

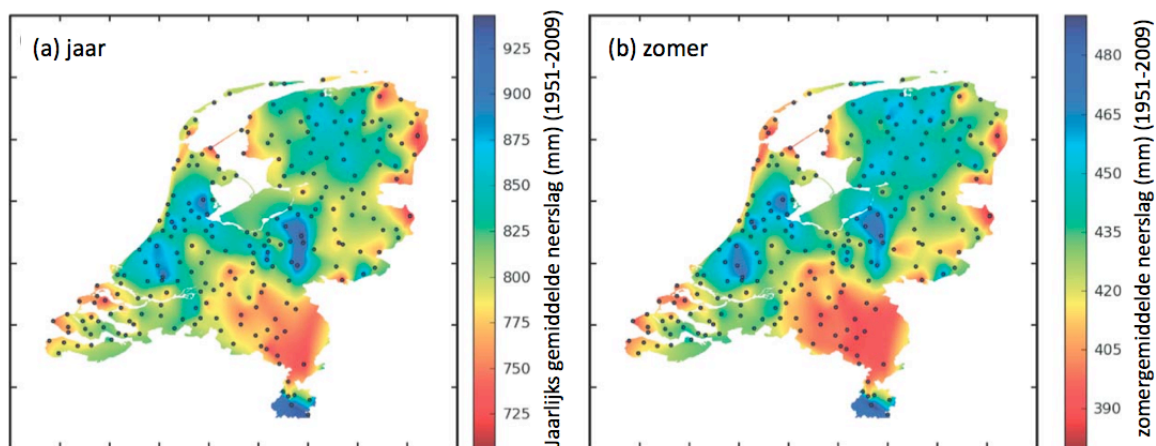
Toename neerslag in Nederland door warme zee en meer westenwind

Aarnout van Delden (IMAU)

Meteorologica, 3-2012, 13-16.

De meeste klimaatwetenschappers denken dat neerslag onder invloed van opwarming door het versterkte broeikaseffect grotere extremen zal gaan vertonen. Droge gebieden, zoals woestijnen, zullen droger worden en natte gebieden, zoals de tropen, zullen natter worden. Andere tamelijk natte gebieden, zoals West Europa en de Verenigde Staten, zullen bovendien worden getroffen door langere perioden met overvloedige regenval, maar ook door meer extreme droge periodes. Of de droogte van de afgelopen zomer in het middenwesten van de Verenigde Staten, waardoor de graan- en maïsoogst zwaar is getroffen, een uiting is van deze tendens is nog de vraag. Het is inmiddels duidelijk dat de neerslagverdeling op aarde sterk is veranderd, vooral in de laatste 30 jaar. Maar neerslag en neerslagveranderingen zijn zeer plaatsafhankelijk. Buishand e.a. (2012) hebben dit onlangs aangetoond voor Nederland. Dit artikel onderzoekt de relatie tussen neerslag in Nederland en veranderingen in temperatuur, in atmosfeercirculatie en in oceaancirculatie op regionale en mondiale schaal en concludeert dat de relatief grote neerslagveranderingen van de afgelopen 150 jaar zich maar moeilijk laten verklaren.

