Atmosferische getijden

Huug van den Dool en Henk de Bruin

In het kader van het Jaar van het Licht beschrijven we in dit artikel een bijzonder atmosferisch verschijnsel dat direct samen hangt met zonlicht, namelijk het atmosferisch getij. Atmosferische Getijden (AG) zijn in de tropen en subtropen overduidelijk te zien aan metingen van de dagelijkse gang van luchtdruk aan de grond. In 1992 en 2002 nam een team van de Wageningen Universiteit, waar de tweede auteur toen aan verbonden was, deel aan de meetcampagnes HAPEX-SAHEL (Goutorbe et al., 1997) en MATADOR (Renno et al., 2004) in respectievelijk Niger en Arizona (VS).

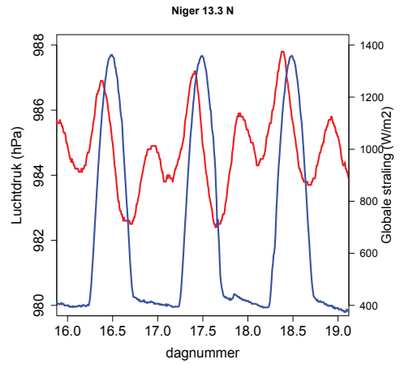
Onwetend van het bestaan van AG viel het hem op dat op beide locaties de luchtdruk een duidelijke halfdagelijkse gang vertoonde (zie Figuren 1 en 2). Op gematigde breedten is dit regelmatig patroon niet zo direct zichtbaar in waarnemingen. Uit Figuur 1 en Figuur 2 blijkt dat de drukcurve een regelmatig halfdaags patroon vertoont met een maximum ongeveer 2.5 uur *eerder* dan de lokale noen en een tweede maximum in de nacht. Het gaat om snelle luchtdrukveranderingen met piek-tot-dal verschillen tot 5 hPa! Deze luchtdrukpatronen in de (sub)tropen waren al rondom 1800 bekend bij bijvoorbeeld Humbolt die drukwaarnemingen verrichtte tijdens zijn expeditie naar Zuid-Amerika. Hij merkte op dat zijn barograaf een bruikbare klok[1] was. Gebruikelijk is het de waargenomen luchtdrukreeksen te schrijven als een Fourier-reeks:

$$P(t) = \sum_1^n s_n \sin\left(\frac{n2\pi}{T}t + \sigma_n\right)$$

waarin t de tijd is in seconde, T de daglengte (s), n= 1, 2, 3, etc., s_n de amplitude en σ_n de fase van de n^{de} Fourier component. Omdat de aardbaan een ellips is en niet met constante snelheid wordt doorlopen moet t worden berekend uit de lokaal gemeten tijd (Lindzen en Chapman, 1970). Bartels (1932) bepaalde s_2 en σ_2 voor enkele stations in de VS en gaf deze grafisch weer in Figuur 3 (gereproduceerd). De lengte van de strepen is een maat voor de amplitude en de richting voor de fase. De fase, in locale tijd, is ongeveer gelijk op alle stations, maar de amplitude neemt af van zuid naar noord, terwijl ook op een bepaalde breedtegraad er kleine verschillen zijn die mogelijk samenhangen met de verdeling land-water.
Beroemde natuurkundigen zoals Kelvin en Rayleigh zochten een verklaring. Dat AG een thermisch fenomeen moet zijn en niet in verband staat met de gravitatie van de maan was al snel empirische duidelijk. Voor een goed historisch overzicht zie Lindzen en Chapman (1970). Daaruit blijkt onder andere dat de zogeheten resonantietheorie van Kelvin op grond van waarnemingen in de hogere luchtlagen onhoudbaar was. In de volgende sectie beschrijven we de nu min of meer geaccepteerde verklaring.

