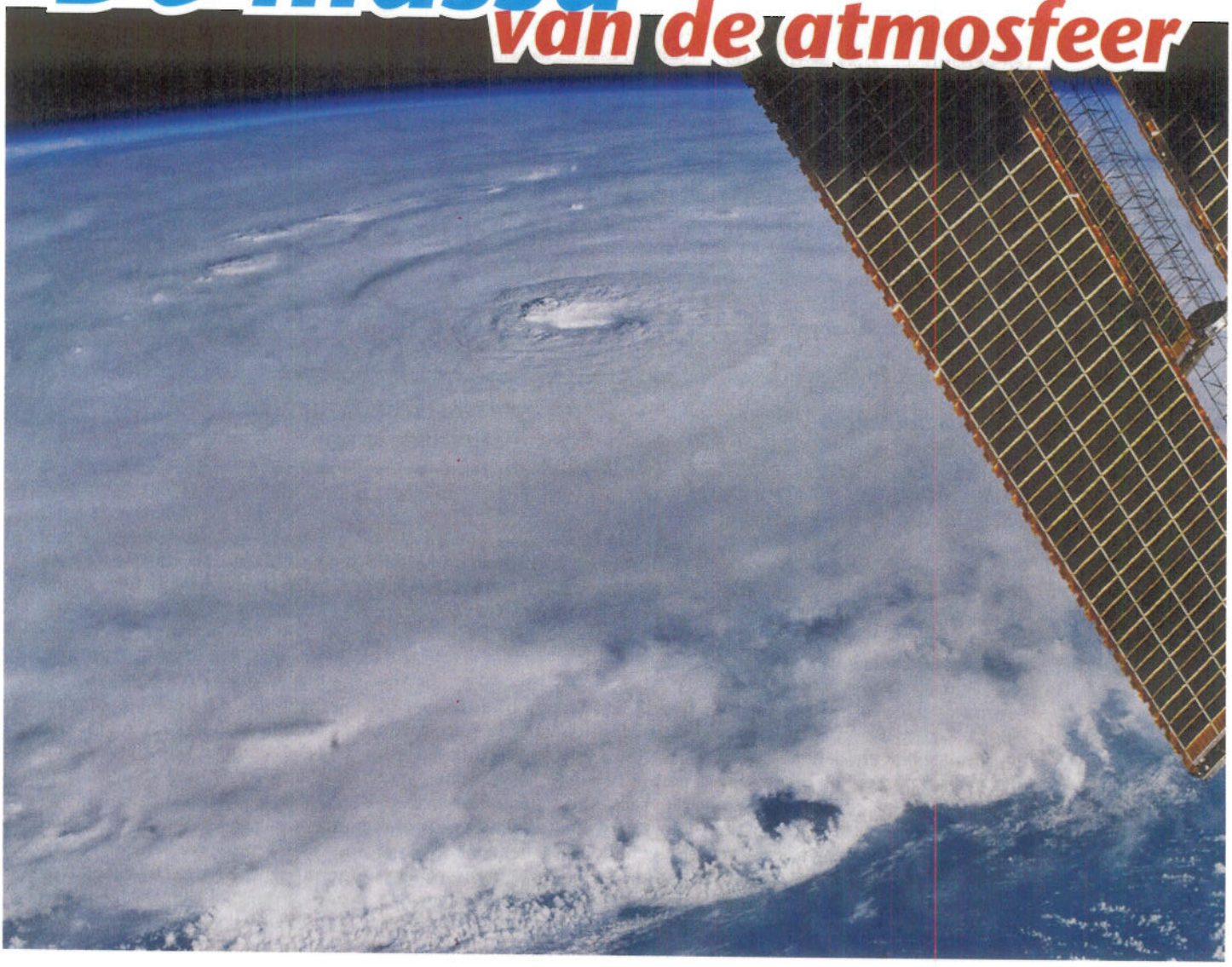
De massa van de atmosfeer



De aarde en haar atmosfeer, gezien vanuit het ISS. (Foto: NASA)

Het lijkt een kinderlijk eenvoudige vraag: hoeveel lucht is er in de atmosfeer? Een antwoord op deze vraag zullen we op basis van de laatste mondiale Reanalysis geven, maar zelfs vandaag de dag moeten we het exacte antwoord nog enigszins schuldig blijven. Eenvoudigweg omdat er niet genoeg barometers zijn opgesteld, met name niet in bergachtig terrein en in vele andere (vrijwel) onbewoonde gebieden.

