

Tieffliegende Satelliten und ihr Nutzen für die Schwerefeldanalyse

Adrian Jäggi

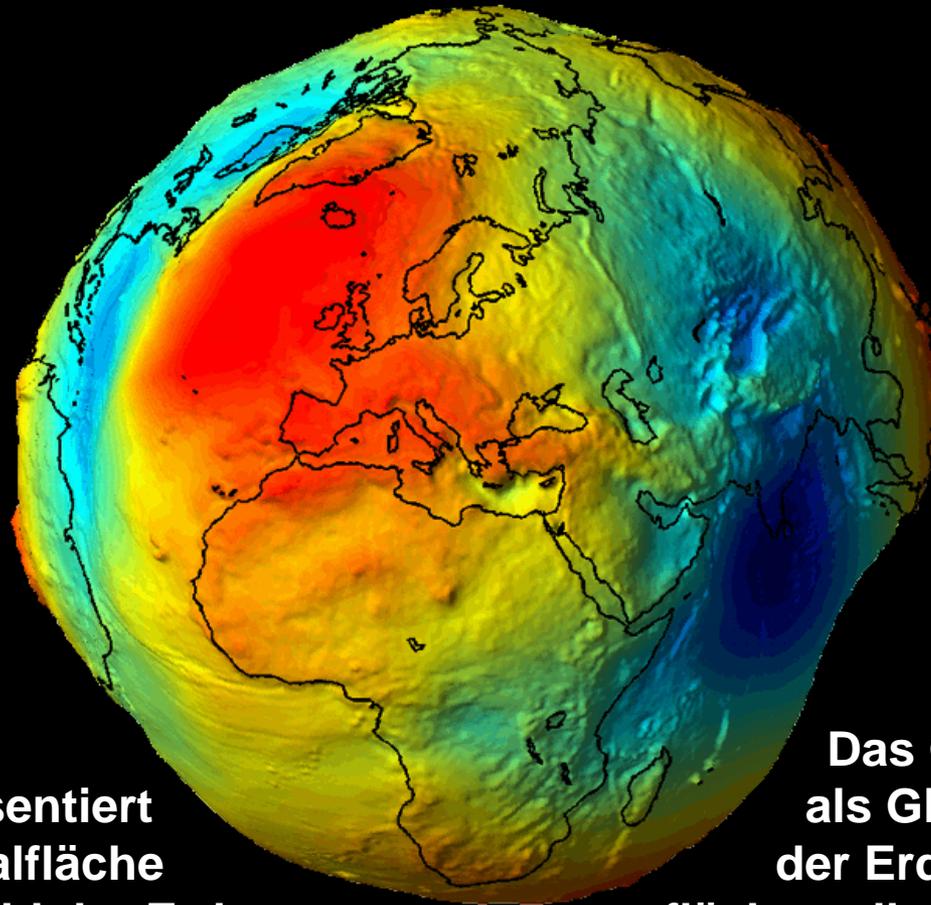
Astronomisches Institut, Universität Bern



Inhalt

- Einleitung
 - Messverfahren
 - Der Satellit CHAMP
 - Die GRACE Satelliten
 - Der Satellit GOCE
-

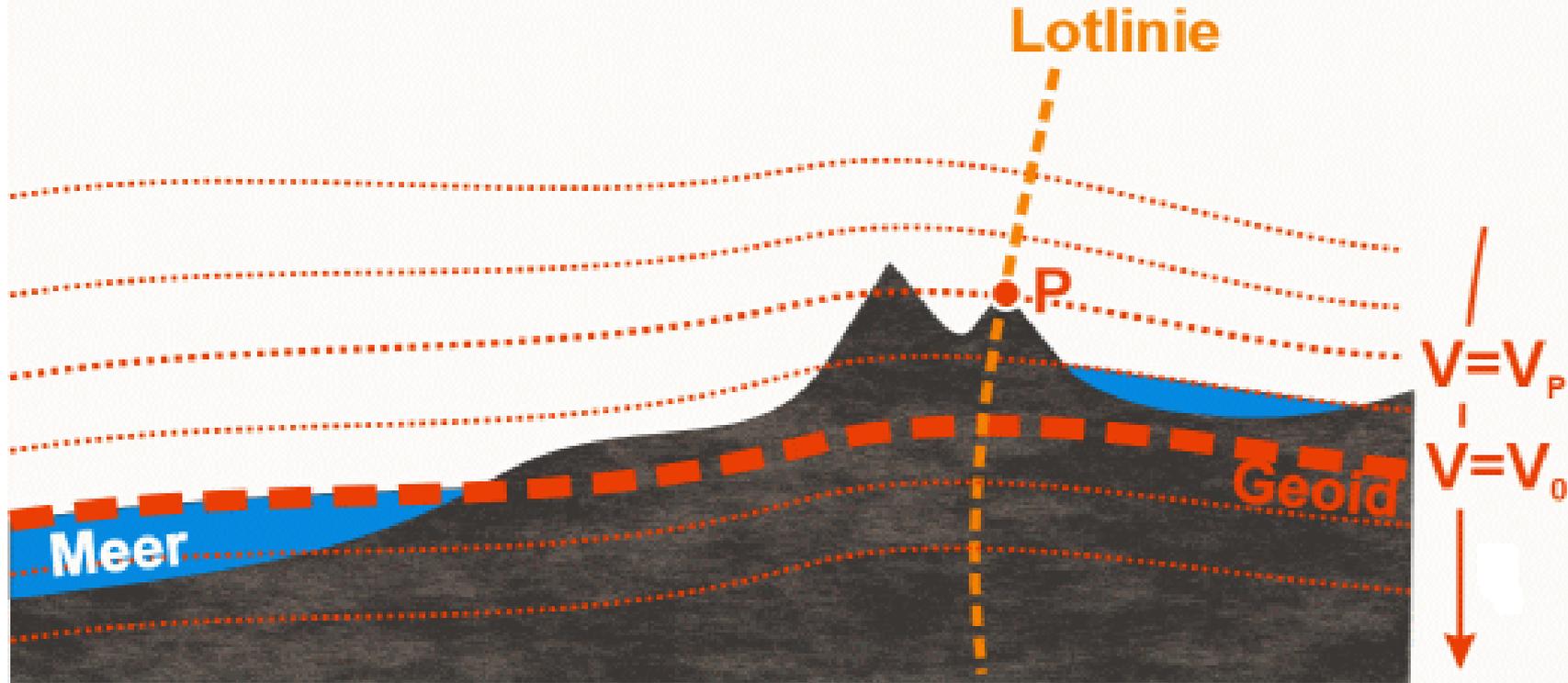
Das Gravitationsfeld der Erde



Das Geoid repräsentiert eine Äquipotentialfläche im Gravitationsfeld der Erde

Das Geoid ergäbe sich als Gleichgewichtsfigur der Erde, wenn die Oberfläche vollständig mit in Ruhe befindlichem Wasser bedeckt wäre

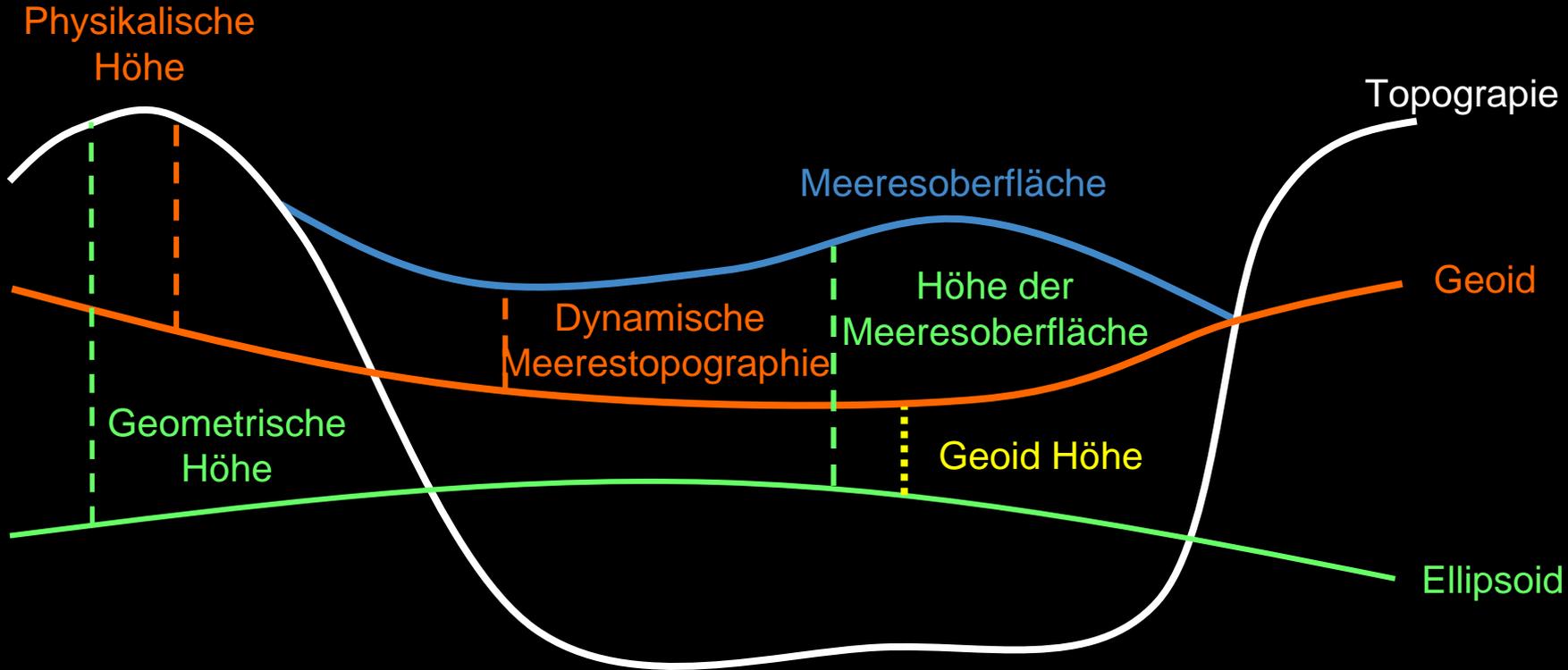
Das Gravitationsfeld der Erde



Das **Geoid** ist eine Äquipotentialfläche ($V=V_0$), die über den Ozeanen bis auf etwa zwei Meter genau dem Niveau des Meeresspiegels folgt

Die Schwerkraft wirkt immer senkrecht zur Geoidoberfläche entlang der **Lotlinie**, d.h. ein Wassertropfen auf dieser Oberfläche würde sich nicht von der Stelle bewegen

Das Gravitationsfeld der Erde

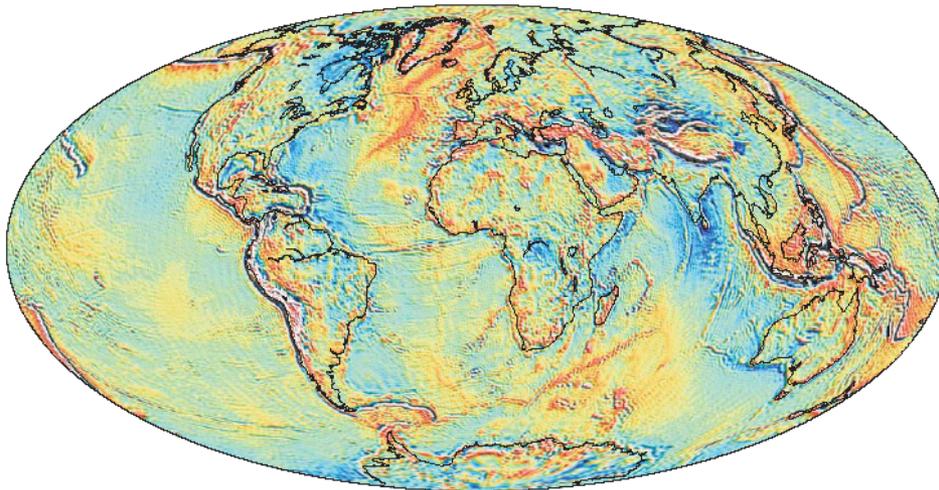


Physikalische Höhen bestimmen wo „oben“ und „unten“ ist

Die Höhe des Geoids über dem Ellipsoid beträgt maximal ± 100 Meter

Das Gravitationsfeld der Erde

$$V(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{R} \sum_{l=0}^{l_{\max}} \left(\frac{R}{r}\right)^{l+1} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\cos \theta) \cdot \left[\bar{C}_{lm} \cos(m\lambda) + \bar{S}_{lm} \sin(m\lambda) \right]$$



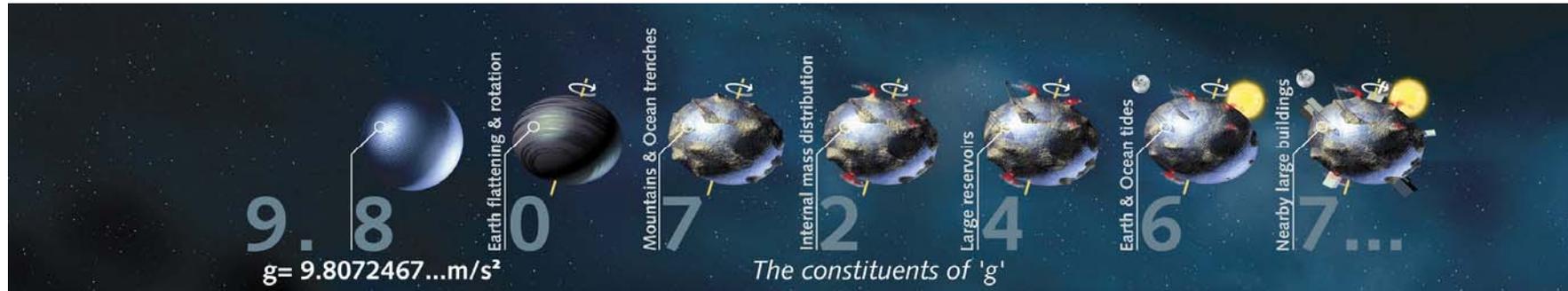
(Schwereanomalien)

l_{\max}	Anz. Koeff.	λ [km]
20	441	1000
100	10201	200
200	40401	100
250	63001	80

λ ... räumliche (halbe) Wellenlänge

Als **Schwereanomalie** bezeichnet man die Abweichung von der an einem Punkt auf dem Geoid wirkenden Schwerebeschleunigung zu der auf dem Rotationsellipsoid resultierenden Beschleunigung

Das Gravitationsfeld der Erde

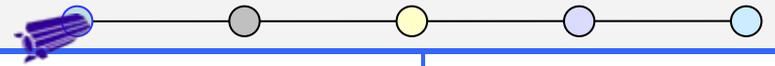


Die **Schwereanomalien** auf dem Geoid variieren mit maximalen Ausschlägen von 0.001m/s² nach oben und unten, d.h. etwa mit 0.1‰ der mittleren Schwerebeschleunigung

Die **Schwereanomalien** auf dem Geoid geben, in Analogie zu den Beulen und Dellen im Geoid, Aufschluss über die unregelmässige Massenverteilung im Innern der Erde

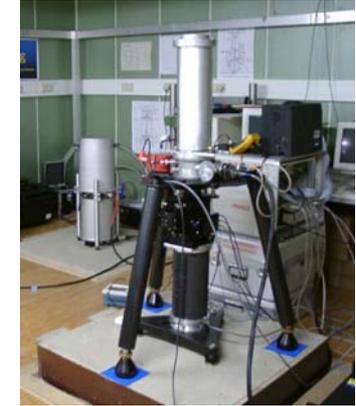
Zum **Vergleich**: Die Schwerebeschleunigung nimmt mit zunehmender Höhe ebenfalls ab, pro 1000m etwa um 0.3‰

Eine zentrale Frage ist, mit welcher Genauigkeit und räumlichen Auflösung man Schwereanomalien heutzutage erfassen kann

