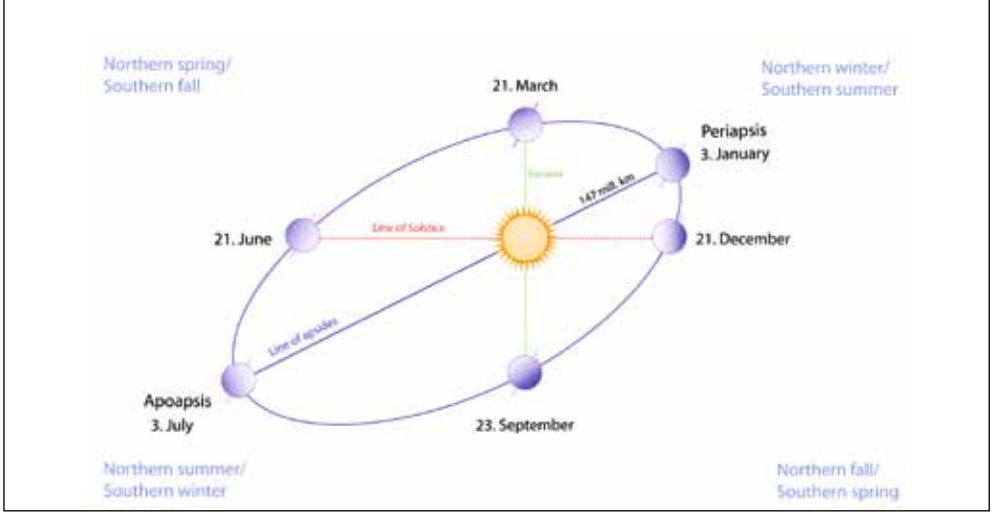
Hoe lang duurt het jaar? Astronomie met een thermometer

Huug van den Dool en Henk de Bruin

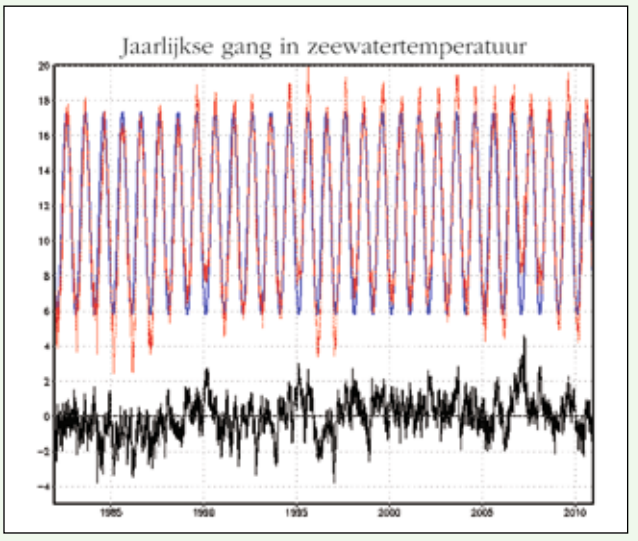
Huug van den Dool werkte van 1975 tot 1982 als onderzoeker op het KNMI en daarna in de VS, recentelijk bij het Climate Prediction Center in Washington DC.
Henk de Bruin studeerde natuurkunde aan de UvA en was van 1970 tot 1985 wetenschappelijk hoofdmedewerker bij het KNMI. Hij promoveerde aan de Wageningen Universiteit, waar hij tot 2007 werkzaam was, en is nu freelanceronderzoeker.
Reacties: Huug van den Dool, hmvandendool@hotmail.com.

