

Is de aarde een bolvormige koe?

Theoretisch natuurkundigen houden van vereenvoudigde modellen waarmee ze de essentiële fysica van een probleem kunnen beschrijven. Als grap zeggen we dat we dingen kunnen berekenen, zolang we aannemen dat het gaat om een [bolvormige koe in een vacuüm](#). Bij al die benaderingen moeten we echter wel oppassen: soms zijn de details juist belangrijk!

Om de aarde te beschrijven, zou een natuurlijke eerste aanname zijn dat onze planeet een homogene bol is die rondzweeft in een verder lege ruimte. De aarde is natuurlijk ook redelijk rond, en de ruimte is ook redelijk leeg. Toch zijn die aannames niet voldoende als we bijvoorbeeld - erg relevant tegenwoordig - veranderingen in de zeespiegel willen voorspellen. Wat zijn precies de verschillen tussen de aanname van een 'bolvormige koe' en de echte aarde?

De dikke aardbol

Ten eerste heeft de draaiing van de aarde een effect op haar vorm. Dit effect heb je zelf meegemaakt als je ooit in een zweefmolen hebt gezeten: hoe sneller de molen draait, hoe meer je stoel naar buiten zwenkt en begint te zweven. Wat hier gebeurt is dat de draaiing van de molen je stoel versnelt, en hiermee het neerwaartse effect van zwaartekracht tegenwerkt. Hoe verder je stoel van de draaias van de molen af is bevestigd, hoe makkelijker die stoel naar buiten zwenkt, omdat je daar relatief sneller draait. In de aarde gebeurt hetzelfde: de materie die zich verder van de draaias bevindt, zwenkt ook meer naar buiten. Hierdoor is de aarde ellipsvormig, een beetje geplet in de richting van de noord-zuidas. Om precies te zijn: de straal van de aarde in de poolrichting is zo'n 21,4 km kleiner dan de straal naar de evenaar.



Afbeelding 1. Een zweefmolen

Afbeelding: [Christian Hartlep](#)

Bobbels

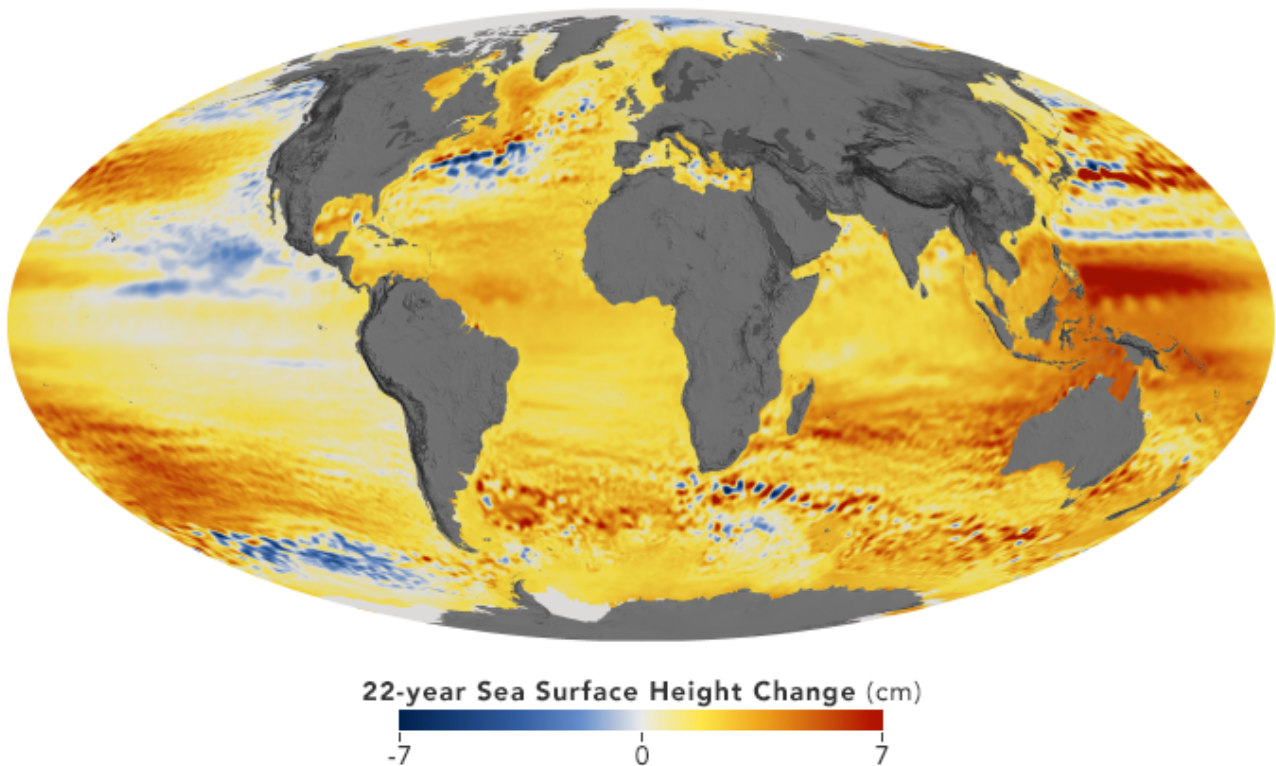
Behalve dat de aarde een beetje geplet is langs de poolas, is het oppervlak ook nog eens bobbelig. De aardkorst is niet eerlijk verdeeld over de planeet, en is dus niet overal even dik en heeft niet overal dezelfde dichtheid. Rond het Himalayagebergte is de aardkorst bijvoorbeeld kilometers dikker dan in Nederland, en de samenstelling van continentale platen is anders dan die van de aardkorst op de zeebodem. Dit heeft een significante invloed op de sterkte van het lokale zwaartekrachtsveld ten opzichte van wat je zou verwachten bij een gladde ellipsoïde aardbol. Tegenwoordig kunnen we deze verschillen meten met satellieten, en weergeven zoals in het filmpje hieronder. Het bobbelige oppervlakte dat je daar ziet is een 'oppervlak van gelijkwaardige zwaartekrachtspotential', wat inhoudt dat de aantrekking van het zwaartekrachtsveld op dat oppervlak overal even sterk is. De bobbeligheid is voor de duidelijkheid overdreven: in het echt is het maximale hoogteverschil rond de 200 meter. De vorm die zo ontstaat wordt ook wel de *geoïde* genoemd. Op [deze site](#) kun je zelf met de weergave van de geoïde spelen, met de iets oudere data van de GRACE-satelliet.