Verklaring

Hoewel het verschijnsel dus al heel lang bekend is heeft het tot in de jaren 1970 geduurd voordat er een fysische mechanisme werd gevonden die waarnemingen op verschillende hoogtes redelijk konden verklaren. Hoewel het op het eerste gezicht wel zo lijkt, heeft het AG toch niets te maken met de zwaartekracht van zon en maan die de getijden in de oceanen



Figuur 1. De gemeten luchtdruk (in rood) op 16 t/m 19 oktober 1992 in Banizoumbou (130° 20' N, 20° 24' O), Niger, tijdens het HAPEX-SAHEL project. In blauw is de gemeten inkomende zonnestraling weergegeven. De tijdschaal is in decimale dagen (16.5 betekent dus 12 uur locale tijd op 16 oktober).

veroorzaken; de AG zijn voornamelijk thermisch van aard, veroorzaakt door de periodieke verwarming van de atmosfeer door de zon. Hierbij is de opwarming in the stratosfeer door absorptie van UV-straling door ozon het belangrijkst. Merk op dat UV-straling dodelijk is voor leven op aarde, dus danken zowel het AG als het leven op aarde hun bestaan aan dezelfde UV absorptie!
AG wordt dus aangedreven door zonlicht, maar die veroorzaakt in principe een eenmaal-daagse verwarming en hoe dit tot een tweemaal daagse drukvariatie kan leiden is lang een puzzel gebleven, tot 1970, toen Chapman en Lindzen (1970) met een verklaring kwamen. Die gaat ongeveer als volgt. Zonlicht wordt geabsorbeerd in de stratosfeer, met name (maar niet uitsluitend) door ozon. In de ruimte lijkt dat op een aan/uit functie, verwarming als de zon schijnt, en verwarming = 0 gedurende de uren dat het donker is, een funktie zoals de blauwe curve in de Figuren 1 en 2. De Fourier transformatie van zo'n functie geeft ons het spectrum van de forcering. Het forceringsspectrum in de stratosfeer is niet triviaal, maar heeft voornamelijk ruimtelijk golfgetal 1 (dat uniform rondtrekkend in een dag een maximum in s_1 zou veroorzaken); de amplitude neemt verder af met het golfgetal. Het effect ervan aan de bodem hangt echter samen met golven op planetaire schaal, die zich verticaal moeten kunnen voortplanten. De verticale golfvoortplanting wordt bepaald door de struktuur van de atmosfeer. Het blijkt dat golven met horizontaal golfgetal 1 zich niet of nauwelijks vertikaal kunnen voortplanten, maar wel golven met golfgetal 2 of hoger. Golven met golfgetal 3 of hoger zijn echter zwakker qua forcering. Zodoende blijft in de response aan het aardoppervlak voornamelijk golfgetal 2 over.

1 Tegenwoordig meten we de druk in de tropen dusdanig nauwkeurig dat men het verschil tussen zonnetijd en middelbare zonnetijd (dat wil zeggen, de tijdsvereffening) goed kan bepalen.

Aldus de verklaring van Chapman en Lindzen. Moeder natuur maakt het soms ingewikkeld, vandaar dat niemand dit 100 jaar geleden begreep. Tot op de dag van vandaag is er overigens nog geen 100% sluitende theorie die alle waargenomen aspecten van AG correct beschrijft. Met name golfgetal 1 (periode 24 uur) bevat nog allerlei geheimen.

Belang

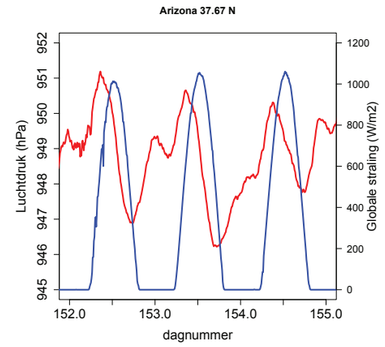
Synoptisch meteorologen hebben lange tijd weinig positieve interesse in AG gehad. Dat heeft drie oorzaken. Ten eerste zijn de getijden vrij regelmatig en dus goed voorspelbaar, zodat het te triviaal lijkt om ze te voorspellen. Ten tweede veroorzaken de getijden problemen bij het interpreteren van 3-uurlijkse drukveranderingen (zogenaamde app voor ingewijden) die normaal gesproken met argusogen worden gevolgd bij een depressieontwikkeling op gematigde breedte. Ook al is de amplitude van de AG klein (~1 hPa), een verandering van 2 tot 3 hPa in 4 uur is qua grootte zeker vergelijkbaar met drukvariaties die langzaam bewegende en ontwikkelende weersystemen kenmerken. AG moet dus worden gefilterd om de app van het weer te begrijpen; weg met het AG, "je hebt er alleen last van!" De derde oorzaak betreft het misverstand dat de AG op zichzelf staan en zich in de troposfeer uitsluitend uiten in de druk. Het is pas recent gebleken (Covey et al., 2014) dat getijden wel degelijk invloed hebben op het weer, bijvoorbeeld in termen van bewolking en neerslag, en daardoor kunnen andere verschijnselen kunnen beïnvloeden. Ook omgekeerd heeft het weer, en dan vooral convectie in de tropen, invloed op de sterkte van de getijden. Het modeleren van AG is dus belangrijk, en hoewel empirisch triviaal bleken de AG in weersvoorspelmodellen lange tijd verre van perfect te worden gesimuleerd.