Omdat zonnestraling een drijvende kracht is voor veel meteorologische verschijnselen, zijn meteorologen uiteraard geïnteresseerd in de hoeveelheid zonnestraling (uitgedrukt in Watt per m²) die aan de rand van de atmosfeer binnenkomt. Straling varieert sterk met de seizoenen. Meteorologen en aardse fysici in het algemeen hebben zich weinig of nooit bemoeid met kalenders. Zij volgen de kalender die toevallig aan de muur hangt, en noteren hun metingen op de datum die de Gregoriaanse kalender aangeeft. In de laatste decennia, waarin klimaat en klimaatsveranderingen in de belangstelling komen te staan, blijkt dat ook meteorologen wat nauwkeuriger met het begrip 'jaar' moeten omgaan. Dit bleek onder meer uit publicaties over het al of niet warmer zijn van het voorjaar in schrikkeljaren, vergeleken met 'normale' jaren. In dit artikel – de eerste van een serie van drie – bekijken wij het belang van een nauwkeurige kalender voor de klimatologie en seizoensverwachtingen. We doen dat door een omgekeerde weg te bewandelen: het bepalen van de jaarlengte uit weergegevens.

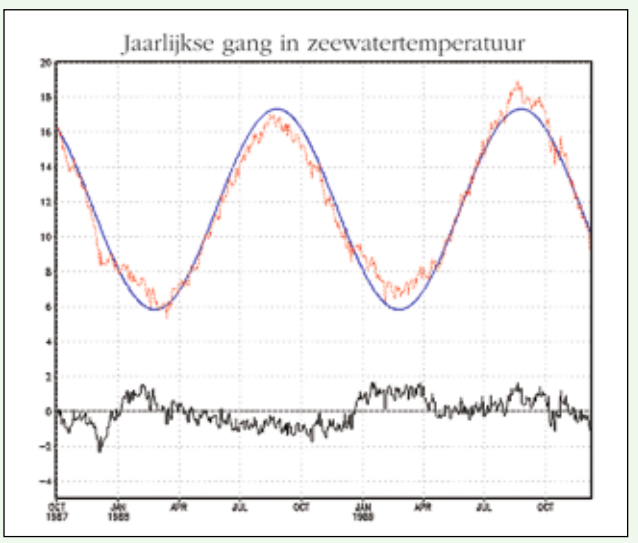
Het fysisch begrip 'jaar' hangt samen met de baan van de aarde om de zon: een jaar is de tijd die onze planeet nodig heeft om een baantje om de zon te trekken (figuur 1). Er zijn niettemin diverse definities van het jaar, waarbij het 'tropisch' en 'anomalistisch' jaar hier een rol spelen. Het burgerlijk begrip 'jaar' wordt via de kalender uitgedrukt in gehele aantallen dagen. Interessant (ongelukkig?) genoeg is het fysisch jaar op dit moment ruwweg 365,25 dagen, niet een heel getal, zodat de burgerlijke kalender meestal 365, maar ook wel eens 366 dagen telt. Sterrenkundigen wisten al 400 jaar v. Chr. dat het jaar ongeveer 365,25 dagen lang was. Julius Ceasar introduceerde daarom een kalender die eens in de vier jaar een extra dag heeft. Rond 1500 AD wisten sterrenkundigen dat het tropisch jaar iets minder lang duurt dan 365,25 dagen en daarom werd onder paus Gregorius XIII de kalender aangepast: driemaal per vier eeuwen wordt de schrikkeldag niet toegekend. Dat werkt gemiddeld goed. De samenleving kan nog duizenden jaren voort met de huidige Gregoriaanse kalender. We nemen dan aan dat de rotatiesnelheid van de aarde niet veel gaat veranderen.



Figuur 1: de aarde in zijn baan om de zon. De aardas helt ten opzichte van de ecliptica. De ellipticiteit is voor de duidelijkheid overdreven. In volgorde: het perihelium in begin januari, het maartequinox, het junisolstitium, het aphelium in begin juli, het septembersolstitium en het decemberequinox. Dit diagram licht alle elementen van het tropisch jaar toe en heeft ook enkele elementen van het anomalistisch jaar. (Bron: Wikipedia)



Figuur 2: een tijdreeks van 10592 waarden (rood) van SST in de zuidelijke Noordzee (3,375 OL, 52,125 NB), de beste sinusgolf (blauw) die zich aan deze metingen laat aanpassen, en het verschil (zwarte lijn) tussen de rode en blauwe lijnen. Eenheid is graden Celsius. De horizontale as is de tijd, 10,592 dagen voor de kalenderperiode 1982 t/m 2010.