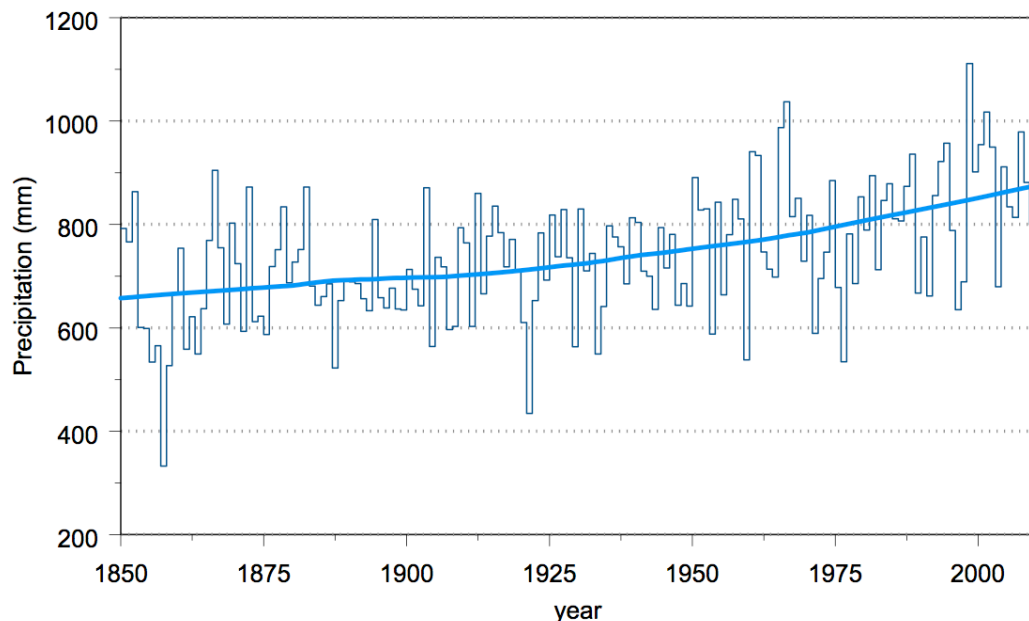
Figuur 1 toont de, voor een vlak land, opvallend *niet* homogene verdeling van de jaargemiddelde neerslag in Nederland voor de periode vanaf 1951 tot 2009. Zuid Holland, de regio rond Amsterdam, de Veluwe en Zuid Limburg springen eruit als natte gebieden met meer dan 900 mm neerslag per jaar, terwijl Noord Limburg, Oost Brabant, het westen van Zeeland, de regio rond de kop van Noord Holland en de Noordoostelijke grensstreek gemiddeld relatief droog zijn, met ongeveer 750 ± 25 mm per jaar.



Figuur 1. Jaargemiddelde neerslag (links) en zomerhalfjaargemiddelde neerslag (rechts) voor de periode 1951 tot 2009. De zomer loopt van 1 mei tot en met 31 oktober. De zwarte punten geven de positie aan van de neerslagmeetstations. Bron: Buishand et al., 2012.

Toename gemiddelde neerslag in Nederland

Vanaf 1950 bezit Nederland een zeer dicht netwerk van ongeveer 300 neerslag-meetstations (zie figuur 1). In 1850 waren dat er nauwelijks 10 en in 1900 ongeveer 100. Buishand e.a. hebben uit de niet homogene neerslagmetingen, voor de periode 1850 tot 2009, “gehomogeniseerde” (in plaats en tijd) reeksen van wintergemiddelde en zomergemiddelde neerslag bepaald. Hieruit is de landelijk gemiddelde neerslag bepaald voor elk jaar vanaf 1850. Het resultaat wordt getoond in **figuur 2**. Het is duidelijk dat de jaargemiddelde neerslag sterk van jaar op jaar varieert. Het natste jaar sinds 1850 was 1998, toen er landelijk gemiddeld ongeveer 1100 mm viel. Het droogste jaar was 1857 met landelijk gemiddelde ongeveer 360 mm, een jaarsom die in het droogste gedeelte van Spanje (bijvoorbeeld in Alicante) niet zou misstaan. De vloeiende lijn in de grafiek is het resultaat van een filtering van de meetreeksen waardoor relatief kortdurende fluctuaties worden verwijderd. Een geleidelijke neerslagtoename is waarneembaar. In 1850 was de landelijk gemiddelde neerslag, volgens deze kromme, slechts ongeveer 660 mm per jaar. In 2009, daarentegen, was de landelijk gemiddelde neerslag inmiddels gestegen tot bijna 900 mm per jaar. De dikke vloeiende lijn geeft de indruk dat deze neerslagtoename al in de negentiende eeuw op gang was gekomen en zeer geleidelijk is verlopen. De vraag is nu of dit het gevolg van het versterkte broeikaseffect.



Figuur 2. Jaarlijkse neerslag in Nederland vanaf 1851 tot 2009 (bron: Buishand et al., 2012).

