



Waarom de KNMI-scenario's niet zullen uitkomen

Colofon

Dit rapport kwam tot stand op initiatief van wetenschapsjournalist Marcel Crok. Hij was betrokken bij het internationale discussieplatform climatedialogue.org. Een van de onderwerpen op dat platform luidde: *are regional models ready for prime time?* Deze discussie ging tussen Bart van den Hurk van het KNMI, die nauw betrokken is bij de KNMI-klimaatscenario's en Roger Pielke Sr., een Amerikaanse onderzoeker met veel ervaring maar ook kritiek op de manier waarop klimaatmodellen gebruikt worden. In de brochure die het KNMI uitbracht over de klimaatscenario's noch in het wetenschappelijke achtergronddocument dat het KNMI publiceerde is er ook maar iets te vinden over deze Climate Dialogue dan wel over de vele papers die Pielke Sr. over dit onderwerp publiceerde. Dat is een gemis. Donateurs van de Groene Rekenkamer brachten 3000 euro bijeen. Verdere financiering is niet gezocht. In een later stadium raakte Rob de Vos bij het onderzoek betrokken.

Marcel Crok

Marcel Crok is een freelance wetenschapsjournalist die woont en werkt in Amsterdam. Hij werkte in het verleden voor het populairwetenschappelijke maandblad Natuurwetenschap & Techniek (NWT, tegenwoordig de Nederlandse editie van New Scientist). In 2005 publiceerde Crok in NWT een lang artikel over de hockeystickgrafiek, waarin de kritiek van Stephen McIntyre en Ross McKittrick uitgebreid aan de orde kwam.

Crok publiceerde in 2010 het boek *De Staat van het Klimaat*. Na Climategate en de commotie over fouten in het vierde IPCC-rapport vroeg de Nederlandse overheid hem om het vijfde IPCC-rapport als expert reviewer te reviewen. Samen met het KNMI en PBL (Planbureau voor de Leefomgeving) heeft Crok tevens een internationaal discussieplatform opgezet, www.climatedialogue.org, dat een constructieve dialoog faciliteerde tussen klimaatonderzoekers met verschillende visies.

In 2014 publiceerde hij samen met de Britse onderzoeker Nic Lewis het rapport *A Sensitive Matter*, dat in vertaling bij de Groene Rekenkamer verscheen onder de titel *Een Gevoelige Kwestie, Hoe het IPCC goed nieuws over klimaatverandering verborg*. Beide versies van het rapport zijn gratis te downloaden via www.thegwpf.org/category/gwpf-reports/ en www.groenerekenkamer.nl/rapporten/.

Rob de Vos

Rob de Vos is geograaf en ondernemer en al geruime tijd woonachtig in het zuiden van het land. Als geograaf - gespecialiseerd in klimaat en landschapsgenese - is hij vele jaren werkzaam geweest als docent aardrijkskunde in het voortgezet onderwijs. Hij heeft zijn leerlingen naast kennis en inzicht in geografische processen ook altijd een kritische houding ten opzichte van informatie proberen bij te brengen. Uit de behoefte van zijn leerlingen aan een betrouwbare informatiebron over klimaatverandering komt de website

www.klimaatgek.nl voort, waarvan hij redacteur is. In eerste instantie opgezet als hulp en naslagwerk voor examenkandidaten is de website inmiddels uitgegroeid tot een veelgelezen kritische klimaatblog.

De Groene Rekenkamer

Objectiviteit en neutraliteit behoren vanzelfsprekend te zijn bij lastige beleidskwesties.

Cijfermatige controle van resultaten, vrij van emotie en een vooringenomen standpunt is de enige manier om een doeltreffend beleid te kunnen vormen.

De Groene Rekenkamer voert deze controle uit, op eigen initiatief of op verzoek, en vrij van politieke voorkeur en absoluut onafhankelijk van wie dan ook. De Groene Rekenkamer stelt zich strikt neutraal op bij verzoeken om cijfermatige controle. In elke overeenkomst met een opdrachtgever staat daarom dat deze geen invloed heeft op de uitkomsten. Dit is de kracht van de Groene Rekenkamer.

Artikel 1 van de Statuten zegt immers: Het doel van de stichting is het kritisch volgen van het overheidsbeleid op het gebied van milieu, gezondheid, technologie en verwante gebieden en te bevorderen dat dit wordt gebaseerd op wetenschappelijke analyses van risico's en kosteneffectiviteit van maatregelen.

Inhoud

Waarom de KNMI-scenario's niet zullen uitkomen	0
Colofon	2
Inhoud	4
Samenvatting.....	6
Inleiding.....	11
1. Weer versus klimaat	15
2. Mondiale klimaatverandering, waar staan we?	19
Business as usual of worst case?	20
Zijn broeikasgassen dominant?	24
De stagnatie.....	28
Tropen	38
Wolken en neerslag.....	42
De oceanen.....	44
Klimaatgevoeligheid	49
De toekomst	57
Goed of slecht?.....	59
3. Klimaatverandering in Nederland	60
Temperatuur en het onduidelijke CO ₂ -effect	64
Dimming en brightening.....	66
Temperatuursprong rond 1988.....	71
Verstedelijking.....	83
De Noordzee.....	93
Conclusies.....	98
4. Neerslag: méér en extremer?	102
Meetproblemen	108
Temperatuur	112
Luchtcirculatie	114
Verstedelijking.....	118
Zware neerslag: etmaalsommen.....	122
Extreme buien: uursommen	125
Conclusies.....	132

5. Zeespiegelstijging: business as usual	135
Mondiale zeespiegelstijging	136
Satellietmetingen	138
Getijdemetingen.....	1412
Getijdemetingen versus satellietmetingen	143
Getijdemetingen Nederland.....	145
Conclusies.....	148
6. Epiloog en aanbevelingen	152

Samenvatting

- 1) Dit rapport heeft als titel “Waarom de KNMI-scenario’s niet zullen uitkomen”. De stelligheid van deze titel is een knipoog naar de brochure over de KNMI-scenario’s waarin het KNMI diverse claims presenteert die veel te stellig zijn, zoals “[d]e temperatuur in Nederland zal verder stijgen” en “[o]p jaarbasis ligt de opwarming in Nederland tussen 1,0 en 2,3°C rond 2050”. Het KNMI erkent in achtergronddocumentatie dat aan de KNMI-scenario’s geen kansen verbonden zijn. Het is dus niet te zeggen of de kans op 1-2,3°C aan opwarming in 2050 1% of 99% of welk percentage dan ook zal zijn. Het taalgebruik van het KNMI suggereert echter een 100% zekerheid dat de opwarming in de range 1-2,3°C zal liggen en dat is onjuist.
- 2) De belangrijkste aanname voor het nut van klimaatscenario’s is dat de uitstoot van antropogene broeikasgassen (door met name het gebruik van fossiele brandstoffen) op dit moment het klimaat domineert en ook van dominante invloed zal zijn op het klimaat in de 21e eeuw, zowel wereldwijd als in Nederland. Het KNMI doet weinig moeite om deze aanname te onderbouwen, wellicht omdat deze visie in lijn is met die van het IPCC en derhalve beschouwd wordt als ‘algemeen aanvaard’. Het bewijs achter deze aanname rust echter op dezelfde klimaatmodellen waarmee de scenario’s worden gedaan. Dit rapport laat zien dat het bewijs voor een dominante invloed van broeikasgassen op het klimaat nog altijd zwak is. Het rapport documenteert tevens dat diverse andere factoren – deels natuurlijke, deels antropogene – onderbelicht blijven.
- 3) Modellen simuleren weliswaar de toename van de wereldwijde temperatuur tussen 1975 en 2000 heel redelijk, maar vallen in andere periodes door de mand. Zo onderschatten diezelfde modellen een vrijwel identieke opwarming tussen 1917 en 1944 met een factor drie. Ook zagen modellen de afvlakking van de opwarming na 2000 niet ‘aankomen’. Dit heeft tot gevolg dat de IPCC-modellen de opwarming tussen 1979 en 2017 wereldgemiddeld al met zo’n 35% overschatten. De opwarming van de oceanen wordt in dezelfde periode met bijna een factor twee overschat en de zogenoemde *hot spot* hoog in de tropische atmosfeer wordt zelfs met een factor drie overschat. Modellen zijn ook niet goed in staat om natuurlijke schommelingen in het klimaat (zoals de Atlantic Multidecadal Oscillation) te simuleren. Deze *mismatches* tussen modellen en waarnemingen zijn niet genoemd door het KNMI.
- 4) Er is inmiddels een goede en logische verklaring waarom modellen de opwarming sinds 1979 aanzienlijk overschatten. Modellen zijn ‘overgevoelig’ voor broeikasgassen en genereren dus te veel opwarming als CO₂ in het model toeneemt. Observatoire schattingen voor klimaatgevoeligheid (opwarming na een verdubbeling van de CO₂-concentratie), gebaseerd op de waargenomen wereldwijde opwarming sinds 1850 en die aannemen dat vrijwel al die opwarming door broeikasgassen veroorzaakt is, komen aanzienlijk lager uit dan diezelfde klimaatgevoeligheid afgeleid van klimaatmodellen. Bij de zogenoemde overgangsgevoeligheid (TCR), die vooral van belang is voor de opwarming in deze

eeuw, is de observationele schatting 1,3 graden Celsius terwijl modellen op 1,8 graden Celsius zitten. Het KNMI bespreekt deze belangrijke kwestie niet.

- 5) De 'goede' overeenkomst tussen modellen en de wereldgemiddelde temperatuur in de periode 1975 en 2000 is zeer waarschijnlijk het gevolg van een 'verkeerde' combinatie van factoren. Modellen onderschatten de natuurlijke opwarming in deze periode, onder andere het periodiek warmer worden van de Atlantische Oceaan. Tegelijkertijd overschatten modellen de opwarming door broeikasgassen en overschatten ze het afkoelende effect van aerosolen (luchtverontreinigingsdeeltjes). De 'toevallige' overeenkomst tussen modellen en wereldgemiddelde temperatuur in deze relatief korte periode is derhalve onvoldoende bewijs om overtuigd te zijn van een dominante invloed van CO₂ op het klimaat. Het IPCC is hier in onze ogen dan ook te stellig over.
- 6) Het KNMI gebruikte twee van de vier IPCC-scenario's als uitgangspunt voor de KNMI-scenario's, het RCP4.5- en het RCP8.5-scenario. RCP4.5 is de basis voor het "Gematigde" KNMI-scenario (GH en GL) en RCP8.5 de basis voor het "Warme" KNMI-scenario (WH en WL). Het KNMI omschrijft RCP8.5 als een *business-as-usual*-scenario, maar dat is anno 2017 niet langer houdbaar. RCP8.5 is echter veel meer een *worst case*-scenario. Een manier om in 2100 op RCP8.5 uit te komen is bijvoorbeeld dat de wereld dan tien keer zoveel steenkool gebruikt als tegenwoordig. Dat is zeer onwaarschijnlijk. Een recente studie stelt dan ook dat RCP8.5 een onaannemelijk scenario is dat eigenlijk niet meer als referentie gebruikt zou moeten worden voor beleidsstudies. De bovengrens van 2,3°C aan opwarming in 2050 in de KNMI-scenario's is gebaseerd op dit onaannemelijke RCP8.5-scenario.
- 7) De gemiddelde temperatuur in Nederland is sinds 1900 gestegen met zo'n 1,8°C. Het is verleidelijk om een groot deel van deze opwarming toe te schrijven aan de uitstoot van CO₂ en het KNMI doet dat dan ook (stilzwijgend). Dit rapport stelt echter dat de aanname dat broeikasgassen een dominante invloed hebben op het Nederlandse klimaat nog altijd voorbarig is. De meest in het oog springende verandering in de afgelopen eeuw was een plotselinge sprong in de temperatuur van ruim 1°C eind jaren '80. Die sprong is terug te vinden in grote delen van West-Europa en zelfs in de zeewatertemperaturen langs de Europese kusten. Het KNMI rept noch in de brochure noch in het wetenschappelijke achtergrondrapport over deze 'sprong'. Een plotselinge sprong in opwarming is niet zomaar te koppelen aan de geleidelijke toename van broeikasgassen en klimaatmodellen weten deze sprong ook niet te simuleren.
- 8) De afgelopen decennia is de veranderde luchtcirculatie misschien wel de belangrijkste factor geweest voor de toename van de temperatuur in ons land. Een grotere aanvoer van zachte lucht vooral in de winter (meer zuidwestenwind) leidde tot een snelle toename van de temperatuur vanaf eind jaren '80. Ook het schoner worden van de lucht boven ons land heeft ervoor gezorgd dat vanaf de jaren '80 de hoeveelheid zonnestraling met maar liefst 10% is toegenomen (gemiddeld een uur meer zon per dag). Het is aannemelijk dat ook deze zogenaemde *brightening* een rol gespeeld heeft bij de opwarming. Het KNMI noemt beide fenomenen maar maakt

niet aannemelijk hoe verandering in luchtcirculatie iets met de toegenomen CO₂-concentratie te maken kan hebben.

- 9) De invloed van de toenemende verstedelijking is een andere, wellicht onderschatte factor die van invloed is op de temperatuurontwikkeling in Nederland. Niet alleen de mate van verstedelijking maar ook de voor Nederland kenmerkende versnippering van de verstedelijking heeft waarschijnlijk meer invloed dan tot nu toe wordt verondersteld.
- 10) Ook de temperatuur van het Noordzeewater voor de kust nam eind jaren '80 sterk toe. Een relevante studie van Van Aken (2010) kon vrijwel alle veranderingen in de zeewatertemperaturen 'verklaren' met een combinatie van veranderde luchtcirculatie, persistentie (het fenomeen dat een warme zee wel even warm blijft) en de toename van zonnestraling. De toename van CO₂ was in dit statistische model niet eens opgenomen. Het KNMI verwijst niet naar deze studie.
- 11) In tegenstelling tot de beeldvorming (namelijk van een versnelde opwarming) warmt Nederland de laatste twintig jaar nagenoeg niet op. In dezelfde periode is het CO₂-gehalte van de atmosfeer met ruim 11,5 % gestegen. Het is dan ook de vraag wanneer de opwarming in Nederland opnieuw op gang zal komen. De KNMI-scenario's veronderstellen immers dat Nederland tot 2050 gemiddeld iedere tien jaar 0,18 °C (het gematigde scenario) tot maar liefst 0,42 °C (het warme scenario) warmer zou moeten worden. Het KNMI zou meer aandacht moeten besteden aan het vergelijken van modeloutput met de recente veranderingen in het Nederlandse klimaat.
- 12) De hoeveelheid neerslag in Nederland is sinds 1910 toegenomen. Onduidelijk is echter met hoeveel procent. Het KNMI zelf geeft op haar website en in documenten verschillende percentages, waaronder 26% en 18%. Het is niet duidelijk waar die verschillen vandaan komen.
- 13) Het KNMI koppelt de neerslagtoename aan de toename van de temperatuur. Het idee is dan dat opwarming meer verdamping geeft en uiteindelijk dus ook meer neerslag. Maar zelfs wereldwijd gaat dit verhaal (nog) niet op. Het IPCC drukt zich dan ook zeer voorzichtig uit over trends in neerslag sinds 1900. Ook het Global Precipitation Climatology Project dat neerslag vanuit satellieten meet laat geen trends zien sinds 1979. Ook is er nog geen wereldwijde langetermijntrend aangetoond in de hoeveelheid waterdamp. Een toename van waterdamp fungeert in de modellen echter als positieve feedback, het versterkt de opwarming.
- 14) Dit rapport laat zien dat veranderde luchtcirculatie (meer zuidwestenwind) een logischere kandidaat is om trends in de Nederlandse neerslag te verklaren. Neerslagtrends in Nederland en Engeland zijn sterk aan elkaar gekoppeld wat ook pleit voor een grote invloed van grootschalige circulatie. Daarnaast is er een duidelijk waarneembaar stadseffect op de neerslag in ons land. De grote stedelijke agglomeraties Amsterdam, Utrecht, Den Haag en Rotterdam registreren meer neerslag dan landelijke gebieden. Onderzoek in West-Nederland laat zien dat niet alleen de grote steden hogere neerslagcijfers vertonen, maar dat dit ook geldt voor

de kleinere steden en zelfs voor de benedenwindse rurale gebieden. Opvallend is overigens dat de neerslag piekte in het jaar 2000 en sindsdien weer behoorlijk is afgenomen, tot op een niveau van ongeveer 800 mm/jaar. Dat is het niveau dat we uit de jaren '60 van de vorige eeuw kennen.

- 15) Het is algemeen geaccepteerd in het Nederlandse publieke debat over klimaatverandering dat extreme neerslag in Nederland steeds extremer aan het worden is. Een analyse van de data wijst uit dat het aantal dagen met extreme neerslag inderdaad is toegenomen, zoals het KNMI ook opmerkt. Maar uit diezelfde data blijkt dat extreme neerslag niet extremer is geworden. De gemiddelde neerslagintensiteit van etmaalsommen ≥ 50 mm is sinds 1950 niet gestegen. Ook bij de claim van het KNMI dat extreme buien steeds extremer worden kunnen vraagtekens gezet worden. Het vermoeden bestaat dat het KNMI in de val getrapt is van wat onderzoekers *sampling bias* noemen. Het aantal stations dat uurmetingen doet in Nederland is pas de laatste twintig jaar flink aan het toenemen. De kans om extreme buien 'op te pikken' neemt daarmee toe. Het KNMI legt grote nadruk op een handvol zware buien in recente jaren (bijvoorbeeld een zware bui in Herwijnen in 2011) maar die buien werden alle door relatief nieuwe stations gemeten. De uursommen in De Bilt laten sinds 1951 niets bijzonders zien. We concluderen dan ook dat noch de etmaalsommen noch de uursommen bewijzen dat de neerslag extremer wordt.
- 16) De zeespiegel langs de Nederlandse kust steeg de afgelopen 150 jaar in een tempo van ongeveer 18 cm/eeuw (ofwel 1,8 mm/jaar). Toevallig komt dit ongeveer overeen met de wereldgemiddelde stijging van de zeespiegel in dezelfde periode. De KNMI-scenario's voor 2050 gaan uit van een zeespiegelstijging van 15 tot maximaal 40 cm en van 25 tot maximaal 80 cm in 2085. Omgerekend komt dat neer op een stijging van 2,7 mm/jaar tot 7,3 mm/jaar tot aan 2050 en van 2,8 mm/jaar tot 8,9 mm/jaar tot aan 2085. Dit soort versnellingen hebben zich de afgelopen eeuw langs de Nederlandse kust niet voorgedaan, ook niet na 1950, de periode waarin volgens het IPCC de uitstoot van broeikasgassen het merendeel van de wereldwijde opwarming veroorzaakt zou hebben. Het KNMI gaat er dus vanuit dat er een historisch gezien ongekende versnelling van de zeespiegel gaat plaatsvinden langs de Nederlandse kust. Die versnelling is niet waarneembaar in de data. Extrapoleren we de historische trend naar 2050 dan komt de zeespiegel lager uit dan de ondergrens van het gematigde KNMI-scenario.
- 17) Klimaatmodellen kunnen regionale veranderingen in temperatuur en neerslag in de 20e eeuw niet goed simuleren. Het KNMI erkent dit ook in diverse wetenschappelijke papers. In de door het KNMI en PBL georganiseerde Climate Dialogue over regionale modellen stelt de Amerikaanse onderzoeker Roger Pielke Sr. dat regionale scenario's beleidsmakers op het verkeerde been zetten omdat ze de illusie wekken dat we het toekomstige klimaat kunnen 'voorspellen'.
- 18) Samenvattend: wij achten het niet aannemelijk dat de KNMI-scenario's zullen uitkomen. Historische ontwikkelingen van het Nederlandse klimaat zijn ook goed te

‘verklaren’ zonder (grote) invloed van broeikasgassen. Meer zon en een veranderde luchtcirculatie hebben vermoedelijk een aanzienlijke invloed gehad evenals de toenemende verstedelijking. Het ‘warme’ scenario van het KNMI is gebaseerd op het RCP8.5-scenario van het IPCC. Dit scenario gaat uit van een vertienvoudiging van steenkoolgebruik in 2100 en wordt door experts momenteel als onrealistisch bestempeld. De klimaatmodellen zelf zijn waarschijnlijk ‘overgevoelig’ voor CO₂ en overschatten daarmee de (toekomstige) opwarming. Klimaatmodellen zijn voorts niet goed in staat om natuurlijke variaties in het klimaat te simuleren. De opwarming in Nederland staat de laatste twintig jaar ‘stil’. Neerslag is na een piek in 2000 terug op het niveau van de jaren ’50 van de vorige eeuw. De zeespiegel stijgt weliswaar, maar al anderhalve eeuw in hetzelfde monotone tempo.

Inleiding

Het KNMI publiceerde in 2014 nieuwe klimaatscenario's voor Nederland, de zogenoemde KNMI Next scenario's. Deze scenario's geven aan hoe het klimaat in Nederland zich de komende eeuw mogelijkwerijs zal gaan ontwikkelen en worden gebruikt om na te denken over klimaatadaptatie. De uitkomsten van de KNMI-scenario's laten weinig aan de verbeelding over. Hieronder enkele passages uit de brochure die bij de lancering van de scenario's werd uitgebracht:

“De temperatuur in Nederland zal verder stijgen.”

“Op jaarbasis ligt de opwarming in Nederland tussen 1,0 en 2,3 °C rond 2050 en kan oplopen tot 3,7 °C in 2085. De toekomstige winters in Amsterdam kunnen meer gaan lijken op de huidige winters in Bordeaux.”

“De hoeveelheid neerslag zal gemiddeld verder toenemen.”

“Het tempo van de zeespiegelstijging neemt toe. (...) Voor 2050 zal er een stijging tot 40 centimeter zijn ten opzichte van 1981-2010. Rond 2085 zal de zeespiegel aan de Nederlandse kust tot 80 centimeter hoger liggen.”

Horeca-uitbaters aan de Hollandse kust zullen de vlag wellicht uithangen als deze prognoses uitkomen, hoewel ze liever zullen hebben dat de Nederlandse zomers op die van Bordeaux gaan lijken in plaats van de winters. Het taalgebruik in bovenstaande claims suggereert vaststaande feiten. Terwijl we van wetenschappers altijd veel mitsen en maren en waarschijnlijkheden verwachten. Waar zijn de nuanceringen? In de brochure niets van dat al: de temperatuur *zal* stijgen, de opwarming in 2050 *ligt* tussen de 1,0 en 2,3 °C, de neerslag *zal* toenemen en de zeespiegel *gaat versnellen*.

Tijdens de presentatie van de KNMI-scenario's bij het KNMI in De Bilt vroeg een van ons¹ aan het KNMI-panel hoe groot de kans is dat de temperatuur in Nederland in 2050 gelijk is aan die in 2014? Het antwoord van het KNMI was iets in de trant van: daar kunnen we niets over zeggen, we kunnen daar namelijk geen kans aan hangen. Dat antwoord is heel interessant. Als je geen kans kunt hangen aan de mogelijkheid dat Nederland niet opwarmt tot 2050, kun je dan wel een kans hangen aan de claim dat Nederland tussen de 1 en 2,3 °C opgewarmd zal zijn in 2050? Het enige logische antwoord is uiteraard 'nee'. Het KNMI kan niet zeggen hoe waarschijnlijk het is dat de opwarming in die range van 1 tot 2,3 °C zal vallen. Desalniettemin schrijft het: “Op jaarbasis ligt de opwarming in Nederland tussen 1,0 en 2,3 °C rond 2050”. Het woordje 'ligt' suggereert hier een 100% zekerheid dat de temperatuur in 2050 in die range zal vallen. Die is er echter niet. Het KNMI stelt zich in de scenariobrochure dus veel zekerder op dan op wetenschappelijke gronden verantwoord is.

¹ Marcel Crok

Nu krijgen wetenschappers vaak het verwijt dat ze overdreven genuanceerd zijn en dat het prettig zou zijn als ze in hun vertaalslag naar het publiek alle mitsen en maren nou eens achterwege laten zodat de hoofdboodschap niet ondergesneeuwd raakt. Dat is in dit geval goed gelukt. Toch mag je dan verwachten dat de gebruikers van de scenario's wel in duidelijke bewoordingen al die mitsen en maren meekrijgen. In dit rapport onderzoeken wij of dat gebeurd is. Hint: nee.

Als knipoog naar het veel te zekere taalgebruik van het KNMI in haar brochure hebben wij dit rapport de titel "Waarom de KNMI-scenario's niet zullen uitkomen" meegegeven. Waarom is dit een knipoog? Omdat wij hierbij exact dezelfde fout maken als het KNMI, we zijn te stellig in onze woorden. Wij kunnen immers onmogelijk bewijzen dat de scenario's niet zullen uitkomen, simpelweg omdat het hier de toekomst betreft en die is ongewis. Dus strikt genomen had er moeten staan: Waarom wij denken dat de KNMI-scenario's niet zullen uitkomen. Maar dat is geen pakkende kop natuurlijk. Het enige dat je kunt doen als het om het voorspellen van de toekomst gaat is je aannames daarbij zo transparant mogelijk opschrijven. En dat is wat wij in dit rapport getracht hebben te doen. Wij zullen daarbij laten zien dat er enerzijds niet zoveel bijzonders aan de hand is met het Nederlandse klimaat en anderzijds dat andere factoren dan CO₂ wel eens een grotere invloed zouden kunnen hebben dan het KNMI (vaak stilzwijgend) veronderstelt.

In het jaar voordat de KNMI-scenario's werden gepubliceerd was Marcel Crok samen met het KNMI en het PBL betrokken bij een internationaal discussieplatform, climatedialogue.org. De aanpak bij deze dialogen (er zijn er zes georganiseerd) was telkens om een klimaatscepticus en een of meerdere mainstream klimaatonderzoekers met elkaar in dialoog te brengen over een controversieel thema. Een van de discussies die op dat platform georganiseerd werd ging over het gebruik van regionale klimaatmodellen en -scenario's. *Are regional models ready for prime time?* was de titel van deze dialoog. 'Ready for prime time' kan in dit verband begrepen worden als 'goed genoeg om voor je klimaatbeleid te gebruiken'. De klimaatscepticus in dit geval was de Amerikaanse onderzoeker Roger Pielke Sr. en zijn gesprekspartner was Bart van den Hurk van het KNMI, die, niet verwonderlijk, nauw betrokken was bij de KNMI-scenario's.

Pielke's standpunt is dat klimaatscenario's nog niet 'ready for prime time' zijn en hij stelt zelfs dat zulke scenario's beleidsmakers op het verkeerde been (kunnen) zetten omdat ze de illusie wekken dat we weten wat er zal gaan gebeuren. Van den Hurk, niet verwonderlijk, vindt dat ze wel bruikbaar zijn voor beleid in de zin dat ze ons een beeld schetsen van een mogelijke toekomst. In het wetenschappelijke achtergronddocument dat het KNMI publiceerde bij de klimaatscenario's is niets terug te vinden over de Climate Dialogue tussen Pielke en Van den Hurk. Een tweede doel van dit rapport is daarom om de belangrijkste argumenten uit de Climate Dialogue over regionale klimaatscenario's op een rijtje te zetten.

Marcel Crok neem inmiddels ruim tien jaar actief deel aan het klimaatdebat in Nederland en daarbuiten. In die tien jaar heeft hij kunnen volgen hoe het KNMI opereert in dat sterk gepolariseerde en gepolitiseerde debat. Een aspect dat daarbij is opgevallen en dat relevant is voor de klimaatscenario's is dat het KNMI vaak de rol heeft van 'eenooig koning'. Het KNMI maakt nu eenmaal de klimaatscenario's en geen enkele andere partij in Nederland doet dat, simpelweg omdat er geen middelen beschikbaar zijn of vrijgemaakt worden om die exercitie door twee of meer partijen te laten uitvoeren. Dat is logisch en onvermijdelijk maar er schuilt uiteraard een gevaar in. Want wie controleert het KNMI? Het KNMI doet veel moeite om de gebruikers van de scenario's duidelijk te maken hoe de scenario's geïnterpreteerd dienen te worden en ook kunnen stakeholders vragen en wensen indienen.

Maar een Roger Pielke Sr., die op een fundamenteel niveau aankaart hoe betrouwbaar de klimaatscenario's eigenlijk zijn en of ze überhaupt wel een rol zouden moeten spelen in het beleid, is er in Nederland niet. Het KNMI heeft met de scenario's een monopoliepositie. De overheid vraagt het KNMI om die scenario's te maken – en betaalt daarvoor. Diezelfde overheid gebruikt die scenario's vervolgens om beleidsbeslissingen op te baseren. Ingenieursbureaus krijgen dan te horen dat het ontwerp van een dijk of een spuisluis moet voldoen aan klimaatscenario X of Y. Die ingenieursbureaus hebben er geen belang bij om al te kritische vragen te stellen over het realiteitsgehalte van het scenario want dan lopen ze alleen maar kans in de toekomst geen of minder opdrachten te krijgen. Zo ontstaat er een hele keten, waarin doorgaans slimme en hoogopgeleide mensen werken, waarbinnen de klimaatscenario's voor zoete koek (moeten) worden geslikt.

Gelukkig zijn wij Nederlanders wel zo nuchter dat we niet halsoverkop draconische maatregelen treffen, puur en alleen op basis van klimaatscenario's. Zo is bijvoorbeeld het concept 'adaptief deltamanagement' geïntroduceerd, dat beoogt om zo lang het mogelijk is 'no-regret-maatregelen' te nemen. Toch kan het geen kwaad heel kritisch naar de fundamenteen van de klimaatscenario's te kijken. Tal van vragen zullen daarbij aan bod komen. Een cruciale aanname bij de scenario's is dat broeikasgassen de bepalende factor zijn voor het klimaat in de komende eeuw. Waarop is die aanname gebaseerd en hoe aannemelijk is die? Hoe goed doen modellen het in het verleden, zowel mondiaal als regionaal? Zijn er ook alternatieven voor het gebruik van klimaatscenario's?

Dit rapport zou je kunnen beschouwen als een vorm van wat Ravetz en Funtowicz (1992) "extended peer review" noemen. Het IPCC schreef daar in haar laatste rapport het volgende over (nadruk van ons):

"To achieve legitimacy, institutions charged with linking science to policy must also open themselves up to public input at one or more stages in their deliberations. This process of "extended peer review" (Funtowicz and Ravetz, 1992) is regarded as necessary, though insufficient, for the production of "socially robust knowledge", that is, knowledge that can

withstand public scrutiny and scepticism (Gibbons, 1994). Procedures that are sufficient to produce public trust in one political context may not work in others because national political cultures are characterized by different “civic epistemologies”, i.e., culturally specific modes of generating and publicly testing policy-relevant knowledge (Jasanoff, 2005a).”²

Uiteraard is dit rapport, dat tot stand kwam met een zeer bescheiden budget, geen uitputtend assessment van de klimaatscenario's. Dat zou onmogelijk zijn. Het rapport is meer te beschouwen als een discussiestuk, waarin wij gebruikers van de scenario's willen wijzen op de kanttekeningen die je bij die scenario's kunt plaatsen. We proberen het blikveld van de lezer wat dat betreft vooral te verbreden en we hopen dat het KNMI met onze suggesties aan de slag zal gaan.

Marcel Crok en Rob de Vos, december 2017

² Kunreuther H., S. Gupta, V. Bosetti, R. Cooke, V. Dutt, M. Ha-Duong, H. Held, J. Llanes-Regueiro, A. Patt, E. Shittu, and E. Weber, 2014: Integrated Risk and Uncertainty Assessment of Climate Change Response Policies. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

1. Weer versus klimaat

Mark Twain: "Climate is what you expect, the weather is what you get"

Klimaat is wat je verwacht, weer is wat je krijgt. Deze uitspraak wordt toegeschreven aan de beroemde Amerikaanse schrijver Mark Twain. Het wordt vaak genoemd in discussies rondom klimaatverandering. Iedereen heeft in zijn of haar leven proefondervindelijk geleerd dat dit in beginsel opgaat. Als het langjarige gemiddelde voor juni 22 °C is, dan 'verwacht' je dat het komende juni ook weer ongeveer 22 °C zal zijn. Gerrit Hiemstra noemt dit in het weerbericht 'de normaal' en die is gebaseerd op de meeste recente 'referentieperiode' van dertig jaar, namelijk 1981-2010. Maar een willekeurige junidag kan in Nederland wel een graad of tien afwijken van dat gemiddelde. Dus het kan bloedheet worden of herfstachtig fris, dat is dus 'het weer dat je krijgt'.

Weersvoorspellingen zijn de afgelopen vijftig jaar aantoonbaar beter geworden. Dat heeft meerdere oorzaken. Meteorologen beschikken tegenwoordig over veel meer metingen om hun weermodel te initialiseren. De modellen zelf zijn beter geworden, niet in de laatste plaats omdat de weersvoorspellingen dagelijks getoetst kunnen worden. Het model kan dus steeds verbeterd worden. Ondanks die aantoonbare vooruitgang houdt het nog altijd na een dag of zeven op. Daarna neemt het onvoorspelbare gedrag van de atmosfeer zodanig toe dat weermodellen er flink naast kunnen zitten.

Als het weer niet langer dan een dag of vijf redelijk goed te voorspellen is, hoe zit het dan met klimaat? Het klimaat voorspellen lijkt dan nagenoeg onmogelijk. Strikt genomen wel, erkent ook het IPCC. Een voorspelling begint bij het goed kennen van de begintoestand. Dat is bij het weer redelijk goed mogelijk omdat je grotendeels kunt volstaan met metingen uit de atmosfeer. Veranderingen in de oceanen en in de biosfeer zijn op de tijdschaal van een paar dagen niet zo invloedrijk. Maar bij klimaat is dat heel anders. De meeste mensen denken bij de definitie van klimaat aan "het gemiddelde weer over een periode van dertig jaar". Die dertig jaar is gekozen door de WMO (World Meteorological Organization), de overkoepelende organisatie van de Verenigde Naties op het gebied van weer, klimaat en water) maar is verder tamelijk arbitrair. Klimaatscenario's proberen dan te verkennen hoe dit gemiddelde weer gaat veranderen in de toekomst.

Maar er is ook een andere veel bredere definitie van klimaat, namelijk 'gewoon' de staat van de atmosfeer, de oceanen, de biosfeer en de cryosfeer.³ Wie een klimaatvoorspelling wil doen zal de begintoestand van het klimaat zo goed mogelijk moeten kennen, de staat van de wereldwijde atmosfeer van het oppervlak tot op grote hoogte, de staat van de oceanen, niet alleen aan het oppervlakte maar ook enkele kilometers de diepte in, de staat van het land en hoe dat gebruikt wordt (stad, landbouw, graslanden, bos, savanne etc.), de staat van de

³ Zie voor een discussie over verschillende klimaatdefinities bijvoorbeeld:

<https://pielkeclimatesci.wordpress.com/2005/07/11/what-is-climate-why-does-it-matter-how-we-define-climate/>

bodem en met name het vochtgehalte daarin, en de staat van sneeuw- en ijsbedekking zowel op land als in de oceanen. Ondanks de vele miljarden die we wereldwijd investeren in de monitoring van het klimaat, bestaat zo'n gedetailleerde beschrijving van de begintoestand simpelweg niet. Neem alleen al de oceanen, die twee derde van het aardoppervlak bestrijken. Sinds een jaar of tien zwemmen er meer dan 3000 zogenoemde ARGO-boeien rond in de oceanen. Die duiken ook volautomatisch naar beneden tot wel twee kilometer diepte en meten temperatuur en zoutgehalte. Een fantastische dataset, onmisbaar voor een beter begrip van de oceanen, maar nog altijd is maar een fractie van de oceanen bemonsterd.

Maar stel dat je zou beschikken over een perfect bepaalde beginsituatie, dan nog is het doen van een klimaatvoorspelling geen haalbare kaart. Want je zou niet alleen moeten weten hoe factoren die van invloed zijn op het klimaat in de toekomst veranderen (zon, vulkanen, samenstelling van de atmosfeer, veranderd landgebruik etc.), ook zullen veranderingen in het klimaatsysteem leiden tot ontelbare interacties (feedbacks).

Het klimaat is een chaotisch systeem en in zulke systemen treden ook spontane veranderingen of fluctuaties op. De Amerikaanse klimaatwetenschapper Roy Spencer heeft er meermalen op gewezen dat een spontane afname in het wereldwijde wolkendek met slechts 1% voldoende kan zijn om een opwarming van een graad te verklaren. Natuurlijk kan zo'n verandering ook de andere kant op gaan en het effect van broeikasgassen 'maskeren'.

Klimaatwetenschappers noemen zulke spontane veranderingen natuurlijke of interne variabiliteit. Het speelt een sleutelrol in klimaatdiscussies want hoe kom je erachter hoe groot die natuurlijke variabiliteit is. Bij de KNMI-scenario's berekent het KNMI wat de natuurlijke variabiliteit in bijvoorbeeld de temperatuurreeks van De Bilt zou zijn. Die natuurlijke variabiliteit is veel kleiner dan de opwarming die in Nederland heeft plaatsgevonden, wat de KNMI-onderzoekers sterkt in hun overtuiging dat er een 'broeikassignaal' zichtbaar is in de meetreeks. Hier spelen allerlei aannames – bijvoorbeeld statistische – een rol en we zullen daar later dan ook op terugkomen.

Naast al die ontelbare spontane veranderingen, invloeden en interacties, moeten klimaatonderzoekers het doen met imperfecte modellen. Vrijwel geen enkel proces in klimaatmodellen is geheel numeriek op te lossen. Dit komt enerzijds doordat veel fysische processen in het klimaat überhaupt niet exact te beschrijven zijn en anderzijds doordat de modellen een bepaalde rasterafmeting hebben, van bijvoorbeeld 100 bij 100 kilometer. De meeste processen spelen zich af op een schaal die kleiner is dan dat en moeten daarom 'geparametriseerd' (geschat) worden. Dus straling, zowel binnenkomend als uitgaand, luchtvochtigheid, mate van bewolking, temperatuur, neerslag, het moet allemaal bepaald worden voor een gebied van 100 bij 100 kilometer. En bij een klimaatsimulatie worden veranderingen in al deze parameters iedere bijvoorbeeld 15 minuten opnieuw becijferd.

Klimaatvoorspellingen zijn dus onmogelijk en het is gegeven het inherent chaotische gedrag van het klimaat sterk de vraag of we ooit in staat zullen zijn om enigszins betrouwbare

voorspellingen te doen op een termijn van jaren tot decennia. Bij de KNMI-scenario's verscheen een lijvig (maar helaas niet zo gemakkelijk leesbaar) achtergronddocument waarin al meteen op de eerste pagina het volgende staat (vet door ons aangebracht): **"The variability of the system poses limitations to the predictability of the climate state. Internal variations of the climate system beyond monthly time scales apart from the contribution from the positive multidecadal surface temperature trend that is currently eminent (Oldenborgh et al. 2012) and oceanic variability (Hazeleger et al. 2013), are difficult to predict and at time scales of 30 – 100 years useful predictions are basically impossible."**⁴

Dertig tot honderd jaar, dat is precies de periode waarin de nieuwe KNMI-scenario's vallen. Als voorspellen van het klimaat simpelweg niet mogelijk is, waarom doen we dan scenario's? Goede vraag! Het IPCC en het KNMI denken – uiteraard – dat scenario's ons op de een of andere manier toch een blik in de toekomst geven. Het idee is dat als je heel vaak klimaatmodellen runt met verschillende begintoestanden, en dan de concentratie aan broeikasgassen in de modelatmosfeer laat toenemen, dat je dan een beeld krijgt van de 'klimaatrespons'. Als hetzelfde patroon nu maar optreedt in verschillende klimaatmodellen, dan is deze klimaatrespons 'robuust' (een woord dat aan populariteit wint in klimaatkringen). Alle klimaatmodellen waarin je de CO₂-concentratie instantaan verdubbelt of geleidelijk laat toenemen warmen op. Dit is ook wat je verwacht op basis van de fysica. Gemiddeld over alle modellen is die opwarming bij een verdubbeling van de CO₂-concentratie ruim drie graden Celsius.

Dit is precies wat de IPCC-scenario's voor de wereld en de KNMI-scenario's voor Nederland doen. Die gaan ervan uit dat broeikasgassen op dit moment en in de komende eeuw allesbepalend zijn voor het klimaat. Dus een belangrijke aanname is dat andere factoren als de zon, vulkanen en de eerdergenoemde natuurlijke variabiliteit op een tijdschaal van 30-100 jaar in het niet vallen bij deze verwachte 'klimaatrespons' door broeikasgassen. En een tweede belangrijke aanname is dat modellen (blijkbaar) goed genoeg zijn om het klimaat enigszins realistisch weer te geven. Beide aannames worden maar mondjesmaat genoemd in de stukken van het KNMI.

In dit rapport onderzoeken we in feite hoe goed deze aannames onderbouwd zijn dan wel te onderbouwen zijn. Dat komt neer op het eindeloos vergelijken van modellen met de meetgegevens waarover we beschikken. En telkens de vraag stellen: zijn er ook andere verklaringen mogelijk dan de invloed van broeikasgassen om de waarnemingen te 'begrijpen'?

⁴ KNMI (2014): KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century – A Netherlands perspective; by Bart van den Hurk, Peter Siegmund, Albert Klein Tank (Eds), Jisk Attema, Alexander Bakker, Jules Beersma, Janette Bessembinder, Reinout Boers, Theo Brandsma, Henk van den Brink, Sybren Drijfhout, Henk Eskes, Rein Haarsma, Wilco Hazeleger, Rudmer Jilderda, Caroline Katsman, Geert Lenderink, Jessica Loriaux, Erik van Meijgaard, Twan van Noije, Geert Jan van Oldenborgh, Frank Selten, Pier Siebesma, Andreas Sterl, Hylke de Vries, Michiel van Weele, Renske de Winter and Gerd-Jan van Zadelhoff. Scientific Report WR2014-01, KNMI, De Bilt, The Netherlands. www.climatescenarios.nl

Terug naar weer en klimaat. Het klimaat is zeer complex en verandert op alle tijdschalen. Voorspellingen zijn niet mogelijk, dat erkent iedereen. Toch leeft er onder de huidige generatie klimaatonderzoekers een sterke overtuiging dat we ‘weten’ dat het de komende eeuw een paar graden warmer zal worden en dat dit grote consequenties kan/zal hebben voor bijvoorbeeld extreem weer. Niet geheel toevallig – denken we – reageren klimaatmodellen heel lineair op ‘forcing’ (bijvoorbeeld de toename van broeikasgassen).

Omdat klimaatwetenschappers nu eenmaal geen experimenten kunnen doen met de aarde als geheel (hoewel sommigen cynisch opmerken dat we met de uitstoot van broeikasgassen een heel gevaarlijk ‘experiment’ uitvoeren) zijn ze sterk afhankelijk van het werken met modellen. In modellen kan je experimenten nabootsen. Patrick Michaels⁵ publiceerde onlangs een inventarisatie van de klimaatliteratuur en concludeerde dat zeker 50% van de klimaatpublicaties gebaseerd is op klimaatmodellen. Modellen zijn dus zeer dominant aanwezig in het werk van onderzoekers en dit beïnvloedt de visie die zij hebben op klimaatverandering.

Er verschijnen zo nu en dan wel relativerende stukken over het onderscheid tussen weer en klimaat.⁶ Zo stelde Lovejoy (2013) dat inderdaad ‘climate is what you expect, weather is what you get’ dicht in de buurt komt van de visie die de meeste klimaatonderzoekers hebben op weer en klimaat. Maar, stelde Lovejoy, voor klimaat geldt eigenlijk hetzelfde als voor weer, dus ook voor klimaat zou je moeten zeggen: climate is what you get.

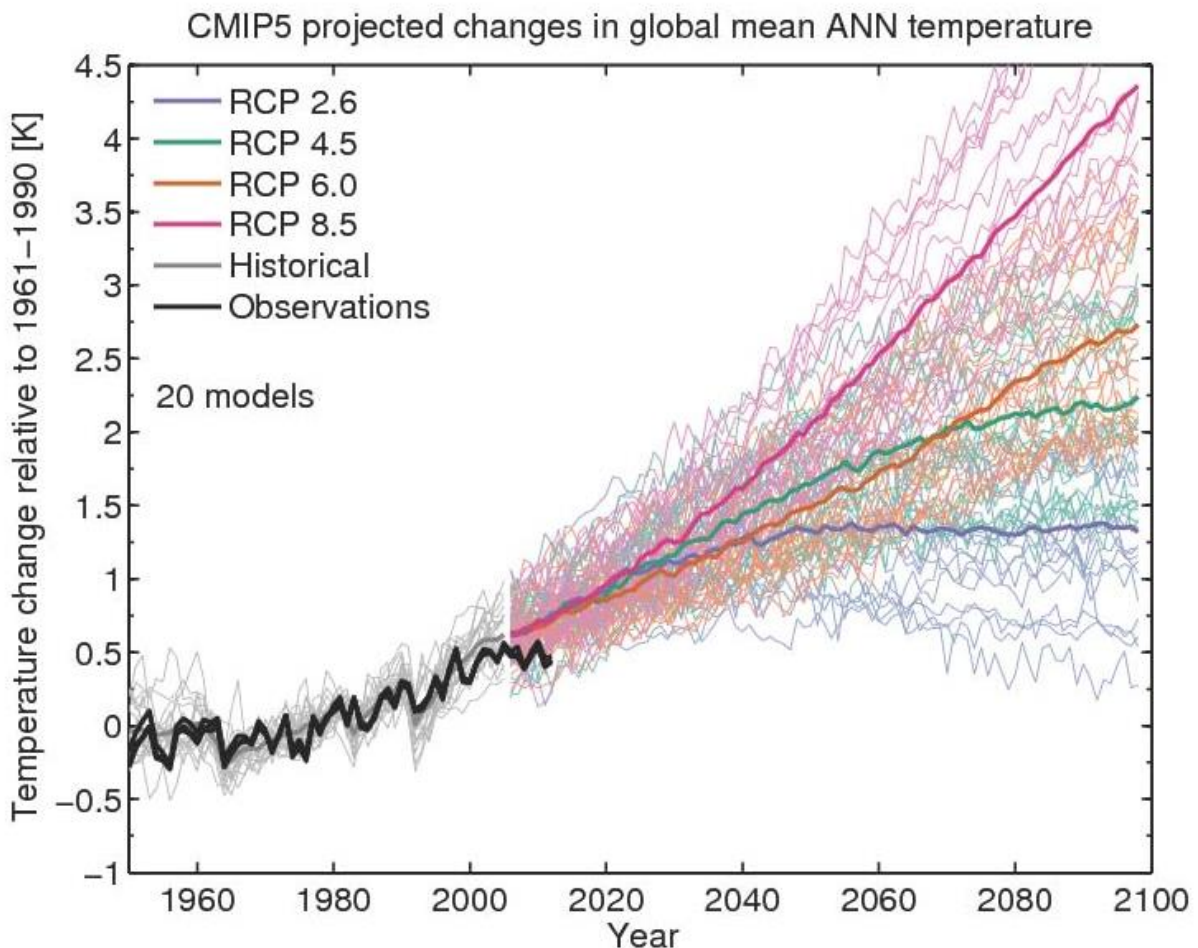
⁵ <https://www.cato.org/blog/climate-modeling-dominates-climate-science>

⁶ Lovejoy S (2013) What is climate? EOS 94(1) 1 January, pp 1–2

2. Mondiale klimaatverandering, waar staan we?

Klimaatverandering wordt nog altijd gezien als een van de grootste uitdagingen van de mensheid voor de komende eeuw(en). In december 2015 sloten alle landen in de wereld een klimaatakkoord in Parijs dat als hoofddoelstelling heeft om de mondiale opwarming van de aarde te beperken tot 2 graden Celsius. Een kleine graad daarvan hebben we al te pakken, dus de aarde 'mag' volgens deze doelstelling nog maar ruim een graad opwarmen de komende eeuw.

Volgens berekeningen met klimaatmodellen zal dat waarschijnlijk niet gaan lukken. Het IPCC laat in het vijfde IPCC-rapport uit 2013 de volgende projecties zien van de mondiale temperatuur tot 2100:



Figuur 2.1: Projecties van de mondiale temperatuur op basis van vier scenario's.

Het IPCC gebruikt in het vijfde rapport vier verschillende scenario's. De scenario's heten Representative Concentration Pathways en de getallen verwijzen naar de zogenoemde stralingsforcering die in 2100 bereikt zal worden, dus 8,5 W/m² in het geval van RCP8.5. Stralingsforcering is simpel gezegd het effect van broeikasgassen en andere stoffen op de stralingsbalans van de aarde. Een positieve forcering door broeikasgassen leidt tot

opwarming, een negatieve forcering, bijvoorbeeld door aerosolen die zonlicht reflecteren, tot afkoeling. De toename aan vooral broeikasgassen (koolstofdioxide, maar ook bijvoorbeeld methaan, ozon en lachgas) in de atmosfeer heeft volgens het IPCC geleid tot een toename van de forcering sinds 1750 met $2,3 \text{ W/m}^2$. In het hoogste scenario van het IPCC komt daar deze eeuw dus nog eens ruim 6 W/m^2 bij.

De emissies van broeikasgassen zitten momenteel boven het hoogste scenario, RCP8.5. De concentraties, en daar gaat het bij het broeikaseffect vooral om, zitten echter ergens tussen RCP4.5 en RCP6.0 in. Het startjaar voor deze scenario's was 2005 en het is nog te vroeg om te stellen welk scenario wat betreft concentraties het meest realistisch zal zijn. Deze figuur heeft 1961-1990 als referentieperiode. Die periode was $0,3$ graden warmer dan 1850-1900, de periode die het IPCC beschouwt als 'pre-industrieel'. De twee gradengrens ligt in deze grafiek dus bij $1,7^\circ\text{C}$. Uit de grafiek valt af te lezen dat als het klimaat daadwerkelijk reageert op scenario RCP8.5 zoals gesimuleerd wordt door klimaatmodellen, dat we dan rond 2040 al over de twee gradengrens heen zullen gaan. Dit gegeven is misschien wel de belangrijkste reden waarom wetenschappers en beleidsmakers publiekelijk de noodklok luiden en stellen dat het dus 2 voor 12 is (of al 10 voor half 2 zoals sommige onderzoekers met gevoel voor drama).

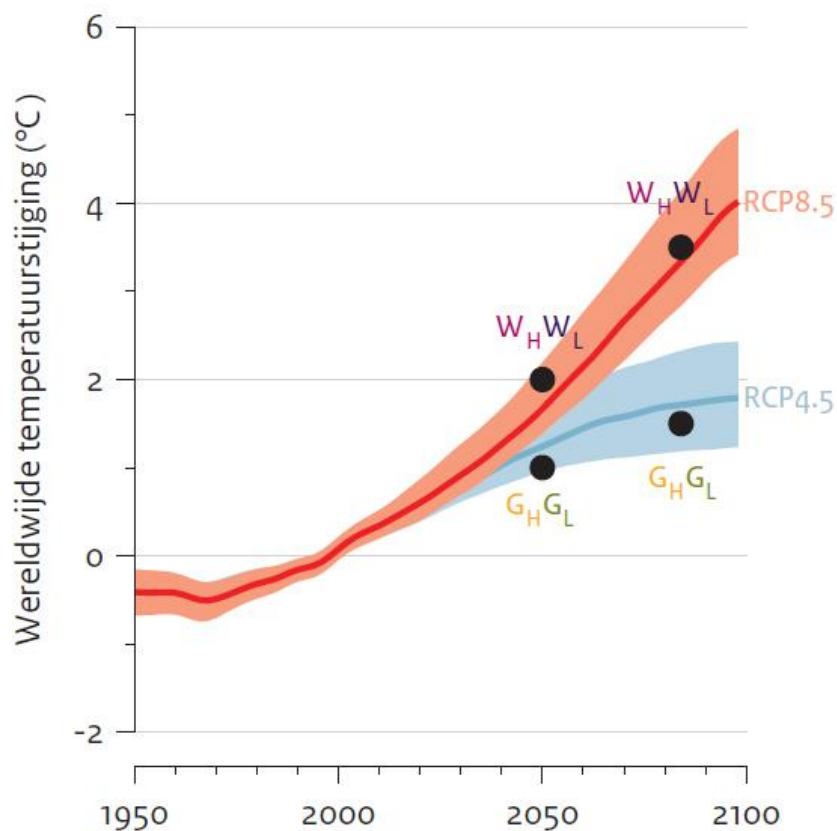
Ook kun je op basis van deze modellen berekenen hoeveel CO_2 er nog uitgestoten mag worden in de wereld voordat de twee gradengrens bereikt wordt. Ook die berekeningen komen erop uit dat we in het huidige tempo van emissies (zo'n tien gigaton aan koolstof per jaar) over een jaar of 25 ons 'koolstofbudget' hebben opgestookt. Op basis van deze constatering concluderen vele onderzoekers en beleidsmakers in binnen- en buitenland dat de twee gradengrens niet meer haalbaar is.

Wil je toch binnen de twee gradengrens blijven zal je tamelijk draconische maatregelen moeten nemen. Het verklaart waarom Europa al in 2050 haar CO_2 -uitstoot met 80 tot 95% wil reduceren. Daar komt ook de druk vandaan op oliebedrijven om hun olievoorraden in de grond te houden. Ook maatregelen als ondergrondse CO_2 -opslag, die weer extra energie kosten en kostbaar zijn, komen dan in beeld.

Business as usual of worst case?

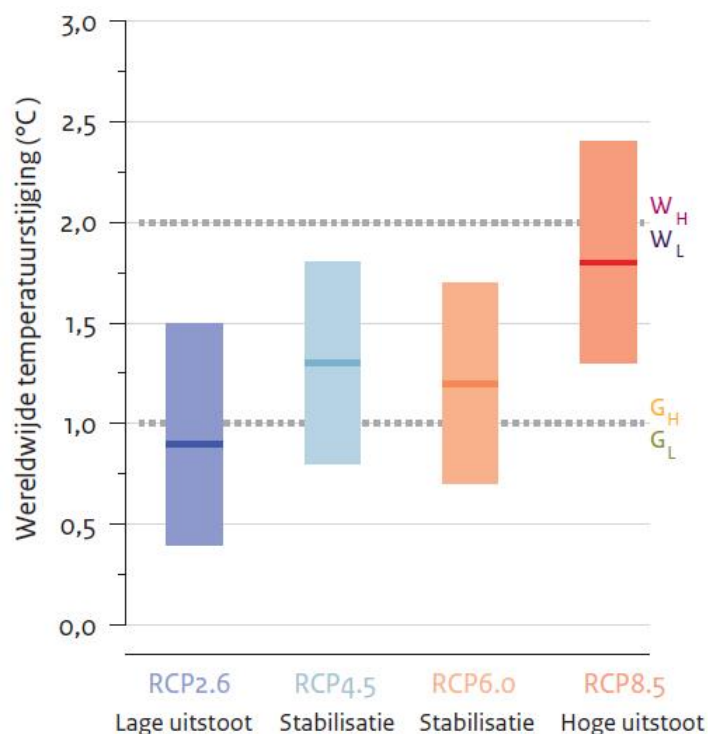
Hoe verhouden die mondiale scenario's van het IPCC zich nu tot de regionale klimaatscenario's van het KNMI? Welnu, het KNMI gebruikt twee IPCC-scenario's als basis voor de KNMI Next Scenario's, namelijk het RCP4.5 en het RCP8.5 scenario.⁷

⁷ http://www.klimaatscenarios.nl/faq_klimaatscenarios/range_knmi14.html



Figuur 2.2: In rood en blauw de twee scenario's van het IPCC, in zwart met punten de modelruns die als uitgangspunt zijn genomen voor de KNMI voor Nederland.

Het KNMI combineert deze twee IPCC-scenario's met twee varianten voor veranderde luchtcirculatie en zo komt het tot de vier KNMI'14 scenario's WH, WL, GH en GL (waarbij W staat voor warm, H voor hoog, G voor gematigd en L voor laag). In de brochure laat het KNMI in afbeelding 25 zien hoeveel opwarming de vier IPCC-scenario's zouden kunnen geven in 2050 en hoe die mondiale opwarming zich verhoudt tot de door het KNMI verwachte opwarming in Nederland op basis van de vier scenario's:



Figuur 2.3: Geschatte mondiale opwarming bij de verschillende IPCC-scenario's en met stippellijnen de door het KNMI verwachte opwarming in 2050 voor Nederland.

Aangezien RCP4.5 en RCP6.0 qua verwachte opwarming in 2050 weinig van elkaar verschillen is het niet zo vreemd dat het KNMI slechts een van deze twee scenario's heeft gebruikt. Dus het heeft daarnaast RCP8.5 gebruikt en omschrijft dat in deze figuur als een scenario met "hoge uitstoot". Wat heet? In dit scenario gebruikt de wereld in 2100 tien keer zoveel steenkool als tegenwoordig en stijgt de wereldbevolking naar 12 miljard mensen.⁸ RCP8.5 gaat daarnaast uit van een behoorlijke extra forcing ($1,7 \text{ W/m}^2$) door andere broeikasgassen dan CO_2 zoals methaan en lachgas.

Desalniettemin wordt dit scenario door diverse onderzoekers en beleidsmakers aangeduid als een business as usual scenario. Ook het KNMI schrijft op haar website (onze nadruk): "RCP8.5 is a **business-as-usual scenario** with increasing greenhouse gas emissions over time, leading to high greenhouse gas concentration levels."⁹ En in de Nederlandse samenvatting van het laatste IPCC-rapport schrijven KNMI en PBL (onze nadruk): In het hoogste emissiescenario (**business-as-usual**) blijft de uitstoot onverminderd stijgen.¹⁰

Een belangrijk criterium bij de KNMI-scenario's is dat de scenario's een beeld schetsen van een 'plausible future'. Het KNMI schrijft ter verantwoording in het wetenschappelijke achtergronddocument bij de scenario's het volgende: "The important question to answer is:

⁸ <http://www.rationaloptimist.com/blog/more-growth-less-warming/>

⁹ https://climexp.knmi.nl/help/atlas_scenario.shtml

¹⁰ KLIMAATVERANDERING, Samenvatting van het vijfde IPCC-assessment en een vertaling naar Nederland, PBL en KNMI, 2015.

what are the criteria that need to be satisfied to consider climate scenarios to be useful? In the KNMI'06 project the criteria for useful climate scenarios were plausibility, internal consistence and relevance. Plausibility and internal consistence imply that the scenarios are physically consistent and well understood, and are supported by quantitative evidence obtained from models and observations.”¹¹

KNMI-scenario's doen geen uitspraken in termen van kansen (probabilities). “Similarly, Von Storch (2008) describes climate scenarios as possible, **plausible**, and internally consistent, but not necessarily **probable**, developments.” De scenario's zijn dus ‘plausibele verhaallijnen’ waaraan geen kansen gehangen kunnen worden. Maar ja, wie bepaalt wat plausibel is en wat niet? Volgens het KNMI moet het RCP8.5 scenario wel plausibel zijn, waarom zou je het anders gebruiken voor de KNMI-scenario's? In toenemende mate wordt echter duidelijk dat RCP8.5 een verre van plausibel scenario is. De voornaamste reden is dat dit scenario een onwaarschijnlijke terugkeer naar steenkool zou inluiden. Een recent gepubliceerd artikel in de Journal Energy vat de onwaarschijnlijkheid van dit scenario samen.^{12,13} Het stelt (onze nadruk): “These four lines of evidence (i-iv) collectively indicate **that RCP8.5 no longer offers a trajectory of 21st-century climate change with physically relevant information for continued emphasis in scientific studies or policy assessments.** Though IAMs could possibly re-imagine pathways that achieve RCP8.5 in the context of modern coal economics, this level of forcing was chosen as an SSP-RCP end-point based on scenarios that applied the most extreme version of the return to coal hypothesis [2,7,15,35]: an implausible outlook for a vast coal backstop [50,51].”

IAMs staat voor Integrated Assessment Models, dat zijn de economische modellen waarmee bijvoorbeeld ook de schade van toekomstige klimaatverandering doorerekend kan worden. Het artikel maakt aannemelijk dat een terugkeer naar steenkool in de komende eeuw niet aannemelijk is en dat daarmee ook RCP8.5 een zeer onwaarschijnlijk scenario is. Uit de conclusie: “This evidence indicates RCP8.5 does not provide a physically consistent worst case BAU [Business As Usual] trajectory that warrants continued emphasis in scientific research. Accordingly, it does not provide a useful benchmark for policy studies [e.g. 113].” De bekende Amerikaanse onderzoeker Roger Pielke Jr becommentarieerde de paper op zijn blog:¹⁴ “The paper argues that the IPCC's scenario for future emissions of carbon dioxide most often characterized as “business-as-usual” (technically called RCP 8.5) should be considered implausible.” En ook de Amerikaanse blogger Larry Kummer heeft er diverse malen op gewezen dat RCP8.5 niet beschouwd kan worden als een business as usual

¹¹ Wetenschappelijke achtergronddocument bij de KNMI'14 Scenario's.

¹² Richie, J., Dowlatabadi, H. 2017. Why do climate change scenarios return to coal? Energy 140(1): 1276 – 1291. Te downloaden via: <https://cedmcenter.org/wp-content/uploads/2017/08/Why-do-climate-change-scenarios-return-to-coal.pdf>

¹³ Commentaren van de onderzoeker over dit onderzoek staan in dit artikel: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-05-24/misleading-coal-estimates-may-have-skewed-climate-projections>

¹⁴ <https://theclimatefix.wordpress.com/2017/11/16/pielke-on-climate-7/>

scenario en dat het scenario misbruikt wordt om paniekverhalen over klimaatverandering te voeden.¹⁵

Er is veel kennis in Nederland over de RCP-scenario's omdat het Planbureau voor de Leefomgeving (PBL) nauw bij de totstandkoming van deze scenario's betrokken is geweest. Het is daarom vreemd dat dergelijke nuanceringen rond RCP8.5 in den lande niet te horen zijn. Sterker nog, zoals we hierboven lieten zien verwijst het KNMI naar RCP8.5 als een business as usual scenario.

