Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin *144 (2020), 25–49*

Roland Pail (MLS)

Die Vermessung des Klimawandels – Geodäsie, Erdsystem und Klima

Kurzfassung

Moderne Methoden der Satellitengeodäsie sind in der Lage, kleinste Veränderungen im System Erde direkt und mit hoher Genauigkeit zu beobachten. Damit wird es auch möglich, klimainduzierte Signale zu quantifizieren. Beispiele dafür sind langzeitliche Veränderungen im globalen Wasserkreislauf, das Abschmelzen von Eismassen oder Variationen des Meeresspiegels. Diese Messdaten und daraus abgeleitete geodätische Produkte stellen daher eine wichtige Grundlage für zentrale Teile der Weltklimareports und politische Entscheidungsprozesse dar. Eine begleitende realistische Abschätzung von Unsicherheiten ist zudem eine Grundvoraussetzung für die Zuverlässigkeit von Vorhersagen. Eine Fortführung dieser Messzeitreihen ist von hoher Wichtigkeit, um Klimatrends noch robuster schätzen und natürliche von anthropogenen Signalen des Klimawandels trennen zu können.

1. Die Rolle der Geodäsie für die Erforschung des Systems Erde

Die Geodäsie ist nach Friedrich Robert Helmert die „Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche“. Dies umfasst die Bestimmung a) der geometrischen Figur der Erde, b) der Orientierung der Erde im Weltraum, und c) des Erdschwerefelds. Abbildung 1 zeigt diese drei Grundpfeiler der modernen Geodäsie. Das Thema „Geometrie und Kinematik“ umfasst die hochgenaue Bestimmung von Koordinaten und deren zeitliche Veränderungen. Nachdem mehr als zwei Drittel der Erdoberfläche von Ozeanen bedeckt ist, kümmert sich die Geodäsie aber auch um die hochgenaue Vermessung der Ozeanoberfläche. Das Thema „Rotation“ befasst sich mit der Tatsache, dass unsere Erde recht unregelmäßig rotiert. Das betrifft sowohl die Rotationsgeschwindigkeit, d. h. nicht jeder Tag ist gleich lang, als auch die Orientierung der Rotationsachse im Raum. Der dritte Grundpfeiler „Schwerefeld“ vermisst die Gravitationswirkung von Massen und deren Veränderungen.

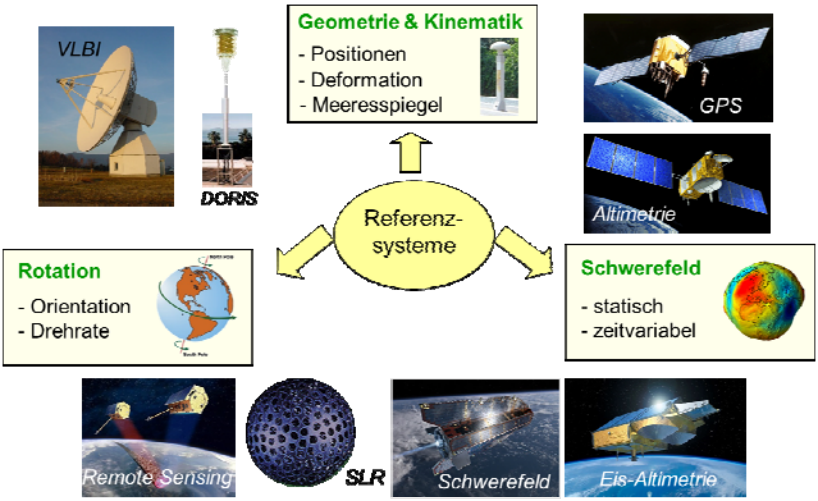

Abb. 1: Grundpfeiler der Geodäsie und geodätische Beobachtungstechniken

Wo ist nun der Konnex zu Erdsystem und Klima? Wir wissen, dass unsere Erde kein starrer, sondern ein sehr dynamischer Planet ist, auf dessen Oberfläche und in dessen Inneren Veränderungsvorgänge auf vielen räumlichen Skalen (z. B. von der kleinen Flussmündung bis zum globalen Wasserkreislauf) und zeitlichen Skalen (z. B. vom instantanen Erdbeben bis zur behäbigen Plattentektonik) ablaufen.

Abbildung 2 zeigt exemplarisch einige dieser Prozesse. Im Bereich der kontinentalen Hydrologie bildet sich der gesamte globale Wasserkreislauf mit seinen Elementen Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Wasserspeicherung/Grundwasser ab. Dieses Thema ist von besonderer gesellschaftlicher Relevanz, weil damit unmittelbar Fragen der Trink- und Brauchwasserverfügbarkeit verknüpft sind. Die Frage abschmelzender Eismassen in Grönland und der Antarktis hat aktuelle hohe Medienpräsenz, da die Kryosphäre einen sehr sensitiven Indikator für Klimaveränderungen darstellt. Die Ozeane spielen im System Erde eine besondere Rolle als riesiger Speicher von Wärme und Kohlendioxid. In den Ozeanen findet aber auch ca. 40 % der globalen Umverteilung von Energie aus den Äquatorregionen in Richtung Pole statt (die restlichen ca. 60 % bewerkstelligt die Atmosphäre). Als Beispiel sei hier der Golfstrom genannt, der Wärme vom Golf von Mexiko in sehr hohe nördliche Breiten transportiert und damit quasi eine Zentralheizung für Europa darstellt, denn ohne Golfstrom wäre es in Europa im Jah-

resmittel um 4–5 °C kühler. Im Bereich der festen Erde treiben Konvektionsbewegungen im Erdmantel der Plattentektonik von ca. 80–120 km dicken Lithosphärenplatten an. Auswirkungen an der Oberfläche sind Erdbeben und Vulkanismus.

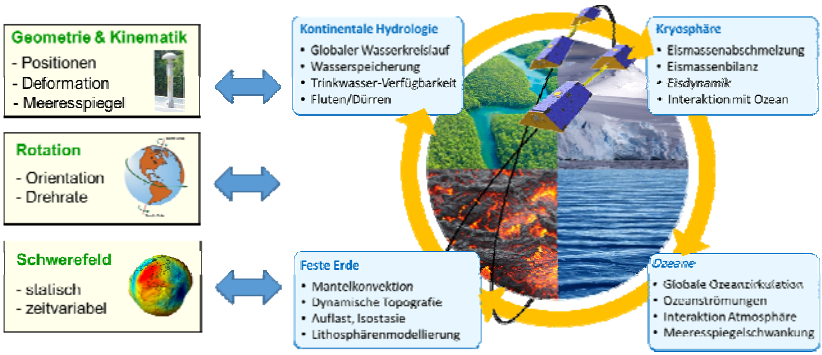

Abb. 2: Komponenten des Erdsystems und deren Verknüpfung mit geodätischen Beobachtungen

All diese Prozesse gehen mit Deformationen einerseits und Massenverlagerungen andererseits einher und spiegeln sich deshalb auch in den Zeitreihen geodätischer Messungen wider. Nehmen wir als einfaches Beispiel ein Erdbeben, das zu Verschiebungen an der Erdoberfläche von mehreren Metern führen kann. Darüber hinaus kommt es dabei auch zu großen Massenverlagerungen, die sich einerseits in der Veränderung des Erdschwerefeldes widerspiegeln, andererseits aber auch zu veränderten Trägheitsmomenten des Erdkörpers und somit Anomalien im Rotationsverhalten der Erde führen. Ein ähnliches Beispiel kann man für veränderliche Wasser- oder Eismassen durchspielen. Masseneinträge führen zu vergrößerten Auflasten auf die Erdoberfläche und somit Vertikalbewegungen. Dieses Mehr an Masse führt aber auch zu einer Vergrößerung der Schwerebeschleunigung und wiederrum zu einem leicht veränderten Rotationsverhalten der Erde.

Viele diese Signale sind sehr klein oder laufen auf sehr langen Zeitskalen ab. Typische Geschwindigkeiten von Plattenbewegungen sind einige Zentimeter pro Jahr. Dies entspricht in etwa jener Geschwindigkeit, mit der ein menschlicher Fingernagel wächst. Ein anderes Beispiel für sehr kleine Signale ist der globale Meeresspiegelanstieg von ca. 3 mm/Jahr. Daraus ergeben sich schon wesentliche Anforderungen für (geodätische) Messsysteme: Einerseits benötigen wir eine extrem hohe Messgenauigkeit, um diese

kleinen Signale überhaupt detektieren zu können, und andererseits lange Zeitreihen, um auch langfristige Phänomene messtechnisch erfassen zu können.