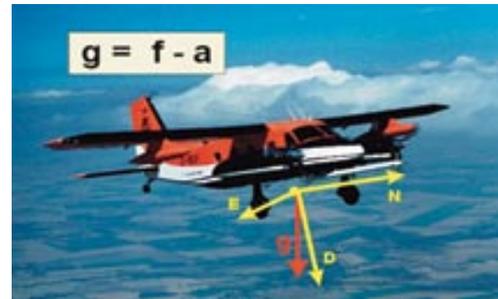


Verschiedene Messverfahren

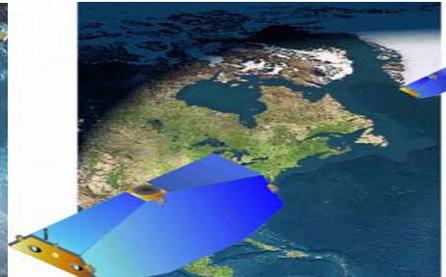
➤ Terrestrische Verfahren

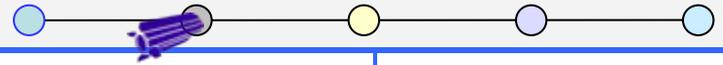


➤ Aero-, Schiffs-Gravimetrie

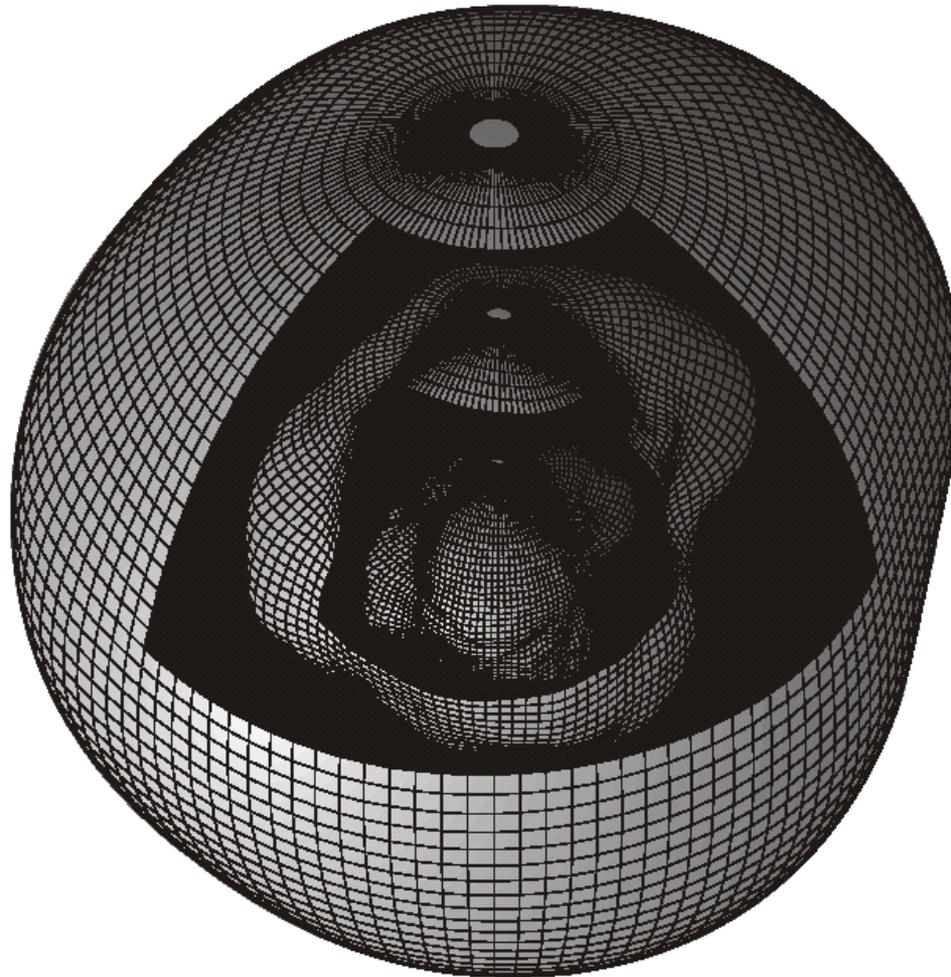


➤ Satellitenverfahren





Je tiefer, desto besser



Die Äquipotentialflächen werden nach aussen immer kugelförmiger, die Feinstrukturen im Gravitationsfeld werden weniger gut sichtbar

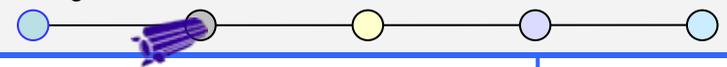
Klassische Gravitationsfeldbestimmung

Satellite Laser Ranging (SLR)

- Distanzen zu Satelliten können von einigen wenigen Observatorien auf der Welt mittels Laserdistanzmessungen mit einer Genauigkeit von (heutzutage) wenigen Zentimetern vermessen werden
- aus der Analyse solcher Messungen über viele Jahre zu Satelliten mit verschiedenen Bahncharakteristiken können die niedrigen Grade der Gravitationsfeldkoeffizienten bestimmt werden



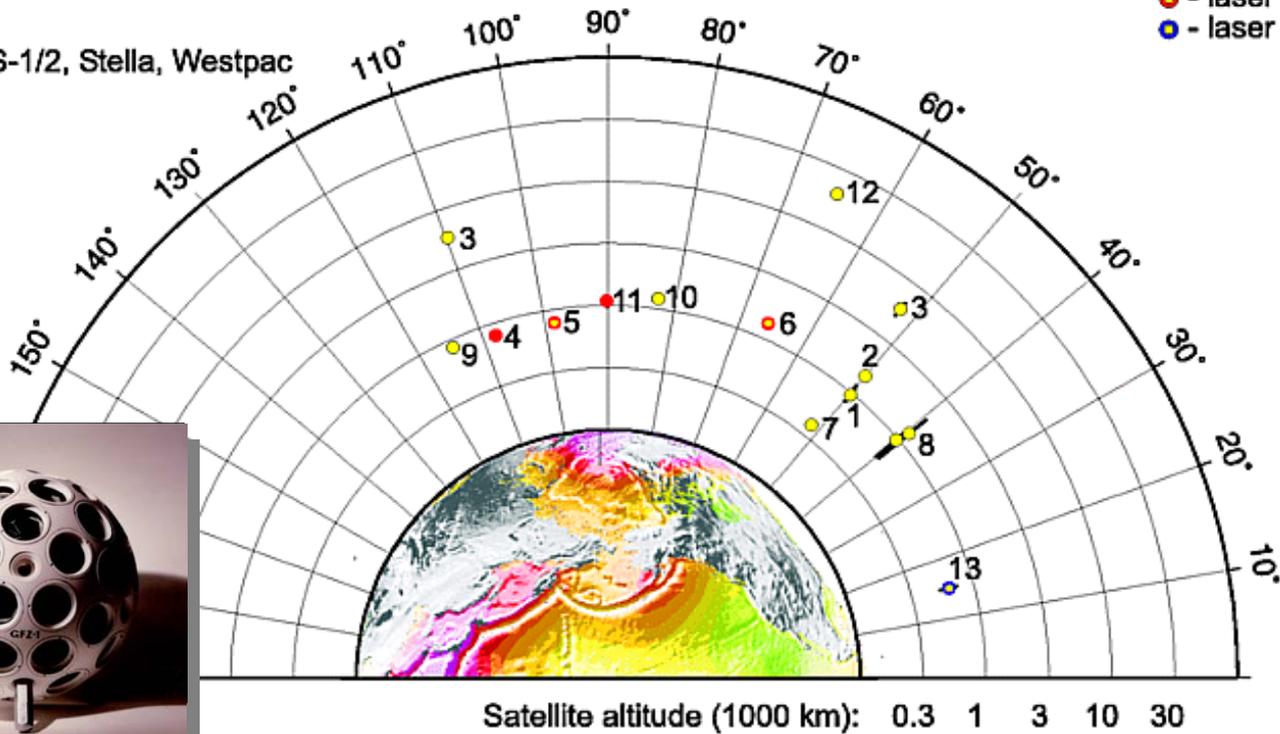
Diese Methode wurde während mehreren Jahrzehnten erfolgreich zur Gravitationsfeldbestimmung angewendet. Die Methode ist allerdings limitiert, weil die Satelliten nicht ständig vermessen werden können



Klassische Gravitationsfeldbestimmung

- 1 Starlette
- 2 Ajisai
- 3 Lageos 1/2
- 4 Geosat
- 5 Spot-2/3, ERS-1/2, Stella, Westpac
- 6 Topex
- 7 GFZ-1
- 8 D1-C, D1-D
- 9 GEOS-3
- 10 METEOR-3
- 11 NOVA3
- 12 ETALON-1/2
- 13 PEOPLE

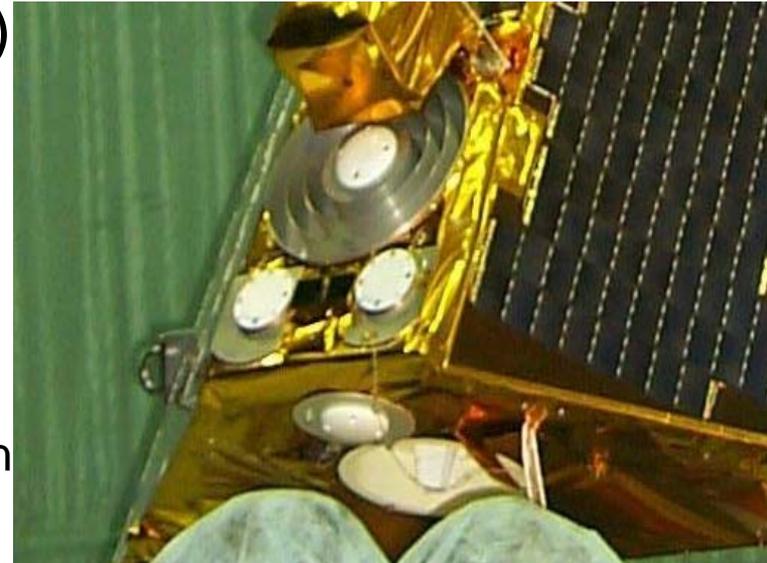
- - laser
- - microwave
- - laser + microwave
- - laser + camera



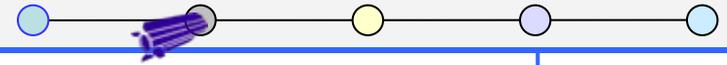
Moderne Gravitationsfeldbestimmung

Global Positioning System (GPS)

- GPS leistet entscheidende Beiträge zur Realisierung globaler Referenzsysteme, zur modernen Landesvermessung und zu diverser geophysikalischer Forschung
- Positionen permanenter GPS Stationen lassen sich heutzutage mit Genauigkeiten von wenigen Millimetern bestimmen
- Es war bloss eine Frage der Zeit, bis GPS Antennen auch auf die tiefer fliegenden Forschungssatelliten montiert wurden, um deren Positionen kontinuierlich und hochgenau berechnen zu können



GPS Antennen gehören heutzutage zur Standardausrüstung moderner Forschungssatelliten, weil die drei-dimensionalen Positionen der Satelliten mit hoher zeitlicher Auflösung und Genauigkeiten von wenigen Zentimetern bestimmt werden können

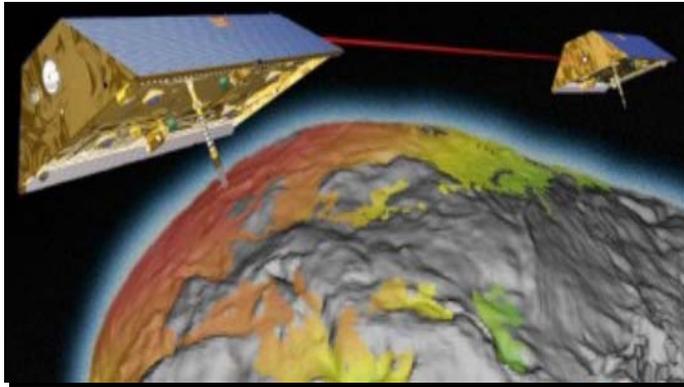


Aktuelle Schwerfeldmissionen



CHAMP (2000)

CHALLENGING
MInisatellit
PAylod



GRACE (2002)

GRAVITY
RECOVERY
AND
CLIMATE
EXPERIMENT



GOCE (2009)

GRAVITY FIELD & STEADY-STATE
OCEAN
CIRCULATION
EXPLORER

Der Satellit CHAMP

Missionsparameter

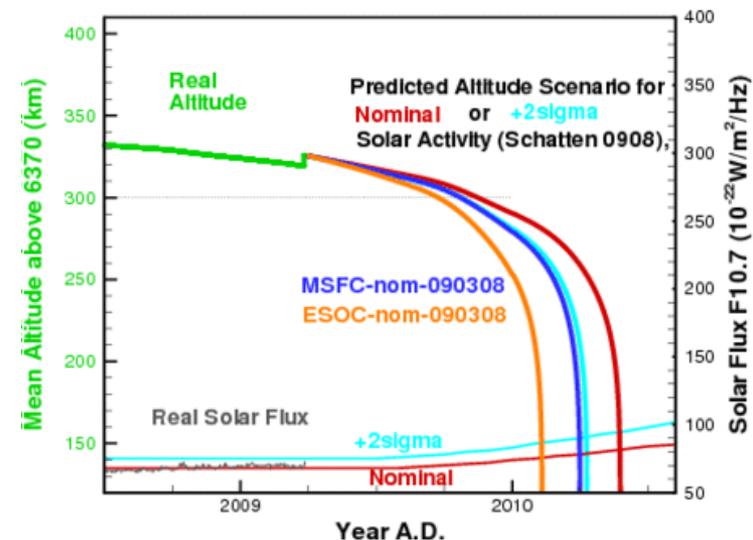
- Start: 15. Juli 2000
- Bahnneigung: 87°
- Initialhöhe: 454 km; heute: verglüht



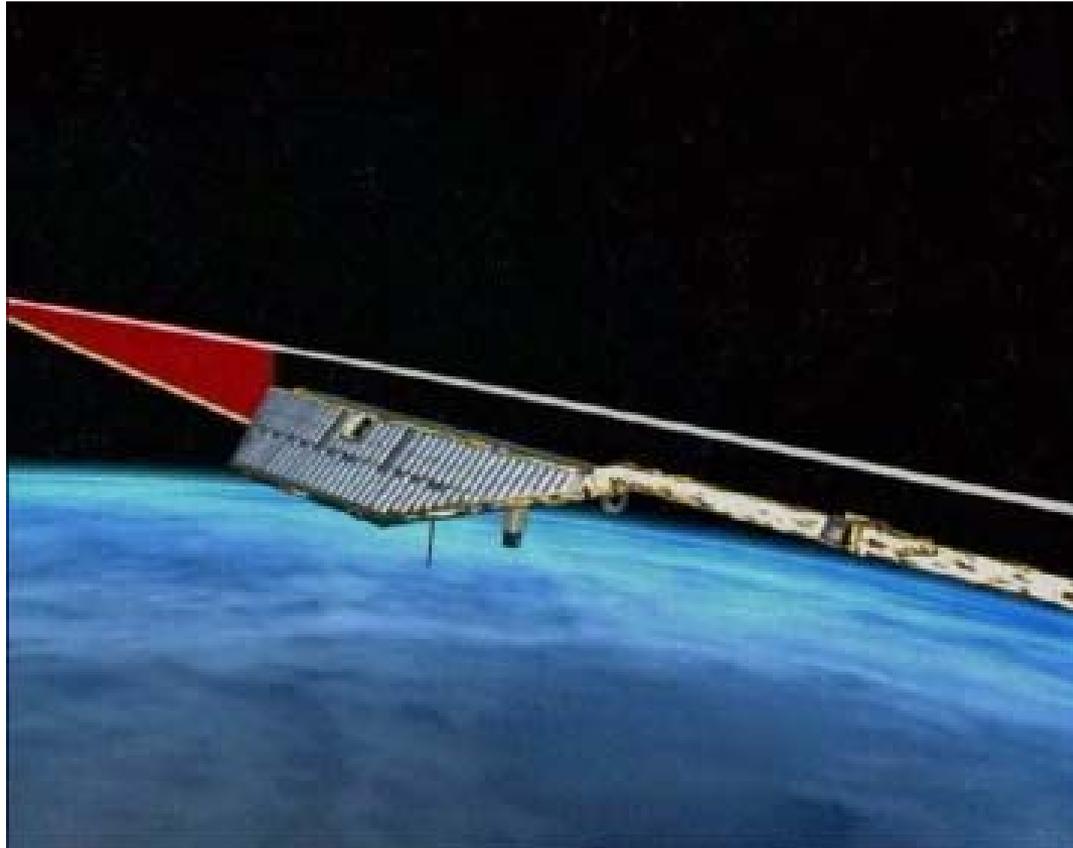
Missionsziele und Resultate

- Globale Modelle des Gravitationsfeldes der Erde bis etwa Grad 70
- Globale Modelle des Erdmagnetfeldes
- Atmosphärensondierung

CHAMP Decay Scenario (31-Mar-2009)



CHAMP in der Umlaufbahn



Die Abweichung der *wirklichen* (mit Hilfe von GPS vermessenen) *Bahn* von einer (mit allen bekannten Modellen berechneten) *Referenzbahn* enthält unter anderem Informationen über die noch zu ungenau bekannten Anteile des Gravitationsfeldes der Erde

Welche Beschleunigungen treten auf?