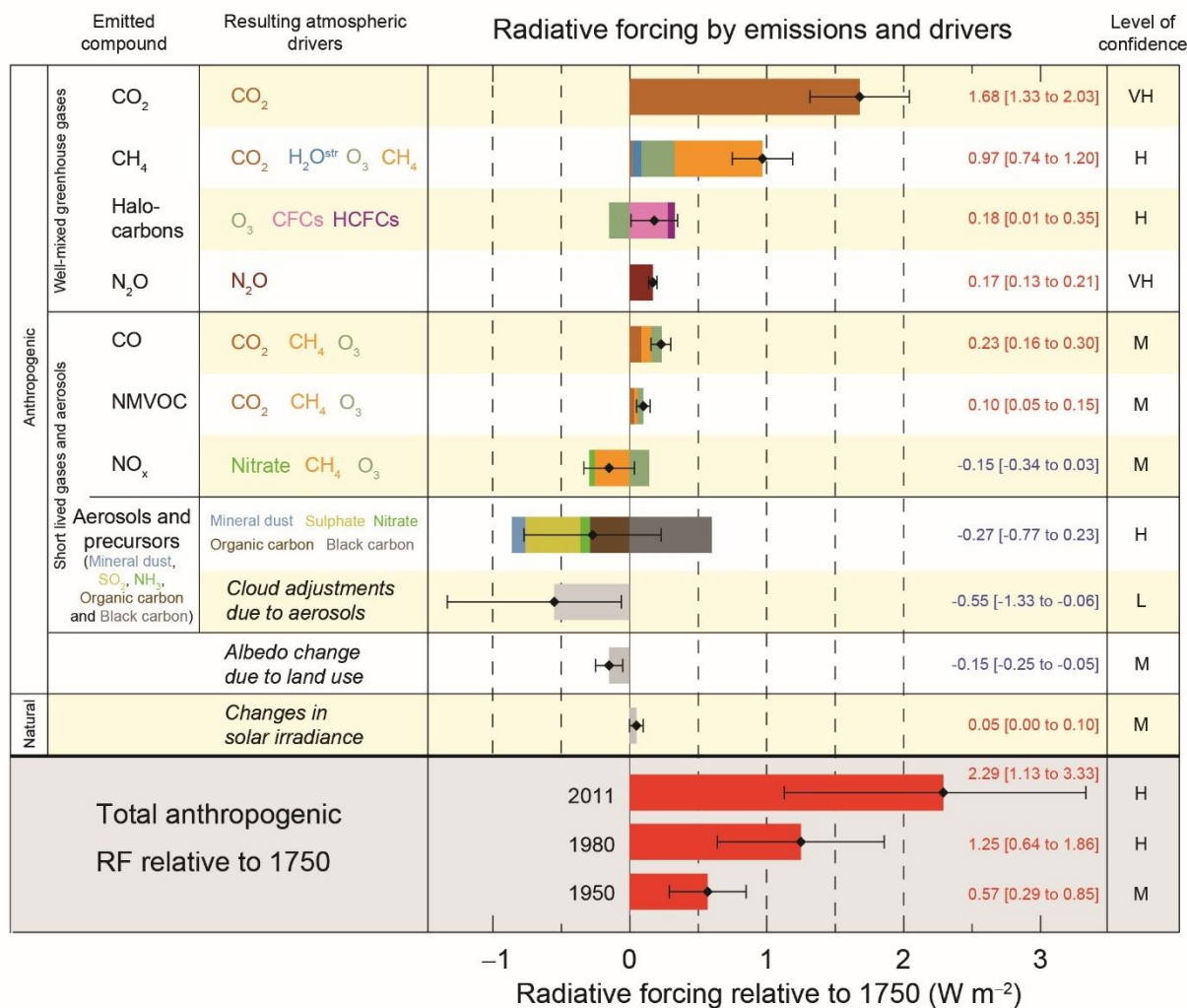
RCP8.5 is de basis voor het WH en het WL-scenario. Deze scenario's voor Nederland moeten dan ook alleen al op basis van socio-economische gronden als onwaarschijnlijk bestempeld worden. De KNMI-klimaatscenario's suggereren dat Nederland in 2050 1 tot 2,3 graden Celsius zal opwarmen. Die bovenwaarde van 2,3 graden Celsius is echter afkomstig van het RCP8.5 scenario en dus onrealistisch.

Zijn broeikasgassen dominant?

Een cruciale aanname bij niet alleen de mondiale maar ook de regionale klimaatscenario's is dat broeikasgassen op dit moment verreweg de meeste invloed hebben op de ontwikkeling van het klimaat. Het IPCC gaat er bijvoorbeeld van uit dat variaties in de zon een verwaarloosbaar effect hebben op het klimaat ten opzichte van het effect van broeikasgassen. Dit is niet gebaseerd op klimaatmodellen maar op het ingeschatte effect van de zon op de stralingsbalans van de aarde.¹⁶

¹⁵ <https://fabiusmaximus.com/2015/11/05/visions-of-dark-climate-future-90153/>

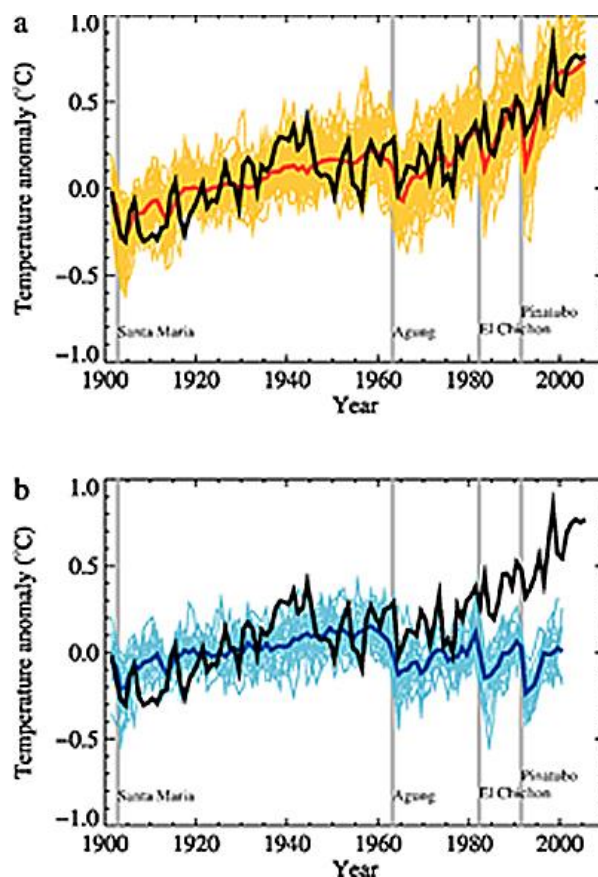
¹⁶ http://www.climatechange2013.org/images/figures/WGI_AR5_FigSPM-5.jpg



Figuur 2.4: Natuurlijke en antropogene veranderingen in de stralingsforcering sinds 1750. Bron: vijfde IPCC-rapport.

Puur afgaand op deze tabel is er geen speld tussen te krijgen. CO₂ en methaan staan fier bovenaan. Het effect van de zon is slechts 0,05 W/m² volgens het IPCC en dat is slechts 2% op het totaal van 2,29 W/m². Natuurlijke fluctuaties in het klimaat vinden we niet terug in deze tabel. Het IPCC gaat ervan uit dat zulke fluctuaties relatief kortdurend zijn (maximaal enkele decennia) en beschouwen ze daarom als ruis zodra het gaat om de lange-termijnontwikkeling van het klimaat. Is dit nu het bewijs dat wij als mens de aarde opwarmen? Ja en nee. Als je ervan uitgaat dat stralingsforcering inderdaad bepalend is en dat onze kennis daarover vrij gedegen is, dan kan alleen deze tabel al voldoende zijn om overtuigd te zijn van een dominante invloed van broeikasgassen.

Maar er is meer. Het IPCC heeft een apart hoofdstuk dat “detectie en attributie” heet. Daarin ‘bewijst’ het IPCC dat de opwarming sinds 1950 door broeikasgassen veroorzaakt zou zijn. Dat is het beste te illustreren met figuur 2.5:



Figuur 2.5: Attributie in het vierde IPCC-rapport uit 2007. Onder, modellen alleen gevoed met natuurlijke invloeden, boven met zowel natuurlijke als antropogene invloeden.

Waarom is dit misschien wel hét belangrijkste bewijs van het IPCC? In de onderste grafiek zijn klimaatmodellen – de dikke blauwe lijn is het gemiddelde van alle modellen – gevoed met natuurlijke klimaatinvloeden, voornamelijk variaties in de zon en vulkaanuitbarstingen. De zwarte lijn vertegenwoordigt de ‘gemeten’ mondiale temperatuur aan het oppervlak. Vanaf 1970 neemt de temperatuur toe terwijl de modellen suggereren dat er afkoeling zou moeten plaatsvinden. In de bovenste grafiek zijn de modellen (gele lijn) niet alleen gevoed met natuurlijke maar ook met antropogene invloeden, voornamelijk broeikasgassen en aerosolen.

Op basis van voornamelijk dit soort studies concludeerde het IPCC in 2001 dat het ‘waarschijnlijk’ was dat tenminste de helft van de opwarming sinds 1950 door antropogene broeikasgassen veroorzaakt was. In het vierde IPCC-rapport in 2007 werd de ‘zekerheid’ rond deze claim opgehoogd tot ‘zeer waarschijnlijk’ en in het vijfde IPCC-rapport in 2013 zelfs tot ‘extreem waarschijnlijk’.

Extreem waarschijnlijk is door het IPCC gedefinieerd als meer dan 95% zeker. Echter, dit is geen statistisch berekende waarschijnlijkheid maar gebaseerd op ‘expert judgment’. Met andere woorden, de auteurs van het hoofdstuk waarin deze figuur staat – het hoofdstuk dat

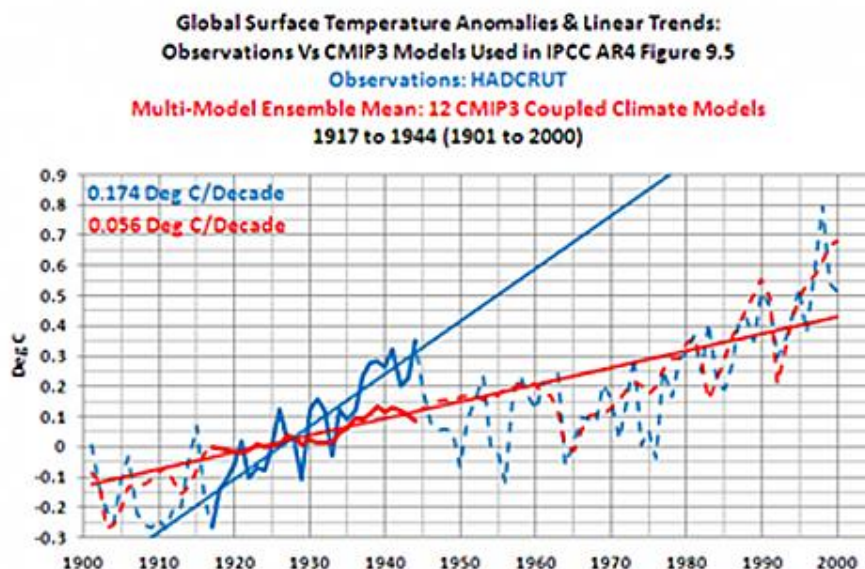
gaat over detectie en attributie - vinden het op basis van hun expertise 95 procent waarschijnlijk dat tenminste de helft van de opwarming sinds 1950 door de mens veroorzaakt is. Daags nadat deze conclusie door het IPCC gepubliceerd werd schreef NRC Handelsblad in een hoofdredactioneel: '95 procent is genoeg'. Met andere woorden, de wetenschap is eruit, nu is de politiek aan zet.

Maar is dat zo? Het 'bewijs' van het IPCC leunt sterk op klimaatmodellen, dezelfde modellen waarmee de KNMI-scenario's worden gemaakt. Nou zijn dit geen kleine 'jongens'. Er zijn verspreid over de wereld inmiddels bijna veertig zogenaamde General Circulation Models (GCMs) ontwikkeld en sinds een paar jaar is ook het KNMI de trotse eigenaar van zo'n model, EC-Earth geheten. Er wordt al enkele decennia gesleuteld aan klimaatmodellen. Eerst had zo'n model alleen een atmosfeer, later kwamen er oceanen bij, nog weer later werden oceanen en atmosfeer aan elkaar gekoppeld en daarna werd de koolstofcyclus eraan toegevoegd, ijskappen en dit proces blijft uiteraard doorgaan. De modellen worden dus steeds completer en daardoor ook complexer. Dit is een volkomen valide wetenschappelijke ontwikkeling.

Maar goed, hoe indrukwekkend klimaatmodellen ook zijn, het werkelijke klimaat is ook waanzinnig complex, met een schier oneindig scala aan interacties tussen atmosfeer, oceaan, landgebruik, bodem, biosfeer en cryosfeer. De cruciale vraag is dan ook: zijn de modellen goed genoeg? Kunnen ze het recente verleden goed simuleren en hoe aannemelijk is het dat ze de nabije toekomst goed kunnen 'voorspellen'.

Het IPCC zegt: klimaatmodellen kunnen de opwarming sinds 1970 alleen met broeikasgassen verklaren. Het is dan legitiem om de vraag te stellen: hoe goed zijn die modellen eigenlijk? Want als je zou aantonen dat de modellen (nog) niet zo goed zijn, dan verzwakt dat het bewijs van het IPCC.

Een eerste punt van 'zwakte' kunnen we al zien in figuur 2.6. Modellen gevoed met broeikasgassen zijn ogenschijnlijk goed in staat de opwarming tussen 1970 en 2000 te simuleren. Maar eerder in de eeuw, tussen 1915 en 1945 vond een vergelijkbare opwarming van een halve graad plaats. Hoe goed simuleren de modellen die periode? Dat lijkt heel aardig te gaan omdat de zwarte waargenomen opwarming vrijwel binnen de bandbreedte blijft van de vele individuele modelruns. Maar het is het gemiddelde van alle modellen die gezien wordt als de beste indicatie van de klimaattrend. In het volgende plaatje zoomen we in op die trend:



Figuur 2.6: Modellen versus waarnemingen tussen 1917 en 1944. Modellen onderschatten de ‘werkelijke’ opwarming met een factor drie.

Klimaatonderzoekers noemen deze periode ook wel de ‘*early warming period*’. Het IPCC besteedt er amper een halve bladzijde aan in het vijfde IPCC-rapport. Het geeft daarin toe dat klimaatonderzoekers nog niet goed weten wat deze vroege opwarming veroorzaakte. Het is vermoedelijk een combinatie van factoren, deels natuurlijke schommelingen in het klimaat, deels wellicht een toename van zonneactiviteit, een afname van vulkanische activiteit en deels broeikasgassen, hoewel de uitstoot van CO₂ pas na de Tweede Wereldoorlog goed op gang komt.

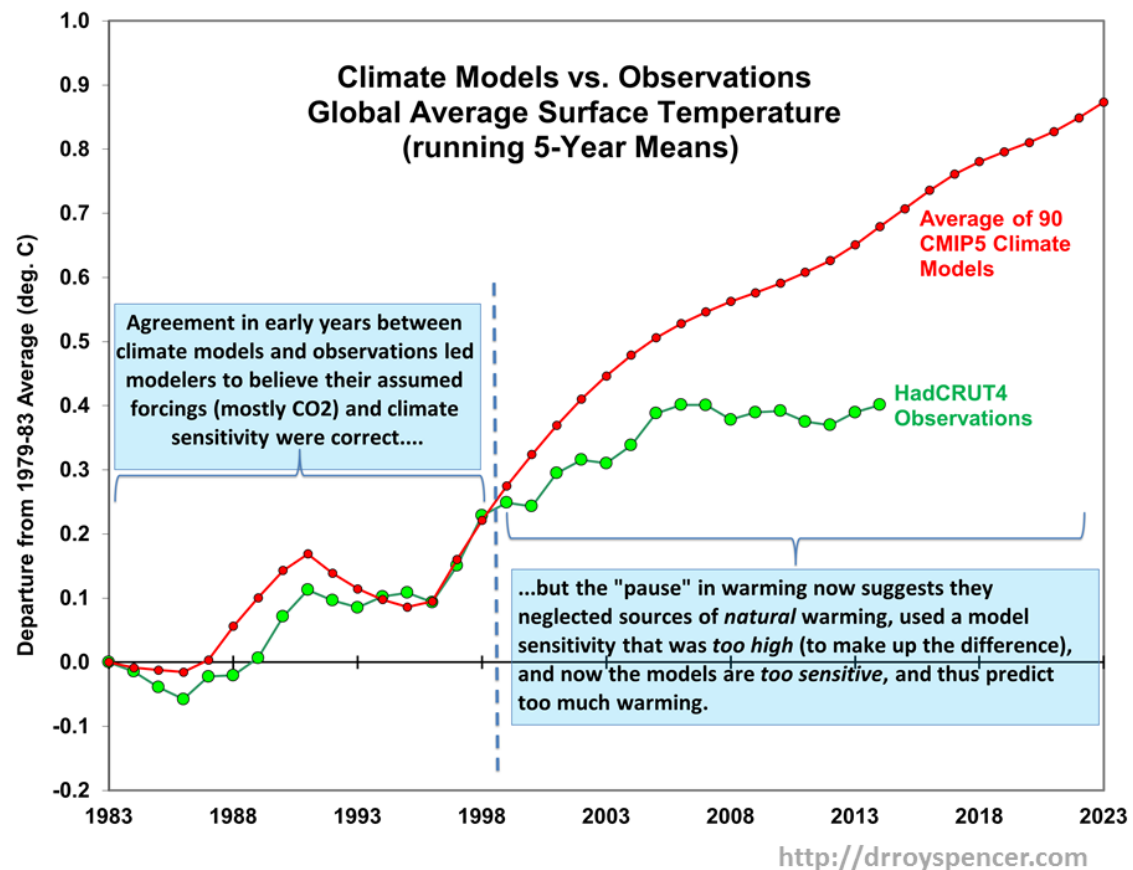
Maar wat het ook mogen zijn, feit blijft dat de modellen die zouden ‘bewijzen’ dat CO₂ de opwarming sinds 1970 grotendeels veroorzaakt heeft, een bijna gelijke opwarming eerder in de eeuw niet goed weten te simuleren. De modellen onderschatten in dit geval de waargenomen opwarming met een factor drie.

De stagnatie

Een ander punt dat genoemd moet worden is dat klimaatmodelleurs de historische waarnemingen uiteraard al kenden voordat zij hun modelruns deden. De beroemde wiskundige John von Neumann schijnt ooit gezegd te hebben: *With four parameters I can fit an elephant and with a fifth I can make him wiggle his trunk*. Met andere woorden: met een aantal parameters kan je bestaande data altijd ‘fitten’.

De mondiale temperatuur is al jarenlang de belangrijkste indicator voor de opwarming van de aarde. Modelgroepen zullen er dus naar streven om die parameter goed te simuleren en dat lukt heel behoorlijk bij de opwarming tussen 1975 en 2000. Maar ons vertrouwen in de

modellen zou natuurlijk aanzienlijk groter worden als ze nieuwe data ook goed weten te ‘voorspellen’. Helaas gaat dit niet al te best. Dit heeft onder andere te maken met de zogenaamde ‘hiatus’ of ‘pauze’, een periode van geringe opwarming sinds de eeuwwisseling die modellen niet zagen ‘aankomen’. De onderstaande grafiek van de Amerikaanse onderzoeker Roy Spencer probeert een en ander te verduidelijken:¹⁷



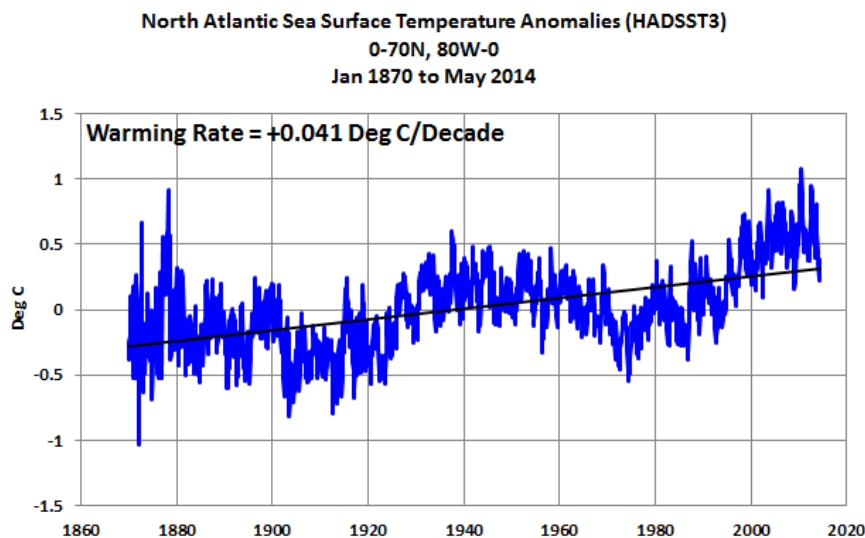
Figuur 2.7: Modellen versus waarnemingen in de periode 1979-2014. HadCrut4 is een mondiale temperatuurreeks aan het oppervlak. De rode lijn is het gemiddelde van de in het vijfde IPCC-rapport gebruikte modellen. Bron: Roy Spencer.

Voor na 2000, de periode dat modellen ‘nieuwe data’ moeten gaan ‘voorspellen’, lopen modellen en waarnemingen in groeiende mate uit elkaar. Nu stellen modelleers dat gedurende periodes van tien tot vijftien jaar natuurlijke fluctuaties het ‘antropogene signaal’ kunnen overstemmen. Een andere term hiervoor is interne variabiliteit.

Bekende natuurlijke fluctuaties zijn El Niño en La Niña. Die wisselen elkaar om de paar jaar af. Maar er zijn ook vormen van interne variabiliteit die op langere tijdschalen plaatsvinden, bijvoorbeeld de Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) en de Pacific Decadal Oscillation

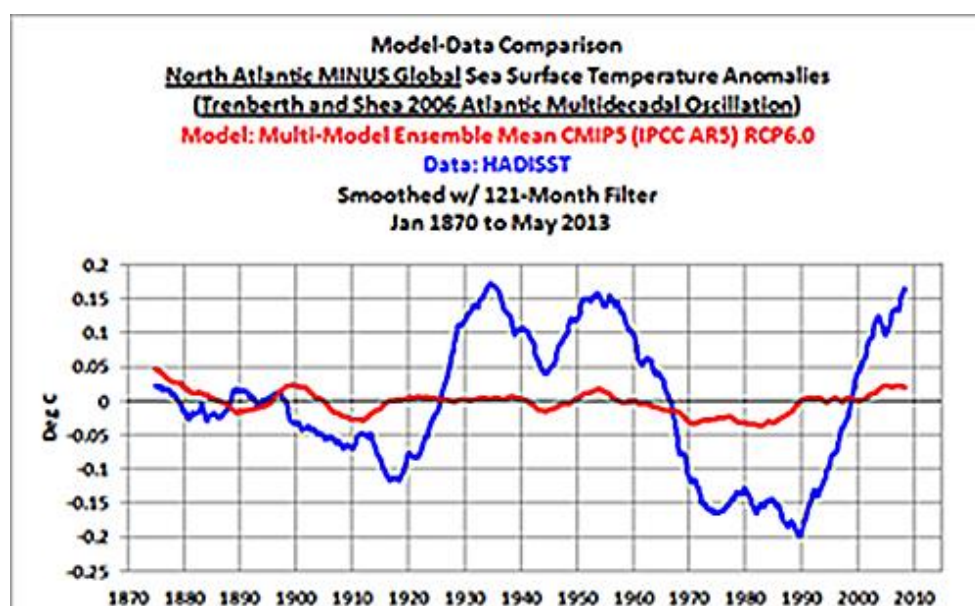
¹⁷ <http://www.drroyspencer.com/wp-content/uploads/90-CMIP5-models-vs-observations-with-pause-explanation.png>

(PDO). Zie hieronder bijvoorbeeld de ontwikkeling van de temperatuur in de Noord-Atlantische Oceaan in de afgelopen eeuw:



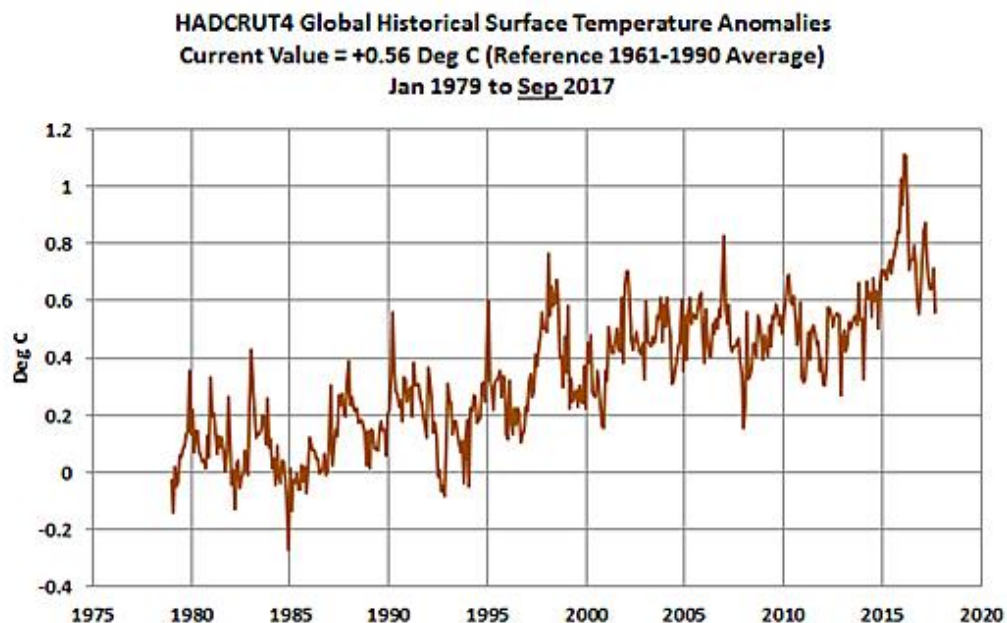
Figuur 2.8: Gemiddelde temperatuur van het zeewater in de Noord-Atlantische Oceaan.
Bron: Bob Tisdale.

De gelijkenis met de evolutie van de mondiale temperatuur is opvallend. De opwarming tussen 1920 en 1940 en tussen 1975 en pak 'm beet 2010 is in de Noord-Atlantische oceaan echter aanzienlijk sterker dan de mondiale opwarming, wat betekent dat deze 'oscillatie' de mondiale opwarming in deze periodes heeft 'versterkt'. De AMO is pas rond 2000 'ontdekt'. Hoewel (sommige) modellen tegenwoordig AMO-achtige patronen weten te simuleren, is de timing daarvan nog niet goed. Door het modelgemiddelde te nemen – zoals het IPCC doet – zullen natuurlijke schommelingen als AMO en PDO sowieso uitmiddelen. Dat is voor de AMO goed te zien in de onderstaande figuur:



Figuur 2.9: De temperatuur in de Noord-Atlantische Oceaan minus de mondiale zeewatertemperatuur. In blauw waarnemingen, in rood modellen. Het modelgemiddelde pikt het AMO-signaal duidelijk niet op. Bron: Bob Tisdale.

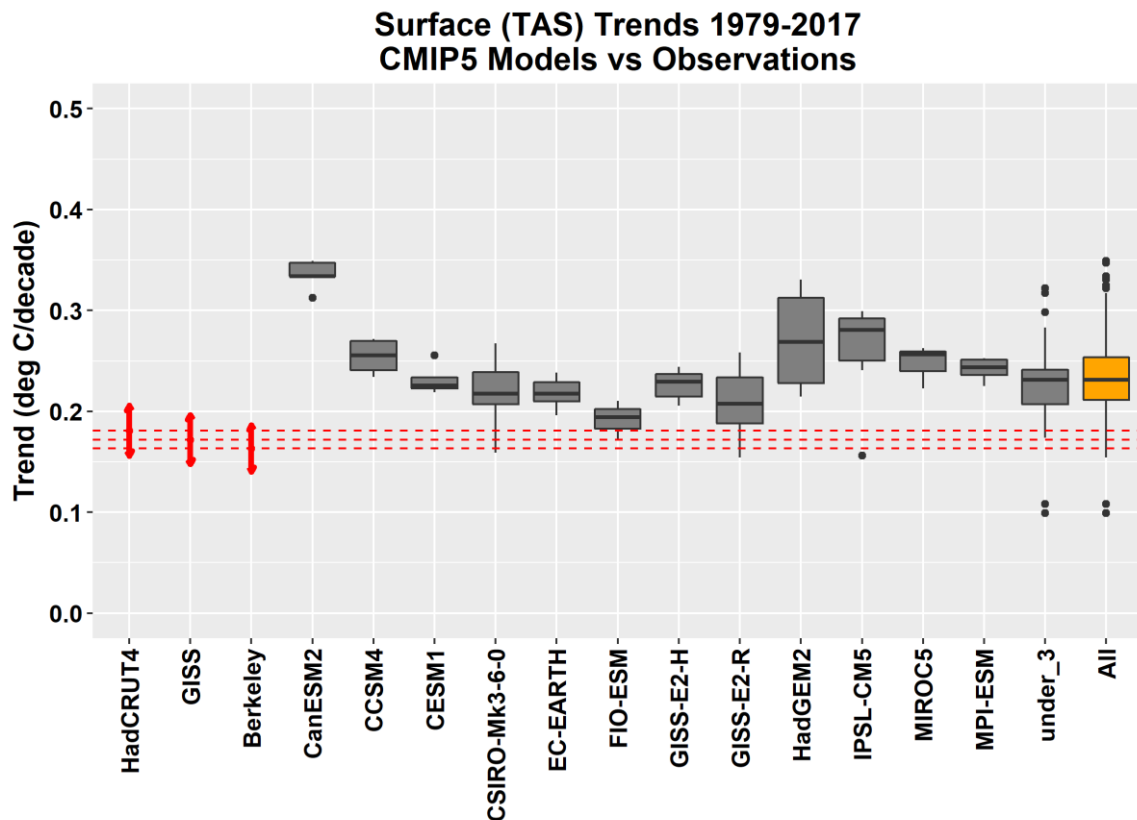
Modelleurs lijken zich nog altijd niet zo druk te maken over de ‘pauze’ in de opwarming, zeker nu die pauze mede dankzij een krachtige El Niño in 2015/2016 weer voorbij lijkt te zijn:



Figuur 2.10: Mondiale temperatuurreeks HadCrut4. De stagnatie die te zien is van pak ‘m beet de eeuwwisseling tot 2014 lijkt voorbij. Bron: Bob Tisdale.

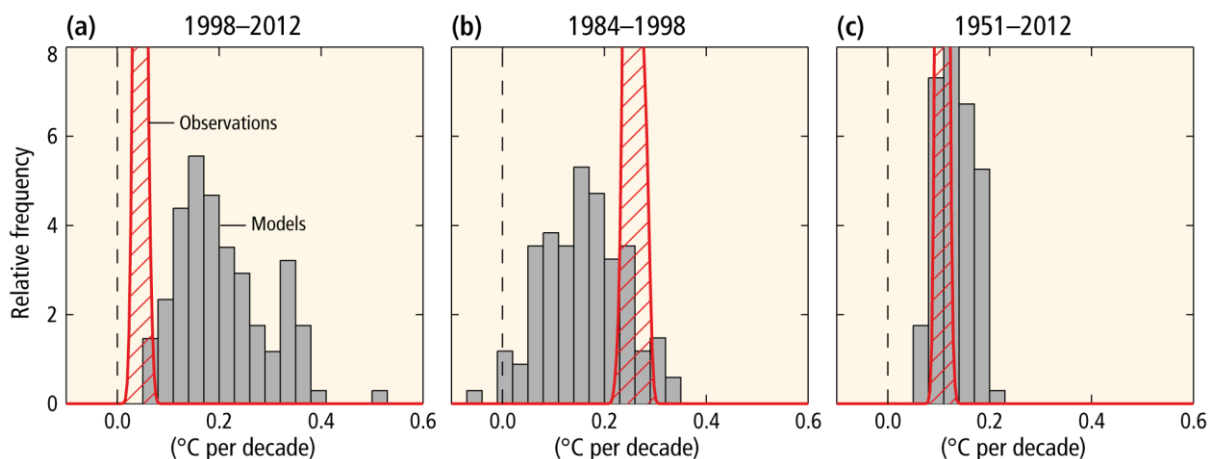
Klimaatonderzoekers redeneren als volgt: natuurlijke fluctuaties kunnen de trend over korte periodes van tien tot vijftien jaar bepalen. Het modelgemiddelde pikt zulke fluctuaties nou eenmaal niet op. Pas op langere tijdschalen begint de ‘geforceerde trend’, zoals onderzoekers dat noemen, te overheersen. Wat echter weinig aandacht krijgt van mainstream onderzoekers is dat modellen ook over de laatste dertig tot veertig jaar aanzienlijk meer opwarming simuleren dan waargenomen. Dit is het best te illustreren aan de hand van trends, zoals hier gedaan door de Canadese onderzoeker Stephen McIntyre op diens blog Climate Audit:¹⁸

¹⁸ <https://climateaudit.org/2017/11/18/reconciling-model-observation-reconciliations/>



Figuur 2.11: Waargenomen mondiale temperatuurtrend aan het oppervlak versus trends in de modellen. Het KNMI-model EC-Earth is ook vermeld. Helemaal rechts in geel het gemiddelde van alle modellen. Bron: Stephen McIntyre.

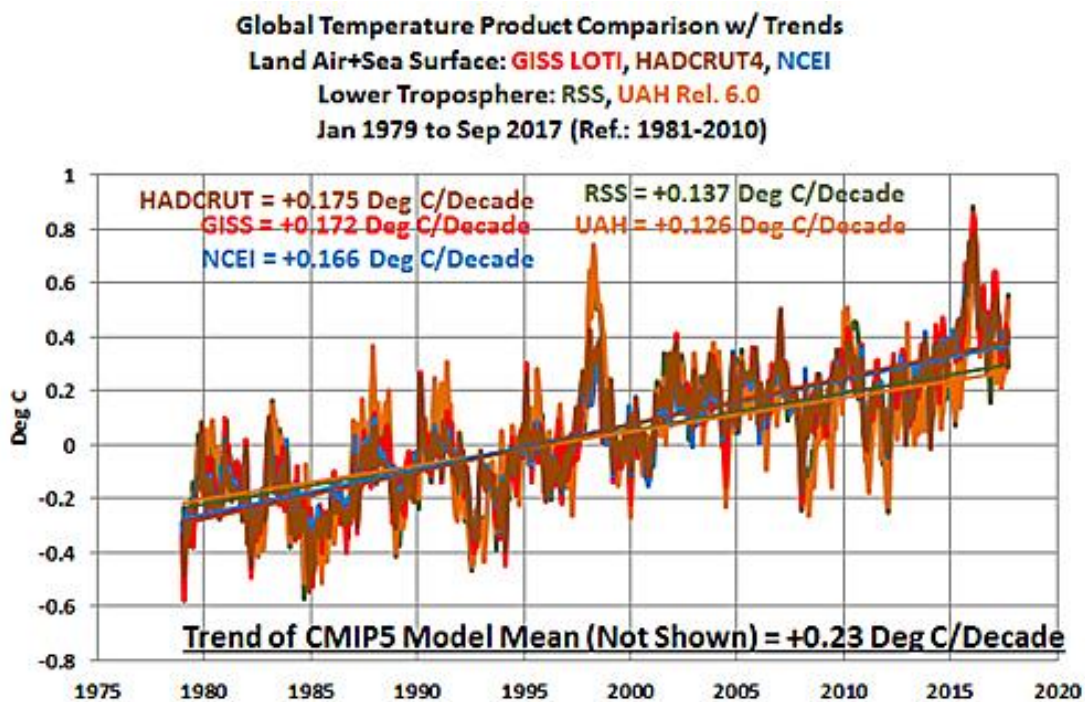
Duidelijk zichtbaar is dat alle modellen (waaronder het EC-Earth model van het KNMI) aanzienlijk meer opwarming simuleren in de periode 1979-2015 dan de door het IPCC meest gebruikte dataset HadCrut4 (plus twee andere datasets, GISS en Berkeley) aangeeft. Het vijfde IPCC-rapport laat ook een figuur zien met trends, dit in verband met de 'hiatus'.



Figuur 2.12: waargenomen trends versus modeltrends in drie periodes. Bron: vijfde IPCC-rapport.

De boodschap van deze figuur is dat modellen inderdaad de opwarming overschatten in de periode 1998-2012 maar dat je net zo makkelijk een periode van 15 jaar kunt selecteren (1984-1998) waarin modellen de opwarming onderschatten. Als je nou maar een periode neemt die lang genoeg is (1951-2012) dan vallen de waarnemingen binnen de range van de modellen. Maar merk op dat er tussen 1951 en 1975 sprake was van een dalende temperatuur, een daling die het IPCC toeschrijft aan een sterke toename van aerosolen in de lucht. Hierop komen we nog terug. De recente opwarming die het IPCC met een hoge mate van waarschijnlijkheid toeschrijft aan broeikasgassen begon rond 1975. McIntyre begint zijn analyse in 1979 omdat dat het startjaar is van diverse satellietreeksen waaronder die voor temperatuur. Door te starten in 1979 kan je de modellen dus vergelijken met zowel de oppervlaktereeksen als de reeksen voor de troposfeer. Bovendien zit je precies in de periode van opwarming die het IPCC met grote mate van zekerheid toeschrijft aan broeikasgassen.

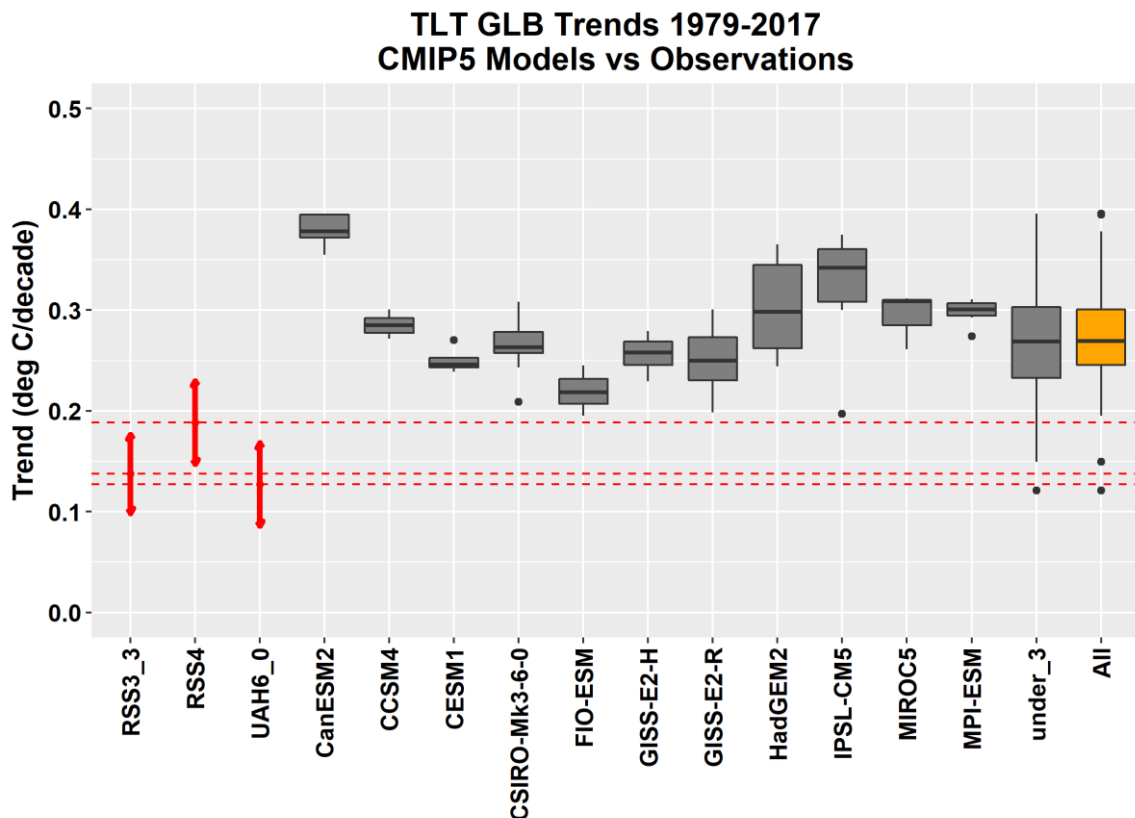
Er zijn twee groepen in de wereld – UAH en RSS - die met satellietmetingen een temperatuurreeks hebben geconstrueerd voor de onderste acht kilometer van de atmosfeer (de troposfeer). Het mooie is dat die groepen elkaar ‘scherp’ houden. De UAH-groep van Roy Spencer en John Christy wordt gezien als ‘sceptisch’ en de RSS-groep van Frank Wentz en Carl Mears als ‘mainstream’. Hun reeksen komen goed met elkaar overeen maar liggen lager dan de drie oppervlaktereeksen HadCrut4, GISS en NCEI:



Figuur 2.13: Mondiale opwarming aan het oppervlak en in de lagere troposfeer sinds 1979.

Klimaatmodellen simuleren meer opwarming in de troposfeer dan aan het oppervlak maar de beschikbare meetreeksen laten het tegenovergestelde zien, meer opwarming aan het oppervlak dan in de atmosfeer. Het is nog altijd niet duidelijk waar de verschillen tussen de oppervlaktereeksen en de satellietreeksen vandaan komen, maar die discussie valt verder buiten het bestek van dit rapport.

Niet verwonderlijk is dan ook dat de verschillen in trends tussen modellen en waarnemingen nog groter zijn voor de troposfeer:

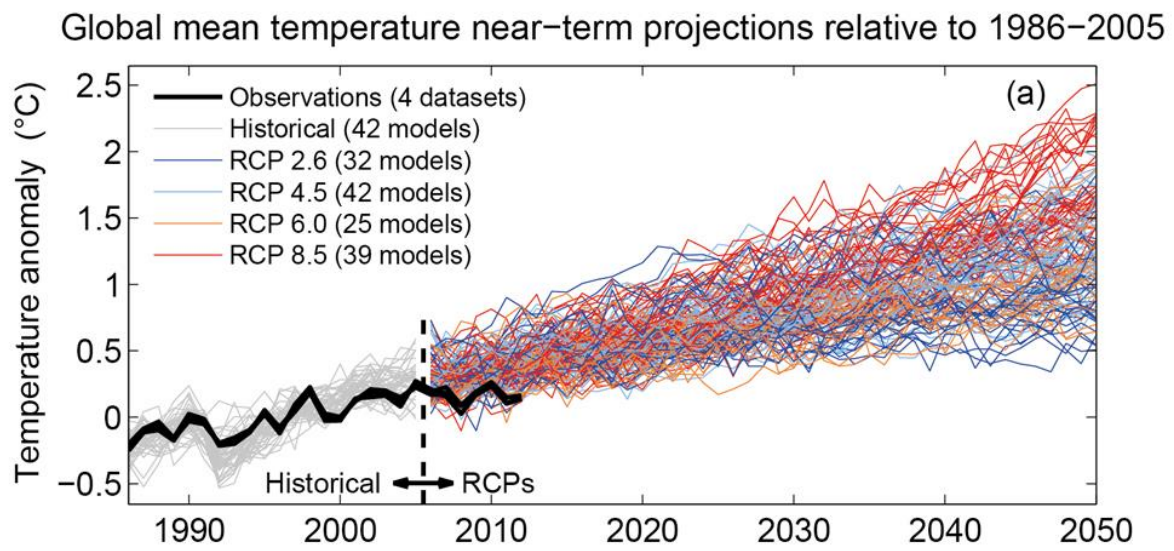


Figuur 2.14: Waargenomen mondiale temperatuurtrend in de lagere troposfeer versus trends in de modellen voor de periode 1979-2017. Helemaal rechts in geel het gemiddelde van alle modellen. Er zijn twee versies van RSS getoond omdat de meest recente versie aanzienlijk afwijkt van de vorige versie. Bron: Climate Audit.¹⁹

Dus modellen overschatten de opwarming sinds 1979 van zowel het oppervlak als de troposfeer al aanzienlijk. Of toch niet? In de blogosfeer woeden er geregeld verhitte discussies over deze kwestie. Een vaak gehoord tegenargument is dat in de figuur hierboven de onzekerheid in de waarnemingen niet getoond is en dat als je dat wel zou doen er wel degelijk enige overlap is tussen de modellen en de waarnemingen. Daaruit concludeert men dan dat modellen en waarnemingen nog altijd ‘consistent’ met elkaar zouden zijn.

¹⁹ <https://climateaudit.org/2017/11/18/reconciling-model-observation-reconciliations/>

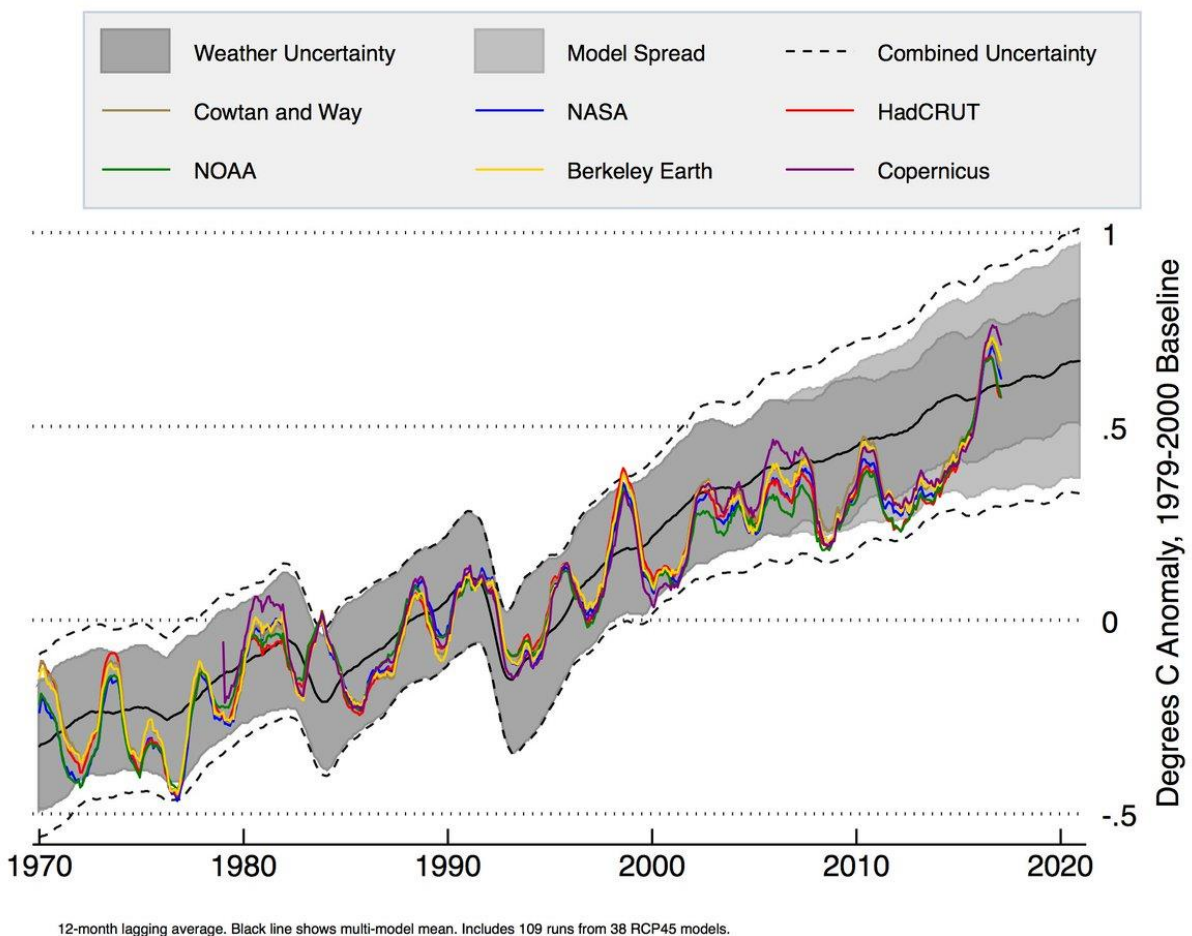
Een andere manier om modellen en waarnemingen ogenschijnlijk meer met elkaar in overeenstemming te brengen is om de referentieperiode anders te kiezen. De referentieperiode is de periode waarin modellen en waarnemingen een gezamenlijk nulpunt hebben. Het IPCC bijvoorbeeld publiceerde deze grafiek in het vijfde IPCC-rapport:



Figuur 2.15: Modellen versus observaties ten opzichte van de referentieperiode 1986-2005. Bron: vijfde IPCC-rapport.

De observaties zitten in dit geval weliswaar aan de onderkant van de range maar vallen er niet buiten zoals in de veelbesproken figuur 2.7 van Spencer en Christy wel gebeurt. Dit heeft voornamelijk te maken met de keuze voor de referentieperiode van 1986-2005 die in dit geval lang was en middenin de periode 1979-2012 ligt. De periode na 2005 is dan te kort om de modellen en de waarnemingen visueel duidelijk uiteen te laten lopen. Meer recent is op tal van sites de volgende vergelijking tussen modellen en waarnemingen te zien, die gebaseerd is op bovenstaande figuur uit het IPCC-rapport:

Blended Model-Observation Comparisons, 1970-2020

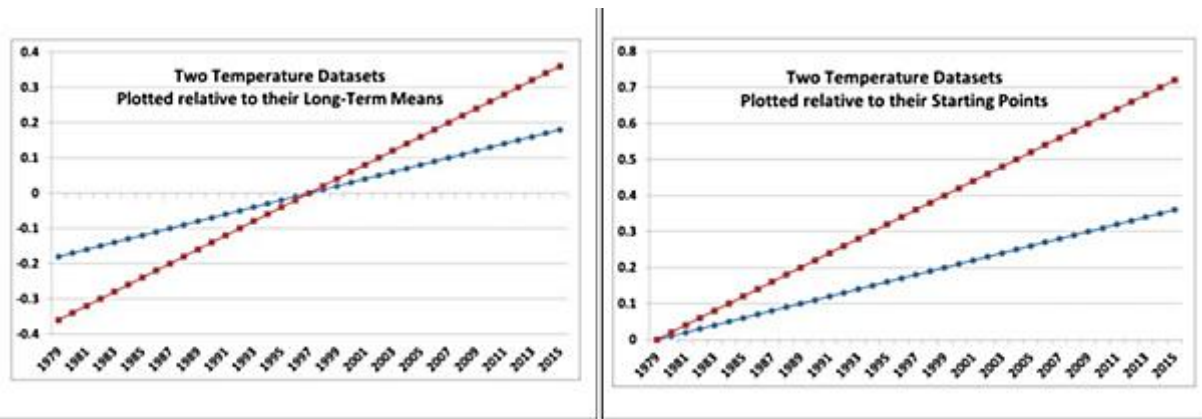


Figuur 2.16: Modellen versus diverse temperatuurreksen. Bron: Zeke Hausfather.²⁰

Figuur 2.16 suggereert dan dat modellen en waarnemingen prima overeenkomen. Merk op dat hier de periode 1979-2000 als referentieperiode is gebruikt.

Hieronder is het verschil in presentatie (tussen Spencer/Christy enerzijds en IPCC/Schmidt/Hausfather anderzijds) nogmaals schematisch weergegeven:

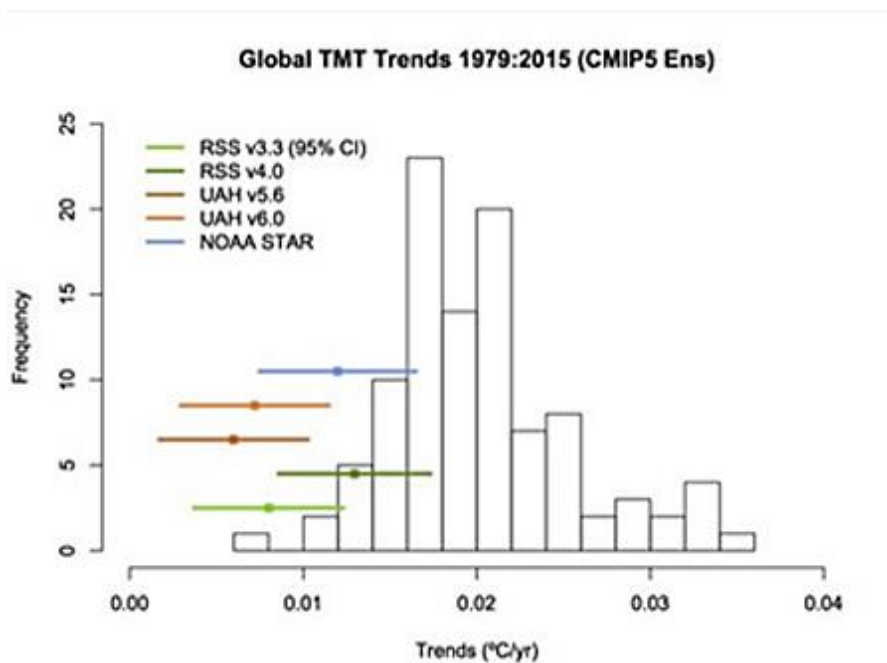
²⁰ <https://twitter.com/hausfath/status/842792242876047360>



Figuur 2.17: Twee manieren om twee trends met elkaar te vergelijken. De rode en blauwe reeks hebben links en rechts dezelfde trend.

Spencer en Christy kozen voor de rechter aanpak door de referentieperiode aan het begin te kiezen (zij kozen voor de korte periode 1979-1983). Bij een verschil in trends tussen modellen en waarnemingen maximaliseert dit het verschil in 2015. Het IPCC koos voor de linker aanpak door een referentieperiode in het midden van de periode te kiezen. Dit verkleint de verschillen op het einde.²¹

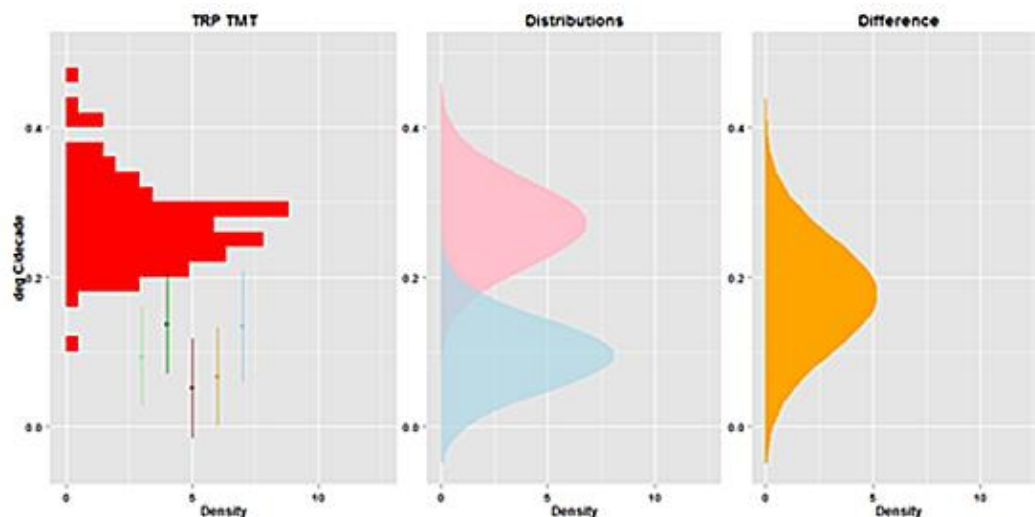
Gavin Schmidt, directeur van NASA GISS in New York, en een zeer bekende mainstream onderzoeker, mengde zich ook in deze discussie. Hij publiceerde deze figuur:



²¹ Voor een goede discussie hierover zie <https://climateaudit.org/2016/04/19/gavin-schmidt-and-reference-period-trickery/> en <https://climateaudit.org/2016/05/05/schmidts-histogram-diagram-doesnt-refute-christy/>

Figuur 2.18: Modellen versus waarnemingen voor de hogere troposfeer. Bron: Gavin Schmidt.

Hier zijn de onzekerheden meegenomen in de waarnemingen en is er enige overlap tussen de modeltrends en de waargenomen trends. McIntyre reageerde met een blogbericht waarin hij stelde dat deze figuur de eerder getoonde figuur van Christy niet onderuithaalt.



Figuur 2.19: Links de figuur van Gavin Schmidt, in het midden een waarschijnlijkheidsverdeling op basis van dezelfde data gecreëerd door Stephen McIntyre. Rechts het verschil tussen de twee waarschijnlijkheidsverdelingen.

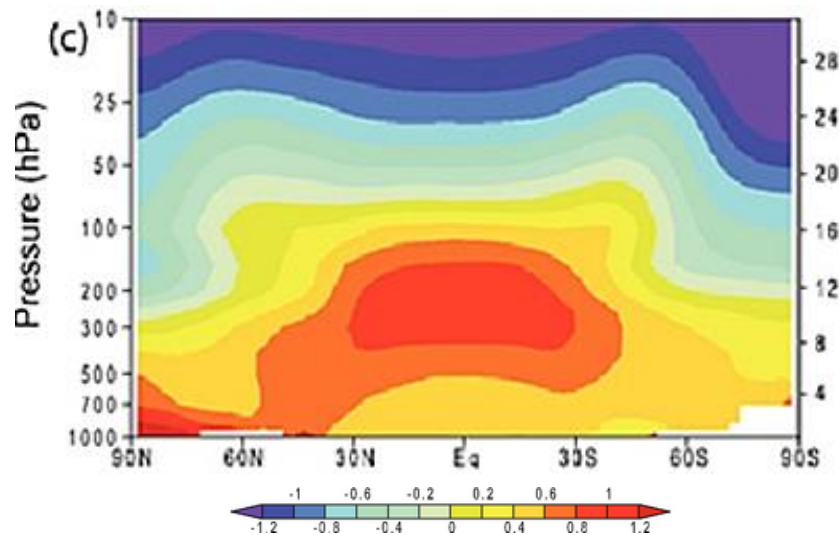
McIntyre reageerde hierop in een vervolgartikel met bovenstaande figuur. Hij rekent vooral af met het idee dat enige vorm van overlap voldoende is om te kunnen claimen dat modellen en waarnemingen dus consistent met elkaar zouden zijn. Eerder andersom, de verschillen tussen modellen en waarnemingen zijn evident. In de conclusies stelt hij dat op basis van deze data een modelrun 99,5% van de tijd ‘warmer’ zal zijn dan de waargenomen trend. In 88% van de gevallen zal een modelrun zelfs meer dan 0,1 graden Celsius per decennium warmer zijn dan de waargenomen trend.

Tropen

In de bovenstaande discussie tussen Schmidt, Christy en McIntyre ging het in het bijzonder over de opwarming in de hogere troposfeer (*mid troposphere* in het Engels). Dat heeft een reden. Een van de meest opvallende patronen in klimaatmodellen is een versterkte opwarming in de tropen op zo’n tien kilometer hoogte. Deze zogenaamde *hot spot* is niet per se uniek voor broeikasgassen, want ook bij een grotere zonneactiviteit of een andere forcering verwachten we hoog in de tropen extra opwarming. Dit is wat onderzoekers de waterdampfeedback noemen. Extra opwarming in de tropen aan het oppervlak, door wat

voor reden ook, leidt tot extra convectie en die energie komt hoog in de tropen weer vrij, daar waar waterdamp weer condenseert tot water.

Volgens figuur 2.20 is er nu sprake van een sterke forcing door broeikasgassen en dus simuleren modellen gevoed met de stijgende CO₂-concentratie in de atmosfeer een forse versterking van de opwarming rond de tien kilometer hoogte in de tropen:



Figuur 2.20: De hot spot hoog in de tropen. Gebaseerd op figuur 9.1 in het vierde IPCC-rapport. Rechts langs de y-as de hoogte in kilometers. Deze simulatie was gedaan met één klimaatmodel over de periode 1890-1999. De schaal is °C per eeuw.

Duidelijk te zien is dat hoog in de tropen de opwarming twee tot drie keer zo sterk zou moeten zijn als aan het oppervlak. Sinds eind jaren vijftig zijn er ballonmetingen beschikbaar en sinds 1979 worden ook met satellieten veranderingen in de troposfeer gemonitord. Zien we de hot spot daarin terug?

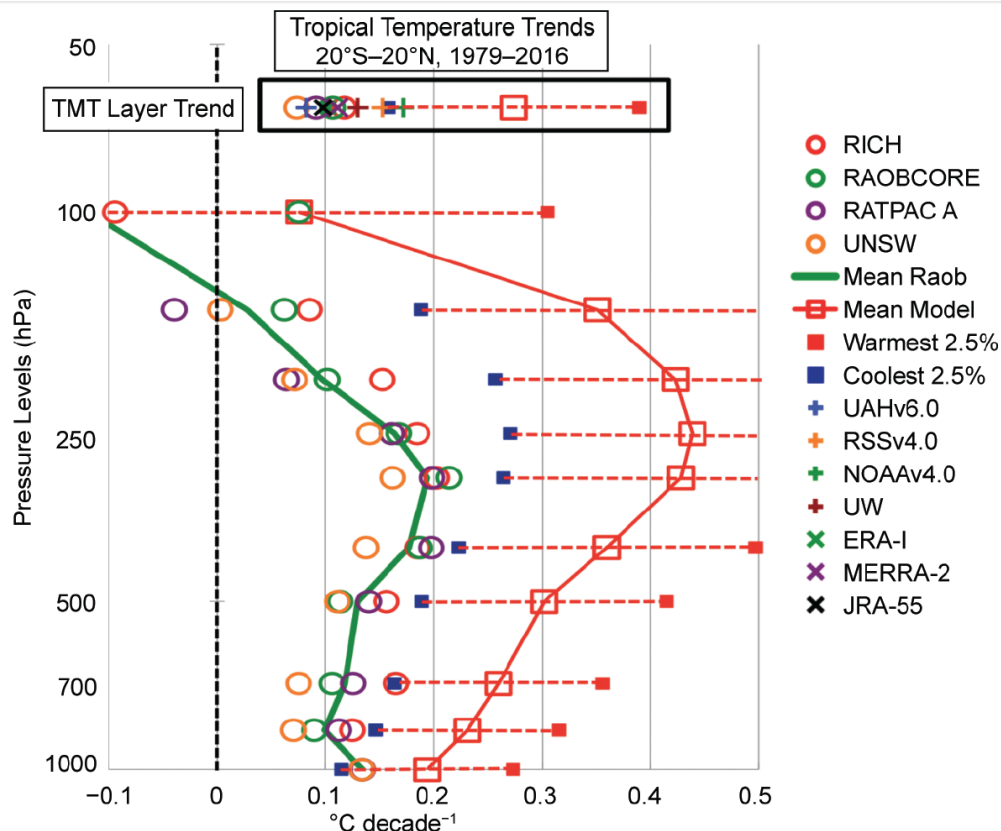
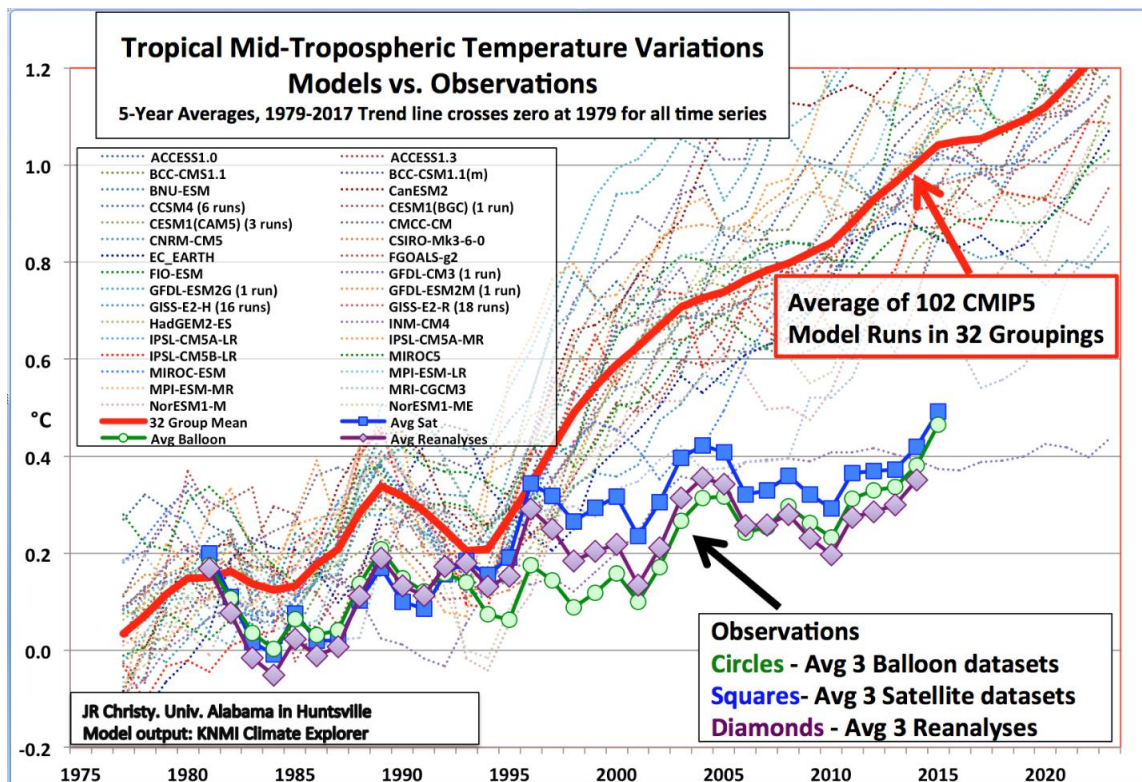


FIG. S2.10. Temperature trends ($^{\circ}\text{C decade}^{-1}$) for the tropics at various tropospheric levels for 1979–2016. The top box indicates trends for the tropical atmospheric layer known as the midtroposphere (TMT) and includes satellite observations. The CMIP-5 (rcp4.5) model output of 102 runs was used for the mean and range of model trends. The horizontal dashed lines represent the range within which 95% of the model trends occurred.