Figuur 3: detailopname uit figuur 2 voor twee jaren rond 1989.

In dit artikel willen wij de geofysicus een wat actievere rol geven: we gaan allereerst bepalen wat de lengte van het jaar is. Niet door een kijker op de hemel te richten, maar door temperatuurmetingen op aarde. Alle lezers zijn bekend met de jaarlijkse gang in de temperatuur. Dat het 's zomers warmer is dan 's winters heeft te maken met de seizoensafhankelijke zonnestraling die de planeet als functie van lengte en breedte ontvangt. Dus bestuderen we de temperatuur op aarde die naast ruis (het weer, meetfouten, klimaatvariaties) een groot signaal bevat waarin we de jaarlijkse gang eenvoudig herkennen. Als eerste voorbeeld beschouwen we een tijdreeks van daggemiddelde zeewatertemperaturen (SST), bepaald aan het oppervlak op een locatie in de zuidelijke Noordzee voor 1982-2010. We vergeten even dat er een kalender is, en werken met een tijdreeks van *dagelijkse* temperaturen met een lengte van 10.592 dagen; 29 jaren inclusief 7 schrikkeldagen (dagelijkse waarden zijn hier absoluut nodig en maandgemiddelden zijn uit den boze). In figuur 2 zien we de tijdreeks in rood; figuur 3 is hetzelfde, maar dan voor slechts 2 jaar zodat we de details beter zien. Dit ene voorbeeld laat al overduidelijk zien dat de jaarlijkse gang op gematigde breedte een dominant verschijnsel is; de temperatuur gaat ruim 10 graden Celsius op en neer. Daar moet mee te werken zijn, daar moet bijvoorbeeld aan te zien zijn hoe lang een jaar duurt.

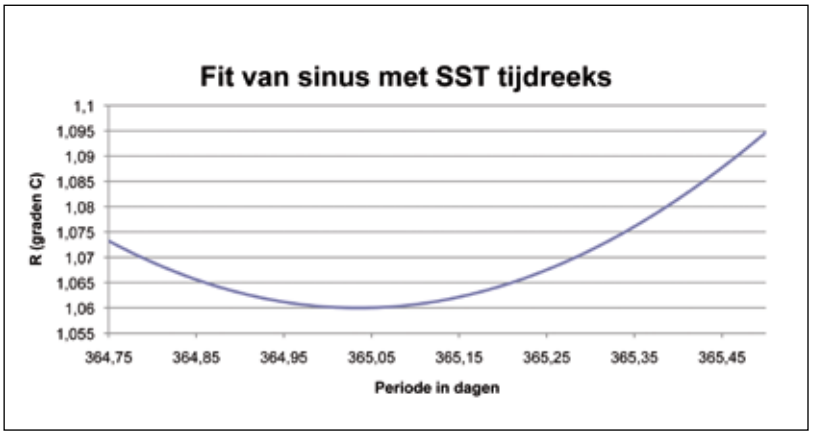
De methode

Hoe vinden we nu de lengte van het jaar in SST metingen? Dat doen we door een periodieke functie door de rode punten te trekken: dit levert de blauwe lijn op in figuur 2 en 3. We hebben verondersteld dat die functie een sinusgolf is. Dat is geen wet van Meden en Perzen, maar op gematigde breedte is dat een nauwkeurige benadering van de inkomende zonnestraling, zoals we in tabel 1 bevestigd zullen zien. We hopen dat dit ook geldt voor de temperatuur aan het aardoppervlak (een respons van het systeem op de variërende inkomende zonnestraling). We zijn vrij in de keuze van de periode van de sinus; voor iedere keuze zoeken we een minimum in het verschil R tussen de rode tijdreeks f(t) en de blauwe analytische sinus beschreven als A sin(2πt/P - φ):

