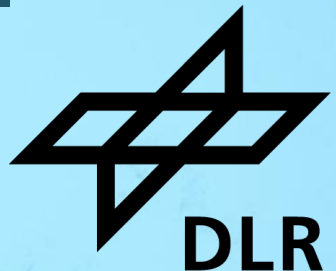


UNSER WASSER VERSCHWINDET – EINE GEFAHR FÜR DIE ENERGIEVERSORGUNG

Matthias Weigelt

Institut für Satellitengeodäsie und Inertialsensorik

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt





Zahl der Dürren nimmt zu

"Wasser ist keine Selbstverständlichkeit mehr"

Stand: 17.06.2025 15:09 Uhr

Innerhalb von 120 Jahren haben sich die von Dürre betroffenen Flächen weltweit verdoppelt. Das zeigt eine neue Auswertung der OECD. Als Hauptverursacher nennt die Organisation den Klimawandel.

Weltweit hat sich die von Dürren betroffene Landfläche innerhalb von 120

Global Drought Outlook (OECD):

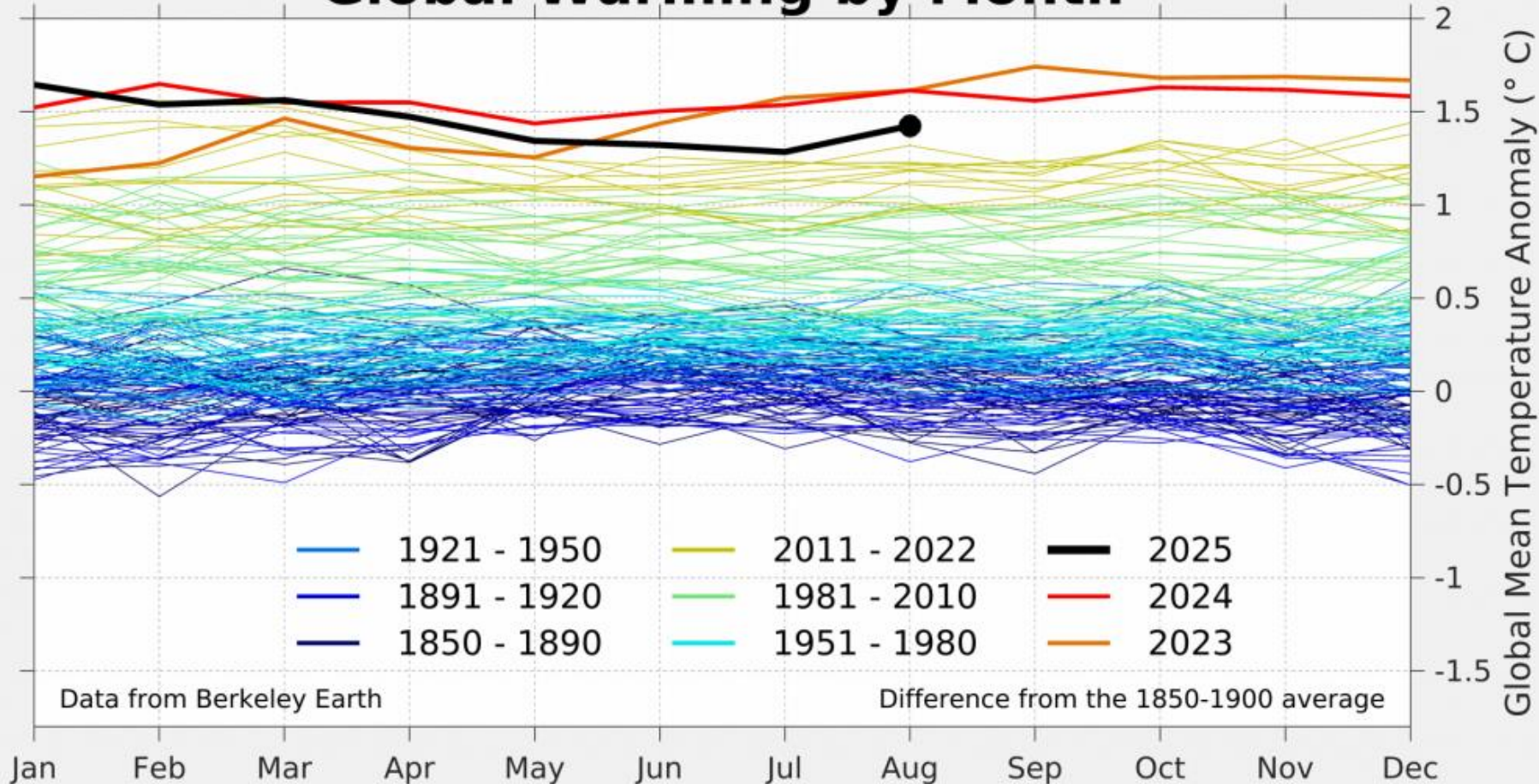
"Dürreperioden werden weltweit immer häufiger und schwerer", schreiben die Autoren.

"Praktische Lösungen für ein nachhaltiges Management von Wasser, Ökosystemen und Land können die Verwundbarkeit verringern und wirtschaftliche Schäden abfedern", erklärte OECD-Generalsekretär Mathias Cormann.

Globale Erwärmung



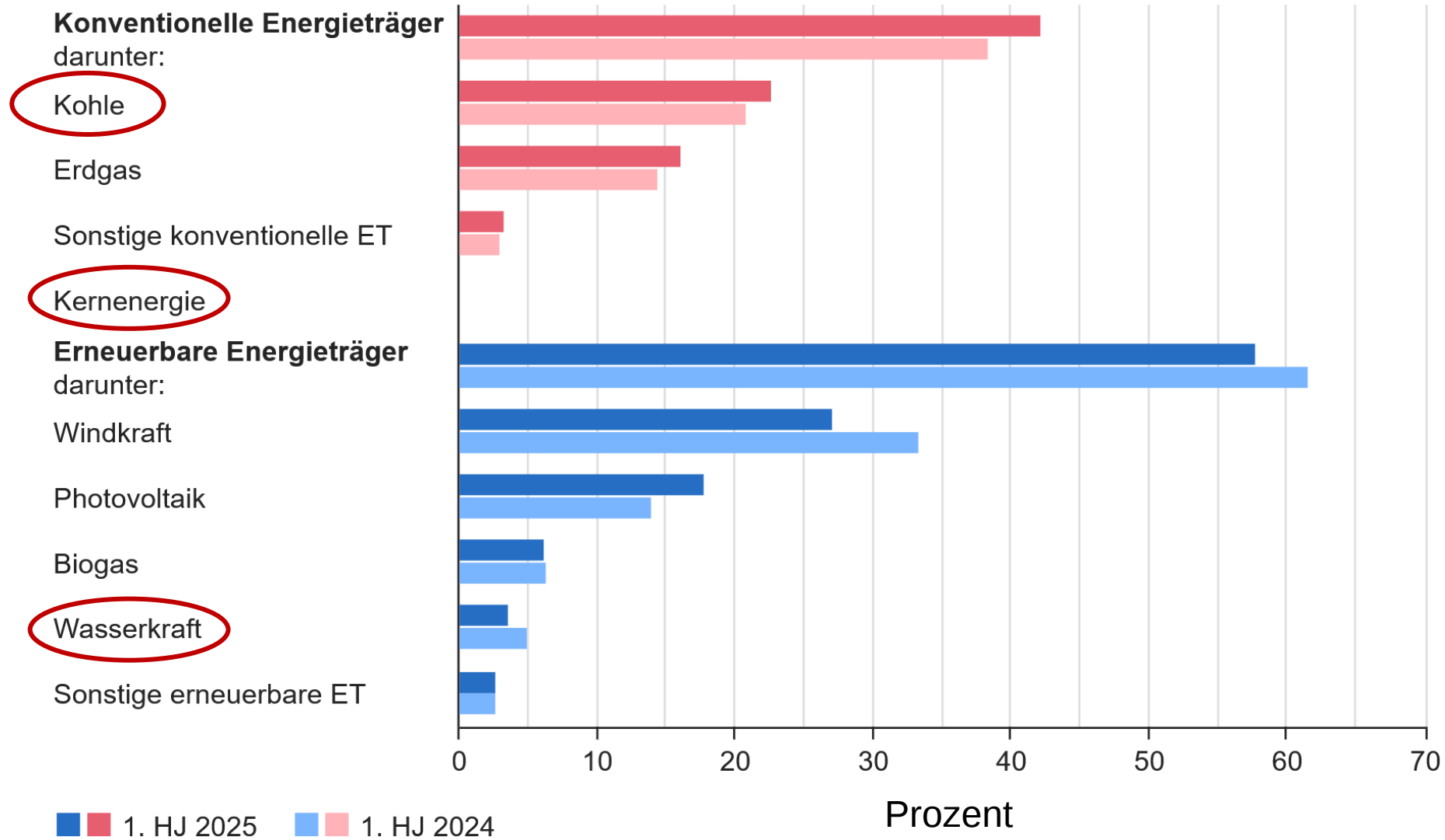
Global Warming by Month



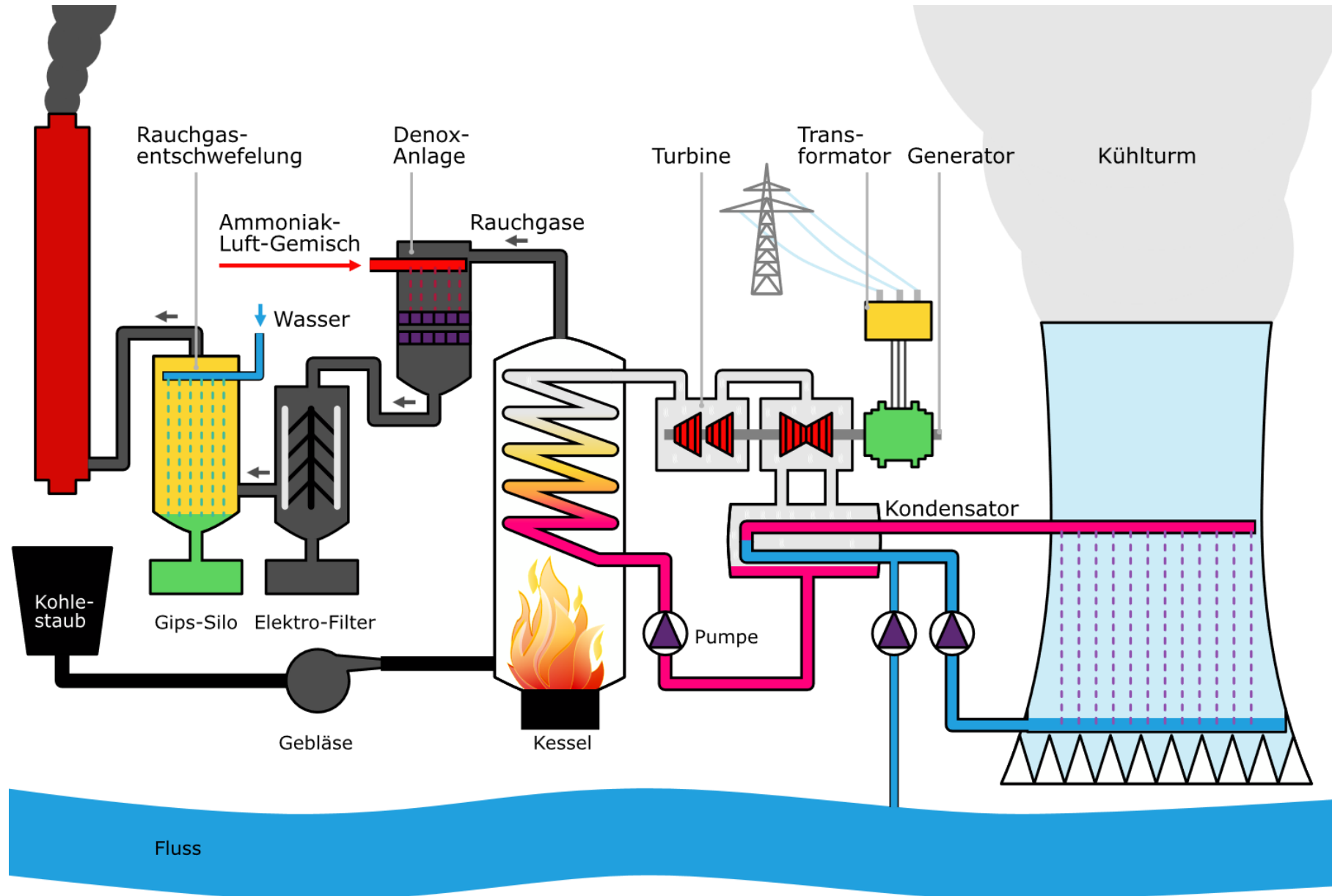
- 2023-2025:
20 aufeinanderfolgende Monate mit Temperaturrekord
- 22 aufeinanderfolgende Monate mit mittleren Temperaturen über dem 1.5° Ziel
- Extra-aufgeladener Wasserzyklus
- Leichte Entspannung nach El Niño

<https://berkeleypage.org/august-2025-temperature-update/>

Energieträger



Kohlekraftwerk



Wassermangel im April 2025



Köln am Rhein im April, die Dürre trifft die Region schon früh im Jahr

SPIEGEL Wirtschaft

AbonnementAnmelden >

Menü

<irtschaft>Unternehmen>Rhein>Rhein/Niedrigwasser: Trockenheit beeinträchtigt Schifffahrt – Pegelstände fallen weiter

Q

Frachtverkehr bei Niedrigwasser

Trockenheit beeinträchtigt Schifffahrt auf dem Rhein, Pegelstände fallen weiter

Die niedrigen Pegelstände im Rhein belasten die deutsche Wirtschaft. Schiffe können nur deutlich weniger Ladung transportieren, Logistiker verlangen »Kleinwasserzuschläge«.

11.04.2025, 11.57 Uhr

3 Min

Xf✉

Binnenschiffe auf dem Rhein bei Duisburg: »Da guckt eine Menge Bordwand raus« Foto: Jochen Tack / IMAGO

Je mehr die Pegelstände am Rhein fallen, desto größer sind die



DLR, Photo: Jochen Tack / IMAGO

Kernkraftwerk



Spiegel, 08. Oktober 2025

HITZEWELLE

Mosel warm wie das Mittelmeer – Cattenom steht unter Beobachtung

Bei bis zu 28 Grad Celsius Wassertemperatur steht das Atomkraftwerk Cattenom im Fokus – im Notfall müsste es seine Leistung senken oder ganz stoppen.

11 2 0



Die Temperatur der Mosel ist diesen Sommer auf bis zu 28 Grad Celsius gestiegen.
Archiv: Editpress/Julien Garroy



Menü

DIE ZEIT

Abo testen



Hitzewelle

Frankreich fährt wegen extremer Hitze Kernkraftwerke herunter

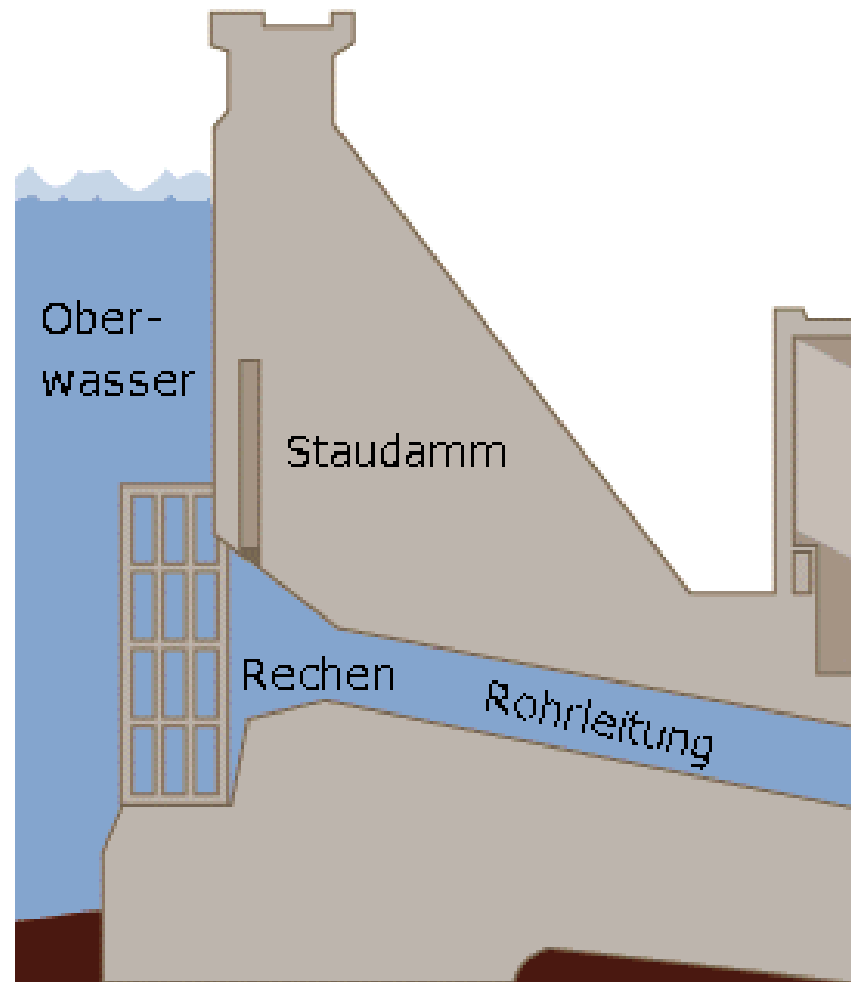
Der französische Wetterdienst warnt vor extremer und außergewöhnlicher Hitze, in Paris gilt die höchste Warnstufe. Kernkraftwerke werden im Land heruntergefahren.

Aktualisiert am 30. Juni 2025, 21:11 Uhr ⓘ Quelle: DIE ZEIT, AFP, dpa, [dar](#)

▶ 3 Min. 1.239 Zusammenfassen

Wegen extremer Hitze in [Frankreich](#) hat der staatliche Stromkonzern EDF das Kernkraftwerk Golfech im Süden des Landes heruntergefahren. Das sei bereits am Sonntag geschehen, teilte EDF mit, um ein Aufheizen des Flusses Garonne zu verhindern, aus dem das Kraftwerk sein Kühlwasser bezieht. Wegen des Wetters wurde ein Aufheizen der Garonne auf eine Wassertemperatur von 28 Grad erwartet. Wie lange das Kraftwerk ausgeschaltet bleibt, teilte EDF nicht mit.

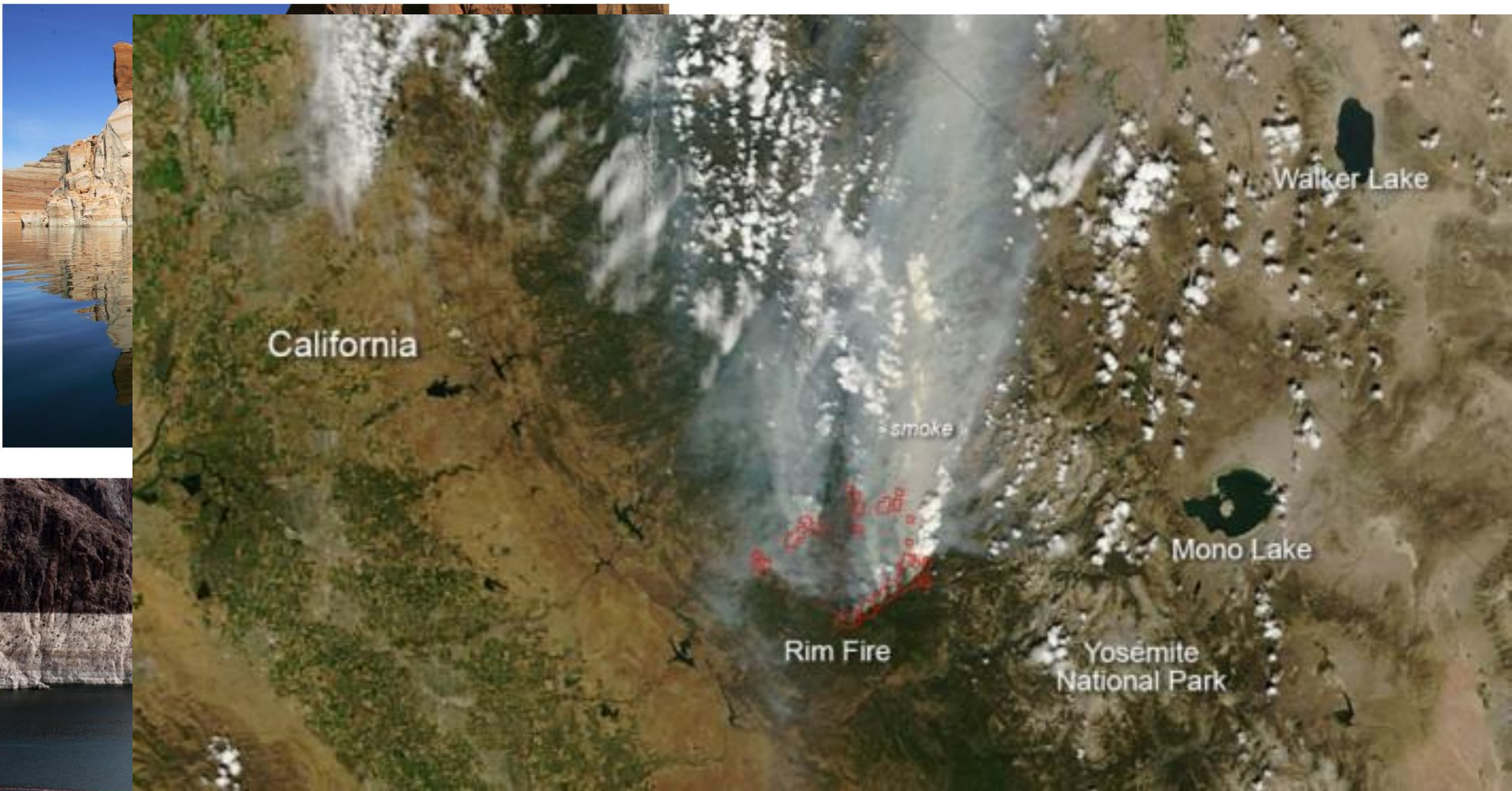
Wasserkraft



© Wikipedia



Fehlendes Wasser ist eine Naturgewalt



UNL/ National Drought Mitigation Center

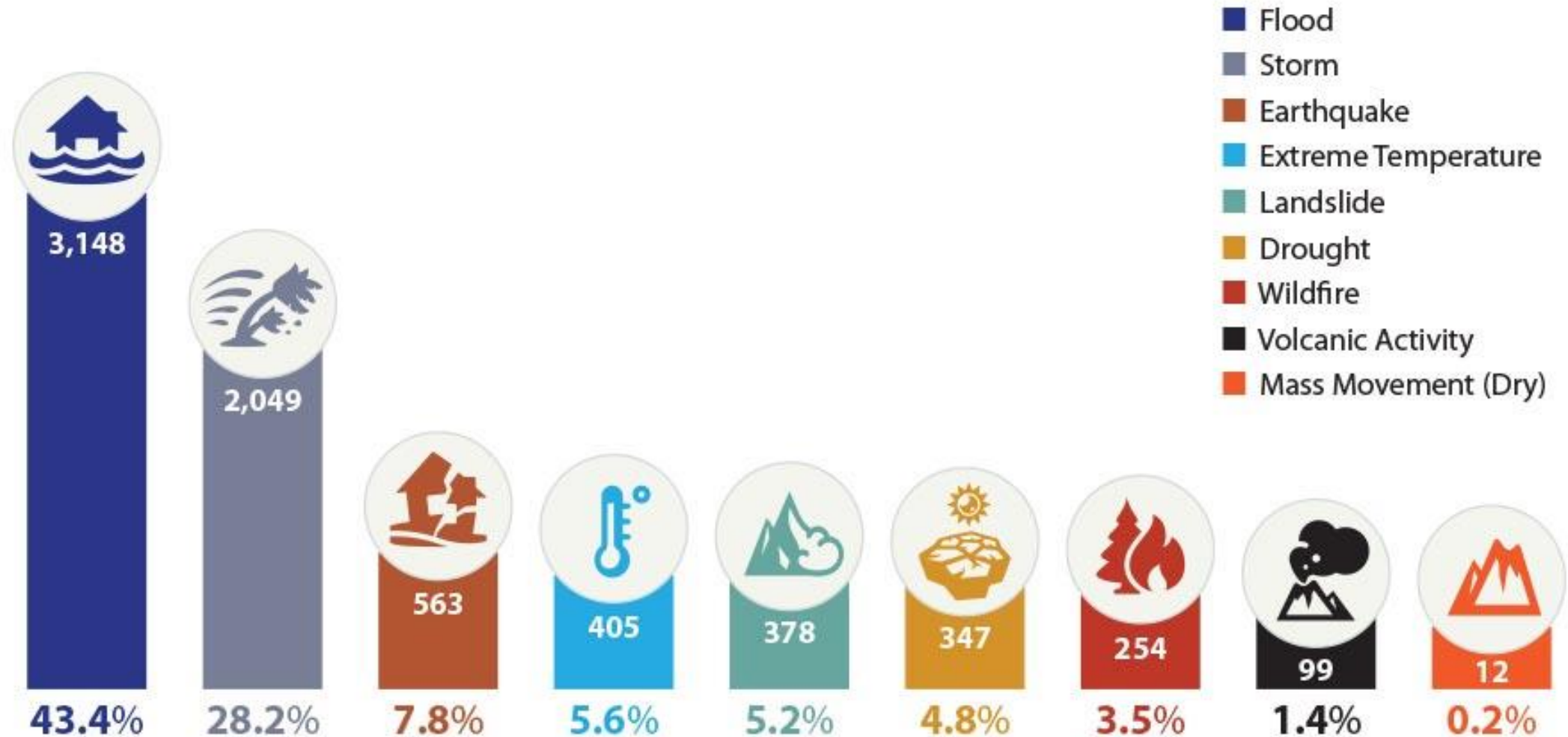
© Bureau of Reclamation

Bureau of Reclamation

Auch zu viel Wasser ist eine Naturgewalt



Wetterextreme



Source: CRED, UNISDR, 2018

The background of the slide is a photograph of an underground cave. The cave walls are composed of layered, sedimentary rock, showing various shades of brown, tan, and grey. The rock surfaces are uneven and textured. At the bottom of the frame, a calm pool of water reflects the light from above, creating a mirror-like effect of the rock formations. The overall atmosphere is dim and mysterious.