Die Geodäsie setzt für diese Beobachtungen eine Reihe unterschiedlicher Messtechniken ein. Dabei hat die Ära der Satellitenverfahren seit den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts im wahrsten Sinne des Wortes einen Perspektivenwechsel ausgelöst, weil wir mit Hilfe künstlicher Erdtrabanten geodynamische Phänomene „von oben", auf globalem Maßstab und mit relativ kurzen Wiederholzeiten beobachten können, was davor mit erdgebundenen Methoden in keiner Weise möglich war. Abbildung 1 zeigt exemplarisch einiger dieser geodätischen Raumverfahren und Satellitenmesstechniken. Globale Positionierungs- und Navigationssysteme (*Global Navigation Satellite System* – GNSS) wie das amerikanische *Global Positioning System* (GPS) oder neuerdings auch das europäische Pendant *Galileo* haben nicht nur in der wissenschaftlichen Welt, sondern auch in unserem Alltag Einzug gehalten. Wer nutzt nicht sein Mobiltelefon oder sein Fahrzeug-Navigationssystem zur Ortung und Findung beliebiger Ziele? Mit *Satellite Laser Ranging* (SLR) vermessen wir mittels Lasersignalen den Abstand zu Satelliten, woraus sowohl die Satellitentrajektorie als auch die Koordinaten der Bodenstation mit wenigen Millimetern Genauigkeit bestimmt werden können. Das Verfahren der *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI) beobachtet Laufzeitunterschiede von Radiosignalen, die von weit entfernten Himmelsobjekten, sogenannten Quasaren, ausgesendet werden. Aufgrund deren großer Distanz von 13–14 Milliarden Lichtjahren stellen diese Fixpunkte am Himmel dar, sodass sich damit raumfeste Bezugssysteme realisieren, aber auch die unregelmäßige Rotation der Erde bezüglich des Fixsternhimmels bestimmen lassen. Ein weiteres Verfahren, *Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite* (DORIS), sendet von Bodenstationen aus Radiosignale zu Satelliten, um daraus über die Nutzung des Doppler-Effekts die Satelliten- und Bodenpositionen abzuleiten. Mittels Satellitenaltimetrie vermessen wir mittels Radar- oder Lasersignalen geometrisch die Veränderung von Wasser- und Eisoberflächen. In die Gruppe der Fernerkundungssatelliten fällt beispielsweise das *Satellite Aperture Radar* (SAR), mit dessen Hilfe sich etwa Deformationen der Erdoberfläche nicht nur punktweise wie bei GNSS, sondern flächig ableiten lassen.

Im Folgenden wollen wir uns einige Anwendungsbeispiele ansehen, welche die hohe Messgenauigkeit geodätischer Beobachtungen demonstrieren. Abbildung 3a zeigt die aus den geodätischen Messverfahren GNSS, VLBI, SLR und DORIS abgeleiteten Plattengeschwindigkeiten. Die Länge der

Pfeile skaliert dabei mit der Geschwindigkeit. Man sieht, dass die einzelnen Verfahren untereinander sehr konsistente Ergebnisse liefern. Die Bewegung aller mitteleuropäischer Stationen Richtung Nordosten wird durch die Nordwärts-Drift der Afrikanischen Platte in Richtung Eurasischer Platte verursacht. Abbildung 3b zeigt dagegen die Verschiebung von Stationskoordinaten aufgrund des Tohoku-Erdbebens am 11. März 2011, das als Seebeben einen großen Tsunami ausgelöst hat, aufgenommen von einem sehr dichten GNSS-Netz in Japan. Neben der Verlagerung von mehreren Metern in der Nähe des Epizentrums sieht man in dieser Abbildung, welche die Situation ca. 4.5 Minuten nach dem Bebenereignis darstellt, im Bereich Zentraljapans die Richtung Süden laufende Erdbebenwelle. Mit Hilfe hochgenauer geodätischer Beobachtung können wir also zum einen langsame Prozesse wie Plattentektonik mit einer Genauigkeit von ca. 0.1 mm/Jahr direkt messen, zum anderen aber auch hochdynamische Prozesse wie das Laufen von Erdbebenwellen durch die Erdkruste sichtbar machen.

Die Gruppe der Schwerefeldsatelliten beobachtet mit unterschiedlichen Messkonzepten das Erdschwerefeld und dessen Veränderungen. Sie liefert damit Informationen über Massenverteilung und Massentransportprozesse im Erdsystem. Für die Vermessung des zeitvariablen Schwerefeldes hat sich das Konzept der hochgenauen Abstandsmessung zwischen zwei Satelliten, die auf derselben Bahn in einem Abstand von ca. 200 km die Erde umkreisen, etabliert. Das Messprinzip ist in Abbildung 4 erklärt, in der die beiden Satelliten, nennen wir sie Tom und Jerry, gemeinsam über eine unregelmäßige Massenverteilung wie einen Berg fliegen. Beide Satelliten werden von der zusätzlichen Masse angezogen, aber aus unterschiedlicher Richtung. Der erste Satellit, Jerry, wird gebremst, weil die Masse des Berges „von hinten“ zieht, während der zweite Satellit, Tom, von der Masse beschleunigt wird. Deshalb verändert sich der Abstand zwischen den beiden Satelliten während des Überflugs über die Störmasse: im konkreten Fall verringert er sich. Diesen Abstand messen wir nun mit einer Genauigkeit von einem Hunderttausendsten Millimeter (was kleiner ist als der Durchmesser eines Virus) und haben somit eine Messmethode gefunden, die derart sensitiv bezüglich des Schwerefelds ist, dass wir damit sogar dessen kleine zeitliche Veränderungen messen können. Daneben wird die Position der beiden Satelliten mittels GNSS auf wenige Zentimeter genau bestimmt. Zusätzlich haben beide Satelliten einen Beschleunigungssensor mit an Bord, um die nicht-gravitativen Einflüsse auf die Bahndifferenz der beiden Satelliten zu messen. Realisiert wurde dieses Messkonzept durch die Satellitenmissionen GRACE (2002–2017) und GRACE Follow-On (seit 2018).