Betrouwbaarheid neerslagmetingen

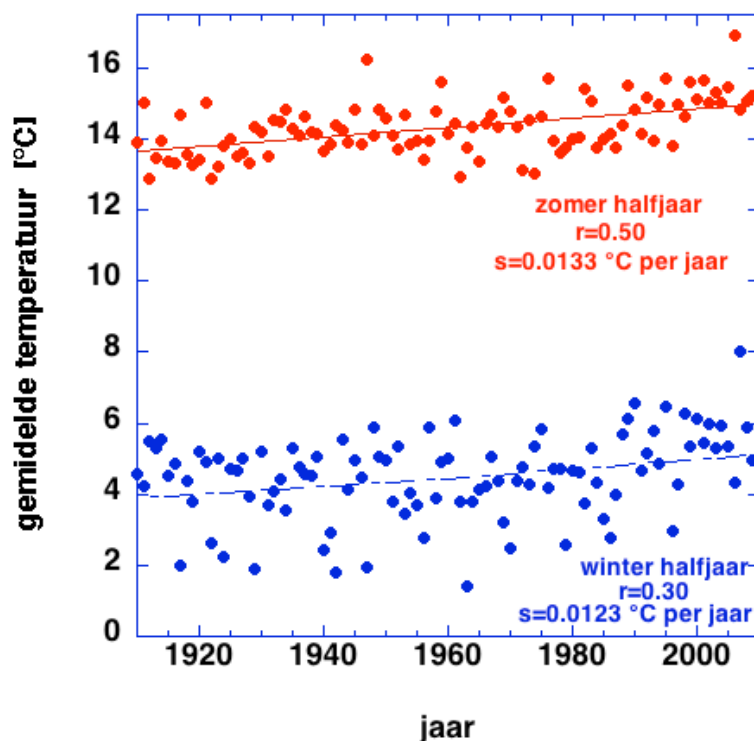
De betrouwbaarheid van neerslagmetingen van voor 1900 is echter onzeker. Neerslagmeetmethoden waren in die tijd verre van gestandaardiseerd. Neerslag werd in de negentiende eeuw op verschillende hoogtes en met totaal verschillende instrumenten gemeten. In 1903 werd in Nederland afgesproken dat de rand van de regenmeter zich op 150 cm boven het aardoppervlak moest bevinden en dat het oppervlak 400 vierkante cm moest zijn. In 1946 is de standaardhoogte van de rand van de regenmeter verlaagd naar 40 cm om de windgerelateerde meetfout te verkleinen. In 1962 werd opnieuw een andere standaard geïntroduceerd: het oppervlak van regenmeters werd verkleind naar 200 vierkante cm. De hoogte bleef 40 cm. Het corrigeren en onderling consistent maken van de verschillende neerslag meetreeksen, die overigens niet altijd compleet zijn, heeft veel tijd en inspanning gevergd.

Relatie watercyclus en temperatuur

Buishand e.a. berekenen een toename van de landelijk gemiddelde neerslag voor de periode 1910-2009 van 25%. De neerslagtoename over deze eeuw is veel groter in het winterhalfjaar (+35%) dan in het zomerhalfjaar (+16%). Het winterhalfjaar omvat de 6 koudste maanden van het jaar en omvat dus de maanden november tot en met april. Het zomerhalfjaar loopt van 1 mei tot 31 oktober.

Tussen 1910 en 2009 is de temperatuur nabij het aardoppervlak, gemiddeld in centraal Nederland, met 1.3°C gestegen (figuur 3). In de zomer is de temperatuurstijging iets groter geweest (1.33°C) dan in de winter (1.23°C). Als het waar is dat de neerslagtoename een direct gevolg is van deze temperatuurverandering, dan is de gevoeligheid, S_P , van de landelijk gemiddelde jaarlijkse neerslag voor een verandering, ΔT , van de landelijk- en jaar gemiddelde temperatuur, gedefinieerd als $S_P = (\Delta P/P)/\Delta T$, waarin P de jaargemiddelde neerslag en ΔP de verandering van P , gelijk aan 0.2°C^{-1} . Dat is fors!

De totale hoeveelheid waterdamp per vierkante meter, W , in de atmosfeer is globaal gemiddeld ongeveer 25 kilogram per vierkante meter. In Nederland bedraagt W in de winter gemiddeld 11 kg m^{-2} en in de zomer gemiddeld 24 kg m^{-2} . De gevoeligheid van W voor een temperatuurverandering kan worden uitgedrukt door middel van de parameter $S_W = (\Delta W/W)/\Delta T$. Volgens de wet van Clausius en Clapeyron neemt W , bij constante relatieve vochtigheid, met 7% per graad Celsius temperatuurstijging toe. In Nederland is de jaargemiddelde relatieve vochtigheid tussen 1910 en 2010 niet significant veranderd, waardoor geldt dat $S_W = 0.07^{\circ}\text{C}^{-1}$. Dus: $S_P > S_W$.



