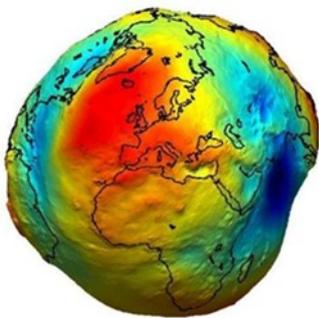


## Kann Wasser auch bergauf fließen?

Der Nullpunkt des Donauegels in Regensburg liegt auf einer Höhe von 324m, derjenige von Passau auf 275m. Die Donau fließt also von Regensburg nach Passau – immer bergab. Der Wasserspiegel eines ruhigen Sees erscheint uns horizontal – schließlich sind doch die Uferpunkte und der Wasserspiegel überall gleich hoch.

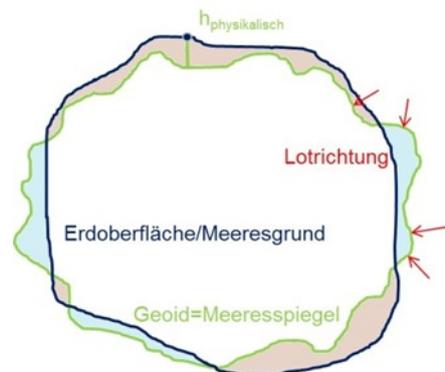
Wirklich?

Gehen wir der Frage kurz auf den Grund.



Das Geoid in ca. 15000-facher Überhöhung

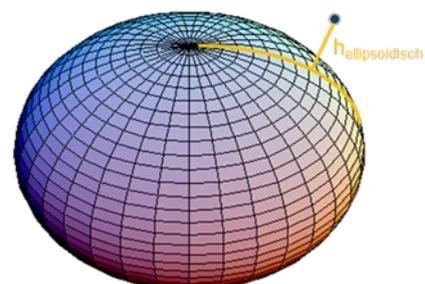
Die Oberfläche dieses Geoides ist der Meeresspiegel, den man sich auch unter dem Festland fortgesetzt denkt. Seine Gestalt ist abhängig von Betrag und Richtung der Schwerkraft an der jeweiligen Stelle. Sie wird hauptsächlich von der Massenverteilung in der Erde und durch die Fliehkraft der Erdrotation beeinflusst. Das Lot steht überall senkrecht auf dieser Fläche. Die Form des Geoides ist daher völlig unregelmäßig und auch heute nur als Näherung bekannt, denn auf dem Festland ist die Schwerkraft auf Höhe Null nicht direkt messbar.

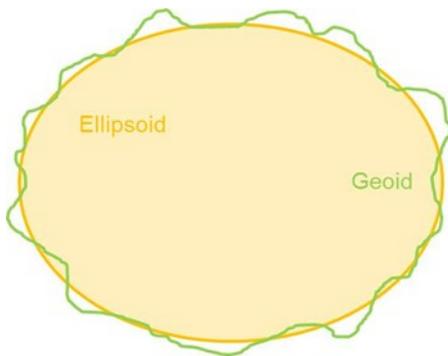


Die physikalische Höhe eines Punktes auf der Erdoberfläche bezieht sich auf das Geoid.

Höhen über der Geoidfläche nennt man auch *physikalische Höhen*. Das klassische und genaueste Verfahren zu ihrer Bestimmung ist das Nivellement (Prinzip der Wasserwaage). Sie entsprechen unserem natürlichen Empfinden von horizontal und lotrecht, bergauf und bergab.