Ursache	Beschleunigung (m/s ²)
Hauptterm der Erdanziehung	8.42
Term aufgrund der Abplattung der Erde	0.015
Luftwiderstand in der Hochatmosphäre	0.00000079
Terme höherer Ordnung der Erdanziehung	0.00025
Anziehung durch den Mond	0.0000054
Anziehung durch die Sonne	0.0000005
Direkter Strahlungsdruck der Sonne	0.000000097
.	.



Welche Beschleunigungen treten auf?

Ursache	Beschleunigung (m/s ²)
Hauptterm der Erdanziehung	8.42
Term aufgrund der Abplattung der Erde	0.015
Luftwiderstand in der Hochatmosphäre	0.00000079
Terme höherer Ordnung der Erdanziehung	0.00025
Anziehung durch den Mond	0.0000054
Anziehung durch die Sonne	0.0000005
Direkter Strahlungsdruck der Sonne	0.000000097

Aus der mit GPS vermessenen Bahn muss man versuchen, die von der **Erdanziehung verursachte Beschleunigung** zu isolieren, um die Koeffizienten des Gravitationsfeldes der Erde abzuleiten

Welche Beschleunigungen treten auf?

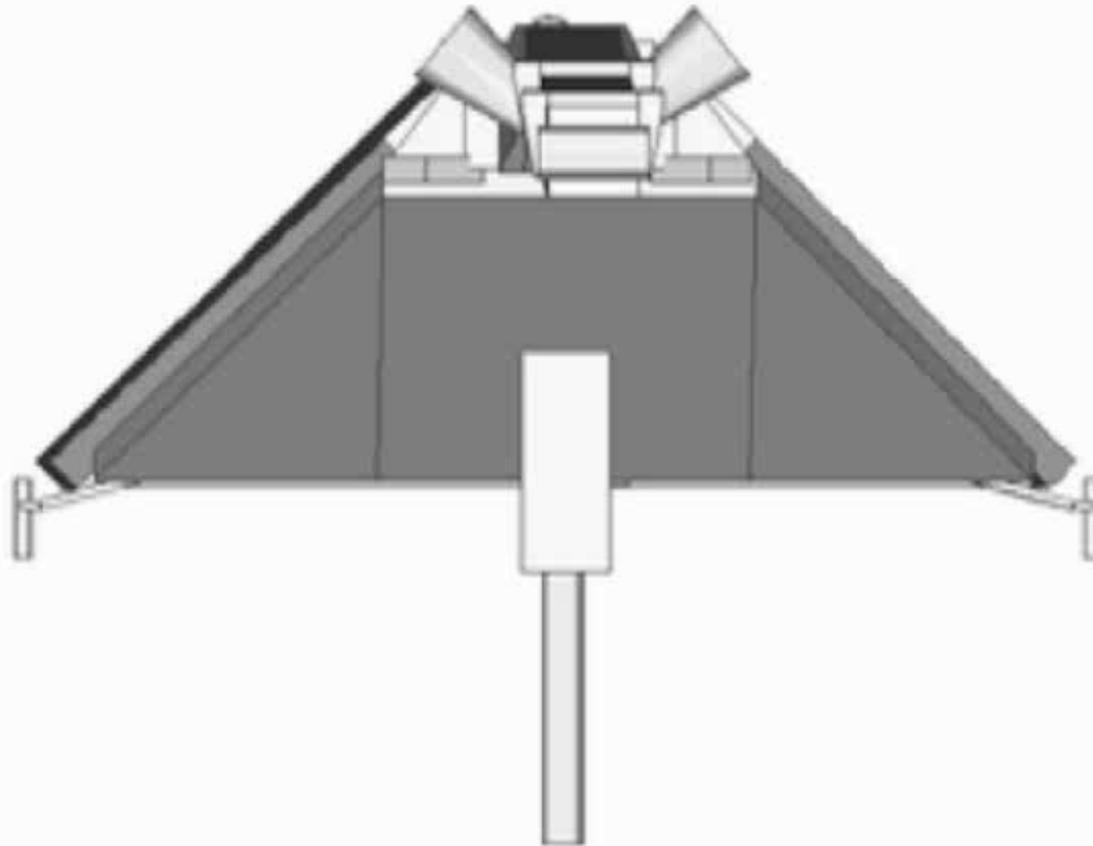
Ursache	Beschleunigung (m/s ²)
Hauptterm der Erdanziehung	8.42
Term aufgrund der Abplattung der Erde	0.015
Luftwiderstand in der Hochatmosphäre	0.00000079
Terme höherer Ordnung der Erdanziehung	0.00025
Anziehung durch den Mond	0.0000054
Anziehung durch die Sonne	0.0000005
Direkter Strahlungsdruck der Sonne	0.000000097

Aus der mit GPS vermessenen Bahn muss man versuchen, die von der **Erdanziehung verursachte Beschleunigung** zu isolieren, um die Koeffizienten des Gravitationsfeldes der Erde abzuleiten

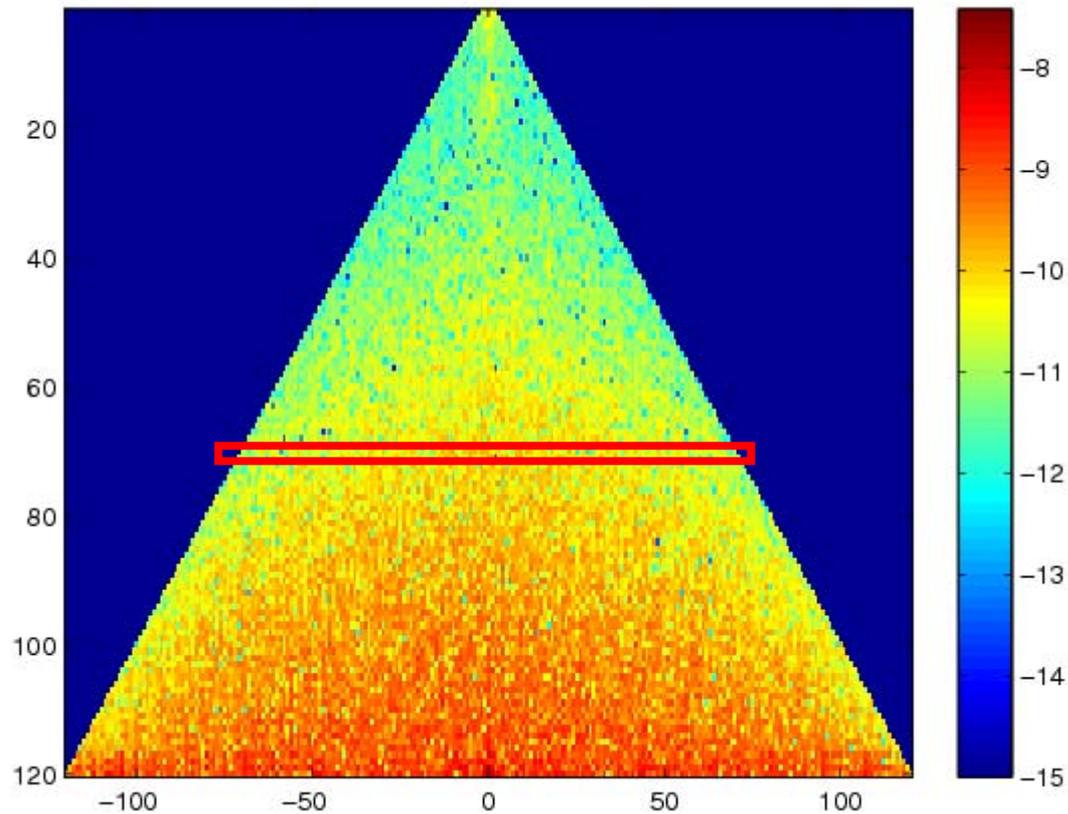
Die **übrigen Beschleunigungen** müssen dabei entweder direkt gemessen oder durch externe Modelle beschrieben werden



Ganz so einfach ist es natürlich nicht ...

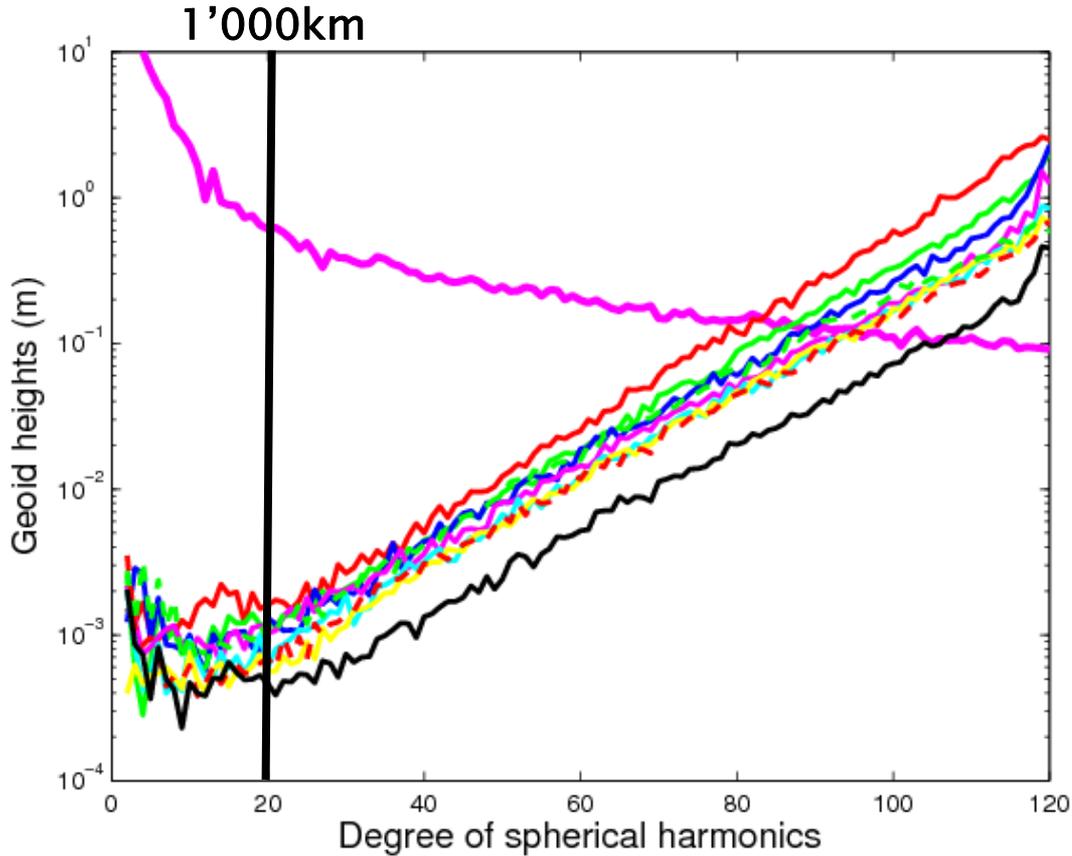


CHAMP Lösungen



Differenzen der Koeffizienten zu einer (überlegenen) Referenzlösung

CHAMP Lösungen



Referenz:
GRACE Lösung

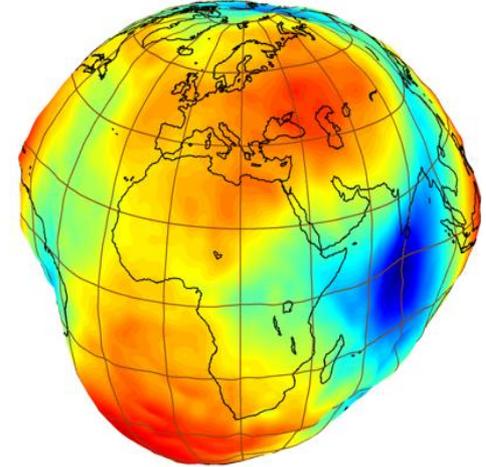
- Differenzen:
- Jahr 2002
 - Jahr 2003
 - Jahr 2004
 - Jahr 2005
 - Jahr 2006
 - Jahr 2007
 - Jahr 2008
 - Jahr 2009

Kombination:
8 Jahreslösung

Welchen Gewinn hat CHAMP gebracht?

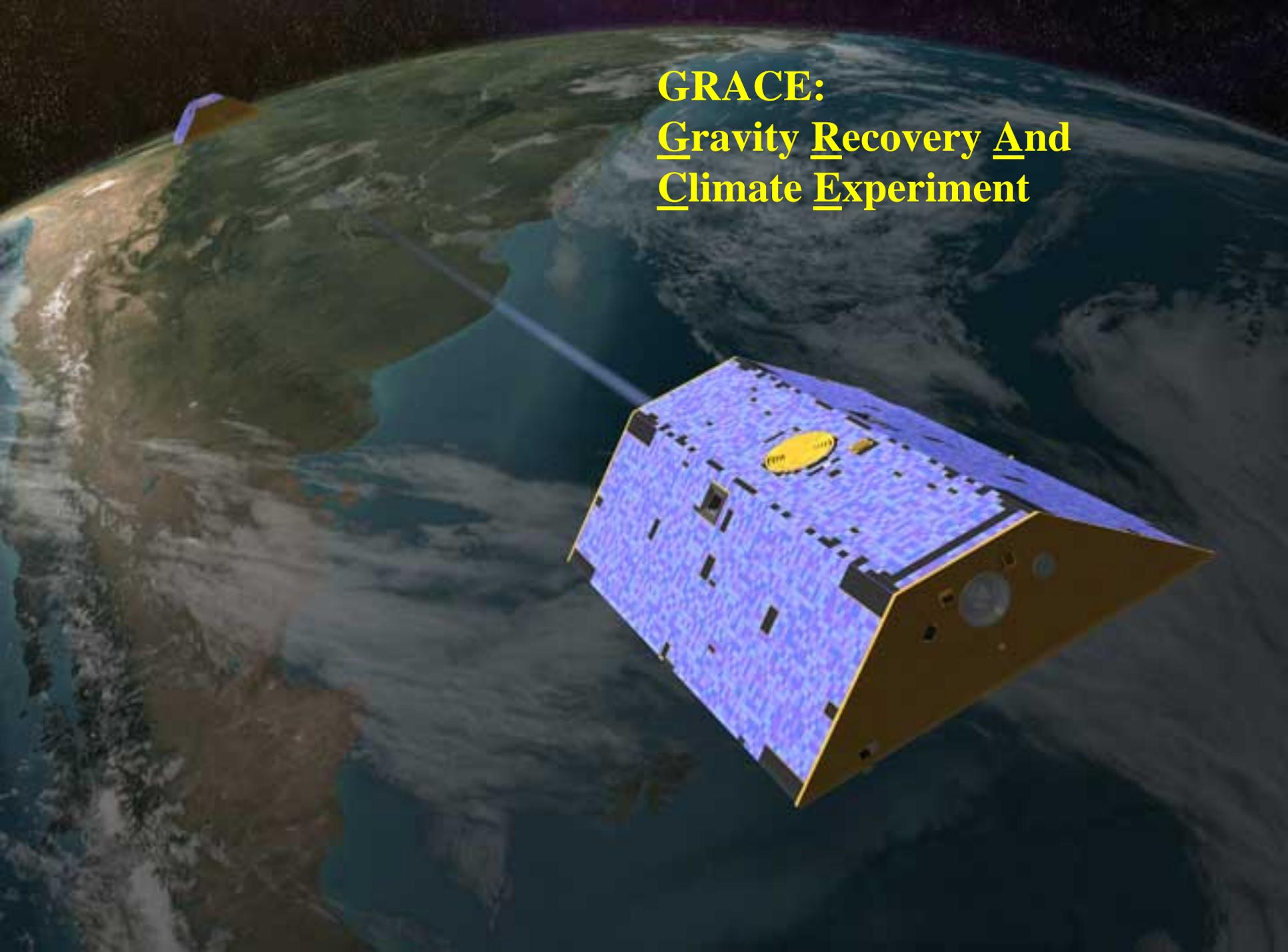
Gravitationsfeldmodelle sind ...

