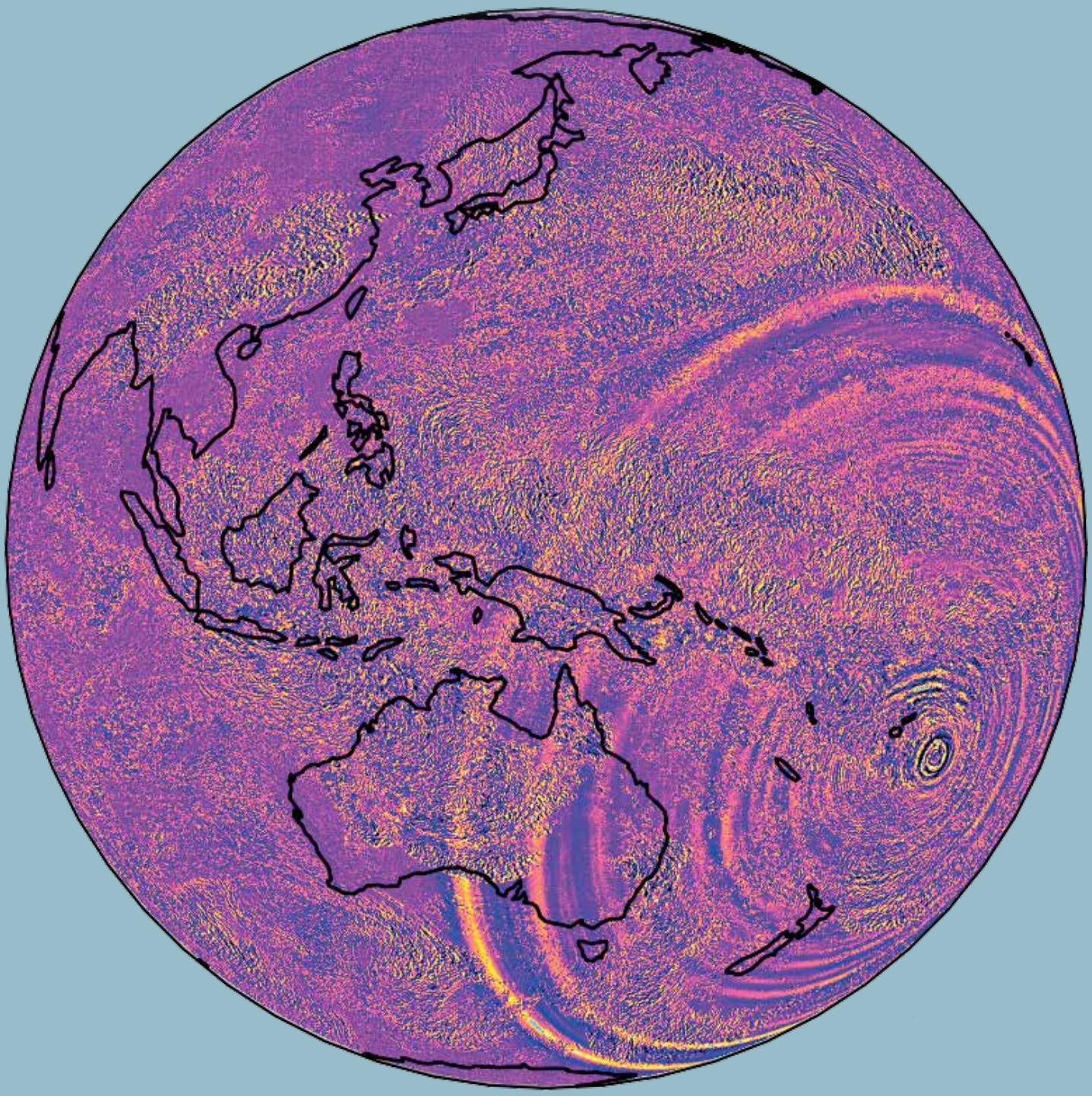
Jaargang 31 - nr. 1 - Maart 2022

METEOROLOGICA



DRUKGOLVEN NA TONGA ERUPTIE

Uitgave van de Nederlandse Vereniging ter Bevordering van de Meteorologie

Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Werken bij het KNMI: the best place to be voor onderzoekers!

Het weer is grillig, de bodem beweegt en het klimaat verandert. Voor onze veiligheid en welvaart moeten we weten welke risico's en kansen dit oplevert.
En: hoe we ons het beste kunnen voorbereiden.
Die kennis heeft het **Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut** (KNMI) in huis als het nationale kennis- en datacentrum voor weer, klimaat, oceanografie en seismologie. Betrouwbaar, onafhankelijk en gericht op wat Nederland nodig heeft. Voor een veilig Nederland dat voorbereid is op de invloed van weer, klimaat en aardbevingen.

Voorbereiden, waarschuwen en adviseren

In ons dichtbevolkte land van water, wind en dijken leven we al eeuwenlang met de elementen. Nu de aarde opwarmt, de zeespiegel stijgt en extreem weer vaker voorkomt, groeit de kans dat het weer ons onaangenaam verrast.
De weerkamer van het KNMI staat 24/7 paraat om Nederlanders te waarschuwen als er gevaarlijk of extreem weer dreigt. Tijdig, gericht en met oog voor de impact van het verwachte weer.

Evalueren, onderzoek en wetenschap

Na elke gebeurtenis maken we de balans op. We plaatsen incidenten in een bredere context. We willen ervan leren en nieuwe kennis opdoen. Zodat we risico's preciezer kunnen bepalen en onze kwaliteit als kennisinstituut kunnen waarborgen. Uniek aan het KNMI is de koppeling tussen operationeel en wetenschap. Praktijkervaringen kunnen meteen wetenschappelijk onderzocht worden. Kennis kan direct ingezet worden ten behoeve van de operationele diensten van het KNMI.

Uniek onderzoek bij het KNMI

In de R&D vakgroepen van het KNMI wordt gewerkt aan verbetering van het waarneemsysteem en van de modellen. Unieke expertise ligt op het gebied van satellietmetingen van de atmosferische samenstelling. Het KNMI heeft de wetenschappelijke leiding over het TROPOMI satelliet-instrument dat in 2017 succesvol is gelanceerd. TROPOMI is de opvolger van OMI, en brengt de mondiale luchtkwaliteit in kaart. Ook wordt gewerkt aan innovatieve metingen met kleine sensoren op de grond. Op het gebied van modellering wordt gewerkt aan het HARMONIE hoge-resolutie model.

Werken bij het KNMI?

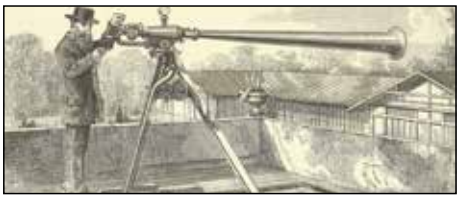
Voor onze R&D vakgroepen zoeken we regelmatig onderzoekers, zowel OIO's als post-doc's, die een bijdrage willen leveren aan ons internationaal hoog gewaardeerde onderzoek.

Kijk voor onze actuele vacatures op
www.werkenvoornederland.nl/knmi.

4

10

24



Van de hoofdredacteur

Meteorologica begint het jaar 2022 met een grote verandering in de opmaak. Het betreft de opmaak van het blad. De redactie heeft naar aanleiding van een enquete onder de NVBM-leden gekozen voor een iets ruimer opgezette paginavulling, met onder andere een bijbehorend rustiger (schreefloos) lettertype en grotere marges rondom de tekst. Wij denken dat deze veranderingen de leesbaarheid ten goede komt en ons verenigingsblad nog toegankelijker maakt.

Een tweede aanpassing (achter de schermen) betreft de samenstelling van de redactie, die per dit nummer is uitgebreid met Lone Mokkenstorm. Lone is operationeel meteorologe bij het KNMI en heeft ook ervaring met journalistiek werk (zie www.thelonewriter.nl). Juist de combinatie van deze twee interessegebieden maakt haar een uitstekende versterking van onze redactie.

Recentelijk werd de wereld opgeschrikt door de uitbarsting van de Hunga vulkaan in Tonga op 15 januari. De explosie veroorzaakte namelijk drukgolven die over de hele aarde raasden met een amplitude van enkele hectopascal. De explosie werd ook in het infrageluid waargenomen, zelfs in Nederland. In het artikel van Jelle Assink en medeauteurs (pagina 20) kunt u lezen hoe dit tot uiting kwam.

Van groot belang voor de maatschappij is hoe klimaatextremen veranderen als de aarde verder opwarmt. Het artikel van Karin van der Wiel en Richard Bintanja (pagina 12) onderzoekt of de veranderingen in temperatuur- en neerslagextremen worden veroorzaakt door een verschuiving van de gemiddelde waarde of door een aanpassing in de variabiliteit. De resultaten laten zien dat temperatuurextremen vooral door de veranderingen in het gemiddelde worden bepaald, maar dat voor neerslag de variabiliteit tevens een belangrijke rol speelt. Ook wordt inzichtelijk gemaakt hoe de ruimtelijke verdeling van veranderingen in extremen eruitziet. Deze resultaten zijn van belang om de processen die bij veranderingen in extreem weer een rol spelen te identificeren en te kwantificeren.

