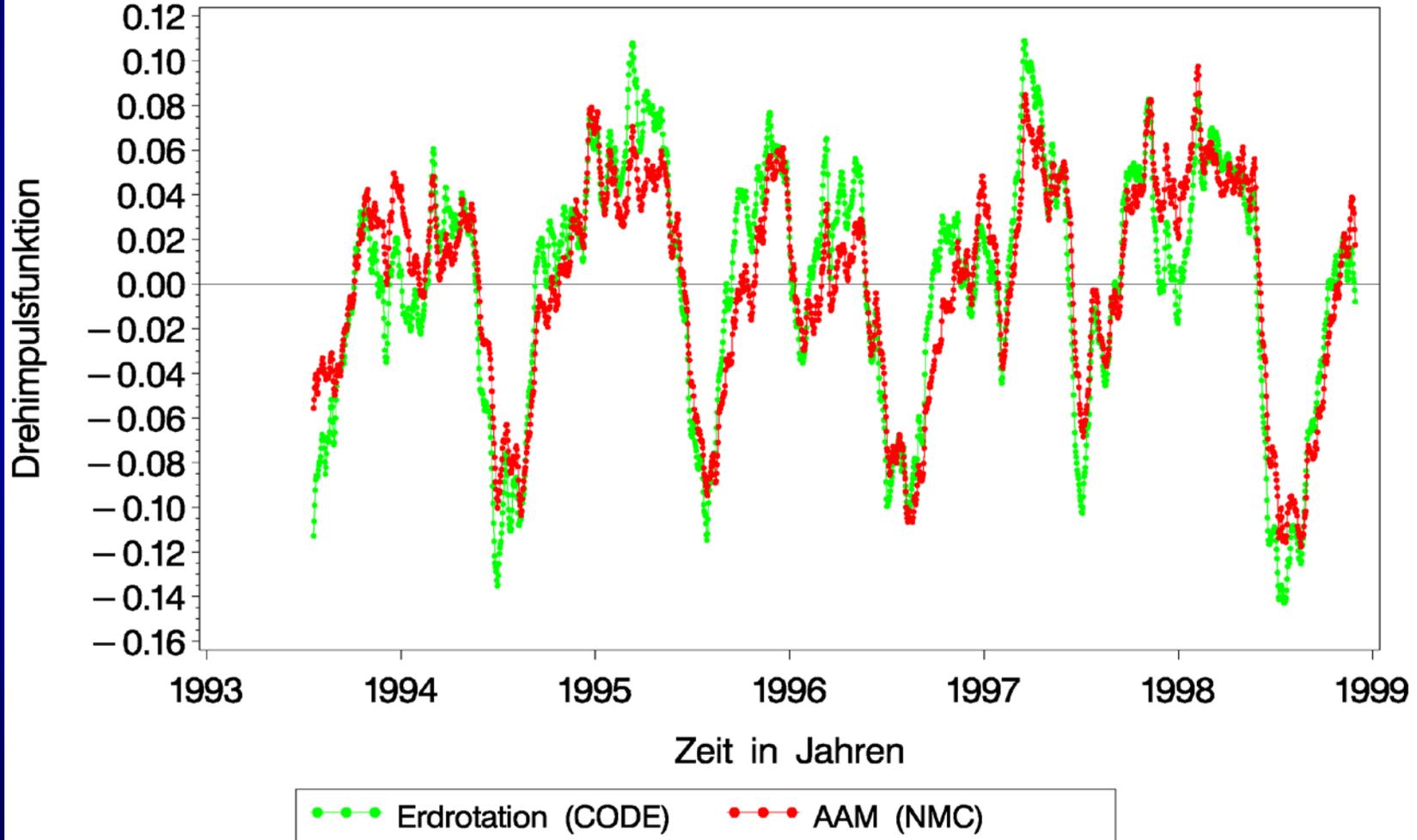
Langsame und schnelle Tageslängenvariationen aus GPS