WASSER

Wasser ist die Basis unseres Lebens

Lebensraum



Erholungsraum



Nahrungsmittel



Zugang zu sauberem Trinkwasser ist ein Menschenrecht

(UN general assembly on July, 28 2010)

... aber Wasser ist begrenzt



Transport

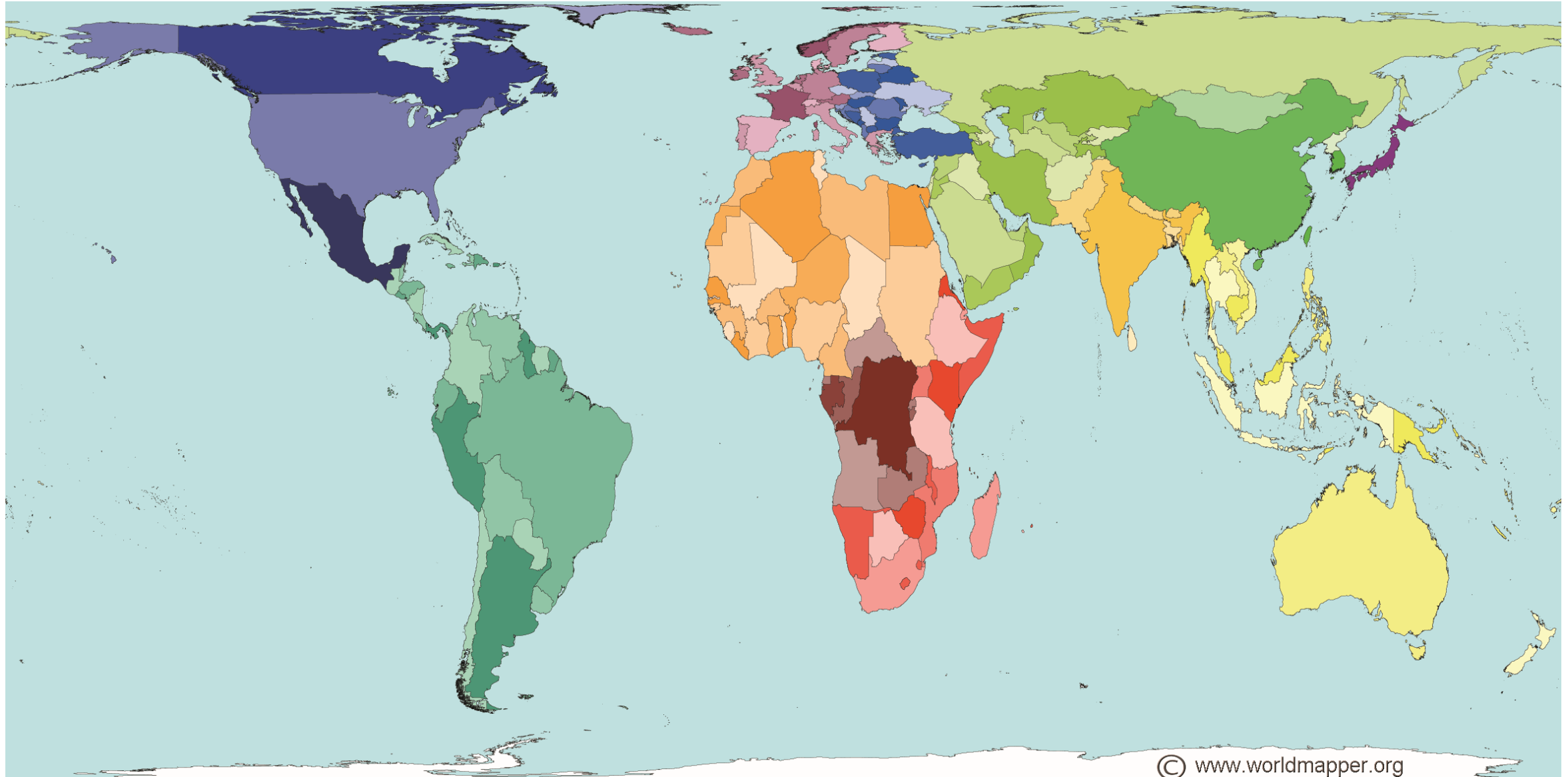


Wirtschaftsfaktor

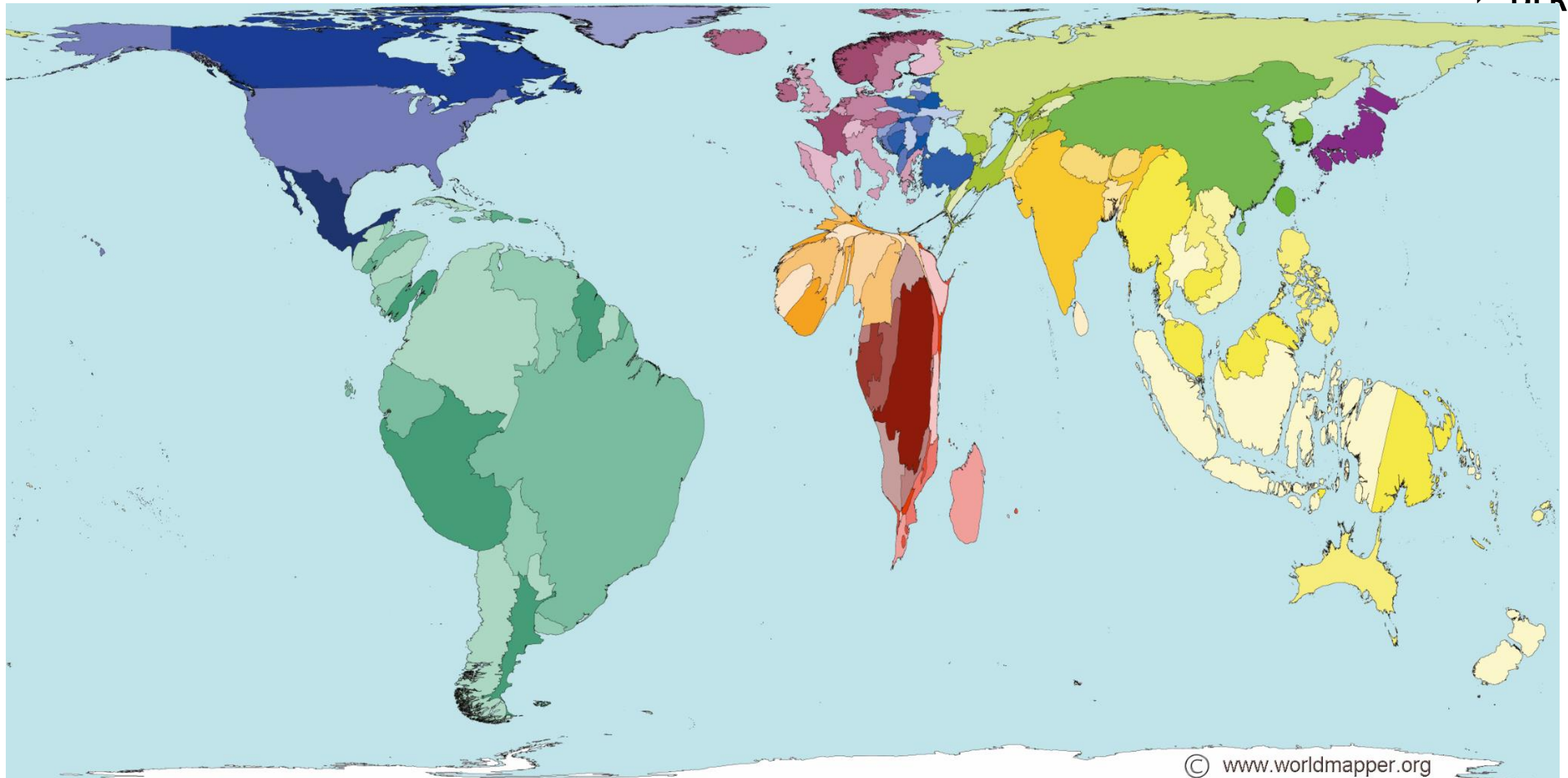


Resource

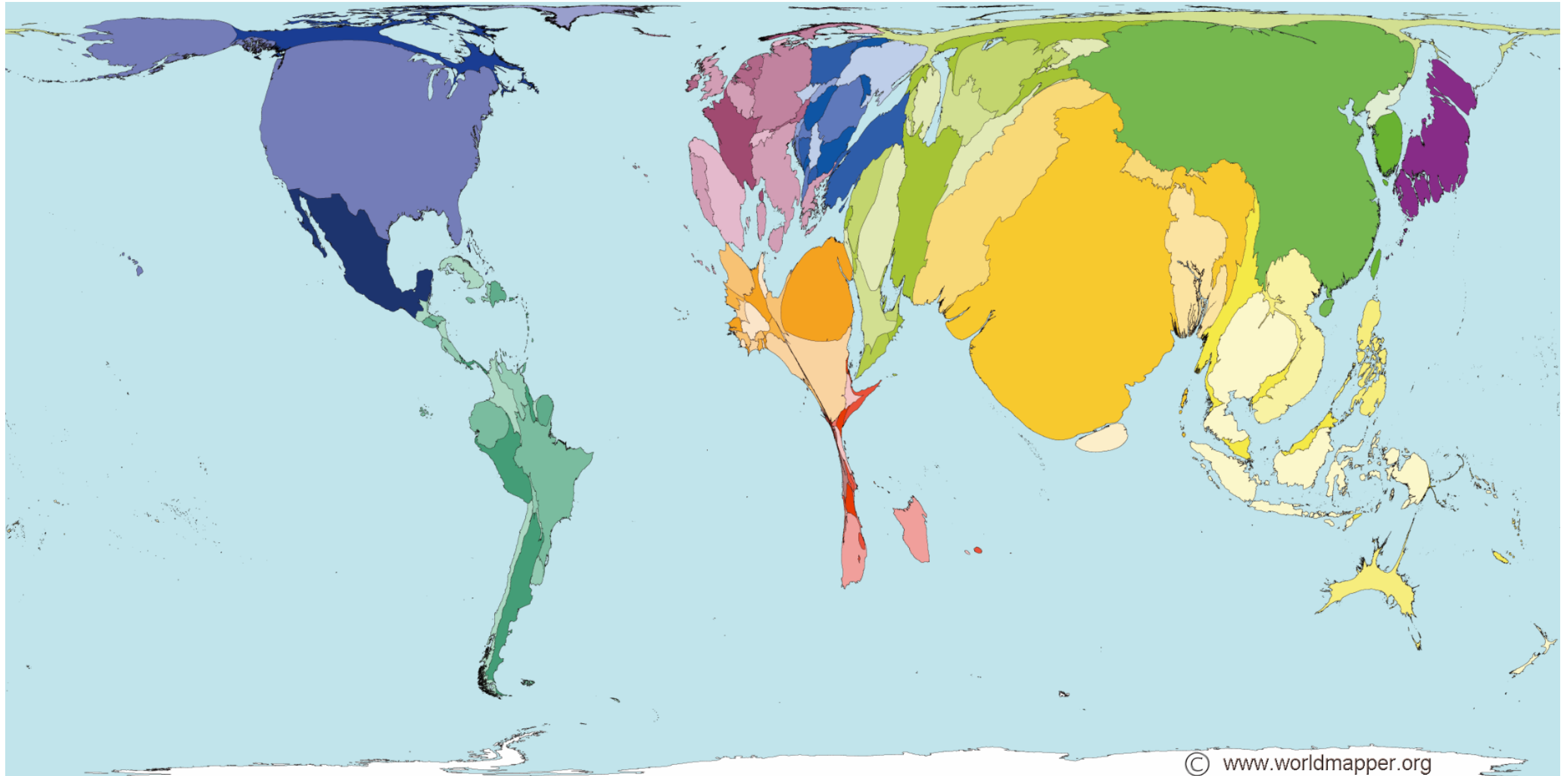
Wasser ist ungleichmäßig verteilt



Wasserverfügbarkeit



Wasserverbrauch

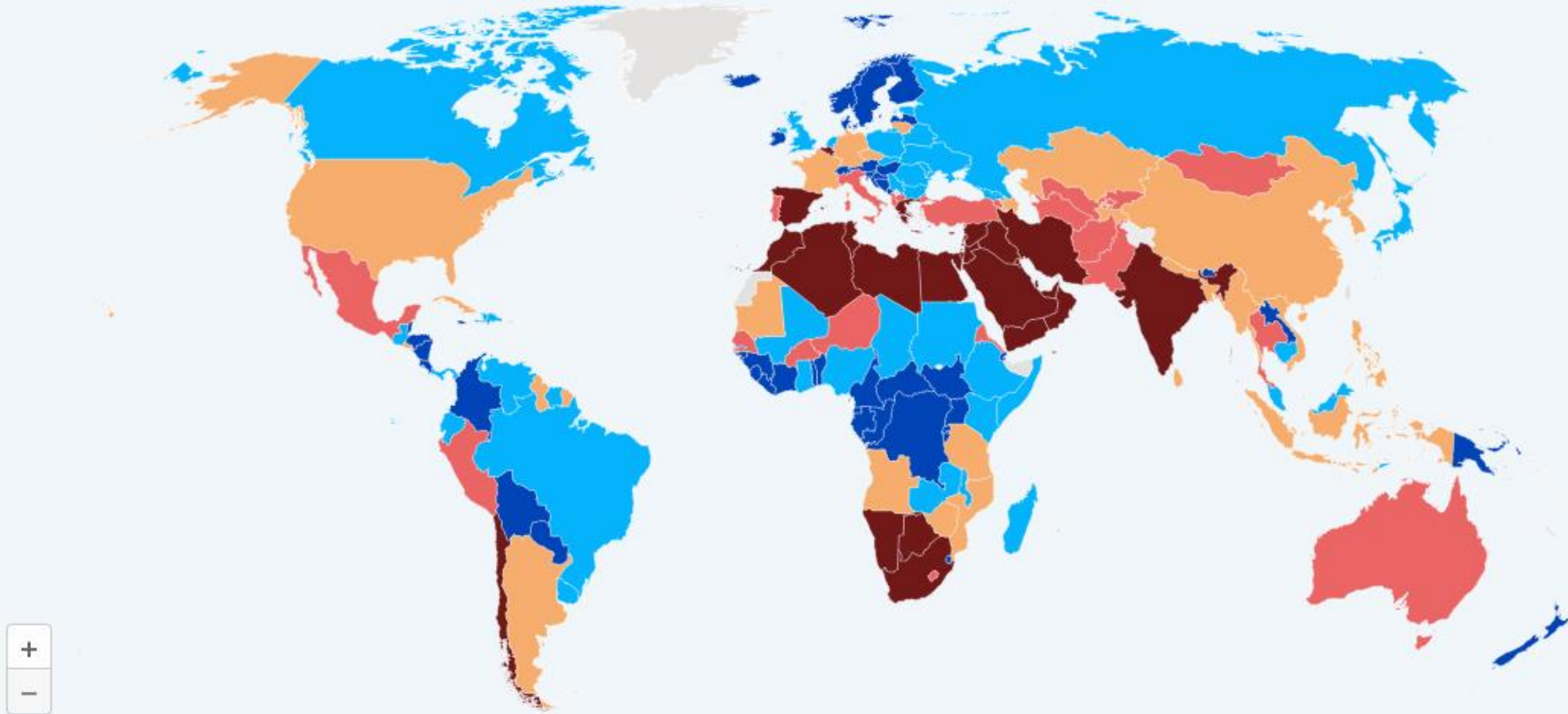


Regionen mit Wasserstress bis 2050

Wasserstress bedeutet: Die Nachfrage nach Wasser ist zeitweise höher als die verfügbare Menge, oder schlechte Wasserqualität schränkt die Nutzung ein

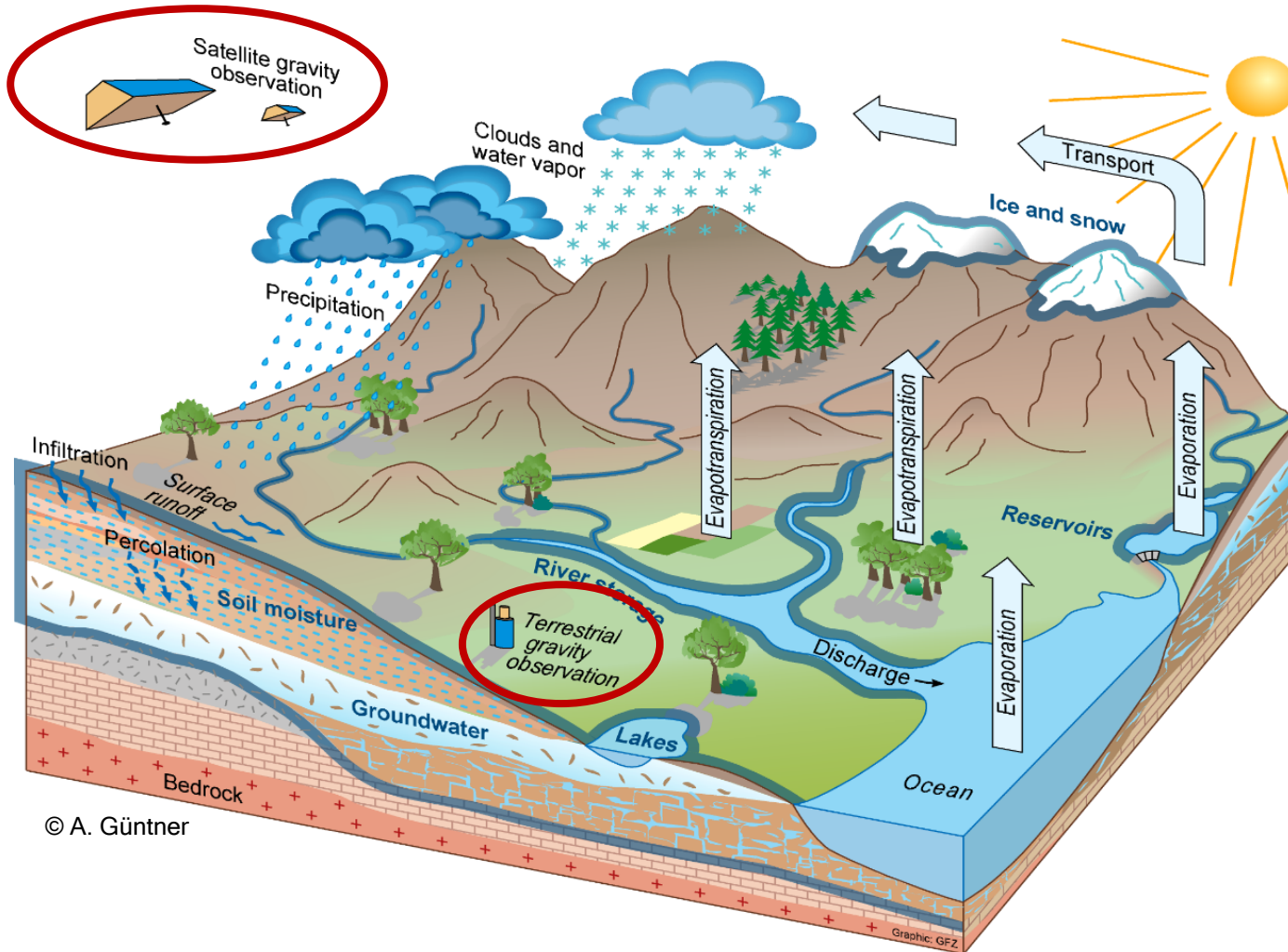
Verhältnis von Wasserentnahme zu verfügbaren erneuerbaren Wasserressourcen

● Niedrig ● Niedrig bis mittel ● Mittel bis hoch ● Hoch ● Extrem hoch



*Berechnung bezogen auf das "business as usual" Szenario (Temperaturanstieg von 2,8°C bis 4,6°C bis 2100)

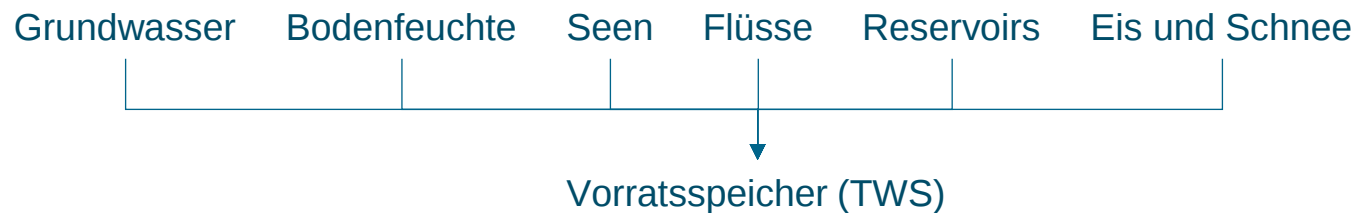
Wasserkreislauf



Kontinentale Wasserbilanz

$$\Delta S = P - ET - Q$$

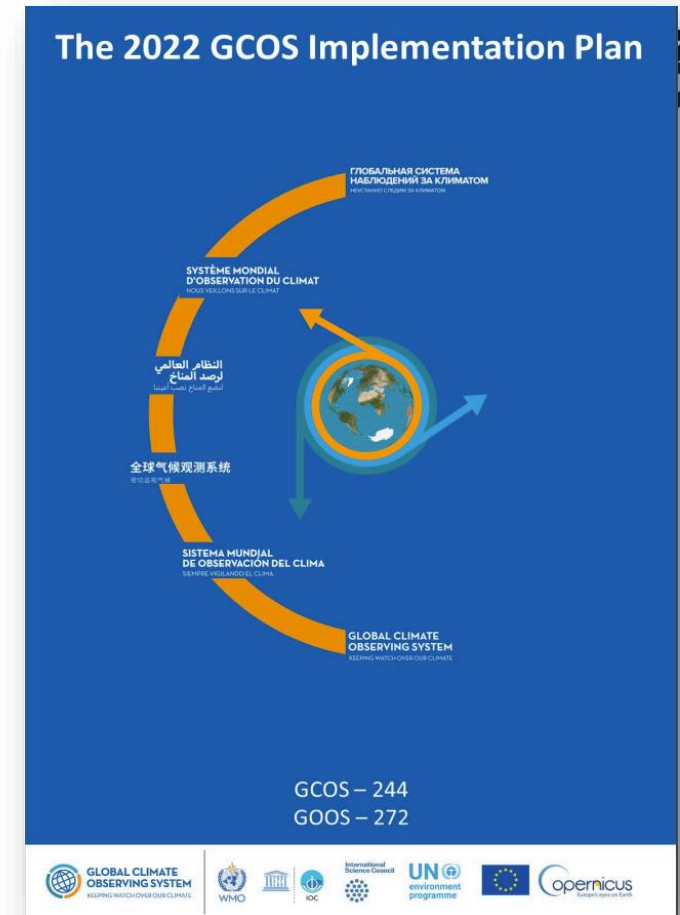
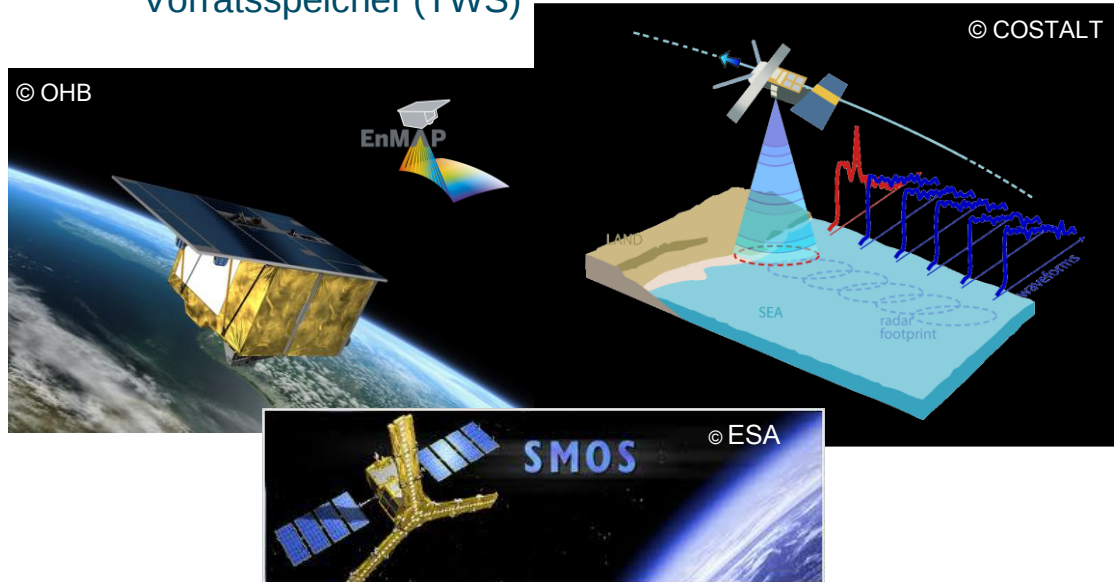
P: Niederschlag
ET: Verdunstung
Q: Abfluss
 ΔS : Vorratsänderung



Grundwasser aus Gravimetrie

Grundwasser Bodenfeuchte Seen Flüsse Reservoirs Eis und Schnee

Vorratsspeicher (TWS)



Grundwasser = TWS – Gletscher – Schnee – Bodenfeuchte – Oberflächengewässer



=



–



–



–



–

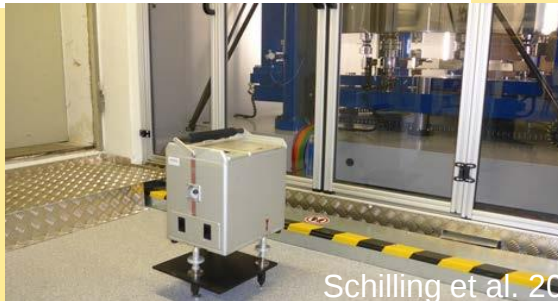
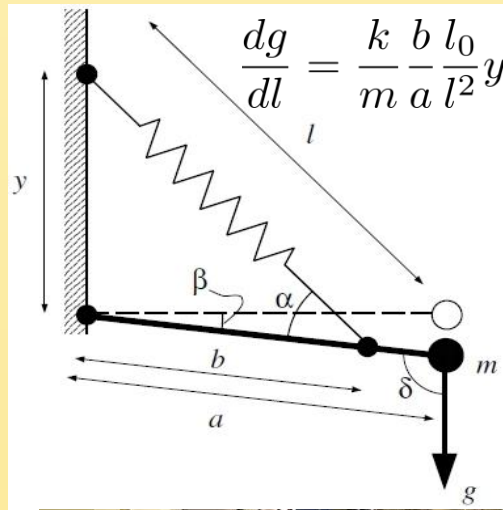


© G3P



Wie vermessen wir das Schwerefeld?

Federgravimeter



Schilling et al. 2017

$\sigma \approx 5 \mu Gal$
= 120 mm Niederschlag

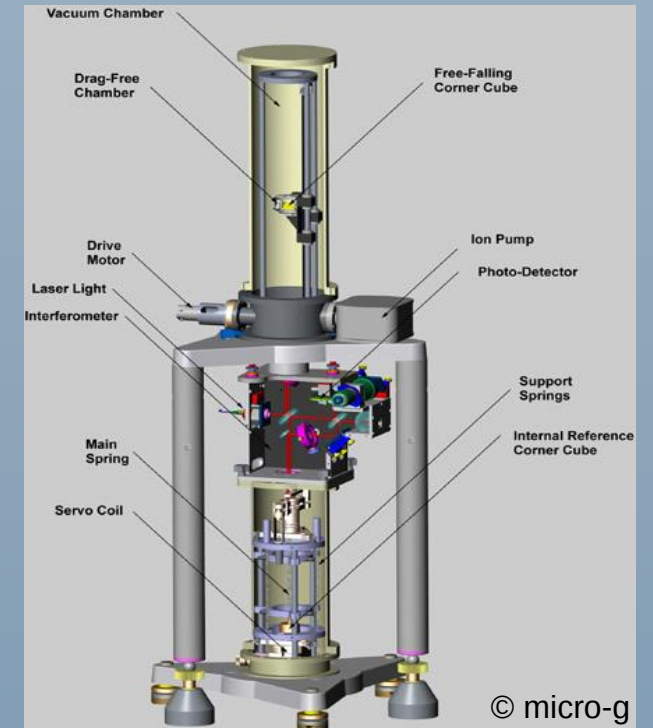
Superconducting Gravimeter



Source: <http://www.eas.stu.edu/GGFctspec.html>

$\sigma \approx 0.01 \mu Gal$
= 0.2 mm Niederschlag

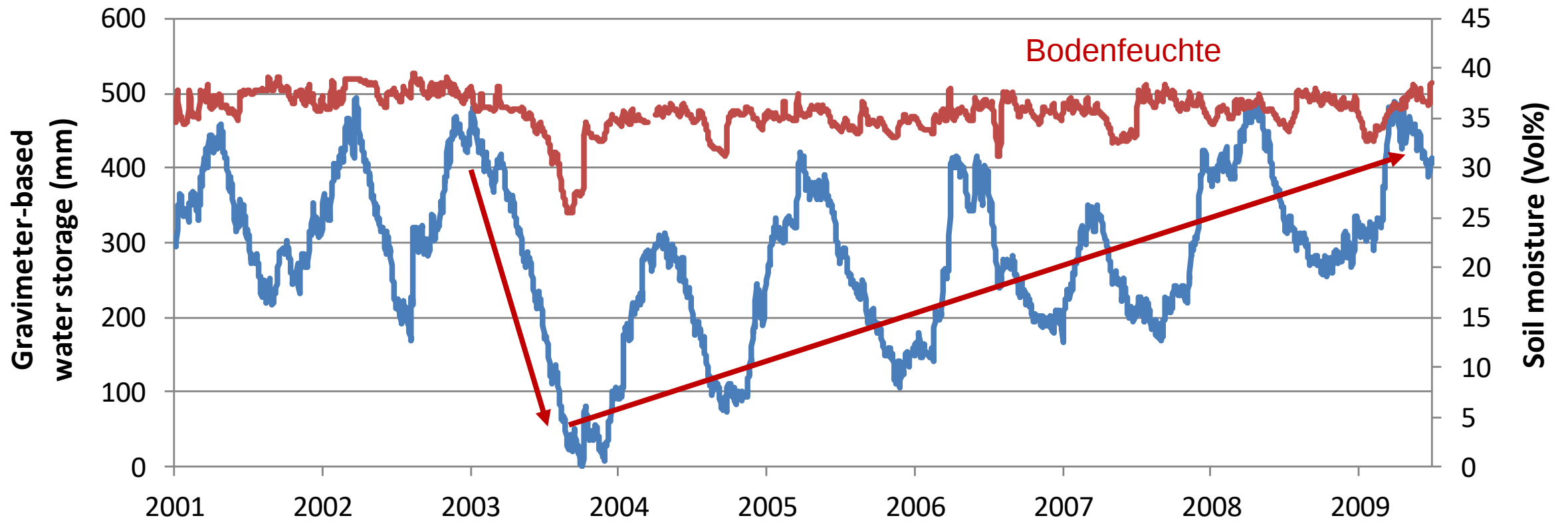
Freifallgravimeter



© micro-g

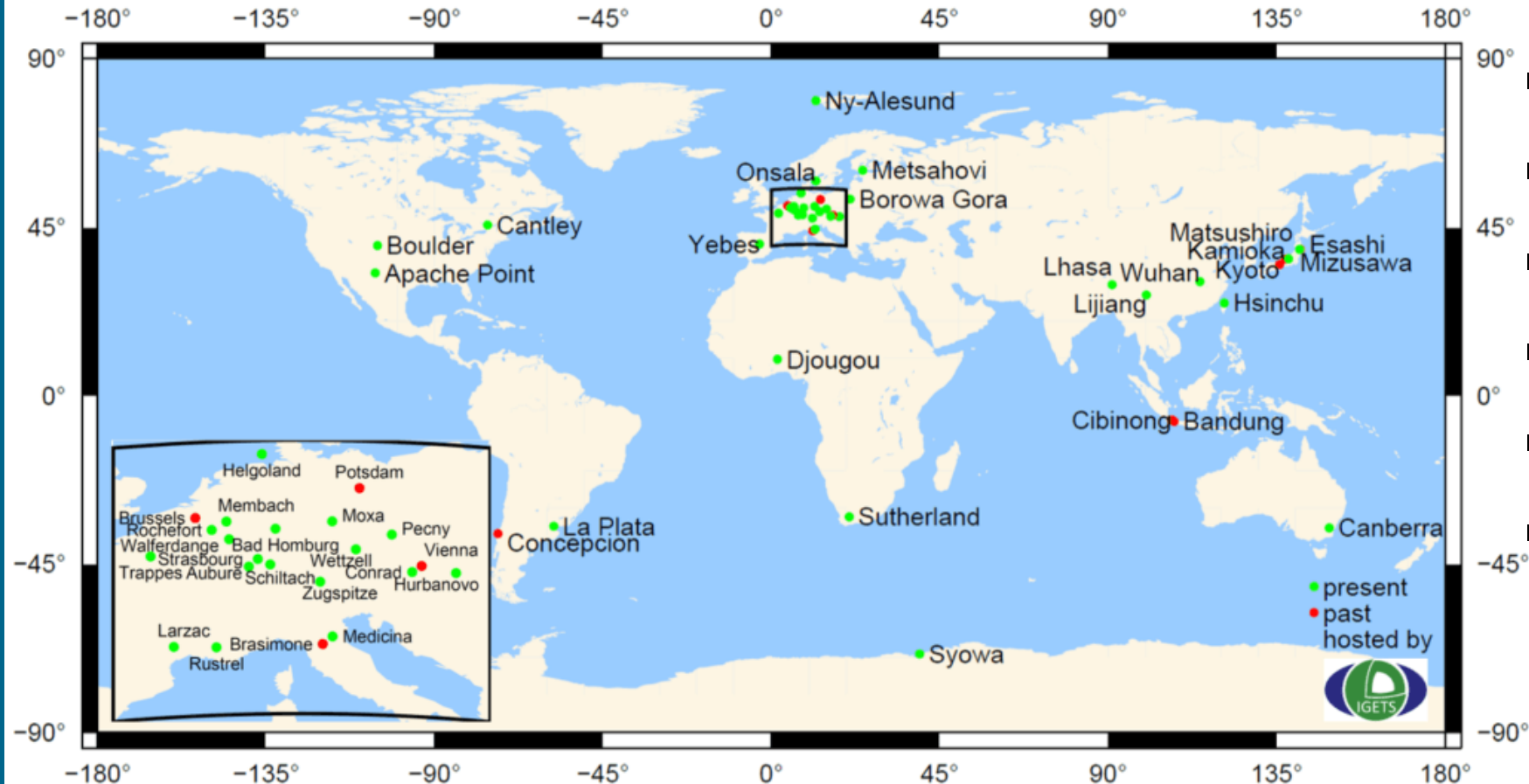
$\sigma \approx 1 \mu Gal$
= 24 mm Niederschlag

