

Die Vermessung der Meeresoberfläche aus dem Weltraum

Wolf-Dieter Schuh, Jan Martin Brockmann, Silvia Müller

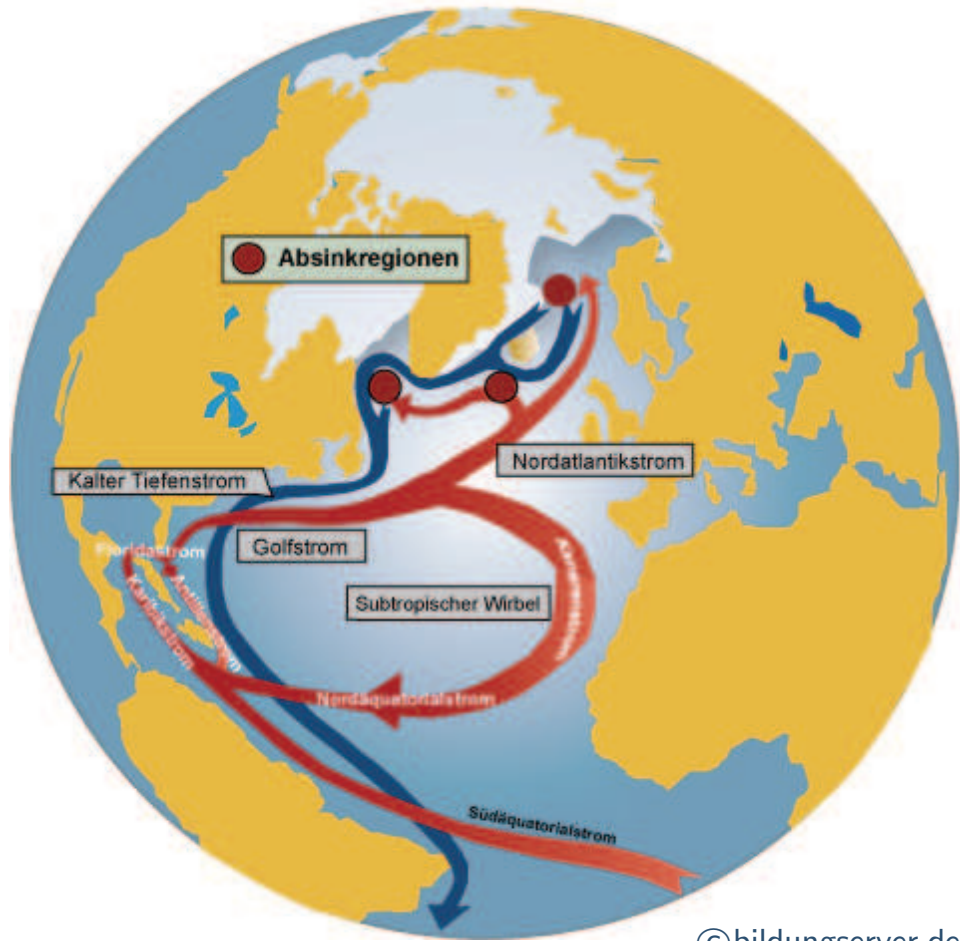
Institut für Geodäsie und Geoinformation

Professur für Theoretische Geodäsie

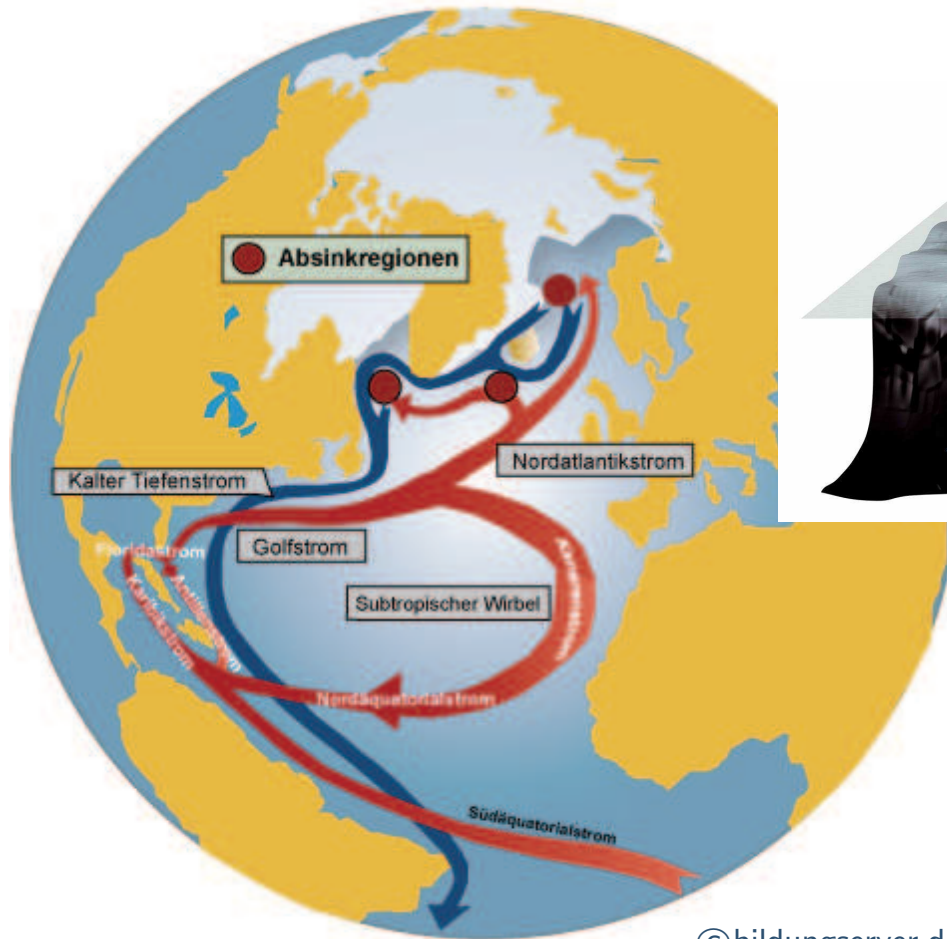
Universität Bonn

10. Bonner Wissenschaftsnacht

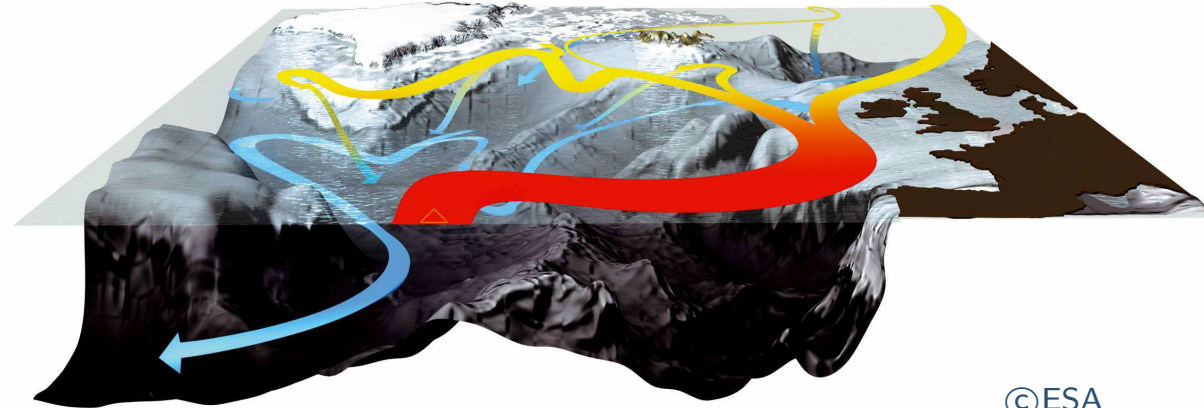
Bonn, 3. Juni 2016



Ozean:
Sonnenkollektor
Pufferspeicher
Wärmelieferant



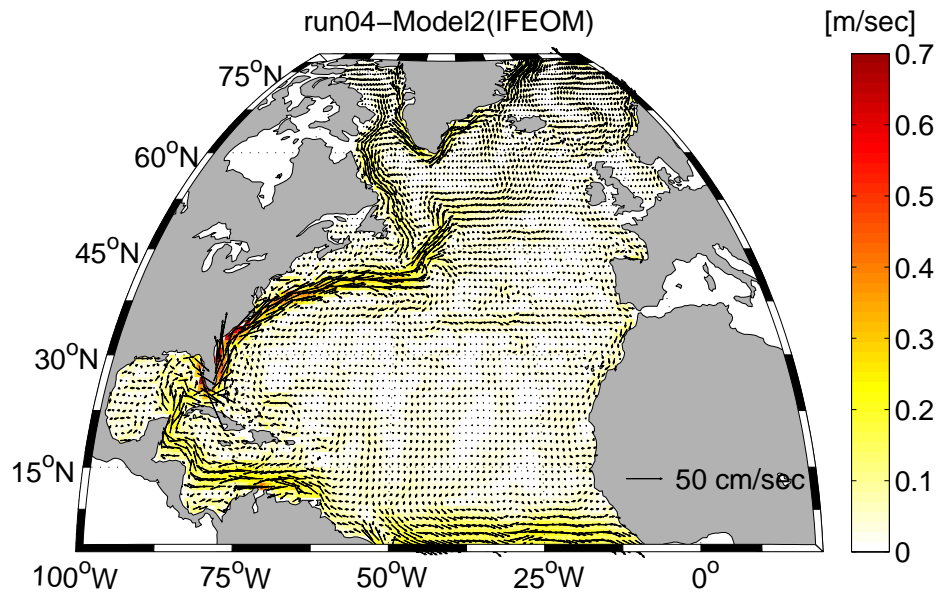
Zirkulation im Nordatlantik:



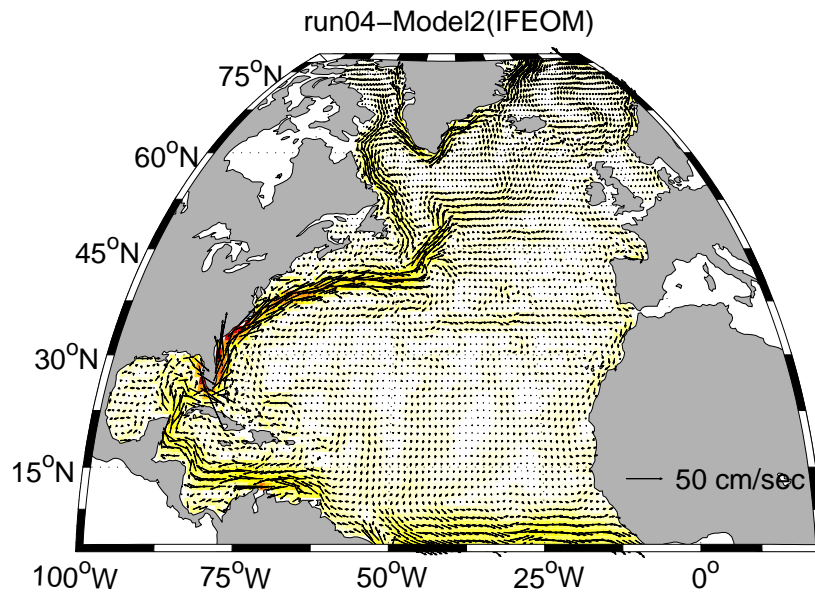
Ozean:

Sonnenkollektor
Pufferspeicher
Wärmelieferant

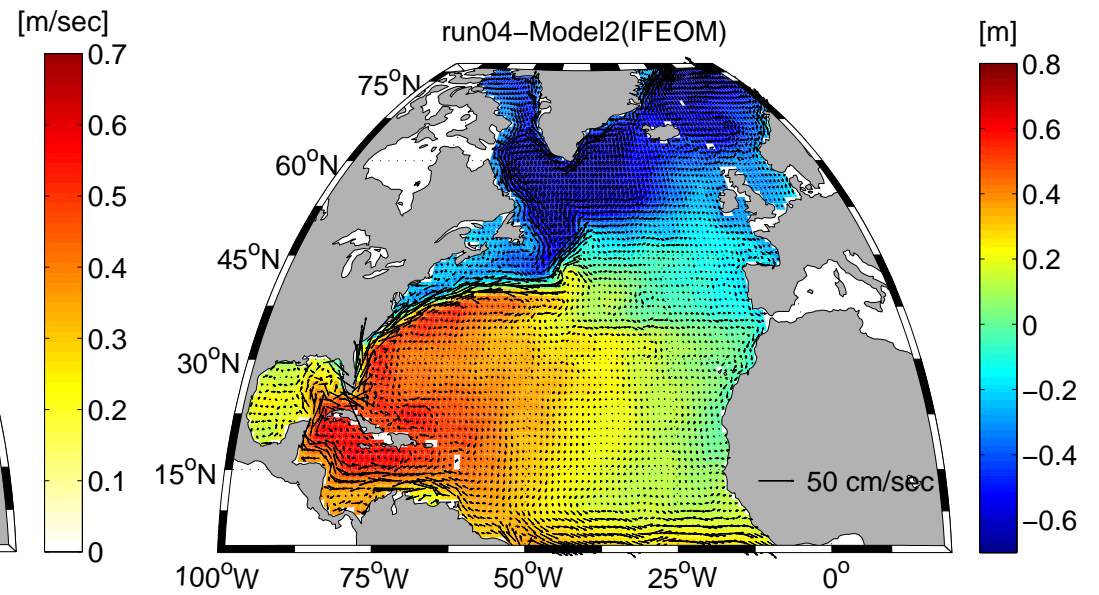
Unser Klima wird wesentlich durch Ozeanzirkulation getrieben