AG en klimaatmodellen

Een goed klimaatmodel moet in staat zijn de AG nauwkeurig te simuleren. Omdat AG veroorzaakt wordt door UV-stralingabsorptie van ozon in de stratosfeer zal het duidelijk zijn dat alleen de klimaatmodellen die luchtlagen tot voorbij de stratosfeer doorrekenen (noodzakelijke, maar niet voldoende conditie) in staat zijn de AG te reproduceren. In de laatste tien jaar is dat voor bijna alle modellen het geval. In het kader van de IPCC-rapporten is dit onder meer onderzocht door Covey et al. (2014) en de referenties in dit artikel. Zij concluderen dat de meeste klimaat-georiënteerde GCM's de amplitude van de AG overschatten. Verschijnselen die samenhangen met AG zijn geschikte 'tracers' voor het valideren van klimaatmodellen.

Modern mondiaal voorbeeld

Figuur 4 laat een voorbeeld zien van de getijden in een moderne mondiale heranalyse ("reanalysis"), CFSR genaamd (Saha et al., 2010). Deze nieuwe heranalyse, zie ook Kader 1 voor uitleg van reanalysis, bevat modeluitvoer op ieder uur, zodat we de AG goed en mondiaal kunnen beschrijven. Voor ieder uur, 0 Z (ook wel 0 GMT genaamd) tot en met 23 Z nemen we het gemiddelde van de luchtdruk aan de grond voor een bepaalde maand, en trekken daar het dag-en-maandgemiddelde van af. Dit zijn zeer eenvoudige bewerkingen, en toch voldoende om de AG overal te laten zien, dus ook op gematigde breedte; de zelfwerkzame lezer kan het gemakkelijk zelf doen (en het equivalent van de rode curve in Figuur 1 verkrijgen) met een maand uurlijkse waarnemingen. (Als we middelen over 10 maarten (bijvoorbeeld 1998 t/m 2007) dan veranderert Figuur 4 niet substantieel, de lijnen worden dan alleen wat 'gladder'.)
We zien in Figuur 4 de blauwe en rode plekken naar het wes-



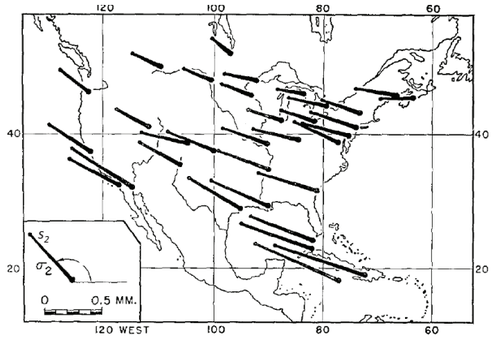
Figuur 2. Als Figuur 1 maar dan voor 37.67° N, 111.54° W, Arizona, VS, tijdens het MAYTADOR project (Renno et al., 2004). In Arizona is ook 'gewoon' weer zodat de rode curve zich minder regelmatig herhaalt dan in Niger (Figuur 1).

ten trekken, dat wil zeggen, alle drukmaxima en minima lopen continu westwaarts. Deze ene figuur beschrijft één dag van de AG voor de hele wereld, weliswaar maar voor die ene maand, maar deze situatie is representatief voor andere maanden. Bekende aspekten zijn:

1. De AG zijn min of meer symmetrisch ten opzichte van de evenaar, en dit is het geval in alle maanden van het jaar (ondanks de noord-zuid beweging van de zon).
2. De amplitude is aanzienlijk in de brede tropen en vermindert naar de polen toe, ongeveer als de derde macht van de cosinus van de breedte, zoals al lang geleden met alleen waarnemingen op bepaalde meetstations vastgesteld door Haurwitz (1956), de grote klassieke empirist op dit gebied.
3. Langs de evenaar loopt een 'verschijnsel' met enorme snelheid naar het westen (in één dag helemaal rond de aarde) met een dominant ruimtelijk golfgetal 2 en een amplitude van ruim 1 hPa zodat de luchtdruk overal tweemaal per dag op en neer gaat.
4. Wie goed kijkt ziet dat het westwaarts trekkende patroon bestaat uit een sterke plus, een sterke min, een zwakkere

