GPS, mehr als ein Navigationssystem. Was wir mit GPS über unsere Erde erfahren können...

R. Dach et al.
Astronomisches Institut, Universität Bern
Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern

BK-Maibummel 2011

11. Mai 2011

4325349.0179

564738.8076

4638540.9308

Positionsbestimmung und Navigation

Navigation ist eine wichtige Voraussetzung für die Seefahrt. . .

Positionsbestimmung und Navigation

Grundlage: Winkelmessung zu Sternen mit bekannter Position

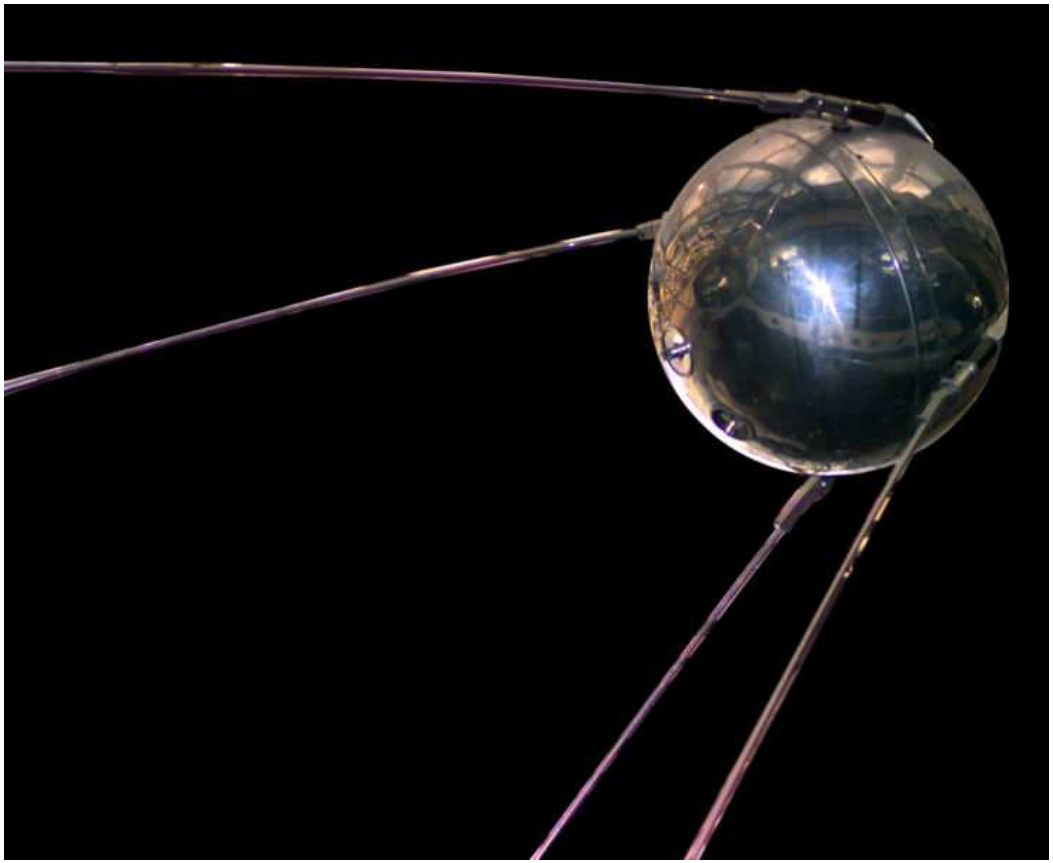
aus Sternkatalogen und dem Zeitpunkt der Messung

Nach zwei Revolutionen. . .

Elektro–optische
Streckenmessung

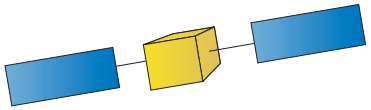
Nach zwei Revolutionen. . .

Elektro–optische Streckenmessung

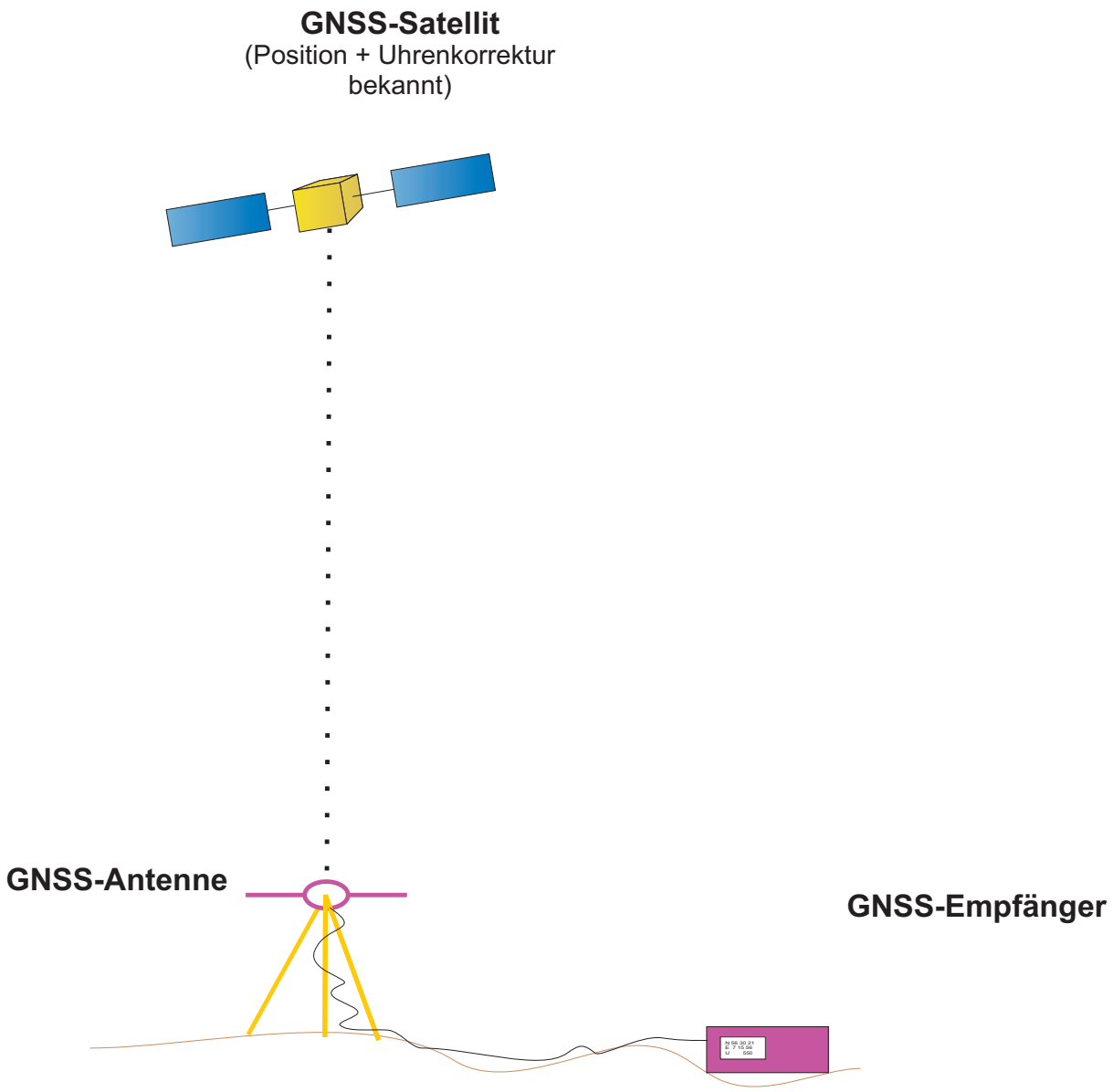


Es können Satelliten gestartet werden, die auf der Erde empfangbare Signale aussenden.

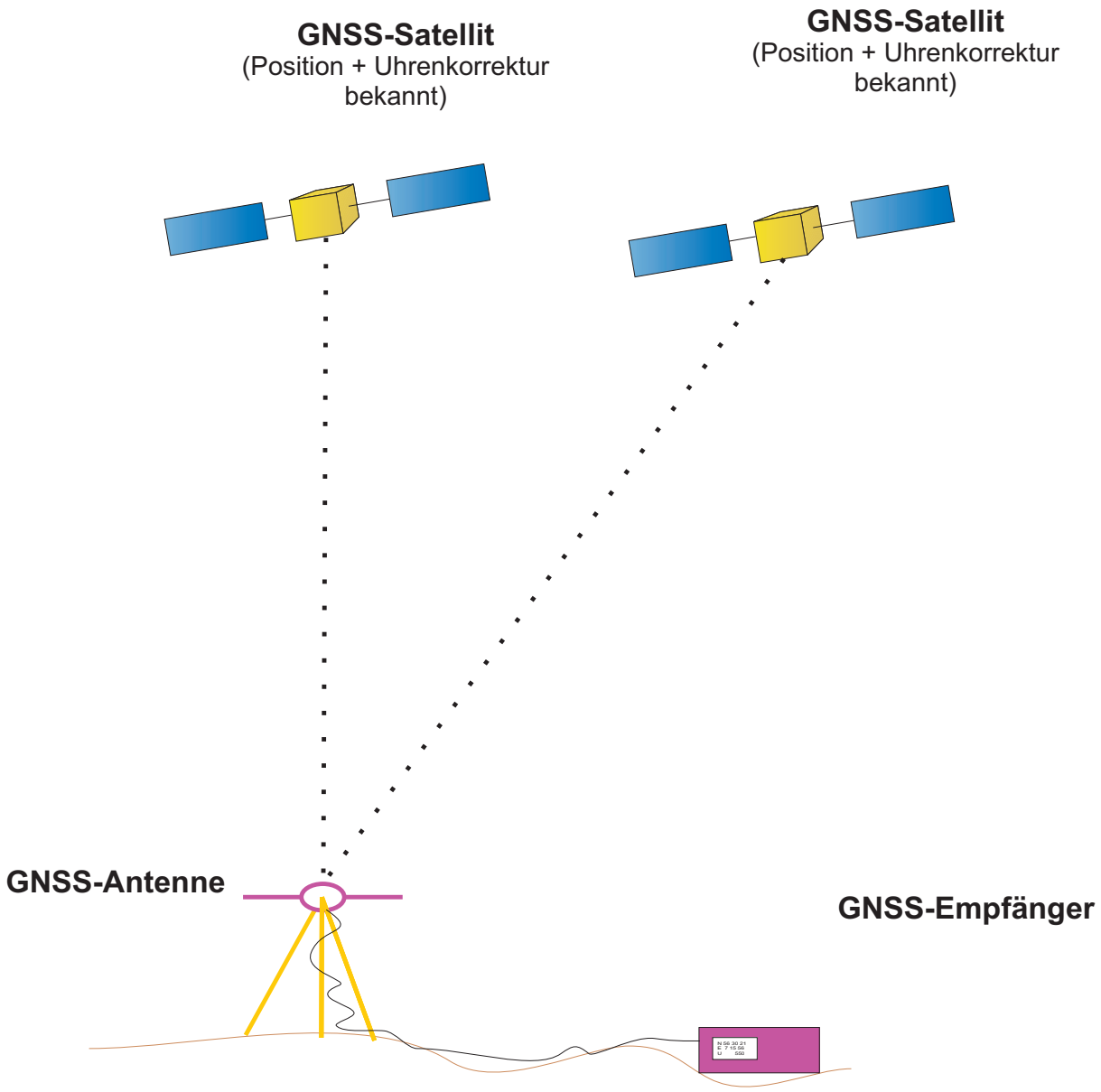
Navigation mit Satelliten



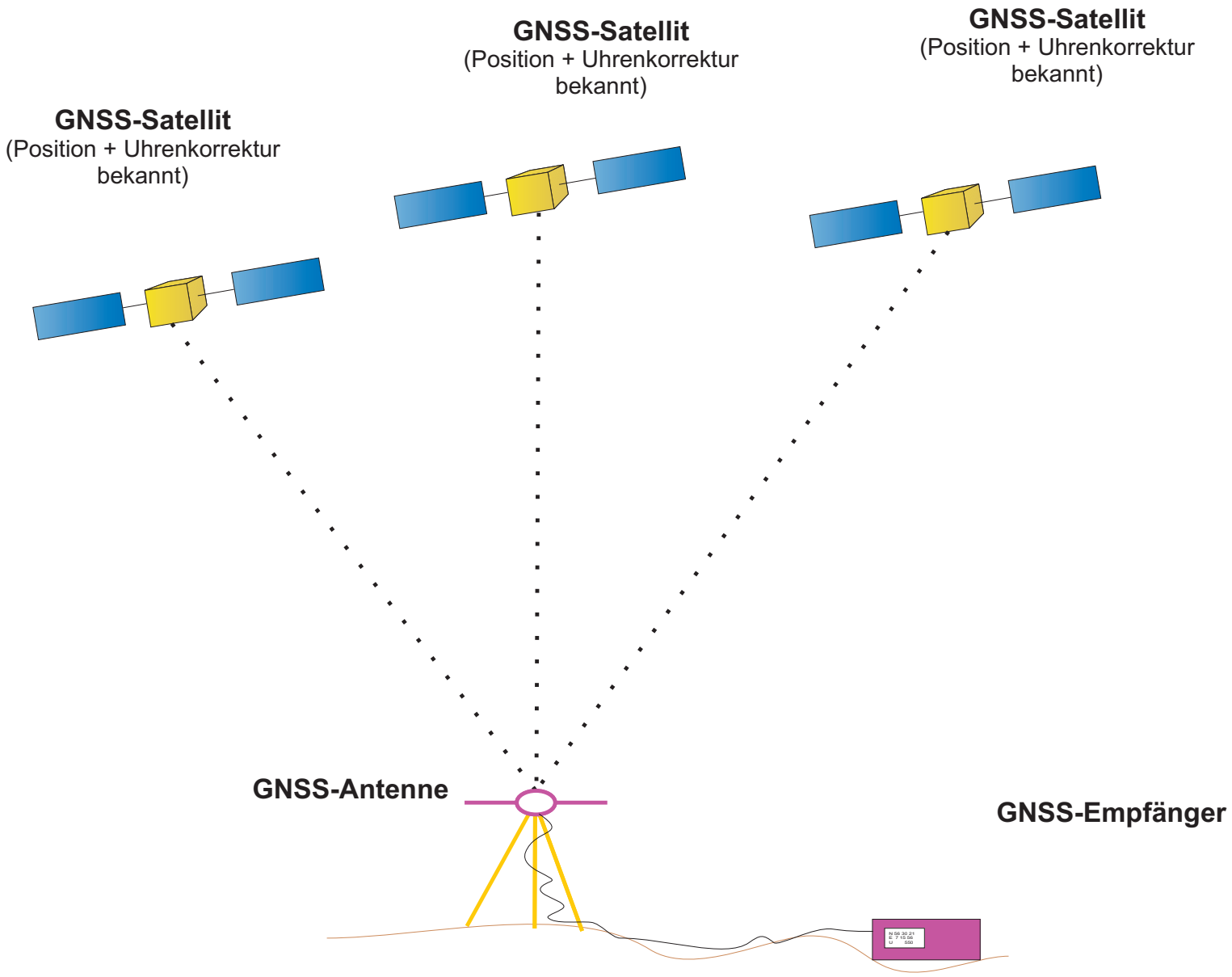
Navigation mit Satelliten



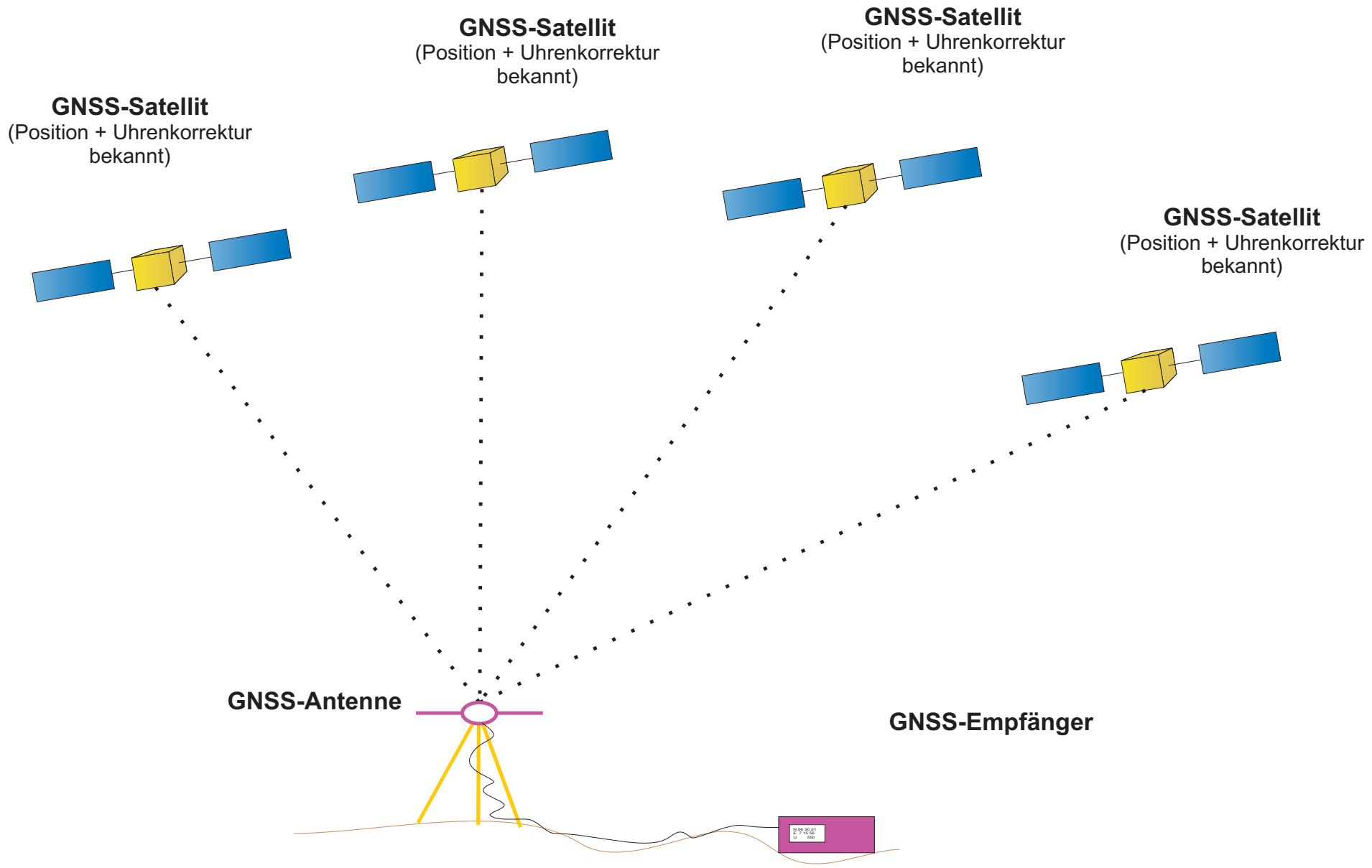
Navigation mit Satelliten



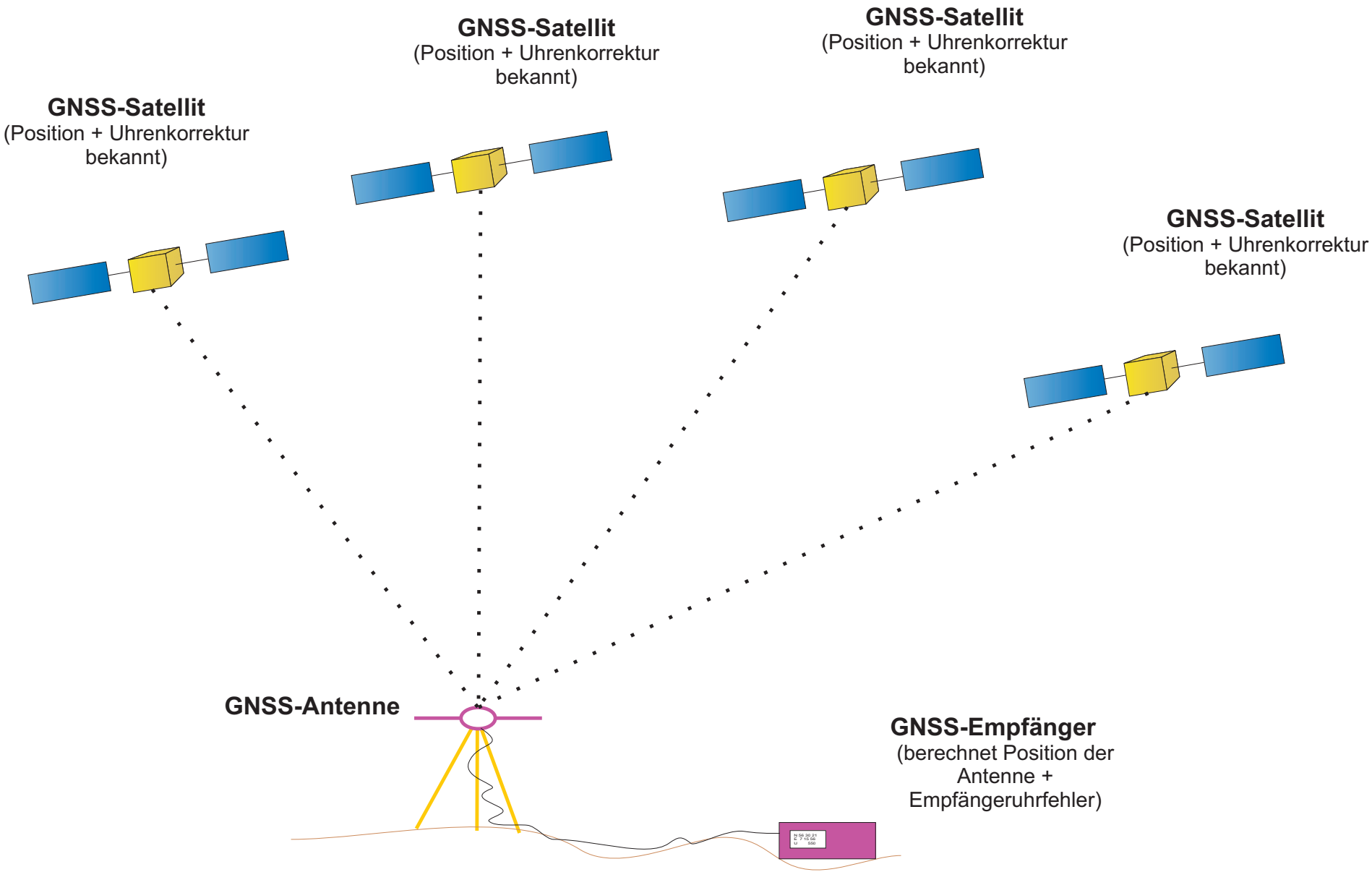
Navigation mit Satelliten



Navigation mit Satelliten



Navigation mit Satelliten



Inhaltsverzeichnis

- GPS eines der GNSS
  - GNSS: Globale Satellitennavigationssystems
  - Welche GNSS gibt es heute bzw. wird es in Zukunft geben?

Inhaltsverzeichnis

- GPS eines der GNSS
  - GNSS: Globale Satellitennavigationssystems
  - Welche GNSS gibt es heute bzw. wird es in Zukunft geben?
- Beispiele für Anwendungen
  - Beispiele aus der Landes- und Ingenieurvermessung
  - Beispiele aus der Geodynamik
  - Beispiele aus anderen Wissenschaftsgebieten

Inhaltsverzeichnis

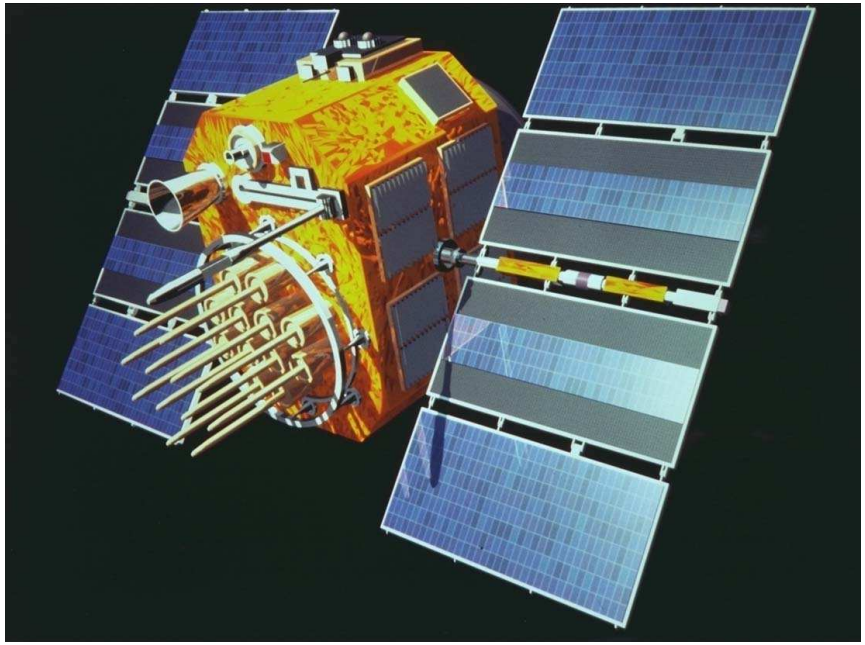
- GPS eines der GNSS
  - GNSS: Globale Satellitennavigationssystems
  - Welche GNSS gibt es heute bzw. wird es in Zukunft geben?
- Beispiele für Anwendungen
  - Beispiele aus der Landes- und Ingenieurvermessung
  - Beispiele aus der Geodynamik
  - Beispiele aus anderen Wissenschaftsgebieten
- International GNSS Service
  - Was ist der IGS?
  - Wie funktioniert der IGS?
  - Beiträge der Universität Bern zum IGS

Inhaltsverzeichnis

- GPS eines der GNSS
  - GNSS: Globale Satellitennavigationssystems
  - Welche GNSS gibt es heute bzw. wird es in Zukunft geben?
- Beispiele für Anwendungen
  - Beispiele aus der Landes- und Ingenieurvermessung
  - Beispiele aus der Geodynamik
  - Beispiele aus anderen Wissenschaftsgebieten
- International GNSS Service
  - Was ist der IGS?
  - Wie funktioniert der IGS?
  - Beiträge der Universität Bern zum IGS
- Bewegungen/Deformationen der Erdkruste
  - Welche weiteren Effekte kann man mit GNSS messen?

GPS: Global Positioning System

- zur Zeit 32 aktive Satelliten in 6 Bahnebenen
- etwa 20 000 km über der Erdoberfläche
- Umlaufszeit von $11^{\mathrm{h}}\ 58^{\mathrm{m}}$



Block–II Satellit

Block–IIR–M Satellit

ГЛОНАСС

- zur Zeit 21 aktive Satelliten in 3 Bahnebenen
- etwa 19 000 km über der Erdoberfläche
- Umlaufszeit von $11^{\mathrm{h}}\ 16^{\mathrm{m}}$

GLONASS–M Satellit

Startvorbereitung
(drei Satelliten)

Глобальная навигационная спутниковая система

- zur Zeit 21 aktive Satelliten in 3 Bahnebenen
- etwa 19 000 km über der Erdoberfläche
- Umlaufszeit von $11^{\mathrm{h}}\ 16^{\mathrm{m}}$

GLONASS–M Satellit

Startvorbereitung
(drei Satelliten)

GLONASS: Globales Satellitennavigationssystem

- zur Zeit 21 aktive Satelliten in 3 Bahnebenen
- etwa 19 000 km über der Erdoberfläche
- Umlaufszeit von $11^{\mathrm{h}}\ 16^{\mathrm{m}}$

GLONASS–M Satellit

Startvorbereitung
(drei Satelliten)

Komponenten eines GNSS

Raumsegment
Die Satelliten des Systems.

Komponenten eines GNSS

Raumsegment
Die Satelliten des Systems.

Kontrollsegment
Einrichtungen des Systembetreibers zur Überwachung des Systems.

Komponenten eines GNSS

Raumsegment
Die Satelliten des Systems.

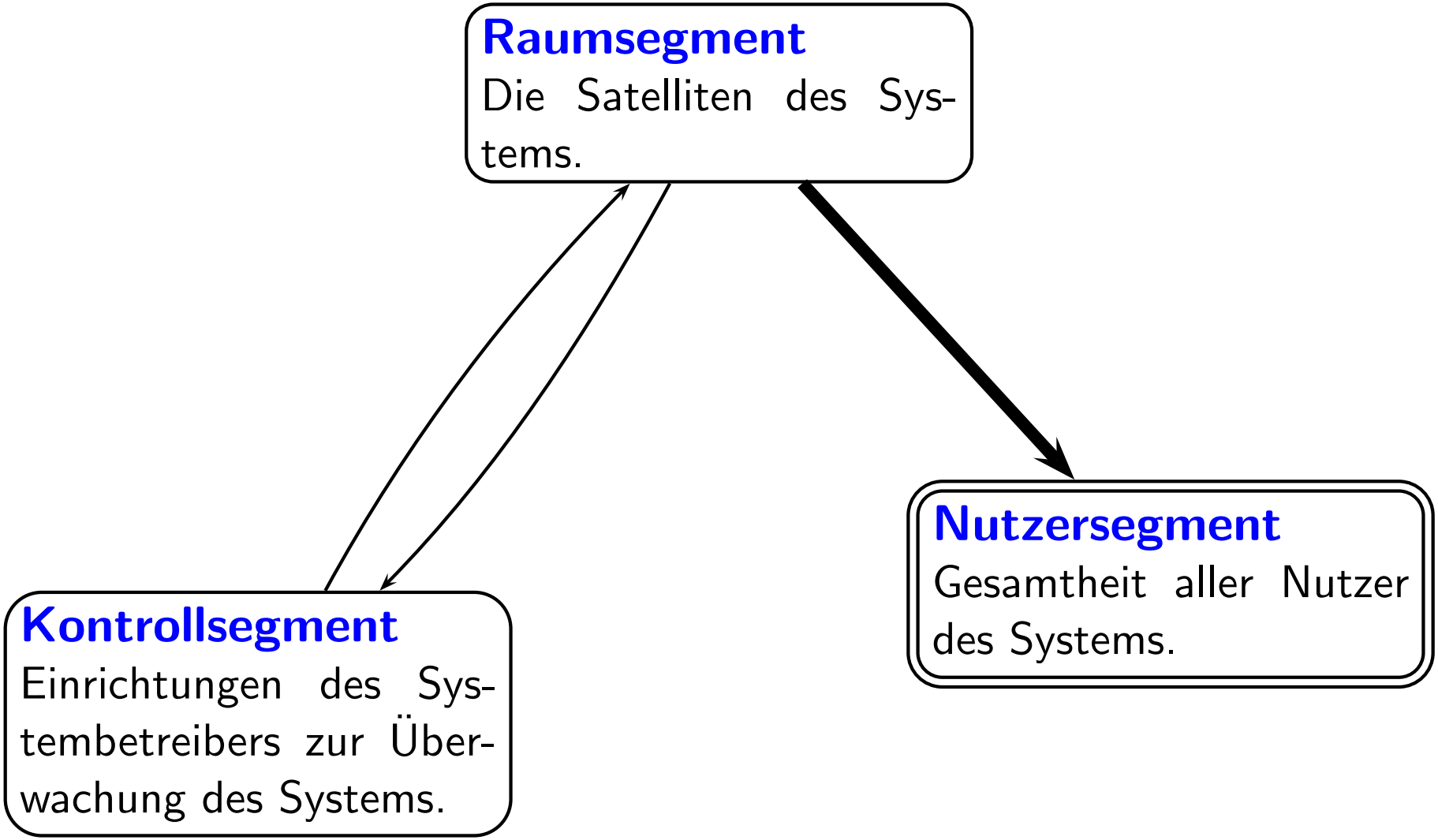
Kontrollsegment
Einrichtungen des Systembetreibers zur Überwachung des Systems.

Komponenten eines GNSS

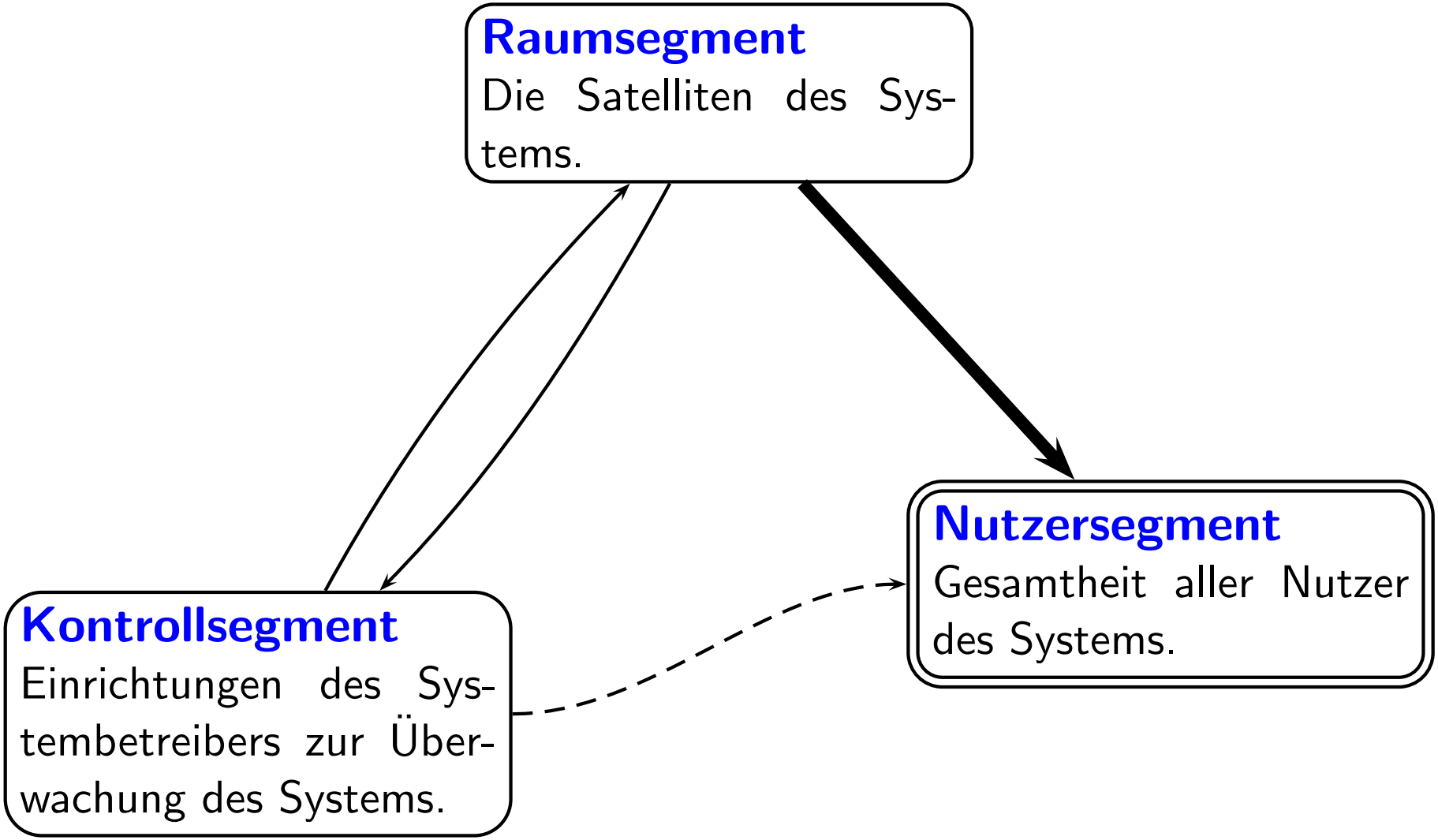
Raumsegment
Die Satelliten des Systems.

Kontrollsegment
Einrichtungen des Systembetreibers zur Überwachung des Systems.

Komponenten eines GNSS

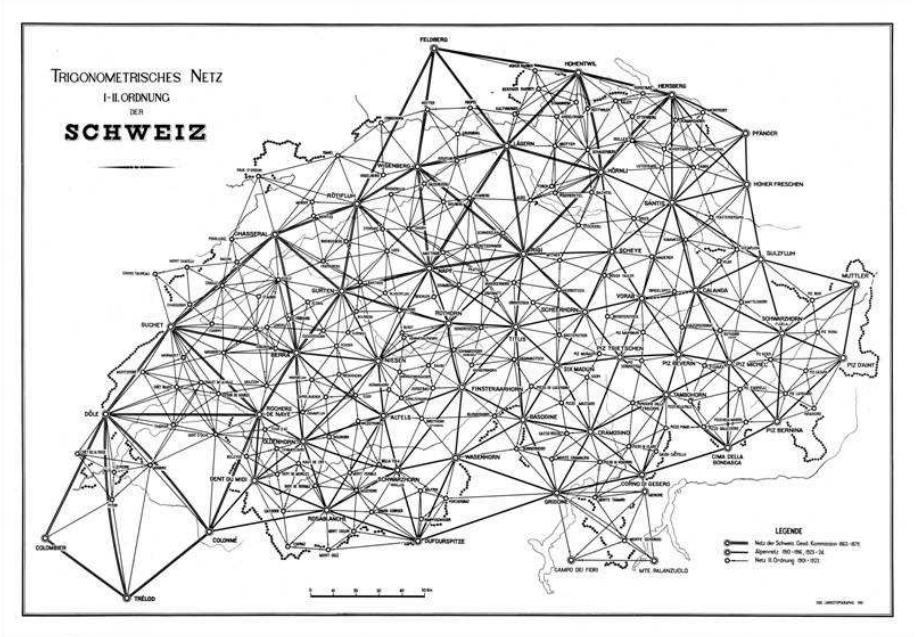


Komponenten eines GNSS



Landesvermessung

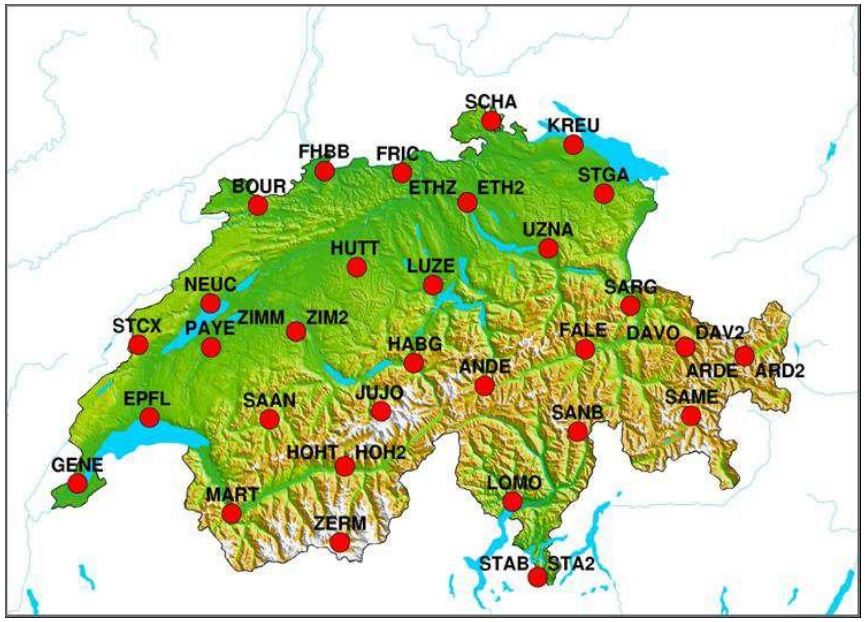
Geodätische Grundlage für alle Vermessungsarbeiten und zur Herstellung topographischer Karten.



damals: Triangulation mit Hilfe von Zielpyramiden
(Metergenauigkeit für die Schweiz)

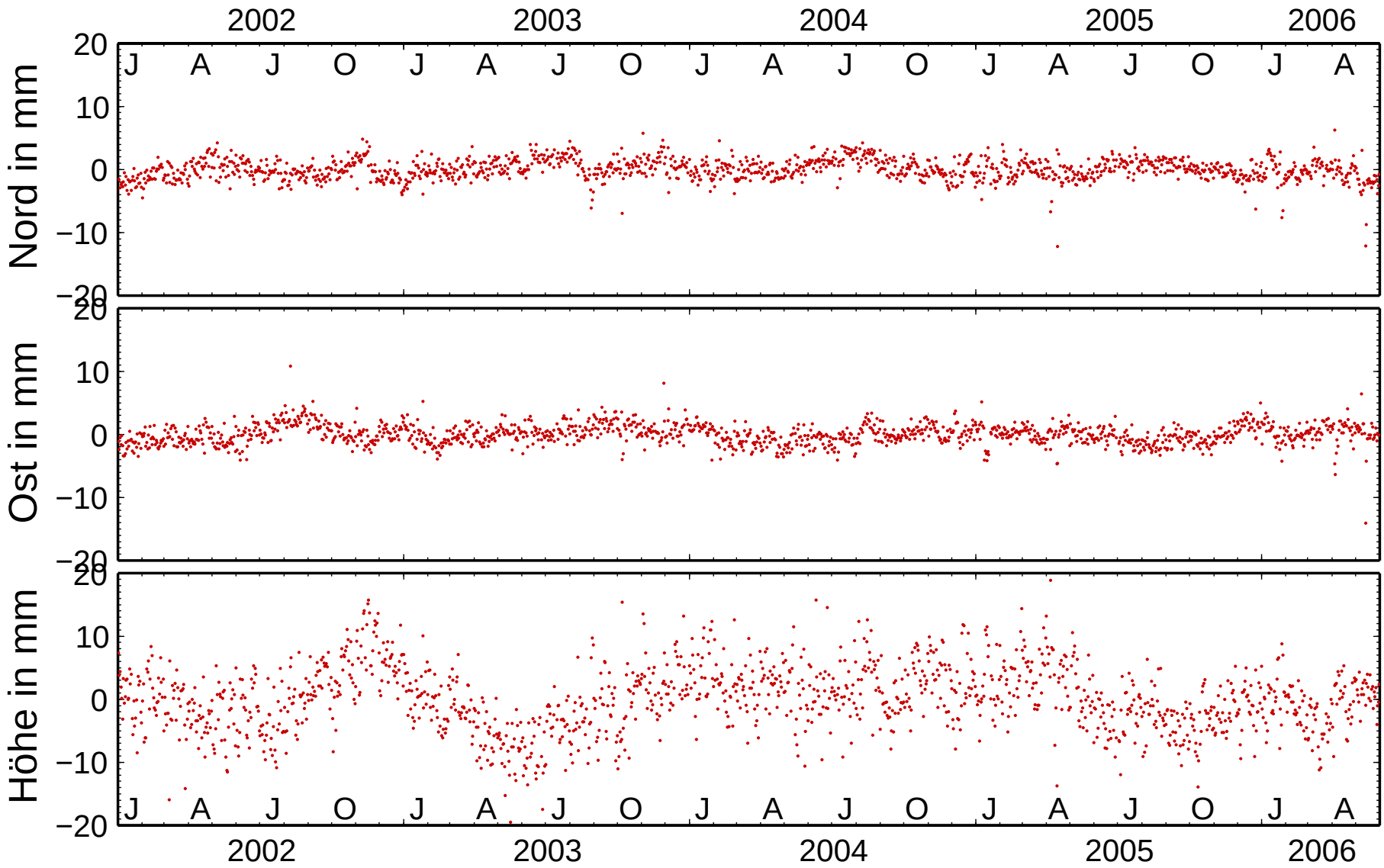
Landesvermessung

Geodätische Grundlage für alle Vermessungsarbeiten und zur Herstellung topographischer Karten.