Dürre 2003 – Gravimetriestation Wettzell



Terrestrische Gravimetrie

IGETS data base



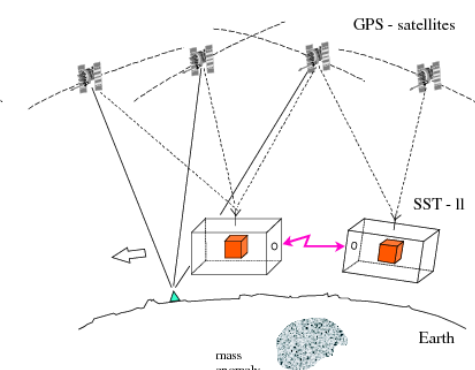
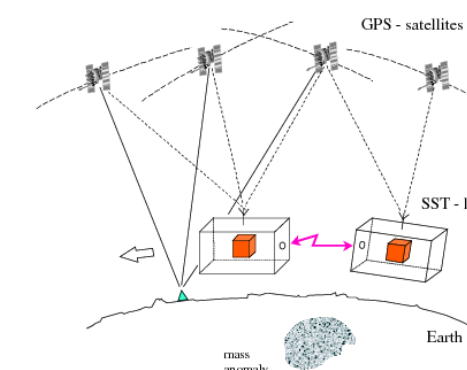
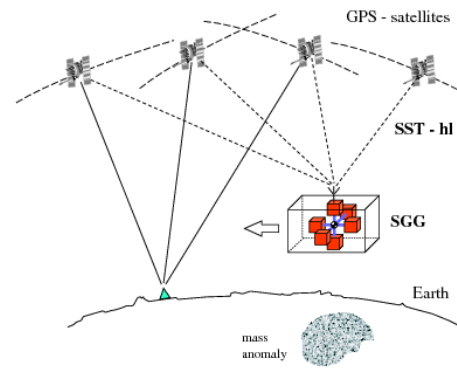
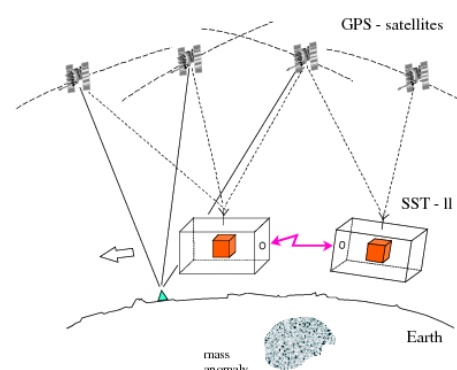
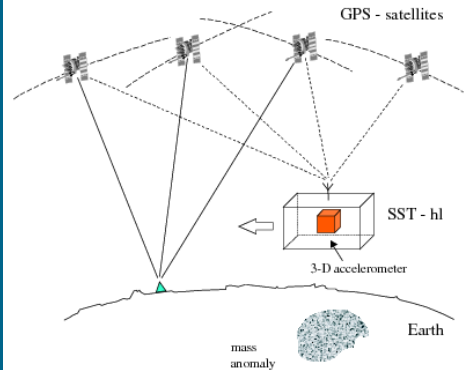
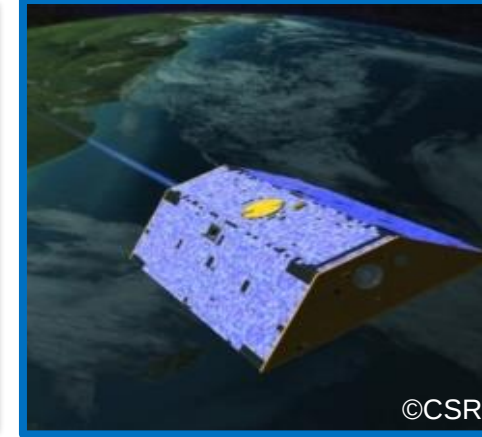
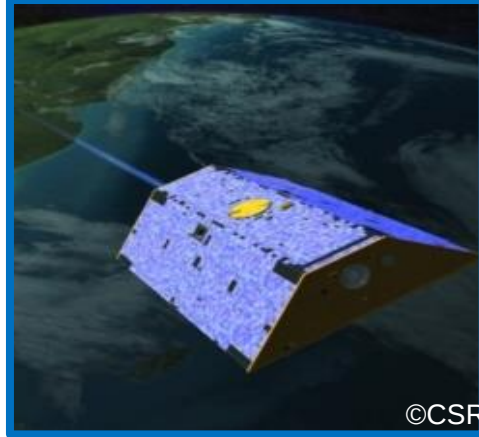
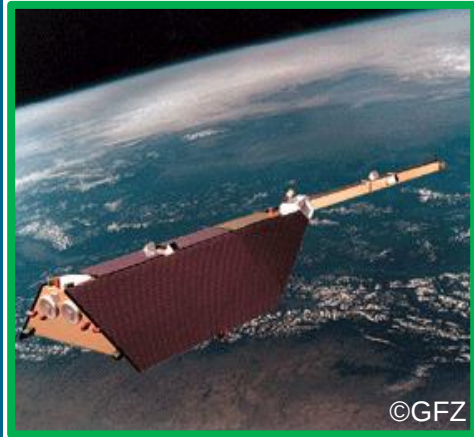
- qualitativ beste Daten
- lokal begrenzt (einige km)
- aufwendig
- stationär
- Laboraufbauten
- Geohazards, Hydrologie, ...

<https://ggos.org/item/igets/>



Wie vermessen wir das Schwerefeld?

Satelliten als Testmassen



CHAMP (GFZ, 2000-2010)

GRACE (NASA/DLR, 2002-2017)

GOCE (ESA, 2009-2013)

GRACE-FO
(NASA/GFZ, 2018-203X)

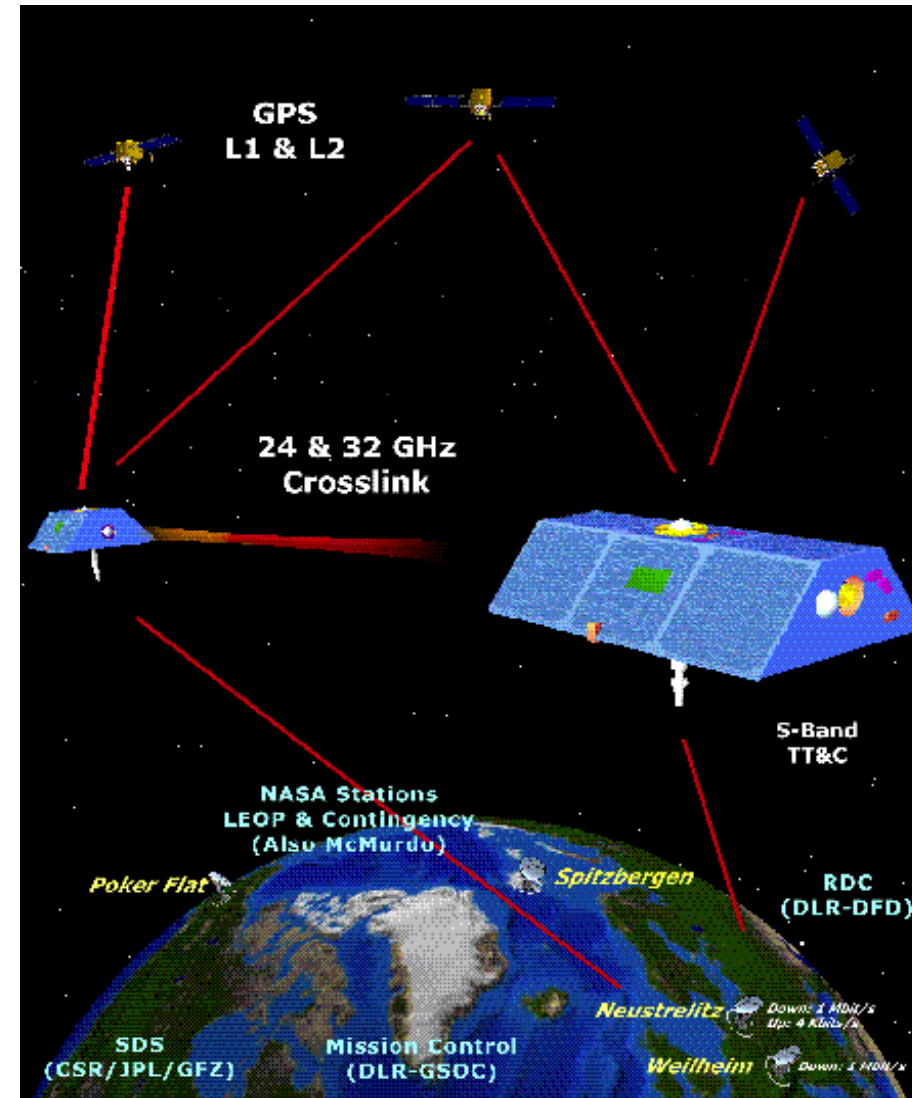
GRACE-C (2028-203X)

NGGM (2031-203X)

MAGIC

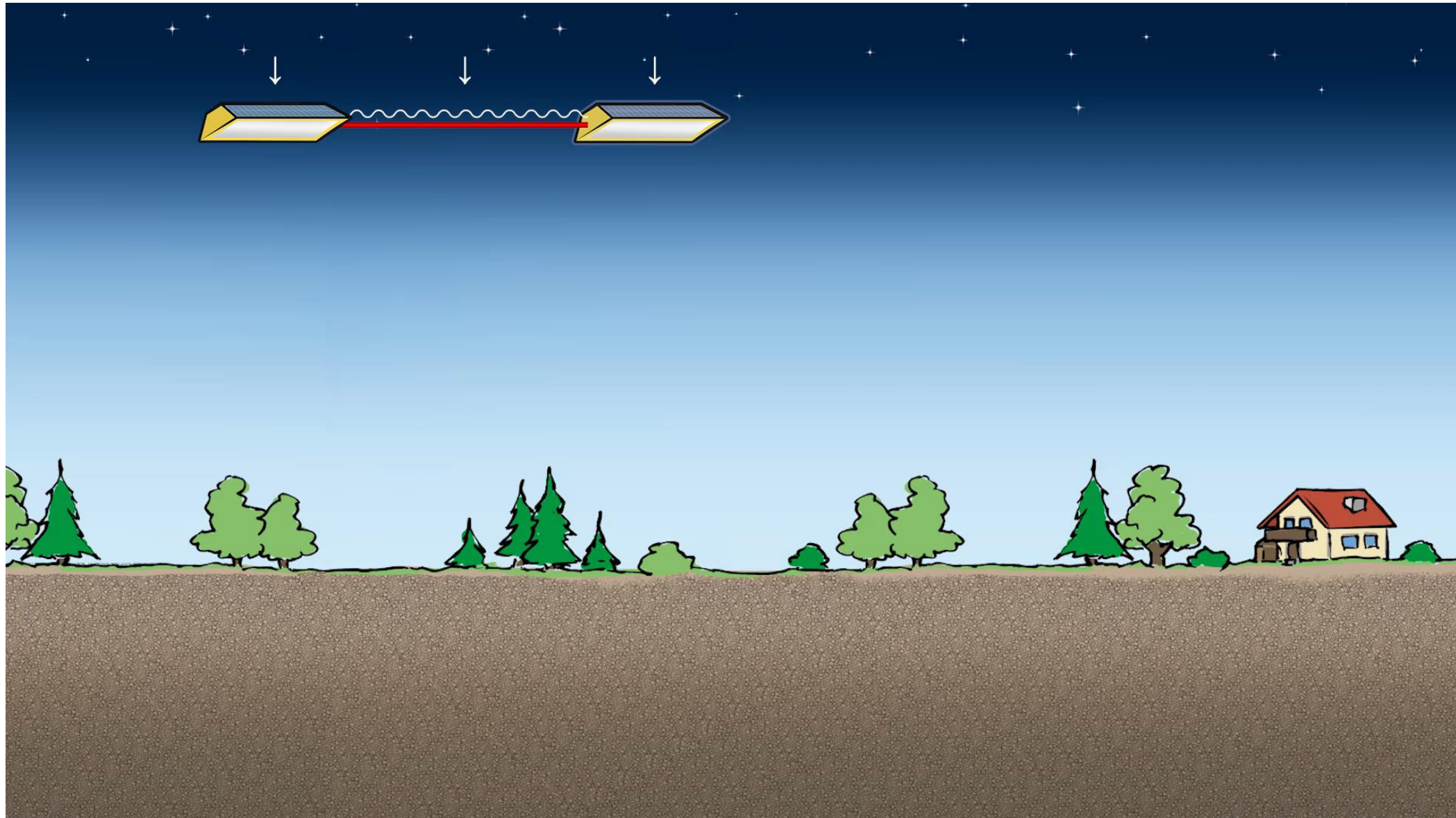
Satellite system GRACE

- (Anfangs-)Orbithöhe: ~ 485 km
- Inklination: ~ 89°
- Schlüsseltechnologien:
 - GPS
 - Akzelerometer
 - K-Band ranging-system
- Primäre Beobachtungen:
 - Distanz (range)
 - Distanzänderung (range-rate)

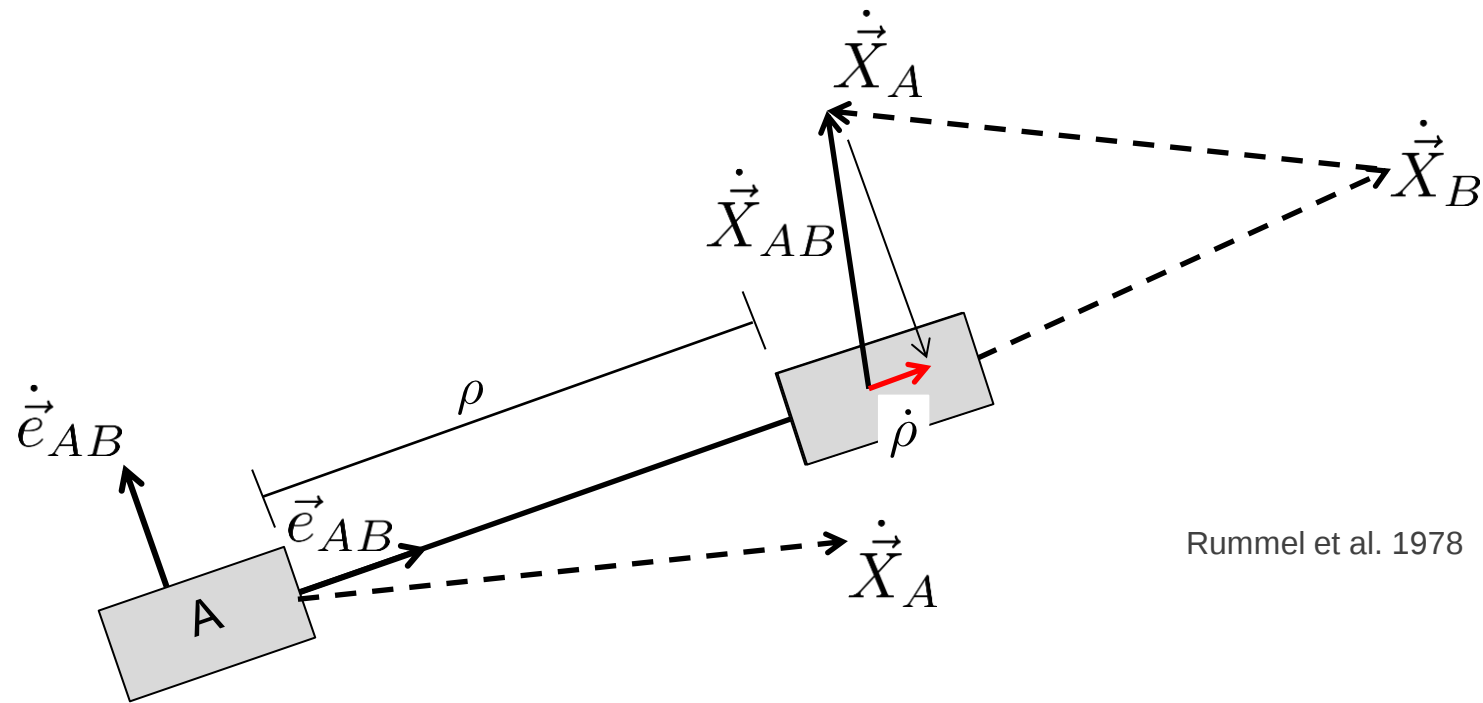


© CSR, UTexas

Satelliten als Testmassen



Geometrie eines GRACE-Systems



Rummel et al. 1978

Differentiation

Integration



$$\rho = \vec{X}_{AB} \cdot \vec{e}_{AB}$$

$$\dot{\rho} = \dot{\vec{X}}_{AB} \cdot \vec{e}_{AB}$$

$$\ddot{\rho} = \ddot{\vec{X}}_{AB} \cdot \vec{e}_{AB} + \dot{\vec{X}}_{AB} \cdot \dot{\vec{e}}_{AB}$$

$$= \nabla V_{AB}$$

$$V = \frac{GM}{R} \sum_{l=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r} \right)^{l+1} \sum_{m=0}^l \bar{P}_{lm}(\sin \phi) (\bar{C}_{lm} \cos m\lambda + \bar{S}_{lm} \sin m\lambda)$$

mit GM Gravitationskonstante x Erdmasse

R Erdradius

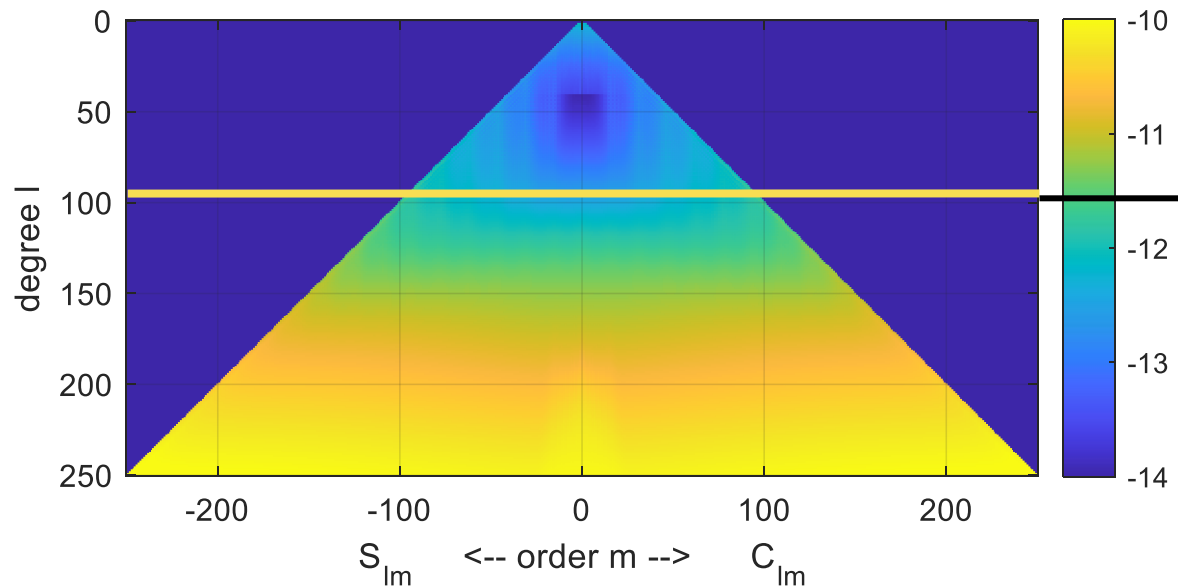
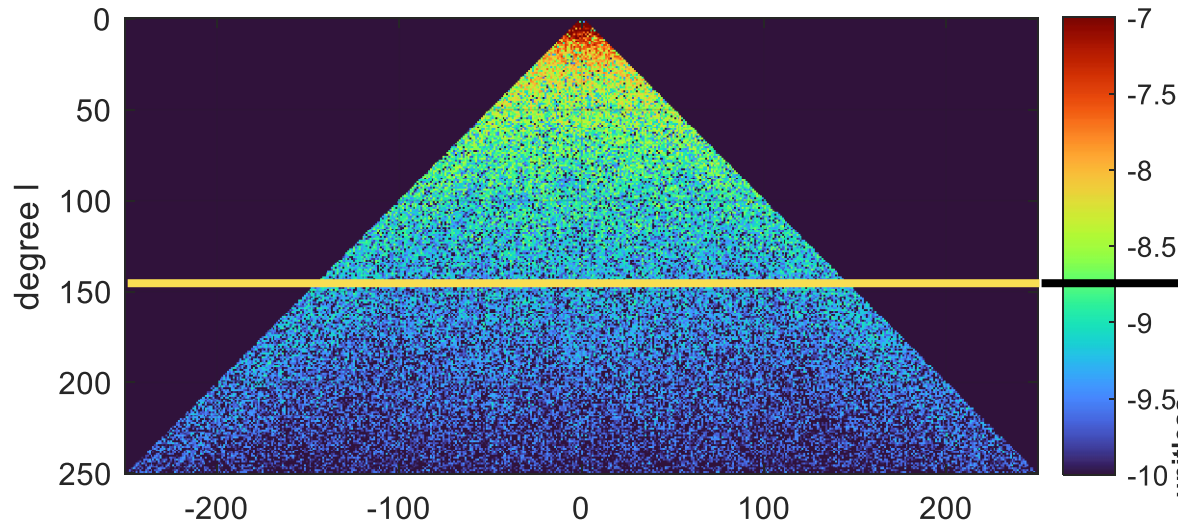
r, ϕ, λ sphärische Koordinaten

$\bar{P}_{lm}$ Legendre-Funktion

l, m Grad, Ordnung

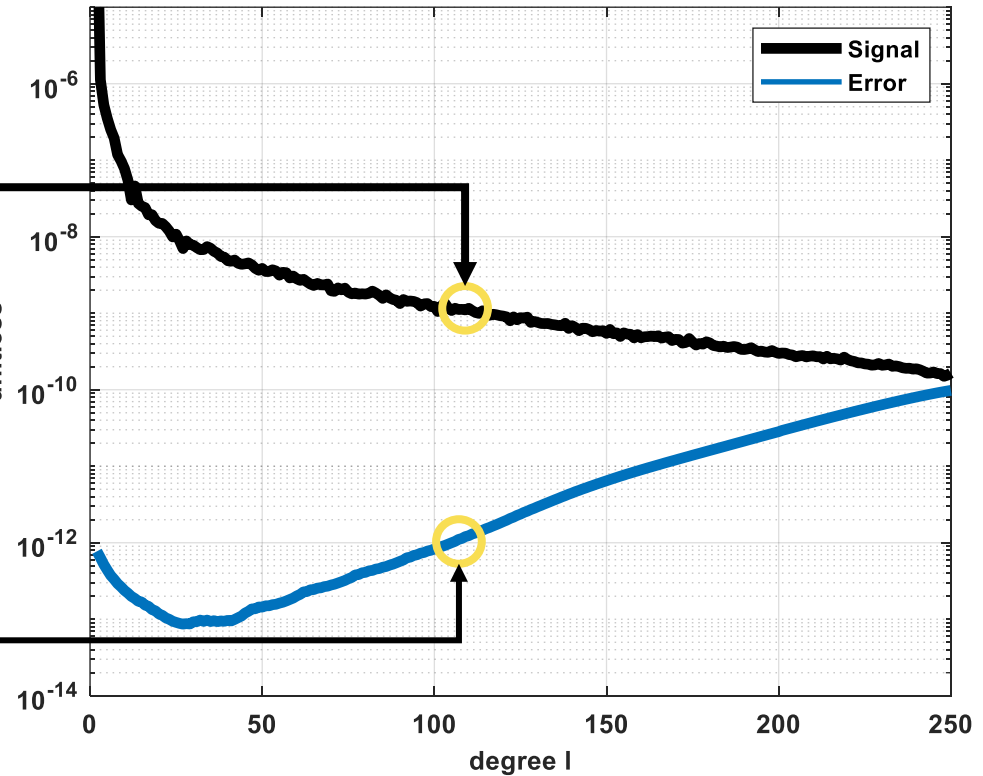
$\bar{C}_{lm}, \bar{S}_{lm}$ Sphärisch-harmonische Koeffizienten

Spektrale Darstellung



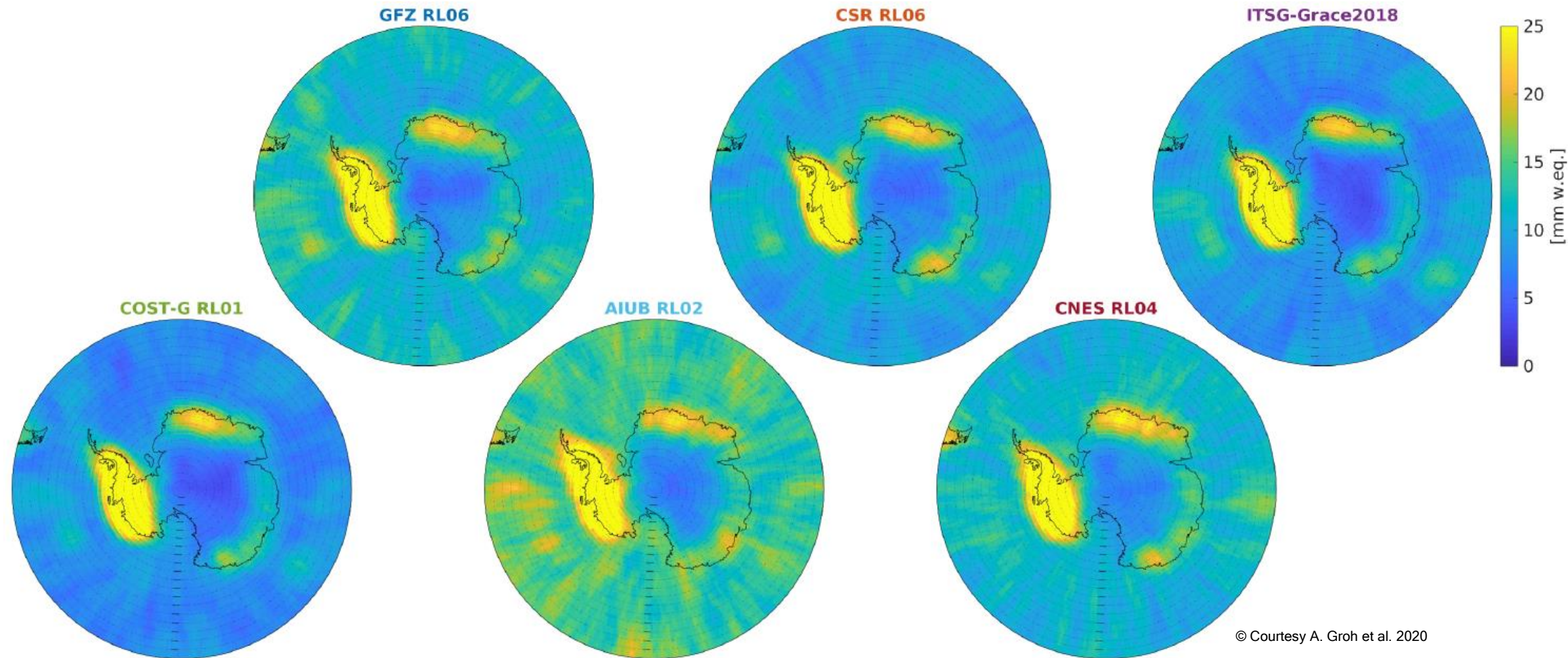
$$\bar{A}_l = \sqrt{\frac{1}{2l+1} \sum_{m=0}^l (\bar{C}_{lm}^2 + \bar{S}_{lm}^2)}$$

Spherical harmonic spectrum of GOCO06s



$$\bar{\sigma}_l = \sqrt{\frac{1}{2l+1} \sum_{m=0}^l (\sigma_{\bar{C}_{lm}}^2 + \sigma_{\bar{S}_{lm}}^2)}$$

Lösungen verschiedener Prozessierungszentren





Welcome to COST-G

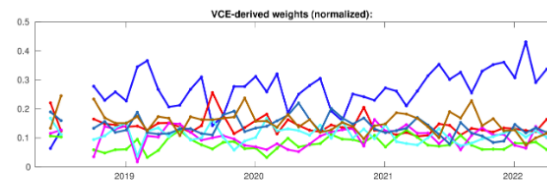
The International Combination Service for Time-variable Gravity Fields (COST-G) is the center of the International Gravity Field Service (IGFS) and is dedicated to the monthly global gravity field models. COST-G stems from the activities of the follow-up project European Gravity Service for Improved Emergency Management (EGSIEM) developed within the follow-up project Global Gravity-Based Groundwater Project (GGGG) is funded from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Grant Agreement no. 870353 (funding period 2020-2022).