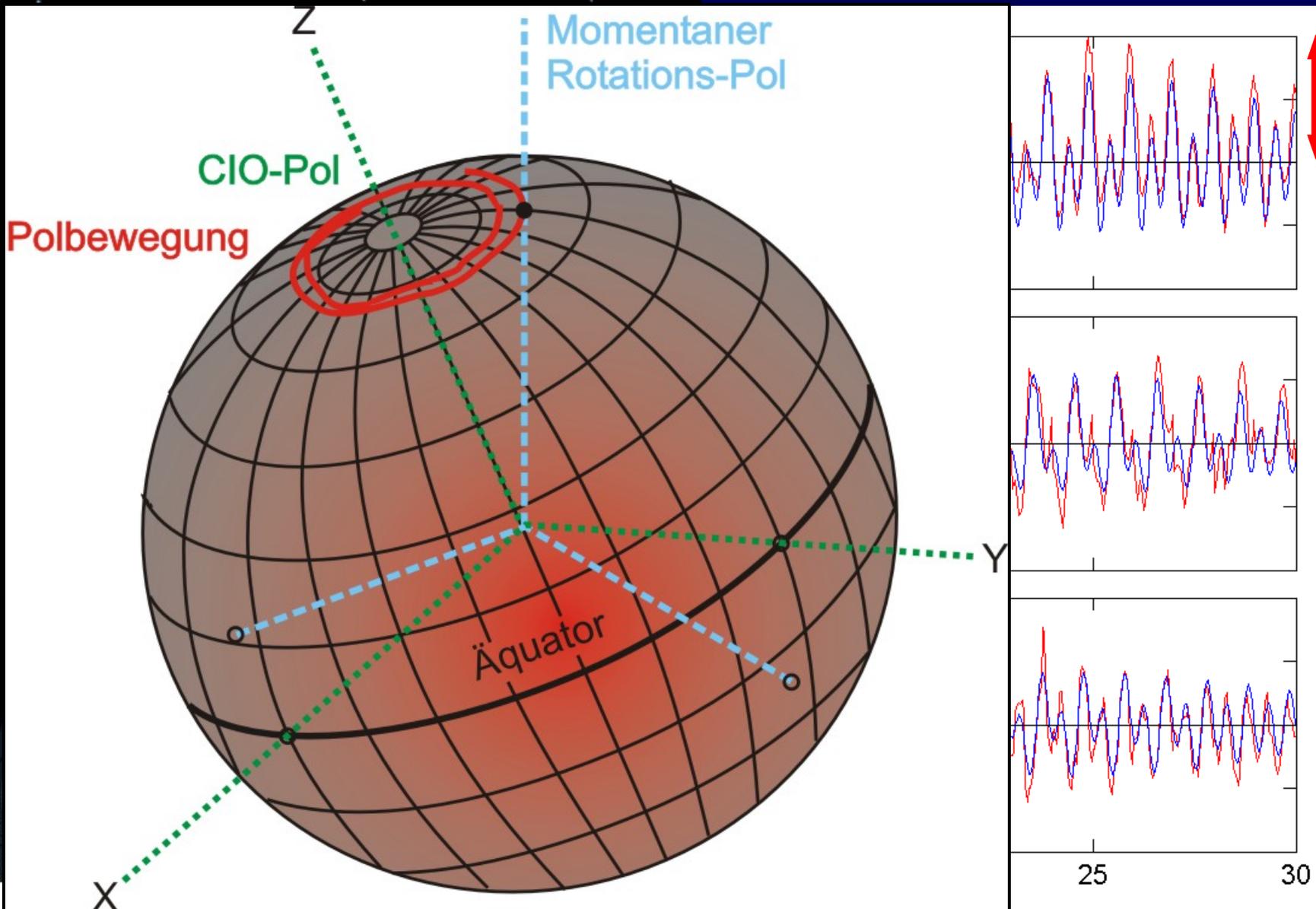
Vergleich von Atmosphäre und GPS

Vergleich von χ^3 Drehimpuls

berechnet aus Atmosphärendaten und aus Erdrotationsparametern



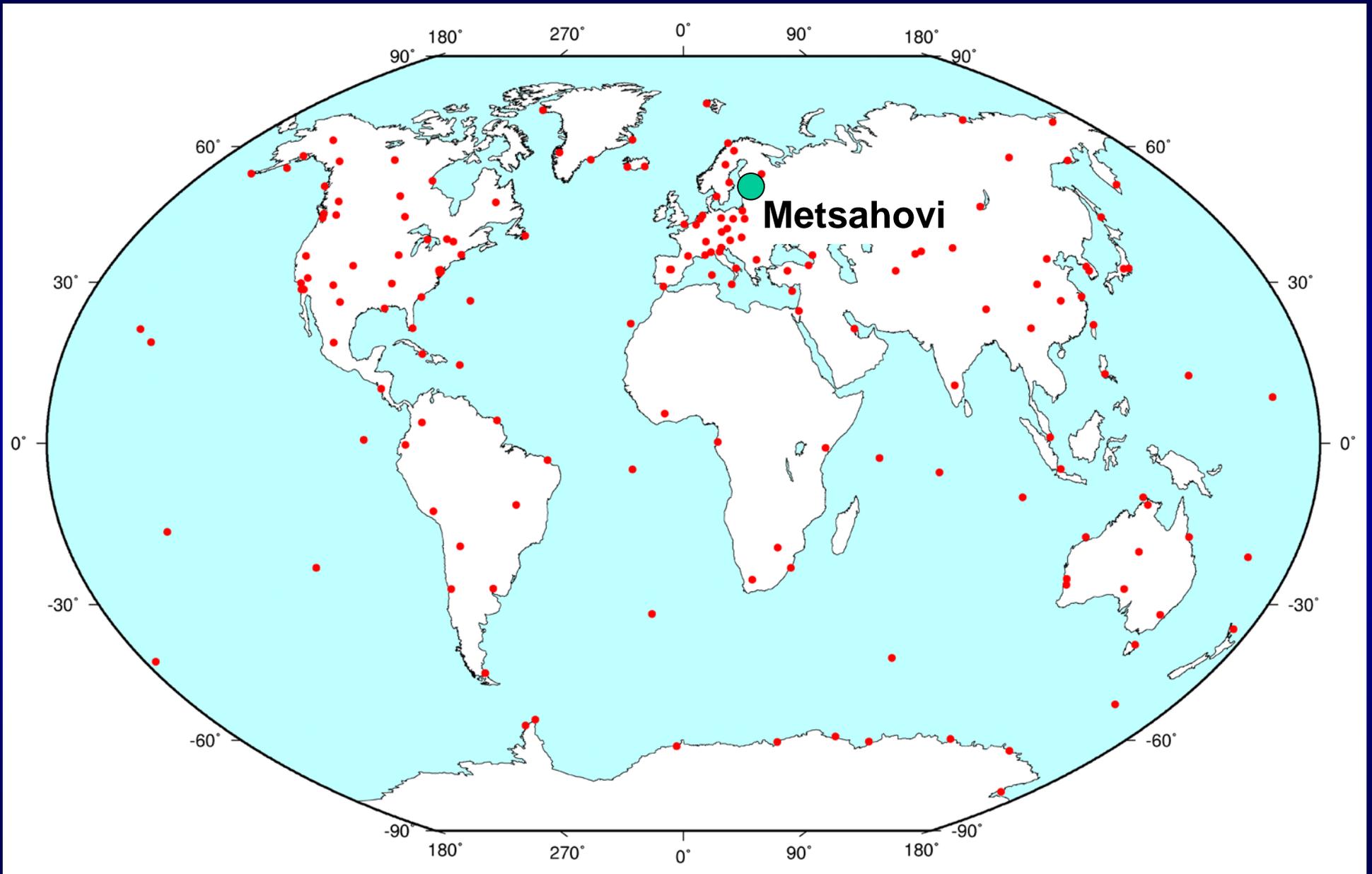
Schnelle Änderungen (sub-täglich) der Erdrotation



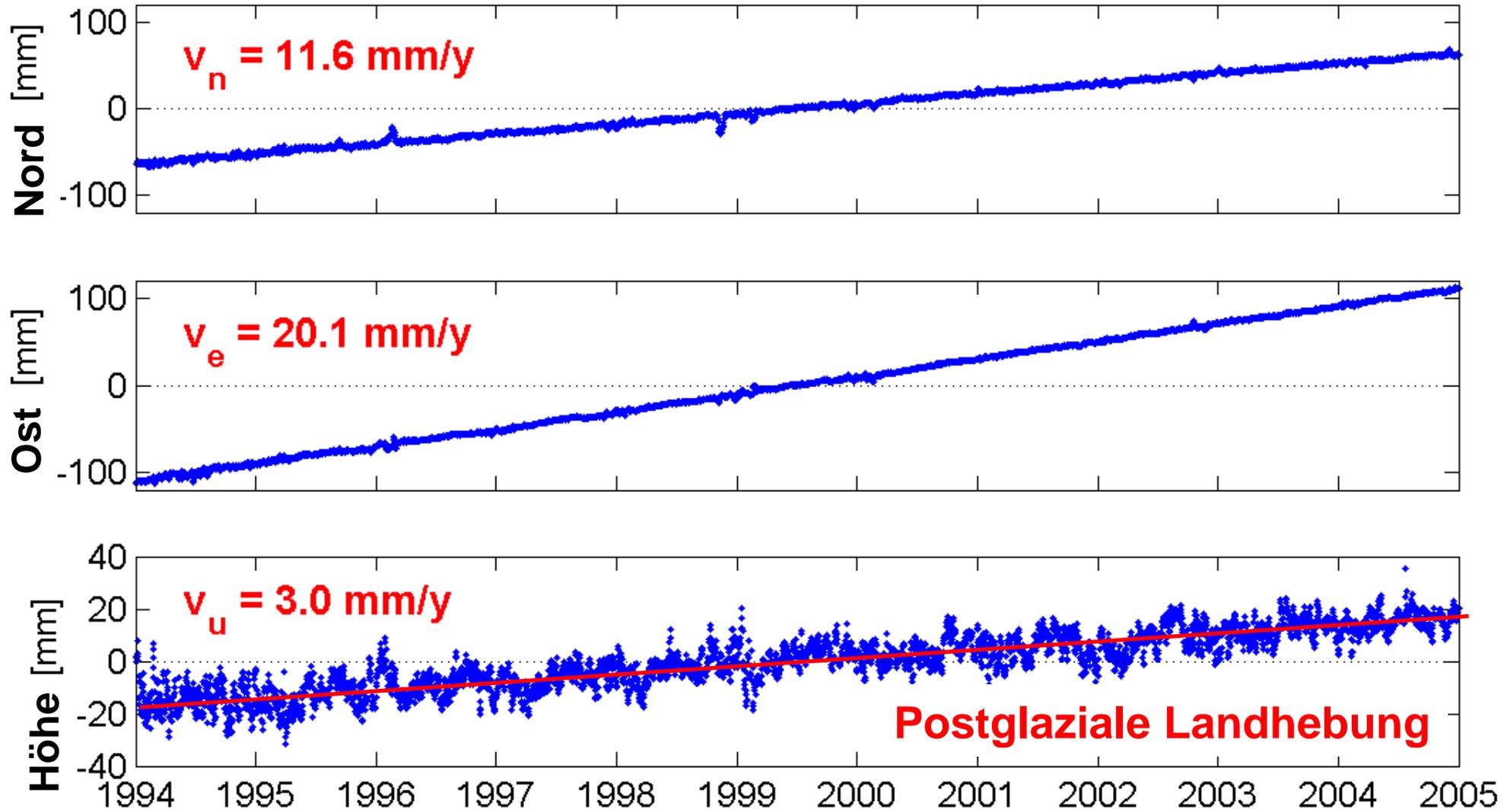
Meeresspiegel \leftrightarrow Tsunami

- 1) Postglaziale Landhebung und Meeresspiegel
- 2) Tsunami-Frühwarnsystem im Indischen Ozean