Ik wens u veel leesplezier toe.

Inhoudsopgave

4 Extreme wateroverlast door veel neerslag in Zuid-Limburg van 13 tot 15 juli 2021
Bob Ammerlaan, Stefan Ligtenberg

10 Neêrlandsch oudste halomelding
Kees Floor

12 Toekomstige weerextremen ontleed
Karin van der Wiel, Richard Bintanja

16 Hoe cyclonen en Rossby-golven het Arctisch zee-ijs beïnvloeden
Marte Hofsteenge

20 Drukgolven in Nederland na de eruptie in Tonga op 15 januari 2022
Jelle Assink, Fred Bosveld, Jan Fokke Meirink, Frank Selten

23 Column – Alles is zeldzaam
Huug van den Dool

24 Weermuziek – Mistklanken
Harry Geurts

27 Bert Holtslag ontvangt de eerste Sergej Zilitinkevitch Memorial Award
Bestuur NVBM

28 De Bosatlas van weer en klimaat
Peter Siegmund

30 Column – Geo-engineering
Leo Kroon

31 NVBM Sponsors en Colofon

Advertenties
2 KNMI
9 IMAU – Universiteit Utrecht
15 CaTeC
19 Wittich en Visser
36 Wageningen Universiteit

Voorkant
Visualisatie van drukgolven in de atmosfeer op basis van gegevens van de Himawari-8 satelliet ongeveer vijf uur na de uitbarsting van de Hunga vulkaan in Tonga.

Extreme wateroverlast door veel neerslag in Zuid-Limburg van 13 tot 15 juli 2021

Bob Ammerlaan, Stefan Ligtenberg (Weather Impact BV)

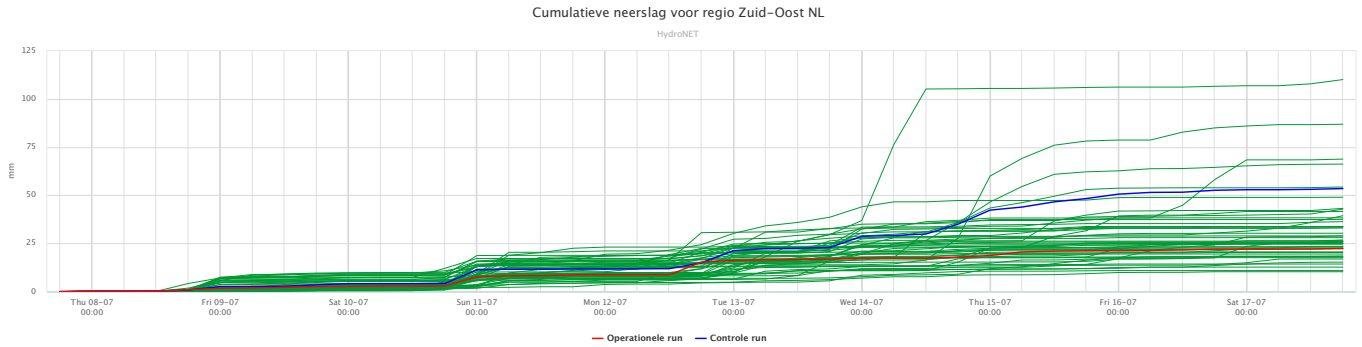
In de week van 12 – 19 juli 2021 zijn Limburg en de omliggende gebieden in België en Duitsland getroffen door extreme overstromingen als gevolg van overvloedige regen. De impact en gevolgen voor de regio en haar inwoners waren – en zijn nog steeds – enorm: uiteindelijk vielen er circa 180 dodelijke slachtoffers in België en Duitsland en trad er enorme materiële schade op, die nog lang niet hersteld is. De overstromingen werden veroorzaakt door zeer langdurige zware regen: in een groot gebied viel in circa 48 uur 150 – 200 mm neerslag. Tijdens deze extreme neerslagsituatie werd het prototype waarschuwingssysteem voor extreme neerslag van het KNMI en Weather Impact getest als onderdeel van een eenjarige pilot. In dit artikel analyseren we eerst de meteorologische verwachting en daarna het gebruik van de applicatie door verschillende gebruikers binnen overheidsorganisaties. Hoe heeft het waarschuwingssysteem gepresteerd? Hadden we deze situatie kunnen zien aankomen en hadden de gevolgen beperkt kunnen worden?

Sinds februari 2019 voert Weather Impact samen met het KNMI en in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (I&W) het project "Verwachting extreme neerslag" uit (zie Kader 1). Binnen dit project is door het KNMI onderzoek gedaan naar het verbeteren van de verwachting voor extreme neerslag, wat geleid heeft tot een pre-operationeel verwachtingssysteem voor (extreme) neerslag, op basis waarvan Weather Impact een prototype waarschuwingssysteem voor extreme neerslag heeft ontwikkeld. In dit prototype worden drie verschillende modellen gebruikt, het Short Term Ensemble Prediction System (STEPS) – een radar nowcast ensemble –, het KNMI Harmonie Model Output Statistics (MOS) en het ECMWF ensemble, die voor drie verschillende tijdsperiodes (respectievelijk tot 2 uur vooruit, tot 48 uur vooruit en tot 10 dagen vooruit) een kansverwachting geven. Het prototype waarschuwingssysteem is gedurende een eenjarige pilot getest bij zo'n 20 pilotdeelnemers. Gedurende de pilot zijn er meerdere situaties opgetreden met extreme neerslag. Dit artikel gaat verder in op de situatie in de week van 12 – 19 juli in Limburg: hoe werd dit weergegeven in het waarschuwingssysteem en hoe zijn de pilotdeelnemers hiermee omgegaan? Voor verslagen over andere situaties in de zomer van 2021, zie www.weatherimpact.nl/nieuws.

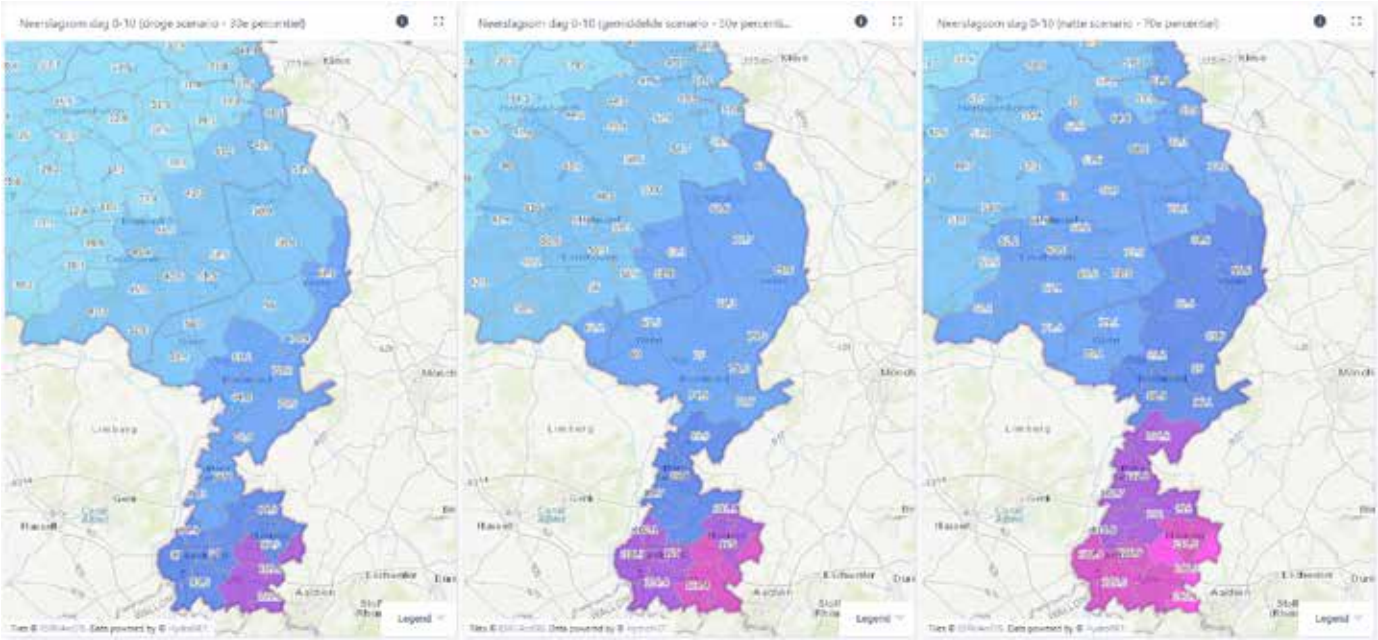
De eerste signalen – een analyse van het ECMWF-ensemble

Het allereerste signaal – uiteraard met een zeer kleine kans – dat er een extreme situatie zou kunnen optreden verscheen al op woensdag 7 juli in de 12Z run van het ECMWF-ensemble. Eén enkel lid uit het ensemble van 51 leden (een kans van 2%) verwachtte een neerslaghoeveelheid van 80 mm in 24 uur tussen dinsdag 13 juli 14:00 uur en woensdag 14 juli 14:00 uur op het prikpunt Maastricht (Figuur 1). De kans op dit extreme scenario bleef enkele dagen 2%. Vanaf zaterdagochtend (modelrun van zaterdag 10 juli 00Z) groeide de kans op deze extreme situatie langzaam. In de pluim voor de regio zuidoost (prikpunt Maastricht) waren er drie ensembleleden die tussen dinsdag en vrijdag een neerslagsom van meer dan 100 mm verwachtten (een kans van 6%). De operationele run berekende een neerslaggebied over het zuiden van Limburg en de omliggende regio's in België en Duitsland, maar liet het eindtotaal op zo'n 65 mm uitkomen. Deze kleine kansen geven voor een eindgebruiker, zoals het waterschap Limburg, nog niet voldoende input om daadwerkelijk tot handelen over te gaan. De kans dat deze situatie uiteindelijk niet optreedt was op dat moment immers nog erg groot.