Huug van den Dool en Henk de Bruin

Huug van den Dool studeerde meteorologie aan de RUU. Nadien werkte hij van 1975 tot 1982 als onderzoeker op het KNMI en daarna in de VS, recentelijk bij het Climate Prediction Center in Washington DC. Henk de Bruin studeerde natuurkunde aan de UvA en was van 1970 tot 1985 wetenschappelijk hoofdmedewerker bij het KNMI. Hij promoveerde aan de Wageningen Universiteit en is nu freelance-onderzoeker.

Van alle fundamentele factoren die het klimaat op aarde bepalen, kunnen we naast de massa van de atmosfeer ook noemen: de straal van de aarde (a), de versnelling van de zwaartekracht (g), de omwentelingssnelheid van de aarde (Ω), en de hoeveelheid zonne-energie die we ontvangen (S). De waarden van Ω, g en a worden steeds nauwkeuriger. Sinds we met satellieten metingen kunnen doen, kennen we ook S (en de kleine variaties daarin) vrij goed. De massa van de atmosfeer, zowel de referentiewaarde als de variaties, is van toenemend belang voor de geofysica, geodesie (de vorm van de aarde, de variatie van de zwaartekracht en de variatie in rotatiesnelheid), de oceanografie en de navigatie van ruimtevoertuigen. Het is onze eer

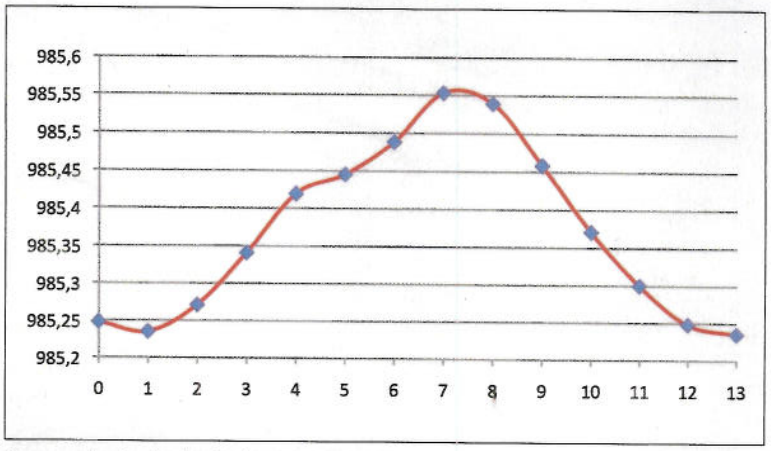
als meteorologen te na dat de gemiddelde luchtdruk op onze eigen aarde niet eens zo heel nauwkeurig bekend is. Om de situatie beter te begrijpen moeten we eerst een onderscheid maken tussen de nauwgerelateerde begrippen massa en luchtdruk.