Please use the top menu to visit the various parts of our website!

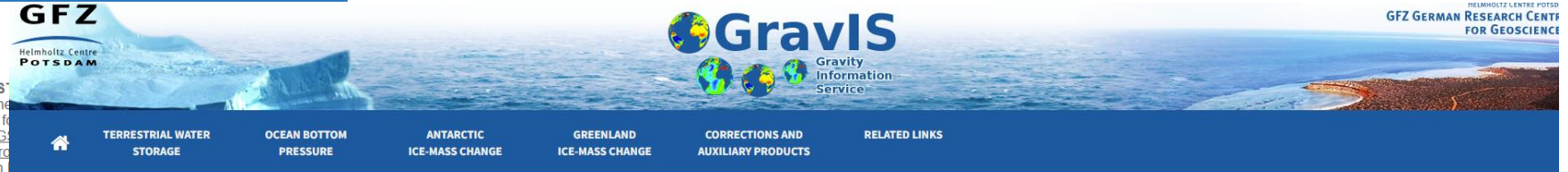
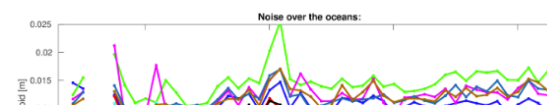
Best regards,
Your COST-G Team.

Latest GRACE-FO combination results

Weights

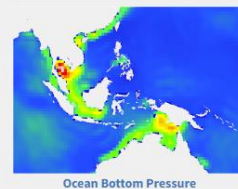
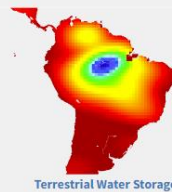


Noise over the oceans



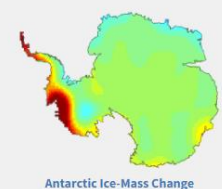
Welcome to GravIS, the Gravity Information Service of the German Research Centre for Geosciences (GFZ), in collaboration with the Alfred-Wegener-Institut (AWI) and Technische Universität Dresden. Data products derived from the gravimetric Earth observation satellite missions GRACE and GRACE-FO are widely used by scientists and other interested users to study mass variations in the Earth system. However, processing of GRACE/GRACE-FO data into user-friendly products for dedicated geophysical applications is nontrivial, neither when starting from original satellite observations nor from the level of gravity field products. In order to enable the usage of satellite gravimetry data for a broader community, user-friendly ('Level-3') products are generated by various institutions.

GravIS visualizes and describes Level-3 products based on the most recent GRACE and GRACE-FO data release from GFZ. In addition, Level-3 products based on the most recent release of combined models for GRACE and GRACE-FO from COST-G are offered as well. The products presented at GravIS are available for download at GFZ's Information System and Data Center (ISDC).



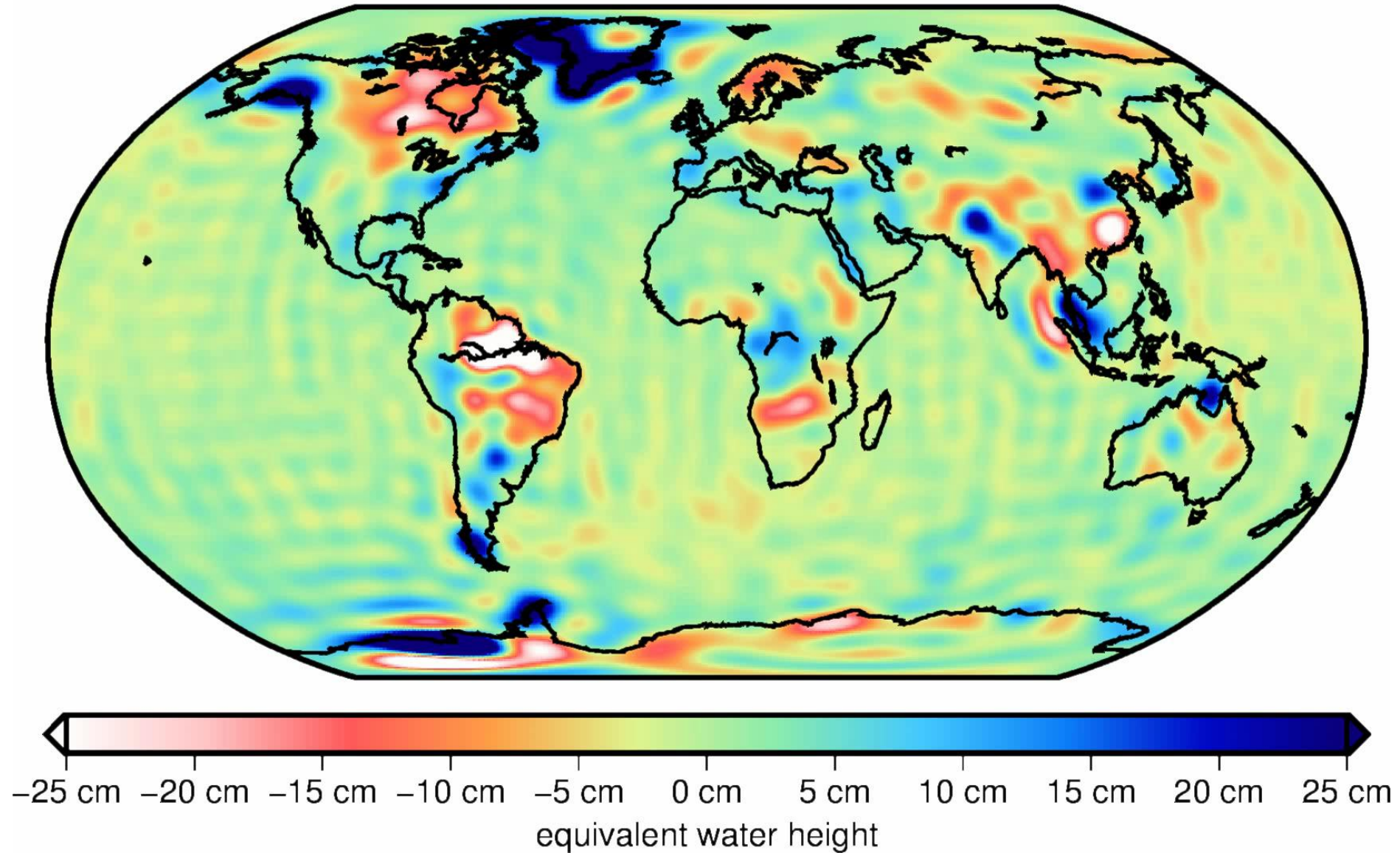
The Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE; 2002 - 2017) and its Follow-On mission (GRACE-FO; launched in May 2018) typically provide monthly independent estimates of the Earth's global gravity field. Differences between consecutive months are caused by mass redistribution and mass transport in the Earth system, particularly in the geophysical fluid layers of the atmosphere, oceans, and continental hydrosphere.

GRACE/GRACE-FO data processing is structured into sensor data analysis (Level-0 to Level-1), global gravity field estimation (Level-1 to Level-2), and geophysical mass anomaly inversion (Level-2 to Level-3). Level-3 products at GravIS comprise gridded mass anomalies as well as basin average time series and are available for terrestrial water storage over non-glaciated regions, bottom pressure variations in the oceans, and ice-mass changes in both Antarctica and Greenland. In order to achieve the highest possible accuracy of the mass anomalies, several post-processing steps have been applied to the Level-2 spherical harmonic coefficients before inversion.

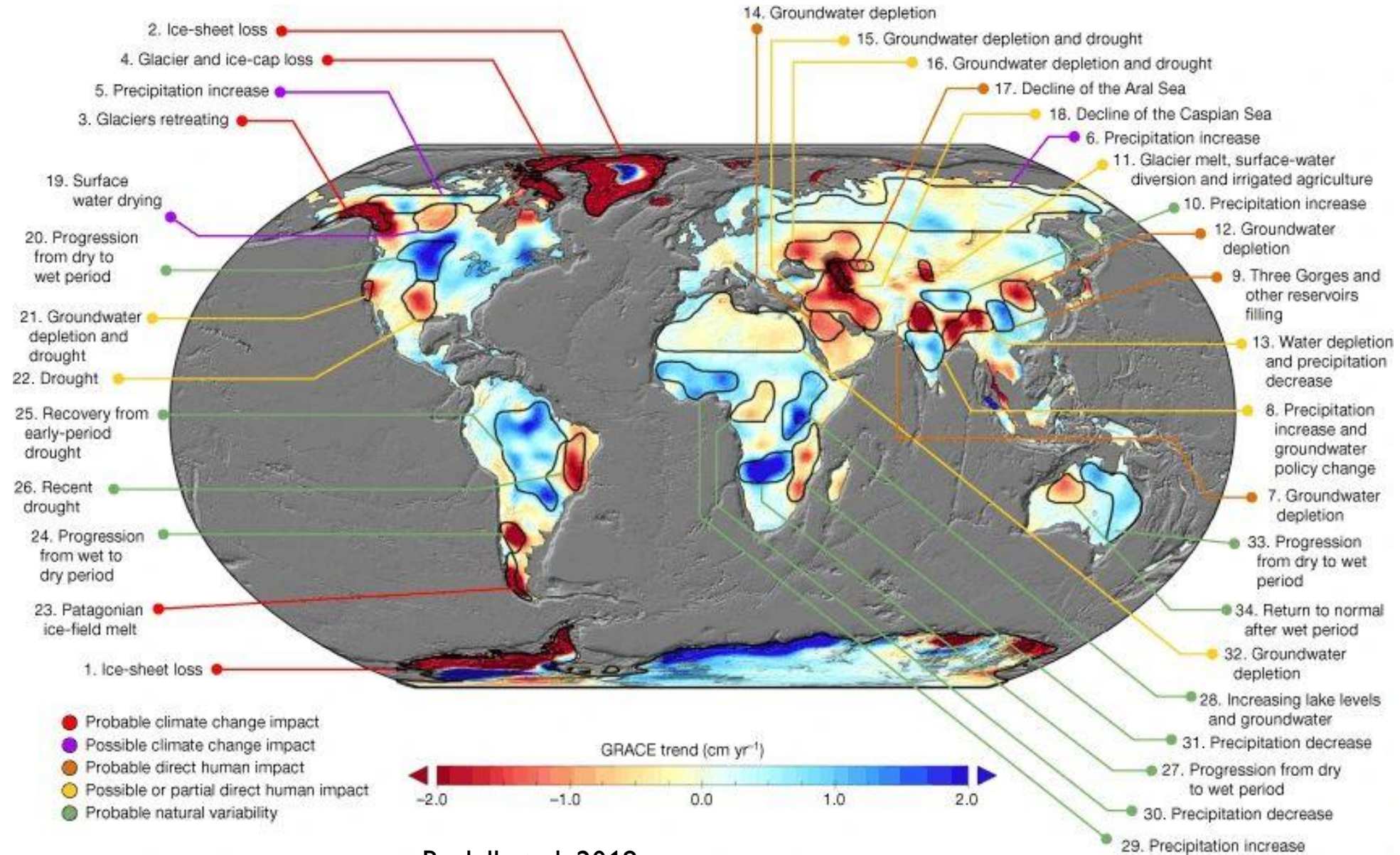


Massentransporte

ITSG-Grace2016_dailyKalman (2004-01-01)



Tipping Points



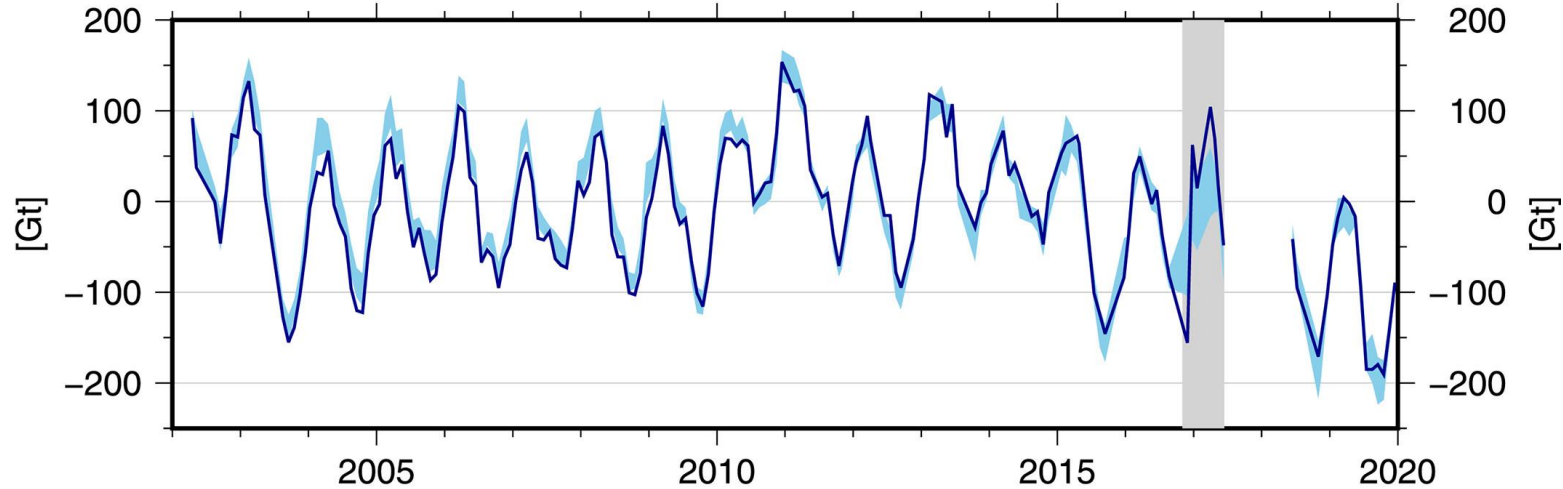
Rodell et al. 2018

Emerging trends in global freshwater availability

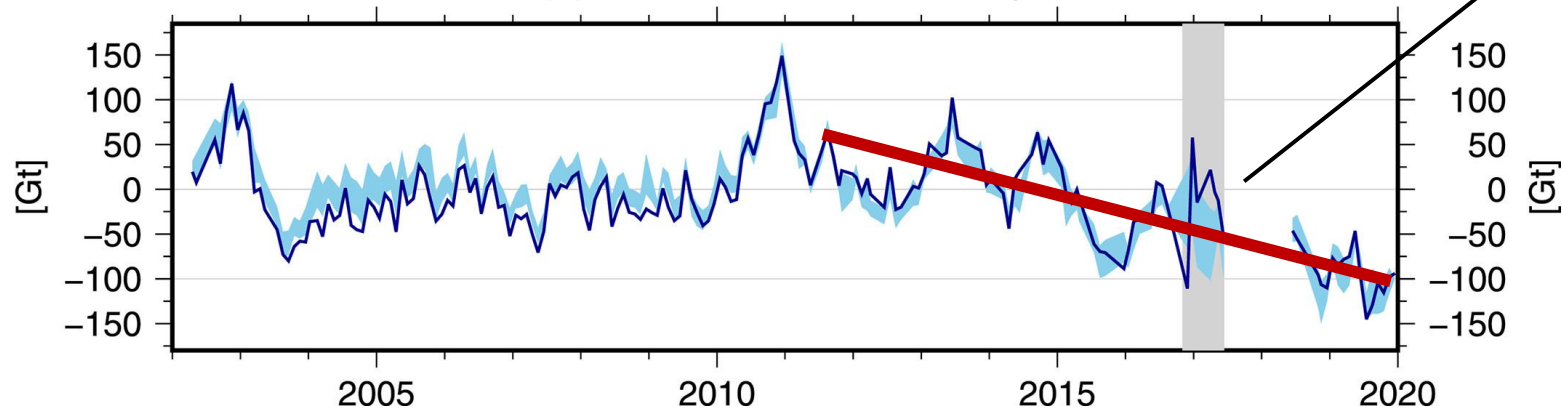
GRACE und GRACE-FO: gesamter Wasservorrat in Zentraleuropa



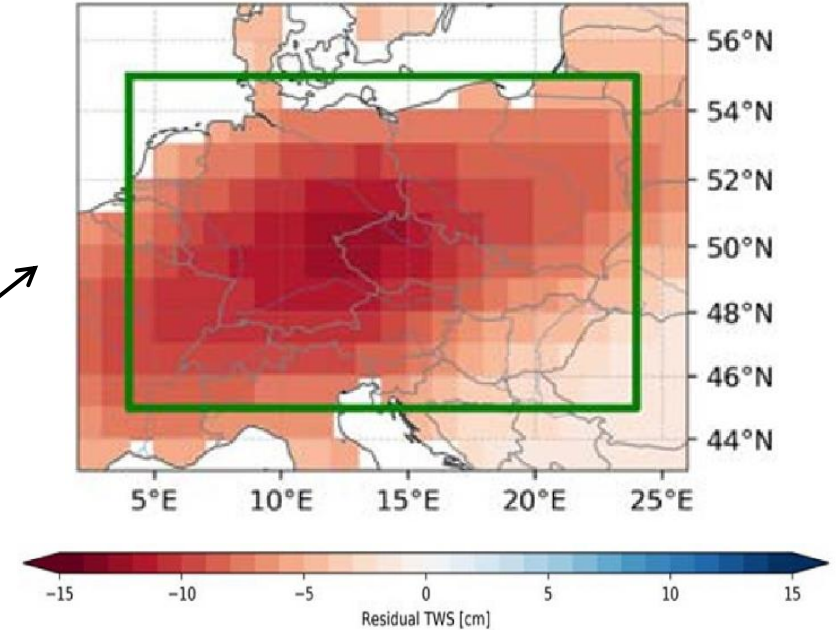
(a) Mass Anomaly



(b) Residual Mass Anomaly



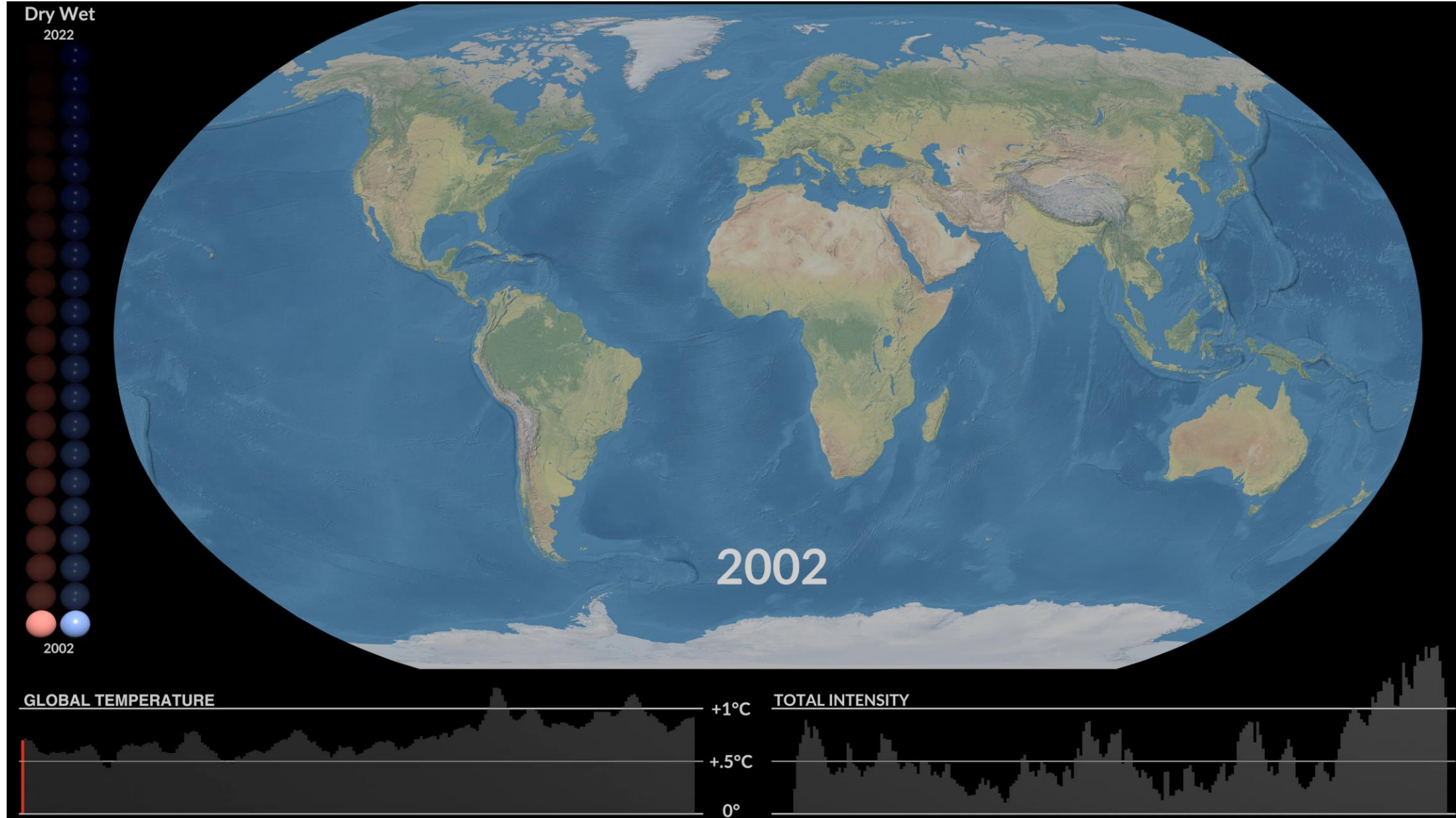
(d) July 2019



Boergens, E., Güntner, A., Dobsław, H., & Dahle, C. (2020). Quantifying the Central European droughts in 2018 and 2019 with GRACE Follow-On. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL087285. <https://doi.org/10.1029/2020GL087285>

Zunahme von Extremereignissen

© NASA's Scientific Visualization Studio



Gravimetrie als Frühwarnsystem

Gesättigter Boden



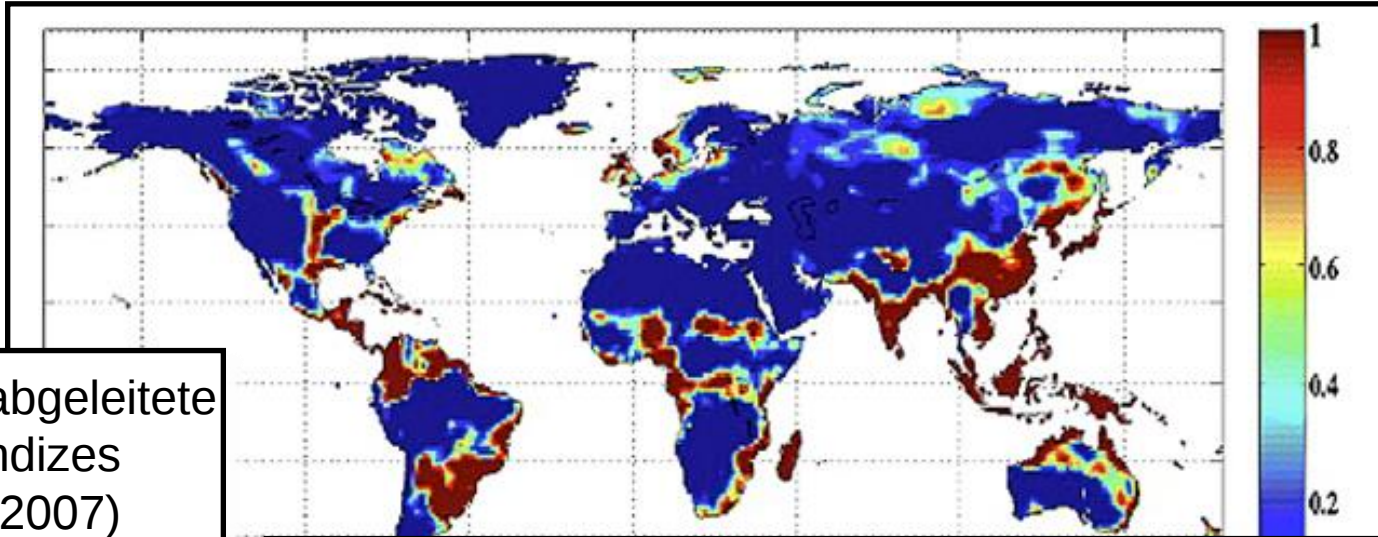
Gefahr von Flutereignissen



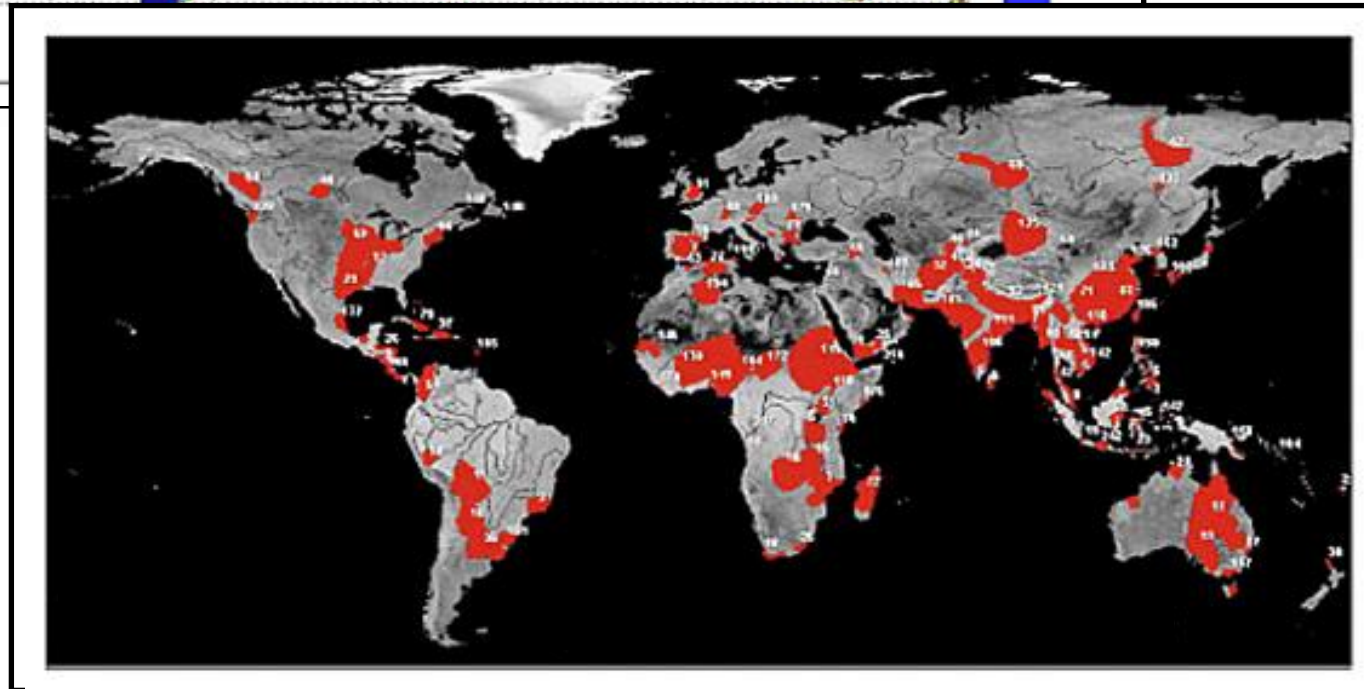
Flutindizes aus Gravimetrie können
Flutereignisse anzeigen, bevor sie
tatsächlich auftreten.