Een dag later, in de modelrun van zondag 11 juli 00Z, ging ook de operationele run mee in een extreem scenario. Deze berekende een neerslagsom van 150 mm verspreid over drie dagen voor Zuid-Limburg. Dit scenario (meer dan 150 mm in drie dagen), werd door een drietal ensembleleden ondersteund. Het scenario van meer dan 100 mm in drie dagen werd inmiddels opgepikt door zo'n



Figuur 1. Pluimverwachting van het ECMWF model voor de regio Zuidoost (prikpunt Maastricht), zoals berekend door de modelrun van woensdag 7 juli 12UTC. Bron: HydroNET.



Figuur 2. Verwachting van het ECMWF model voor de neerslagsom van dinsdag 13 juli 02:00 uur – donderdag 22 juli 02:00 uur, zoals gegeven op dinsdag 13 juli rond 07:00 uur. NB: de dagen na 15 juli waren nagenoeg droog in de verwachting, dus deze neerslagsom werd verwacht voor 13 – 15 juli. Bron: HydroNET.

20% van de ensembleleden (tegenover 6% een dag eerder). Kansen van deze ordegrootte kunnen een professionele eindgebruiker al tot actie doen brengen, afhankelijk van het risicoprofiel.

In de daaropvolgende runs berekenden steeds meer ensembleleden een flinke hoeveelheid neerslag, die ook in een relatief korte periode zou vallen. De nieuwe modelverwachtingen die op maandag en dinsdag uitgegeven werden, gaven een zeer consistent beeld. Elke modelrun verwachtte tussen 65 en 115 mm aan neerslag voor het zuiden van Limburg. Al deze neerslag zou vallen in de periode van dinsdagochtend tot en met donderdagavond.

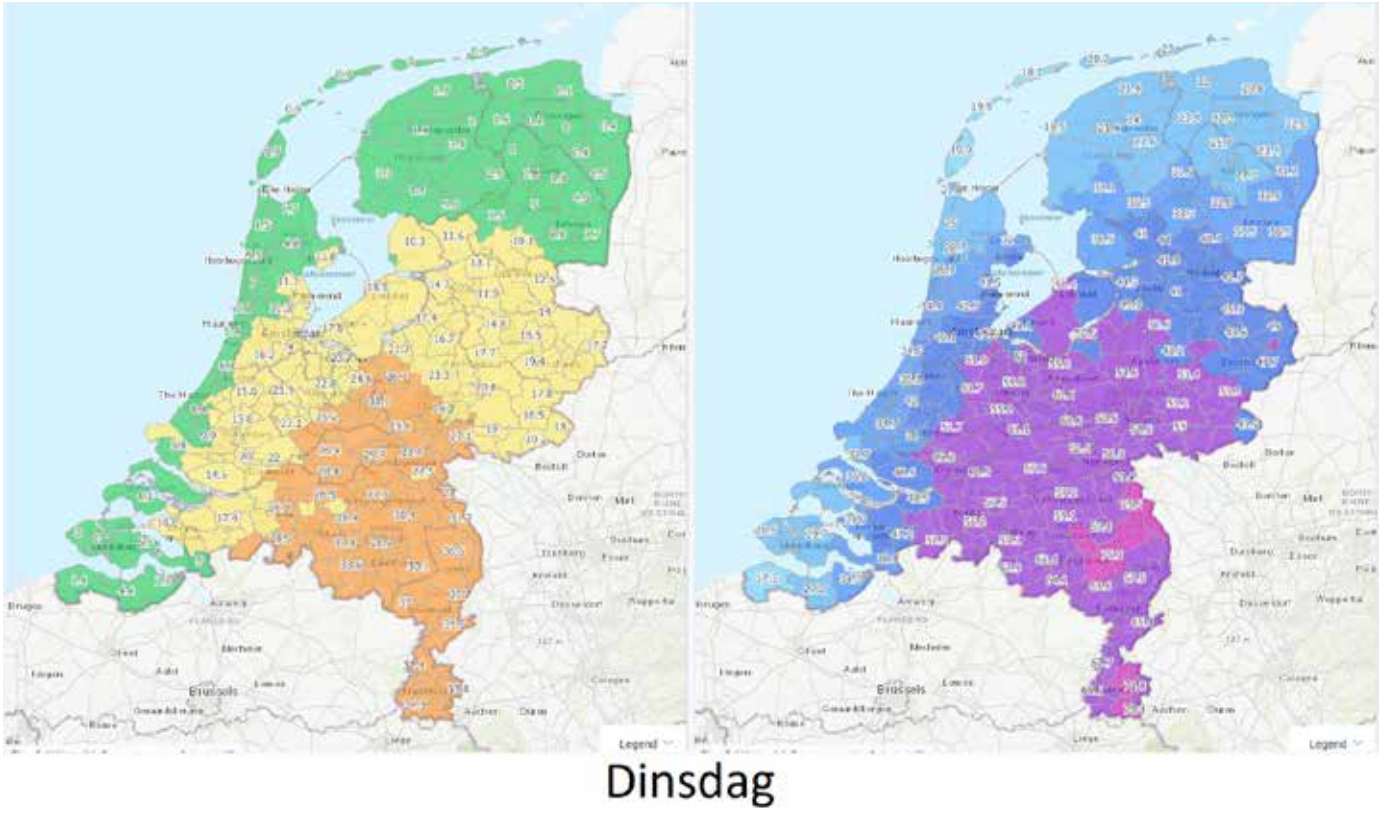
De laatste modelrun van het ECMWF-model die we hier bespreken is die van maandag 12 juli 00Z, welke ongeveer beschikbaar was om 8 uur in de ochtend (lokale tijd). In Figuur 2 staat de ruimtelijke verdeling van de cumulatieve neerslagverwachting voor Limburg weergegeven voor drie verschillende scenario's: een scenario met relatief weinig neerslag (het 30e percentiel uit het ensemble), een mediaan scenario (het 50e percentiel) en een scenario met relatief veel neerslag (het 70e percentiel). Alle scenario's berekenen zeer grote neerslagsommen in met name Zuid-Limburg. Merk op dat deze verwachting geldig is tot tien dagen vooruit, maar dat alle neerslag van deze termijn in drie dagen zou vallen. Nu we zo kort op de daadwerkelijke neerslaggebeurtenis komen, komen we ook in het tijdsbereik van het fijnmazigere model.

De verwachting van KNMI Harmonie MOS

Op deze kortere termijn begint de extreme neerslagsituatie ook in het tijdsbereik te komen van het KNMI Harmonie MOS. Harmonie MOS is een statistische nabewerking van de Harmonie modeluitvoer waarbij gebruik is gemaakt van de machine learning techniek quantile regression forests (QRF). Harmonie MOS is een vervolg op eerder onderzoek van R&D Weer en Klimaatmodellen bij KNMI (Whan and Schmeits, 2018; van Straaten et al., 2018) en binnen dit project door het KNMI ontwikkeld om extreme neerslag beter te kunnen verwachten in Nederland. De output van Harmonie MOS is een 50-leden tellend statistisch

Kader 1 – Project "verwachting extreme neerslag"

Het project "verwachting extreme neerslag" is een onderzoeksproject dat van februari 2019 tot november 2021 is uitgevoerd door het KNMI en Weather Impact in opdracht van het Ministerie van I&W. Het doel van dit project was om een waarschuwingssysteem voor extreme neerslag te ontwikkelen dat met name de convectieve zomerse neerslag beter kan verwachten in 1) tijd en 2) plaats en dat 3) deze verwachtingen beter aansluiten op de wensen van de gebruiker. De eerste twee verbeteringen zijn door het KNMI onderzocht. Voor de zeer korte termijn, tot 2 uur vooruit, is een probabilistische nowcast op basis van het STEPS algoritme (ontwikkeld door het Australische BoM en het UK Met Office) geïmplementeerd. Gezien de langdurige neerslag van deze case wordt deze nowcast hier niet besproken. Voor de termijn tot 48 uur vooruit heeft het KNMI een statistische nabewerking van de Harmonie modeluitvoer (Model Output Statistics – MOS) ontwikkeld, waarbij gebruik is gemaakt van de machine learning techniek quantile regression forests. Daarnaast wordt voor de middellange termijn (tot 10 dagen vooruit) nog gebruik gemaakt van het ECMWF ensemble. Weather Impact heeft met behulp van deze datastromen en bevindingen uit een gebruikersonderzoek een prototype waarschuwingssysteem ontwikkeld in HydroNET, een hydrologisch informatieplatform. Gedurende het pilotjaar dat liep van oktober 2020 tot en met september 2021 is het prototype waarschuwingssysteem succesvol getest. In deze pilot konden de gebruikers, bestaande uit waterschappen, gemeenten, veiligheidsregio's en Rijkswaterstaat, gebruik maken van het prototype waarschuwingssysteem. Dankzij de vele situaties met extreme neerslag deze zomer, konden de pilotdeelnemers het systeem goed testen en bekend raken met probabilistische neerslaginformatie.