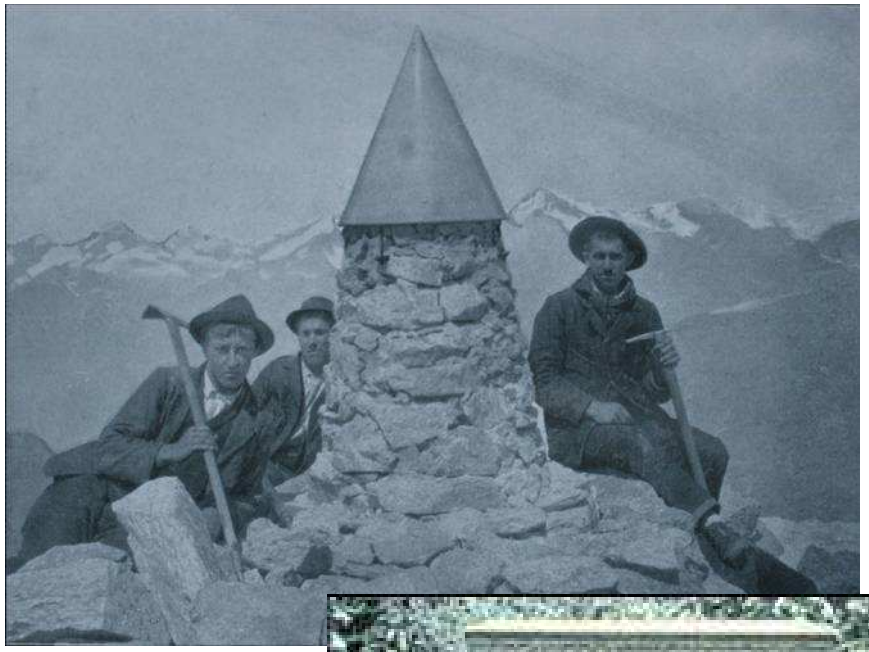
heute: GNSS–Permanentnetz (AGNES)
mit Verdichtungspunkten
(Millimetergenauigkeit für die Schweiz)

Landesvermessung



Vermessung für den Tunnelbau

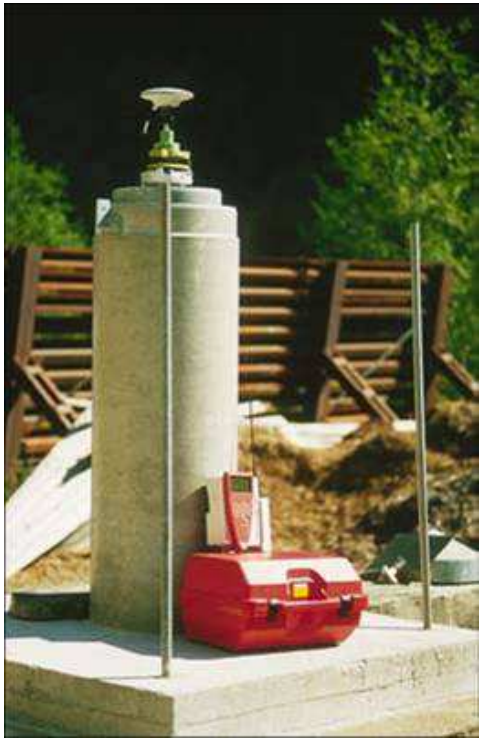
Vor Beginn des Tunnelbaus müssen die „Portalnetze“ miteinander verbunden werden.

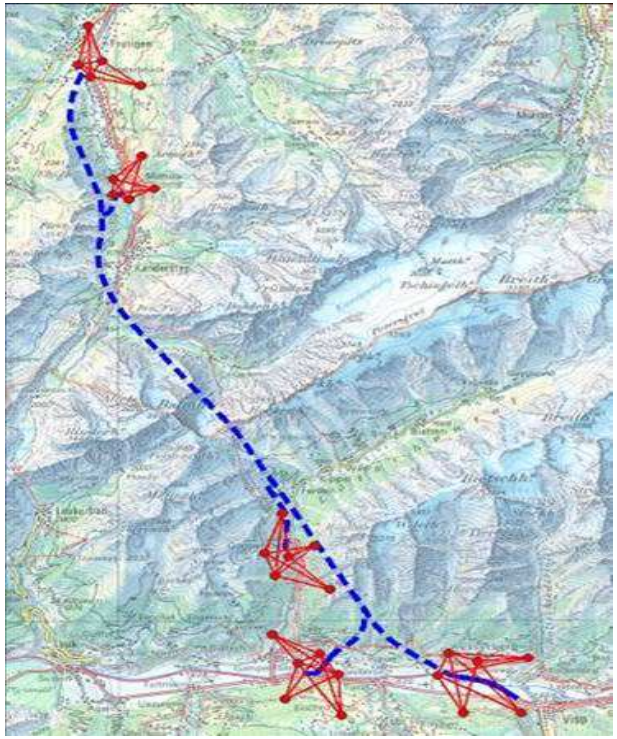


damals: mehrmonatige Triangulationsarbeiten

Vermessung für den Tunnelbau

Vor Beginn des Tunnelbaus müssen die „Portalnetze“ miteinander verbunden werden.





heute: wenige Stunden GNSS–Messungen genügen

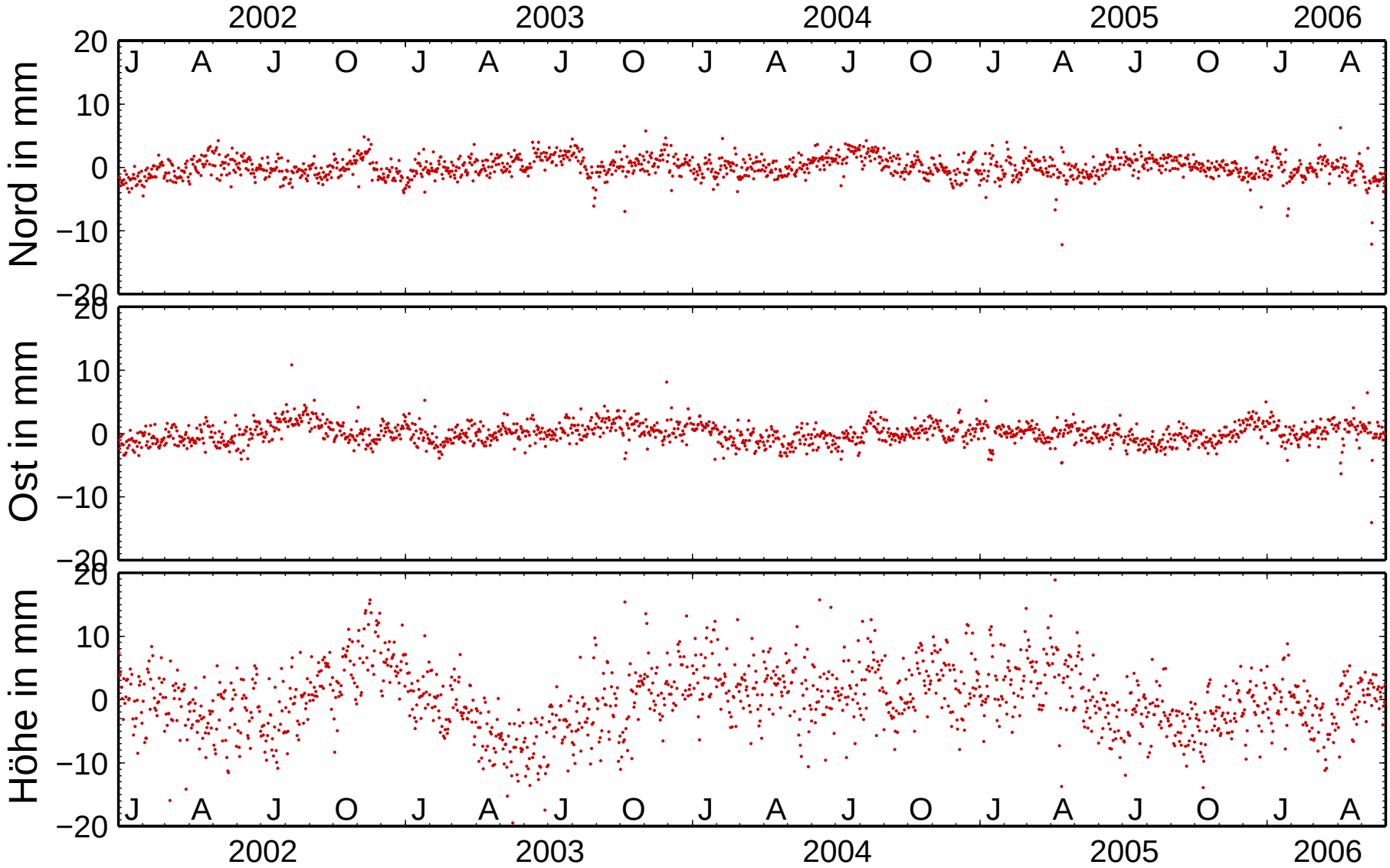
Bauwerksüberwachungsmessungen

Überwachung von Bauwerken ist ebenfalls eine typische Aufgabe der Ingenieurgeodäsie

heute: in Echtzeit und nahezu vollautomatisch möglich

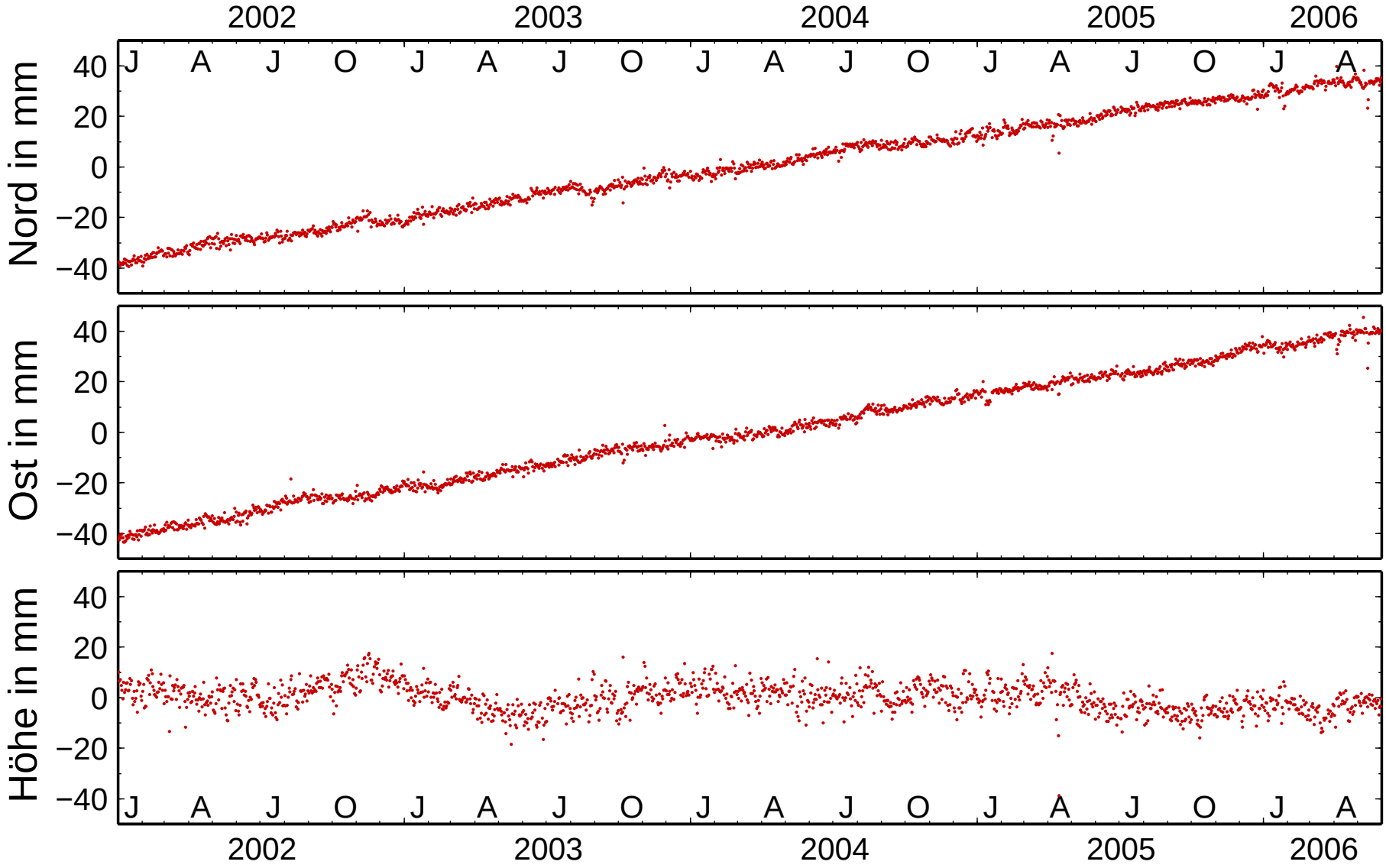
Geodynamik

Koordinaten aus Tageslösungen für Zimmerwald



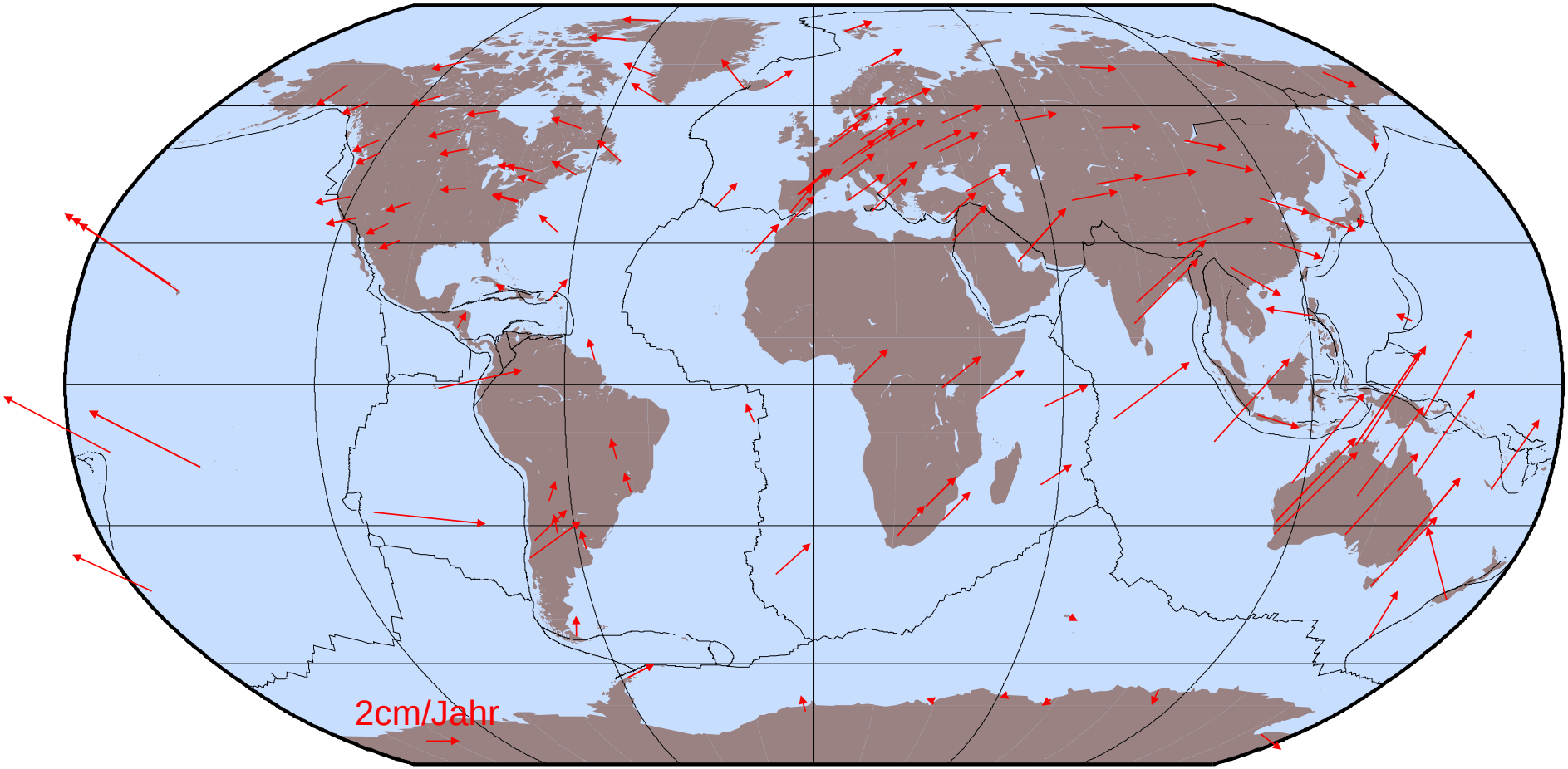
Geodynamik

Koordinaten aus Tageslösungen für Zimmerwald



Plattentektonik

Stationsbewegungen aus mehreren Jahren GNSS–Messungen



Plattentektonik

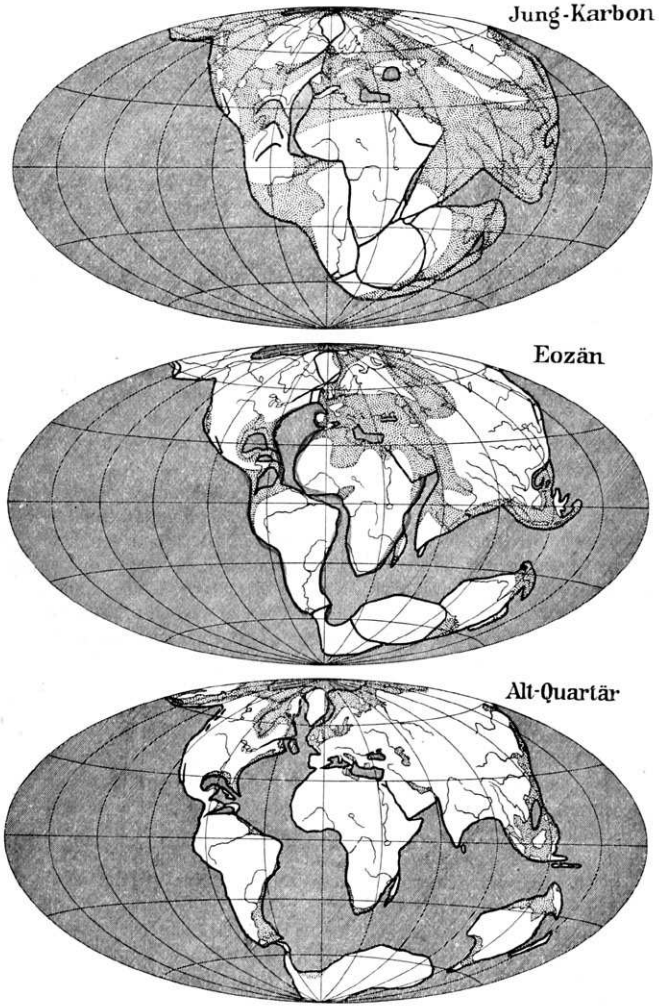
Alfred Wegener (1880-1930)

Wenn ich auch nur durch die übereinstimmenden Küstenkonturen darauf gekommen bin, so muß die Beweisführung natürlich von den Beobachtungsergebnissen der Geologie ausgehen.

Alfred Wegener: Brief vom 6. November 1911 an seinen Mentor Wladimir Köppen

Plattentektonik

Alfred Wegener (1880-1930)



Rekonstruktionen der Erdkarte nach der Verschiebungstheorie für drei Zeiten.

Schraffiert: Tiefsee; punktiert: Flachsee; heutige Konturen und Flüsse nur zum Erkennen. Gradnetz willkürlich (das heutige von Afrika).

- 11. März 2011 05:46:23 UTC

- 11. März 2011 05:46:23 UTC
- Japan

- 11. März 2011 05:46:23 UTC
- Japan
- 24.4 km östlich der Küste von Honshu

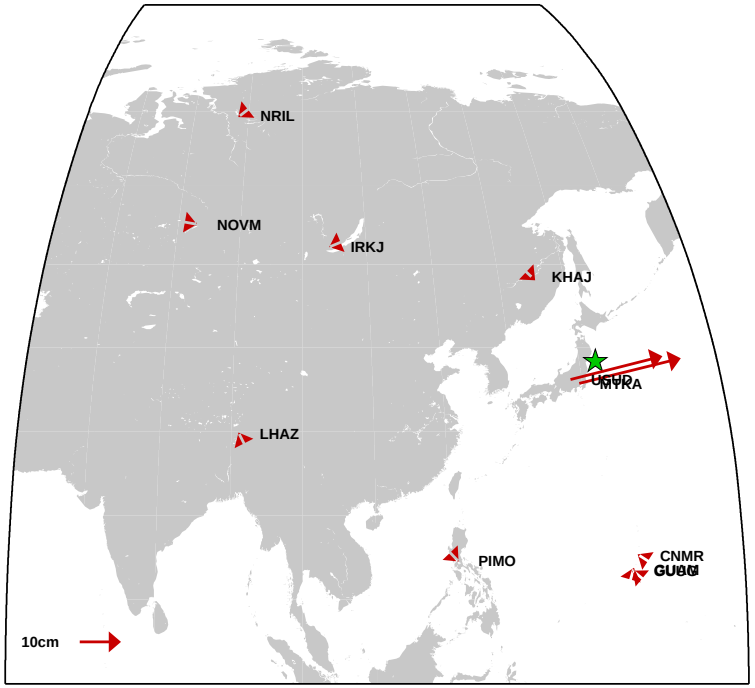
Erdbeben in Japan

- 11. März 2011 05:46:23 UTC
- Japan
- 24.4 km östlich der Küste von Honshu
- Erdbeben der Magnitude 9.0
  (siehe USGS http://earthquake.usgs.gov)

Erdbeben in Japan

- 11. März 2011 05:46:23 UTC
- Japan
- 24.4 km östlich der Küste von Honshu
- Erdbeben der Magnitude 9.0
  (siehe USGS http://earthquake.usgs.gov)

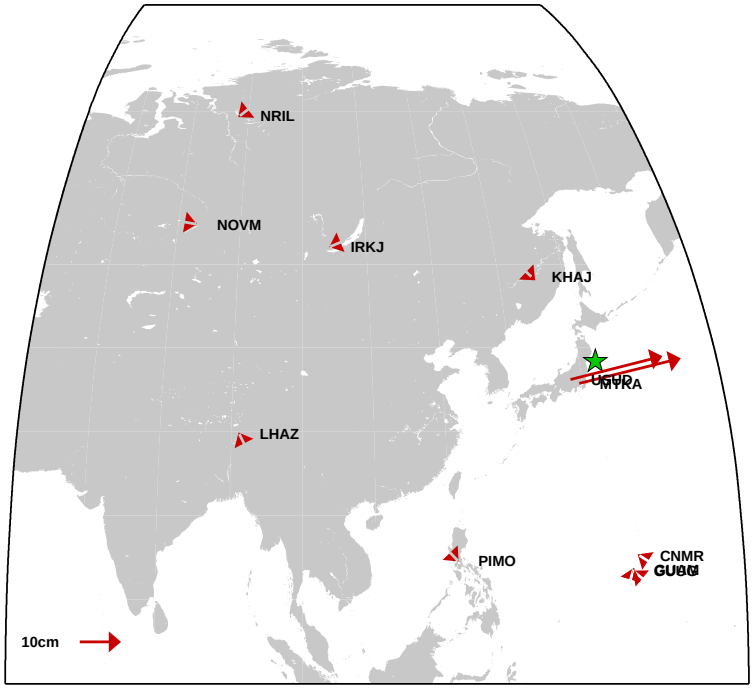
Erdbeben in Japan



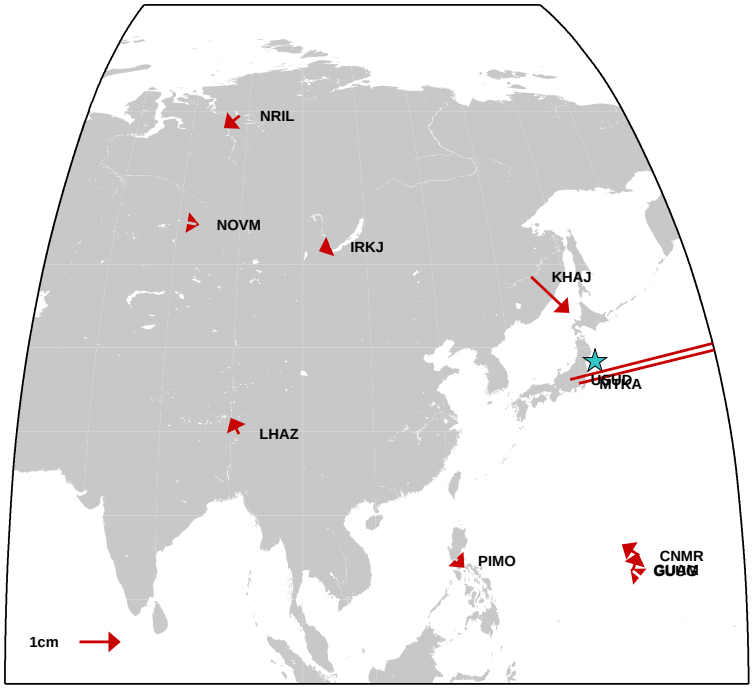
GMT 2011 Mar 14 08:49:25

Differenz der Koordinatenlösungen nach und vor dem Erdbeben

Erdbeben in Japan



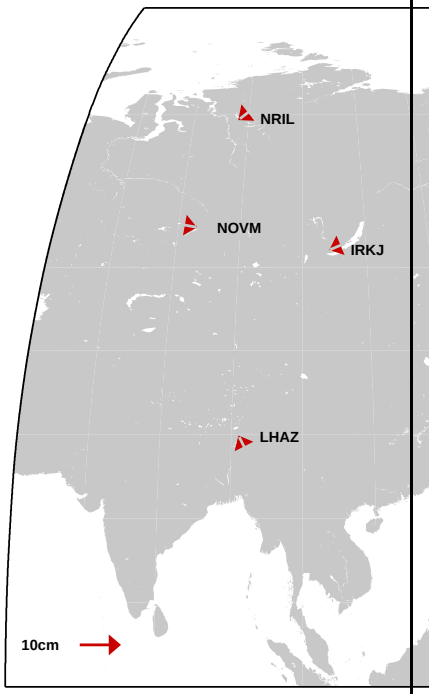
2011 Mar 14 08:49:25



2011 Mar 14 09:51:04

Differenz der Koordinatenlösungen nach und vor dem Erdbeben

Erdbeben in Ja



2011 Mar 14 08:49:25

Differenz der Koordinate

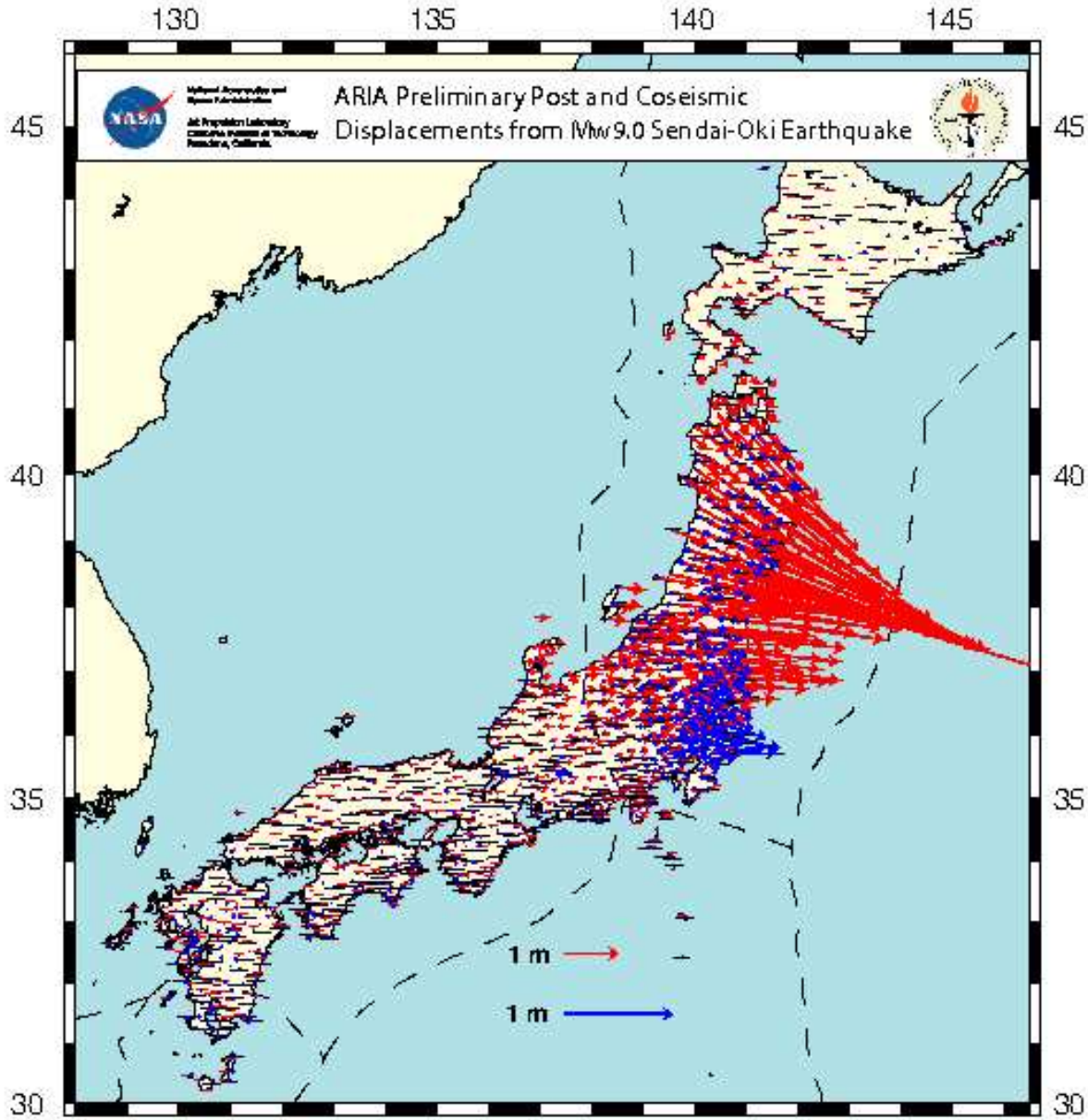
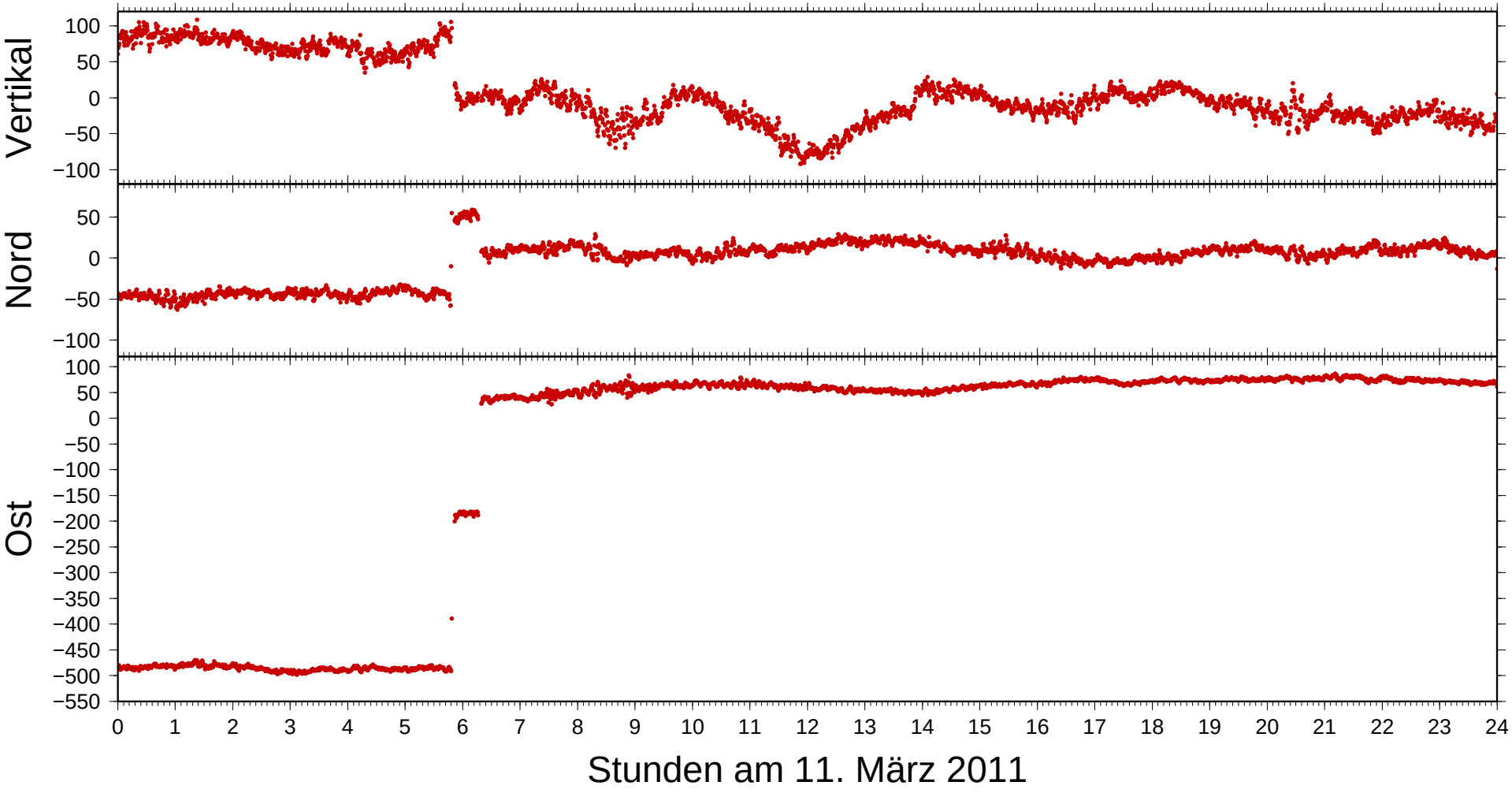


Figure shows horizontal displacements based on ARIA verion 0.3 position estimates for GEONET stations. Coseismic displacement is shown in red, and first 8 hours of postseismic motion is shown in blue, including motion caused by aftershocks. Bars at end of vector show 95% error estimate. Solutions courtesy of ARIA team at JPL and Caltech (email aria@jpl.nasa.gov or aria@caltech.edu). All original GEONET RINEX data provided to Caltech by the Geospatial Information Authority (GSI) of Japan.

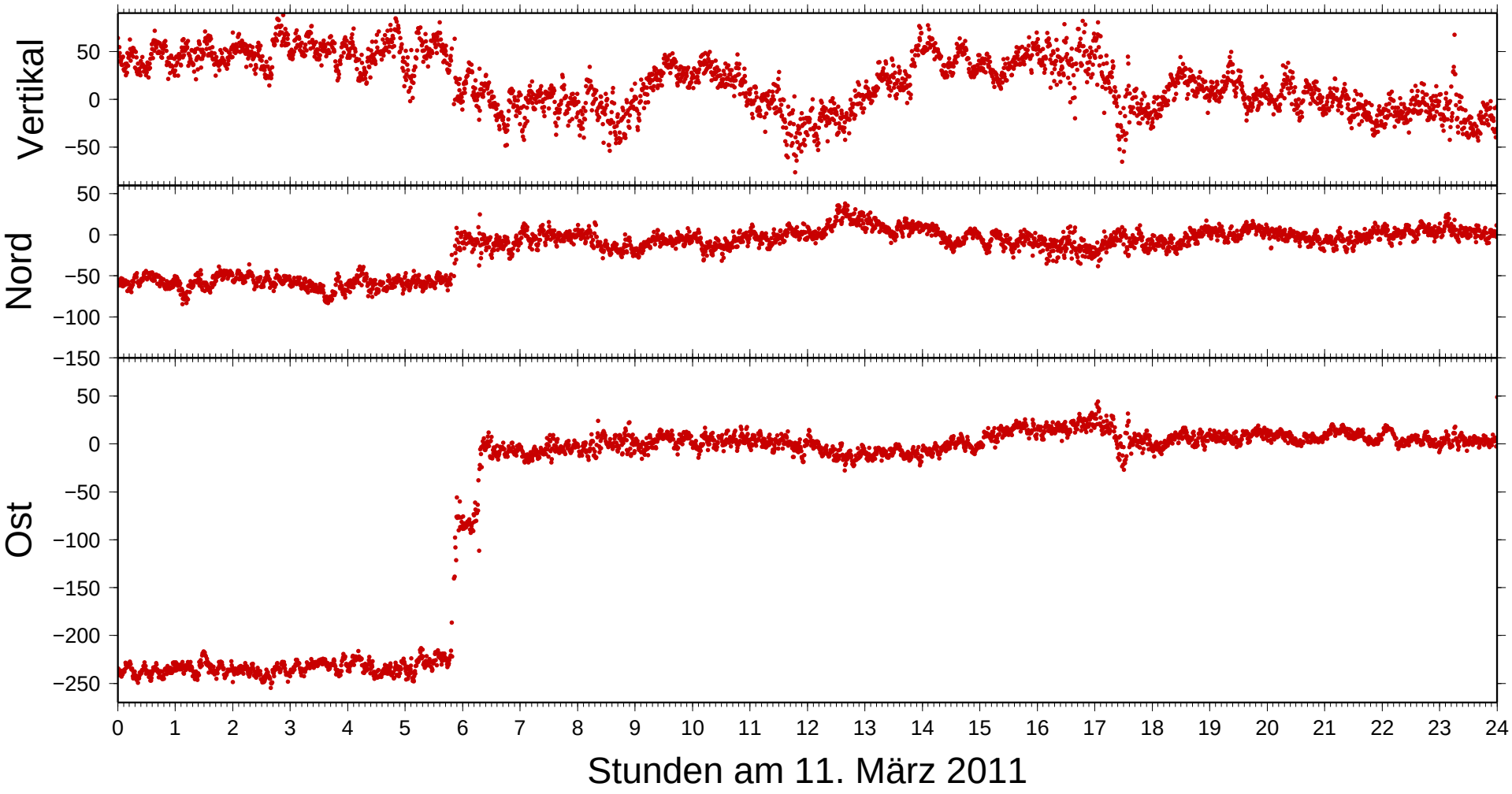
Erdbeben in Japan



Kinematische Koordinatenbestimmung für Tsukuba (318 km vom Epizentrum)

Angaben in mm

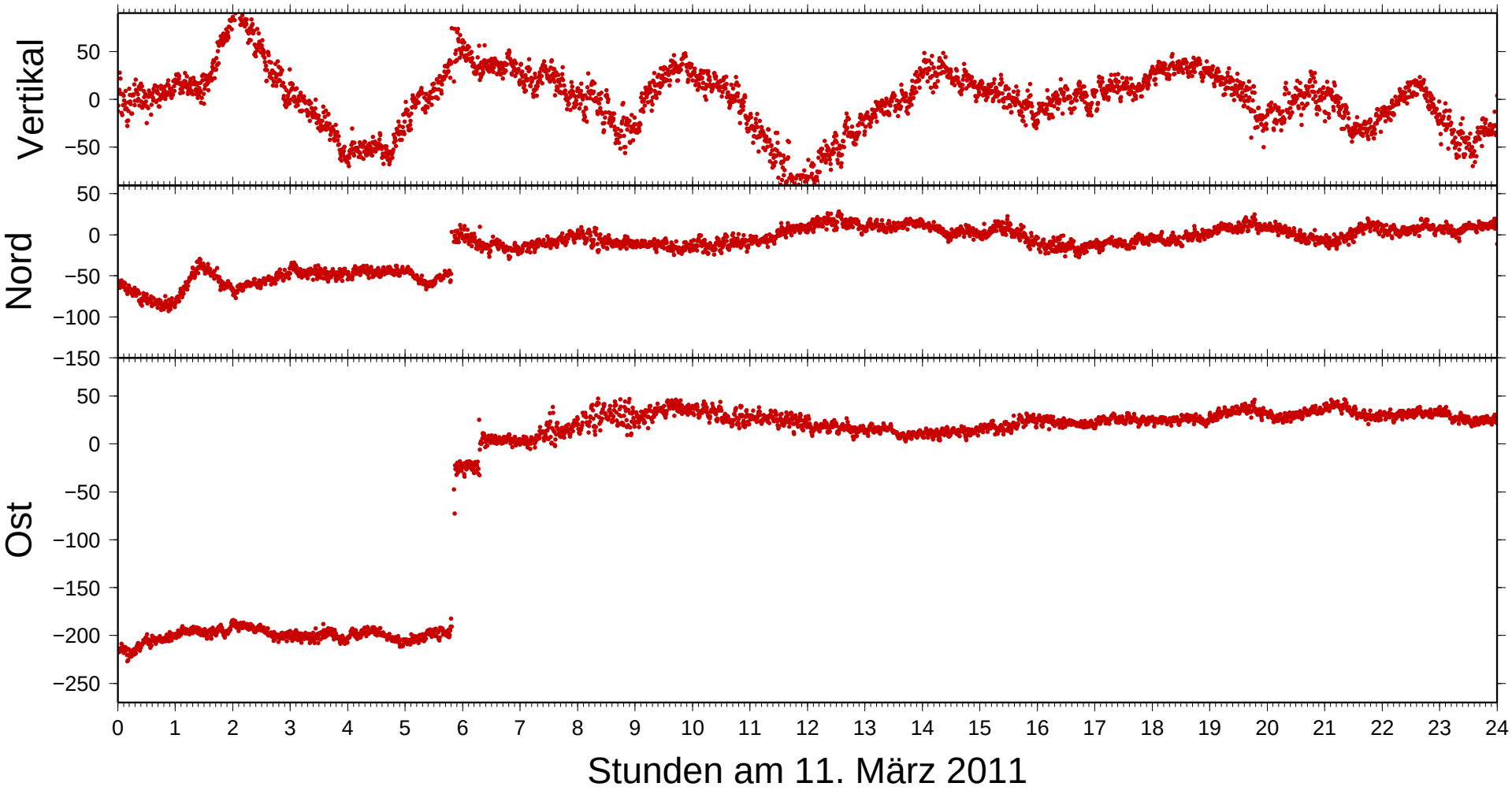
Erdbeben in Japan



Kinematische Koordinatenbestimmung für Mitaka (385 km vom Epizentrum)