Figuur 3. Jaarlijks gemiddelde temperatuur in centraal Nederland (het gebied tussen de steden Utrecht, Arnhem, Breda en Eindhoven) in het winterhalfjaar (blauw) en in het zomerhalfjaar (rood) vanaf 1910 tot 2010. De rechte lijnen (een lineaire regressie) geven aan dat de temperatuur in centraal Nederland zowel in de zomer als in de winter binnen een eeuw is gestegen met ongeveer $1,3^{\circ}\text{C}$ (zie van der Schrier et al., 2011a,b). De parameter, r , is de correlatiecoëfficiënt van de lineaire regressie. De parameter, s , is de helling van de rechte lijn.

Bekijken we de watercyclus gemiddeld over een periode van meerdere jaren of gemiddeld over meerdere seizoenen, dan kan de gemiddelde verblijftijd, t , van waterdamp in de atmosfeer worden geschat uit de vergelijking, $t = W/P$. De verblijftijd t is dus een maat voor hoe lang waterdamp gemiddeld in de atmosfeer verblijft alvorens het uitregent. Boven Nederland is t in de zomer ongeveer 10 dagen en in de winter ongeveer 5 dagen. De gevoeligheid, S_t , van de gemiddelde verblijftijd van water in de atmosfeer, per graad Celsius temperatuurverandering, is in Nederland blijkbaar negatief, want er geldt dat $S_t = (\Delta t/t)/\Delta T = S_W - S_P$. Jaargemiddeld geldt voor Nederland dus ongeveer $S_t = -13\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Veranderingen verdamping en circulatie in atmosfeer en oceaan

Een negatieve waarde van S_t betekent dat de watercyclus is versneld. Dit kan komen door een toename van de verdamping vanaf het aardoppervlak en/of door een toename van de vochtfluxconvergentie door grootschalige circulatieveranderingen, al dan niet tezamen met een toename van de verdamping elders, vooral boven de oceaan. Verdamping wordt niet direct gemeten. Daarom kunnen we er voorlopig alleen maar over speculeren. Er zijn *geen* aanwijzingen dat verdamping boven het landoppervlak van Nederland sterk is toegenomen, zeker niet in de winter. In maart en april is een lichte toename van de verdamping mogelijk vanwege de vervroeging van het groeiseizoen. Planten en bomen gaan door de hogere temperatuur vroeger in het jaar een bijdrage leveren aan de verdamping door transpiratie. Een groot effect zal dit niet zijn. Een ander, wellicht belangrijker, effect heeft te maken met de flinke toename van de netto straling aan het aardoppervlak in de zomer vanaf 1985 door de aanzienlijke afname van de concentratie sulfaataerosolen (een bepaald soort luchtvervuiling) in de atmosfeer, waardoor de verstrooiing van zonlicht aanzienlijk is verminderd (van Beelen en van Delden, 2012). Hierdoor is er meer energie beschikbaar voor verdamping. In een waterrijk land als Nederland kan dit effect een belangrijke toename van verdamping in de zomer veroorzaken, maar het kan ook tot een sterkere verdroging van de toplaag van de bodem leiden en daardoor tot een limitering van de verdamping. In de winter spelen deze effecten nauwelijks een rol en bepaalt de grootschalige circulatie de neerslag.