$$R(P) = \Sigma \{ (f(t) - (A \sin(2\pi t/P - \varphi) \} **2 \quad (1)$$

waarbij P de periode in dagen is, A en φ zijn respectievelijk amplitude en fase, N is het aantal waarnemingen in de reeks f(t), N=10592, en de sommatie is voor t=1 t/m N. De gemiddelde waarde van f(t) is eerst verwijderd. Merk op dat N/P geen geheel getal hoeft te zijn, in figuur 2 zien we ongeveer 29 keer dezelfde sinus. Figuur 4 laat zien hoe de restfout R van de periode (P) van de sinusgolf afhangt in de buurt van P=365 dagen. We kiezen die periode P die in kleinste kwadraten het verschil tussen de blauwe en de rode lijn het kleinst maakt: in dit eerste voorbeeld 365,035 dagen.

Voor we de berekening naar de hele wereldzee uitbreiden hebben we in tabel 1 resultaten verzameld van het toepassen van vgl (1) op een aantal tijdreeksen die voor het klimaat nabij Nederland van belang zijn. We zien allereerst in rij 2 dat de straling aan de buitenkant van de atmosfeer op 52N, berekend via Meeus (1998), voor 99,99% met een enkele sinus met amplitude 206,6 W/m² kan worden beschreven. Dat is erg goed voor onze methode. De jaarlijkse gang van de inkomende zonnestraling, gemeten in de KNMI-tuin, in rij 4, dat wil zeggen onderin de atmosfeer, is ruim 50% minder in amplitude; dat komt door wolken en troebelheid (die de fase overigens nauwelijks veranderen.) Voorts zien we dat de temperatuur van de lucht een fa-



Figuur 4: de waarde van R volgens vgl(1) als functie van de gekozen periode (in dagen). Voor iedere 0.005 dagen is een waarde voor R ingevoerd. Het minimum treedt op bij 365,035.

se-naijling heeft van zeker 30 graden (graden = ~ dagen) ten opzichte van de straling, terwijl SST nog eens 30 graden verder naijlt. Dit zijn bekende verschijnselen van een kustklimaat (ref 2). Ter vergelijking geven we in rij 3 ook de inkomende straling op 52 Zuid, waar de sinusgolf 180 graden uit fase is, maar een grotere amplitude (224 tegen 206) heeft die we later toelichten. Tot slot merken we op dat met één sinus de SST een aanmerkelijk groter verklaarde variantie heeft dan weersgevoelige elementen zoals de luchttemperatuur en straling aan de grond.

Toepassing op de wereldzee

De lengte van het jaar, bepaald uit SST in de zuidelijke Noordzee, is de afstand tussen opeenvolgende punten van gelijke fase (zoals de pieken) in de blauwe curve in figuur 2; we vonden 365.035 dagen. Op een ander punt in de Noordzee vindt men tienden (van dagen) meer of minder. Zoals astronomen verschillende telescopen aan elkaar kunnen koppelen om de nauwkeurigheid van een meting enorm op te voeren, zo kunnen wij onze berekening op duizenden roosterpunten tegelijk uitvoeren en aan elkaar koppelen. Om precies te zijn hebben we 28.309 roosterpunten op het noordelijk halfrond benut, en 53.938 roosterpunten op het zuidelijk halfrond, allemaal SST voor dezelfde 29 jaar. We nemen alleen die roosterpunten mee waar de amplitude van de jaarlijkse gang groter dan 2 graden Celsius is, dat wil zeggen waar er een signaal te oogsten is en dat is op ge-

	Variabele, locatie, bron	*Tijdvak*	*Dominante periode P in dagen*	*Amplitude A*	*Fase φ in graden*	*Restfout R*	*Verklaarde Variantie (%)*
1	SST - Noordzee (52,13 Noord, 3,38 Oost)	1982-2010	365,035	5,75 C	236,2°	1,06 C	93,60%
2	Q (52N,TOA) Meeus	1958-2010	365,241	206,6W/m²	170,3°	1,58W/m²	99,99%
3	Q (52Z,TOA) Meeus	1958-2010	365,245	224,4W/m²	351,3°	11,11W/m²	99,51%
4	Q (KNMI-tuin)	1958-2010	365,221	97,25W/m²	171,0°	51,43W/m²	64,14%
5	T-2m-lucht (KNMI-tuin)	1958-2010	365,200	7,63 C	202,0°	3,36 C	71,99%
6	Tx-lucht (KNMI-tuin)	1958-2010	365,200	8,82 C	199,0°	3,87 C	72,20%
(7)	Tn-lucht (KNMI-tuin)	1958-2010	365,210	6,41 C	206,6°	3,65 C	60,94%
(8)	T-2m-lucht Stockholm	1756-2008	365,245	10,53 C	203,5°	3,88 C	79,02%