Video 1. De geoïde, gemeten door ESA's GOCE satelliet De kleuren en vorm van het oppervlak geven aan hoe sterk de afstand tussen het midden van de aarde en een punt waarop de zwaartekracht een gekozen sterkte heeft, varieert. Rode delen hebben een sterker zwaartekrachtsveld dan blauwe delen. Video: [ESA/HPF/DLR](#).

De geoïde laat zien wat het gemiddelde niveau van de zeespiegel zou zijn, zonder de effecten van stromingen, wind en het getij. Door de oneven massaverdeling in de aardkorst kan de hoogte van de zeespiegel dus meters verschillen! (In de afbeelding zijn de continenten dus weggehaald – waar nu land zit is in het echt natuurlijk geen zee, maar daar laat de geoïde bijvoorbeeld zien hoe hoog het water zou zijn als je kanalen zou graven vanaf de zee.) Deze variatie gaat wellicht tegen onze intuïtie in, omdat we eraan gewend zijn dat water zich gelijkmatig verdeelt.

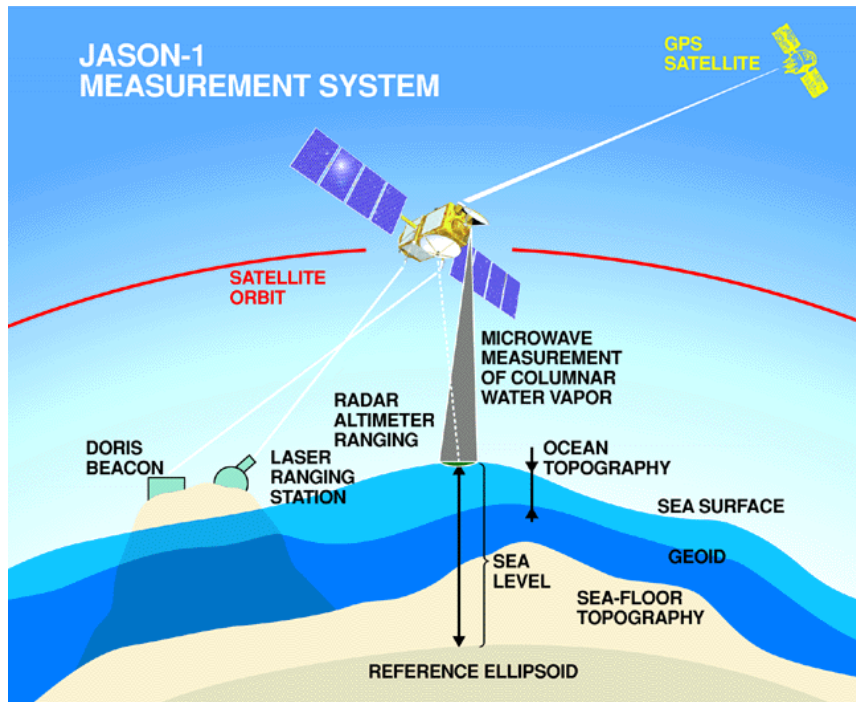
Een stijgende zeespiegel

Waar de bobbeligheid van het zwaartekrachtsveld van de aarde bijvoorbeeld een belangrijke rol speelt, is bij het meten van de zeespiegel en het voorspellen van veranderingen daarvan. Drie weken geleden publiceerde de Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) een [rapport](#) “over de oceaan en cryosfeer in een veranderend klimaat”. Dit rapport kwam in Nederland veel in het nieuws, omdat erin voorspeld werd dat de zeespiegel rondom Nederland komende eeuw maar liefst 84 cm zal stijgen – zelfs als we onze uitstoot van broeikasgassen sterk verminderen (zie [hier](#), of [hier](#)). Deze schatting is 10 cm meer dan wat in een eerder IPCC-rapport uit 2013 stond, omdat het ijs in (onder andere) Groenland en Antarctica nog sneller smelt dan was verwacht. Als we onze uitstoot niet verminderen, is de voorspelde stijging nog hoger.



Afbeelding 2. De zeespiegelstijging tussen 1992 en 2014Afbeelding: [Kel Elkins/NASA Earth Observatory](#).

De actuele hoogte van de zeespiegel (en hoe deze verandert in de loop van de tijd, zoals weergegeven in afbeelding 2) wordt ook gemeten met behulp van satellieten. Deze metingen zijn anders dan die van de geoïde: in plaats van het meten van de veranderende valversnelling door variaties in het zwaartekrachtsveld, gebruiken deze satellieten lasers of microgolfstraling om de afstand tussen de satelliet en het zeeoppervlak te meten. (Zie ook [ons eerdere tweedelige artikel](#) over hoe zulke afstandsmetingen gedaan worden en waar we ze nog meer voor gebruiken.) Het zeeniveau wordt daarna berekend als de afstand tussen het daadwerkelijke zeeoppervlak en een gestandaardiseerd referentie-ellipsoïde die de gemiddelde vorm van de aarde beschrijft.



Afbeelding 3. Hoe een satelliet de zeespiegel meet. Deze satelliet (Jason-1, werkend van 1992-2005) gebruikte radar om de zeespiegel te meten. De hoogte werd vergeleken met die van een referentie-ellipsoïde die de gemiddelde vorm van de aarde beschrijft. De positie van de satelliet wordt bijgehouden door een aparte GPS-satelliet, en een [lidar-systeem](#) op de grond. De hoeveelheid waterdamp in de atmosfeer wordt ook bijgehouden, omdat de microgolven van het radarsysteem hierdoor gehinderd worden. Afbeelding: [NASA/JPL](#).