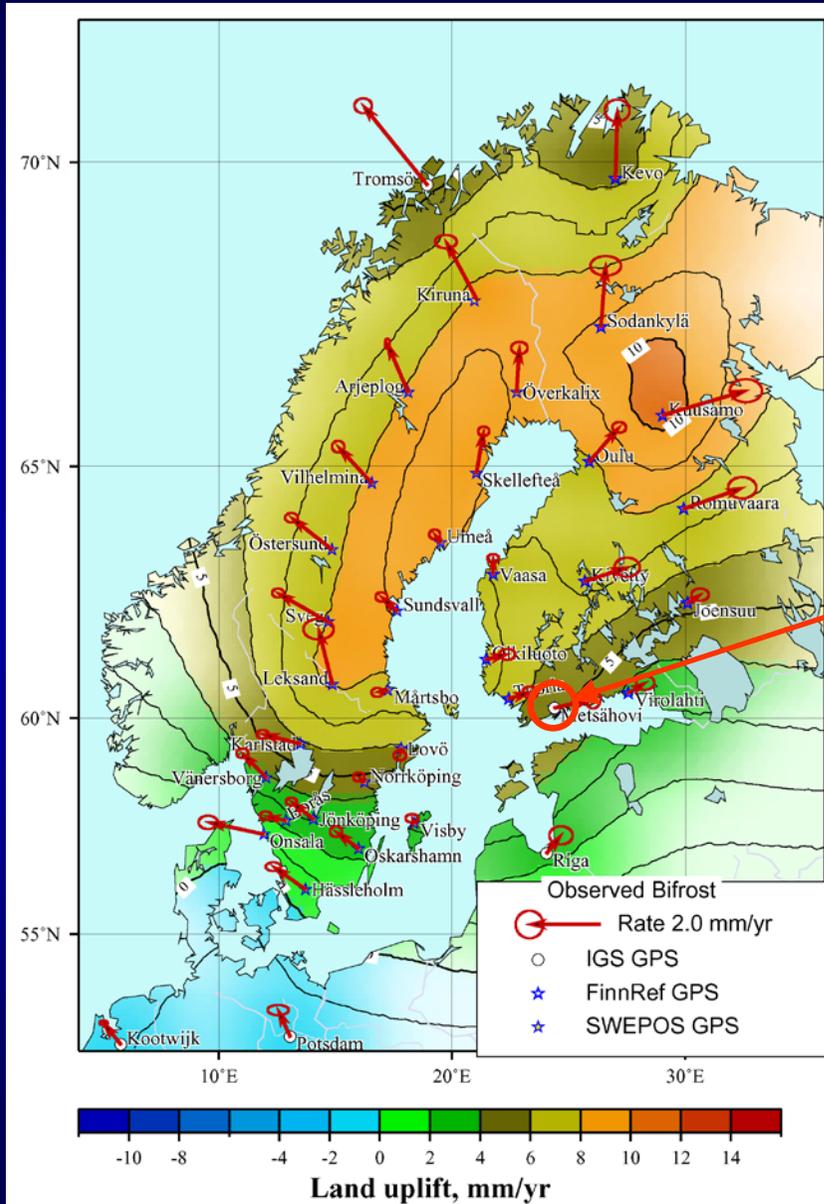
Meeresspiegel: Globales GPS-Netz



Station Metsahovi (Finnland)