Tabel 1: enkele gegevens over het aanpassen van een jaarlijkse sinus aan acht lange tijdreeksen van dagelijkse waarden. Van boven naar beneden: 1. de zeewatertemperatuur (SST) in de Noordzee; 2. de inkomende straling Q op een horizontaal vlak op 52 Noord; 3. hetzelfde maar Q op 52 Zuid; 4. de inkomende straling Q op een horizontal vlak zoals gemeten aan de grond in de KNMI-tuin; 5. de daggemiddelde luchttemperatuur op 2 meter hoogte gemeten in de KNMI-tuin; 6. de maximum temperatuur (Tx) op 2 meter hoogte gemeten in de KNMI-tuin; 7. de minimumtemperatuur (Tn) op 2 meter hoogte gemeten in de KNMI-tuin; 8. de daggemiddelde luchttemperatuur op 2 meter hoogte gemeten in Stockholm. Alle variabelen zijn daggemiddelden, behalve Tx en Tn. Van links naar rechts de variabele, het tijdvak der metingen, de dominante periode P, de amplitude A, de fase φ , de restfout R en de verklaarde variantie.

matigde breedte. Met al dat materiaal in een grote pot vinden we dan dat de periode van het jaar 365,235 dagen is. Dat is een zeer bevredigend resultaat. *We zien in de temperatuurwaarnemingen op aarde dat het jaar langer dan 365 dagen duurt, maar iets korter dan 365,25.* De waarde 365,235 is slechts 0,007 dagen verwijderd van 365,24219, de beste schatting door astronomen van het (gemiddeld) tropisch jaar.

De lezer vraagt zich wellicht af waarom wij de SST hebben benut, en niet de luchttemperatuur. Dat heeft een aantal redenen: Ten eerste is er zeer onlangs een nieuwe wereldomvattende *dagelijkse* SST dataset 1982-heden op een rooster van 1/4de graad door NOAA vrijgegeven (ref 3). De meetmethode over de bijna 30 jaar is vrijwel homogeen (zie de discussie in Saha et al (2010) op blz 1031). Ten tweede: de oceaan beslaat 70% van de aarde. Ten derde: de jaarlijkse gang in SST is aanmerkelijk minder verstoord door het weer dan die in luchttemperatuur boven land (zie tabel 1). En de laatste reden: het valt niet mee om dagelijkse temperaturen boven land te krijgen.

Het blijkt heel moeilijk te zijn om *dagelijkse* luchttemperaturen boven land voor de hele aarde te vinden. Voorzover Reanalysis deze levert (Saha et al 2010) is de kwaliteit nog niet geweldig. Er zijn wel een aantal stations met geschoonde reeksen die veel langer teruggaan dan 30 jaar, maar dat is slechts hier en daar, zoals Stockholm.