- bereits aus relativ kurzen Datenreihen von Bahnpositionen berechenbar (anstelle von Jahrzehnten benötigt man nun ca. ein Jahr)
- aus der Analyse von Bahnpositionen eines einzelnen Satelliten berechenbar (anstelle von ca. einem Dutzend benötigter Satelliten)
- mit deutlich besserer Auflösung und Genauigkeit aus der Analyse von Bahnpositionen berechenbar als dies je zuvor mit anderen Satelliten-Techniken möglich war. Dies ist der genauen, drei-dimensionalen GPS Positionierung zu verdanken



Dennoch war CHAMP in erster Linie eine Mission, um den Einsatz von Technologien wie die des GPS für die Gravitationsfeldbestimmung zu demonstrieren

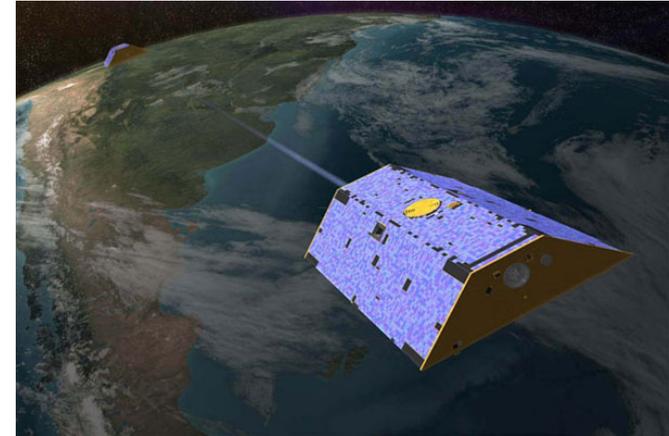
**GRACE:
Gravity Recovery And
Climate Experiment**



Die GRACE Satelliten

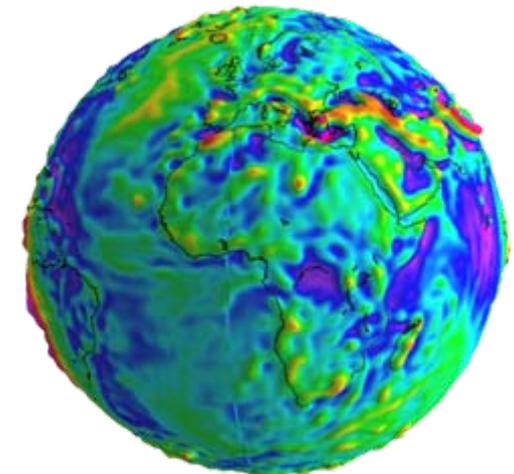
Missionsparameter

- Start: März 2002
- Bahnneigung: 89°
- Initialhöhe: 485 km; heute: ca. 470 km
- Abstand der Satelliten: ca. 220 km



Missionsziele & Resultate

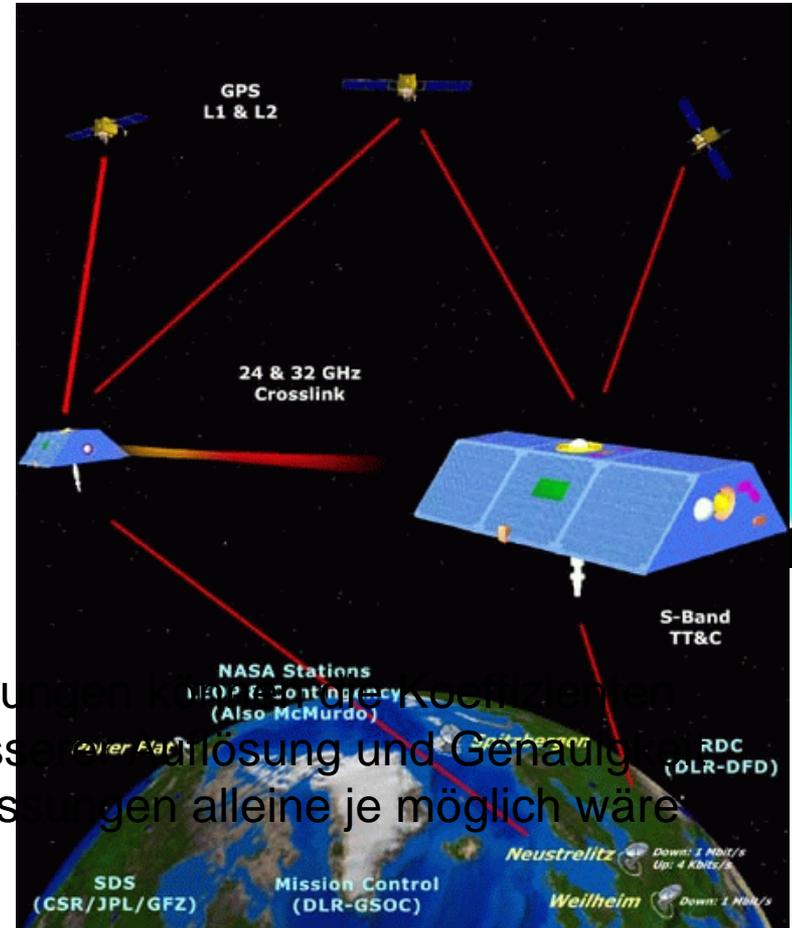
- Globale Modelle des Gravitationsfeldes der Erde bis etwa Grad 180
- Zeitliche Variationen des Gravitationsfeldes (Hydrologie, Eismassen, Ozeane, ...)
- Atmosphärensondierung



Die GRACE Satelliten

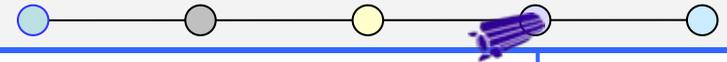
GRACE Messprinzip

- Die Entfernung zwischen den beiden Satelliten wird mittels Mikrowellen mit einer unglaublichen Genauigkeit von wenigen Mikrometern vermessen !!!
- Gleichzeitig wird die Satellitenposition mit GPS bezüglich dem Ellipsoid wie bei CHAMP mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern bestimmt
- Aus der Kombination der beiden Messungen kann das Gravitationsfeld mit deutlich besserer Auflösung und Genauigkeit bestimmt werden als dies mit GPS Messungen alleine je möglich wäre



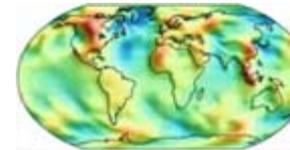
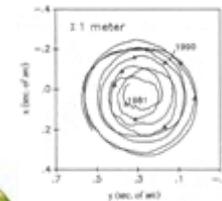
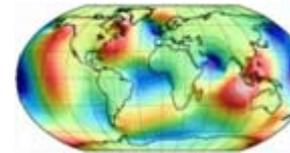
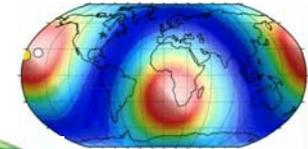
Hauptvorteil

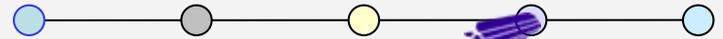
Bereits aus äusserst kurzen Datenreihen von nur einem Monat können qualitativ hochstehende Gravitationsfeldlösungen berechnet werden



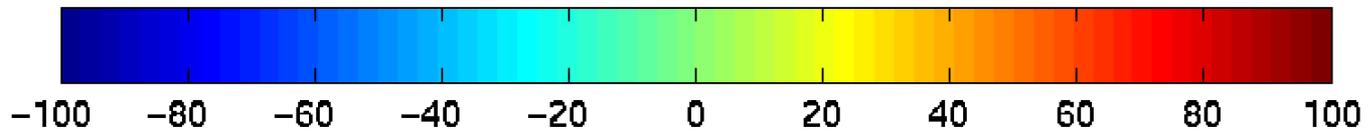
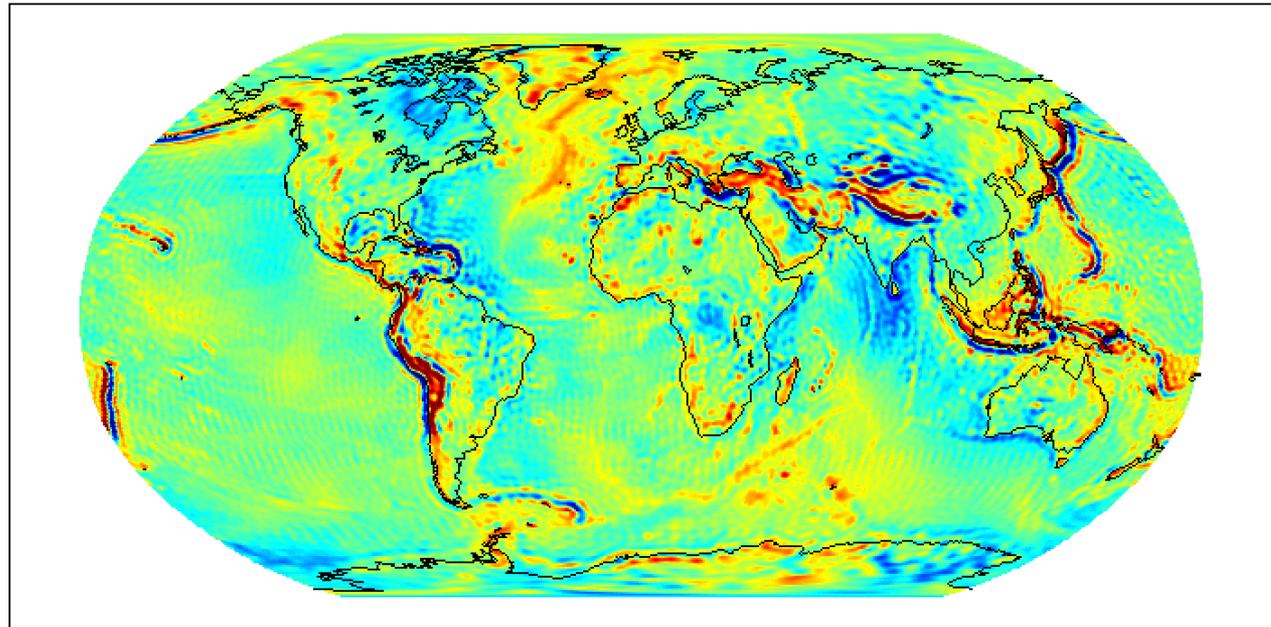
Hintergrundmodellierung

- Anziehung von Sonne, Mond und Planeten:
- Gezeiten der festen Erde:
- Ozeangezeiten:
- Polgezeiten:
- Variationen der Atmosphäre und die Reaktion des Ozeans darauf:
- nicht-gravitative Kräfte:
- relativistische Korrekturen:

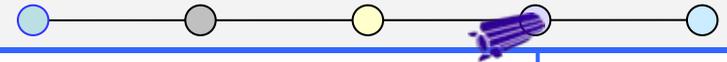




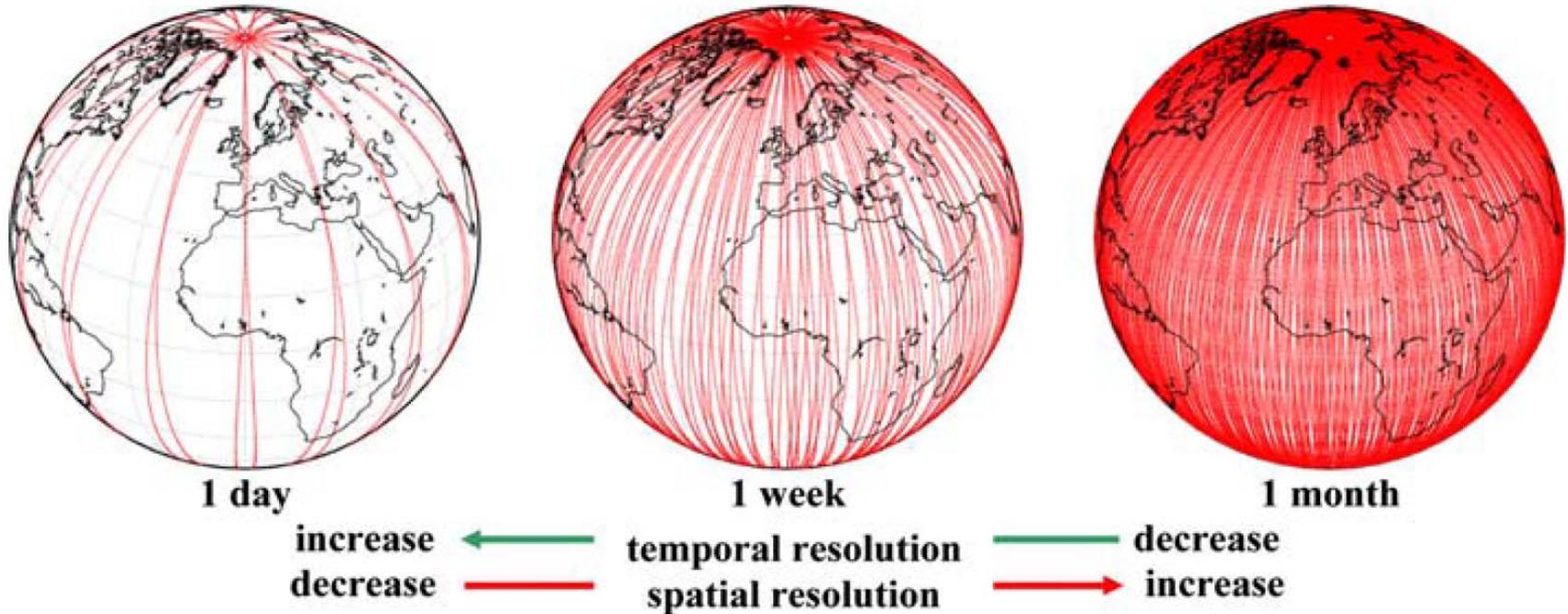
Mittleres statisches Gravitationsfeld



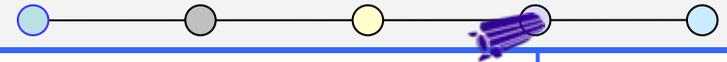
Schwereanomalien in mgal



Zeitlich variables Gravitationsfeld

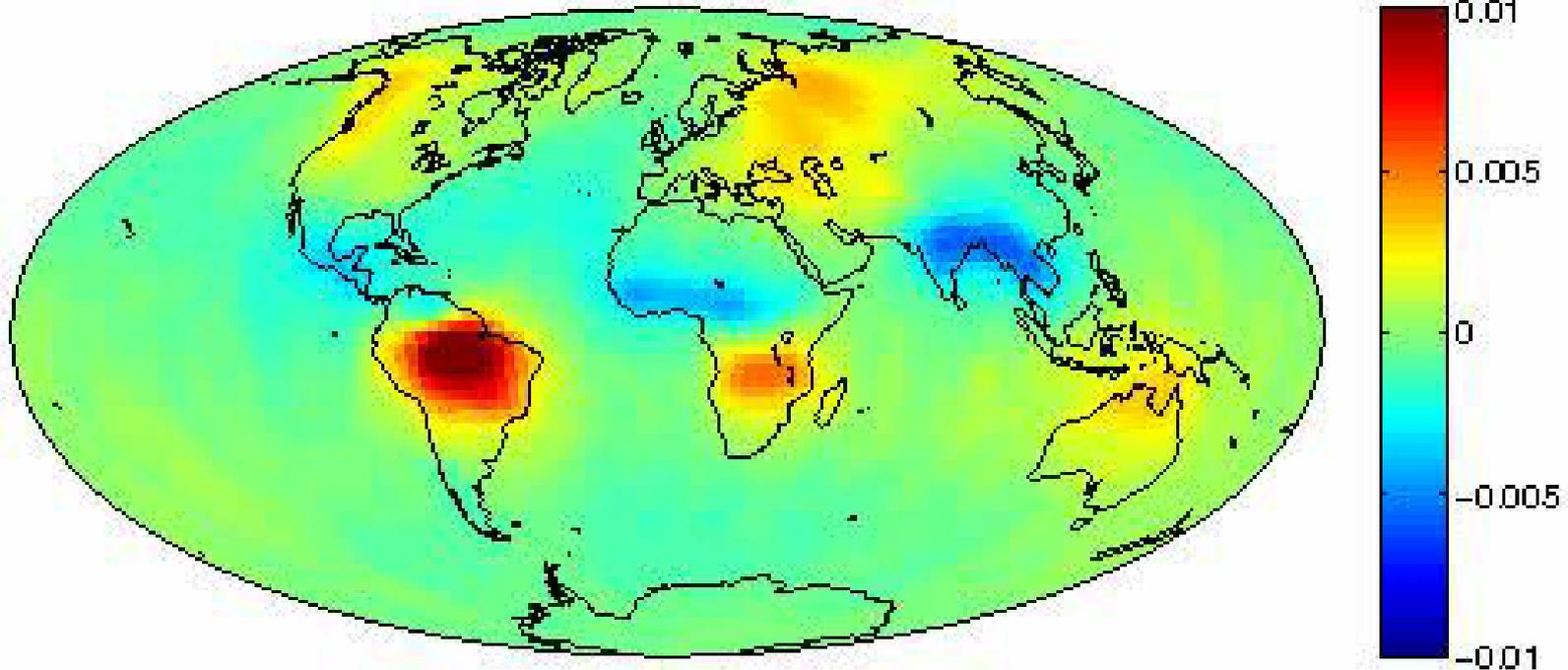


Zwischen der zeitlichen und der räumlichen Auflösung des Schwerefelds besteht eine Art Unschärferelation: je höher die zeitliche Auflösung, desto geringer ist die räumliche Auflösung und umgekehrt.

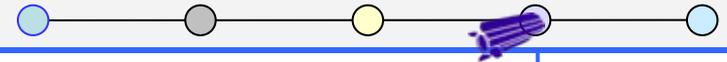


Zeitlich variables Gravitationsfeld

GRACE time variations (only significant): 52760

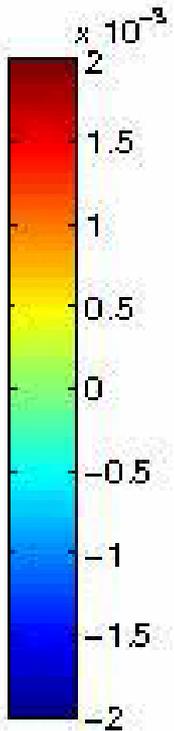
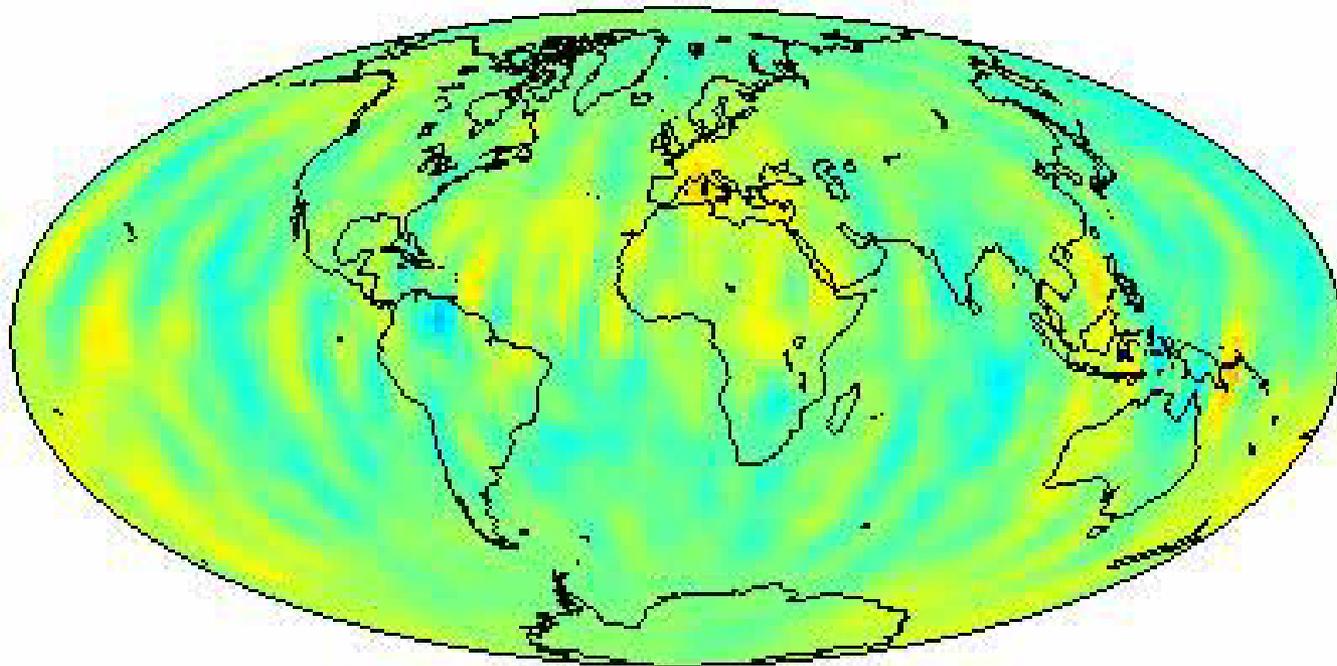


Geoidhöhen in m



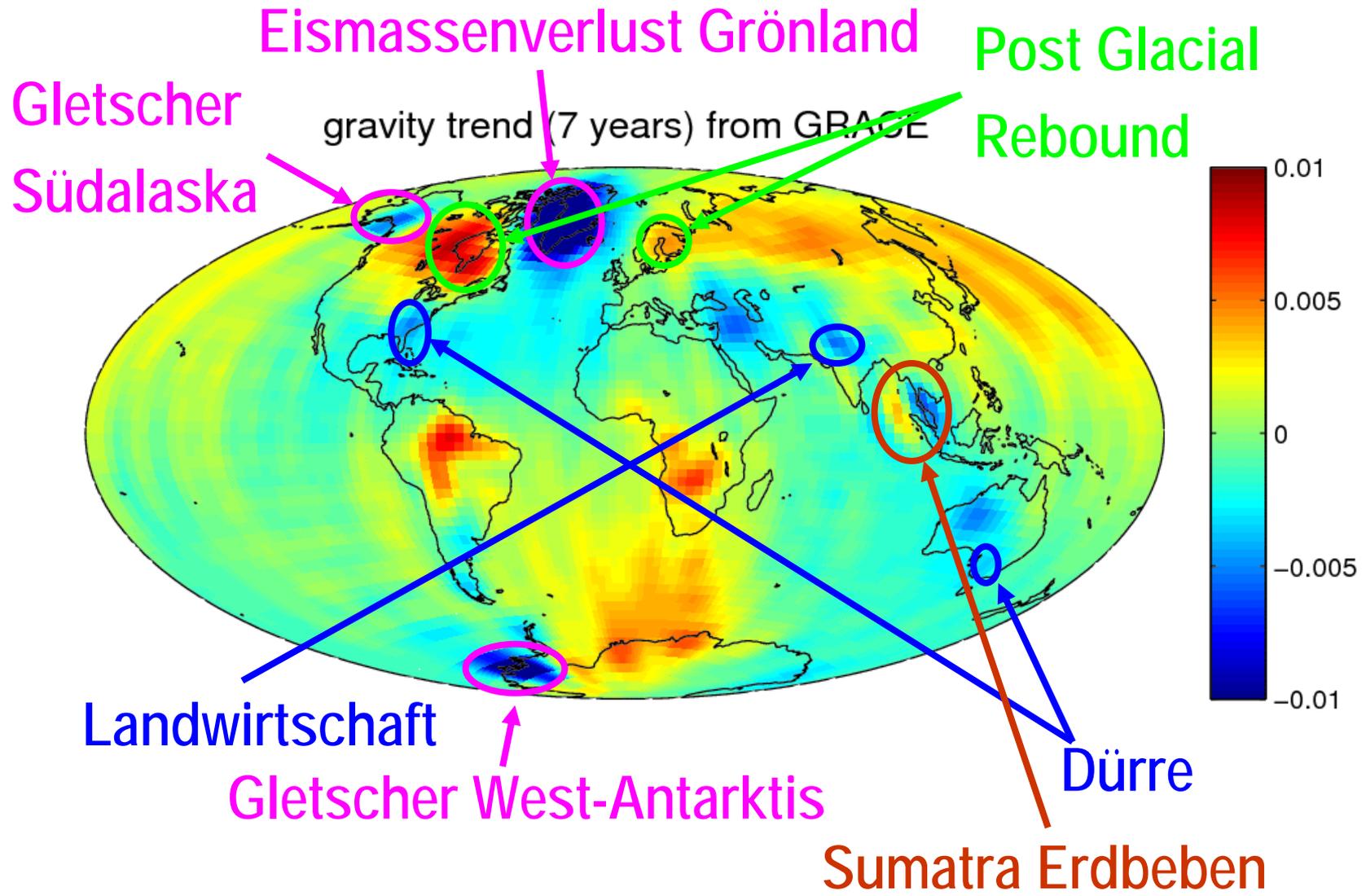
Zeitlich variables Gravitationsfeld

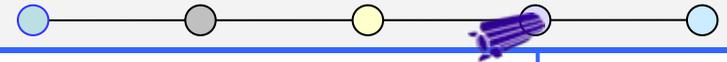
GRACE time variations (not significant): 52760



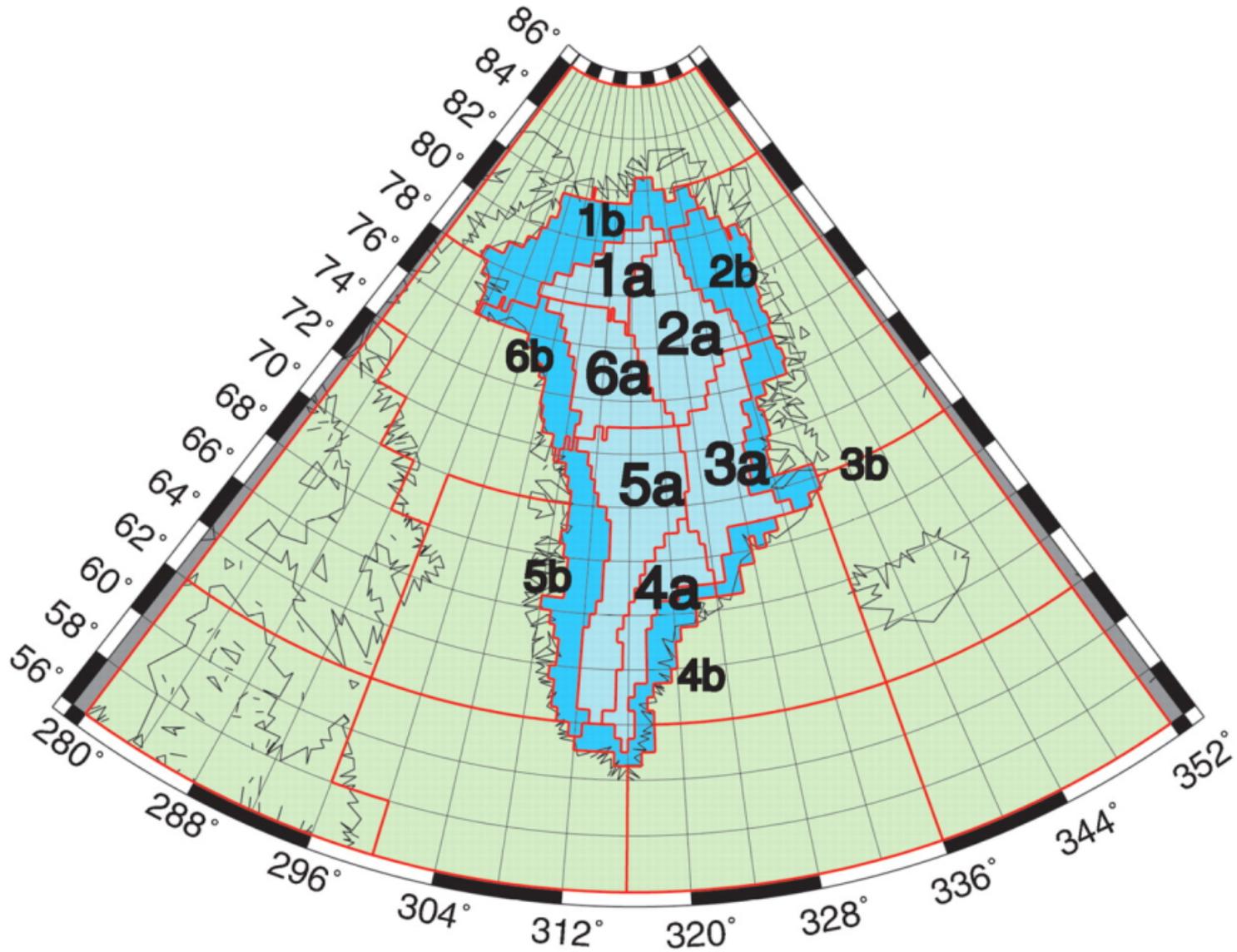
Geoidhöhen in m

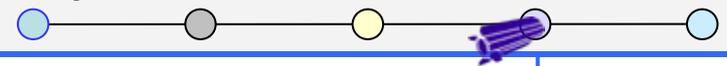
Zeitlich variables Gravitationsfeld



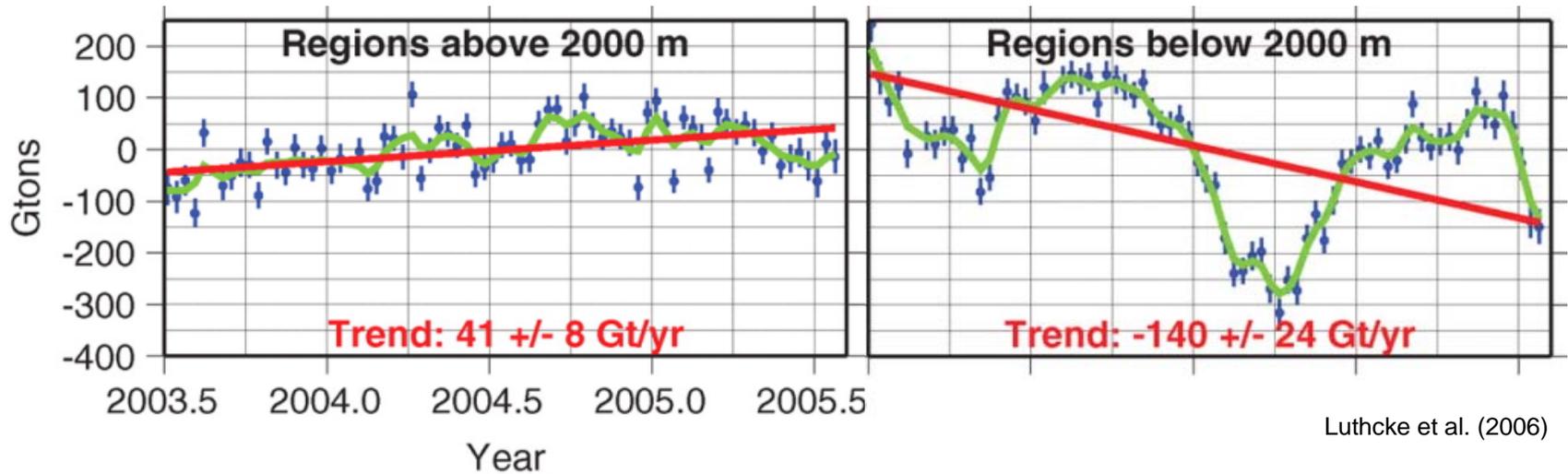


Eismassenbilanz in Grönland





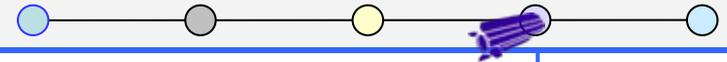
Eismassenbilanz in Grönland



Luthcke et al. (2006)