Angaben in mm

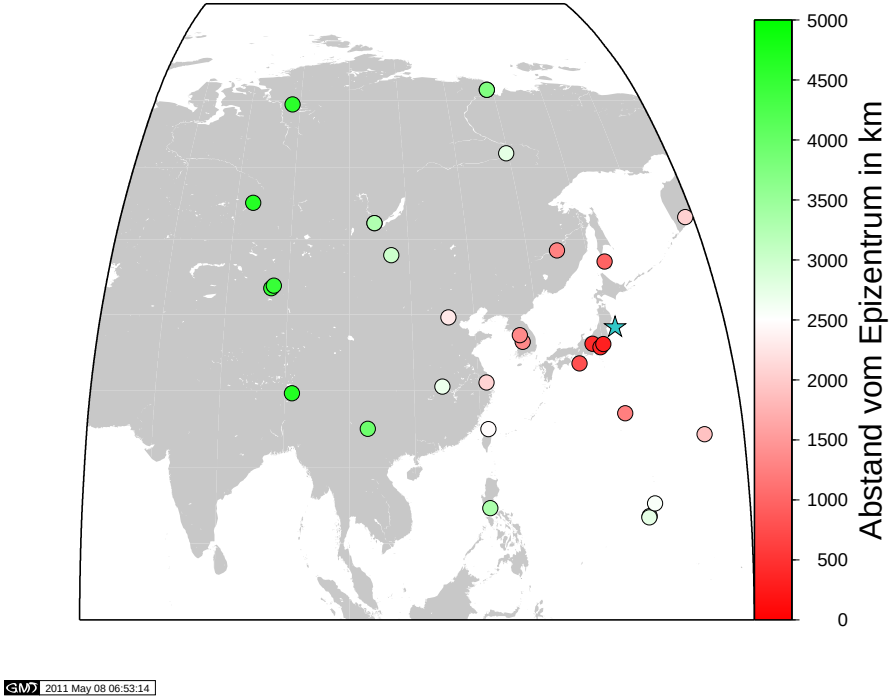
Erdbeben in Japan

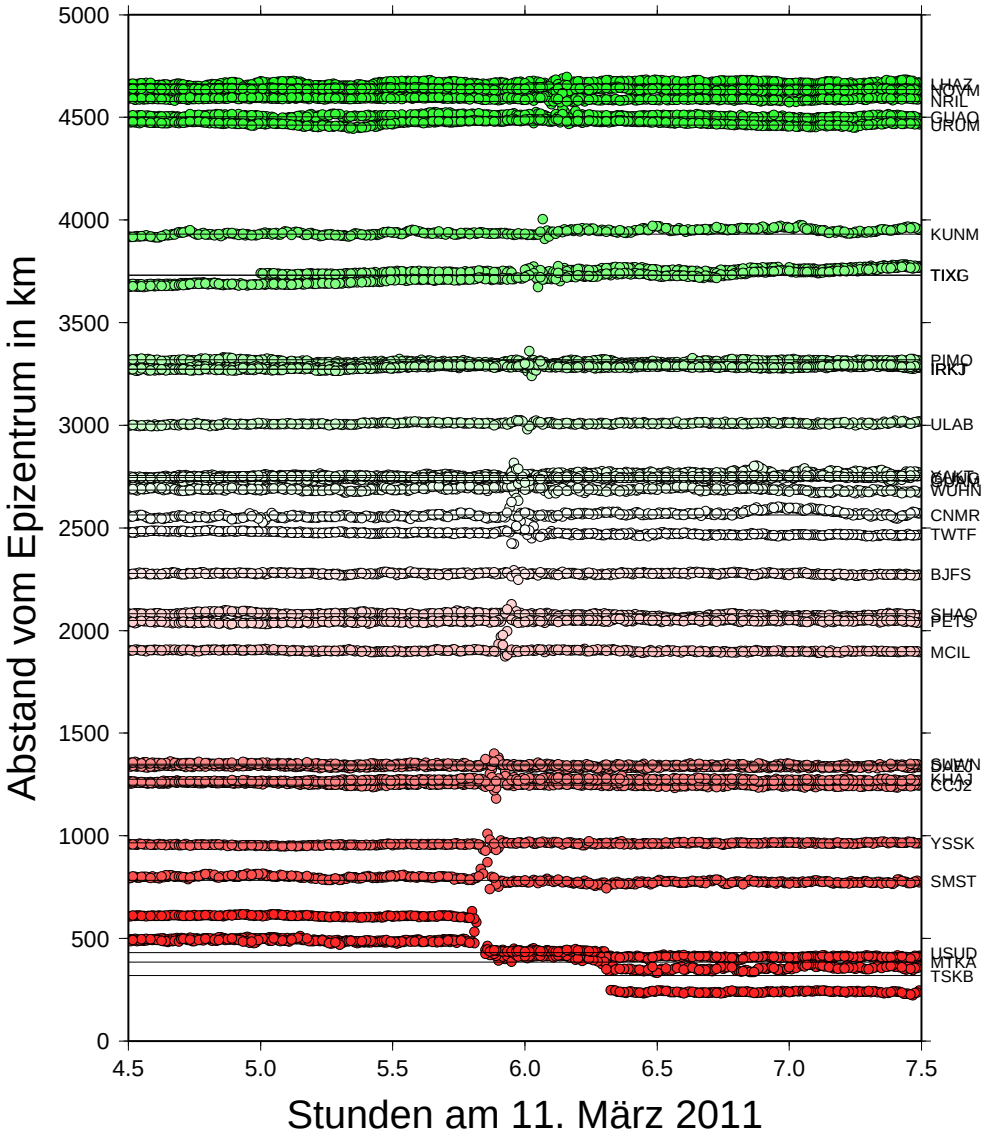


Kinematische Koordinatenbestimmung für Usuda (430 km vom Epizentrum)

Angaben in mm

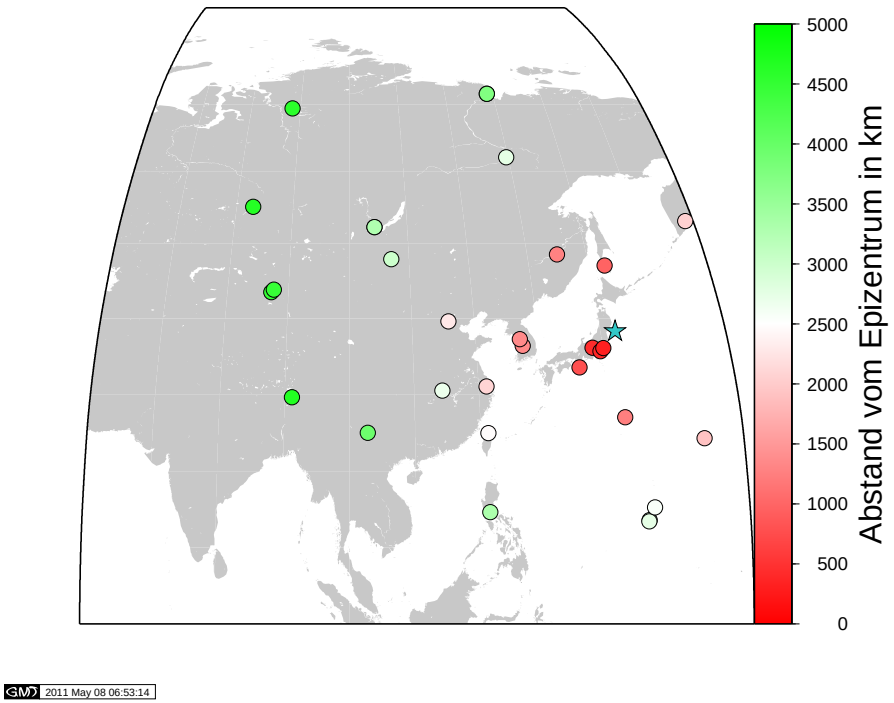
Erdbeben in Japan

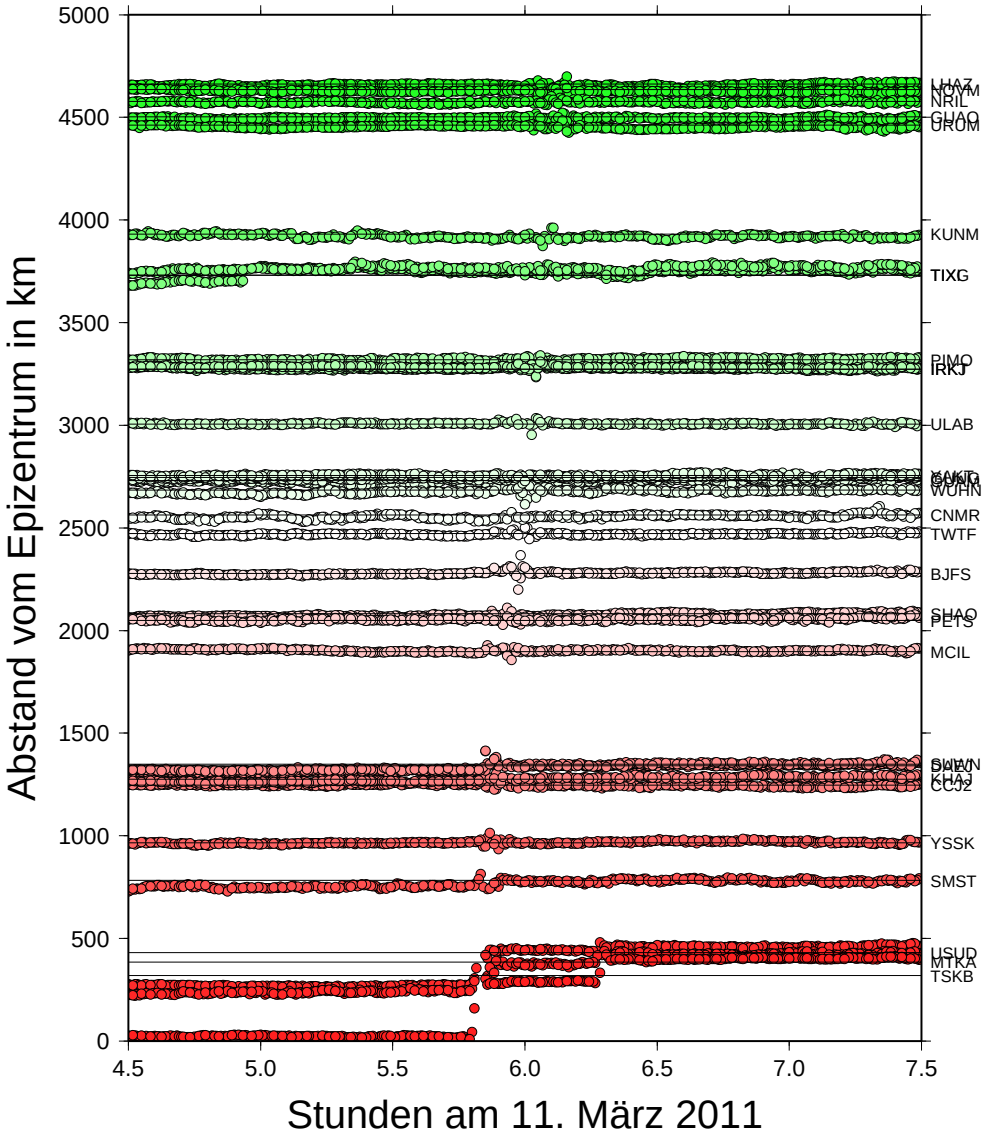




radial: Richtung von der Station zum Epizentrum

Erdbeben in Japan





quer: senkrecht zur Richtung
von der Station zum Epizentrum

Aber Achtung. . .

Aber Achtung. . .

. . . nicht alle Koordinatenänderungen haben geodynamischen Ursprung!

Aber Achtung. . .

. . . nicht alle Koordinatenänderungen haben geodynamischen Ursprung!

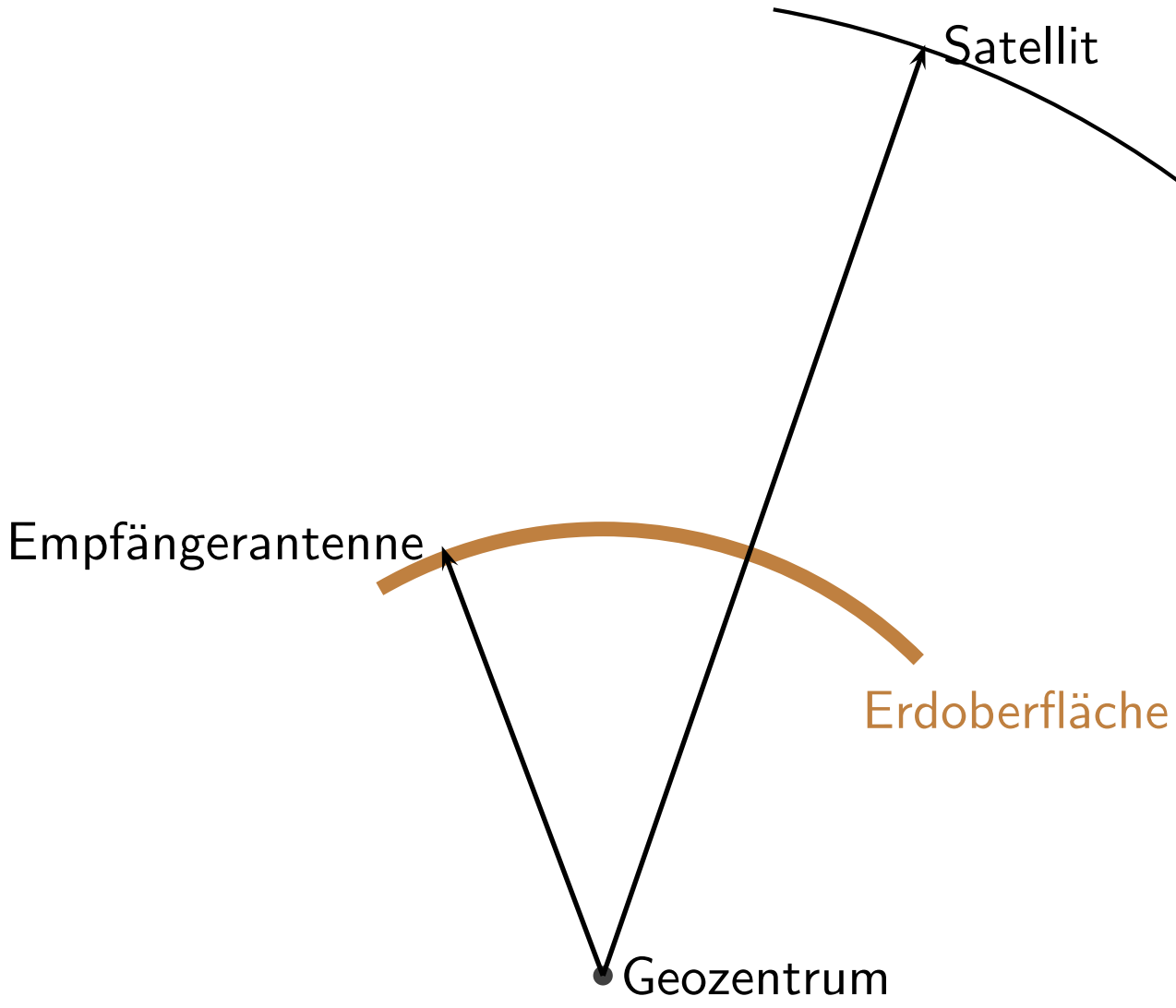
Ny Alesund (Spitzbergen, Norwegen)

Aber Achtung. . .

. . . nicht alle Koordinatenänderungen haben geodynamischen Ursprung!

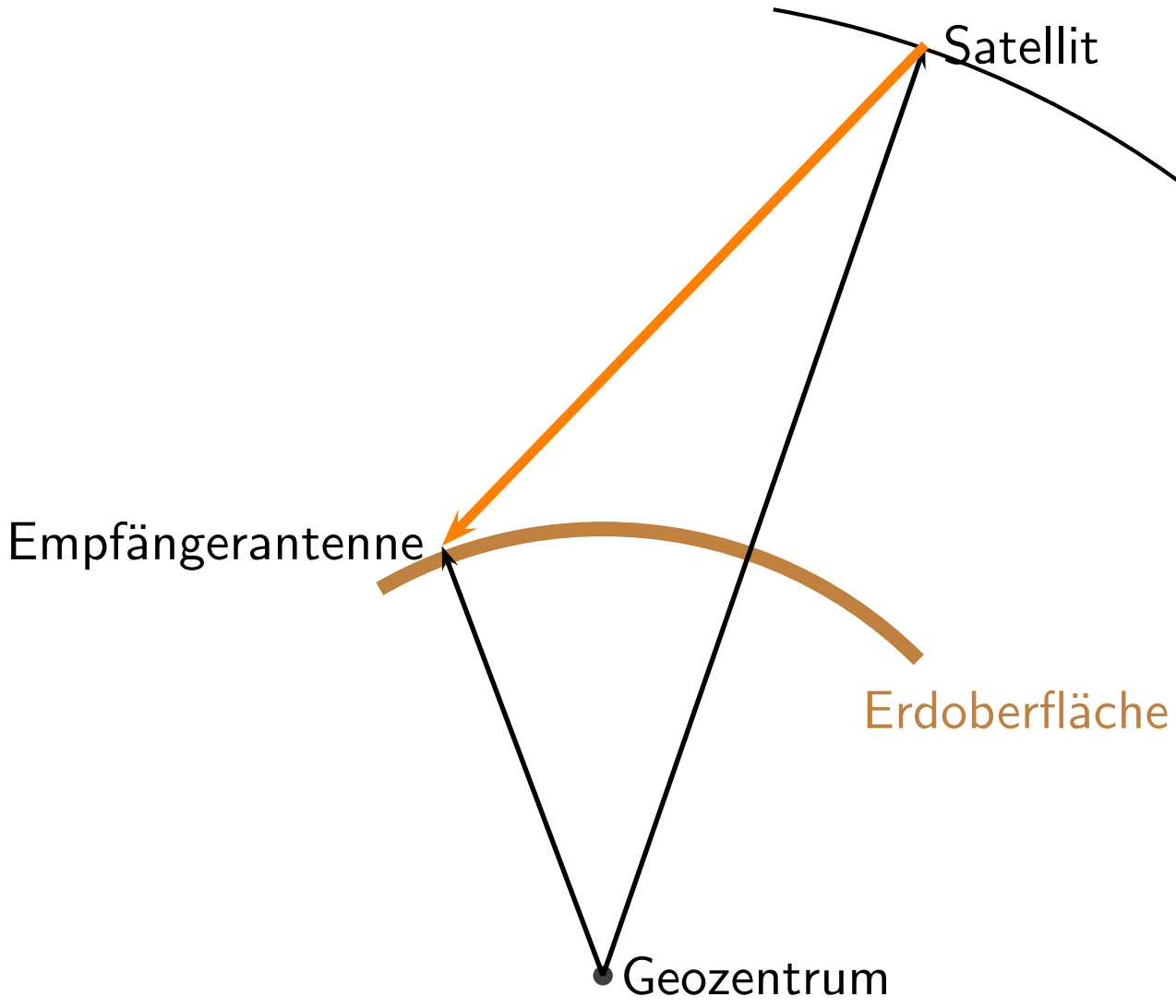
Morpeth (England, United Kingdom)

Signallaufzeitverzögerung in der Atmosphäre



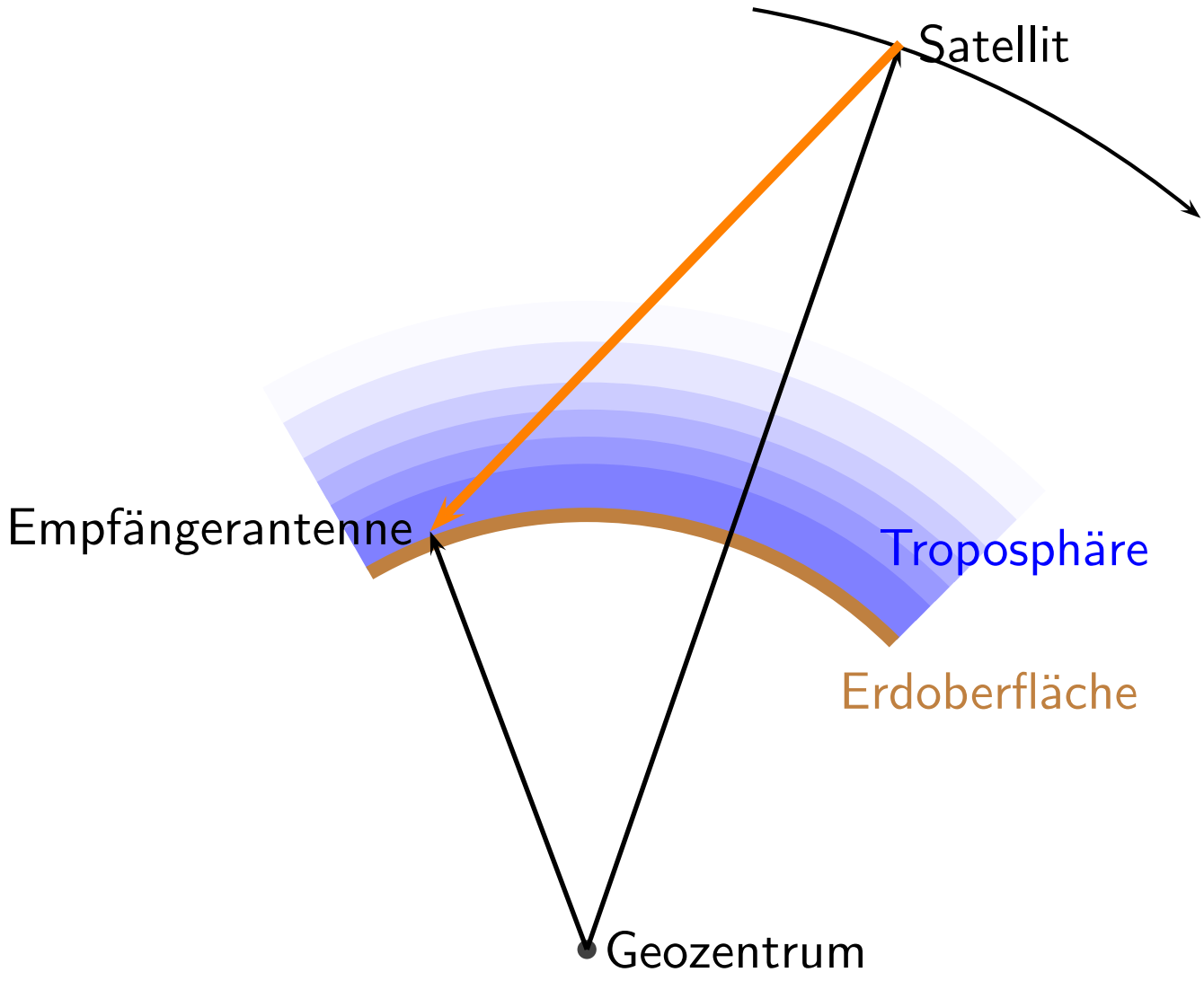
Nicht massstabsgetreu!

Signallaufzeitverzögerung in der Atmosphäre



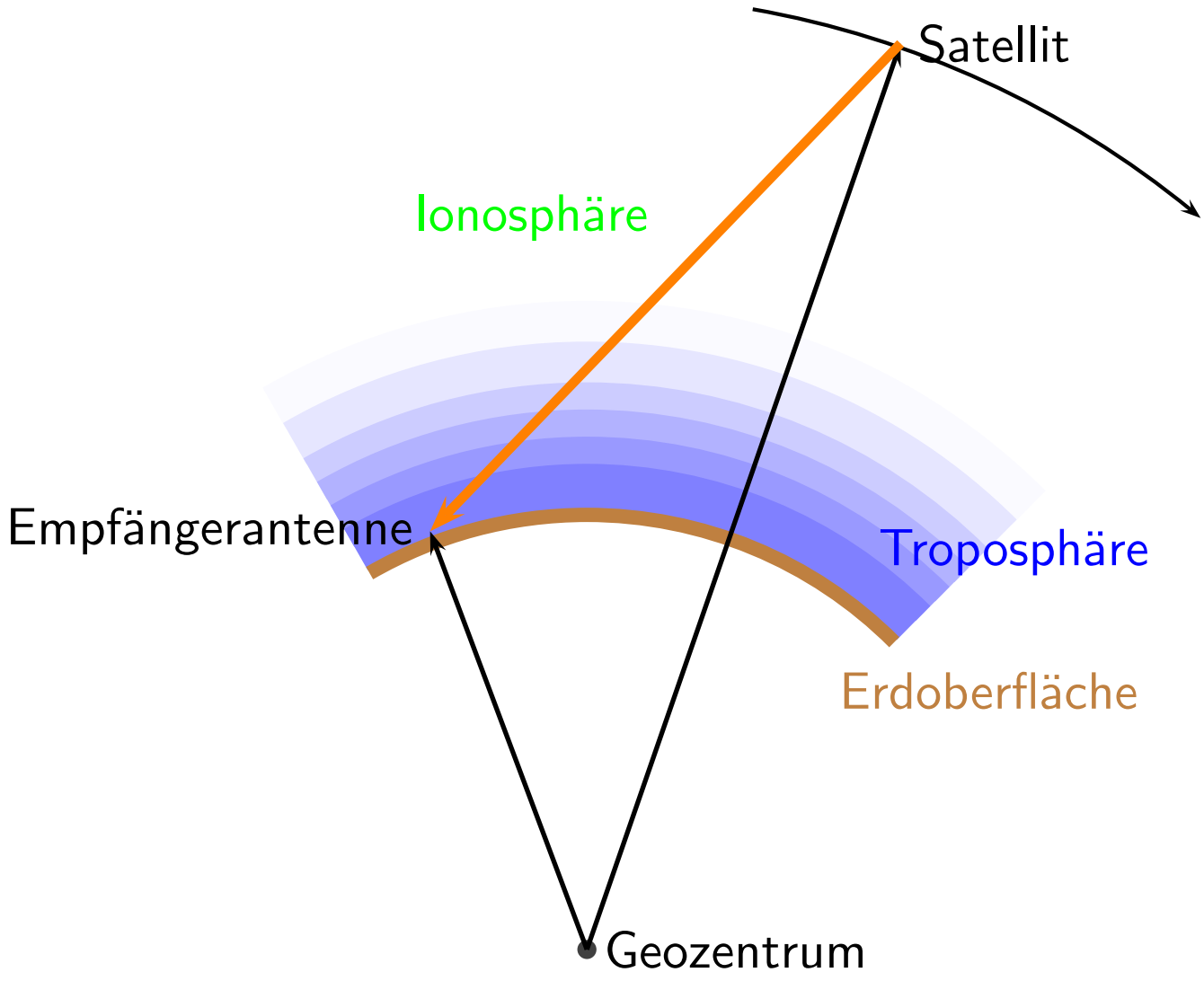
Nicht massstabsgetreu!

Signallaufzeitverzögerung in der Atmosphäre



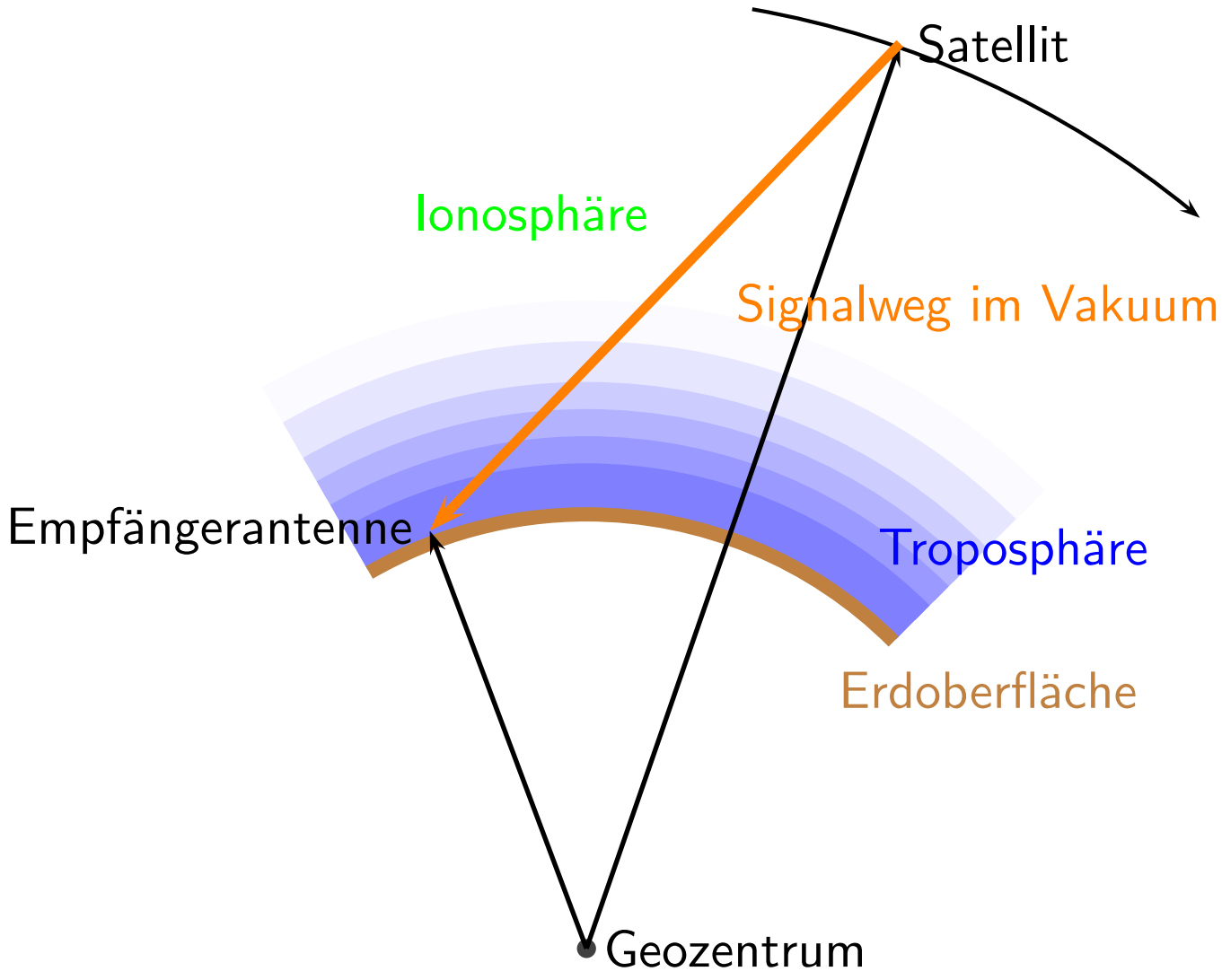
Nicht massstabsgetreu!

Signallaufzeitverzögerung in der Atmosphäre



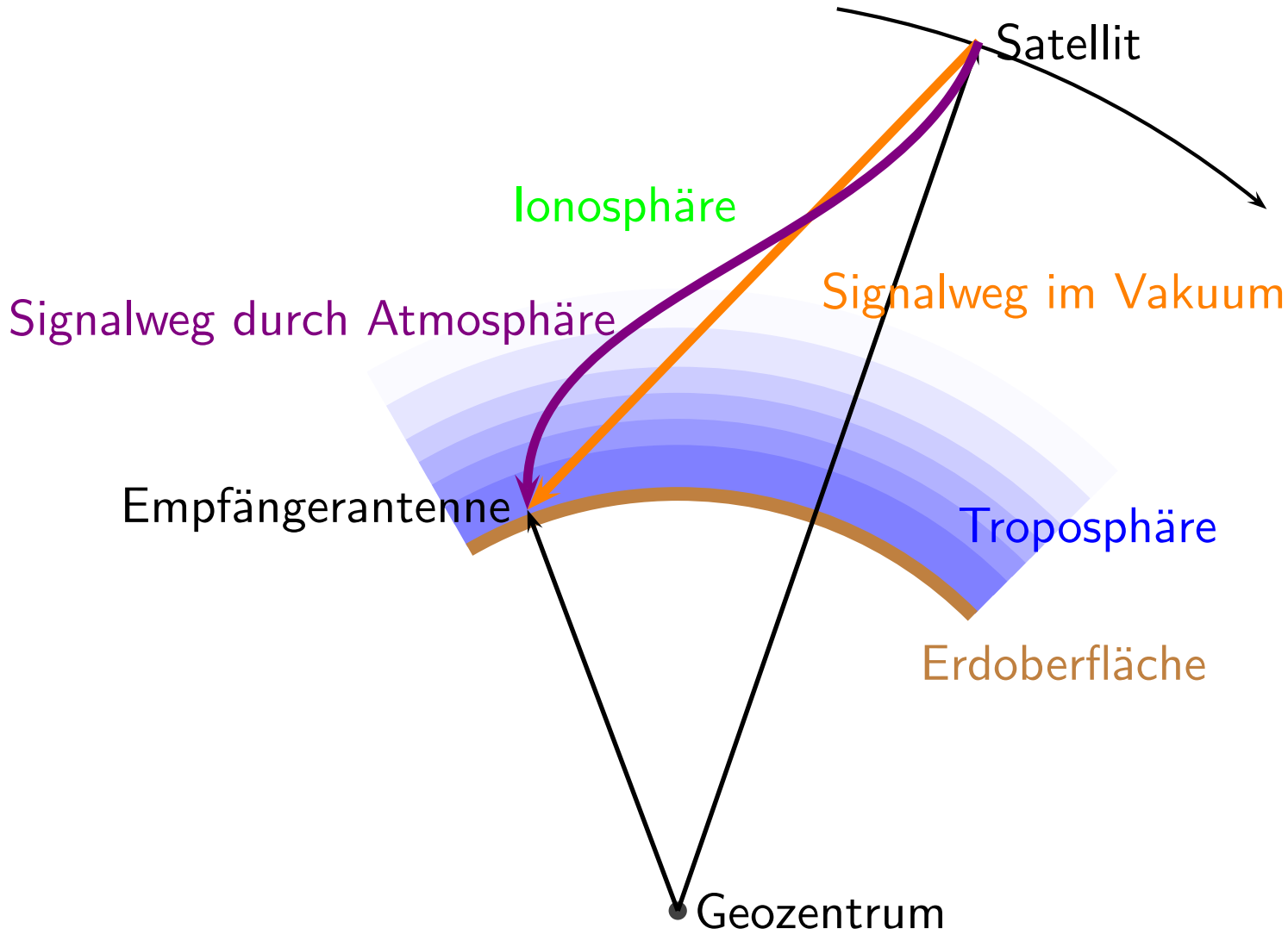
Nicht massstabsgetreu!

Signallaufzeitverzögerung in der Atmosphäre



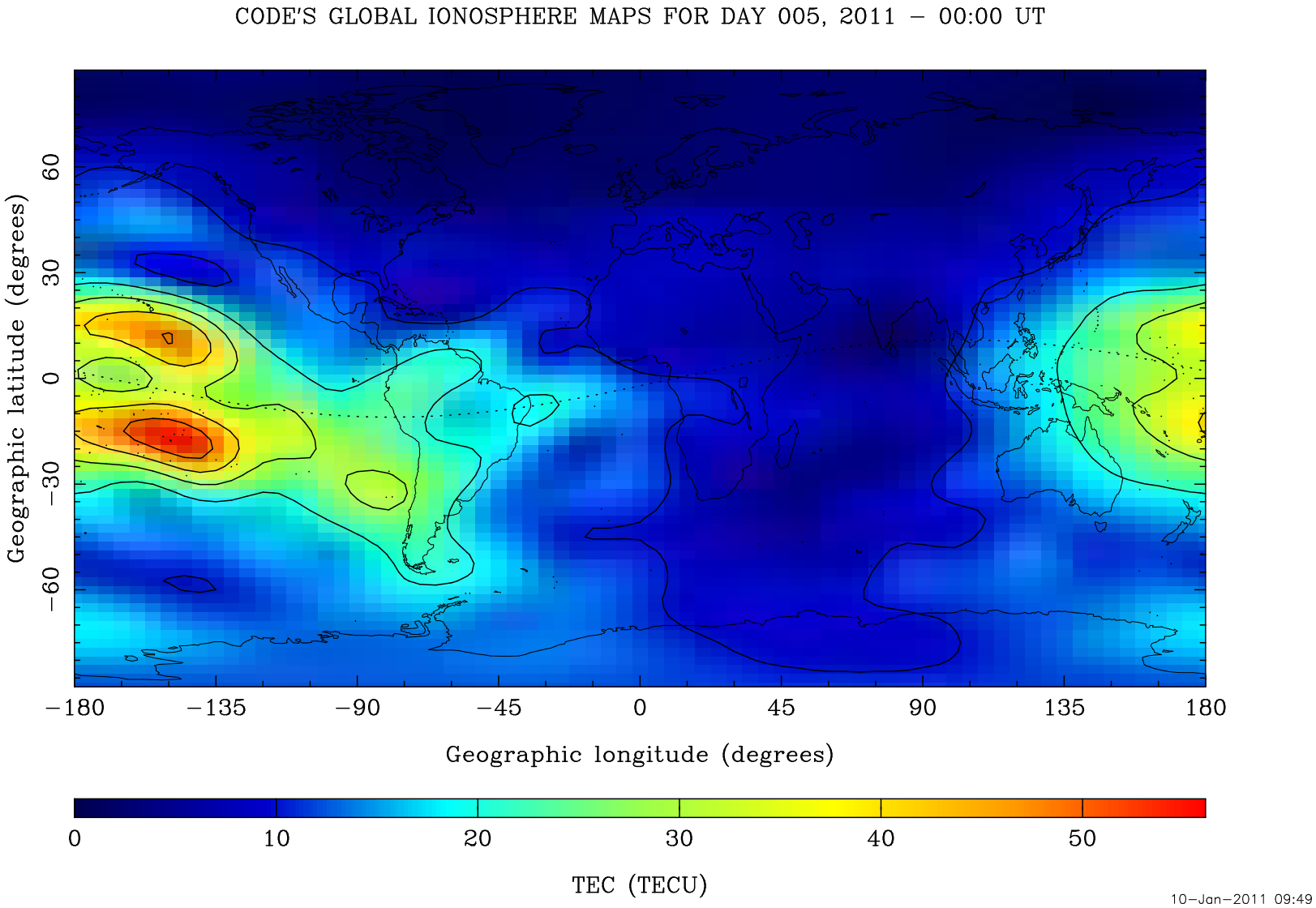
Nicht massstabsgetreu!

Signallaufzeitverzögerung in der Atmosphäre

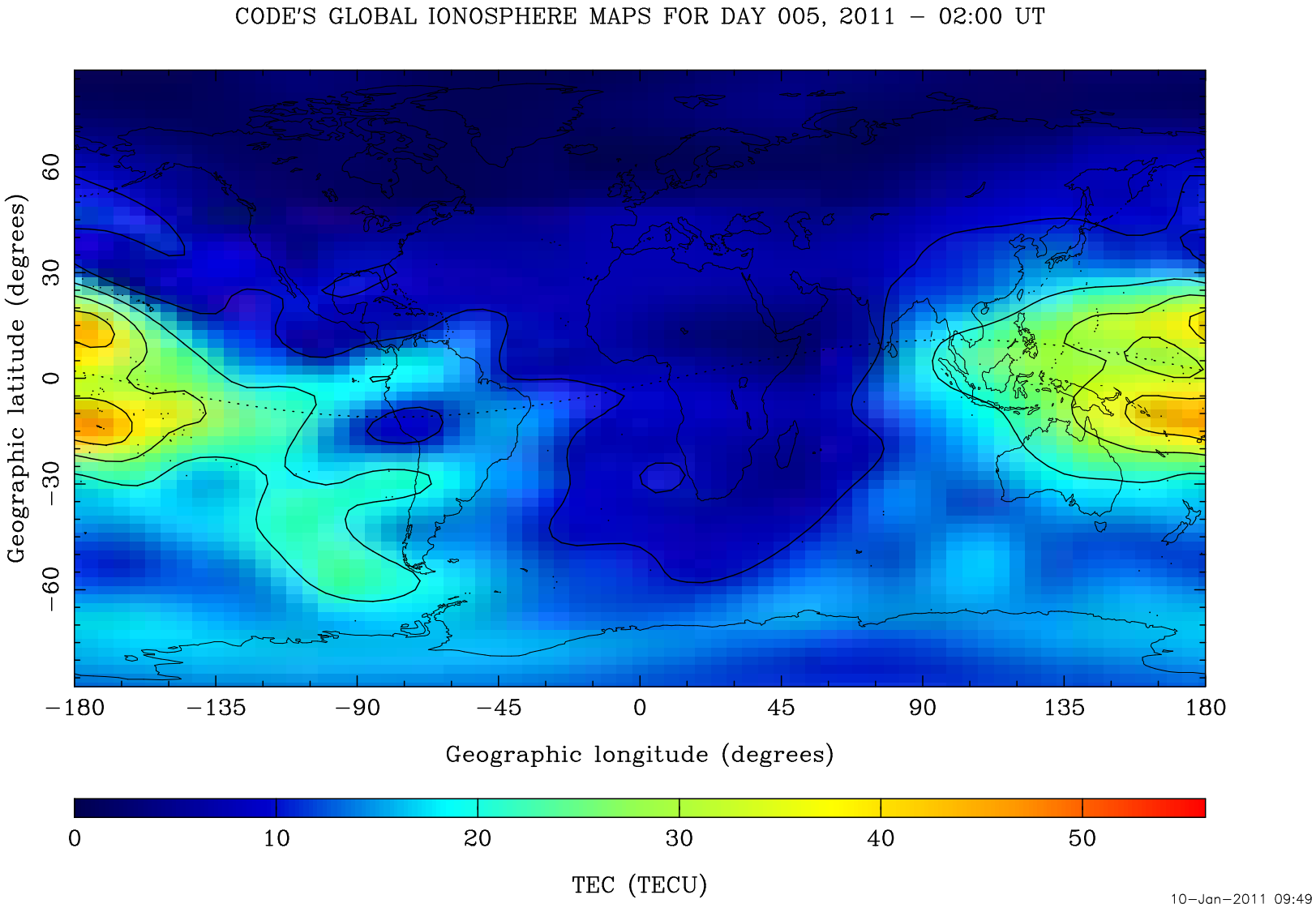


Nicht massstabsgetreu!