Massa en luchtdruk

Op elke plaats op aarde kan men schrijven

$p = M * g$ (1)

p is de luchtdruk aan de grond in Pascal (Pa), M is de massa van de kolom lucht er boven met een doorsnede van 1 m^2 (kg/m^2) en g staat voor de versnelling van de zwaartekracht (m/s^2). Deze vergelijking, een versie van Newton's tweede wet, is geldig zolang de verticale versnelling van de lucht klein is[1], dat wil zeggen zolang er hydrostatisch evenwicht is. Onder die omstandigheden meet een barometer aan de grond het gewicht van de kolom lucht er boven. Lokaal zijn massa en luchtdruk 'hetzelfde' en moeten we alleen even goed op de gebruikte eenheden letten. Als g ruimtelijk constant zou zijn, dan geldt dit ook voor het wereldgemiddelde van p en M en een schatting van de wereldgemiddelde luchtdruk gedeeld door g en vermenigvuldigd met het aardoppervlak, dat wil zeggen: $4\pi a^2$ voor een bol met straal a zou dan een schatting zijn van de totale atmosferische massa. In werkelijkheid varieert g ruimtelijk, van 9.78 tot 9.83 m/s^2 tussen equator en pool en daar komen we aan het einde van dit artikel op terug[2].



Figuur 1: de luchtdruk gemiddeld over de aarde als functie van de maand. Januari is 1 (13), December 12 (0). De eenheid is hPa, en de verticale schaal is slechts 0.4 hPa.

We benadrukken hier dat we in de luchtdruk aan de grond zijn geïnteresseerd, niet de luchtdruk gereduceerd tot zeeniveau[3] want die procedure genereert fictieve lucht[4]. De luchtdruk aan de grond is gemiddeld lager, men name natuurlijk in de bergen; wereldgemiddeld zo'n 30 hPa lager dan de luchtdruk op zeeniveau.

Reanalysis

Sinds de jaren 1990 is de meteorologische wereld drukdoende om alle weersgegevens van jaren opnieuw te analyseren. Dit soort analyses werkt als volgt: men heeft een model van de atmosfeer waarin om de 6 uur waarnemingen worden geassimileerd (aangepast, red.). Na assimilatie op bijvoorbeeld 0 uur GMT doet men een korte verwachting, 6 uur vooruit, om een zogeheten 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, enzovoort. 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 (ref.1), is begin 2010 gereed gekomen voor de periode 1979-2009. Het bijzondere is het hoog oplossend vermogen (ongeveer 35 km op gematigde breedte), en de hoge frequentie van de analyse-uitvoer: uurlijks. Hoe hoger het oplossend vermogen des te beter bergen en dalen worden beschreven en bonafide metingen, die voorheen werden verworpen, kunnen worden geassimileerd. CFSR levert driedimensionale analyses op van alle toestandsvariabelen op de bijna 700.000 roosterpunten en 64 lagen in de vertikaal. In dit artikel kijken we alleen naar p, de luchtdruk aan de grond. De waarde van p wordt (tussen twee haakjes) niet alleen bepaald door metingen met barometers, maar ook door de talloze metingen van de andere variabelen zoals temperatuur en wind.

Als eerste resultaat melden we

[1] Een heel enkele keer, tijdens een onweersbui, als lucht enorm wordt versneld in de vertikaal, hebben we een zogenaamd 'neusje' in de luchtdruk, en is vergelijking (1) heel even niet geldig.

[2] Dat g in de vertikaal varieert (afneemt met de hoogte) is ook een kleine complicatie in vgl (1), want de kolom lucht is erg hoog.

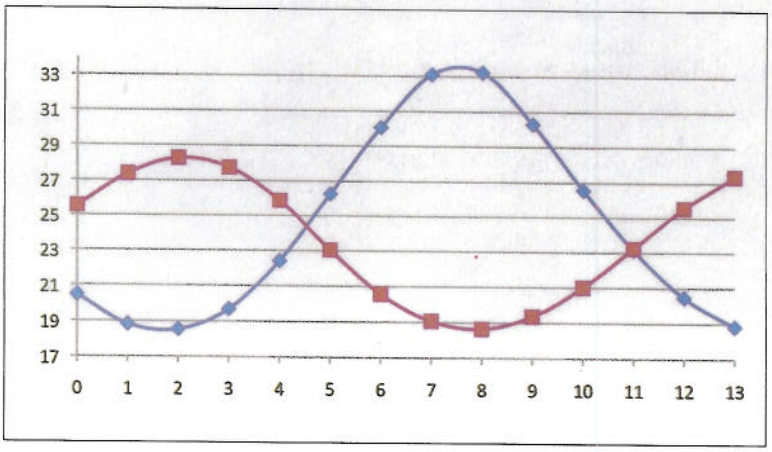
[3] De druk herleid tot zeeniveau, traditioneel te zien in isobaren op weerkaarten, is uitgevonden voor de interpretatie van het weer in termen van hoge en lagedrukgebieden.