Gravimetrie als Frühwarnsystem

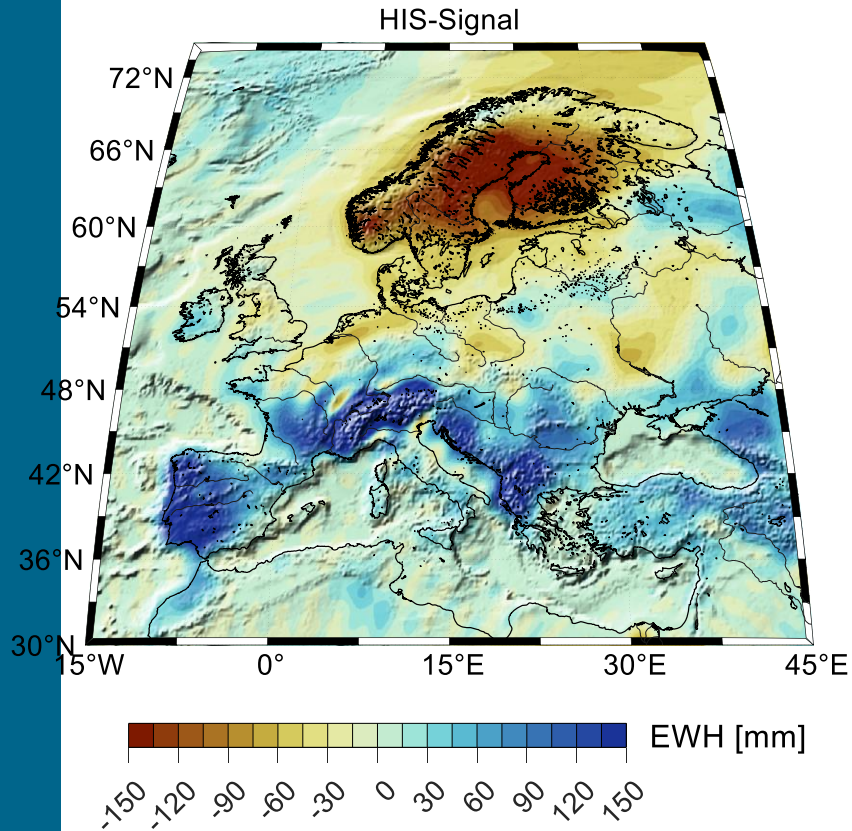
GRACE-abgeleitete
Flutindizes
(Mai 2007)



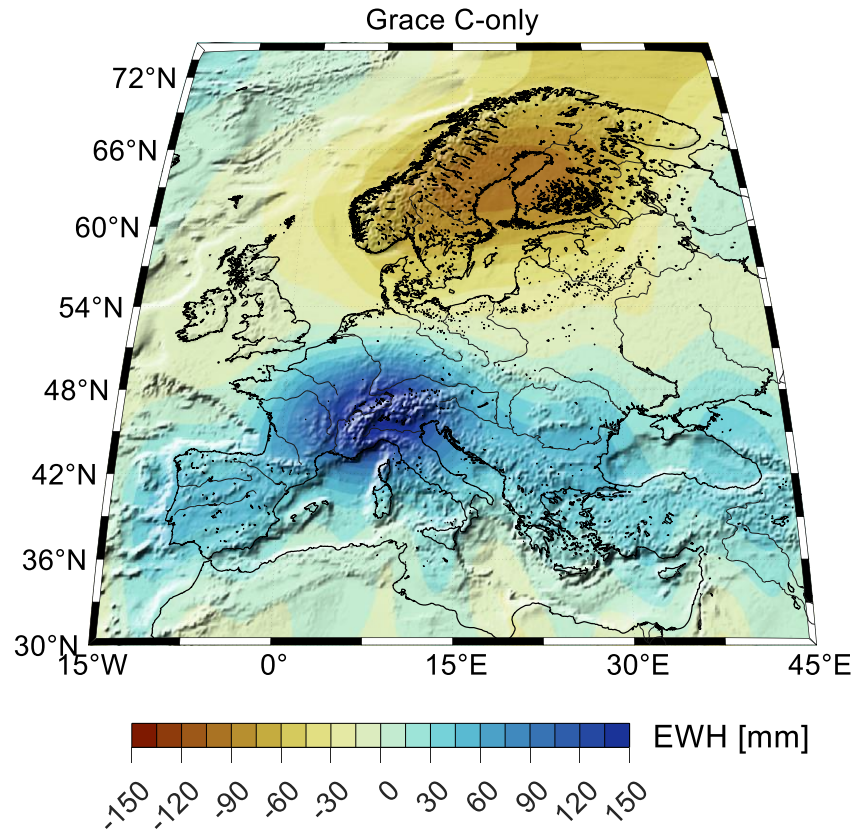
Tatsächliche
Flutereignisse
Mai 2007



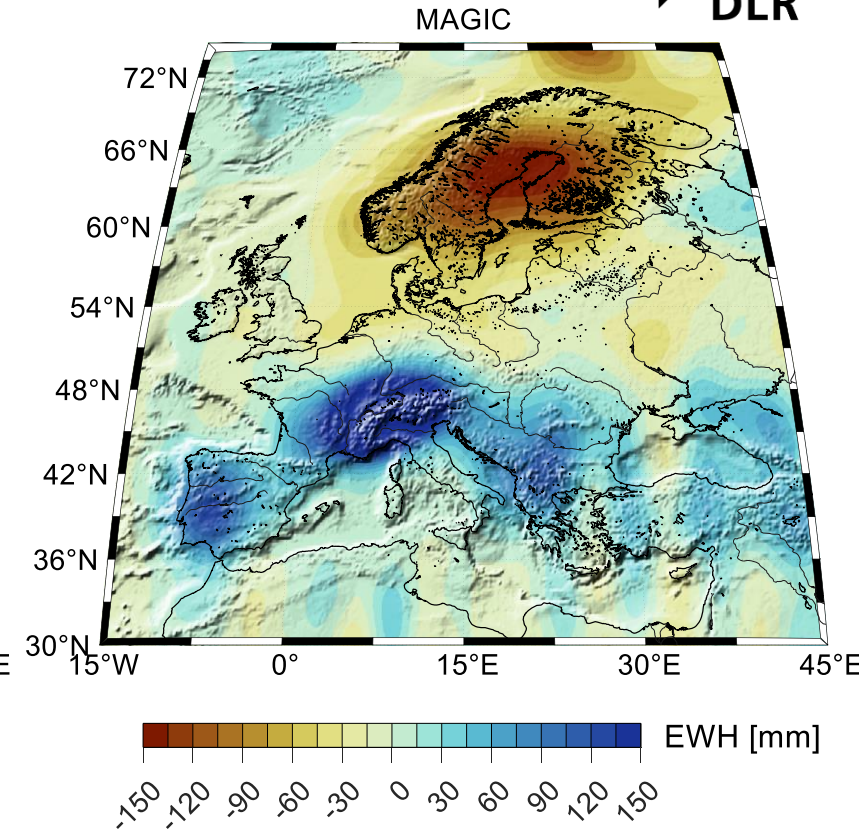
Herausforderungen bestehender Systeme



Simuliertes Signal
mit 50 km
räumlicher
Auflösung



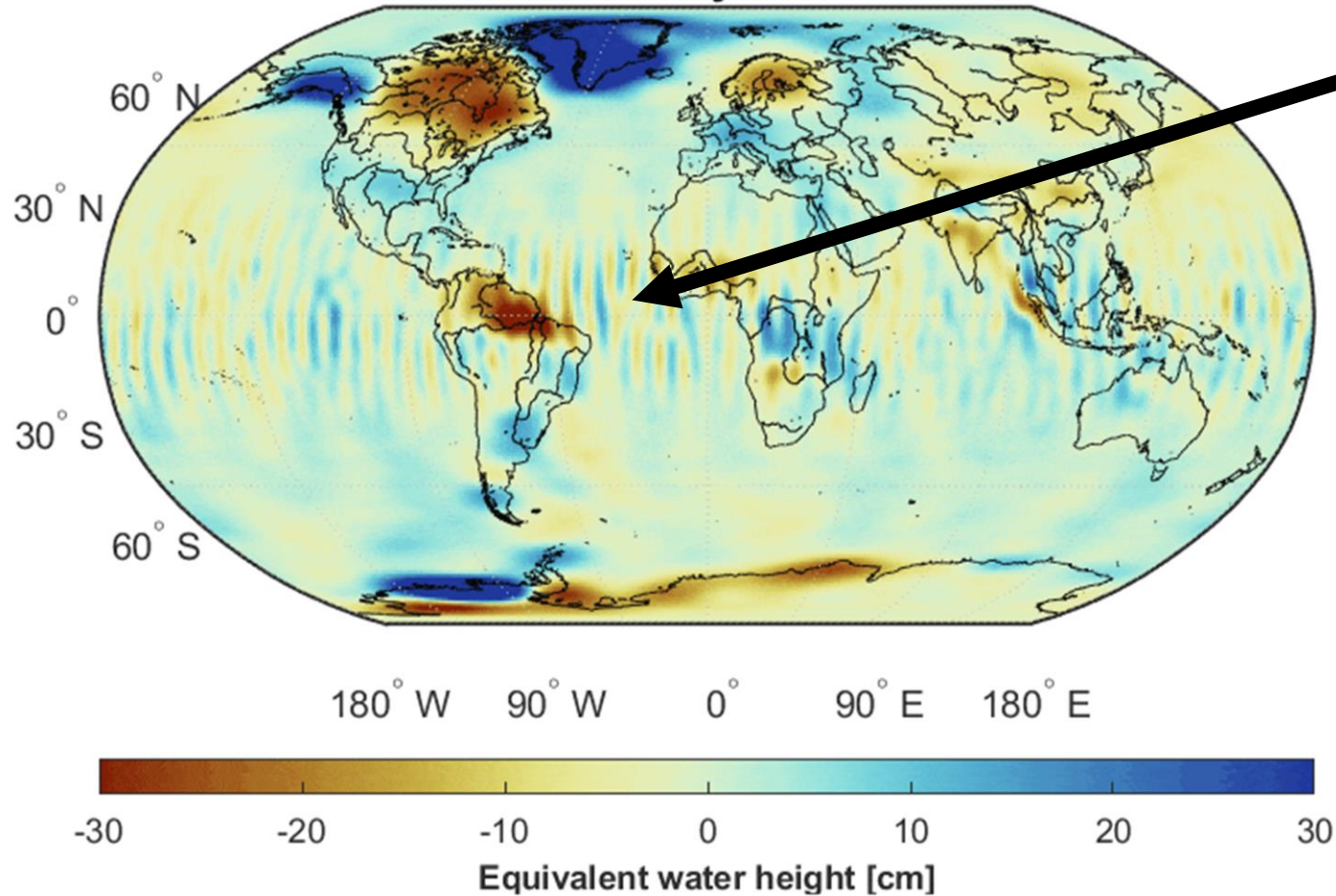
Beobachtetes Signal mit
einem einzelnen Paar:
300km Auflösung



Beobachtetes Signal
mit einem Doppelpaar:
150km Auflösung

Herausforderungen bestehender Systeme

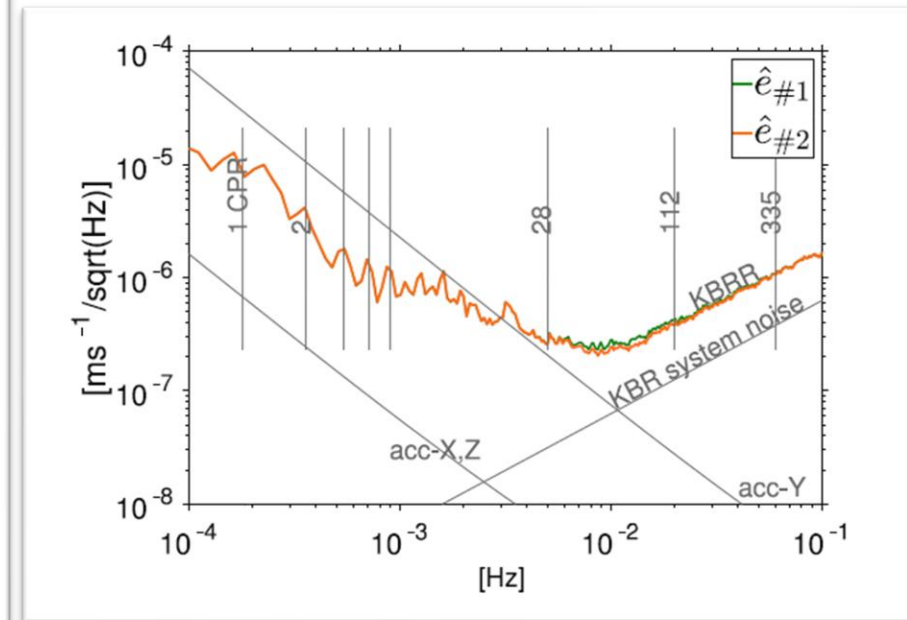
January 2003



HINTERGRUNDMODELLE



SENSORRAUSCHEN



Goswami et al. 2018
*Analysis of Attitude Errors
in GRACE Range-Rate residuals*

Herausforderungen bestehender Systeme



based on ITSG 2018

Herausforderungen bestehender Systeme



RÄUMLICHE UND ZEITLICHE AUFLÖSUNG

Limitierung auf ca.
300km - 400km
und monatlich



SENSOR- RAUSCHEN

Beobachtungs-
systeme können
nicht voll
ausgeschöpft
werden



HINTERGRUND- MODELLE

Aliasing von
geophysikalischen
Signalen



DATEN- VERFÜGBARKEIT

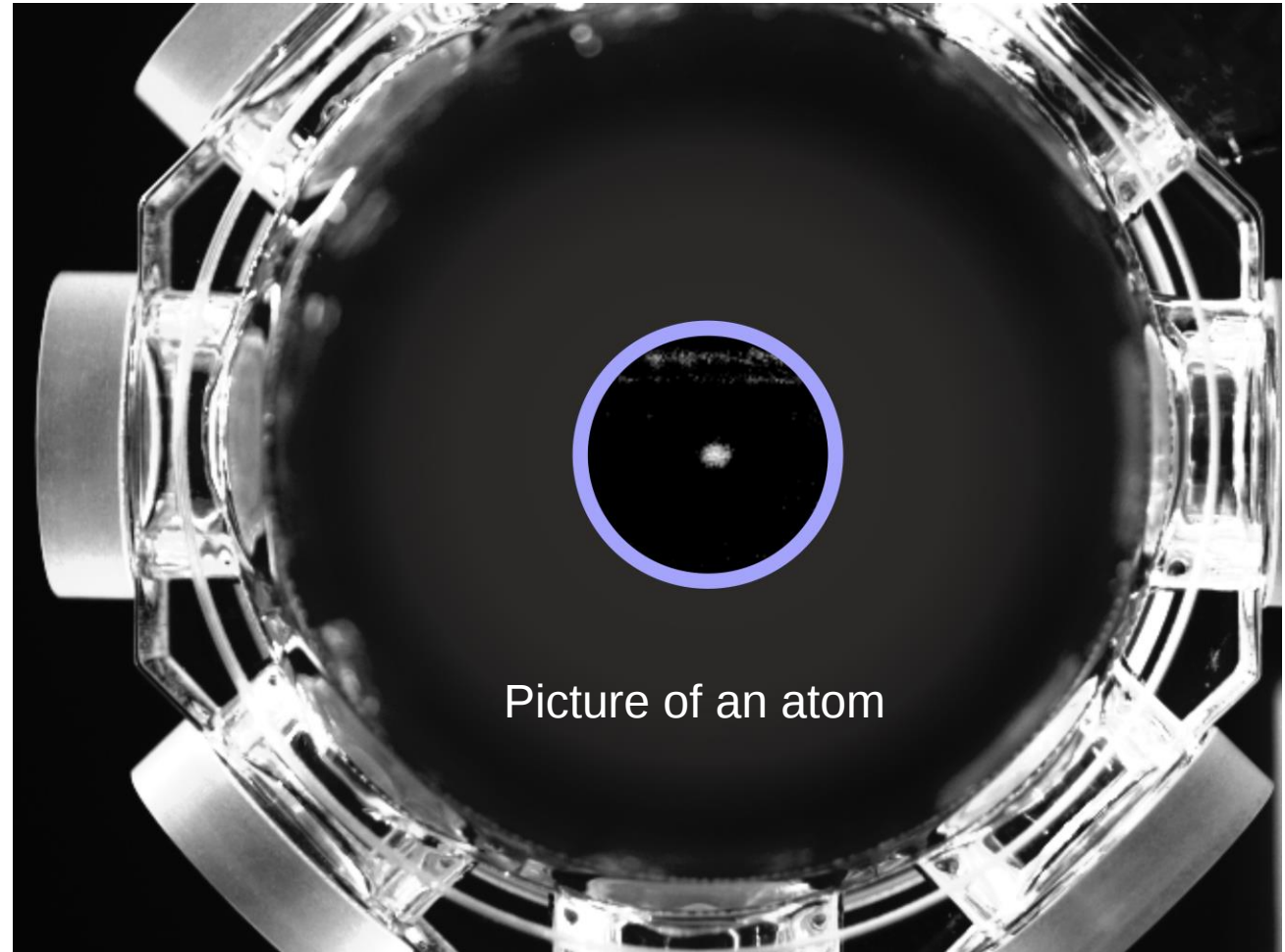
Verfügbarkeit?
Redundanz?
Latenzzeiten?
Räumliche Abdeckung?
Sensitivität?

A man with a beard and safety glasses is looking intently at a complex quantum technology setup. The setup includes various optical components like mirrors, lenses, and fiber optic cables, with some parts illuminated by blue and purple light. The background shows a laboratory environment with more equipment and structural elements.

WIE KÖNNEN QUANTUM TECHNOLOGIEN HELFEN?

Quantensensoren

- Einzelne Atome werden isoliert.
- Ausnutzen der Welleneigenschaften von Atomen
- Einsatz von Atomen für hochpräzise Beobachtungen
 - Beschleunigungsmesser
 - Rotationssensoren
 - Gravimetrie/Gradiometrie
 - Zeit- und Frequenzmessungen



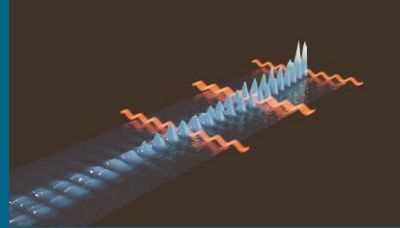
Nutzung der fundamentalen Eigenschaften von Atomen und Molekülen zur Verbesserung von Messgenauigkeiten und Auflösungen

Laserinterferometer



- Langzeitstabil, hochpräzise Abstandsmessungen
- Hochpräzise Messung kleinster Winkel

Atominterferometer



- Absolut, driftfrei, hochgenau
- Beschleunigungsmesser
- Rotationssensor

Optische Uhren



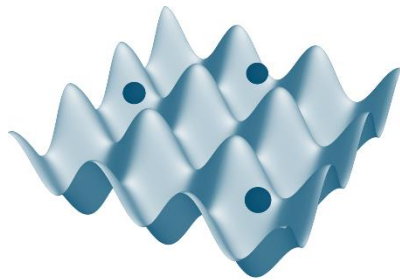
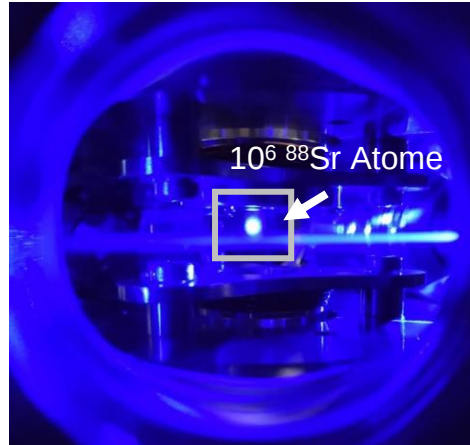
- Absolut, driftfrei, hochgenau
- Navigation
- Referenzsystem für Höhenprofile

Digital Twin: Orbitpropagation unter Berücksichtigung sämtlicher Störeffekte (Umwelt, Weltraumwetter, Satellit), Simulation von Sensorik, Systems Engineering Tools

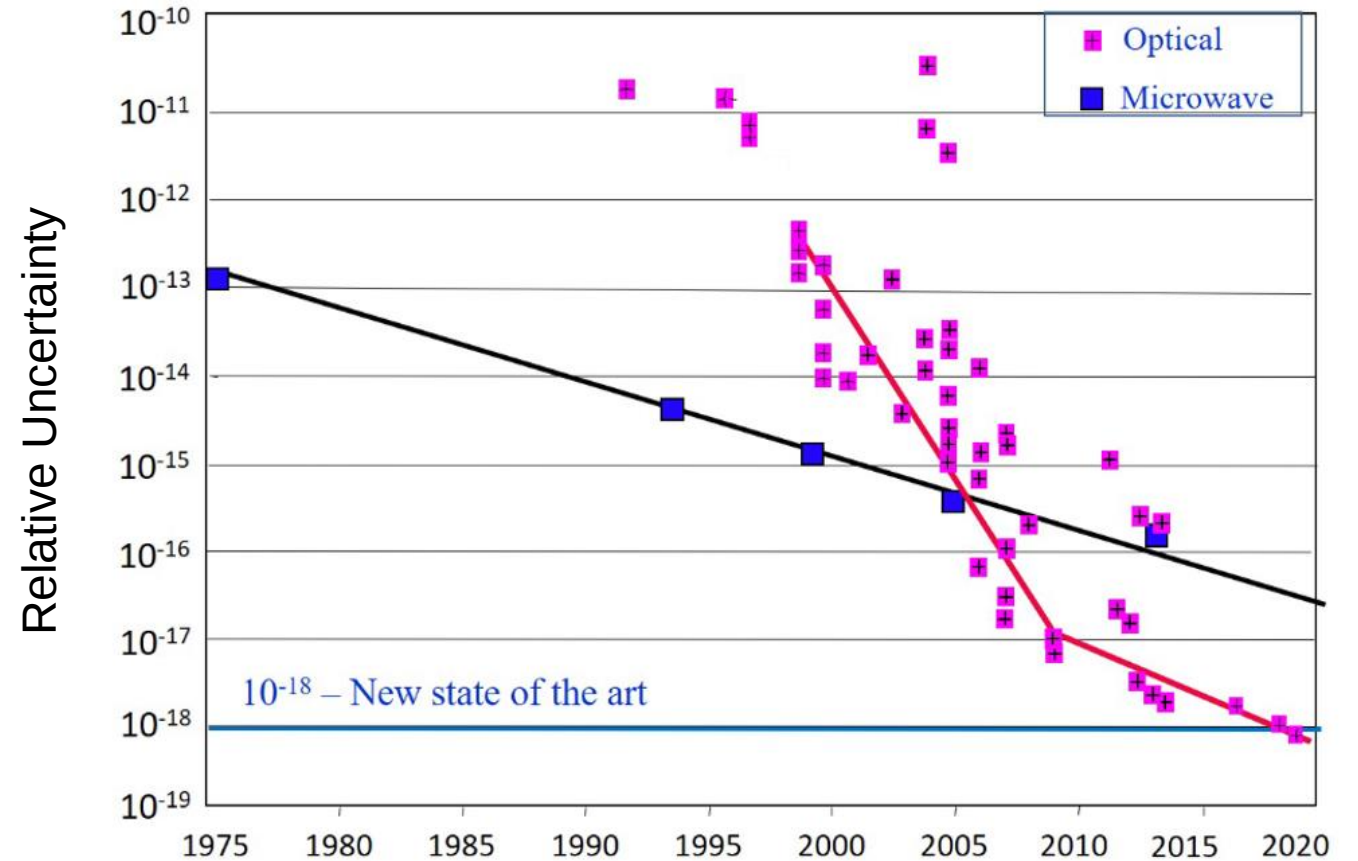
Geodätische Modellierung und
Aufbereitung von Schwerefelddaten für Öffentlichkeit, Datenanalyse-Tools

OPTISCHE FREQUENZMETROLOGIE

Uhrengenauigkeit

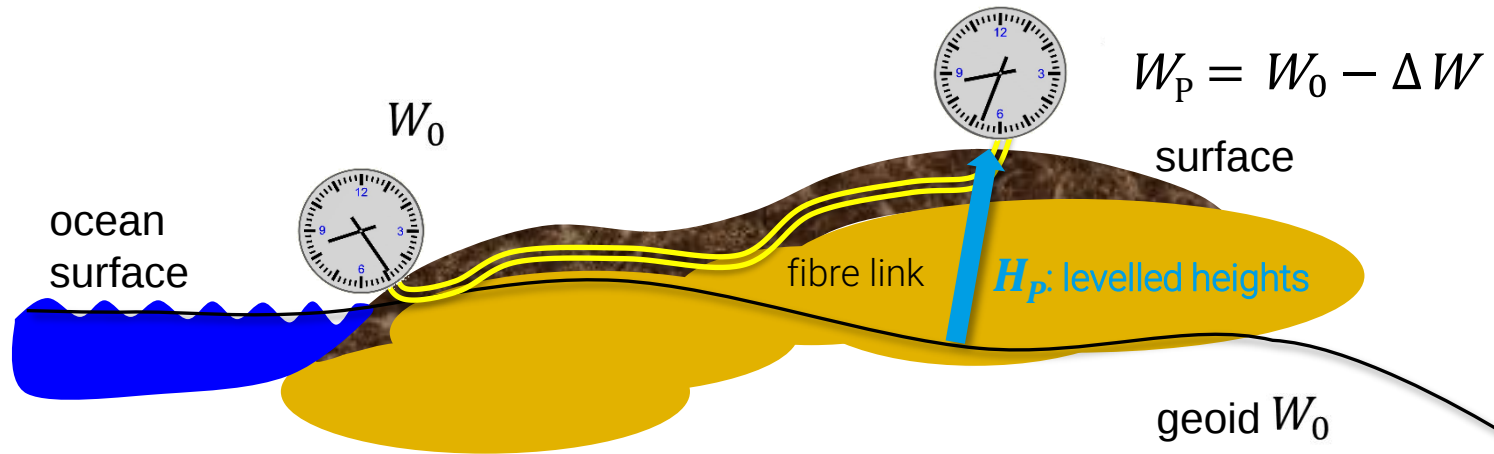


Optical lattice clock



Derevianko et al., arXiv:2112.10817 (2021)





Vermeer, Reports of the Finnish Geodetic Institute **83(2)**, 1(1983); Bjerhammar, Bull. Geodesique **59**, 207 (1985).

