

Supraleitende Gravimeter – Im Schwerefeld des Klimawandels

Martin Bünnagel

Das Schwerefeld der Erde schwankt regional und zeitlich betrachtet. Es ist abhängig von der inhomogenen DichteVerteilung der Erdmassen, wie zum Beispiel Granit oder Sandboden, und von zeitlichen Veränderungen im Untergrund, wie zum Beispiel durch das Grundwasser. Kann man die Erdanziehungskraft und die damit verbundene Gravitation messen, macht sie Verborgenes sichtbar. Gravimeter sind für Geodäsie und Geophysik ein gewichtiges Werkzeug – insbesondere in Zeiten des Klimawandels.

Bevor die Ahrtalüberflutung (Juli 2021) begann, kündeten starke Vibrationen des Erdbodens zwischen den belgischen Talsperren Eupen und Gileppe davon, dass etwas Außergewöhnliches in der Weser vorgehen musste. Eine unvorstellbare Gewalt schoss den Fluss hinunter und ließ die Nadeln des Seismografen der geophysikalischen Forschungsstation Membach erzittern.

Das dortige supraleitende Gravimeter maß zu diesem Zeitpunkt bereits seit 27 Jahren hydrologische Veränderungen in der Region. Doch nun registrierte das Gravimeter über zwei Tage hinweg eine kontinuierliche und extreme Schwereänderung, bis sich ein stabiler Wert eingependelte. Da der Boden durch den bisherigen Regen vollständig gesättigt war, floss das Regenwasser nun komplett an der Erdoberfläche ab und schoss in die Flüsse. Innerhalb von 48 Stunden ergossen sich an einigen Orten über 270 mm Regen pro Quadratmeter auf das Land.

Die fortschreitende Regenwasseraufnahme des Bodens, bis zur vollständigen Sättigung, wurde indirekt durch die Schwerefeldmessungen mit dem supraleitenden Gravimeter in Membach beobachtet. In Belgien, Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen hatten tagelange Regenfälle die Böden und Grundwasserspiegel schon vor dem 14. Juli durchnässt. Die gewaltigen Wassermengen, die sich schließlich entluden, konnten die Böden der Region am Nachmittag des 14. Juli nicht mehr aufnehmen, wie die Schwerefeldmessungen des supraleitenden Gravimeters in Membach in Echtzeit dokumentierten.

Terrestrische Gravimetrie

Die Prozesse im Inneren der Erde zu verstehen, ist Kernaufgabe der terrestrischen Gravimetrie an weltweit verteilten Forschungsstandorten. In Membach ebenso wie im Müritz-Nationalpark, wo das Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ) ein supraleitendes Gravimeter betreibt, das sich im TERENO-Nordost-Observatorium mit den Klimawandelfolgen in der Region beschäftigt. Wo es im DFG-Sonderforschungsbereich »TerraQ«, geleitet an der Leibniz

Universität Hannover, unter anderem um die Untersuchung regionaler Wasserkreisläufe geht. Aber auch um die Kombination verschiedener Messverfahren aus supraleitendem Gravimeter, Feldgravimeter, Quantengravimeter und den Satelliten-Daten von GRACE/GRACE-FO, um möglichst hohe zeitliche und räumliche Auflösungen zu erreichen – in einem 300×300 Quadratkilometer großen Gebiet in den sandigen Böden Brandenburgs.

Phänomene der Tieftemperaturphysik

Supraleitende Gravimeter folgen dabei dem Prinzip einer Federwaage. Herzstück ist eine supraleitende Kugel, die in einem stabilen Magnetfeld schwebt, das von supraleitenden Spulen erzeugt wird. Der Strom fließt dabei widerstandslos und das erzeugte Magnetfeld ist extrem stabil, da dank Supraleitung kein Energieverlust auftritt – ein Phänomen der Tieftemperaturphysik. Deren Pionier Heike Kamerlingh Onnes hatte 1911 bei Experimenten mit Quecksilber bei sehr tiefen Temperaturen entdeckt, dass der elektrische Widerstand dieses Metalls bei 4,2 Kelvin ($-268,95^\circ\text{C}$) plötzlich auf null fiel. Im Jahr 1913 erhielt er dafür den Nobelpreis für Physik.

Supraleitende Magnete

Doch das Verhalten der Elektronen bei $-268,95^\circ\text{C}$ beeinflusst auch magnetische Felder auf besondere Weise. So zeigen Supraleiter den sogenannten Meissner-Effekt, bei dem sie magnetische Felder aus ihrem Inneren verdrängen. Das hat zur Folge, dass ein supraleitendes Material in der Lage ist, externe Magnetfelder abzuschirmen und magnetisch »schwebend« zu agieren. So war die Entwicklung supraleitender Magnete auch eine der ersten praktischen Anwendungen der Supraleitung. Mit ihr konnte u. a. die Magnetresonanztomographie (MRT) realisiert werden, die Transrapid-Magnetschwebebahn und der Large Hadron Collider (LHC), in dem supraleitende Magnete Teilchenstrahlen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigen. Aktuell spielen sie auch eine Schlüsselrolle in der Entwicklung von Quantencomputern, da sie es ermöglichen, Qubits mit hoher Präzision zu steuern und zu manipulieren.