Postglaziale Landhebung

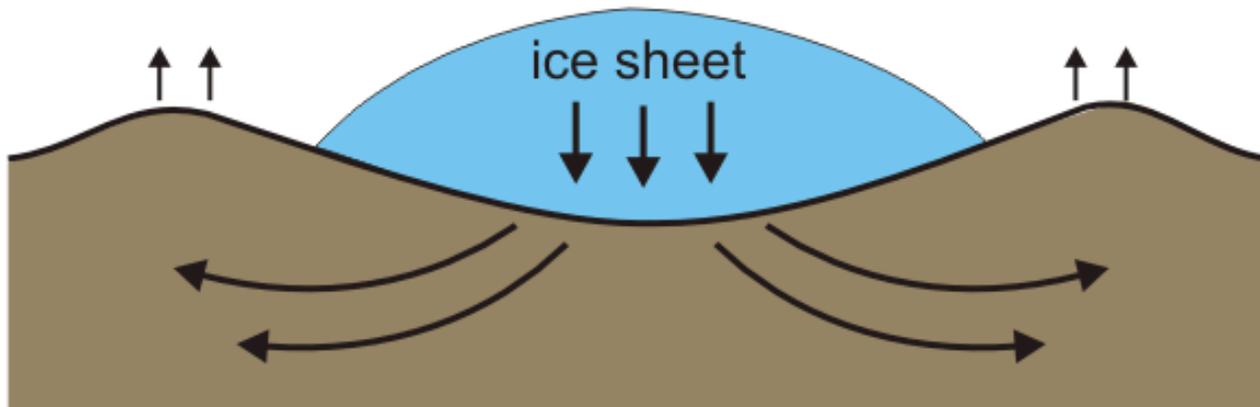


Metsähovi: 3.3 mm/Jahr

Bifrost-Projekt

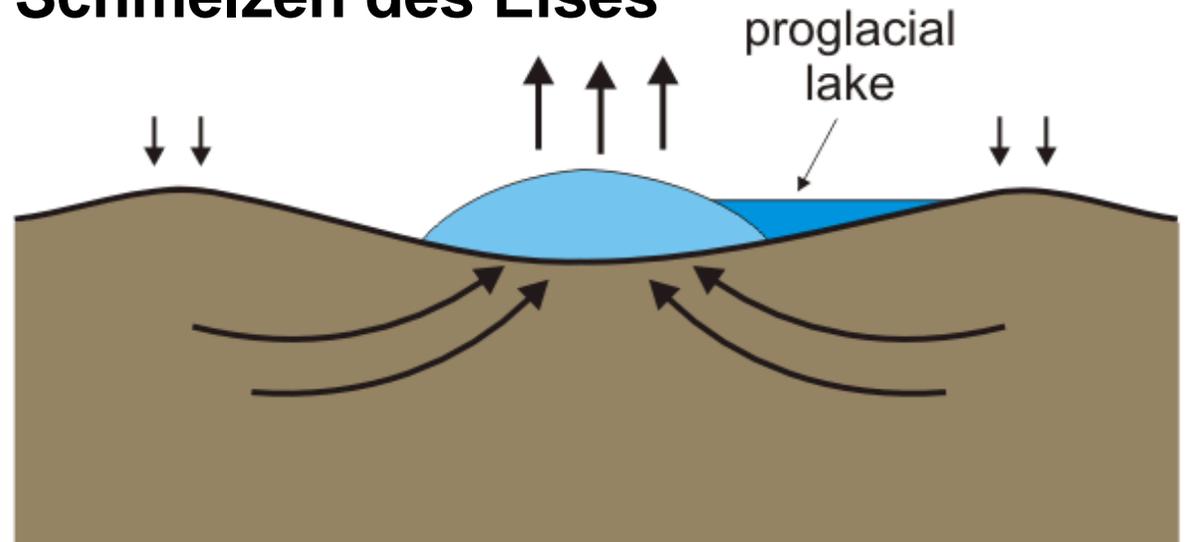
Postglaziale Landhebung: der Prozess

Grösste Vereisung



Vor 10'000
Jahren, letzte
Eiszeit

Schmelzen des Eises



Ende der Eiszeit

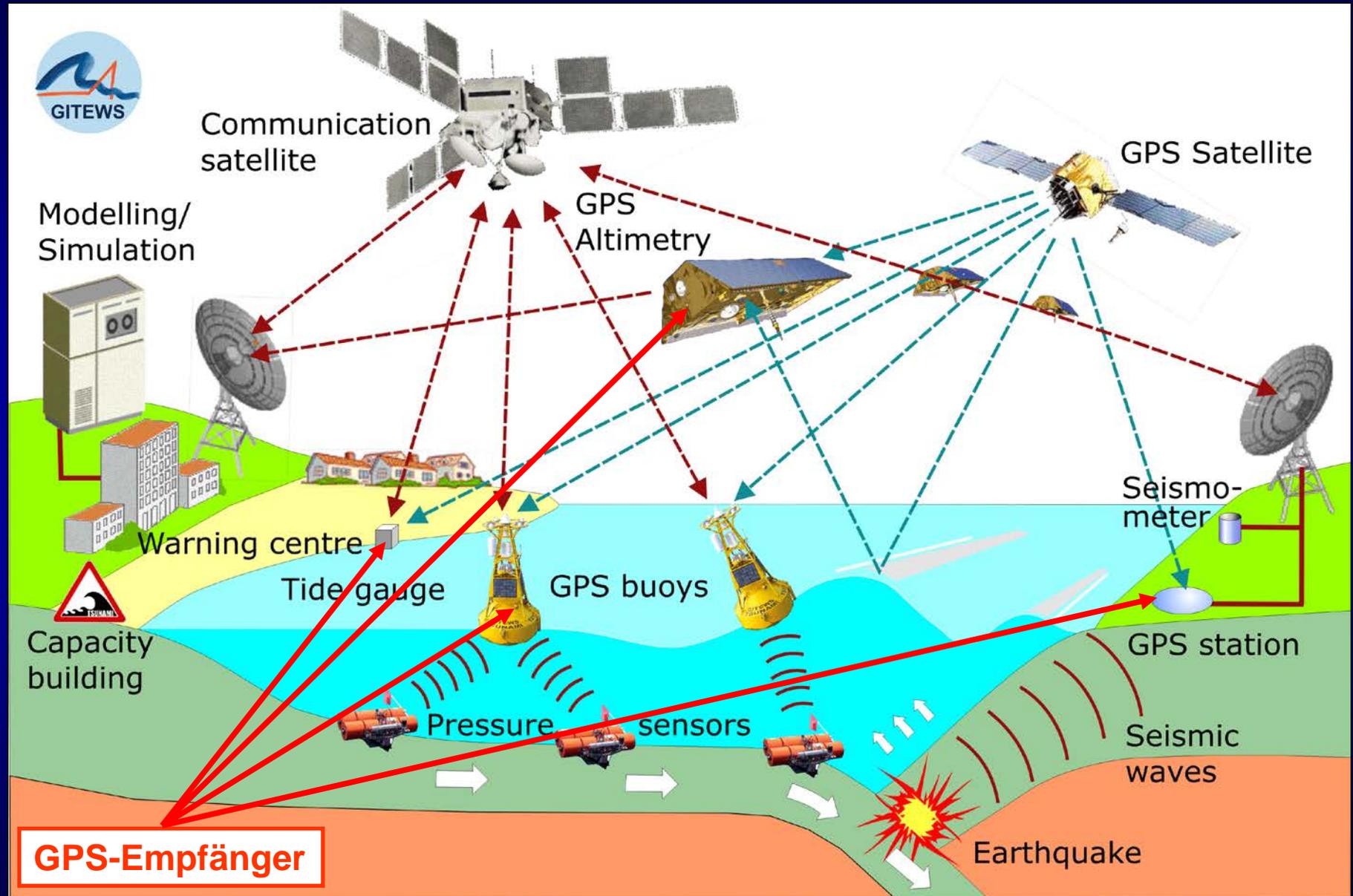
Postglaziale Landhebung: Bootshäuser am Trockenener