Figuur 2.21: Modellen versus observaties in de tropen. In rood het modelgemiddelde. De rondjes zijn verschillende datasets gebaseerd op ballonmetingen. Bron: John Christy.

Figuur 2.21 laat zien dat eigenlijk alle modelruns op alle hoogtes meer opwarming simuleren dan de weerballonnen meten. De ballonmetingen laten geen drie keer zo sterke opwarming zien op tien kilometer hoogte. En ook in absolute zin genereren de modellen veel meer opwarming dan de metingen aangeven wat nog beter te zien is in figuur 2.22:



Figuur 2.22: Modellen versus waarnemingen in de hogere troposfeer. In groen/blauw en paars drie verschillende datasets. In rood het modelgemiddelde. Bron: John Christy.

In 2012 organiseerden we een Climate Dialogue over dit onderwerp waar drie prominente onderzoekers rond deze kwestie aan meededen.²² Uiteindelijk waren twee opposanten, John Christy van de UAH-satellietreeks en Carl Mears van de RSS-reeks, het er in ieder geval over eens dat er een statistisch significant verschil bestaat tussen modellen en waarnemingen in de tropische troposfeer.

Over de redenen van het verschil waren de discussianten het echter helemaal niet eens.²³ John Christy, een bekende Amerikaanse klimaatscepticus, ziet in de afwezigheid van de *hot spot* het bewijs dat zowel de waterdamp- als de wolkenfeedback negatief zijn. Dit betekent dan dat het klimaat relatief ongevoelig is voor broeikasgassen. Mears stelt dat we eigenlijk nog geen idee hebben wat de oorzaak is van deze discrepantie tussen modellen en waarnemingen in de tropen maar dat het vermoedelijk een combinatie van factoren is.

Even terug naar de hoofdlijn van het verhaal. Het IPCC stelt dat het op basis van de overeenkomst tussen modellen en waarnemingen (met name die van de mondiale temperatuur, zie figuur 2.5) er vrijwel zeker van is dat het merendeel van de opwarming sinds 1950 door broeikasgassen komt. We hebben echter hier laten zien dat modellen de

²² <http://www.climatedialogue.org/the-missing-tropical-hot-spot/>

²³ Zie bijvoorbeeld tabel 7 in de samenvatting: <http://www.climatedialogue.org/wp-content/uploads/2014/10/Climatedialogue.org-summary-the-missing-tropical-hot-spot.pdf>

opwarming tussen 1915 en 1945 juist fors onderschatten en dat diezelfde modellen de opwarming sinds 1979 al behoorlijk lijken te overschatten. Wat rest is dus de periode 1975-2000 waarin het modelgemiddelde wel goed overeenkomt met de waarnemingen (zie figuur 2.5). De vraag is nu, gezien de problemen die de modellen in die twee andere periodes hebben, of die overeenkomst tussen modellen en waarnemingen niet ‘toevallig’ is. Of anders gezegd, misschien is de overeenkomst in die periode wel het gevolg van de ‘verkeerde’ combinatie van factoren. En inderdaad zijn er sterke aanwijzingen dat daar sprake van is. Ten eerste is het aannemelijk dat oscillaties in de oceanen zoals de Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) en de Pacific Decadal Oscillation (PDO) hebben bijgedragen aan de opwarming tussen 1975 en 2000.²⁴ Een paper van Kosaka en Xie (2013) suggereert zelfs dat meer dan de helft van de opwarming in deze periode het gevolg is van wat onderzoekers “interne variabiliteit” noemen.

Zoals we in figuur 2.9 echter lieten zien zal een gemiddelde van alle modellen de invloed van de AMO (en ook de PDO) niet oppikken. De modellen schrijven de temperatuurstijging in deze periode met name toe aan een combinatie van twee factoren: opwarming door broeikasgassen en afkoeling door aerosolen. Zoals we later in dit hoofdstuk nog uitgebreider zullen bespreken zijn er sterke aanwijzingen dat modellen ‘overgevoelig’ zijn, dat wil zeggen, dat ze het opwarmende effect van broeikasgassen overdrijven. Tegelijkertijd stapelen de bewijzen zich ook op dat modellen het afkoelende effect van aerosolen eveneens overdrijven.²⁵ Met die ‘foute’ combinatie van te sterke opwarming door broeikasgassen, te sterke afkoeling door aerosolen en het niet correct modelleren van de AMO en de PDO krijgen de modellen de mondiale opwarming tussen 1975 en 2000 min of meer correct. Maar om de verkeerde redenen dus.

Al met al reden genoeg om attributie zoals gedaan door het IPCC nog altijd met een flinke korrel zout te nemen. Zeker de stelligheid uit het vijfde IPCC-rapport (it is extremely likely etc.) is op basis van het hier gepresenteerde materiaal voorbarig. Modellen hebben grote moeite om zelfs de mondiale temperatuur in de 20e en begin 21e eeuw goed te simuleren. Dat is geen schande, want het klimaat is een extreem complex, chaotisch systeem. Maar dat zou onderzoekers heel bescheiden moeten houden in hoe goed we dat systeem begrijpen, laat staan kunnen simuleren.

Wolken en neerslag

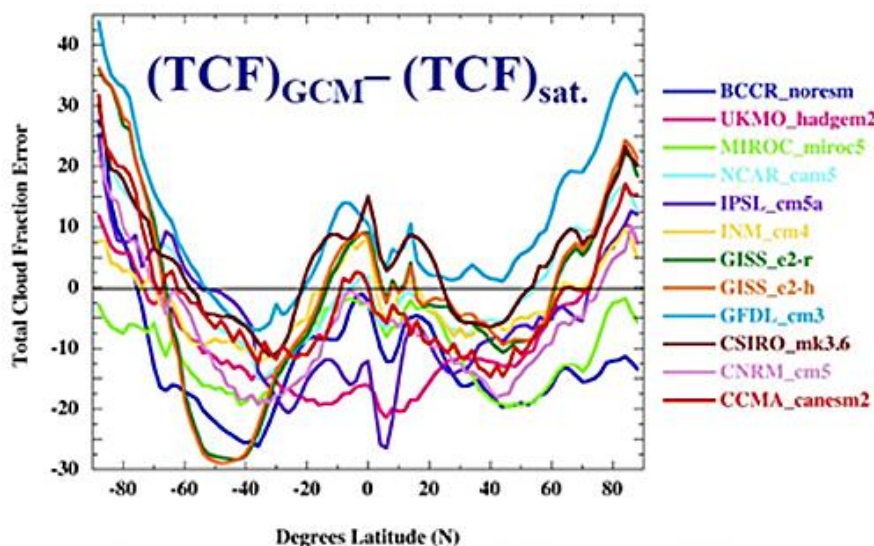
²⁴ Een goede paper hierover is Kosaka, Y, Xie S-P. 2013. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*. 10.1038/nature12534 Discussie hierover op <https://judithcurry.com/2013/08/28/pause-tied-to-equatorial-pacific-surface-cooling/> en <http://www.staatvanhetklimaat.nl/2013/08/30/xie-reacts-on-curry/>

²⁵ Belangrijke papers in dit verband zijn onder andere Stevens, B. Rethinking the lower bound on aerosol radiative forcing. In press, *J.Clim* (2015) doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00656.1> en Malavelle, F. F. et al. *Nature* 546, 485–491 (2017).

Klimaatmodellen warmen gemiddeld 3,4 graden op bij een verdubbeling van de CO₂-concentratie. Die waarde heet de klimaatgevoeligheid en daarop komen we later terug. Het theoretische stralingseffect van de extra CO₂ bij een verdubbeling is echter 'slechts' ongeveer ruim een graad. De tweede en derde graad opwarming in modellen komen door versterkingseffecten, met name de waterdampfeedback en de wolkenfeedback. We hebben zojuist gezien dat de waterdampfeedback nog niet duidelijk tot uiting komt hoog in de tropische troposfeer.

Hetzelfde geldt eigenlijk voor de wolkenfeedback. Het effect van wolken is niet eenvoudig te bepalen. Grofweg geldt dat lage wolken netto voor afkoeling zorgen door weerkaatsing van zonlicht. Hoge wolken dragen bij aan het broeikaseffect door het invangen van infrarode straling. Netto koelt het mondiale wolkendeck op dit moment. Maar de grote vraag is wat er gaat gebeuren in de toekomst als de extra CO₂ tot verdere opwarming zal leiden. In de huidige generatie klimaatmodellen leidt dit tot extra opwarming, voornamelijk door een afname van lage bewolking.

Klimaatonderzoekers en het IPCC erkennen echter dat de simulatie van wolken nog een hele uitdaging is. Een van de redenen is dat wolken op ruimtelijke schalen voorkomen die kleiner zijn dan de roosterafmetingen van het model. Klimaatmodellen hebben de grootst mogelijke moeite om het de huidige wolkenbedekking op aarde te simuleren, zoals te zien is in de volgende figuur:



Figuur 2.23: Fout in wolkenfractie per breedtegraad. Helemaal rechts de Noordpool, helemaal links de Zuidpool. Positieve waarden betekent meer wolken in het model dan waargenomen vanuit satellieten.²⁶

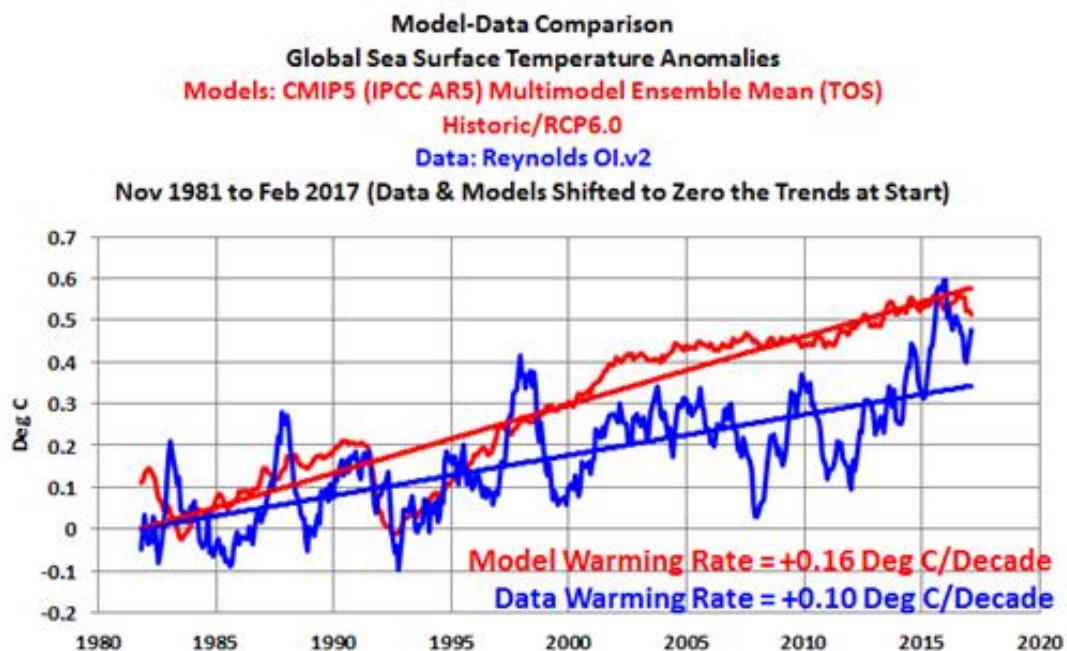
²⁶ Figuur afkomstig van Pat Frank en gepresenteerd door Fred Singer tijdens de AGU in 2013.

Ook het IPCC erkent in het vijfde rapport dat er nog geen duidelijke observationele bewijzen zijn voor een positieve wolkenfeedback. Het is onwaarschijnlijk dat dit probleem op korte termijn opgelost wordt. Als modellen zoveel moeite hebben met wolken is het niet verwonderlijk dat ze ook nog grote moeite hebben met neerslag. Een artikel in 2010 documenteerde dat het in vijf onderzochte modellen ongeveer twee keer zo vaak regende als in werkelijkheid en dat het tegelijkertijd veel lichter regende.²⁷

De oceanen

Even een kort resumé: klimaatmodellen overschatten dus de mondiale opwarming aan het oppervlakte en in de troposfeer en hoog in de tropische troposfeer, daar waar het effect van waterdamp goed zichtbaar zou moeten zijn, worden de verschillen zelfs nog groter. We kijken tenslotte nog even apart naar de oceanen. Vriend en vijand zijn het erover eens dat oceanen een sleutelrol spelen in het mondiale klimaat.

Het is in dat verband nuttig om eens te kijken in hoeverre modellen de opwarming van de oceanen (aan het oppervlak) simuleren in de laatste 35 jaar. Om te beginnen het mondiale plaatje:

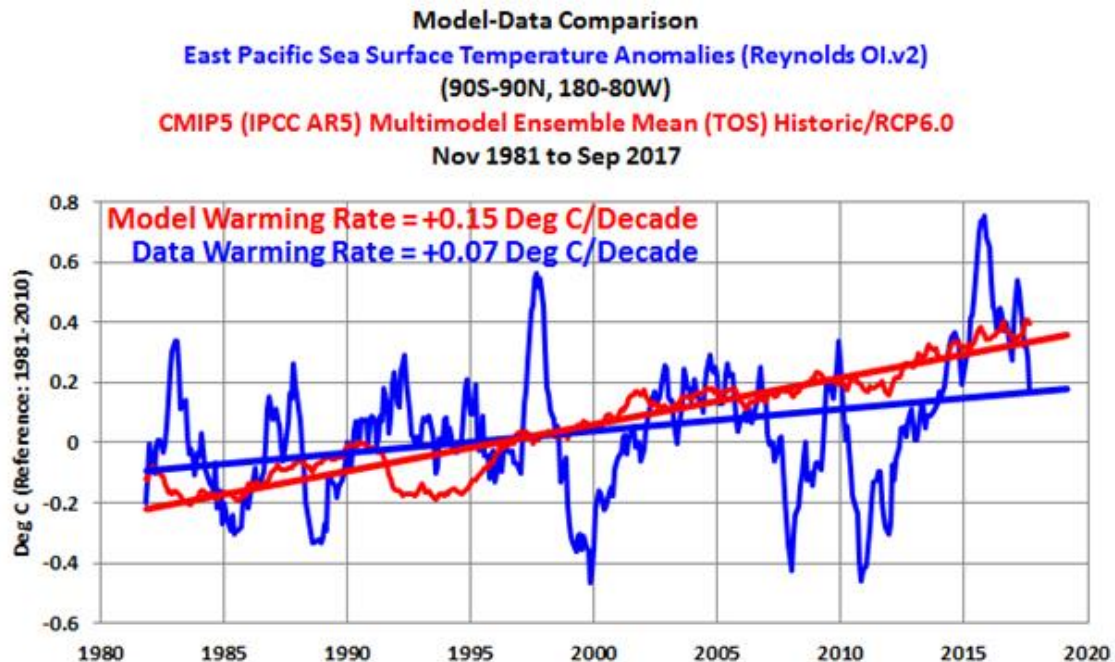


Figuur 2.24: Opwarming van de oceanen, modellen versus waarnemingen. Bron: Bob Tisdale.

²⁷ Stephens, G. L., T. L'Ecuyer, R. Forbes, A. Gettleman, J.-C. Golaz, A. Bodas-Salcedo, K. Suzuki, P. Gabriel, and J. Haynes (2010), Dreary state of precipitation in global models, J. Geophys. Res., 115, D24211, Doi:10.1029/2010JD014532

In lijn met het mondiale beeld warmen modellen de oceanen aanzienlijk sneller op dan in werkelijkheid gebeurt.

Ook interessant is de trend in het oostelijke deel van de Grote Oceaan. Die loopt van de Zuidpool tot de Noordpool en bestrijkt in totaal een derde van de wereldwijde oceanen.

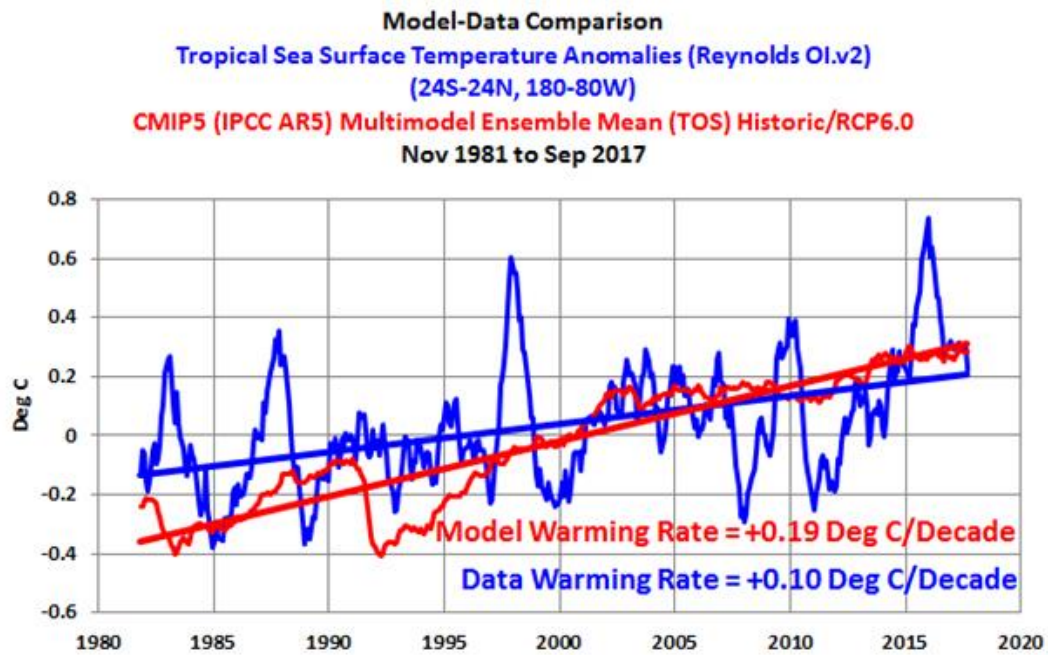


Figuur 2.25: Opwarming in het oostelijk deel van de Grote Oceaan, modellen versus waarnemingen.

De waargenomen opwarming in dit deel van de oceaan is slechts de helft van die in de modellen.²⁸ Hoe kan dit? Waarom slaat het versterkte broeikaseffect een derde van de wereldwijde oceanen over? Broeikasgassen zoals CO₂ worden door het IPCC 'well mixed' genoemd, ze mengen goed en snel waardoor de concentratie in de atmosfeer redelijk gelijkmatig verdeeld is. Er is dus geen reden om aan te nemen dat het versterkte broeikaseffect boven dit deel van de oceaan niet zou bestaan.

De tropen zijn extreem belangrijk voor het klimaat omdat zich daar de meeste energie ophoopt. Hoe goed simuleren modellen de oceanen in de tropen?

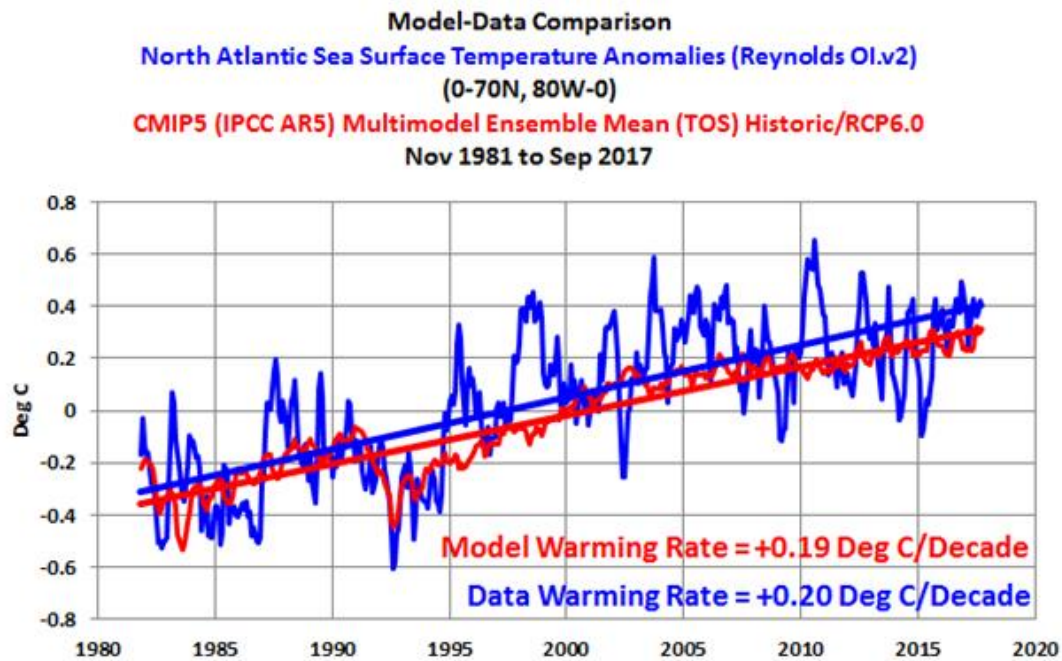
²⁸ Dankzij de krachtige El Nino in 2015 is er nu wel een lichte trend waarneembaar:
<https://bobtisdale.wordpress.com/2015/10/12/september-2015-sea-surface-temperature-sst-anomaly-update/>



Figuur 2.26: Opwarming in de tropische oceanen versus de modellen.²⁹

In de tropen simuleren de modellen gemiddeld twee keer zoveel opwarming als waargenomen in de laatste ruim dertig jaar. Dit is in lijn met het ontbreken van de hot spot hoog in de tropische troposfeer, dat we eerder bespraken. We hebben het hier over een gebied dat 46 procent van het mondiale oceaanoppervlak bestrijkt. De enige oceaan die de afgelopen dertig jaar sterker opwarmde dan de modellen is de Noord-Atlantische Oceaan:

²⁹ <https://bobtisdale.wordpress.com/2014/03/26/maybe-the-ipccs-modelers-should-try-to-simulate-earths-oceans/>



Figuur 2.27: Opwarming in de Noord-Atlantische Oceaan versus modellen.

De Noord-Atlantische Oceaan warmde de afgelopen dertig jaar verreweg het sterkst op van alle oceanen. Maar zoals we eerder al bespraken doorloopt de temperatuur in deze oceaan een quasi-periodieke cyclus van 60 tot 70 jaar: de Atlantic Multidecadal Oscillation (zie figuur 2.8). Sinds 1980 is de AMO van negatieve naar positieve waarden gegaan. En klimaatmodellen, zeker het modelgemiddelde niet, kunnen dit AMO-sigitaal nog niet simuleren (figuur 2.9).

Een artikel in *Science* uit 2008 suggereert dat de opwarming in de Noord-Atlantische Oceaan verband houdt met de Noord Atlantische Oscillatie (NAO).³⁰ De NAO index, berekend door het luchtdrukverschil tussen IJsland en de Azoren, heeft ook invloed op het weer in Europa.³¹ De auteurs in *Science* concludeerden: *'Whether the overall heat gain is due to anthropogenic warming is difficult to confirm because strong natural variability in this ocean basin is potentially masking such input at the present time.'*

In een begeleidend persbericht zei eerste auteur Susan Lozier: *'The take-home message is that the NAO produces strong natural variability' [...]. The simplistic view of global warming is that everything forward in time will warm uniformly. But this very strong natural variability is superimposed on human-caused warming. So researchers will need to unravel that natural variability to get at the part humans are responsible for.'*³²

³⁰ The Spatial Pattern and Mechanisms of Heat-Content Change in the North Atlantic, M. Susan Lozier, Susan Leadbetter, Richard G. Williams, Vassil Roussenov, Mark S. C. Reed, and Nathan J. Moore, *Science* 8 February 2008: 319

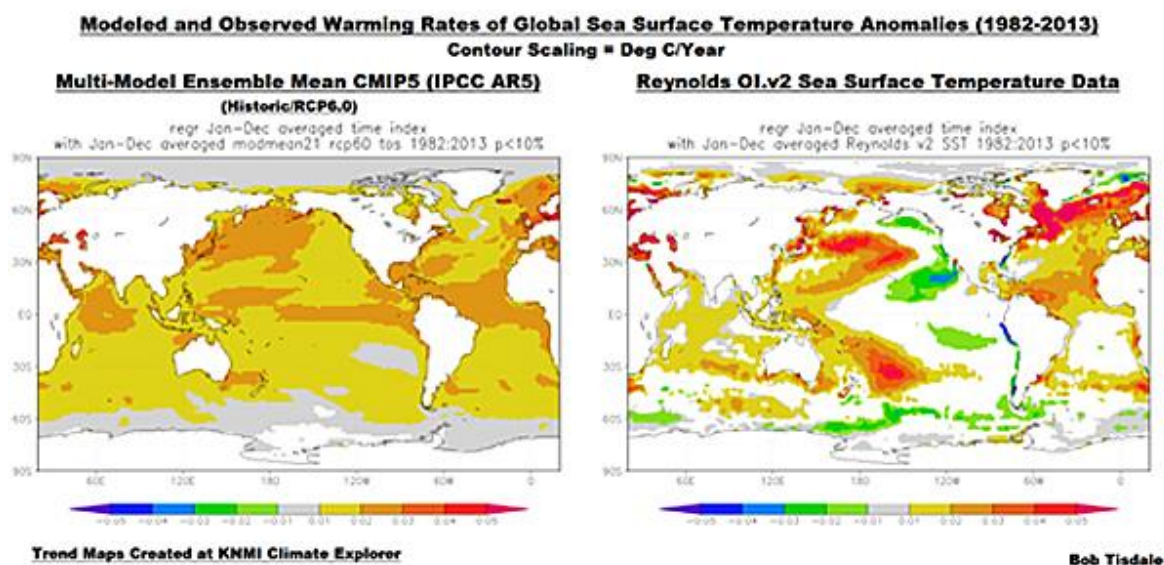
³¹ <http://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/publicatie/de-noord-atlantische-oscillatie>

³² <http://today.duke.edu/2008/01/naochanges.html>

Uitgerekend de Noord-Atlantische Oceaan is zeer bepalend voor het weer en het klimaat in Nederland en West-Europa. We komen hier dan ook zeker op terug als we in een later hoofdstuk inzoomen op het klimaat in Nederland.

Samenvattend

Modellen hebben grote moeite om temperatuurveranderingen in de oceanen sinds 1980 goed te simuleren. Figuur 2.28 maakt dat nogmaals inzichtelijk.



Figuur 2.28: Patroon van opwarming in de oceanen sinds 1982. Links de modellen, rechts de waarnemingen.

Modellen (links) warmen de oceanen vrij gelijkmatig op. De werkelijkheid (rechts) is veel gevarieerder. De C-vormige opwarming in het westelijke deel van de Grote Oceaan zijn 'overblijfselen' van El Niño's. Bob Tisdale, van wiens blog veel van bovenstaande figuren afkomstig zijn, suggereert dat we een periode achter de rug hebben waarin El Niño's 'dominant' zijn. De La Niña's brengen met name na de krachtige El Niño's van 1986-1988, 1997-1998 en 2015-2016 de temperatuur in het westelijk deel van de Grote Oceaan niet volledig terug tot normale waarden. Daarom is er een netto opwarming sinds 1982. Zolang modellen dit patroon niet weten te simuleren is het erg prematuur om te concluderen dat deze opwarming gedreven wordt door de gestegen broeikasgasconcentratie in de atmosfeer, aldus Tisdale.³³

³³ Zie <https://bobtisdale.wordpress.com/2014/03/26/maybe-the-ipccs-modelers-should-try-to-simulate-earths-oceans/> en <https://bobtisdale.wordpress.com/2014/04/06/el-nino-residuals-cause-the-c-shaped-warming-pattern-in-the-pacific/>

De sterke opwarming in de Noord-Atlantische Oceaan houdt zoals gezegd verband met de positieve fase van de AMO. Het is aannemelijk dat de AMO de komende dertig jaar weer terugkeert naar de negatieve fase en in dat geval zal het patroon van sterke opwarming langzaam weer verdwijnen. Dit zal ongetwijfeld gevolgen hebben voor de ontwikkeling van zowel het mondiale klimaat als dat in West-Europa.

Klimaatgevoeligheid

Klimaatmodellen overschatten de opwarming van het klimaat sinds 1979. Dat is precies de opwarming die volgens het IPCC juist met grote zekerheid is toe te schrijven aan broeikasgassen. Dat roept de vraag op of klimaatmodellen niet te 'gevoelig' zijn voor broeikasgassen.

Juist over die vraag woedt de laatste jaren een verhit debat, uitgebreid beschreven in het rapport *Een Gevoelige Kwestie*.³⁴ Dat debat is nog lang niet over en gezien het belang van klimaatgevoeligheid voor toekomstige opwarming is een samenvatting hier noodzakelijk. De klimaatmodellen die het IPCC in het vijfde IPCC-rapport gebruikte hebben een gemiddelde klimaatgevoeligheid van 3,4 graden Celsius. Dit is de zogenaamde evenwichtsklimaatgevoeligheid (Equilibrium Climate Sensitivity, ECS). Zoals het woord al zegt is dit de mondiale opwarming door een verdubbeling van de CO₂-concentratie nadat het klimaatsysteem weer in evenwicht is gekomen. Dat duurt vele eeuwen, want het duurt lang voordat oceaan en atmosfeer met elkaar in evenwicht zijn. Dus de ECS bepaalt de opwarming op de langere termijn en zegt ook iets over zeespiegelstijging.

Omdat ECS niet erg praktisch is vanuit beleidsperspectief voor de komende decennia is de laatste jaren een tweede vorm van klimaatgevoeligheid populair geworden: de overgangsklimaatgevoeligheid, ofwel de Transient Climate Response (TCR). Bij definitie is TCR de opwarming die je bereikt nadat je de CO₂-concentratie verdubbelt in 70 jaar tijd. TCR is dus relevanter voor de opwarming in de 21e eeuw. Het zegt weer minder over een mogelijke zeespiegelstijging.

Klimaatgevoeligheid is al vanaf het Amerikaanse Charney-rapport in 1979 een belangrijk begrip in de klimaatdiscussie. Immers, het geeft aan hoe snel de aarde zal opwarmen als CO₂ stijgt. In de tabel hieronder is te zien welke schattingen in de loop der tijd gepubliceerd zijn in diverse rapporten, waaronder die van het IPCC:

³⁴ <http://www.groenerekenkamer.nl/2365/een-gevoelige-kwestie/>

Tabel 1: Ontwikkeling van de schattingen voor evenwichtsklimaatgevoeligheid (ECS) in de afgelopen 35 jaar en voor de range van de overgangsklimaatgevoeligheid (TCR) sinds 2001

	ECS Range (°C)	ECS Beste schatting (°C)	TCR Range (°C)
Charney Report 1979	1,5–4,5	3,0	
NAS Report 1983	1,5–4,5	3,0	
Villach Conference 1985	1,5–4,5	3,0	
IPCC First Assessment 1990	1,5–4,5	2,5	
IPCC Second Assessment 1995	1,5–4,5	2,5	
IPCC Third Assessment 2001	1,5–4,5	Geen	1,1–3,1 ^a
IPCC Fourth Assessment 2007	2,0–4,5 ^b	3,0	1,0–3,0 ^c
IPCC Fifth Assessment 2013	1,5–4,5 ^d	Geen	1,0–2,5 ^d

^aRange voor AOGCMs. ^b17–83% range; voor AR4 waren de ranges niet duidelijk gedefinieerd in kanstermen. ^c10–90% range. ^dWaarschijnlijkheidsrange.

Tabel 2.1: Schattingen voor ECS en TCR in de afgelopen 35 jaar.

De range voor ECS was vrijwel altijd 1,5 tot 4,5 graden, met uitzondering van het vierde IPCC-rapport toen de ondergrens verhoogd werd tot 2 graden. De beste schatting voor ECS was 3 of 2,5 graden. TCR wordt vanaf het derde IPCC-rapport genoemd. De range in het vijfde IPCC-rapport was 1 tot 2,5 graden. Een beste schatting is nooit gegeven.

Simulaties met mondiale klimaatmodellen hebben altijd een sleutelrol gespeeld bij het bepalen van de ECS. Aanvankelijk simuleerden GCMs de oceanen nog niet maar tegenwoordig worden ze gebruikt met gekoppelde atmosfeer-oceaanmodellen (AOGCMs). AOGCMs hebben wisselende klimaatgevoeligheden maar het gemiddelde van alle door het IPCC gebruikte modellen ligt rond de 3,4°C, niet ver boven de waarde voor de beste schatting in de afgelopen 35 jaar. Zoals te zien is in de tabel viel de beste schatting voor ECS meestal ongeveer middenin de gegeven range. De TCR van klimaatmodellen is ook af te leiden uit modelsimulaties. Gemiddeld komen AOGCMs uit op een TCR van ongeveer 1,8°C.

Gezien het belang van klimaatgevoeligheid voor toekomstige opwarming is het opmerkelijk dat de range in de afgelopen 35 jaar niet kleiner is geworden. Een Brits artikel claimt dat halvering van de onzekerheidsmarge in TCR tien biljoen dollar zou kunnen opleveren omdat gericht beleid in dat geval mogelijk zou kunnen worden.³⁵

De laatste jaren is het mogelijk geworden om op basis van observaties klimaatgevoeligheid te schatten. Die schattingen lijken de onzekerheid rond klimaatgevoeligheid te verkleinen. En bevatten nog eens goed nieuws ook, want de klimaatgevoeligheid lijkt aanzienlijk kleiner te zijn dan de waardes die al dertig jaar de ronde doen. De Britse onderzoeker Nic Lewis en

³⁵ Hope, C, 2015. The \$10 trillion value of better information about the transient climate response. Roy Soc Phil Trans A, 327, DOI: 10.1098/rsta.2014.0429

ikzelf publiceerden dit ‘goede nieuws’ in 2014 in een uitgebreid rapport.³⁶ Een vertaling verscheen bij de Groene Rekenkamer.³⁷

Wat is er precies aan de hand? Zoals gezegd werden schattingen voor klimaatgevoeligheid in het verleden vooral bepaald met behulp van klimaatmodellen. De laatste jaren is het ook mogelijk geworden om klimaatgevoeligheid te schatten aan de hand van observaties. We spreken dan over de periode sinds 1850, waarin er geleidelijk aan steeds meer temperatuurmetingen beschikbaar komen. De Britse onderzoeker Jonathan Gregory, die ook aan het vijfde IPCC-rapport meewerkte, publiceerde in 2002 een paper waarin hij deze observationele methode beschreef.³⁸

De auteurs beschreven het voordeel van hun nieuwe methode in hun samenvatting: ‘Omdat de methode geen gebruik maakt van de klimaatgevoeligheid zoals die wordt gesimuleerd door klimaatmodellen, voorziet zij in een onafhankelijke op waarnemingen gebaseerde afbakening van deze belangrijke parameter van het klimaatsysteem.’ De aanpak wordt ook wel de energiebalans-methode genoemd. Op het moment dat CO₂ toeneemt in de atmosfeer kan er minder infrarode straling ontsnappen naar het heelal. Er komt dus meer zonlicht binnen dan er aan infrarode straling uitgaat. Deze stralingsonbalans bovenin de atmosfeer is de drijvende kracht achter het versterkte broeikaseffect. Onderzoekers noemen deze onbalans ook wel stralingsforcering (radiative forcing). Het systeem zal ernaar streven om de balans te herstellen maar bij een hogere CO₂-concentratie kan dat alleen door de temperatuur omhoog te brengen zodat de atmosfeer efficiënter infrarode straling uitzendt. Het grootste deel van de extra energie in het systeem zal gaan zitten in de oceanen maar ook het oppervlak en de atmosfeer zullen warmer worden.

Op basis van behoud van energie geldt $ECS = F_{2 \times CO_2} \times \Delta T / (\Delta F - \Delta Q)$, waar ΔQ de verandering is in de warmteopname door de oceanen, ΔF de stralingsforcering en ΔT de verandering in de mondiale temperatuur. $F_{2 \times CO_2}$ is de stralingsforcering door een verdubbeling van de CO₂-concentratie.

Als de toename in forcing ΔF eindigt in een periode van 60 tot 80 jaar dan kan TCR op nagenoeg dezelfde wijze geschat worden: $TCR = F_{2 \times CO_2} \times \Delta T / \Delta F$. Het enige verschil tussen ECS en TCR is dus de term ΔQ , de energie die in de oceanen gaat zitten. Vandaar dat TCR weinig zegt over zeespiegelstijging en ECS wel.

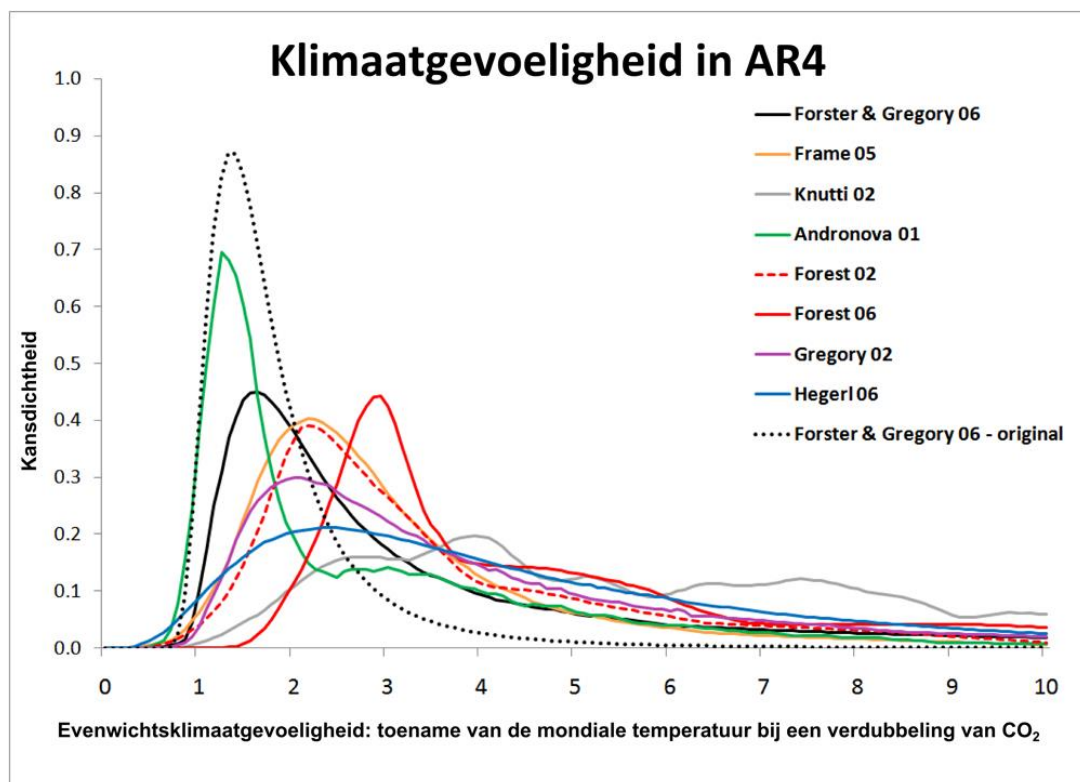
³⁶ A Sensitive Matter, How the IPCC buried evidence showing good news about global warming, Nic Lewis, Marcel Crok, GWPF 2014, <http://www.thegwpf.org/content/uploads/2014/02/A-Sensitive-Matter-Foreword-inc.pdf>

³⁷ <http://www.groenerekenkamer.nl/2365/een-gevoelige-kwestie/>

³⁸ Gregory, J.M., R.J. Stouffer, S.C.B. Raper, P.A. Stott, and N.A. Rayner, 2002. An observationally based estimate of the climate sensitivity. *J. Clim.*, 15: 3117–3121.

De methode is dus afhankelijk van betrouwbare en redelijk afgebakende schattingen van veranderingen in de mondiale stralingsforcering, de stralingsonbalans bovenin de atmosfeer (of diens tegenhanger de warmteopname van het klimaatsysteem, voornamelijk de oceanen) en de mondiale temperatuur. Maar ervan uitgaande dat dat is gebeurd, bestaat er weinig twijfel over dat deze benadering de meest robuuste schattingen voor ECS en TCR oplevert. Energiebalansschattingen zijn in feite de gouden standaard.

Gregory kwam met deze methode in 2002 tot een schatting voor ECS van $6,2^{\circ}\text{C}$ met een range van $1,1^{\circ}\text{C}$ tot oneindig en werd, afgebroken bij 10°C , getoond in een prominente figuur in het vierde IPCC-rapport (AR4):



Figuur 2.29: Replicatie van Figuur 9.20 uit het AR4 WGI-rapport. De gestippelde zwarte lijn is toegevoegd en laat de oorspronkelijke resultaten zien uit de paper Forster/Gregory (2006).

In het rapport *A Sensitive Matter* is in detail beschreven dat vrijwel al deze studies problematisch zijn. De oorspronkelijke Gregory studie gebruikte onder andere een verkeerde dataset voor de oceanen en een veel te lage forcering. Vooral die kleine forcering leidt tot de zeer 'lange staart' (fat tail) in de waarschijnlijkheidsverdeling in figuur 18. Nadat Lewis deze fouten gecorrigeerd had zakte de beste schatting voor ECS van $6,2^{\circ}\text{C}$ tot $1,8^{\circ}\text{C}$. Ook verdwijnt de *fat tail* grotendeels.³⁹

³⁹ <http://judithcurry.com/2011/07/07/climate-sensitivity-follow-up/>

De enige echt goede observationele schatting in het vierde rapport was een studie van Forster en opnieuw Gregory uit 2006. Hun beste schatting was 1,6°C, de waarschijnlijkheidsrange was 1,2–2,3°C en 95% van de waarschijnlijkheidsverdeling lag in de range 1,0–4,1°C. Maar deze studie is uiteindelijk op foutieve wijze in het IPCC-rapport terecht gekomen. De oorspronkelijke, veel beter afgebakende *probability density function* (pdf) is weergegeven met een stippellijn in figuur 18.⁴⁰

Kortom in het vierde rapport had het IPCC al tot de conclusie kunnen komen dat goede observationele schattingen uitkomen op veel lagere waarden voor klimaatgevoeligheid (1,6–1,8°C) dan de klimaatmodellen. Het tegenovergestelde gebeurde echter, het IPCC stelde voor het eerst de ondergrens voor ECS naar boven bij van 1,5°C tot 2°C.

Het goede nieuws in het vijfde IPCC-rapport

Zoals wij beschrijven in het rapport Een Gevoelige Kwestie bevat het vijfde IPCC-rapport uitermate goed nieuws over klimaatgevoeligheid. Dat goede nieuws komt uit onverwachte hoek. Uit de formule voor ECS ($ECS = F_2 \times CO_2 \times \Delta T / (\Delta F - \Delta Q)$) kunt u opmaken dat ECS zal dalen als ΔF stijgt. Welnu, dat is precies wat er tussen het vierde en vijfde rapport gebeurde en dit had deels te maken met de immer stijgende CO₂-concentratie maar vooral met nieuwe inzichten over het effect van aerosolen.

Onderzoekers gaan ervan uit dat aerosolen – vanwege hun afkoelende werking op het klimaat – een deel van de opwarming door broeikasgassen teniet hebben gedaan. Het effect van aerosolen is echter de grootste onzekerheid bij onze schattingen voor de totale antropogene forcering. Kennis over aerosolen is daarom van cruciaal belang voor schattingen van klimaatgevoeligheid.

Op dit vlak heeft het vijfde IPCC-rapport (AR5) uitstekend nieuws voor ons in petto: de schattingen voor het afkoelende effect van aerosolen zijn aanzienlijk kleiner dan die in AR4. Er is weinig verandering geweest in de emissies van aerosolen, maar de schatting voor aerosolforcering is flink naar beneden bijgesteld, van –1,3 W/m² in AR4 tot –0,9 W/m² in AR5. Dit is puur een kwestie van wat het IPCC ‘verbeterd inzicht’ noemt. Als gevolg hiervan is de totale antropogene forcering flink toegenomen, tot 2,29 W/m². De Summary for Policy Makers bracht dit goede nieuws: De beste schatting voor de totale antropogene stralingsforcering in 2011 is 43% hoger dan de gerapporteerde waarde in AR4 voor het jaar 2005.

In onderstaande figuur is de ECS berekend op basis van gegevens uit het IPCC-rapport zelf:

⁴⁰ Zie voor meer details het rapport A Sensitive Matter, blz. 24-27 en <http://judithcurry.com/2011/07/07/climate-sensitivity-follow-up/>

Energy budget method: gold standard

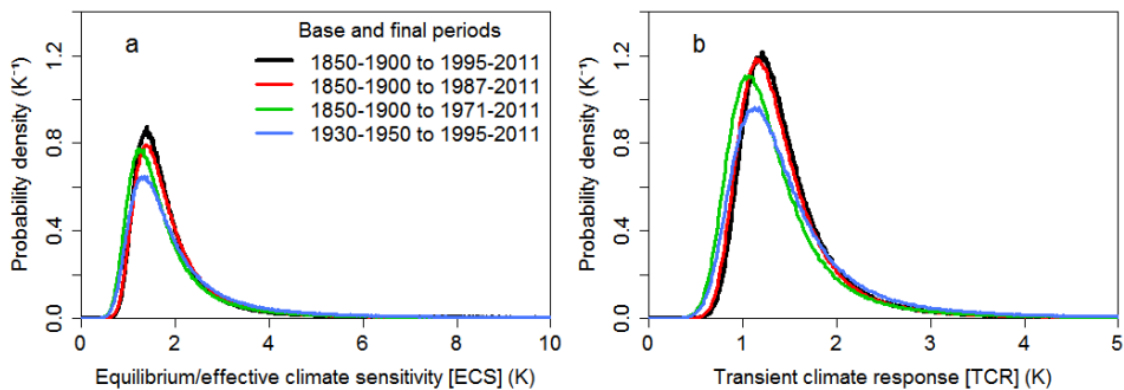
$$\Delta T$$

$$ECS = \frac{\Delta T}{(\Delta F - \Delta Q)} \times F_{2\times CO_2} \quad \Delta = \text{change in}$$

- Periods 1850-1900 and 2011
- $F_{2\times} = 3.71 \text{ W/m}^2$
- $\Delta T = 0.8 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\Delta F = 2.29 \text{ W/m}^2$
- $\Delta Q = 0.5 \text{ W/m}^2$
- **$ECS = 0.8 / (2.29 - 0.5) \times 3.71 = 1.66^\circ\text{C}$**

Figuur 2.30: ECS berekend op basis van gegevens uit het vijfde IPCC-rapport.

Zo kom je op een ECS van $1,66^\circ\text{C}$, veel lager dan de gemiddelde klimaatgevoeligheid van $3,4^\circ\text{C}$ van klimaatmodellen. Nu is bovenstaande voorbeeld alleen maar een illustratie zonder onzekerheidsmarges. Nic Lewis en Judith Curry, een Amerikaanse onderzoeker die het voorwoord bij ons rapport schreef, deden deze exercitie later in 2014 nog eens uitgebreid over en publiceerden het resultaat in *Climate Dynamics*.⁴¹ De resulterende waarschijnlijkheidsverdelingen voor ECS en TCR zien er als volgt uit:



Figuur 2.31: observationele schattingen voor ECS en TCR op basis van gegevens uit het vijfde IPCC-rapport.

Voor wie graag cijfers wil zien hier een uitgebreide tabel waarin de resultaten van deze studie vergeleken worden met eerdere studies en assessments⁴²:

⁴¹ Lewis N., Curry J.A., 2014: The implications for climate sensitivity of AR5 forcing and heat uptake estimates. *Clim. Dyn.* DOI 10.1007/s00382-014-2342-y

⁴² <http://judithcurry.com/2014/09/24/lewis-and-curry-climate-sensitivity-uncertainty/>

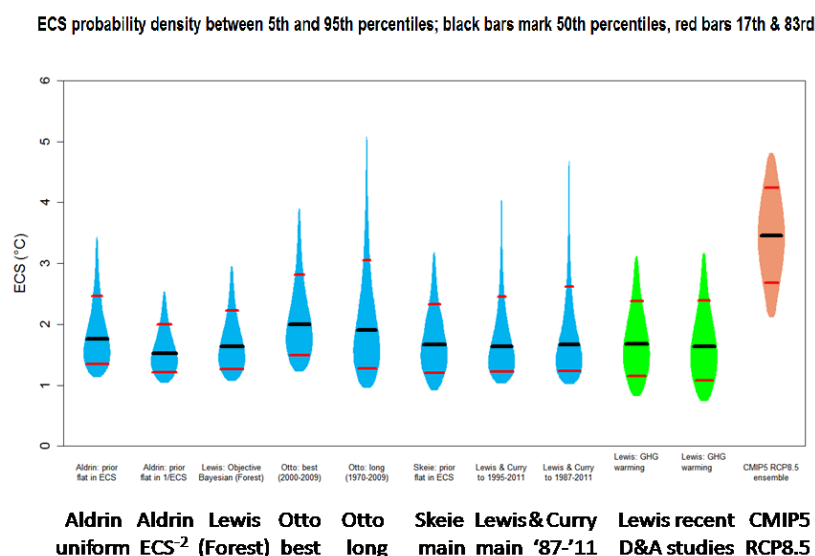
Base period	Final period	ECS best estimate [°C]	ECS 17-83% range [°C]	ECS 5-95% range [°C]	TCR best estimate [°C]	TCR 17-83% range [°C]	TCR 5-95% range [°C]
1859–1882	1995–2011	1.64	1.25–2.45	1.05–4.05	1.33	1.05–1.8	0.9–2.5
1850–1900	1987–2011	1.67	1.25–2.6	1.0–4.75	1.31	1.0–1.8	0.85–2.55
1850–1900	1971–2011	1.56	1.1–2.6	0.9–5.40	1.22	0.9–1.8	0.75–2.7
1930–1950	1995–2011	1.72	1.15–3.15	0.9–9.45	1.33	0.95–2.0	0.8–3.3
<i>Relevant other ranges:</i>							
Otto et al: 2000–09 data		2.0	1.5–2.8	1.2–3.9	1.33	1.05–1.65	0.9–1.95
Otto et al: '70– 09 data		1.9	1.3–3.05	0.95–5.0	1.36	0.95–1.9	0.75–2.55
AR5 (Chapter 10)			1.5–4.5	1–NA		1–2.5	NA–3
Lewis & Crok report		1.75	1.25–3.0		1.35	1–2	

Tabel 2.2: Resultaten van Lewis/Curry 2014 vergeleken met Otto et al., het Lewis/Crok-rapport en AR5.

Lewis beschouwt de vetgedrukte cijfers als de beste schattingen. Met 1,64°C ligt de beste schatting voor ECS tegen de ondergrens van het IPCC van 1,5°C aan en ver beneden het gemiddelde van 3,4 van klimaatmodellen. Ook de TCR van 1,33°C is aanzienlijk lager dan de 1,8°C van klimaatmodellen. En de bovengrens voor de waarschijnlijkheidsrange (likely range, 17-83%) voor TCR is 1,8°C, gelijk dus aan het gemiddelde van klimaatmodellen.

Bij de observationele schattingen gaan Lewis en Curry uit van de forcering van het IPCC zelf. Zoals we eerder zagen in figuur 2.4 worden de forceringen volledig gedomineerd door broeikasgassen en aerosolen. Bij de observationele schattingen voor ECS en TCR ga je er dus vanuit dat vrijwel alle opwarming sinds 1850 door de mens komt. Maar zelfs met deze conservatieve aanname dat vrijwel alle opwarming door CO₂ en andere broeikasgassen komt, kom je uit op lage schattingen voor ECS en TCR.

Er is inmiddels een hele reeks aan studies verschenen met observationele schattingen voor klimaatgevoeligheid, waarvan enkele gepubliceerd door Lewis. Lewis vatte de resultaten daarvan samen in onderstaande zogenaamde *violin plots*:



Figuur 2.32: recent gepubliceerde observationele schattingen voor ECS (in blauw en groen) versus de spreiding in klimaatmodellen (in rood). Bron: Lewis.⁴³

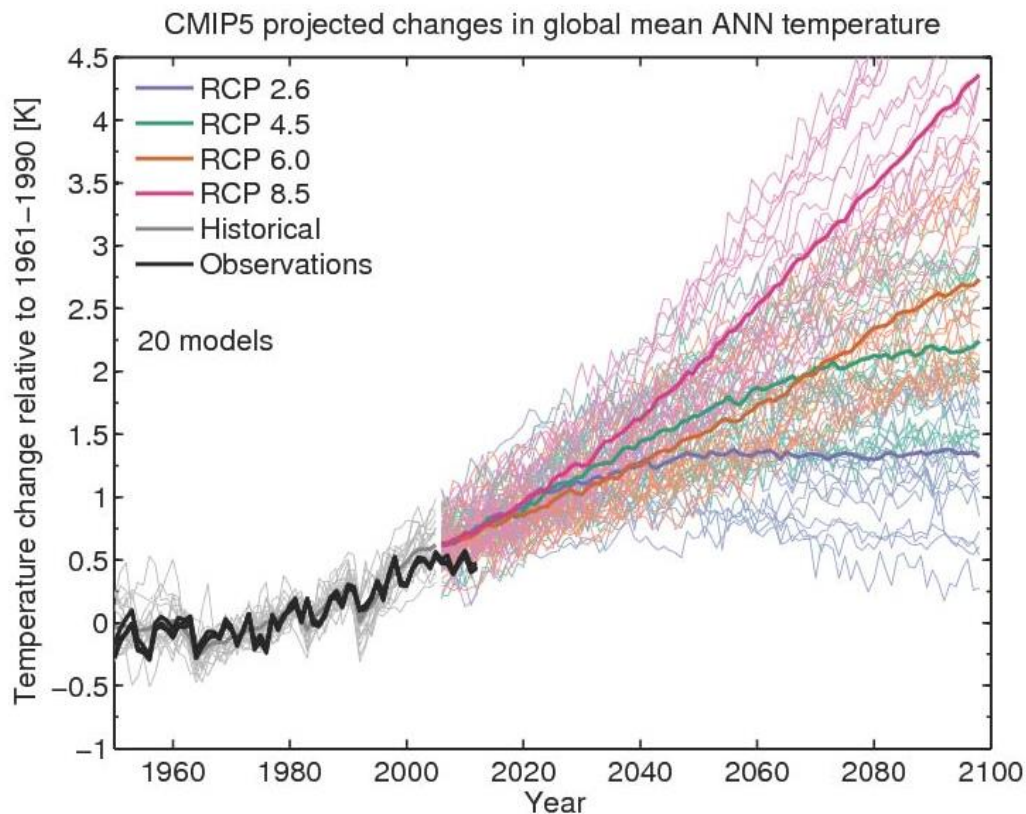
De boodschap is duidelijk, observationele schattingen liggen aanzienlijk lager dan modelschattingen. IPCC-rapporten leunen altijd sterk op modelsimulaties. Lewis en ik opperen in ons rapport dat het IPCC daarom flink in de maag zat met de lagere observationele schattingen. Hoe loste het IPCC dit dilemma op? Het besloot geen beste schatting voor ECS te geven – terwijl dat in vierde rapport nog 3 graden Celsius was – maar wel de ondergrens, die in AR4 verhoogd was tot 2°C weer te verlagen tot 1,5°C om daarmee recht te doen aan de observationele schattingen die tussen de 1,5 en de 2°C liggen. Het IPCC gaf dit echter nauwelijks aandacht. In de Summary for Policy Makers werd het ontbreken van een beste schatting voor ECS slechts vermeld in een voetnoot. Die stelde: ‘Er kan nu geen beste schatting voor de evenwichtsklimaatgevoeligheid gegeven worden vanwege een gebrek aan overeenstemming over de waardes tussen verschillende bewijzen en studies.’

Dit is een legitieme conclusie. In het rapport Een Gevoelige Kwestie stellen wij echter dat het IPCC beleidsmakers veel duidelijker had moeten attenderen op het grote verschil tussen observationele en modelschattingen. Want in de rest van het rapport slaat het IPCC vervolgens aan het rekenen met de modellen en wordt al spoedig ‘vergeten’ dat deze modellen weleens ‘overgevoelig’ kunnen zijn. Het zijn deze modellen waarmee prognoses worden gedaan voor 2100. Zowel mondiaal als voor Nederland in de KNMI-scenario’s. Nergens vermeldt het IPCC (of het KNMI) een disclaimer dat die scenario’s tot stand zijn gekomen met modellen die een aanzienlijk hogere klimaatgevoeligheid hebben dan de observaties suggereren.

⁴³ De ‘groene’ schattingen zijn gebaseerd op detectie en attributie-studies. Meer hierover is te lezen in de publicatie: Lewis, N, 2015. Implications of recent multimodel attribution studies for climate sensitivity. Clim Dyn DOI 10.1007/s00382-015-2653-7

De toekomst

In de media verschijnen geregeld berichten dat de internationaal afgesproken tweegradengrens niet meer haalbaar is. Hoe komt men tot die conclusie? Dat kunnen we fraai illustreren aan de hand van een figuur uit het vijfde IPCC-rapport.



Figuur 2.33: Projecties van de mondiale temperatuur op basis van vier scenario's. Bron: IPCC.

De emissies zitten momenteel boven het hoogste scenario, RCP8.5. De concentraties zitten echter ergens tussen RCP4.5 en RCP6.0 in. Het startjaar voor deze scenario's was 2005 en het is nog te vroeg om te stellen welk scenario qua concentraties uiteindelijk het meest realistisch zal zijn. Eerder dit hoofdstuk bespraken we dat RCP8.5 een onrealistische terugkeer naar steenkool inhoudt en daarom ook als scenario niet realistisch zal zijn.

Deze figuur heeft 1961-1990 als referentieperiode. Die periode was 0,3 graden warmer dan 1850-1900, de periode die het IPCC beschouwt als 'pre-industrieel'. De tweegradengrens ligt in deze grafiek dus bij 1,7°C. Met name het hoogste scenario (RCP8.5) gaat al binnen nu en 25 jaar over de tweegradengrens heen. Dit is de voornaamste reden dat het halen van de tweegradengrens onwaarschijnlijk wordt geacht.

In het publieke debat over klimaatverandering en met name het halen van de doelstelling uit het Parijs klimaatakkoord ontstaat al snel de neiging om de hierboven getoonde

modelskenario's letterlijk te nemen. In dit hoofdstuk hebben we diverse argumenten aangedragen waarom dat voorbarig en onverstandig is. Het gaat ons uiteindelijk allemaal om het 'echte' klimaat buiten en niet om het virtuele klimaat in de GCMs.

Klimaatmodellen zijn een stuk gevoeliger voor broeikasgassen dan de observaties suggereren. Is het niet mogelijk om een projectie te doen op basis van de observationele schattingen voor bijvoorbeeld de TCR? Dat is inderdaad mogelijk. In het rapport Een Gevoelige Kwestie publiceerden we deze tabel:

Tabel 3: Opwarming tot aan het eind van de 21e eeuw

Scenario	Opwarming in 2081–2100 op basis van: de CMIP5-modellen				CMIP5/TCR ratio t.o.v.
	°C t.o.v. 1850–1900	°C t.o.v. 2012*	°C t.o.v. 1850–1900*	°C t.o.v. 2012	
Referentie	1850–1900	2012*	1850–1900*	2012	2012
RCP2.6	1,6	0,8	1,0	0,2	3,4×
RCP4.5	2,4	1,6	1,6	0,8	2,0×
RCP6.0	2,8	2,0	2,0	1,2	1,7×
RCP8.5	4,3	3,5	2,9	2,1	1,7×

Tabel 2.3: Projecties op basis van observationele schattingen voor TCR versus de modelprojecties uit het vijfde IPCC-rapport.

De observationeel bepaalde TCR gekoppeld aan de forcering uit de scenario's leiden bij RCP4.5 en RCP6.0 rond 2100 tot respectievelijk 1,6 en 2,0°C aan opwarming.⁴⁴ In beide gevallen bereiken we de twee gradengrens dus pas eind deze eeuw. Bij RCP8.5 gaan we wel over de twee graden heen, maar wel veel later dan de klimaatmodellen van het IPCC suggereren. En RCP8.5 is dus een op energie-technische en economische gronden onwaarschijnlijk scenario.

Observationele schattingen voor TCR en ECS kunnen dus enorme consequenties hebben voor ons klimaatbeleid. De opwarming zal vermoedelijk veel minder snel verlopen dan de scenario's van het IPCC aangeven. Paniekvoetbal is dus niet nodig.

Onze analyse in dit hoofdstuk heeft ook consequenties voor de KNMI-scenario's. Zoals gezegd is RCP8.5 een onwaarschijnlijk scenario wat betekent dat de opwarming in het WH en WL-scenario ook als onwaarschijnlijk moet worden betiteld. Want het is een combinatie van een onrealistisch snelle toename van broeikasgassen in de atmosfeer gekoppeld aan 'overgevoelige' klimaatmodellen. De GH en GL-scenario's (die gebaseerd zijn op RCP4.5) zijn wel te beschouwen als een soort business as usual scenario. In RCP4.5 blijven de wereldwijde emissies van broeikasgassen tot 2040-2050 nog stijgen om vervolgens daarna te gaan dalen. Op basis van observationele schattingen voor klimaatgevoeligheid zou de

⁴⁴ We houden rekening met de zogenaamde 'heat in the pipeline' die het gevolg is van de energie die nu al in de oceanen is gaan zitten. Deze bijdrage is overigens vrij gering, zo'n 0,15°C in 2100.

wereldwijde opwarming in 2050 volgens dit scenario in de orde van 0,4°C kunnen liggen. Aanzienlijk lager dus dan de 1,0 graden in het KNMI-scenario dus.

Goed of slecht?

Tot slot, zijn klimaatmodellen goed of slecht? Het antwoord op die vraag is subjectief. Zoals onze voorbeelden duidelijk hebben gemaakt hebben modellen nog de grootste moeite om zelfs maar het recente klimaat enigszins realistisch te simuleren. Klimaat is iets van lange tijdschalen en om die reden zijn modellen ook nagenoeg niet te falsificeren op een termijn van tien tot twintig jaar. Het is onduidelijk wat de 'onzekerheidsmarge' rond het modelgemiddelde precies inhoudt. Hoe meer runs je doet, hoe groter de 'onzekerheidsmarge' lijkt te worden en hoe groter dus de kans dat de waarnemingen 'consistent zijn' met de modellen.

Er bestaat geen verificatie- en validatie-protocol voor klimaatmodellen. Er is geen set van criteria waarop klimaatmodellen stuk voor stuk getoetst worden. De modellen zijn continu in ontwikkeling. Het IPCC claimt in vrijwel ieder rapport dat er 'vooruitgang' is geboekt ten opzichte van het vorige rapport. Maar zijn de modellen goed genoeg en goed genoeg waarvoor? Die vraag wordt eigenlijk niet gesteld, niet door het IPCC en niet door het KNMI. Men lijkt te denken: het is het enige en het 'beste' wat we hebben dus we moeten het er maar mee doen, zonder deze gedachte overigens expliciet te maken.

Dikwijls komt het er bij discussies over klimaatmodellen op neer dat voor de een het glas halfvol is en voor de ander halfleeg. Wij zou op dit moment echter zeggen dat het glas slechts een kwart vol is. Er zijn te veel fundamentele problemen om zelfs maar het klimaat van de afgelopen eeuw enigszins realistisch te simuleren.