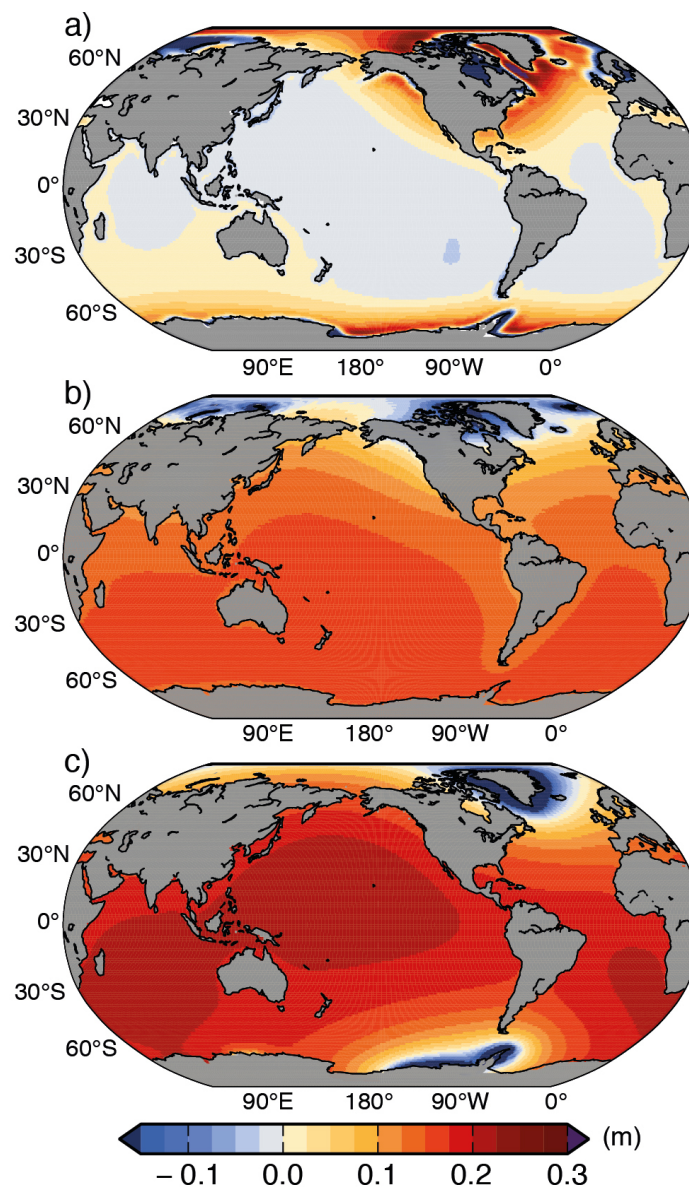
Moeilijke voorspellingen

Nu vraag je je misschien af wat de geoïde hiermee te maken heeft, omdat die in de hierbovengenoemde meting geen directe rol speelt. Als we willen voorspellen hoe de zeespiegel in de toekomst zal veranderen, moeten we er echter wel rekening mee houden! Een van de uitdagingen van zulke voorspellingen is dat er in een realistisch model veel effecten tegelijkertijd moeten worden meegenomen. Ondanks dat het duidelijk is dat de zeespiegel echt aan het stijgen is, is het dus ook geen wonder dat er zoveel verschillende modellen met elkaar vergeleken worden in de wetenschappelijke literatuur.

De modellen die in door de IPCC met elkaar vergeleken worden, nemen allemaal meerdere effecten mee. Afbeelding 4 laat de invloed van drie verschillende effecten zien. Het effect in afbeelding 4(a), met de moeilijke naam 'glaciale isostatische aanpassing', is nog een overblijfsel van de laatste ijstijd, zo'n 10.000 jaar geleden. De massa van het ijs dat toendertijd een groot deel van de aardbol bedekte, heeft de aardkorst letterlijk een beetje

ingeduwd. Sinds het ijs is gesmolten, is de korst langzaam maar zeker weer aan het stijgen, met enkele millimeters per jaar. Gebieden die niet onder het ijs lagen, zinken daardoor nog langzaam om die stijging te compenseren.

Afbeeldingen 4(b) en 4(c) laten respectievelijk de effecten van het smelten van gletsjers en de ijskappen zien. Hier worden meerdere effecten bij elkaar opgeteld. Natuurlijk leidt het smelten tot meer water in de oceanen, en dus tot een netto zeespiegelstijging. We weten echter ook dat de zeespiegel hierdoor niet overal gelijkwaardig stijgt. Dat heeft gedeeltelijk te maken met stromingen en het lokale zoutgehalte (wat daalt door smeltwater), maar ook de effecten van zwaartekrachtvariaties zijn belangrijk. Zo zie je bijvoorbeeld in paneel (c) dat de plaatselijke zeespiegel rondom Groenland en West-Antarctica zelfs zullen dalen!