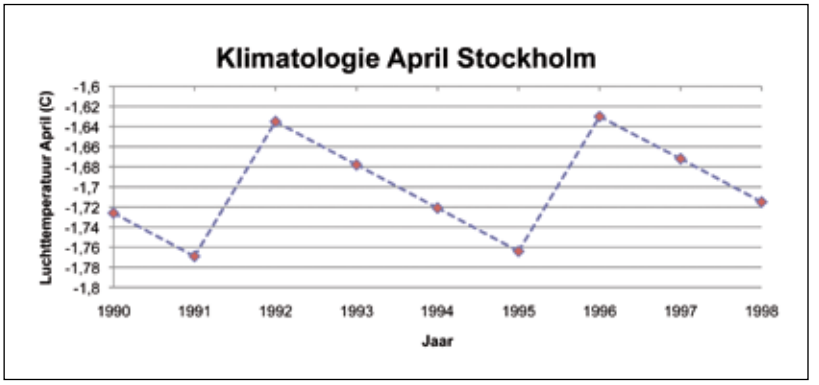
Hoewel de jaarlijkse gang in de luchttemperatuur boven land groter is dan die in SST kan men geen plaatsen vinden waar die ene periode 93% van de variatie verklaart (zoals in de SST in de Noordzee). Dat wil zeggen: er is percentueel veel meer ruis in de luchttemperatuur boven land. De aanwezigheid van ruis is niet onschuldig, want men kan al aan figuur 2 zien dat de ruis, de zwarte lijn, omhoog gaat door opwarming van de Noordzee. Dat is dus geen zuivere ruis. De eigenschappen van ruis zijn belangrijk voor de nauwkeurigheid van het resultaat.

Een duidelijk nadeel van de SST is dat het slechts 29 jaar is (met min of meer constante meetmethode; SST-analyse van daarvoor zit geheel anders in elkaar en is niet dagelijks). We hebben de problemen, die locaal gepaard gaan met een te korte reeks, enigszins gecamoufleerd door de hele wereldoceaan in de berekening te betrekken. Maar 29 jaar blijft kort en is vooral een probleem bij het onderscheid van het tropisch en anomalitisch jaar dat hieronder besproken wordt.

Complicaties

Het begrip tropisch jaar is de tijd die verstrijkt tussen opeenvolgende solstitia en equinoxen: vier van de zes significante punten op de ellips in figuur 1. Het tropisch jaar is de voornaamste reden dat de gematigde breedten seizoenen hebben (uit fase op de twee wereldhalfronden). Deze jaarlijkse gang zou van weinig betekenis zijn als de rotatieas loodrecht op de ecliptica stond. In dat geval zou er nog wel een jaarlijkse gang in inkomende straling zijn, omdat de baan een ellips is en vanuit de aarde gezien de zonneconstante met 6 a 7% varieert (zonder dat de dagen lengen en korten). Deze tweede jaarlijkse gang is in fase op de twee wereldhalfronden. Het anomalitisch jaar is de tijd die verstrijkt tussen opeenvolgende aphelium- of periheliumpassages, en dat is gemiddeld iets groter dan 365,25 dagen omdat de assen van de ellips in figuur 1 voorwaarts bewegen door precessie (dit is de snelste der Milankovitch-factoren). Astronomen schatten dat het anomalistisch jaar gemiddeld 365,25964 dagen duurt, een klein half uur langer dan het tropisch jaar. Terwijl de aarde nu rond 3 januari het dichtst bij de zon staat, zal dat over ruim 10,000 jaar in begin juli zijn. De Gregoriaanse kalender is ontworpen om met het tropisch jaar gelijke tred te houden, maar brengt het anomalitisch jaar op geen enkele manier in rekening.