Meeresspiegel \leftrightarrow Tsunami

- 1) Postglaziale Landhebung
- 2) Tsunami-Frühwarnsystem im Indischen Ozean

GITEWS: German Indonesian Early Warning System



Tsunami-Boje: GPS / OBPU / Seismometer

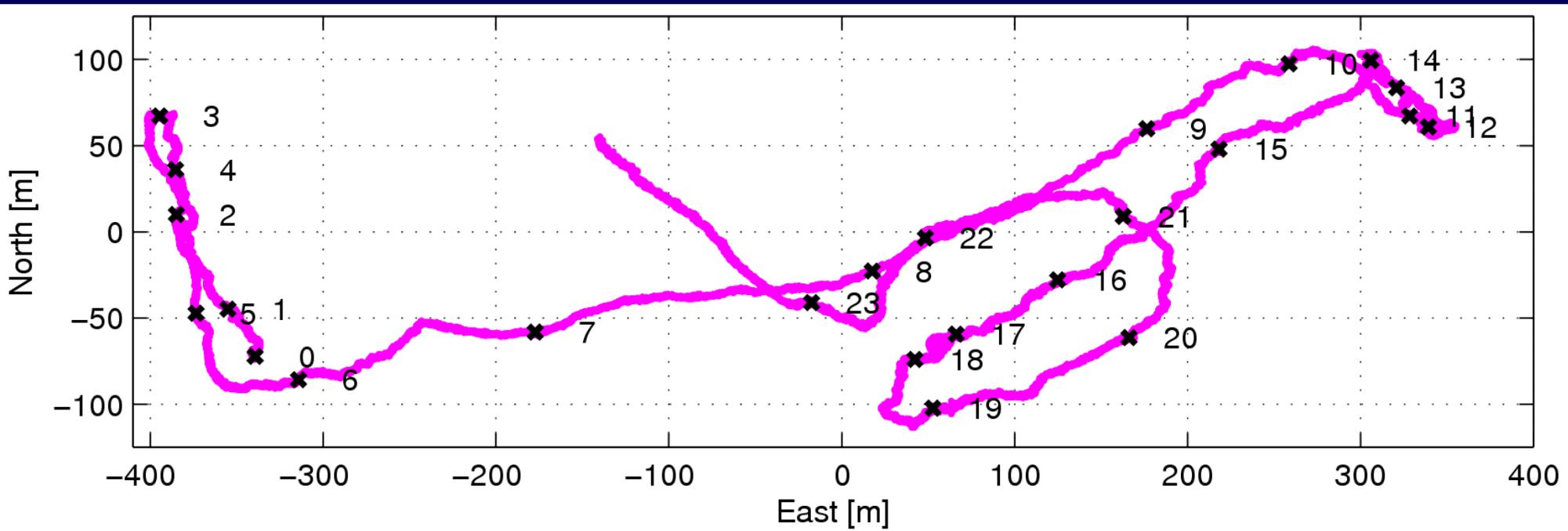


© IFM-GEOMAR

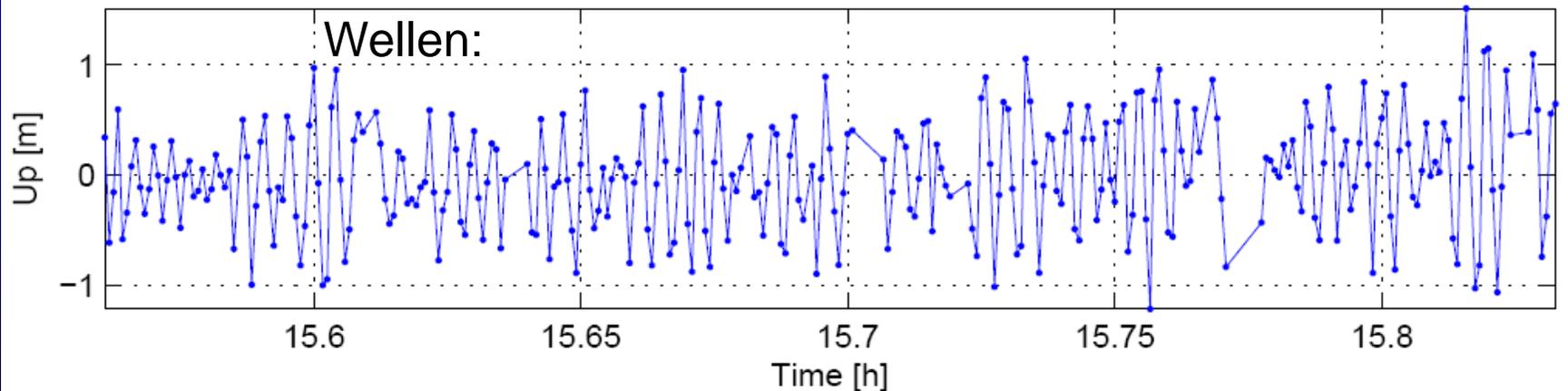


GPS Tsunami-Boje: Bewegung

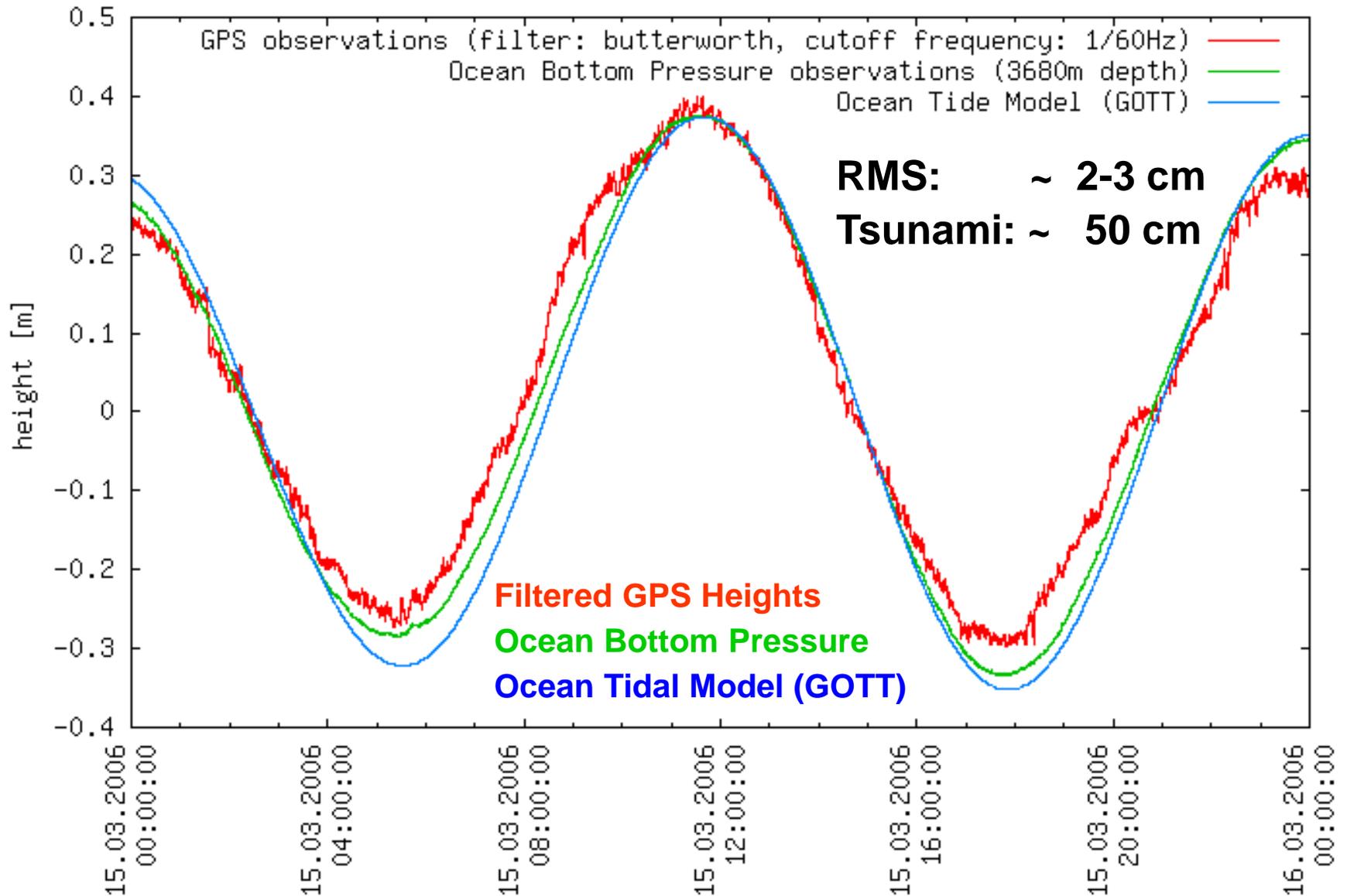
Horizontale Position (Tage):



Höhe:



GPS Tsunami-Boje: Meereshöhe



Tsunami Modellierung: wie hoch wird die Welle ?