[4] Op enkele plaatsen wordt lucht door reductie tot zeeniveau verdonkeremaand, zoals in Death Valley, de Dode Zee en de Zuidplaspolder, die onder zeeniveau liggen.

van de atmosfeer

dat de wereld- en jaargemiddelde luchtdruk volgens de laatste NCEP Reanalysis 985.39 hPa bedraagt. Dat is ongeveer 0.5 hPa hoger dan in de eerste NCEP Renalysis in 1995. Toen was het 984.92 hPa, maar niet ver van de waarde die het Europees centrum met haar recente Reanalysis (ERA40) heeft bepaald: 985.50 hPa. De toevallige fout in deze getallen is klein, vandaar twee decimalen achter de komma. Echter, de onzekerheid is nog wel een hele hPa, vanwege systematische fouten zoals de representatie van de orografische hoogte in de modellen, het oplossend vermogen van de modellen, de niet-homogene verdeling van waarnemingen over de aardbol en enkele vereenvoudigingen in de fysica van de modellen.

De waarde 985.39 hPa correspondeert ($p^*4\pi a^2/g$) met 5.125 10^{18} kg lucht. Om dit in perspectief te plaatsen: de massa van de aarde wordt geschat op 5.9736 10^{24} kg waarvan 1.35 10^{21} kg aan het water in de oceaan wordt toegedacht. De atmosfeer is dus qua massa iets minder dan een miljoenste van de massa van de aarde, dat wil zeggen pas in de tweede decimaal na de 6 in 5.9736. Trenberth en Smith (ref. 2), gebaseerd op ERA40 en een iets nauwkeuriger integratie (de aarde is een ellipsoïde enzovoort), houden het op 5.1480 10^{18} kg.

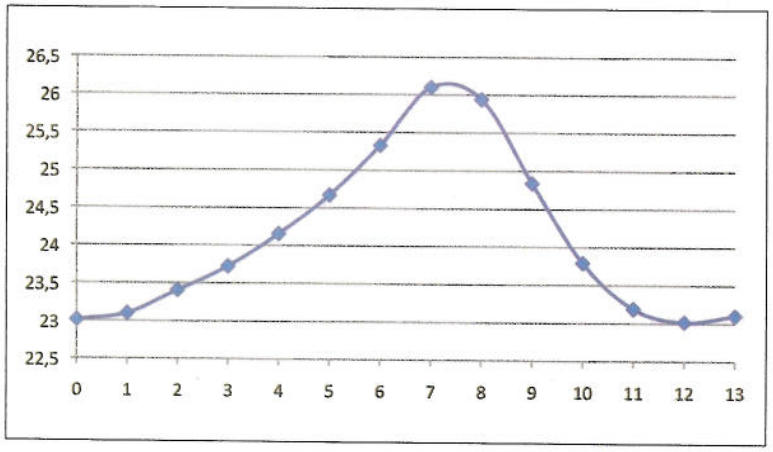


Figuur 3: de jaarlijkse gang in *pwat* boven het zuidelijk halfrond (rood) en het noordelijk halfrond (blauw) in de nieuwste NCEP Reanalysis in mm.