Wanneer wij, zoals hierboven, de SST met een enkele sinus analyseren, wat verwachten wij dan: de duur van het anomalitisch of van het tropische jaar? Overwegend de laatste, want dat heeft, op gematigde breedte, een veel groter effect op de straling. Maar eigenlijk zouden we dus twee jaarlijkse gangen tegelijk in rekening moeten brengen. We vermoeden dat we het verschil tussen f(t) en het product van $A_t \sin(2\pi t/P_t - \varphi_t)$ en $(1+ A_a \sin(2\pi t/P_a - \varphi_a)$ moeten minimaliseren, waarbij de indices t en a op tropisch en anomalistisch betrekking hebben en de periodes P_t en P_a niet precies aan elkaar gelijk hoeven te zijn. Het is vrijwel uitgesloten dat we met 29 jaar aan gegevens zoiets numeriek kunnen oplossen. Wel kunnen we speculeren. We hebben kunstmatig tijdreeksen gegenereerd met beide componenten en die aan een voor twee golven aangepaste versie van vgl (1) ter analyse aangeboden. Hadden we tijdreeksen van ruim 20.000 jaar, dan was er geen enkel praktisch probleem; over zo'n lang tijdvak loopt het perihelium een keer helemaal rond. Met 5000 jaar kunnen we ook nog toe, maar met 500 jaar ontstaan al problemen. Met slechts enkele tientallen jaren zijn twee sinussen met een periode die zo dicht bij elkaar liggen, niet uit elkaar te halen. Het probleem is het grootst op het noordelijk halfrond onder de huidige omstandigheid. Immers: het anomalitisch en tropisch jaar zijn 'uit fase' (we zijn dicht bij de zon in de winter), waardoor de amplitude van de jaarlijkse gang per saldo verkleind wordt, althans zo lijkt dat met metingen over een korte periode (zie tabel 1). Het zuidelijk halfrond is een stuk gunstiger, omdat het makkelijker is om het totaal van twee variaties te deconstrueren als de componenten constructief samenwerken. Misschien dat onze berekening hier toch iets van laat zien, want wij vonden dat de periode van die ene sinus die R minimaliseert voor SST op het ZH 365,281 +/-0,26 dagen bedraagt, terwijl we op het noordelijk halfrond 365,189 +/- 0,16 vinden. Het zuidelijk halfrond ziet er empirisch, dus wat anomalitischer uit dan het noordelijk halfrond. In tabel 1 zien we (rijen 2 en 3) dat op onze breedte tropisch plus anomalistisch (nu op het zuidelijk halfrond) op 224 W/m^2 uitkomt en tropisch min anomalistisch (noordelijk halfrond) op 206 W/m^2. Dat het anomalitisch jaar empirisch te vinden is in aardse metingen, rapporteerden wij ook al in ons artikel over atmosferische getijden (*Zenit* 2011, blz. 114) want de getijden in de luchtdruk aan de grond (evenredig met inkomende zonnestraling) zijn dus duidelijk sterker in januari dan in juli. Weersverwachting: Over 10.000 jaar zal dat andersom zijn!



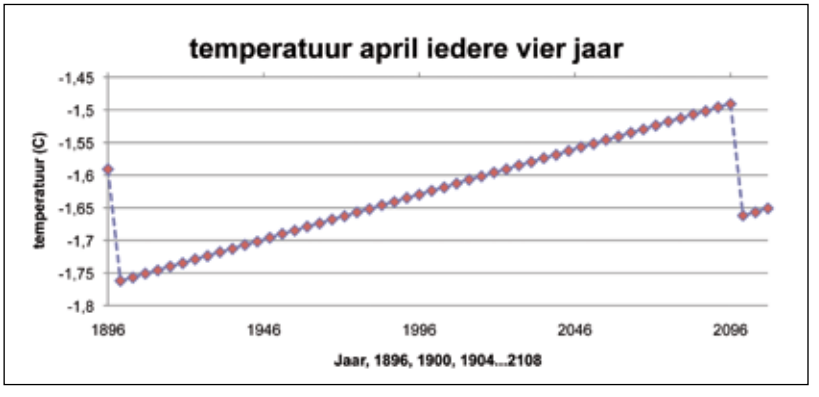
Figuur 5: de aprilgemiddelde klimatologische temperatuur in Stockholm voor 1990 t/m 1998. De klimatologie is bepaald over 1756-2008 door een sinus met periode 365,24219 aan de dagelijkse temperaturen aan te passen.