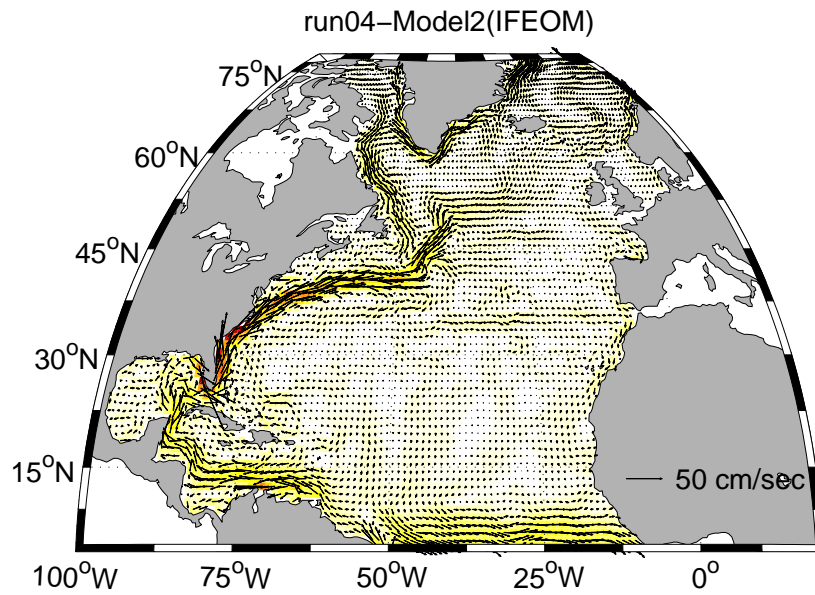
Ozeanzirkulation



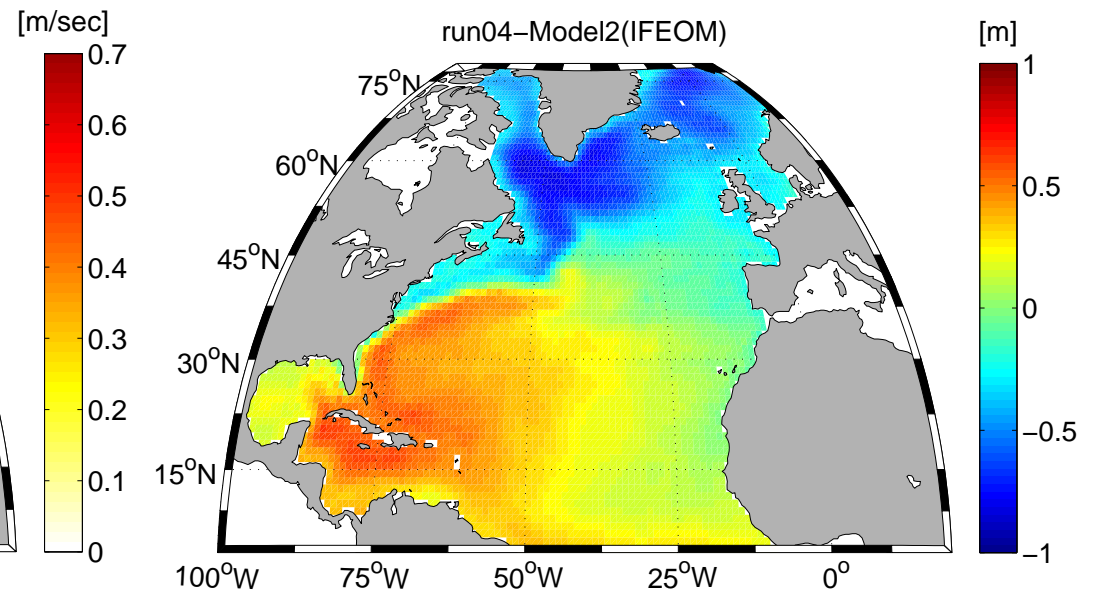
Ozeanzirkulation



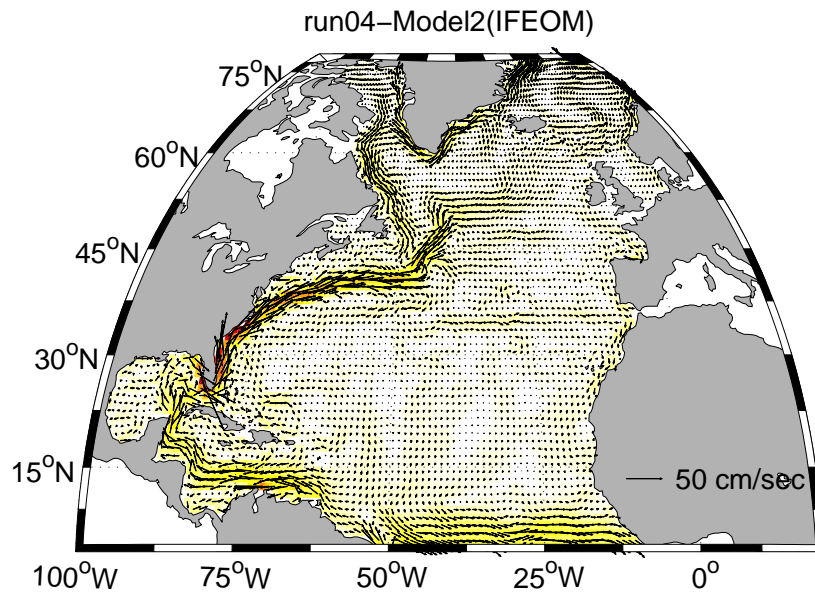
dynamische Ozeantopographie



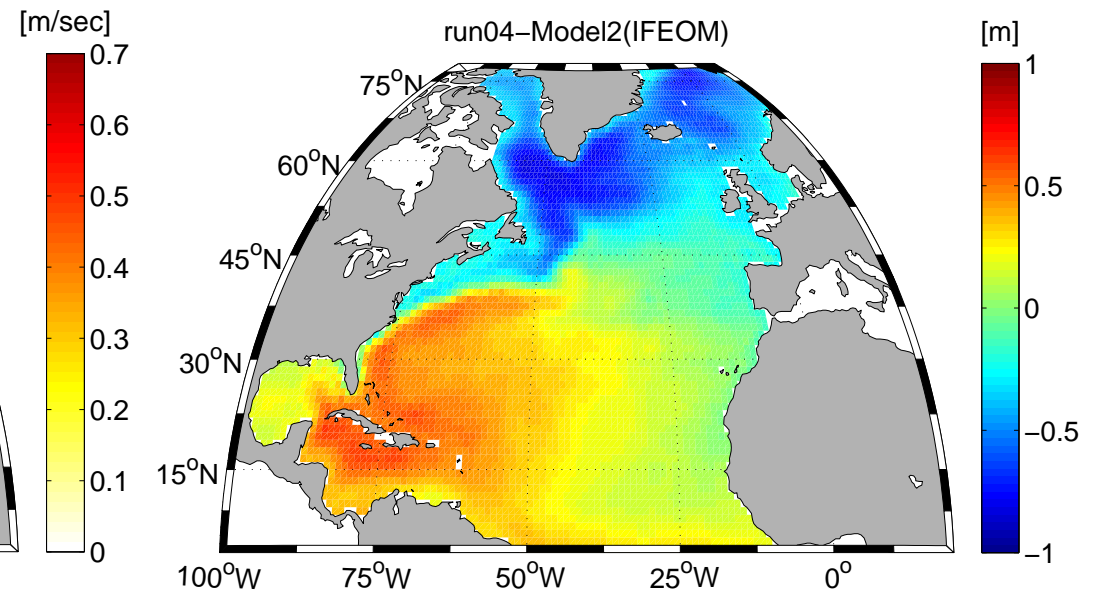
Ozeanzirkulation



dynamische Ozeantopographie



Ozeanzirkulation



dynamische Ozeantopographie

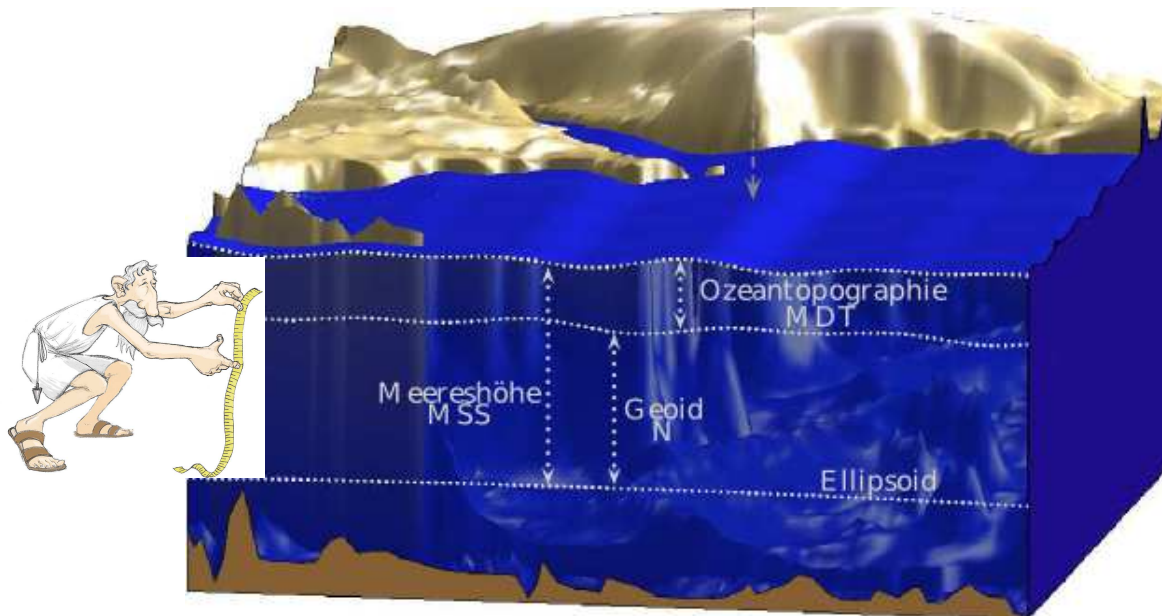
Aufgabe: Vermessung der dynamischen Ozeantopographie

Beachte die Größenordnung: Golfstrom — ca. 80 cm



Fragen an den **Academicus** des Studiengangs Geodäsie und Geoinformation

Frage: Wie kann man diese 80cm messen?
Wo beginnt man zu messen?



