

Gleichung mit Unbekannten

Martin Bünnagel

■ Die Geodäsie ist heute eine datengetriebene Wissenschaft und mit ihren Satellitentechnologien und geodätischen Modellen Grundlage und treibende Kraft für Küstenschutz, Klima- und Erdbeobachtungssysteme. Zwei aktuelle Studien erinnern daran, wie wichtig ihre Methoden und Werkzeuge sind – wie entscheidend das Rechnen mit Unsicherheiten ist und das Kalkulieren mit Fehlerquellen.

In einen Küstenfelsen auf der schwedischen Insel Lövgrund ritzte Anders Celsius, Professor für Astronomie an der Universität Uppsala, im Jahr 1731 eine horizontale Linie, um in den kommenden Jahren ein Phänomen zu untersuchen, das die Menschen in der Region schon seit Jahrhunderten beschäftigte. Bereits im Mittelalter beobachteten die Bewohner an den Küsten Schwedens und Finnlands, dass das Meer sich unaufhörlich zurückzog. Der Meeresspiegel sank im Laufe der Zeit so drastisch, dass im Jahr 1491 sogar die Stadt Östhammar näher an die neue Küste verlegt werden musste, weil ihr Hafen für Schiffe unpassierbar wurde.

Da es bislang keine Referenzpunkte für das Phänomen gab, wollte Celsius seine Markierung nutzen, um das Zurückweichen des Meeres messen und dokumentieren zu können. Zwölf Jahre später veröffentlichte er seine Untersuchung. Doch obwohl seine Berechnung scheinbar korrekt war, enthielt sie einen dramatischen Fehler – denn Celsius übersah einen entscheidenden Faktor. Anfang des Jahres 2026 alarmieren zwei neue Studien zum Meeresspiegel die Erdsystemforschung.

Systematische Unsicherheiten

Celsius starb zwei Jahre nach der Veröffentlichung seiner Untersuchung. Rund 80 Jahre später war es der Geodät Carl Friedrich Gauß, der zwischen 1821 und 1825 seine Sommer damit verbrachte, das Königreich Hannover zu vermessen. Dabei stieß er auf ein fundamentales Problem: Messungen sind niemals perfekt. Wenn man ein Dreieck aus drei Berggipfeln vermisst, addieren sich die Winkel in der Realität nie exakt auf 180 Grad.

Gauß erkannte, dass der Fehler selbst eine Information ist, und entwickelte die Methode der kleinsten Quadrate (Least Squares Adjustment). Damit wurde die Geodäsie zur ersten Wissenschaft, die systematisch mit Unsicherheiten umging. Und als Friedrich Robert Helmert in den 1880er-Jahren sein Werk »Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie« veröffentlichte, konnte er nicht ahnen, welchen Beitrag er damit auch für die Welt des 21. Jahrhunderts leistete.

Es sind bis heute die theoretische und die mathematische Geodäsie, die das Fundament vieler Vermessungs-, Navi-

gations- und Erdbeobachtungstechnologien bilden, da sie die mathematisch-physikalischen Modelle bereitstellen, mit denen Referenzsysteme wie das ITRF (International Terrestrial Reference Frame), das Schwerefeld und die Erdfigur (Geoid) überhaupt erst präzise definiert und aus Messdaten abgeleitet werden können. Basierend auf Erdbeobachtungssystemen fließen heute Hunderte Milliarden weltweit in den Küstenschutz.