**Vergleich: Der Aletschgletscher
hat eine Masse von
27Gt**





Der Satellit GOCE

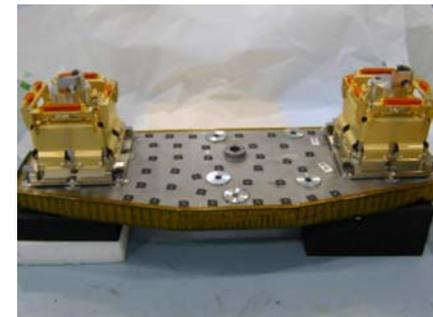
Missionsparameter

- Start: 17. März 2009
- Bahnneigung: 96.5°
- Initialhöhe: 283 km; heute: ca. 255 km



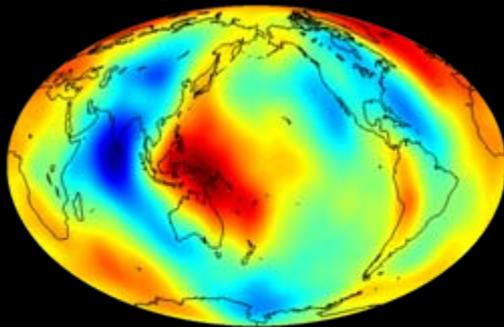
Innovationen

- Gradiometer (weltweit erstmals gebaut und eingesetzt)
- Extrem niedrige Flughöhe
- Kompensierung des Luftwiderstands



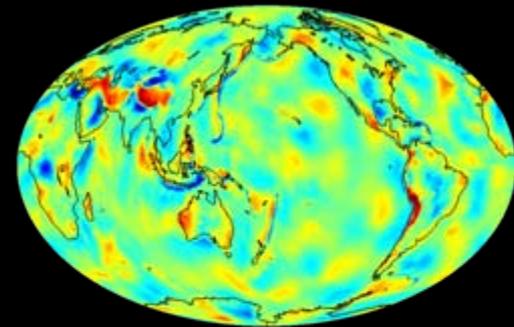
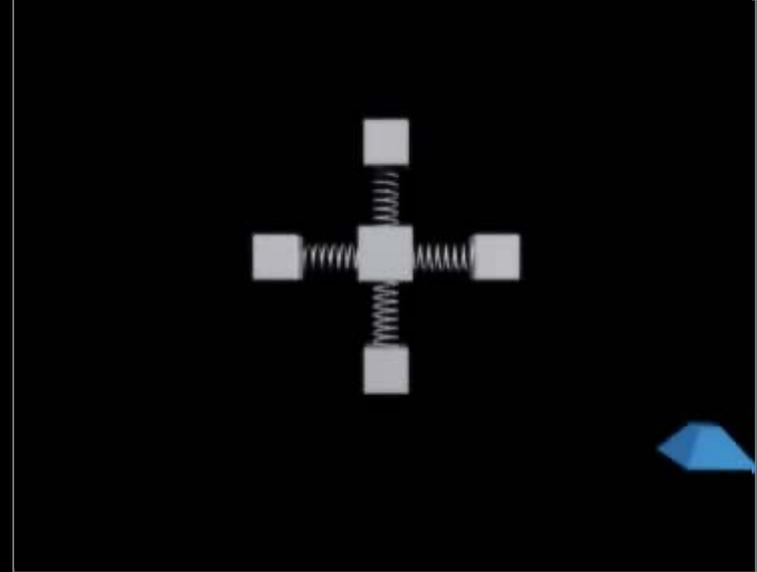
Der Satellit GOCE

GPS Messungen



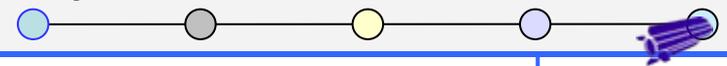
-80 0 80 m

Gradiometer Messungen



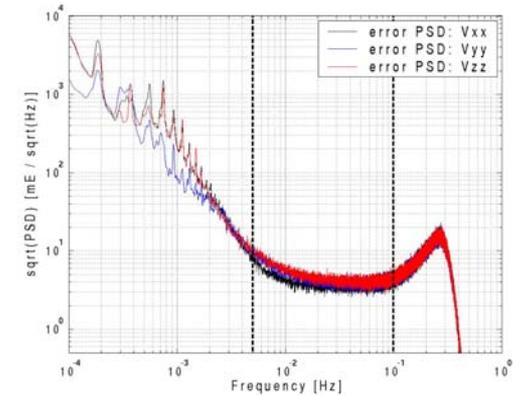
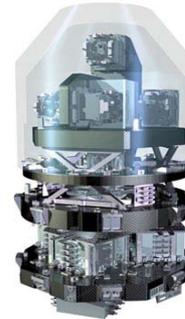
-15 0 15 m

+

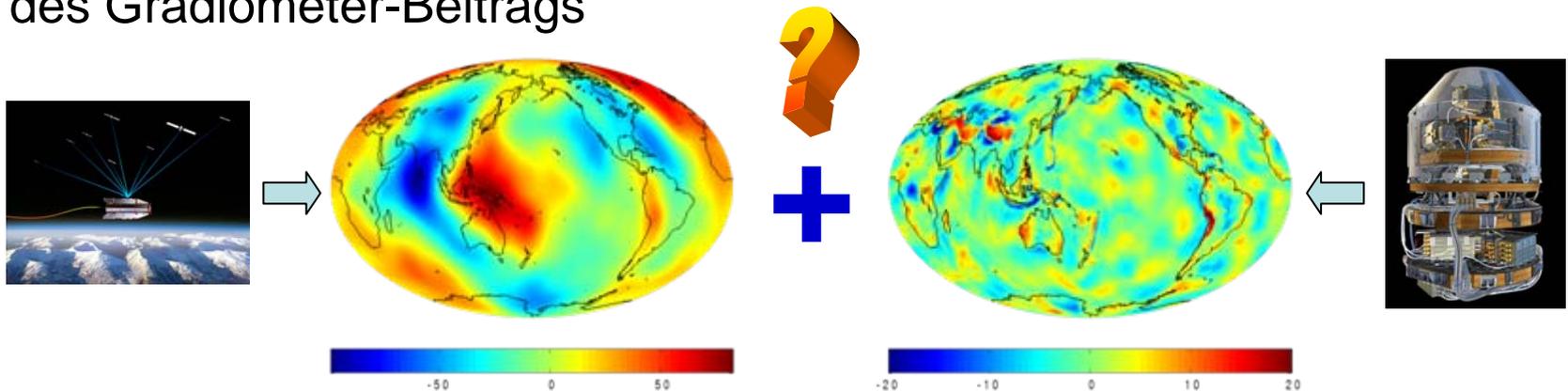


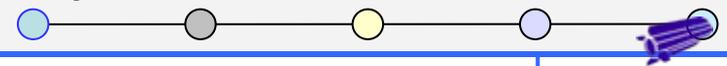
Herausforderungen mit GOCE

- Lösung grosser Gleichungssysteme
- Modellierung der stochastischen Eigenschaften der Gradiometer Beobachtungen (unterschiedliche Sensitivität im Spektralbereich)