- **Referenzflächen:**

- Ellipsoid
- Geoid

- **Größen von Interesse:**

MSS ... Meereshöhe

N ... Geoidhöhe

MDT ... Ozeantopographie

- **Berechnung:**

$$MSS - N = MDT$$

- **Forderungen:**

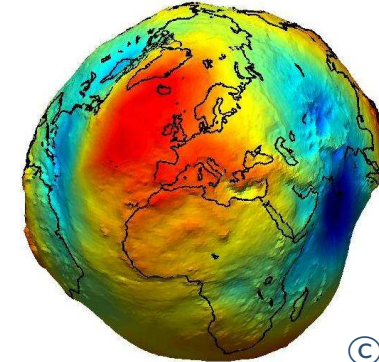
Genauigkeit: 2-3 cm

Auflösung: 100 km



Referenzflächen

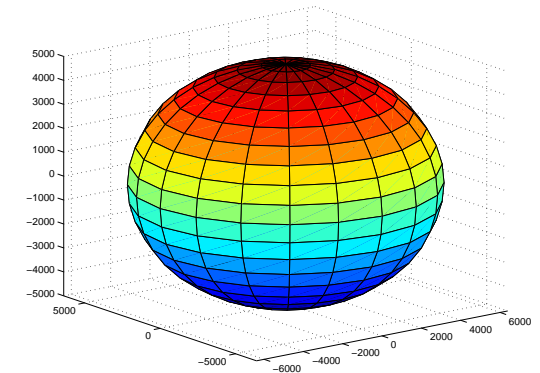
● **Physik: Schwerefeld**



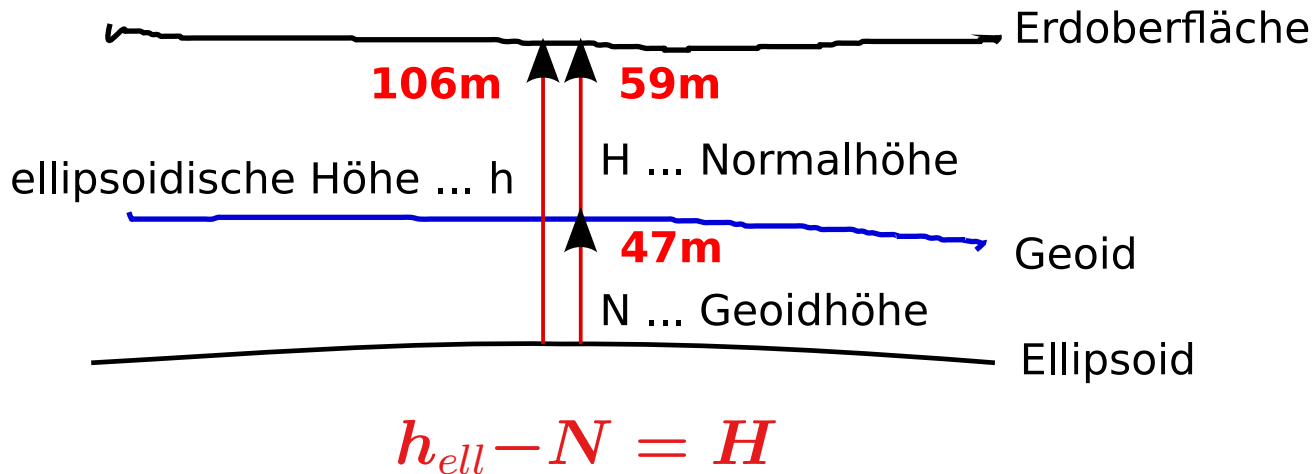
©ESA

Geoid

● **Geometrie:**



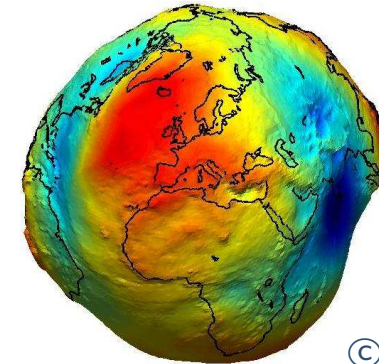
Ellipsoid





Referenzflächen

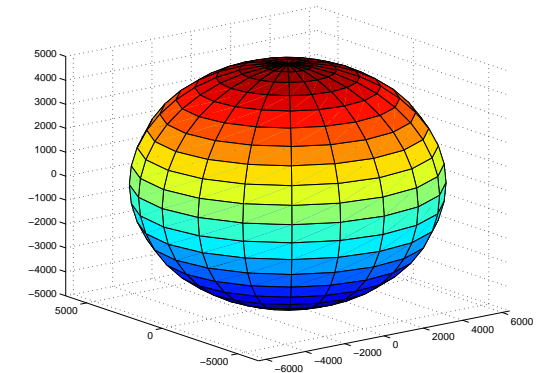
● **Physik: Schwerefeld**



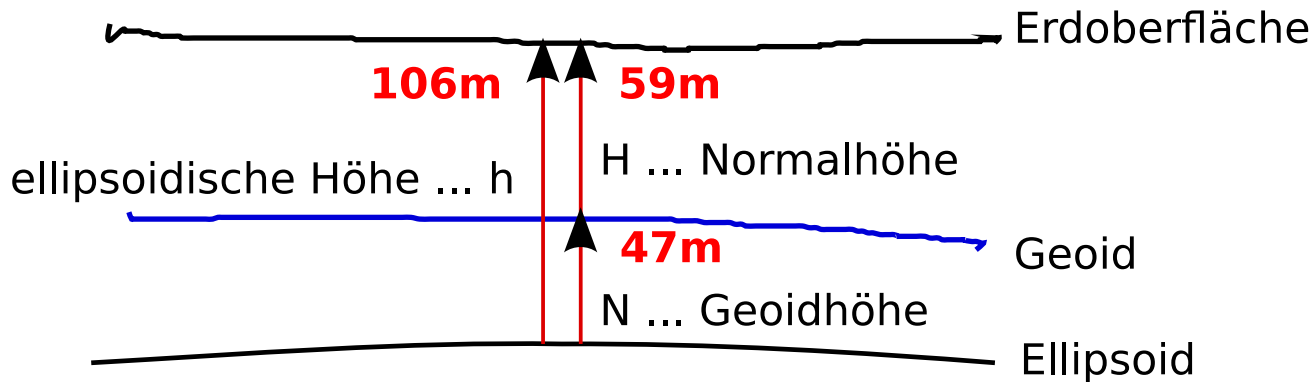
©ESA

Geoid

● **Geometrie:**

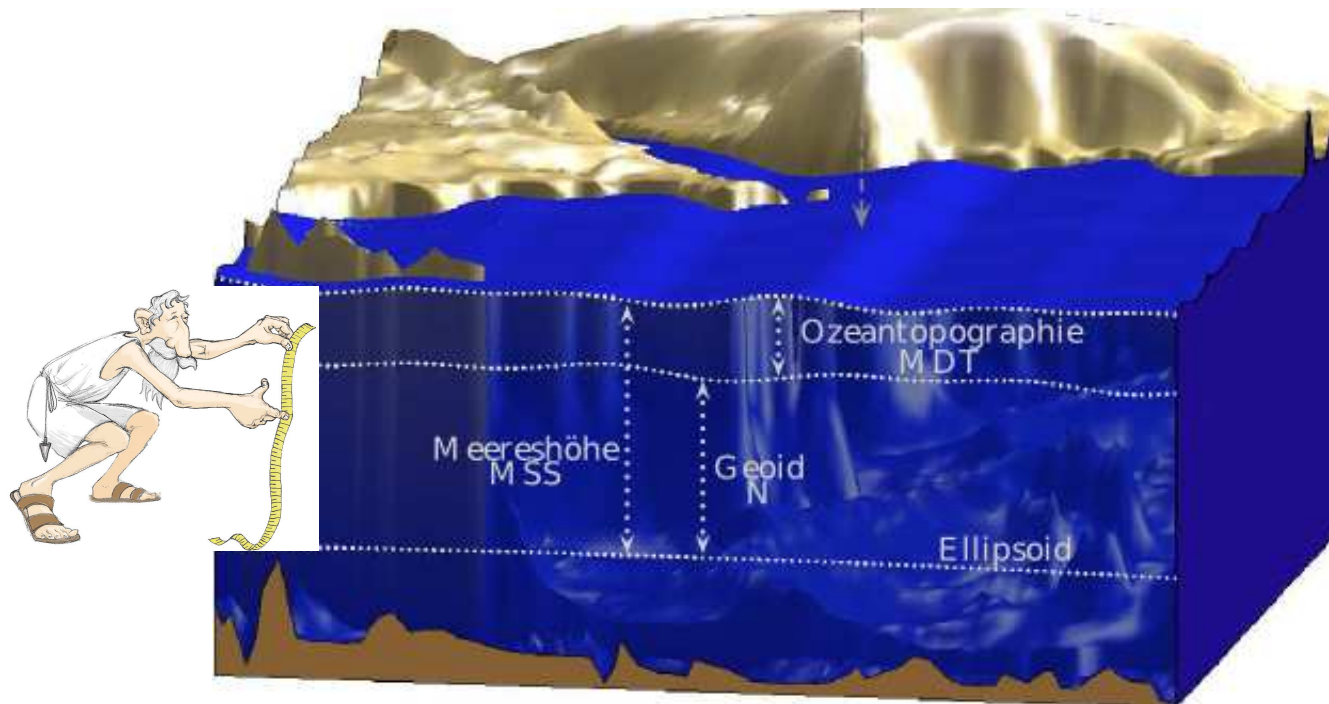


Ellipsoid



$$h_{ell} - N = H$$

GPS Handy: 105 ± 10 m



$$MSS - N = MDT$$

- Aufgaben:**
- Bestimmung des Schwerefeldes (Geoids)
 - Messung der Meereshöhe

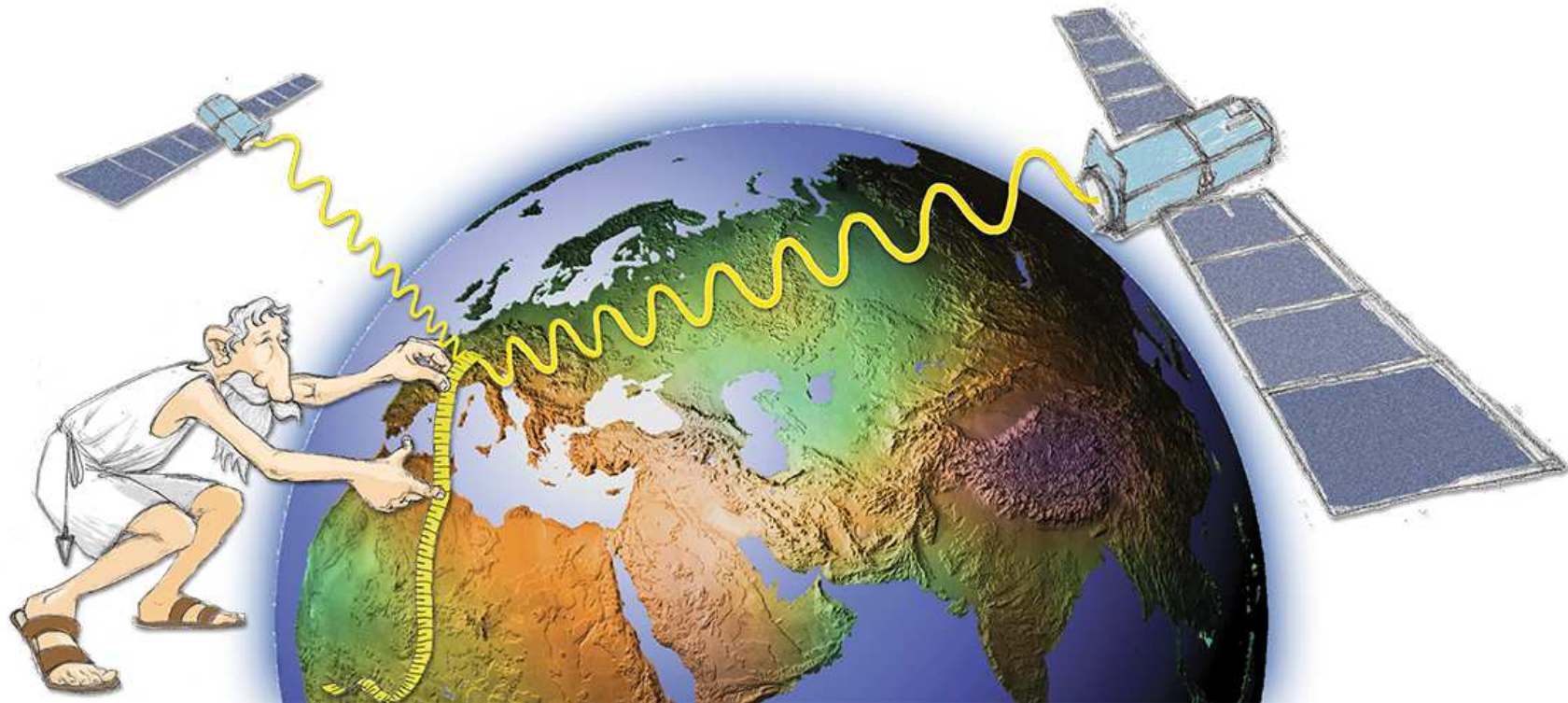


Fragen an den **Academicus** des Studiengangs Geodäsie und Geoinformation

Frage: Wie kann man diese 80 cm messen?

Wo beginnt man zu messen?

Wie kann man das am Meer wirtschaftlich durchführen?



Fragen an den **Academicus** des Studiengangs Geodäsie und Geoinformation

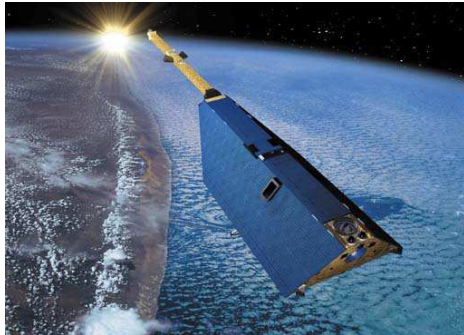
Frage: Wie kann man diese 80 cm messen?

Wo beginnt man zu messen?

Wie kann man das am Meer wirtschaftlich durchführen?

Bestimmung des Schwerfeldes

CHAMP



©Astrium

CHAMP

(CHALLENGING Minisatellite Payload)

Missionsdauer:

15 Juli 2000

19 September 2010

Orbit:

Inklination: 87°

zirkular ($e < 0.01$)

Höhe: 454 - 300 km

Ziele:

Erdschwerefeld

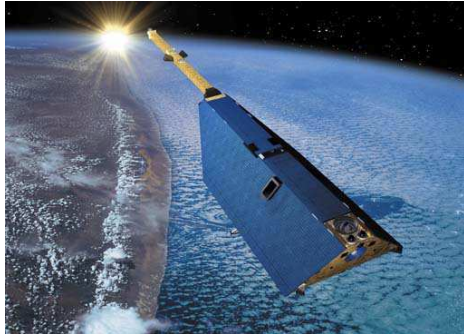
Magnetfeld

Atmosphäre

Messungen:

Satellite-to-Satellite Tracking Hoch-Tief (SST-HL)

CHAMP



©Astrium

GRACE



©GFZ

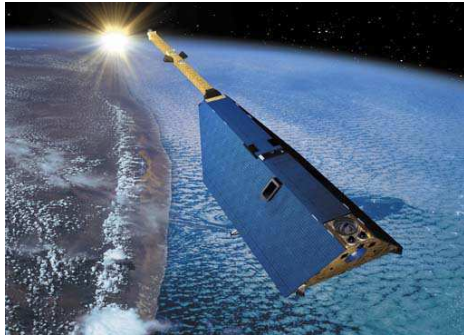
GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment)

Missionsstart:
17 März 2002

Orbit:
Inklination: 89°
zirkular ($e < 0.01$)
Höhe: 500 - 470 km
Entfernung: 220 km

Ziele:
zeitvariables Schwerefeld (G/O 40)
statisches Schwerefeld (G/O 150 bzw. 180)
Atmosphäre

Messungen:
Satellite-to-Satellite Tracking Hoch-Tief (SST-HL)
Satellite-to-Satellite Tracking Tief-Tief (SST-LL)

CHAMP

©Astrium

GRACE

©GFZ

GOCE

©ESA

GOCE (Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer)

Missionsdauer:
17 März 2009
11 Nov. 2013

Orbit:
Inklination: $96^{\circ}5$
zirkular ($e < 0.01$)
sonnensynchron
Höhe: 260 - 220 km

Ziele:
statisches Schwerfeld
Auflösung: G/O 200 (250)
Genauigkeit: 2-3 cm bzw. 1mGal per 100km

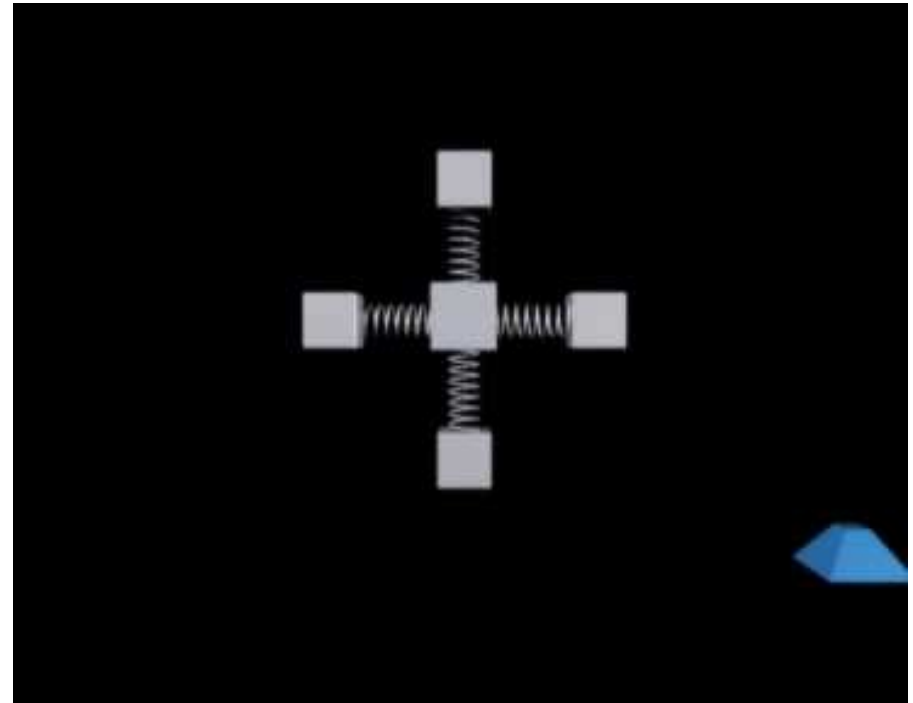
Messungen:
Satellite-to-Satellite Tracking Hoch-Tief (SST-HL)
Satellitengradiometrie (SGG)

- **Satellite-to-Satellite Tracking
Hoch-Tief (SST-HL)**



©ESA

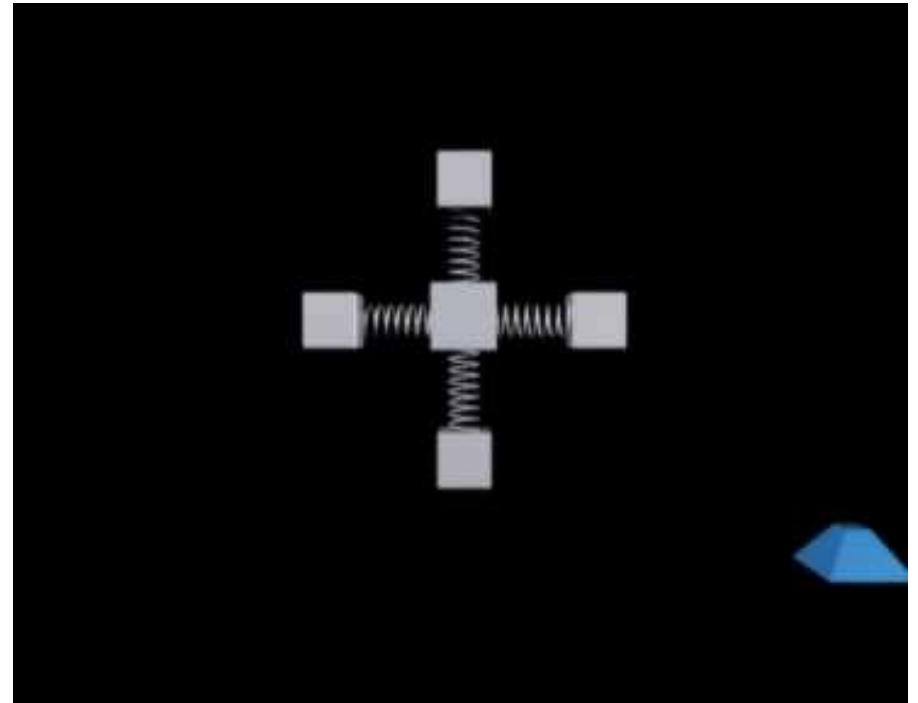
- **Satellitengradiometrie (SGG)**



©ESA

- **Satellite-to-Satellite Tracking
Hoch-Tief (SST-HL)**

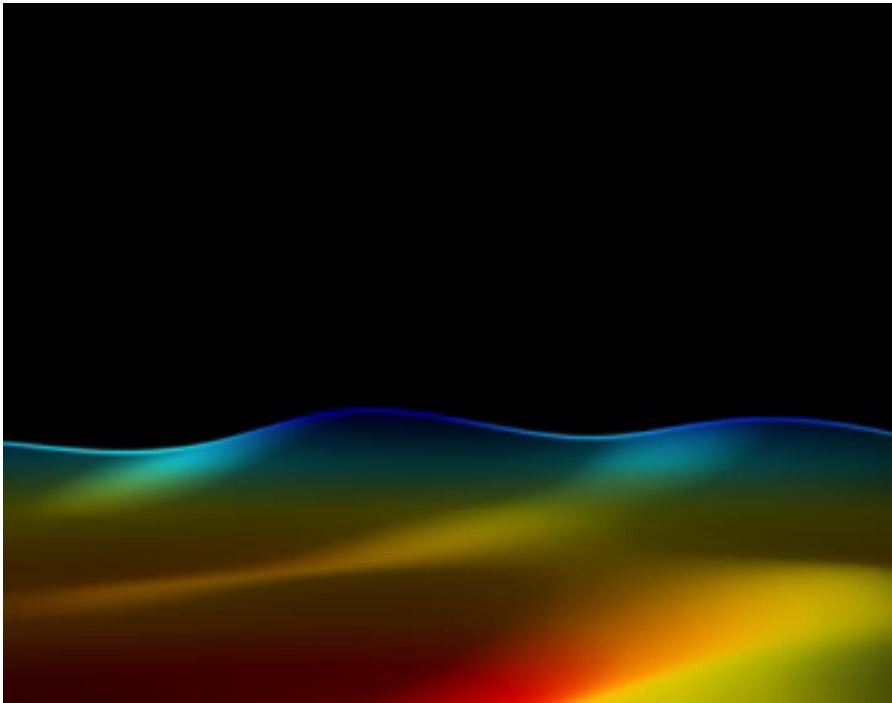
- **Satellitengradiometrie (SGG)**



©ESA

©ESA

- **Satellite-to-Satellite Tracking Hoch-Tief (SST-HL)**



©ESA

- **Satellitengradiometrie (SGG)**

©ESA



Bestimmung des Schwerefeldes

Genauigkeit der Geoidhöhen: $\pm 2-3$ cm

Räumliche Auflösung: 100 km



Bestimmung des Schwerefeldes

Genauigkeit der Geoidhöhen: $\pm 2\text{-}3\text{ cm}$

Räumliche Auflösung: 100 km



Anzahl der Parameter: $\sim 80\ 000$

Anzahl der Messungen: $\sim 400\text{ Mio.}$



Bestimmung des Schwerefeldes

Genauigkeit der Geoidhöhen: $\pm 2-3$ cm

Räumliche Auflösung: 100 km



Anzahl der Parameter: $\sim 80\,000$

Anzahl der Messungen: ~ 400 Mio.