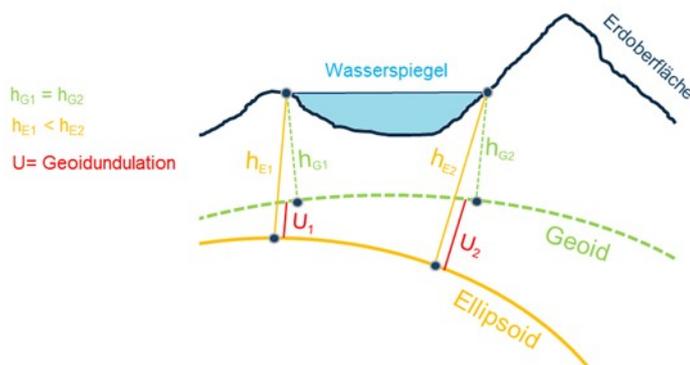
Anders verhält es sich mit den *ellipsoidischen Höhen*. Diese erhält man aus der Vermessung mit Satelliten (GNSS-Messung, z.B. GPS und GLONASS), die heute zum Standard gehört. Diese Höhen beziehen sich auf die Oberfläche eines so genannten Rotationsellipsoides.





Die Form dieses Ellipsoids wurde so gewählt, dass es das Geoid weltweit möglichst gut ersetzt. Viele Berechnungen werden dadurch vereinfacht. Da die Schwerkrafteffekte hier keinen Einfluss auf die Höhenbestimmung haben, sprechen wir auch von *geometrischen Höhen*.

Die Oberflächen von Geoid und Ellipsoid, und damit auch die darauf bezogenen Höhen, haben in Deutschland einen Abstand von 40 bis 50 Meter, weltweit bis zu 100 Meter. Diesen Abstand nennt man *Geoidundulation*. Er variiert lokal recht stark – mehrere Zentimeter auf einen Kilometer Horizontalentfernung. Darüber hinaus verlaufen Geoid und Ellipsoid oft gegenläufig. Das führt dazu, dass „aus Sicht“ der ellipsoidischen Höhen das Wasser auch mal bergauf fließt.



*Stark schematisierte Darstellung der unterschiedlichen Höhenmodelle.*

*Ellipsoidische Höhen  $h_E$  erhalten wir aus GNSS-Messungen, Geoidhöhen  $h_G$  durch Nivellement. Bindeglied ist die Geoidundulation.*

Ellipsoidische Höhen sind also für praktische Zwecke, etwa die Planung eines Abwassernetzes oder die Beurteilung von Hochwassergefahren, nicht direkt verwendbar. Sie müssen daher durch die Addition der Geoidundulation in physikalische Gebrauchshöhen umgerechnet werden.

Geometrische Höhen aus geodätischen GNSS-Messungen haben eine Genauigkeit von 2-3 cm. Mit entsprechend aufwändigen Verfahren können auch wenige Millimeter erreicht werden. Die Genauigkeit der daraus berechneten Gebrauchshöhen hängt also wesentlich vom Fehleranteil der Geoidundulationen ab. Es gilt also, die Form des Geoides und seine Lage zum Ellipsoid möglichst genau zu bestimmen.

Dies ist hauptsächlich durch die Messung der Schwerkraftverhältnisse auf der Erdoberfläche, die *Gravimetrie* möglich.



Globale Schwerefeldmodelle werden vor allem mit Hilfe der Raumfahrttechnik erstellt. Der Satellit GOCE umkreist die Erde seit 2009 und arbeitet wie eine große Wasserwaage. Mit seinen Messungen werden Schwerkraft- und Niveauunterschiede mit einer Auflösung von etwa 100 km bestimmt.

Dieser weltweite Rahmen, genügt aber nicht für kleinteilige Vermessungsarbeiten mit hohen Genauigkeitsanforderungen und muss deshalb mit auf der Erdoberfläche gemessenen Schwerewerten ergänzt werden.

Geodätische Institute und Landesvermessungsbehörden schaffen deshalb Schwerefestpunktfelder in mehreren Verdichtungsstufen durch absolute und relative *Gravimetrie*.