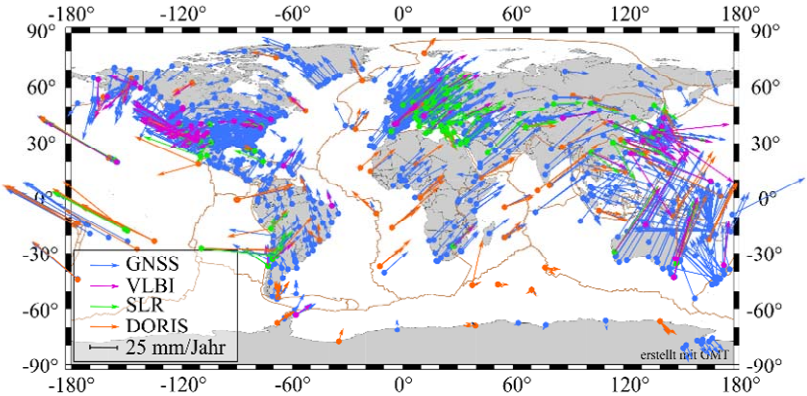

Abb. 3a: Geodätisch gemessene Plattengeschwindigkeiten

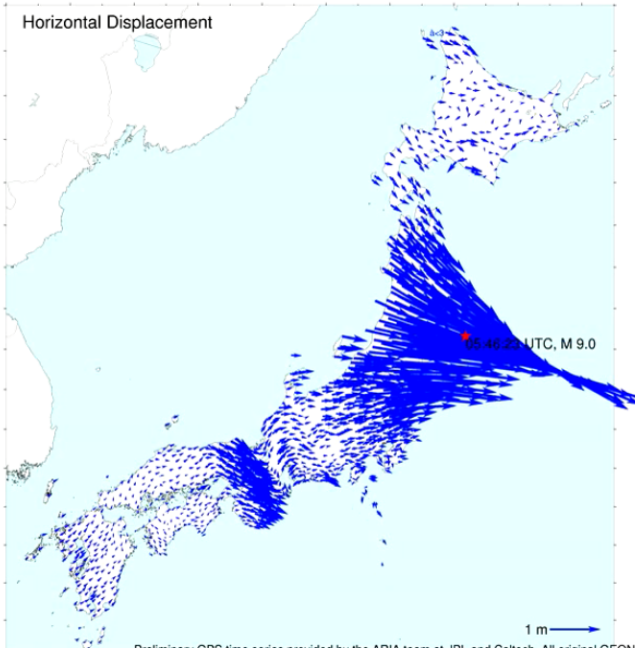

Abb. 3b: Koordinationsverschiebungen aufgrund des Tohoku-Erdbebens 2011

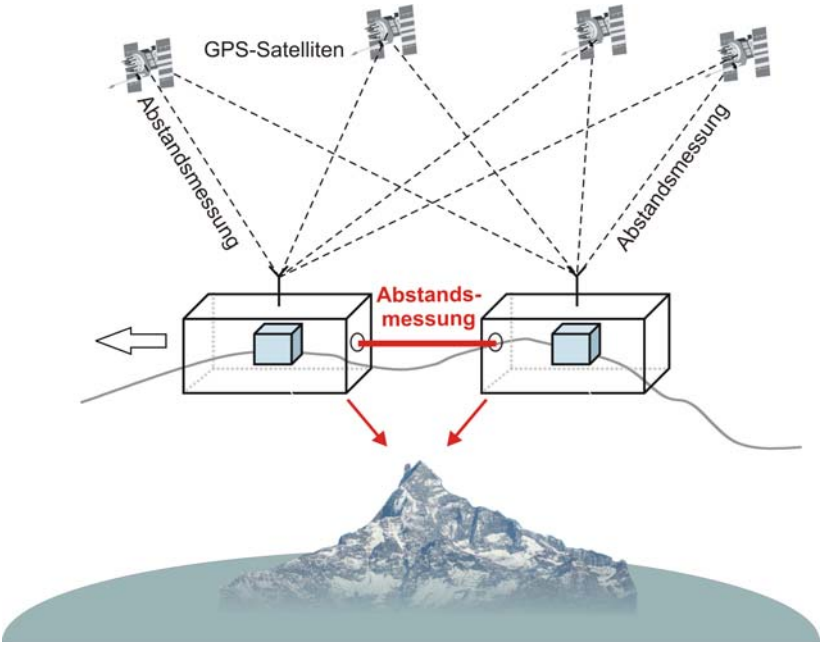

Abb. 4: Messprinzip der Intersatelliten-Distanzmessung, wie sie bei den Missionen GRACE und GRACE-Follow On realisiert ist

Damit haben wir ein ganzes Arsenal an Beobachtungstechniken diskutiert, die uns detaillierte Auskunft über den Zustand und Veränderungen im System Erde geben.

2. Geodäsie und die Messung klimarelevanter Signale

Klimawandel – Fakten oder Fake News? In dieser oftmals leidenschaftlich wie hitzig geführten Debatte kann Geodäsie Fakten schaffen. In Kapitel 1 wurde ausführlich dargestellt, dass geodätische Beobachtungstechniken in der Lage sind, kleinste Veränderungsprozesse im Erdsystem auf globalem Maßstab zu erfassen. Zahlreiche dieser Veränderungen stehen im Verdacht, durch den ebenfalls messtechnisch nachgewiesenen Anstieg der globalen Mitteltemperatur von ca. 1°C während des letzten Jahrhunderts angetrieben zu werden. Geodäsie kann diese klimainduzierten Signale direkt messen, und damit können auch Klimaprognosen der Vergangenheit validiert wer-

den. Nicht zuletzt basieren zahlreiche Ergebnisse, die sich in den Weltklimareports des *Intergovernmental Panel of Climate Change* (IPCC) wiederfinden, auf geodätischen Beobachtungen und Produkten.

2.1 Kontinentale Hydrologie

Abbildung 5 zeigt beispielsweise die Veränderungen des Wasserhaushalts im Einzugsgebiet des Amazonas über den Jahresverlauf hinweg, abgeleitet aus Schwerefeldmessungen der GRACE-Mission. Da zeitliche Schwerefeldvariationen vielfach mit Veränderung von Wasserkörpern zu tun haben, verwendet man häufig die Einheit „äquivalente Wasserhöhe“ (*equivalent water height*, EWH). Dies stellt die Höhe einer hypothetisch mit purem Wasser gefüllten Säule dar, die notwendig ist, um eine bestimmte Schwerefeldveränderung zu bewirken. Auf reale Gegebenheiten umgerechnet kann man davon ausgehen, dass ein durchschnittliches Gestein ein offenes Poren-

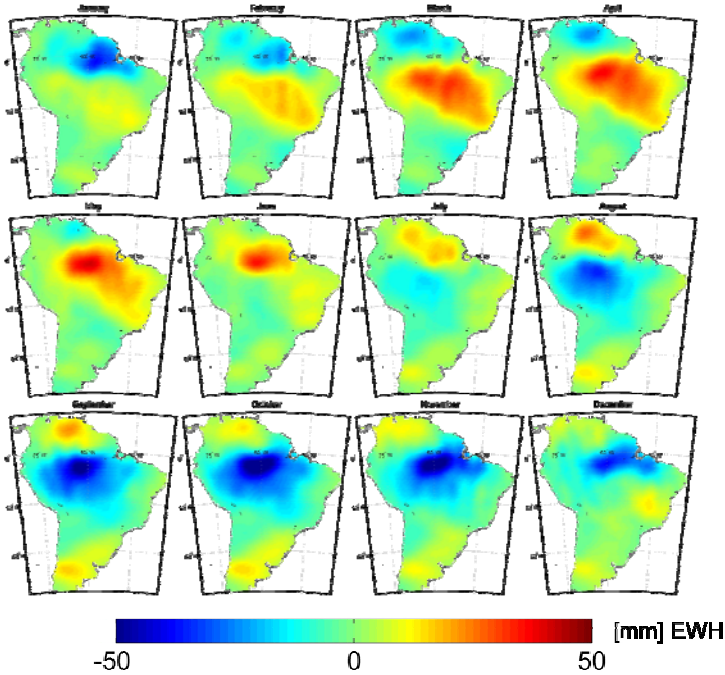

Abb. 5: Wasserspeichervariationen (in mm äquivalente Wasserhöhe) im Gebiet Amazonas im Jahre 2005, abgeleitet aus GRACE-Daten

volumen von ca. 10 % hat, d. h. maximal 10 % des gesamten Gesteinsvolumens können sich mit Wasser füllen. Eine äquivalente Wasserhöhe von 20 cm bedeutet somit eine Veränderung des Grundwasserspiegels von 2 m. Deutlich ist in Abbildung 5 der Effekt der starken Regenperioden in den Monaten Februar bis Mai zu erkennen, die zu einer positiven Anomalie im Schwerefeld relativ zu einem Langzeitmittel führen. Diese Art von Karten kann auch für die gesamte Erde gemacht werden. Dabei wird deutlich, dass die größten hydrologischen Veränderungen im Jahresverlauf, also mit einer Periode von einem Jahr, passieren.

Einer der Vorzüge von Satellitenverfahren besteht darin, dass die gesamte Welt mit homogener Genauigkeit überwacht werden kann. Damit lässt sich auch nachvollziehen, wie sich Wasser im System Erde umverteilt – eine für Wassermanagement zur Sicherstellung von Trink- und Brauchwasserversorgung zentral wichtige Datenquelle.

Neben periodischen Veränderungen, mit Jahresperiode aber auch unterjährigen Zyklen, finden wir in manchen Regionen auch langfristige Veränderungen. Abbildung 6 stellt solche Trends global dar. (Man beachte: Negative Trends, also „zu wenig Wasser“ relativ zu einem Langzeitmittel, sind im Gegensatz zu Abbildung 5 hier in rot dargestellt.) Außerdem wurde hier versucht, die Anomalien nach ihrem wahrscheinlichen Entstehungsgrund zu klassifizieren, also unter anderem auch, ob sie durch den Klimawandel induziert sind.

Aus den vielen in Abbildung 6 dargestellten Trend-Signalen wollen wir eine Region herausgreifen, in welcher der Wassermangel besonders kritisch für die dort sehr zahlreich ansässige Bevölkerung war: das Dürreereignis 2013–2015 in Kalifornien. Abbildung 7 stellt oben rechts die zeitliche Veränderung der totalen Wasserspeicherung im Sacramento-San Joaquin-Einzugsgebiet im Zeitraum 2002 bis 2016 dar. Die einsetzende Dürre im Jahre 2013 ist in der Zeitreihe markant sichtbar. Die Flächengrafik zeigt die Anomalie im Wasserspeicher relativ zu einem langjährigen Mittel, dargestellt für die Epoche November 2015. Hiermit wird deutlich, wie großflächig und lange andauernd Dürreperiode sein können.