Afbeelding 4. Verschillende effecten die leiden tot zeespiegelstijging De drie afbeeldingen laten de voorspelde verandering in zeespiegel zien tussen het gemiddelde van 1986-2000 en 2081-2100, door (a) glaciale isostatische aanpassing (GIA); (b) het smelten van gletsjers en (c) het smelten van de ijskappen. Deze voorspellingen zijn uit het IPCC-rapport uit 2013, dus al iets verouderd, en gaan uit van een gematigde vermindering van uitstoot van broeikasgassen. Afbeelding: [IPCC AR5 Climate Change 2013, Figure 13.18](#).

Het belangrijkste effect van de geoïde, de 'bobbelijkheid' van het aardse zwaartekrachtsveld, is dat water aangetrokken wordt door gebieden met meer massa. Omdat we weten wat de vorm van de geoïde is, weten we ook waar het zwaartekrachtsveld het sterkst is, en dus waar de gemiddelde zeespiegel hoger ligt. Door het smelten van de ijskappen verandert echter de massaverdeling van de aarde, en dus ook de vorm van de geoïde. Doordat de ijsmassa's op Antarctica en Groenland krimpen, trekken die gebieden ook minder water aan. Huidige veranderingen in de geoïde worden bijgehouden en gebruikt om voorspellingen te verbeteren.

Wat leren we hiervan? Behalve natuurlijk dat klimaatverandering natuurlijk een belangrijk probleem is dat we – zeker in ons laagliggende Nederland – serieus moeten nemen, is dit voorbeeld ook een goede les voor ons theoretisch natuurkundigen: hoewel bolvormige koemodellen problemen berekenbaarder kunnen maken, is de wereld om ons heen vaak toch iets ingewikkelder!