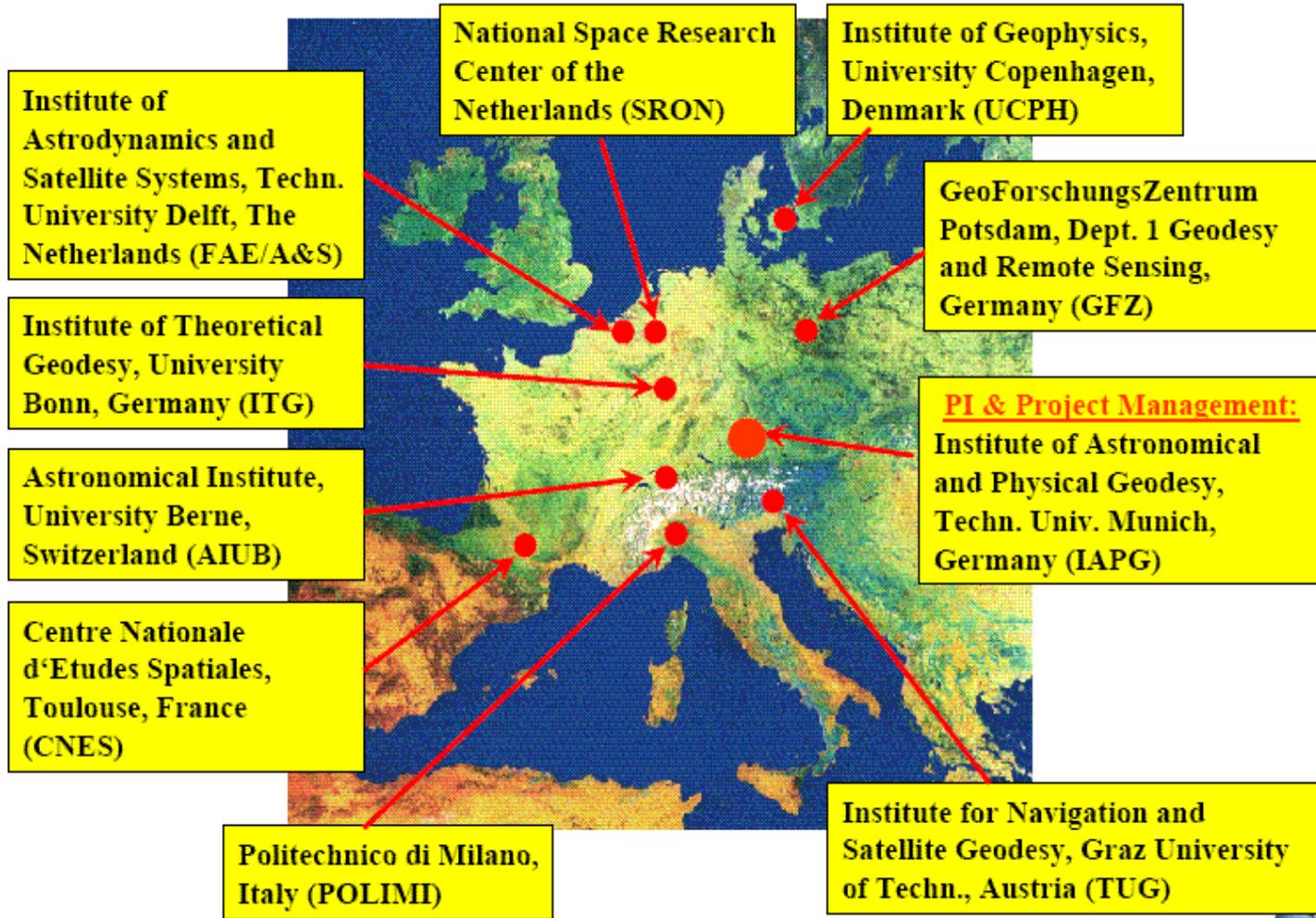


- Optimale Kombination des GPS-Beitrags und des Gradiometer-Beitrags

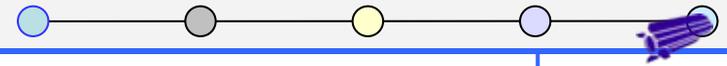




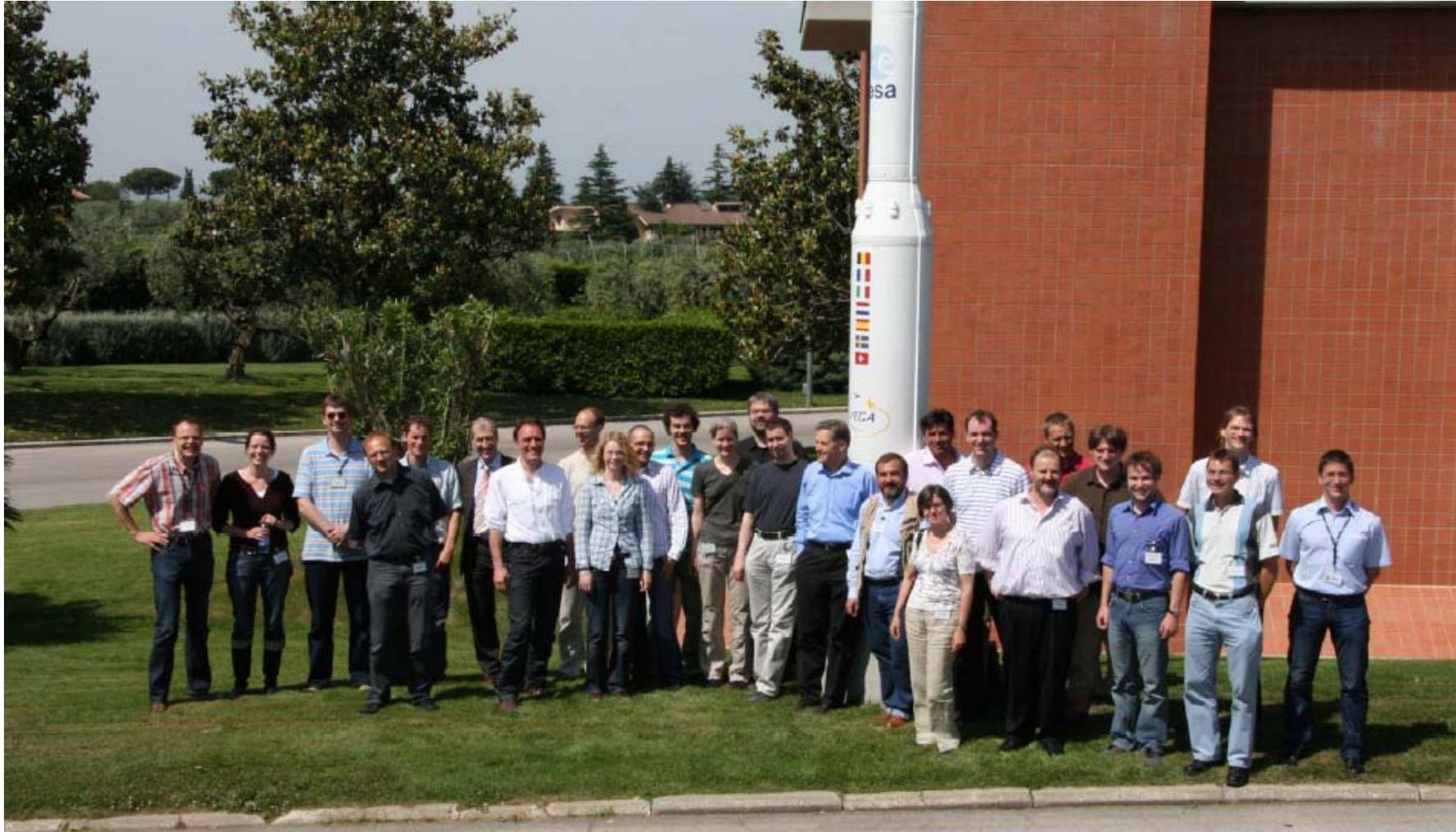
GOCE High-level Processing Facility



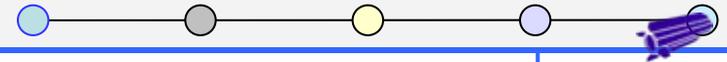
Beteiligte Institutionen



GOCE High-level Processing Facility



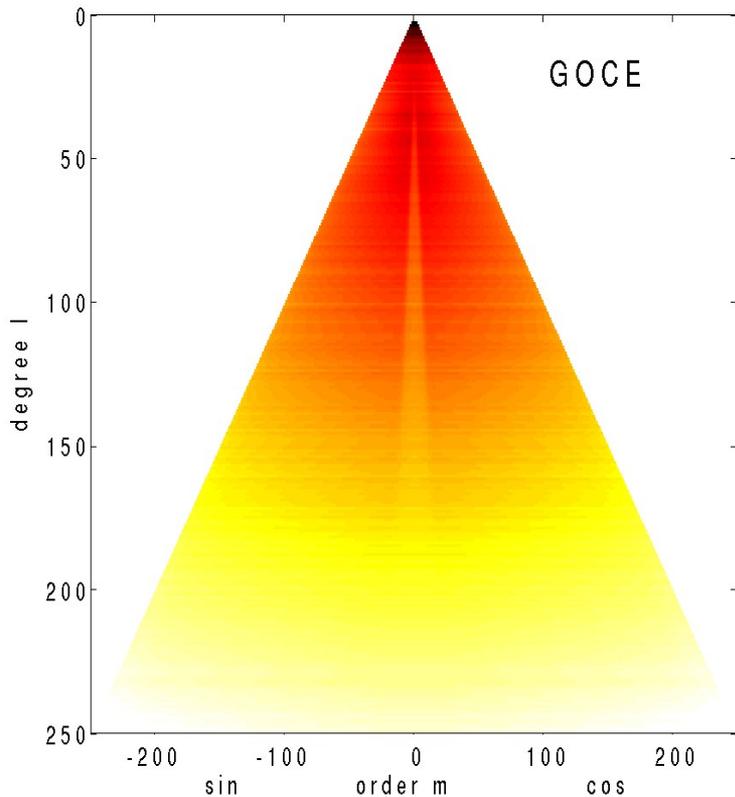
Beteiligte Personen



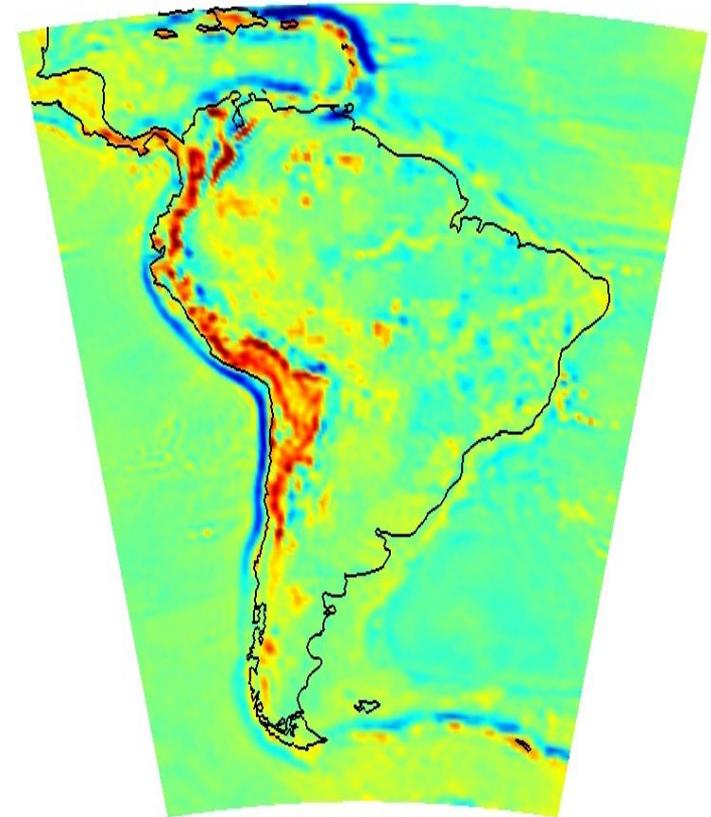
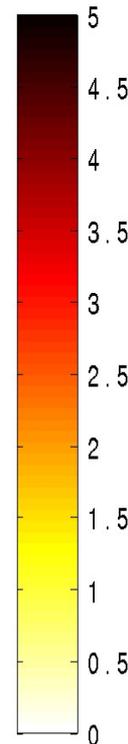
Verbesserte räumliche Auflösung

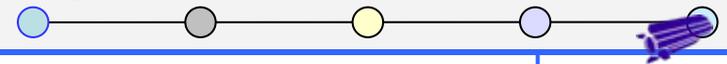
$$V(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{R} \sum_{l=0}^{l_{\max}} \left(\frac{R}{r}\right)^{l+1} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\cos \theta) \cdot \left[\bar{C}_{lm} \cos(m\lambda) + \bar{S}_{lm} \sin(m\lambda) \right]$$

Signifikante Stellen der Koeff.

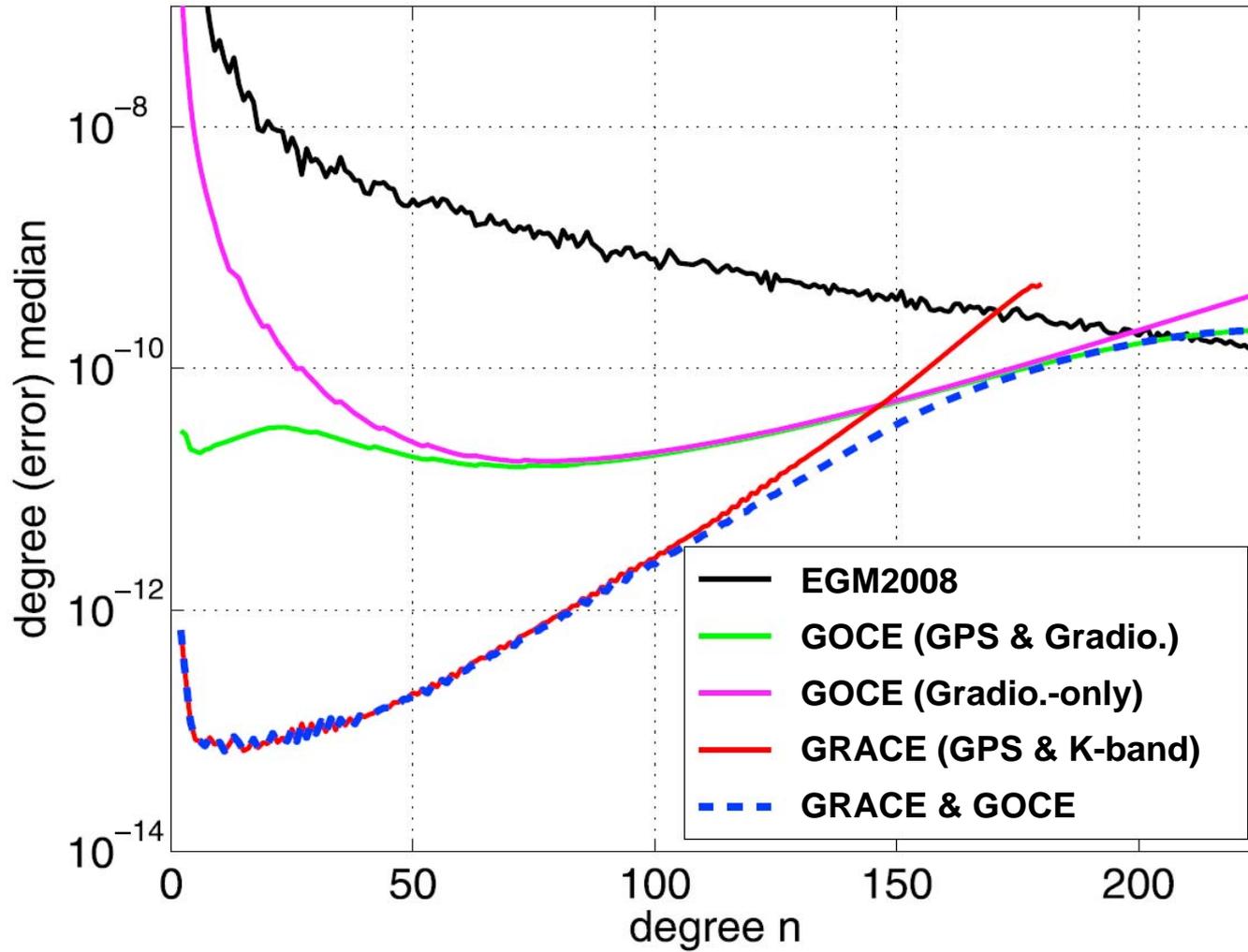


Schwereanomalien





Verbesserte räumliche Auflösung



Verbindung zur Ozeanographie

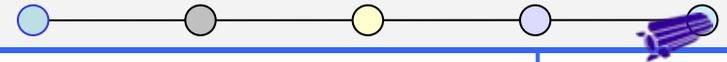
Prinzip der Satellitenaltimetrie

- Die Entfernung zur Meeresoberfläche lässt sich mit Radaraltimetern hochauflösend mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern messen
- Gleichzeitig wird die Satellitenposition (z.B. mit GPS) bezüglich dem Ellipsoid bestimmt
- Aus der Kombination der beiden Messungen kann schliesslich die mittlere Meereshöhe, bezogen auf das Ellipsoid, mit hoher räumlicher Auflösung berechnet werden

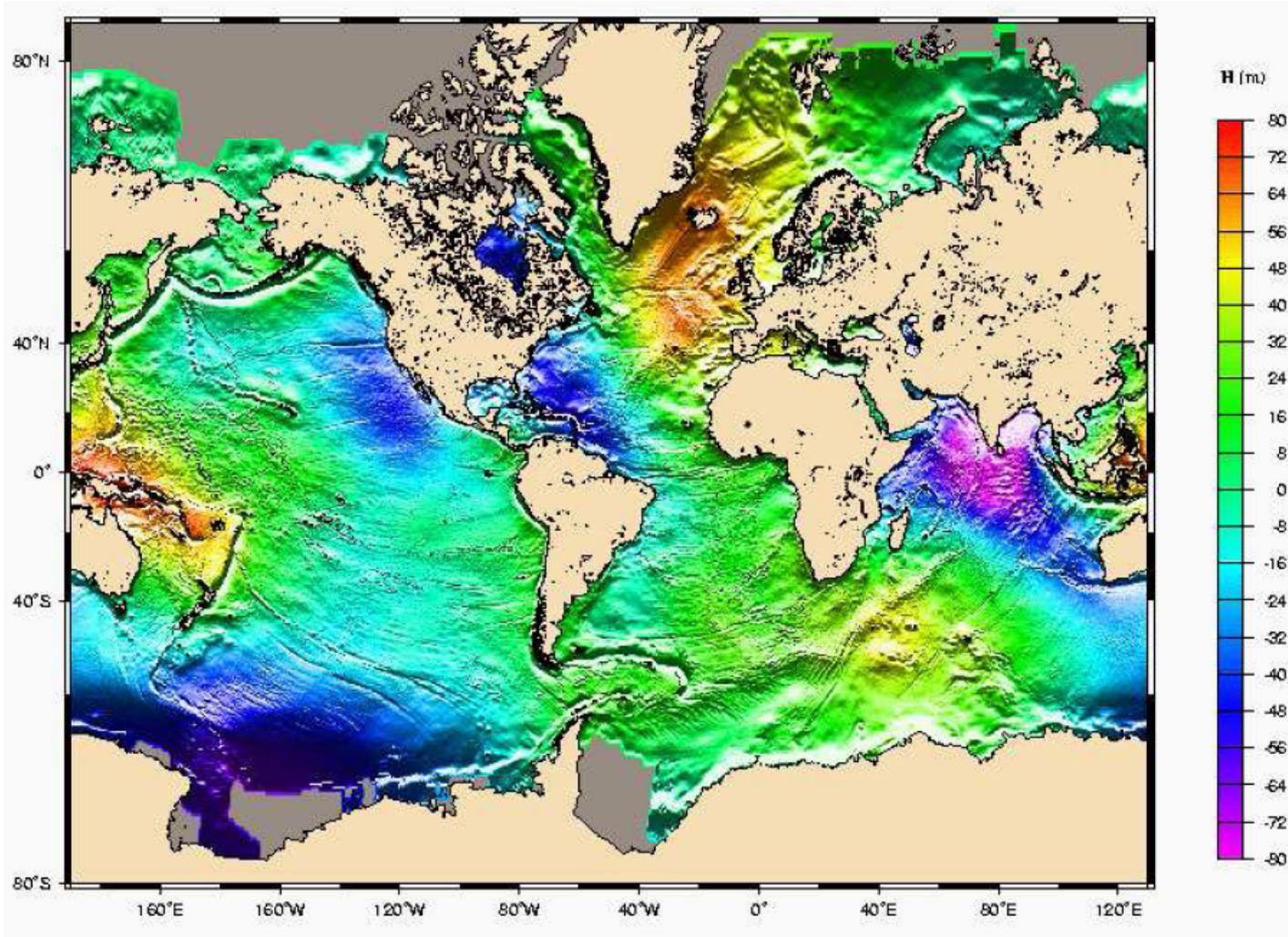


Wäre die mittlere Meereshöhe identisch mit dem Geoid, so könnte man über den Ozeanen mit Hilfe der Satellitenaltimetrie die Geoid Höhen über dem Ellipsoid direkt bestimmen

Die mittlere Meereshöhe unterscheidet sich aber vom Geoid bis zu etwa zwei Meter (dynamische Meerestopographie)