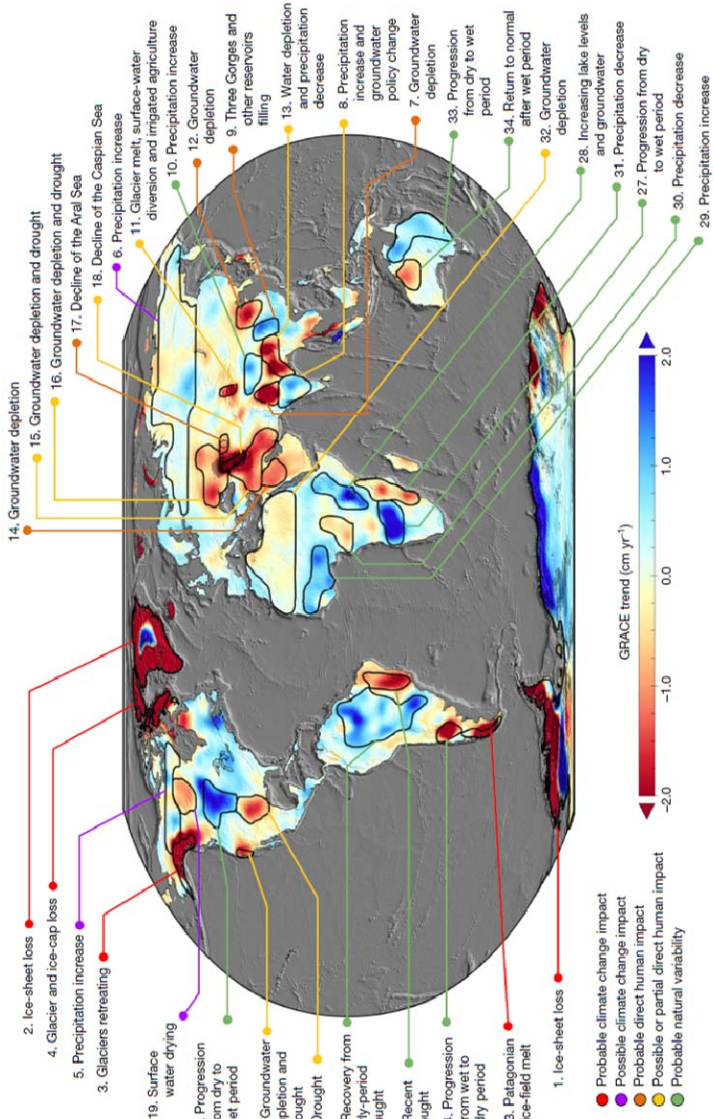

Abb. 6: Trends im totalen Wasserspeicher und mögliche Ursachen

Quelle: Rodell et al. 2018

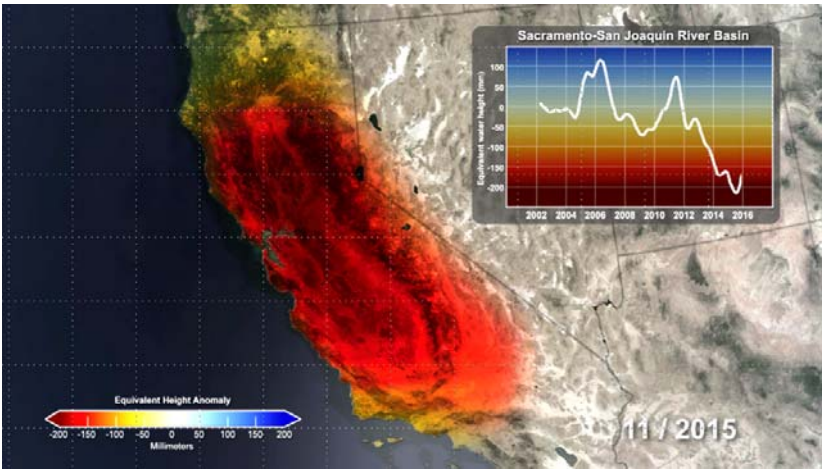

Abb. 7: Dürreereignis in Kalifornien

Quelle: NASA/JPL

2.2 Eismassen

Wie bereits erwähnt, sind Eismassen besonders sensitive Indikatoren für Klimaveränderungen. Betrachten wir in Abbildung 6 die Regionen mit den größten Eiskörpern unserer Erde, also die Antarktis, Grönland, Patagonien, Alaska, Spitzbergen oder Island, so stellen sich alle tiefrot dar, d. h. wir beobachten dort überall negative Massentrends und somit Abschmelzvorgänge.

Abbildung 8 zeigt die Massenbilanzänderungen für Grönland und die Antarktis über einen Zeitraum von mehr als 15 Jahren, wie sie aus Ergebnissen der Satelliten-Schwerfeldmission GRACE abgeleitet wurden. In Grönland sehen wir eine dramatische Eismassenabnahme in zahlreichen küstennahen Ausflussgletscher-systemen (Abbildung 8a). In Abbildung 8b wird die Massenänderung im Gesamtgebiet Grönland als Zeitreihe gezeigt. Neben einem offensichtlichen jährlichen Zyklus, der auf jahreszeitliche Veränderungen zurückzuführen ist, erkennt man klar einen negativen Trend von ca. 280 Gigatonnen pro Jahr als Durchschnittswerte über die gezeigte 15-Jahresperiode. Eine Gigatonne entspricht dabei einem mit Wasser gefüllten Würfel mit 1 km Kantenlänge, und 280 solcher Würfel fließen Jahr für Jahr in den Ozean. Übertragen auf die heimische Abschmelzrate Grönlands entspricht dies der sechsfachen Wassermenge des Bodensees.

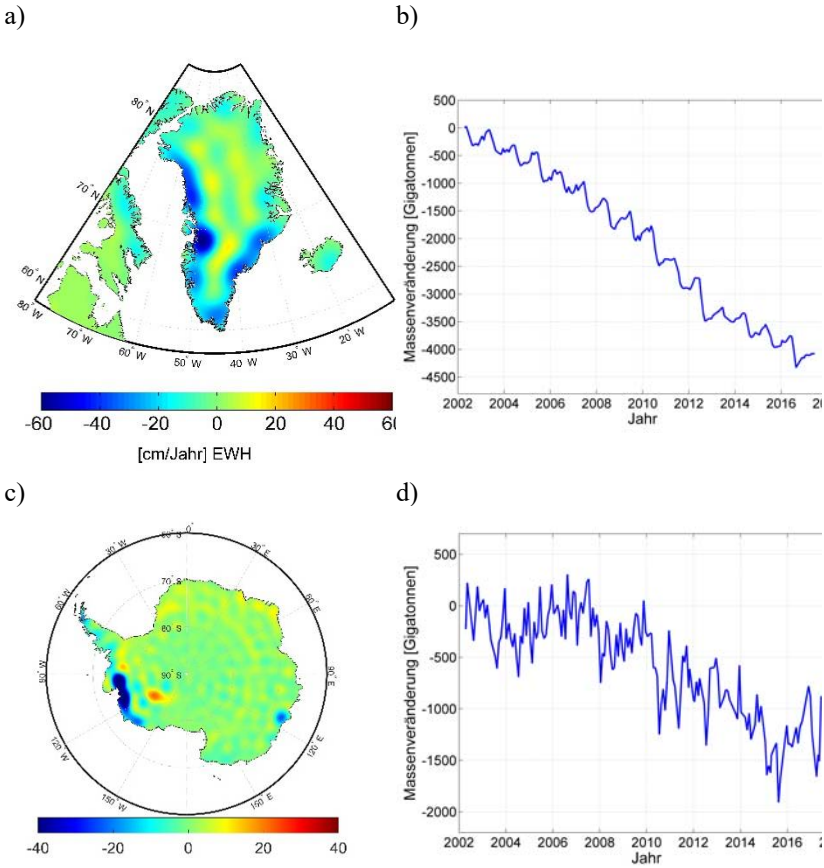

Abb. 8: Eismassenvariationen in Grönland (a, b) und Antarktis (c, d)

Die Abbildungen a) und c) illustrieren jeweils die regionale Verteilung von linearen Massetrends, während b) und d) die Massenänderungen des jeweiligen Gesamtgebiets im Zeitverlauf zeigen.

Ein etwas differenzierteres Bild ergibt sich im Falle der Antarktis. Offensichtlich gibt es hier auch Regionen, in denen die Eismassen in den letzten 15 Jahren zugenommen haben (rote Farbskala in Abb. 8c), z. B. an den Küsten der Ostantarktis. Die viel größeren Abschmelzraten in den Gletschersystemen der Westantarktis und der Amundsensee führen aber dazu, dass die Antarktis insgesamt im Schnitt ca. 125 Gigatonnen pro Jahr an Eismasse

verliert. Die Zeitreihe des Massenbilanzverlaufs (Abb. 8d) unterscheidet sich auch signifikant von jener Grönlands. Auffällig ist insbesondere, dass in der Antarktis die jahreszeitlichen Schwankungen viel schwächer ausgeprägt sind als in Grönland. Das liegt daran, dass auch im antarktischen Sommer kaum positive Temperaturen erreicht werden, sodass es auch dann kaum zu Schmelzvorgängen kommt.

Aber nun zur Gretchenfrage: Wie zuverlässig sind diese Ergebnisse überhaupt? Sind die Horrorvisionen von abschmelzenden Eismassen lediglich falsch interpretierte Messfehler der Wissenschaft? Eine der besten Strategien, um Resultate zu überprüfen, ist die Validierung mittels unabhängiger Methoden. Für die Bestimmung von Eismassenbilanzen haben sich drei Methodengruppen etabliert, die in Abbildung 9 skizziert sind.