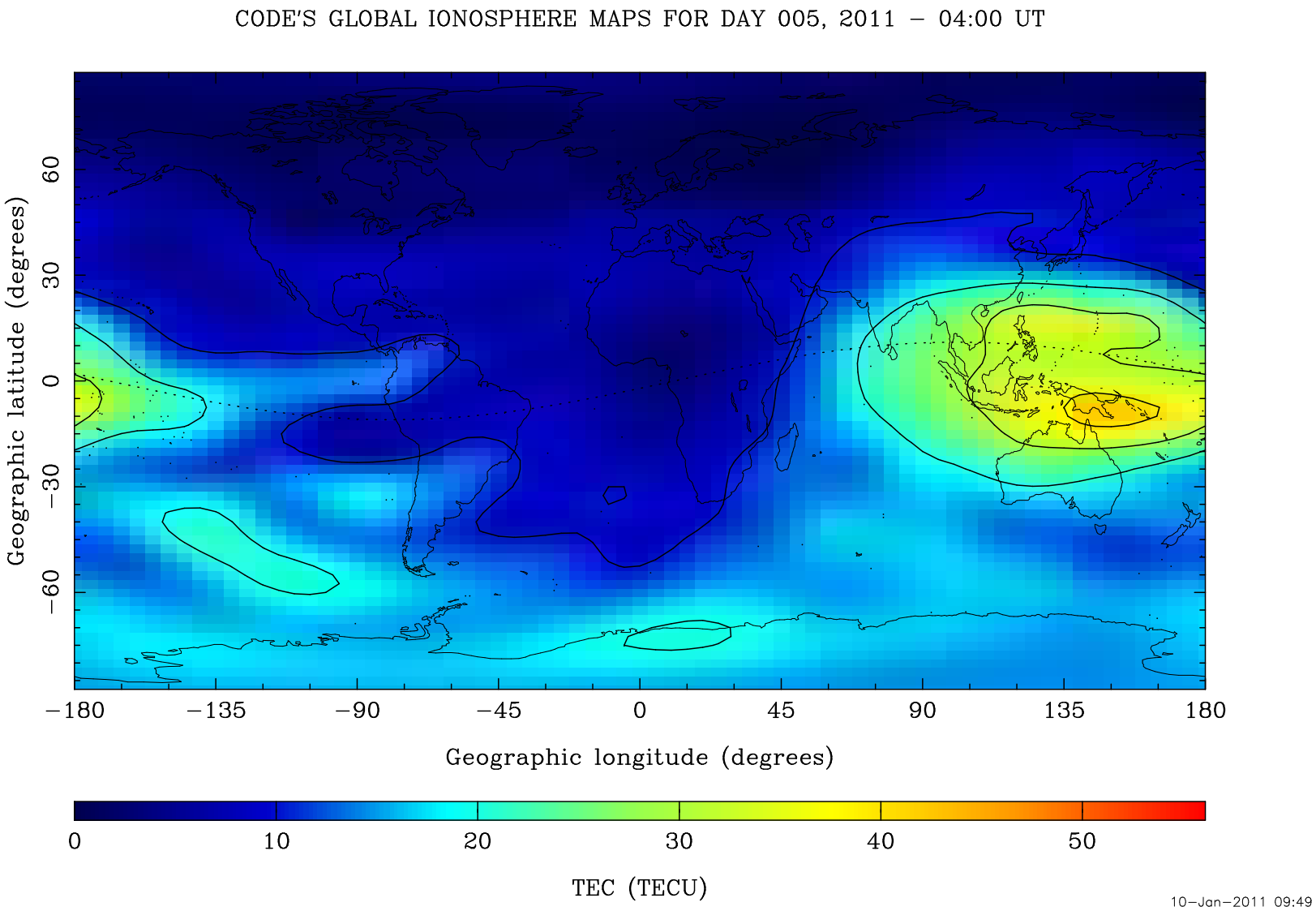
Ionosphärenkarten



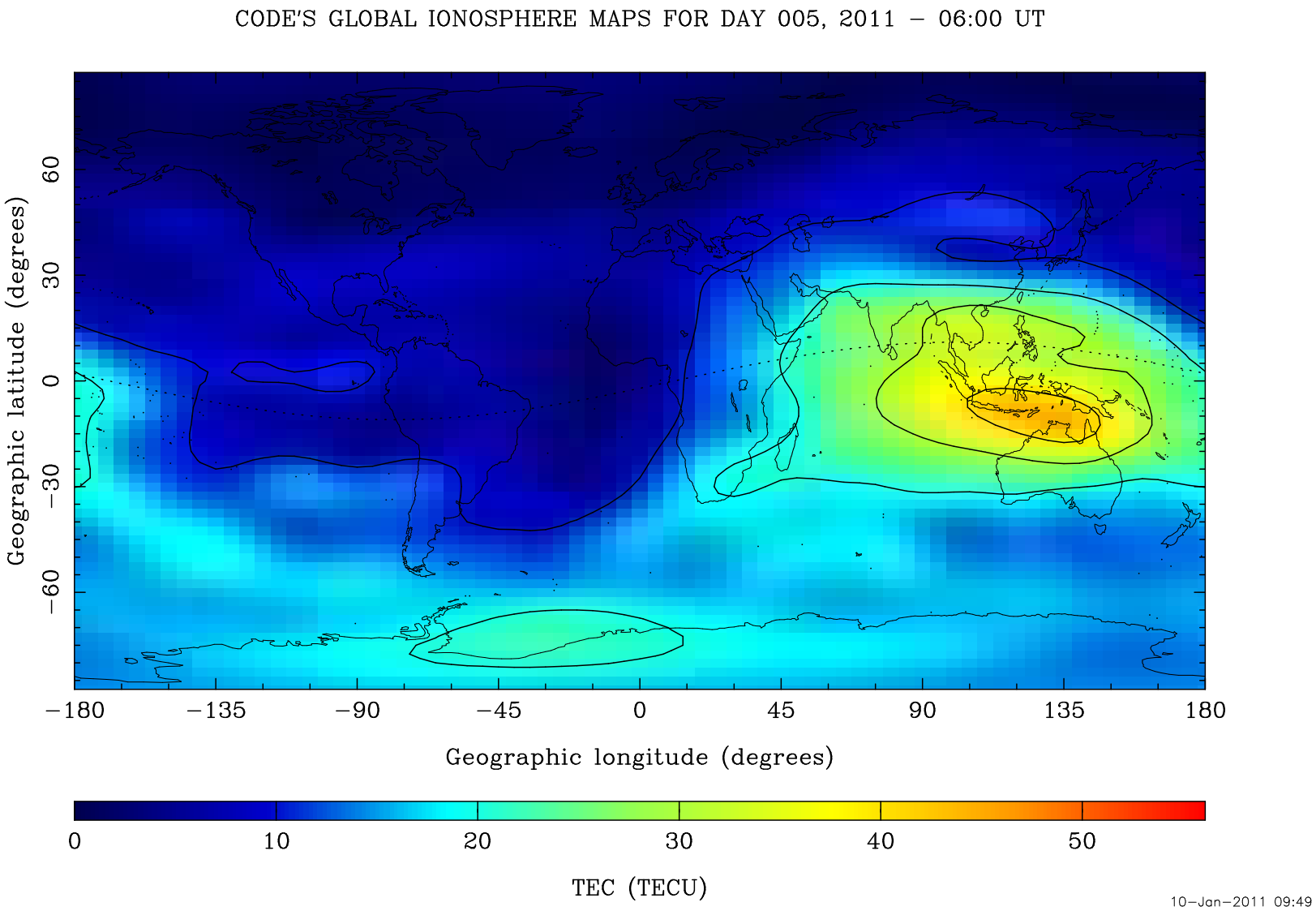
Ionosphärenkarten



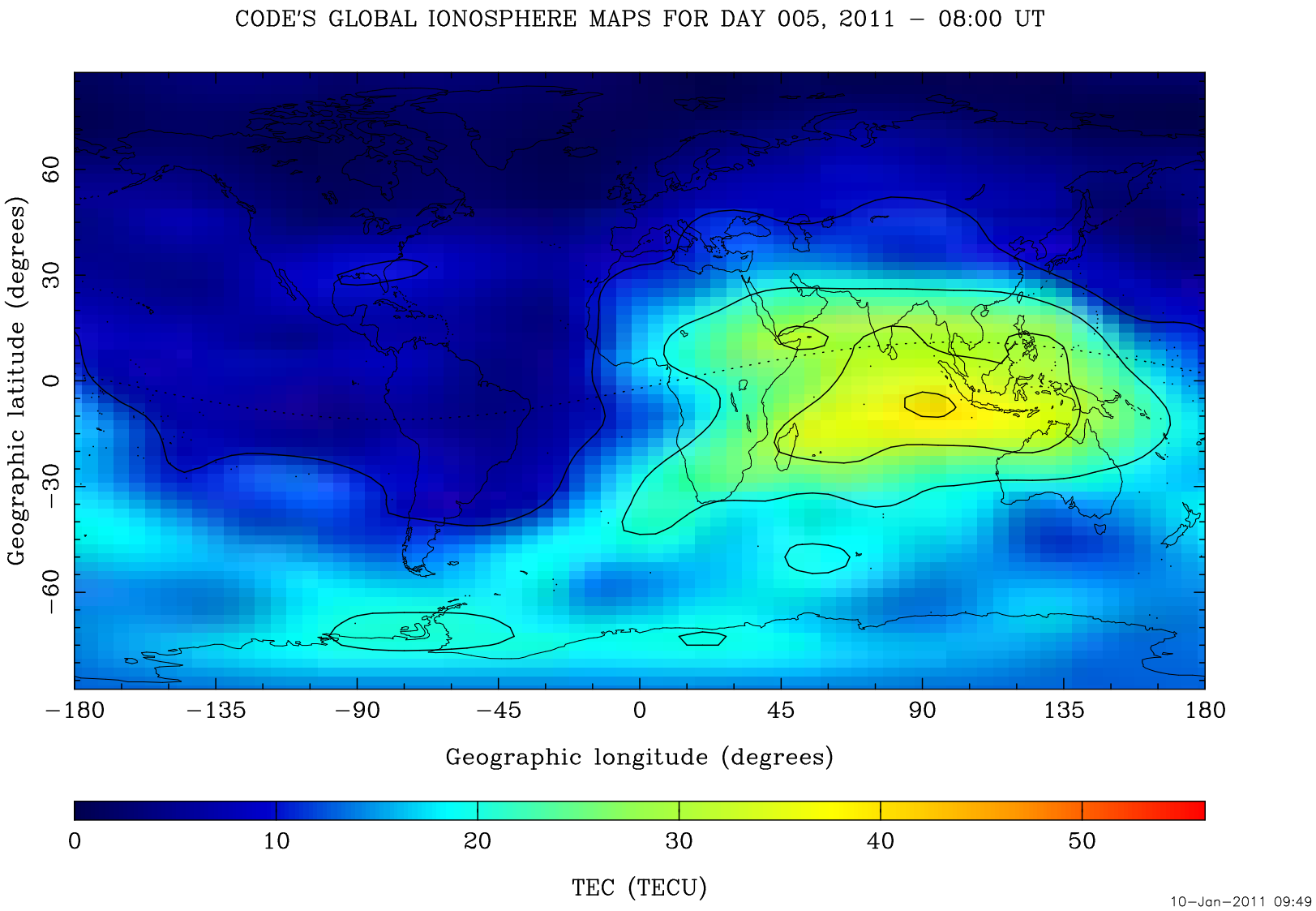
Ionosphärenkarten



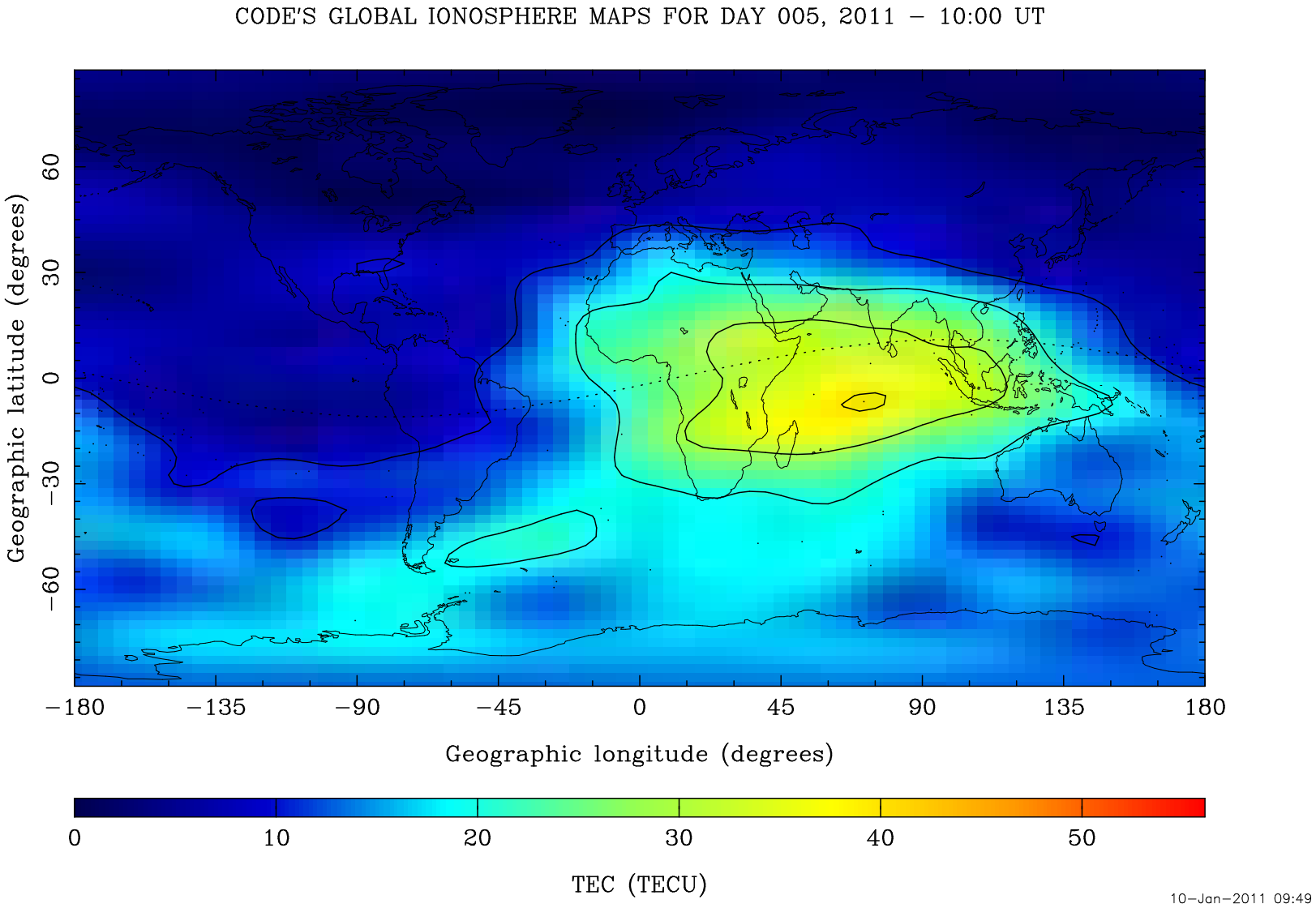
Ionosphärenkarten



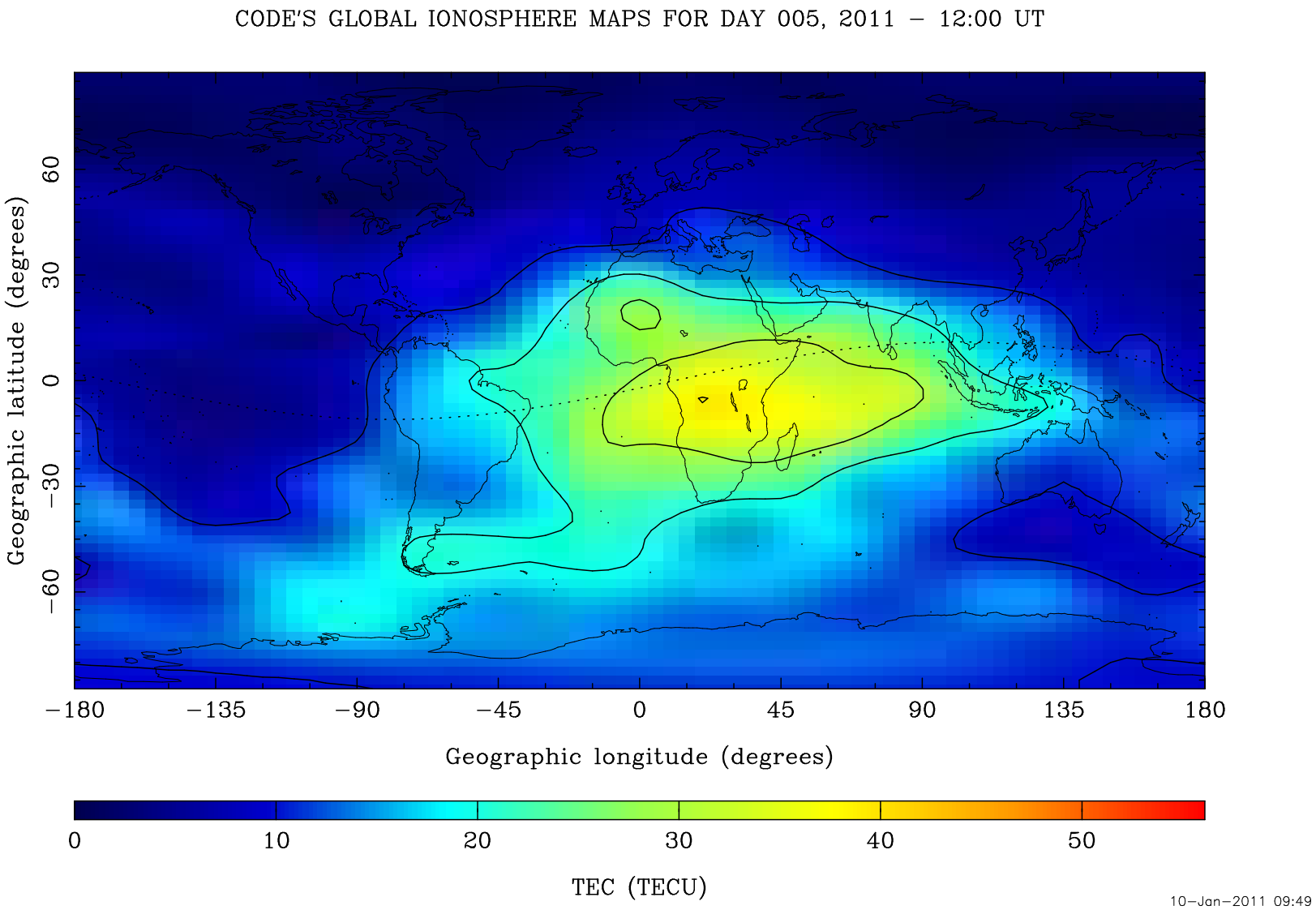
Ionosphärenkarten



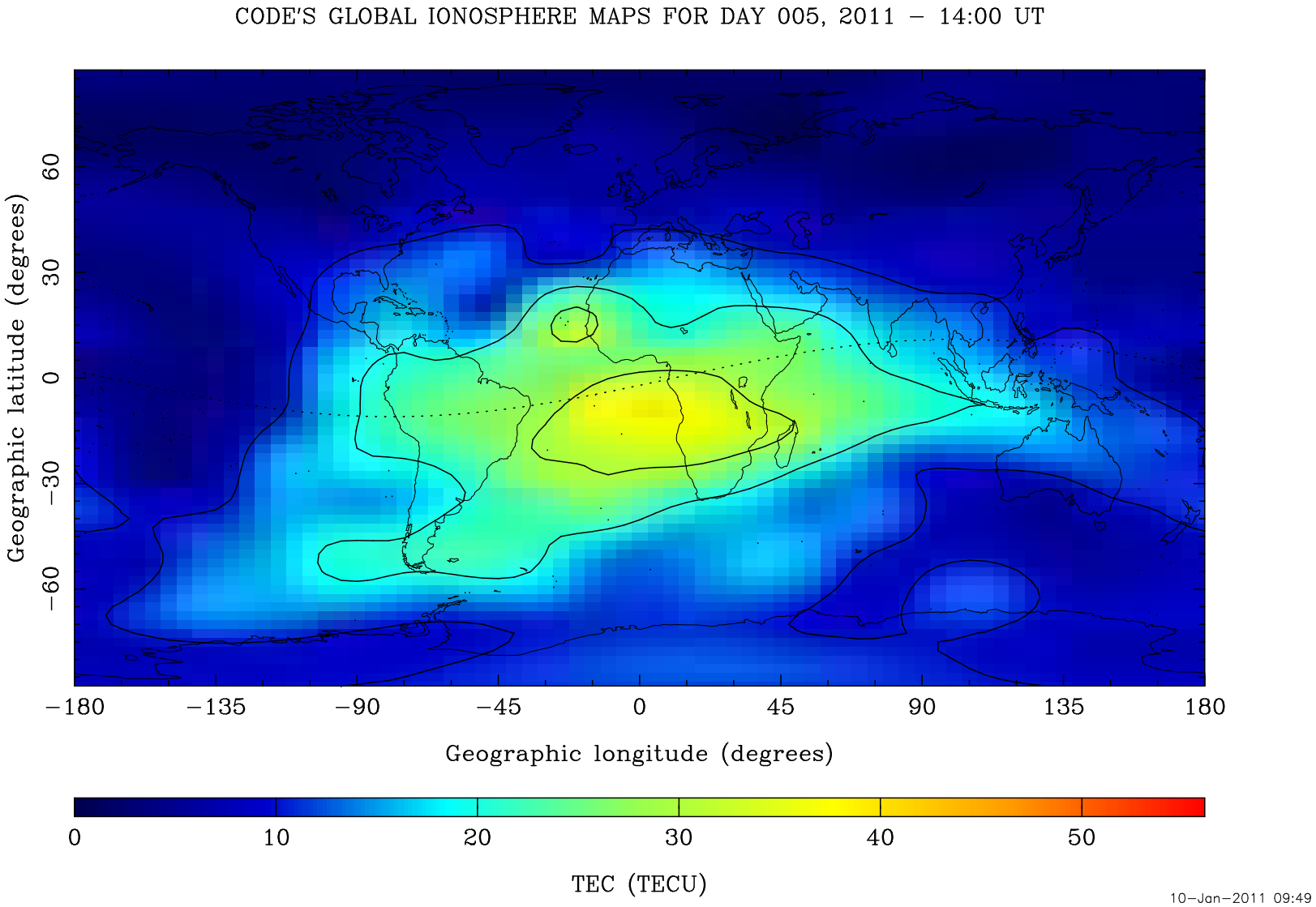
Ionosphärenkarten



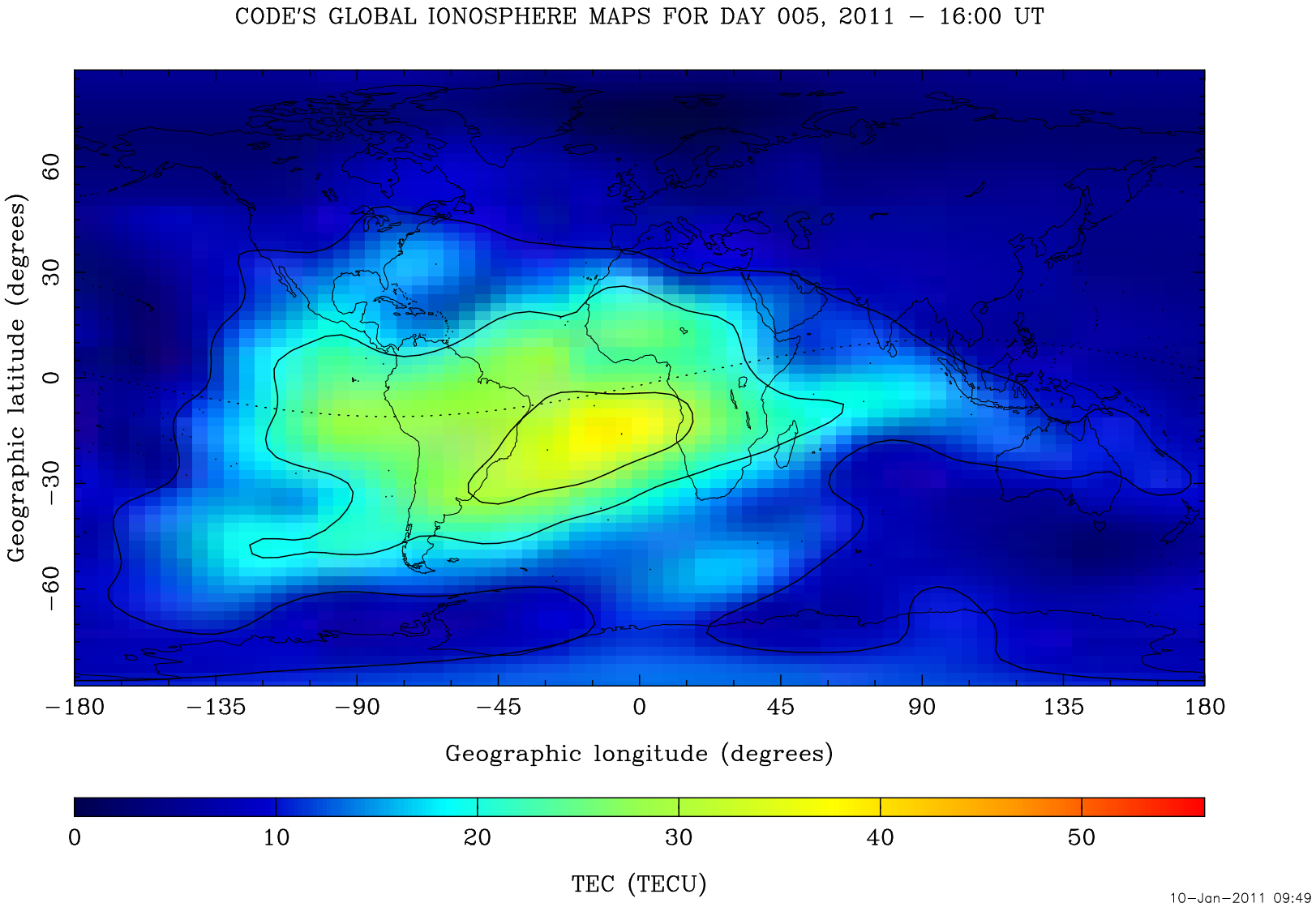
Ionosphärenkarten



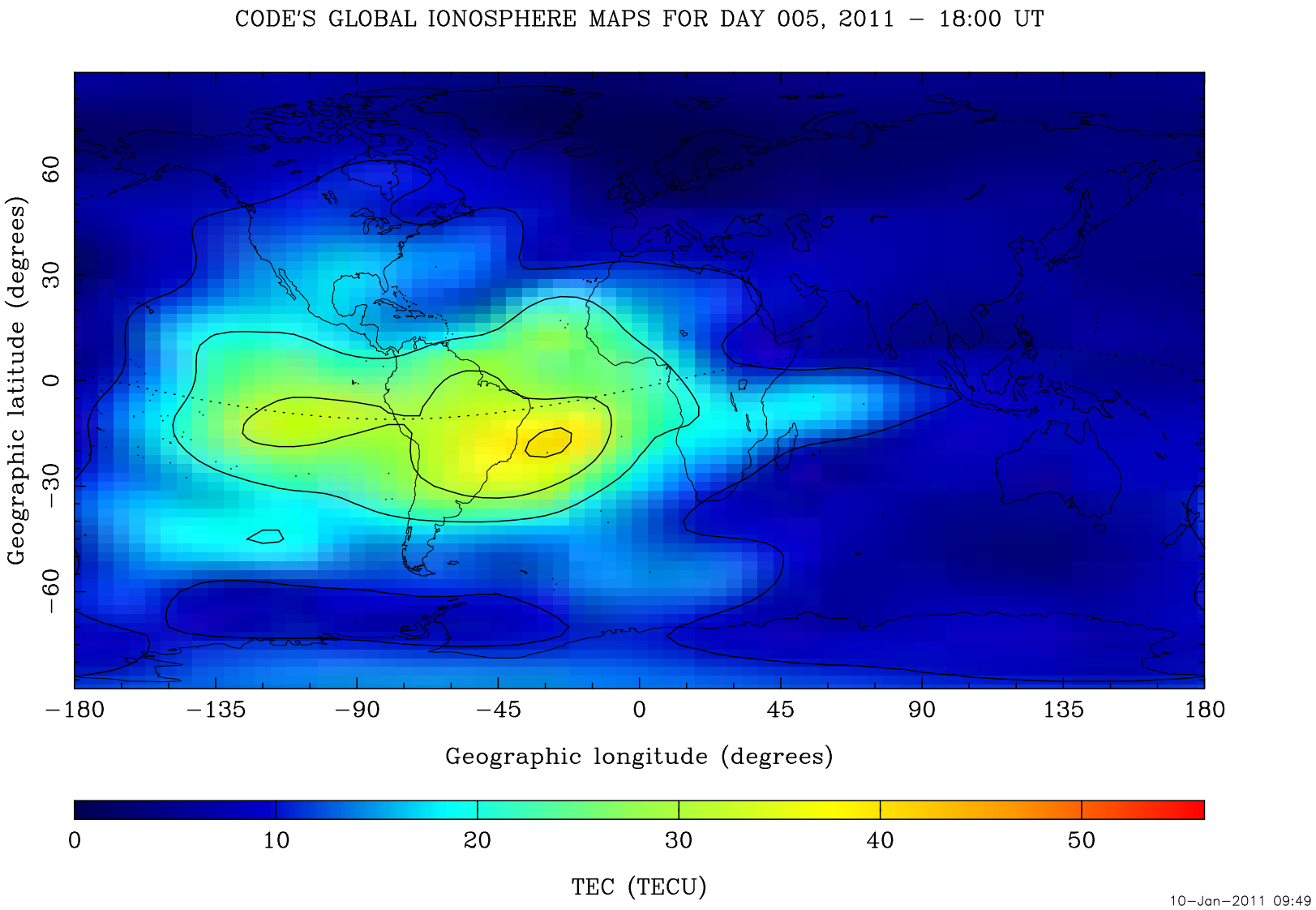
Ionosphärenkarten



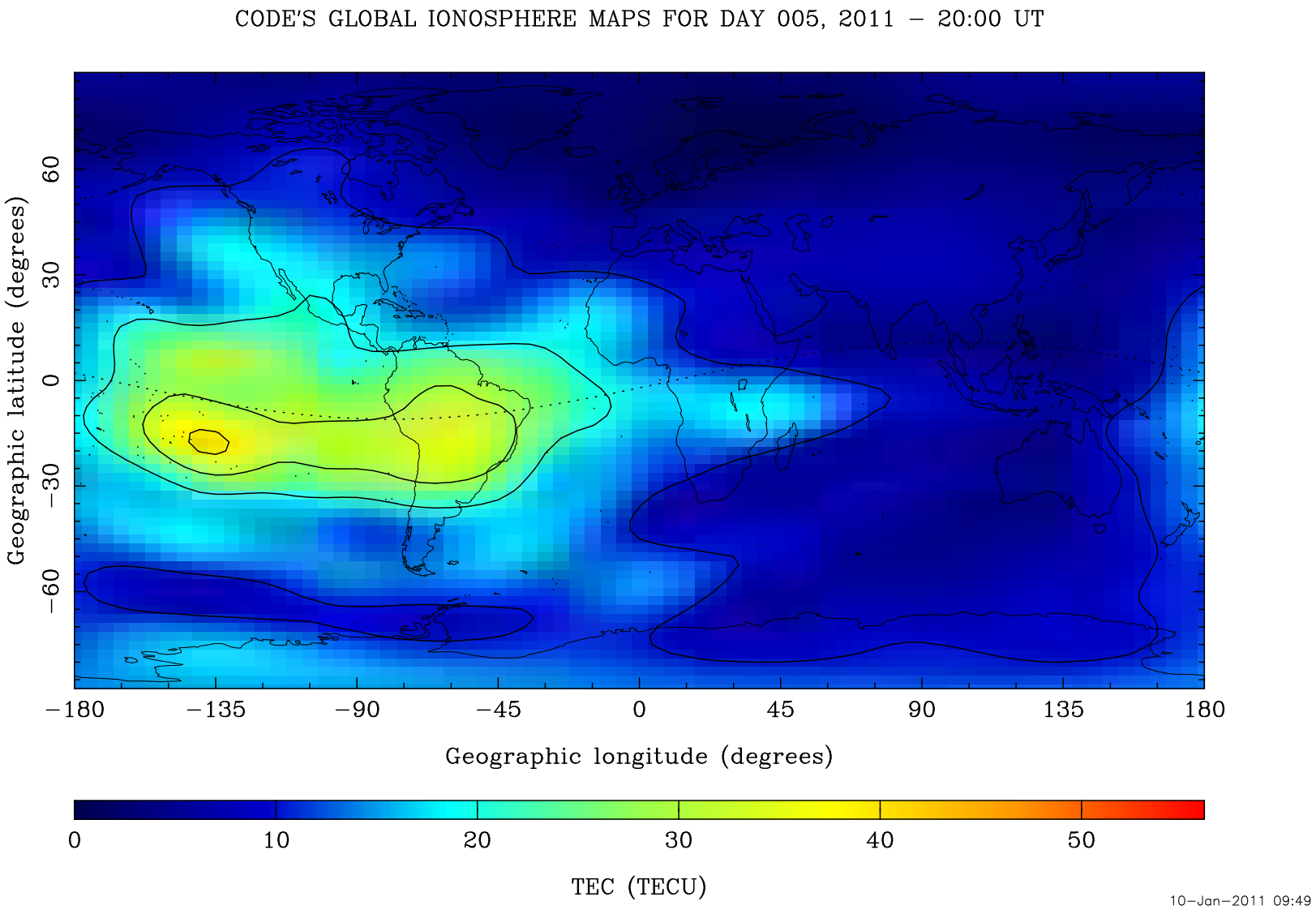
Ionosphärenkarten



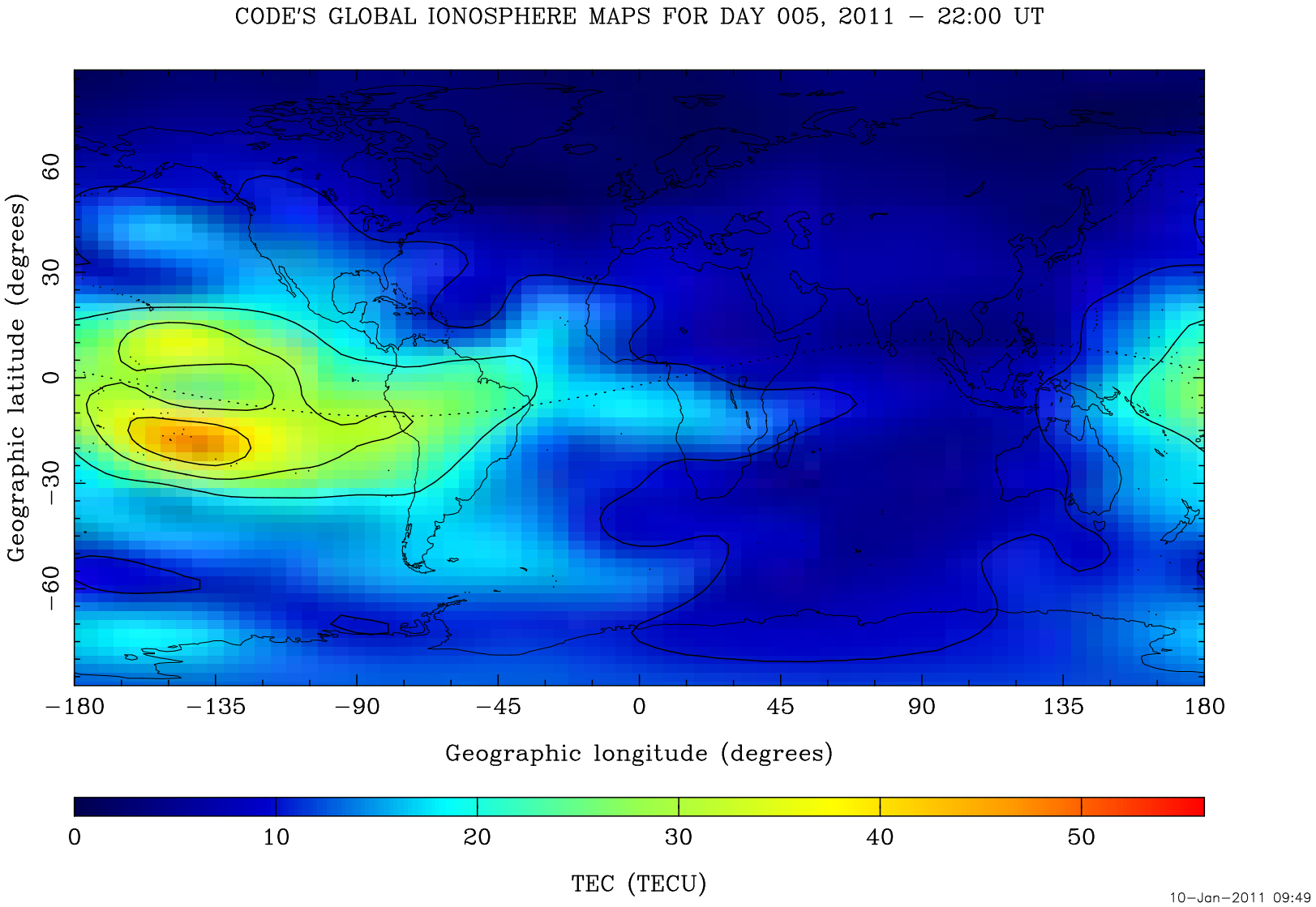
Ionosphärenkarten



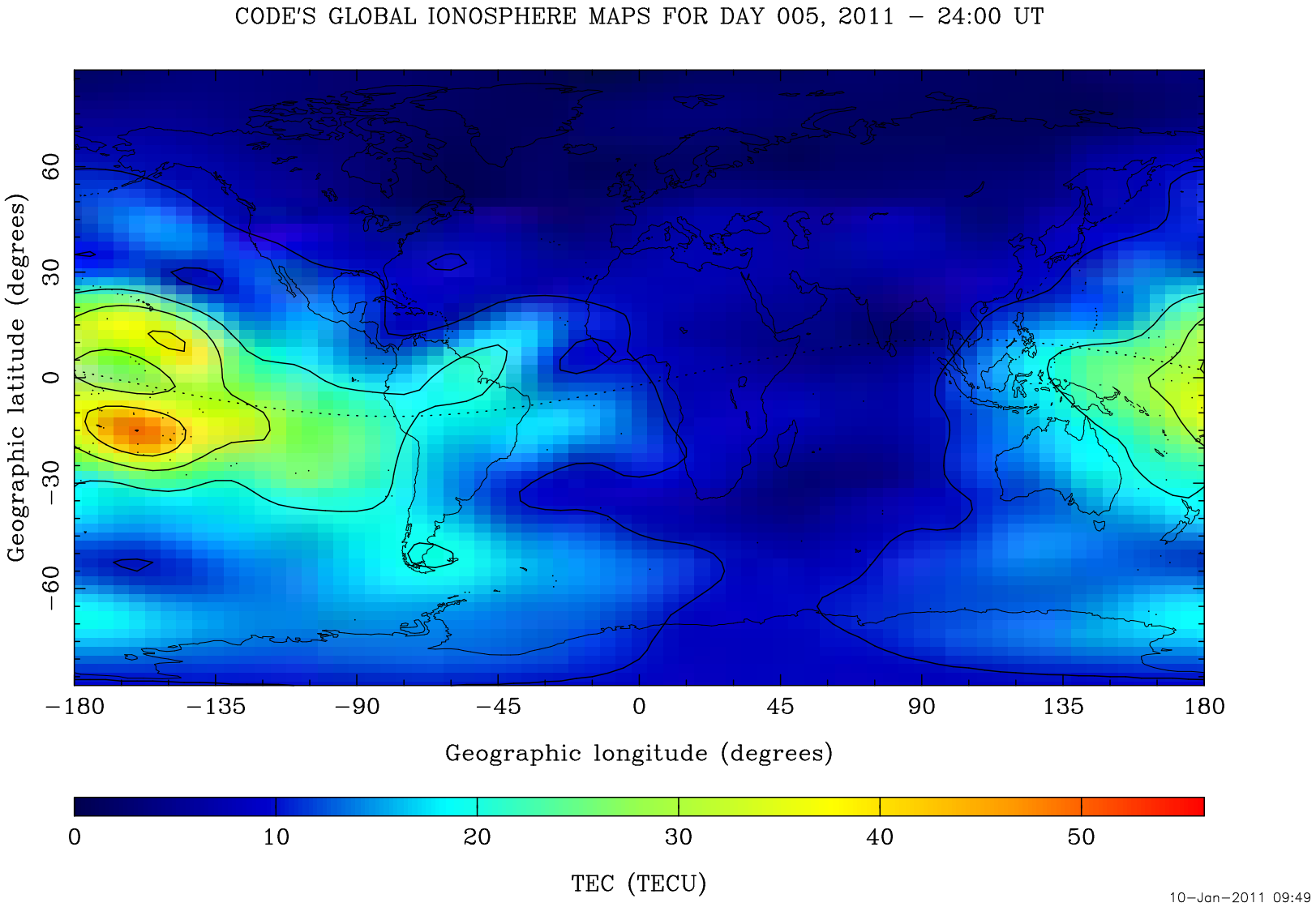
Ionosphärenkarten



Ionosphärenkarten



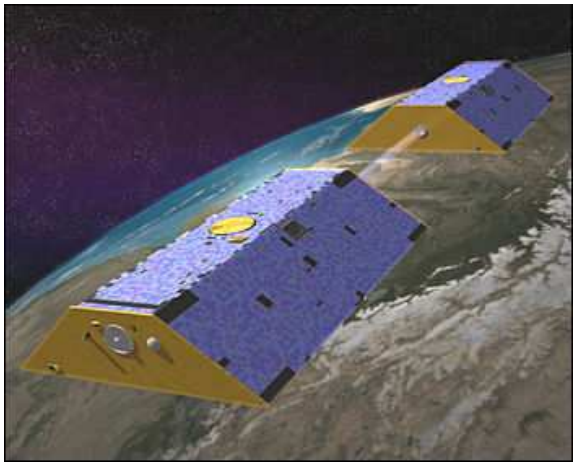
Ionosphärenkarten



LEO–Bahnbestimmung

- Die Bahnen von tieffliegenden Satelliten (LEO: Low Earth Orbiters), die mit GNSS–Empfängern ausgestattet sind, können so auf wenige cm genau bestimmt werden.
- Das trifft zum Beispiel auf folgende Missionen zu:

CHAMP,



GRACE,

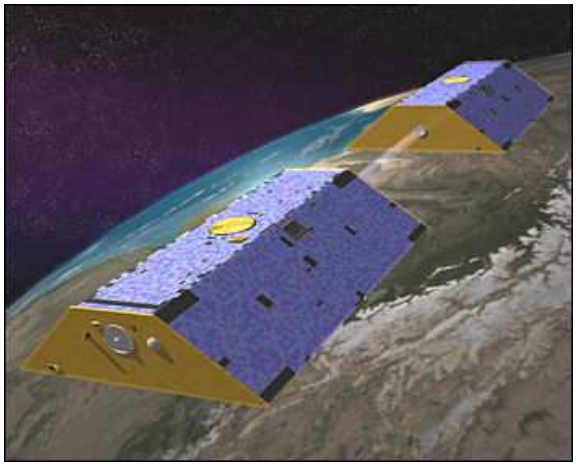
GOCE,

aber auch auf MetOp, JASON, SAC–C, ...

LEO–Bahnbestimmung

- Die Bahnen von tieffliegenden Satelliten (LEO: Low Earth Orbiters), die mit GNSS–Empfängern ausgestattet sind, können so auf wenige cm genau bestimmt werden.
- Das trifft zum Beispiel auf folgende Missionen zu:

CHAMP,



GRACE,

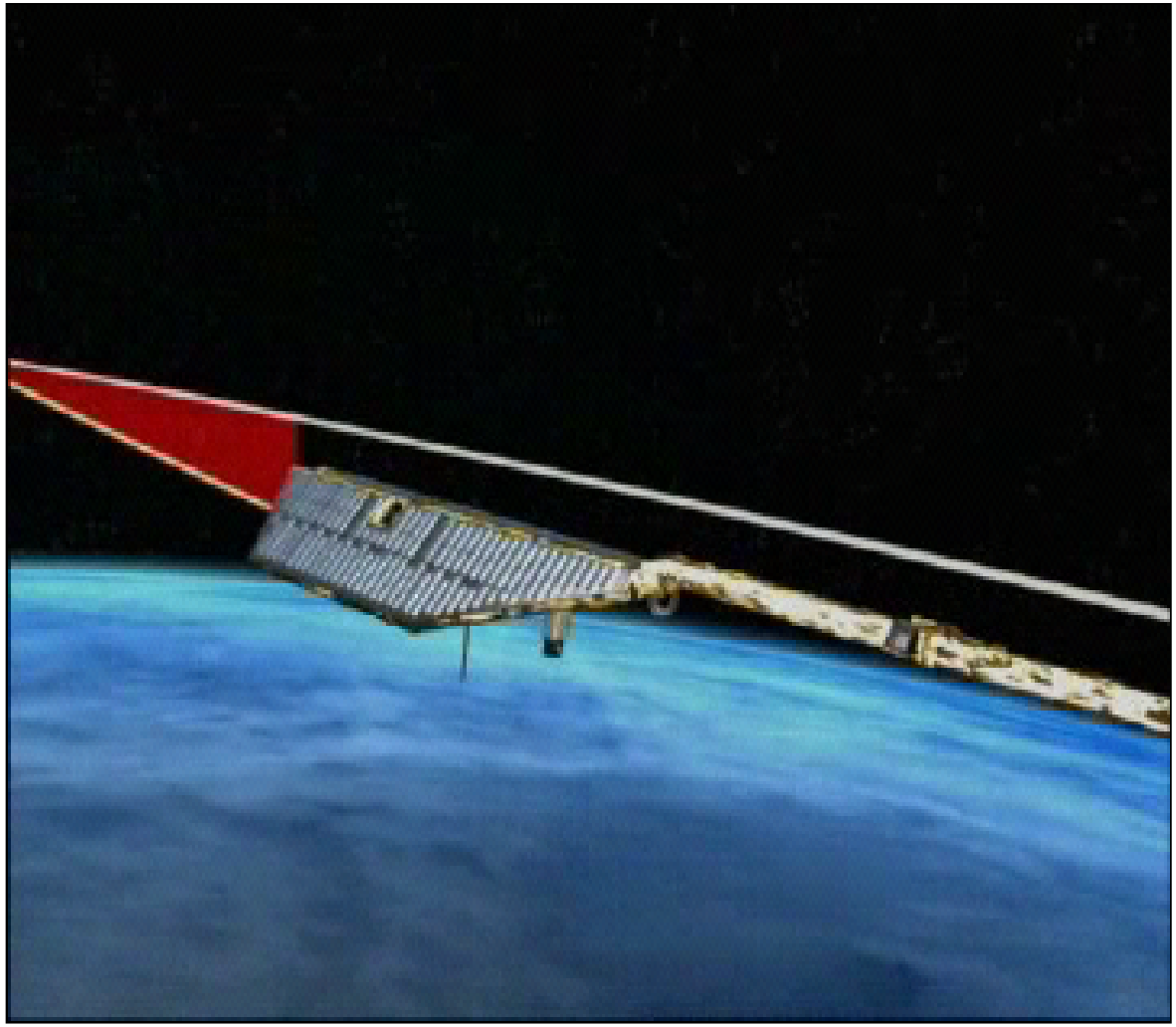
GOCE,

aber auch auf MetOp, JASON, SAC–C, ...