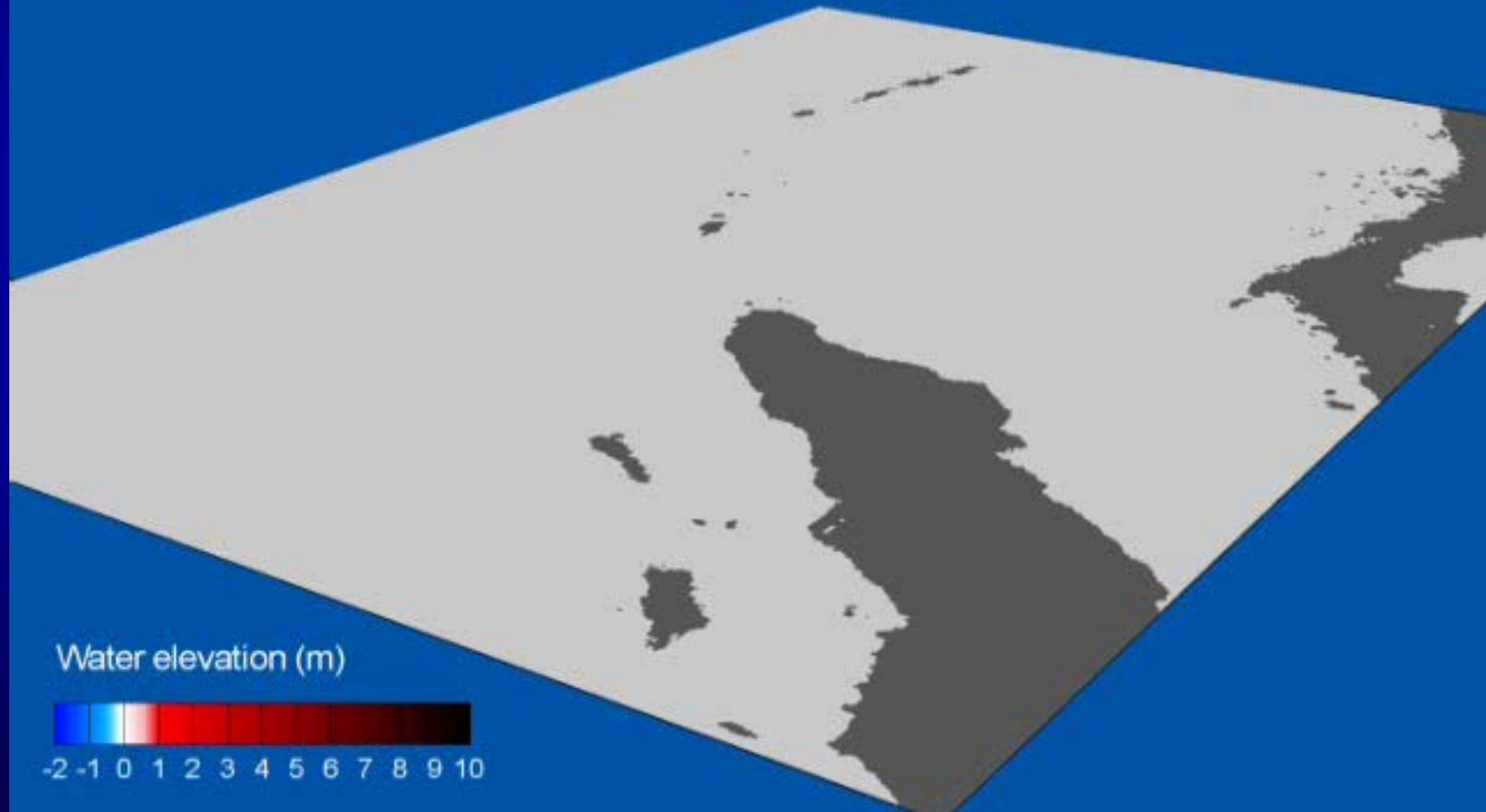
Model of the Sumatra Tsunami 26.12.2004



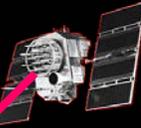
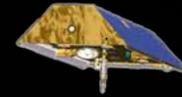
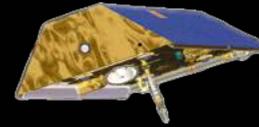
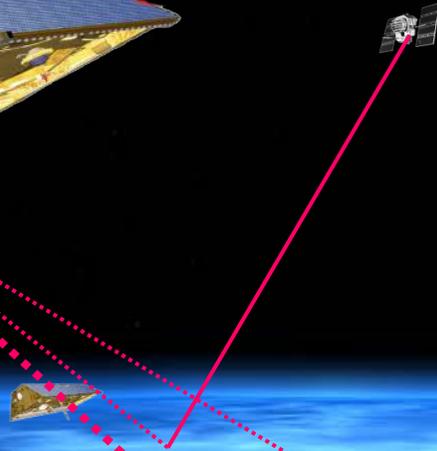
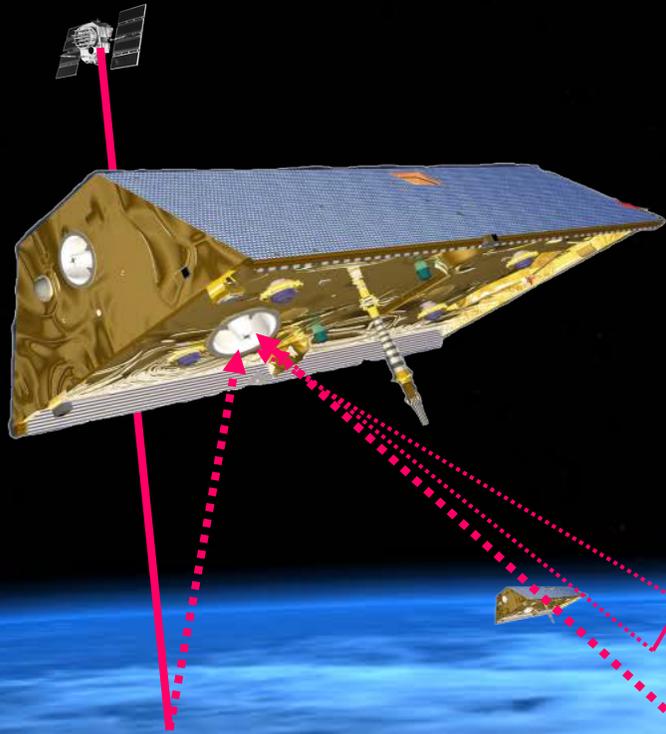
A. Babeyko (University of Frankfurt/M, Geophysics)

S. Sobolev (GFZ Potsdam)

Time: 00:00:00 h

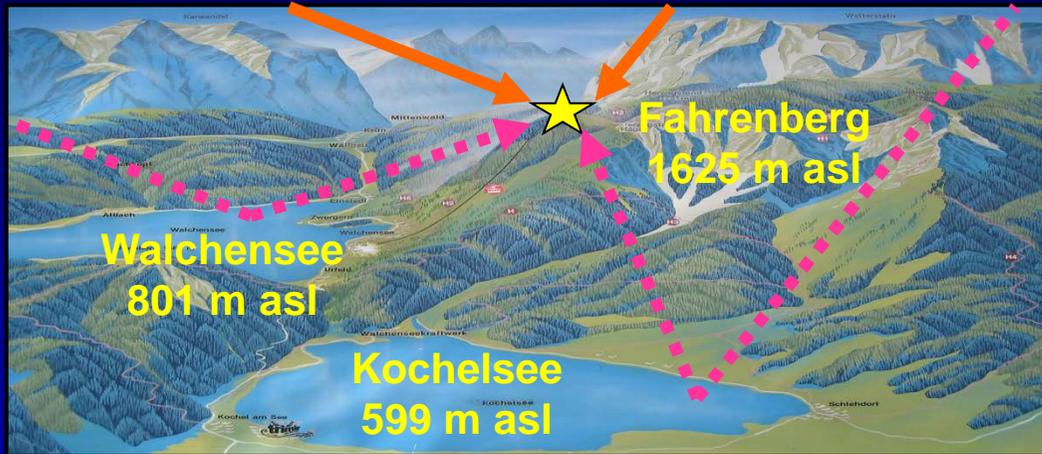


GPS-Reflektometrie: globale Vermessung der Meeresoberfläche



Zukünftige Satellitenkonstellation für ein Frühwarnsystem ?

Bodengestützte GPS-Reflektometrie



Instrument

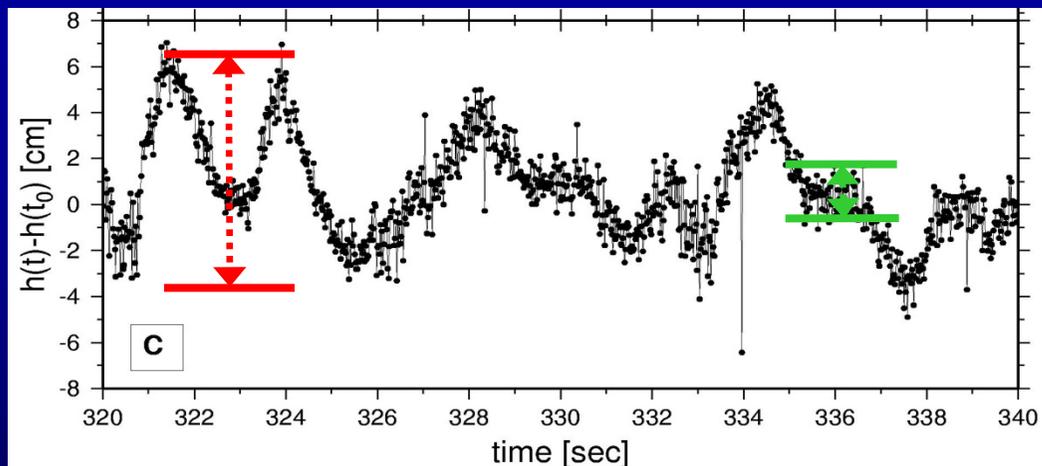
Reflektometrie-GPS-Empfänger
des GFZ

Messtechnik

Interferenz zwischen dem
reflektierten und direkten GPS-
Signal

Result:

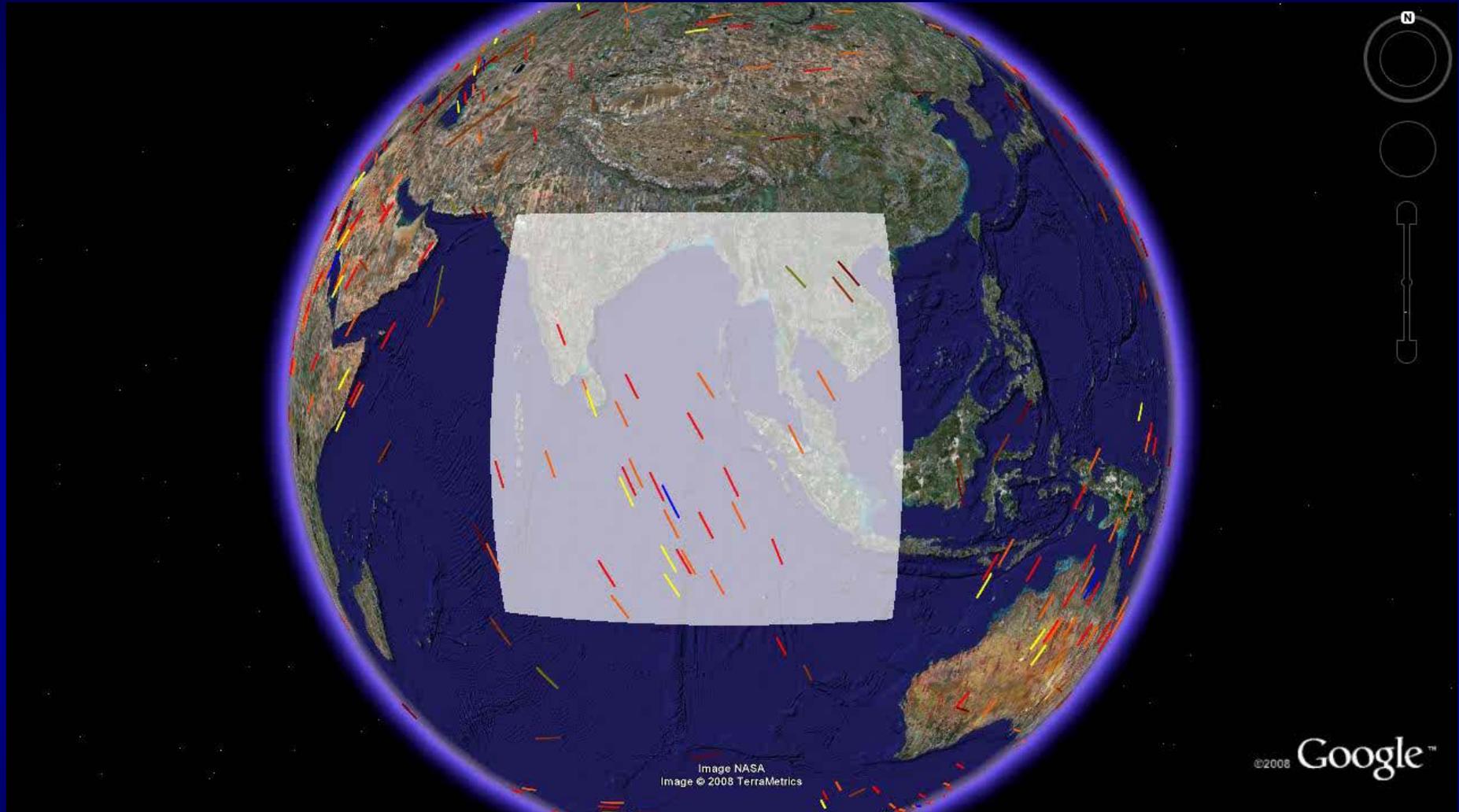
Relative Höhenänderungen mit
cm-Genauigkeit