In der Input-Output-Methode (auch: Budgetmethode) wird versucht, alle Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Eisschildes und die dort ablaufenden Prozesse zu erfassen. Input und Output an der Eisoberfläche, der sogenannten Oberflächenmassenbilanz, werden aus Beobachtungen abgeleitet. Diese

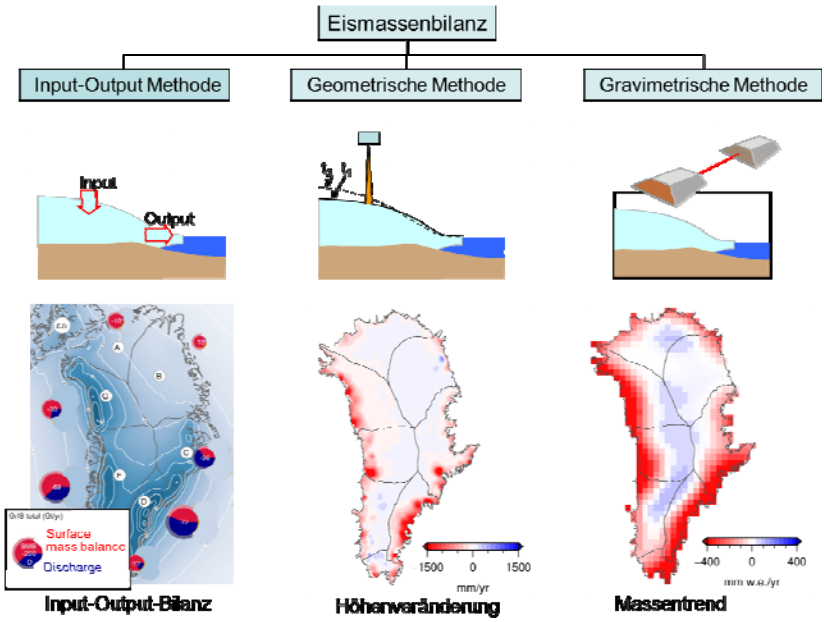

Abb. 9: Methoden der Eismassenbilanzierung und abgeleitete Produkte am Beispiel von Grönland

werden entweder direkt am Boden bzw. Eis durchgeführt, wie z. B. meteorologischen Daten zur Messung des Niederschlags oder Eisdickenmessungen mittels Radarsondierung. Zusätzlich werden Daten aus Messungen der Fernerkundung vom Flugzeug oder Satelliten herangezogen oder aus geophysikalischen Modellen ermittelt. All diese Daten werden in ein gemeinsames Modell zusammengefasst, alle Eingangsgrößen zusammengezählt und alle Ausgangsgrößen davon abgezogen. Am Ende ergibt sich die Änderung der Eismassen innerhalb des Untersuchungszeitraums. Das Hauptproblem dieser Methode besteht nun darin, dass die Messungen aller Einzelkomponenten häufig nicht sehr gleichmäßig vorliegen bzw. mit großen Ungenauigkeiten behaftet sind. Dies führt natürlich dazu, dass sich alle Einzelfehler letztlich auch in der finalen Massenbilanzschätzung aufsummieren.

In der geometrischen (häufig auch geodätischen) Methode werden vorwiegend Satellitenverfahren eingesetzt. Insbesondere kommt die Eis-Altimetrie zur Anwendung, um die Oberkante von Eiskörpern sehr genau zu vermessen. Fliegt man nun wiederholt über dieselbe Stelle, können Änderungen in der Dicke und somit im Volumen des Eiskörpers ermittelt werden. Das Hauptproblem dieses Ansatzes liegt darin, dass damit streng genommen nur geometrische und damit Volumenveränderungen beobachtet werden können. Der Übergang vom Volumen zur Masse erfolgt über die Materialeigenschaft der Dichte, die für Eis je nach Kompaktionsgrad sehr unterschiedlich sein kann. Aufgrund dieser Unsicherheit hinsichtlich der wahren Dichte ist es auch nur sehr ungenau möglich, aus der Kenntnis des Eisvolumens allein auf dessen Masse zu schließen. Im Gegenzug hat die geometrische Methode den Vorteil, dass sie aufgrund der punktweisen Beobachtungen der Satellitenaltimetrie eine sehr hohe räumliche Auflösung von nur wenigen Metern liefert. Zusammengefasst bekommen wir also die Information über Eishöhen- und Eisvolumenänderungen räumlich sehr hoch aufgelöst, die daraus berechnete Massenänderung ist aufgrund der notwendigen Eisdichtenannahme aber recht ungenau.

Die gravimetrische Methode, also die Messung des zeitvariablen Schwerefeldes mit Satelliten wie GRACE und GRACE Follow-On, ist das einzige Verfahren, um Massenänderungen direkt erfassen zu können. Neben diesem entscheidenden Vorteil ergeben sich allerdings Beschränkungen aufgrund der limitierten räumlichen und zeitlichen Auflösung. Mit heutiger Messtechnologie sind räumliche Auflösungen von lediglich 200–300 km und zeitliche Auflösungen von Wochen bis Monaten erzielbar.

Als Vorbereitung für den letzten Weltklimareport des Jahres 2013 wurde eine Gruppe von mehr als 50 internationalen Experten mit der spannenden

Aufgabenstellung betraut, Eismassenbilanzen für Grönland und die Antarktis abzuleiten. Dabei sollten unterschiedliche Methoden, die zuvor erläutert wurden, konsistent auf die Daten eines vordefinierten Zeitraums angewendet werden. Das Ergebnis ist in summarischer Form in Abbildung 10 dargestellt. Gezeigt sind jeweils das Ergebnis sowie eine realistische Schätzung der zugehörigen Ungenauigkeit als Fehlerbalken. In roter Farbe sind die Ergebnisse der Input-Output-Methode, in türkis und grün jene der geometrischen Methode (wobei hier noch zwischen Radar- und Laser-Messungen unterschieden wird), und in blau die Beobachtung von Schwerefeldvariationen dargestellt.

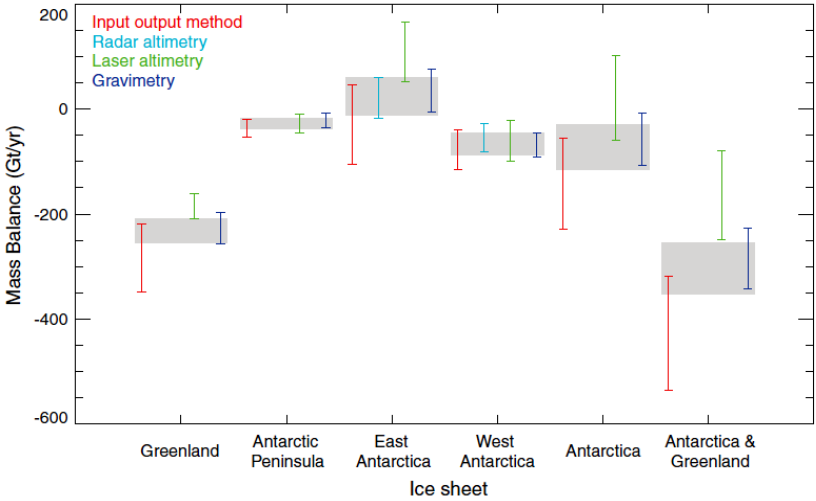

Abb. 10: Linearer Trend der Eismassenveränderung, ermittelt aus unterschiedlichen Methoden

Quelle: Shepherd et al. 2012

Eine der wichtigsten Erkenntnisse: Alle drei Methoden liefern im Rahmen ihrer spezifischen Genauigkeiten dieselben Ergebnisse. Außerdem ist in Abbildung 10 ersichtlich, dass Grönland im Vergleich zur Antarktis nicht nur die größeren Abschmelzraten, sondern auch signifikant kleinere Fehlerbalken aufweist. Dies hat nicht zuletzt mit den noch schwierigeren Beobachtungsbedingungen in der Antarktis zu tun.