Lokale Meeresspiegel falsch berechnet

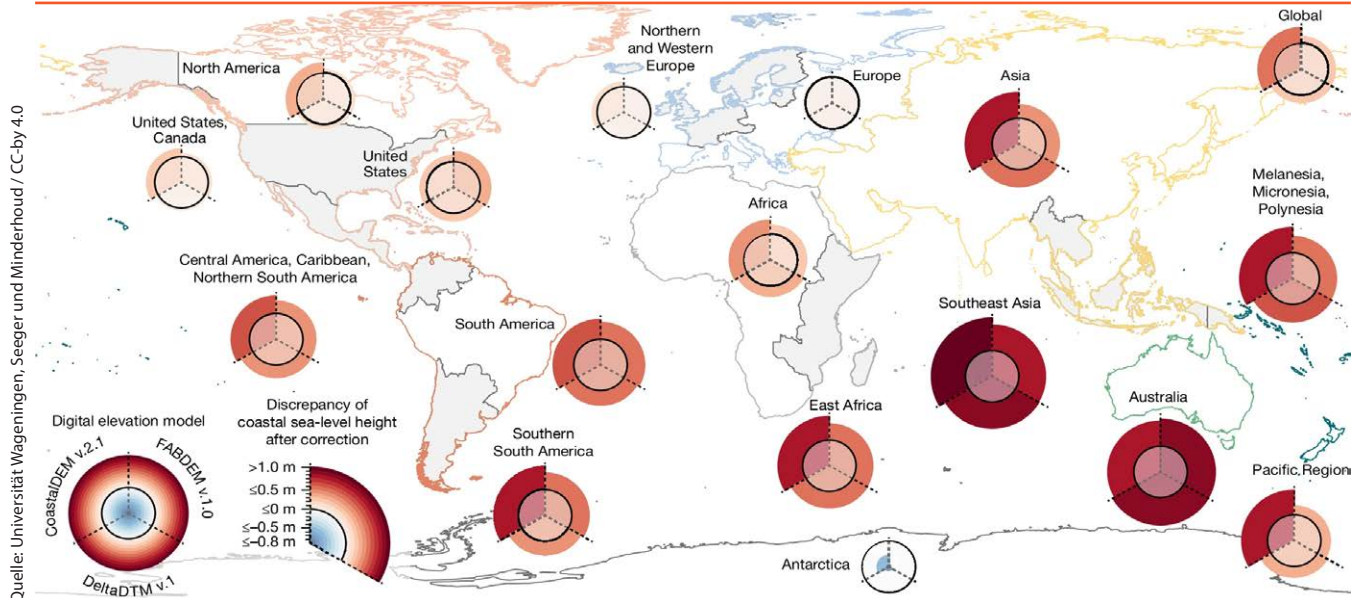
Doch Hunderte wissenschaftliche Studien der vergangenen 16 Jahre aus dem globalen Süden bis hin zur Westküste Nordamerikas zum lokalen Meeresspiegel-Anstieg und dem Küstenschutz könnten fehlerhaft sein. Wie hoch die aktuellen Pegel vor Ort liegen, wurde offenbar in vielen Regionen unterschätzt. Dies ist das Ergebnis einer Anfang März 2026 veröffentlichten Metastudie eines deutsch-niederländischen Forscherteams der Universität Wageningen. Demnach haben mehr als 90 Prozent der Küstenschutz-Analysen eine fehlerhafte Methodik und falsche Referenzdaten verwendet. Dadurch wurde der aktuelle Meeresspiegel im globalen Schnitt um 20 bis 30 Zentimeter zu niedrig eingeschätzt, in einigen Regionen um mehr als einen Meter.

Für die Studie berechnete das Team weltweit die Differenz zwischen der Höhe des Küstenlandes und dem küstennahen Meeresspiegel und verglich die Ergebnisse mit 385 aktuellen wissenschaftlichen Publikationen aus den Jahren 2009 bis 2025.

Umrechnung von Daten und Geoid-Modellen

So seien oft Daten von Land- und Meeresspiegelmessungen von verschiedenen Satelliten mit unterschiedlichen Geoid-Modellen verwendet worden, die aber umgerechnet werden müssten, um sie korrekt zu verknüpfen. Die Geoid- oder Quasigeoid-Lösungen werden aus zugehörigen Schwerefeldmodellen berechnet. Neben dem Schwerefeld-Modell EGM2008 wurde in den Küstenschutz-Studien als vertikale Referenz häufig auch noch das ältere Schwerefeld-Modell EGM96 (Earth Gravitation Modell 1996) verwendet. Wenn man die Höhe eines Landes relativ zum Meeresspiegel bestimmen möchte, muss man die verschiedenen Datensätze zunächst jedoch in ein gemeinsames Bezugssystem umrechnen. Dann kann man die relative Höhe zwischen beiden korrekt ermitteln.

An Geoid-Modellen hängt das Höhenmodell der Erde und damit auch jede Höhenangabe über »Normal Null« des Meeresspiegels. Es gibt nicht ein einzelnes globales überall best-angepasstes Geoid-Modell, sondern mehrere regional optimierte, für Deutschland zum Beispiel das regionale Quasigeoid-Modell GCG2026 (German Combined Quasi-



Meeresspiegel falsch berechnet: Regionale Diskrepanzen zwischen dem bisher angenommenen Meeresspiegel zu den tatsächlichen Pegeln. Rote Farbtöne zeigen höhere Pegel als zuvor geschätzt, je dunkler das Rot, desto stärker die Abweichung.

geoid 2016; 2026 wird ein Nachfolgemodell berechnet). Global ist derzeit das EGM2008 das am meisten genutzte Schwerefeld-Modell.