Kader 1. Reanalysis (heranalyse)

Sedert de jaren 1990 is de meteorologisch wereld doende om alle weersgegevens van jaren her opnieuw te analyseren. Dit soort analyses werkt als volgt: men heeft een model van de atmosfeer waarin om de 6 uur waarnemingen worden "geassimileerd". Na assimilatie op bijvoorbeeld 0 uur GMT doet men een korte verwachting, 6 uur vooruit, om een gisveld te produceren waarin de waarnemingen van 6 uur GMT worden geassimileerd, dan op naar 12 uur GMT, 18 uur GMT en daarna de volgende dag, enzovoorts. Het resultaat is dus een mengsel van de fysica van het gebruikte model en de oorspronkelijke waarnemingen. Een nieuwe analyse op de National Centers for Environmental Prediction (NCEP), CFSR genaamd (Saha et al., 2010), is begin 2010 voor de periode 1979-2009 gereed gekomen. Het bijzondere is het hoog oplossend vermogen (~35 km op gematigde breedtes), en de hoge frequentie van de analyse-uitvoer: uurlijks. CFSR levert driedimensionale analyses van alle toestandsvariabelen op de bijna 700.000 roosterpunten en 64 lagen in de vertikaal. In dit artikel kijken we uitsluitend naar p, de luchtdruk aan de bodem.

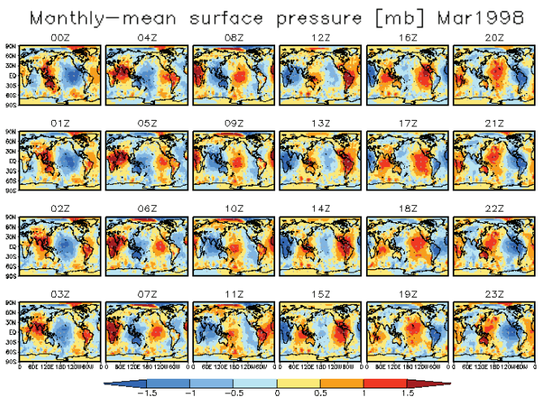


Figuur 3. Amplitude s_2 (mm Hg) en fase σ_2 voor tweede Fourier-component van de luchtdruk voor verschillende stations in de VS (Bartels, 1932). Merk op dat 1 mm Hg = 1.333 hPa.

plus en een zwakkere min. Er is namelijk ook nog een golfgetal 1, met een amplitude (~0.6 hPa) die weliswaar kleiner is dan die van golfgetal 2, maar niet te verwaarlozen. De zon staat precies tussen de sterke + en – in, daar is het dus 12 uur locale zonnetijd, de klok van Humboldt. Het is middernacht tussen de zwakke + en –. Men kan inderdaad al in Figuur 1 zien dat het verval van de luchtdruk in Niger 's middags om 12 uur groter is dan 's nachts om 12 uur. Dat is in de tropen dus bijna overal het geval.

5. Er zijn nog wat kleinere bijdragen van hogere golfcomponenten. Het veld dat westwaarts trekt is, afgezien van kleine variaties in de beweging, niet helemaal constant qua patroon. De dagelijkse gang van de dagelijkse gang zogezegd; deze bijzonderheid heeft tot de meest uiteenlopende (en verwarrende) definities geleid. Er zijn ook kleine stationaire componenten aanwezig die dus niet naar westwaards trekken.
6. Ook al is het halfdaags tij dominant, de fundamentele periode blijft toch 24 uur; bijvoorbeeld de 12 Z en 0 Z kaartjes lijken erg op elkaar maar zijn toch niet identiek.

We kunnen de eendaagse en twee-daagse gang waargenomen op stations bijna gelijk stellen aan ruimtelijke golfgetallen een



Figuur 4. De luchtdruk aan de grond, verminderd met de daggemiddelde luchtdruk, gemiddeld over maart 1998. Er zijn 24 momentopnamen voor de hele aarde, van 0 GMT links bovenaan tot 23 GMT rechts onderaan. Na 23 GMT komt 0 GMT weer aan de beurt, enzovoorts. De eenheid is hPa. Bron is CFSR (Saha et al., 2010). In blauwe (rode) gebieden is de luchtdruk op het aangegeven GMT uur lager (hoger) dan het daggemiddelde.

en twee omdat de aarde in 24 uur onder het gehele verschijnsel doordraait.