- Für die GOCE Mission ist das AIUB für die genaue Bahnbestimmung verantwortlich.

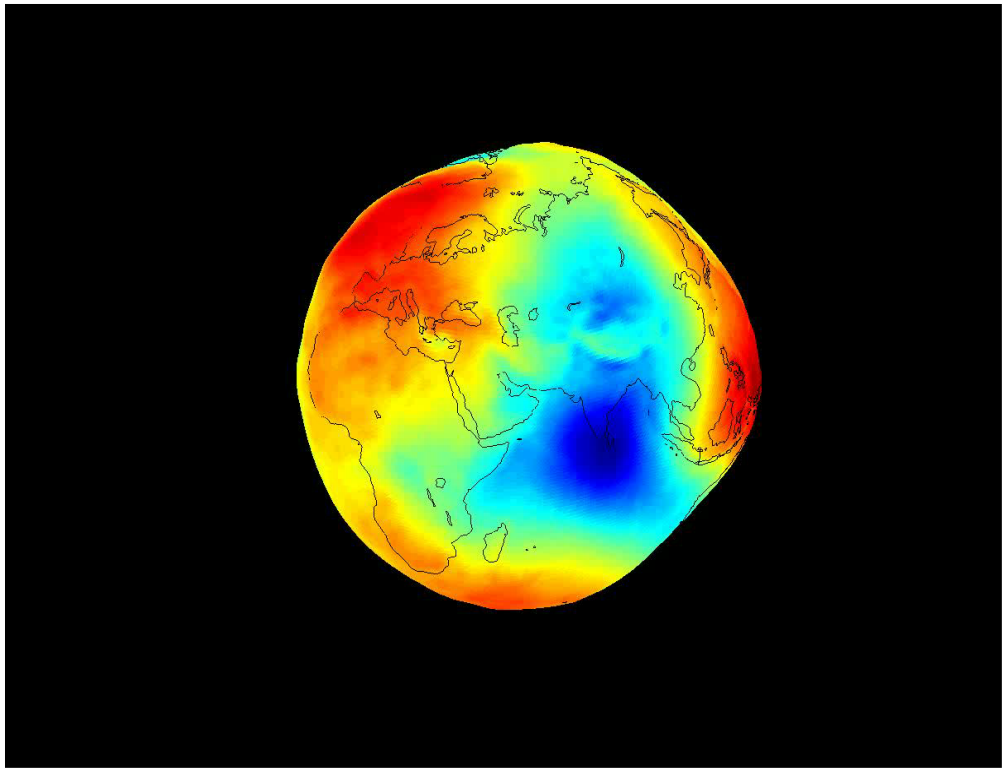
Schwerefeldbestimmung aus LEO–Bahnen

- Jeder Satellit reagiert mit seiner Flugbahn auf die Masseverteilung der Erde.



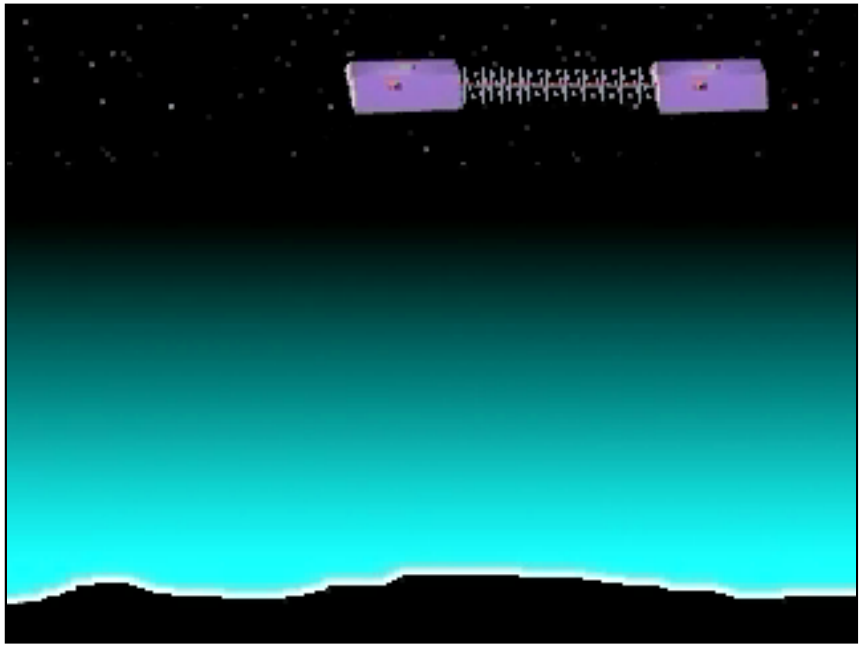
Schwerefeldbestimmung aus LEO–Bahnen

- Jeder Satellit reagiert mit seiner Flugbahn auf die Masseverteilung der Erde.
- Satelliten mit tiefen Bahnen (LEOs) sind davon stärker betroffen als höher fliegende (z.B. GNSS-Satelliten).
- Man kann also durch gezielte Analyse der Flugbahn eines LEOs auf das Schwerefeld der Erde schliessen.

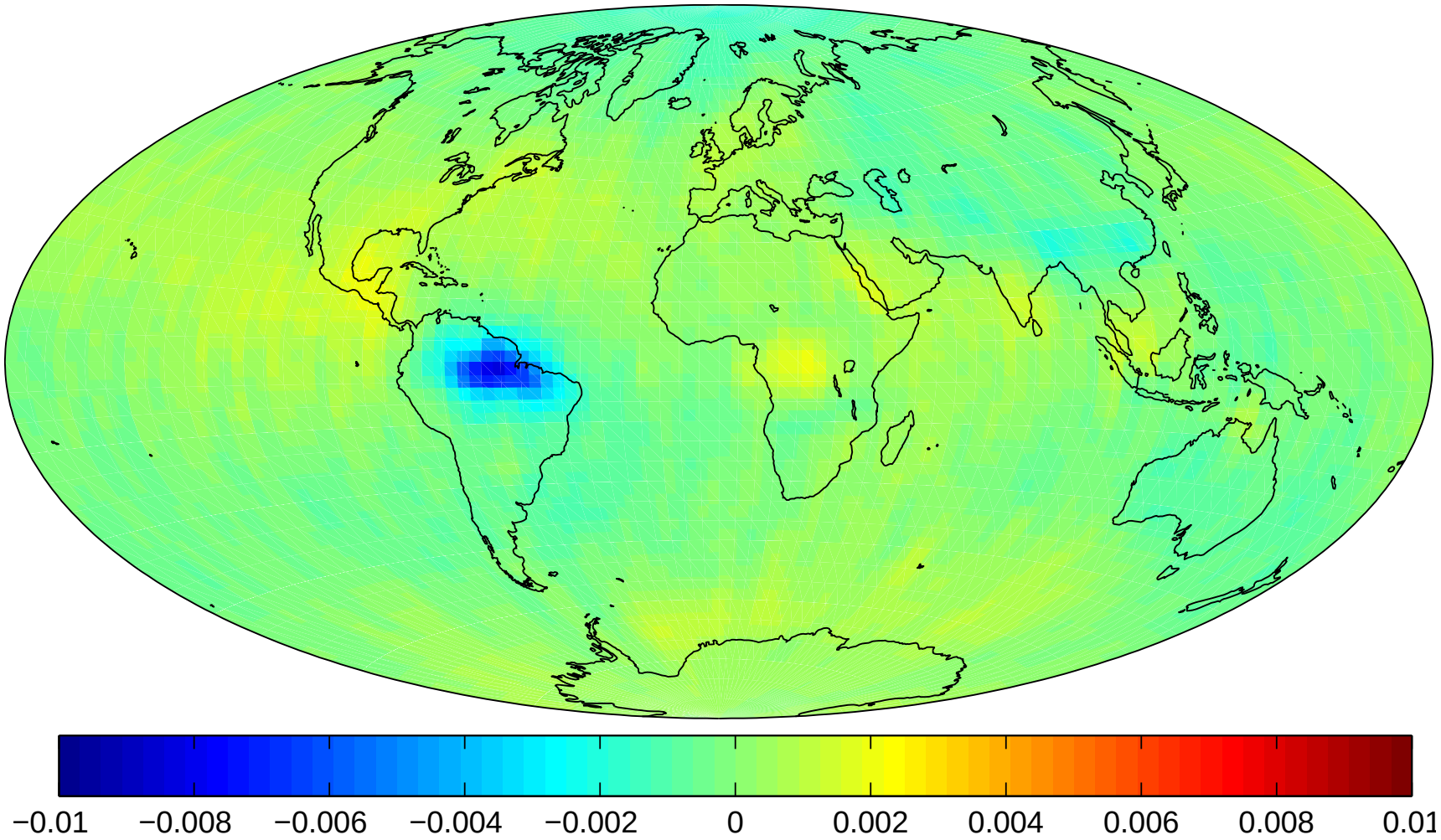


Schwerefeldbestimmung aus LEO–Bahnen

- Jeder Satellit reagiert mit seiner Flugbahn auf die Masseverteilung der Erde.
- Satelliten mit tiefen Bahnen (LEOs) sind davon stärker betroffen als höher fliegende (z.B. GNSS-Satelliten).
- Man kann also durch gezielte Analyse der Flugbahn eines LEOs auf das Schwerefeld der Erde schliessen.
- Bei der GRACE-Mission fliegen zwei Satelliten hintereinander, wobei ihr Abstand sehr präzise gemessen wird.