Figuur 3. Verwachting van het Harmonie MOS model voor dinsdag 13 juli 02:00 uur – woensdag 14 juli 02:00 uur, zoals gegeven op dinsdag 13 juli rond 07:00 uur. Links is de kans op > 40 mm in 24 uur en rechts is de 'potentiële piekhoeveelheid' (het 90e percentiel uit het ensemble) weergegeven. Bron: HydroNET.

ensemble met daarin uurlijkse neerslagdata tot 48 uur vooruit. Om de data beter te laten aansluiten op een aantal eindgebruikers, aggregeren wij deze uurlijkse data tot dagelijkse sommen, waarop een online dashboard en een alarmeringsmodule geschakeld zitten.

Het eerste signaal in Harmonie MOS werd uitgestuurd op maandagochtend 12 juli om 6 uur. Op dit tijdstip werd er een alert uitgestuurd voor Zuid-Limburg: er was voor dinsdag meer dan 50% kans op meer dan 30 mm in 24 uur. Dinsdagochtend kondigde het KNMI code geel af voor Limburg en werden al er voorbereidingen getroffen voor de verwachte neerslag. Deze code geel is later ook opgeschaald naar code oranje en op woensdag 14 juli naar code rood.

Op dinsdagochtend 13 juli gaf de tweede auteur toevallig een digitale presentatie over dit prototype waarschuwingssysteem aan enkele Nederlandse waterschappen en als toegift had hij een analyse toegevoegd over de verwachtingen van de komende dagen. Figuur 3 en 4 geven respectievelijk de verwachte neerslagsommen voor dinsdag 13 juli en woensdag 14 juli weer (berekend door KNMI Harmonie MOS). Opvallend is dat de verwachtingen voor beide dagen redelijk identiek zijn: grote kans op veel neerslag in Zuidoost-Nederland met de hoogste waarden in (Zuid-) Limburg. Beide dagen was 35 – 40% kans op meer dan 40 mm in 24 uur en dat zijn gezien onze ervaring met de verwachting in eerdere situaties erg hoge waarden. De 'potentiële piekhoeveelheden' (het 90e percentiel van Harmonie MOS voor een tijdsperiode van 24 uur, zie Figuren 3 en 4) van respectievelijk 70 en 80 mm zijn erg hoog, maar niet per se extreem. Zulke pieken op twee opeenvolgende dagen op dezelfde locatie zijn wél extreem.

Al met al was er op dinsdagochtend een duidelijk signaal dat er de komende dagen zeer veel neerslag in (Zuid-) Limburg kon gaan vallen met in potentie uitzonderlijke hoeveelheden. Dat dit in heuvelachtig terrein leidt tot overstromingen is, achteraf gezien, een logisch gegeven, maar op dat moment kon niet iedereen dat voorzien.

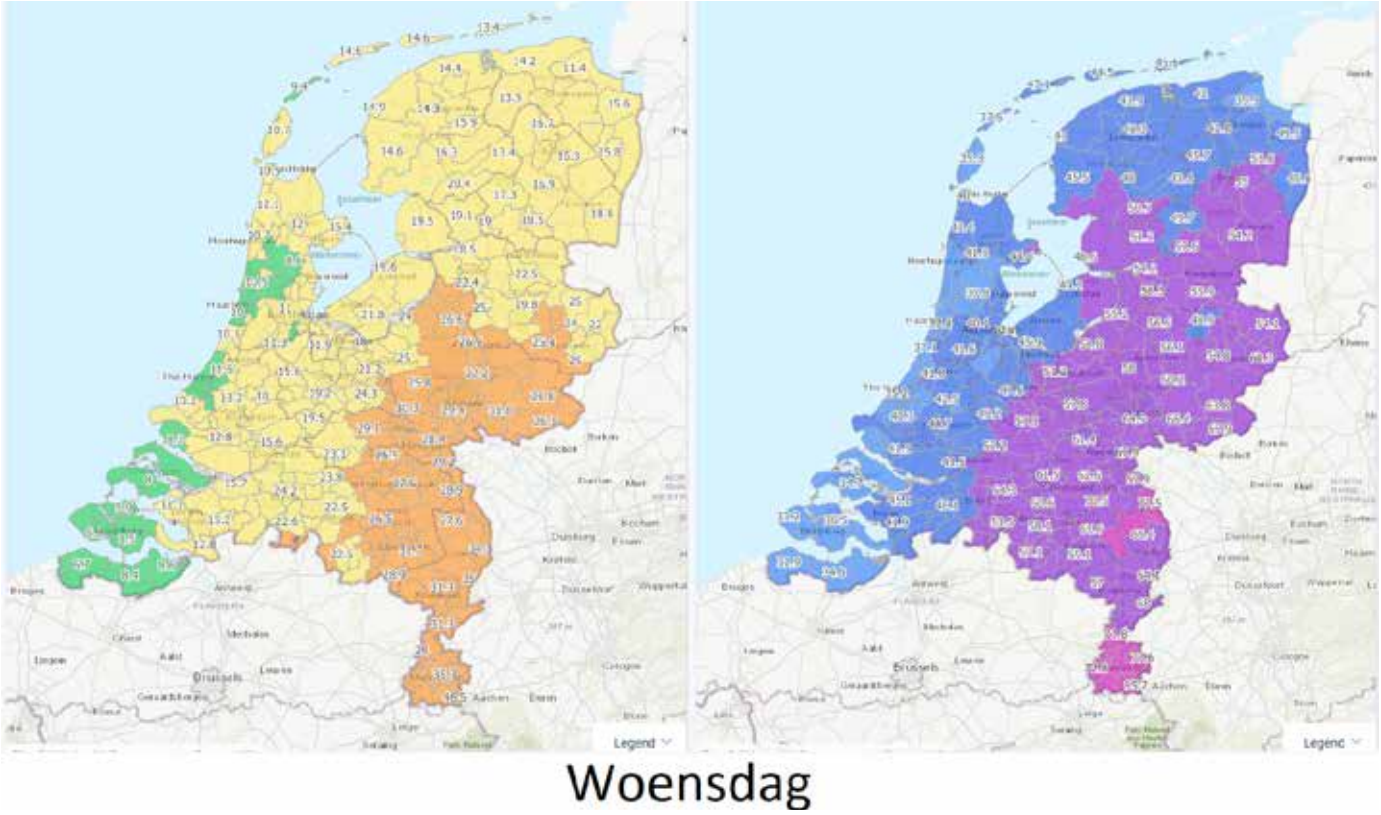
Hoeveel is er uiteindelijk gevallen?

In Figuur 5 is de gevallen neerslag te zien, zoals geobserveerd door de de radar (HydroNet). Het is duidelijk dat veruit de meeste neerslag is gevallen ten zuiden van Roermond, met in het Limburgse heuvelland op grote schaal meer dan 120 mm in 48 uur. Het zwaartepunt qua hoeveelheid neerslag lag in het gebied tussen Heerlen en Gulpen met 160 – 180 mm. De uitgebreide oranje gebieden in België (het gebied rondom Verviers en Spa valt niet binnen het grid) en Duitsland laten ook zien waarom er op zo'n grote schaal wateroverlast en overstromingen zijn geweest.

In Figuur 6 is de verdeling van de neerslag over de dagen te zien voor een locatie nabij Valkenburg. De regenval begon gedurende de namiddag van dinsdag 13 juli en, op enkele droge uren na, heeft het 30 uur lang geregend tot en met woensdagavond 23:00 uur. In dat tijdsbestek is er in de heuvels rondom Valkenburg circa 180 mm gevallen, wat leidde tot het buiten de oevers treden van de Geul en het overstromen van het centrum van Valkenburg op woensdagavond.