Verbindung zur Ozeanographie

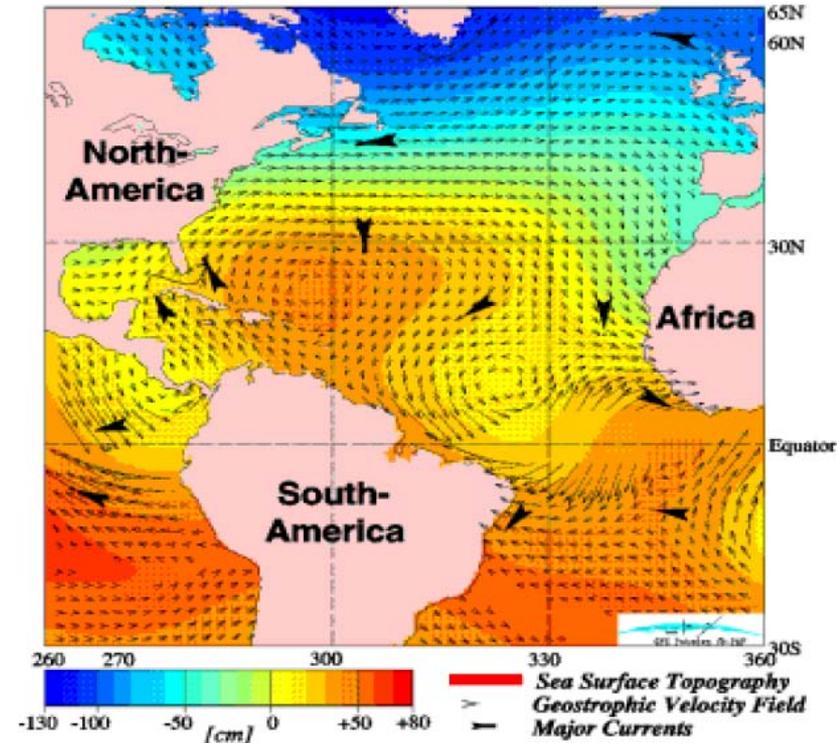


Höhe der Meeresoberfläche aus Altimeterdaten

Verbindung zur Ozeanographie

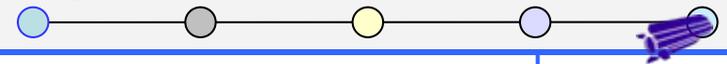
Meerestopographie

- Kennt man das Geoid, so lässt sich aus der Höhe der Meeresoberfläche auch die Abweichung der Meeresoberfläche vom Geoid berechnen
- Aus den Abweichungen der Meeresoberfläche vom Geoid lassen sich die Strömungsgeschwindigkeiten in den Ozeanen berechnen, z.B. für den für das Klima bedeutenden Golfstrom

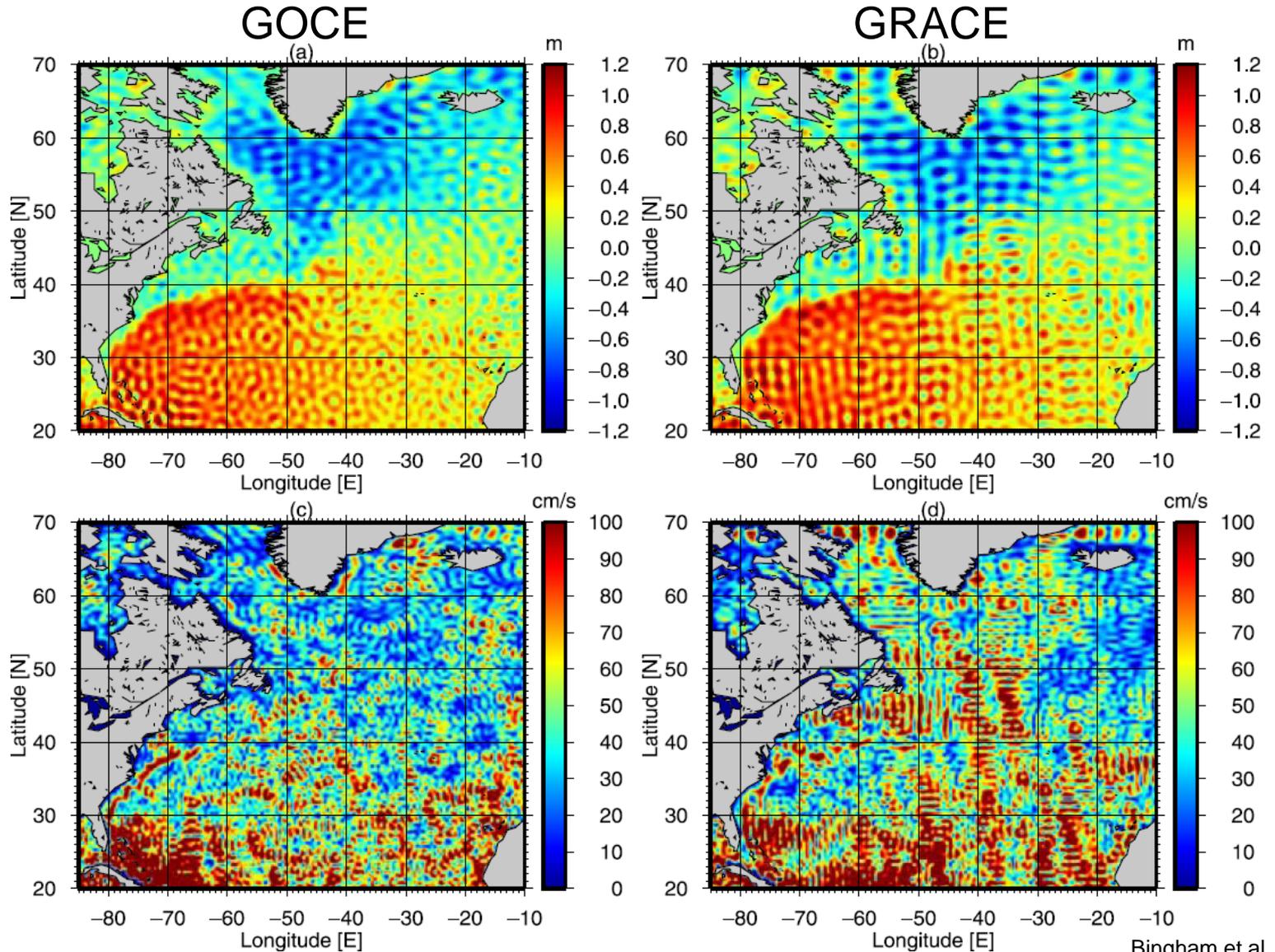


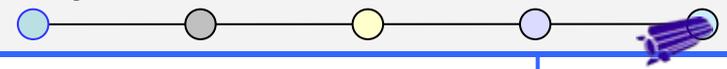
Wegen der geringen Grössenordnung der Meerestopographie (~ 2m) werden an die Genauigkeit der Geoidbestimmung allerhöchste Anforderungen gestellt (~ 1cm) .

GOCE hat als erste Schwerefeldmission das Potential, um in Richtung solch hoher Anforderungen überhaupt vorstossen zu können



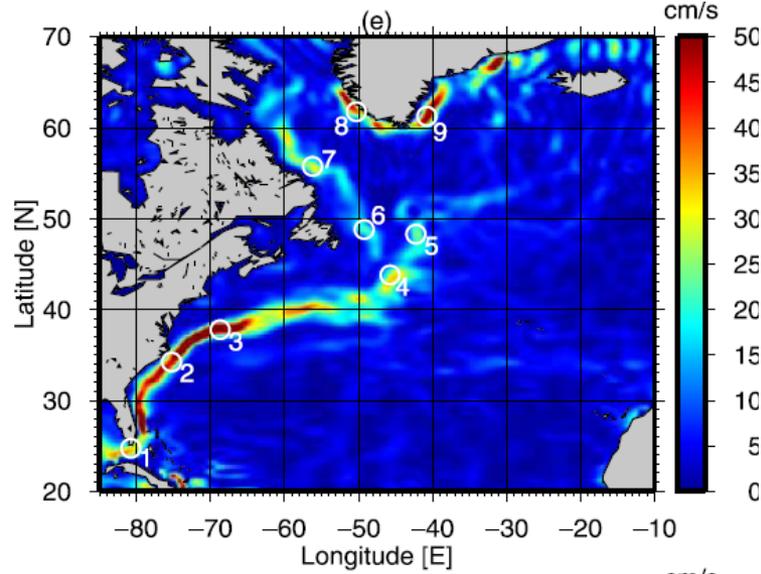
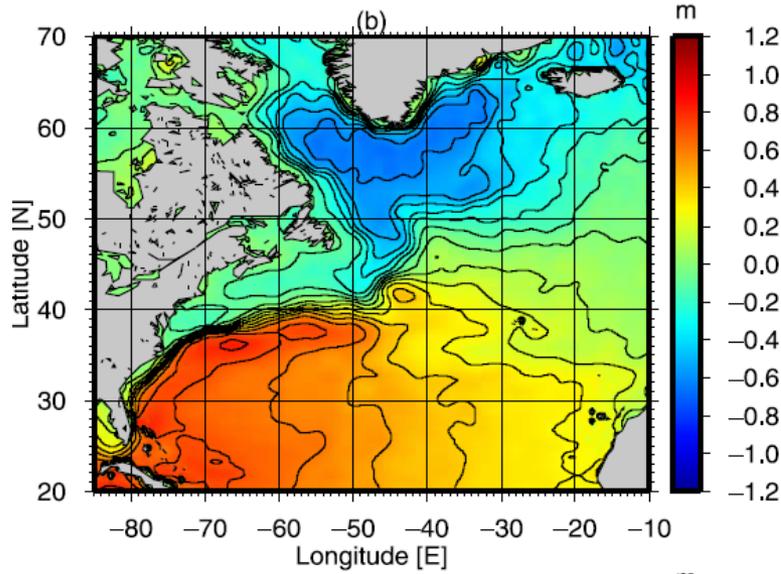
Verbindung zur Ozeanographie



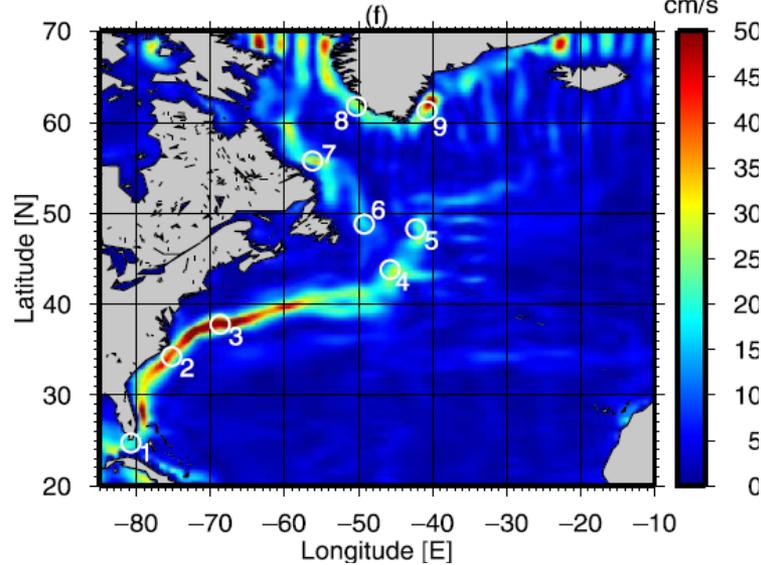
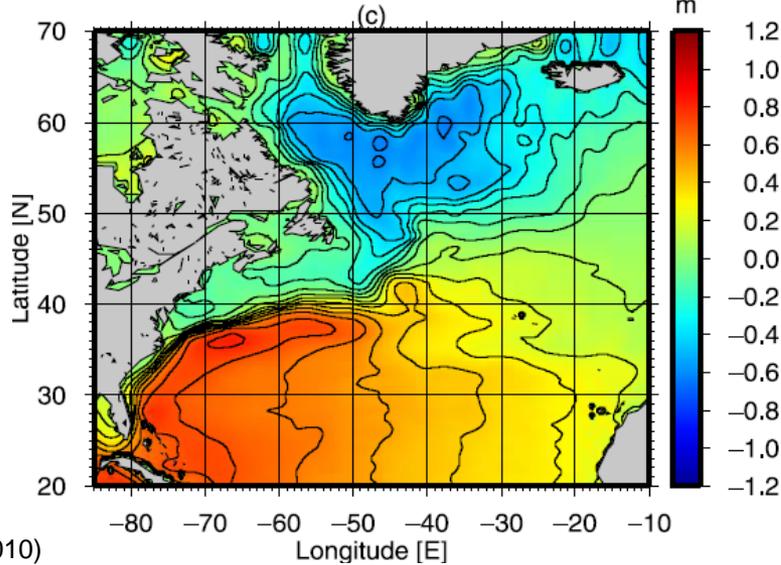


Verbindung zur Ozeanographie

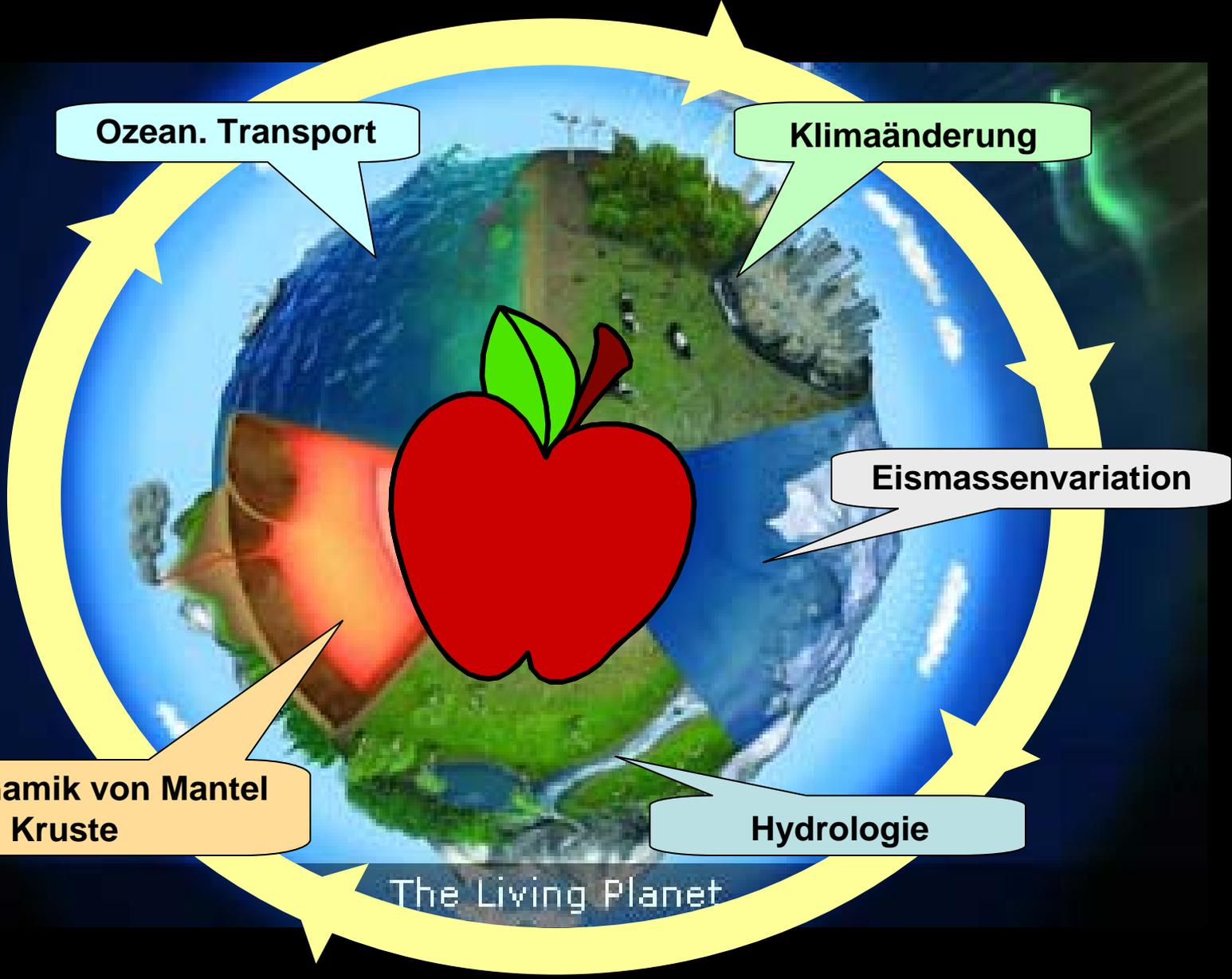
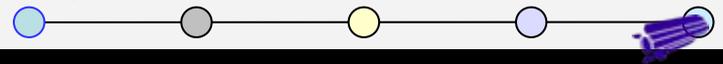
GOCE



GRACE







Ozean. Transport

Klimaänderung

Eismassenvariation

Dynamik von Mantel und Kruste

Hydrologie

The Living Planet