Het is op basis van de tekortkomingen van de modellen op mondiale schaal zeer de vraag of je überhaupt regionale scenario's moet draaien. Maar goed, dat gebeurt en in de volgende hoofdstukken zullen we bekijken wat dat oplevert voor Nederland.

3. Klimaatverandering in Nederland

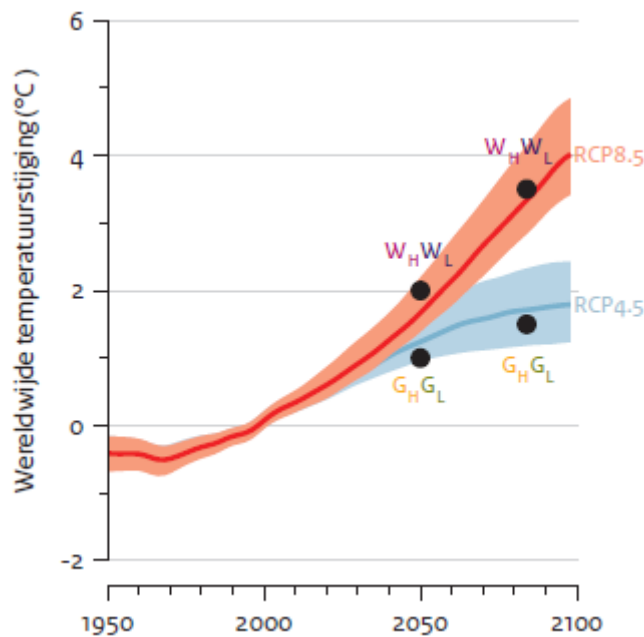
Wat staat ons in Nederland de komende eeuw te wachten aan klimaatverandering? Met een onderwerp dat internationaal zo hoog op de agenda staat wil iedereen dat natuurlijk graag weten. Nederland doet al eeuwenlang aan 'klimaatadaptatie', met name in de omgang met de zee. Nederland is nu dankzij welvaart en technologie veiliger dan ooit, zoveel is wel zeker, maar uiteraard zijn we ook kwetsbaar. Grote delen van met name de Randstad liggen beneden zeeniveau en overstromingen vanuit een van de rivieren dan wel de zee zouden dan ook voor grote schade en voor veel slachtoffers kunnen zorgen.

Valt er iets te zeggen over de veranderingen van ons klimaat in de komende eeuw? Die vraag heeft het KNMI feitelijk met 'ja' beantwoord want anders zouden de klimaatscenario's niet gemaakt zijn. Toch?

In de volgende hoofdstukken zoomen we in op de veranderingen in het Nederlandse klimaat en dat van de ons omringende landen in de afgelopen eeuw en op de veranderingen voor de toekomst die uit de scenario's komen rollen.

Het KNMI heeft in 2006 voor het eerst klimaatscenario's gemaakt. In 2014 is die exercitie herhaald met de zogenoemde KNMI Next scenario's. Aangezien de toekomstverwachtingen in de scenario's van 2006 en 2014 niet zo veel van elkaar verschillen beperken we ons hier tot de klimaatscenario's uit 2014.

Tot nu toe hebben we vooral aandacht geschonken aan de mondiale klimaatveranderingen en hoe goed of slecht de mondiale klimaatmodellen de recente periode simuleren. Figuur 3.1 toont de klimaatprognoses voor Nederland ten opzichte van de mondiale scenario's uit het vijfde IPCC-rapport uit 2013. Het KNMI heeft ervoor gekozen om twee van de wereldwijde scenario's eruit te lichten, het gematigde RCP4.5- en het tamelijk extreme RCP8.5-scenario.



Figuur 3.1: Klimaatscenario's van het KNMI voor 2050 en 2085 ten opzichte van de mondiale scenario's van het IPCC. Twee uitstootscenario's: RCP4.5 (stabilisatie) en RCP8.5 (hoge uitstoot). Gekleurde banden: spreiding tussen klimaatmodellen; lijnen: gemiddelde over de modellen; Punten: wereldwijde temperatuurstijging zoals toegepast in de KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland.⁴⁵

De zwarte stippen in de figuur zijn dus niet de uitkomsten van de KNMI-scenario's, het is de selectie van de modellen die als uitgangspunt dienden voor de KNMI-scenario's. Het is nog niet zo eenvoudig om erachter te komen welke stappen nu door het KNMI zijn genomen om uitgaande van een selectie van de mondiale modellen te komen tot de regionale scenario's voor Nederland.

De KNMI-brochure over de klimaatscenario's schrijft daarover het volgende:

“Voor de scenario's zijn de uitkomsten van alle IPCC-modelberekeningen geanalyseerd. Daarnaast zijn er additionele modelberekeningen met de KNMI-klimaatmodellen EC-Earth en RACMO2 gemaakt, waarbij in totaal meer dan 1200 jaar aan klimaatdata voor Nederland is geproduceerd met een ongekend hoge ruimtelijke resolutie van ongeveer 10 km. Deze resolutie is 4 keer zo hoog als in de KNMI'06 scenario's.

Op basis van de IPCC-modelberekeningen zijn er voor elk van de vier KNMI'14-scenario's 8 modelberekeningen geselecteerd. Hierbij is gebruik gemaakt van het scenario-onderscheid op basis van wereldwijde opwarming en verandering in circulatiepatroon. Samen bestrijken deze $4 \times 8 = 32$ berekeningen het relevante gedeelte van de veranderingen volgens de andere IPCC-modelberekeningen.

De beschikbaarheid van meerdere berekeningen voor elk scenario maakt het bovendien

⁴⁵ http://www.klimaatscenarios.nl/kerncijfers/scenario_2030.html

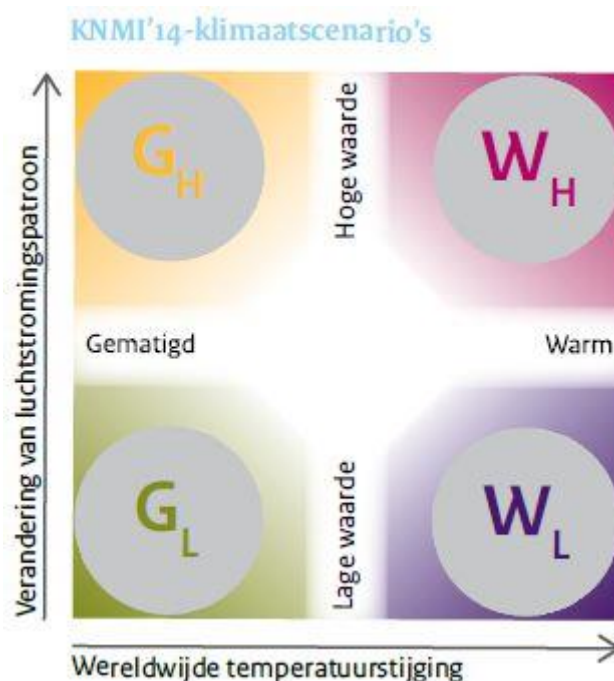
mogelijk klimaatverandering (het signaal) te onderscheiden van de natuurlijke variaties (de ruis). Naast deze modelberekeningen is voor een aantal indicatoren, bijvoorbeeld voor neerslagextremen, gebruik gemaakt van aanvullende informatie uit waarnemingen en zeer hoge resolutie modellen. Voor gedetailleerde informatie over de gevolgde methode wordt verwezen naar het wetenschappelijk rapport.”⁴⁶

Het wetenschappelijke achtergronddocument geeft de volgende uitleg:

“Also the EC-Earth model (Hazeleger et al. 2012) participated to the CMIP5 project, making available 8 projections for each of the RCPs 4.5 and 8.5. In addition, KNMI and other EC-Earth members executed another set of 8 projections for the RCP8.5 scenario, using the same model version and enlarging the ensemble size for this configuration.

The 8 EC-Earth members running the RCP8.5 scenario that have been submitted to CMIP5 have been further downscaled using the regional climate model RACMO2 (Van Meijgaard et al. 2008). This model has been set-up at a grid spacing of roughly 10km. Generally daily outputs have been retrieved from these experiments, and used for analysing regional climate responses, and stratified along the lines as explained in section 2.3.”

Het RCP8.5-scenario heet bij de KNMI-scenario's "W" van warm en het RCP4.5-scenario heet "G" van gematigd. Dus voor KNMI Next zijn twee in plaats van de mondiale vier scenario's gebruikt. Het KNMI komt uiteindelijk wel tot vier scenario's omdat nog extra onderscheid gemaakt wordt tussen hoge en lage natuurlijke variaties (H en L). Gecombineerd geeft dit dus de vier combinatie G_L , G_H , W_L en W_H . Visueel als volgt weergegeven:



Figuur 3.2: De vier scenario's van het KNMI.

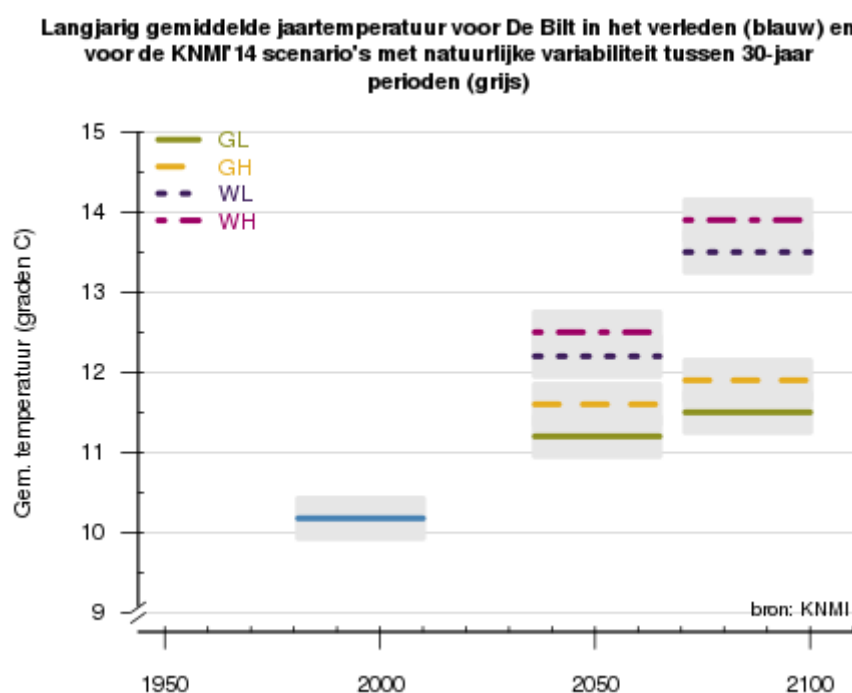
⁴⁶ KNMI, 2014: Climate Change scenarios for the 21st Century – A Netherlands perspective. Scientific Report WR2014-01, KNMI, De Bilt, The Netherlands. www.klimaatscenario's.nl

De keuze om naast G en W ook gebruik te maken van H en L is als volgt ingegeven:

“Net als voor de KNMI’06-scenario’s, is ook nu de verandering van het luchtstromingspatroon gehanteerd als tweede kenmerk voor het scenario-onderscheid. Sommige klimaatmodellen berekenen voor de winter een kleinere opwarming boven de Noord-Atlantische Oceaan en een grotere opwarming in de subtropen vergeleken met andere klimaatmodellen. Het temperatuurverschil boven Europa dat hieruit volgt, veroorzaakt in die modellen in de winter vaker westenwinden, die in Nederland leiden tot zacht en nat weer. Voor de zomer berekenen sommige modellen een kleinere opwarming boven de Noord-Atlantische Oceaan en een grotere opwarming in Centraal-Europa. Dit veroorzaakt meer oostenwinden, die in Nederland warm en droog weer met zich meebrengen.”

Op de verandering van de luchtstromingspatronen komen we later in dit hoofdstuk uitgebreid terug. Die spelen namelijk een belangrijke rol bij temperatuurveranderingen in Nederland.

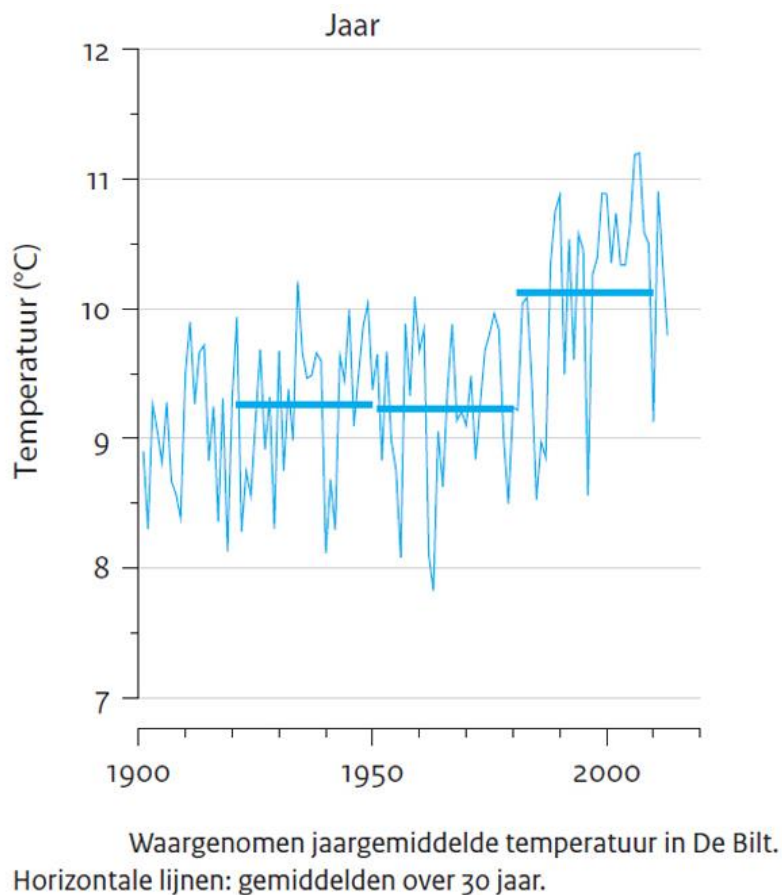
Deze vier scenario’s geven dan voor de temperatuur in 2050 en 2085 de volgende verwachting zoals te zien in figuur 3.3:



Figuur 3.3: Verwachte ontwikkeling van de gemiddelde temperatuur in de Bilt in 2050 en 2085 volgens de vier KNMI-scenario's.

De tendens is duidelijk: in alle vier de scenario's 'warmt Nederland op'. Net als bij de mondiale modellen kunnen we nu een aantal vragen stellen. Hoeveel opwarming hebben we tot nu toe in Nederland gehad? Is het aannemelijk dat CO₂ en andere broeikasgassen een dominante invloed hebben of zijn er andere mogelijke verklaringen te vinden? Hoe goed doen modellen het in het recente verleden in Nederland en West-Europa?

Temperatuur en het onduidelijke CO₂-effect

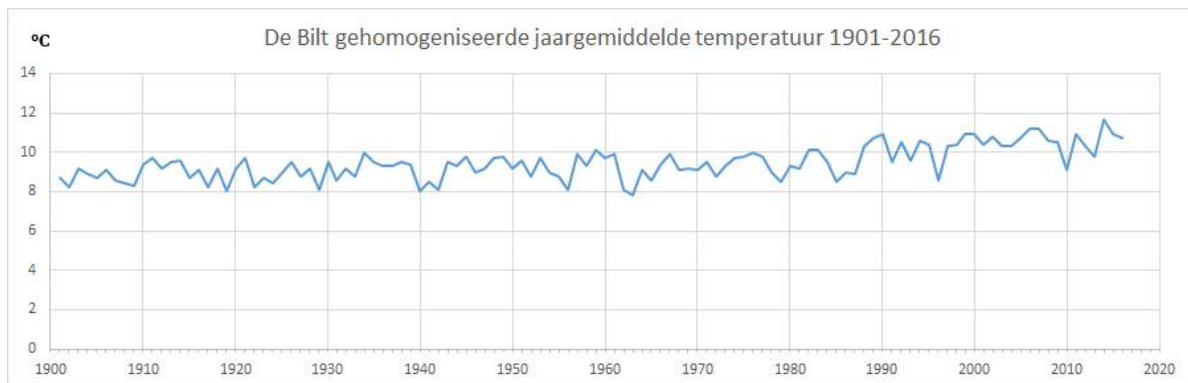


Figuur 3.4: De temperatuurontwikkeling in Nederland sinds 1901. Bron: KNMI'14
Klimaatscenario's voor Nederland.

In figuur 3.4 is de gehomogeniseerde jaartemperatuur van De Bilt weergegeven van 1901 t/m 2016 en voorzien van horizontale lijnen om de gemiddelde temperatuur voor de drie laatste klimaatperiodes aan te geven. De grafiek is afkomstig uit de KNMI-brochure *“KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland”* en toont dat Nederland is opgewarmd.⁴⁷ Die opwarming wordt als volgt beschreven: *“Nederland is eveneens opgewarmd. Tussen 1901 en 2013 nam de gemiddelde temperatuur in De Bilt toe met 1,8 °C. Het grootste deel van deze toename, namelijk 1,4 °C, vond plaats tussen 1951 en 2013. Sinds 1951 is de toename ongeveer twee keer zo groot als de wereldwijde toename van de gemiddelde temperatuur over het land- en zeeoppervlak. De opwarming in onze buurlanden was vergelijkbaar.”*

⁴⁷ KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie, KNMI, De Bilt, 36 pp.

De grafiek ziet er tamelijk dramatisch uit. Dat komt onder andere doordat de makers de y-as niet bij 0 laten beginnen en de x-as korter is weergegeven dan de y-as. Dezelfde datareeks maar met een iets andere lay-out ziet er al heel anders uit (figuur 3.5):



Figuur 3.5: Jaargemiddelde temperatuur De Bilt 1901-2016. Bron: KNMI.⁴⁸

De oorzaken van de temperatuurontwikkeling in ons land zijn zeer complex. Uiteraard is er enige ‘invloed’ van de stijging van de mondiale temperatuur op de temperatuur in Nederland. Maar bij regionale temperatuurontwikkelingen spelen andere factoren vaak een grote rol. Hoe maakt het KNMI nu aannemelijk dat CO₂ en andere broeikasgassen een dominante invloed hadden op de klimaatverandering in Nederland in de afgelopen eeuw? Welnu, daar kunnen we kort over zijn, het schrijft er vrijwel niets over. Het KNMI neemt op basis van bijvoorbeeld de IPCC-rapporten gewoon aan dat broeikasgassen dominant zijn, niet alleen mondiaal maar ook voor Nederland. De brochure stelt:

“IPCC: ‘De menselijke invloed op het mondiale klimaatsysteem is duidelijk zichtbaar’. Dat concludeert het vijfde klimaatrapport van het IPCC, het klimaatpanel van de Verenigde Naties, dat in september 2013 verscheen. Uit waarnemingen en onderzoek blijkt dat de mens invloed heeft op de opwarming van de atmosfeer en de oceanen, op veranderingen in de wereldwijde waterkringloop, op de afname van sneeuw en ijs, op zeespiegelstijging en op veranderingen in sommige klimaatextremen. Aanhoudende uitstoot van broeikasgassen door de mens zal de invloed op het klimaat doen toenemen 3).”

Waarbij referentie 3) het laatste IPCC-rapport is en “de mens” synoniem is voor “broeikasgassen”. Met het laatste zinnetje verantwoordt men feitelijk waarom het doen van scenario’s zinvol zou zijn.

Ook in het verleden heeft het KNMI heel weinig gedaan aan wat in het jargon “attributie” heet, het toekennen van oorzaken aan waargenomen veranderingen. In 2008 schreef het KNMI het volgende in de brochure De toestand van het Klimaat in Nederland:

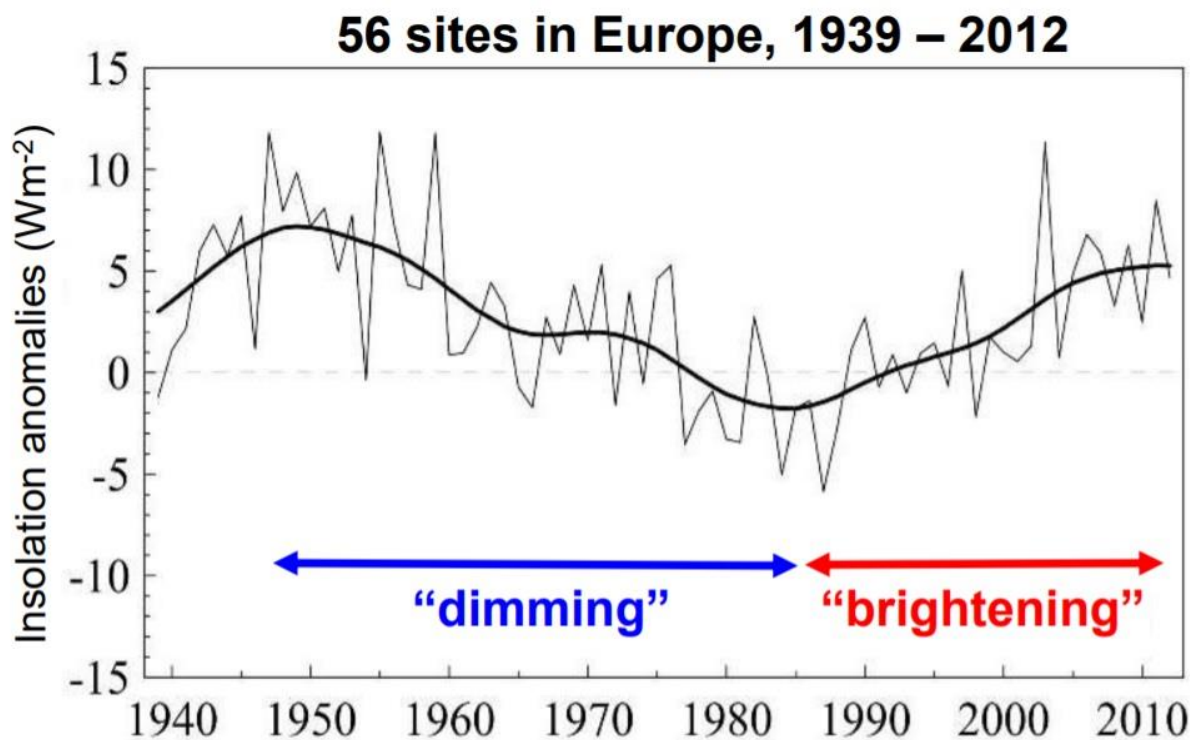
⁴⁸ https://cdn.knmi.nl/knmi/map/page/klimatologie/gegevens/maandgegevens/mndgeg_260_tg.txt

“De hoge temperaturen in Nederland van de afgelopen jaren bevestigen dat het klimaat in Nederland opwarmt. De opwarming gaat twee keer zo snel als de wereldgemiddelde temperatuurstijging in een gebied dat zich uitstrekt van Frankrijk tot Polen. De snellere opwarming wordt hoogstwaarschijnlijk niet veroorzaakt door natuurlijke klimaatvariaties. Oorzaken voor de sterkere temperatuurstijging zijn gevonden in een sterke toename van de hoeveelheid westenwind in de late winter en het vroege voorjaar en een toename van de zonnestraling in voorjaar en zomer. Een verband met het versterkte broeikaseffect ligt voor de hand, maar is nog niet aangetoond.”

Met name de laatste zin is natuurlijk zeer interessant. Een verband met het versterkte broeikaseffect is nog niet aangetoond, aldus het KNMI. Dit is twee jaar na de publicatie van de KNMI 2006 scenario's. Het KNMI merkt terecht op dat een sterke toename van westenwind een rol speelt en ook meer zon. Maar een cruciale vraag is natuurlijk hoe groot die invloeden zijn ten opzichte van de invloed van broeikasgassen. Of wat daar redelijkerwijs over te zeggen valt.

Hieronder lopen we een aantal factoren door die invloed hebben gehad op de temperatuur in Nederland.

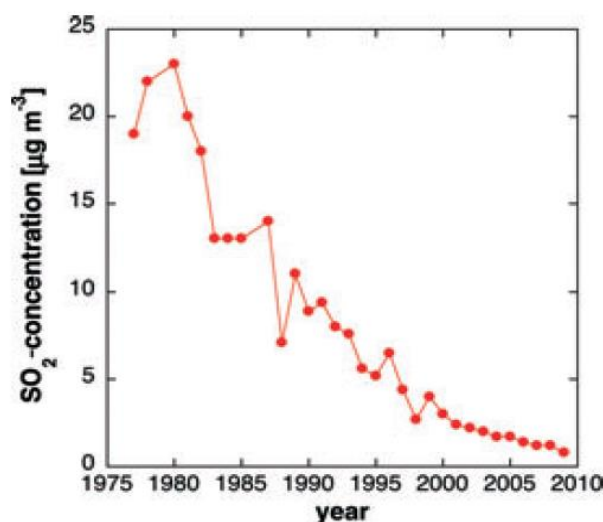
Dimming en brightening



Figuur 3.6: Relatieve veranderingen van gemeten zonnestraling aan het oppervlakte. Bron: Martin Wild, AGU Fall presentatie 2015.

In de loop van de vorige eeuw is als gevolg van luchtverontreiniging de inkomende zonnestraling afgenomen. Dat proces heet *global dimming*. De afname van zonnestraling aan het oppervlak vond met name plaats van 1950 tot in de jaren tachtig. In de figuur hierboven is het gemiddelde getoond van 56 locaties in Europa waar de zoninstraling aan het oppervlak gemeten is. Het gaat om een forse afname van zo'n 10 W/m^2 tussen 1950 en 1985. Ter vergelijking, de toename van broeikasgassen (na aftrek van het afkoelende effect van aerosolen) heeft tot nu toe geleid tot een berekende toename van $2,3 \text{ W/m}^2$ op de netto stralingsbalans van de aarde. Helaas zijn deze getallen niet een op een met elkaar te vergelijken. De afname aan zon is gemeten aan het oppervlak en betreft primair de inkomende 'kortgolelige' straling, de *Top of the Atmosphere* (TOA) stralingsforcering hoog in de atmosfeer is van toepassing op de netto stralingsbalans, dus kortgolelige en langgolelige straling tezamen.

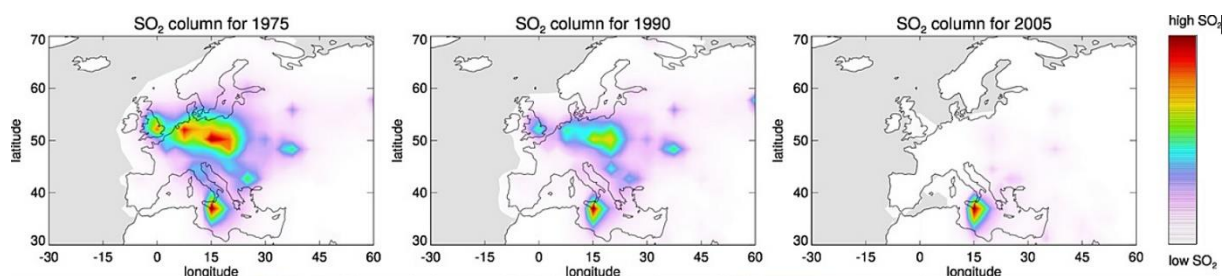
Global brightening ontstaat als die emissies daarna afnemen vanwege bijvoorbeeld milieumaatregelen. Die brightening treedt in grote delen van de wereld op met uitzondering van landen die nog volop in ontwikkeling zijn zoals China en India. Hieronder de afname van de SO_2 -concentratie in Nederland in de afgelopen decennia:



Figuur 3.7: SO_2 -concentratie tussen 1976 en 2009. Bron: Van Beelen en Van Delden.

Die afname van aerosolen is in ons land sinds de jaren '80 van de vorige eeuw spectaculair geweest. In figuur 3.7 is de SO_2 -concentratie tussen 1976 en 2009 in De Bilt weergegeven. In de grafiek is nog net het laatste stukje van de dimming te zien. Vanaf 1980 neemt de SO_2 -concentratie af tot bijna 0 in 2010.

Figuur 3.8 geeft een modelsimulatie weer van de SO_2 -concentraties in Europa voor 1975, 1990 en 2005.



Figuur 3.8: Modelsimulatie SO₂-concentraties in Europa voor 1975, 1990 en 2005.

Bron: KNMI.

De brightening zoals die in ons land is geconstateerd sinds 1985 is inderdaad opvallend. Van Beelen en Van Delden publiceerden in 2012 een artikel over brightening in Nederland.⁴⁹ Met name de lengte van de dagdelen met een zicht ('visibility') van > 19 km vertoonde in De Bilt en op Schiphol na 1985 een opvallende stijging. Die visibility is sterk afhankelijk van de aerosolconcentraties.

⁴⁹ van Beelen, Aldert J., van Delden, Aarnout J. (2012), Cleaner air brings better views, more sunshine and warmer summer days in the Netherlands, Weather, RMetS, John Wiley & Sons, Ltd., 1477-8696, <http://dx.doi.org/10.1002/wea.854>, 10.1002/wea.854

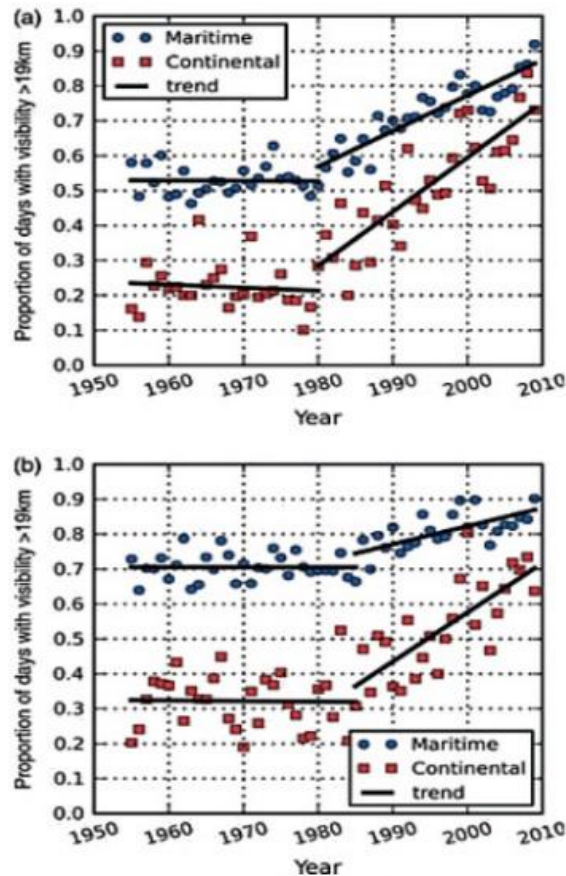


Figure 3. Proportion of days having a maximum visibility greater than 19km in each wind regime, i. e. maritime and continental, for each year as observed in De Bilt (a) and Schiphol (b). Least-squares trend lines were drawn to highlight the changes.

Figuur 3.9: Aandeel dagen met zicht > 19 km in De Bilt en Schiphol. Bron: Van Beelen en Van Delden.

Brightening, de afname van aerosolen in de atmosfeer, heeft directe en indirecte effecten, zoals op zicht (visibility), duur van de zonneshijn, bewolkingsgraad, inkomende kortgolvlige straling en (daarmee) op de temperatuur. Tussen 1985 en 2010 is de directe zonnestraling in De Bilt met maar liefst 25% toegenomen. Die toename vond vooral in de zomer plaats. Direct invallend zonlicht (zonneshijn) is een goede proxy voor de bewolkingsgraad. Ook hier is weer een opvallende trendbreuk te zien in het midden van de jaren '80 (figuur 3.10).

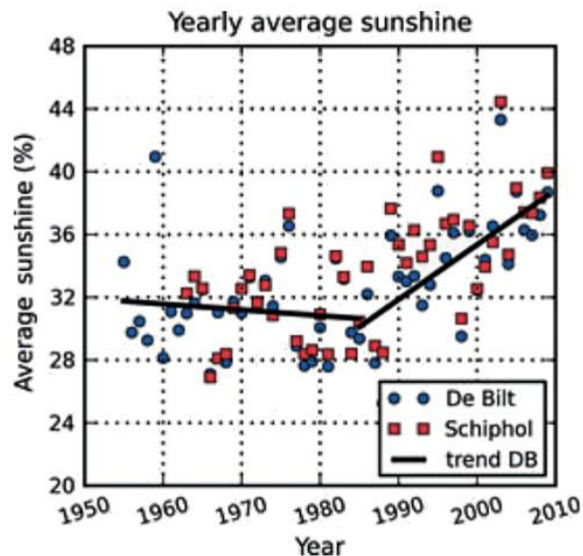


Figure 4. Sunshine duration as a percentage of the day length at De Bilt and Schiphol.

Figuur 3.10: Duur zonneshijn als percentage van de daglengte in De Bilt en Schiphol. Bron: Van Beelen en Van Delden.

Van Oldenborgh et al constateerden naast een toename van de kortgolvlige straling als gevolg van brightening ook een toename advection door extra opwarming in Zuid- en Midden-Europa.⁵⁰ Droogtegevoelige bodems zorgen voor extra opwarming, waarna zuiderwinden deze warme en droge lucht naar het noorden transporteren en hier behalve voor extra advectione warmte ook voor meer inkomende straling zorgen.

De gebruikte standaard eenheid voor straling als energiestroom is W/m^2 . De gemiddelde straling in een bepaald tijdvak (in dit geval een dag) betreft het gemiddelde van alle metingen in dit tijdvak (W/m^2).⁵¹ Als we in figuur 3.11 hieronder het verloop van de totale (direct en indirect) inkomende kortgolvlige straling in De Bilt bekijken dan zien we eerst over de periode 1958-1985 een totale afname van bijna 4 W/m^2 , waarschijnlijk als gevolg van dimming door aerosolen. In de periode 1986-2016 stijgt de directe en indirecte kortgolvlige straling in totaal met ruim 10 W/m^2 . Dat betekent dat vanaf 1986 de kortgolvlige straling met bijna 10% toegenomen is!

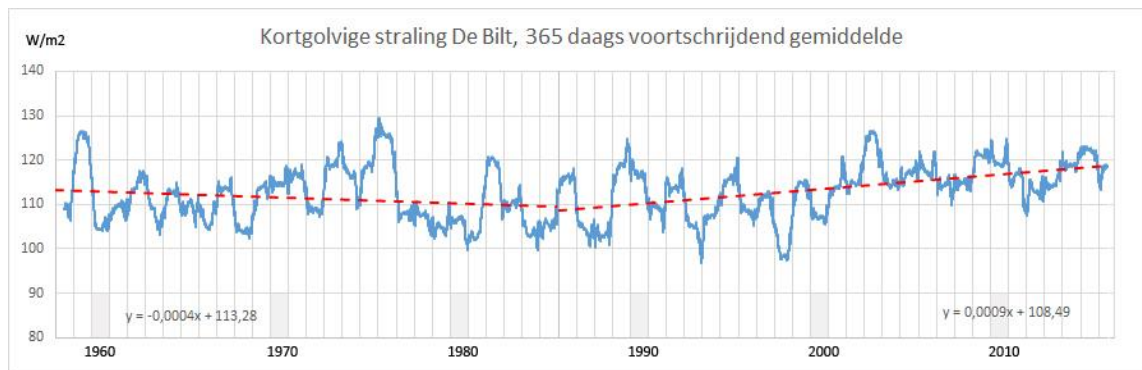
In dezelfde periode is de forcing vanwege toename van broeikasgassen gestegen met ongeveer 1 Watt/m^2 .⁵² De forcing vanwege brightening tussen 1986 en 2016 is dus een factor 10 groter dan die van CO_2 . Nogmaals, die twee getallen zijn niet een op een met

⁵⁰ G. J. van Oldenborgh, S. Drijfhout, A. van Ulden, R. Haarsma, A. Sterl, C. Severijns, W. Hazeleger, and H. Dijkstra (2009), Western Europe is warming much faster than expected, *Clim. Past*, 5, 1–12, 2009

⁵¹ Handboek Waarnemingen, Hst.7 Straling (2005), KNMI, http://projects.knmi.nl/hawa/pdf/Handboek_H07.pdf

⁵² <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/>

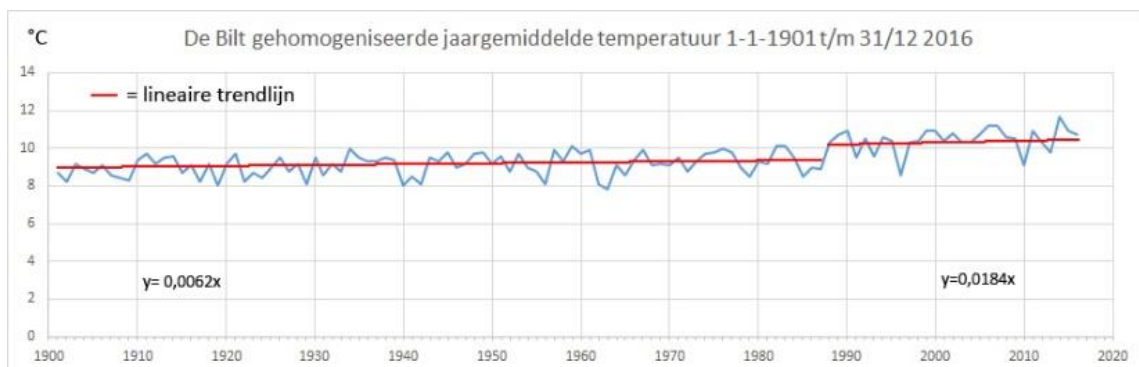
elkaar te vergelijken. Maar dat die grote toename van de instraling met ruim 10 W/m²/dag een grote invloed moet hebben gehad op het temperatuurverloop in De Bilt vanaf 1985 is aannemelijk.



Figuur 3.11: 365-daags voortschrijdend gemiddelde van kortgolvlige straling in De Bilt vanaf 1958. Bron: KNMI Climate Explorer.⁵³

In een artikel in tijdschrift NWT stelde Van Oldenborgh in 2009: “Vanaf 1985 verklaart de afname van de luchtverontreiniging grofweg de helft van de opwarming, denk ik.”⁵⁴ Hier doelde hij op de opwarming in Nederland. De helft van de opwarming zou neerkomen op tenminste 0,5 °C. In de klimaatbrochure komt het KNMI echter tot een aanzienlijk lagere schatting: “De toegenomen zonnestraling draagt ongeveer 0,2 °C bij aan de totale temperatuuroptoenname van ongeveer 1 °C in Nederland tussen 1981 en 2013.” Waar deze berekening op gebaseerd is wordt niet duidelijk. Het wetenschappelijke achtergronddocument vermeldt het getal en de berekening ook niet.⁵⁵

Temperatuursprong rond 1988



⁵³ http://climexp.knmi.nl/data/qqqq260_mean12_anom_mean1_anom.dat

⁵⁴ M. Crok (2009), De Grote Opklaring, NWT, maart 2009.

⁵⁵ KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century – A Netherlands perspective, Version 26 May 2014. Sectie 3.4 vermeldt uitsluitend de toename van de zonnestraling maar niet het geschatte temperatureffect daarvan.

Figuur 3.12: Gehomogeniseerde jaargemiddelde temperatuur De Bilt 1901-2016

Bron data: KNMI

Figuur 3.12 toont de gehomogeniseerde jaartemperatuur van De Bilt van 1901 t/m 2016, maar hier met twee trendlijnen, een voor de periode 1901-1987 en een voor 1988-2016. In beide periodes is er nauwelijks sprake van opwarming. Duidelijk is te zien dat de temperatuur rond 1988 een forse sprong maakt. De temperatuurstijging in De Bilt vanaf 1901 van 1,8 °C is dus voor een aanzienlijk deel 'het gevolg' van een opvallende sprong in de temperatuur aan het eind van de jaren '80.

In een publicatie uit 2013 constateren Crok en De Laat dat de sprong zich in een groot deel van Europa heeft voorgedaan.⁵⁶ Ze spreken dan ook van een "*European Climate Shift*" (ECS⁵⁷). In figuur 3.13 is voor een aantal meetreeksen aangegeven waar in Europa die temperatuursprong een significantie van >95% heeft. Heel interessant is dat de sprong in verschillende datasets zichtbaar is, zoals de temperatuur aan de grond (op 2 meter hoogte), in de troposfeer (UAH en RSS) en zelfs in de zeeën rond Europa (zie de figuur rechtsonder waar OHC staat voor Ocean Heat Content).

⁵⁶ A. T. J. de Laat, M. Crok (2013), A Late 20th Century European Climate Shift: Fingerprint of Regional Brightening?, *Atmospheric and Climate Sciences*, 2013, 3, 291-300

⁵⁷ Deze ECS voor European Climate Shift dient uiteraard niet verward te worden met de eerder in het rapport gebruikte afkorting ECS voor Equilibrium Climate Sensitivity.

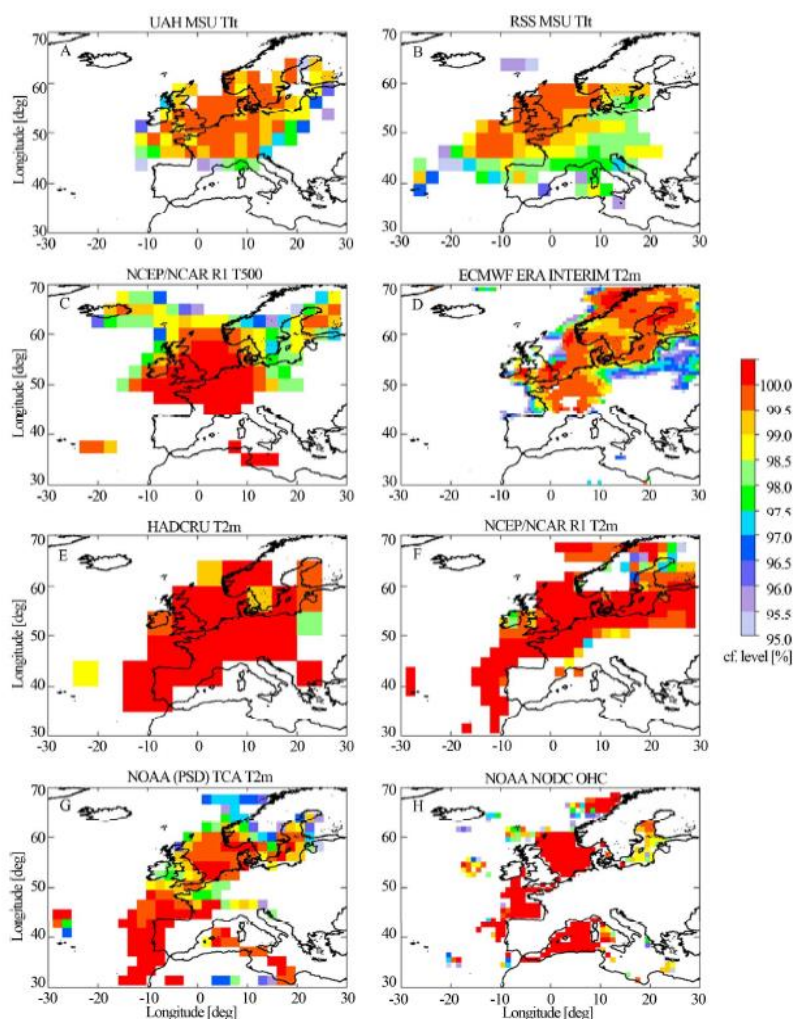


Figure 2. Spatial patterns of the statistical significance of the 1987-1988 ECS for the European domain. Only points with a significance larger than 95% are shown.

Figuur 3.13: Ruimtelijk patroon statistisch significante (>95%) temperatuursprong 1987-1988. Bron: Crok en De Laat.

De auteurs 'verklaren' de sprong als volgt: *"We argue that the notion of a shift is "spurious", i.e. the result of a fast change in Europe from dimming to brightening combined with an accidental sequence of cold (negative NAO) and warm (positive) NAO years during this period. The "shift" could therefore be considered as a fingerprint of European brightening during the last few decades."*

De temperatuursprong is statistisch gezien zeer significant en dus in dat opzicht 'echt'. Maar Crok en De Laat hypothetiseren dat de sprong voortkomt uit de gelijktijdige overgang van een aantal koude naar een aantal warme jaren in combinatie met de overgang van dimming naar brightening. Hoe dan ook, beter begrip van deze episode is essentieel want de notie van een sprong van ruim 1 °C strookt niet direct met een geleidelijke opwarming als gevolg van de geleidelijke toename van broeikasgassen in de atmosfeer.

Het KNMI onderschrijft in de Brochure de invloed van meer zonnestraling op temperatuur, maar in het wetenschappelijke rapport wordt er met geen woord over gerept. Het KNMI schetst een ander, ons inziens eenzijdig “beeld” van de opwarming dat geen recht doet aan bestaande kennis en wetenschappelijke literatuur. In het achtergronddocument is de volgende figuur 3.14 opgenomen:

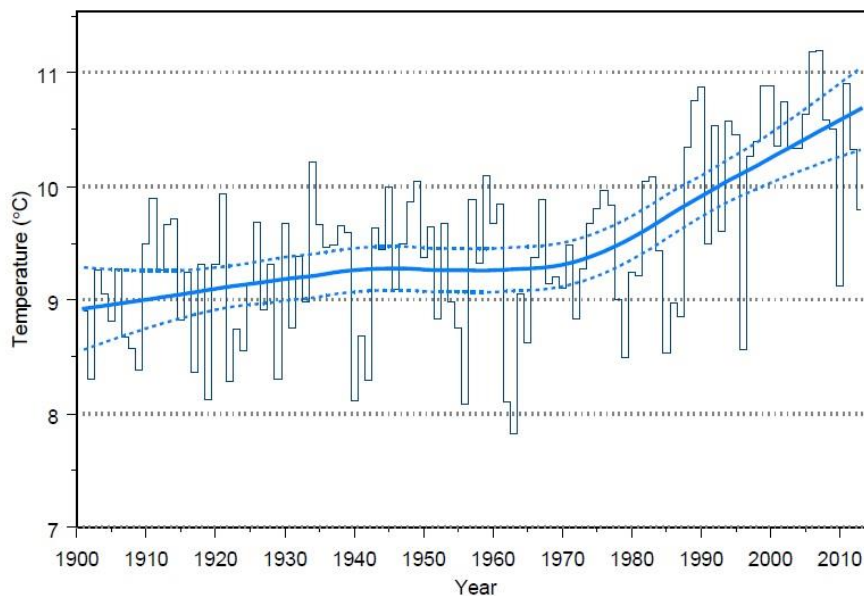


Figure 3.1: Annual mean temperature De Bilt 1901-2013. The bold smooth line represents a LOESS smoother, the dashed lines give the 2×pointwise standard error band of the smooth.

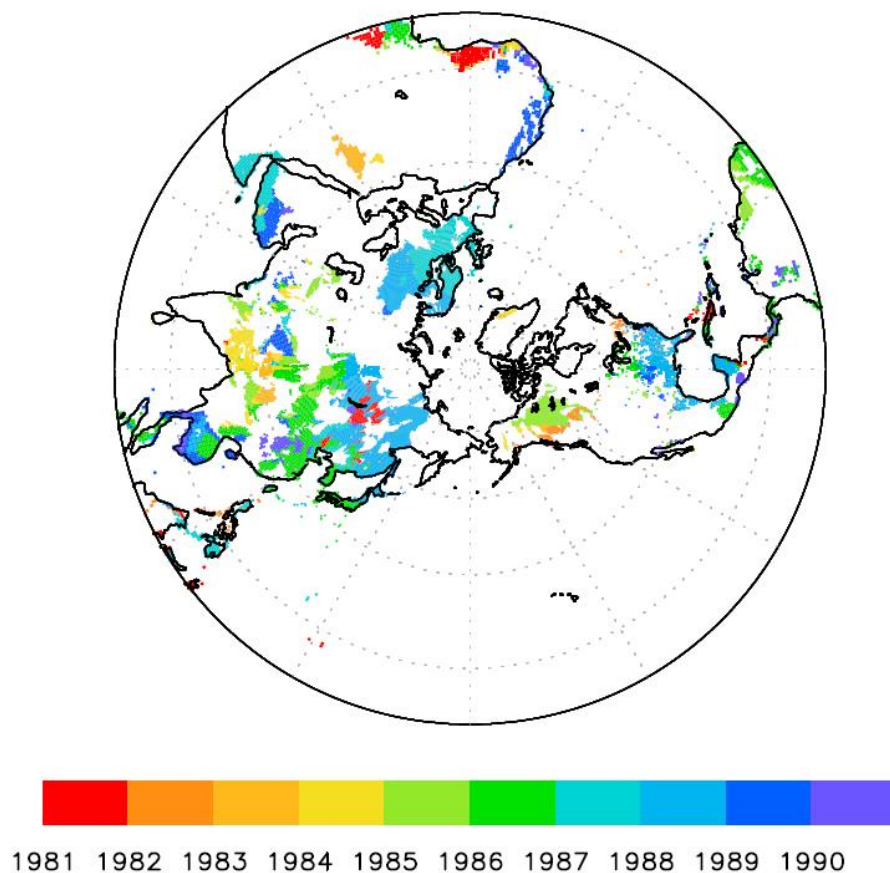
Figuur 3.14: opwarming in Nederland sinds 1901. Reproductie van figuur 3.1 uit het wetenschappelijke achtergronddocument van het KNMI.

In de tekst wordt uitgelegd dat het in deze figuur gebruikte filter (de dikke blauwe lijn) overeenkomt met een voortschrijdend 30-jarig gemiddelde. De auteurs spreken van een niet-lineaire (lees ‘versnelde’) opwarming in de loop van de twintigste eeuw. In de brochure schrijft het KNMI: “Tussen 1901 en 2013 nam de gemiddelde temperatuur in De Bilt toe met 1,8 °C. Het grootste deel van deze toename, namelijk 1,4 °C, vond plaats tussen 1951 en 2013.” Het moge duidelijk zijn dat wij deze blik op onze recente klimaatgeschiedenis onvolledig vinden.

Schuurmans en Van den Dool noemen de temperatuursprong een dynamische aanpassing van het klimaatsysteem, vergelijkbaar met de overgang van seizoenen. Het is een aanpassing van het systeem aan veranderde (stralings-)omstandigheden.⁵⁸ Een meer recente publicatie van Kim et al. toont aan dat de temperatuursprong aan het eind van de jaren ’80 geen louter

⁵⁸ Schuurmans, C.J.E., en H. van den Dool (2001), Klimaatverandering en persistentie, Meteorologica

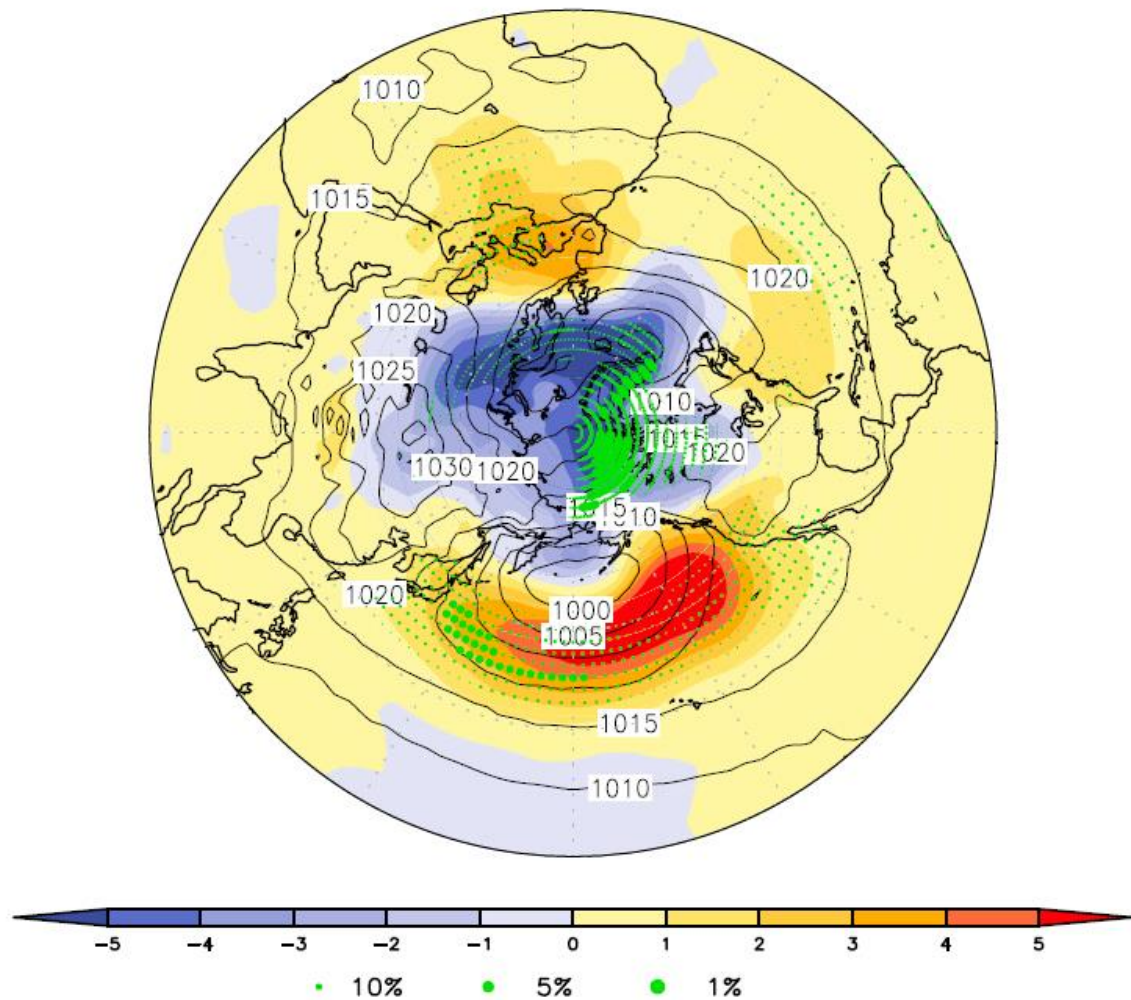
Europees fenomeen is maar in meer regio's op het noordelijk halfrond heeft plaatsgevonden.⁵⁹



Figuur 3.15: Spreiding in tijd en ruimte van gebieden met een abrupte temperatuursprong in de jaren '80. Bron: Kim et al.

Kim et al nemen de intensivering en uitbreiding van de meridionale luchtcirculatie onder de loep, die volgens hen de verschuiving van de gemiddelde wintertemperatuur in de late jaren '80 veroorzaakte. Die sprong vond eind jaren '80 niet alleen in West-Europa plaats maar ook in Oost-Azië en het oosten van de USA.

⁵⁹ Kim, Y.-H., M.-K. Kim, W. K. M. Lau, K.-M. Kim, and C.-H. Cho (2015), Possible mechanism of abrupt jump in winter surface air temperature in the late 1980s over the Northern Hemisphere, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 12,474–12,485, doi:10.1002/ 2015JD023864



Figuur 3.16: Verschillen in de gemiddelde Sea Level Pressure in de winter tussen de transitieperiode en de referentieperiode. Bron: Kim et al.

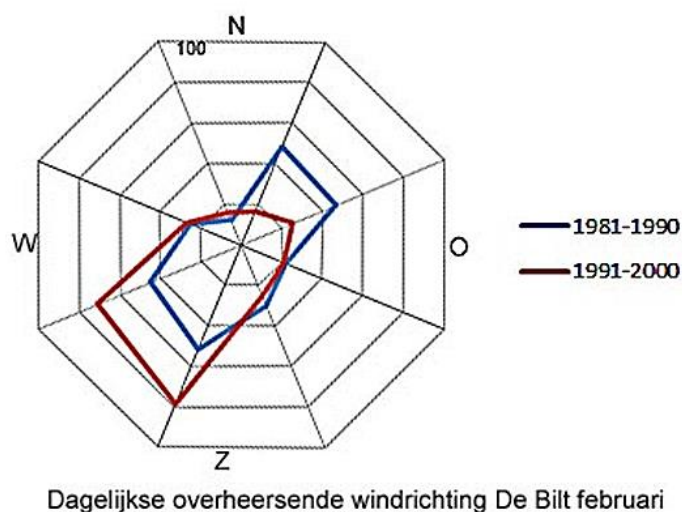
De onderzoekers wijten de temperatuursprong aan de aanvoer van warme lucht als gevolg van een toegenomen luchtdrukverschil tussen subtropen (25° - 35° NB) en polaire gebieden (60° - 70° NB). Die toegenomen luchtdrukverschillen op gematigde breedte op het noordelijk halfrond zijn volgens Kim et al. het gevolg van de intensivering van de Ferrel Cell en het opschuiven ervan naar het noorden, allemaal als gevolg van het noordwaarts uitbreiden van de Hadley Cell op het noordelijk halfrond.

Kim et al. gaan ervan uit dat de zichtbare relatieve opwarming op gematigde breedte ervoor gezorgd heeft dat de straalstroom langdurig verder naar het noorden is verschoven en krachtiger is geworden. Daardoor ontstaat er een sterkere blokkade voor koude poollicht, die daardoor moeilijker de gematigde zone kan bereiken, ook in de periode na de sprong. De aanvoer van warme lucht zorgt ook voor extra smelt van sneeuwbedekking in de polaire zone en extra afsmelten van drijfs, factoren die daardoor de persistentie van de nieuwe situatie voeden.

Jones et al. constateren in een andere recente publicatie dat op regionale schaal gezien temperatuurveranderingen meer stapsgewijs plaatsvinden dan geleidelijk. Een mogelijke oorzaak daarvan is volgens hen het zogenaamde *store-and-release-mechanisme* bij de warmteoverdracht van oceaan naar atmosfeer.⁶⁰

De bevindingen van Kim et al. sluiten aan bij de veranderingen in de luchtcirculatie zoals die zich de afgelopen decennia boven ons land hebben voorgedaan en waarbij met name de aanvoer van warmere lucht uit het zuidwesten in de winter is toegenomen.

De temperatuur in ons land is sterk afhankelijk van de windrichting. Veranderingen van temperatuur zijn in Nederland vooral het gevolg van veranderingen van temperatuur van de aangevoerde lucht. Een temperatuurverandering van meer dan 10 °C binnen 24 uur als gevolg van een veranderde luchtcirculatie is niet ongevoelbaar. Dat hangt samen met de geografische ligging van ons land op de grens van de Atlantische Oceaan en Europa en de breedteligging. Met name in de winter en zomer kunnen de verschillen in temperatuur tussen maritieme en continentale luchtsoorten erg groot zijn. Maar ook de ligging op gematigde breedte speelt een rol: zowel Arctische lucht als woestijnlucht kunnen ons land bereiken.



Figuur 3.17: Verandering luchtcirculatie in februari voor De Bilt 1981-1990 en 1991-2000. Bron: Klimaatgek.⁶¹

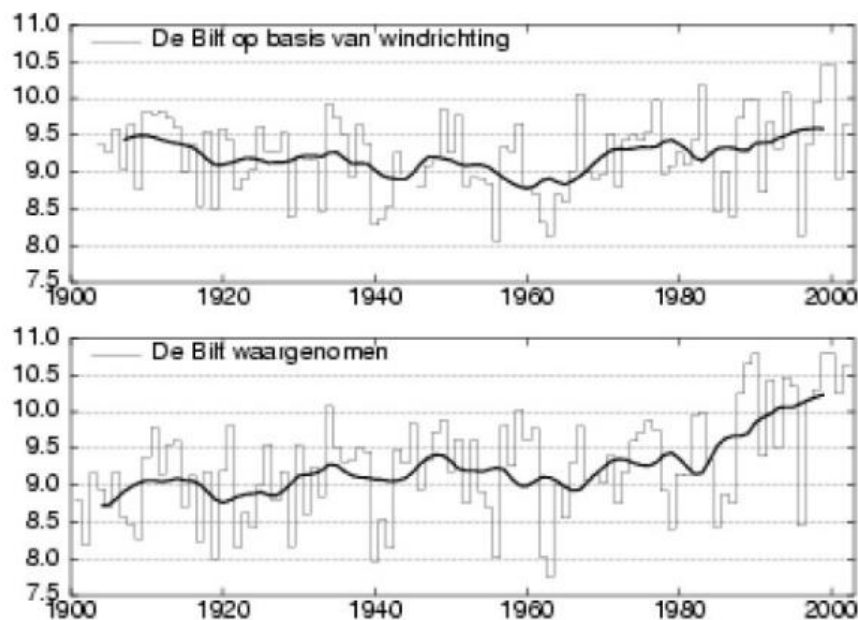
De afgelopen decennia hebben zich verschuivingen voorgedaan in de luchtcirculatie die van invloed zijn op de temperatuur in ons land. Figuur 3.17 toont voor De Bilt een opmerkelijke verschuiving van de windrichting in de maand februari tussen 1981 en 2000.

⁶⁰ R.N.Jones, J.H. Ricketts (2017), Reconciling the signal and noise of atmospheric warming on decadal timescales, Earth System Dynamics

⁶¹ <http://klimaatgek.nl/wordpress/luchtcirculatietypen-en-klimaatverandering/>

Wessels et al. hebben al in 1994 een onderzoek gedaan naar de temperatuurstoename in De Bilt.⁶² Onderzoeksvraag was of die toename vooral het gevolg was van algemene opwarming van de atmosfeer of van een veranderde luchtcirculatie. Ze maakten daarvoor gebruik van de dertig Grosswetterlagen (GWL), een bekende classificatie op basis van luchtsoort en brongebied. Conclusie was dat de opwarming in De Bilt meer het gevolg was van veranderende luchtcirculatie dan van een wezenlijke opwarming van de atmosfeer.

Van Oldenborgh van het KNMI deed in 2001 onderzoek naar de rol van de veranderende overheersende circulatietypes.⁶³ Er is sprake van dat in elk seizoen de windrichtingen zodanig veranderd zijn dat de temperatuur in Nederland toeneemt: meer zuidwestenwind in de winter, meer zuidoostenwind in de zomer, en meer zuidenwind in voor- en najaar. De opwarming sinds 1960 is deels te verklaren door verandering in gemiddelde windrichting (figuur 3.18).



Figuur 3.18: Berekende en waargenomen jaargemiddelde temperatuur De Bilt. Bron: Van Oldenborgh (2001).

De bovenste grafiek toont de berekende temperatuur op basis van de windrichting voor De Bilt tussen 1904 tot 2002. De onderste grafiek betreft de waargenomen temperatuur. Tot 1960 is waargenomen trend tegengesteld aan die van de berekende, vanaf 1960 zijn ze beide stijgend. Van Oldenborgh concludeert dat na 1950 in de winter en voorjaar een duidelijke trend te zien is in de op basis van windrichting gereconstrueerde temperatuur. Een uitsplitsing naar maanden laat zien dat de circulatie-gerelateerde toename van de

⁶² Wessels, H.R.A., Klein Tank, A.M.G. en Können, G. (1994), Trends in the annual temperature of De Bilt: warmer atmosphere or changed advection? Extended abstract in Heino, R. (Ed): Proceedings of the European Workshop on Climate Variations in Europe, Kirkkonummi, Finland, 15-18 mei 1994

⁶³ G.J. van Oldenborgh (2003), Temperatuur en windrichting in Nederland in de 20e eeuw, Meteorologica

temperatuur zich afspeelt in februari, maart en april. De gemiddelde temperatuur sinds 1950 is in deze maanden extra toegenomen omdat het aantal dagen met noorden- en oostenwind duidelijk is afgenomen en het aantal dagen met zuiden- en westenwinden is toegenomen, zoals ook in figuur 3.19 te zien is.

Schuurmans en Van den Dool vergeleken de temperatuur-anomalieën van De Bilt van 1991-2000 met die van 1961-1990 en analyseerden opwarming in een aandeel mondiale opwarming en een aandeel luchtcirculatie. Voor het hele jaar vinden Schuurmans en Van den Dool dat van de opwarming na 1960 ongeveer 0,5°C van de luchtcirculatie afhangt en 0,32°C ergens anders vandaan moet komen. Ze wijzen als verklaring naar een veranderend atmosfeer-oceaansysteem, waarin een sterkere Noord-Atlantische Oscillatie (NAO) met meer westcirculatie en een opwarmende Noordzee in ons land voor fikse opwarming hebben gezorgd.