- Schwerepotential W : Newtonian + Zentrifugalterm

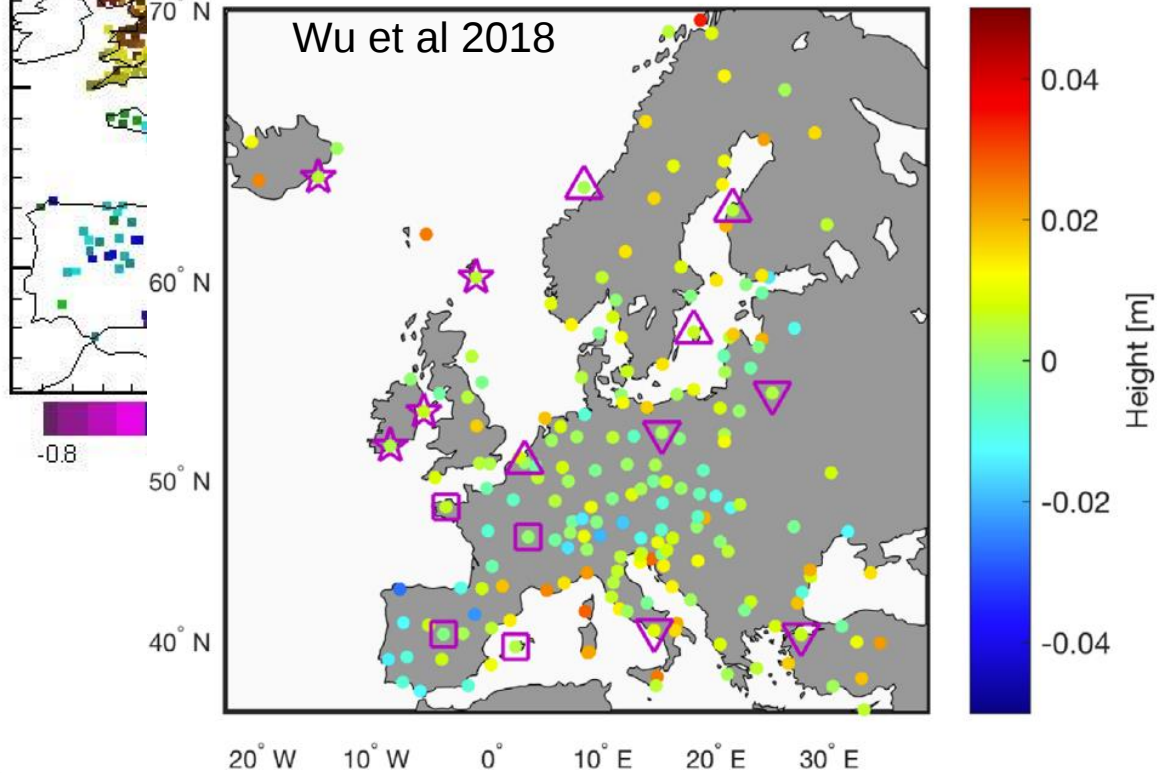
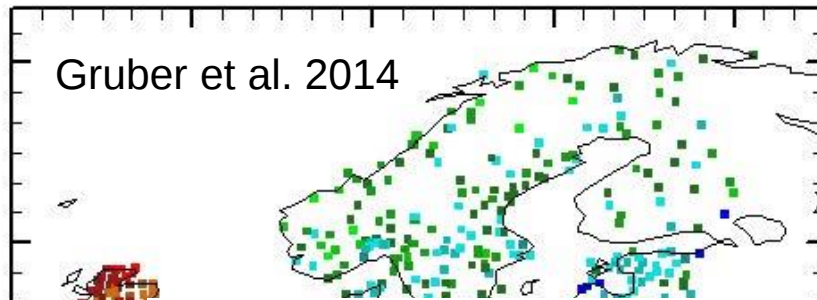
- Relativistische Frequenzgang: $\frac{\Delta f}{f} = \frac{W_0 - W_P}{c^2}$

- Höhen: $H_P = \frac{W_0 - W_P}{\bar{g}} = \frac{c^2}{\bar{g}} \frac{\Delta f}{f}$

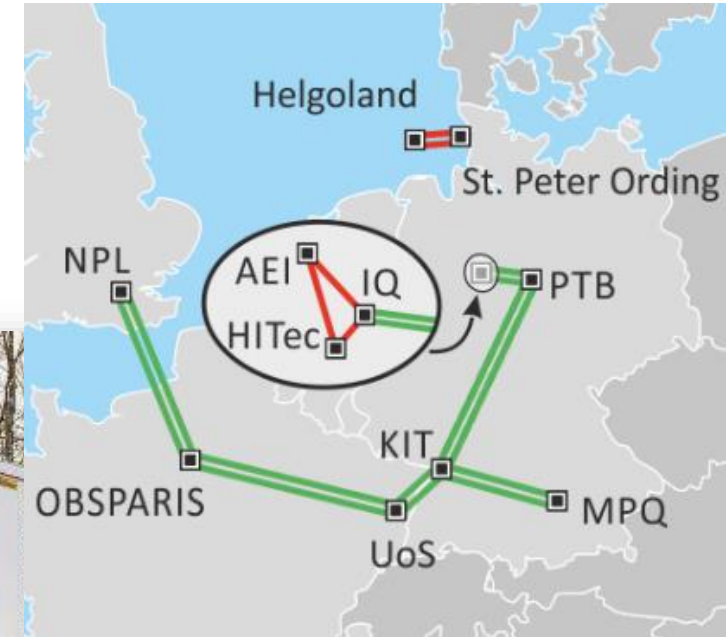
➔ Chronometrische Nivellement über lange Distanzen

➔ Uhrenbasierte Höhensysteme

Uhrennetzwerke



Terra



courtesy of TerraQ

Herausforderungen bestehender Systeme



RÄUMLICHE
UND
ZEITLICHE
AUFLÖSUNG

Uhren



SENSOR-
RAUSCHEN

Uhren



HINTERGRUND-
MODELLE



DATEN-
VERFÜGBARKEIT

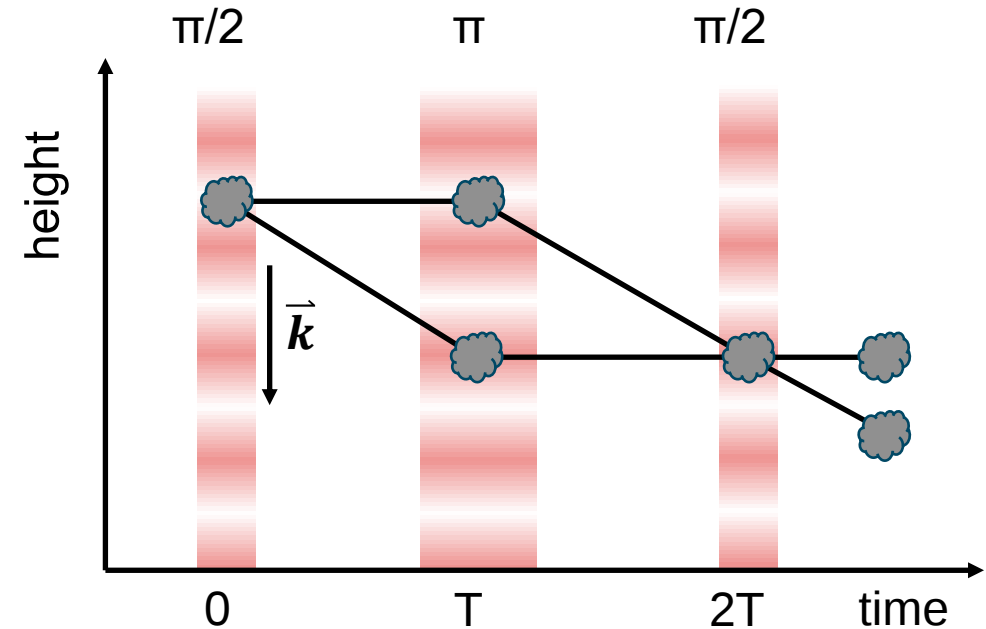
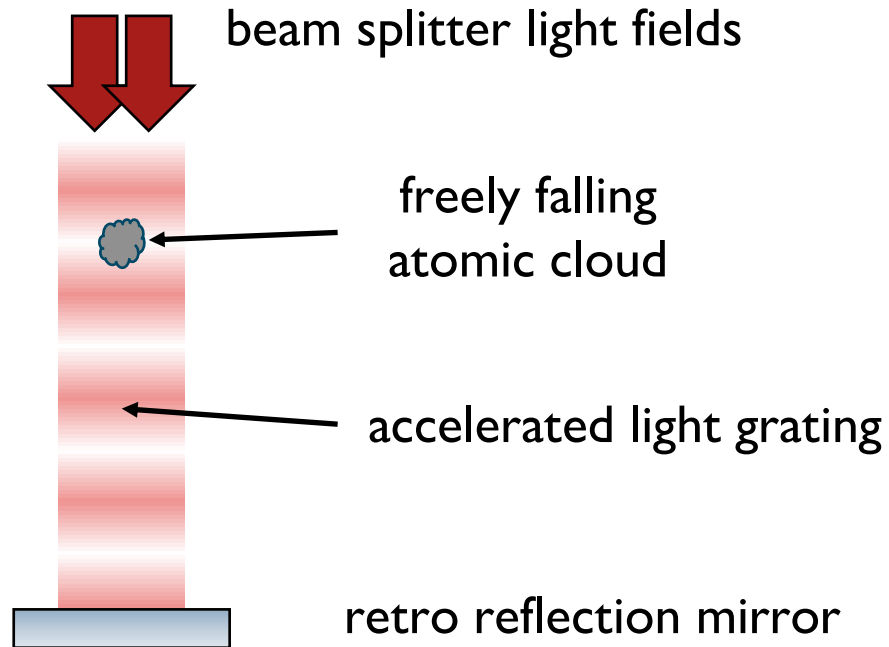
Uhren



ATOMINTERFEROMETRIE

Atominterferometrie

Atome im freien Fall in einer Mach-Zehnder $\pi/2 - \pi - \pi/2$ Pulsgeometrie:



courtesy of Christian Schubert

Beschleunigung $\vec{a}$: $\phi_{acc} = \vec{k} \cdot \vec{a} T^2$

Atominterferometrie in der Geodesie

Quantum gravimeter



from Heine et al. 2020

Absolutgravimeter

- transportabel
- driftfrei
- miniaturisierbar

VLBAI



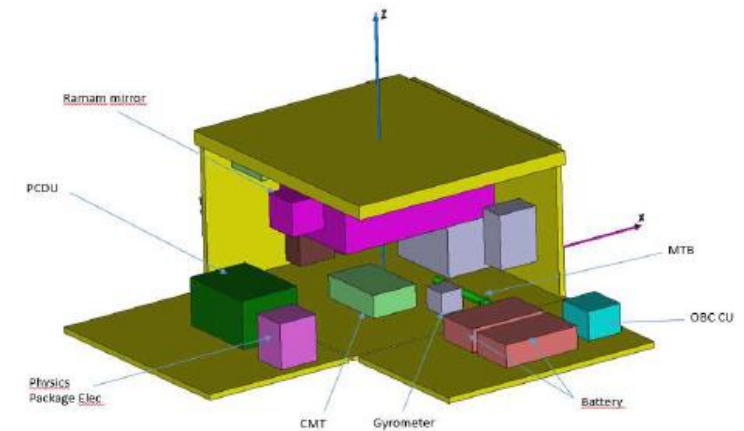
from Schilling et al. 2020

Absolut- gravimeter

- stationär
- driftfrei
- Langzeitstabile
Schwere-
referenz

CARIOQA

Cold **A**tomium
Rubidium **I**nterferometer in
Orbit for **Q**uantum
Accelerometry



from Lévêque et al. 2022

CARIOQA - Consortium



CARIOQA-PMP vereint **17 Partner** aus **5 EU Ländern**:



Coordination
CNES and DLR under CNES lead



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Satellite instrument development

*Airbus Defence and
Space, Exail, TELETEL, LEONARDO*



Quantum sensing

*LUH, SYRTE, LP2N, LCAR, ON
ERA, IESL/FORTH*



Space geodesy, Earth sciences

LUH, TUM, POLIMI, DTU



Technical University
of Denmark



Technische Universität München



POLITECNICO
MILANO 1863



Leibniz
Universität
Hannover

Impact maximization and impact assessment

*FORTH/ PRAXI Network,
G.A.C. Group*

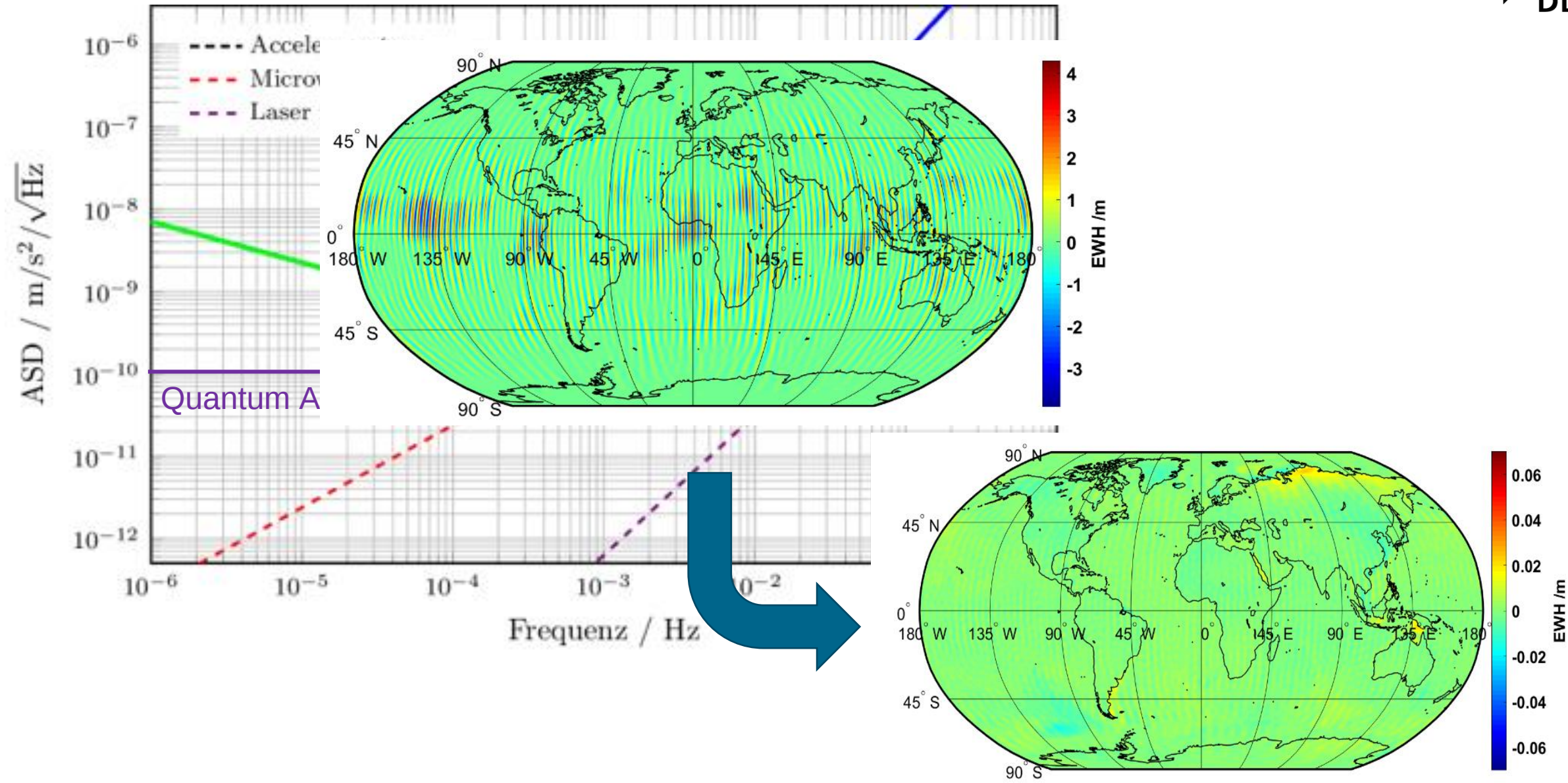


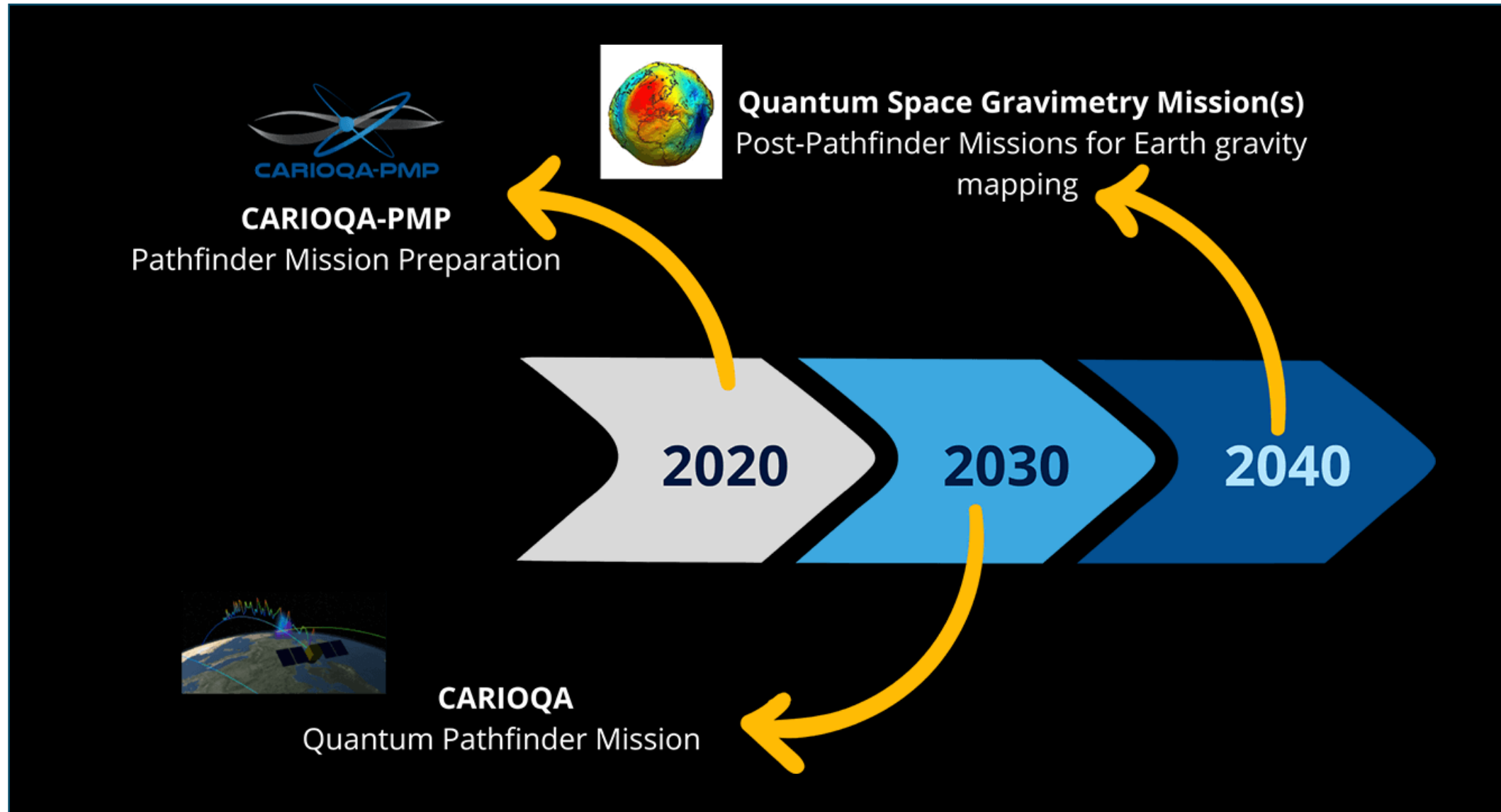
FOUNDATION FOR RESEARCH AND TECHNOLOGY - HELLAS



G.A.C. GROUP
Innovation & Performance For Impact







Herausforderungen bestehender Systeme



RÄUMLICHE
UND
ZEITLICHE
AUFLÖSUNG

Uhren



CAI



SENSOR-
RAUSCHEN

Uhren



CAI



HINTERGRUND-
MODELLE



DATEN-
VERFÜGBARKEIT

Uhren



CAI

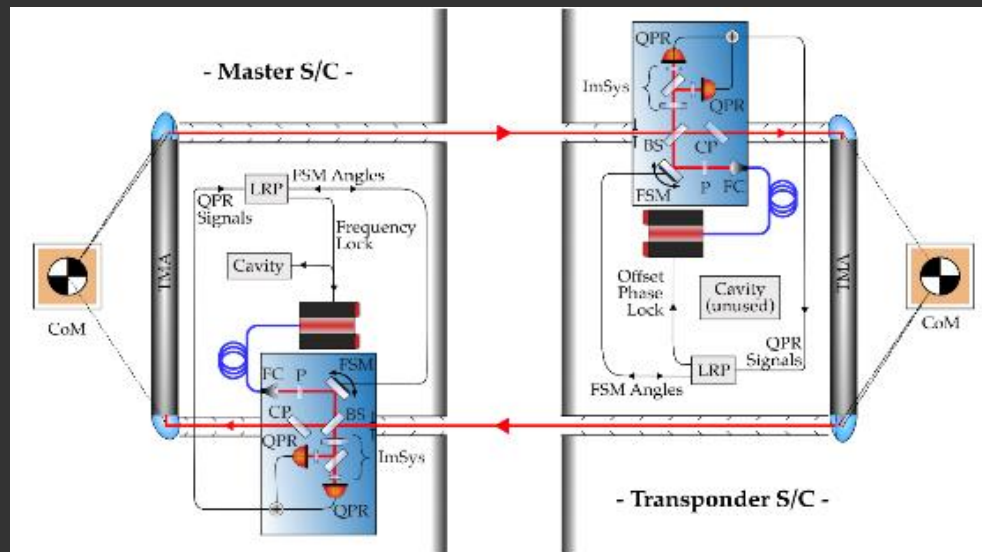


A blurred background image showing a laser interferometry setup. A bright red laser beam is visible, reflecting off a mirror and passing through a series of optical components. The setup is mounted on a table, and a person's hand is visible on the right side, adjusting a component.

LASERINTERFEROMETRIE

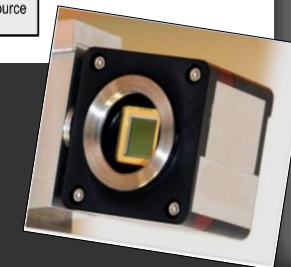
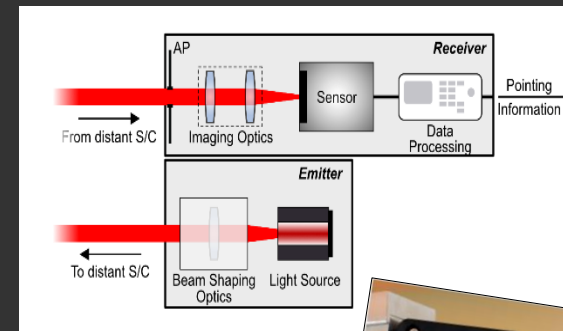
Optische Bank der nächsten Generation

Neue Konzepte für die Miniaturization des Ranging-Systems

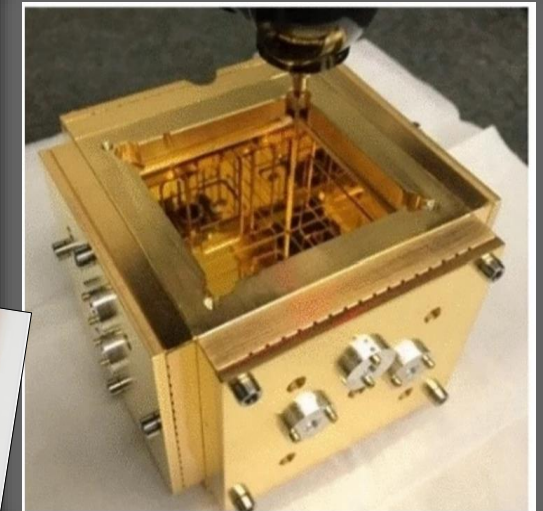


Neue Sensortypen

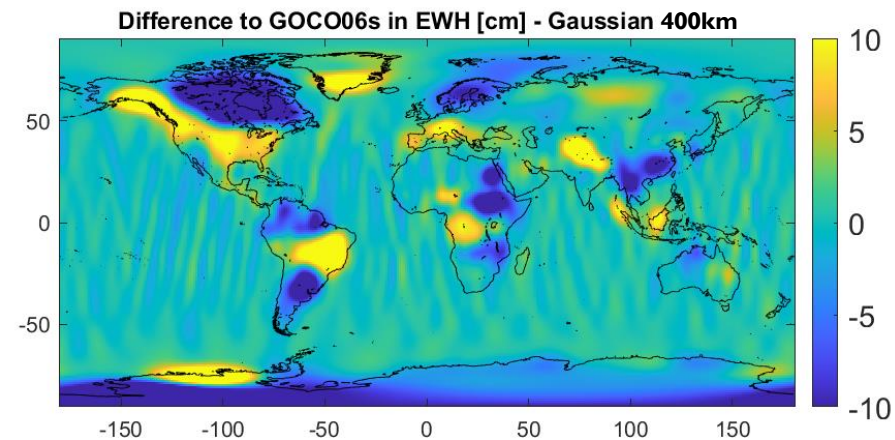
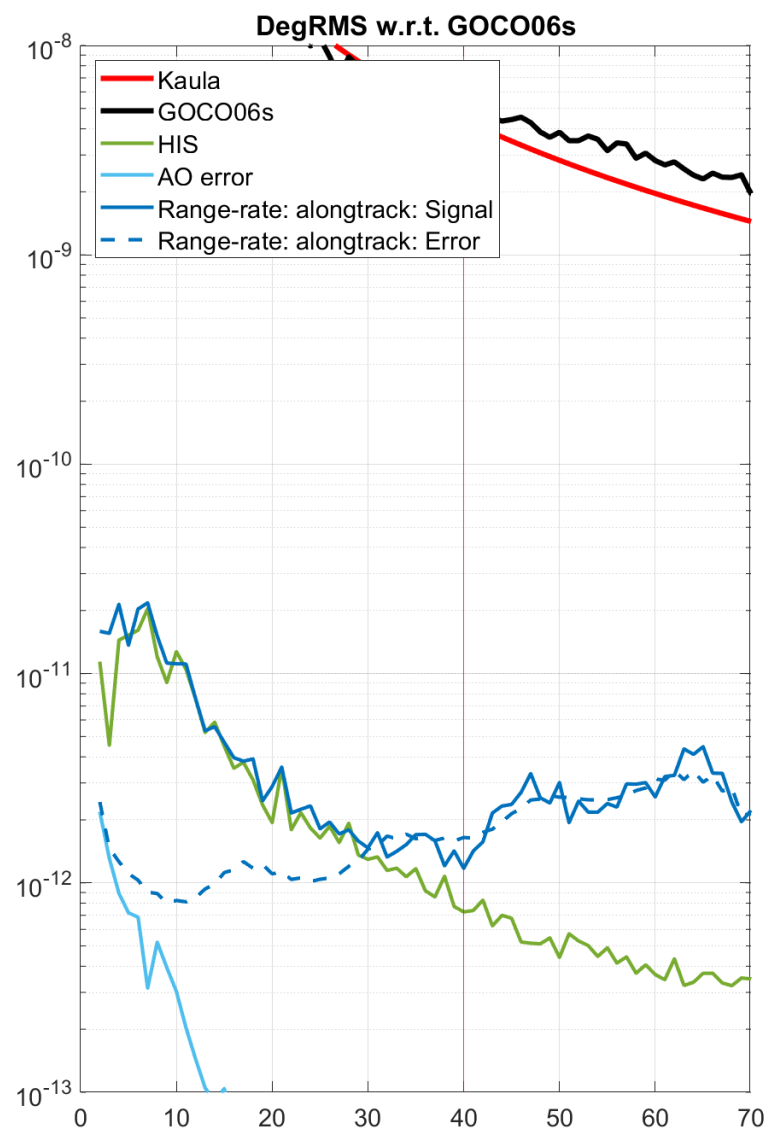
MiniCAS