Het is duidelijk dat Figuur 4 aanmerkelijk meer informatie biedt dan eerdere analyses die alleen plaatjes op 0, 6, 12 and 18 Z bevatten, zie bijvoorbeeld Van den Dool et al. (1997) voor een bespreking van deze problemen; met kaarten iedere 6 uur is bijvoorbeeld de westwaartse beweginging van golfgetal twee niet vast te stellen vanwege problemen met de Nyquist frequentie in de Fourier analyse. Op de CFSR website, http://cfs.ncep.noaa.gov/cfsr/atlas/ kan men het plaatje als Figuur 4 vinden voor iedere maand gedurende de periode 1979–2009; de resultaten van maart 1998 zoals hier gepresenteerd zijn een (representatief) voorbeeld.

Variaties in de sterkte van het Atmosferisch Getij

Er is altijd een atmosferisch getij en het heeft de naam regelmatig en saai te zijn, maar uit de CFSR gegevens voor de periode 1979-2009 kunnen we vaststellen dat het verschijnsel eigenlijk helemaal niet zo constant is. Hieronder laten we enkele variaties zien.

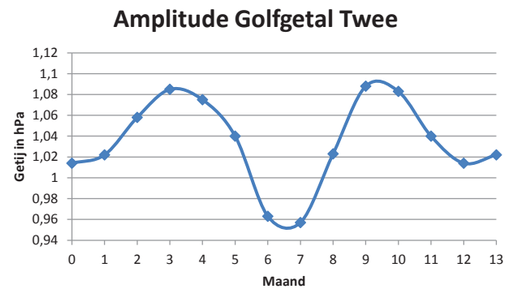
In Figuur 5 is te zien dat de amplitude van het halfdaags getij – we beperken ons hier even tot de sterkste component – langs de equator klimatologisch afhangt van de tijd van het jaar. De variatie bedraagt bijna 0.2 hPa en is zeer regelmatig, met twee pieken en twee dalen per jaar.

Het getij is het sterkst in maart en september, dat wil zeggen het rood en blauw in Figuur 5 is dan het meest intens. Waarom? Omdat de AG symmetrisch is ten opzichte van de evenaar en deze dynamische respons het sterkst aangeslagen wordt als de zon recht boven de evenaar staat, dus op ongeveer 21 maart en september. De zwakste getijden verwacht men onder dezelfde redenering in december en juni, en dat blijkt vrijwel precies te kloppen, zie Figuur 5. Hoewel een minimum, is het getij in december toch heel wat sterker dan in juni, en ook dat heeft een verklaring, want in december staat de aarde dichterbij de zon (7% meer instraling) en wordt het getij derhalve sterker aangeslagen. Figuur 5 is dus vrij goed te verklaren, althans kwalitatief.

Een geheel andere variatie is in Figuur 6 weergegeven. Het blijkt dat het jaargemiddelde van de amplitude van het halfdaagse getij behoorlijk varieert met de tijd, en de variatie is onregelmatig. In de periode 1979 – 1994 leek de sterkte van de AG af te nemen. Plotseling nam de AG tussen '94 en '95 ineens weer 15% in sterkte toe, en dit hield een jaar of zes aan. Na een minimum in 2003 volgt een langzamere maar gestage toename tot 2009. Het is een merkwaardige grafiek. Wat de verklaring van deze variaties is is op dit moment onduidelijk. Als verklaring voor variaties van s2 worden genoemd: a) de Quasi-Biennual Oscillation (QBO), b) variaties in geabsorbeerd zonlicht in de stratosfeer, c) de sterkte van de som van alle convectie in de troposfeer. Het is ook niet uit te sluiten dat de diversiteit in satellieten, vaak slechts enkele jaren in gebruik, waarvan als invoergegevens door CFSR worden gebruikt, een rol speelt. Dit laatste is dus geen fysisch oorzaak, maar een verandering in instrumentatie.