Gleichungssystem mit 400 Mio. Zeilen und 80 000 Spalten



Bestimmung des Schwerefeldes

Genauigkeit der Geoidhöhen: $\pm 2\text{-}3\text{ cm}$

Räumliche Auflösung: 100 km



Anzahl der Parameter: $\sim 80\,000$

Anzahl der Messungen: $\sim 400\text{ Mio.}$



Gleichungssystem mit 400 Mio. Zeilen und 80 000 Spalten

Überlegung: **Ist das groß?**

(30 TByte)

pro Zahl (= 16 Ziffern) verwenden wir 1 cm^2 ,
dann benötigen wir zum Ausdrucken $3\,200\text{ km}^2$

(Bonn: 441 km^2 , Rhein-Sieg: 1153 km^2)



Bestimmung des Schwerefeldes

Genauigkeit der Geoidhöhen: $\pm 2-3$ cm

Räumliche Auflösung: 100 km



Anzahl der Parameter: $\sim 80\,000$

Anzahl der Messungen: ~ 400 Mio.



Gleichungssystem mit 400 Mio. Zeilen und 80 000 Spalten

Überlegung: **Kann man das mit einem Computer berechnen?**

Ja: in Echtzeit !!!



Bestimmung des Schwerefeldes

Genauigkeit der Geoidhöhen: $\pm 2-3$ cm

Räumliche Auflösung: 100 km



Anzahl der Parameter: $\sim 80\,000$

Anzahl der Messungen: ~ 400 Mio.



Gleichungssystem mit 400 Mio. Zeilen und 80 000 Spalten

Überlegung: **Kann man das mit einem Computer berechnen?**

Ja: in Echtzeit !!!

d.h. wir benötigen für eine Berechnung gleich lang,
wie die Mission gedauert hat (**3.5 Jahre !!!**)



©Arithmeum

Hochleistungsrechnen - Parallelität



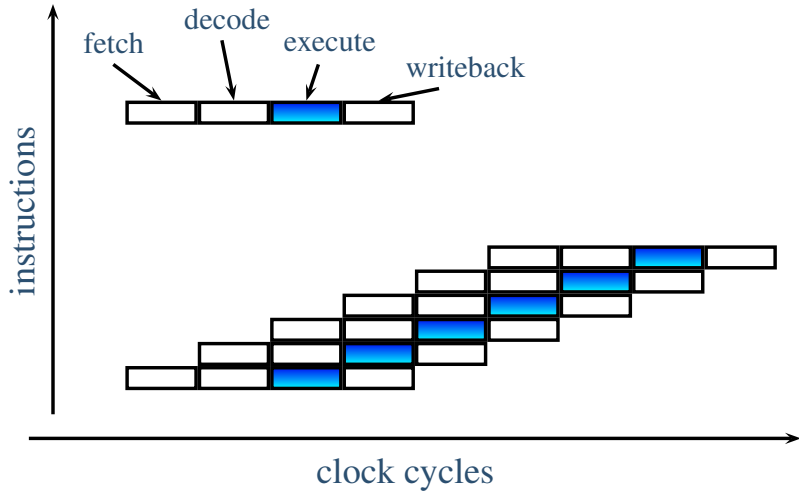
Geodäsie-CropBio Cluster



1 984 Kerne,
8.75 TB Arbeitsspeicher,
Infiniband,
240 TB Plattenspeicher

Hochleistungsrechnen - Parallelität

Hochleistungsrechnen - Parallelität

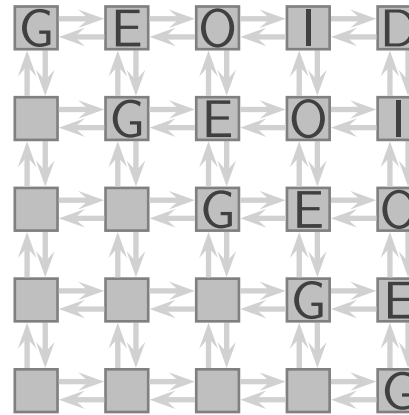


Cache effiziente
Implementierung
(pipelining)



JSC Jülich - JURECA

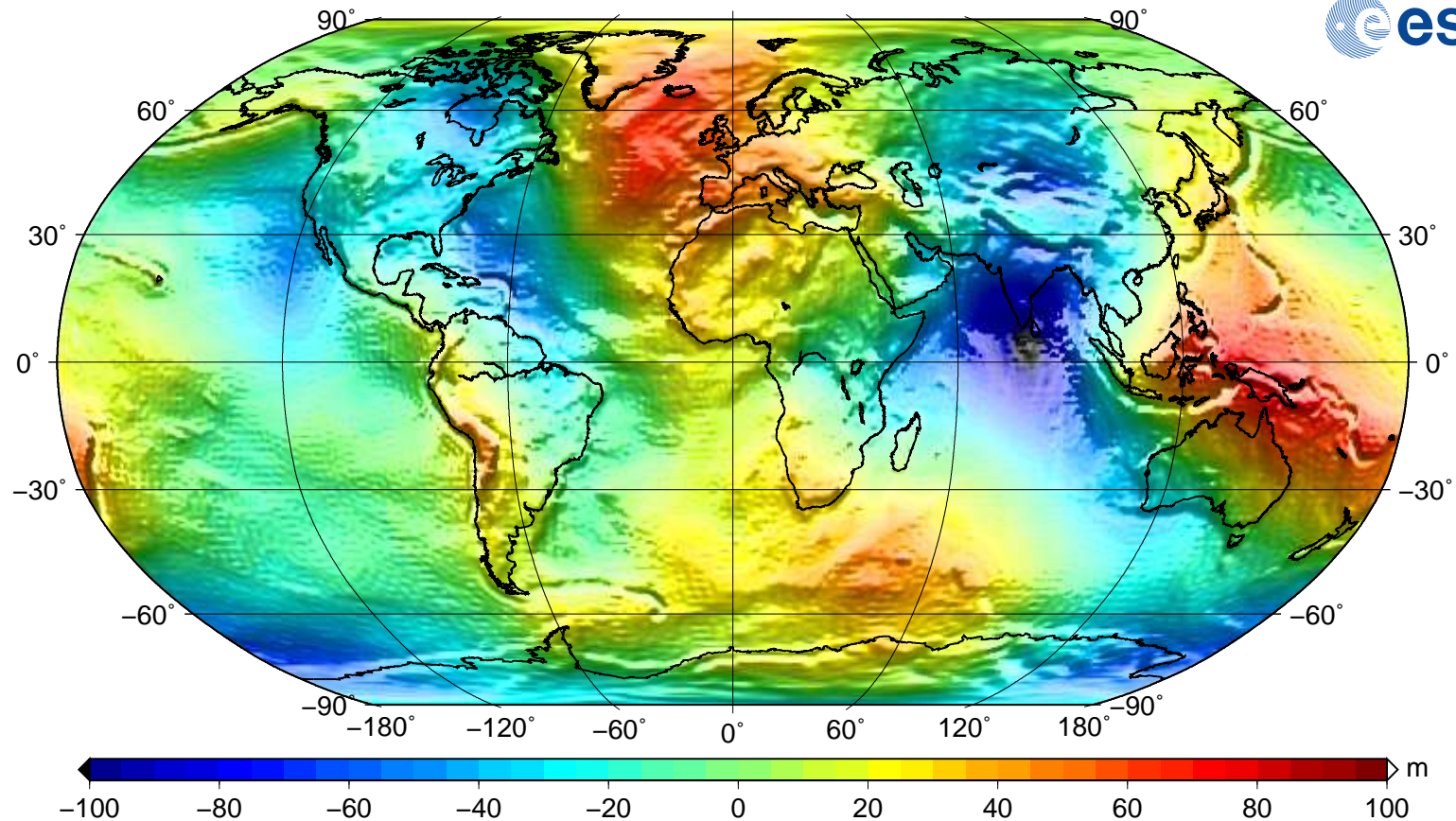
45 216 Kerne,
314 TB Arbeitsspeicher,
1.8 Petaflops
49/TOP500



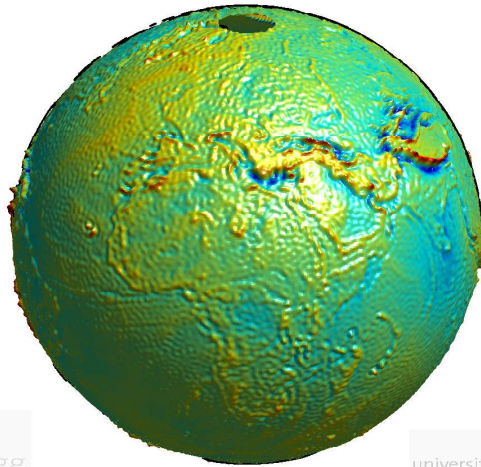
parallele Algorithmen
verteiltes Rechnen

ESA-GOCE-TIM50 Schwerefeldmodell

Made im Bonn
(Brockmann-etal.,2014)



Genauigkeiten: $\pm 2.4 \text{ cm} / 100 \text{ km}$ ($\pm 10 \text{ cm} / 80 \text{ km}$)
 $\pm .69 \text{ mGal} / 100 \text{ km}$ ($\pm 3.4 \text{ mGal} / 80 \text{ km}$)

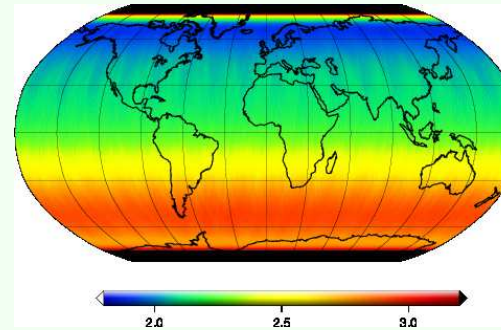


GOCE Schwerefeld

Geoidhöhen: ± 100 m
 Genauigkeit: ± 2.4 cm
 ± 0.69 mgal
 Auflösung: 100 km
 d/o 200

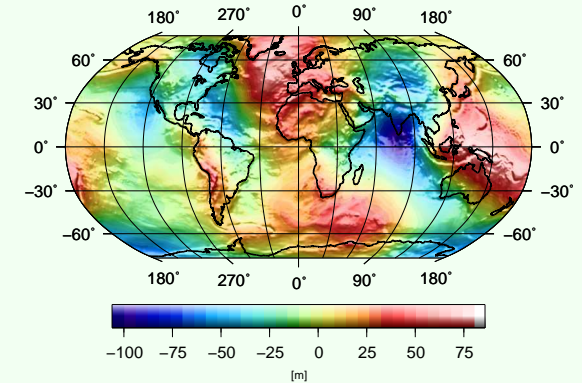
homogene
 globale Genauigkeit

Schwerefeldmodell (78.400 Parameter)

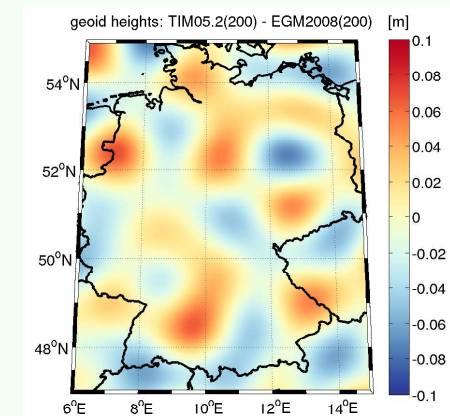


externen Validierung

TIM05-EG2008: Deutschland
 (rms: ± 2.7 cm)



Genauigkeiten^(intern)
 (± 2.0 - 3.0 cm)



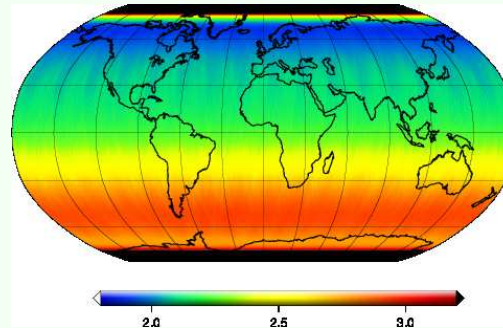
- konsistente Modellierung des Genauigkeitsbudget
- Varianz/Kovarianz Informationen verfügbar

GOCE Schwerefeld

Geoidhöhen: ± 100 m
 Genauigkeit: ± 2.4 cm
 ± 0.69 mgal
 Auflösung: 100 km
 d/o 200

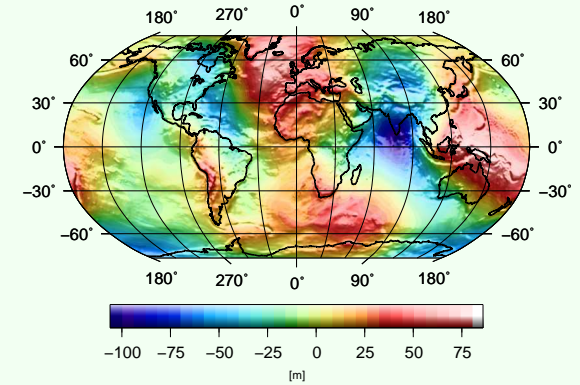
homogene
 globale Genauigkeit

Schwerefeldmodell
 (78.400 Parameter)