Der deutsche Mathematiker und Geodät Johann Benedict Listing prägte 1873 den Begriff Geoid (griechisch-neulateinisch für Erd-ähnlich). Es bezeichnet die physikalisch definierte, unregelmäßige Form der Erde, die dem mittleren Meeresspiegel in Ruhe entspricht und überall senkrecht zur Lotrichtung steht. Lokale Dichteanomalien (Massenverteilung) im Erdinneren bestimmen die Form des Geoids. Messungen der Erdbeschleunigung (Satelliten-Gravimetrie) mit Satellitenmissionen wie GRACE-FO werden genutzt, um das Schwerefeld und somit auch das Geoid monatlich zu kartieren.

Prognosen für den Küstenschutz

Für den Küstenschutz sind aber nicht nur korrekte Angaben über den aktuellen Meeresspiegel entscheidend, sondern vor allem auch Prognosen. Seit dem späten 19. Jahrhundert stieg der Meeresspiegel global um 21 bis 24 Zentimeter. Ob und in welcher Geschwindigkeit die Eispanzer Grönlands und der Antarktis schmelzen, entscheidet über die Zukunft vieler Küstenregionen mit Hunderten Millionen Menschen. Um die Massenveränderungen der Eisschilde messen zu können, nutzt die Geodäsie die Satellitenmission GRACE-FO (Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On). Seit Beginn der Messungen im Jahr 2018 waren es allein in der Antarktis so zum Beispiel 900 bis 1.000 Gigatonnen Eis, die verloren gingen und den globalen Meeresspiegel mit antarktischen Süßwasser in den vergangenen sieben Jahren um 2,8 Millimeter ansteigen ließen.

Doch was, wenn die Ergebnisse falsch interpretiert werden, weil eine unbekannte Größe im Spiel ist? Wenn nicht das Eis das größte Rätsel ist, sondern das Land und die Masse darunter, so wie für Anders Celsius rund 300 Jahre zuvor? Nach seinen Beobachtungen war der Meeresspiegel um 1,4 Zentimeter pro Jahr gesunken und lag 1743 rund

17 Zentimeter niedriger als zwölf Jahre zuvor. Doch Celsius' Beobachtungen enthielten einen Fehler: Der Meeresspiegel sank nicht. Es war das Land, das sich hob. Verantwortlich dafür war das »Glazialisostatische Adjustment (GIA)«. Die enorme Last des Eises hatte während der letzten Eiszeit dazu geführt, dass das Land nach unten gedrückt wurde und es nach dem Abschmelzen seither wieder »zurückfederte«.

Eine im Januar 2026 veröffentlichte Studie der Technischen Universität Dänemark (DTU) warnte, dass die Auswertungsmodelle für GRACE-FO-Daten zwar konsistent seien und ein zuverlässiges Instrument in der Klimabeobachtung darstellten. Dass Landhebungen des GIA aber große Unsicherheiten bei Schwerefeldmessungen beinhalten können, da die Mechanismen und Vorgänge im Erdmantel bis heute nicht ausreichend erforscht seien. Denn die Landhebung kann auch zu Veränderungen tief im Erdmantel führen, wodurch zähflüssiges Mantelmaterial nach oben strömt. Dieser Massenzufluss kann die lokale Schwerkraft in der Antarktis erhöhen und den gemessenen Eisverlust maskieren.

Die GIA-Unsicherheit in der Antarktis liegt in einer Größenordnung von zehn bis einigen zehn Prozent. Dies entspricht einer Unsicherheit von ± 50 bis 100 Gigatonnen an Eismassenverlust, was seit Beginn der GRACE-FO-Messungen im Jahr 2018 einem möglichen höheren Beitrag der Antarktis zum globalen Meeresspiegel-Anstieg von insgesamt 2,5 bis 3,0 Millimeter bedeuten könnte.

Wie sich der Anstieg des Meeresspiegels vor Schweden rund um die Insel Lövgrund und der Hafenstadt Östhammar bemerkbar macht, können dortige Wissenschaftler nun jedenfalls einfacher untersuchen. Für den lokalen Küstenschutz steht ihnen jetzt ein Angebot des Forscherteams der Universität Wageningen zur Verfügung. Mit Hilfe von Supercomputern haben sie vier globale Höhenmodelle korrekt mit den aktuellsten Meeresspiegelmessungen verknüpft und die Datensätze frei zugänglich gemacht. Länder und Organisationen können damit ab sofort präzisere Küstenanalysen durchführen, schreiben die Autoren der Studie.

Kontakt: martin.buennagel@zon-verlag.de