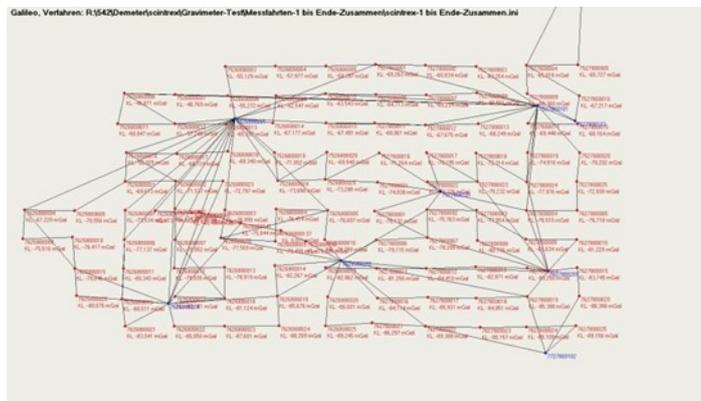


Absolutgravimeter A10

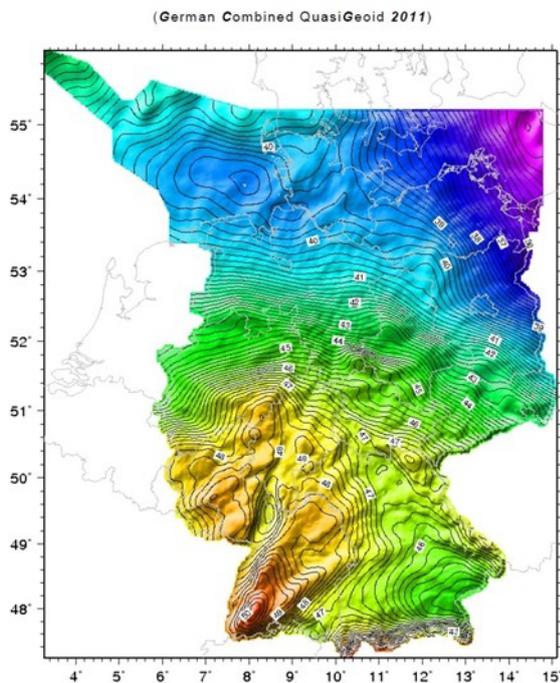


Relativgravimeter Scintrex CG-5

Um eine möglichst genaue und lückenlose Bestimmung des Geoids zu ermöglichen, verdichten die Vermessungsverwaltungen der Bundesländer (AdV) das bereits vorhandene Schwerefestpunktfeld in einem flächenhaften Raster. Der ideale Punktabstand beträgt 2 bis 4 Kilometer. Wegen der Größe Bayerns beschränkt man sich hier aus wirtschaftlichen Erwägungen auf 4 Kilometer. Die Punkte werden durch GNSS-Messung koordiniert, jedoch nicht vermarktet.



Beispiel eines Beobachtungsnetzbildes für das Schwere raster



*Karte mit Linien gleicher Undulationswerte (GCG2011). Quelle: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*

Mit diesen globalen und lokalen Messwerten berechnet das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Erdmessung in Hannover (IfE) das „German Combined QuasiGeoid“ (GCG). Dieses Geoid wird in regelmäßigen Abständen mit den aktuellen Messungen neu berechnet und in der Genauigkeit gesteigert. In seiner derzeitigen Fassung von 2011 erreicht es eine Genauigkeit von circa 1 - 2 cm im Flachland, 3 - 4 cm im Hochgebirge und 4 - 10 cm im Meeresbereich.

Nimmt man die Fehleranteile der GNSS-Messung und des Geoides mit je etwa 2-3 cm an, ergibt sich daraus für eine neu bestimmte Gebrauchshöhe ein Gesamtfehler von 3-4 cm. Berücksichtigt man die Schnelligkeit dieser Messmethoden (z.B. unter 1 Minute bei RTK-Messung mit SAPOS), ist dies ein hervorragender Wert, der in Zukunft noch verbessert wird. Die Genauigkeit der Höhenbestimmung durch klassisches Nivellement kann jedoch noch nicht erreicht werden.