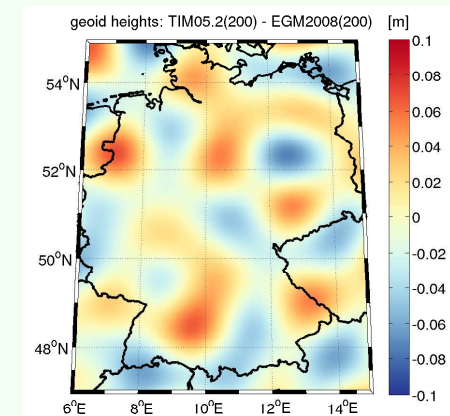


externen Validierung

TIM05-EG2008: Deutschland
 (rms: ± 2.7 cm)

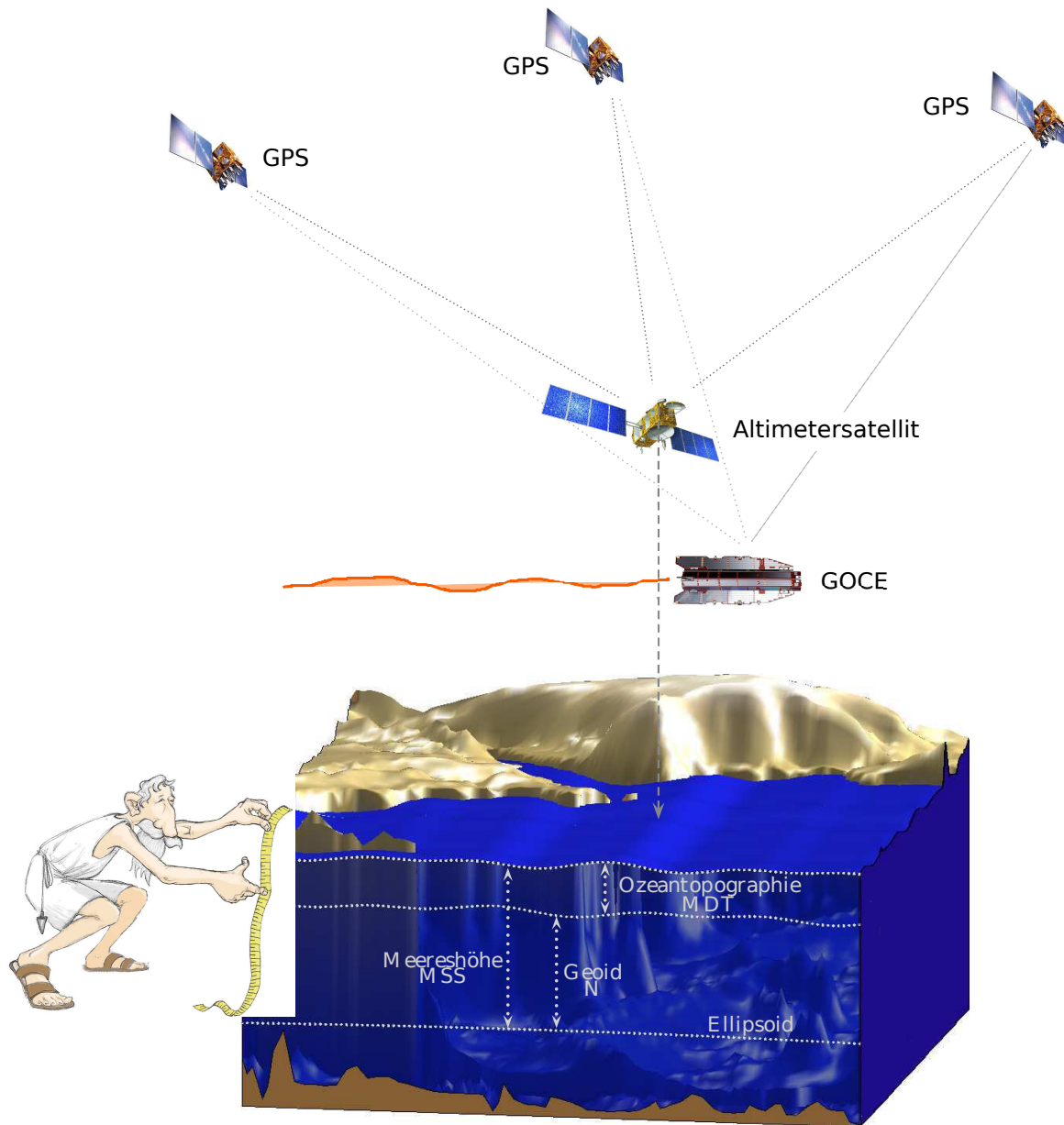


Genauigkeiten^(intern)
 (± 2.0 - 3.0 cm)



- konsistente Modellierung des Genauigkeitsbudget
- Varianz/Kovarianz Informationen verfügbar

Bestimmung des Meereshöhe



Referenzflächen:

- Ellipsoid
- Geoid

Größen von Interesse:

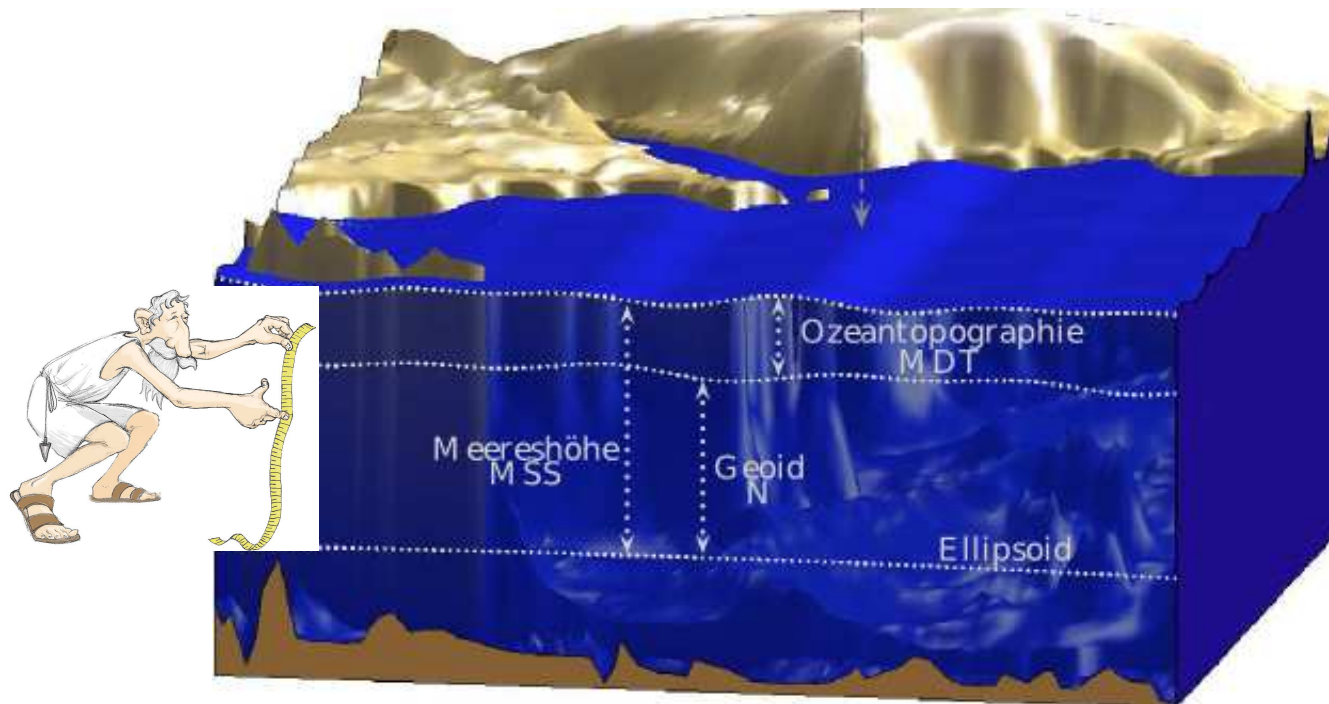
- MSS ... Meereshöhe
- N ... Geoidhöhe
- MDT ... Ozeantopographie

Berechnung:

$$MSS - N = MDT$$

Forderungen:

- Genauigkeit: 2-3 cm
- Auflösung: 100 km



$$MSS - N = MDT$$

- unterschiedliche Zugänge:
- Einzelauswertungen
 - integrierte Auswertung

Zugang: Einzelauswertungen

Zugang: Einzelauswertung

- Berechnung eines Modells der Meereshöhen (z.B. Regressionsmodell)
⇒ Meereshöhen
- Berechnung des Schwerefeldesmodells
⇒ Geoidhöhen
- Berechnung der Differenz
⇒ Ozeantopographie

MSS

—

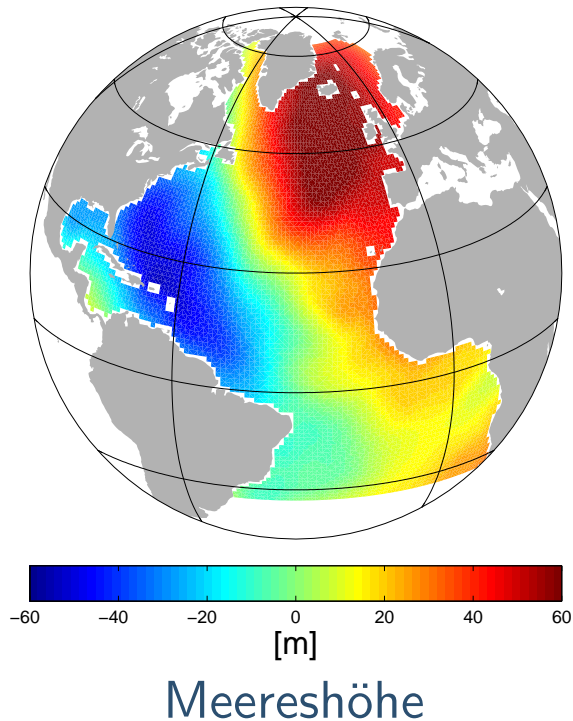
N

=

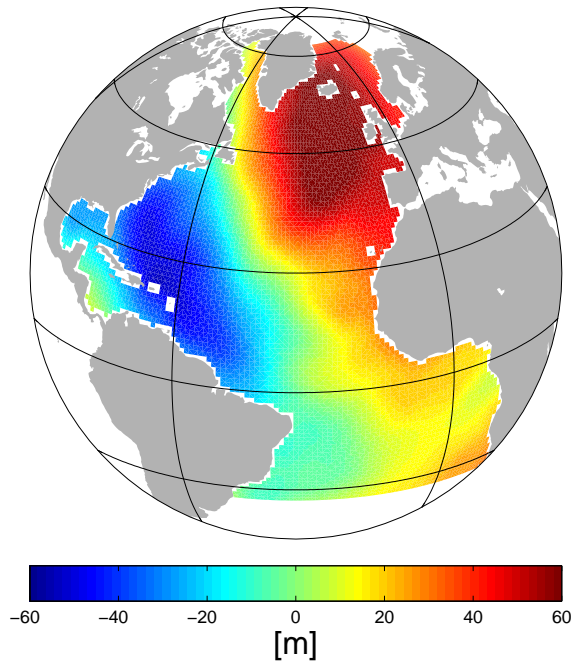
MDT



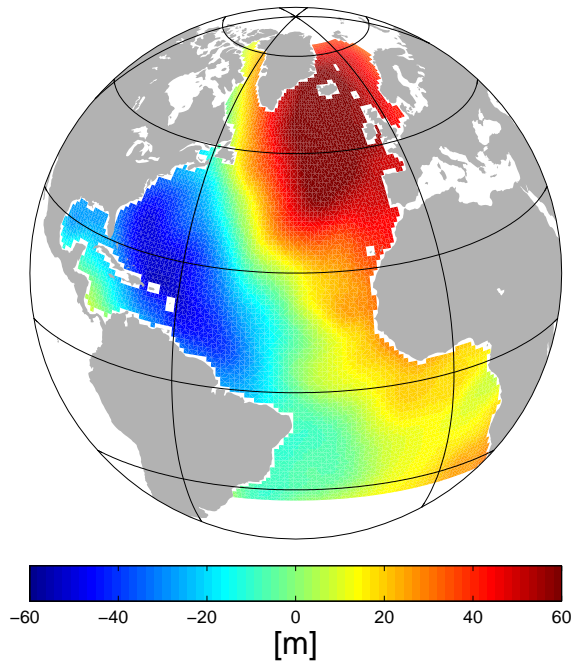
Ist der einfache Zugang $MSS - N = MDT$ möglich?



Ist der einfache Zugang $MSS - N = MDT$ möglich?