Donderdag 15 juli

Donderdag was het in Zuid-Limburg gelukkig zo goed als droog, maar het had niet veel gescheeld of er was nog heel veel neerslag in dit al zwaar getroffen gebied geval-



Figuur 4. Verwachting van het Harmonie MOS model voor woensdag 14 juli 02:00 uur – donderdag 15 juli 02:00 uur, zoals gegeven op dinsdag 13 juli rond 07:00 uur. Links is de kans op > 40 mm in 24 uur en rechts is de 'potentiële piekhoeveelheid' (het 90e percentiel uit het ensemble) weergegeven. Bron: HydroNET.

len. Daags van te voren was de verwachting van KNMI Harmonie MOS dat het na dinsdag en woensdag ook op donderdag hard en veel zou regenen in Limburg. Gedurende de woensdag werd door de KNMI Harmonie MOS de neerslagzone van donderdagmorgen echter steeds iets verder noordwestwaarts opgeschoven. Dit resulteerde uiteindelijk ook in de afschaling van het alert voor Zuid-Limburg op donderdag 15 juli om 6 uur.

Uiteindelijk is er donderdagochtend plaatselijk zeer veel neerslag gevallen, maar deze viel niet meer in Zuid-Limburg. In een relatief smalle strook van de Veluwe over Tiel, Den Bosch en Tilburg is meer dan 50 mm in 12 uur gevallen met het maximum rondom Den Bosch (101 mm). Omdat deze regen continu en gestaag viel (in plaats van tijdens één piekbui) was de overlast beperkt tot enkele ondergelopen tunnels en overstroomde vijvers.

Dit laat zien dat niet alleen neerslaghoeveelheden de kans op wateroverlast bepalen; 50 mm op de ene locatie kan tot ernstige overlast leiden terwijl het op een andere plek geruisloos voorbij gaat als een verregende dag. Op 13 en 14 juli was het in Limburg (en België/Duitsland) vooral de combinatie van de extreme neerslag (> 150 mm in 30 uur), het geaccidenteerde terrein, de relatief verzadigde bodem en de smalle riviergangen nabij steden en dorpen die leidden tot deze extreme en uitzonderlijke overstromingen.

Gebruik van het waarschuwingssysteem voor extreme neerslag

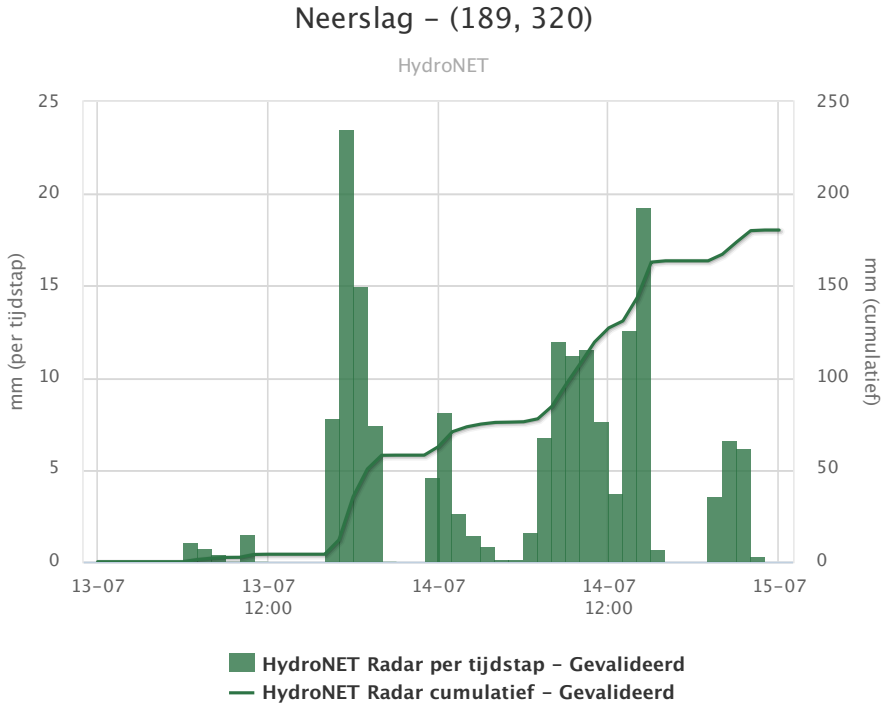
Het doel van Weather Impact binnen het project "verwachting extreme neerslag" was om ervoor te zorgen dat het waarschuwingssysteem zo goed mogelijk aansloot op de wensen van de eindgebruiker (Kader 1). De eindgebruikers binnen deze pilot waren verschillende overheidsorganisaties: gemeenten, veiligheidsregio's, waterschappen en Rijkswaterstaat. De informatiebehoefte verschilt per type organisatie. Tijdens een gebruikersonderzoek, uitgevoerd in 2019, zijn deze behoeftes in kaart gebracht en gedurende de pilot zijn deze aangescherpt.

De specifieke neerslagsituatie van juli in Limburg hebben we vooral besproken en uitgediept met het waterschap Limburg en de veiligheidsregio's Limburg Noord en Zuid-Limburg. Bij het waterschap ontvangt men al grote hoeveelheden data, waaronder meteorologische data, en heeft men de inhoudelijke kennis om hiermee aan de slag te gaan. Medewerkers van het waterschap hebben een duidelijk beeld bij verschillende neerslaghoeveelheden en kunnen dit zelf vaak al vertalen naar mogelijke vervolgacties. Toch is er ook voor de korte termijn behoefte aan informatie over de onzekerheid. Het waarschuwingssysteem binnen dit project kon in deze behoefte bij het waterschap voorzien.

Veiligheidsregio's zijn een heel ander type organi-

Figuur 5. Radar-geobserveerde neerslag van dinsdag 13 juli 00:00 tot donderdag 15 juli 00:00 uur. Bron: HydroNET.

saties. Ten eerste is het werkveld zeer breed, van terrorismebestrijding tot beslissen of de avondvierdaagse doorgaat; en van de aanpak van de coronapandemie tot overlast door extreme neerslag. Daarnaast werken veiligheidsregio's over het algemeen nog erg reactief; pas als er een calamiteit optreedt wordt er gehandeld. Er is momenteel binnen de veiligheidsregio's een ontwikkeling gaande om ook real-time de veiligheidsrisico's te blijven monitoren en al te kunnen handelen voordat een calamiteit optreedt. Deze factoren zorgen ervoor dat de informatie die getoond wordt aan een veiligheidsregio veel eenvoudiger te interpreteren moet zijn dan bij bijvoorbeeld een waterschap. De verschuiving naar het monitoren van risico's van extreme neerslag, en dus het aannemen van een proactievere houding biedt wel een duidelijke ingang bij de veiligheidsregio's om aan de slag te gaan met meteorologische informatie.



Figuur 6. Radar-geobserveerde neerslag voor een gridpunt nabij Valkenburg van dinsdag 13 juli 00:00 tot donderdag 15 juli 00:00 uur. Staafjes geven de uurlijkse neerslag aan (linker y-as), terwijl de lijn de cumulatieve neerslag aangeeft (rechter y-as). Bron: HydroNET.

Om het waarschuwingssysteem uiteindelijk te kunnen evalueren zijn de ervaringen van deze pilotdeelnemers belangrijk. Weather Impact was uitgenodigd voor overleg van de zes zuidelijke veiligheidsregio's om de cases van de afgelopen maanden te bespreken. Tijdens dit overleg werd duidelijk dat een deel van de veiligheidsregiomedewerkers het systeem regelmatig bekijkt en tijdens de extreme neerslag van 13 en 14 juli inderdaad heeft gebruikt voor het implementeren van maatregelen. Het systeem heeft volgens hen goed gewerkt, omdat ze dankzij de "0 – 24 uur vooruit" voorspelling op tijd wisten dat het in Zuid-Limburg voor langere tijd hard zou blijven regenen. Het systeem was vooral nuttig voor het verwachten van piekhoeveelheden en de lengte van de periode dat het zou blijven regenen. Dit is heel positief en laat zien hoe het systeem, naast de in dit project beoogde convectieve situaties, ook nuttig is bij het verwachten van meer stationaire en langdurige zware neerslag.

Toch zijn er een paar punten die de gebruiksvriendelijkheid van het systeem beperken. Ten eerste: het gebrek aan verwachtingen buiten de Nederlandse grens kan een grote invloed hebben in de maatregelen die worden genomen, vooral wanneer het over grensgebieden gaat. De regen in Duitsland en de Ardennen heeft grote invloed op de wateroverlast in Limburg gehad. Als het systeem over een groter gebied piekwaarden had laten zien was de urgentie wellicht nog groter geweest. Een ander aandachtspunt is de complexiteit van verwachtingen en dashboards, waarbij kansen en hoeveelheden door elkaar worden gebruikt. Hierdoor heeft de gemiddelde gebruiker soms meer duiding nodig, vooral als meteorologische expertise ontbreekt.

Ondanks deze aandachtspunten waren gebruikers van de veiligheidsregio's zeer positief over de prestatie van het systeem tijdens de extreme neerslag van 13 en 14 juli en vinden zij dat het nieuwe systeem hen een goed beeld geeft van de te verwachten neerslagextremen en de locaties van deze extremen. Daarnaast zouden zij het systeem in de toekomst graag willen blijven gebruiken en zijn ze van plan om een document te maken met uitgebreide toelichting over het gebruik van het systeem. Zo wordt het systeem breder inzetbaar.