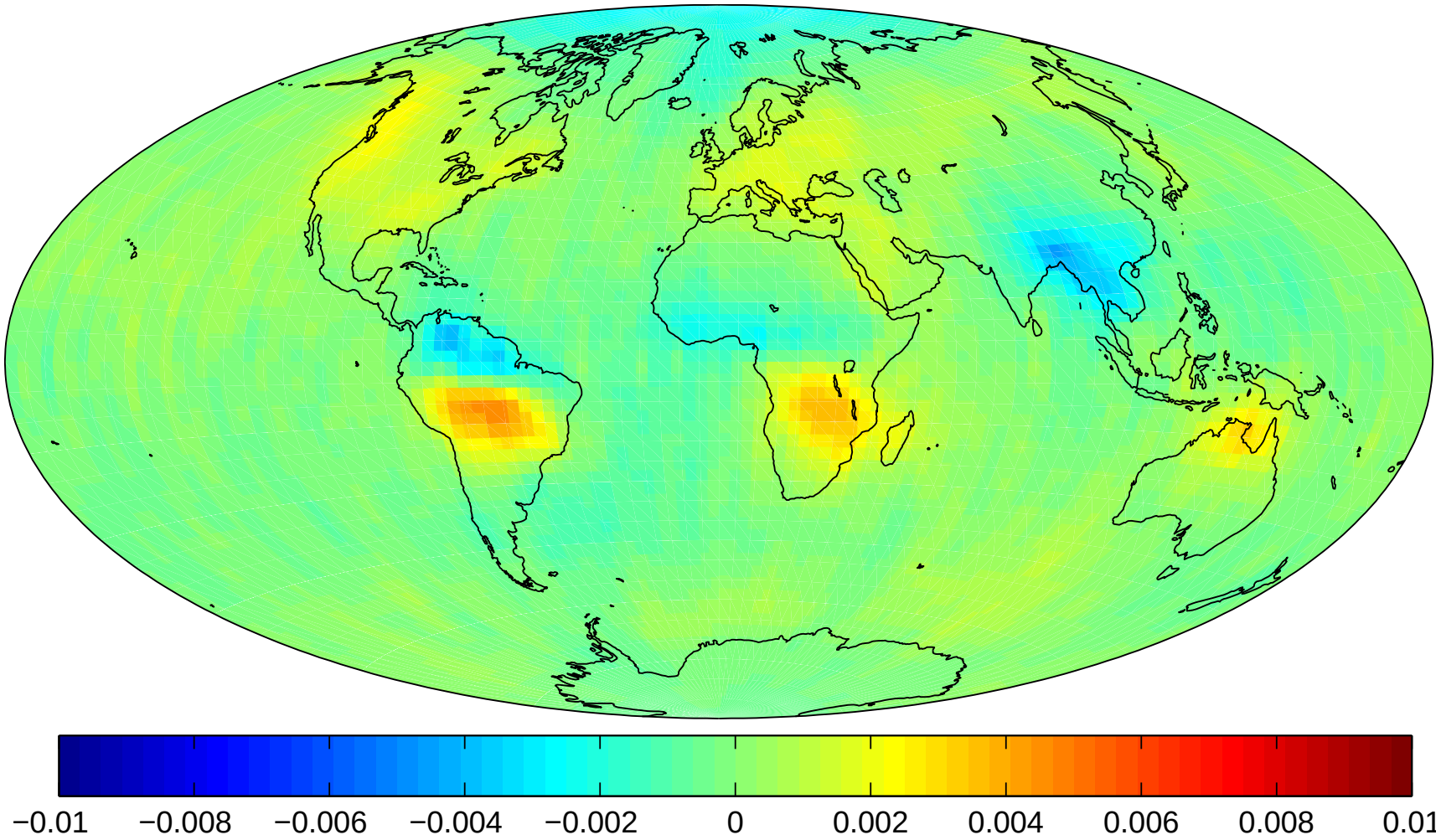


Monatslösungen des Schwerefeldes aus GRACE



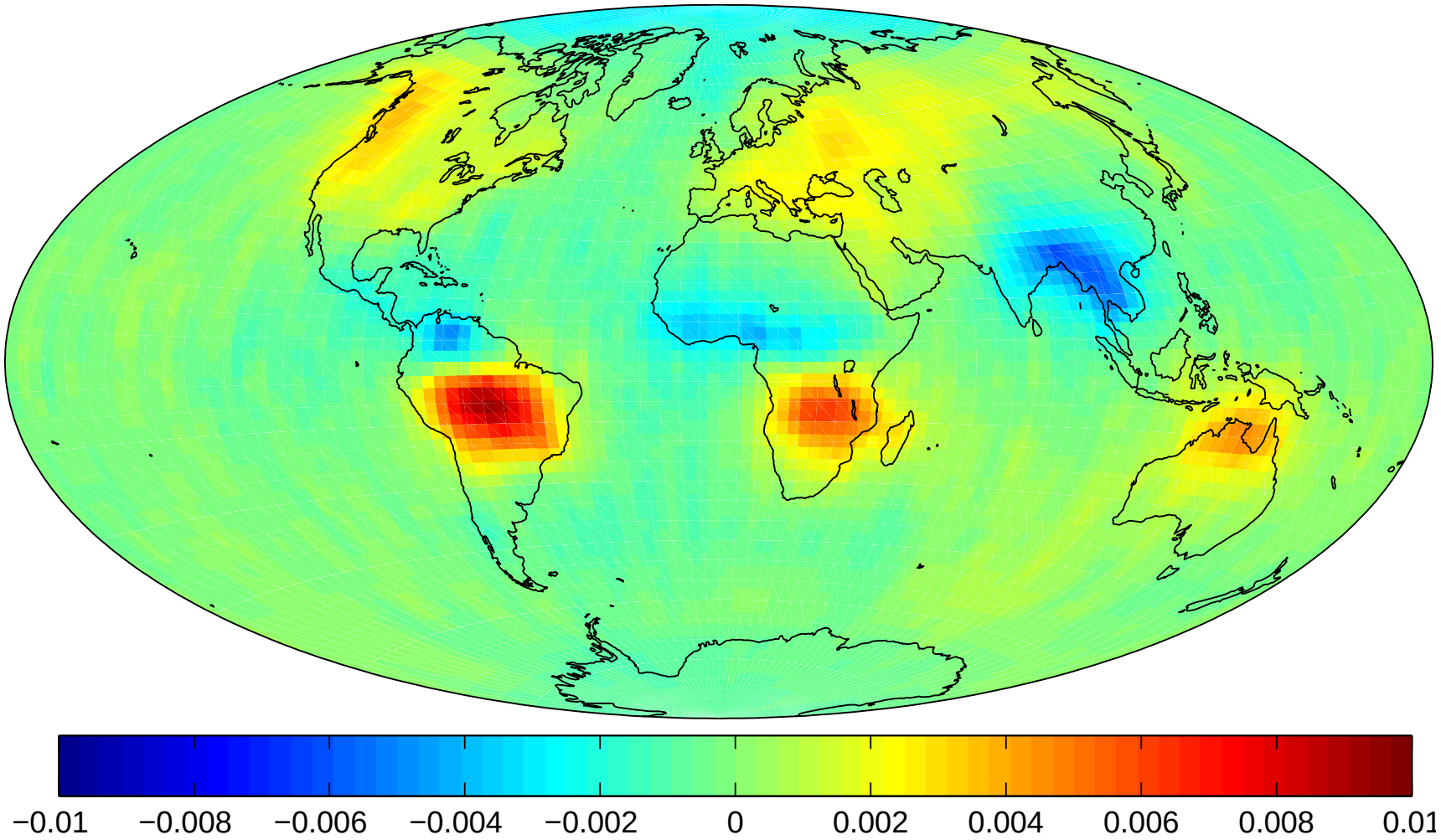
Geoidhöhen in m

Monatslösungen des Schwerefeldes aus GRACE



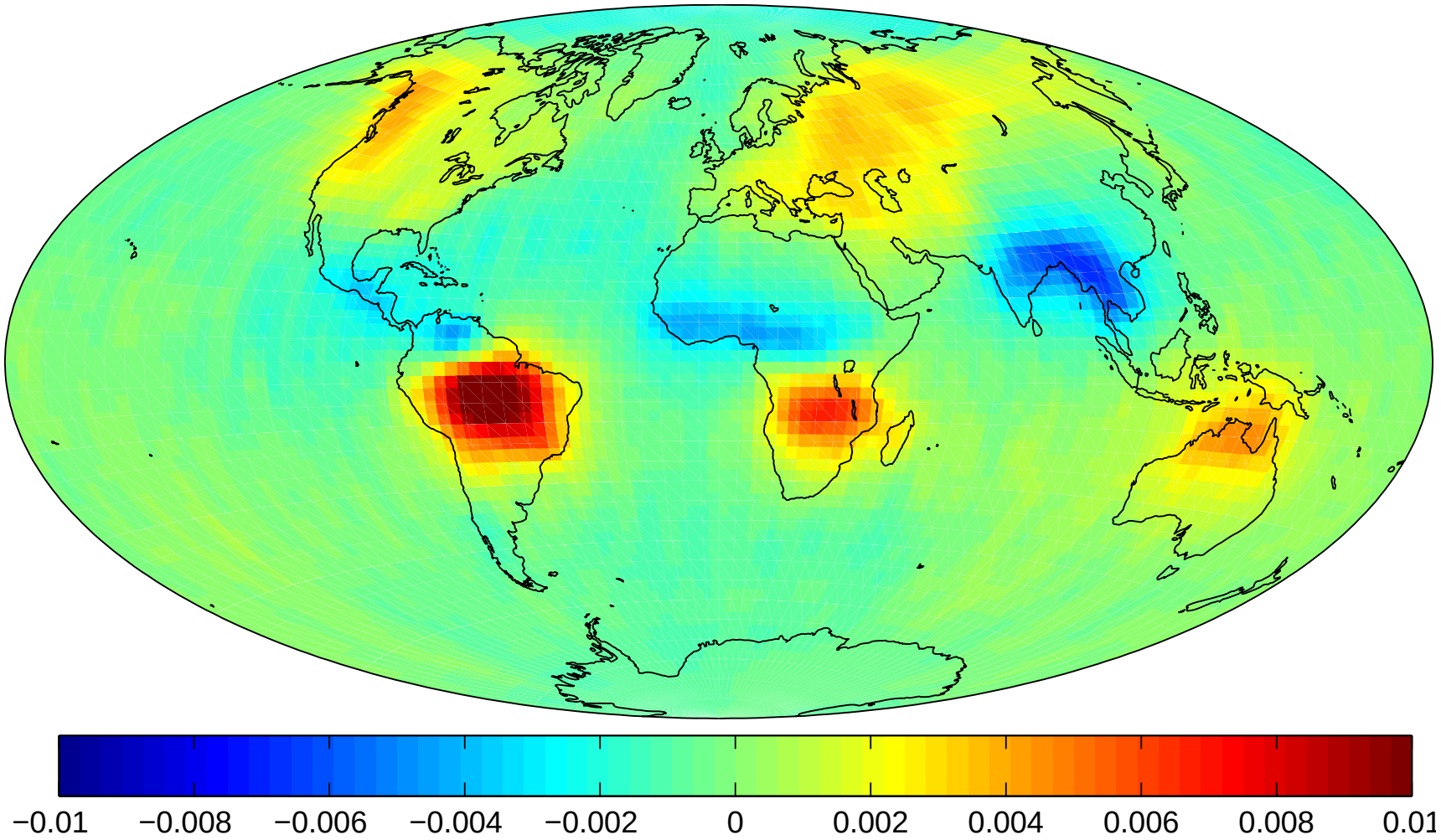
Geoidhöhen in m

Monatslösungen des Schwerefeldes aus GRACE



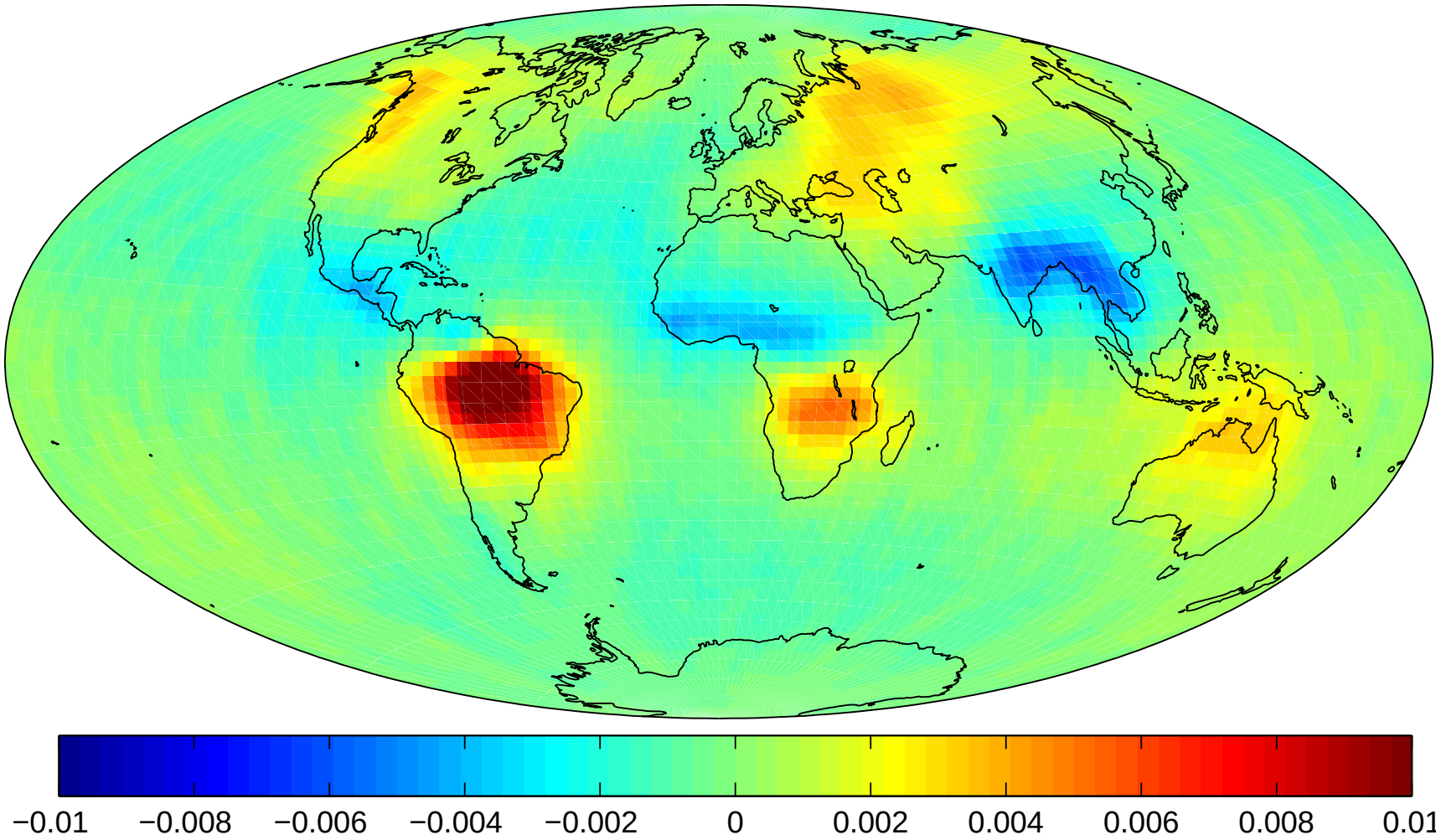
Geoidhöhen in m

Monatslösungen des Schwerefeldes aus GRACE



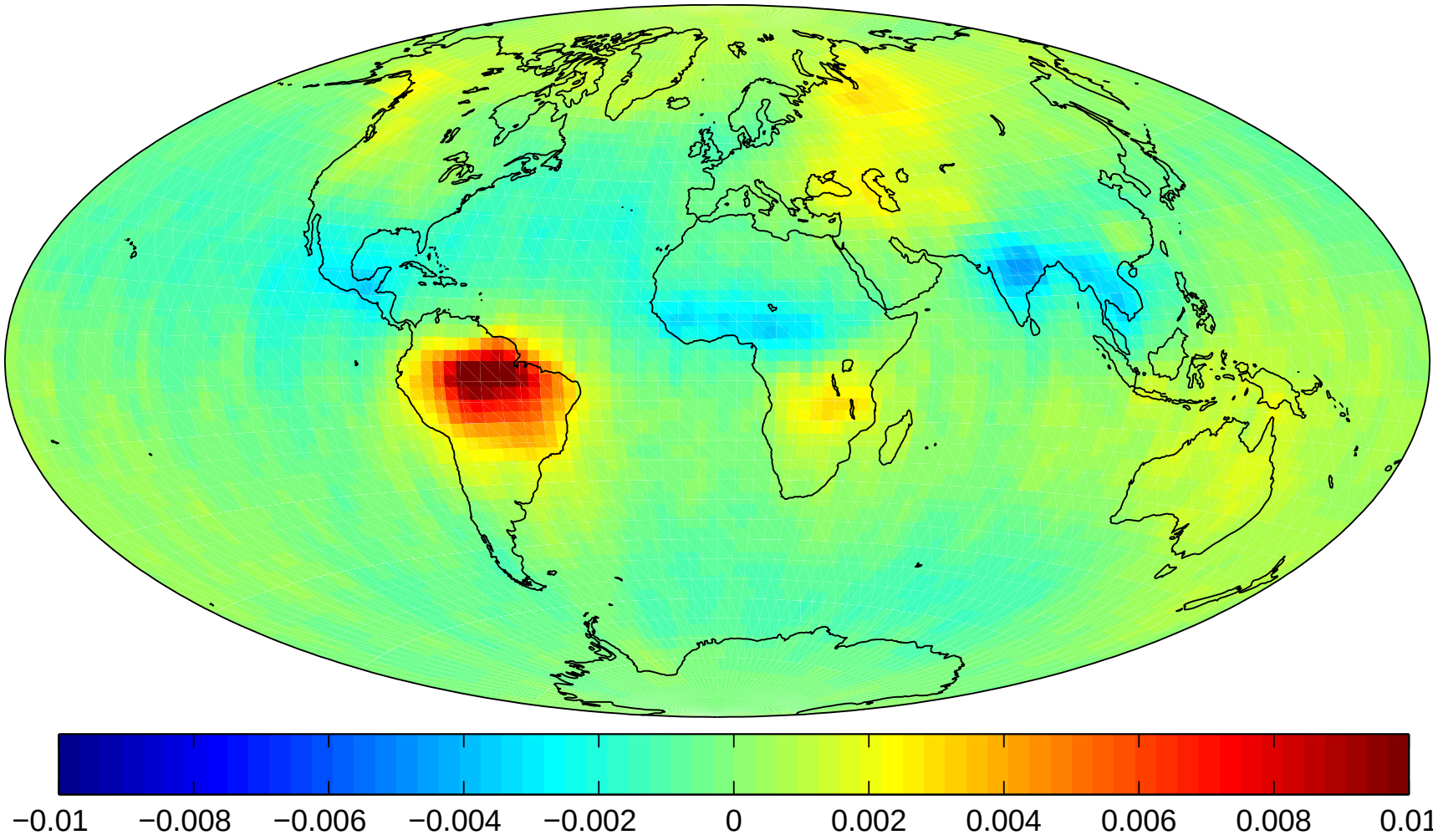
Geoidhöhen in m

Monatslösungen des Schwerefeldes aus GRACE



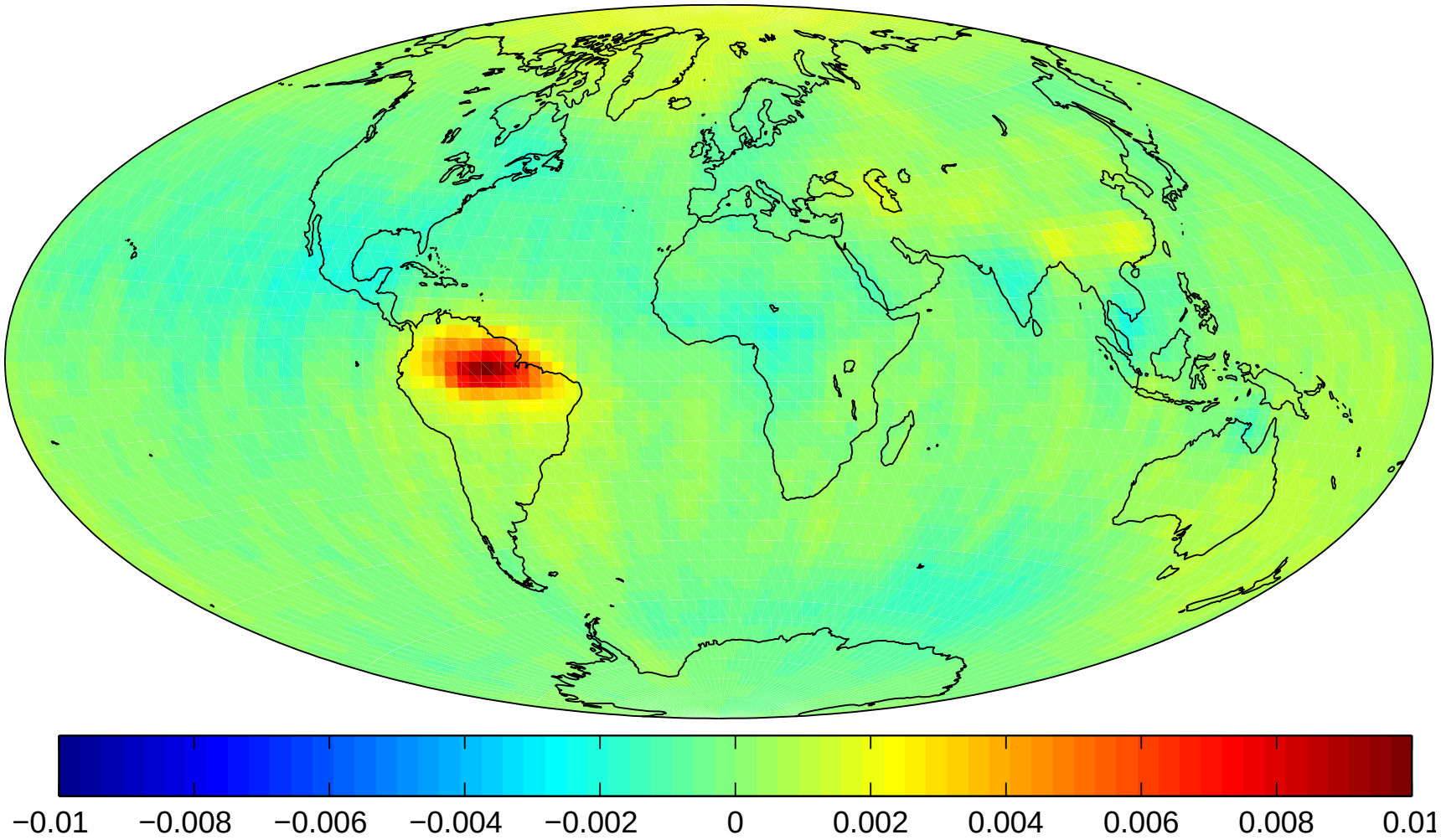
Geoidhöhen in m

Monatslösungen des Schwerefeldes aus GRACE



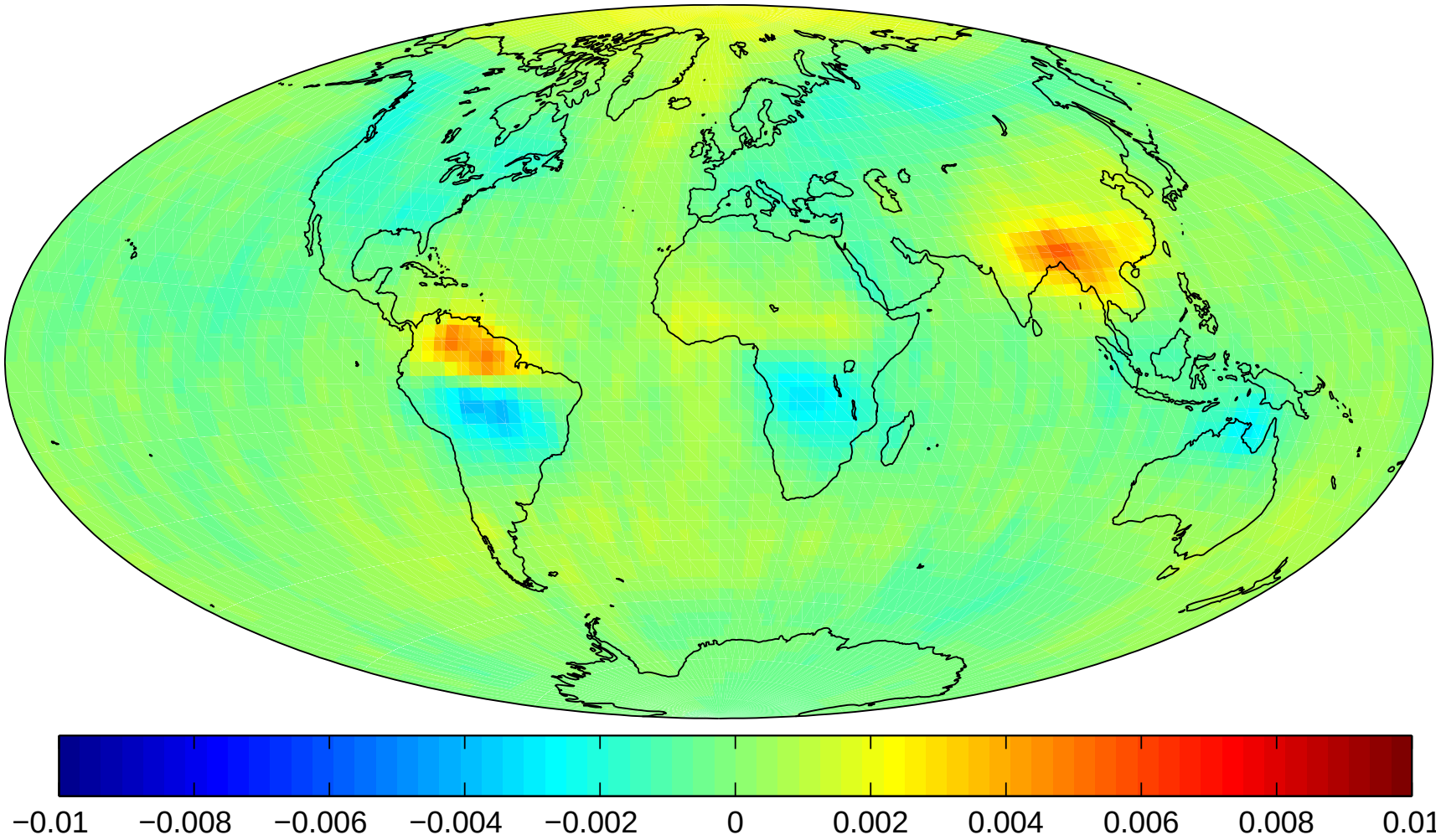
Geoidhöhen in m

Monatslösungen des Schwerefeldes aus GRACE



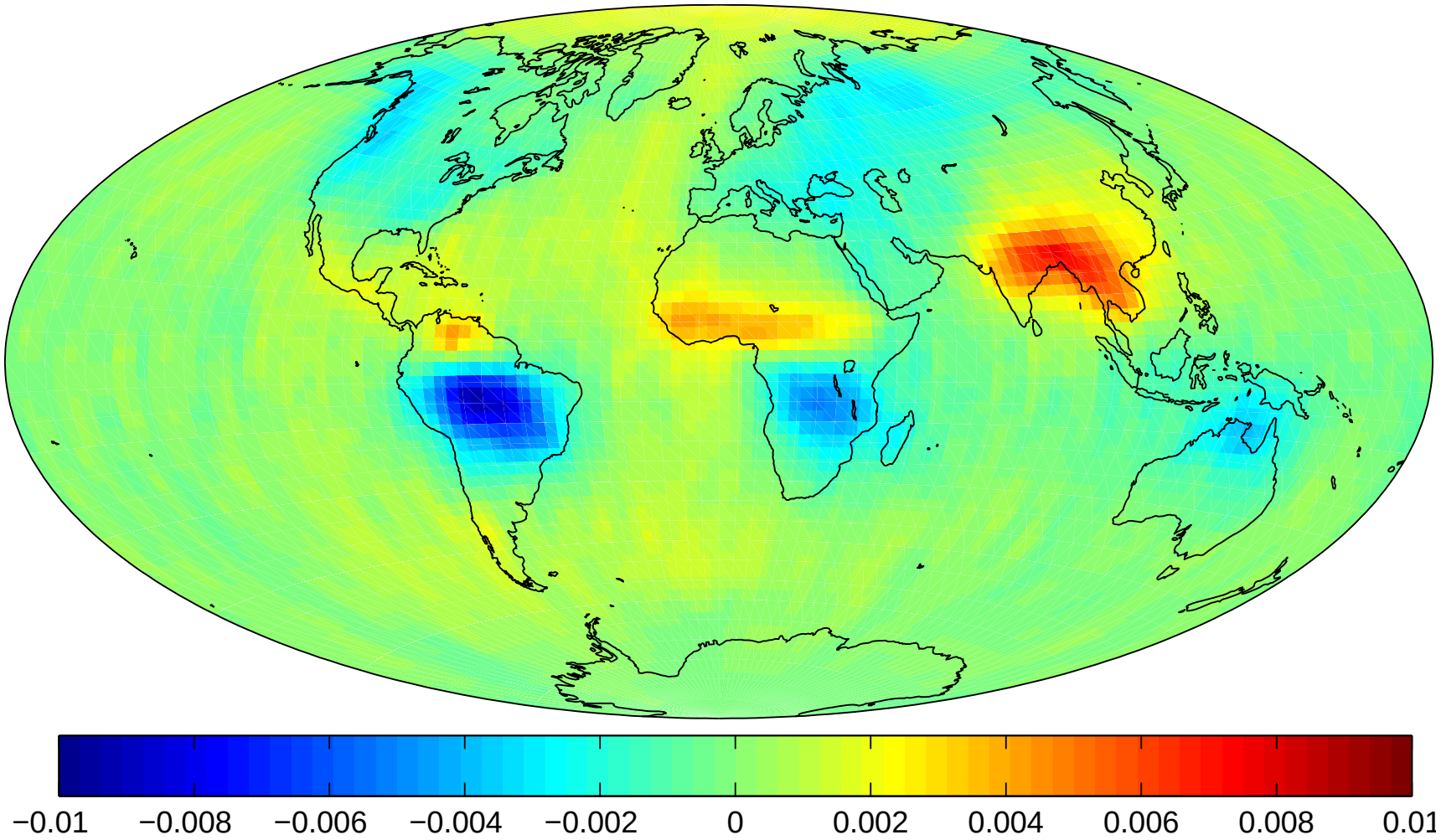
Geoidhöhen in m

Monatslösungen des Schwerefeldes aus GRACE



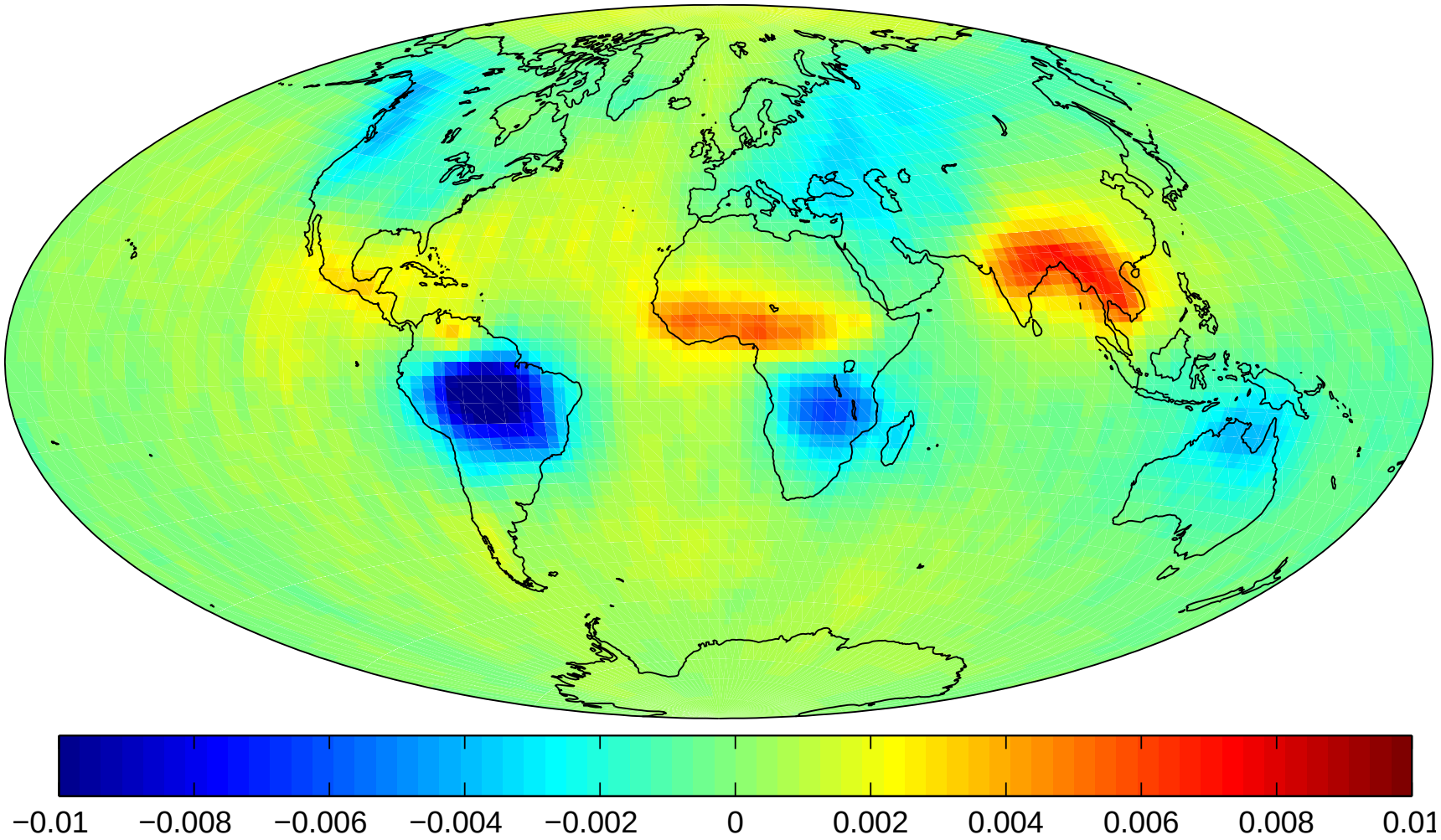
Geoidhöhen in m

Monatslösungen des Schwerefeldes aus GRACE



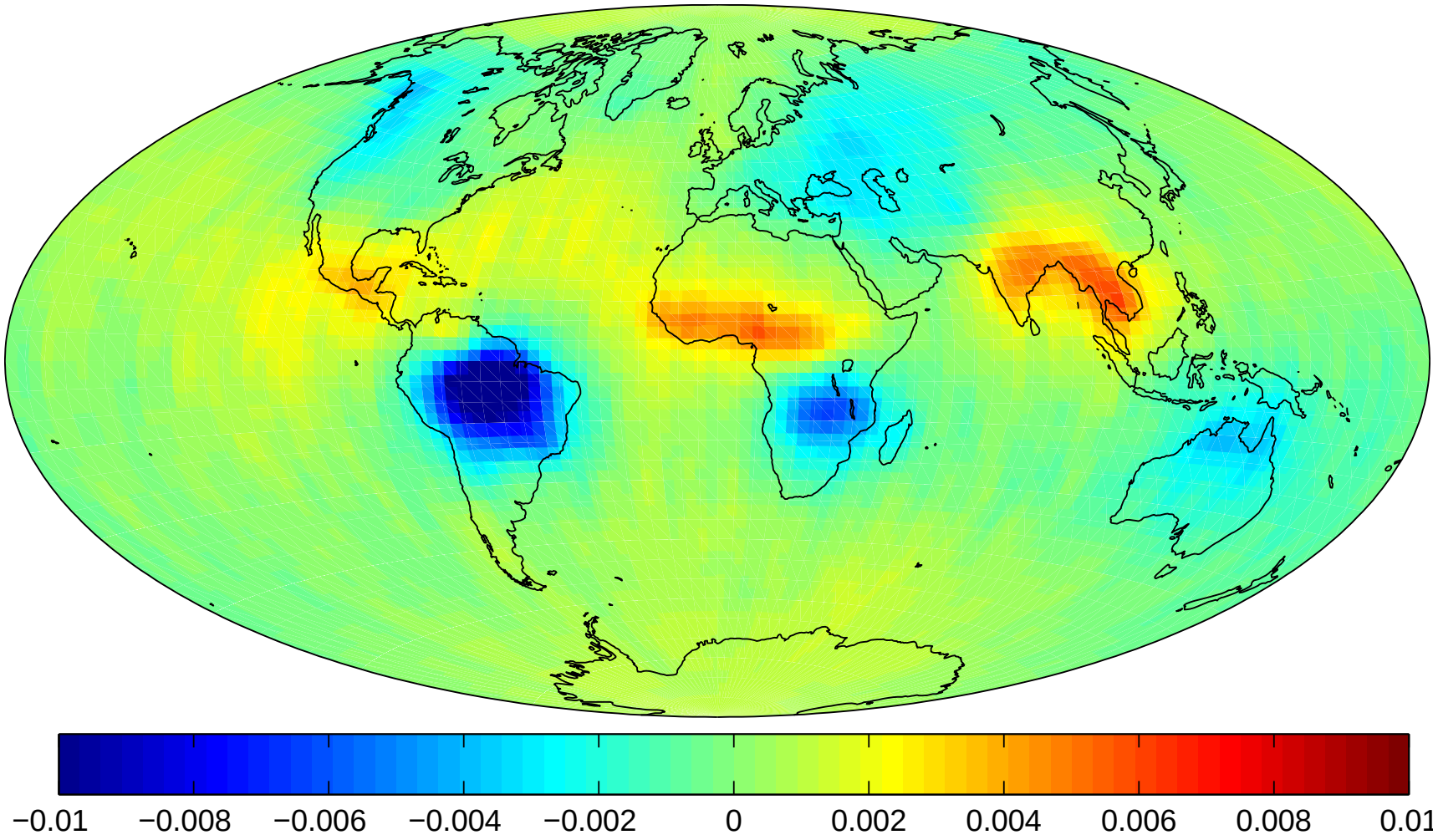
Geoidhöhen in m

Monatslösungen des Schwerefeldes aus GRACE



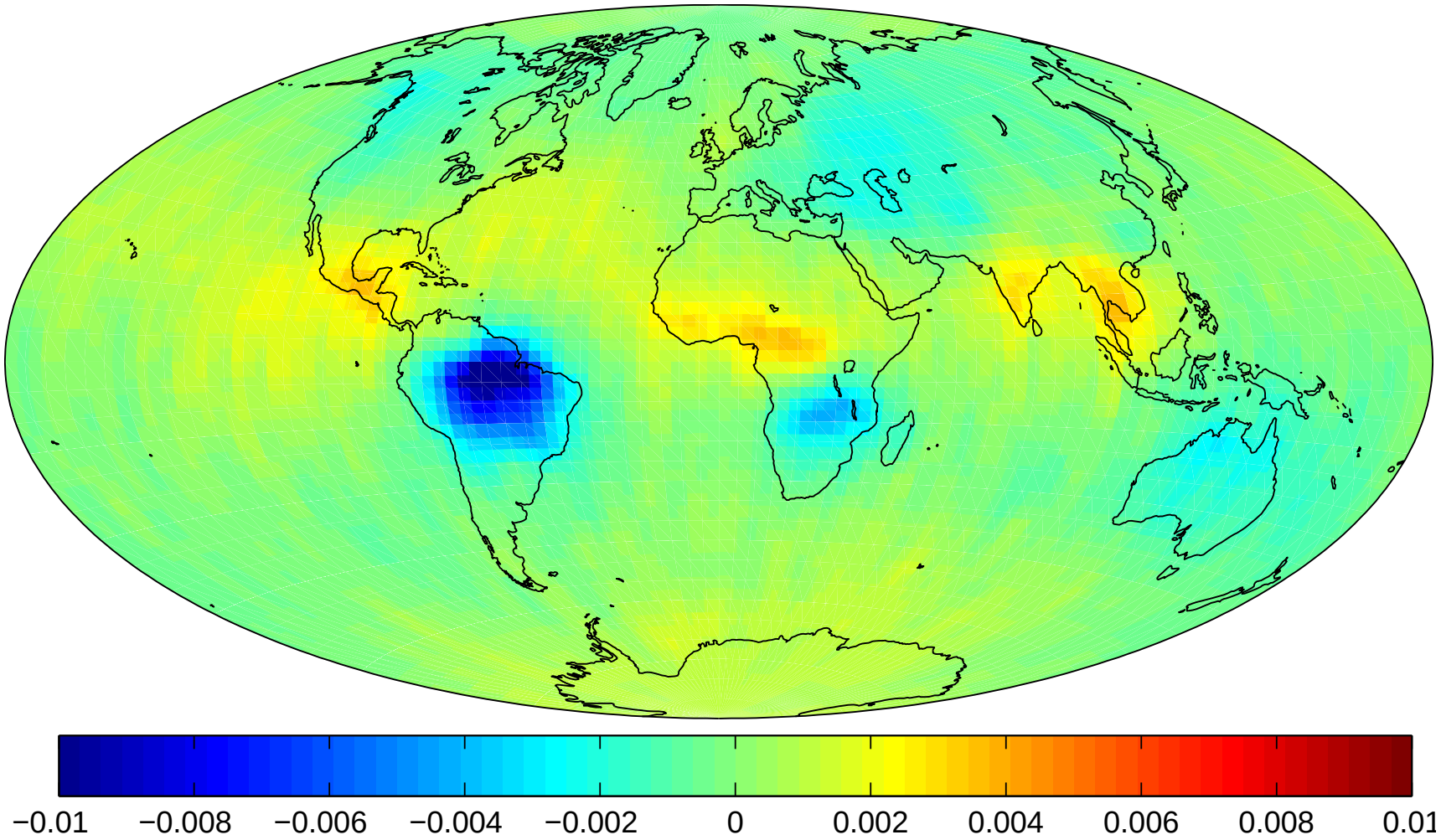
Geoidhöhen in m

Monatslösungen des Schwerefeldes aus GRACE



Geoidhöhen in m

Monatslösungen des Schwerefeldes aus GRACE



Geoidhöhen in m

IGS: International GNSS Service

- Bereits gegen Ende der 1980er Jahre war die Anwendung durch die Genauigkeit der verfügbaren GPS–Satellitenbahnen beschränkt.
- Der IGS nahm am 01. Januar 1994 als ein Service der IAG (International Association of Geodesy) seinen regulären Dienst auf.
- Es tragen heute mehr als 300 Institutionen aus etwa 80 Ländern von der ganzen Welt zum IGS auf freiwilliger Basis bei.
- Durch den ständigen Vergleich der Lösungen von verschiedenen Auswertezentren wurde die Konsistenz (Genauigkeit?) der Auswerteverfahren im Laufe der Zeit immer weiter verbessert.

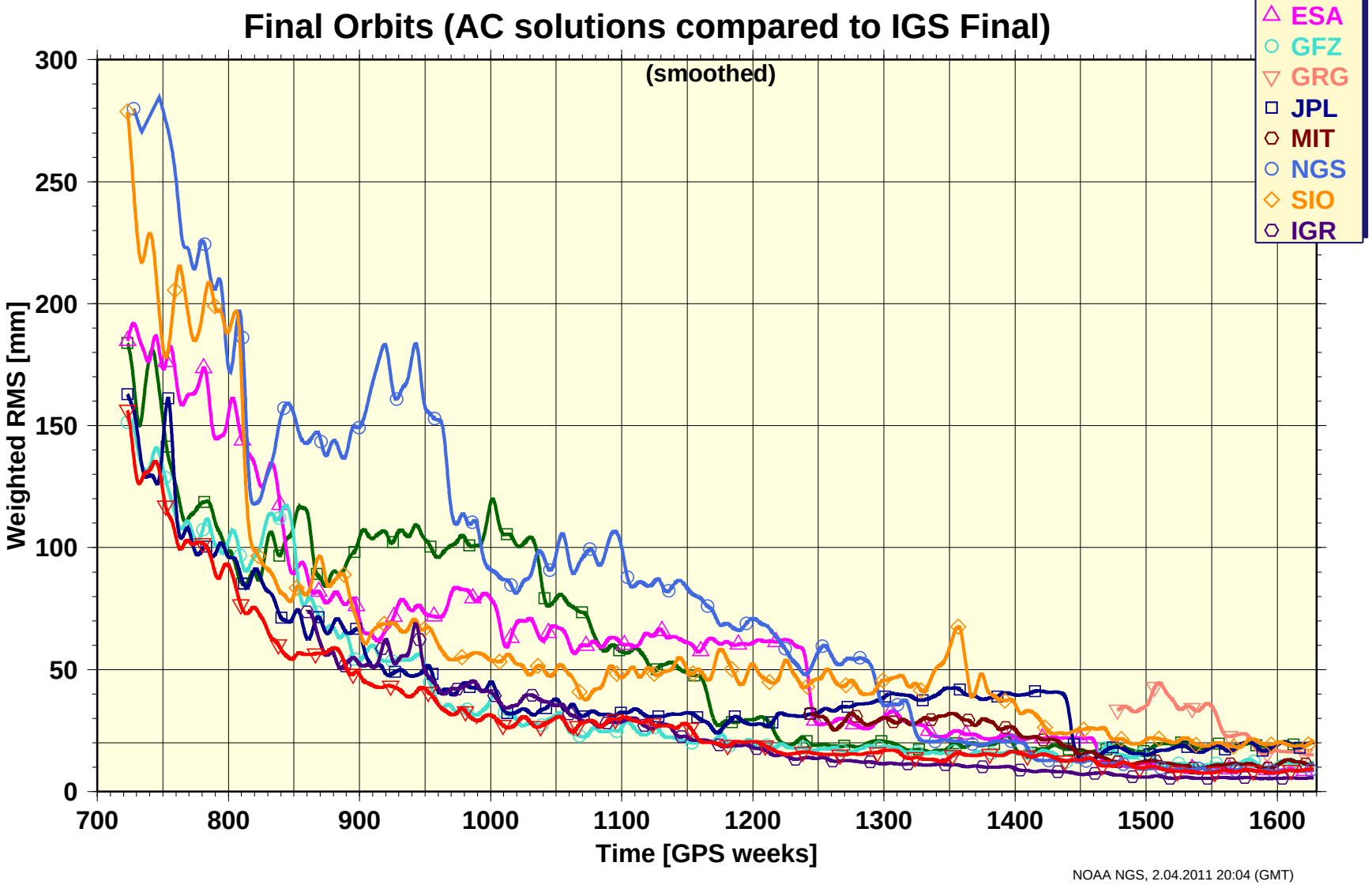
Komponenten des IGS

- GNSS–Stationen des IGS–Netzes
  Grundlage der Aktivitäten des IGS
  Beiträge von sehr vielen Organisationen
- Regionale und globale Datenzentren
  stellen die Daten den Nutzern und Analysezentren zur Verfügung
- Analysezentren
  berechnen aus den Daten der IGS–Stationen die Produkte
- AC Koordinator
  kombiniert die Beiträge der Analysezentren zu den IGS–Produkten
- Produktdatenbanken
- IGS Central Bureau technische Zentrale des IGS
- IGS Governing Board politische Leitung des IGS

Wofür steht IGS?

- International GPS Service for Geodesy and Geodynamics
  Januar 1994
- International GPS Service
  Mai 1998
- International GNSS Service
  März 2005

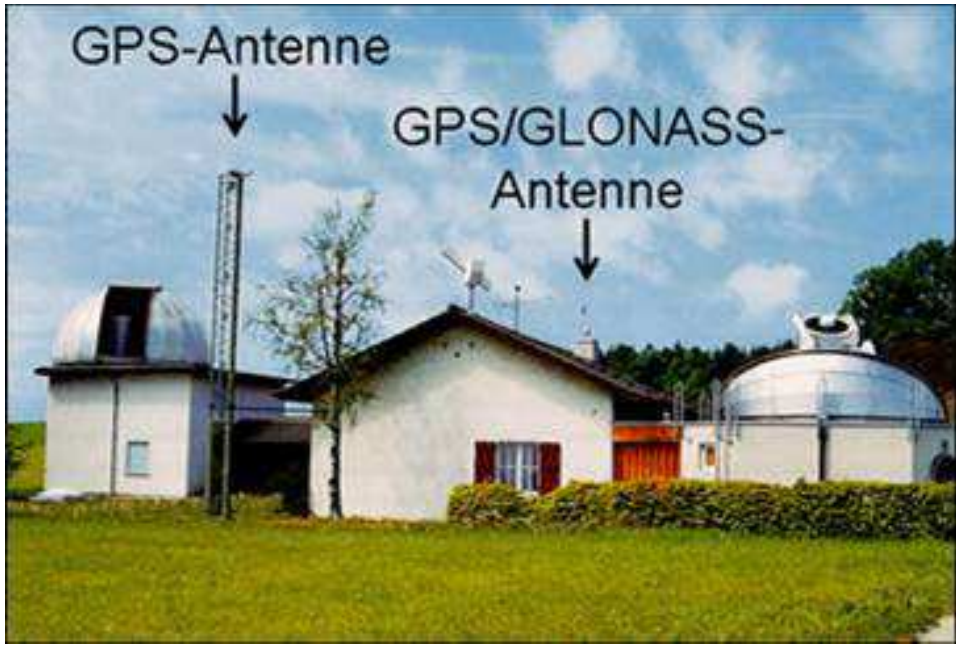
IGS Satellitenbahnen für GPS



Beiträge der Uni Bern zum IGS

CODE–Rechenzentrum am Astronomischen Institut

GNSS–Messstation im Observatorium Zimmerwald



CODE: Center for Orbit Determination in Europe

- CODE ist ein Joint Venture bestehend aus
  - Astronomisches Institut der Universität Bern (AIUB),
  - Bundesamt für Landestopographie (swisstopo),
  - Institut für Kartographie und Geodäsie (BKG), and
  - Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie an der Technischen Universität München (IAPG, TUM).

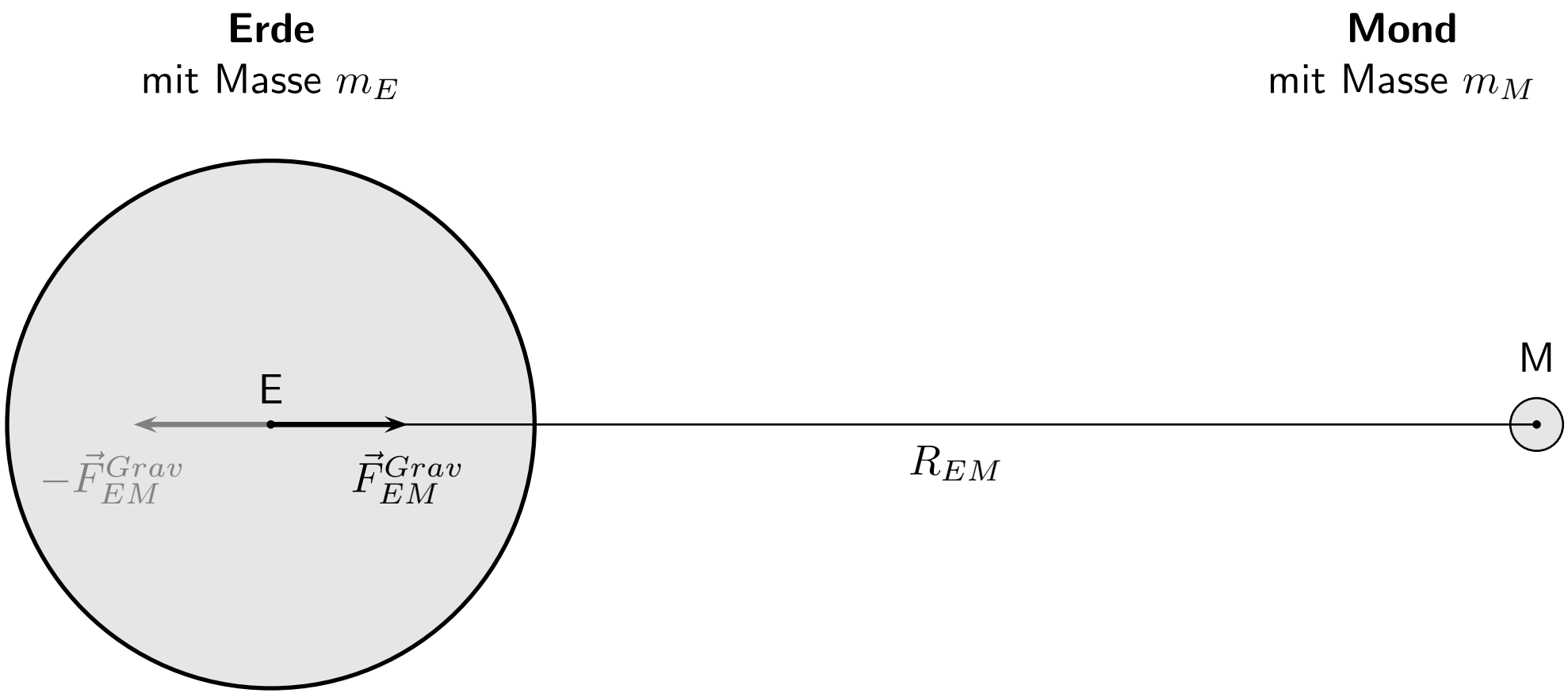
AIUB

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

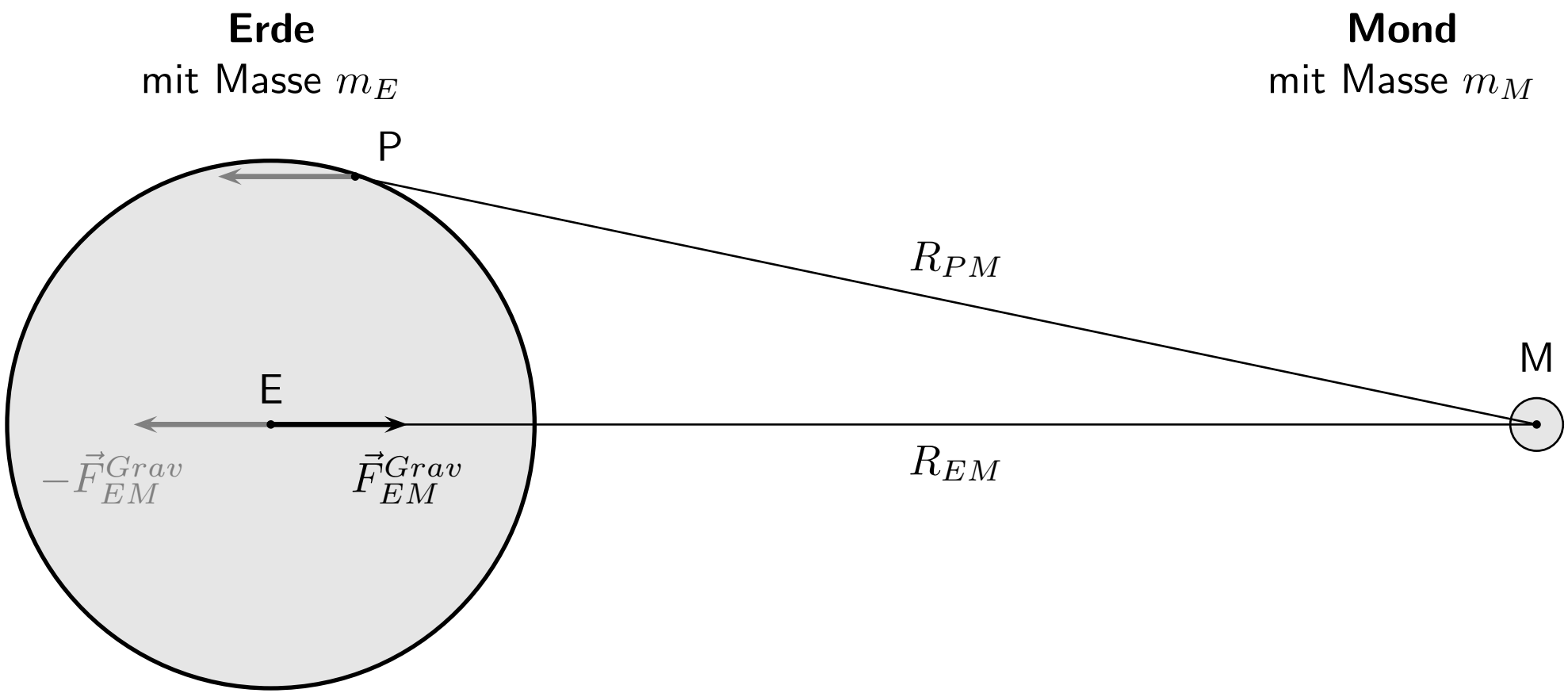
Bundesamt für
Kartographie und Geodäsie

Technische Universität München

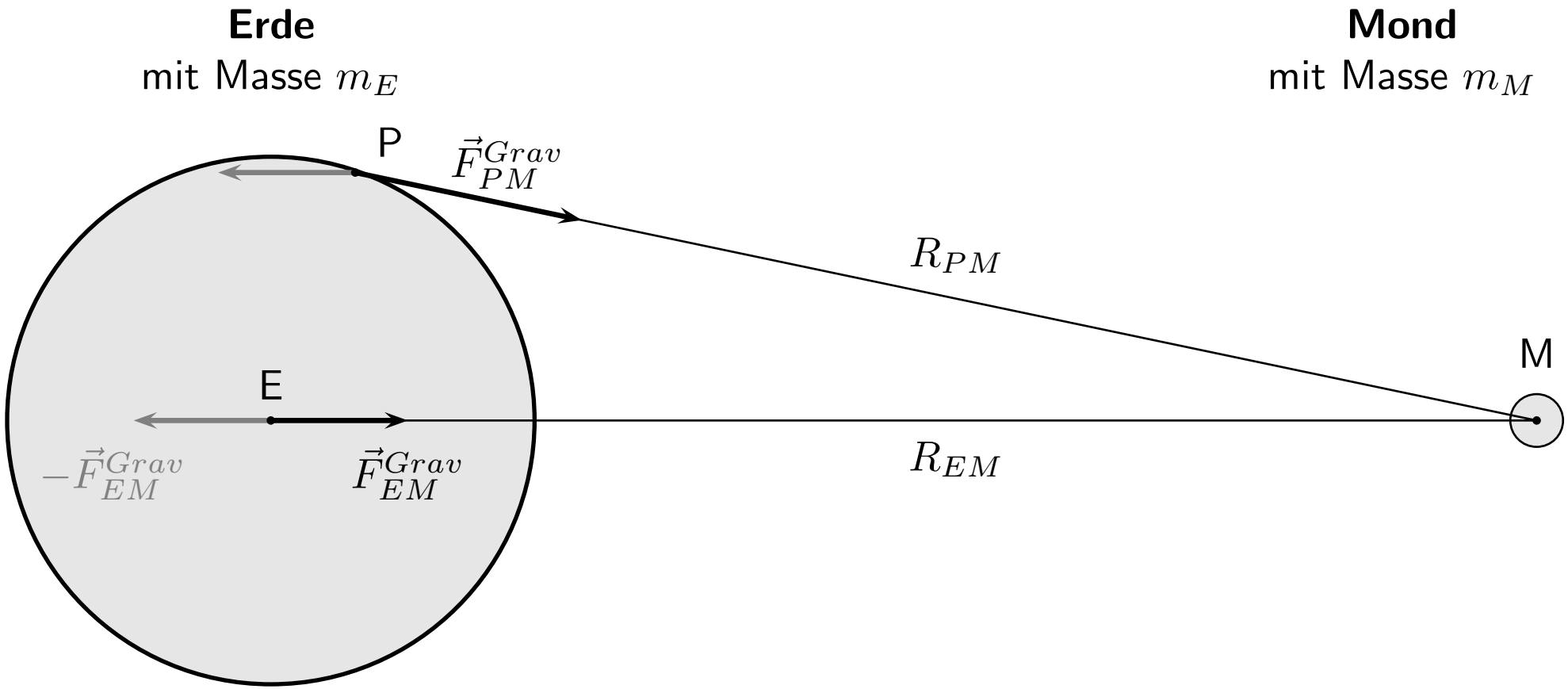
Entstehung der Gezeitenkräfte



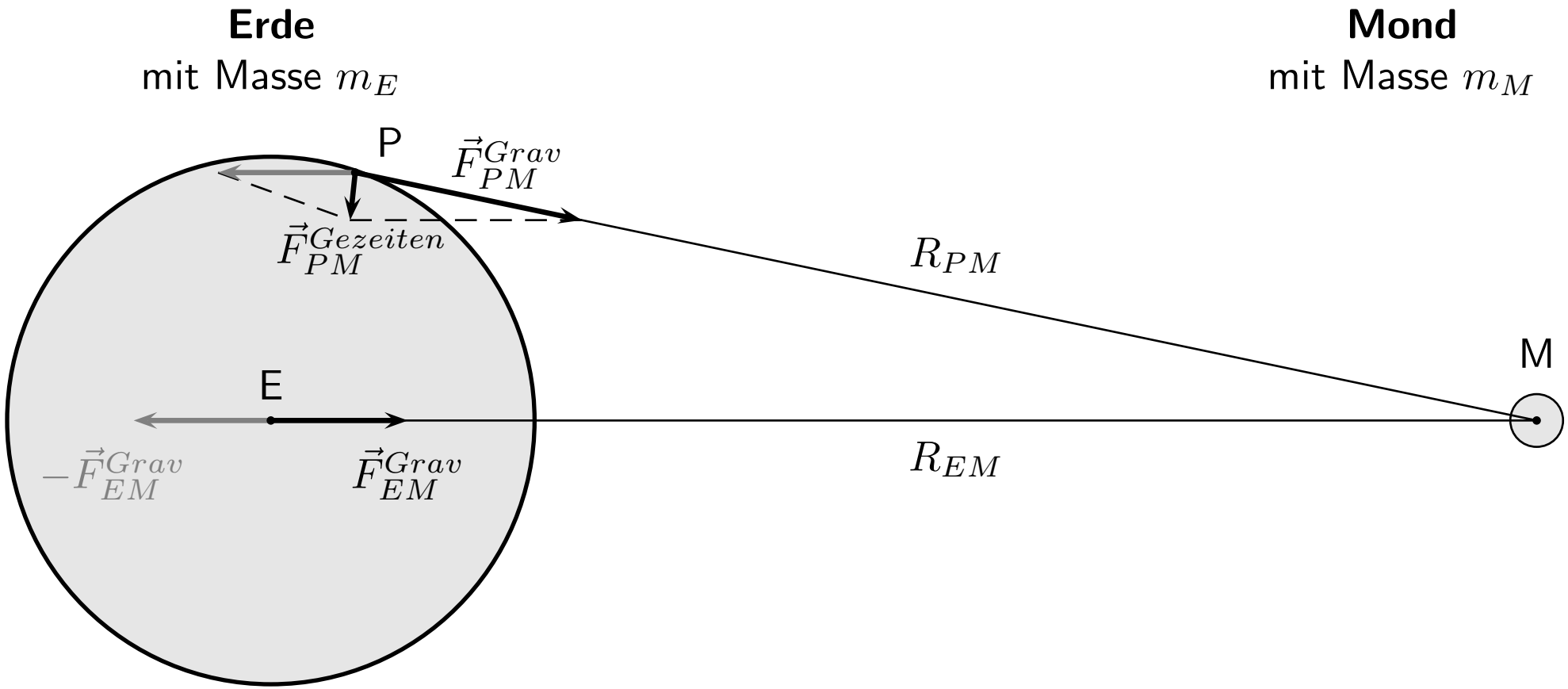
Entstehung der Gezeitenkräfte



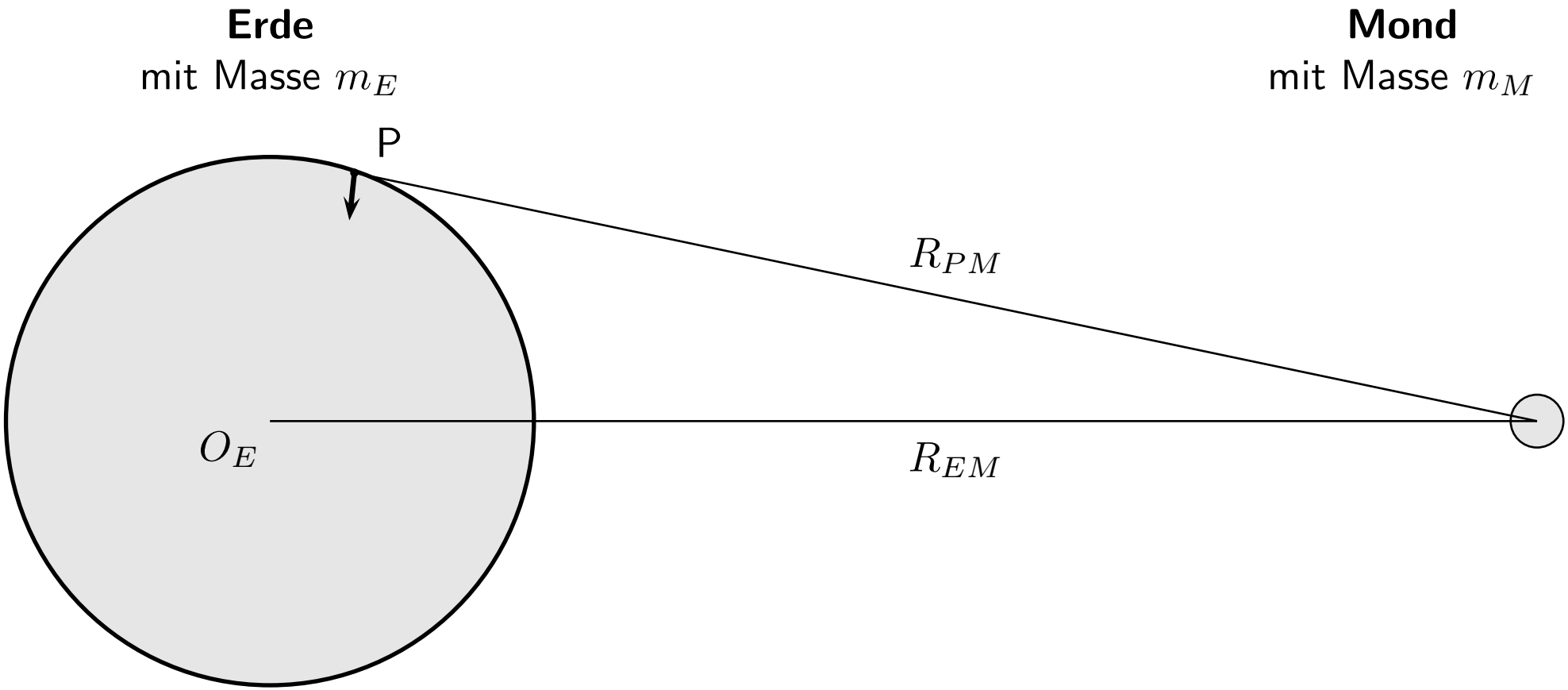
Entstehung der Gezeitenkräfte



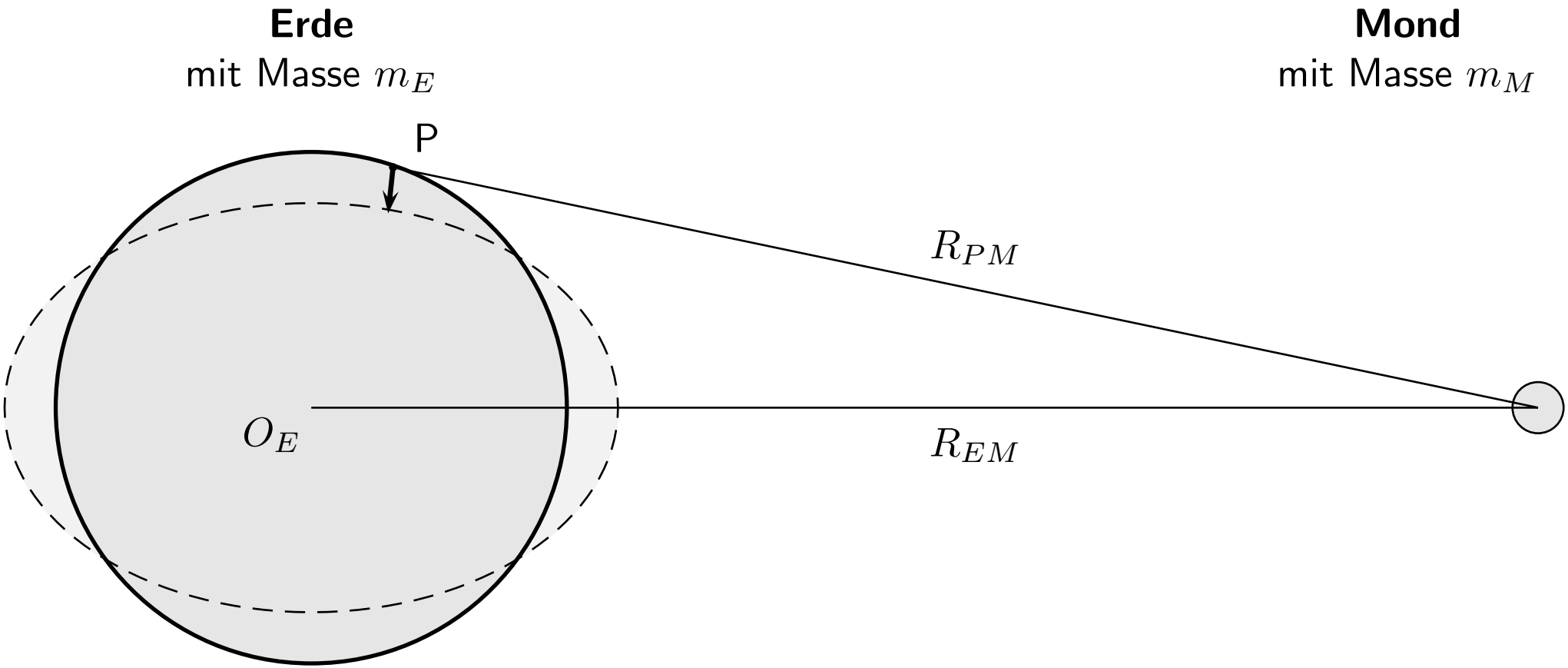
Entstehung der Gezeitenkräfte



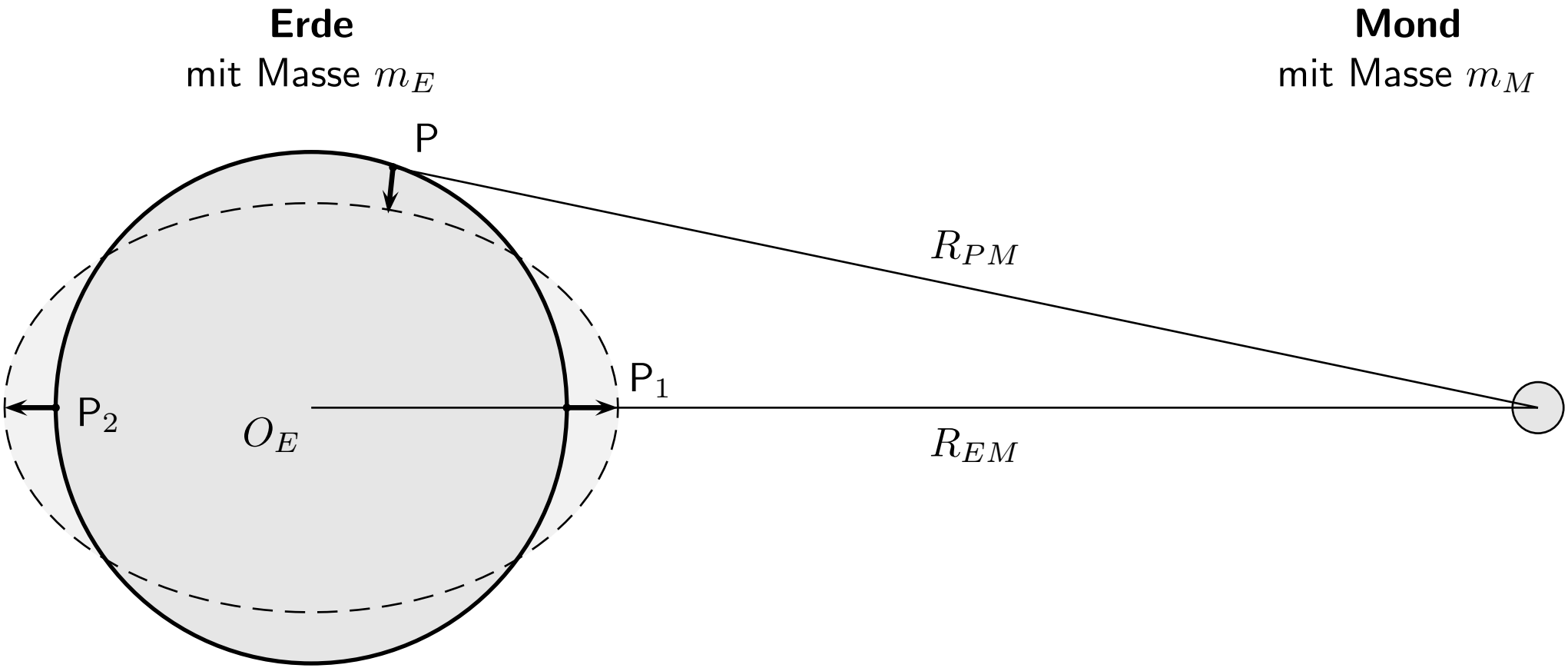
Entstehung der Gezeitenkräfte



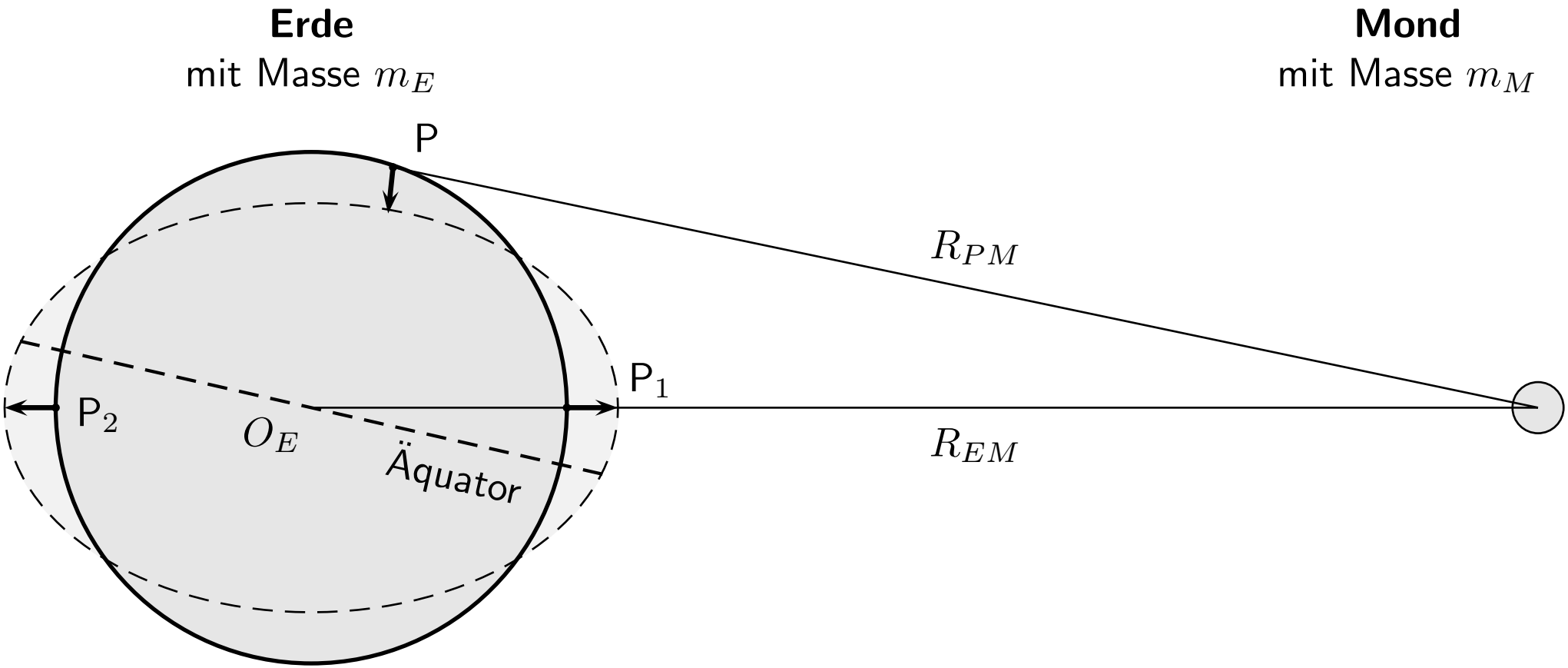
Entstehung der Gezeitenkräfte



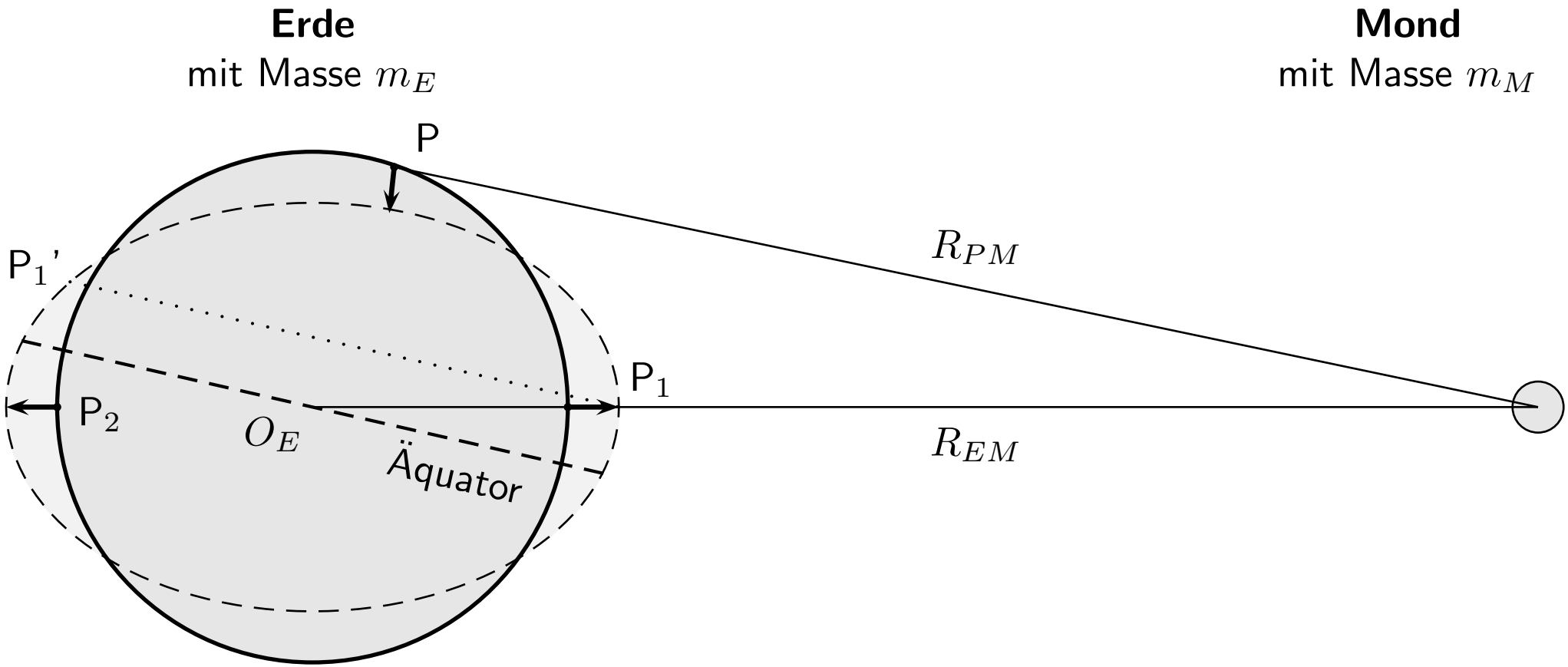
Entstehung der Gezeitenkräfte



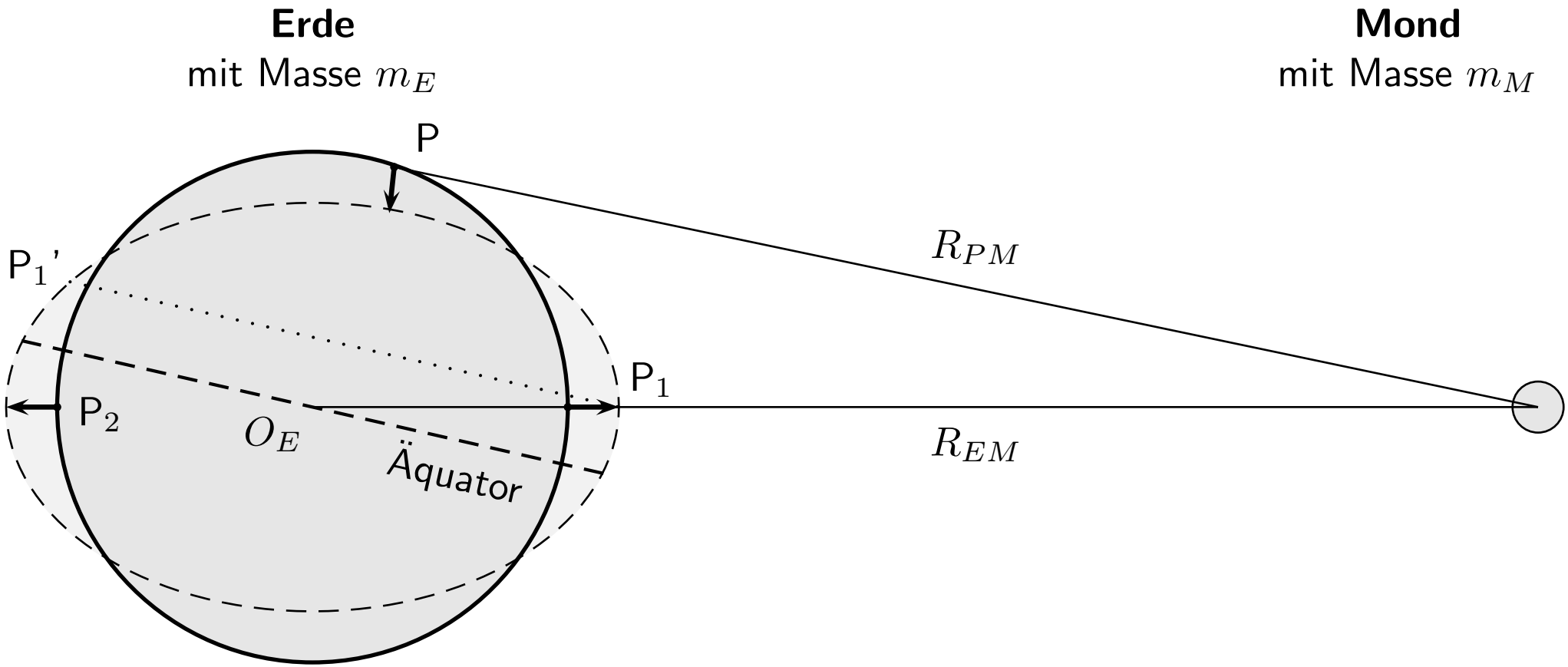
Entstehung der Gezeitenkräfte



Entstehung der Gezeitenkräfte



Entstehung der Gezeitenkräfte



- Gezeiten haben also halbtägliche, tägliche und wegen der Variation der Bahn des Himmelskörpers auch langperiodische Anteile.