**Wellenamplituden
bis zu 10 cm**

**Präzision
etwa 2 cm**

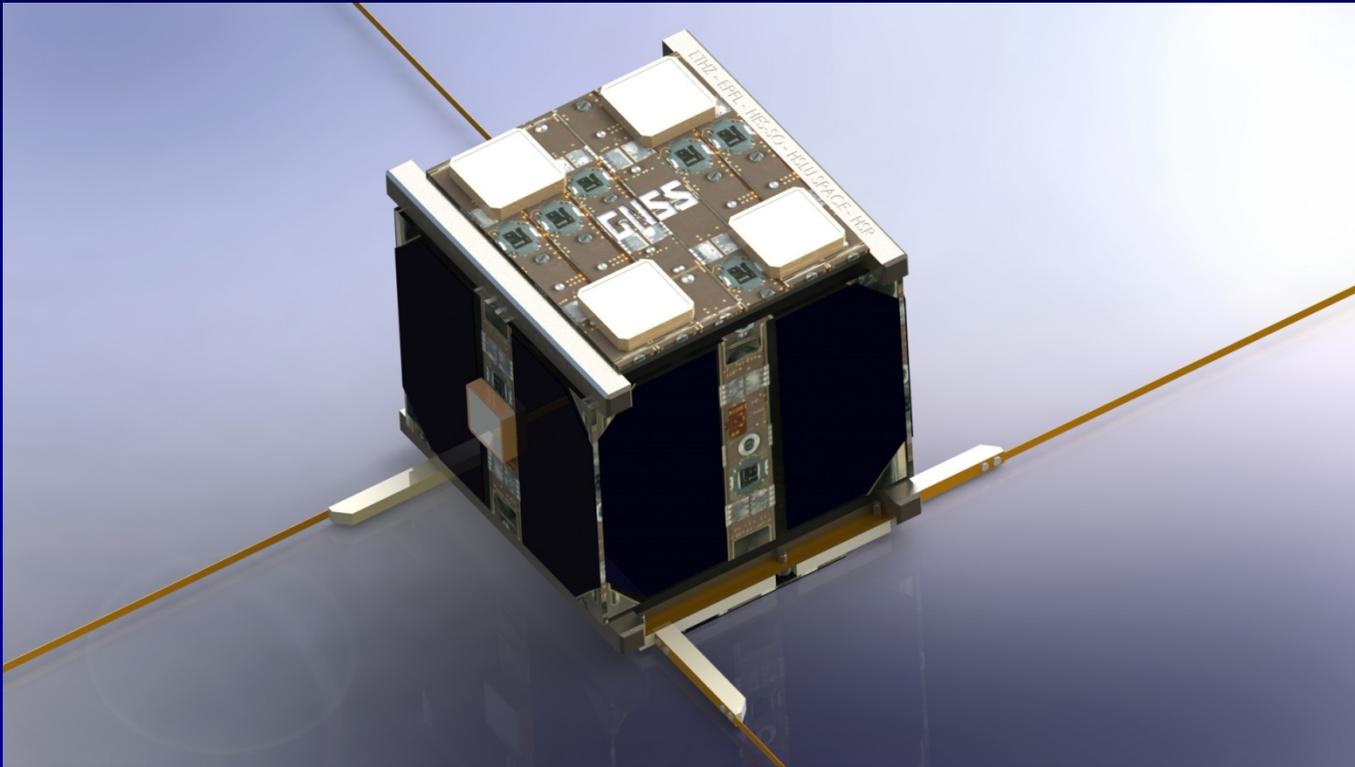
GNSS-Reflektometrie-Konstellation: Sumatra Tsunami



LEO: 18 Satelliten, 3 Bahnebenen, 900 km Höhe, 60° Bahnneigung

GNSS: GPS, GLONASS, Galileo

CubETH: Cube Satellite Mission



- 10x10x10 cm, 1.3 kg
- Mehrere 1-Frequenz GNSS-Empfänger (u-blox NEO-7N)
- Hochgenaue Bahn- und Lagebestimmung
- Atmosphärenexperimente
- Vorbereitung für Konstellationen, Formationsflüge

Cooperation

ETH Zürich, Institute für Geodäsie und Photogrammetrie

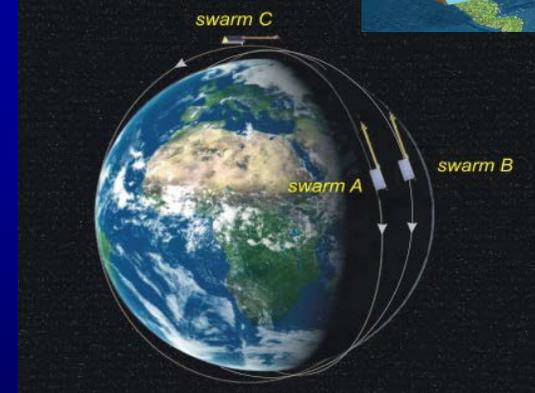
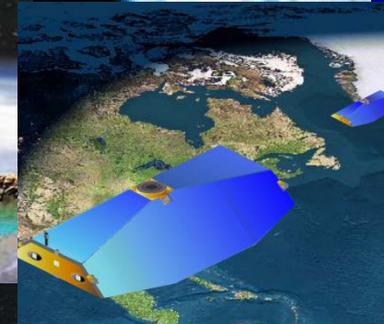
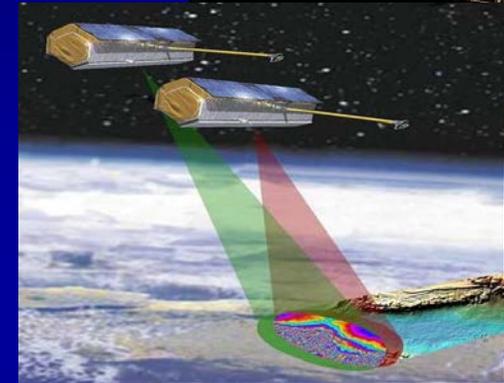
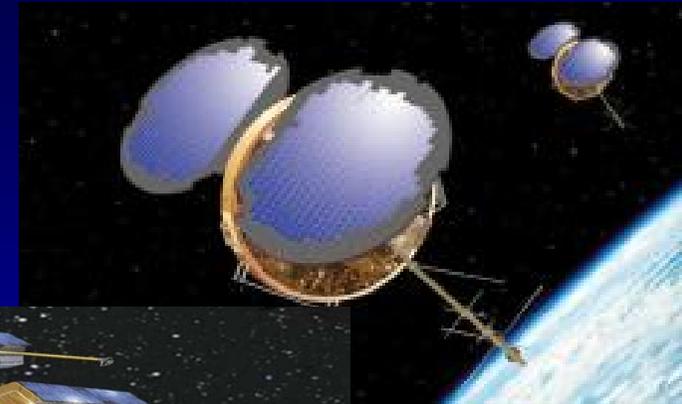
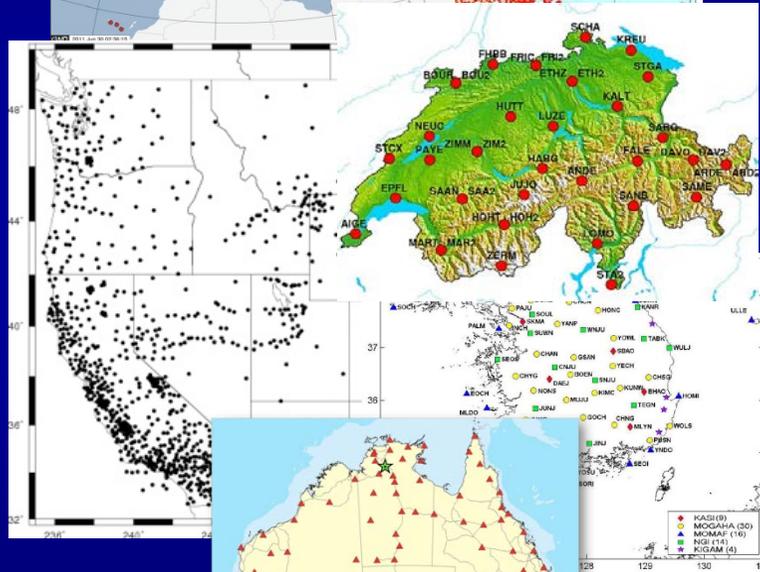
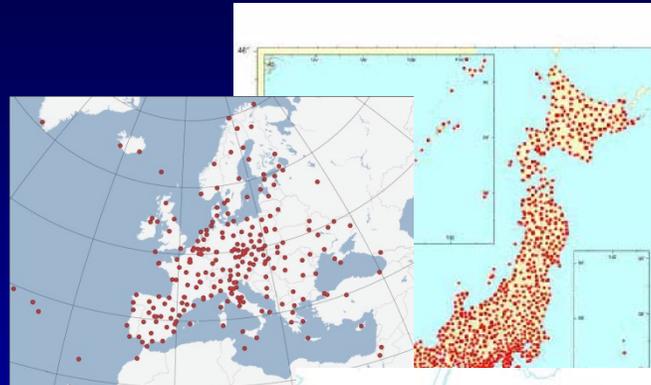
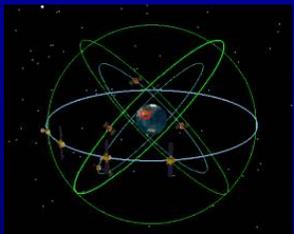
Swiss Space Center (EPFL)