Jaarlijkse gang van de luchtdruk

De beantwoording van de vraag hoeveel lucht er is wordt gecompliceerd omdat de gemiddelde waarde van M (en dus p) een jaarlijkse gang blijkt te hebben. Figuur 1 laat de jaarlijkse gang van de wereldgemiddelde luchtdruk zien volgens CFSR. De laagste waarde treedt op in januari (985.24 hPa) en de hoogste in het laatste deel van juli (985.56 hPa), zodat er een seizoensvariatie van 0.32 hPa genoteerd kan worden. Lokaal is de jaarlijkse gang veel groter. Er gaan bijvoorbeeld tientallen hPa heen en weer tussen land en oceaan als winter en zomer elkaar afwisselen; een enorme moesson in termen van massa (zie ref. 3). Ook de twee halfronden wisselen lucht uit onder regie van de jaarlijkse gang van de zonneschijn; maxima in druk worden op het winterhalfrond bereikt. Omdat massa behouden is (de droge lucht althans) middelt dat wereldgemiddeld uit. Figuur 1 laat dus een klein residu zien dat we nu verder willen verklaren.

Dat de druk in juli hoger is komt door het vocht (voornamelijk waterdamp, maar ook water en ijs in wolken) in de atmosfeer, dat in eerste benadering bepaald wordt door de temperatuur van de lucht. De temperatuur ondergaat een grote jaarlijkse gang die uit fase loopt op de twee halfronden, maar omdat het noordelijk halfrond meer land heeft dan het zuidelijk halfrond, komt voornamelijk het gedrag van het noordelijk halfrond tot



Figuur 2: de jaarlijkse gang in *pwat*, het wereldgemiddelde precipitable water, in eenheden van mm.

Figuur 4: met een toenemende nauwkeurigheid in ruimtenavigatie, astronomie en geodesie is de vraag hoeveel lucht er om de aarde zit niet slechts voor meteorologen van belang. De foto maakt duidelijk dat ook wolken en waterdamp bij de massa van de atmosfeer horen. (Foto: NASA)

uiting in figuur 1. Het is het warmst in juli, dus is er dan meer vocht in de lucht, en dus is de druk (evenredig met de massa, inclusief die van de waterdamp) het hoogst in juli. Dat deze redenering klopt wordt bevestigd door min of meer onafhankelijke schattingen van het vocht in de lucht die we nu gaan bespreken.

Jaarlijkse gang van precipitable water

In de kolom lucht bevindt zich waterdamp en met de tegenwoordige analyses kunnen we ook de hoeveelheid water en ijs in wolken schatten. De verticale integraal van het vocht in alle vormen heet in het Engels precipitable water (p_{wat}). In het algemeen kunnen we de totale luchtdruk p schrijven als

$$p = p_{wat} + p_{droog} \quad (2)$$

We weten dat de hoeveelheid water in de lucht variabel is en tevens nemen we aan dat de totale hoeveelheid droge lucht behouden is[5]. De jaarlijkse gang van p_{wat} moet dus die getoond in figuur 1 verklaren. Inderdaad, als we naar figuur 2 kijken, eveneens gebaseerd op CFSR, is dat een uitstekende verklaring. p_{wat} varieert tussen 23 mm water en 26.2 mm water, met de tijd van het jaar voor het maximum en minimum in zeer goede overeenstemming in figuur 1 en 2. Ook de orde van grootte is uitstekend, want 1 mm

[5] Er verbrandt wel eens een komeet, er is wel eens een vulkaan die material aan de atmosfeer toevoegt, de atmosfeer verliest licht gassen aan de ruimte, en zonneaktiviteit blaast de thermosfeer op, maar dit zijn zeer kleine veranderingen in de droge druk aan de grond.

water = 1 kg/m² en na vermenigvuldiging met g en deling door 100 om hPa te krijgen zien we dus een variatie van ruim 0.3 hPa in zowel figuur 1 als 2. Het bijzondere is dat de p_{wat} waarnemingen niets met barometers aan de grond te maken hebben, want zij worden geleverd door vochtsensoren in radiosondes en satellietmetingen; een onafhankelijke bevestiging dus. Dat een moderne Reanalysis zulke details goed beschrijft geeft de burger moed. Het is opmerkelijk dat we vrij zeker zijn van kleine variaties (tienden van hPa) terwijl we vermoeden dat de absolute waarde makkelijk een hele hPa onzekerheid heeft. Dat komt vaker voor.