Supraleitende Gravimeter

Zeitgleich mit der Realisierung der Magnetschweebahnen in den 1970er Jahren wurde auch Forschung zur Entwicklung eines supraleitenden Gravimeters betrieben, die 1978 in der Vorstellung des ersten funktionierenden Prototyps durch G. W. Luther und D. T. Deventer mündete.



Der Schweingartensee liegt im Serrahner Teil des Müritz-Nationalparks. Kleines Bild: Supraleitendes Gravimeter, das Änderungen der Schwerkraft im Bereich von 10^{-12} m/s^2 detektieren kann.

Herzstück eines supraleitenden Gravimeters ist eine supraleitende Kugel, typischerweise mit der Metalllegierung Niob beschichtet. Zudem bauen zwei supraleitende Spulen ein stabiles Magnetfeld auf, das als Gegenkraft zur Schwerkraft auf die Kugel wirkt und sie ausgleicht. Der ganze Sensor, Gehäuse mit Innenleben, befindet sich in einem Heliumbad bei rund $-268,95^\circ\text{C}$. Wenn sich die lokale Gravitationskraft ändert, zum Beispiel durch Gezeiten, tektonische Aktivität oder Änderungen des Grundwasserspiegels, verschiebt sich die schwebende Kugel minimal in ihrer Position. Diese vertikalen Bewegungen werden mit einem 3-Plattenkondensator gemessen und die supraleitende Kugel über diese Rückkopplungsschleife durch die Spulen schwebend in ihrer Position gehalten. Die dafür notwendige Stromstärke ist das Messsignal, das in Änderungen der Schwerkraft (g) umgerechnet wird. Ein supraleitendes Gravimeter kann so Änderungen der Schwerkraft im Bereich von 10^{-12} m/s^2 detektieren – dies entspricht einer Verschiebung der Kugel im Picometerbereich.

Anwendungen

Die Geodäsie nutzt supraleitende Gravimeter auf vielfältige Weise. Sie ermöglichen zum Beispiel die präzise Messung von Gezeitenkräften, die durch die Gravitationswirkungen von Mond und Sonne verursacht werden. Sie helfen auch bei der Erfassung von Schwereänderungen infolge der Polbewegung der Erde. Supraleitende Gravimeter können zudem Änderungen in der Schwerkraft erfassen, die seismische Aktivitäten verursachen. Dadurch können sie zur Überwachung von Erdbeben und den damit verbundenen Eigenschwingungen der Erde eingesetzt werden. Und eine der wesentlichen Anwendungen liegt in der Überwachung von Wasserhaushaltsveränderungen im Untergrund – insbesondere in Zeiten des Klimawandels.

Internationale Netzwerke

International existieren mehrere Netzwerke und Kooperationen, in die Forschungsstandorte mit supraleitenden Gravimetern eingebunden sind. In Deutschland koordinieren zum Beispiel das Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (BKG) und die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) den »International Geodynamics and Earth Tide Service« (IGETS), einen Verbund mit 47 Forschungsstationen. Im IGERTS werden hochpräzise Langzeitdaten von weltweit verteilten supraleitenden Gravimetern koordiniert. Auch die »International Association of Geodesy« (IAG) fördert die internationale Zusammenarbeit und betreibt verschiedene wissenschaftliche Kommissionen und Dienste, die sich mit globalen Schwerfeldmessungen befassen und supraleitende Gravimeter-Daten in globale geodätische Modelle integrieren.

Wasser und Gravitation

Das Grundprinzip ist dabei immer gleich und wird auch in der geophysikalischen Forschungsstation Membach und vom Geoforschungszentrum im Müritz-Nationalpark genutzt: Masse beeinflusst die Gravitation. So ist die Gravitationskraft direkt proportional auch zur Masse des Wassers im Boden. Steigt der Grundwasserspiegel und nimmt damit der Sättigungsgrad zu, erhöht sich die Masse pro Flächeneinheit und somit auch die lokale Gravitationskraft. Sinkt der Grundwasserspiegel oder trocknet der Boden aus, verringert sich die Masse und die lokale Gravitation nimmt ab. Das supraleitende Gravimeter misst dabei kontinuierlich die lokale Gravitationsbeschleunigung. So könnten supraleitende Gravimeter laut des Forscherteams in Membach in Zukunft auch eine wichtige Rolle im Katastrophenschutz und bei der Beobachtung extremer Wetterereignisse spielen, indem sie die durch den Wasserstand bedingte Variation der Gravitation in Echtzeit messen und Teil eines Frühwarnsystems werden. **Kontakt:** martin.buennagel@zon-verlag.de