Gravitational Reference Sensor

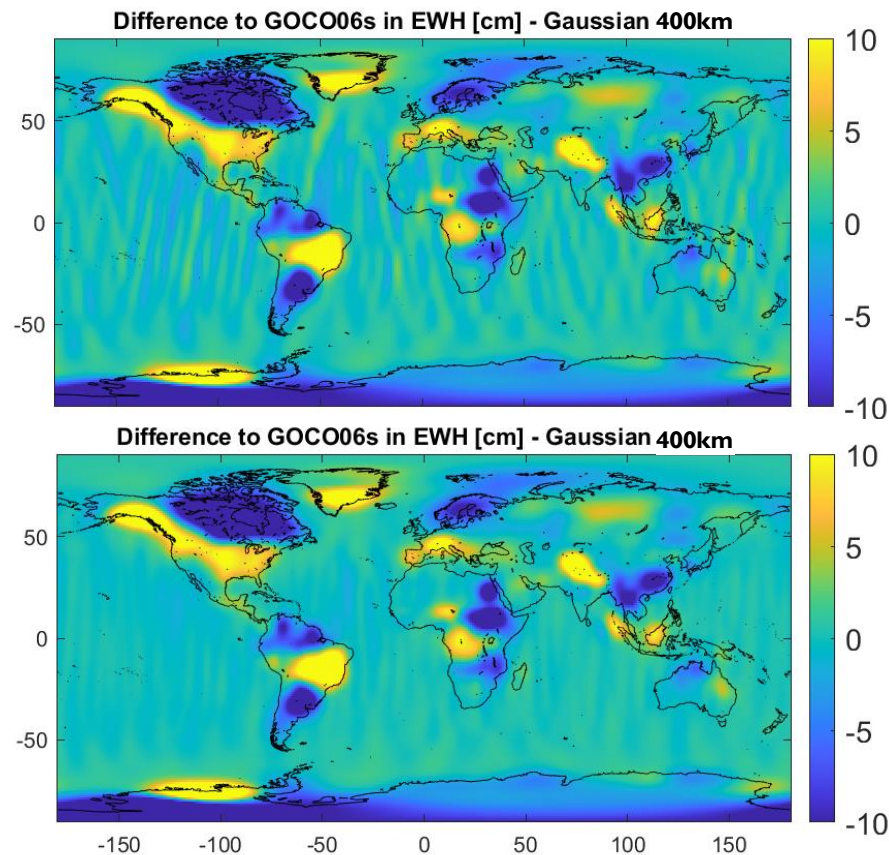
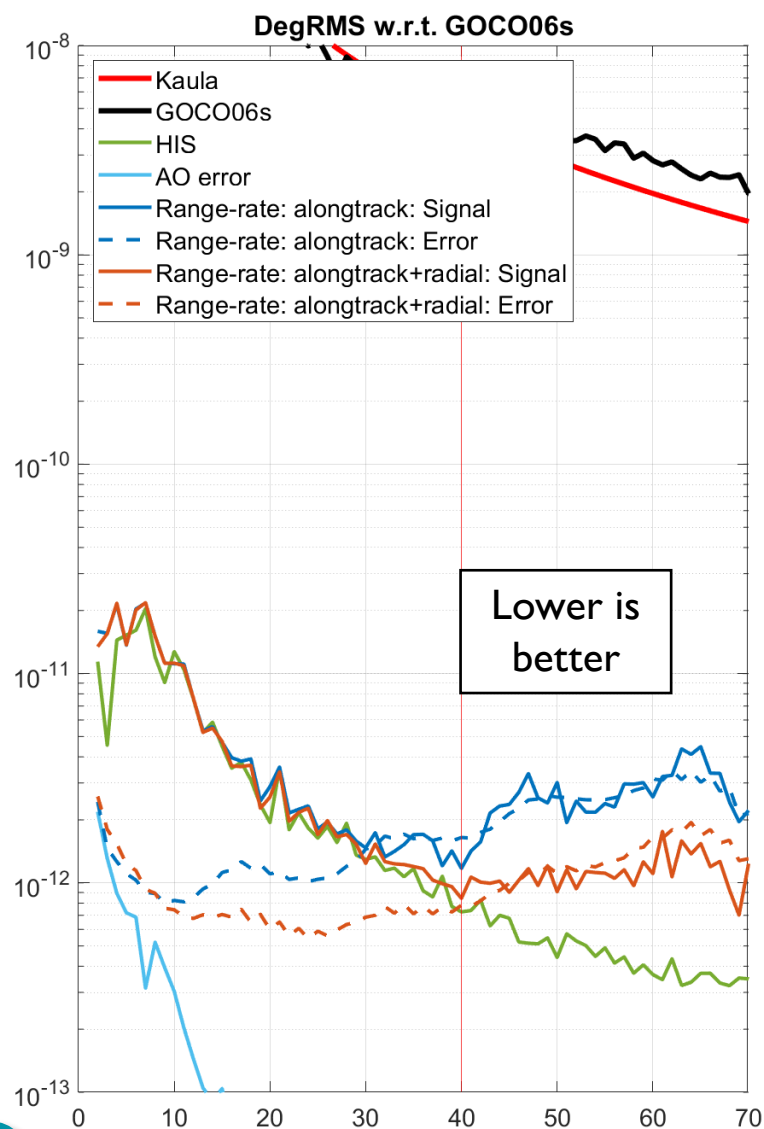


Simulationsstudie

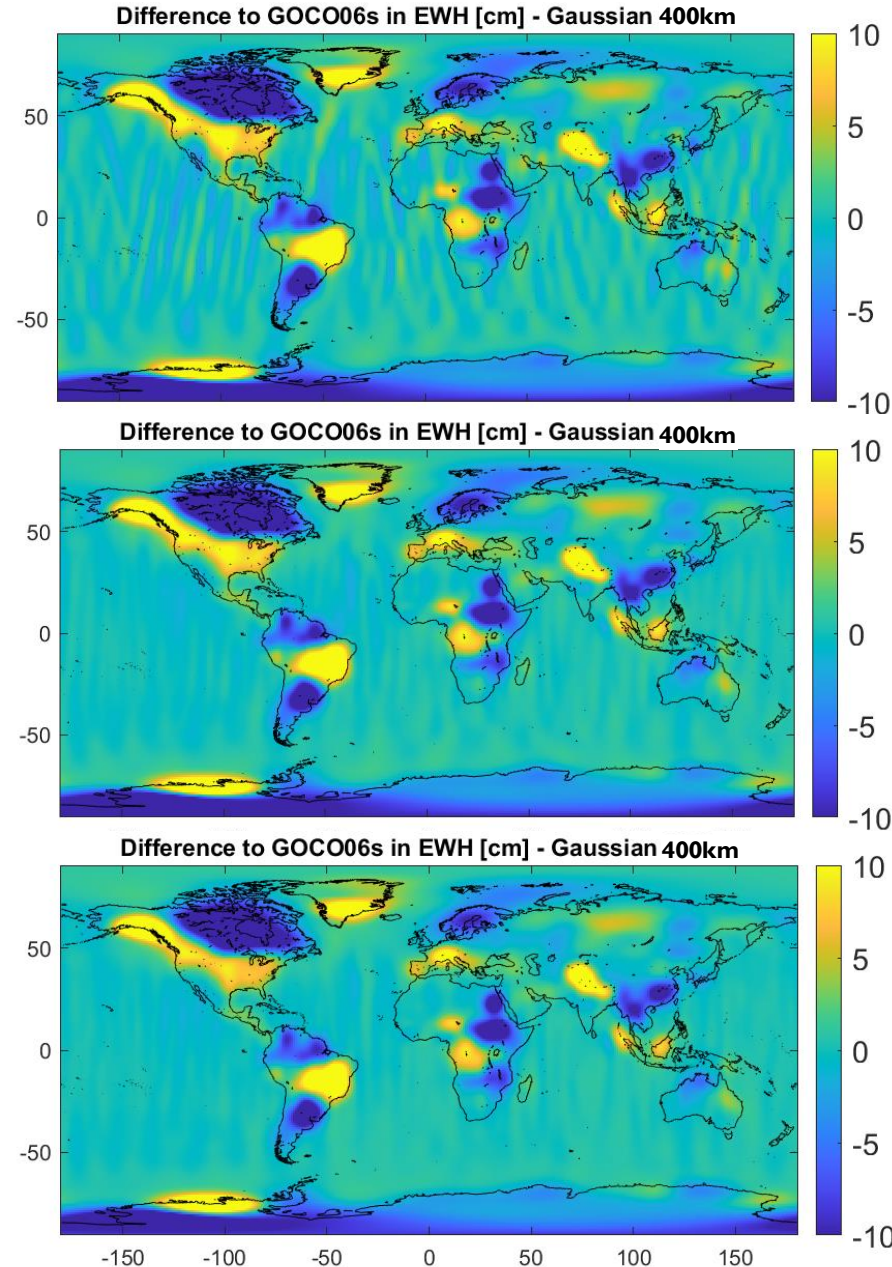
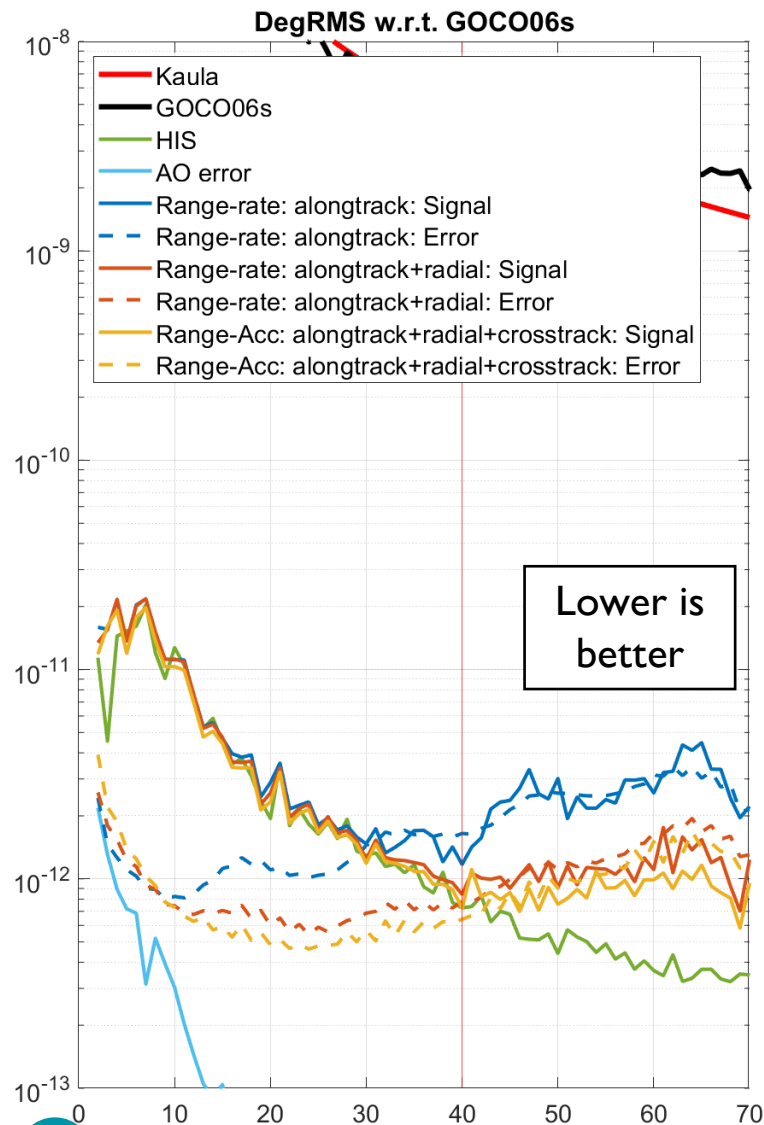


Range-rate
alongtrack

Simulationsstudie



Simulationsstudie



Range-rate
along track

Smoother is
better

Range-rate
along track + radial

Range-acceleration
along-track + radial +
cross-track

Herausforderungen bestehender Systeme



RÄUMLICHE UND ZEITLICHE AUFLÖSUNG

Uhren



CAI



Neue
Konzepte



SENSOR- RAUSCHEN

Uhren



CAI



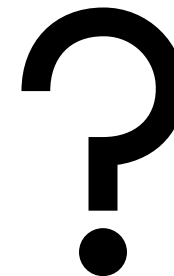
LRI/LRX



GRS



HINTERGRUND- MODELLE



DATEN- VERFÜGBARKEIT

Uhren



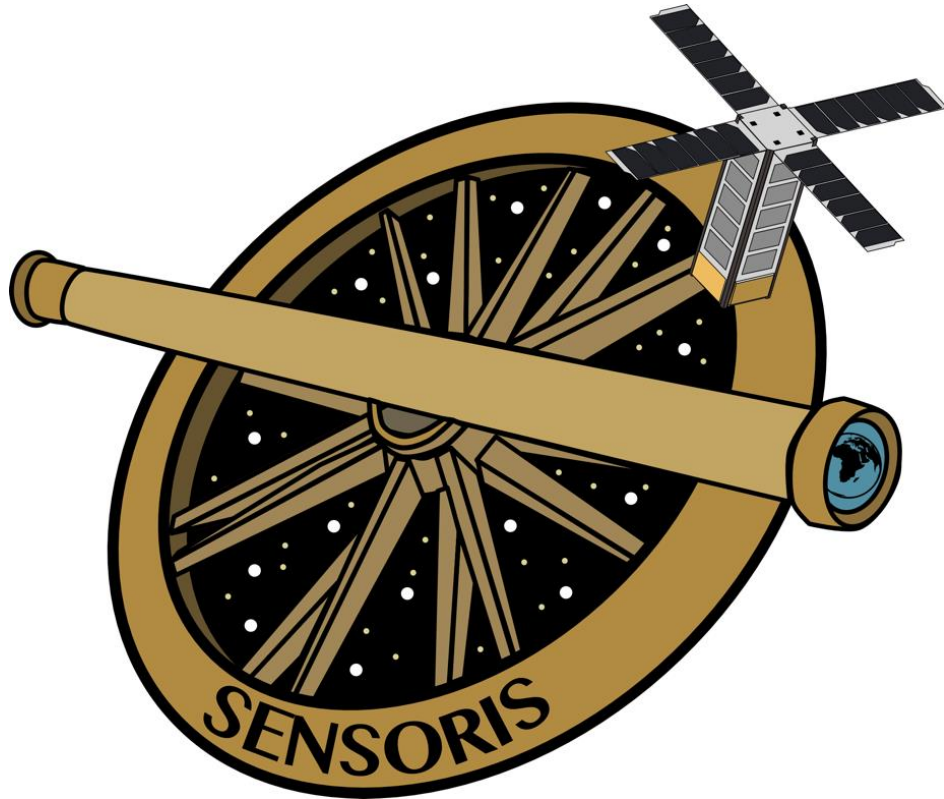
CAI



MiniCAS



SENSORIS

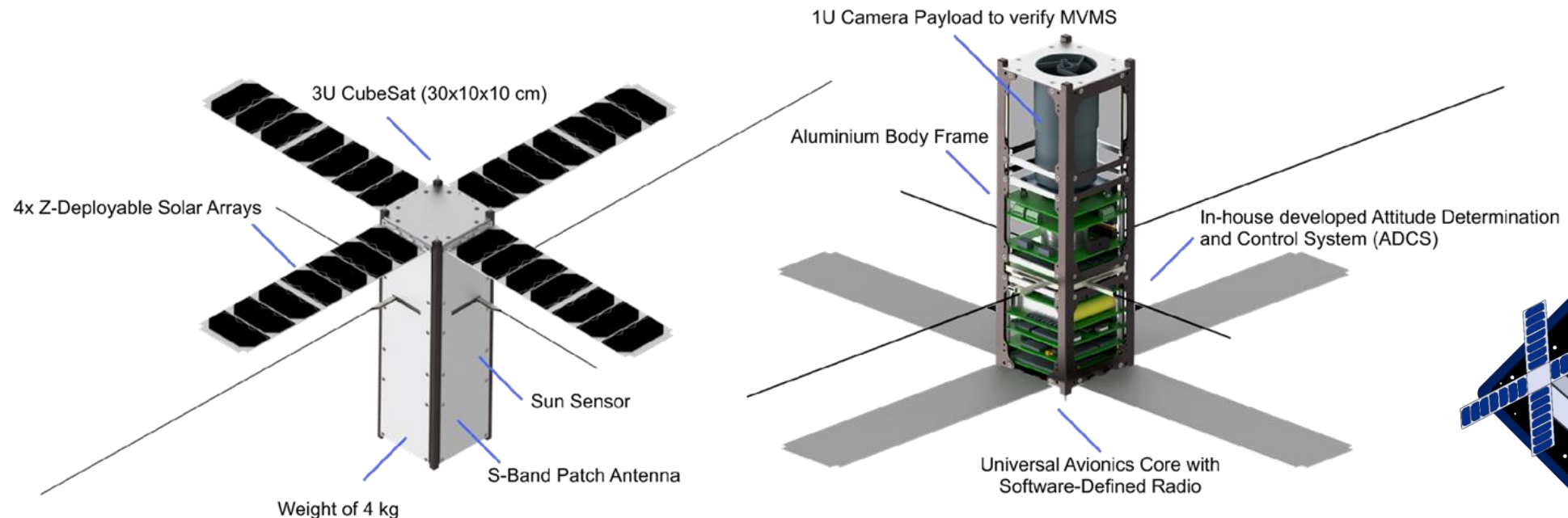


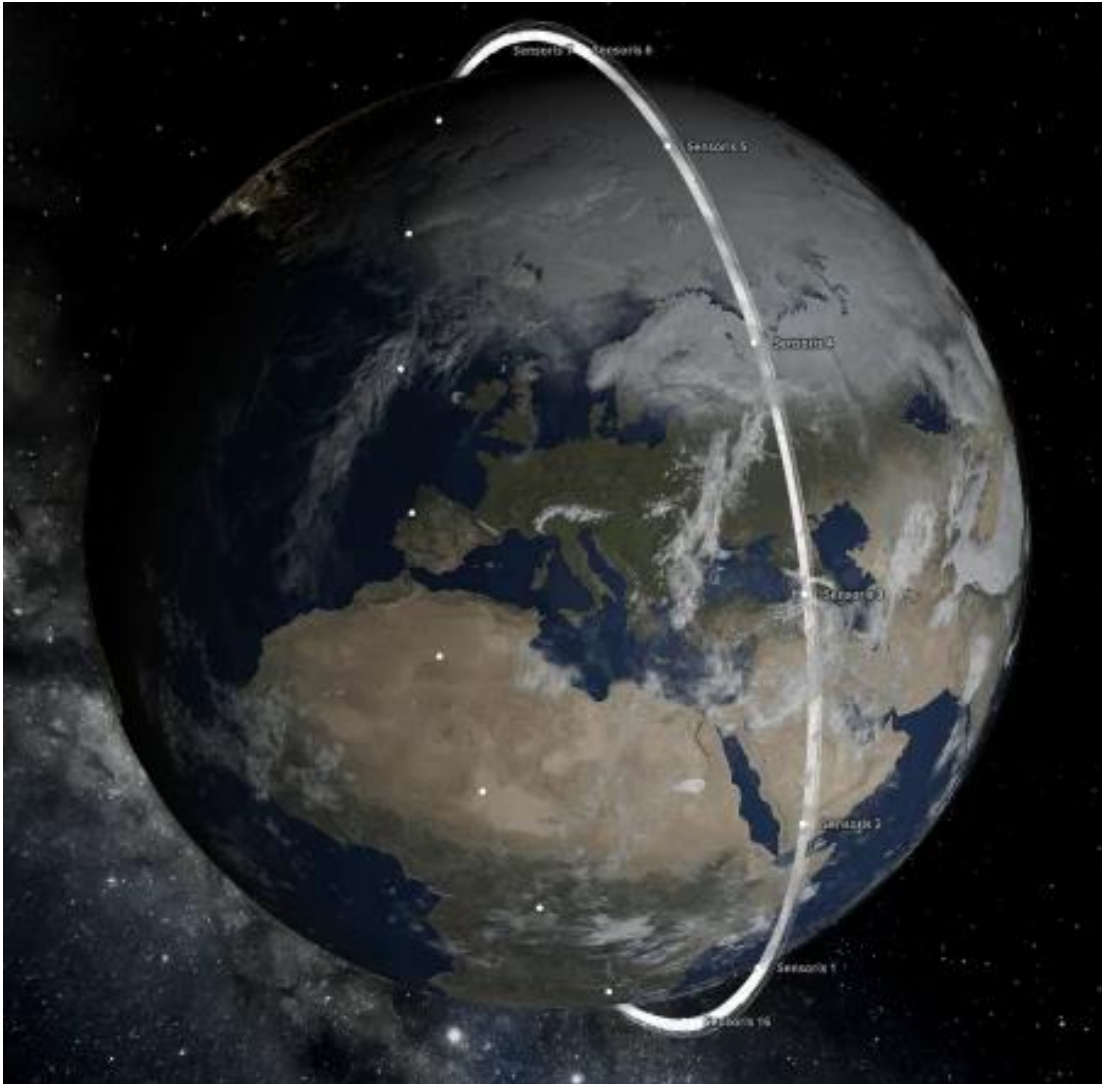
Beobachtung des zeitvariablen Schwerefeldes niedriger Ordnung mit hoher zeitlicher Auflösung durch CubeSats-Konstellationen

- Aufruf der DLR-Raumfahrtagentur zu neuen Satellitenkonzepten für EO
- Missionstyp II (max. 30 Mio € ohne Start)
- New Space Approach (reduzierte ECSS-Standards)
- Anschubfinanzierung für eine Machbarkeitsstudie 200k€
- Start 3 Jahre nach der Machbarkeitsstudie

Technologie

- Basierend auf dem VIBES Pioneer
- Bremens 1. von Studenten gebauter Satellit zur Verbesserung der optischen Leistung von Raumfahrzeugen mit Hilfe von Unterhaltungselektronik
- Eines von acht europäischen Projekten für eine kostenlose Startmöglichkeit durch das DLR
- Der Start ist für 2026 zu einer 500km sonnensynchronen Umlaufbahn geplant





Konzept für die Satelliten

CubeSat-Satellitenplattform (3U)

- Voraussichtliche Kosten pro Satellit: 500K €
- GNSS als primäre Beobachtung
- Beschleunigungsmessung optional

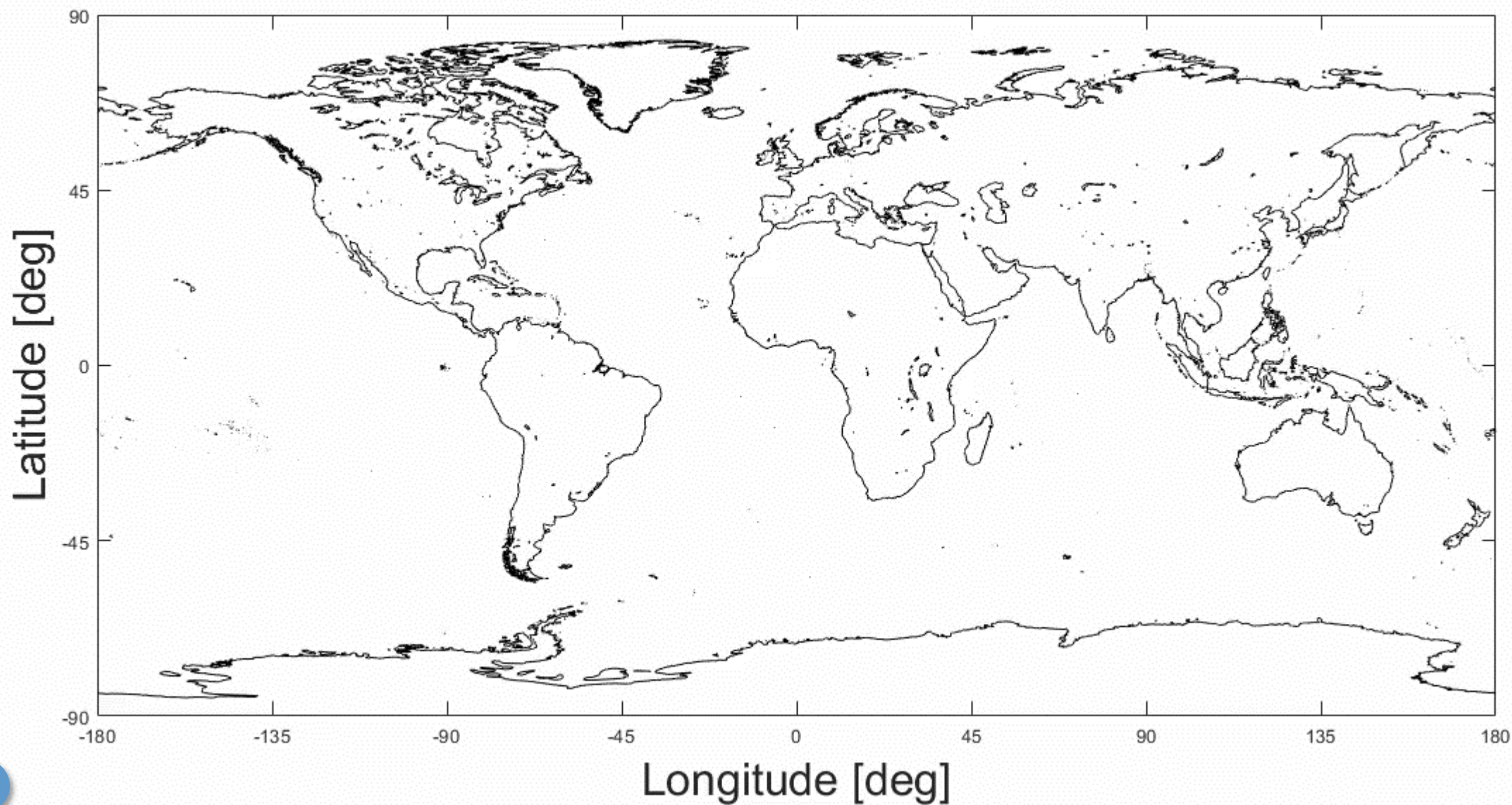
Konzept für die Konstellation:

- HLSST-Tracking
- Niedrige Erdumlaufbahnen ($< 500\text{km}$)
- Polare Umlaufbahn
- 16 Satelliten