Conclusie

Concluderend kunnen we stellen dat de extreme neerslag van 13 – 14 juli 2021 goed in de verwachtingen zat, zowel ECMWF als KNMI Harmonie MOS had deze situatie goed in de modellen zitten. Enkele dagen van tevoren was duidelijk dat zich een bijzondere meteorologische situatie kon voordoen in Zuidoost-Nederland en omliggende landen. Naarmate dinsdagmiddag dichterbij kwam werden de verwachtingen extremer en vlak van tevoren werd lokaal mogelijk 150 – 160 mm binnen 48 uur verwacht. Zowel de locatie, de hoeveelheid als de duur van de neerslag zaten goed in het systeem. De relevante pilotdeelnemers van het waterschap en de veiligheidsregio's hebben de verwachting nauwlettend gevolgd en gebruikt om beslissingen op te baseren; kortom, een echte praktijktest!

Dankwoord

Met dank aan Josine Camps, Janette Bessembinder en Maurice Schmeits (KNMI) voor de kritische review van dit artikel.

Referenties

van Straaten, C., Whan, K. and Schmeits, M., 2018. Statistical postprocessing and multivariate structuring of high-resolution ensemble precipitation forecasts. Journal of Hydrometeorology, 19(11), pp.1815-1833.

Whan, K. and Schmeits, M., 2018. Comparing area probability forecasts of (extreme) local precipitation using parametric and machine learning statistical postprocessing methods. Monthly Weather Review, 146(11), pp.3651-3673.

Contact: Bob.Ammerlaan@weatherimpact.com

Universiteit Utrecht

Climate Physics

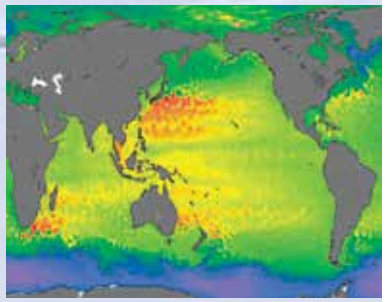
Master's Programme at Utrecht University, The Netherlands

This Master's programme offers a unique combination of theoretical courses and practical training in all aspects of the climate system. Physics, dynamics and chemistry of the atmosphere, the oceans, the glaciers and ice sheets and their interaction are the core of this programme.

Our research fields:

- Ocean Circulation and Climate
- Physical Oceanography of the Coastal Zone
- Atmospheric Dynamics and the Hydrological Cycle
- Atmospheric Physics and Chemistry
- Ice and Climate

More information:
Utrecht University, The Netherlands
Institute for Marine and Atmospheric Research
www.uu.nl/masters/climate



Neêrlandsch oudste halomelding

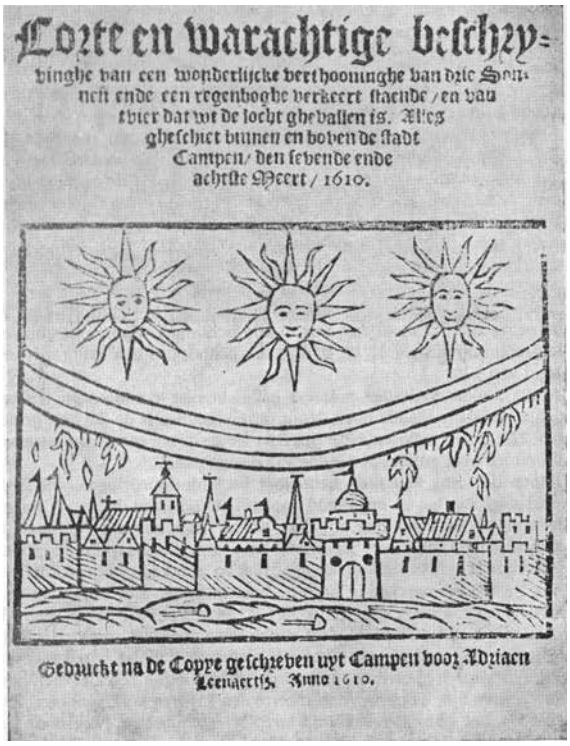
Kees Floor

In maart 1610 werden er in Kampen bijzondere lichtverschijnselen aan de hemel waargenomen. Volgens de beschrijving ervan ging het onder meer om 'drie Sonnen ende een regenboghe verkeert staende'. KNMI-medewerker prof. S.W. Visser, die in 1948 over het verschijnsel publiceerde [1], nam aan dat het de oudste beschrijving van een halo in Nederland betrof. Halo's zijn al dan niet kleurrijke lichteffecten die zich voordoen in sluierbewolking. Ze ontstaan door terugkaatsing en breking van het licht van de zon of de maan door de ijskristallen waaruit die bewolking bestaat.

Goulart

Acht jaar voor Visser zijn vermoeden ventileerde, verscheen echter een artikel met informatie die anders doet vermoeden [2]. De auteur, G.A. Evers, conservator van de Universiteitsbibliotheek van Utrecht, was in een publicatie gedoken van de Franse protestante theoloog, humanist en dichter Simon Goulart van Senlis (1543 – 1628), die later woonde en werkte in Genève. Het eerste deel van zijn Franstalige boek vol met de vreemdste verhalen en gebeurtenissen verscheen in 1600 en werd talrijke malen herdrukt [3]. De Nederlandse vertaling kwam uit in 1614 [4]. Laatstgenoemde uitgave bevindt zich in de bibliotheek van de Universiteit van Leiden. Volgens een bijgevoegde notitie is er op dit moment wereldwijd geen ander exemplaar van dit boek bekend. Boekdrukker Jan Andriesz uit Delft, die de uitgave verzorgde, kreeg van de Staten Generaal in 1614 als blijk van waardering een niet te versmaden bedrag van 100 pond toegekend [5].

In het hoofdstuk Verschyden verschijninghen in de Lucht noemt Goulart onder andere tal van lichtverschijnselen aan de hemel. Een daarvan bestond uit een angstaanjagend, vaalbleek zogeheten andreaskruis. Het zou in 1528 in Utrecht aan de nachtelijke hemel te zien zijn geweest tijdens een beleg van de stad door Bourgondische troepen. Voor de Utrechters was het een veeg teken; Sint Andries was namelijk de beschermheilige van de Bourgondiërs. De belegeraars putten er kracht uit en zagen het als teken van een naderende overwinning.



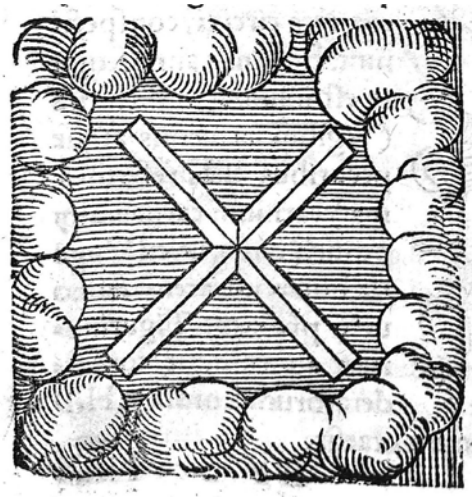
Figuur 1. Halo van Kampen, 1610. Bron: Stadsarchief Kampen.

Minnaert

Een van de bronnen die Goulart uitgebreid had geraadpleegd, was een in 1557 verschenen boek over wonderen, geschreven door de Duitse taalgeleerde en theoloog Conrad Lycosthenes [6] (Figuur 1). Helaas was het boek in geen enkele bibliotheek in Nederland te vinden, zodat Evers het moest doen met Goularts rapportage uit de tweede hand. Zelf was hij overigens niet thuis op het terrein van optische verschijnselen aan de hemel, zodat hij de hulp inriep van prof. M. Minnaert, directeur van de Utrechtse sterrenwacht, van wie in 1937 een boek over het onderwerp was verschenen [7]. Die zag het als een wel vaker voorkomend haloverschijnsel: een combinatie van een zuil en een bijzonnenring (een verticale respectievelijk horizontale heldere band door de zon). Dergelijke lichtkruisen hadden volgens Minnaert in alle tijden een grote indruk gemaakt op de verbeelding van het volk. 'Het enige bezwaar tegen deze verklaring zou zijn dat gesproken wordt van een "andreaskruis", terwijl er strikt genomen had moeten staan een "Grieks kruis". Het ligt echter voor de hand dat niet alle schrijvers deze nomenclatuur zo zorgvuldig gevolgd zullen hebben. Een werkelijk andreaskruis is in de meteorologische optica nooit waargenomen, en het is niet in te zien dat het ooit mogelijk zal zijn,' aldus Minnaert. De conclusie is duidelijk: deze Utrechtse halowaarneming van 1528 is ouder dan die van Kampen uit 1610.