Reaktionen der Erde auf Gezeitenkräfte

- Ozeangezeiten sind eine direkte Reaktion auf die Gezeitenkräfte.

Reaktionen der Erde auf Gezeitenkräfte

- Ozeangezeiten sind eine direkte Reaktion auf die Gezeitenkräfte.
- Die tatsächlichen Ozeangezeiten werden jedoch neben den anregenden Gezeitenkräften durch
  - die Kontinente (Störung der Ausbreitung des Wassers),
  - Flachwassergebiete (verringerte Fliessgeschwindigkeit) und
  - Resonanzeffekten in Ozeanbecken

  beeinflusst.

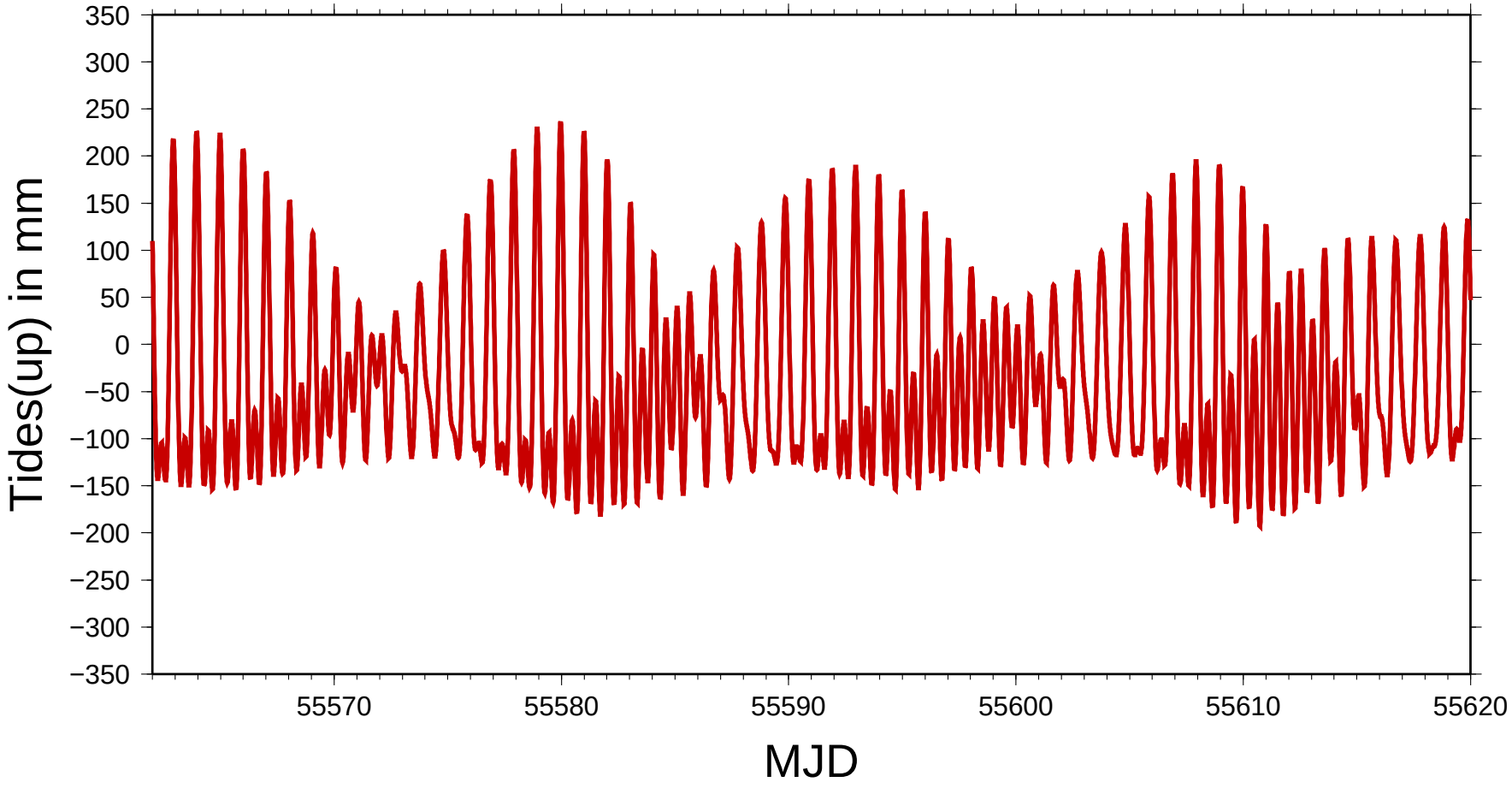
Reaktionen der Erde auf Gezeitenkräfte

- Ozeangezeiten sind eine direkte Reaktion auf die Gezeitenkräfte.
- Die tatsächlichen Ozeangezeiten werden jedoch neben den anregenden Gezeitenkräften durch
  - die Kontinente (Störung der Ausbreitung des Wassers),
  - Flachwassergebiete (verringerte Fliessgeschwindigkeit) und
  - Resonanzeffekten in Ozeanbecken

  beeinflusst.
- Der Erdkruste reagiert mit einer Deformation von ca. 60% eines völlig freien Ozeans: Festerdegezeiten

Beispiele für Festerdegezeiten: Vertikale Deformation

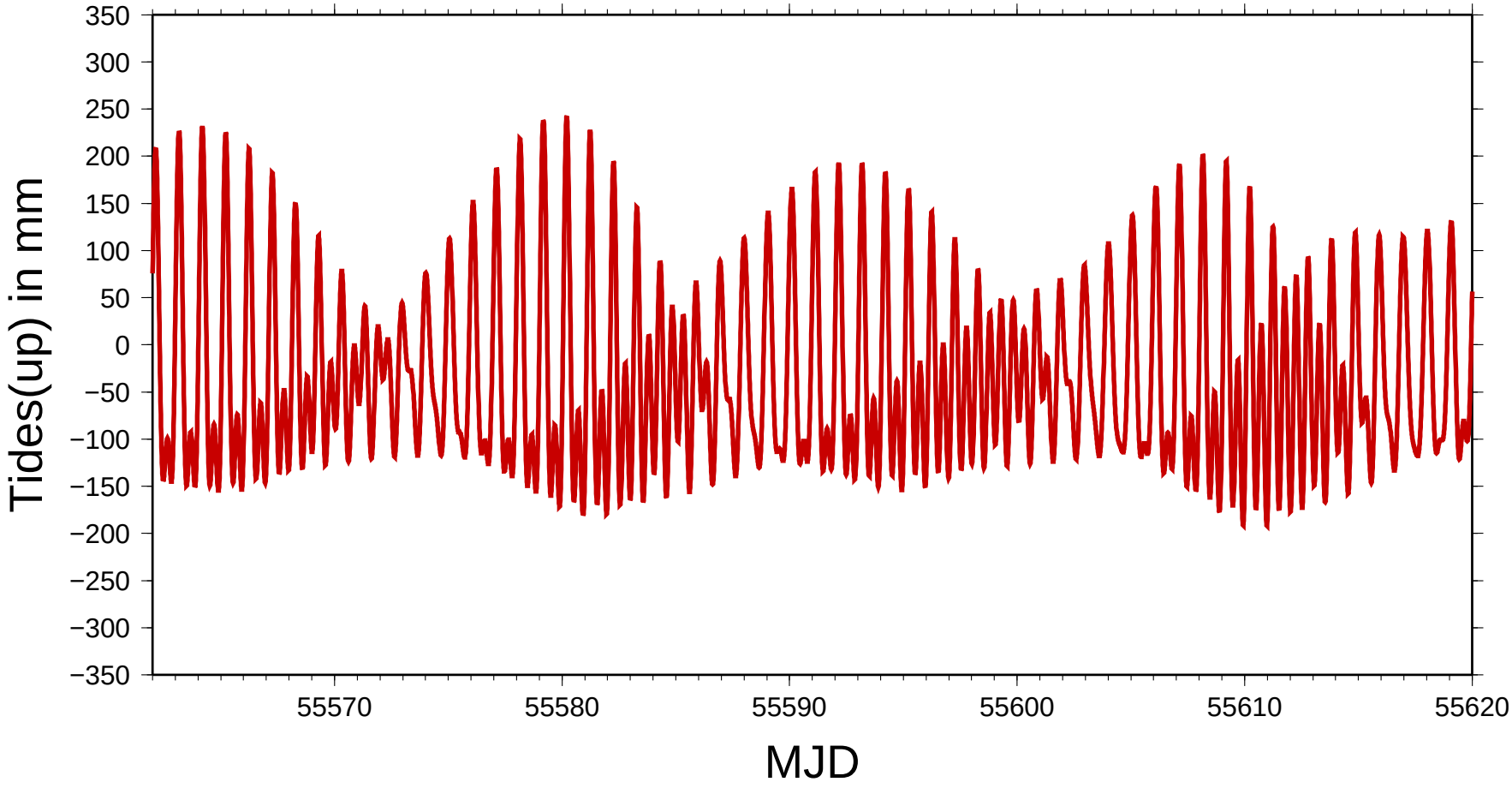
Station: Zimmerwald, Schweiz



Zeitraum: Januar/Februar 2011

Beispiele für Festerdegezeiten: Vertikale Deformation

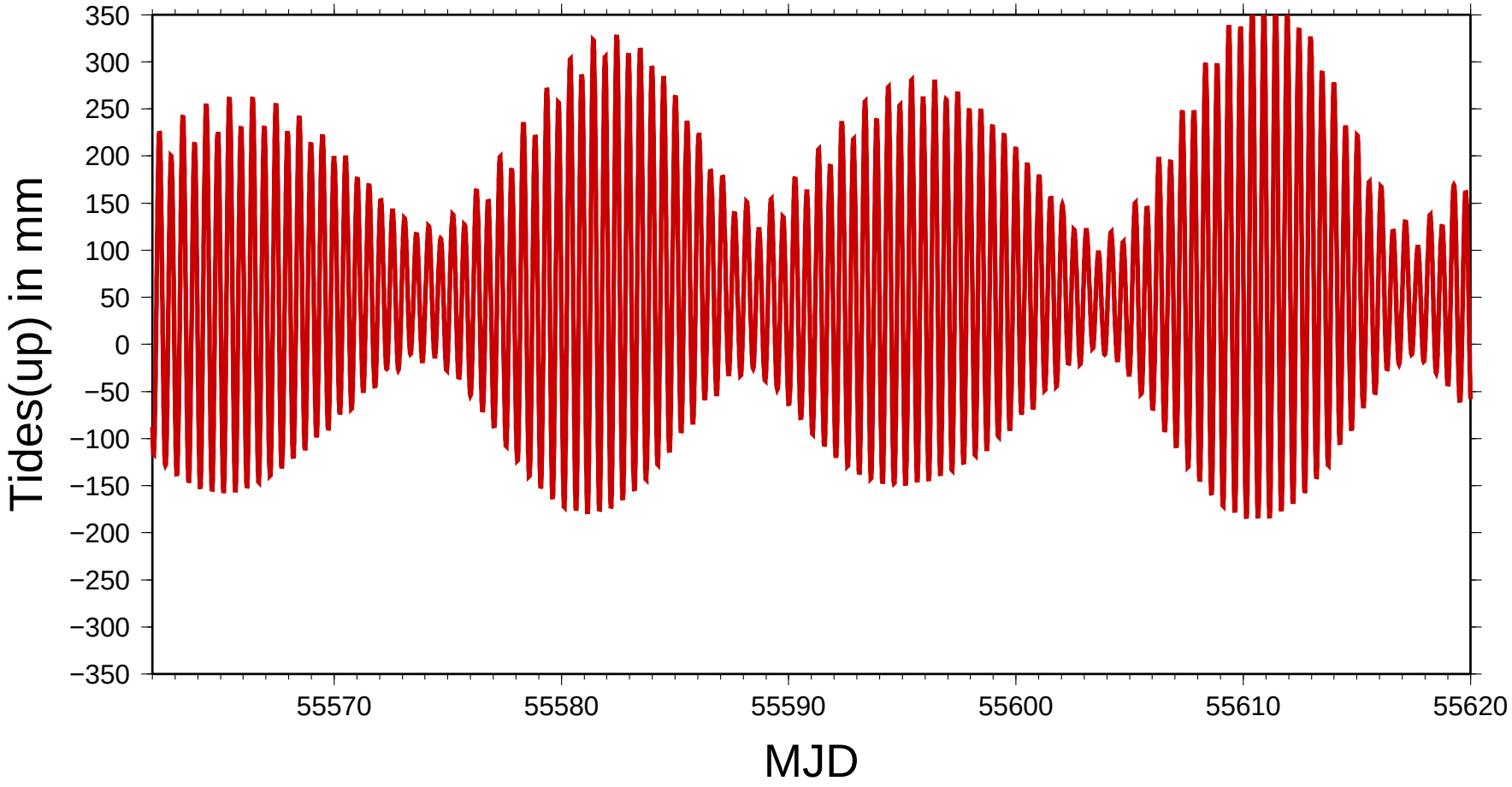
Station: Algonquin, Kanada



Zeitraum: Januar/Februar 2011

Beispiele für Festerdegezeiten: Vertikale Deformation

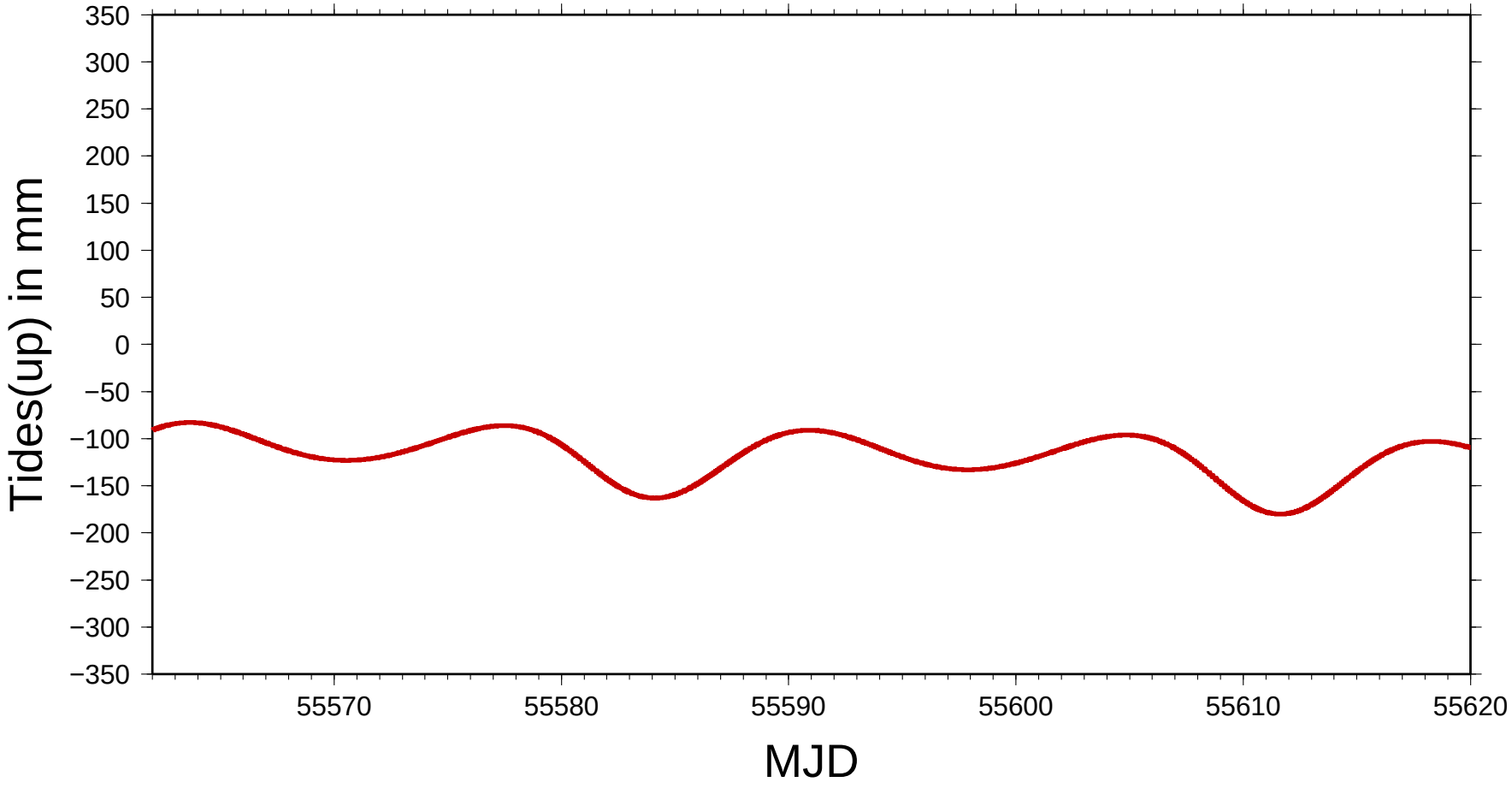
Station: Malindi, Kenia



Zeitraum: Januar/Februar 2011

Beispiele für Festerdegezeiten: Vertikale Deformation

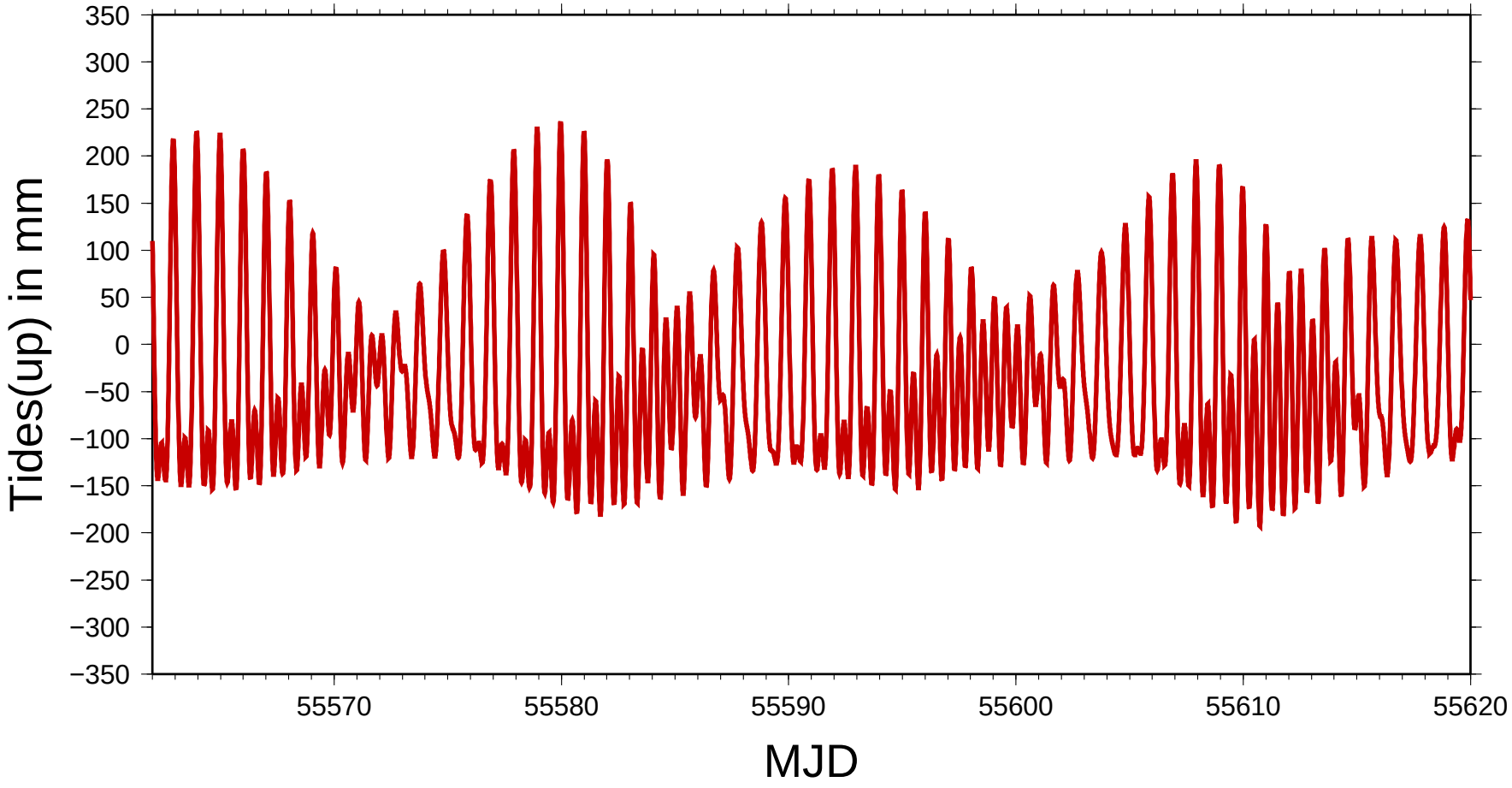
Station: Amundson-Scott, Südpol



Zeitraum: Januar/Februar 2011

Beispiele für Festerdegezeiten: Vertikale Deformation

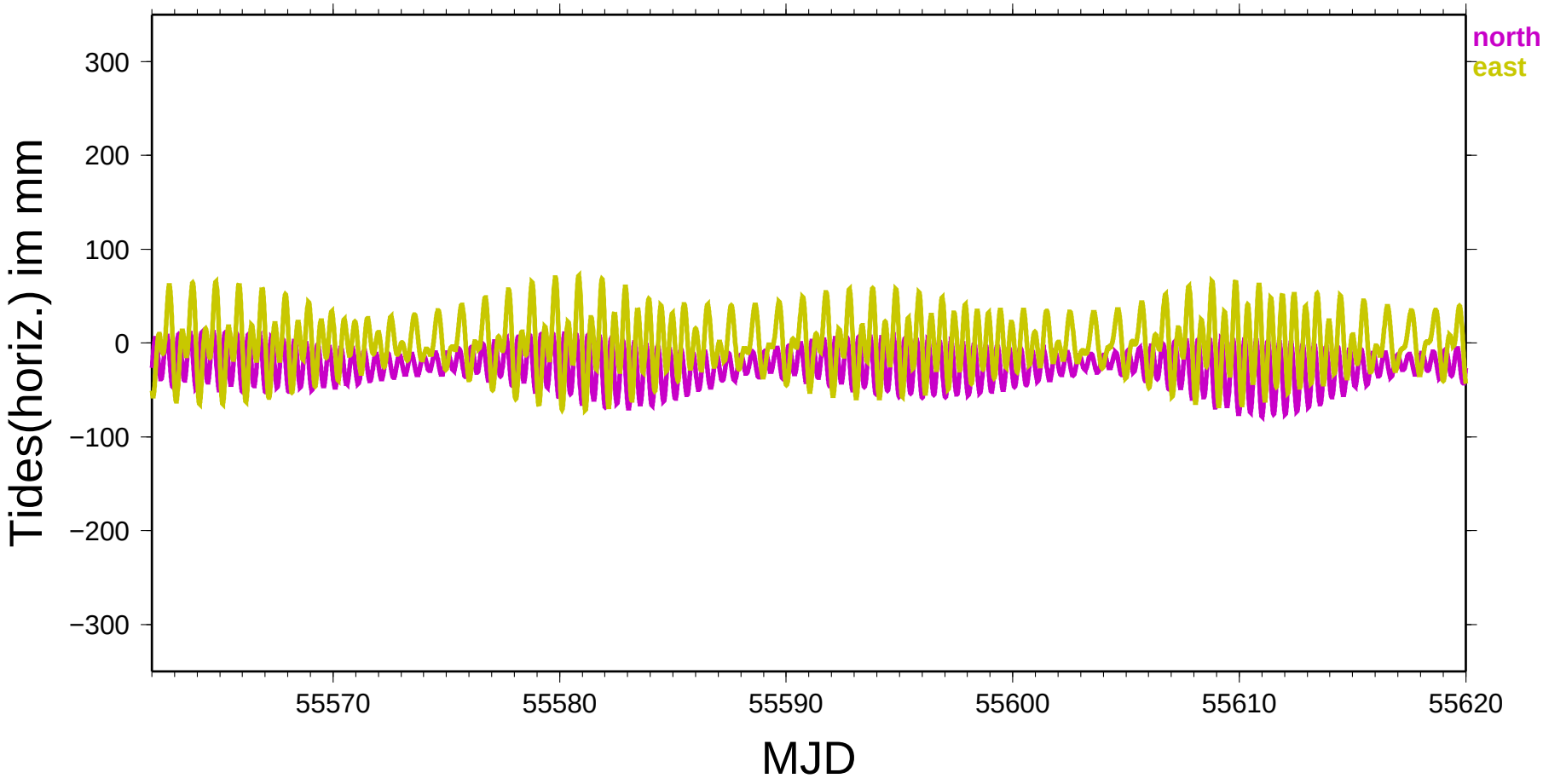
Station: Zimmerwald, Schweiz



Zeitraum: Januar/Februar 2011

Beispiele für Festerdegezeiten: Horiz. Deformation

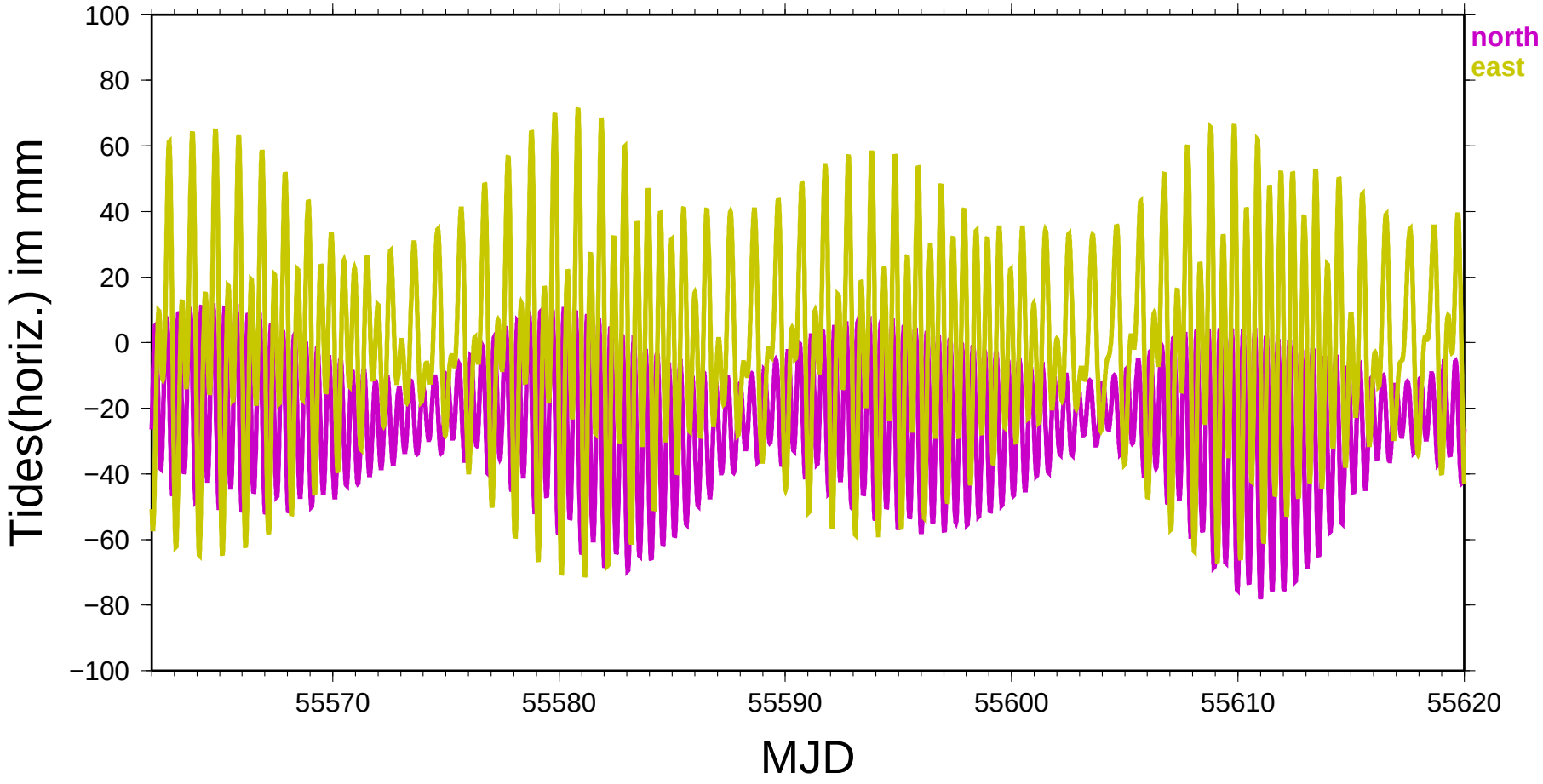
Station: Zimmerwald, Schweiz



Zeitraum: Januar/Februar 2011

Beispiele für Festerdegezeiten: Horiz. Deformation

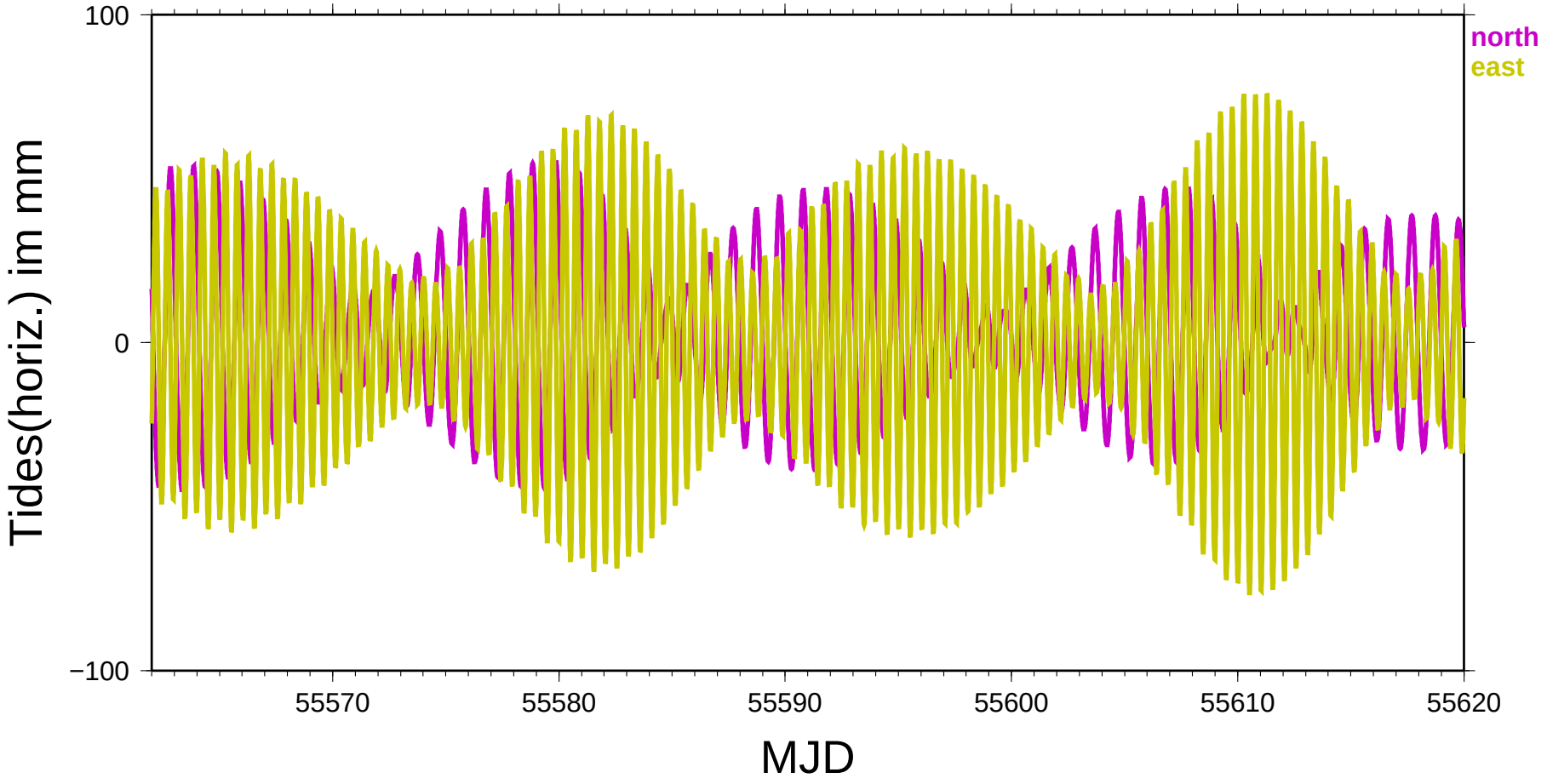
Station: Zimmerwald, Schweiz



Zeitraum: Januar/Februar 2011

Beispiele für Festerdegezeiten: Horiz. Deformation

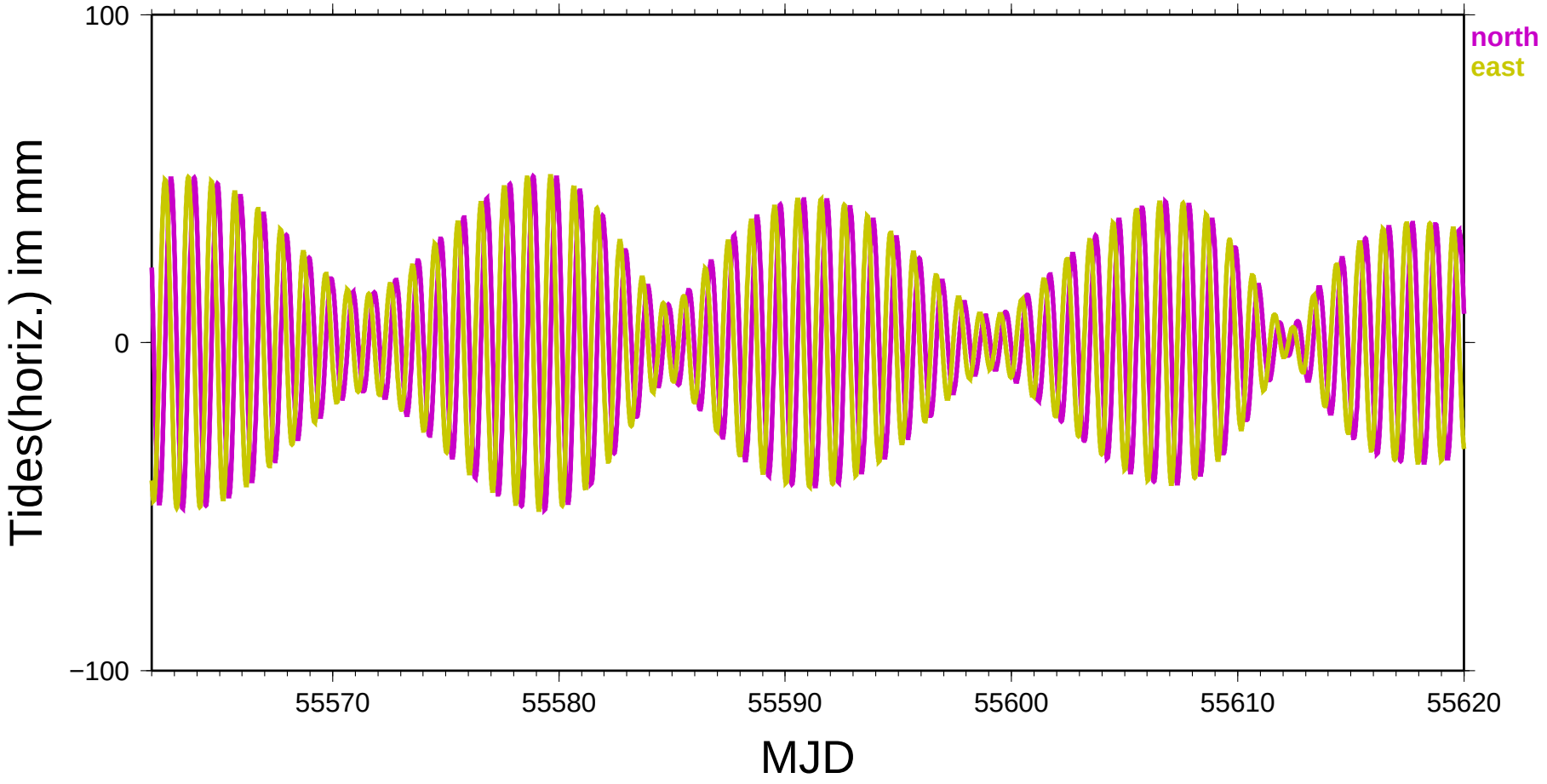
Station: Malindi, Kenia



Zeitraum: Januar/Februar 2011

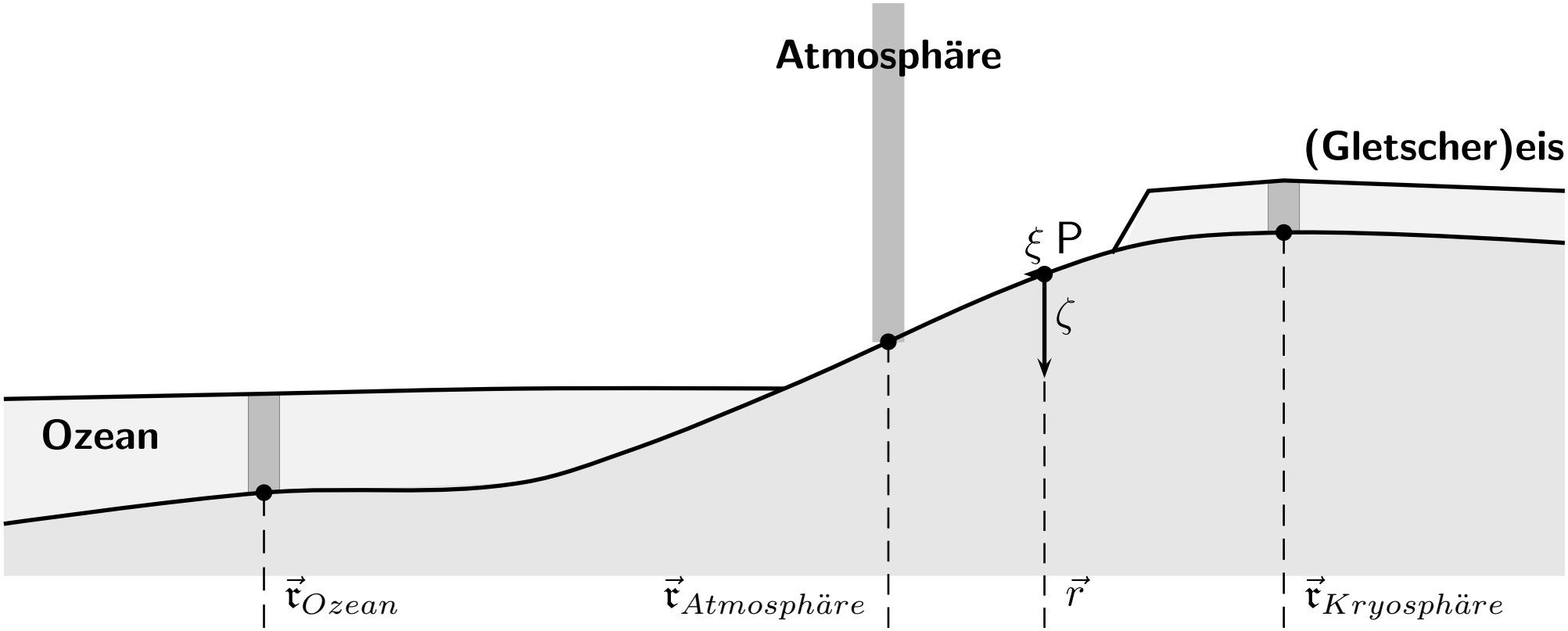
Beispiele für Festerdegezeiten: Horiz. Deformation

Station: Amundson-Scott, Südpol



Zeitraum: Januar/Februar 2011

Deformationen durch Belastung der Erdkruste



Auflastdeformationen

- *Ozeangezeiten*:
  - Die Umverteilung des Wassermassen durch die Ozeangezeiten führt zu einer zeitlich variablen Deformation der Erdkruste.

