

Periodisch deformiert

Franziska Konitzer

Die Gezeiten sind viel mehr als nur Ebbe und Flut – gerade auch für die Geodäten, die sich mit ihnen beschäftigen.

Übrigens ist gerade Ebbe an der Nordsee. Nicht, dass man davon etwas in München – dem derzeitigen Standort der Autorin – mitbekommen würde.

Aber die Gezeitenkräfte wirken überall. »Es gibt einerseits die Gravitationskraft, zum Beispiel zwischen dem Mond und der Erde«, erklärt Ludger Timmen von der Leibniz Universität Hannover. »Die zweite Kraft im Bezugssystem zweier um einen gemeinsamen Drehpunkt rotierenden Himmelskörper ist die Zentrifugalkraft.« Während die Zentrifugalkraft überall auf der Erde gleich ist, ist die Gravitationskraft auf der dem Mond zugewandten Seite aufgrund der geringeren Entfernung etwas größer. Auf der mondabgewandten Seite hingegen ist die Gravitationskraft kleiner als die Zentrifugalkraft. »Das Ergebnis ist ein Gezeiten- oder Residuenvektor«, sagt Timmen. Nur im Massenschwerpunkt der Erde gibt es keine Gezeiten, da sich dort die beiden Kräfte aufheben.

Wohlgemerkt, dieser Effekt tritt nicht nur zwischen Erde und Mond auf, aber für die Erde ist das Zusammenspiel mit dem Mond am Wichtigsten. Die Gezeitenkräfte der Sonne sind weniger als halb so stark wie die des Mondes. »Man kann theoretisch auch berechnen, welchen Einfluss Jupiter auf die Erde hat,« sagt Henryk Dobsław vom Geoforschungszentrum Potsdam. »Aber diese Gezeiteinflüsse der anderen Planeten sind gegenüber den Kräften von Mond und Sonne um mindestens eine Größenordnung kleiner.«

Sonne, Mond und Gezeiten

Die Gezeitenkräfte kann man als zeitlich variables Potenzial darstellen, das auf die Erde wirkt – und zwar auf die ganze Erde. Das heißt, dass der gesamte Erdkörper deformiert wird.

»Tatsächlich ist der Gezeiteffekt der festen Erde ein sehr starker Effekt«, erzählt Ludger Timmen. »Zweimal am Tag hebt sich Hannover innerhalb von sechs Stunden bis zu vierzig Zentimeter rauf und anschließend wieder runter.« Natürlich bekommt man davon als Normalsterblicher nichts mit, aber dieser Gezeiteffekt ist inzwischen mit Hilfe von GNSS-Systemen leicht messbar. Die wichtigste Messmethode für diese Art von Gezeiten ist aber das Gravimeter. Gravimeter erlauben die Bestimmung der Schwerebeschleunigung der Erde an einem bestimmten Punkt – zum Beispiel fast auf dem Gipfel der Zugspitze, wo seit 2018 ein vom Geoforschungszentrum Potsdam installiertes Superleitgravimeter bei -270 Grad Celsius Betriebstemperatur die Gezeiten registriert.

Tatsächlich interessieren den Geodäten dabei weniger die Gezeiten, sondern eigentlich die Massenbewegungen innerhalb der Zugspitze – das Wasser im Gestein, das Eis, die Gletscher. Wenn man sich den Wert für die Erdbeschleunigung vornimmt, der oft auf zwei Nachkommastellen mit 9,81 Metern pro Sekunde Quadrat angegeben wird, kommen diese Effekte in der achten Nachkommastelle ins Spiel. »Mit den Gezeitenkräften geht es aber ab der sechsten Nachkommastelle los«, sagt Timmen. »Deshalb brauchen wir eine Modellvorstellung über die unterschiedlichen Beiträge. Ein Gravimeter alleine kann nicht als Orakel funktionieren.«

Glücklicherweise ändert sich an den Gezeiten der festen Erde auch im Verlauf von Jahrtausenden nicht viel bis gar nichts. Und deshalb hatten Geodäten genügend Zeit, um die Deformationen und damit die Änderungen im Schwerfeld genau zu erfassen und entsprechende Modelle zu erstellen. Diese erlauben es ihnen, die Gezeiteffekte »herauszurechnen« und so an die Effekte zu gelangen, die sie heutzutage mehr interessieren.

Resonanzen im Meer

Etwas anders schaut der Fall aus, wenn man den Gezeitenklassiker untersucht: das Meer. »Das ist nicht mehr so einfach wie bei der festen Erde,« sagt Henryk Dobsław. »Die Wasserbewegungen aufgrund der Gezeitenkräfte hängen nämlich stark von der Geometrie der Ozeanbecken ab. Es ergeben sich Resonanzen, die für verschiedene Gezeitenperioden durchaus sehr unterschiedlich aussehen können.«

Dobsław gibt ein Beispiel: »Im Nordatlantik ist die Resonanz der M2, also der halbtäglichen Hauptzeit des Mondes, sehr groß. Insbesondere in der Deutschen Bucht ist das Signal noch einmal ein bisschen ausgeprägter, weil die Welle dort von Nordwesten reinläuft und sich an der Küste aufsteilt.« Deshalb sind Wattwanderungen möglich. Die Ostsee hingegen mit ihren kaum bemerkbaren Gezeiten ist ein gutes Gegenbeispiel. Ihr Becken ist schlicht und ergreifend zu klein, als dass sich dort die Gezeitenkräfte bemerkbar machen würden.