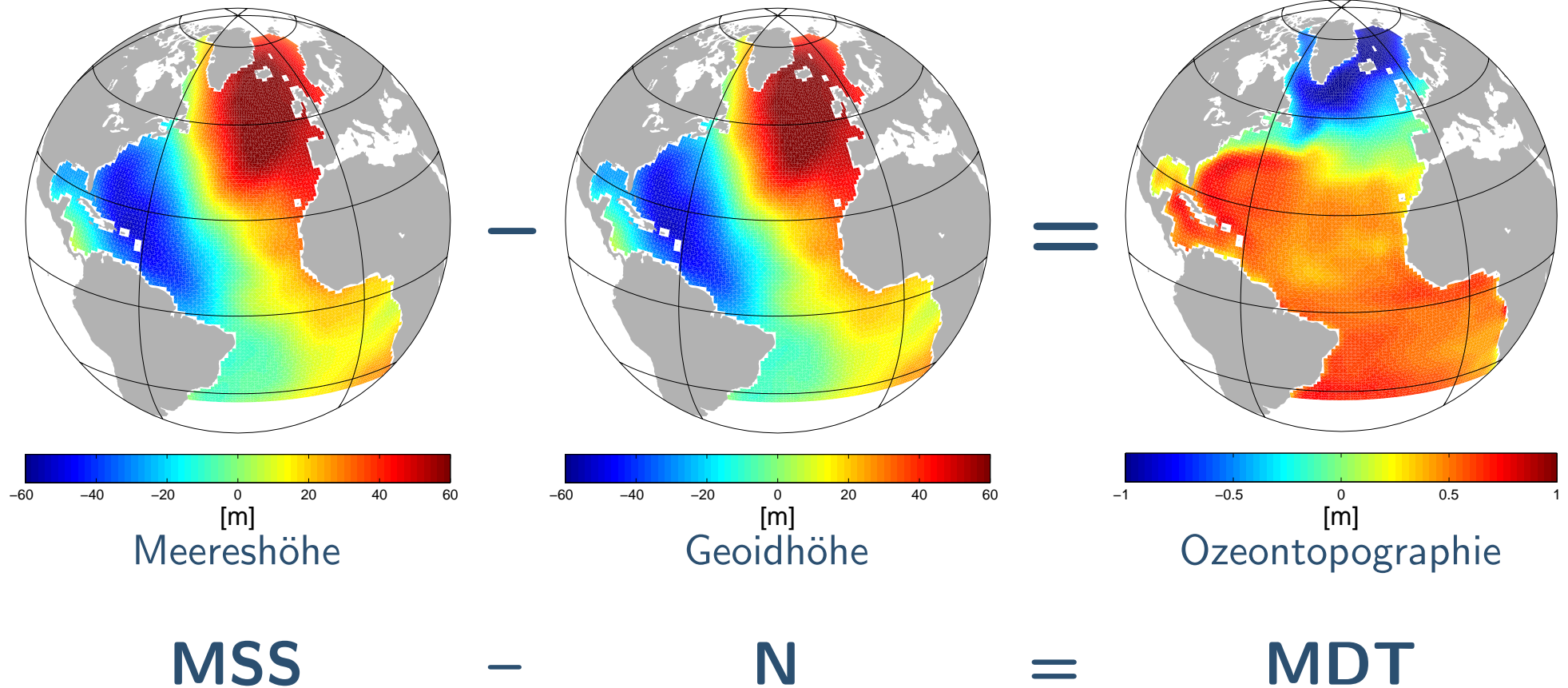


Meereshöhe

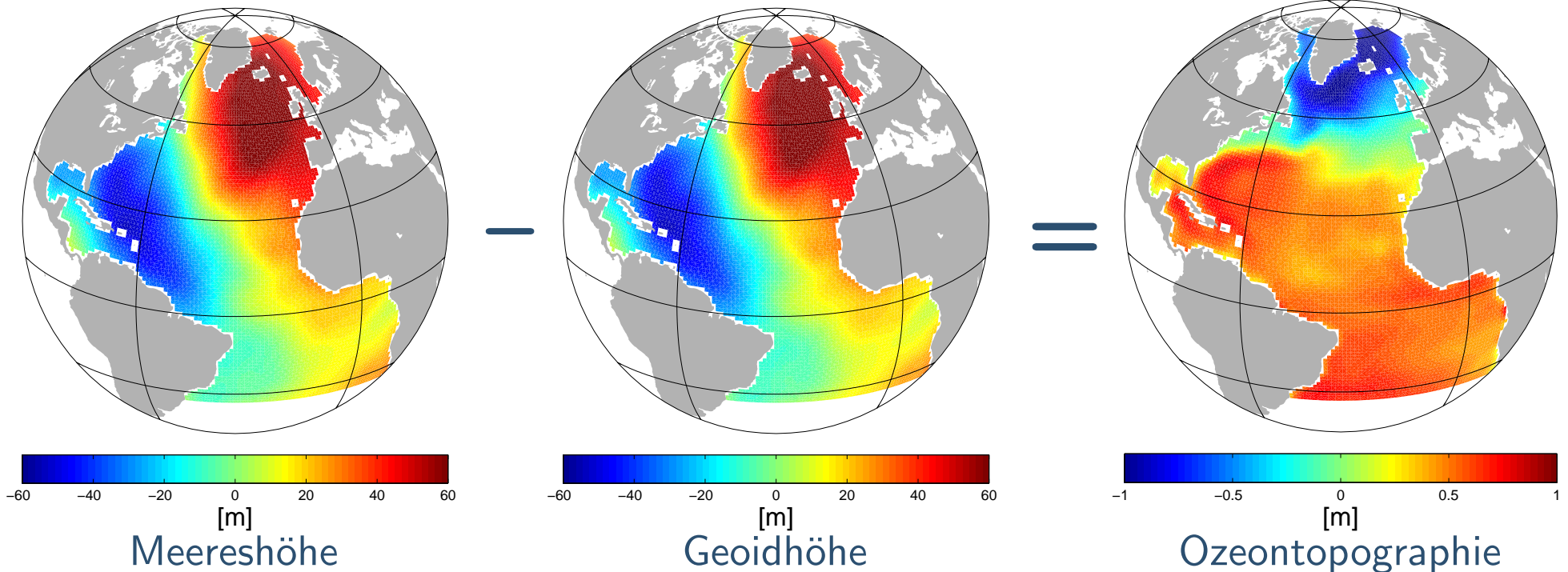


Geoidhöhe

Ist der einfache Zugang $MSS - N = MDT$ möglich?



Ist der einfache Zugang $MSS - N = MDT$ möglich?



MSS

–

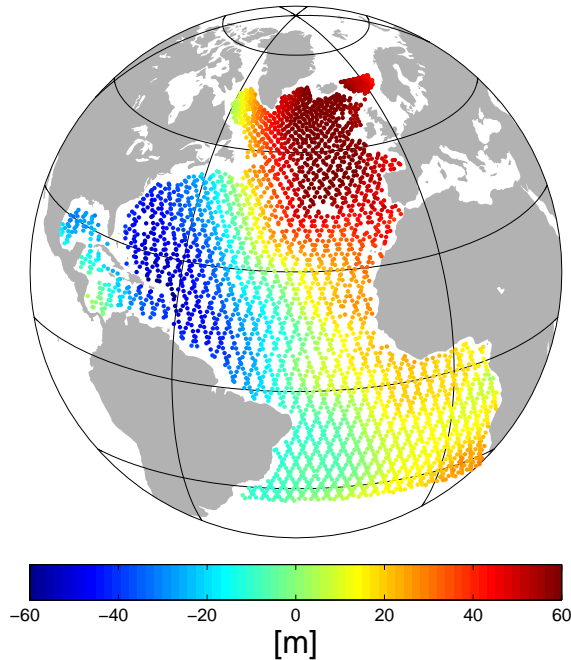
N

=

MDT

In der Theorie: **Ja**

Aber in der Praxis: ?



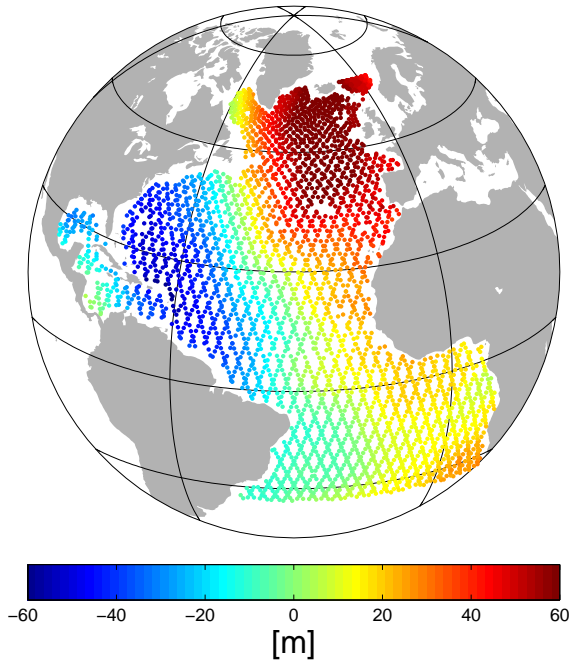
Meereshöhe
abgeleitet durch

ALTIMETRIE

auf Satellitenspuren
Regression
räumliche beschränkt
Punkt Information

Messungen
Berechnung
Bandbegrenzung
Datenwerte

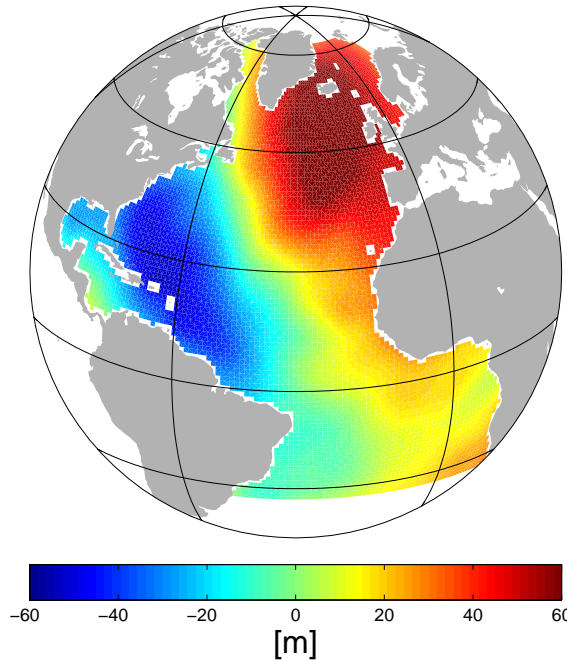
Aber in der Praxis: ?



Meereshöhe
abgeleitet durch

ALTIMETRIE

auf Satellitenspuren
Regression
räumliche beschränkt
Punkt Information



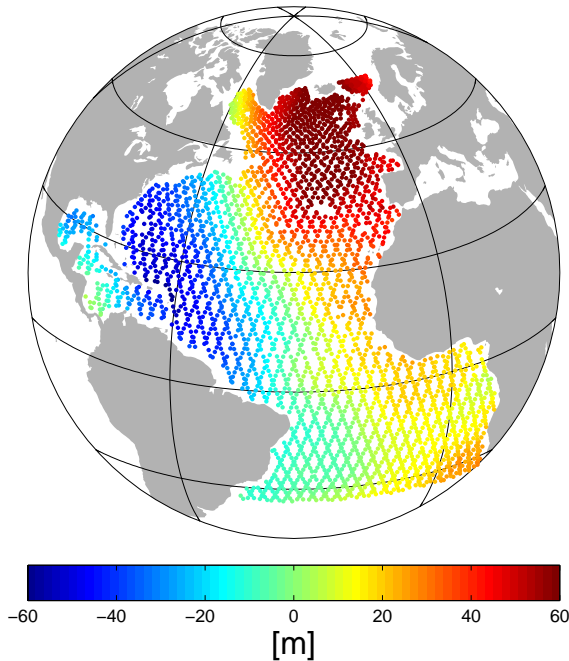
Geoidhöhe
abgeleitet durch

GOCE

auf Satellitenhöhe
Feldfortsetzung
spektral beschränkte
integrierte Werte

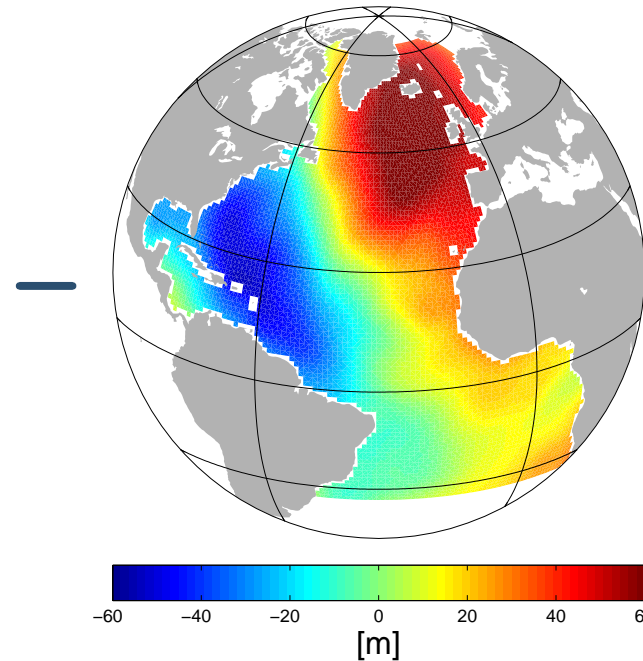
Messungen
Berechnung
Bandbegrenzung
Datenwerte

Aber in der Praxis: ?



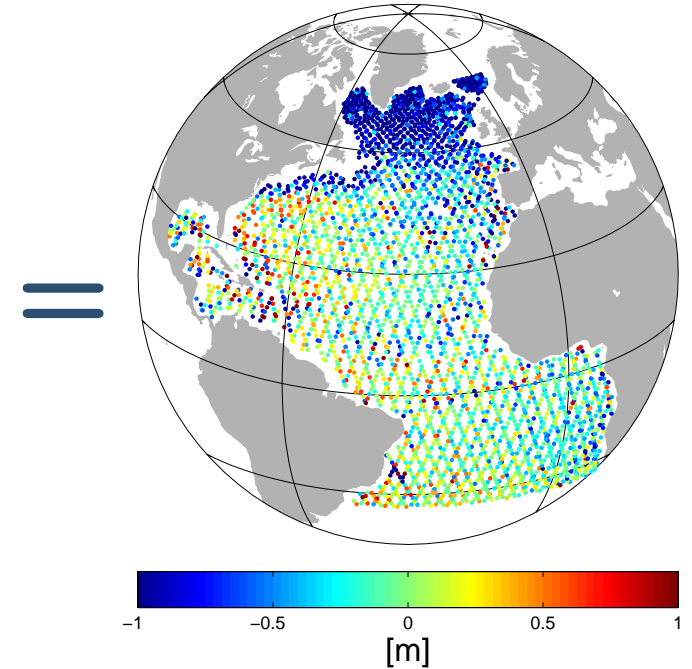
Meereshöhe
abgeleitet durch
ALTIMETRIE

auf Satellitenspuren
Regression
räumliche beschränkt
Punkt Information



Geoidhöhe
abgeleitet durch
GOCE

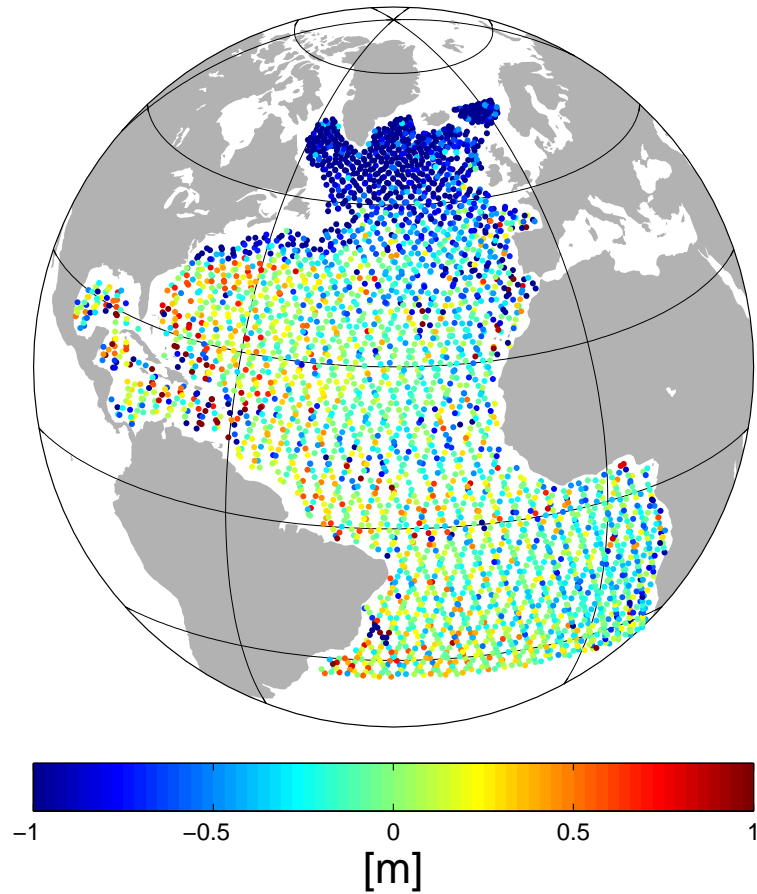
auf Satellitenhöhe
Feldfortsetzung
spektral beschränkte
integrierte Werte



Ozeantopographie
???