Abdeckung der Erde



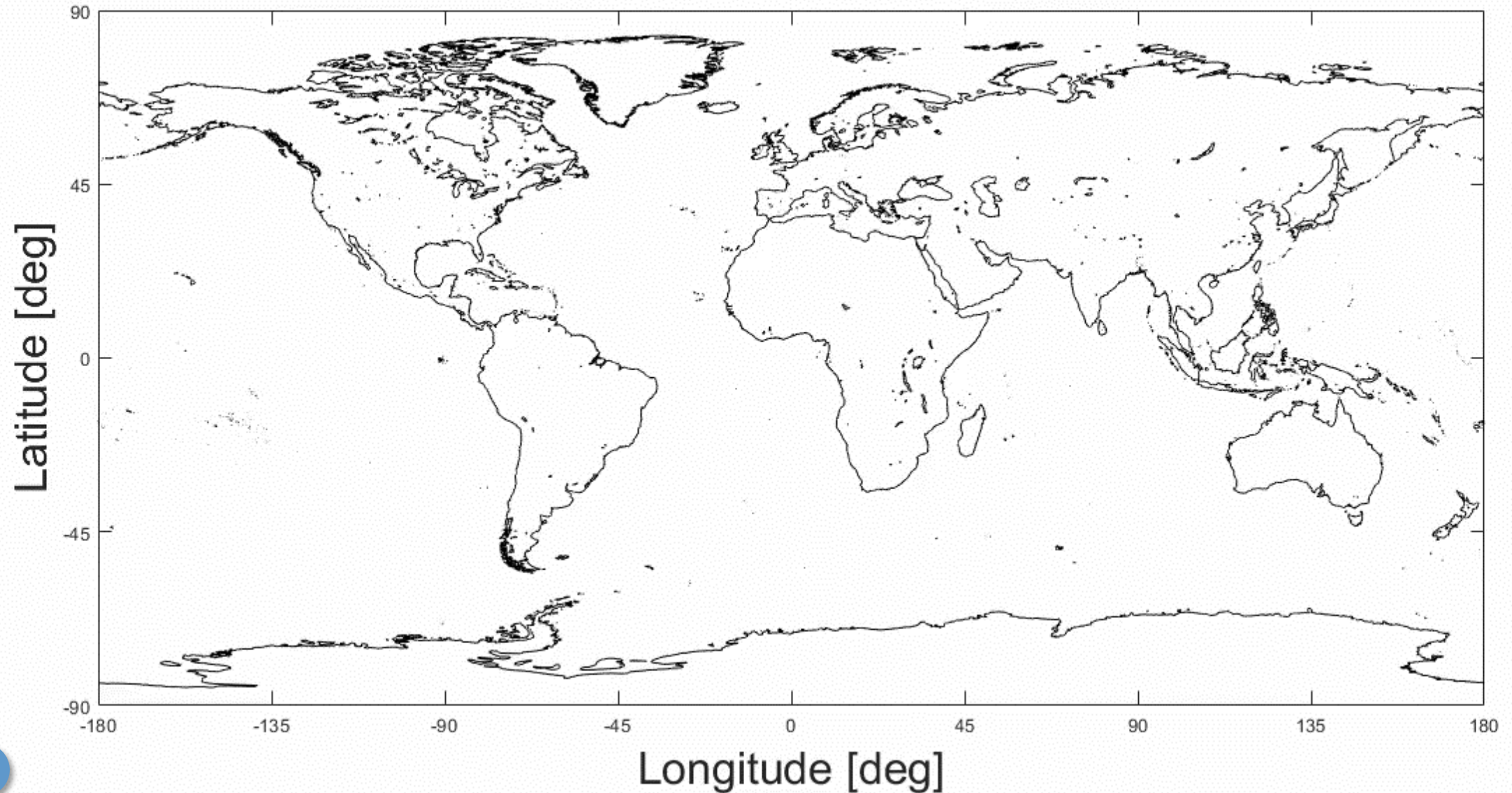
05-Jan-2008 00:01:59



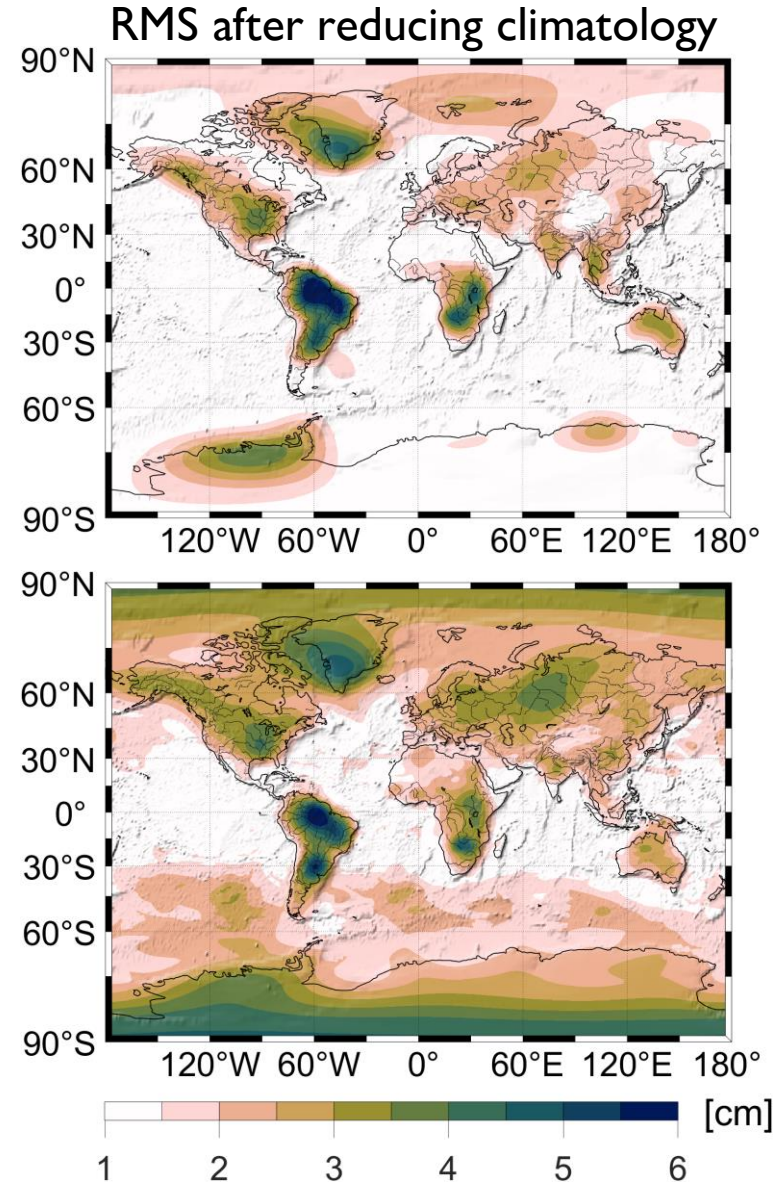
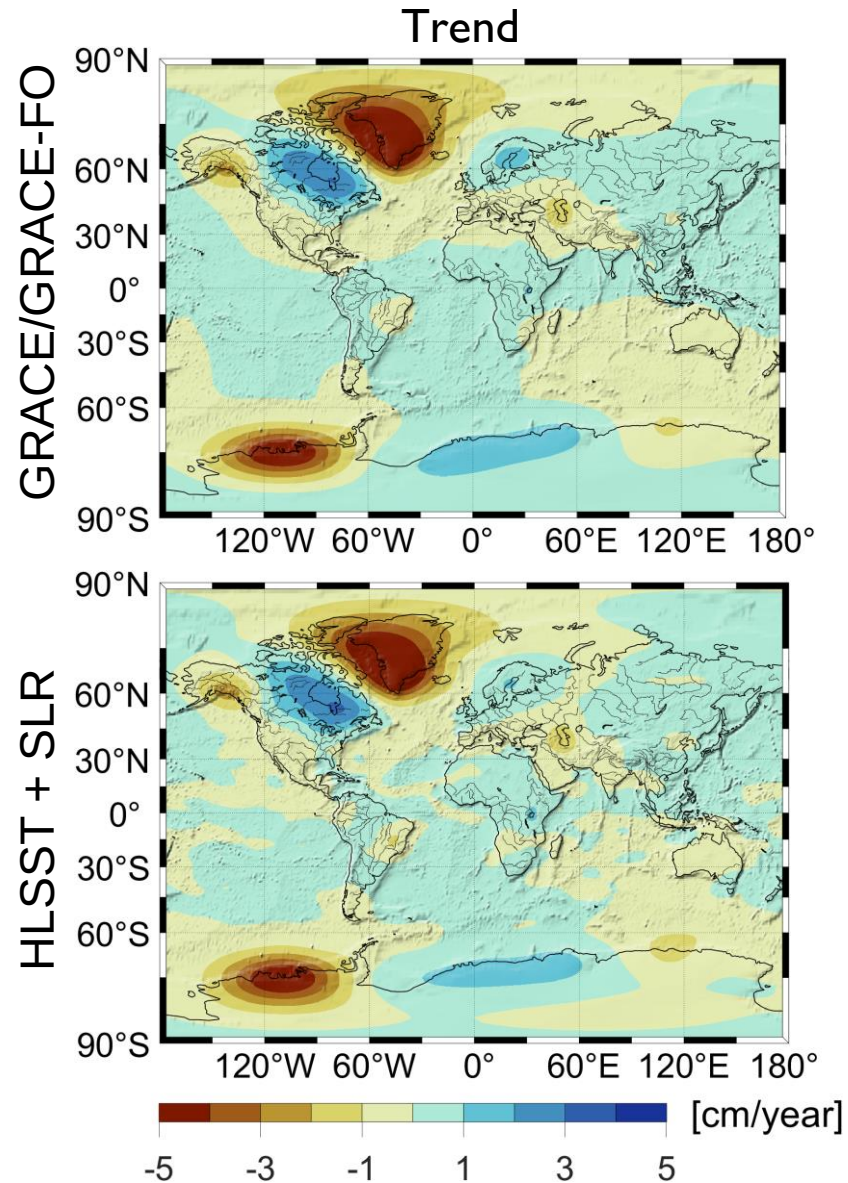
Abdeckung der Erde



01-Jan-2008 00:01:59



HL-SST+SLR



Gaussian filter 700 km

Herausforderungen bestehender Systeme



RÄUMLICHE UND ZEITLICHE AUFLÖSUNG

Uhren



CAI



Neue

Konzepte



SENSOR- RAUSCHEN

Uhren



CAI



LRI/LRX



GRS



HINTERGRUND- MODELLE

Sensoris



DATEN- VERFÜGBARKEIT

Uhren



CAI



MiniCAS



Sensoris



- Energiesysteme sind vom Wassermangel und Extremwetter betroffen.
- Indirekte Effekte, wie z.B. gestörte Wassertransportwege, können ebenfalls die Verfügbarkeit von Energiesystemen beeinflussen.
- Mit Hilfe der Satellitengravimetrie kann die Veränderung der Wasserressourcen flächendeckend beobachtet werden.
- Quantentechnologien versprechen die notwendige Genauigkeitssteigerungen, um eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung zu erreichen.

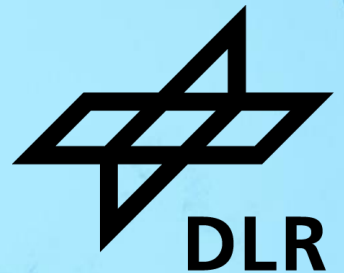


Das Schwerefeld zu beobachten heißt das Klima zu beobachten:
der Schlüssel für ein besseres Ressourcenmanagement



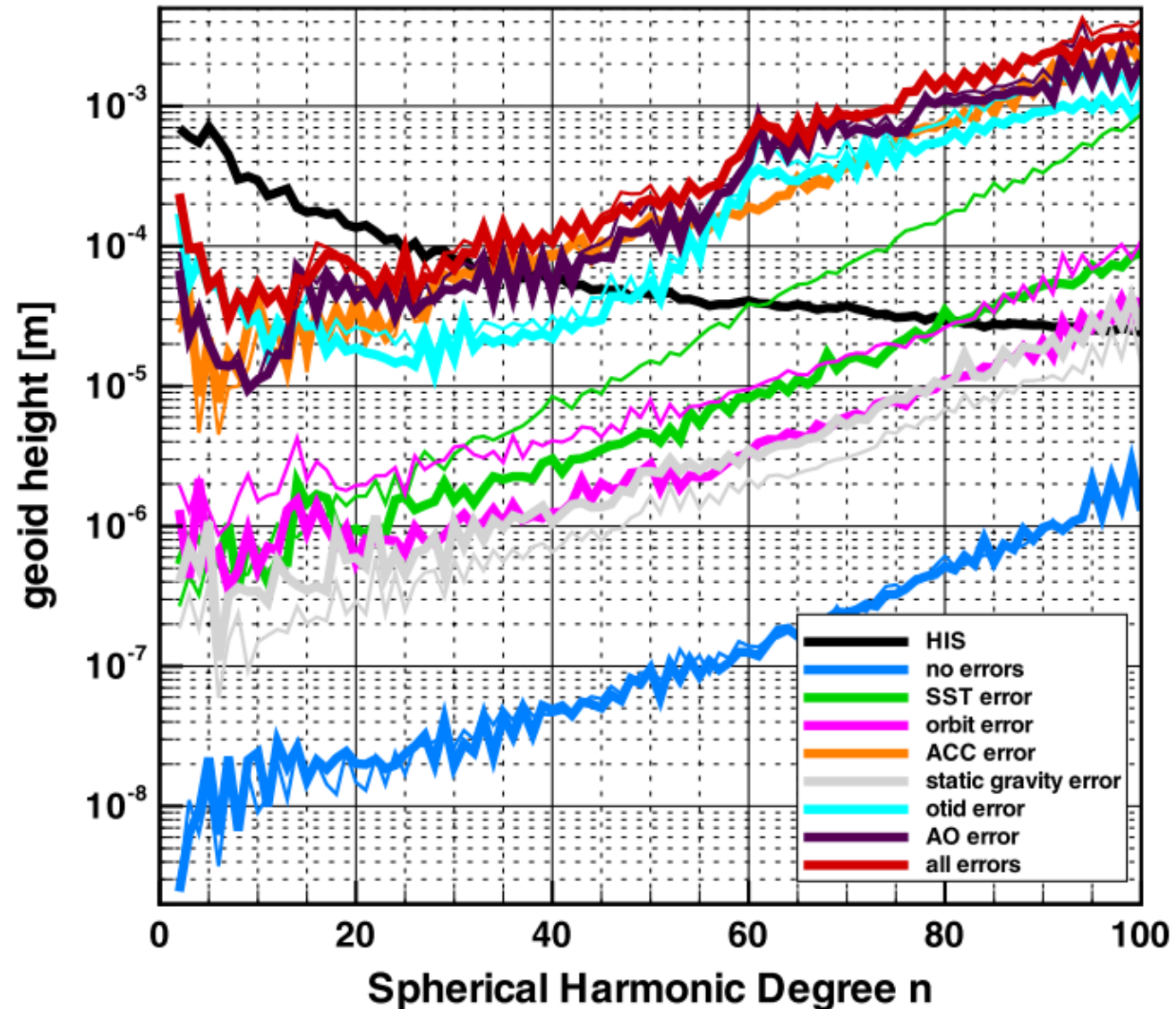
VIELEN DANK

Matthias Weigelt (matthias.weigelt@dlr.de)



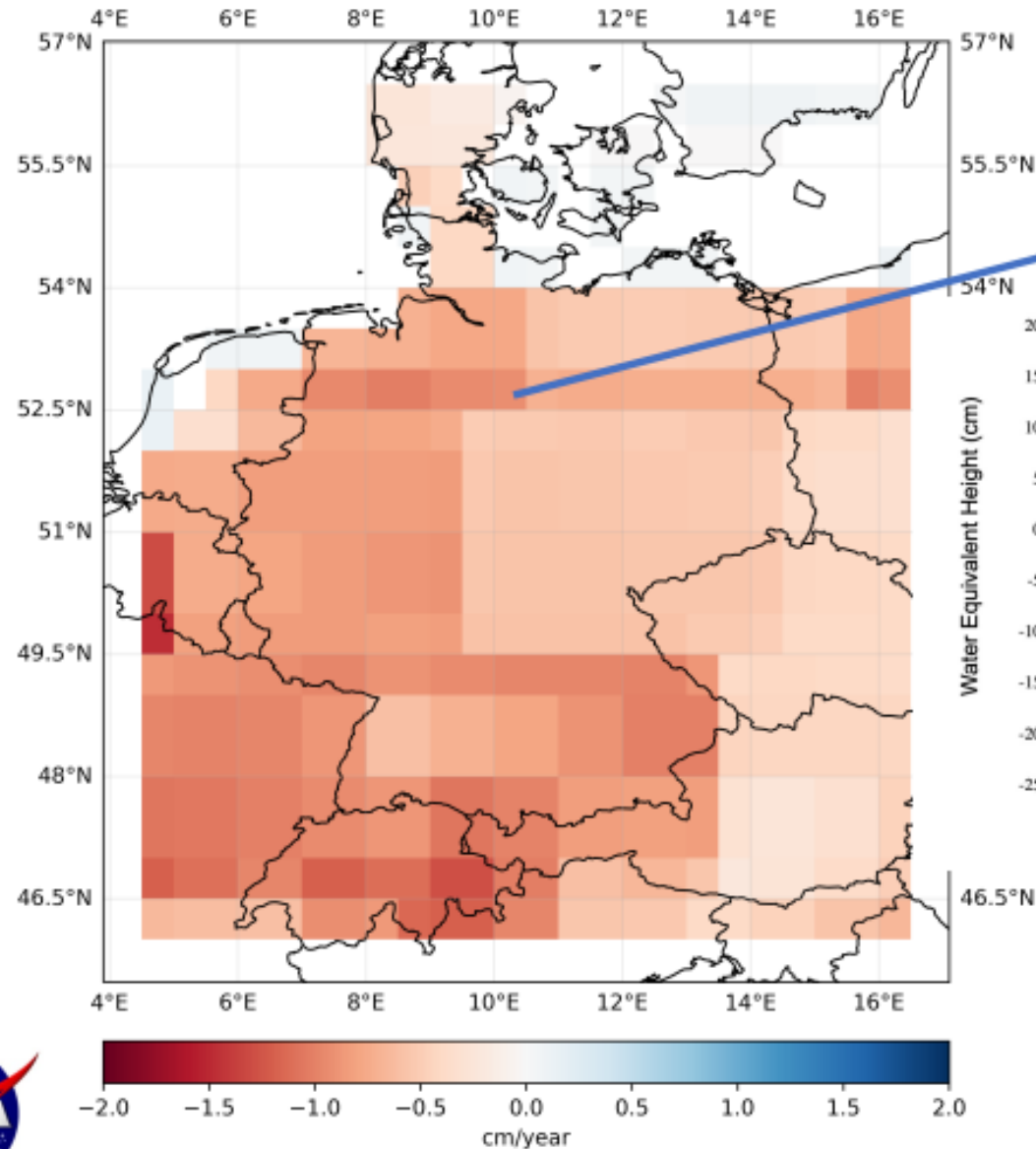
Limitations

Fig. 10 Degree amplitudes in terms of geoid height error for May 2021 for different individual instrument and model errors (see legend). The *thin* and *bold* lines show the results obtained with MWI and LRI, respectively. The *blue curve* shows the numerical accuracy of the full-scale simulations (no errors applied) which is about 3 orders of magnitude below the current GRACE-FO error level. The *black line* depicts the monthly mean HIS signal

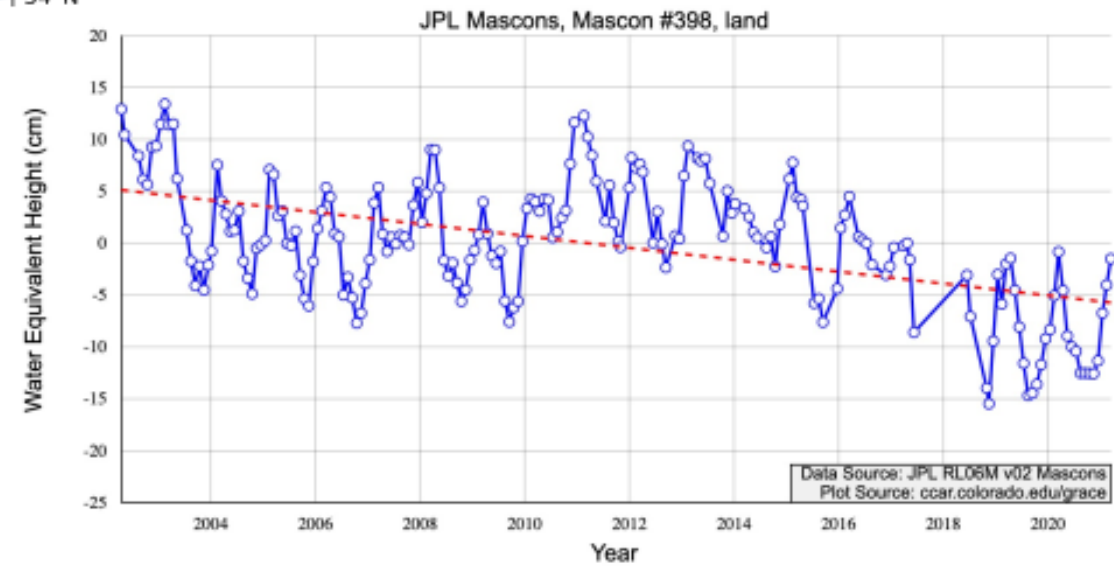


Flechtner, Frank; Neumayer, Karl-Hans; Dahle, Christoph; Dobslaw, Henryk; Fagiolini, Elisa; Raimondo, Jean-Claude; Güntner, Andreas (2016):
What Can be Expected from the GRACE-FO Laser Ranging Interferometer for Earth Science Applications?
In: A. Cazenave, N. Champollion, J. Benveniste und J. Chen (Hg.): Remote Sensing and Water Resources, Bd. 37.
Cham: Springer International Publishing, S. 263–280.

Trend in TWS



Wasserverlust Lüneburg seit 2002



The carbon cycle in sight ...



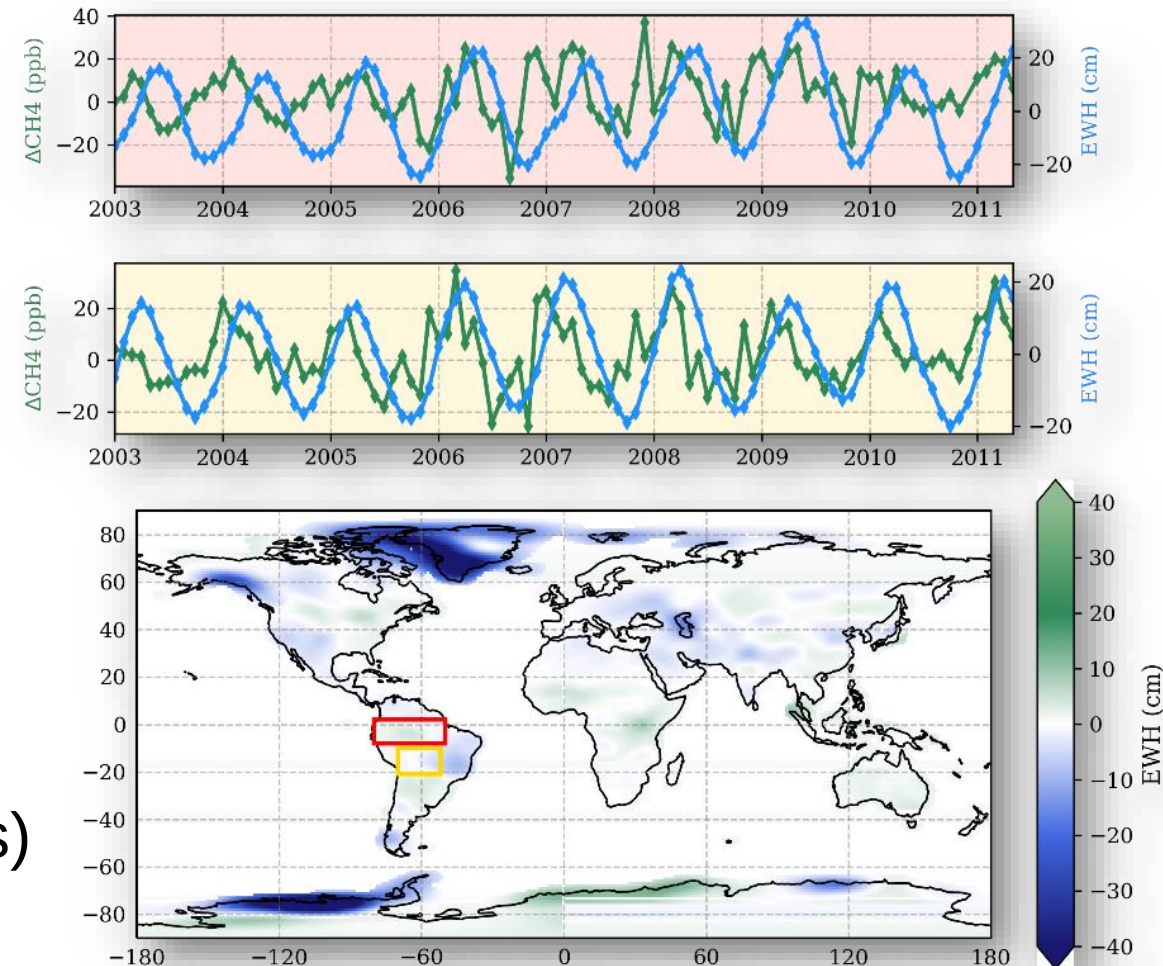
Wetlands are the largest natural Methan (CH_4) source

Project:

*Wechselwirkung zwischen
Kohlenstoff- und Wasserkreislauf*

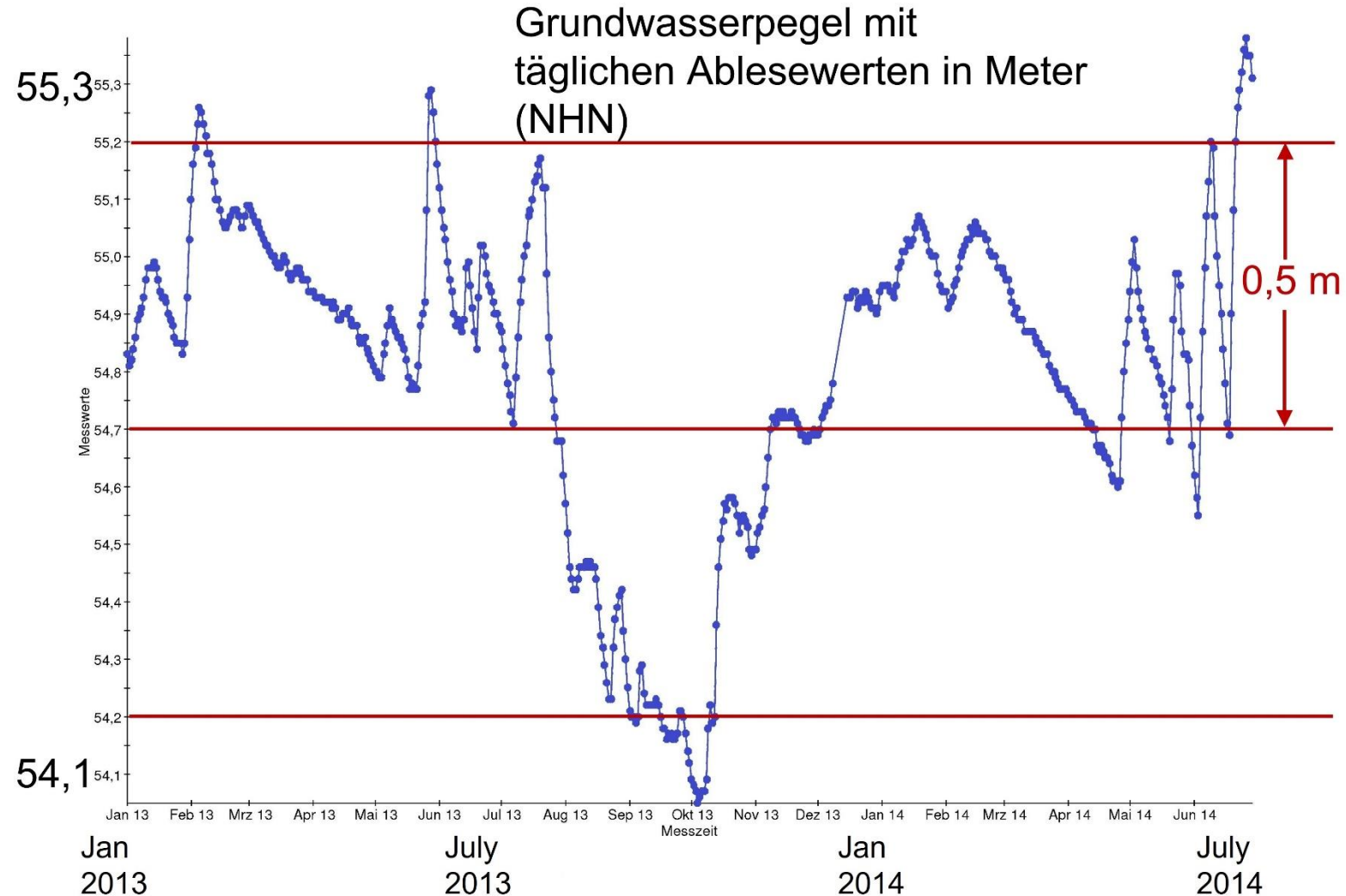


CH_4 is produced during
anaerobic decomposition (Methanogenesis)



Klemme et al. 2022

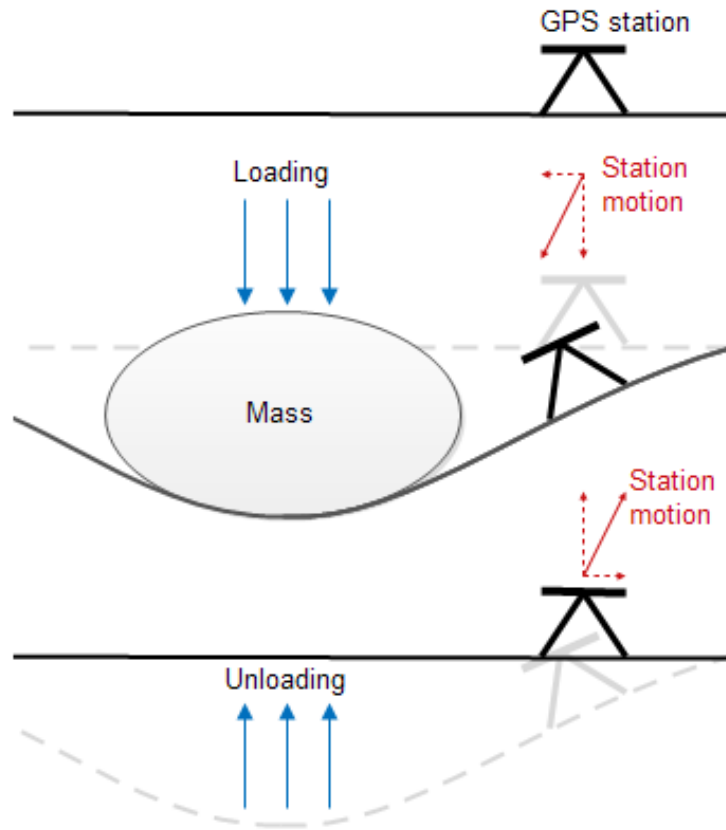
Test der Grundwasserüberwachung mit Feldgravimetrie im Beregnungsgebiet Uelzen



Porenvolumen 30%
($P=0.30$), GW-Spiegel
Abnahme $\delta H = 0.1 \text{ m} \rightarrow$
Schwereeffekt 13 nm/s^2

**Instrumentelle
Messunsicherheit
von 10 nm/s^2
benötigt!**

Nutzung von Auflastbeobachtung



GNSS

- Verteilung ortsabhängig
- Tägliche Koordinaten

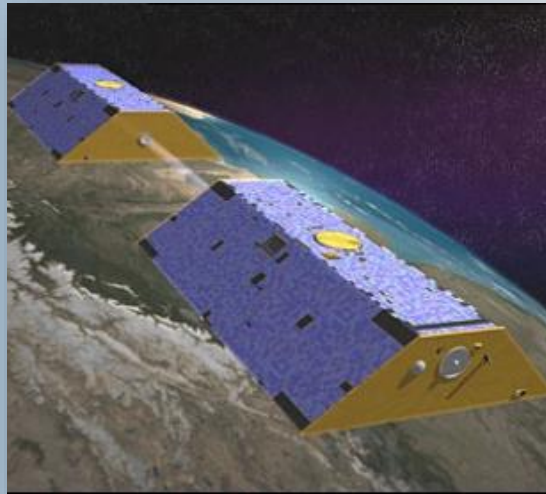
SAR / InSAR

- Hohe räumliche Auflösung
- Zeitliche Auflösung variiert



Spatial scales

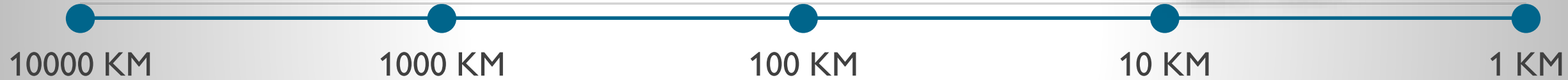
Large scales



Medium scales



Small scales



Sensorkombination

Modelling von Massenvariationen auf allen räumlichen und zeitlichen Skalen