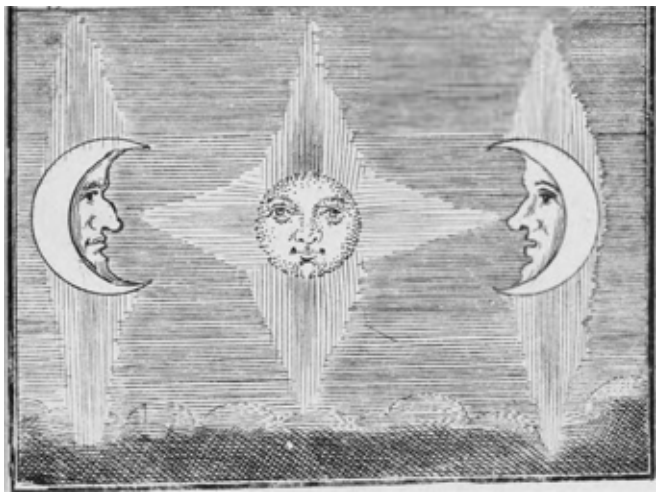
Lycosthenes

Inmiddels is het boek van Lycosthenes via internet te raadplegen. Net als bij de halo van Kampen blijkt de oor-



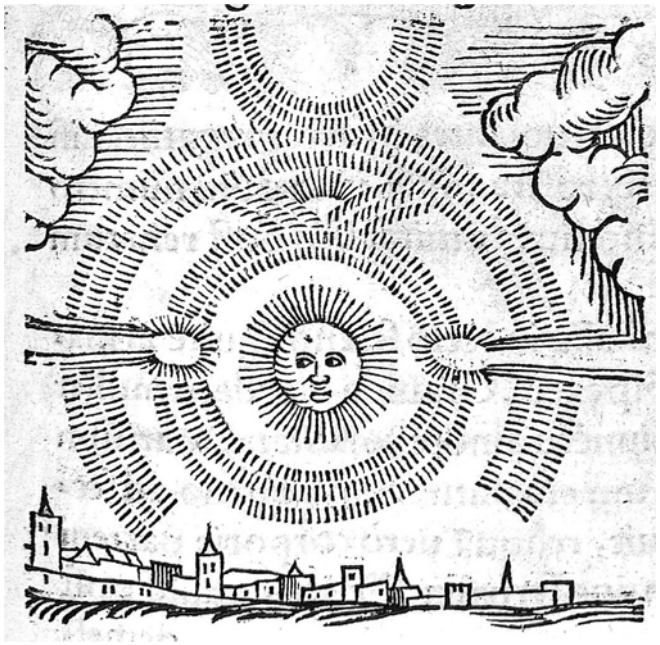
Figuur 2. Andreaskruis boven Utrecht, 1528. Bron: Lycosthenes [6].

spronkelijke vermelding te zijn voorzien van een illustratie (Figuur 2). Die laat zien dat het écht om een andreaskruis gaat. Bovendien is er ook nog eens geen spoor te bekennen van een zon of maan die op het snijpunt van de zuil en de horizontale cirkel (of een deel daarvan) had moeten staan. Een vergelijkbaar kruis werd volgens de opsomming van Lycosthenes in Europa eenmaal in 1478



Figuur 3. Zuil en twee bijmanen bij de maan. Bron: Lycosthenes [6].

Figuur 4. Halo van 4 juni 1596, uit het boek van Gerrit de Veer [8].



Figuur 5. Halo van Antwerpen, 28 februari 1551 (?). Bron: Gallica/BNF.

en tweemaal in 1554 aan de hemel gezien. Steeds liet hij daarbij hetzelfde plaatje afdrukken. In gevallen waarin wél de halovariant kruis werd bedoeld, werden andere illustraties gebruikt, bijvoorbeeld die van Figuur 3. De zogenaamde Utrechtse halo is dus geen halo, laat staan de eerst beschrevene. De positie van 'Kampen' als oudste, gerapporteerde halowaarneming lijkt godzijdank niet in gevaar.

Verder terug

Toch kunnen we met wat goede wil beschrijvingen vinden van 'Nederlandse' halowaarnemingen van voor 1610. Daarbij zijn er twee opties:

1. Halowaarnemingen die door Nederlanders buiten de landsgrenzen of territoriale wateren zijn verricht en beschreven, tellen ook mee.
2. Alle gerapporteerde waarnemingen in de Nederlanden doen mee, dus niet alleen die binnen de destijds nog niet bestaande huidige Nederlandse landsgrenzen.

In het eerste geval is een halo uit 1596 vooralsnog de oudste (Figuur 4). Hij werd waargenomen tijdens de reis om de noord die zou uitmonden in de overwintering op Nova Zembla. Het verschijnsel is beschreven en afgebeeld in het verslag dat Gerrit de Veer van die reis maakte [8]. In het tweede geval kunnen de oudste halomeldingen zelfs teruggaan tot 1551 of 1552. Zo is er een halo die volgens Goulart op 19 februari 1552 in Mechelen te zien was. Nog iets verder terug is er de halo die in Antwerpen werd waargenomen op 28 februari 1551 en die Goulart en Lycosthenes beide beschreven, in het laatste geval met afbeelding (Figuur 5). Het kan geen kwaad deze afbeelding met een zekere reserve te bekijken. Lycosthenes gebruikte hem namelijk ook voor halowaarnemingen buiten ons aandachtsgebied te Paderborn in het jaar 851 en te Venetië in 1532. Daarnaast is er een identieke afbeelding, vervaardigd door Hans Liefrinck, uitgever van prenten, drukker, tekenaar, vervaardiger van houtsnedes, etser en schilder te Antwerpen [9]. Liefrinck vermeldt daarbij als datum 19 februari 1552, precies de dag waarop ook de eerder genoemde halo in Mechelen werd gezien. Voorlopig houden we het er maar op dat de oudste, gerapporteerde halowaarneming in de Nederlanden teruggaat tot 28 februari 1551.

Literatuur

[1] Visser, S.W., 1948: Een halo in het jaar 1610, Hemel en Dampkring 46 (2), 24-25.
[2] Evers, G.A. 1940: Utrechtsche overleveringen XVIII: Het St. Andrieskruis in de lucht, 1528. Maandblad van "Oud Utrecht" 15 (11), 84-87.
[3] Goulart (Senlisien), Simon, 1600: Thrésor d' histoires admirables et mémorables de nostre temps, Jean Houzé, Paris; 1610, Paul Merceau, Paris; 1620 en 1640, Samuel Crespin, Genève.
[4] Goulart (Senlisien), Simon, 1614: Schat-camer der wonderbare ende gedenkweerdige historien onses tijds, uyt velerley autheuren memorien ende advijsen, door Simon Goulart van Senlis t'samen gebracht ende int François uytghegheven: ende nu int Nederduytsch overgheset door Iohannem Lamotium. Het eerste deel, Ian Andriesz, Delft. Herdruk 1664 met titel Cabinet der historien bestaende in veel vreemde, notabele en uytstekende geschiedenissen, Jacob Venckel, Amsterdam.
[5] Laboranter, 1873, Vereeringen voor opdragten en aanbiedingen van boekwerken enz. 1603-1614: De Navorscher 23, 127.
[6] Lycosthenes, Conrad, 1557: Prodigiorum et ostentorum chronicon, Henricum Petri, Basel.
[7] Minnaert, M., 1937: De Natuurkunde van 't vrije veld, deel 1, Thieme, Zutphen.
[8] Veer, Gerrit de, 1598: Waerachtighe beschryvinghe van drie seylagien, ter werelt noyt soo vreemt ghehoort, Cornelis Claesz, Amsterdam.
[9] Hans Liefrinck: Een seer wonderlijck Teeken dwelck ghesien is gheweest inder locht Boven Antwerpen Van seer Velle duversche Personen Int Jaer .M.D.LII. den xix. dach Februarius.

Toekomstige weerextremen ontleed

Karin van der Wiel (KNMI), Richard Bintanja (KNMI, Rijksuniversiteit Groningen)

Extremen in het weer en de bijbehorende risico's voor de samenleving veranderen door klimaatverandering. In dit artikel onderzoeken we of de verandering van het aantal weerextremen simpelweg te verklaren is door veranderingen in het gemiddelde klimaat, of dat veranderingen in klimaatvariabiliteit ook een rol spelen. De verkregen inzichten helpen om toekomstige weerextremen beter te begrijpen, inclusief de bijbehorende onzekerheden, en dragen daarmee bij aan de verbetering van klimaatscenario's en klimaatadaptatie.

Kans op toekomstige extremen kwantificeren

Een direct gevolg van de variabiliteit van het weer zijn weerextremen. Hittegolven, koudegolven, zware regenbuien en droogtes zijn hiervan bekende voorbeelden, en iedereen weet hoe de samenleving en natuur soms gebukt gaan onder zulke gebeurtenissen. Door klimaatverandering nemen de kansen op extreem weer toe, daarom is het van belang dat we toekomstige veranderingen in weerextremen onderzoeken en zo goed mogelijk veranderingen in extremen en de bijbehorende risico's in kaart brengen.