We vinden dus dat de totale wereld- en jaargemiddelde druk p van 985.39 hPa opgevat kan worden als een bijdrage van 983.01 hPa door droge lucht en 2.38 hPa door vocht. We mogen dus veronderstellen dat als we een barometer in ons huis aflezen, daar enkele hPa aan vocht bij inbegrepen zijn. Figuur 3 laat de jaarlijkse gang in p_{wat} voor beide halfronden zien. Hier zien we dus bevestigd dat op beide halfronden de zomer (winter) het meeste (minste) vocht heeft in de atmosfeer, en dat het noordelijk halfrond licht domineert zodat het gemiddelde van de twee lijnen in figuur 3 op die van het NH moet lijken. De schatting in figuur 3 is wederom van CFSR, dat wil zeggen er komt een atmosferisch model aan te pas (met voor- en nadelen), maar het komt heel goed overeen met een schatting door Randel (ref.4, figuur 9) die uitsluitend gebaseerd zijn op waarnemingen.

Discussie en slotopmerkingen

We hebben uit ongeveer 300 terabytes aan gegevens, geproduceerd door een recente NCEP Reanalysis, enkele details van de wereldgemiddelde druk en dus de totale massa van de atmosfeer kunnen berekenen. Die druk is gemiddeld 985.39 hPa en de massa 5.125 10^{18} kg . Dit komt goed overeen met schattingen gemaakt met het model van het Europees weercentrum. Voor de druk zijn de verschillen 1 a 2 tienden hPa voor de twee centra. De jaarlijkse gang in p is ongeveer 0.32 hPa, en dat komt zeer goed overeen met de onafhankelijk bepaalde variatie van de watersubstanties in de lucht (p_{wat}) van 3.2 mm. Er komen pas wat problemen als we de p_{wat} variaties zouden willen verklaren uit het verschil tussen verdamping (E) en neerslag (P), dat wil zeggen via $d(p_{wat})/dt = E - P$. In de bepaling van E en P spelen waarnemingen geen directe rol en moeten we bijna geheel op het model vertrouwen. Zo vinden we bijvoorbeeld dat de verdamping de neerslag overtreft van december t/m juni, en dat verklaart de toenemende p_{wat} en p-waarden in die maanden, maar helaas alleen kwalitatief. Van juli t/m november regent het meer dan verdamping aan massa kan toevoegen.

Uit nauwkeurige inspectie blijkt dat ook figuur 1 en 2 niet helemaal met elkaar overeenkomen. Het verschil, in de juiste eenheden, zou constant moeten zijn als droge lucht behouden is. Het verschil heeft echter een halfjaarlijkse gang met maxima in april en oktober (men kan dit al aan de 'schouder' in april in figuur 1 zien); p_{droog} varieert tegen de verwachting met bijna 0.1 hPa. Worden de wetten van de fysica geweld aangedaan? Gelukkig niet! Dit komt omdat vergelijking (1) geldt voor constante g. In werkelijkheid kan droge lucht wegstromen van de tropen naar de hogere breedte en met behoud van massa toch een hogere wereldgemiddelde droge luchtdruk geven omdat g met de breedte toeneemt. Dit gebeurt twee maal per jaar als de zon boven de equator staat en de droge lucht daar plaats moet maken voor meer waterdamp. Dit zou uit te werken moeten zijn, maar het NCEP-model werkt nog met een 'aardbol' en constante g. Het wordt tijd dat we variabele g en een ellipsoïde als vorm van de aarde gaan gebruiken in atmosferische modellen: de waarnemingen zijn er aan toe.