Conclusie

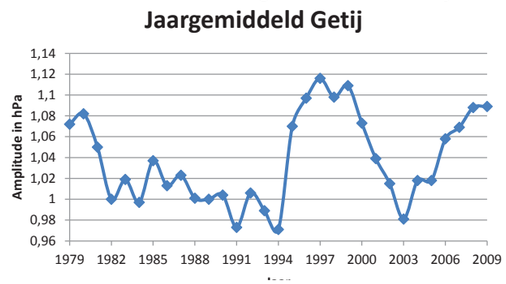
Atmosferische getijden zijn een regelmatig en wereldomvattend verschijnsel, dominant over de halve aarde, dat synchroon met de zon van oost naar west verschuift. Bij nadere studie blijkt de regelmaat zeker geen 100% te zijn, dat wil zeggen dat de getijden op allerlei manieren varieren: met het seizoen (het sterkst in maart en september), met het weer (hebben we hier niet laten zien) en op hele lange tijdschalen (Figuur 6). Deze variaties zijn van belang voor het bestuderen van het weer, van klimaatsverandering, en van voorheen moeilijk waarneembare verschijnselen zoals de stratosferische QBO. De QBO is pas sinds de jaren 1950–1960 waargenomen (met radiosondes die hoog genoeg reikten), maar reconstruktie via de amplitude van het halfdaagse getij geeft enige hoop om verder terug in de tijd te gaan. De AG hebben invloed op het weer en omgekeerd. AG veriaties zijn ook van belang voor toepassing in de geofysica, de oceanografie en de ruimtevaart. De AG 'drukken' op de vaste aarde en op de oceaan en modificeren zelfs het oceaangetij dat door zwaartekrachtseffecten van zon en maan wordt veroorzaakt. Door drukverschillen tussen de oost- en westkant van steile bergen kunnen de AG de rotatiesnelheid van de aarde beïnvloeden (Hamilton et al..



Figuur 5. De klimatologische amplitude van het halfdaagse getij langs de equator als functie van de maand, 0 (12) is december, 1 (13) is januari. Eenheid is hPa.

2008). De AG vormt tevens een sterk signaal bij de metingen van zwaartekrachtssatellieten en kan bovendien hinderlijk zijn omdat de AG gemakkelijk tot verwarring leidt gegeven de omlooptijd van satellieten (aliasing of stroboscoopeffect). Snappen we nu alles? Nee, gelukkig niet. Met name golfgetal 1 is nog steeds een mysterie. Volgens de theorie van Chapman en Lindzen zou golfgetal 1 een amplitude van 0.3 hPa aan het aardoppervlak moeten hebben. Maar wij vinden het dubbele, dus 0.6 hPa. Het vermoeden is dat golfgetal 1 voor een deel in de troposfeer zelf wordt opgewekt, mogelijk zelfs aan het aardoppervlak, dus niet uitsluitend door verticale golfvoortplanting vanuit de periodiek verwarmde stratosfeer. Het verschil tussen neerslag (P) en verdamping (E) vormt qua massa een forcering die de luchtdruk aan de grond beïnvloed, en E - P trekt semi-regelmatige rondjes om de Aarde onder regie van het zonlicht. Semi-regelmatig, want boven land hebben zowel E als P door de bank genomen een maximum overdag, terwijl boven de oceaan E min of meer constant is en P vaak een nachtelijk maximum heeft. De dagelijkse gang in neerslag vormt een groot probleem in atmosferische modellen.

Het $E - P$ effect verklaart ongeveer 0.1 hPa. Er blijft dus werk



Figuur 6. De jaargemiddelde amplitude van het halfdaagse getij langs de equator gedurende 1979–2009. Eenheid is hPa.

aan de winkel. Men kan in Figuur 4 de getijden af en toe even aan de continenten zien 'plakken': een teken van opwekking in de troposfeer of zelfs aan het aardoppervlak. Dai en Wang (1999) geven de beste beschrijving van de locaties op aarde waar de dagelijkse gang (bij benadering golfgetal 1 in de ruimte) het grootst is qua amplitude.

Er is veel nieuw onderzoek gaande. Het artikel van Covey et al. (2014) houdt ons op de hoogte van de stand van zaken wat betreft de AG in de laatste lichting klimaatmodellen. Aangezien modellen niet perfect zijn en bovendien een sterke stempel drukken op (her)analyse van AG zijn waarnemingen op zoveel mogelijk betrouwbare stations (dus zonder modellen) nog steeds onderwerp van studie, bijvoorbeeld door Schindelegger en Ray (2014) die met bijna 6900 stations in feite een update van het klassieke werk van Haurwitz (1956) hebben gegeven.