Figuur 3.19: Shift in tienjarig voortschrijdend gemiddelde van de GWL in de zomer van NW-circulatie (blauw) en ZW-circulatie (rood) Bron: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.⁶⁴

Bovenstaande grafiek toont de verschuiving in percentueel voorkomen van een aantal GWL gedurende het zomerseizoen tussen 1881 en 1996. De blauwe lijn vertegenwoordigt de noordwest-circulatietypen (NW), de rode lijn die uit het zuidwesten (ZW) en zuiden (Z). Dergelijke verschuivingen hebben soms aanzienlijke gevolgen voor de temperatuur in ons land, vooral in de winter en voorjaar.

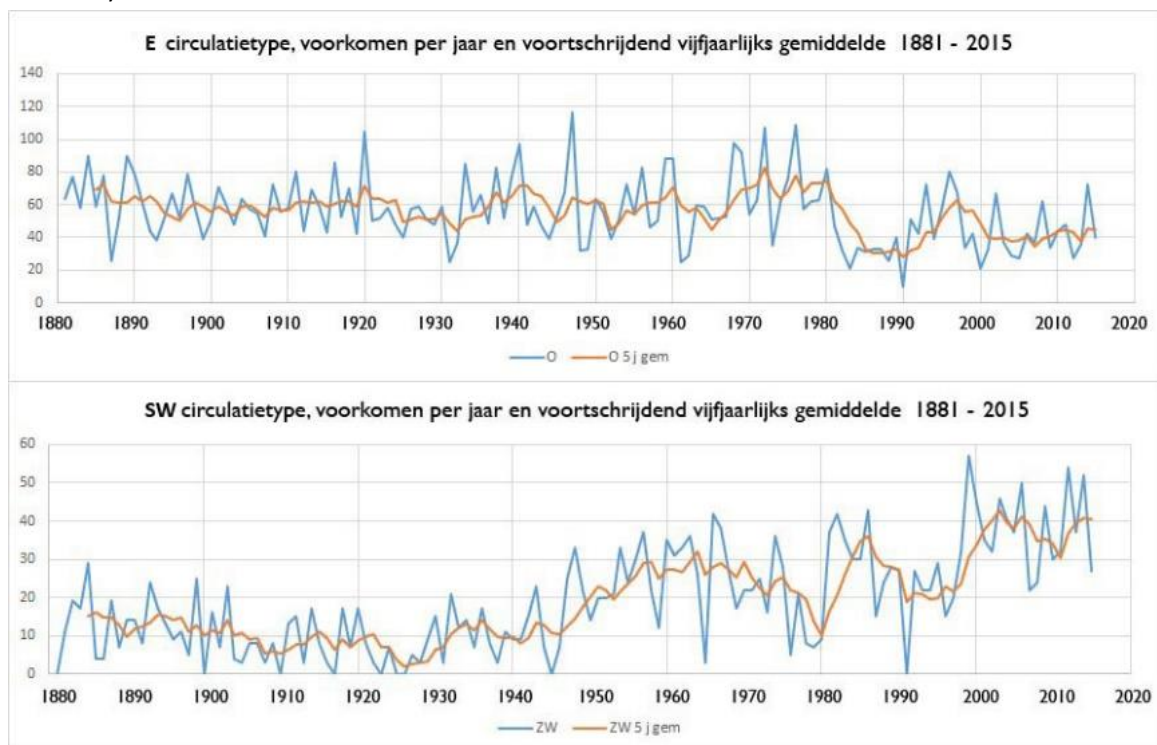
⁶⁴ Friedrich-Wilhelm Gerstengarbe, Peter C. Werner (2005), Katalog der Grosswetterlagen Europas (1881-2004), PIK Report No. 100, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.

De blog Klimaatgek heeft de verschuivingen in de luchtcirculatie onderzocht aan de hand van data van de GWL.⁶⁵ Van alle GWL zijn gegevens beschikbaar over het voorkomen per jaar vanaf 1881 t/m 2015. De dertig GWL zijn samengevoegd tot tien zogenaamde Grosswettertypen (GWT), en die zijn weer samengevoegd tot zeven circulatietypen:

W = WA, WZ, WS, WW, U
SW = SWA, SWZ
NW = NWA, NWZ
H = HM, BM
N = NA, NZ, HNA, HNZ, HB, TRM, TM
E = NEA, NEZ, HFA, HFZ, HNFA, HNFZ, SEA, SEZ
S = SA, SZ, TB, TWR

Figuur 3.20: de zeven circulatietypen en de daartoe behorende GWL.

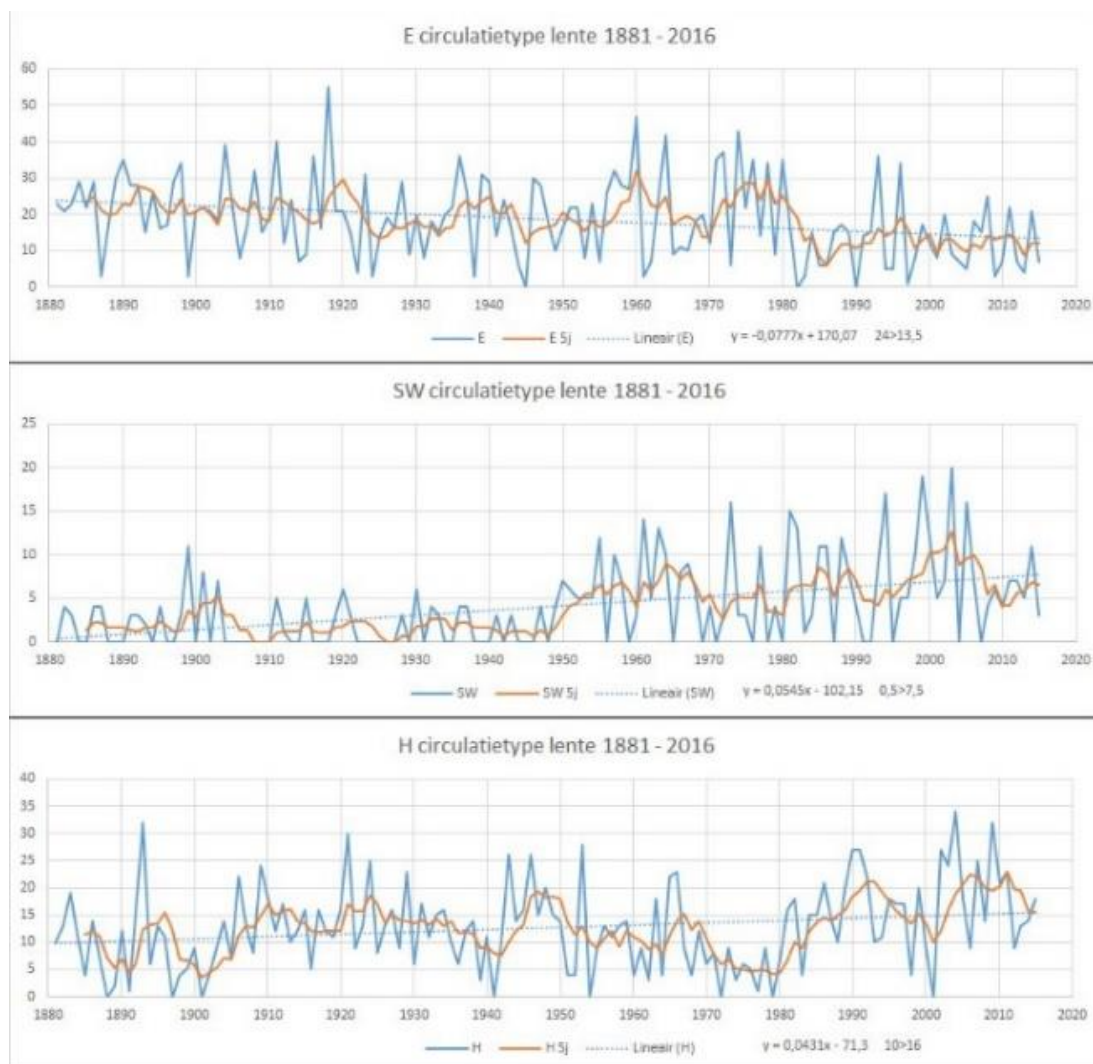
Op basis van het voorkomen per jaar zijn er twee circulatietypen die de afgelopen decennia een opmerkelijke verandering vertonen, namelijk het E-type (oost) en het SW-type (zuidwest):



Figuur 3.21: Voorkomen per jaar van circulatietypen E en SW 1881-2015. Bron: Klimaatgek.nl.

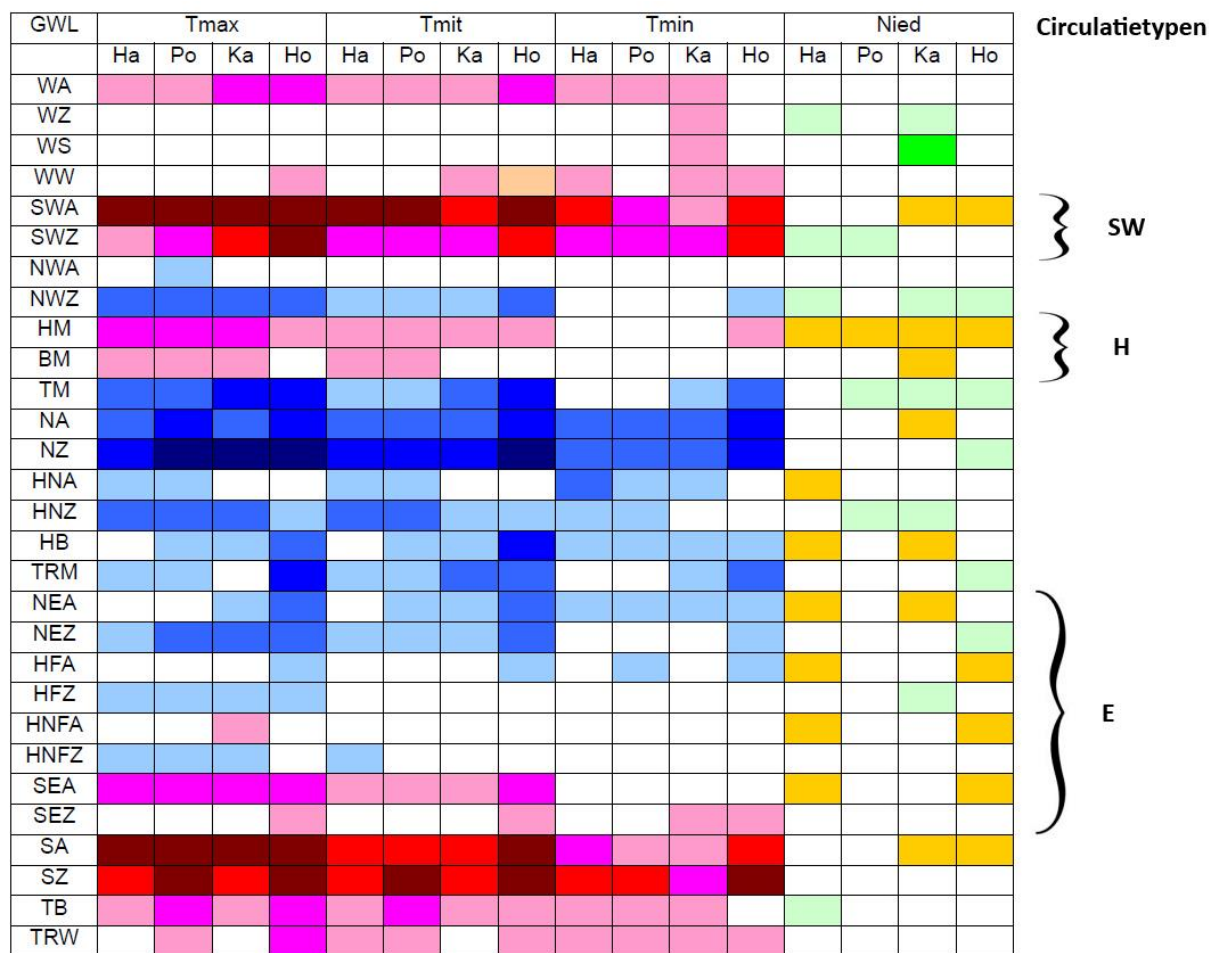
⁶⁵ <http://klimaatgek.nl/wordpress/luchtcirculatietypen-en-klimaatverandering/>

Beide grafieken vertonen een opmerkelijk grote sprong in het begin van de jaren '80. Minder E-circulatie en meer SW-circulatie leiden tot hogere temperaturen. Omdat de invloed van het voorkomen van een circulatietype op de temperatuur afhankelijk is van het jaargetijde is voor alle seizoenen bekeken of er significante veranderingen in frequentie zijn geweest. Daarbij is naar alle circulatietypen gekeken omdat veranderingen per seizoen gemaskeerd kunnen worden op jaarbasis. Voor de lente, waarin de grootste veranderingen hebben plaatsgevonden, zijn er drie circulatietypen die een opmerkelijke trend laten zien:



Figuur 3.22: Voorkomen in de lente van circulatietypen E, SW en H 1881-2015. Bron: Klimaatgek.nl.

Ook hier is de sprong terug te vinden van de E-circulatie begin jaren '80. De sprong in de SW-circulatie begin jaren '80 is niet meer terug te vinden, wel een sprong rond 1950. Het H-type (hogedrukgebied boven Midden-Europa) vertoont wel weer een sprong begin jaren '80. In de tabel hieronder is de invloed van deze drie circulatietypen op de temperatuur in de lente weergegeven voor vier stations in Duitsland:



Mittlere Anomalien meteorologischer Größen an den Stationen Hamburg (Ha), Potsdam (Po), Karlsruhe (Ka) und Hohenpeißenberg (Ho) bezogen auf die Großwetterlagen für das Frühjahr 1901-2003

(Temperatur: K; Niederschlag: mm)

Klasse	< -4.0	< -3.0	< -2.0	< -1.0	<= 1.0	<= 2.0	<= 3.0	<= 4.0	> 4.0
Temperatur									
Niederschlag									

Figuur 3.23: Invloed van de GWL op temperatuur en neerslag in Duitsland. Bron: PIK.⁶⁶

Duidelijk is dat het SW-circulatietype in de lente een sterk opwarmend effect heeft, evenals het H-type. Het E-circulatietype heeft een overwegend afkoelend effect in de lente. Uitzonderingen vormen de GWL SEA en SEZ, beide uit het zuidoosten komend. Concluderend kan gesteld worden dat de veranderingen in het voorkomen van de circulatietypen in de lente de afgelopen decennia een duidelijk opwarmend effect hebben gehad.

Het KNMI is zich (uiteraard) bewust van de veranderende circulatiepatronen. Het is een van de redenen waarom veranderende circulatiepatronen als variabele meegenomen worden in de KNMI-scenario's. Net als bij dimming en brightening zegt het KNMI echter zeer weinig over de grootte van het effect. In de brochure schrijft het: "De winters (december, januari en

⁶⁶ <https://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr100.pdf>

februari) waren zachter doordat de wind vaker uit het westen kwam.” Hetzelfde zinnetje is in Engelse vertaling terug te vinden in het achtergronddocument.

Hierboven hebben wij laten zien dat de veranderingen in windrichting zich niet beperken tot de winter maar juist ook aanzienlijk zijn in de lente. Uiteraard is het bijzonder lastig (zo niet onmogelijk) om deze invloed precies te kwantificeren. Maar er zo summier melding van maken en vervolgens ervan uitgaan dat broeikasgassen de ontwikkeling van het Nederlandse klimaat domineren doet bestaande kennis en inzichten tekort.

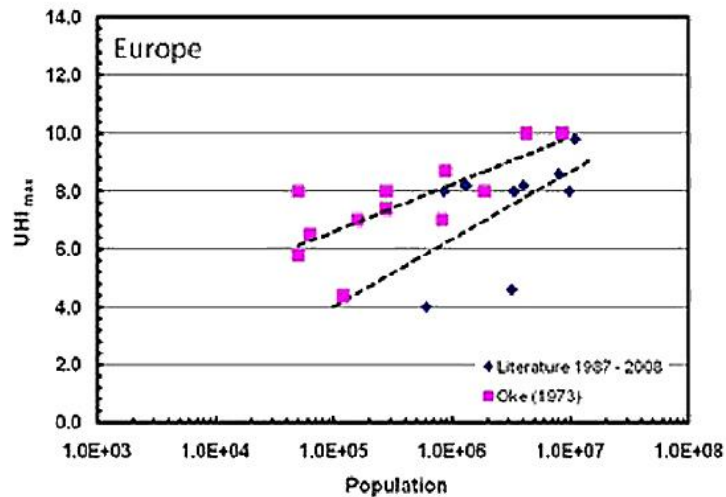
Verstedelijking

Het Urban Heat Island-effect (UHI) is het klimatologische effect op de temperatuur, neerslag en windsnelheid in stedelijke gebieden. Het ontstaat door de fysieke en antropogene eigenschappen van stedelijke gebieden die afwijken van die van het omringende platteland. Die fysieke eigenschappen van steden beïnvloeden onder andere albedo en evapotranspiratie waardoor de energiebalans van steden afwijkt van die in rurale gebieden.

Een belangrijke oorzaak van het ontstaan van het UHI is de bebouwing. Hoogte van gebouwen en smalle straten zorgen voor meervoudige reflecties en sterkere absorptie van inkomende straling en beperking van de uitstraling van warmtestraling. Door wrijving neemt ook de windsnelheid af en vermindert daardoor de afkoeling door turbulentie. Van belang is ook de lagere verdamping in de stad: doordat neerslagwater snel en grotendeels ondergronds wordt afgevoerd is er relatief weinig water om te verdampen. Ook de vaak geringe oppervlakten met begroeiing zorgen voor een lagere verdamping. Verdamping is op aarde de belangrijkste manier om warmte aan het aardoppervlak kwijt te raken.

De antropogene invloeden betreffen warmtebronnen zoals gemotoriseerd verkeer, industrie, verwarming ('s winters) en airconditioning ('s zomers). Tenslotte hangt er over grote steden altijd een stofkoepel: luchtvervuiling zorgt voor absorptie en reflectie van de uitgaande warmtestraling, waardoor het vooral 's nachts bijdraagt aan de opwarming van steden. Steden zijn door al deze factoren warmer dan hun omgeving, vooral in de zomer en meer 's nachts dan overdag.

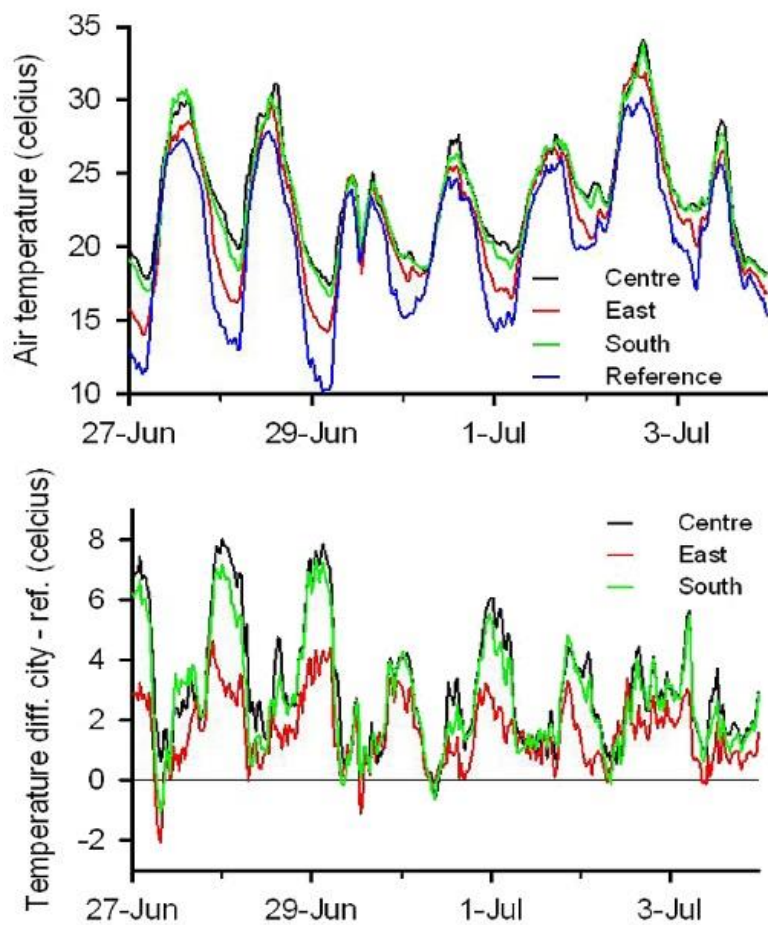
Er is een logaritmisch verband tussen het UHI-effect en inwonertal:



Figuur 3.24: Verband tussen bevolkingsomvang en UHI_{max}. Bron: Van Hove et al 2011.⁶⁷

Op grond daarvan wordt het maximale UHI-effect van de grote Nederlandse steden geschat op 4 tot 8 °C. Figuur 3.25 toont het gemeten temperatureffect in de stad Rotterdam gedurende een zomerweek in 2010.

⁶⁷ Van Hove, L.W.A., G.J. Steeneveld, C.M.J.Jacobs, B.G. Heuzinkveld, J.A. Elbers, E.J. Moors, A.A.M.Holtslag (2011), Exploring the heat island intensity of Dutch cities, Wageningen Alterra report 2170



Figuur 3.25: UHI in Rotterdam, zomer 2010. Bron: Van Hove et al 2011.

De verschillen met de rurale referentietemperatuur kunnen oplopen tot 8 °C. De cijfers van Rotterdam en andere Nederlandse steden doen vermoeden dat het UHI-effect op de temperatuur tamelijk groot is.

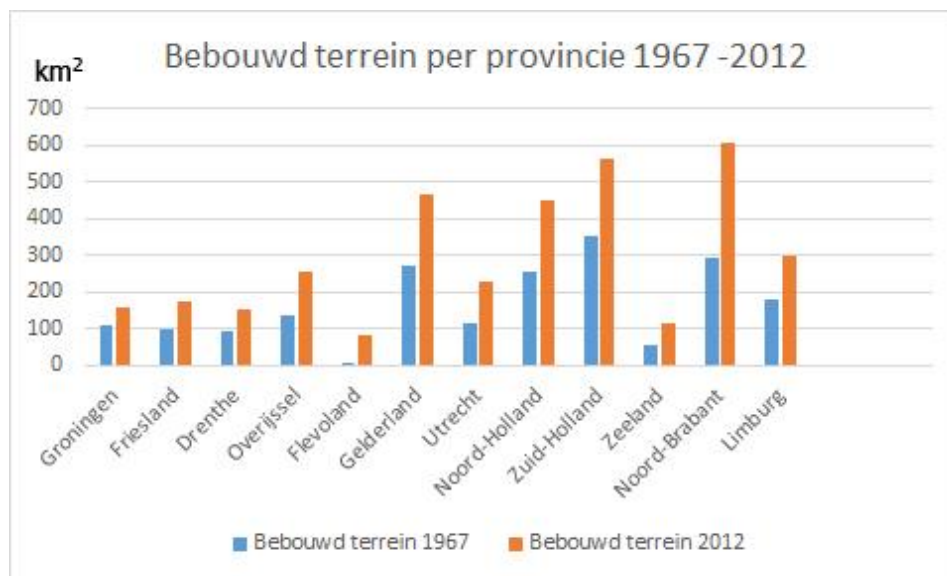
De ruimtelijke invloed van het UHI-effect beperkt zich niet alleen tot de bebouwde omgeving van de stad. Door advectie hangt er een warmtepluim vanaf de stad over het omringende platteland. Het meetstation De Bilt ligt aan de oostzijde van Utrecht, net buiten de bebouwde kom. Het KNMI schat dat de bijdrage van advectie van stadswarmte van de stad Utrecht op de temperatuurmetingen in De Bilt op 0,5 °C voor westelijke wind en nachtelijke omstandigheden.

Voor De Bilt is in 2003 door Brandsma et al onderzoek gedaan naar de effecten van het UHI van Utrecht op de temperatuurmetingen gedurende de afgelopen eeuw.⁶⁸ Brandsma et al.

⁶⁸ Brandsma, T., G.P. Können en H.R.A. Wessels, 2003. Empirical estimation of the effect of urban heat advection on the temperature series of De Bilt (The Netherlands). *International Journal of Climatology*, 23, 829-845.

schatten de bijdrage van de advection van stadswarmte op de temperatuurtrend in De Bilt in de 20ste eeuw op 0,1 °C (plus of min 0,06 °C). Deze schatting is gebaseerd op windrichtingafhankelijke temperatuurverschillen tussen De Bilt en Soesterberg (de rurale referentie). De schatting houdt rekening met al het stedelijk gebied rondom het KNMI-terrein in De Bilt en de groei daarvan in de 20e eeuw. Op basis van vergelijking met deze resultaten schat het KNMI de bijdrage van advection van stadswarmte op de temperatuurtrend in De Bilt over de periode 1901-2008 op ongeveer 0.14°C.

Het CBS heeft vanaf 1967 tot 2012 cijfers van het totale oppervlak bebouwd terrein per provincie.



Figuur 3.26: Bebouwd terrein per provincie 1967-2012. Bron: CBS.⁶⁹

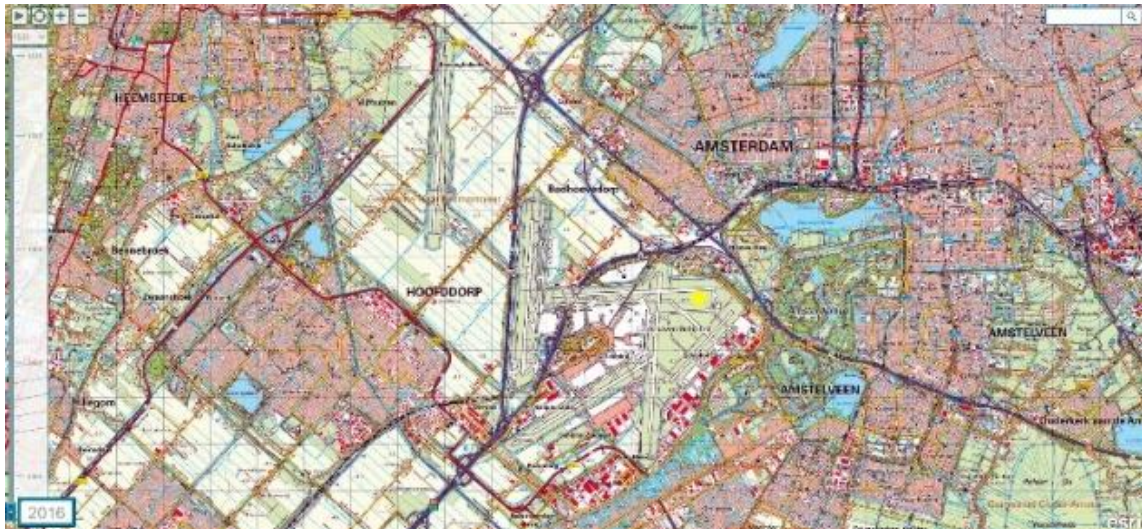
Het is waarschijnlijk dat het effect van verstedelijking op de temperatuurmeting in bepaalde delen van Nederland groter is dan de schattingen voor Utrecht. Nederland is vanaf het begin van de 20e eeuw zeer sterk verstedelijkt. Vooral West-Nederland is sterk versteend, maar dat geldt ook voor andere delen van Nederland zoals Zuid-Limburg, Noord-Brabant en Twente. Om een idee te krijgen van de oprukkende versterking hebben we voor twee meetstations van het KNMI, namelijk Rotterdam en Schiphol, de verstedelijking van de omgeving tussen 1950 en 2016 bekeken met behulp van topografische kaarten. De beelden spreken voor zich.

⁶⁹ <http://statline.cbs.nl/Statweb/publication/?DM=SLNL&PA=37105&D1=1-8,17-19&D2=a&D3=46,63,I&STB=G1,G2,T&VW=T>



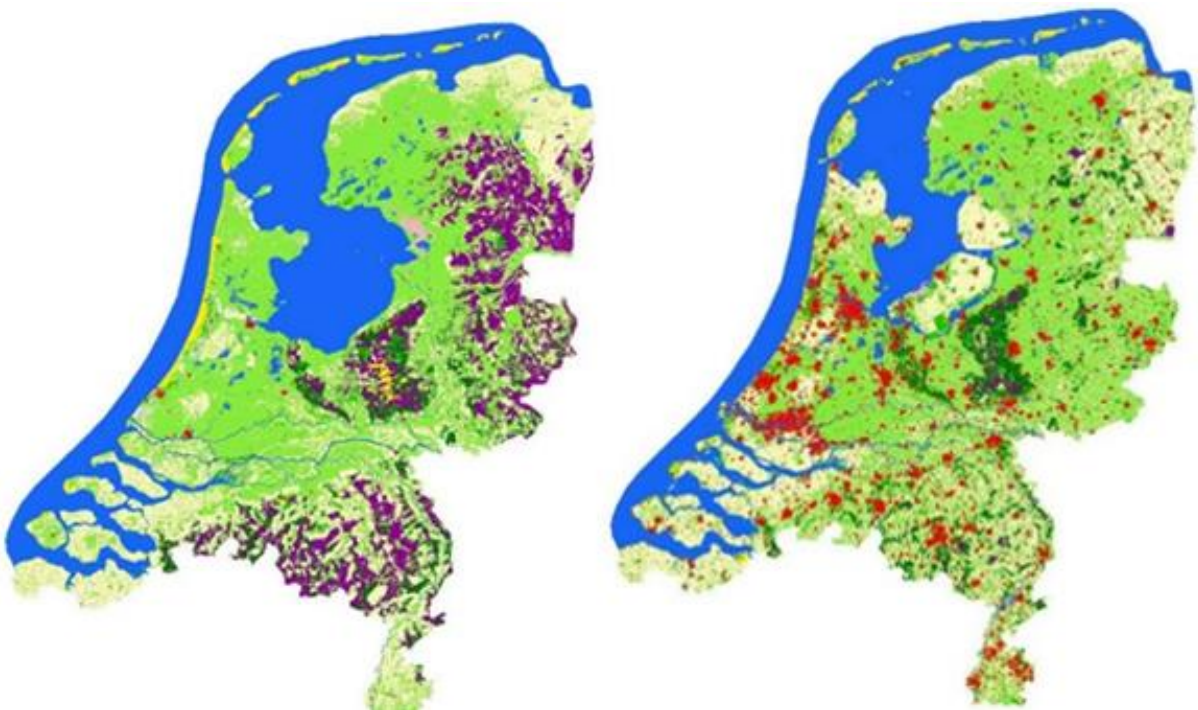
Figuur 3.27: Ligging KNMI-meetstation Rotterdam (gele stip) en verstedelijking in de periode 1950-2016. Boven 1950, onder 2016. Bron: Topografische Kaart 1:50.000.





Figuur 3.28: Ligging KNMI-meetstation Schiphol (gele stip) en verstedelijking. Boven 1950, onder 2016. Bron: Topografische Kaart 1:50.000.

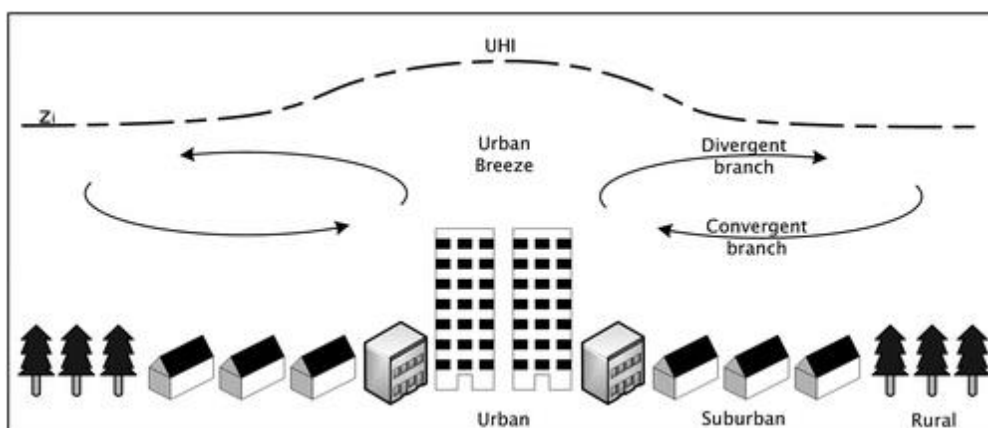
Voor de periode 1900-1966 zijn geen CBS cijfers beschikbaar van het oppervlak bebouwd terrein maar het is aannemelijk dat het groeitempo van het bebouwd oppervlak in deze periode aanzienlijk is geweest. Alleen in de periode 1914-1945 is er relatief weinig gebouwd. Op onderstaande kaarten is goed te zien dat de oppervlakte bebouwd terrein (rood) tussen 1900 en 2000 sterk is toegenomen (figuur 3.29):



Figuur 3.29: Verstedelijking (rood) in Nederland 1900-2000. Links 1900, rechts 2000. Bron: W.C.Knol et al.⁷⁰

In 2012 was 15% van het landoppervlak in Nederland bebouwd (data CBS). In een rapport van het PBL uit 2006 schatten de onderzoekers dat het verstedelijkt oppervlak in 2040 kan oplopen tot 20%. De verstedelijking in Nederland richt zich sterk op de Randstad en op Twente, Arnhem-Nijmegen en de Brabantse steden. Ook verwacht men een forse groei van woningbouw in het Groene Hart. Verder is er sprake van een toenemende verstedelijking in de kleinere steden door het hele land. Het is aannemelijk dat die toenemende verstedelijking van invloed zal zijn op de temperatuur de komende decennia.

Wat bijzonder aan de verstedelijking in Nederland is, is dat deze sterk versnipperd is. We kennen geen zeer grote steden maar wel heel veel middelgrote en kleine steden. Vanwege die ruimtelijke vernippering van de verstedelijking is het aannemelijk dat de temperaturen in peri-urbane gebieden en wellicht ook delen van rurale gebieden beïnvloed worden door nabijgelegen stedelijke bebouwing. In een studie uit 2016 naar de effecten van UHI op de neerslag in West-Nederland concluderen Daniels et al: *“In all, we find our methodology deals well with the fragmented urban areas in the Netherlands and the influence of such type of urbanization can be similar to that of a large metropolitan region.”*⁷¹



Figuur 3.30: Het ontstaan van Urban Breeze Circulation. Bron: Hidalgo et al 2010.

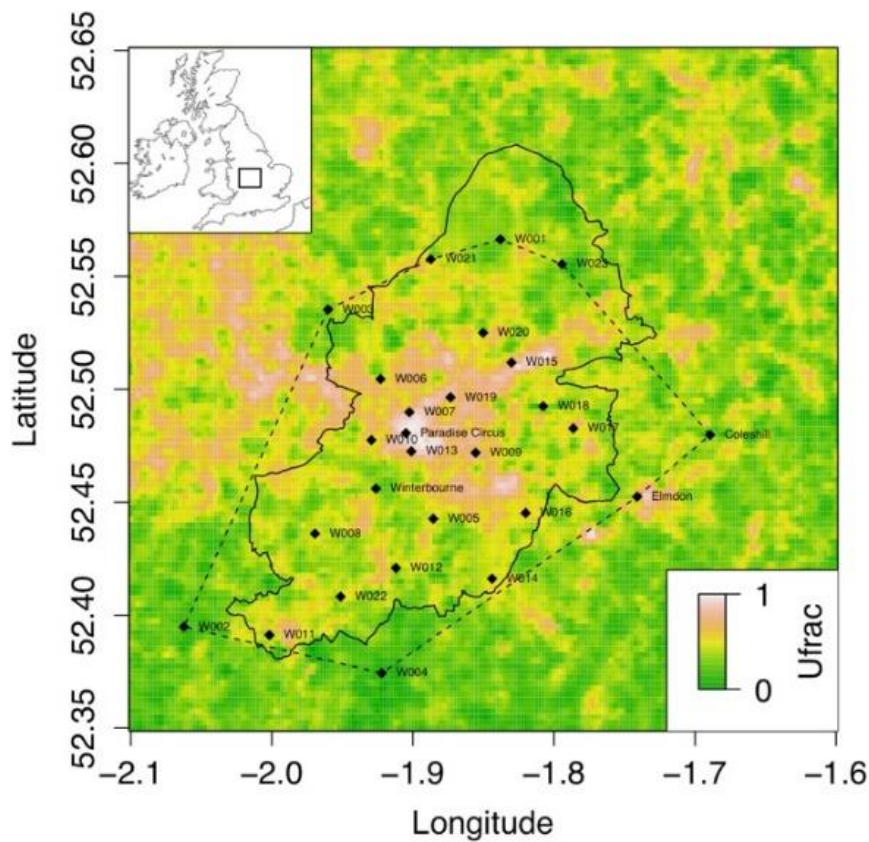
Het UHI-effect heeft ook invloed op de luchtcirculatie in de omgeving. Hidalgo et al. spreken van een Urban Breeze Circulation: een circulatie die ontstaat door de temperatuurverschillen tussen de stad en het omringende rurale gebied.⁷² Door de

⁷⁰ Knol, W.C., H. Kramer & H. Gijsbertse (2004), Historisch Grondgebruik Nederland; een landelijke reconstructie van het grondgebruik rond 1900, Wageningen, Alterra

⁷¹ E. E. Daniels, G. Lenderink, R. W. A. Hutjesa, A. A. M. Holtslag, 2016. Short Communication Observed urban effects on precipitation along the DutchWest coast. Int. J. Climatol. 36: 2111–2119 (2016)

⁷² J. Hidalgo, V. Masson, L. Gimeno (2010), Scaling the Daytime Urban Heat Island and Urban-Breeze Circulation, Journal of Applied Meteorology and Climatology

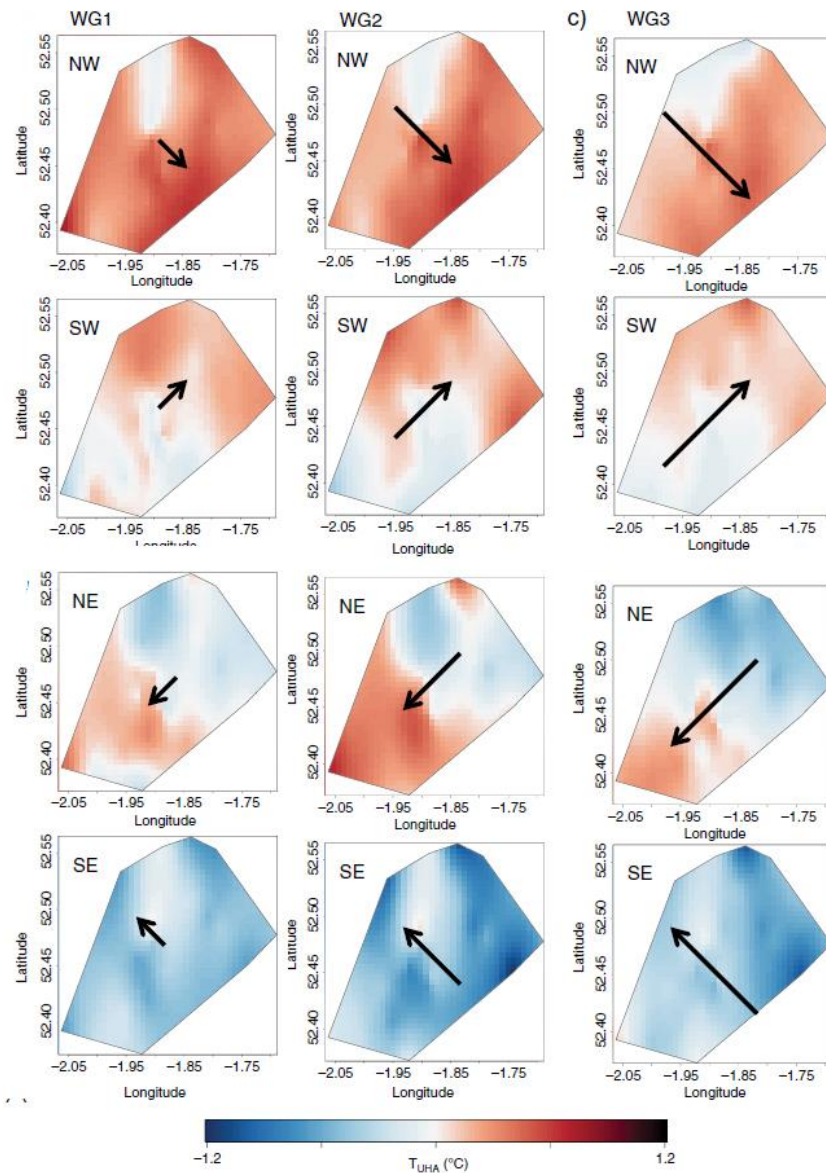
aanwezigheid van wind kan warmte boven de stad verticaal mengen en naar de omgeving getransporteerd worden. Deze zogenaamde *urban plumes* kunnen tot 10 à 15 km van het stadscentrum reiken.



Figuur 3.31: Onderzoeksgebied Bassett et al. rond Birmingham. Ufrac is de mate van verstedelijking. Bron: Bassett et al.

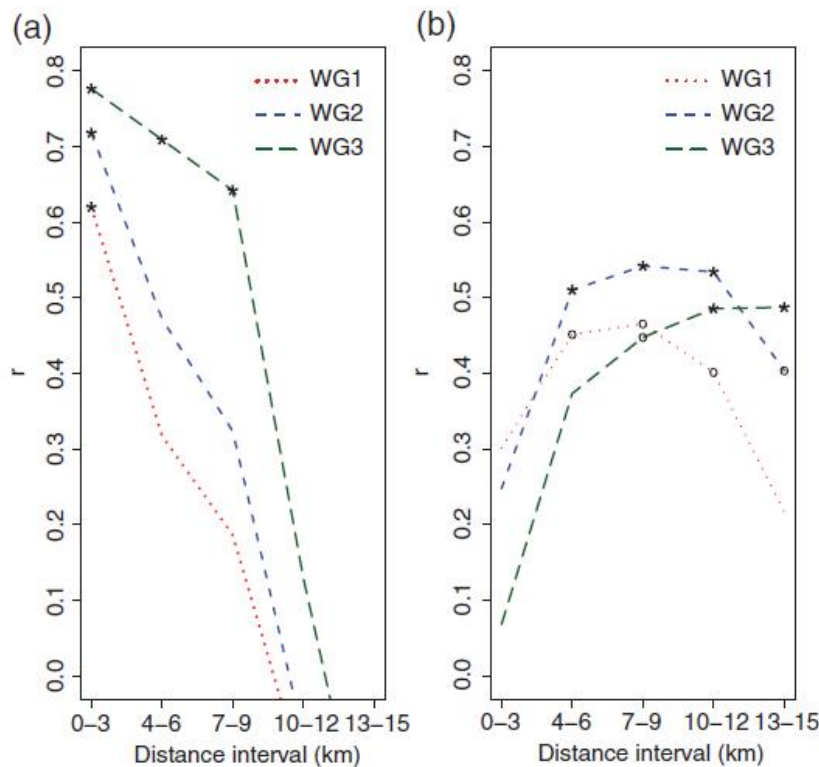
Een recent grootschalig onderzoek van advectie van stadswarmte naar de omgeving van Birmingham is door Bassett et al in 2016 gepubliceerd.⁷³ Met behulp van 29 weerstations (zie figuur 3.31) in en rond Birmingham hebben de onderzoekers 20 maanden lang onderzoek gedaan naar het proces van Urban Heat Advection (UHA). De meetopstelling tot 15 km van het referentie-meetstation in het centrum van Birmingham bracht een upwind-downwind temperatuurverschil tot 1,2°C aan het licht.

⁷³ R. Bassett et al, 2016. Observations of urban heat island advection from a high-density monitoring network, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Q.J.R.Meteorol.Soc. 142: 2434–2441, July 2016 B DOI:10.1002/qj.2836



Figuur 3.32: Ruimtelijke effecten van UHA voor vier windrichtingsectoren en drie windsnelheden: WG1 ($<2\text{ms}^{-1}$), WG2 (2 tot 3ms^{-1}) en WG3 ($>3\text{ms}^{-1}$). Bron: Bassett et al.

Bassett et al. onderzochten ook de correlatie tussen UHI en Ufrac (verstedelijkingsgraad) en UHA en Ufrac. Niet verwonderlijk is dat de correlatie tussen UHI en Ufrac het sterkste was in de afstandscategorie 0-3 km en daarna sterk afliep.



Pearson's correlation coefficient (r) between (a) UHI ($\overline{\Delta T_{i-u}}$) and Ufrac annuli ($Ufrac_{(i,d)}^{(ann)}$), (b) UHA ($T_{UHA(i)}^{(\theta)}$) and Ufrac arcs ($\Delta Ufrac_{(i,d)}^{(\theta)}$) at 3 km intervals from the stations. (*) Correlation is significant at the 0.01 level; (o) Correlation is significant at the 0.05 level.

Figuur 3.33: Correlatie tussen UHI (links) en UHA (rechts) en afstand tot het referentiemeetstation in het centrum van Birmingham. Bron: Bassett et al.

De correlatie neemt voor alle windsnelheidsgroepen toe op de afstand 4-6 km (significant op 0,01 niveau). De correlatie voor windsnelheidsniveau WG1 (<2ms⁻¹) is het sterkst op de afstand 4-9 km. Voor WG2 (2 tot 3ms⁻¹) is de correlatie het hoogst op 7-9 km afstand en blijft hoog tot 10-12 km. Voor WG3 (>3ms⁻¹) ligt de hoogste correlatie op 13-15 km afstand. Een hogere windsnelheid vervoert de warmte dus verder.

Uit de ruimtelijke spreiding van het UHA-effect in figuur 3.32 en de grafiek b van figuur 3.33 is af te leiden dat voor wat betreft windklasse WG3 de significante correlatie op 13-15 km afstand beperkt wordt door de omvang van het onderzoeksgebied. Voor een aanzienlijk grotere stad als Londen zijn UHA-effecten gevonden tot 40 km downwind (Bohnenstengel 2011⁷⁴).

In Nederland is er op zich veel aandacht voor stadseffecten. De KNMI-brochure besteedt er ook aandacht aan: "Uit onderzoek van de Nederlandse Organisatie voor toegepast-

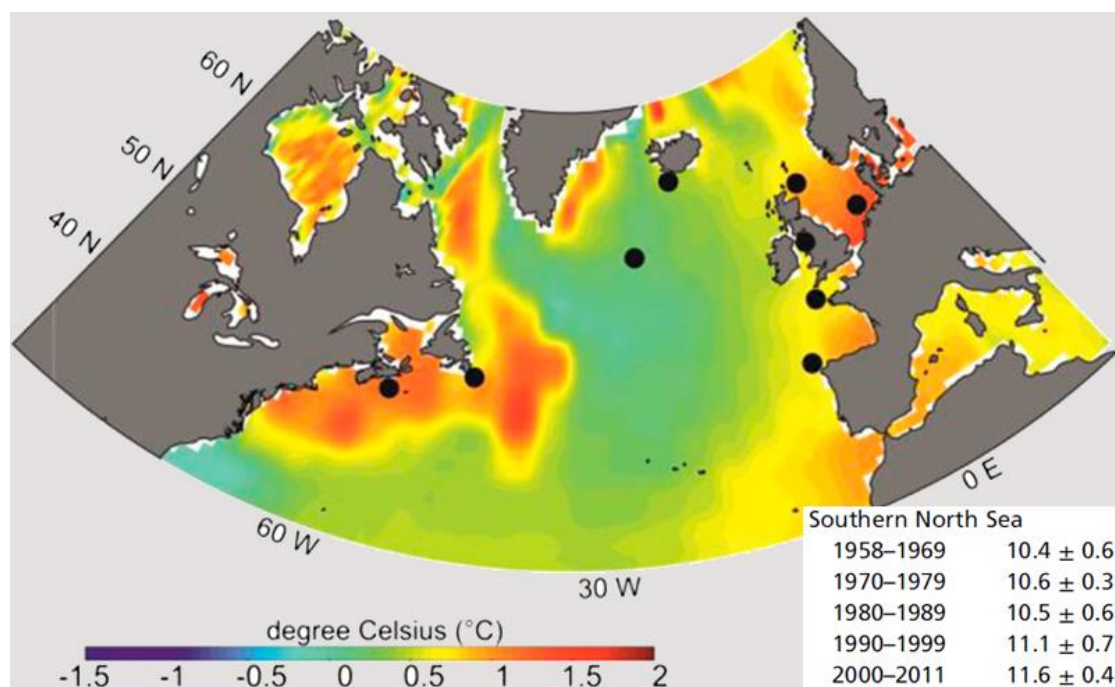
⁷⁴ S. I. Bohnenstengel et al (2011), Simulations of the London urban heat island, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.

natuurwetenschappelijk onderzoek (TNO), Wageningen UR en het KNMI blijkt dat het temperatuurverschil door het warmte-eiland effect gemiddeld even groot is als de temperatuurverandering in de scenario's voor 2050.” Erbij staat een kaartje van Utrecht dat laat zien dat jaarrond de nachten daar gemiddeld tot twee graden warmer zijn dan het nabijgelegen platteland.

In termen van attributie speelt het UHI echter nauwelijks een rol. Op de trend in De Bilt is een kleine correctie van 0,14°C toegepast. Het lijkt aannemelijk dat vanwege de sterke verstedelijking van het Nederlands grondgebied en de ruimtelijke versnippering van die verstedelijking veel meer stations in Nederland beïnvloed zijn door het UHI.

De Noordzee

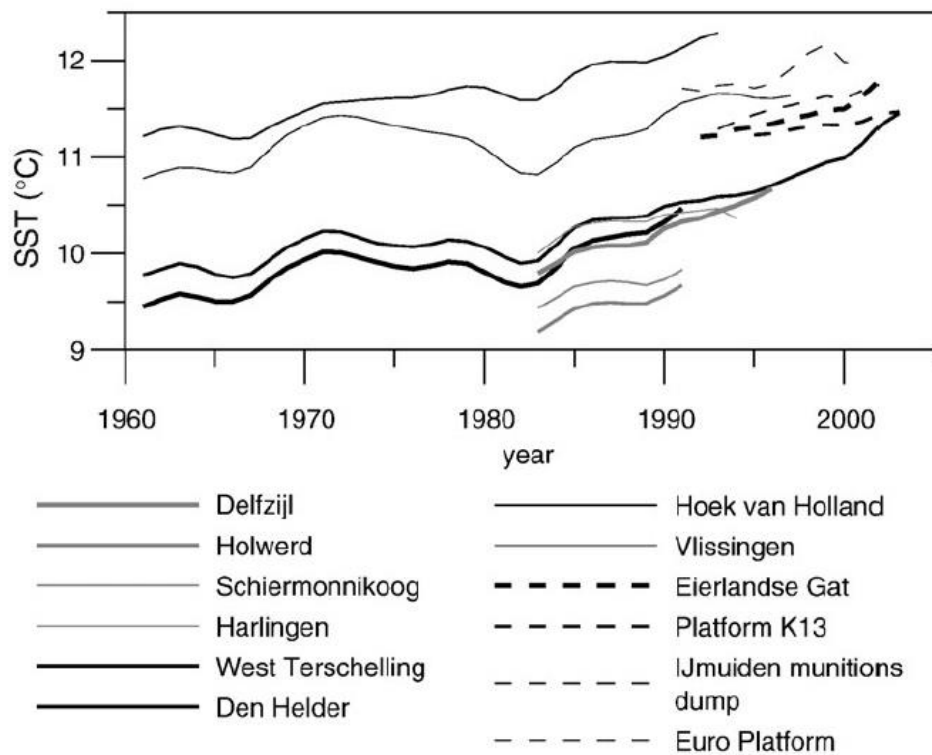
De zuidelijke Noordzee is sinds het begin van de jaren '80 van de vorige eeuw opmerkelijk opgewarmd. Vezzulli et al. constateerden een opwarming tussen 1980-1989 en 2000-2011 van 10,5°C naar 11,6°C, volgens de onderzoekers een gevolg van de toegenomen temperatuur op het Noordelijk Halfrond ('*climate change*') en de positieve fase van de Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO).⁷⁵



Figuur 3.34: Opwarming zuidelijke Noordzee. Bron: Vezzulli et al.

⁷⁵ Vezzulli L., C. Grande, P.C. Reid, P. Hélaouët, M. Edwards, M.G. Höfle, I. Brettar, R.R. Colwell, C. Pruzzo (2016), Climate influence on *Vibrio* and associated human diseases during the past half-century in the coastal North Atlantic, PNAS

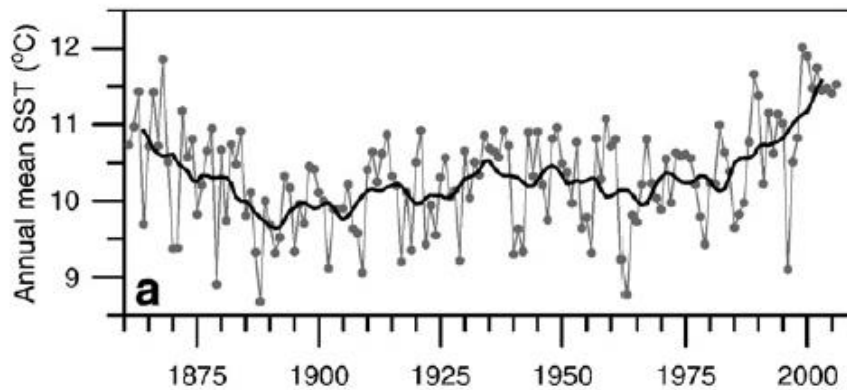
Van Aken heeft de opwarming van de Nederlandse kustwateren nader onderzocht. Hij maakte gebruik van de langjarige SST-reeksen (Sea Surface Temperature) van een twaalfstal stations in de Nederlandse kustwateren.⁷⁶



Figuur 3.35: 10-jarig voortschrijdend gemiddelde van de jaargemiddelde SST van de twaalf stations. Bron: Van Aken 2010.

In figuur 3.35 is duidelijk een sprong in SST te zien in het begin van de jaren '80. Van Aken gebruikt deze data om vast te stellen dat de langjarige SST-reeks van het Marsdiep (vanaf 1860!) representatief is voor de langjarige SST-ontwikkeling voor de gehele Nederlandse kust.

⁷⁶ H.M. van Aken (2010), Meteorological forcing of long-term temperature variations of the Dutch coastal waters, Journal of Sea Research



Figuur 3.36: Jaarlijkse gemiddelde SST in het Marsdiep met 10-jarig voortschrijdend gemiddelde 1860-2008. Bron: Van Aken.⁷⁷

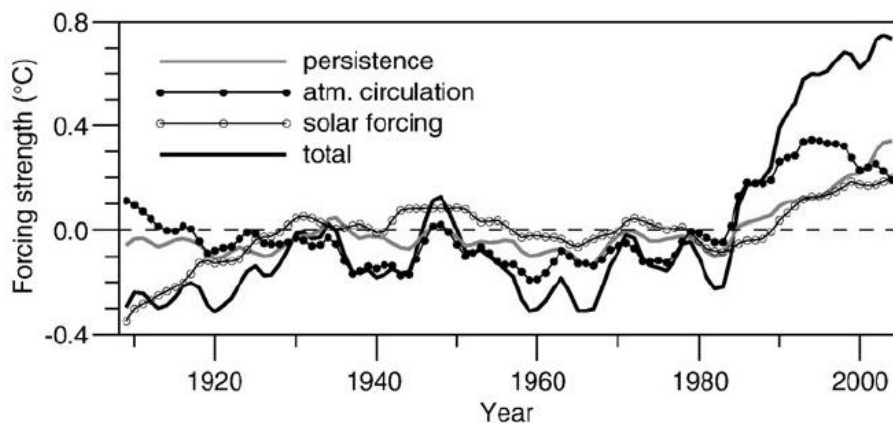
Opvallend is ook hier de sterke temperatuurstijging van de SST sinds de jaren '80 van de vorige eeuw. Minstens zo opvallend is de sterke daling van de SST van 1860 tot 1890 en het feit dat de temperatuur rond 1860 vergelijkbare waardes had als na 2000.

Van Aken heeft op zijn zoektocht naar de oorzaken van deze stijging gebruik gemaakt van meervoudige lineaire regressie, dat klimatologische en oceanografische forceringen koppelt aan de SST. De oceanische forcering is de SST van het voorafgaande seizoen en representeert de persistentie van de temperatuur als gevolg van het feit dat water langzaam afkoelt en opwarmt. Deze is alleen werkzaam op de tijdschaal van seizoenen. De klimatologische forceringen die in het model zijn ingebracht zijn de windrichting en de directe inkomende zonnestraling.

In voorgaande paragraaf over de veranderde luchtcirculatie is al gewezen op het positiever worden van de winter NAO-index en de daarmee gepaard gaande verandering in luchtcirculatie. Die verandering van de luchtcirculatie heeft geleid tot een toename van de westenwind in de winter met advectie van relatief warme en vochtige oceanische lucht. Deze lucht vermindert de warmteverliezen door een toenemende terugstraling van infrarode straling, en vermindert ook de verliezen door latente en voelbare warmte door verminderde turbulentie.

In de zomer domineert de zonne-instraling de energiebalans. We zagen reeds in de paragraaf over brightening dat er sinds het begin van de jaren 1980 een opmerkelijke toename is van de hoeveelheid invallende zonne-energie. Van Aken gebruikt de langjarige reeksen (vanaf 1909) van dagelijkse zonuren als proxy voor de kortgolvlige straling.

⁷⁷ H.M. van Aken (2008), Variability of the water temperature in the western Wadden Sea on tidal to centennial time scales, *Journal of Sea Research*, Volume 60, Issue 4, p. 227-234.



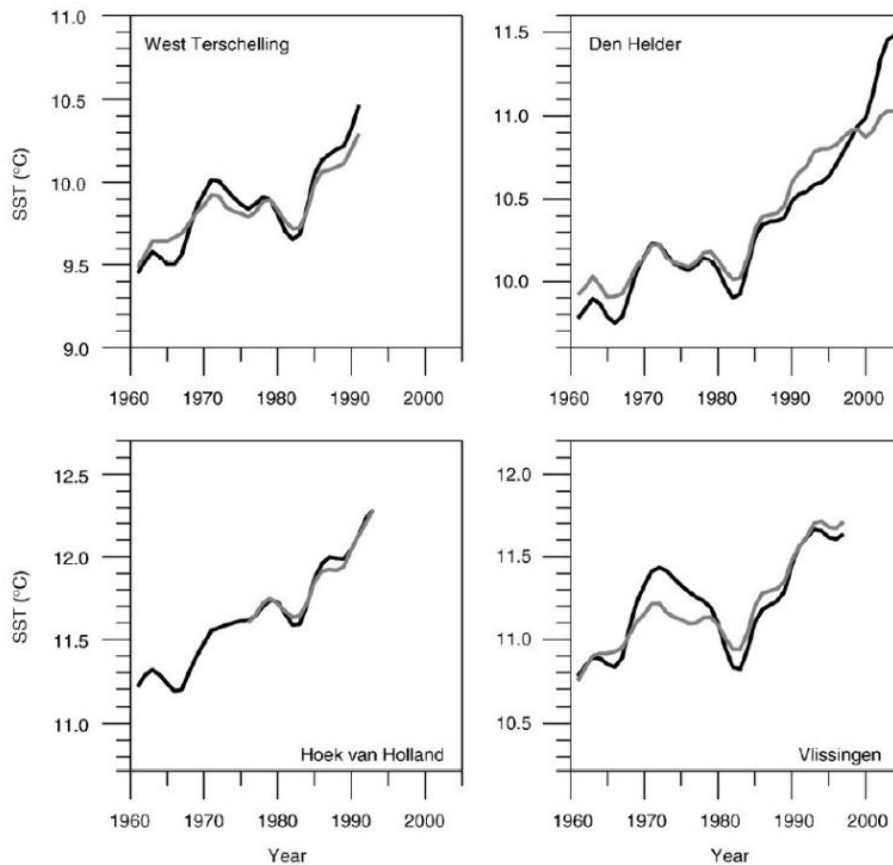
Figuur 3.37: 10-jarig voortschrijdend gemiddelde van het aandeel van de factoren persistentie, verandering in luchtcirculatie en zonne-forcering in de totale gemodelleerde SST-variantie. Bron: Van Aken.

Als we kijken naar de invloed van de gebruikte meervoudige regressie-parameters dan is de persistentie van de SST de kleinste factor. Die is van invloed op de SST van het volgende seizoen maar de invloed is van korte duur en beïnvloedt de SST nooit langer dan 1 jaar. Wel is de stijging van de persistentie vanaf 1982 een indicator voor de opwarming als gevolg van veranderingen in externe forcering.

De toename van het aantal zonne-uren (van 4,2 uren naar 5,1 uren/dag) van 1982 tot 2007 bedraagt maar liefst 21%. Dat resulteert na 2003 in een toename van de watertemperatuur met $\sim 0,3$ °C. Van Aken constateert dat dezelfde trend ook te zien is op de belangrijke weerstations op het land en dat de toename van de temperatuur op die stations hoofdzakelijk het gevolg is van de sterke toename van de zonne-instraling in de lente.

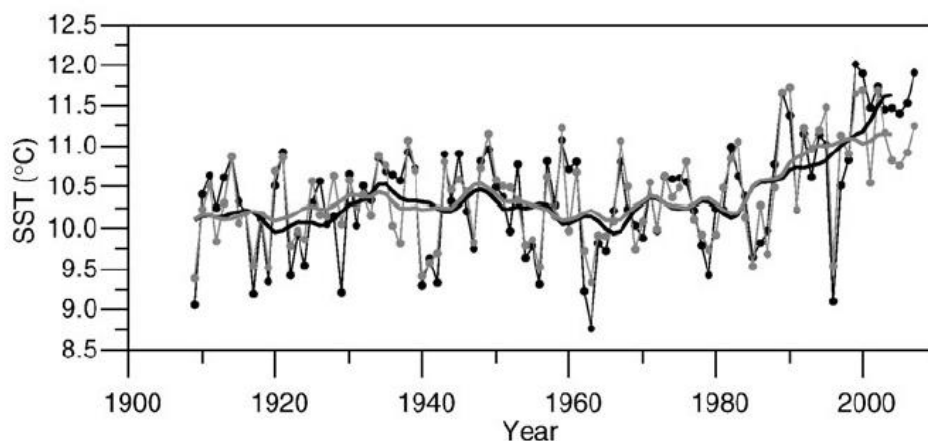
Overigens is de toename van de zonne-energie zoals die plaats vindt van 1982 tot 2004 niet uniek: Van Aken constateerde dat tussen 1909 en 1931 een nog sterkere zonne-forcering optrad. Deze periode wordt overigens ook wel aangeduid als *early brightening*.

De belangrijkste factor voor de toename van de SST vanaf 1982 is echter de verandering in luchtcirculatie (toename westenwind). De invloed daarvan deed zich het sterkst gelden in de herfst en winter en deed de SST tussen 1982 en 2007 toenemen met $0,4$ °C.



Figuur 3.38: 10-jarig voortschrijdend gemiddelde op basis van gemiddelde jaarlijkse SST in de vier belangrijkste getijde-openingen (gemeten, zwart). In grijs het 10-jarig voortschrijdend gemiddelde op basis van de gehanteerde forceringen in meervoudige regressiemodellen. Bron: Van Aken.