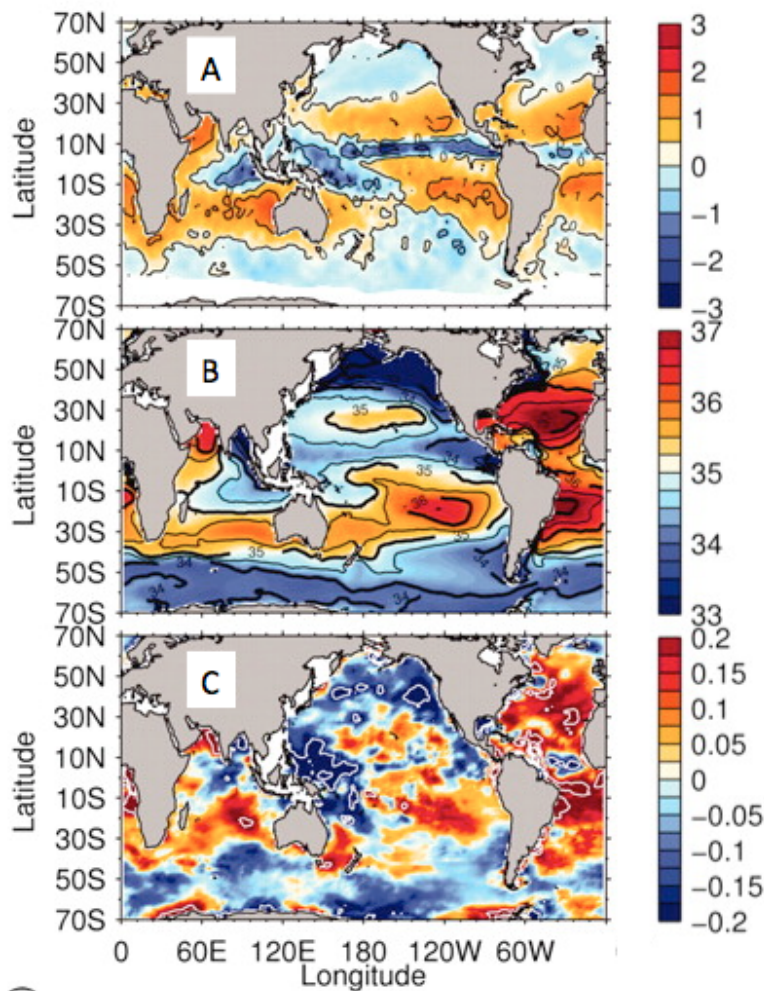
Redenen voor de spectaculaire versnelling van de watercyclus in Nederland, vooral in de winter, moeten dus hoofdzakelijk buiten Nederland worden gezocht. Er zijn aanwijzingen dat de aanvoer van waterdamp vanaf de oceaan is toegenomen doordat de wind vaker en gemiddeld sterker uit het westen is gaan waaien. Volgens van Haren e.a. (2012) blijkt dit uit een toename, over de afgelopen eeuw, van de luchtdrukgradiënt tussen het Middellandse zeegebied en Scandinavië.

Metingen van toenemende zoutconcentraties van het water nabij het oppervlak van de Atlantische Oceaan wijzen op een toename van de verdamping, E , ten opzichte van de neerslag, P , boven de Atlantische Oceaan (Durack et al., 2012) (zie **figuur 4**). Als water van de oceaan verdampt blijft het zout achter. Daardoor wordt het oppervlaktewater van de oceaan zouter. De hoogste zoutconcentraties worden gemeten in de toplaag van de *subtropische oceaan*, waar verdamping het grootst is (**figuur 4**). In de tropen en dichterbij de polen overtreft neerslag de verdamping, waardoor het oceaanwater aldaar minder zout is. De zoutconcentratie van het zeewater aan het oppervlak van Atlantische Oceaan is tussen 1950 en 2000 bijna overal toegenomen. Dit betekent dat de netto waterflux van de Atlantische Oceaan naar de atmosfeer in deze periode is toegenomen (figuur 4).

Durack et al. (2012) concluderen hieruit dat de watercyclus in dit gebied in de afgelopen 50 jaar is versneld met $8 \pm 5\%$ per graad Celsius opwarming aan het aardoppervlak ($S_t = -8 \pm 5\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Als dit waar is en als ons inderdaad een globaal gemiddelde opwarming van 2 tot 3°C in de komende eeuw te wachten staat, zoals de klimaatmodellen voorspellen, en als het waar is dat de water cyclus uitsluitend afhankelijk is van de temperatuur, dan staat ons, volgens deze onderzoekers, in de komende eeuw een substantiële versnelling van de *globale* watercyclus te wachten van maar liefst 16 tot 24 %. Roderick et al., (2012) maakten

in een ingezonden brief in *Science* snel bezwaar tegen deze nogal boude bewering omdat hij niet van toepassing is op de watercyclus boven land (30% van het aardoppervlak).

De temperatuur van de oceaan wordt, overigens, niet alleen beïnvloed door het versterkte broeikaseffect, maar zeker ook door zeer langzame interne veranderingen van de oceaanstroming. Het effect van deze veranderingen op de temperatuur van het oppervlak van de Atlantische Oceaan uit zich in een oscillatie die de "Atlantic Multidecadal Oscillation" (AMO) wordt genoemd. De AMO is een schommelingen van de gemiddelde temperatuur van het oppervlak van de Atlantische Oceaan op het noordelijk halfrond met een periode van ongeveer 50 tot 60 jaar. De relatief warme Atlantische Oceaan gedurende het laatste decennium heeft zeker ook te maken met de AMO.