Fachhochschulen: HSLU, HSR, HES-SO

Firmen: u-blox, RUAG

Blick in die Zukunft

Blick in die Zukunft (2020)



**GPS, GLONASS,
GALILEO, BEIDOU**
→ > 120 Satelliten

GNSS-Netze
→ > 10'000 Stationen

**Satelliten-Konstellationen,
Formationsflüge**

GALILEO wird Realität: Stationsnetz und Testsatelliten



**GALILEO-Station
in LaPlata (GFZ)**



**Wasserstoff-
Maser
(Neuenburg)**



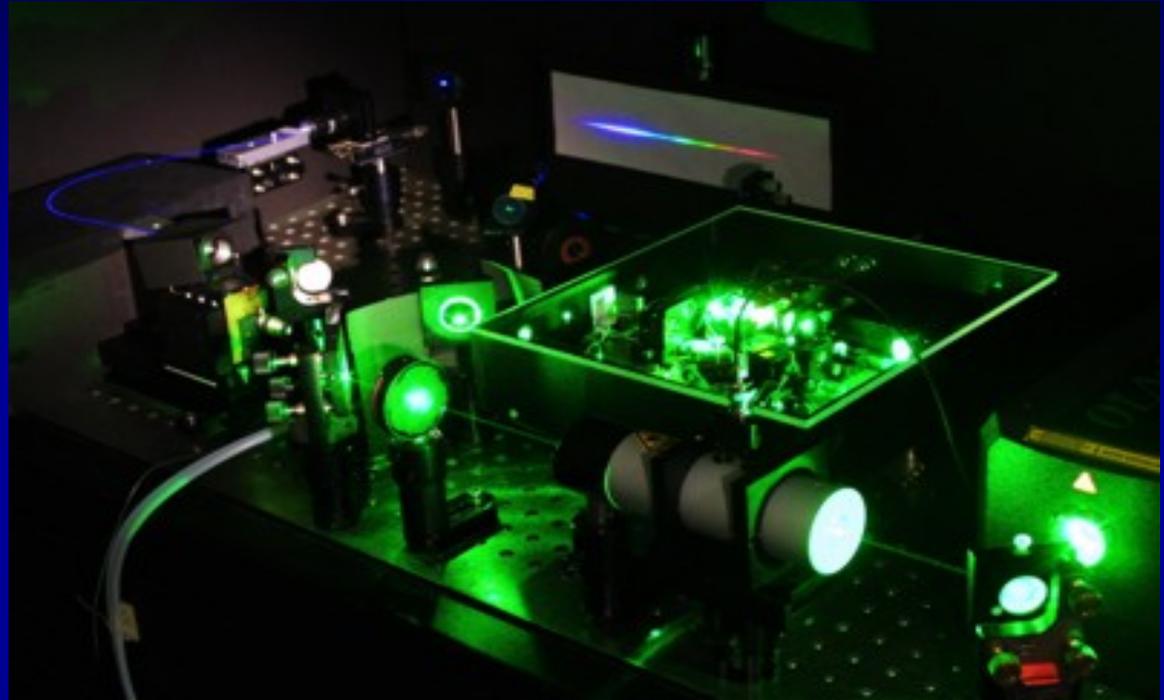
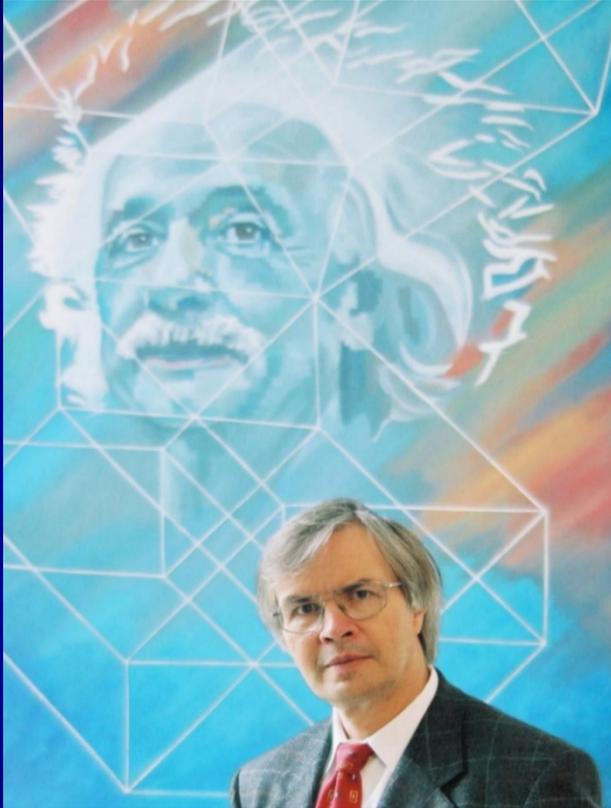
GIOVE-A (28.12.05)



GIOVE-B (27.04.08)



IOV-Sat. (21.10.11, 12.10.12)



1

← 10^{-18}

1 000 000 000 000 000 000 000

Schlussfolgerungen

- **Die GNSS können heute einen bedeutenden, fundamentalen Beitrag leisten zum Monitoring und Verständnis des Systems Erde:**
 - **Langsame Bewegungen:**
 - Plattentektonik,
 - postglaziale Landhebung, ...
 - **Schnelle Bewegungen:**
 - Erdbeben, Vulkane
 - Hangrutschungen, ...
 - **Atmosphäre:**
 - Wasserdampf in der Troposphäre (globale Erwärmung)
 - Freie Elektronen in der Ionosphäre (Weltraumwetter)
 - **Frühwarnsysteme:**
 - Erdbebenerfassung
 - Tsunami-Frühwarnsystem
- **Basis für ein tieferes Verständnis des Systems Erde und der Zukunft unseres sich verändernden Planeten, für den Aufbau von Frühwarnsystemen**

**Danke für Ihre
Aufmerksamkeit !**

**Einstein hätte an der heuti-
gen Satellitengeodäsie
seine Freude gehabt: es
dreht sich alles um Zeit,
Raum und Schwere ...**

Source: Scientific American, Oct. 2004