De meervoudige regressieanalyse op basis van de drie forceringen zoals die door Van Aken zijn gehanteerd verklaren vrijwel helemaal de langjarige SST-trends van de vier grote getijde-openingen aan de Nederlandse kust. Tot slot nog de correlatie tussen gemeten SST in het Marsdiep vanaf 1908 en de uitkomsten van de multiële regressiemodellen:



Figuur 3.39: Jaarlijkse gemiddelde SST in het Marsdiep met 10-jarig voortschrijdend gemiddelde (zwart). In grijs de uitkomst van het meervoudige lineaire regressiemodel van Van Aken.

Bijzonder is dat het meervoudige regressiemodel van Van Aken broeikasgassen niet meeneemt als forcering. De auteur: *“An explicit local greenhouse effect is not required as separate forcing factor to explain the recent warming trend of Dutch coastal waters starting in the early 1980s; coincident variations in wind statistics and cloudiness are a sufficient explanation.”* Het is dus mogelijk om de toename van de watertemperatuur voor onze kust volledig te ‘verklaren’ met de persistentie van de zeewatertemperatuur (een warme zee blijft wel even warm), de veranderende luchtcirculatie en de toename van de zonnestraling.

De warmer geworden Noordzee is uiteraard ook (via advectie) van invloed op de temperatuur op land en op de neerslag (waarover in het volgende hoofdstuk meer). Merkwaardig genoeg besteedt het KNMI helemaal geen aandacht aan de ontwikkeling van de zeewatertemperatuur langs onze kust, zoals in de paper van Van Aken is gedaan. Dit is een belangrijke omissie.

Conclusies

Het is verleidelijk om de temperatuurontwikkeling in ons land na 1950 te vergelijken met die van de wereld als geheel, inclusief de dominant geachte rol van CO₂. Het KNMI doet dat dan ook en gaat er bij de KNMI-scenario's vanuit dat broeikasgassen na 1950 een dominante invloed hadden, ook op het Nederlandse klimaat, en dat dit de komende eeuw zo zal blijven. In dit hoofdstuk hebben we laten zien dat de aanname dat broeikasgassen een dominante invloed hebben op het Nederlandse klimaat nog altijd zeer voorbarig is.

De meest in het oog springende verandering in de afgelopen eeuw was een plotselinge sprong in de temperatuur van ruim een graad Celsius eind jaren '80. Die sprong is terug te vinden in grote delen van West-Europa en zelfs in de zeewatertemperaturen langs de Europese kusten. Het KNMI rept noch in de brochure noch in het wetenschappelijke achtergrond over deze 'sprong'. Het prefereert duidelijk een meer (non)lineaire blik op onze recente klimaatgeschiedenis. Men benadrukt dat Nederland twee keer zoveel is opgewarmd dan wereldgemiddeld en dat het merendeel van die opwarming na 1950 plaatsvond, de periode waarvan het IPCC zegt dat het vrijwel zeker is dat broeikasgassen een grote invloed hadden. Beide constatering van het KNMI zijn waar, maar datzelfde geldt voor de constatering dat de opwarming in Nederland grotendeels gezien kan worden als een sprong eind jaren '80. Zo'n sprong is echter veel lastiger te verklaren aan de hand van de geleidelijke toename van broeikasgassen in de atmosfeer.

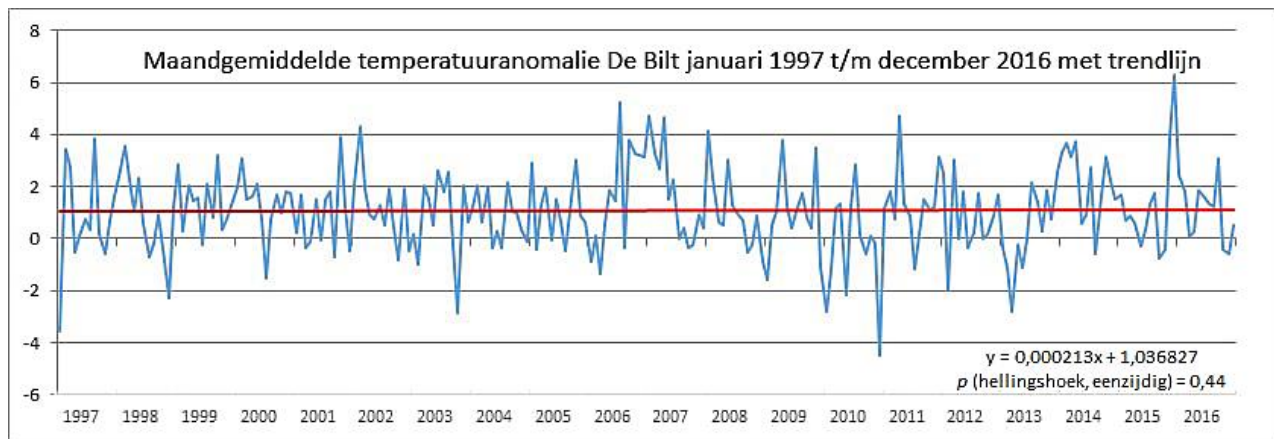
De afgelopen decennia is de veranderde luchtcirculatie misschien wel de belangrijkste factor geweest voor de toename van de temperatuur in ons land. Een grotere aanvoer van zachte lucht vooral in de winter zorgde voor een snelle toename van de temperatuur vanaf eind jaren '80 met ongeveer 1 °C. Ook de temperatuur van het Noordzeewater voor de kust nam in deze periode sterk toe onder andere vanwege de veranderde luchtcirculatie.

Het schoner worden van de lucht boven ons land heeft ervoor gezorgd dat vanaf de jaren '80 de inkomende kortgolvlige straling met maar liefst 10% is toegenomen. Het is aannemelijk dat deze brightening een flinke rol gespeeld heeft bij de opwarming. Een studie van Van Aken kon vrijwel alle veranderingen in de zeewatertemperaturen 'verklaren' met een combinatie van veranderde luchtcirculatie en de toename van zonnestraling.

De invloed van de toenemende verstedelijking is een andere (onderschatte) factor die van invloed is op de temperatuurontwikkeling. Niet alleen de mate van verstedelijking maar ook de voor Nederland kenmerkende versnippering van de verstedelijking heeft waarschijnlijk meer invloed dan tot nu toe wordt verondersteld. Onderzoek is noodzakelijk.

Kortom, wij constateren dat het KNMI weinig aandacht heeft besteed aan wat 'attributie' wordt genoemd, het toekennen van factoren/oorzaken aan de waargenomen verandering. In lijn met het IPCC veronderstelt het KNMI dat broeikasgassen ook in Nederland een dominante invloed hebben. Het KNMI toont dit echter niet aan. Dit is een belangrijke tekortkoming bij de verantwoording van de scenario's. Want pas als aannemelijk is gemaakt dat broeikasgassen dominant zijn heeft het zin om scenario's te draaien waarbij voornamelijk broeikasgassen toenemen terwijl andere factoren min of meer constant gehouden worden. Een aanbeveling van dit rapport is dan ook dat het KNMI, voordat het de nieuwe scenario's in 2021 uitbrengt, veel meer aandacht besteedt aan attributie.

De KNMI-scenario's geven aan dat Nederland in 2050 (tijdvak 2036-2065) 1 °C tot 2,3 °C warmer zal zijn dan in de referentieperiode (1981-2010). Dat betekent dat het iedere tien jaar 0,18 °C tot maar liefst 0,42 °C warmer zou moeten worden. Nu ligt de referentieperiode 1981-2010 nog niet zo lang achter ons, maar toch, hoe ontwikkelt de temperatuur zich de laatste jaren?



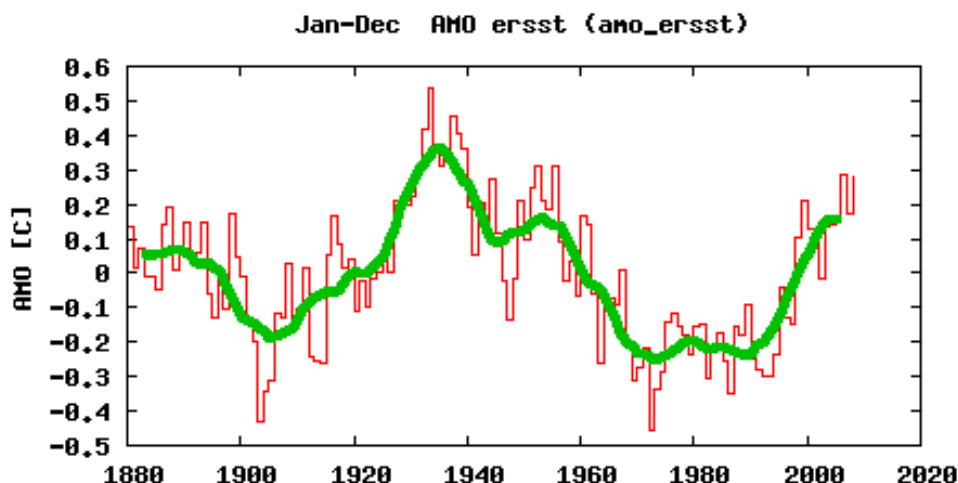
Figuur 3.40: Geen significante stijging van de temperatuur in De Bilt sinds 1997.

Opmerkelijk genoeg staat de temperatuurontwikkeling in ons land al twintig jaar vrijwel stil. Wie had twintig jaar geleden durven voorspellen dat de temperatuur in De Bilt tenminste twintig jaar geen significante stijging zou vertonen? In dezelfde periode is het CO₂-gehalte van de atmosfeer met ruim 11,5 % gestegen.⁷⁸

Voor de temperatuurontwikkeling in ons land lijkt de ontwikkeling van de globale temperatuur van ondergeschikt belang. Van Aken toonde aan dat de toename van de watertemperatuur voor onze kust volledig te 'verklaren' is op basis van persistentie van SST, veranderende luchtcirculatie en toename van de zonnestraling. Van brightening hoeven we echter in de toekomst niet veel meer te verwachten. De lucht is inmiddels flink opgeklaard en het ligt voor de hand dat de hoeveelheid zon die we ontvangen ook een soort maximum bereikt heeft.

Daarnaast is er de Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO), die sinds de jaren tachtig van de koude naar de warme fase opschoof:

⁷⁸ <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/full.html>



Figuur 3.41: AMO-index volgens de definitie van het KNMI. Bron: KNMI.⁷⁹

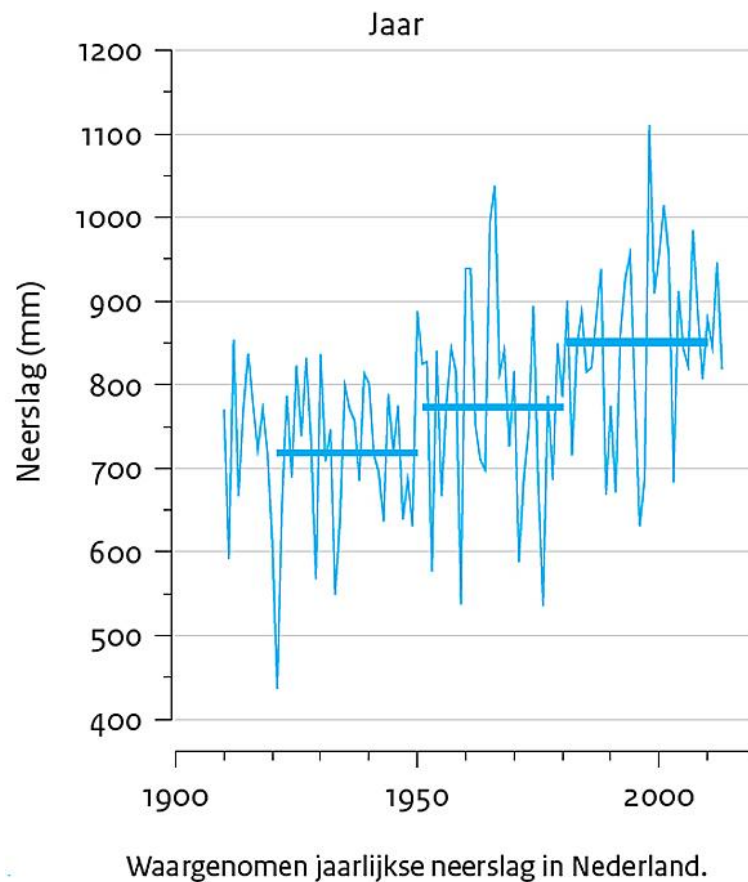
Sutton et al⁸⁰ komen tot de conclusie dat er voldoende bewijs is dat de temperatuur van de noordelijke Atlantische Oceaan de 'key driver' is van de klimaatverandering vanaf de jaren '90 in Europa. Historisch gezien is te verwachten dat de AMO de komende decennia weer zal dalen. Dit betekent simpelweg lagere temperaturen in de Atlantische Oceaan en dus koelere temperaturen als de wind van zee komt. Of zich weer grote veranderingen zullen voordoen in de windrichting is uiteraard niet te voorspellen.

Op basis hiervan vinden wij het niet ondenkbaar en zelfs heel reëel te verwachten dat de vlakke temperatuurtrend in Nederland nog wel tien tot twintig jaar kan voortduren en dat zelfs een daling van de temperatuur de komende decennia niet onaannemelijk is. Dit had eigenlijk als 'best case'-scenario in het KNMI-rapport meegenomen moeten worden. Want stel dat het met die klimaatverandering in ons land wel mee gaat vallen, wat dan?

⁷⁹ <http://climexp.knmi.nl/amo.cgi>

⁸⁰ Sutton R. T. & Dong B. Atlantic Ocean influence on a shift in European climate in the 1990s. Nat. Geosci. 5, 788–792 (2012)

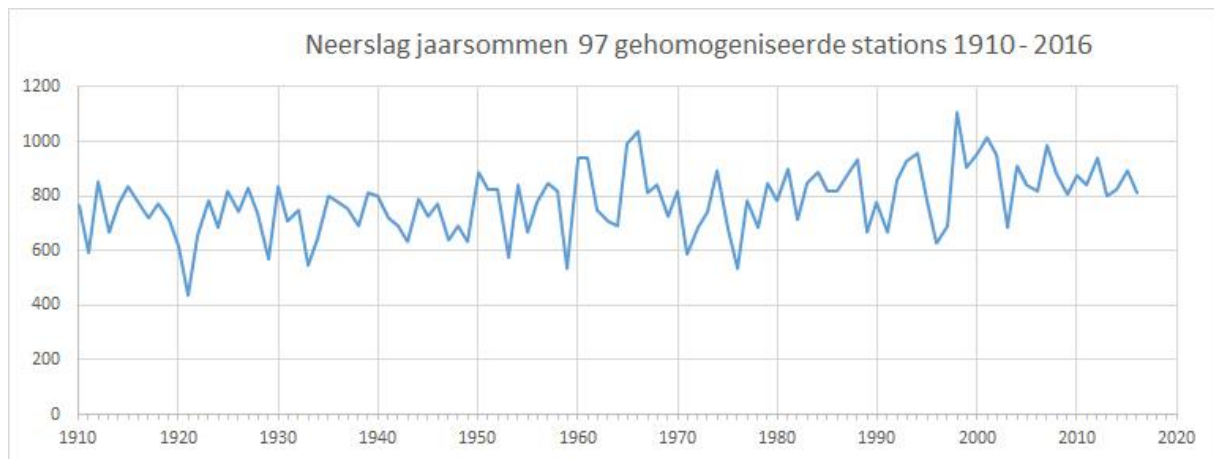
4. Neerslag: méér en extremer?



Figuur 4.1: Toename jaarlijkse neerslag in Nederland 1910-2013. Bron: KNMI.⁸¹

In Nederland is de totale jaarlijkse neerslag de afgelopen eeuw toegenomen. Bovenstaande figuur 4.1 uit de KNMI-brochure toont de toename tussen 1910 en 2013. De grafiek ziet er nogal dramatisch uit. Dat komt omdat de makers de y-as niet bij 0 laten beginnen en ook doordat de x-as korter is dan de y-as. Zo ziet dezelfde datareeks eruit met een iets andere lay-out van de grafiek (figuur 4.2).

⁸¹ http://www.climatescenarios.nl/images/Climate_scenarios_EN_2015.pdf



Figuur 4.2: Jaarsommen neerslag Nederland 1910-2016.

Data: KNMI

Volgens het KNMI is de toename in deze periode 26% en tussen 1951 en 2013 14%. Die toename zou voor een deel te danken zijn aan de hogere temperaturen, die ook de toename van de extremen verklaart. De KNMI-brochure verwoordt dat als volgt: *“Door de toename van de temperatuur is ook de hoeveelheid waterdamp in de lucht toegenomen sinds 1950. Dit verklaart gedeeltelijk de toename van de jaarlijkse hoeveelheid neerslag. Het effect op zware buien is nog groter. Uit waarnemingen blijkt dat bij de meest extreme buien de hoeveelheid neerslag per uur toeneemt met ongeveer 12% per graad opwarming.”*

In alle KNMI-scenario's neemt de neerslag in alle seizoenen toe, met uitzondering van de zomer. Extreme neerslagintensiteiten nemen in alle scenario's het hele jaar door toe, zelfs in de GH- en WH-scenario's waarin de zomerneerslag afneemt. Dat lijkt aannemelijk: hogere temperaturen leiden immers in theorie tot grotere verdamping, en *what goes up must come down*. Althans dat gaat op voor de aarde als geheel. Hoewel? Het IPCC is heel voorzichtig als het gaat om de mondiale trends in neerslag. In de Summary for Policy Makers van het IPCC-rapport uit 2013 schreef het: *“Confidence in precipitation change averaged over global land areas since 1901 is low prior to 1951 and medium afterwards. Averaged over the mid-latitude land areas of the Northern Hemisphere, precipitation has increased since 1901 (medium confidence before and high confidence after 1951). For other latitudes area-averaged long-term positive or negative trends have low confidence (see Figure SPM.2). {TS TFE.1, Figure 2; 2.5}”*⁸²

Het deel van de wereld waar Nederland in ligt kent een toename van neerslag, aldus het IPCC, maar voor de wereld als geheel is er 'low confidence' in neerslagtrends op land. Dat was ook de conclusie van een studie van Van Wijngaarden et al twee jaar later, die neerslaggegevens van bijna 1000 weerstations met minimaal honderd jaar aan metingen

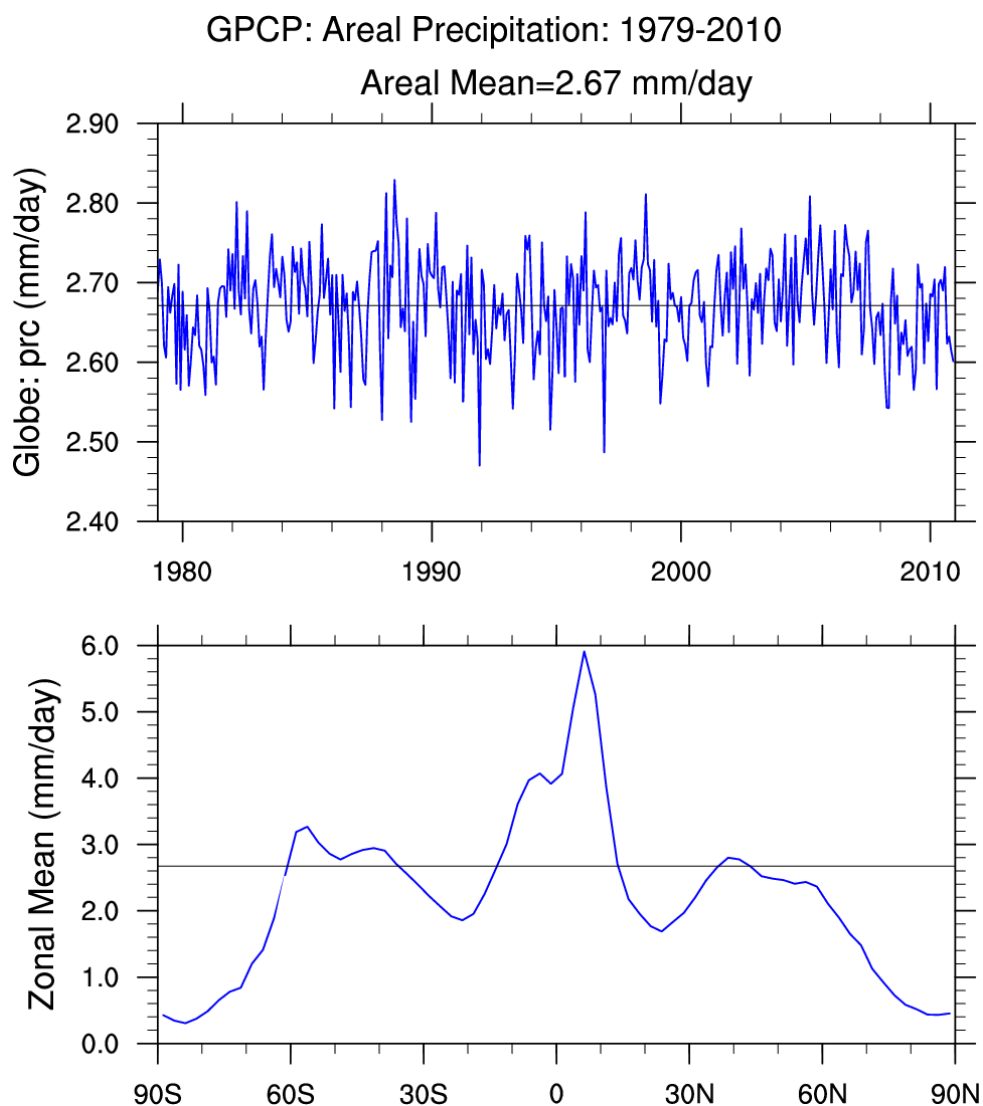
⁸² https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf (pag. 3)

onderzochten.⁸³ De Canadese onderzoekers concluderen dat *“global changes in precipitation over the Earth's land mass excluding Antarctica relative to 1961-90 were estimated to be: - 1.2±1.7, 2.6±2.5 and -5.4±8.1 percent per century for the periods 1850-2000, 1900-2000 and 1950-2000, respectively.”* Ook merkten zij op dat *“stations experiencing low, moderate and heavy annual precipitation did not show very different precipitation trends.”* Dit betekent volgens hen dat *“deserts/jungles are neither expanding nor shrinking due to changes in precipitation patterns.”* Hun eindconclusie luidt dan ook dat *“some caution is warranted about claiming that large changes to global precipitation have occurred during the last 150 years.”*

Voor trends op langere tijdschalen zijn we logischerwijs afhankelijk van weerstations op land. Tegenwoordig is het ook mogelijk om met behulp van satellieten neerslag in kaart te brengen zodat een echt mondiaal beeld ontstaat. Dit gebeurt bijvoorbeeld in het Global Precipitation Climatology Project (GPCP).⁸⁴ Ook hier geen duidelijke trends te zien:

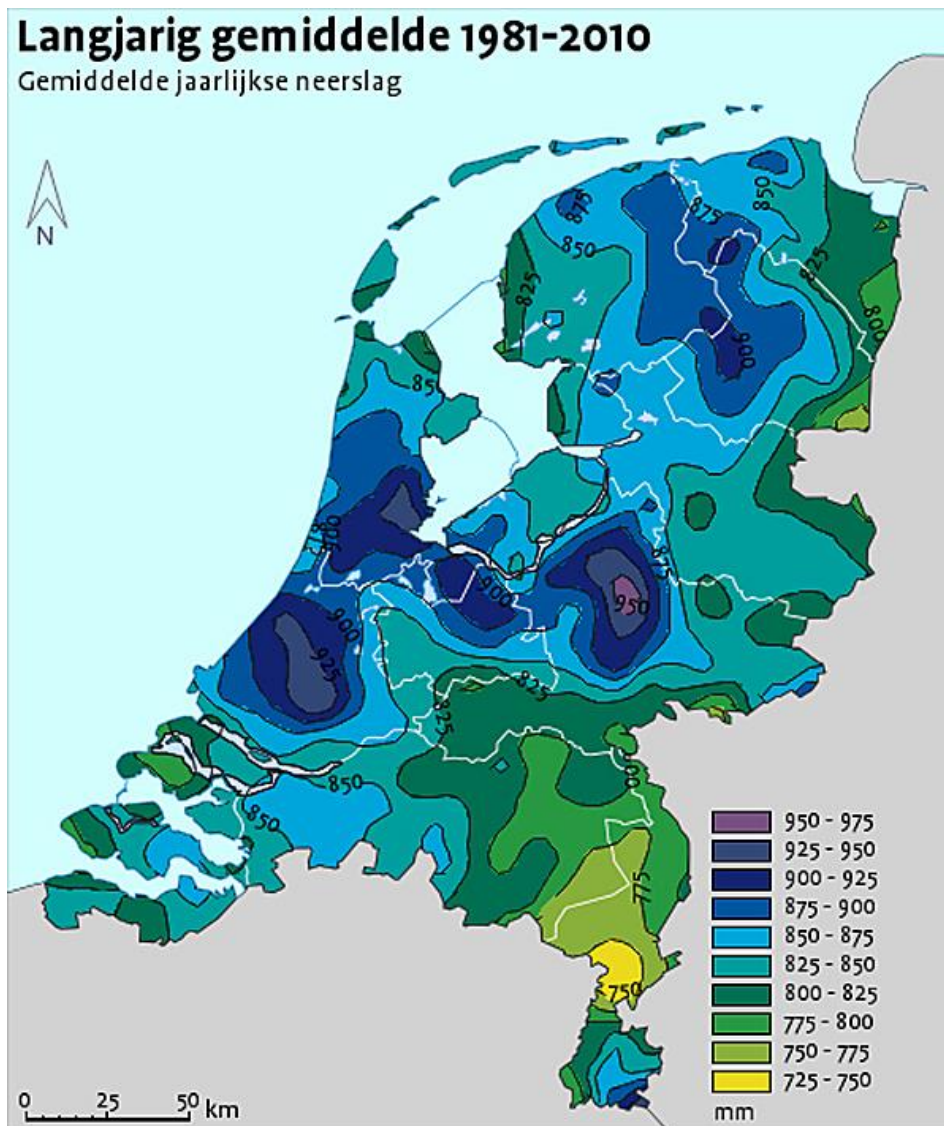
⁸³ Van Wijngaarden, W.A. and Syed, A. 2015. Changes in annual precipitation over the Earth's land mass excluding Antarctica from the 18th century to 2013. *Journal of Hydrology* 531: 1020-1027.

⁸⁴ <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpcp-monthly-global-precipitation-climatology-project>



Figuur 4.3: Ontwikkeling van de mondiale neerslag tussen 1979 en 2010. Onder: verdeling van de neerslag over breedtegraden. Bron: GPCP.

Maar in Nederland is er zoals de KNMI-grafiek laat zien wel een duidelijke toename van neerslag sinds 1900. Op lokale en regionale schaal kunnen andere factoren dan de simpele redenering 'warmer is natter' een rol spelen. Daar gaat het in dit hoofdstuk over. En over de vraag of waarnemingen bevestigen dat er sprake is van extremere neerslag in ons land.



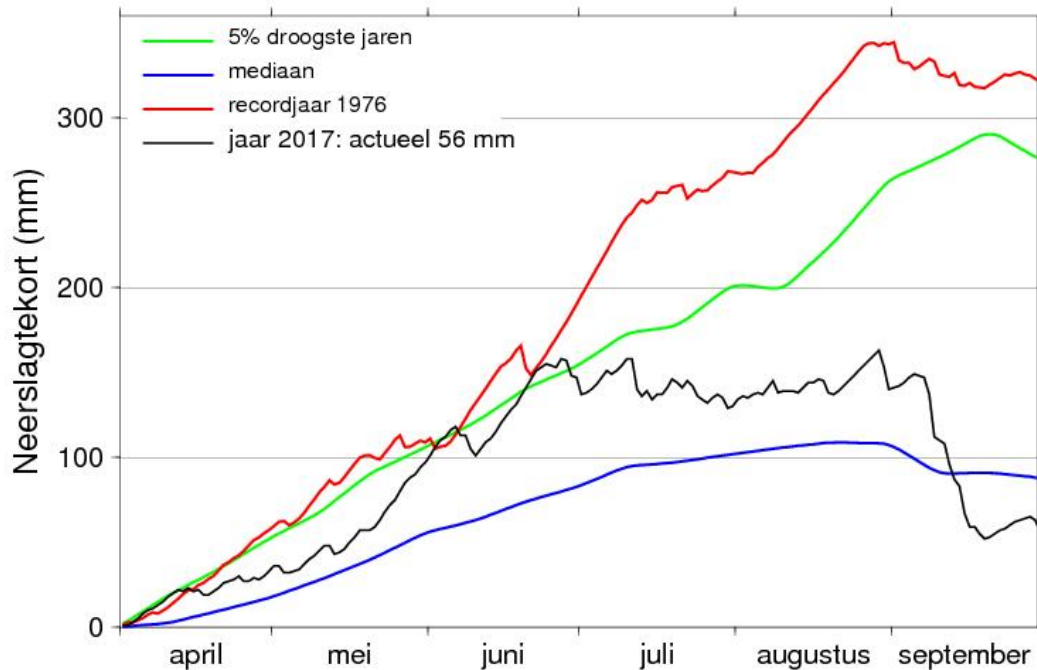
Figuur 4.4: Gemiddelde jaarlijkse neerslag 1981-2010. Bron: Klimaatatlas.⁸⁵

In figuur 4.4 is de gemiddelde jaarlijkse neerslag weergegeven voor de periode 1981-2010. Grofweg kun je stellen dat de ruimtelijke spreiding van de jaarlijkse neerslag op deze schaal door een drietal factoren wordt beïnvloed: afstand tot de kust, hoogteligging en verstedelijking. Vooral de hoogteligging en de verstedelijking vallen in het kaartbeeld op. Overigens valt het met de hoeveelheid jaarlijkse neerslag in ons land wel mee, zeker als je de verdamping in ogenschouw neemt: van april tot oktober heerst hier zelfs een neerslagtekort.

⁸⁵ <http://www.klimaatatlas.nl/>

Neerslagtekort in Nederland in 2017

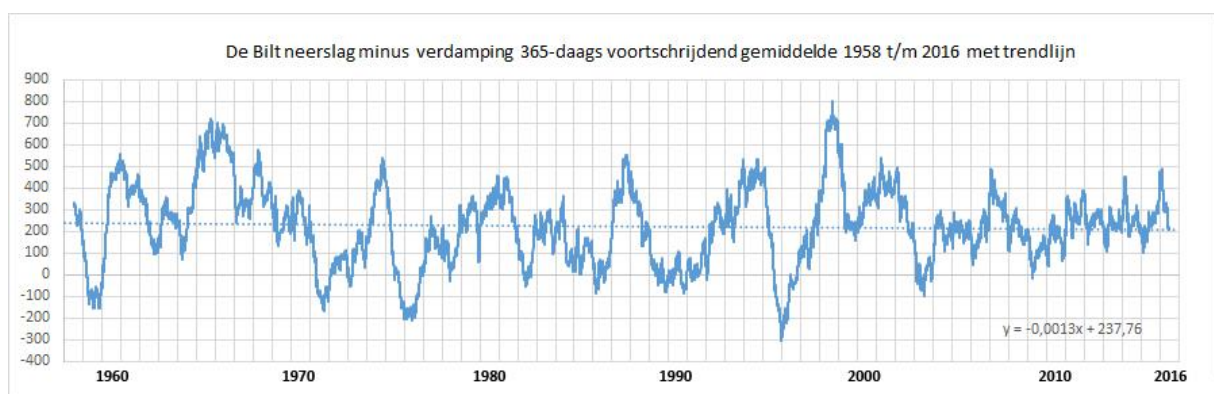
Landelijk gemiddelde over 13 stations



(c) KNMI, bijgewerkt 2017-10-30, 15:32 UT

Figuur 4.5: Neerslagtekort. Bron: KNMI.⁸⁶

Gemiddeld is er de afgelopen 50 jaar weinig veranderd aan de hoeveelheid nuttige neerslag die op jaarbasis na verdamping overblijft. Figuur 4.6 toont het verschil tussen de dagelijkse neerslag in De Bilt en de zogenaamde referentiegewasverdamping (EV24) in een 365-daags voortschrijdend gemiddelde sinds 1958. De trend is nagenoeg vlak.

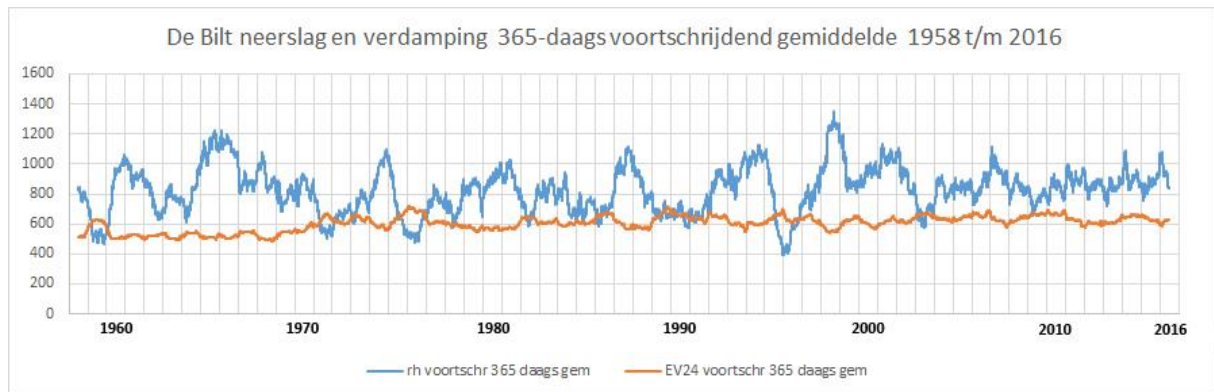


Figuur 4.6: 365-daags voortschrijdend gemiddelde neerslag minus verdamping De Bilt 1958 t/m 2016. Data: KNMI.⁸⁷

⁸⁶ http://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/geografische-overzichten/neerslagtekort_droogte

⁸⁷ <http://projects.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/selectie.cgi>

In figuur 4.7 zijn neerslag en verdamping in De Bilt afzonderlijk weergegeven. De neerslag vertoont al sinds begin jaren '90 geen stijging meer. Wat opvalt is dat tot het begin van het nieuwe millennium de neerslag sterk volatiel is en daarna geen echte grote schommelingen meer vertoont. Die volatiliteit is dus de oorzaak van de grote schommelingen in figuur 4.7. De verdamping toont rond 1970 een lichte stijging waarna de trend tot heden vrij vlak is.



Figuur 4.7: 365-daags voortschrijdend gemiddelde neerslag en verdamping De Bilt 1958 t/m 2016. Data: KNMI.⁸⁸

Dat de hoogteligging zo'n zichtbare invloed heeft (zie figuur 4.4) op de neerslag wekt vaak verbazing. Zelfs geringe hoogteverschillen van nog geen twintig meter, zoals die van het Drents Plateau, blijken de jaarlijkse neerslag relatief sterk te doen toenemen.

In het hoofdstuk over de temperatuur lieten we zien dat de luchtcirculatie boven ons land de afgelopen decennia grote veranderingen heeft ondergaan. Daarbij is een toename van de ZW-circulatie de opvallendste. Die verandering heeft ongetwijfeld ook geleid tot een toename van de neerslag, indachtig het gezegde 'zuidwest regennest'.

Het kusteffect met betrekking tot de neerslag hangt sterk af van de wisselwerking tussen verandering van het luchtstromingspatroon, het temperatuurcontrast tussen land en zee en de stijging van de temperatuur. Het totale effect is zo onzeker, dat het door het KNMI niet is meegenomen in de KNMI'14-klimaatsscenario's.

De vraag wat de toename van de neerslag in ons land de afgelopen eeuw bepaalde spitst zich ons inziens dus toe op de toename van de temperatuur, de veranderende luchtcirculatie en de toegenomen verstedelijking. Daarbij speelt de wijze waarop we neerslag meten en analyseren wellicht ook een rol.

Meetproblemen

⁸⁸ <http://projects.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/selectie.cgi>

Het meten van neerslag kan op een aantal manieren. De meest gebruikte is de handmeting (links op de foto), gevolgd door de automatische meting. En dan is er nog de radarmeting.



Figuur 4.8: Verschillende neerslagmeters. Bron: A. Overeem.⁸⁹

De handmeting is de meest wijdverbreide methode en de standaard volgens directieven van de WMO (1982). Bekend was dat de automatische meetinstrumenten op jaarbasis een 5% lagere waarde geven dan de handmatig afgelezen instrumenten. In haar directief van 1981 stelt het WMO dat vanaf 1982 de handmatige instrumenten de officiële data leveren en dat de automatische meetdata daarnaar gecorrigeerd dienen te worden.

2.2.2 Adjustment of automatic gauge data

The WMO (1981) Guide to Hydrological Practices states that “it was decided that the standard nonrecording rain gauge measurements should be the official rainfall readings at the station, and that a correction factor should be applied to hourly rainfall and maximum intensity data, based on the ratio of the daily total by standard gauge to the total by recording gauge.” Before 1982 the archived hourly sums from the automatic gauges were adjusted by default with the daily sums from the collocated manual gauge. From 1982 the annual rainfall sums from the manual gauges are on average 5% larger than those from the automatic gauges. To promote the homogeneity of the data set it was decided to adjust the remaining 56% of automatic gauge data (1982-2005) by the same procedure, so also the data from the mid 1990s using the readings from the nearest manual gauge.

Figuur 4.9: WMO-richtlijn. Bron: A. Overeem.

Een ander probleem is wisseling van meetlocatie en instrument. Hieronder een overzicht van de veranderingen in De Bilt van de neerslagmeting.

⁸⁹ Aart Overeem (2009), Climatology of extreme rainfall from rain gauges and weather radar, xii+132 pages. In Dutch: Klimatologie van extreme neerslag uit regenmeters en weerradar, xii+132 blz. Thesis Wageningen University

Neerslagmetingen:	gemeten m.b.v. :
19060101 - 19460111	Pluviograaf(vangoppervlak 4 dm ² op 1,50 meter boven maaiveld)
19460112 - 19810331	Pluviograaf(vangoppervlak 4 dm ² op 0,40 meter boven maaiveld)
19810401 - 19930228	Pluviograaf(vangoppervlak 2 dm ² op 0,40 meter boven maaiveld)
19930301 - heden	Elektrische meting(vangoppervlak 2 dm ² op 0,40 meter boven maaiveld)
20080925, 13.00 UT	Instrumentverplaatsing, 200 m.
20080925 - heden	Neerslagmeter in OTT scherm

Figuur 4.10: aanpassingen neerslagmeting in De Bilt. Bron: KNMI.⁹⁰

Dergelijke wisselingen van instrument en verplaatsingen vindt men overigens bij alle meetstations met een lange meetgeschiedenis. Door middel van homogenisatie tracht men van die verschillende meetreeksen één meetreeks te maken.

Het tweede probleem is de wisselende verzameling meetstations. Momenteel telt het KNMI 325 meetstations voor neerslag: 320 zijn handmatige stations en 35 worden automatisch uitgelezen. Aan de getallen is te zien dat een deel van de stations zowel handmatig als automatisch uitgelezen wordt. Tussen 1951 en 2016 schommelde de verzameling neerslagstations tussen 298 en 330. Dat lijkt een stabiel aantal maar in werkelijkheid is het verloop in stations veel groter. Gedurende de meetperiode waren er in totaal 429 neerslagstations actief.⁹¹ Een deel van die stations heeft een meetperiode van minder dan twintig jaar, sommige zelfs maar van één jaar.

Dat het meten van neerslag niet vlekkeloos verloopt bewijst al het verschil tussen de handmatige meting en de automatische meting van 5% op jaarbasis. Maar het kan erger: onlangs heeft het KNMI laten weten dat voor een deel van de handmatige metingen meetafwijkingen geconstateerd zijn.⁹² Deze leiden mogelijk tot overschatting van de werkelijke neerslaghoeveelheden. Om welke stations het gaat is (nog) niet bekend. Wat de gevolgen zijn voor de neerslagdata en publicaties waarin de foute data zijn gebruikt zullen we waarschijnlijk later vernemen.

⁹⁰ <http://projects.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/selectie.cgi>

⁹¹ <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/monv/reeksen>

⁹² <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/knmi-constateert-meetafwijking-door-defect-handmatige-regenmeters>

KNMI constateert meetafwijking door defect handmatige regenmeters

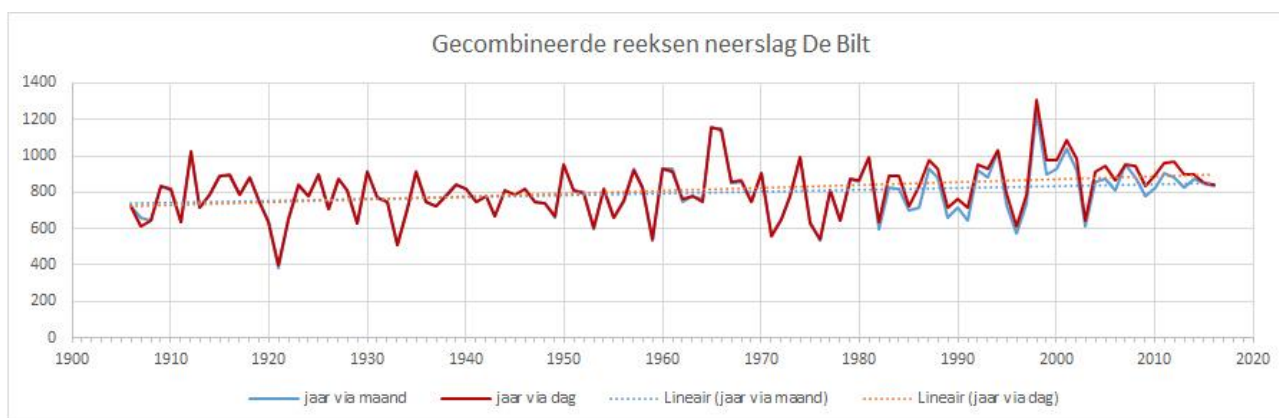
Het KNMI heeft meetafwijkingen geconstateerd door een defect aan een aantal regenmeters voor handmatige neerslagwaarneming. Het betreft een deel van de 320 stations voor handmatige meting, verspreid over het land. Het instituut inventariseert op dit moment de omvang van het probleem en onderzoekt de mogelijkheden om het defect snel te herstellen.

De handmatige neerslagstations vormen gezamenlijk een bron van neerslaginformatie, naast de data van 35 automatische neerslagstations in Nederland. Bij deze automatische stations zijn geen gebreken vastgesteld. Daarnaast wordt voor neerslagwaarnemingen gebruik gemaakt van geavanceerde radar en satellieten.

Het waargenomen defect leidt mogelijk tot een overschatting van de gevallen hoeveelheid neerslag. De gevolgen van deze afwijking voor datareeksen en bestanden worden onderzocht en vanzelfsprekend, waar nodig, gecorrigeerd.

Figuur 4.11: meetafwijkingen handmatige metingen. Bron: KNMI.⁹³

In figuur 4.12 zijn twee neerslagreeksen (jaarlijkse neerslagsom) van De Bilt weergegeven van 1906 t/m 2016. De blauwe reeks is gebaseerd op de jaarlijkse neerslag zoals berekend op basis van de maandsommen.⁹⁴ Die maandsommen zijn weer gebaseerd op de dagsommen. De rode reeks is gebaseerd op de dagsommen.⁹⁵



Figuur 4.12: Vergelijking van twee neerslagreeksen van jaarlijkse neerslag in De Bilt 1906-2016. Bron: KNMI.

Het is opmerkelijk dat beide reeksen nagenoeg identiek zijn van 1906 t/m 1981, en vanaf 1982 divergeren. Dat levert een nogal groot verschil in trend op tussen de ene reeks en de andere. Op basis van de reeks gebaseerd op de maandsommen (blauw) is de toename van de jaarlijkse neerslag in De Bilt tussen 1906 en 2016 14,8%. De rode reeks, gebaseerd op dagsommen, levert in dezelfde periode voor De Bilt een stijging op van 24,2%. Opgemerkt dient te worden dat vanaf 1982 meteorologische diensten vanwege het WMO-directief de handmatige instrumenten de officiële data leveren en dat de automatische meetdata daarnaar gecorrigeerd dienen te worden.

⁹³ <https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/monv/reeksen>

⁹⁴ https://cdn.knmi.nl/knmi/map/page/klimatologie/gegevens/maandgegevens/mndgeg_260_tg.txt

⁹⁵ <http://climexp.knmi.nl/data/rrrr550.dat>

Ook over de toename van de jaarlijkse neerslag voor Nederland als geheel is het KNMI het intern niet altijd eens. In de KNMI-brochure Klimaatscenario's staat hierover: *"Tussen 1910 en 2013 nam de jaarlijkse neerslag in Nederland toe met 26%. Tussen 1951 en 2013 bedroeg de toename 14%. Alle seizoenen behalve de zomer zijn natter geworden."*⁹⁶

Het kennis- en datacentrum van het KNMI bericht op de website echter iets anders:

Neerslagtoename

In Nederland is de jaarlijkse neerslag vanaf 1906 toegenomen met 18 procent. Dit komt vooral voor rekening van de winter en de herfst met in beide seizoenen 26 procent meer neerslag. De toename wordt deels veroorzaakt doordat warmere lucht in het opgewarmde klimaat meer waterdamp kan opnemen. Bovendien waait de wind vaker uit het vochtige westen wat ook een rol speelt in de toename.

Figuur 4.13: Toename jaarlijkse neerslag Nederland 18%. Bron: KNMI.⁹⁷

Kortom, er zijn tekortkomingen en onzekerheden in de neerslagreeksen van het KNMI. Vooralsnog hebben we geen andere keus dan de beschikbare KNMI-reeksen te gebruiken. Voor dit rapport (en het KNMI) betekent dit in ieder geval dat conclusies met voorzichtigheid getrokken dienen te worden.

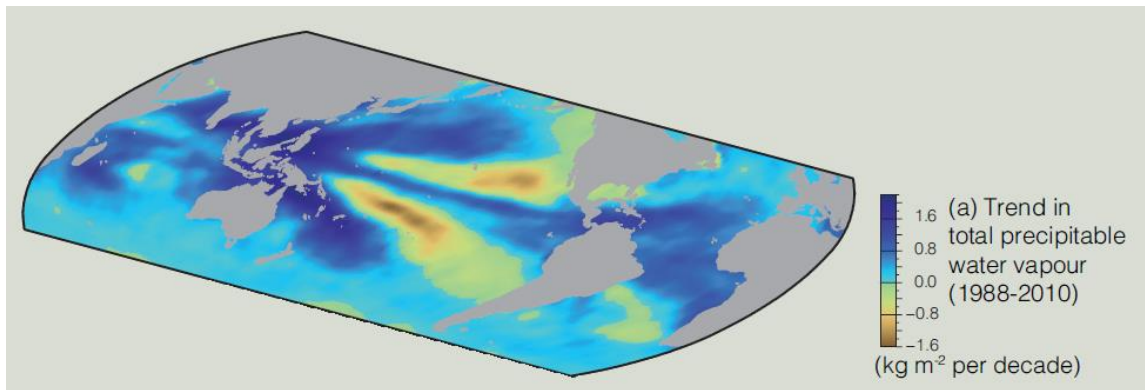
Temperatuur

De temperatuur lijkt de meest voor de hand liggende factor om de toename van de neerslag te verklaren, maar is tegelijk een van de lastigste. Op de regionale schaal van Nederland kan een eventuele toename van de neerslag als gevolg van de stijging van de temperatuur normaal gesproken alleen plaats vinden door toegenomen convectie. Convectieve neerslag ontstaat bij sterke opwarming van de onderste luchtlagen waardoor er een onstabiele verticale temperatuuropbouw ontstaat. Afhankelijk van de relatieve vochtigheid kan dan plaatselijk wolkvorming plaatsvinden en neerslag ontstaan.

De geconstateerde opwarming heeft voor zover we hebben kunnen nagaan niet geleid tot een onstabielere temperatuuropbouw in ons land. Op globale schaal is vanwege de toename van de temperatuur te verwachten dat de absolute luchtvochtigheid vanwege toegenomen verdamping gestegen is. De stijging van 3,5% van de absolute luchtvochtigheid gedurende de afgelopen vier decennia loopt in de pas met de stijging van de temperatuur in deze periode met 0,5 °C. (IPCC AR5 Technical Report).

⁹⁶ http://www.klimaatscenarios.nl/brochures/images/KNMI14_Klimaatscenarios_folder_2015.pdf

⁹⁷ <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/zware-neerslag>

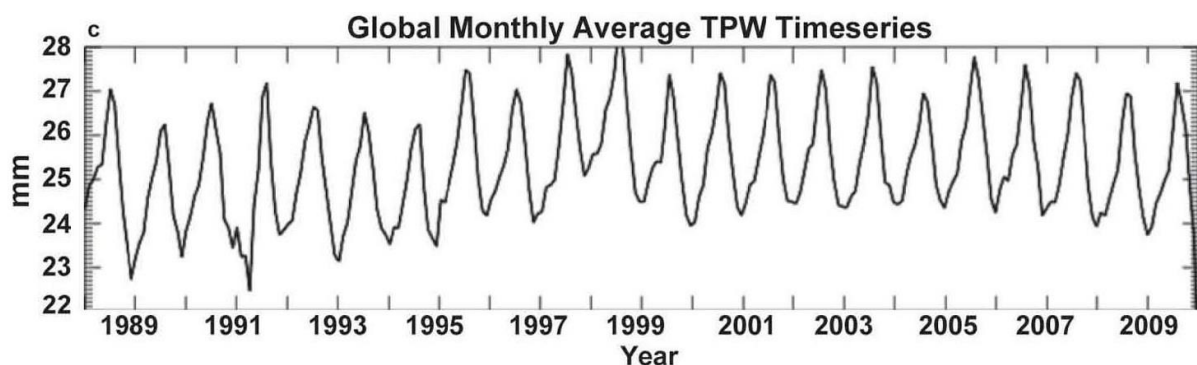


Figuur 4.14: Trend beschikbare waterdamp boven oceanen in kg/m^2 . Bron: IPCC AR5 WG1.⁹⁸

Het IPCC schrijft over de waargenomen luchtvochtigheid:

“It is very likely that global near surface and tropospheric air specific humidity have increased since the 1970s. However, during recent years the near-surface moistening trend over land has abated (medium confidence). As a result, fairly widespread decreases in relative humidity near the surface are observed over the land in recent years. Although trends of cloud cover are consistent between independent data sets in certain regions, substantial ambiguity and therefore low confidence remains in the observations of global-scale cloud variability and trends.”

De voorzichtige woorden van het IPCC zijn verklaarbaar. Een van ons publiceerde enkele jaren geleden een blogbericht in verband met een nieuwe paper over NASA's Water Vapor Project (NVAP).⁹⁹ De sleutelfiguur uit die studie is de volgende:



Figuur 4.15: Trend in Total Precipitable Water vapor. Bron: NASA.¹⁰⁰

De hoofdauteur, Tom Vonder Haar, liet per e-mail onder andere het volgende weten: *“All we can say at present is that the preliminary NVAP data, according to the Null Hypothesis,*

⁹⁸ http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf

⁹⁹ <http://www.staatvanhetklimaat.nl/2012/07/17/still-no-sign-of-water-vapor-increase/>

¹⁰⁰ https://eosweb.larc.nasa.gov/GUIDE/dataset_documents/base_nvap_dataset.html

cannot disprove a trend in global water vapor either positive or negative. In addition, there are good reasons based upon both Sampling / Signal Processing Theory and observed natural fluctuations of water vapor (ENSO's, Monsoons, volcanic events, etc.) to believe that there are no sufficient data sets on hand with a long enough period of record from any source to make a conclusive scientific statement about global water vapor trends." Hij voegde daar nog het volgende aan toe: "Therefore, at this time, we can neither prove nor disprove a robust trend in the global water vapor data."

De relatieve luchtvochtigheid in De Bilt geeft sinds 1951 (ook) een licht dalende trend weer:



Figuur 4.16: Jaarlijkse relatieve luchtvochtigheid De Bilt 1901 t/m 2016. Data: KNMI.¹⁰¹

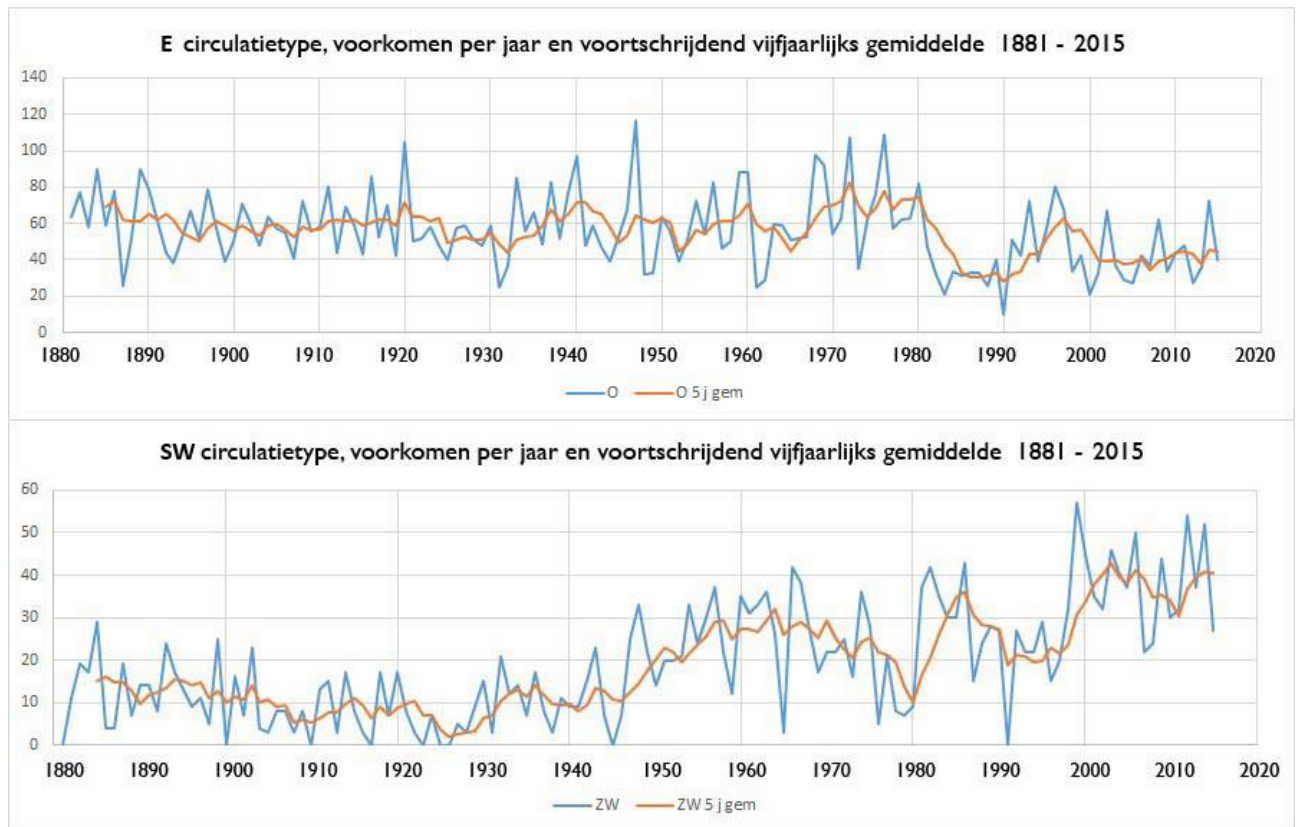
De reeks is inhomogeen vanwege instrumentwisselingen. Zo is de sprong rond 1950 waarschijnlijk het gevolg van de overstap naar de haarhygrometer en die van 1993 vanwege de introductie van de Vaisala-sensor in de schotelhut. Desalniettemin lijkt de trend dalend. Die dalende relatieve luchtvochtigheid in Nederland stimuleert in elk geval niet de wolkenvorming in ons land en dus ook niet de neerslag. Ook het feit dat de luchtkwaliteit in ons land de afgelopen decennia sterk is toegenomen (brightening) en daarmee het aantal condensatiekernen sterk afnam zorgt eerder voor vermindering van neerslag dan voor een toename.

Dit alles overziend lijkt het daarom niet waarschijnlijk dat de stijging van de temperatuur *in ons land* vanaf begin vorige eeuw van grote invloed is geweest op de gemeten toename van de neerslag. Wel kan opwarming elders (met name boven de oceanen) hebben geleid tot grotere wolkenvorming.

Luchtcirculatie

¹⁰¹ <http://projects.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/selectie.cgi>

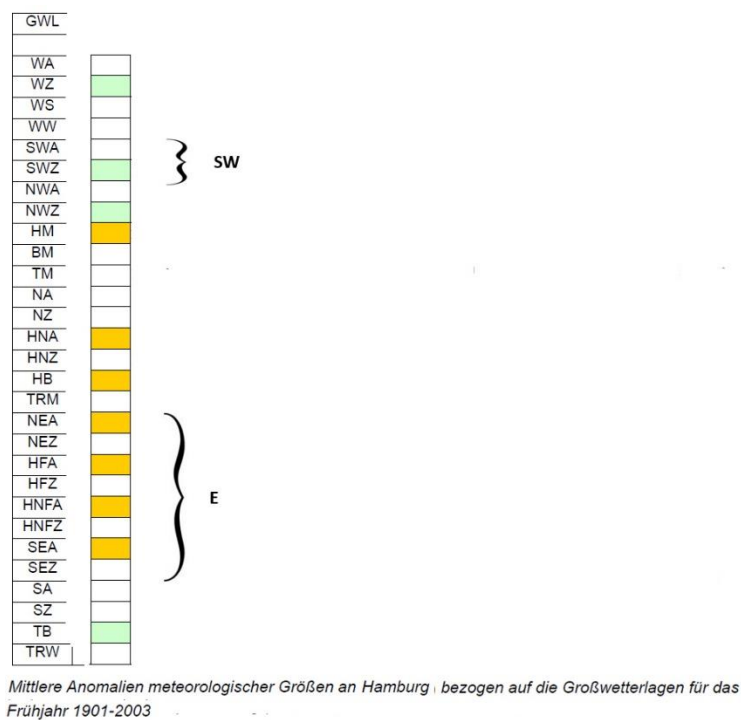
Het hoofdstuk over de temperatuur liet al zien dat er de afgelopen decennia sprake is geweest van een aanmerkelijke verandering in de luchtcirculatie boven ons land. Daarbij is vooral de afname van het E-circulatietype en de toename van het SW-circulatietype opvallend. Die verandering deed zich het sterkst voor in de lente, waardoor de aanvoer van zachte maritieme lucht toenam ten koste van koude continentale lucht.



Figuur 4.17: Verschuivingen in circulatietypen E en SW. Bron: Klimaatgek.

Die verschuiving in luchtcirculatie had niet alleen gevolgen voor de temperatuur in ons land maar ook voor de neerslag. Het circulatietype E brengt overwegend droge continentale lucht het land binnen. De brongebieden van het circulatietype SW liggen boven de Atlantische Oceaan en brengen vochtige maritieme lucht ons land binnen.

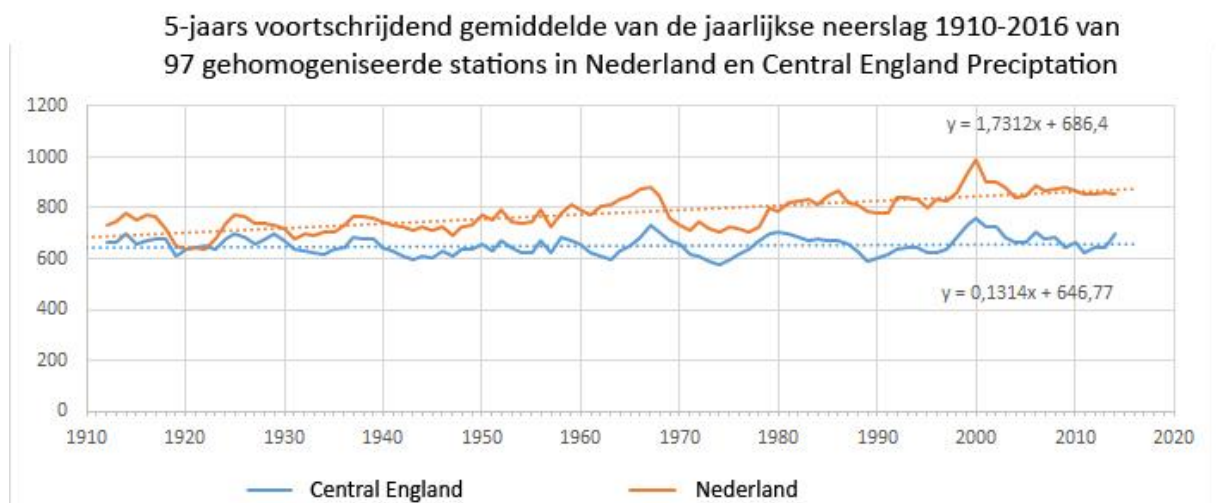
In figuur 4.18 is de invloed van GWL binnen het E- en SW-circulatietype op de neerslag gedurende de lente in Hamburg weergegeven. Meer SW-circulatie leidt tot meer neerslag.



(Temperatur: K; Niederschlag: mm)								
Klasse	< -4.0	< -3.0	< -2.0	< -1.0	<= 1.0	<= 2.0	<= 3.0	<= 4.0
Niederschlag								

Figuur 4.18: Invloed van GWL binnen E- en SW-circulatietype op de neerslag in Hamburg in het voorjaar. Bron: PIK.¹⁰²

Vergelijken we het 5-jarig voortschrijdend gemiddelde van Nederland met dat van Centraal Engeland dan valt op dat die reeksen overeenkomsten vertonen:



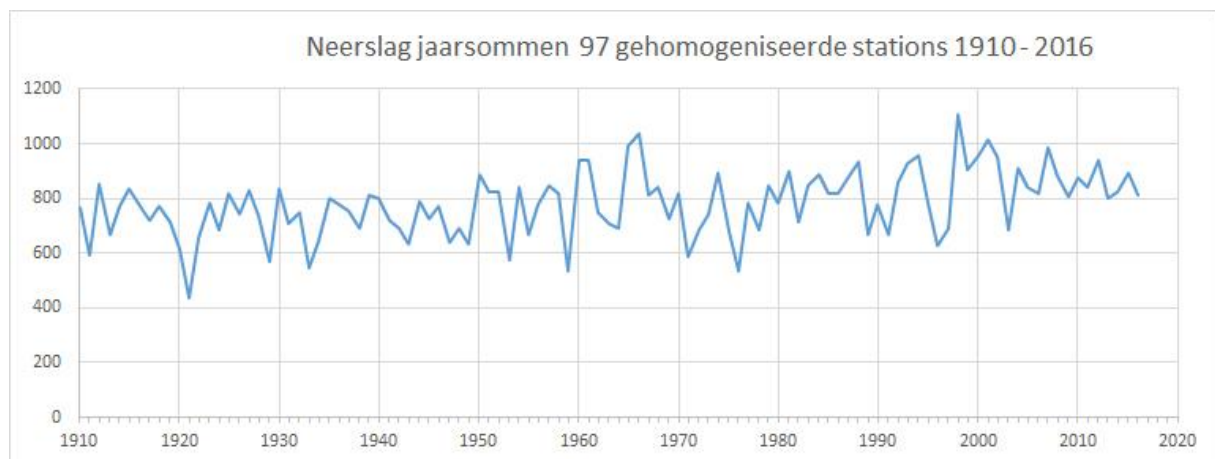
¹⁰² <https://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr100.pdf>

Figuur 4.19: 5- jaarlijks voortschrijdend gemiddelde neerslag in Nederland en Centraal Engeland met trendlijnen.