Figuur 4. A: jaargemiddelde waterflux aan het oppervlak tussen 1950 en 2000 ($E-P$ in m per jaar); B: gemiddelde zoutconcentratie tussen 1950 en 2000 (PSS-78); C: verandering van de zoutconcentratie tussen 1950 en 2000 (PSS-78 per 50 jaar). Bron: (Durack et al., 2012). Informatie over de PSS-78 saliniteitsschaal is te vinden op de website, <http://www.salinometry.com/joomla/index.php/pss-78.html>.

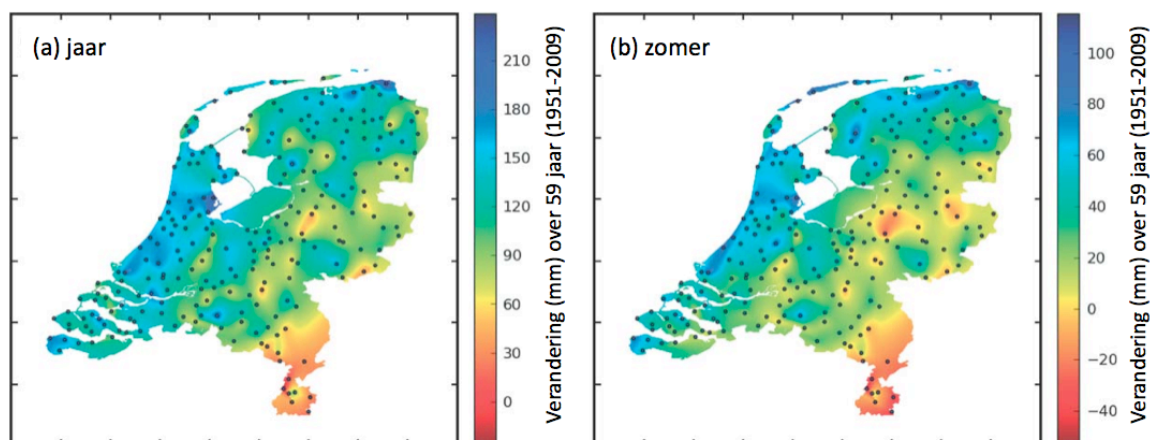
Rol van de stralingsbalans

De boude voorspelling van Durack et al. (2012) is ook in tegenspraak met de verwachting van klimaatmodellen, die aangeven dat de intensiteit van de watercyclus aan banden wordt gelegd door de netto beschikbare stralingsenergie aan het aardoppervlak, die op grond van berekeningen met modellen niet substantieel lijkt toe te nemen met toenemende temperatuur (Wentz et al., 2007; Wild en Liepert, 2010).

Door de toename van broeikasgassen in de atmosfeer is de langgolvlige terugstraling van de atmosfeer naar het oceaanooppervlak weliswaar toegenomen, maar er zijn andere effecten die dit op globale schaal tegenwerken, o.a. de toename van absorptie van zonnestraling door waterdamp, waardoor de energie (de netto straling) die beschikbaar is voor verdamping maar mondjesmaat toeneemt bij toenemende broeikasgasconcentraties. Vele experts denken dan ook dat neerslag, P , relatief veel minder sterk zal toenemen dan het waterdampgehalte, W , onder invloed van de opwarming van de aarde door het versterkte broeikaseffect. Dus, volgens modellen is S_T globaal gemiddeld positief!

Verandering neerslag grootst in een brede kuststrook

Dit lijkt in Nederland dus niet op te gaan, hoewel er sterke regionale en seizoensverschillen in de neerslagtrends zijn waargenomen. Buishand e.a. laten bijvoorbeeld zien dat de neerslagtoename in Nederland zich vooral manifesteert in het westen van Nederland (figuur 5). Terwijl de jaarlijkse neerslagsom in Zuid en Noord Holland tussen 1951 en 2009 met bijna 200 mm is toegenomen, is deze toename in Limburg beperkt gebleven tot minder dan 50 mm. In de zomer zien we in Nederland een verdeling van de neerslagtrends die gedeeltelijk overeenkomt met het adagium: “natte gebieden worden natter en droge gebieden worden droger”. In Limburg is de neerslag in het zomerhalfjaar met enkele tientallen mm *afgenomen* terwijl er langs de Hollandse kust sprake is van een toename van ongeveer 100 mm! Voor het westen van Zeeland en de kop van Noord Holland geldt dit adagium echter niet. Ook deze relatief droge gebieden langs de kust zijn flink natter geworden. Opvallend is ook dat de neerslag niet noemenswaardig is toegenomen in de relatief natte heuvels van Zuid Limburg.