Deshalb hat man sich in einer Folgestudie die Antarktis nochmals vorgenommen, und zwar basierend auf mittlerweile verfügbaren längeren Messzeitreihen. Abbildung 11 zeigt das Ergebnis, und zwar unterteilt in West- und Ostantarktis. Außerdem sind die Eismassenveränderungen nicht nur summarisch, sondern pro Jahr dargestellt. Offensichtlich bleibt der Eiskörper der Ostantarktis weitgehend stabil. Der Mittelwert über eine 25-Jahres-Periode beträgt 5 ± 46 Gigatonnen/Jahr. Für die Westantarktis ergibt sich ein völlig anderes Bild. Während der Mittelwert der Jahre 1992–2001 eine Abschmelzraten von –53 ± 29 Gigatonnen/Jahr ergibt, ist jene für den Mittelwert aus den Jahren 2010–2016 mit –159 ± 26 Gigatonnen/Jahr bereits etwa dreimal so hoch. Diese signifikante Änderung des Systemverhaltens um das Jahr 2005 herum ist auch in Abbildung 11 sehr deutlich auszumachen und zeigt, dass wir es hier in keiner Weise mit linearem Verhalten des Eisschilds zu tun haben. Offenbar wurde 2005 in der Westantarktis ein Kipp-

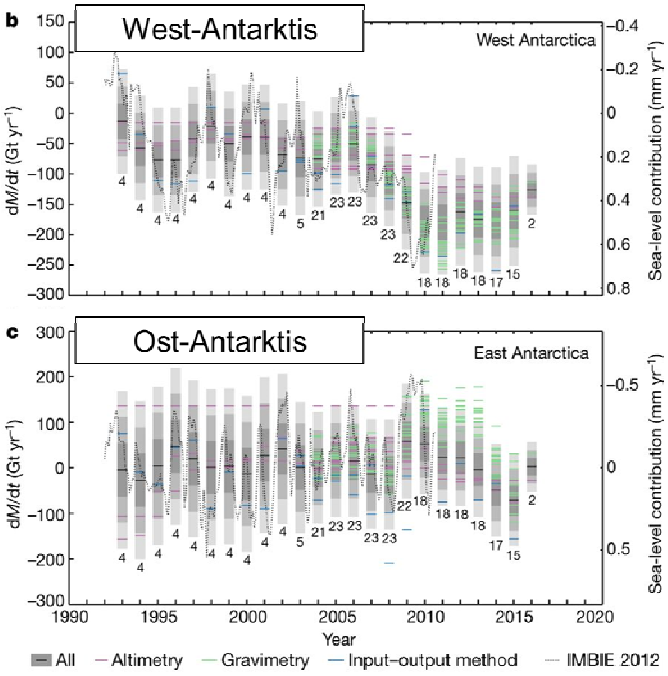

Abb. 11: Eismassenbilanzierung in der Antarktis

Quelle: Shepherd et al 2018 (modifiziert)

punkt überschritten, bei dem ein wahrscheinlich relativ kleiner Trigger eine veritable Änderung des Verhaltens des Gesamtsystems verursacht hat. Jüngste Publikationen zur Eismassenmodellierung in der Antarktis stellen die Hypothese auf, dass es zu einer systematischen Entfestigung des Westantarktischen Eisschildes gekommen sein könnte.

Das systematische Abschmelzen von Eismassen bleibt aber nicht nur auf die beiden großen Eisschilde der Antarktis und Grönlands beschränkt, sondern zeigt sich in fast allen größeren Gletschersystemen weltweit, wie Abbildung 12 eindrucksvoll demonstriert. Hier sind die Eismassenbilanzen für ausgewählte Gletschersysteme dargestellt.

2.3 Meeresspiegel

Abschmelzung von Eismassen – Who cares? Die wohl sichtbarste globale Konsequenz von abschmelzenden Eismassen ist der dadurch verursachte Anstieg des globalen Meeresspiegels, der eine direkte Bedrohung für viele Küstenregionen dieser Erde darstellt. Das hohe Gefahrenpotential resultiert nicht zuletzt aus der Tatsache, dass viele große Städte dieser Welt direkt am Meer liegen.

Grundsätzlich gibt es zwei Effekte, die zu einer Veränderung des Meeresspiegels führen können. Einerseits ist das der Eintrag von zusätzlichen Wassermassen, etwa durch abschmelzende Eismassen, oder aber durch veränderte Zulieferung von Wasser aus dem Wasserkreislauf. Andererseits steigt der Meeresspiegel auch aufgrund der aus der globalen Erwärmung resultierenden Temperaturzunahme des Meerwassers, da sich Wasser wie fast jedes andere Medium auch bei Erwärmung ausdehnt. Da es zwischen den Kontinenten „eingespannt“ ist, kann es nur nach oben ausweichen.

Mit Hilfe geodätischer (Satelliten-)Methoden sind wir heute in der Lage, alle diese Effekte zu messen und somit auch hinsichtlich ihrer Ursache zu trennen, wie Abbildung 13 zeigt. Die schwarze Kurve stellt den gesamten mittleren globalen Meeresspiegelanstieg dar, wobei die jahreszeitliche Schwankung herausgerechnet und abgezogen wurde. Dieser totale Anstieg wurde mittels Satellitenaltimetrie bestimmt. Die blaue Kurve dagegen zeigt die von der Satelliten-Schwerefeldmission GRACE bestimmte Vergrößerung der Ozeanmasse. Da das Schwerefeld Massenverteilungen und deren Veränderungen direkt widerspiegelt, aber nicht sensitiv auf Volumenänderungen ist, kann damit jener Beitrag gemessen werden, der durch den zusätzlichen Masseneintrag in die Ozeane verursacht wird. Die grüne Kurve ist die einzige, die nicht mittels klassischer geodätischer Methoden, sondern

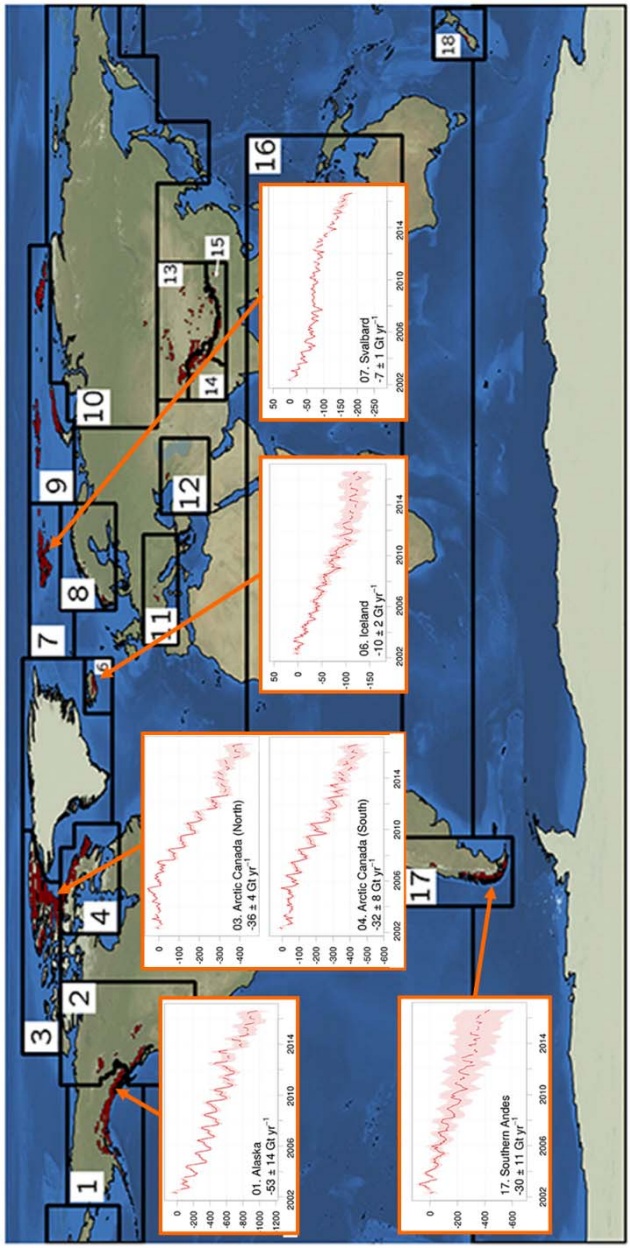

Abb. 12: Eismassenbilanzen für ausgewählte Gletschersysteme

Quelle: Wouters et al. 2019 (modifiziert)