Data: KNMI

Toe- en afnames van de neerslag correleren opvallend, hetgeen wijst op de sterke invloed van de luchtcirculatie. Wel is opvallend dat de neerslagcijfers in Nederland vanaf 1910 een stijging vertonen van 26%, terwijl die van centraal Engeland in dezelfde periode slechts een toename laten zien van 2,1%. Ook ligt het neerslagniveau in centraal Engeland in de gehele periode opmerkelijk lager dan in ons land. Een gedetailleerde vergelijking van deze neerslagcijfers valt buiten de kaders van dit rapport maar maakt wel nieuwsgierig.

In de paragraaf over luchtcirculatie hebben we laten zien dat de SW-circulatie na 2000 weer afneemt, een verandering die in figuur 4.20 terug te vinden is.



Figuur 4.20: jaarsommen op basis van 97 gehomogeniseerde reeksen 1910 t/m 2016.

Opvallend is de daling van de lijn vanaf 2000 tot op een niveau van ongeveer 800 mm/jaar. Dat is het niveau dat we uit de jaren '60 van de vorige eeuw kennen. Op basis van de gemiddelde neerslag per etmaal is de afname over die jaren ruim 15%.

Het KNMI toont in het wetenschappelijke achtergronddocument bij de brochure de volgende figuur:

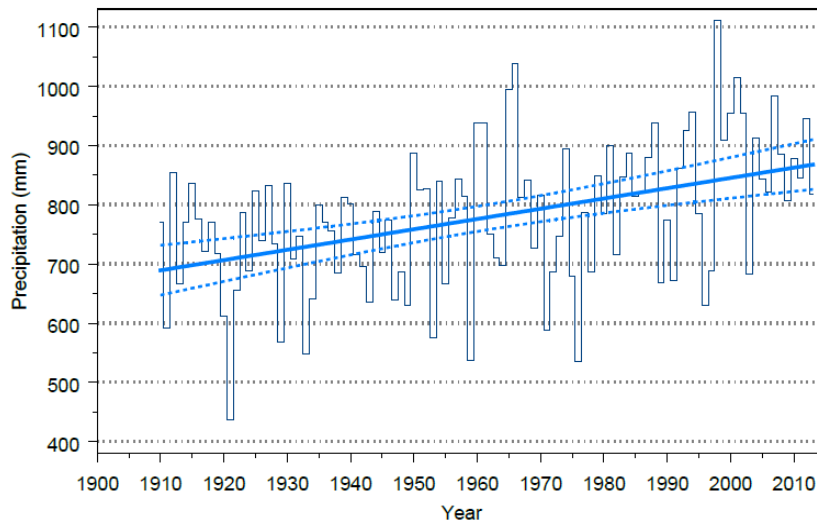


Figure 3.2: Annual precipitation in the Netherlands 1910-2013 (mean of 102 stations). The straight line represent a linear regression fit. The dashed lines give the 95% confidence bands.

Figuur 4.21: toename van neerslag in Nederland. Bron: KNMI.

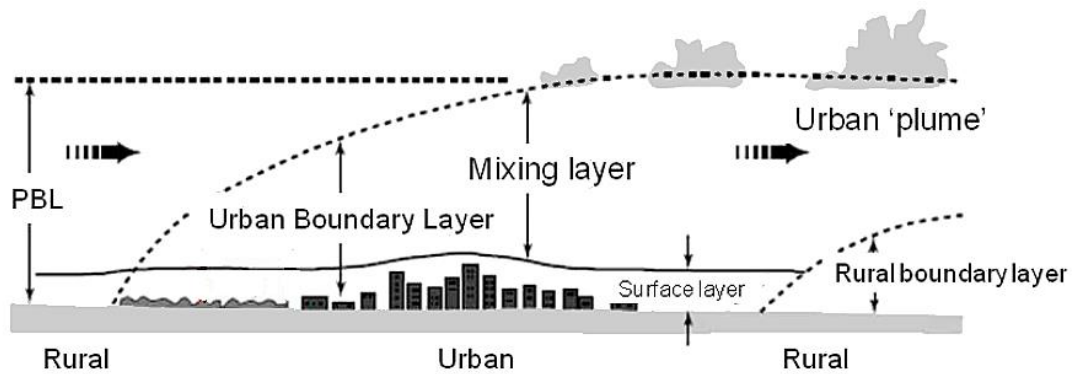
De blauwe lijn (een lineaire regressielijn) domineert het beeld en suggereert een alsmaar toenemende neerslag. Terwijl de door ons getoonde figuur meer de variabiliteit benadrukt en de afname na 2000 duidelijker zichtbaar maakt.

In het achtergronddocument benadrukt het KNMI de rol van opwarming op de neerslag: *“Because of the temperature increase also the amount of water vapour in the atmosphere has increased significantly since 1950. This trend partly explains the observed increase in mean precipitation amount.”* Zoals we hierboven aannemelijk hebben proberen te maken is de rol van de luchtcirculatie een veel logischere kandidaat om de veranderingen in neerslag te ‘verklaren’.

Verstedelijking

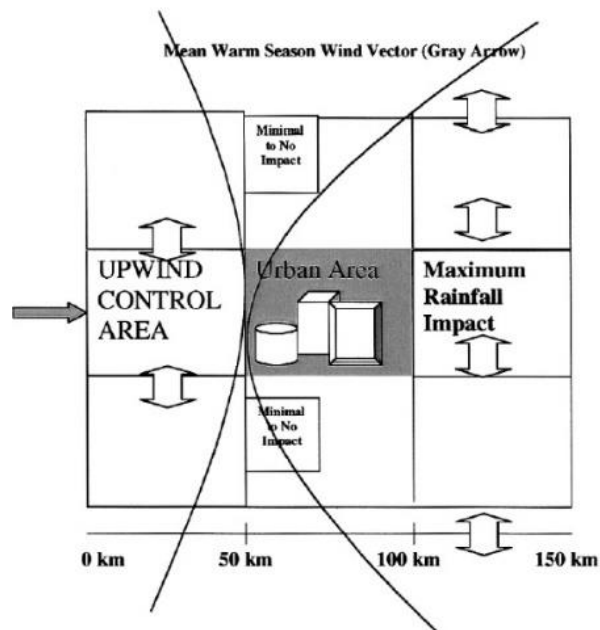
In het hoofdstuk over de temperatuur in Nederland is al uitgebreid het UHI-effect beschreven. De enorme toename van stedelijke bebouwing sinds 1900 en het versnipperde karakter van de verstedelijking heeft sindsdien ongetwijfeld invloed op de klimatologische ontwikkelingen van ons land gehad. Van het totale oppervlakte was in 2012 ruim 15% bebouwd.

De gevolgen van het UHI-effect voor de temperatuur strekken zich als gevolg van advectie over een groter gebied uit dan de stedelijke bebouwing. Dat geldt ook en waarschijnlijk nog sterker voor de extra neerslag als gevolg van het UHI-effect.



Figuur 4.22: Meer convectie en turbulentie zorgen voor meer neerslag. Bron: Van Hove et al., WUR en Alterra, 2011.

In steden valt meer neerslag dan in de rurale omgeving. Dat komt doordat als gevolg van de hogere temperaturen de onstabiliteit van de atmosfeer groter is en daarmee de convectie toeneemt in de menglaag. Die onstabiliteit neemt ook toe doordat hoge gebouwen de ruwheid doen toenemen, waardoor er grotere turbulentie ontstaat. Bovendien hangt er boven urbane gebieden een zogenaamde stofkoepel. De aerosolen daarin werken als condensatiekernen waardoor meer neerslag ontstaat.



Figuur 4.23: Schematische weergave van het impactgebied van neerslag als gevolg van UHI. Bron: Shepherd et al.

De versterkte verticale luchtbeweging neemt toe in het benedenwindse gebied, aldus een studie van Shepherd die rond Dallas en Atlanta werd uitgevoerd. Het gevolg is dat de neerslag als gevolg van het UHI-effect het grootst is in het gebied benedenwinds van de stad (de Maximum Impact Area). Het effect van de extra neerslag als gevolg van het UHI-effect is

in de Maximum Impact Area veel groter dan in het centrum van de stad, gemiddeld 28,4% hoger dan in het bovenwindse controlegebied. In het stadscentrum viel gemiddeld 5,8% meer neerslag als gevolg van het UHI-effect. De maximale neerslag viel 20 km van het stadscentrum van Dallas tot zelfs 60 km van het centrum van Atlanta.¹⁰³

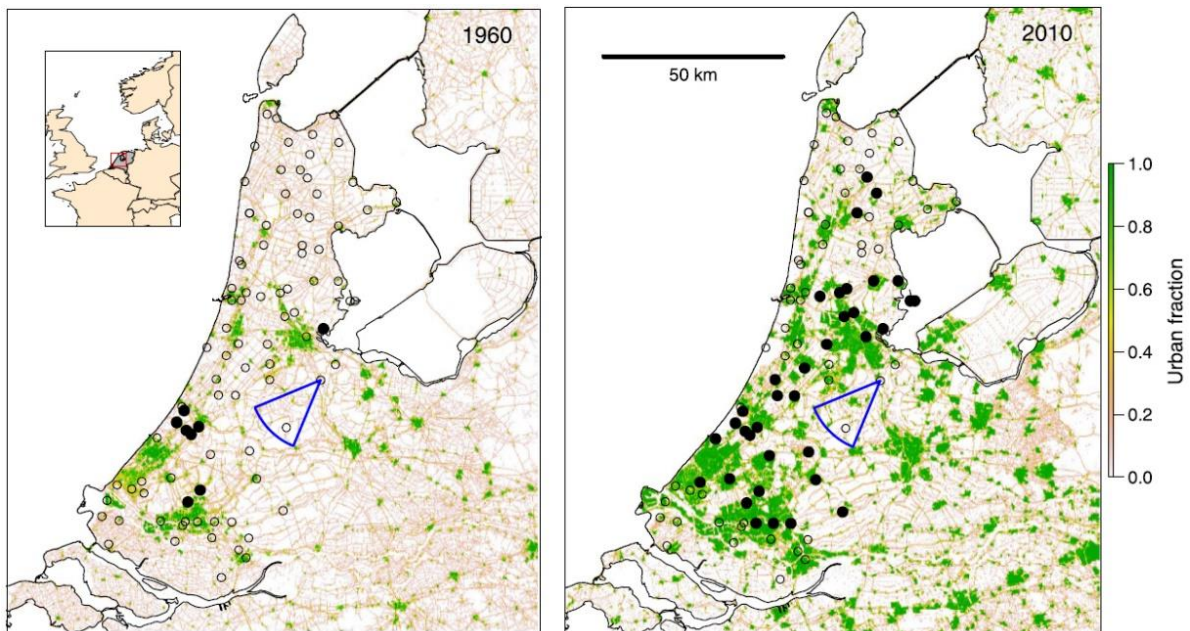
De neerslagkaart eerder in het hoofdstuk (zie figuur 4.4) toont duidelijk de effecten van het UHI-effect voor de grootste steden van Nederland. De regio's in West-Nederland met > 875 mm neerslag betreffen de UHI-neerslageilanden van de steden Amsterdam, Den Haag en Rotterdam. Er is hier vanwege de ligging aan zee geen 'bovenwinds controlegebied', maar we schatten dat het UHI-effect in deze regio's ongeveer 10% extra neerslag tot gevolg heeft.

Nederland is sinds 1900 sterk verstedelijkt. De grootste steden in Nederland zijn internationaal gezien middelgrote steden. Vanwege het versnipperde karakter van de verstedelijking in Nederland heeft het UHI-effect wat betreft neerslag daardoor waarschijnlijk invloed op een aanzienlijk deel van Nederland. Hoe groot dat effect in werkelijkheid is, is door de gebruikte klassificatiecategorieën van de neerslagkaarten niet duidelijk herkenbaar.

Daniels et al. hebben in 2015 onderzoek gedaan naar de effecten van verstedelijking op de neerslag in een deel van Noord- en Zuid-Holland gedurende de periode 1951-2010.¹⁰⁴ Vanwege de versnipperde verstedelijking is het lastig om een enkele stad te onderzoeken, omdat de boven- en benedenwindse gebieden vaak ook verstedelijkt zijn. Bovendien is er het probleem van de nabijheid van de kust. De onderzoekers hebben elk van de weerstations in het onderzoeksgebied geclassificeerd als urbaan of ruraal op basis van de urbanisatiegraad van het bovenwindse gebied voor elk van de negen geostrofische windrichtingen.

¹⁰³ Shepherd, J. M., H. Pierce, and A. J. Negri (2002): Rainfall modification by major urban areas: Observation from spaceborne rain radar on the TRMM satellite. J. Appl. Meteor.

¹⁰⁴ E.E.Daniels, G.Lenderink, R.W.A.Hutjes, A.A.M.Holtslag (2016), Observed urban effects on precipitation along the Dutch West coast, Int. J. Climatol.36:2111-2119

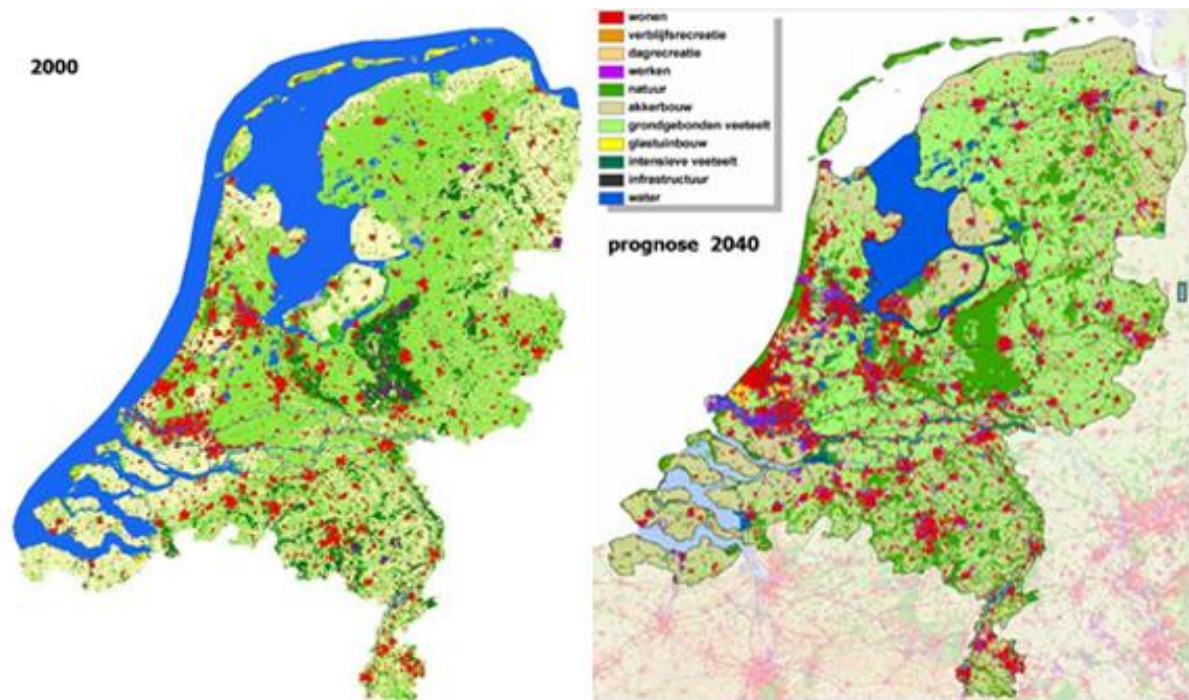


Figuur 4.24: Classificatie van de neerslagstations in urbaan (gesloten cirkel) en ruraal (open cirkel) in 1960 en 2010 voor WT8 (ZW-wind). Bron: Daniels et al.

In figuur 4.24 is dat gedaan voor 1960 en 2010 voor WT8, ZW-wind. Als in de bovenwindse sector van een station (blauw) meer dan 25% van het landoppervlak stedelijk is wordt het station voor die geostrofische wind geclassificeerd als urbaan.

Door de toegenomen verstedelijking tussen 1960 en 2010 is het aantal urbane neerslagstations gestegen van 8 naar 36. Daniels et al. berekenden dat in de onderzochte periode de dagelijkse neerslag in urbane gebieden ongeveer 7% hoger is dan in rurale gebieden en dat die toename kan oplopen tot 20% afhankelijk van de windrichting en periode. Deze uitkomsten zijn vergelijkbaar met soortgelijke onderzoeken elders in de wereld. Ze tonen bovendien dat de invloed van relatief kleine steden op de neerslag die bovendien ruimtelijk sterk versnipperd zijn, zoals in ons land, vergelijkbaar zijn met de effecten van grote steden elders op aarde.

Het vergt niet veel fantasie om te bedenken dat ook in andere delen van Nederland deze aanzienlijke toename van de neerslag als gevolg van toegenomen verstedelijking plaats heeft gevonden. Grote delen van Nederland zijn immers verstedelijkt en die verstedelijking zal de komende decennia naar verwachting alleen maar toenemen.



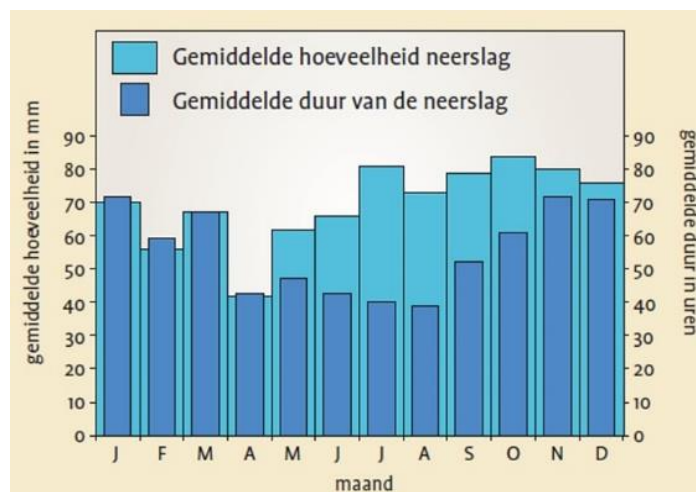
Figuur 4.25: Verstedelijking in 2000 en prognose voor 2040. Bronnen: Knol et al.¹⁰⁵ en PBL.¹⁰⁶

Zware neerslag: etmaalsommen

Het regent in de zomermaanden minder lang dan in de winter. In de winter kan het langdurig regenen, in de zomer valt de neerslag vooral in de vorm van buien. Dat hangt samen met de warmte en daarmee de grotere instabiliteit van de atmosfeer. De intensiteit van de neerslag varieert dus per seizoen.

¹⁰⁵ Knol, W.C., H. Kramer & H. Gijsbertse (2004), Historisch Grondgebruik Nederland; een landelijke reconstructie van het grondgebruik rond 1900, Wageningen, Alterra

¹⁰⁶ Kuiper R, J.Borsboom, A.Bouwman, M.Kuijpers-Linde, W.Loonen (2006), Waarheen met Nederland? Ruimtelijk beeld trends scenario 2040, PBL

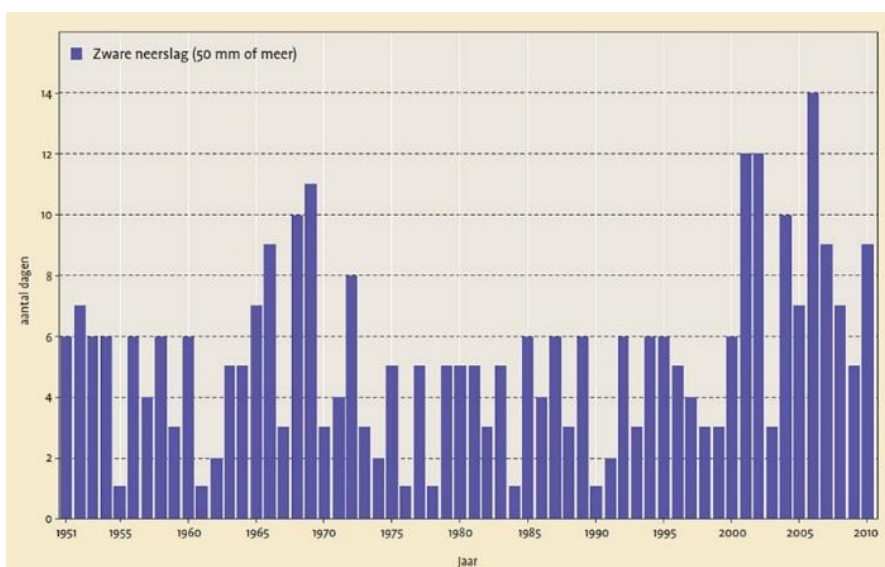


Figuur 4.26: maandelijks hoeveelheid en duur van de neerslag. Bron: KNMI.

Neerslagextremen ontstaan door twee meteorologische verschijnselen, namelijk door passage van fronten die samenhangen met depressies en door buien als gevolg van sterke lokale verticale bewegingen in de atmosfeer. Fronten komen vaker voor in het koude jaargetijde en buien meer in de zomer.

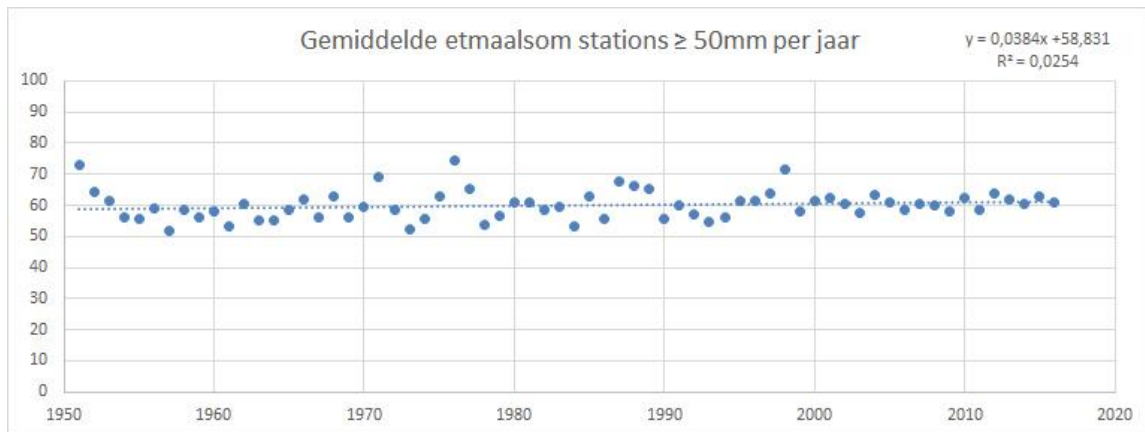
Tijdens buien kan in korte tijd veel regen vallen. Naast deze kortdurende intensieve neerslag die in de volgende paragraaf aan de orde komt worden etmaalsommen geregistreerd. In alle KNMI-scenario's neemt de neerslag in alle seizoenen toe, met uitzondering van de zomer. Extreme neerslagintensiteiten nemen in alle scenario's het hele jaar door toe, zelfs in de GH- en WH-scenario's waarin de zomerneerslag afneemt.

We hebben onderzocht of de waarnemingen deze voorspellingen tot nu toe ondersteunen. Een dag met zware neerslag is volgens de KNMI-definitie een etmaal waarin ergens in Nederland 50 mm neerslag of meer is gevallen. De laatste jaren neemt dit aantal dagen toe.



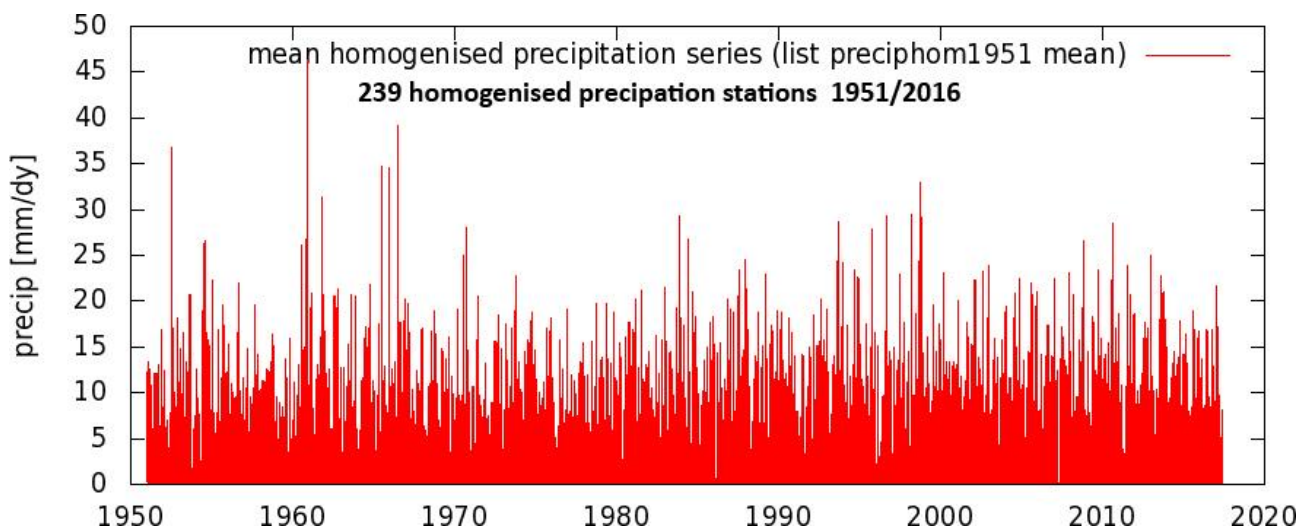
Figuur 4.27: Aantal dagen met zware neerslag in Nederland sinds 1950. Bron: KNMI.

Figuur 4.27 toont het aantal dagen per jaar waarop tenminste één neerslagstation 50 mm of meer registreerde. De grafiek lijkt te bevestigen dat de neerslag de afgelopen decennia 'extremer' is geworden. Bezien we echter de gemiddelde etmaalsom per jaar van 239 gehomogeniseerde stations met ≥ 50 mm neerslag, dan ontstaat een ander beeld:



Figuur 4.28: gemiddelde etmaalsom per jaar van alle stations met ≥ 50 mm neerslag.

Weliswaar is de lineaire trendlijn heel licht stijgend, maar die stijging is statistisch niet significant. Als van elk etmaal sinds 1951 de gemiddelde etmaalsom van alle 239 stations weergegeven wordt, dan ziet dat er zo uit:



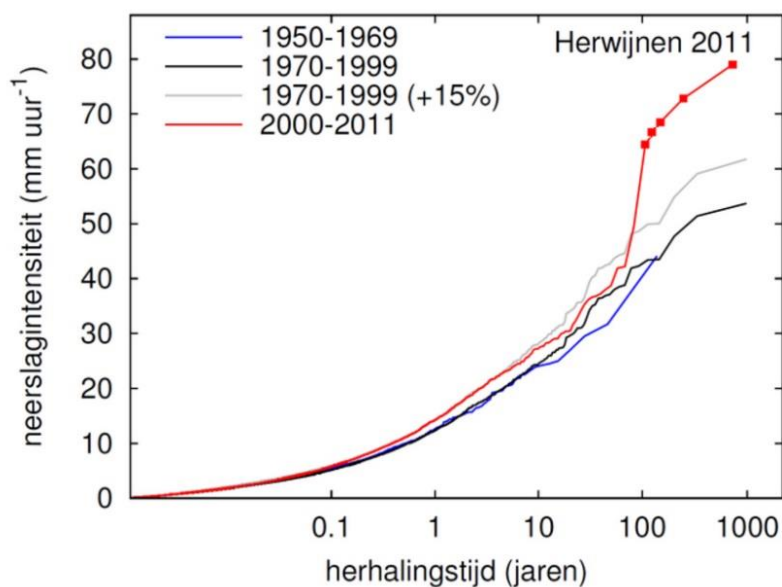
Figuur 4.29: gemiddeld etmaalsom van alle 239 stations sinds 1951.

Bron: KNMI.

De grootste uitschieters van de gemiddelde etmaalsommen zijn te vinden in de jaren '60 van de vorige eeuw. Vanaf eind jaren '90 lijkt er juist sprake van een afname van de hoogste etmaalsommen.

In deze gehomogeniseerde reeks van 239 stations is dus vanaf 1951 weliswaar een stijging waarneembaar van het aantal dagen met ≥ 50 mm neerslag, maar van hogere etmaalsommen en etmaalgemiddelden is geen sprake. De extremen zijn derhalve niet extremer geworden.

Extreme buien: uursommen



Figuur 4.33: herhalingstijd van buien met de hoogste uursommen. Bron: KNMI.¹⁰⁷

Volgens *KNMI'14 klimaatscenario's* zal de hoeveelheid neerslag gemiddeld verder toenemen en zal de kans op *extreme regenbuien* met hagel en onweer groter worden. Omdat extreme buien kort duren en vaak lokaal van omvang zijn, zijn etmaalsommen een te grove manier om te meten. Vandaar dat het KNMI zijn toevlucht neemt tot uursommen. Het KNMI stelt dat in recente uurmetingen aanwijzingen te vinden zijn dat extreme buien extremer worden.

In figuur 4.33 heeft het KNMI de neerslagintensiteit in mm/uur afgezet tegen de zogenaamde herhalingstijd in jaren. De trend van de rode lijn is opvallend en wordt bepaald door 5 extreme buien met uursommen van boven de 60 mm. De blauwe lijn en de zwarte lijn

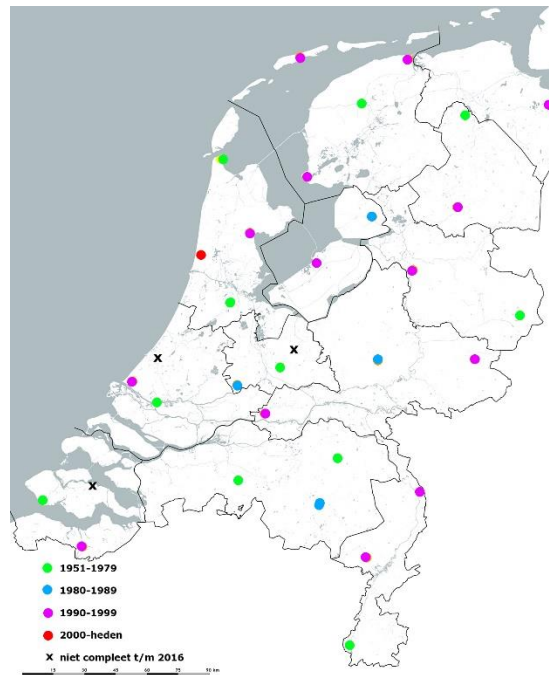
¹⁰⁷ <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/uitleg/regenintensiteit>

zijn getekend op basis van neerslagdata van de zwaarste uursommen in die periode. De lichtgrijze lijn is de zwarte lijn +15%.

Het KNMI schrijft bij de grafiek: *“Door de stijgende temperatuur is ook de hoeveelheid waterdamp in de lucht toegenomen. Dat verklaart gedeeltelijk de toename van de jaarlijkse hoeveelheid neerslag. Het effect op zware buien is nog groter. Uit waarnemingen blijkt dat bij de meest extreme buien de hoeveelheid neerslag per uur toeneemt met ongeveer 12 procent per graad opwarming. Volgens de KNMI'14-klimaatsscenario's zal de hoeveelheid neerslag gemiddeld verder toenemen en wordt de kans op extreme regenbuien met hagel en onweer groter.”*

Met name de laatste zin is opvallend en voor ons aanleiding om de waarnemingen te bekijken. Momenteel zijn er dertig neerslagstations waar elk uur gemeten wordt. Helaas zijn de meeste van die stations nog niet zo lang in gebruik, zodat je geen zicht krijgt op veranderingen gedurende een langere periode. Zo meet het station Herwijnen (van de recordbui met een uursom van 76 mm in 2011) pas sinds 4 mei 1993 elk uur de neerslag. Ook de andere vier rode blokjes van extreme buien zijn afkomstig van neerslagstations die nog maar relatief kort de uursommen meten. Dat zijn de stations Marknesse op 2 juni 2003 (72,8 mm), Westdorpe op 5 augustus 2005 met 68,5 mm, Deelen op 28 juli 2014 met 66,8 mm en Cabauw op 29 juni 2005 met 64,4 mm.

Van de dertig neerslagstations die momenteel uurmetingen doen zijn er vijftien die pas na 1990 actief zijn geworden. Voor het signaleren van trends lijkt ons dat aan de korte kant. Bovendien is het ongebruikelijk dat de berekende herhalingstijd in figuur 4.33 vele malen langer is dan de lengte van de meetperiode. Van de genoemde dertig stations zijn er veertien met een meetreeks langer dan veertig jaar. Van die veertien heeft alleen De Bilt een meetreeks van meer dan honderd jaar, twee stations hebben een meetreeks van zestig jaar en elf tussen de zestig en veertig jaar. De rest van de dertig stations hebben meetreeksen korter dan veertig jaar.



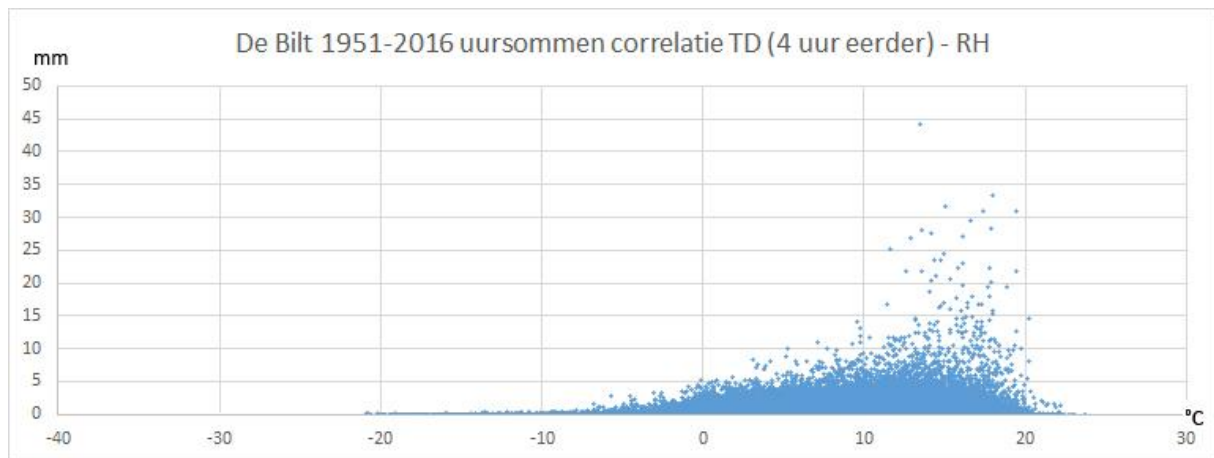
Figuur 4.34: Spreiding van neerslagstations met uursomdata en periode van ingebruikname.

In figuur 4.34 is de ligging en periode van ingebruikname van de dertig neerslagstations met uurdata weergegeven. Extreme buien van $> 25\text{mm/uur}$ zijn meestal zeer beperkt van omvang en overstijgen zelden een doorsnede van meer dan enkele kilometers. Extreme buien met meer dan 50 mm neerslag zijn vaak buiencomplexen, maar ook die hebben zelden een doorsnede van meer dan 10 km . De kans dat je zo'n extreme bui 'vangt' met het zeer grofmazige netwerk van dertig uursomstations is dan ook tamelijk klein. Die kans wordt nog veel kleiner bij een netwerk van maar vijftien stations, zoals dat vóór 1990 bestond (de groene en blauwe bolletjes in figuur 4.34). In de periode tot 1990 waren er ten oosten van de lijn Leeuwarden-Maastricht maar vier stations actief, en dat in een gebied dat zo'n 40% van de oppervlakte van Nederland beslaat. Vóór 1957 was alleen De Bilt actief.

Eigen KNMI-onderzoek laat zien dat het zuidoosten van Nederland gevoeliger is voor zware buien dan de noordwestelijke helft. Als nieuwe stations worden toegevoegd in die zuidoostelijke helft dan wordt de kans groter dat je vaker zware buien tegenkomt in je hele "sample". Het maakt dus nogal wat uit hoe de stations verspreid zijn over het land, zeker bij een grofmazig meetnet als dat van de uursommen.

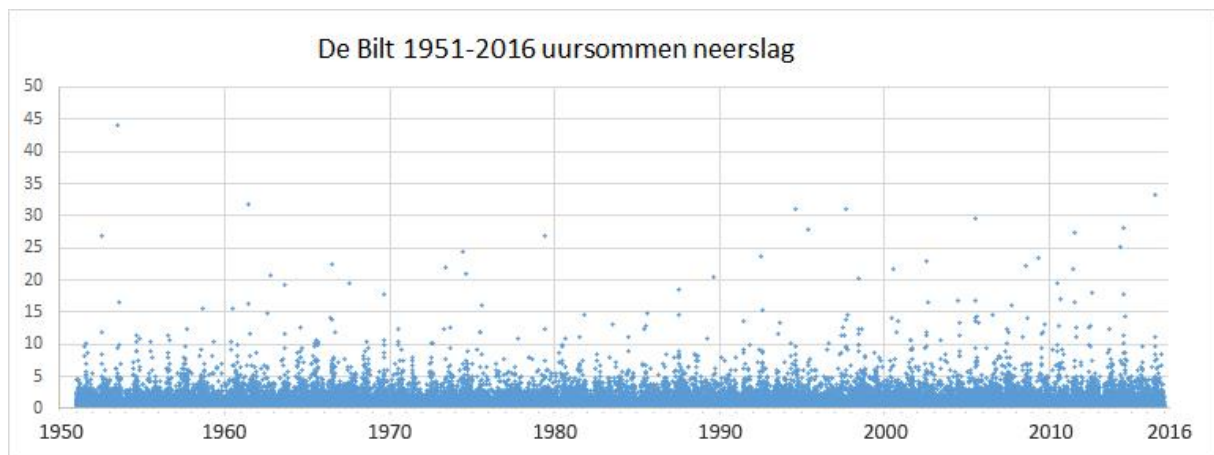
Een hypothese is dat extreme neerslag bepaald wordt door de maximaal beschikbare hoeveelheid waterdamp in de atmosfeer. Dat is gebaseerd op het feit dat de maximale hoeveelheid waterdamp in de atmosfeer toeneemt met 7% per graad, volgens de zogenaamde Clausius-Clapeyron-relatie. Dat er gemiddeld meer neerslag valt als de dauwpunttemperatuur hoger is, ligt fysisch voor de hand. Wanneer de grenslaag onder de wolkenbasis meer waterdamp bevat kun je ervan uitgaan dat er uiteindelijk meer neerslag

ontstaat. Om te zien wat het effect daarvan is hebben we de uursommen van De Bilt van 1951 t/m 2016 vergeleken met de dauwpuntstemperatuur ter plekke vier uur voorafgaande aan de bui.



Figuur 4.35: De Bilt uursommen 1951-2016. Correlatie tussen de hoogte van de uursommen en de dauwpuntstemperatuur vier uur voorafgaande aan de bui.

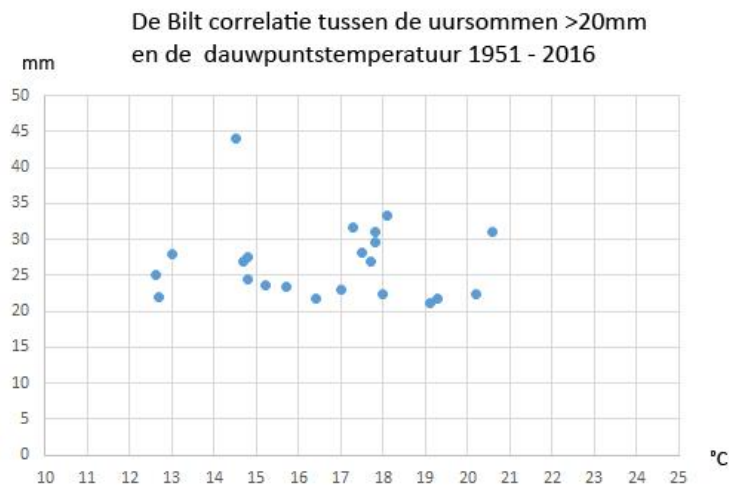
Duidelijk is te zien dat de hoogste uursommen toenemen met de dauwpuntstemperatuur, met uitschieters tussen 10 °C en 20 °C. De toename van de uursommen tussen de 10°C en 20°C zit grotendeels tussen de 1 en 10 mm. Gaan we de uursommen van De Bilt uitzetten in de tijd dan zien we dat de hogere uursommen tamelijk gelijkmatig in de tijd zijn verspreid.



Figuur 4.36: alle uursommen in De Bilt in de periode 1951 t/m 2016.

Het is daarom de vraag of Clausius-Clapeyron generiek toepasbaar is. We denken dat dat voor lokale neerslag niet het geval hoeft te zijn en misschien zelfs wel onwaarschijnlijk is. Anders zou kort gezegd overal in de wereld bij eenzelfde temperatuur dezelfde hoeveelheid neerslag vallen. En dat is niet het geval.

Om te bezien of er een correlatie is tussen de hoogte van de uursom bij hevige buien en de dauwpuntstemperatuur hebben we van de uursomreeks van De Bilt 1951-2016 alle uursommen van > 20mm afgezet tegen de dauwpuntstemperatuur vier uur voorafgaande aan de uursom:



Figuur 4.37: correlatie tussen uursommen van >20mm en de dauwpuntstemperatuur vier uur voorafgaand aan de uursom in De Bilt.

De grafiek vertoont geen enkele correlatie tussen hoogte van de uursommen en de bijbehorende dauwpuntstemperaturen. Extreme buien treden blijkbaar op onder omstandigheden waarbij niet alleen lokale thermodynamische wolkenvormingsprocessen meespelen maar ook grootschalige atmosferische processen. Zo ontstaan extreme buien in de zomer vaak vlak voor een frontale zone. De aangevoerde lucht aan het oppervlak is vaak zeer warm, terwijl het naderende front zeer koude lucht in de hogere troposfeer aanvoert. Door de daardoor ontstane sterk instabiele atmosfeergradiënt is de vorming van zeer hoge wolken mogelijk waaruit vaak veel neerslag valt.

Het KNMI vermoedt dat vanwege opwarming de hevigste buien zelfs niet de 7% per graad volgen (Clausius-Clapeyron) maar zelfs 14% per graad stijging, het zogenaamde 2CC-verband.¹⁰⁸ Er is echter nog heel weinig bekend over deze materie, onder andere omdat er zeer weinig bruikbare meetgegevens zijn. Dat geldt ook voor Nederland, waar uurmetingen nog maar kortgeleden op gang zijn gekomen. Alleen De Bilt beschikt over een meetreeks van meer dan 100 jaar.

De vijf uitschieters van figuur 4.33 lijken geregistreerd te zijn door de uitbreiding van het meetnet. Omdat zeer zware buien een lokale omvang hebben is het aannemelijk dat vanwege de uitbreiding van het meetnet 'toevallig' die zware buien gemeten werden.

¹⁰⁸ <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/grotere-toename-lokale-neerslag-extremen-in-warmer-klimaat>

Anders gezegd: als men niet had besloten om per 4 mei 1993 op station Herwijnen uursommen te gaan meten dan was die extreme bui van 28 juni 2011 nooit gemeten.

31 juli

Op 31 juli 1951 viel er in Boskoop 103 mm, daarvan werd 72 mm in 30 minuten.

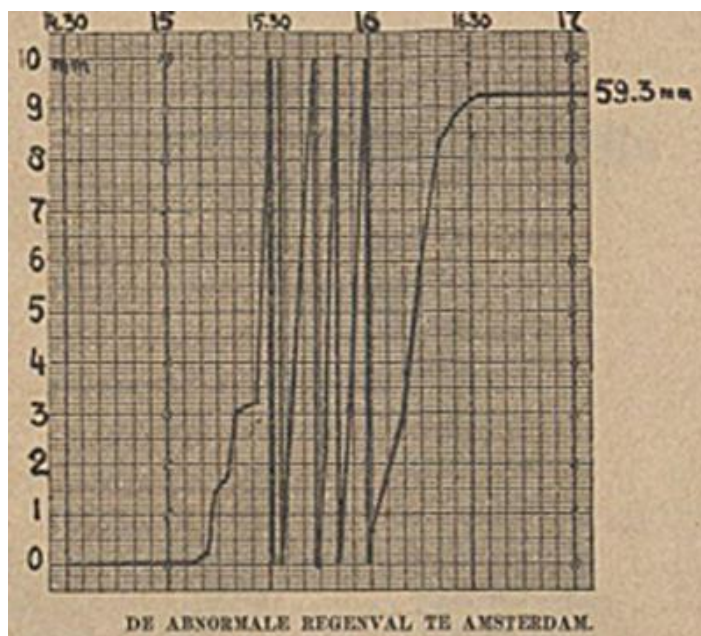
Op 31 juli 1998 was er een windhoos actief in Klazienaveen. Een viertal tuinbouwbedrijven liepen forse schade op.

De laatste 10 dagen (decade) van juli 2005 was in De Bilt de natste sinds 1901: er viel toen 105 mm omlaag!

Figuur 4.38: In Boskoop viel op 31 juli 1951 72 mm neerslag in 30 minuten

Bron: Meteolink¹⁰⁹

Andersom geldt: had het KNMI al vanaf 1951 vijftig neerslagstations actief gehad waar uurmetingen verricht werden, dan zouden er wellicht ook zeer extreme buien gemeten zijn tussen 1951 en 1980. Voor de periode vóór 1951 geldt hetzelfde. Een treffend voorbeeld daarvan is de enorme regenbui die op 31 juli 1951 Boskoop blank zette. In 3 uur tijd viel daar 105 mm regen, waarvan 72 mm in 30 minuten! Het uurgemiddelde waarbinnen die 72 mm viel zou zonder twijfel de KNMI-grafiek van figuur 4.36 gehaald hebben en wellicht bovenaan hebben gestaan. Boskoop is al sinds 1910 een officieel neerslagstation van het KNMI. Maar omdat Boskoop geen officieel uurstation is ontbreekt de waarneming in de neerslagstatistieken van het KNMI.



Figuur 4.39: extreme neerslag in Amsterdam op 7 juli 1936

Bron: Nieuwsblad van Friesland

¹⁰⁹ <http://www.meteolink.nl/weerhistorie-2/weerextremen-per-maand/juli-historie/>

Op het KNMI meetstation Amsterdam Hortus Botanicus viel op 7 juli 1936 in 1 uur tijd minstens 50 mm neerslag. In Zierikzee werd op 2 augustus 1960 binnen 1 uur 60 mm neerslag gemeten (Bron: Friese Koerier). De voorbeelden tonen aan dat op grond van beperkte uurregistratie in het verleden en vijf recente hevige buien beweren dat de intensiteit van de extreme buien in Nederland toeneemt niet houdbaar is.

Wie toekomstscenario's over hevige neerslag wil schrijven begeeft zich op een glibberig pad. Data zijn onvoldoende aanwezig en de wetenschappelijke kennis over dergelijke buien is beperkt. Bovendien zijn de klimaatmodellen tegenwoordig wel in staat om grootschalige processen zoals hoge- en lagedrukgebieden en frontensystemen te beschrijven, maar kleinschalige wolkenprocessen vormen nog steeds een probleem.

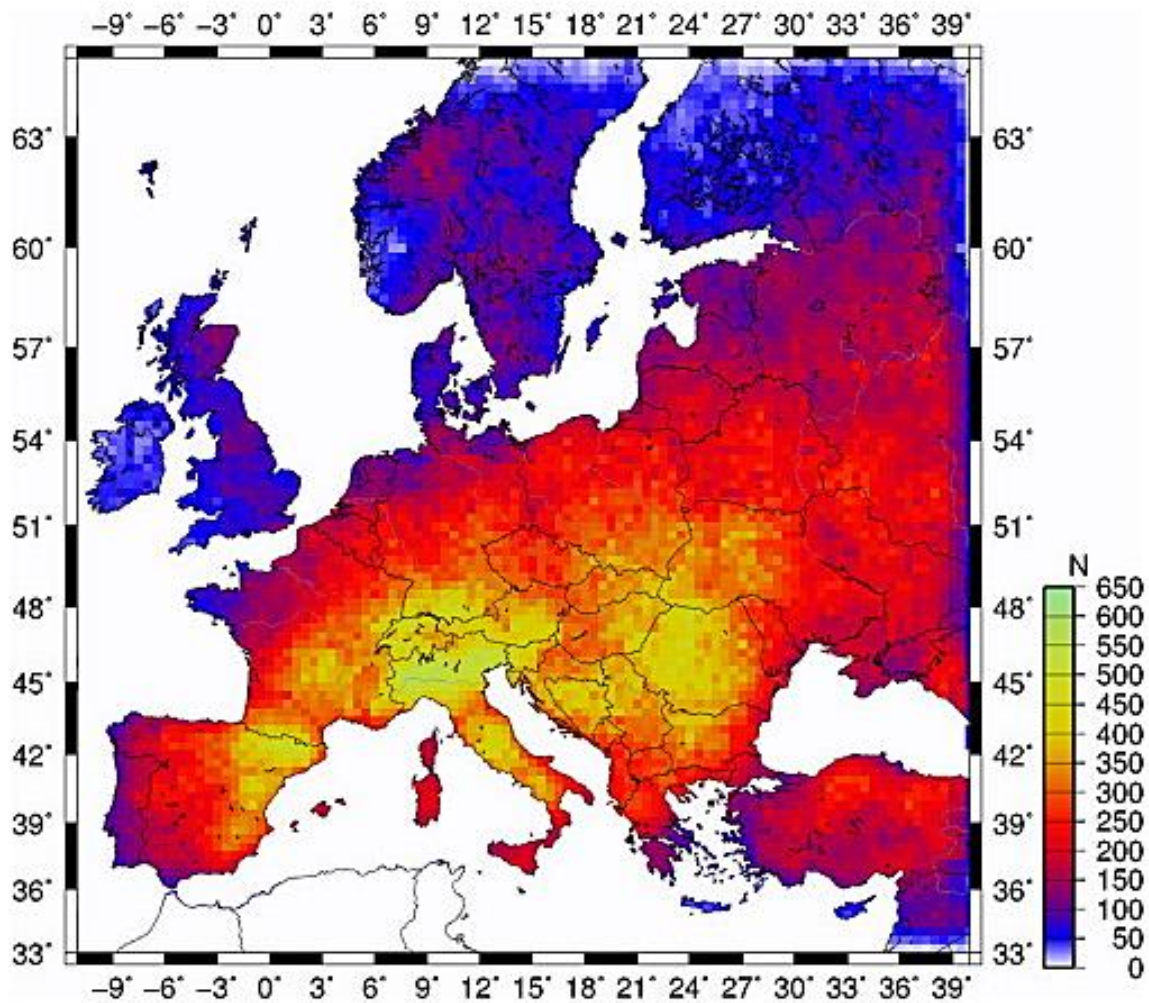
Regionale klimaatmodellen, zoals RACMO van het KNMI, hebben een oplossend vermogen van ongeveer 25 km (een factor tien groter dan de globale modellen) en zijn daardoor beter in staat buiencomplexen te beschrijven dan mondiale klimaatmodellen. Toch blijft ook hier een probleem dat het oplossend vermogen van 25x25 km nog veel te groot is voor observaties van lokale afmetingen.

Een andere tekortkoming in regionale modellen zoals RACMO is dat de hydrologie last heeft van persistentie, clustering van natte en droge periodes gedurende langere periodes. Die persistentie die dagen kan duren maar ook weken en zelfs decennia en nog langer wordt het Hurst-Kolmogorov-effect genoemd.¹¹⁰ Dat neerslag gedurende een bepaalde periode toeneemt of afneemt betekent dus niet automatisch dat er sprake moet zijn van een deterministische trend, veroorzaakt door temperatuur. Dit HK-effect wordt niet meegenomen in de KNMI-klimaatmodellen.

Onderzoeker Geert Lenderink van het KNMI omschrijft de grote onzekerheden voor de toekomstige ontwikkelingen als volgt: *“Het staat nog niet vast of deze schaalvergroting van buien daadwerkelijk zal gaan optreden in de toekomst. Tegenover deze mogelijk sterkere organisatiegraad van buien zijn er ook langetermijneffecten die mogelijk een dempend effect op de toename van neerslagextremen en organisatiegraad van buien hebben. De meeste klimaatmodellen verwachten in de zomer een toenemende invloed van hogedrukgebieden boven Groot-Brittannië, waardoor de grootschalige condities nodig voor extreme neerslag minder vaak optreden. Ook lijkt de stabiliteit van de atmosfeer te kunnen veranderen, waarbij de atmosfeer meer opwarmt op grote hoogte dan aan de grond, met als gevolg dat de opbouw van de onderste 5 tot 10 km van de atmosfeer juist stabiel wordt. Beide stabiliserende effecten zijn echter relatief zwak tot 2050, maar nemen daarna wel toe.”*¹¹¹

¹¹⁰ <http://www.nature.com/nclimate/journal/v6/n4/full/nclimate2894.html>

¹¹¹ G. Lenderink (2017), Convectieve neerslagextremen en klimaatverandering, Zenit, april 2017



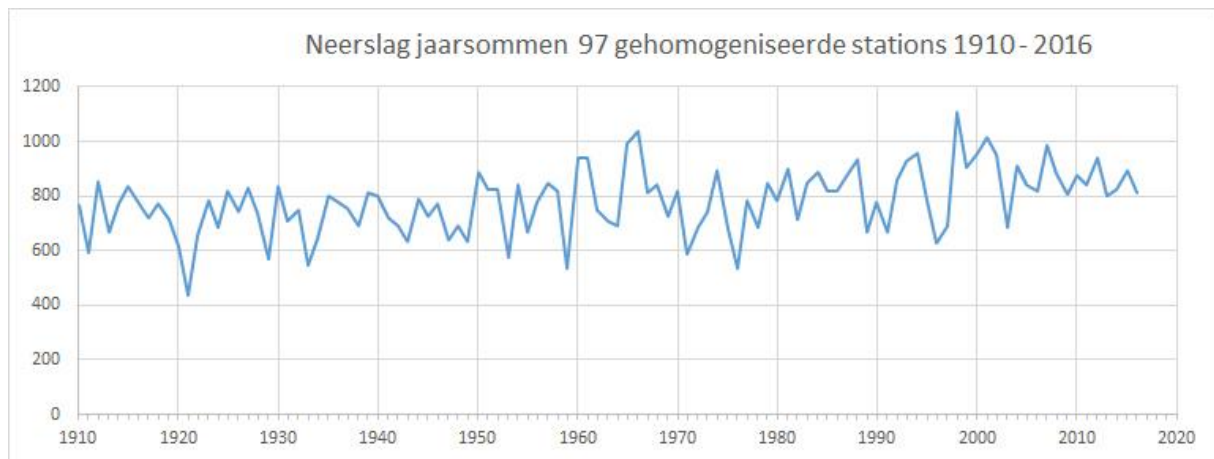
Figuur 4.40: Aantal hagelgebeurtenissen per roosterpunt ($\sim 1 \text{ km}^2$) in ongeveer 225 jaar
Bron: Punge et al.

Een onderzoek naar hagel in Europa door Punge et al uit 2014 toont aan dat de correlatie tussen hagel en temperatuur niet overtuigend is.¹¹² Hagel is een proxy voor zware neerslag. In figuur 4.40 is ook te zien dat het zuidoosten van ons land gevoeliger is voor hagel dan het noordwesten.

Conclusies

Volgens het rapport *KNMI'14 Klimaatscenario's voor Nederland* is de jaarlijkse hoeveelheid neerslag tussen 1910 en 2013 toegenomen met 26%.

¹¹² <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809517303423>



Figuur 4.41: verloop jaarlijkse neerslag in Nederland 1910 t/m 2016.

Opvallend is de daling van de lijn vanaf 2000, tot op een niveau van ongeveer 800 mm/jaar. Dat is het niveau dat we uit de jaren '60 van de vorige eeuw kennen. De neerslagfluctuaties in Nederland vertonen opvallende gelijkenis met die in centraal Engeland wat de belangrijke invloed van de luchtcirculatie aannemelijk maakt.

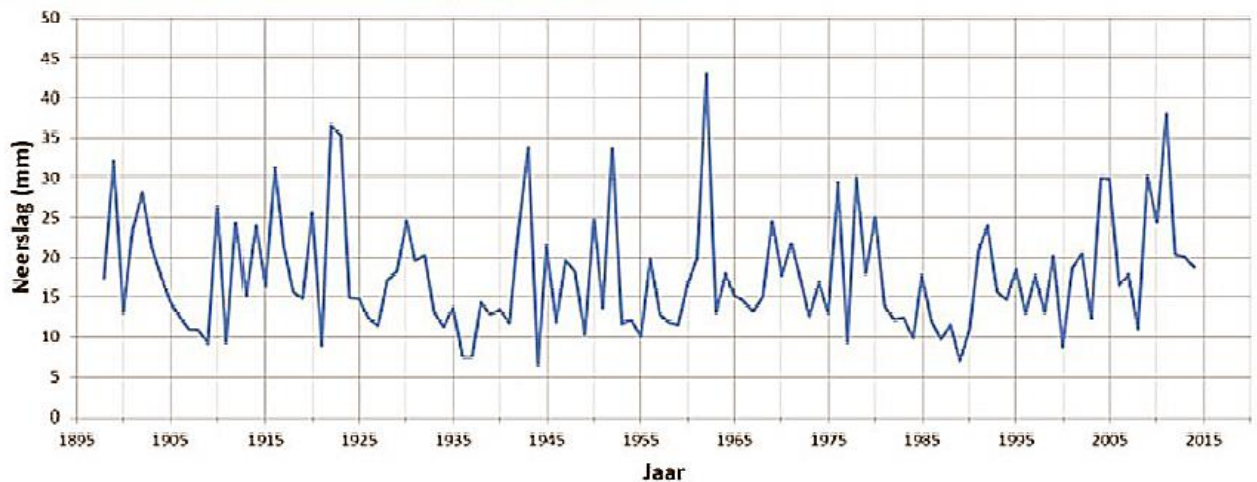
Op basis van de gegevens van 239 gehomogeniseerde reeksen sinds 1951 kan geconcludeerd worden dat het de afgelopen decennia niet harder is gaan regenen maar zware neerslag treedt wel vaker en op meer plaatsen op. De neerslagintensiteit is in de periode niet toegenomen.

De gegevens van de uursommen geven voorsnog geen basis aan de veronderstelling dat extreme buien in ons land intensiever worden. Daarvoor is het meetnet te grofmazig en zijn veel meetstations te kort actief. Niet alleen is er een gebrek aan historische meetgegevens over hevige buien, er is ook nog relatief weinig kennis over de kleinschalige wolkenprocessen die extreme buien sturen. Bovendien is er zoveel onzekerheid over de toekomstige ontwikkelingen van grootschalige weersystemen in Europa en veranderingen in atmosfeeropbouw dat betrouwbare voorspellingen momenteel onmogelijk zijn.

In België en Duitsland is de situatie met betrekking tot extreme neerslag vergelijkbaar met die in Nederland. In Duitsland laten de waarnemingen een afname zien van extreme neerslag sinds 1951. Het enige model dat deze buien goed kan narekenen toont echter een significante toename in de kans op extreme neerslag tussen 1960 en 2016.¹¹³ Dit toont nog eens aan dat men voorzichtig om moet gaan met modellen en projecties die daarop gebaseerd zijn.

¹¹³ <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/klimaatanalyse-van-extreme-buien-eind-mei-begin-juni-2016>

In België is het niet veel anders. Het KMI in België gaf een rapport uit, “Oog voor het Klimaat 2015”.¹¹⁴ Daarin komt de volgende grafiek voor:



Figuur 4.42: Jaarlijkse maximale neerslaghoeveelheden gevallen in één uur in Ukkel 1898-2014. Bron: KMI.

Het KMI in Ukkel schrijft: *“De figuren laten zien dat wat de uurlijkse en dagelijkse neerslag betreft er, naast natuurlijke variaties, geen merkbare trend in de jaarlijkse maxima binnen deze periode waar te nemen valt. Deze natuurlijke fluctuaties werden door analyse van dezelfde reeks gegevens ook al vastgesteld in de studie van Ntegeka and Willems (2008). Zelfs als we sinds het begin van de 21ste eeuw een lichte tendens tot verhoging van deze twee jaarlijkse hoeveelheden vaststellen, is de periode te kort opdat deze tendens statistisch opmerkelijk zou zijn. Ook hier kunnen we besluiten dat de hierboven beschreven resultaten het gevoel dat onweersbuien, die één of meerdere uren kunnen duren, recentelijk intenser en overvloediger geworden zijn, niet bevestigen.”*

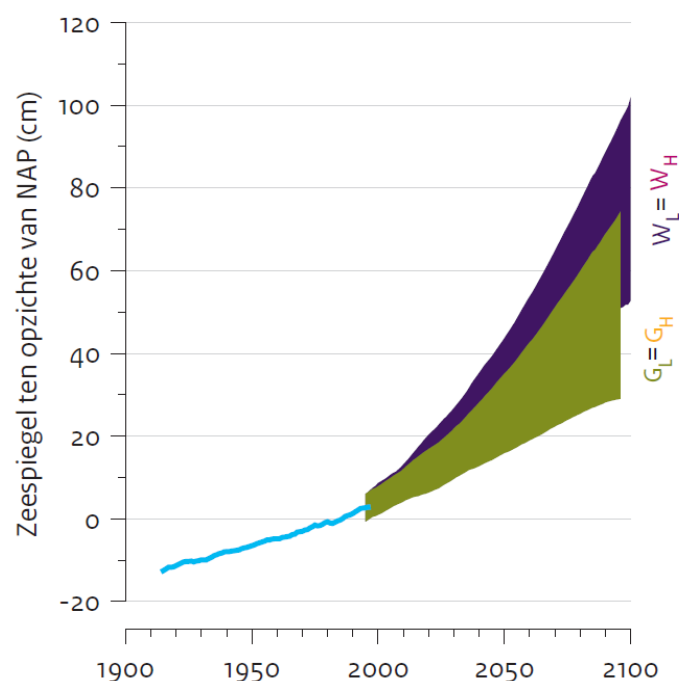
¹¹⁴ http://www.meteo.be/resources/20150508vigilance-oogklimaat/vigilance_climatique_IRM_2015_WEB_NL_BAT.pdf

5. Zeespiegelstijging: business as usual

De brochure Klimaatscenario's van het KNMI stelt: "Uit waarnemingen blijkt dat de zeespiegel aan de Nederlandse kust sinds 1900 stijgt met een gemiddeld tempo van 1,8 mm per jaar. Voor de Noordzee is geen duidelijke versnelling zichtbaar in het tempo van stijging die uitstijgt boven de natuurlijke variaties, zoals die wel zichtbaar is in het wereldgemiddelde. Dit wordt veroorzaakt doordat de natuurlijke variaties voor de Noordzee, die samenhangen met variaties in de wind, veel groter zijn dan voor de wereldgemiddelde zeespiegel."

En: "De KNMI'14-scenario's berekenen voor 2050 een zeespiegelstijging tot 40 centimeter ten opzichte van 1981-2010. Deze bovenwaarde voor 2050 is 5 centimeter hoger dan die in KNMI'06 en in de Deltascenario's. Dit komt vooral doordat de ijskappen op Groenland en Antarctica sneller smelten. Daarnaast is in de KNMI'14-scenario's het uitzetten van het water in de Noordzee meegenomen in de berekeningen. KNMI'06 ging nog uit van berekeningen voor het noordoosten van de Atlantische Oceaan vanwege gebrek aan gegevens voor de Noordzee.

In 2085 zal de zeespiegel aan de Nederlandse kust volgens KNMI'14 tussen de 25 en 80 cm zijn gestegen. Voor 2100 is een bovenwaarde van 100 cm berekend. Deze waarde lijkt veel hoger dan de 85 cm in KNMI'06. Dit verschil komt voor het grootste deel doordat bij KNMI'14 de 95% bovenwaarde is toegepast, zoals gebruikelijk in het nieuwe IPCC-rapport 3), terwijl voor KNMI'06 de 90% bovenwaarde is toegepast. De KNMI'06 95% bovenwaarde correspondeert met een stijging van 95 cm. Het uiteindelijke verschil van 5 cm meer stijging in KNMI'14 komt vooral doordat de ijskap op Antarctica sneller smelt en het uitzetten van de oceaan meer bijdraagt."