Auflastdeformationen

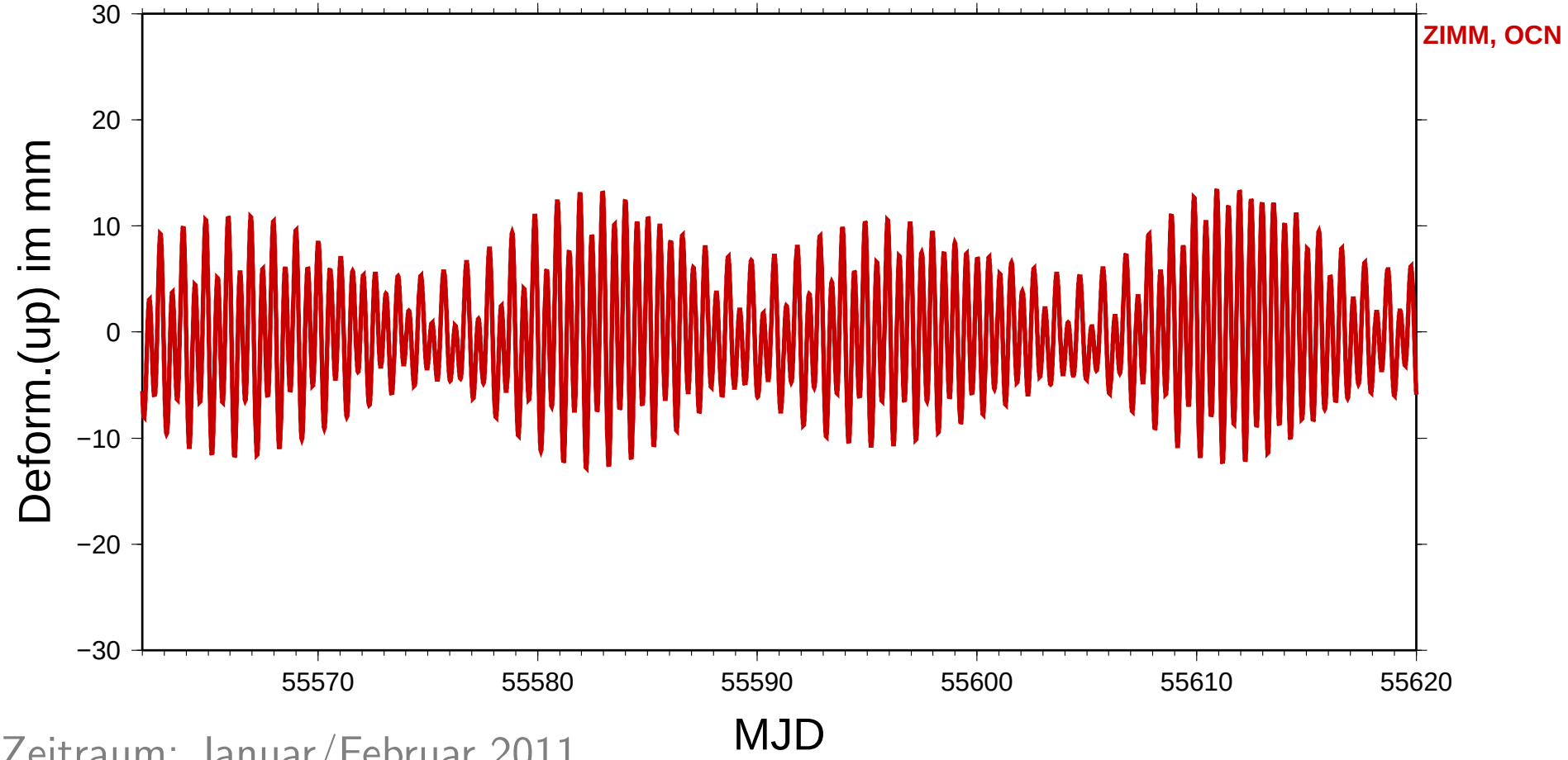
- *Ozeangezeiten*:
  - Die Umverteilung des Wassermassen durch die Ozeangezeiten führt zu einer zeitlich variablen Deformation der Erdkruste.
- *Atmosphäre*:
  - Die Masse der Atmosphäre führt ebenfalls zu einer Deformation der Erdkruste, d.h., Änderungen in der Masseverteilung (Hoch- und Tiefdruckgebiete) haben zeitlich variable Deformationen zur Folge.

Auflastdeformationen

- *Ozeangezeiten*:
  - Die Umverteilung des Wassermassen durch die Ozeangezeiten führt zu einer zeitlich variablen Deformation der Erdkruste.
- *Atmosphäre*:
  - Die Masse der Atmosphäre führt ebenfalls zu einer Deformation der Erdkruste, d.h., Änderungen in der Masseverteilung (Hoch- und Tiefdruckgebiete) haben zeitlich variable Deformationen zur Folge.
- *Inverses Barometer*:
  - Insbesondere küstennahe Stationen sind von den Deformationen durch die Wassermassenumverteilung des Ozeans betroffen, während bei den Inlandstationen die Deformationen durch die Luftmassen dominiert.

Deformation wegen Ozeangezeiten

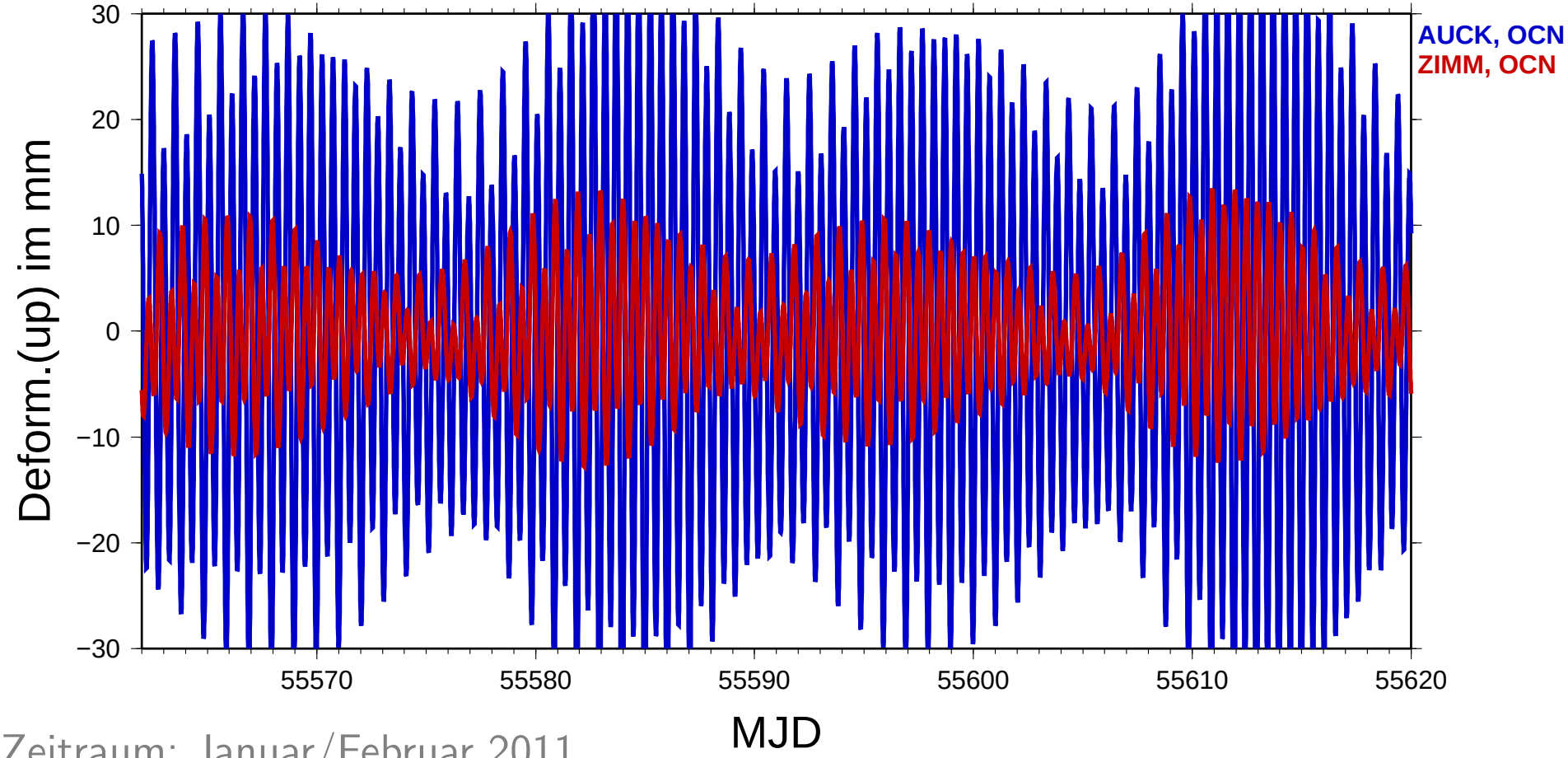
Station: ZIMM – Zimmerwald, Schweiz



Zeitraum: Januar/Februar 2011

Deformation wegen Ozeangezeiten

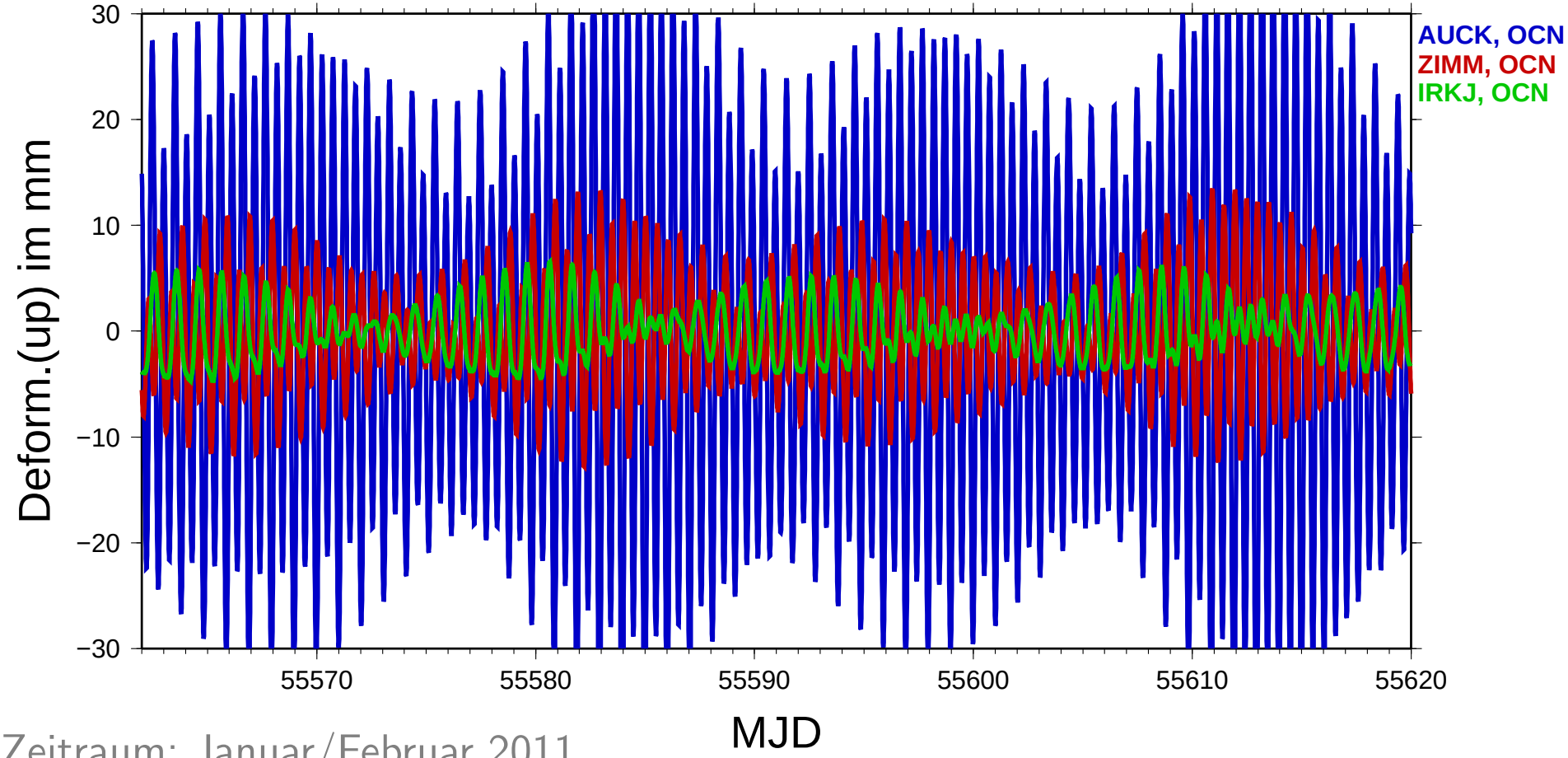
Station: ZIMM – Zimmerwald, Schweiz
Station: AUCK – Auckland, Neuseeland



Zeitraum: Januar/Februar 2011

Deformation wegen Ozeangezeiten

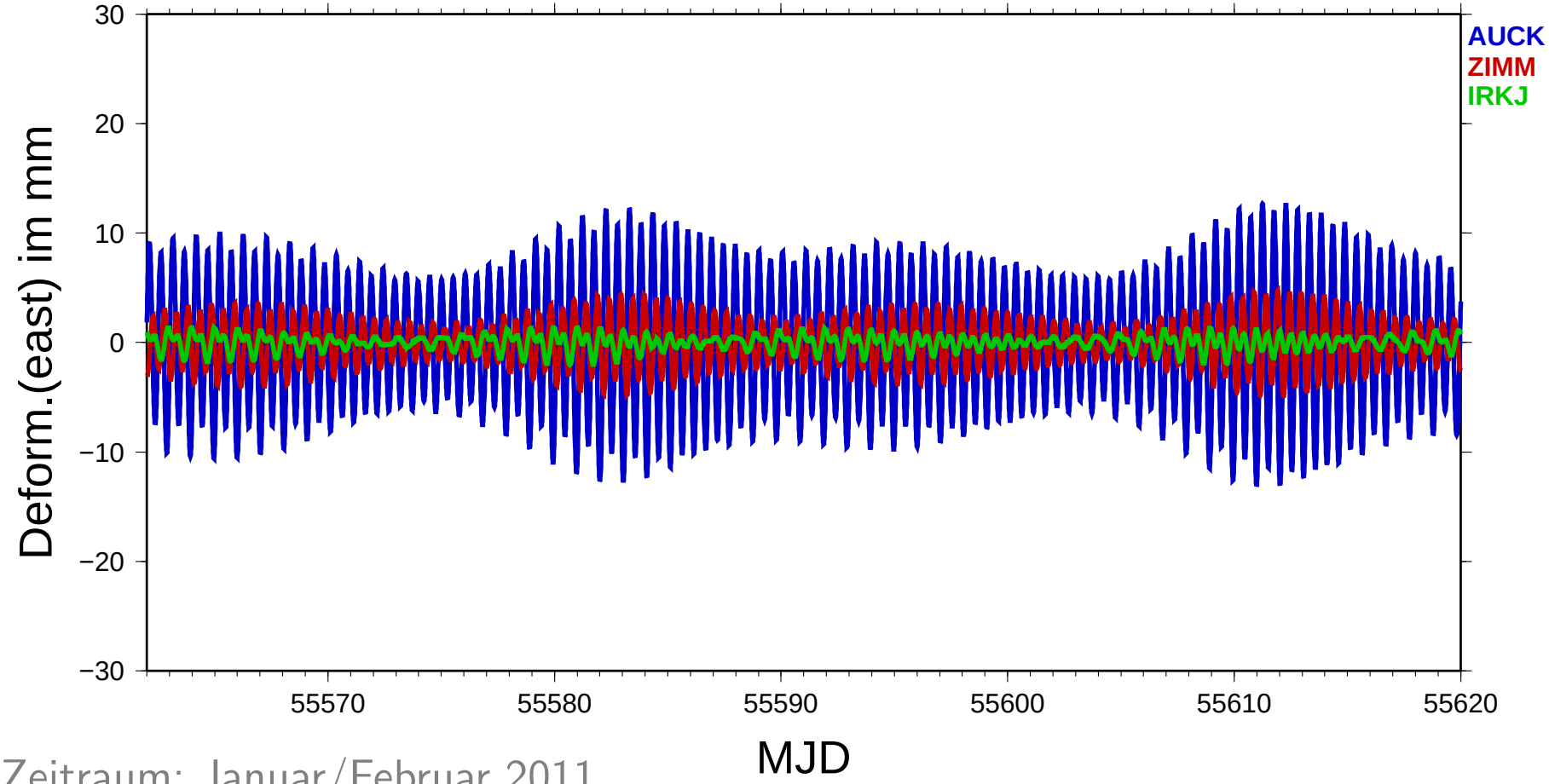
Station: ZIMM – Zimmerwald, Schweiz
Station: AUCK – Auckland, Neuseeland
Station: IRKJ – Irkutsk, Russland



Zeitraum: Januar/Februar 2011

Deformation wegen Ozeangezeiten

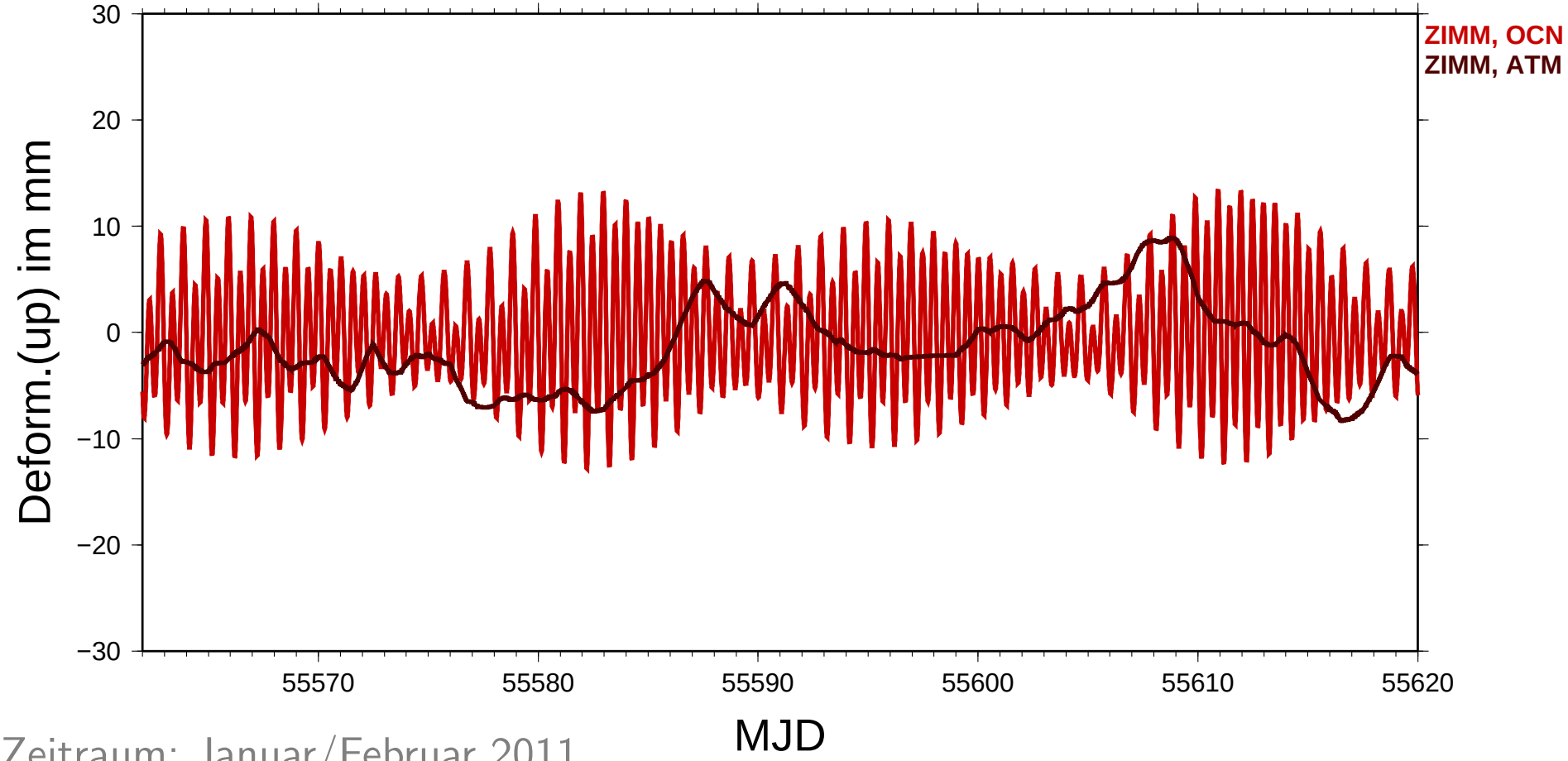
Station: ZIMM – Zimmerwald, Schweiz
Station: AUCK – Auckland, Neuseeland
Station: IRKJ – Irkutsk, Russland



Zeitraum: Januar/Februar 2011

Vergleich: Ozeangezeiten/Luftdruckänderungen

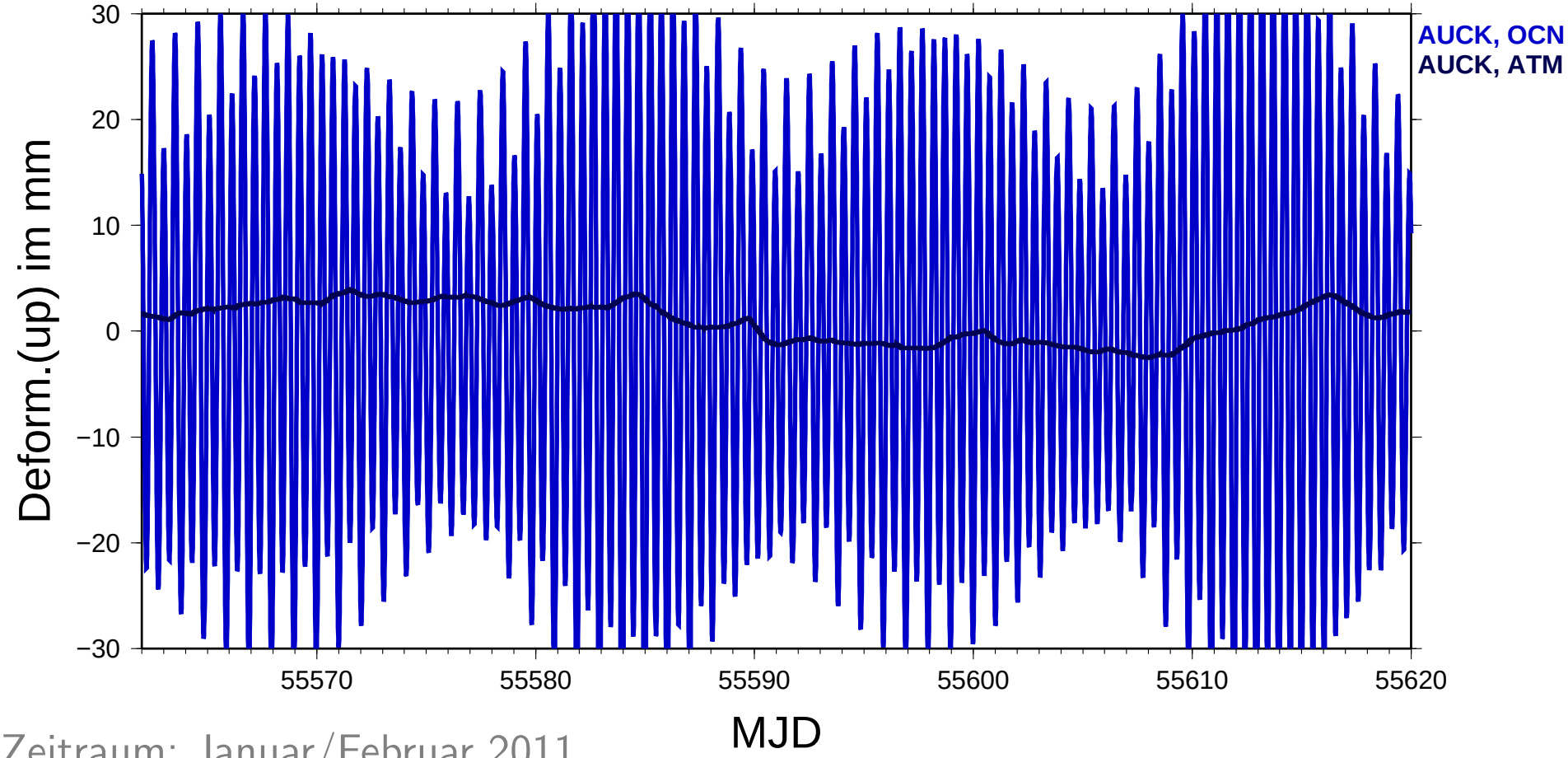
Station: ZIMM – Zimmerwald, Schweiz



Zeitraum: Januar/Februar 2011

Vergleich: Ozeangezeiten/Luftdruckänderungen

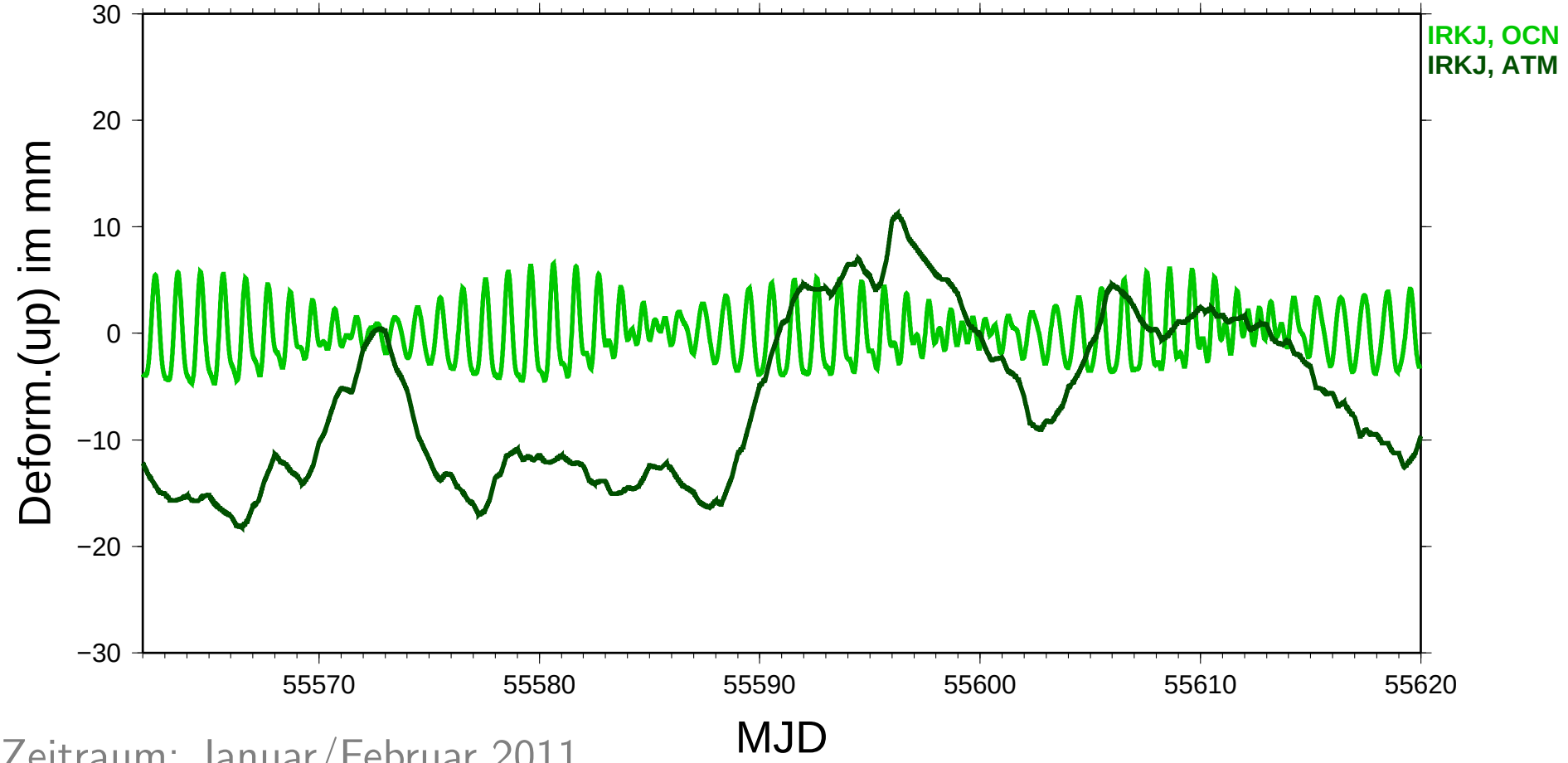
Station: AUCK – Auckland, Neuseeland



Zeitraum: Januar/Februar 2011

Vergleich: Ozeangezeiten/Luftdruckänderungen

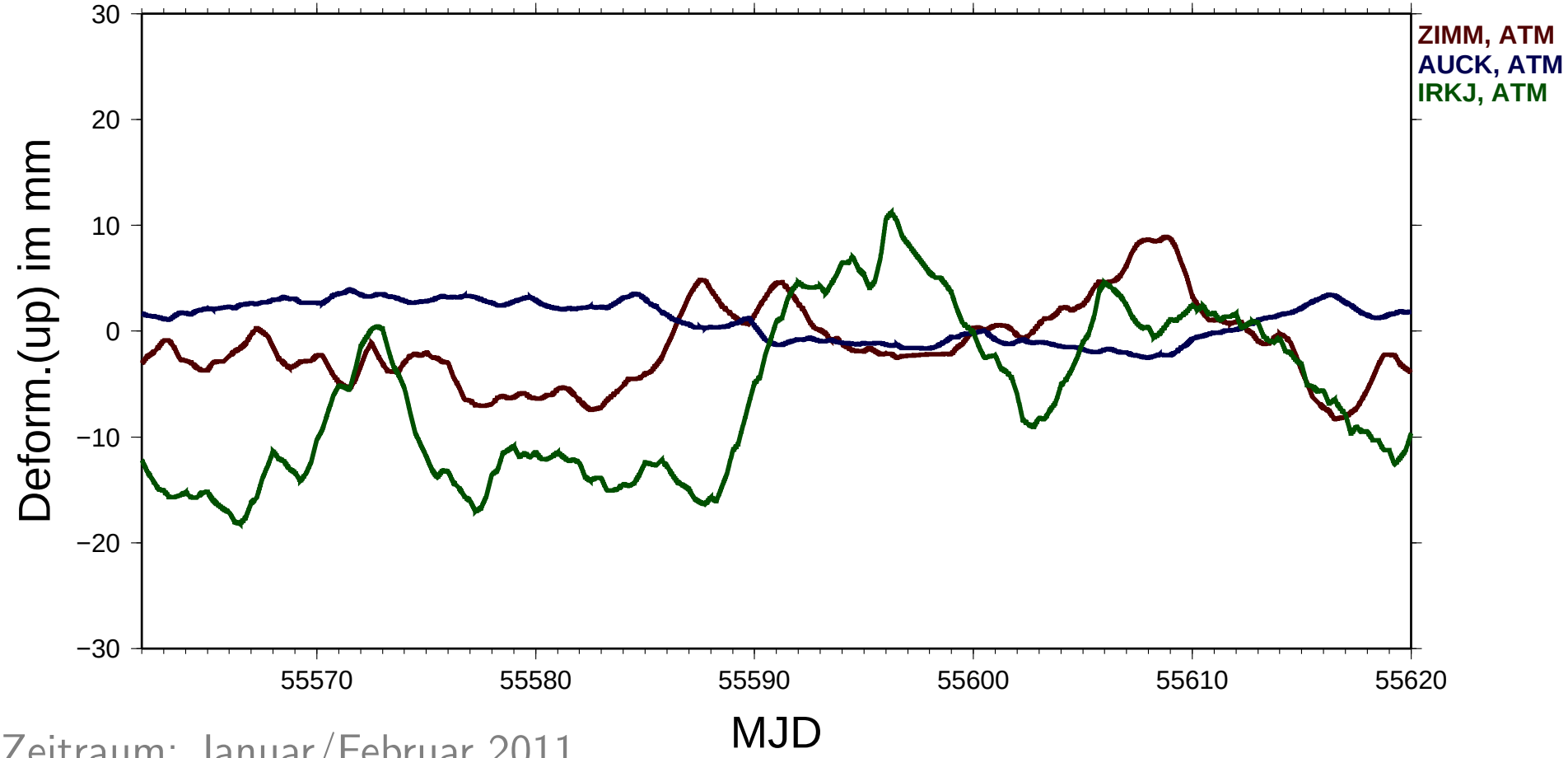
Station: IRKJ – Irkutsk, Russland



Zeitraum: Januar/Februar 2011

Deformation wegen Luftdruckänderungen

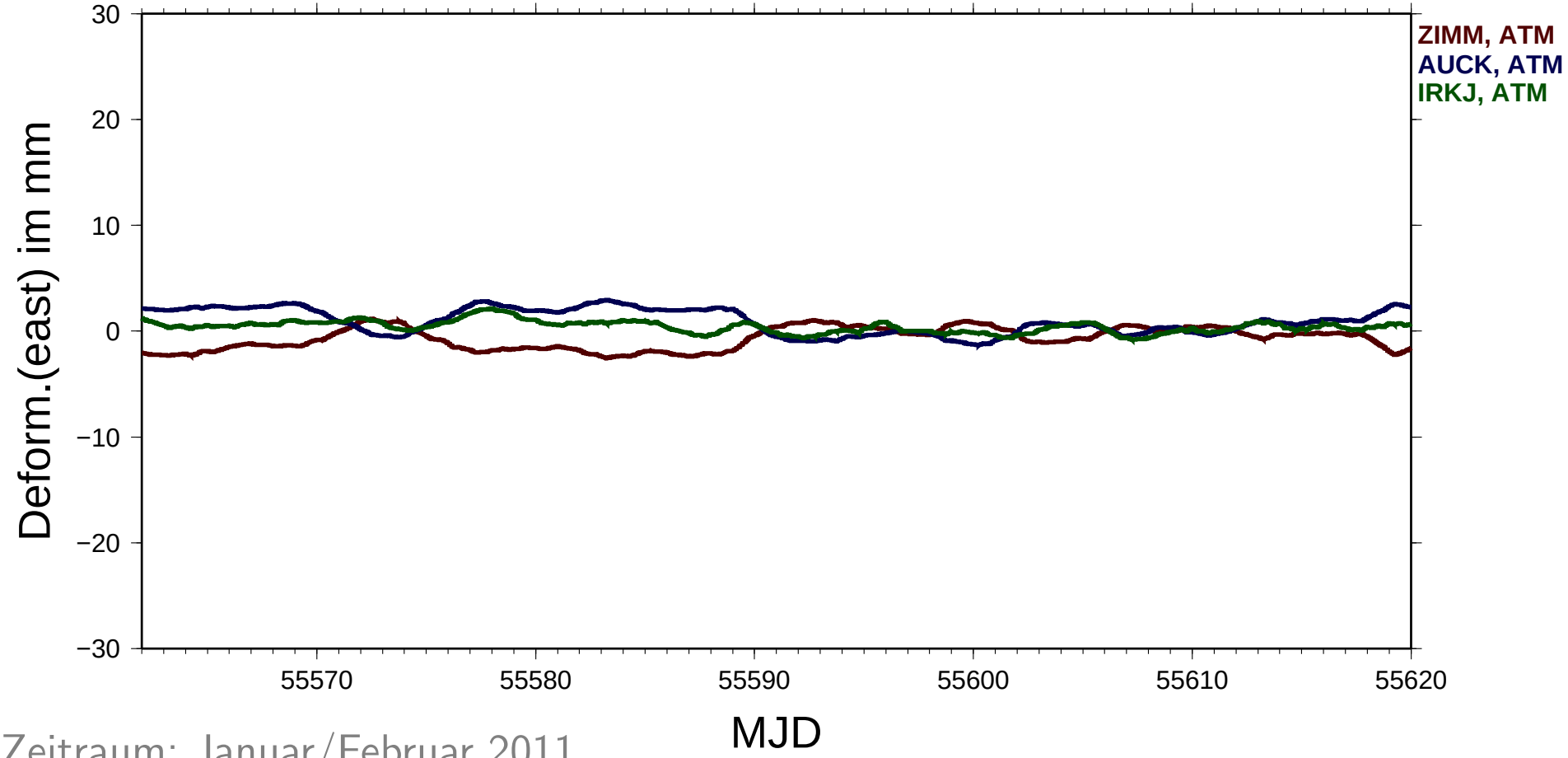
Station: ZIMM – Zimmerwald, Schweiz
Station: AUCK – Auckland, Neuseeland
Station: IRKJ – Irkutsk, Russland



Zeitraum: Januar/Februar 2011

Deformation wegen Luftdruckänderungen

Station: ZIMM – Zimmerwald, Schweiz
Station: AUCK – Auckland, Neuseeland
Station: IRKJ – Irkutsk, Russland



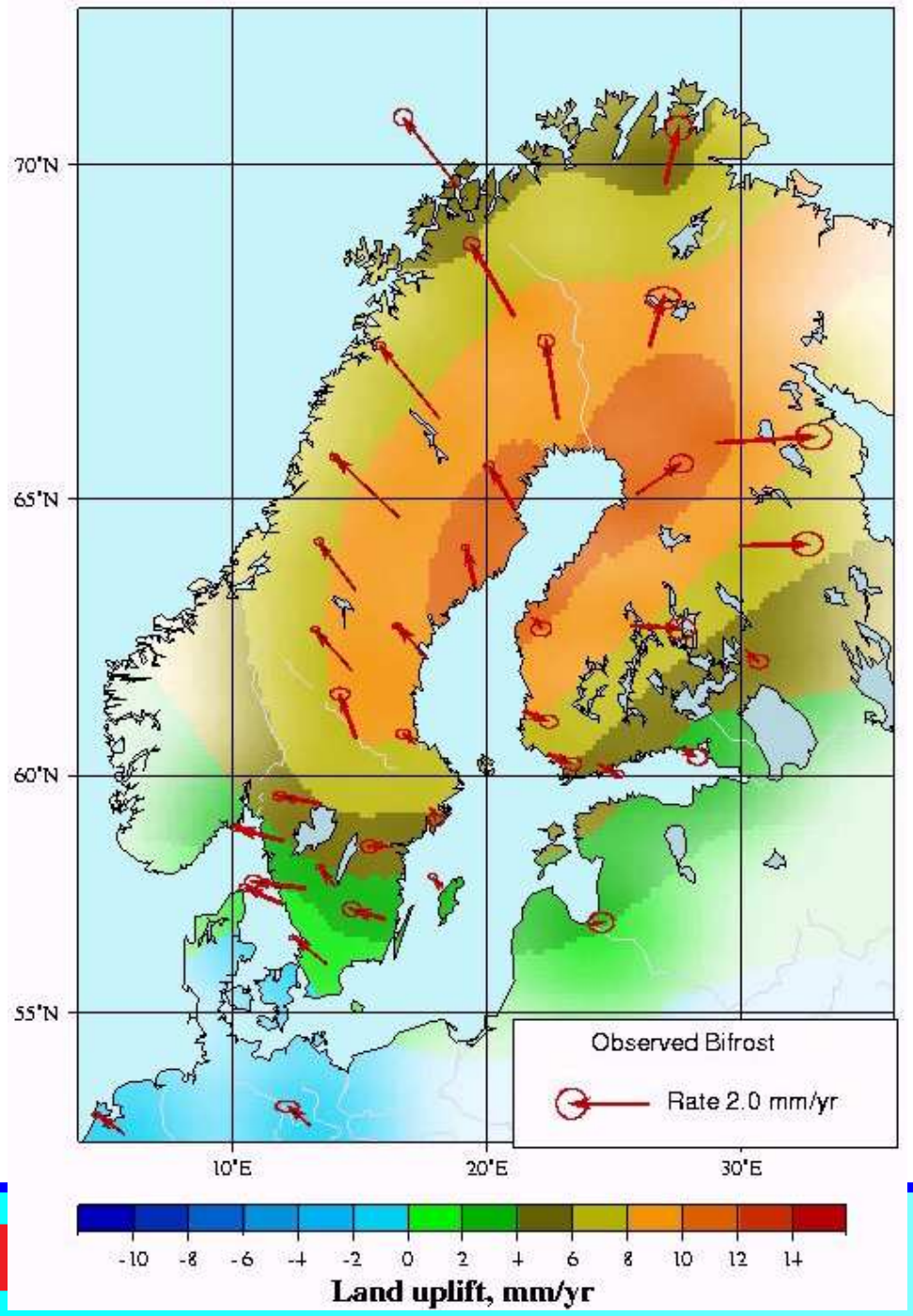
Zeitraum: Januar/Februar 2011

Entlastung durch Abschmelzen von Eismassen

- Die Eismassen, die auf der Erdkruste lagern (Eiskappen auf Antarktika und Grönland, Gletscher), verursachen eine Deformation der Erdkruste. Ändert sich die Masse (z.B. durch Abschmelzen), dann wird die Erdkruste entlastet und reagiert darauf.

- Dieser Prozess geht sehr langsam, hält jedoch noch viele Jahre nach vollständigen Entlastung der Erkruste durch die Eismassen an (z.B. fennoskandische Landhebung).
  Post-glacial rebound; Postglaziale Landhebung

Entlastung durch Abschmelzen von Eismassen



- Das Bild ist ein Ergebnis der Analyse von Johansson, J.M., J.L. Davis, H.-G. Scherneck, G.A. Milne, M. Vermeer, J.X. Mitrovica, R.A. Bennett, G. Elgered, P. Elósegui, H. Koivula, M. Poutanen, B.O. Rönnäng, and I.I. Shapiro, 2002: Continuous GPS measurements of postglacial adjustment in Fennoscandia, 1. Geodetic Results, J. Geophys. Res., Vol. 107, No. B8, DOI 10.1029/2001JB000400, 2002