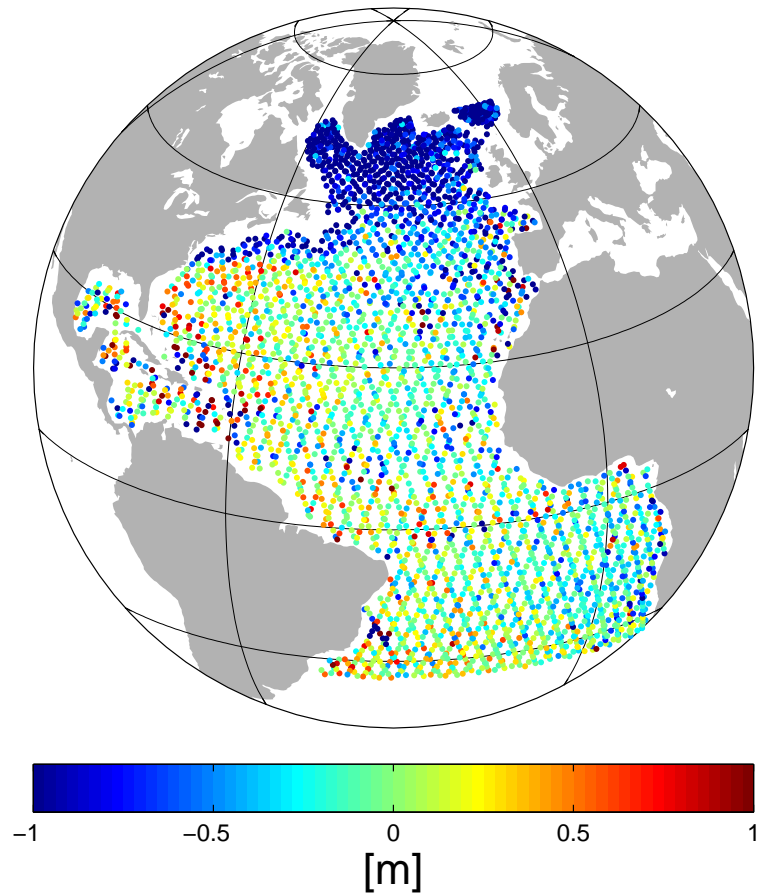
Messungen
Berechnung
Bandbegrenzung
Datenwerte

Ergebnis:



unbefriedigend

Ergebnis:



unbefriedigend

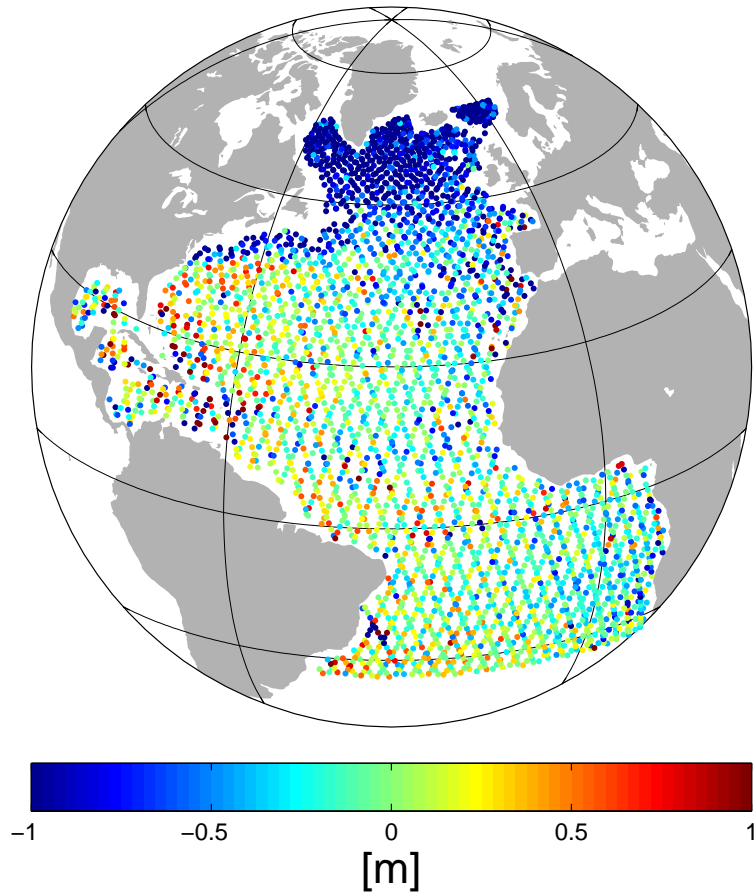
Begründung:

Die beiden Modelle passen nicht zusammen



Punktwerte versus Mittelwerte

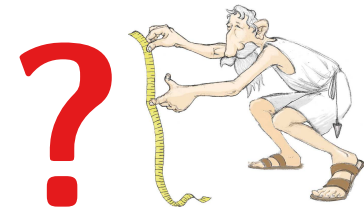
Ergebnis:



unbefriedigend

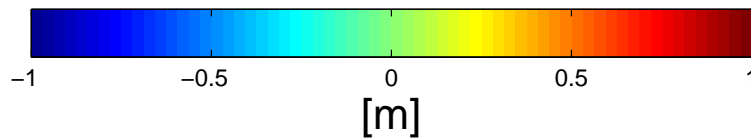
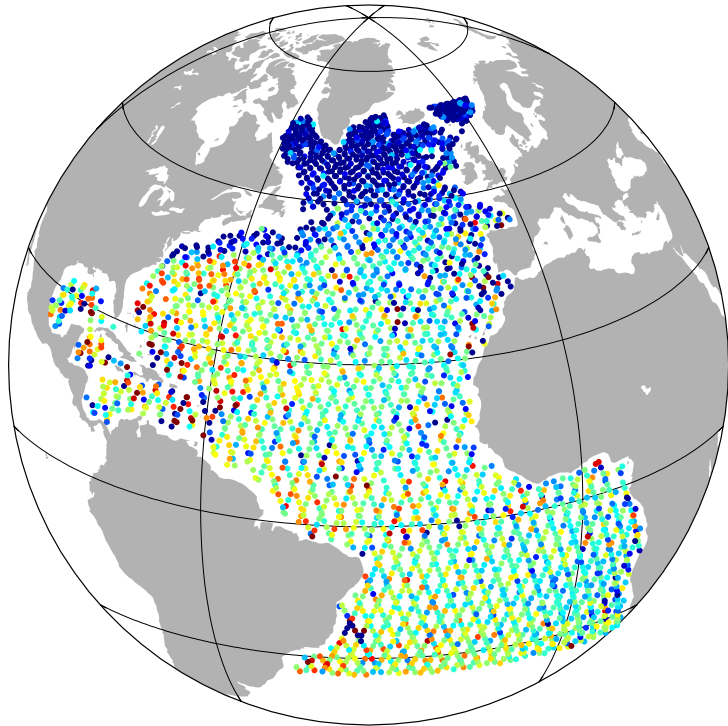


Was tun?



vereinheitlichen ???

Ergebnis:



unbefriedigend

Vereinheitlichung:



**kleinste
Gemeinsamkeit**



**Kommentar:
Da bleibt
nicht viel!!!**

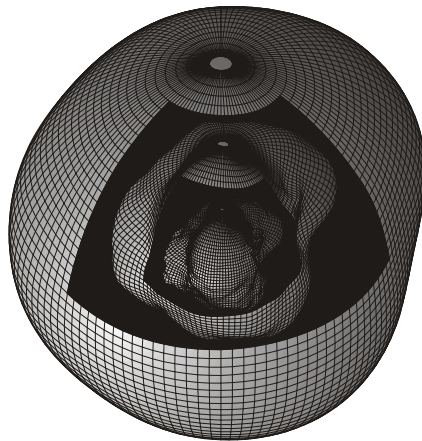
Zugang: integrierte Auswertung

Zugang: integrierte Auswertung

● Parameterisierung: Schwerefled + Ozeantopographie

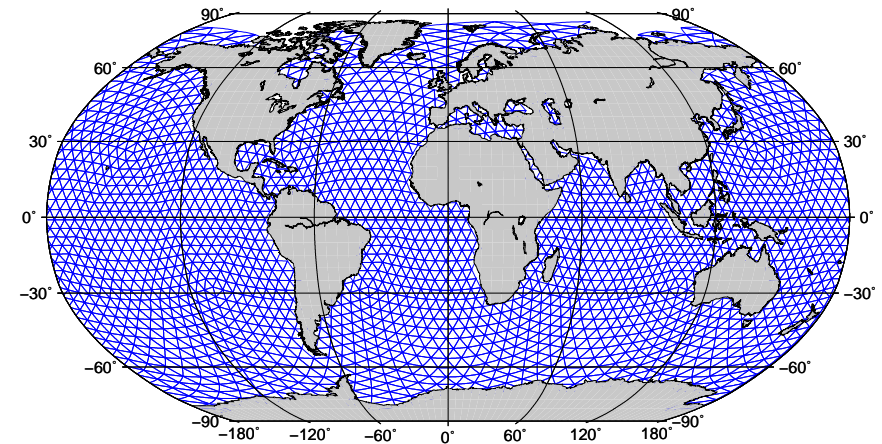
Erdschwerefeld: Kugelfunktionen

Ozeantopographie: finite Elemente



©K.H. Ilk;

IGG



● Messungen:

GOCE:
SST & SGG

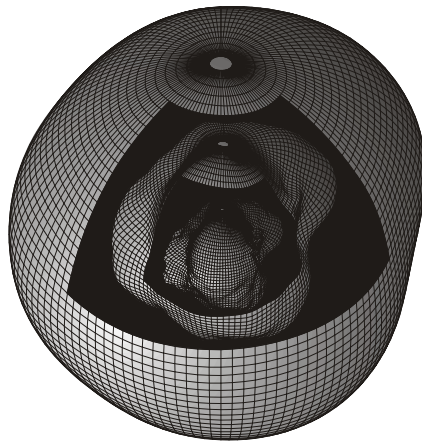
Multimissions-
altimetrie

Zugang: integrierte Auswertung

● Parameterisierung: Schwerefled + Ozeantopographie

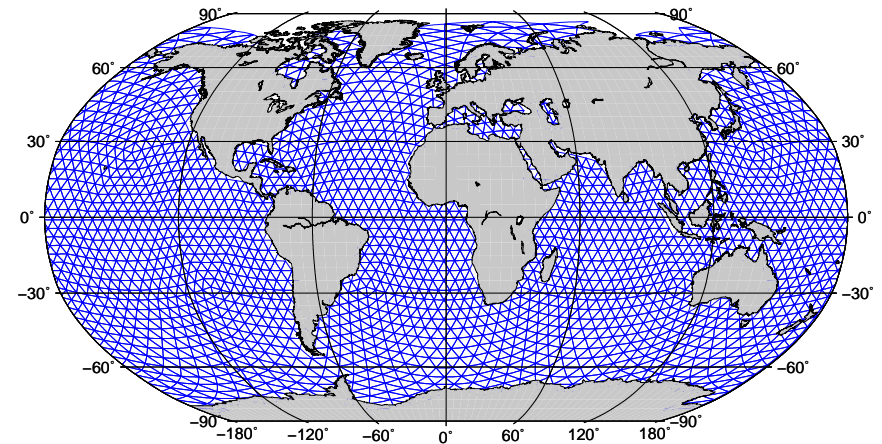
Erdschwerefeld: Kugelfunktionen

Ozeantopographie: finite Elemente



©K.H. Ilk;

IGG



● Messungen:

GOCE:
SST & SGG

Multimissions-
altimetrie

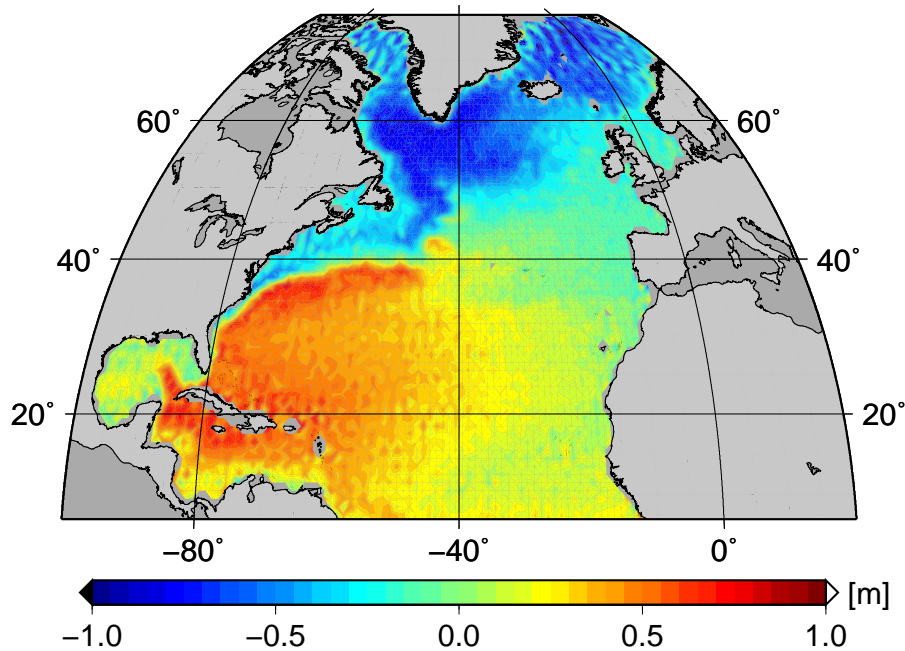
ARGO
Drifter

Oberflächen-
drifter

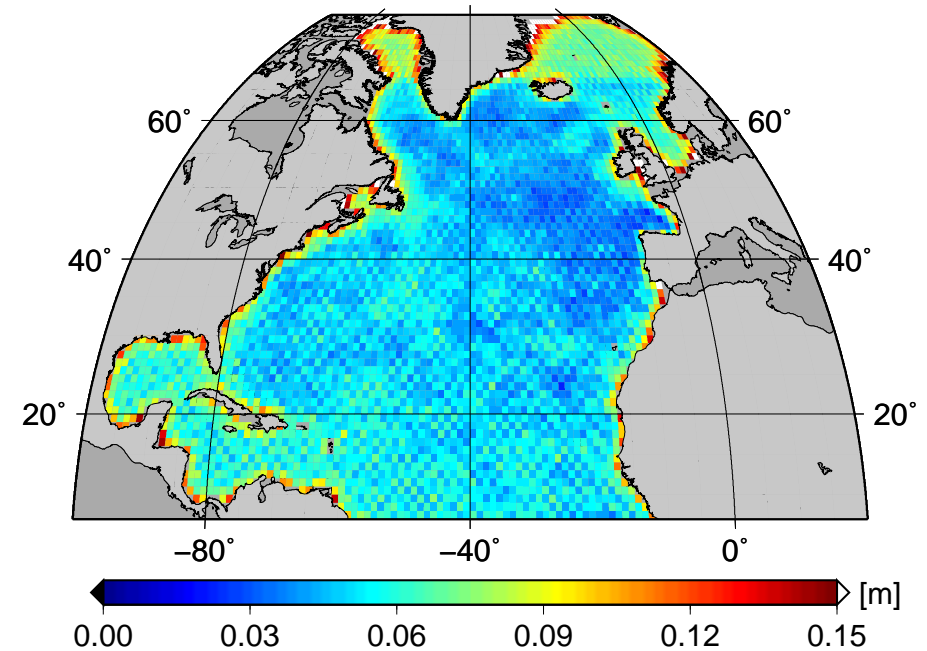
ESA-Studie: COSIMO Consistent combination of satellite- and in-situ data to model the ocean's time variable dynamic topography



mittlere Ozeantopographie



Genauigkeiten



Messungen: 400 Mio. Schwere, 54 Mio. Altimetrie, 6 Mio. Drifter
Parameter: 90.597 Geoid + 451.050 Topographie + 500 Hilfsparameter