Figuur 5.1: Zeespiegel aan de Nederlandse kust zoals waargenomen en volgens de KNMI'14-scenario's. Bron: KNMI.

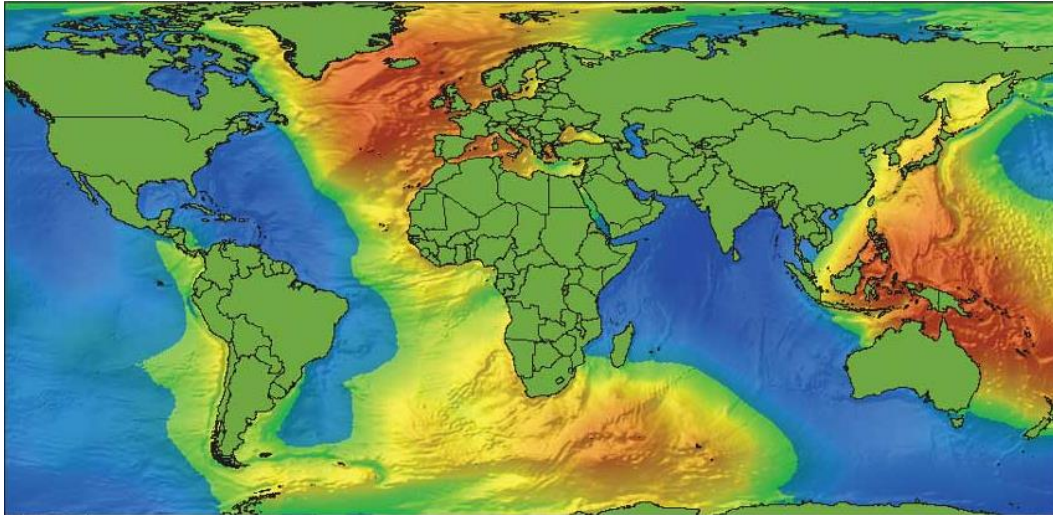
Figuur 5.1 is de illustratie die hoort bij de KNMI-scenario's voor de zeespiegel. Zelfs in de lagere groene variant is de zeespiegeltrend tot het jaar 2100 aanzienlijk hoger dan de historische trend langs de Nederlandse kust op basis van waarnemingen toont. De verwijzing door het KNMI naar het 'snellere smelten' van de ijskappen op Groenland en Antarctica lijkt voorbij te gaan aan de grote onzekerheid over (het tempo van) afsmelten op Groenland en Antarctica, mede als gevolg van de beperkte meetgegevens, zowel in tijd als geografisch bezien.

De absolute zeespiegelstijging voor de Nederlandse kust is een gevolg van de gemiddelde mondiale zeespiegelstijging. Bovendien is het een relatieve zeespiegelstijging, dus ten opzichte van het land. In aanmerking nemend dat de kust van Nederland constant daalt betekent dit dat de absolute zeespiegelstijging langs onze kust lager is dan de getijdemetingen weergeven. Van de zes hoofdpeilmeetstations langs de Nederlandse kust (Delfzijl, Harlingen, Den Helder, IJmuiden, Hoek van Holland en Vlissingen) zijn lange tijdreeksen beschikbaar, de kortste begint in 1890. Hiermee wordt een goede indruk verkregen van de gemiddelde relatieve zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust.

Mondiale zeespiegelstijging

Omdat de absolute zeespiegelstijging voor de Nederlandse kust een gevolg is van de gemiddelde mondiale zeespiegelstijging is het van belang om daar eerst aandacht aan te besteden. De mondiale zeespiegelstijging betreft per definitie de absolute zeespiegel, dat wil zeggen de gemiddelde zeespiegel ten opzichte van een vast referentiepunt of –vlak. Het gebruikte referentievlak is de referentie-ellipsoïde. Het middelpunt van die referentie-ellipsoïde valt samen met het massamiddelpunt van de aarde, inclusief de massa van de oceanen en de atmosfeer.

De zeespiegel vormt geen perfecte ellipsoïde zoals de referentie-ellipsoïde WGS84 maar de hoogte van de zeespiegel varieert van plaats tot plaats. Dat is het gevolg van verschillen in zwaartekracht en aardrotatie maar ook van getijden, luchtdruk, aardkorstbewegingen, wind, zoutgehalte et cetera.



Figuur 5.2: Zeespiegelhoogte ten opzichte van de WGS84 ellipsoïde. Bron: esri.com.¹¹⁵

In figuur 5.2 zijn de relatieve verschillen in hoogte van de zeespiegel ten opzichte van het referentievlak WGS84 over langere perioden weergegeven, waarbij de blauw gekleurde delen van de oceanen beneden het referentievlak liggen en de groen/geel/bruine delen erboven. De (gemiddelde) zeespiegel snijdt dus het referentievlak op de lijn die de grens vormt tussen blauw en groen.

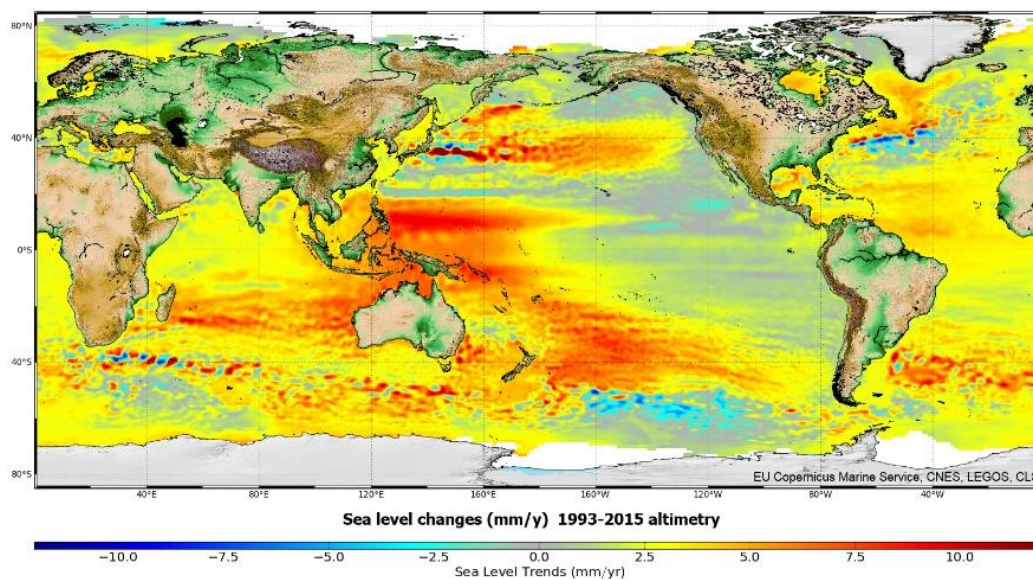
De zeespiegel varieert in de tijd. De tijdschaal daarvan varieert van zeer kort (bijvoorbeeld golven en getijden) tot zeer lang, zoals de zeespiegelveranderingen als gevolg van de afwisseling tussen ijstijden en interglacialen. Voor dit rapport zijn de zeespiegelveranderingen op een termijn van enkele decennia tot een eeuw van belang. Geschat wordt dat de zeespiegelstijging gedurende de 20e eeuw ongeveer 1,5 mm/jaar bedroeg.¹¹⁶ Die schatting is gebaseerd op getidemetingen. De geschatte totale geofysische effecten die bijdroegen aan de zeespiegelstijging in de 20e eeuw zijn uitzetting (0,4 mm/jaar), gletsjers (0,51 mm/jaar), landijs (0,45 mm/jaar), grondwater (0,12 mm/jaar) en antropogene effecten (0,05 mm/jaar).¹¹⁷

Zeespiegelstijging (en -daling) kent grote ruimtelijke verschillen. Satellietmetingen vanaf 1992 gaven het eerste directe bewijs dat er sprake is van relatief grote verschillen in zeespiegelveranderingen. In figuur 5.2 is te zien dat de regionale verschillen kunnen variëren van -15 mm tot + 15 mm per jaar.

¹¹⁵ <http://www.esri.com/news/arcuser/0703/geoid1of3.html>

¹¹⁶ Church, J.A. & White, N.J. *Surv Geophys* (2011) 32: 585. doi:10.1007/s10712-011-9119-1

¹¹⁷ Chung-Yen Kuo (2006), *Determination and Characterization of 20th Century Global Sea Level Rise*, Ohio State University 43210



Figuur 5.3: Regionale zeespiegelveranderingen altimetrie 1993–2015. Bron: Copernicus EU.¹¹⁸

Die regionale verschillen zijn het gevolg van natuurlijke processen zoals veranderende windpatronen en zeestromen. Een voorbeeld daarvan is de opmerkelijk grote stijging van de zeespiegel in grote delen van de westelijke Grote Oceaan (gevolg van El Niño en de Pacific Decadal Oscillation) en de Indische Oceaan. Maar ook verticale bewegingen van de aardkorst als gevolg van platentektoniek (in o.a. Japan) en veranderende landijsmassa's (glacial isostatic adjustment (GIA): Scandinavië) en hebben invloed op het zwaartekrachtsveld en hoogte van de oceaانبodem en daarmee op de zeespiegel. Een dergelijke ruimtelijk ongelijkmatige spreiding van zeespiegelveranderingen kan soms wel decennialang voortduren.

Het gebied in het westelijk deel van de Grote Oceaan dat bruinrood gekleurd is wordt de *Warm Pool* genoemd. De zeespiegel is daar sinds begin jaren '90 drie keer zo hard gestegen als het gemiddelde zeeniveau. Oorzaak is waarschijnlijk een intensivering van de passaatwinden ter plekke.¹¹⁹

Satellietmetingen

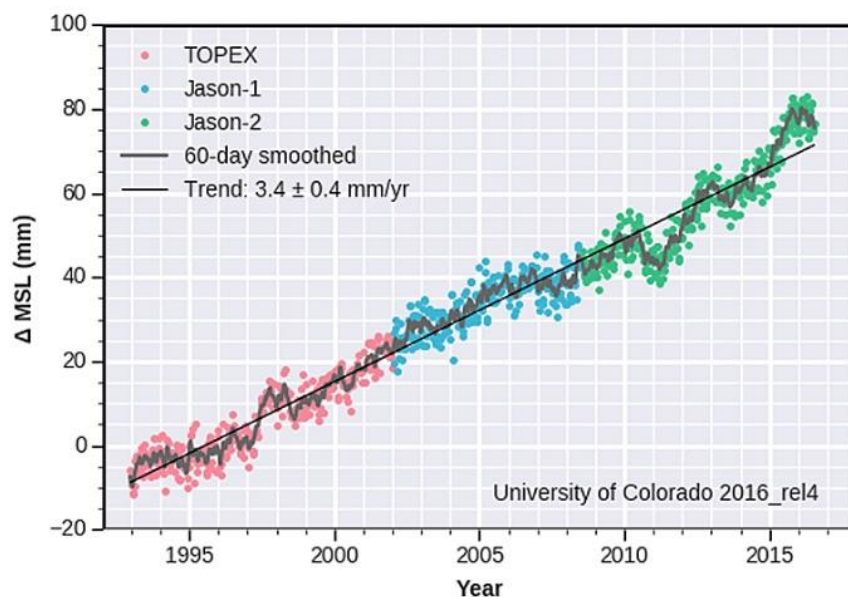
Al in 1978 zijn er pogingen geweest om de zeespiegel vanuit de ruimte te meten. De eerste missie was van Seasat in 1978. Helaas duurden die metingen maar 24 dagen en de missie werd door kortsluiting beëindigd. Ook met Geosat werd in de jaren '80 een poging gedaan. Sinds 1992 worden zeespiegelveranderingen gemeten met behulp van hoogtemeters aan

¹¹⁸ <http://newsletter.copernicus.eu/issue-13-april-2016/article/copernicus-sentinel-satellites-keep-eye-sea>

¹¹⁹ Mark A. Merrifield and Mathew E. Maltrud (2011), Regional sea level trends due to a Pacific trade wind intensification, *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, L21605, doi:10.1029/2011GL049576

boord van satellieten. Achtereenvolgens zijn dat TOPEX/Poseidon (6-12-1992 tot 10-1-2002), Jason1 (15-1-2002 tot 2-7-2008) en Jason2 (3-7-2008 tot heden).

De schatting van de satelliehoogtemeter is gebaseerd op de afstand tussen de gemeten zeespiegel en het midden van de aarde (geocentrische zeewaterhoogte of SSH). Dat gebeurt door de gemeten afstand tussen de satelliet en zeeoppervlak (na correctie voor veel effecten op het radarsignaal) van de precieze baan van de satelliet af te trekken.¹²⁰ Figuur 5.4 geeft de constructie van de zeespiegelstijging van 1992 t/m 2016 weer. De trend over deze periode is volgens University of Colorado 3,4 mm/jaar.



Figuur 5.4: zeespiegelstijging op basis van altimetrie volgens University of Colorado. Bron: University of Colorado.¹²¹

De meetresultaten van zeespiegelmetingen door satellieten, altimetrie, berusten echter op een aanzienlijk aantal geofysische correcties. De ruwe meetgegevens zijn onbruikbaar en dienen dus gecorrigeerd worden.

Bovendien is voortdurende monitoring van de satelliehoogtemeter noodzakelijk door gebruik te maken van in-situ data. Vanuit een aantal locaties over de hele wereld worden de satelliehoogtemeters gekalibreerd met behulp van geodetische instrumenten in de buurt van de satellietbaan of bij kruispunten (platforms, getijdemeters, boeien).

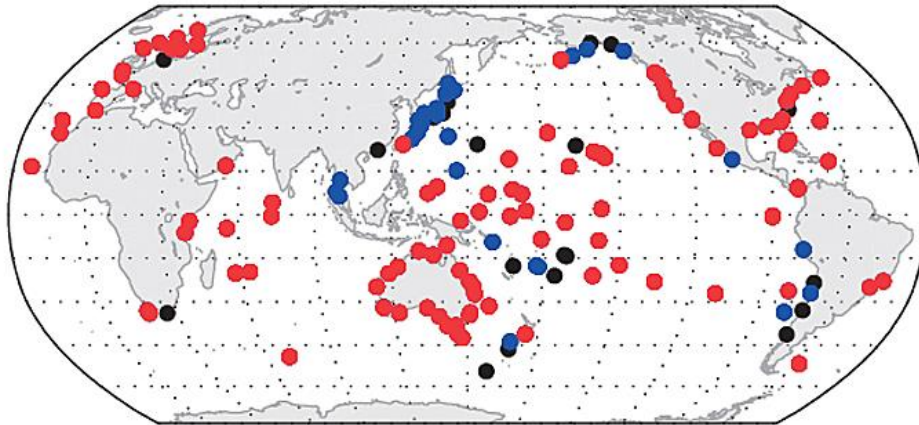
Navigatiesystemen zoals GPS zijn dan onontbeerlijk maar nog steeds zijn er problemen: verticale positionering blijft een probleem.¹²²

¹²⁰ <http://sealevel.colorado.edu/content/what-definition-global-mean-sea-level-gmsl-and-its-rate>

¹²¹ <http://sealevel.colorado.edu/>

¹²² http://www.iag-aig.org/attach/b1fde3fd8dce4117fa5bac24ded5b425/IAG_Newsletter_April_2011.pdf

Verdere kalibratie vindt plaats met behulp van een netwerk van getijdestations die zich recht onder de baan van de satelliet bevinden. Kalibratie met behulp van getijdemetingen is buitengewoon waardevol om tijdsafhankelijke fouten (driftfouten) op te sporen en te corrigeren. Groot probleem vormen de verticale bewegingen van de aardkorst en hun invloed op getijdedata.



Figuur 5.5: In rood de door Watson et al. gebruikte getijdestations. Zwart en blauw zijn onbruikbare stations als gevolg van respectievelijk non-lineaire bodembewegingen en aardbevingen. Bron: Watson et al.¹²³

Het is duidelijk dat de ‘zeespiegelmeting’ met behulp van satellieten ongekend complex is. Data moeten voortdurend gecorrigeerd worden en zijn mede de uitkomst van modellen. Dat toenemende inzichten leiden tot wijzigingen in de schattingen van de globale zeespiegelstijging tonen recente publicaties. Church en White kwamen in 2011 nog uit op een gemiddelde stijging van $3,2 \pm 0,4$ mm/jaar voor de periode 1993-2009 en gebruikten alleen GIA-data voor correctie.¹²⁴ Watson et al. komen in 2015 uit op een globale zeespiegelstijging tussen $2,6 \pm 0,4$ en $2,9 \pm 0,4$ mm/jaar tussen 1993 en midden 2014 door gebruik te maken van op GPS gebaseerde VLM (vertical land movement) data. Dieng et al (2017) komen uit op $3,0$ mm/jaar.¹²⁵ Chen et al (2017) gaan uit van een zeespiegelstijging (altimetrie) van $2,4 \pm 0,2$ mm/jaar in 1993 tot $2,9 \pm 0,3$ mm/jaar in 2014.¹²⁶ Het zal de laatste bijstelling niet zijn verwachten we.

¹²³ C.S. Watson, N.J. White, J.A. Church, M.A. King, R.J. Burgette, B. Legresy (2015), Unabated Global Mean Sea-level Rise over the Satellite Altimeter Era, *Nature Climate Change* DOI: 10.1038/NCLIMATE2635

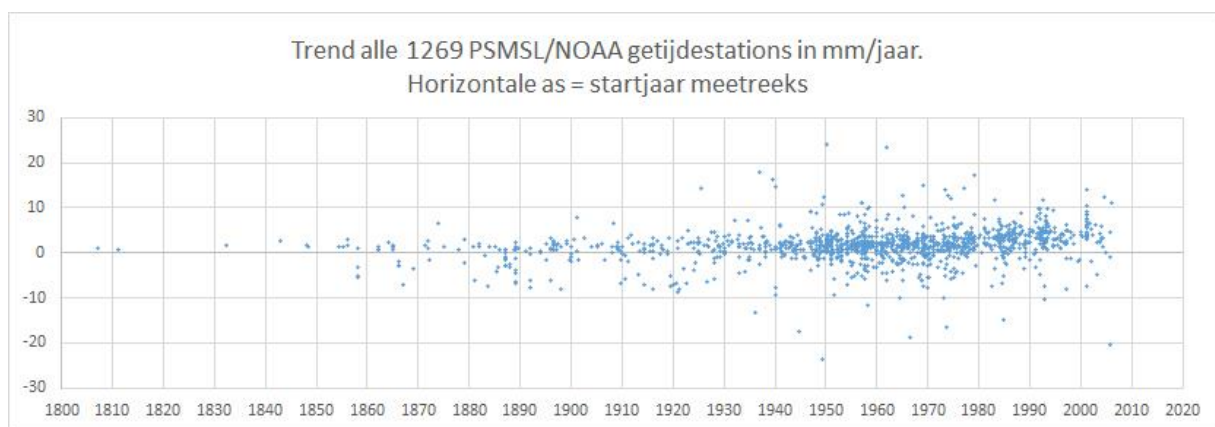
¹²⁴ Church, J.A. & White (2011), Sea Level Rise from the Late 19th tot the Early 21st Century, *N.J. Surv Geophys* 32: 585. doi:10.1007/s10712-011-9119-1

¹²⁵ <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2017GL073308/abstract>

¹²⁶ <https://www.nature.com/nclimate/journal/v7/n7/full/nclimate3325.html>

Getijdemetingen

Getijdemetingen worden uitgevoerd als relatieve zeespiegelveranderingen ten opzichte van een vast punt op het land. Die getijdemetingen vinden plaats met behulp van zogenaamde *tide gauges*, meetboeien, op een aantal plaatsen langs de kust verspreid over de wereld. De zeespiegeldata worden verzameld en verwerkt door een tweetal organisaties, PSMSL in Groot-Brittannië en NOAA in de USA.¹²⁷¹²⁸ PSMSL en NOAA baseren hun reeksen op data die komen van diverse nationale organisaties. Zo levert Rijkswaterstaat de data van Nederland. De oudste bruikbare meetreeks is die van Brest (F), die startte in 1807 en tot op de dag van vandaag actief is. Er zijn momenteel in totaal 1269 beschikbare getijdemeetreeksen beschikbaar, met een gemiddelde trend t/m 2016 van 1,65 mm/jaar.



Figuur 5.6: trend van alle 1269 PSMSL/NOAA getijdestations vanaf hun startjaar. Bron: Sealevel.info.¹²⁹

Die stations zijn, omdat ze langs kusten en op eilanden gesitueerd zijn, niet ruimtelijk gelijkmatig verspreid. Bovendien zijn de meetreeksen in de tijd ongelijkmatig verspreid. Er zijn meetreeksen van meer dan honderd jaar lang die nog steeds doorlopen maar ook meetreeksen van minder dan tien jaar lang die al lang geleden stopten. In figuur 5.6 zijn van alle 1269 stations de trend van de relatieve zeespiegelstijging in mm/jaar weergegeven. Op de x-as het startjaar van de betreffende meetreeks.

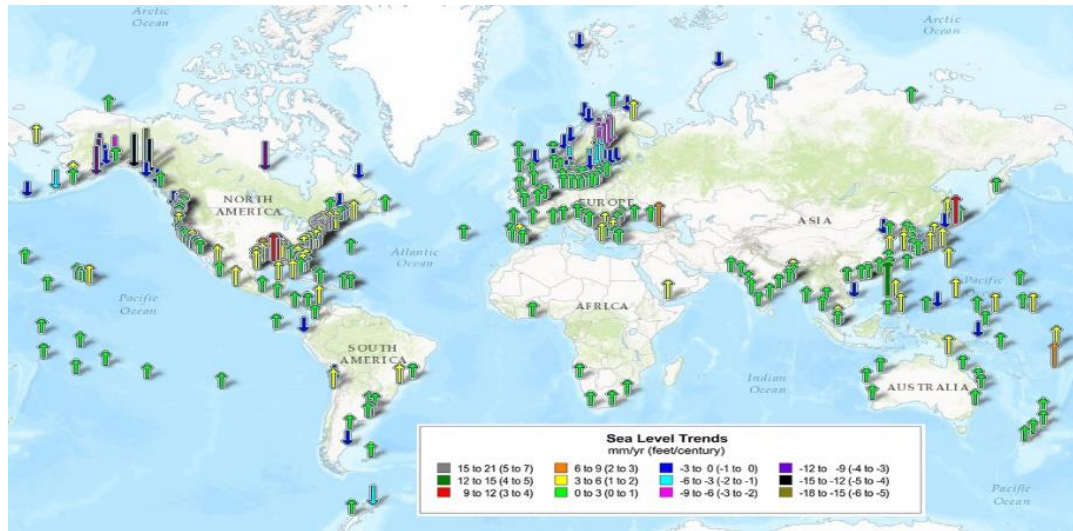
Een probleem is dat de getijdemetingen de relatieve zeespiegelverandering meten ten opzichte van een vast punt op het land. De aardkorst vertoont op veel plaatsen verticale bewegingen, zoals GIA (Glacial Isostatic Adjustment) bij Scandinavië en Noordoost-Canada, aardkorstbewegingen in subductiezones zoals bij Japan, Alaska en in het oostelijk deel van de Middellandse Zee en tektonische bewegingen als gevolg van grootschalige sedimentatie

¹²⁷ <http://www.psmsl.org/>

¹²⁸ <http://www.noaa.gov/>

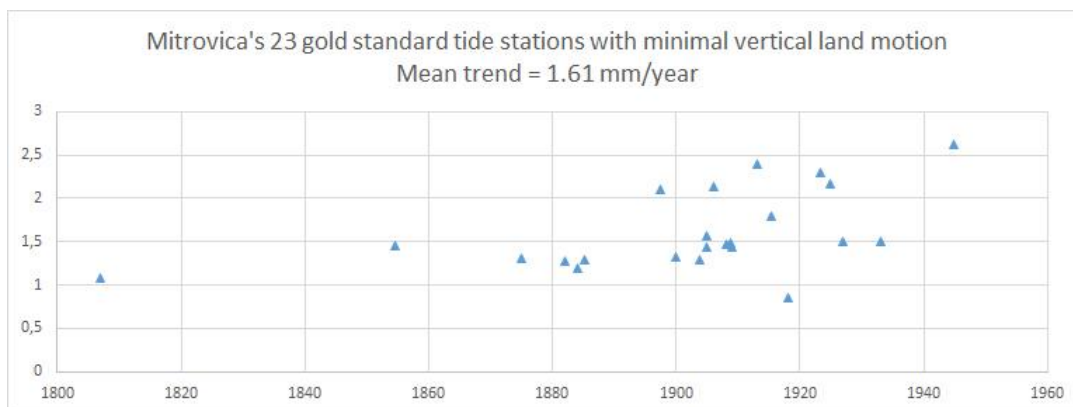
¹²⁹ http://www.sealevel.info/all_stations_trendtable_D.html

zoals de oostkust van de USA en de Golf van Mexico. In figuur 5.7 zijn de effecten daarvan grafisch weergegeven.



Figuur 5.7: invloed van GIA en andere verticale korstbewegingen op getijdemetingen
Bron: NOAA.¹³⁰

Er zijn al diverse pogingen gedaan om verticale aardkorstbewegingen (met name GIA) te verdisconteren in getijdemetingen, onder andere door Peltier.¹³¹¹³² Holgate heeft een selectie van negen getijdestations gemaakt op basis van minimale verticale landbeweging. Hij kwam tot een gemiddelde trend voor de negen stations van 1,77 mm/jaar. Mitrovia deed iets soortgelijks op basis van 23 getijdestations en kwam tot een gemiddelde trend van 1,61 mm/jaar:



¹³⁰ <https://tidesandcurrents.noaa.gov/sltrends/sltrends.html>

¹³¹ Peltier W.R 1998 Postglacial Variations in the Level of the Sea: Implications for Climate Dynamics and Solid-Earth Geophysics. Reviews of Geophysics 1998. 36(4),603-689.

¹³² Peltier W.R 2004 Global Glacial Isostasy and the Surface of the Ice-Age Earth: The ICE-5G(VM2) model and GRACE. Ann. Rev. Earth. Planet. Sci. 2004. 32,111-149.

Figuur 5.8: Mitrovica's lijst van 23 stations met minimale bodembeweging. Bron: sealevel.info.¹³³

Er zijn pogingen gedaan om correcties op basis van GPS toe te passen op niet-GIA aardkorstbewegingen, onder ander door Hamlington et al.¹³⁴ Veelbelovend is het netwerk dat de Franse organisatie SONEL wereldwijd opzet op basis van GPS.¹³⁵ Er zijn begin 2017 al bijna negentig getijdemeters gekoppeld aan GPS-apparatuur. In figuur 5.9 is de spreiding van alle GNSS (global navigation satellite system) apparatuur langs kusten en op eilanden weergegeven. De bedoeling is dat op den duur een geïntegreerd observatiesysteem ontstaat dat getijdemeter-data koppelt aan GNSS.



Figuur 5.9: Verspreiding van GNSS-stations langs kusten en op eilanden. Bron: SONEL.

Getijdemetingen versus satellietmetingen

Debat is er over de discrepantie tussen de getijdedata en de satellietdata. De satellietdata vanaf 1992 tot 2017 liggen ongeveer een factor twee hoger dan de getijdedata over de vorige eeuw. Diverse bronnen spreken van een versnelling in de getijdedata aan het einde van de 20e eeuw waardoor beide datareeksen dichter bij elkaar komen.¹³⁶¹³⁷ Houston et al. ontdekten echter geen recente acceleratie in de getijdemetingen.¹³⁸ Holgate constateerde in

¹³³ http://www.sealevel.info/MSL_mitrovica23_trendtable.html

¹³⁴ B.D. Hamlington, P. Thomson, W.C. Hammond, G. Blewitt and R.D. Ray (2016), Assessing the Impact of Vertical Land Motion Twentieth Century Global Mean Sea Level Estimates, CCPO publications 193

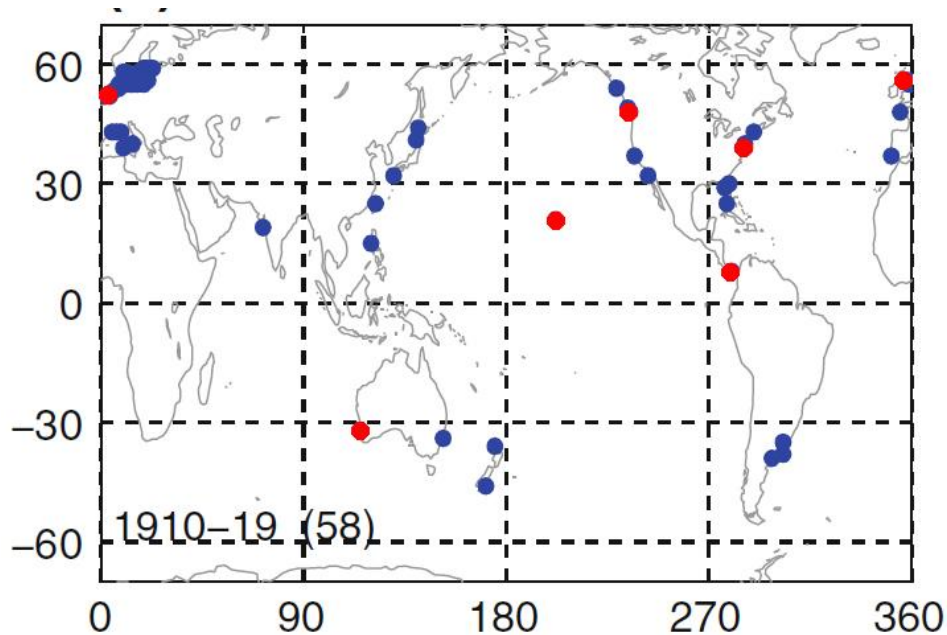
¹³⁵ <http://www.sonel.org>

¹³⁶ Church, J.A. & White (2011), Sea Level Rise from the Late 19th tot the Early 21st Century, N.J. Surv Geophys 32: 585. doi:10.1007/s10712-011-9119-1

¹³⁷ Jevrejeva S., Moore J.C., Grinstead A., Matthews A.P., Spada G. (2014). Trends and acceleration in global and regional sea levels since 1807, Global and Planetary Change, vol 113

¹³⁸ Houston J. R., Dean R. G. (2011) Sea-Level Acceleration Based on U.S. Tide Gauges and Extensions of Previous Global-Gauge Analyses. Journal of Coastal Research: Volume 27

een onderzoek van negen langlopende getijdereeksen tussen 1904 en 1953 een iets hogere trend dan van 1954 tot 2004.¹³⁹ In een latere correctie zijn de trends voor 1904-1953 ($1,91 \pm 0,14$ mm/jaar) en 1954-2003 ($1,42 \pm 0,14$ mm/jaar).¹⁴⁰ Eschenbach onderzocht voor de klimaatblog WUWT 63 getijdestations met meetreeksen van 1950 t/m 2016.¹⁴¹ 53 daarvan gaven geen enkele versnelling weer. Bij zeven stations was er wel sprake van een versnelling en bij drie van een vertraging. Zowel de versnellingen als de vertragingen waren minimaal, gemiddeld $0,015 \pm 0,012$ mm/jaar. Chen et al zien tussen 1993 en 2004 een versnelling en na 2004 een vertraging in de getijdedata.¹⁴²



Figuur 5.10: selectie van 58 getijdestations. Bron: Church et al (2011).

Als er sprake is van een recente toename in de mondiale zeespiegelstijging dan moet dat terug te vinden zijn in langlopende getijdemetingen. Daarom hebben we een selectie gemaakt van stations die tenminste een periode van honderd jaar overspannen, tot heden in bedrijf zijn en een vrijwel ononderbroken meetreeks hebben. De stations werden gekozen uit een verzameling van 58 stations uit de periode 1910-1919 zoals gebruikt door Church et al. (2011). Zie figuur 5.10 hierboven.

Bij de selectie hebben we rekening gehouden met het feit dat meetgegevens van stations die dicht bij elkaar liggen een sterke onderlinge correlatie vertonen. Bovendien hebben we geselecteerd op minimale bodembeweging. Stations uit regio's met bodembewegingen als

¹³⁹ Holgate S.J., (2007), On the decadal rates of sea level change during the twentieth century, *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, L01602

¹⁴⁰ http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/Workshops/SeaLevel/Posters/2_3_Holgate.pdf

¹⁴¹ <https://wattsupwiththat.com/2017/07/20/sea-level-rise-accelerating-not/>

¹⁴² Chen X., Feng Y., Huang N.E.. (2014). Global sea level trend during 1993–2012, *Global and Planetary Change*, vol 11, Volume 112

gevolg van GIA (Glacial Isostatic Adjustment) en stations met niet-lineaire bodembeweging in tektonisch actieve gebieden (Mitchum et al) werden uitgesloten.¹⁴³ De stations moeten bovendien een acceptabele ruimtelijke spreiding over de aarde vertonen. De zeven geselecteerde stations zijn in figuur 5.10 weergegeven met rood.

Station name	St. number	Date range	Slope	Acceleration
Den Helder, Netherlands	150-031	1900/1 to 2015/12	1.542 ± 0.169 mm/yr	0.00578 ± 0.01125 mm/yr ²
Victoria, Canada	822-101	1909/3 to 2015/12	0.707 ± 0.192 mm/yr	0.00441 ± 0.01387 mm/yr ²
The Battery, NY, USA	8518750	1900/1 to 2016/11	3.041 ± 0.126 mm/yr	0.00566 ± 0.00836 mm/yr ²
Honolulu, HI, USA	1612340	1905/1 to 2016/11	1.434 ± 0.211 mm/yr	-0.01004 ± 0.01454 mm/yr ²
Balboa, Panama	840-011	1908/1 to 2015/12	1.473 ± 0.221 mm/yr	-0.00242 ± 0.01580 mm/yr ²
Fremantle, Australia	680-471	1900/1 to 2015/12	1.706 ± 0.265 mm/yr	0.00703 ± 0.01762 mm/yr ²
North Shields, GB	170-053	1900/1 to 2015/12	1.907 ± 0.138 mm/yr	-0.00605 ± 0.00920 mm/yr ²

Figuur 5.11: trend en versnelling van de zeespiegel bij de zeven geselecteerde langjarige stations. Bron: Sealevel.info.¹⁴⁴

In figuur 5.11 zijn in de laatste kolom de versnellingen van de meetreeksen weergegeven. Van de zeven stations vertonen vier stations een positieve versnelling en drie stations een negatieve. De versnellingen en vertragingen zijn echter zo klein dat ze niet significant zijn.

Wetenschappers beschuldigen elkaar over en weer van ‘*cherry picking*’. Dat laatste is niet zo verwonderlijk, want onderzoeksresultaten zijn sterk afhankelijk van de locatie van de gebruikte stations en lengte van de datareeks. De discrepantie tussen de trend van de getijdedata en de satellietdata behoeft nader onderzoek, dat is in ieder geval duidelijk.

Getijdemetingen Nederland

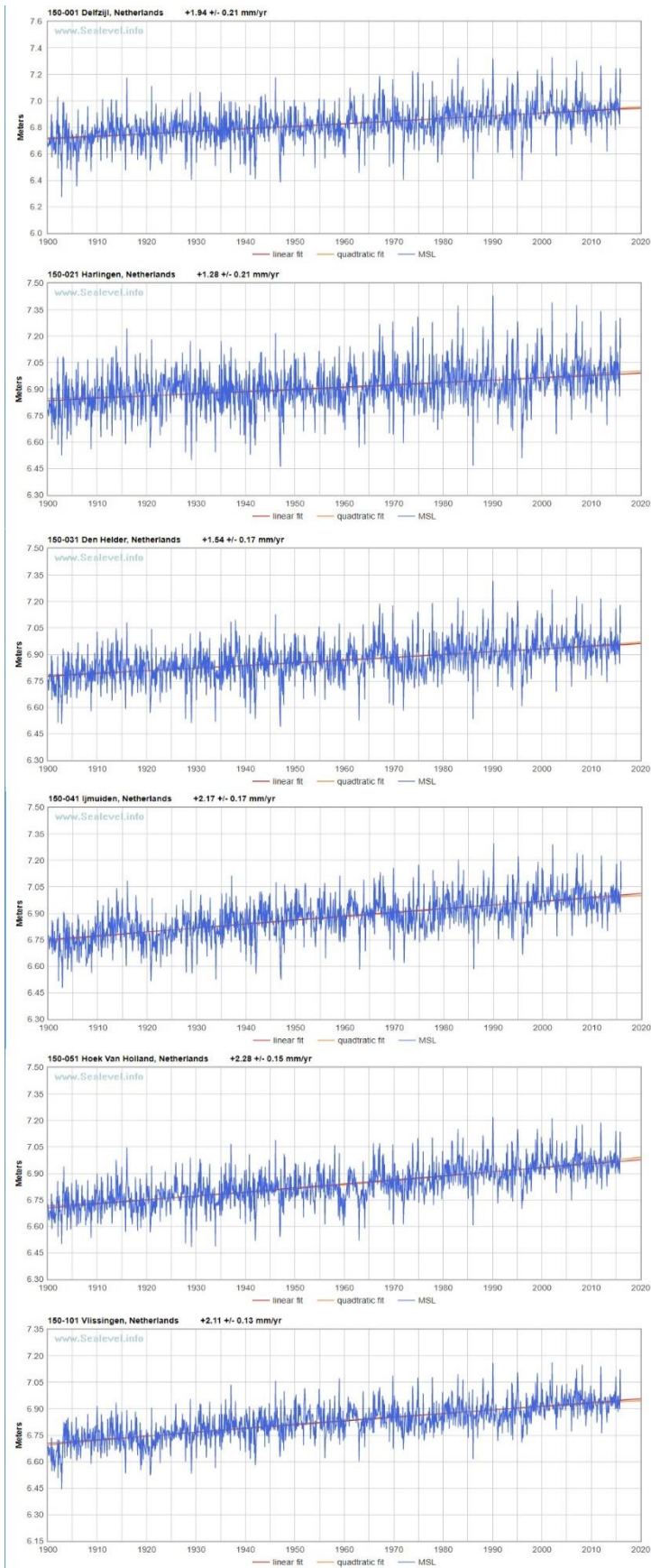
De hoogte van de zeespiegel aan onze kust wordt al heel lang gemeten. Nederlandse meetreeksen behoren tot de oudste ter wereld. In de voorgaande paragraaf is een aantal onderzoeken aangehaald naar trends in langjarige getijdemetingen t/m 2016. Daarbij is geconstateerd dat vrijwel alle meetreeksen geen recente acceleraties in de data vertonen.

In de Zeespiegelmonitor 2014, door Deltares, KNMI en HKV in opdracht van Rijkswaterstaat gemaakt, worden meetreeksen van de zes Nederlandse hoofdpeilmeetstations gebruikt: Delfzijl, Harlingen, Den Helder, IJmuiden, Hoek van Holland en Vlissingen.¹⁴⁵ Deze stations hebben meetreeksen die in de tweede helft van de 19e eeuw beginnen en tot heden doorlopen. Omdat data uit de 19e eeuw minder betrouwbaar zijn laten we grafieken beginnen in 1900.

¹⁴³ http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/Workshops/SeaLevel/Posters/2_14_Doran.pdf

¹⁴⁴ http://www.sealevel.info/all_stations_trendtable_D.html

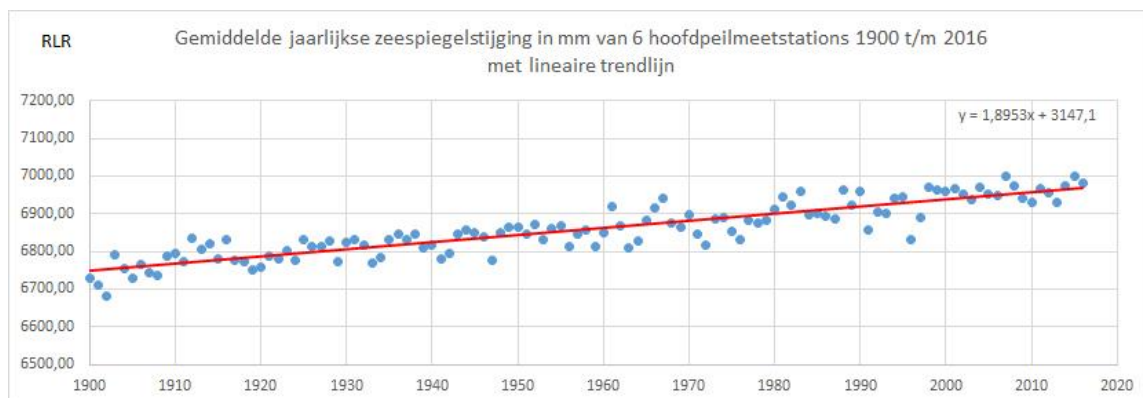
¹⁴⁵ Deltares (2015), Zeespiegelmonitor 2014, Rekenmethode voor huidige en toekomstige zeespiegelstijging.



Figuur 5.12: Maandelijkse zeespiegelhoogte hoofdpeilmeetstations vanaf 1900 met trendlijnen. Data: PSMSL; grafieken: www.Sealevel.info.

De variaties van jaar tot jaar in de zeespiegelstand kunnen aanzienlijk zijn. Die variaties worden met name veroorzaakt door verschillen in dominante windrichting binnen een jaar. Westen- en noordwestenwinden stuwen het water vaak flink op. Andere oorzaken van jaar-op-jaar variaties zijn verschillen in windsnelheid, luchtdruk, watertemperatuur en zoutgehalte. Ook de nodale cyclus van 18,6 jaar, de 'Knopencyclus', speelt een rol. Die wordt veroorzaakt door de afwijking van het baanvlak van de maan ten opzichte van die van de aarde.

De gemiddelde trend over de periode 1900 t/m 2016 voor de zes stations is 1,9 mm/jaar. Voor elke meetreeks is in figuur 5.12 de lineaire trendlijn en de kwadratische trendlijn (versnelling) weergegeven. Dat beide trendlijnen in de zes grafieken nagenoeg samenvallen duidt erop dat de zes reeksen een vrijwel lineair verloop hebben. Analyse van de samengestelde meetreeks langs de Nederlandse kust laat geen versnelling zien, ook niet in recente jaren.¹⁴⁶¹⁴⁷ In figuur 5.13 is de samengestelde meetreeks van alle zes hoofdpeilmeetstations weergegeven.



Figuur 5.13: Jaargemiddelde zeespiegel van de zes Nederlandse hoofdpeilmeetstations. Data: PSMSL.

Dit fraaie lineaire gedrag van de zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust is overigens ook terug te vinden in meetreeksen in de omgeving van Nederland. Wahl et al. vonden in 2011 voor de Duitse bocht dat stations die het dichtst bij Nederland liggen een lineair patroon

¹⁴⁶ Baart, F., P.H.A.J.M. van Gelder, J. de Ronde and M. van Koningsveld (2012). The effect of the 18.6-year lunar nodal cycle on regional sea-level rise estimates. *Journal of Coastal Research* 28(2), 511-516.

¹⁴⁷ Visser, H., S. Dangendorf and A.C. Petersen (2015). A review of trend models applied to sea level data with reference to the "acceleration-deceleration debate". *Journal of Geophysical Research: Oceans* 120, 3873-3895

volgen.¹⁴⁸ Langs de Belgische kust is een lineaire trend waargenomen door Poppe en Verwaest.¹⁴⁹ Wahl et al. analyseerden in 2013 een 30-tal stations langs de Europese kust (inclusief de Noordzeekust) en vonden lineaire trends voor alle stations.¹⁵⁰

De gemiddelde trend voor de zes stations van 1,9 mm/jaar is de relatieve zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust. De kust heeft echter te maken met een langzame daling van het land. Die daling heeft te maken met de geologische ligging van onze kust: het Noordzeebekken daalt al vanaf het begin van het Tertiair en het noordwesten van Nederland maakt deel uit van dat bekken. De daling van Noordwest-Nederland wordt door TNO geschat op ongeveer 0,25 mm per jaar.¹⁵¹ De bodemdaling wordt voor de Nederlandse kust geschat op 0,2 mm per jaar (PBL 2016). Dat betekent een absolute toename van de zeespiegel met 1,7 mm per jaar. De absolute zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust is dus in overeenstemming met cijfers van de mondiaal gemiddelde zeespiegelstijging over dezelfde periode.

Conclusies

De stijgende trend van de zeespiegel langs de Nederlandse kust is (afgezien van het dalende land) het gevolg van een aantal mondiaal werkende factoren: thermische uitzetting van opwarmend zeewater, smelten van landijs, gletsjers en kleine ijskappen en het gebruik van grondwater.

Diverse onderzoekers hebben in het verleden getracht deze bijdragen te kwantificeren. Recent heeft Hanna (2013) voor de altimetrische periode vanaf 1992 een schatting gemaakt van de bijdragen van de diverse oorzaken van zeespiegelstijging.¹⁵²

¹⁴⁸ Wahl, T., Jensen, J., Frank, T. et al. Ocean Dynamics (2011), Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years, Ocean Dynamics, vol 61: 701

¹⁴⁹ <http://www.vliz.be/imisdocs/publications/241522.pdf>

¹⁵⁰ Wahl, T., I.D. Haigh, P.L. Woodworth, F. Albrecht, D. Dillingh, J. Jensen, R.J. Nicholls, R. Weisse and G. Wöppelmann (2013). Observed mean sea level changes around the North sea coastline from 1800 to present. Earth-Science Reviews 124, 51-67

¹⁵¹ <http://www.natuurinformatie.nl/ndb.mcp/natuurdatabase.nl/i000331.html>

¹⁵² Hanna, E., F.J. Navarro, F. Pattyn, C.M. Domingues, X. Fettweis, E.R. Ivins, R.J. Nicholls, C. Ritz, B. Smith, S. Tulaczyk, P.L. Whitehouse and H.J. Zwally (2013). Ice-sheet mass balance and climate change. Nature 498, 51-59.

Table 1 | Estimated recent and current contributions to SLR

Source of contributions	SLR (mm yr ⁻¹)	
	1992/93 to 2008/11*	2000/03 to 2009/11*
GIS + AIS ²	0.59 ± 0.20	0.82 ± 0.16
GICs ^{72,74}	1.40 ± 0.16	0.71 ± 0.08
Ocean thermal expansion ^{77,87,88}	1.10 ± 0.43	1.11 ± 0.80
Terrestrial water storage (1993–2008) ^{67,81}	0.02 ± 0.26	
Sum of contributions	3.11 ± 0.56	2.66 ± 0.86
Observed (1993–2008) ⁶⁷	3.22 ± 0.41	

Tabel 5.1: Geschatte recente bijdragen aan zeespiegelstijging. Bron: Hanna et al 2013.

Deze schattingen zijn omgeven door brede onzekerheidsbanden. Dat geldt vooral voor de thermische uitzetting en de bijdrages van Groenland en Antarctica.¹⁵³

Ondanks de grote onzekerheden over de (recente) bijdragen van met name smeltwater en thermische expansie wordt getracht op basis van de geschatte bijdragen en de voorspellingen van toekomstige temperatuurontwikkelingen fysische modellen te ontwikkelen. De Deltacommissie komt uit op een onrealistische maximale zeespiegelstijging in 2100 van 1,3 meter.¹⁵⁴ Katsman et al. komen in 2013 uit op een zeespiegelstijging in 2100 langs de Nederlandse kust van meer dan 1 meter.¹⁵⁵ De KNMI-scenario's voor de zeespiegelstijging langs onze kust zijn ook gebaseerd op dergelijke fysische modellen.

Er is echter een aantal redenen denkbaar waarom fysische modellen voorlopig niet gehanteerd moet worden. Behalve de grote onzekerheid over de bijdragen van de diverse bronnen aan de zeespiegelstijging is er ook onzekerheid over de ontwikkeling van de mondiale temperatuur aan het aardoppervlak. Bovendien wijken regionale zeespiegelveranderingen vaak af van mondiale ontwikkelingen.

Die grote onzekerheid speelt kennelijk geen rol van betekenis in de berichtgeving over zeespiegelstijging. Ondanks die alarmerende berichtgeving is er al meer dan 100 jaar geen versnelling in de zeespiegelstijging zichtbaar aan de Nederlandse kust. Er is dus voldoende reden om (voorlopig) het lineaire regressiemodel van de zes hoofdpeilmeetstations te hanteren voor toekomstige projecties van de zeespiegelveranderingen voor onze kust.

¹⁵³ CBS, PBL, Wageningen UR (2016). Stand zeespiegel langs de Nederlandse kust en mondiaal, 1890-2014 [19] (indicator 0229, versie 09, 17 maart 2016)

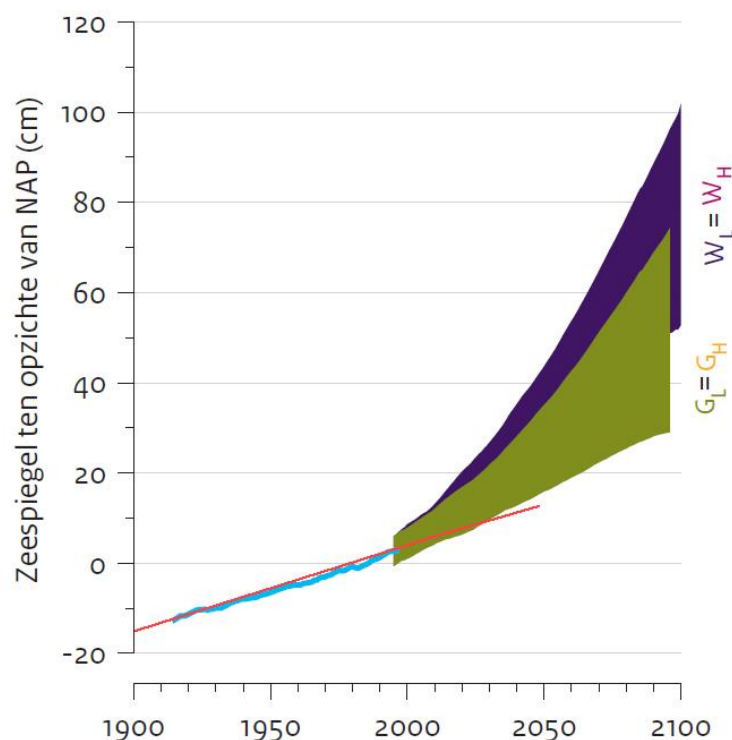
¹⁵⁴ Deltacommissie, 2008. Samen werken met water: een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst; bevindingen van de Deltacommissie 2008.

¹⁵⁵ Katsman, C.A. et al. (2011), Exploring high-end scenarios for local sea level rise to develop flood protection strategies for a low-lying delta - the Netherlands as an example. Climatic Change 109(3-4), 617-645

De Zeespiegelmonitor 2014, door Deltares, KNMI en HKV in opdracht van Rijkswaterstaat gemaakt, hanteert een lineair regressiemodel. Omdat niet alleen de lineaire trend van de zeespiegel van de afgelopen 120 jaar is gebruikt maar ook rekening is gehouden met de wind en nodaal getij heeft men het model nagenoeg perfect kunnen beschrijven. Daarom is het betrouwbaarheidsinterval (95%) zeer nauw. De helling is over de hele periode ongeveer 17 à 18 cm per eeuw.

Over de bruikbaarheid van het model voor voorspellingen van de zeespiegel de komende eeuw stelt de Zeespiegelmonitor: *“We verwachten dat de statistische methode vooral voor de eerste decennia goed werkt, omdat over de laatste eeuw simpele statistische modellen een grote voorspelkracht hebben gehad. Later in de 21e eeuw, wanneer temperatuursveranderingen waarschijnlijk een grote invloed zullen hebben, hebben we meer vertrouwen in het fysische model.”*

Voor wat betreft de ontwikkeling tot het jaar 2050 sluiten we ons aan bij deze zienswijze. Projecteren we het statistische model over de KNMI-scenario's dan komt de te verwachten zeespiegelstijging tot 2050 zelfs onder de ondergrens van het G_L -scenario (figuur 5.14).



Figuur 5.14: Lineaire trend historische zeespiegelstijging afgezet tegen de KNMI-scenario's.

De KNMI-scenario's voor 2050 gaan uit van een zeespiegelstijging van 15 tot maximaal 40 cm en van 25 tot maximaal 80 cm in 2085. Omgerekend komt dat neer op een stijging van 2,7 mm/jaar tot 7,3 mm/jaar tot aan 2050 en van 2,8 mm/jaar tot 8,9 mm/jaar tot aan 2085. Dit soort versnellingen hebben zich de afgelopen eeuw niet voorgedaan. Het KNMI gaat er dus

vanuit dat er een historisch gezien ongekende versnelling van de zeespiegel gaat plaatsvinden langs de Nederlandse kust. We hechten waarde aan het nuchtere principe 'eerst zien dan geloven'. Laat de zeespiegel eerst eens tien jaar lang een stijging zien van 3 mm per jaar bijvoorbeeld.

Voorspellingen voor de periode na 2050 lijken ons zeer prematuur gezien de grote onzekerheden in de fysische modellen.

6. Epiloog en aanbevelingen

Onlangs was er veel tumult over politieke beïnvloeding van wetenschappelijke rapporten van het Wetenschappelijk Onderzoek- en Documentatiecentrum (WODC). Terecht werd de vraag gesteld of er ook andere wetenschappelijke instituten zijn die te dicht tegen de politiek aan schurken.

We hebben geen aanwijzingen dat ministeries de uitkomst van de KNMI-scenario's beïnvloeden, maar bij het KNMI speelt wel iets anders. Klimaatverandering is een sterk gepolariseerd en gepolitiseerd onderwerp. Het onderwerp is wetenschappelijk gezien controversieel en vanwege de grote maatschappelijke belangen die ermee gemoeid zijn ligt vermenging van wetenschap en politiek op de loer. De uitkomst van wetenschappelijk onderzoek heeft direct invloed op het beleid. Bij de KNMI-scenario's is dat ook expliciet het geval: de scenario's worden letterlijk gebruikt als uitgangspunt voor adaptatiemaatregelen zoals dijkbeheer, riviermanagement, riolering, spuisluizen etc.

Scenario's beschrijven ontwikkelingen die zich in de toekomst mogelijk kunnen voordoen. De onwaarschijnlijkheid dat een scenario zich daadwerkelijk zal voordoen, is geen uitsluitingscriterium – ook 'worst case' scenario's kunnen worden geconstrueerd en geanalyseerd. De wetenschapper heeft hier dus een grote keuzevrijheid – hij kiest de scenario's die hij of zij relevant acht. De combinatie van beleidsrelevantie en keuzevrijheid schept een grote verantwoordelijkheid voor diegenen die de scenario's maken. Want aan de uitkomsten hangen substantiële bedragen vast die de maatschappij - lees: de belastingbetaler - moet gaan uitgeven. Geld dat dan niet besteed kan worden aan onderwijs, gezondheidszorg of welk ander doel dan ook.

De vraag is nu of het KNMI in staat is om objectief en feitelijk te berichten over de status quo van het klimaat en wat ons in de nabije toekomst te wachten staat. Op basis van dit rapport en op basis van andere uitingen van het KNMI in de media zien we dat het KNMI moeite heeft met het vinden van de juiste rol. Het instituut heeft steeds vaker (lijkt het) de neiging om op de emoties van het publiek in te spelen om daarmee actief de politiek en het beleid te willen sturen.

Het duidelijkste voorbeeld hiervan was de 'Code Oranje voor het klimaat' die het KNMI afgaf ten tijde van de klimaatconferentie in Parijs in december 2015. Met veel tamtam werd deze Code Oranje voor het klimaat gebracht, als opening van het achtuurjournaal. Een Code Oranje bestaat als onderdeel van het weeralarm. Een Code Oranje voor het klimaat bestaat helemaal niet, er is geen definitie voor. Het ging derhalve om een pseudowetenschappelijke waarschuwing die in feite zuiver 'klimaatactivisme' inhield. Wil het KNMI geloofwaardig blijven, dan zou het zich verre van dit soort acties moeten houden.

Wat dit rapport heeft laten zien is dat andere factoren dan CO₂ invloed gehad hebben op het Nederlandse klimaat in de afgelopen eeuw. Harde bewijzen bestaan niet als het gaat om oorzaken achter regionale klimaatverandering. Dat mes snijdt aan twee kanten en dat geldt dus ook voor de rol van CO₂. Doordat KNMI-onderzoekers er persoonlijk van overtuigd zijn dat CO₂ en andere broeikasgassen op dit moment een dominante invloed op het klimaat

hebben, laten zij, al dan niet doelbewust, andere factoren onderbelicht. Dit verraadt dat er gevaarlijke blikvernuwing (of tunnelvisie) is opgetreden.

Een vergelijking met de zogeheten 'prosecutor fallacy' in forensisch onderzoek dringt zich op. Heel vaak is er geen sluitend bewijs voor handen en zullen rechercheurs met de bewijzen die er zijn tot een plausibel verhaal moeten komen waarna de rechter een oordeel zal moeten uitspreken. De laatste jaren zijn er ook een aantal spraakmakende gerechtelijke dwalingen geweest (bv. de Schiedammer parkmoord of de zaak Lucia de B.) waarbij te snel een verdachte werd aangewezen en achteraf werd geconstateerd dat er sprake was van tunnelvisie. Alleen die feiten die tegen de verdachte pleitten werden in het dossier opgevoerd.

Iets soortgelijks doet zich bij de KNMI-scenario's ook voor. Voor de onderzoekers die aan deze scenario's werkten stond de 'hoofdschuldige' bij voorbaat al vast: CO₂. Andere feiten of argumenten die tegen een grote rol voor CO₂ pleiten krijgen in de brochure en in het wetenschappelijke achtergronddocument geen of nauwelijks aandacht.

Zo'n alternatief 'gegeven' is bijvoorbeeld de sprong van ruim 1°C die de temperatuur in West-Europa maakte eind jaren tachtig. Die sprong is statistisch gezien significant, komt in grote delen van West-Europa voor en is zelfs waarneembaar in de zeewatertemperaturen. Dit laatste is interessant omdat zeewater vooral snel kan opwarmen door meer zonlicht. Daarmee ligt een grote rol voor de overgang van dimming naar brightening voor de hand. Het KNMI erkent dit in wetenschappelijke publicaties en rapporten wel, maar besteedt daar in haar publiekscommunicatie vrijwel geen aandacht aan. Alsof het bang is om anderen tegen het hoofd te stoten door ook alternatieve oorzaken te benoemen.

Een ander voorbeeld dat dit rapport heeft opgeleverd is extreme neerslag. Het KNMI claimt al lang dat extreme neerslag in ons land steeds extremer wordt. Maar een analyse van de KNMI-data in dit rapport kan die claim niet bevestigen. Deze voorbeelden ondersteunen de conclusie dat het KNMI vaak een te eenzijdig beeld schetst van de Nederlandse klimaatverandering (te alarmerend) en de mogelijke oorzaken daarvan (te veel gefocust op alleen CO₂).

Deze voorbeelden ondersteunen de conclusie dat het KNMI op zijn minst een selectief, eenzijdig beeld heeft geschetst van de Nederlandse klimaatverandering en de mogelijke oorzaken daarvan. Dit selectief weglaten van relevante wetenschappelijke bevindingen schept de indruk van activistisch of tenminste resultaatgericht redeneren. Dat zulks onwetenschappelijk is, behoeft geen betoog. Als het KNMI in haar informatie naar buiten bewust (eigen) wetenschappelijke inzichten onbenut houdt, wie is dan nog wél te vertrouwen? Als het KNMI niet meer de hoeder van het onafhankelijk wetenschappelijk klimaatdebat is, wie dan wel? Het KNMI moet meer de wetenschappelijke integriteit in het klimaatdebat veiligstellen.

Die positie van het KNMI als onafhankelijk kennisinstituut is de laatste jaren onder druk komen te staan door bezuinigingen. Dat betekent dat het KNMI net zoals de universiteiten steeds vaker onderzoeksgeld moet vinden buiten het instituut, met projecten en publiek-private samenwerking. Intussen weten we dat van die afhankelijkheid van externe financiering perverse prikkels kunnen uitgaan. Bovendien kreeg ook het KNMI te maken met

de politieke opvatting dat het instituut ‘maatschappelijk relevant’ moet acteren. Daarmee is het KNMI als kennisinstituut in zwaar weer terecht gekomen. Naast de taak van weerinstituut moet de tweede taak van het KNMI, namelijk kennisinstituut, veiliggesteld worden. Dat laatste lijkt helaas bij het ministerie geen prioriteit te hebben. Voortdurende bezuinigingen op het onderzoeksbudget hollen die kennis uit, juist in een periode dat er meer belangstelling is voor weer en klimaat.

Op basis van onze bevindingen komen wij tot de volgende aanbevelingen.

Aanbevelingen voor het KNMI:

- 1) Het taalgebruik in de brochure is te stellig. Een claim als Nederland zal in 2050 tussen de 1 en 2,3°C warmer zijn, is wetenschappelijk gezien niet te onderbouwen en dus schijnwetenschap. De brochure dient duidelijk te maken dat scenario's mogelijke situaties zijn waaraan geen kansen te hangen zijn.
- 2) Besteedt meer aandacht aan attributie. Sluit daarbij geen enkele factor bij voorbaat uit en doe meer onderzoek naar die andere factoren. Wat gaat er bijvoorbeeld gebeuren met de temperatuur in Nederland nu de Atlantic Multidecadal Oscillation de komende decennia vermoedelijk naar de koude fase zal gaan? Hoe groot is eigenlijk het effect geweest van veranderd landgebruik op het Nederlandse klimaat?
- 3) Toon expliciet hoe modellen in het recente verleden al dan niet overeenkomen met de waarnemingen. Probeer aannemelijk te maken waar verschillen door veroorzaakt worden.
- 4) Probeer te opereren als een *honest broker* zoals beschreven in het boek *The Honest Broker* van Roger Pielke Jr. De *honest broker* sluit opties niet uit maar schotelt beleidsmakers een hele rits varianten voor zodat die zelf ook een afweging kan maken. Geef beleidsmakers niet alleen de argumenten die hun beleid ondersteunen, maar ook de argumenten die hun beleid onderuithalen, ook al is dat beleid gesteund op een internationale consensus of internationale afspraken.

Aanbevelingen voor de politiek en beleidsmakers:

- 1) Het KNMI valt onder een ministerie en krijgt daar ook financiering van. Omdat het KNMI deel uitmaakt van een zeer gepolariseerd en beleidsrelevant wetenschappelijk debat over klimaatverandering is het voor de onderzoekers lastig om hun werk met distantie te blijven doen. Daarom is het aan het ministerie om erop toe te zien dat dit zo goed mogelijk gebeurt. Momenteel zijn er in het geval van de KNMI-scenario's te weinig 'checks and balances' aanwezig. De scenario's hebben een monopoliepositie, waardoor kritiek erop (zoals in dit rapport) doorgaans niet gewaardeerd wordt.
- 2) Als opdrachtgever kan de overheid invloed uitoefenen op de onderzoeksrichtingen. De overheid kan het KNMI verzoeken meer onderzoek te doen naar attributie van klimaatverandering en dan met name specifiek ook naar andere natuurlijke en antropogene factoren te kijken dan CO₂.
- 3) De overheid zou op korte termijn in kaart moeten brengen hoe letterlijk de KNMI-scenario's in de praktijk gebruikt worden. Gezien de geuite bedenkingen bij het

RCP8.5-scenario (de basis voor het WH en WL-scenario) zou een maatschappelijke discussie op gang moeten komen of investeringen op basis van dit scenario wel gewenst zijn.

Marcel Crok, Rob de Vos, december 2017