Dat de luchtdruk toeneemt met meer vocht in de lucht is weliswaar geheel logisch vanuit massa oogpunt, maar het geldt alleen zo precies in het wereldgemiddelde. Wie moeite zou nemen dit in bijvoorbeeld Nederland na te gaan vindt empirisch eerder het omgekeerde. Toevoegen van vocht is dynamisch hetzelfde als verwarming, en men kan beide met het begrip virtuele temperatuur vangen. Voegen we vocht toe aan de kolom dan neemt de luchtdruk aan de grond in principe toe, maar na hydrostatische aanpassing neemt de luchtdruk langzamer met de hoogte af dan in de omgeving waar geen vocht of minder vocht is toegevoerd. En er komt uitstroming op enige hoogte op gang en dat leidt in 2de instantie tot verlaging van de luchtdruk aan de grond. Hetzelfde als bij verwarming, men krijgt een

thermische laag. Dit geldt niet alleen lokaal, maar zelfs nog voor wereldhalfronden (druk is het laagst in het zomerhalfrond). Wereldgemiddeld is er echter geen zijwaartse uitstroming mogelijk en zien we het effect van vocht op de druk in zijn pure vorm.

Nauwkeurige kennis van de wereldgemiddelde luchtdruk of massa is niet alleen van belang voor meteorologie, en een erezaak voor meteorologen en aardbewoners. Massa, vorm van de aarde, rotatie en zwaartekracht hangen op talloze manieren samen. Bijvoorbeeld: de verhoging van het zwaartepunt van de atmosfeer door 0.3 hPa toegevoegde massa leidt tot een kleine afname in de rotatiesnelheid van de aarde. Het zou goed zijn als er in aanverwante disciplines (geodesie) meetmethodes worden ontwikkeld voor de massa van de atmosfeer. De eerste auteur van dit artikel heeft wel eens gespeculeerd dat nauwkeurige vergelijking van de zwaartekracht aan het aardoppervlak (z_0) en de zwaartekracht op enkele honderden km hoogte (z_1, van satellieten) iets over de atmosfeer moet zeggen. Immers: op z_0 wordt de zwaartekracht verminderd omdat de massa van de atmosfeer nog boven ons is, terwijl op z_1 ook de atmosfeer naar onderen trekt. Helaas is ook hier het probleem dat de meeste metingen (hoewel fantastisch nauwkeurig), eerder over afwijkingen en verschillen gaan dan over absolute waarden.

Het is ook een goede ontwikkeling dat we naast de goede, oude barometers nieuwe lokale metingen van de luchtdruk tegemoet kunnen zien. Om een voorbeeld te geven: recente studies hebben aangetoond dat met radarmetingen bij 50-56 GHz, waar O_2 een sterke absorptieband heeft, direct de luchtdruk aan de grond kan worden gemeten. Dit is nog in een experimentele fase, maar zou in de toekomst op satellietplatforms gebruikt kunnen worden. De resultaten gebaseerd op CFSR zijn gemiddeld over 1979-2009, 31 jaar, en alleen de klimatologische variatie van het wereldgemiddelde met de kalendermaand is besproken. Later zullen we ook eens kijken naar andere variaties, zoals de dagelijkse gang, of de variatie in jaargemiddelden over deze periode van 31 jaar waarin het klimaat al een beetje is opgewarmd. Is er nu meer vocht in de lucht door opwarming dan destijds in 1979, en zoja loopt de luchtdruk dan ook op? De vraag daarbij is of klimaatsverandering behalve via de voor de hand liggende temperatuurwaarnemingen ook met metingen van respectievelijk waterdamp en luchtdruk is te detecteren. We houden u op de hoogte.

Referenties

1. Saha et al 2010, Bulletin of the American Meteorological Society, augustus.
2. Trenberth + Smith 2005, Journal of Climate, blz. 864-875.
3. Van den Dool en Saha 1993, Journal of Climate, blz. 2-30.
4. Randel et al, 1996, Bulletin of the American Meteorological Society, blz. 1233-1246.