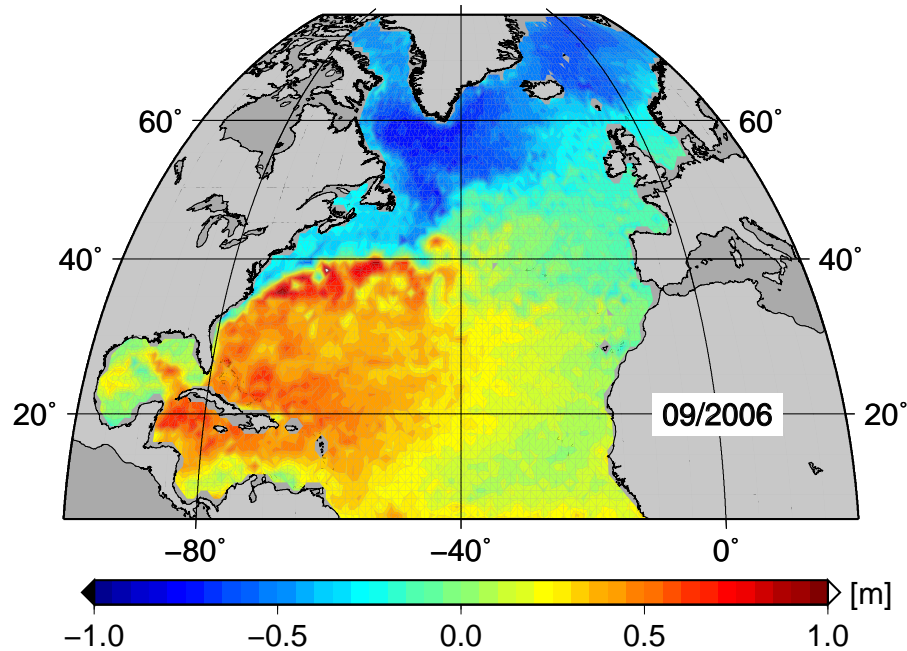
Normalgleichungen > 2 TB \Rightarrow Hochleistungsrechnen

ESA-Studie: COSIMO

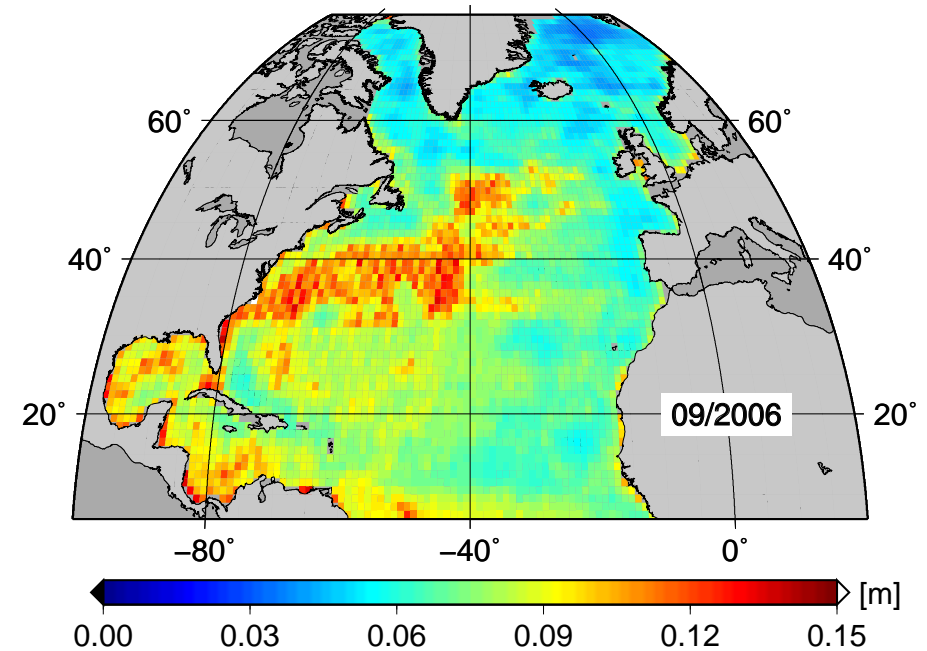
Consistent combination of satellite- and in-situ data to model the ocean's time variable dynamic topography



zeitvariable Ozeantopographie



Genauigkeiten



Messungen: 400 Mio. Schwere, 54 Mio. Altimetrie, 6 Mio. Drifter
 Parameter: 90.597 Geoid + 451.050 Topographie + 500 Hilfsparameter

Normalgleichungen $> 2 \text{ TB} \Rightarrow$ Hochleistungsrechnen

ESA-Studie: COSIMO Consistent combination of satellite- and in-situ data to model the ocean's time variable dynamic topography



zeitvariable Ozeantopographie

Genauigkeiten

Messungen: 400 Mio. Schwere, 54 Mio. Altimetrie, 6 Mio. Drifter

Parameter: 90.597 Geoid + 451.050 Topographie + 500 Hilfsparameter

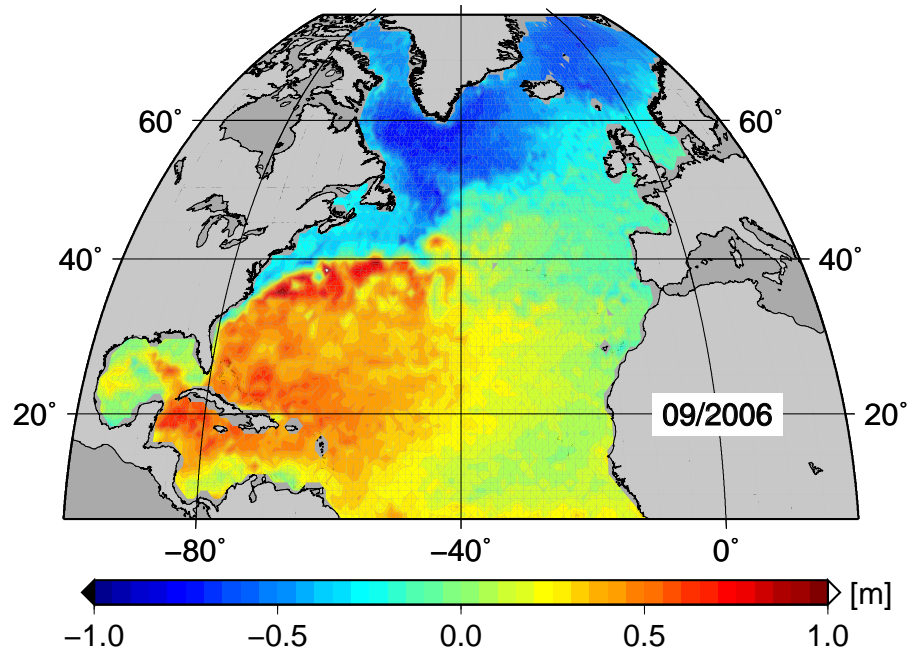
Normalgleichungen > 2 TB \Rightarrow Hochleistungsrechnen

ESA-Studie: COSIMO

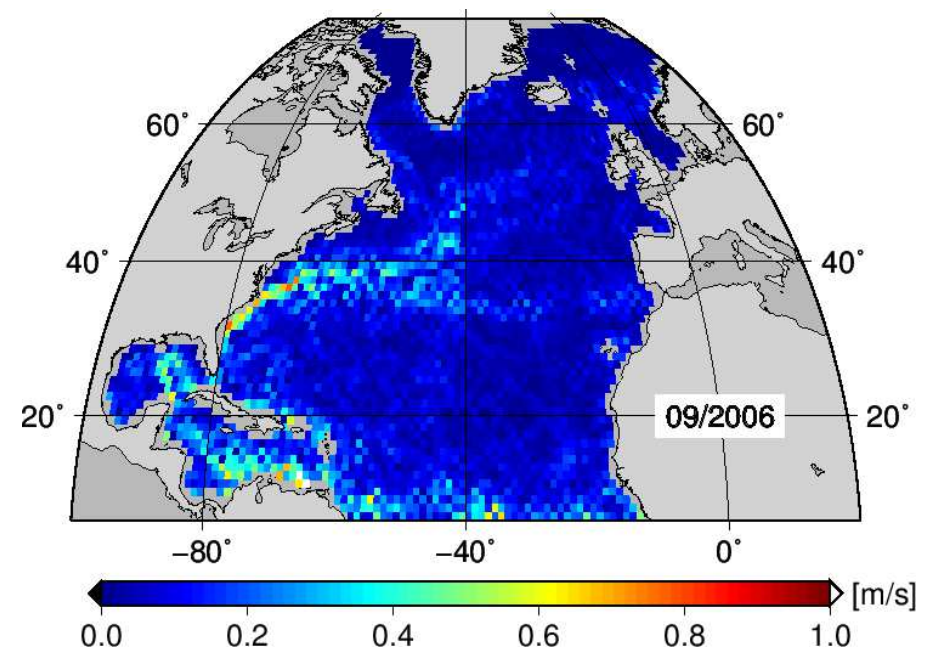
Consistent combination of satellite- and in-situ data to model the ocean's time variable dynamic topography



zeitvariable Ozeantopographie



Ozeanströmung



Messungen: 400 Mio. Schwere, 54 Mio. Altimetrie, 6 Mio. Drifter
Parameter: 90.597 Geoid + 451.050 Topographie + 500 Hilfsparameter

Normalgleichungen > 2 TB \Rightarrow Hochleistungsrechnen

ESA-Studie: COSIMO Consistent combination of satellite- and in-situ data to model the ocean's time variable dynamic topography



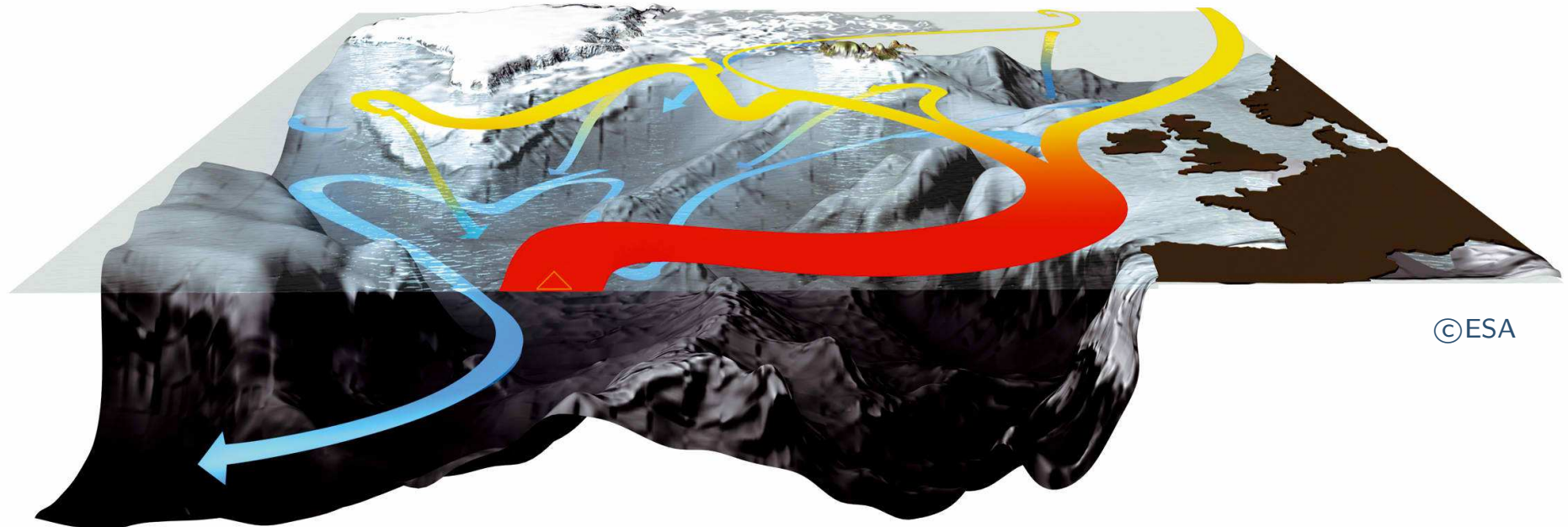
zeitvariable Ozeantopographie

Ozeanströmung

Messungen: 400 Mio. Schwere, 54 Mio. Altimetrie, 6 Mio. Drifter

Parameter: 90.597 Geoid + 451.050 Topographie + 500 Hilfsparameter

Normalgleichungen $> 2 \text{ TB} \Rightarrow$ Hochleistungsrechnen



Zugang: Einzelauswertungen

- liefert rasch Ergebnisse
- kann den vollen Informationsgehalt der Messungen nicht ausschöpfen
- liefert kaum realistische Aussagen über Genauigkeiten

Zugang: integrierte Auswertung

- ermöglicht Einbindung unterschiedlicher Messverfahren
- Modelle geben Auskunft über Parameter und deren Genauigkeiten
- sehr rechenintensiv und anspruchsvoll in der Umsetzung



“Die *Geodäsie* ist derjenige Teil der Geometrie, in welchem die Idee der Approximationsmathematik ihre klarste und konsequenteste Durchbildung gefunden hat. Man untersucht bei ihr unausgesetzt einerseits die Genauigkeit der Beobachtungen und andererseits die Genauigkeit der Resultate, die aus den Beobachtungen folgen.”

Felix Klein (1928, Seite 158):
Elementarmathematik vom Höheren Standpunkt aus III,
Springer, Berlin

**Danke für Ihre
Aufmerksamkeit**



Tag der Geodäsie

Samstag, 4. Juni 2016 ab 11:00 Uhr
Institut für Geodäsie und Geoinformation, Nußallee 17, 53115 Bonn

ALLE ÜBERS STUDIUM

DEMOS

VORTRÄGE

FORSCHUNG

TECHNIK

STUDIUM	
ab 11:00 Uhr	Studienberatung Demos
11:30 - 12:00	Arbeitsplatz Erde - Was ist eigentlich Geodäsie ? Christian Eimg IGG - Geodäsie
12:00 - 12:15	Unser Start ins erste Semester Charlotte Hacker & Eike Koller BSc-Studierende
12:15 - 12:30	Auf der Suche nach dem Sprung in der Schlüssel - im 5. Semester am Radioteleskop in Göteborg David Schunck BSc-Studierender
12:30 - 12:45	Damit das Schiff durch den Panamakanal passt - Bachelorarbeit auf der Meyer Werft Philip Wohmeyer BSc-Studierender
ab 12:45 Uhr	Studienberatung Demos Grillen
FORSCHUNG & PRAKIS	
13:30 - 13:50	Flurbereinigung - Wie man eine Straße auf den richtigen Weg bringt Yvonne Rombey Bezirksregierung Köln
13:50 - 14:10	Autonomes Fahren aus dem Silicon Valley - mit gehaltvoller geodätischer Kompetenz Max Muffert Mercedes Benz Research and Development
14:10 - 14:30	Dem Klimawandel auf der Spur - 6 Monate bei der NASA Annette Eicker IGG - APMG
im Anschluss	Come together Grillen

www.gug.uni-bonn.de

universität bonn | igg | ADRESSE & KONTAKT | Institut für Geodäsie und Geoinformation • Nußallee 17 • 53115 Bonn • tlg-2016@igg.uni-bonn.de • Tel.: 0228 / 73-1751