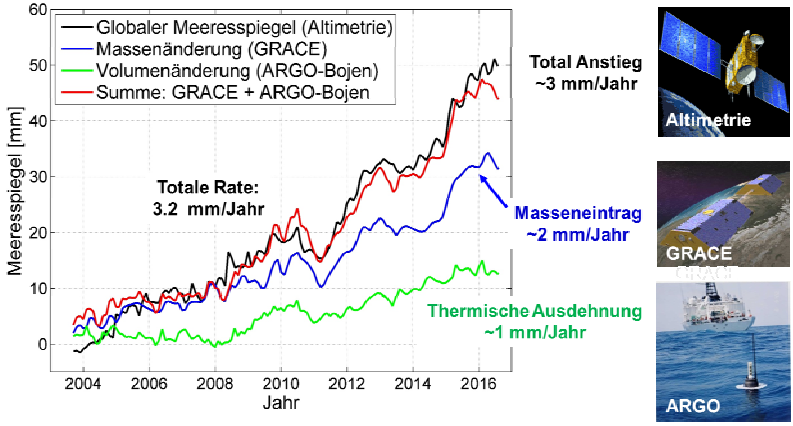

Abb. 13: Beiträge zum mittleren globalen Meeresspiegelanstieg

mit Hilfe von schwimmenden Bojen ermittelt wurde. Heute sind knapp 4.000 solcher Messbojen freischwimmend in den Weltmeeren unterwegs und messen dabei physikalische Größen des Ozeans, wie z. B. Temperatur, Strömungsgeschwindigkeiten und Salzgehalt, in bis zu 2 km Tiefe. Daraus können die Volumenänderungen des Ozeanwassers abgeleitet werden. Addiert man nun die blaue (Masseneffekt) und grüne (Volumeneffekt) Kurve, ergibt sich die rote Kurve, die idealerweise den totalen mittels Altimetrie gemessenen Meeresspiegelanstieg (schwarze Kurve) ergeben sollte. Die kleinen Abweichungen zwischen der roten und der schwarzen Kurve geben ein Indiz für die Größe der Unsicherheiten dieser völlig unterschiedlichen und voneinander unabhängigen Messungen – sie sind beeindruckend klein. Das ist wiederum ein sehr guter Indikator für die Zuverlässigkeit der daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen.

Aus Abbildung 13 können wir erkennen, dass zu etwa zwei Dritteln Masseneffekte und zu etwa einem Drittel Volumeneffekte zum mittleren Meeresspiegelanstieg beitragen, d. h. in Zahlen: 2 mm/Jahr durch Masseneinträge und 1 mm/Jahr durch Wärmeausdehnung. Es versteht sich von selbst, dass diese Zahlen wieder nur einen globalen Mittelwert darstellen und regional sehr unterschiedlich sein können.

Wie in Kapitel 2.2 diskutiert, schmelzen in Grönland aktuell ca. 280 Gigatonnen/Jahr an Eis ab und rinnen in die Weltmeere. Es braucht ca. 360 Gigatonnen/Jahr, um den globalen Meeresspiegel im Mittel um 1 mm/Jahr steigen zu lassen. Daher trägt Grönland allein aktuell ca. 0.8 mm/Jahr zum glo-

balen Meeresspiegelanstieg bei, die Antarktis etwa die Hälfte davon. Überraschenderweise ist der Beitrag der Gletscher und kleineren Eiskappen zum globalen Meeresspiegelanstieg fast genauso groß wie jener von Grönland, obwohl deren Gesamtpotential bei maximal einem halben Meter liegt, im Gegensatz zu Grönland (6.5 m) und der Antarktis (65 m). Während der Beitrag von Grönland und der Antarktis in Zukunft vermutlich weiter ansteigen wird, könnte der Gletscherbeitrag innerhalb eines Jahrhunderts versiegen, weil dann fast die gesamte dort gebundene Eismasse abgeschmolzen sein wird. Wenn wir dagegen auf die zukünftige thermische Ausdehnung des Meerwassers blicken, dann skaliert diese ziemlich linear mit der Temperaturentwicklung unseres Planeten.

Ein besonderes Ereignis lässt sich in Abbildung 13 im Zeitraum 2010/2011 erkennen: ein offensichtliches lokales Minimum in der Meeresspiegelkurve. Dies war zu diesem Zeitpunkt Wasser auf die Mühlen zahlreicher Klimaskeptiker. Sollte sich der Meeresspiegel auf höherem Niveau stabilisieren, und die zwanzig Jahre Anstieg davor waren eine Laune der Natur? Ein paar Jahre später wissen wir aber mehr, denn betrachtet man den weiteren Verlauf, dann zeigt sich, dass dieses Absinken des globalen Meeresspiegels nur ein kurzes Intermezzo war. Heute wissen wir sogar sehr genau, wodurch es verursacht wurde. Zunächst sehen wir, dass das lokale Minimum auch besonders stark in der blauen Kurve, die den Massenbeitrag zum Meeresspiegelanstieg zeigt, ausgeprägt ist. Es fehlen also beträchtliche Wassermassen in den Ozeanen. Wohin sind sie entschwunden? Ende 2010 verzeichnete man sowohl in großen Teilen Australiens und auch im nördlichen Südamerika übermäßig starke und andauernde Regenfälle. Auch in den Messdaten der Schwerefeldmission GRACE erkennt man für diesen Zeitraum, dass sich in diesen Regionen viel mehr Wasser als normal in den Grundwasserreservoiren angesammelt hatte. Da der globale Wasserkreislauf grundsätzlich geschlossen ist, liegt es nahe, dass diese Besonderheit in der kontinentalen Hydrologie Australiens und Südamerikas zum kurzfristigen Absinken des globalen Meeresspiegels geführt hat. Dieses Fallbeispiel zeigt zum einen, wie eng die Systemkomponenten des Planeten Erde miteinander vernetzt sind, zum anderen aber auch, mit welch hoher Genauigkeit wir die einzelnen Phänomene heute beobachten können, sodass wir auch in der Lage sind, sie schlüssig zu erklären. Präzise Messung ist also eine Grundvoraussetzung dafür, um ein Verständnis für das Funktionieren des Gesamtsystems Erde zu erlangen.

Der Meeresspiegel steigt aber nicht überall gleich stark, wie Abbildung 14 zeigt. In manchen Regionen, wie beispielsweise vor der amerikanischen

Westküste, sinkt er aktuell sogar. Andererseits gibt es aber auch Regionen (und diese sind flächenmäßig viel größer), wo es Anstiege von mehr als einem Zentimeter pro Jahr gibt. Dies ist gerade in vielen Inselregionen in der Nähe des Äquators der Fall, die allesamt nur knapp über Meeresniveau liegen. Auch an diesem Beispiel sehen wir, wie komplex und mit zahlreichen Rückkopplungsschleifen unser Erdsystem behaftet ist, sodass globale Mittelwerte oft nur einen Teil der Wahrheit wiedergeben.

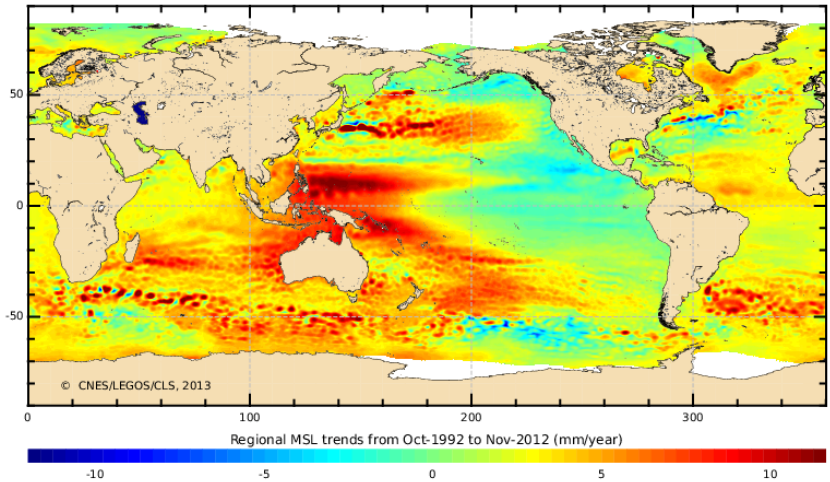

Abb. 14: Regionaler Meeresspiegelanstieg in mm/Jahr

Quelle: CNES/LEGOS/CLS

3. Die Rolle langer Zeitreihen

In Kapitel 2 wurden die Beiträge der Satellitengeodäsie zur Beobachtung klimarelevanter Phänomene diskutiert. Wir haben festgestellt, dass die erhobenen Zeitreihen nicht nur linearen Trends folgen und durchaus auch über mehrere Jahre hinweg Abweichungen vom „typischen“ Verhalten zeigen. Daher stellen sich die berechtigte Frage: Ab welchem Zeitraum beginnt überhaupt Klima? Und darauf aufsetzend: Wie lange müssen wir denn messen, um „Klimasignale“ beobachten zu können?

Das *Global Climate Observing System* (GCOS) definiert, dass mindestens 30 Jahre an kontinuierlicher Beobachtung für klimarelevante Fragestellungen erforderlich sind. Das kann damit begründet werden, dass nur dann Langzeittrends robust bestimmt werden können. Außerdem bietet sich erst dann die

Möglichkeit, natürliche von anthropogen verursachten Prozessen zu trennen, weil viele natürliche Zyklen eben mindestens 20–30 Jahre lang dauern. Der letzte Aspekt ist im Licht der aktuellen Klimadebatte besonders relevant, denn das Lager der Klimaskeptiker lässt sich in mindestens zwei Gruppen teilen. In jene Minorität, die daran zweifelt, dass es aktuell überhaupt globalen Klimawandel gibt, und eine beträchtlich größere Gruppe, die lediglich Bedenken daran äußert, dass der Mensch dabei seine Finger im Spiel hat.