Figuur 5. Geografische verdeling van de verandering van de jaarlijkse neerslag (links) en van de neerslag in het zomerhalfjaar (rechts) in Nederland (bron: Buishand et al., 2012).

De kuststrook was in de maanden september, oktober en november, onder invloed van de relatief warme zee, overigens altijd al veel natter dan het binnenland (Sluijter et al., 2011). Het lijkt erop dat dit maritieme najaarsklimaat zich, onder invloed van hogere zeewatertemperaturen in de zomer en in de winter, sterker manifesteert in een bredere kuststrook van Nederland.

Conclusie

De watercyclus bestaat uit verdamping, transport van waterdamp door de atmosfeer, neerslag, opslag van water in de vorm van ijs en sneeuw, smelt en afvoer van water door de rivieren. Dit artikel bespreekt de toename in de neerslag, die op veel plaatsen in de wereld wordt waargenomen, waaronder in Nederland. Vooral langs de westkust van Nederland is de neerslag spectaculair toegenomen. Dit geldt trouwens o.a. ook voor het westen van

Frankrijk, Schotland en het westen van Noorwegen. De warme Atlantische Oceaan en een hogere frequentie van wind uit het westen hebben hier waarschijnlijk toe bijgedragen.

Het wetenschappelijke inzicht in de redenen van deze veranderingen, vooral op globale schaal, staat echter nog in de kinderschoenen. Verdamping op de Atlantische Oceaan lijkt tussen 1950 en 2000 sterk te zijn toegenomen, maar we weten eigenlijk nog nauwelijks waarom. Wat is hierin de rol van de AMO? Bovendien, de waarnemingen spreken de theorie, dat de intensiteit van deze watercyclus moet afnemen onder invloed van het versterkte broeikaseffect, tegen. Wat de globale watercyclus in de toekomst gaat doen is daarom nog zeer onzeker.

Graag dank ik Arjan van Beelen, Wim van den Berg en Robert Mureau voor zeer nuttig commentaar.

Literatuur

- Beelen, A.J. van, A.J. van Delden, 2012: Cleaner air brings better views, more sunshine and warmer summer days in The Netherlands. **Weather**, **67**, 21-25.
- Buishand, T.A., G. De Martino, J.N. Spreeuw, T. Brandsma, 2012: Homogeneity of precipitation series in the Netherlands and their trends in the past century. **Int. J. Climatology**, 2012.
[DOI: 10.1002/joc.3471](https://doi.org/10.1002/joc.3471).
- Durack, P. J., S. E. Wijffels, R. J. Matear, 2012: Ocean Salinities Reveal Strong Global Water Cycle Intensification During 1950 to 2000. **Science**, **336**, 455-458.
- Haren, R. van, G.J. van Oldenborgh, G. Lenderink, M. Collins, W. Hazeleger, 2012: SST and circulation trend biases cause an underestimation of European precipitation trends **Clim. Dyn.**, [doi:10.1007/s00382-012-1401-5](https://doi.org/10.1007/s00382-012-1401-5).
- Roderick, M.L., F. Sun, G.D. Farquhar, 2012: Water cycle varies over land and sea. **Science**, **336**, 1230-1231.
- Schrier, G. van der, A.P. van Ulden, G.J. van Oldenborgh, 2011a: The construction of a Central Netherlands temperature. **Climate of the Past**, 2011, **7**, 527-542, [doi:10.5194/cp-7-527-2011](https://doi.org/10.5194/cp-7-527-2011).
- Schrier, G. van der, A. van Ulden, G.J. van Oldenborgh, 2011b: De Centraal Nederland Temperatuurreeks. **Meteorologica**, 2011, **20**, 4.
- Sluijter, R., H. Leenaers, M. Camarasa, 2011: **Bosatlas van het Klimaat**. Noordhoff Uitgevers, Groningen.
- Sutton, R. T., Hodson, L. R. (2005). Atlantic forcing of North American and European summer climate. **Science** **309**, 115–118.
- Wentz, F.J., L. Ricciardulli, K. Hilburn, C. Mears, 2007: How much more rain will global warming bring? **Science**, **317**, 233-235.
- Wild., M., B. Liepert, 2010: The earth radiation balance as driver of the hydrological cycle. **Environ. Res. Lett.**, **5** 025203.