De verklaring van de AG is voornamelijk thermisch (zonnewarmte) terwijl de oceaan voornamelijk getijden vanwege de zwaartekracht van zon en maan. Dat wil niet zeggen dat de atmosfeer de aantrekking van zon en maan niet voelt, maar deze componenten van de getijden zijn slechts enkele honderdsten hPa in amplitude. Omgekeerd kent de oceaan ook zwakke thermische getijden door de instraling van de zon. De oceaan heeft zelfs nog een derde component, namelijk het effect van de atmosferische getijden op de oceaan.

We hebben de nadruk gelegd op het effect van de getijden op de luchtdruk aan het aardoppervlak. Dit is de klassiek aanpak. Maar veel van het onderzoek naar getijden richt zich momenteel op de mesosfeer waar sterke getijden in wind worden waargenomen (Hagan et al., 2003). Deze worden nauwelijks ter plaatse opgewekt, maar worden ook thermisch aangedreven door zonlicht en zijn eveneens het gevolg van vertikale voortplanting, in dit geval omhoog, vanuit de stratosfeer.

Het is mooi om in het Internationale Jaar van het Licht stil te staan bij het nog steeds niet 100% begrepen fenomeen van atmosferische getijden die aangedreven worden door een deel van het zonlicht dat schadelijk is voor de mens.

Referenties

Bartels, J., 1932: Tides in the atmosphere. *Sci. Monthly*, **35**, 110-130.

Chapman, S., and R. S. Lindzen, 1970: Atmospheric Tides. D. Reidel, Norwell, Mass.

Covey, Curt, Aiguo Dai, Richard S. Lindzen, and Daniel R. Marsh, 2014: Atmospheric Tides in the Latest Generation of Climate Models. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 1905–1913. doi: http://dx.doi.org/10.1175/JAS-D-13-0358.1

Dai, A., 2001: Global precipitation and thunderstorm frequencies. Part II: Diurnal variations. *J. Climate*, **14**, 1112–1128.

Dai, A. and J. Wang, 1999: Diurnal and Semidiurnal Tides in Global Surface Pressure Fields, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **56**, pp. 3874-3891.

Goutorbe, J.P., Lebel, T., Dolman, A.J., Gash, J.H.C., Kabat, P., Kerr, Y.H., Monteny, B., Prince, S.D., Stricker, J.N.M., Tinga, A. & Wallace, J.S., 1997: An overview of HAPEXSahel: a study in climate and desertification. *Journal of Hydrology*, **189**, 4–17.

Hagan, M.E., J.M. Forbes and A. Richmond, 2003: Atmospheric tides, encyclopedia of atmospheric sciences. Editors: J. Holton et al.

Hamilton, K., S. C. Ryan, and W. Ohfuchi. Topographic effects on the solar semidiurnal surface tide simulated in a very fine resolution general circulation model. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, **113**, D17114, DOI: 10.1029/2008JD010115.

Haurwitz, B., 1956: The geographical distribution of the solar semidiurnal pressure oscillation. *New York University Meteorology Paper*, **2 (5)**, 36 pp.

Renno, N.O, Abreu, V.J, Smith, P.H, Hartogensis, O, Burose, D, De Bruin, H.A.R., Delory, G.T, Farrell, W.M., Parker, M Watts, C.J, Carswell, A. and Arkady Ulitsky, A., 2004: MATADOR 2002: A Pilot Field Experiment on Convective Plumes and Dust Devils. *J. Geophys. Res.*, **109**, E07001, doi:10.1029/2003JE002219.

Saha et al. 2010, The Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **91**, 1015-1057.

Schindelegger, Michael and Richard D. Ray, 2014: Surface pressure tide climatologies deduced from a quality-controlled network of barometric observations. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 4872–4889. doi: http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-14-00217.1

Van den Dool, H., et al., 1997: A temporal interpolation method to obtain hourly atmospheric surface pressure tides in reanalysis 1979-95. *J. Geoph. Res.*, **102**, D18, 22013-22024.

Woolnough, S.J., J. M. Slingo, B. J. Hoskins, 2004: The diurnal cycle of convection and atmospheric tides in an aquaplanet GCM, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **61**, Issue 21, 2559-2573.