Um die Gezeiten des Meeres zu messen, greifen Geodäten nicht nur auf Gravimeter zurück. Stattdessen gibt es schon seit vielen Jahrzehnten ein gut ausgebautes Netz aus Messstationen, die den Küstenpegel erfassen, also die Änderung des Meeresspiegels relativ zur festen Erde an Land. Die Höhenreferenzen werden neuerdings regelmäßig mit GNSS überprüft. Eine zweite wichtige Messmethode, die es erst seit rund 25 Jahren gibt, sind Druckpegelmessgeräte. Diese können in Tiefen bis zu mehreren tausend Metern am Ozeanboden verankert werden.

Laut Dobsław haben diese Geräte allerdings einige Schönheitsfehler. Ihre vertikale Höhenlage kann beispiels-



Bild: Ludger Timmen

Links: Das Zugspitze Geodynamic Observatory Germany (ZUGOG, seit 2018) des Geoforschungszentrums Potsdam. Rechts: Im Vordergrund steht das Absolutgravimeter der Leibniz Universität Hannover, das seit 2004 auf der Zugspitze eingesetzt wird. Im Hintergrund misst das stationäre Supraleitgravimeter des Geoforschungszentrums Potsdam.

weise nicht mit Hilfe von GNSS überprüft werden, das ja schon wenige Zentimeter unter Wasser scheitert. Darüber hinaus funktionieren die Geräte nicht sehr lange, da die Umgebungsbedingungen in etwa 4000 Metern Meerestiefe – man denke nur an den Druck – ziemlich rau sind. So müssen die Druckpegelmesser nach etwa einem Jahr geborgen, gewartet und wieder versenkt werden – und dabei trifft man nie exakt die gleiche Stelle. In sich konsistente Zeitreihen dieser Geräte sind somit sehr viel kürzer als etwa bei den Küstenstationen.

Und schließlich bleibt Geodäten noch der Weg nach oben – beziehungsweise der von Satelliten nach unten. Altimetriemissionen wie TOPEX/Poseidon, die von 1992 bis 2006 aktiv war, oder Satellitengravimeter wie GRACE (2002–2017) liefern über Jahre hinweg eine globale Übersicht über die Gezeiten.

Für die Meeresgezeiten gibt es somit eine Vielzahl von Messmöglichkeiten, sie ergänzen sich auch gegenseitig. Auch Ludger Timmen unternimmt mit seinen Gravimetern Exkursionen nach Helgoland, um dort Schwerfeldänderungen und die Gezeiten zu erfassen. Er sammelt dort Daten, die unter anderem die Satellitenmission GRACE Follow-On unterstützen sollen, welche seit 2018 gemeinsam von der NASA und dem GFZ betrieben wird.

Gezeiten im Modell

Diese Fülle an Daten ist aber auch an Land nötig, denn die Meeresgezeiten und der resultierende Tidenhub reagieren bereits auf kleine Änderungen ziemlich stark. Henryk Dobsław kann das vor allem in den Modellen, die er realisiert, beobachten. »Man nimmt sich eine gewisse Tiefen-

verteilung vor und guckt dann, was für eine Welle sich ausgebildet. Und wenn man dann ein bisschen spielt, die Tiefenverteilung oder die Reibungsparametrisierung ändert, dann sind die entstehenden Gezeitenhöhen an der Küste sehr unterschiedlich, oder auch die Eintrittszeiten des Hochwassers.«

Änderungen können bereits bauliche Veränderungen an der Küste sein. Beispielsweise kann der Bau eines Hafens die Geometrie des Ozeanbeckens so verändern, dass die Resonanzen anders sind – und diese beeinflussen die Gezeiten. Könnte man sich theoretisch etwas überlegen, um der Ostsee zu mehr Gezeitenhöhen zu verhelfen? »Man könnte sie zehnmal größer machen«, antwortet Dobsław. »Aber dann wäre es nicht mehr die Ostsee.«

Die Ostsee ist und bleibt einfach zu klein.

Gezeiten in der Atmosphäre

Schließlich gibt es noch die Erdatmosphäre, die periodisch angeregt wird. Neben den Gezeiten der festen Erde und den Gezeiten der Meere gibt es nämlich in der Lufthülle periodische Druckschwankungen. Allerdings mit dem entscheidenden Unterschied, dass die atmosphärischen Gezeiten nicht auf der Schwerkraft basieren, sondern von der periodischen Sonneneinstrahlung und damit einem Energieeintrag in der mittleren Erdatmosphäre angeregt werden. Als Gezeit wird dieses Phänomen nur bezeichnet, weil es ein regelmäßig wiederkehrendes Signal ist. Haben die gravitativen Gezeitenkräfte also gar keine Auswirkungen auf die Erdatmosphäre?

Henryk Dobsław hat sich mit diesem Thema vor einigen Jahren zusammen mit einem Kollegen in einem Fachartikel auseinandergesetzt. Sie wollten wissen, ob es eine lunare Gezeit in der Atmosphäre gibt. »Es gibt sie«, sagt Dobsław. Sie wird von unten angeregt. Es gibt im Pazifik eine Veränderung der Meereshöhe aufgrund der Ozeangezeit. Durch diese periodische Veränderung der Meereshöhe wird eine Schwingung in der Erdatmosphäre angeregt. Bevor man sich nun fragen kann, was das alles bedeutet, fügt Dobsław hinzu, »Aber das ist wirklich ein so kleiner Effekt, da wird es dann eher akademisch.«

In München merkt man von alledem immer noch nichts. Auch nicht von der Hebung und Senkung des Bodens unter den eigenen Füßen. Aber der Gezeitenkalender für die Nordsee verrät, dass die Flut auch heute mit schönster Vorhersagbarkeit kommt.

Kontakt: f.konitzer@gmail.com