Klimatologie en lange termijnverwachtingen

Wij schreven dat meteorologen zich weinig bemoeid hebben met kalenders. Daarom weten zij, wanneer de klimatologie moet worden bepaald, nauwelijks raad met de schrikkeldag. We nemen als afsluiting vast een voorschot op een volgend artikel over het bepalen van de klimatologie op een manier die beter is dan gebruikelijk. Veronderstel dat we een sinusgolf met periode 365,24219 (het tropisch jaar lenen we nu van de astronomen) hebben aangepast aan de 8,8754 dagelijkse temperaturen (1756-2008) te Stockholm (Moberg 2002 en 2003). We kiezen Stockholm vanwege de beschikbaarheid van geschoonde dagelijkse waarden voor een zeer lange periode 1756-2008. De amplitude blijkt 10,53˚C te zijn, en we verklaren 79% van de variantie (veel minder dan met SST), zie rij 8 in tabel 1. We kunnen de dagelijkse klimatologie nu eenvoudig reconstrueren, extrapoleren en afbeelden op de Gregoriaanse kalender. Figuur 5 laat zien dat de aprilgemiddelde temperatuur van jaar op jaar niet constant is. In een schrikkeljaar springt de temperatuur bijna 0,2˚C omhoog terwijl het tussen twee gewone jaren 0,043˚C kouder wordt. Dat is het eenvoudige gevolg van de discrepantie tussen de fysische en burgerlijke kalender, 365,24219 tegen 365 of 366 dagen.

Het wordt nog wat gortiger als we de apriltemperaturen om de vier jaar over een tijdvak van 200 jaar uitzetten, zie figuur 6. Dan zien we dat het 200 jaar lang warmer wordt in april. Dit is wederom het eenvoudige gevolg van de discrepantie tussen de fysische en burgerlijke kalender. En wel omdat we iets te vaak een schrikkeldag hebben. En het duurt twee eeuwen, omdat de conventie om drie schrikkeldagen per 400 jaar niet toe te kennen al heeft plaatsgevonden in 1700, 1800 en 1900. April wordt dus 0,26C warmer tussen 1900 en 2096 zonder enige klimaatsverandering (oktober 'koelt af' met hetzelfde bedrag). Wat we in figuur 5 en 6 zien wordt trouwens bevestigd door kenners van vogeltrek en phenologie.

In een komend artikel werken we de klimatologieaspecten verder uit. In een ander komend artikel gaan we verder in op de resultaten voor de Noordzee, want men kan aan de amplitude en fase van de jaarlijkse gang in SST zien hoe diep ondiepe zeeën zijn.



Figuur 6: de aprilgemiddelde klimatologische temperatuur iedere vier jaar in Stockholm voor 1896 t/m 2108. De klimatologie is bepaald over 1756-2008 door een sinus met periode 365,24219 aan de dagelijkse temperaturen aan te passen.

Met dank aan Gunther Können en Cor Schuurmans voor het kritisch doorlezen.

Referenties:

1. Cerveny, R. S., B. M. Svoma, R. C. Balling Jr., and R. S. Vose (2008), *Gregorian calendar bias in monthly temperature databases*, Geophys. Res. Lett., 35,L19706,doi:10.1029/2008GL035209.
2. Van den Dool, H. M., and G. P. Können 1982: *Strong variations in the delay of the annual cycle in the air temperature near the coast*. Proceedings of the First Int. Conf on meteorology and air/sea interaction of the coastal zone, 10-12 Aug, pp 325-327. http://s3.amazonaws.com/gunther-konnen/documents/59/1982_vdDool_Coastal.pdf?1292778776
3. Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey, and M. G. Schlax, 2007: *Daily high-resolution blended analyses for sea surface temperature*. J. Climate, **20**, 5473-5496.
4. Meeus, J. *Astronomical Algorithms*. Second edition 1998, Willmann-Bell, Inc., Richmond, Virginia, USA.
5. Saha et al 2010, *The Climate Forecast System Reanalysis*. Bulletin of the American Meteorological Society, vol 91, p1015-1057.
6. Van den Dool, H en H. De Bruin, 2011: *Atmosferische getijden*. *Zenit* maart 2011, blz 114-118.
7. Moberg, A. , Bergström, H., Ruiz Krigsman, J and Svanered, O. 2002: *Daily air temperature and pressure series for Stockholm* (1756-1998), Climatic Change, 53, 171-212.
8. Moberg, A., Alexandersson, H., Bergström, H. and Jones, P.D. 2003: *Were Southern Swedish temperatures before 1860 as warm as measured?* International Journal of Climatology, 23, 1495-1521.