Aktuell kommen wir mit der Satellitengeodäsie in eine interessante Phase, denn für einige Beobachtungsgrößen haben wir mittlerweile Zeitreihen von zwei bis drei Jahrzehnten Länge gesammelt und stoßen damit genau in jene Zeiträume vor, ab denen es aus der Sicht von GCOS interessant wird. An dieser Stelle soll daher explizit darauf hingewiesen werden, wie wichtig Langzeitbeobachtung gerade für die Beantwortung klimarelevanter Fragestellungen ist. Beispielsweise sind historische Aufzeichnungen über Gletscherzustände von unschätzbarem Wert, um die heute gewonnenen Satellitendaten in die Vergangenheit zu verlängern und somit eine viel umfangreichere Datenbasis über deren Langzeitverhalten zu haben. Aus diesem Aspekt leitet sich gleichzeitig aber auch die Notwendigkeit ab, Beobachtungszeitreihen zukünftig weiter zu verlängern und dafür die dauerhafte Installation von nachhaltigen Monitoringsystemen sicherzustellen. Diese bestehen idealerweise aus einer Kombination von bodengestützten und satellitengestützten Verfahren. Erst damit wird es uns ermöglicht, alle relevanten Veränderungsprozesse unseres Heimatplaneten zu erkunden und daraus gesellschaftliche und politische Handlungsanweisungen abzuleiten.

4. Fazit – Korrelation oder Kausalität?

In diesem Beitrag wurde anhand einiger Beispiele demonstriert, mit welcher erstaunlichen Genauigkeit wir Veränderungsprozesse unseres Erdsystems geodätisch beobachten können. Mit solchen Messungen quantifizieren wie auch Signale des Klimawandels. Damit werden Fakten geschaffen, die auch so manche alternative Theorie, die den Klimawandel in Zweifel zieht, falsifizieren. Natürlich können diese Messungen nicht zweifelsfrei belegen, dass wir Menschen zu einem Gutteil für die aktuell beobachteten Veränderungsprozesse aufgrund von Treibhausgasemissionen verantwortlich sind, auch weil in vielen Fällen die Beobachtungszeitreihen noch zu kurz sind.

Häufig wird auch die Frage gestellt: Korrelation oder Kausalität? Gibt es einen direkten Zusammenhang zwischen verstärkter Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre und globalem Temperaturanstieg, d. h. ist dieser kausal bedingt, oder gehen beide Kurven gerade zufälligerweise gleichzeitig

nach oben? Gibt es belastbare Alternativhypothesen zu der aktuellen Lehrmeinung, wie der Strahlungshaushalt unserer Erde funktioniert?

Es ist richtig, dass wir viele Detailaspekte unseres komplexen Systems Erde noch nicht zur Gänze kennen. Als Natur- und Ingenieurwissenschaftler darf man aber davon überzeugt sein, dass wir das System Erde und seine Abläufe zumindest in seinen wesentlichen Zügen verstanden haben. Als Beleg dafür kann angeführt werden, dass wir die zentralen Klimaprognosen von vor 20 Jahren heute mit Messungen weitgehend bestätigen können, außer dass die Prognosen die aktuelle Entwicklung eher unterschätzt haben. Wenn Alternativhypothesen formuliert werden, dann müssen diese ebenfalls mit einigen grundlegenden Gesetzen der Physik, wie die Erhaltung von Masse, Energie und Drehmoment, kompatibel sein, um als alternative Erklärung ernst genommen zu werden.

Also: Kocht das Wasser im Topf, weil er auf einer heißen Herdplatte steht? Oder ist die Herdplatte heiß, weil ein Topf mit heißem Wasser auf ihr steht? Oder aber sind Herdplatte und Wasser im Topf gerade zufällig gleichzeitig heiß? Der erste und zweite Fall wären kausale Zusammenhänge, während der dritte Fall eine reine Korrelation darstellt. In allen Fällen muss man aber auch noch unter Beachtung der physikalischen Grundgesetze erklären können, warum die Herdplatte und das Wasser im Topf überhaupt heiß sind.

Dort, wo unser physikalisches Verständnis tatsächlich ziemlich auf die Probe gestellt wird, ist in der Nähe von Kipppunkten, wo das System von linearem Verhalten oder zumindest relativ einfacher Beschreibbarkeit von Kausalitäten in ein völlig anderes und sehr schwer vorhersagbares Verhalten übergeht.

In der öffentlichen Diskussion wird oft eingewandt, dass die Adaptionsfähigkeit des Menschen groß genug sei, um sich den verändernden Gegebenheiten anzupassen. Interessanterweise taucht vielfach gerade dort, wo man doch den Klimamodellen und der zugehörigen Wissenschaft nicht über den Weg traut, eine tiefgreifende Wissenschafts- und Technikgläubigkeit ein, das Problem mit technischen Maßnahmen in den Griff bekommen zu können. Man kann der Menschheit zugestehen, in gewissem Maße an sich relativ rasch ändernde Umweltbedingungen anpassungsfähig zu sein. Wenn man allerdings am aktuellen Beispiel der Corona-Pandemie erlebt – wobei es mir eigentlich widerstrebt, die beiden Problemfelder Pandemie und Klimawandel in einem Atemzug zu nennen, weil man da hinsichtlich zeitlicher und räumlicher Dimension Äpfel mit Birnen vergleicht – so sieht man doch, wie leicht unsere globalen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Systeme aus den Angeln zu heben sind. Und bei aller Adaptionsfähigkeit kann man

eine Großstadt nicht mal so über Nacht um 200 Meter nach hinten verschieben, damit es wieder für die nächsten zehn Jahre Meeresspiegelanstieg reicht. Wenn man allerdings an das Systemverhalten bei Kipppunkten denkt, spätestens dann dürfen Zweifel angemeldet werden, ob wir als Menschheit dieser völlig neuen Situation gewachsen sein würden.

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass geodätische Messungen (Geometrie und Schwere) wichtig Beiträge leisten können, um die Effekte des Klimawandels zu quantifizieren, und somit einen wichtigen Beitrag zu den Weltklimaberichten zu leisten. Ein besonders wichtiger Aspekt dabei ist, dass als integraler Bestandteil von Messwerten realistische Unsicherheiten angegeben werden können, denn diese sind eine Grundvoraussetzung für die Einschätzung der Zuverlässigkeit von Vorhersagen.

Die Fortführung dieser Messungen ist von großer Wichtigkeit, denn nur lange Messzeitreihen ermöglichen die Trennung von natürlichen und anthropogenen Signalen des Klimawandels. Im Zuge des Aufbaus von nachhaltigen Monitoring-Systemen wird auch an weiter verbesserten Beobachtungskonzepten zur weiteren Verbesserung der Genauigkeit, der räumlichen wie auch der zeitlichen Auflösung gearbeitet (z. B. Pail et al. 2015) im Bereich der Beobachtung von Massentransporten). Denn gerade in Zeiten, wo tiefgreifende politische Entscheidungen und Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen anstehen, ist das Sammeln einer soliden und zuverlässigen Datengrundlage über den Zustand und die Veränderung unseres Erdsystems unerlässlich.

Literatur

Pail, R.; Bingham, R.; Braitenberg, C.; Dobslaw, H.; Eicker, A.; Güntner, A.; Horwath, M.; Ivins, E.; Longuevergne, L.; Panet, I.; Wouters, B. (2015): Science and User Needs for Observing Global Mass Transport to Understand Global Change and to Benefit Society. Surveys in Geophysics, 36(6):, 743-772, doi: 10.1007/s10712-015-9348-9

Rodell, M.; Famiglietti, J. S.; Wiese, D. N.; Reager, J. T.; Beaudoing, H. K.; Landerer, F. W.; Lo, M.-H. (2018): Emerging trends in global freshwater availability. Nature, 557, 651–659, doi: 10.1038/s41586-018-0123-1

Shepherd, A.; Ivins, E. R.; Geruo, A.; Barletta, V. R.; Bentley, M. J.; Bettadpur, S.; Zwally, H. J. (2012): A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. Science, 338(6111), 1183-1189, doi: 10.1126/science.1228102

Shepherd, A.; Ivins, E.; Rignot, E. et al. (2018): Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. Nature 558, 219–222, doi: 10.1038/s41586-018-0179-y

Wouters, B.; Gardner, A. S.; Moholdt, G. (2019): Global glacier mass loss during the GRACE satellite mission (2002-2016). Frontiers in earth science, 7(96), doi: 10.3389/feart. 2019.00096