Er wordt veel onderzoek gedaan naar hoe de kans op extremen verandert, maar vaak blijft nog onduidelijk welke fysische mechanismen deze veranderingen veroorzaken. Dit komt doordat het voorkomen van weerextremen afhankelijk is van zowel het gemiddelde klimaat als van de variabiliteit van het klimaat (Figuur 1a). Deze twee fundamentele aspecten van het klimaatsysteem worden beide beïnvloed door klimaatverandering, maar vaak niet op dezelfde manier.

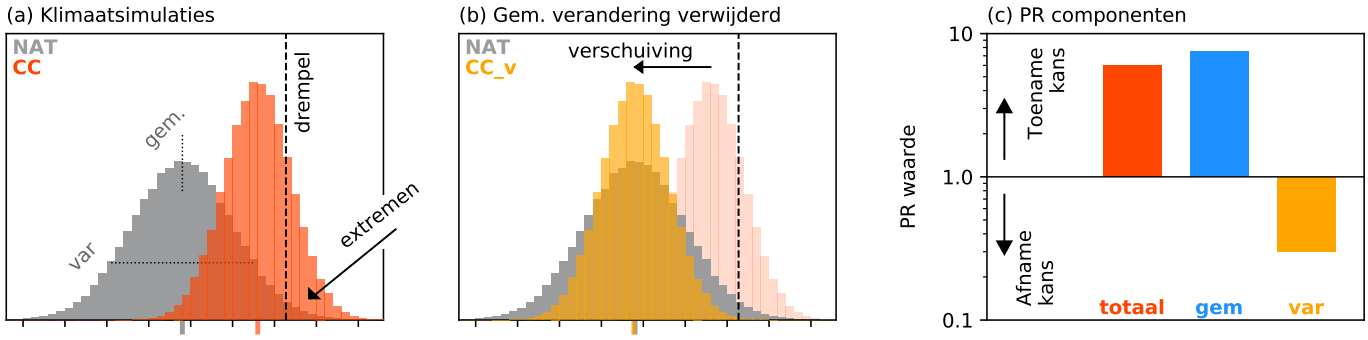
De fysische mechanismes die leiden tot een verandering van het gemiddelde klimaat en de mechanismes die leiden tot een verandering in klimaatvariabiliteit zijn vaak verschillend. Zij kunnen daardoor verschillende, of zelfs een tegengestelde, invloed hebben op het voorkomen van extremen (Figuur 1c). Om het totale effect van klimaatverandering te begrijpen moeten dus zowel de verandering van het gemiddeld klimaat als de verandering van klimaatvariabiliteit in kaart worden gebracht.

In dit onderzoek bepalen we voor meteorologische extremen wereldwijd de individuele bijdragen van veranderingen in het gemiddelde en van veranderingen in variabiliteit aan de totale verandering van de kans op de extremen. We gebruiken hiervoor het concept van de 'Probability Ratio' (PR). PR geeft de verandering van de kans op een extreme gebeurtenis door de menselijke invloed op het klimaat. Wij breiden de definitie van PR uit (Kader 1), zodat de traditionele waarde (hier PR-totaal genoemd) wordt opgesplitst in een 'PR-gem' voor de invloed van de verandering in het gemiddeld klimaat en een 'PR-var' die de invloed van veranderingen in klimaatvariabiliteit beschrijft. We zullen laten zien dat deze opsplitsing sterk afhangt van de klimaatvariabele en de locatie, en dat de uitsplitsing van de totale PR dus waardevolle informatie geeft in de regio-afhankelijke klimaatmechanismen die leiden tot de zo belangrijke veranderingen in weerextremen.

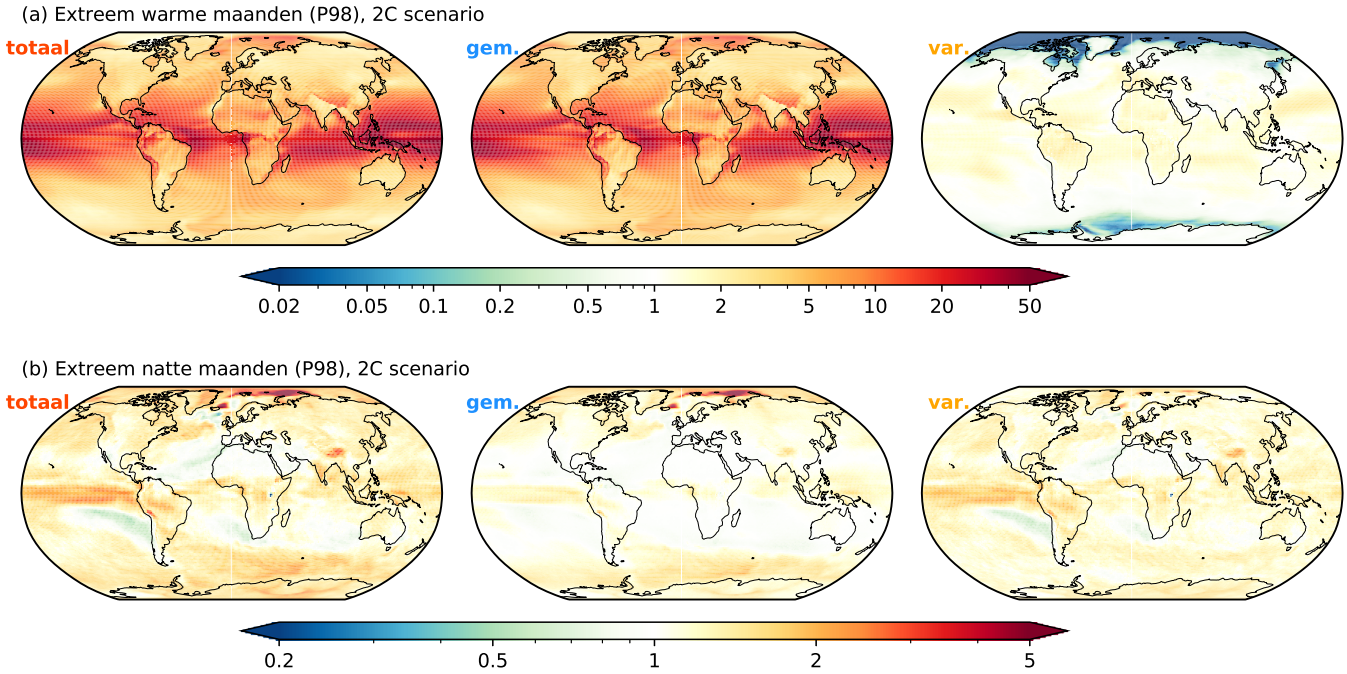
Oorzaken van verandering: gemiddelde of variabiliteit

Op basis van large ensemble klimaatmodeldata hebben we het aantal maandelijkse hitte- en neerslagextremen nu en in de toekomst bekeken. De large ensemble experimenten bestaan uit een set gesimuleerd weer voor het huidige klimaat en een set simulaties voor een klimaat met 2 graden opwarming ten opzichte van pre-industrieel, gemodelleerd met het EC-Earth klimaatmodel (Van der Wiel et al., 2019). Elk van deze twee sets bevat 2000 jaar klimaatgegevens. We richten ons voor deze studie op warme en op natte maanden, elk met een herhalingstijd van ongeveer 1 in 5 jaar in het huidige klimaat (dus het 98^{e} percentiel, P98).

Door klimaatverandering neemt de kans op warme maanden bijna overal toe (Figuur 2a). De grootste toenames vinden we boven de tropische oceanen, met waarden boven de 20 op veel plekken (de kans op het overschrijden van de P98 drempel is 20 keer groter in het 2C scenario vergeleken met het huidig klimaat). Dit wordt veroorzaakt door de relatief smalle temperatuurverdeling, waardoor een kleine verandering van het gemiddelde ervoor zorgt dat een relatief groot deel van die verdeling boven de drempel komt te liggen. Boven land zijn de veranderingen kleiner, maar nog steeds substantieel, met een gemiddelde PR-totaal waarde van 5.5. Ook hier is de verandering van de jaargemiddelde temperatuur dominant (gemiddel-



Figuur 1. Schematische weergave van de opsplitsing van de Probability Ratio (PR) in de individuele bijdragen van veranderingen in het gemiddeld klimaat en veranderingen in klimaatvariabiliteit in de totale verandering van de kans op een weerextreem. Voor details over de methode zie Kader 1.



Figuur 2. (a) Kaarten van de Probability Ratio (PR) voor extreem warme maanden (P98) in een 2C-warmer klimaat (~ Parijs scenario) ten opzichte van het huidig klimaat. Van links naar rechts totale PR, PR door verandering van het gemiddelde klimaat, en PR door verandering van klimaatvariabiliteit. (b) Hetzelfde maar dan voor extreem natte maanden (P98).

de PR-gem = 5.4). Veranderingen in temperatuurvariabiliteit dragen slechts in enkele gebieden een klein beetje bij (gemiddelde PR-var = 1.1).

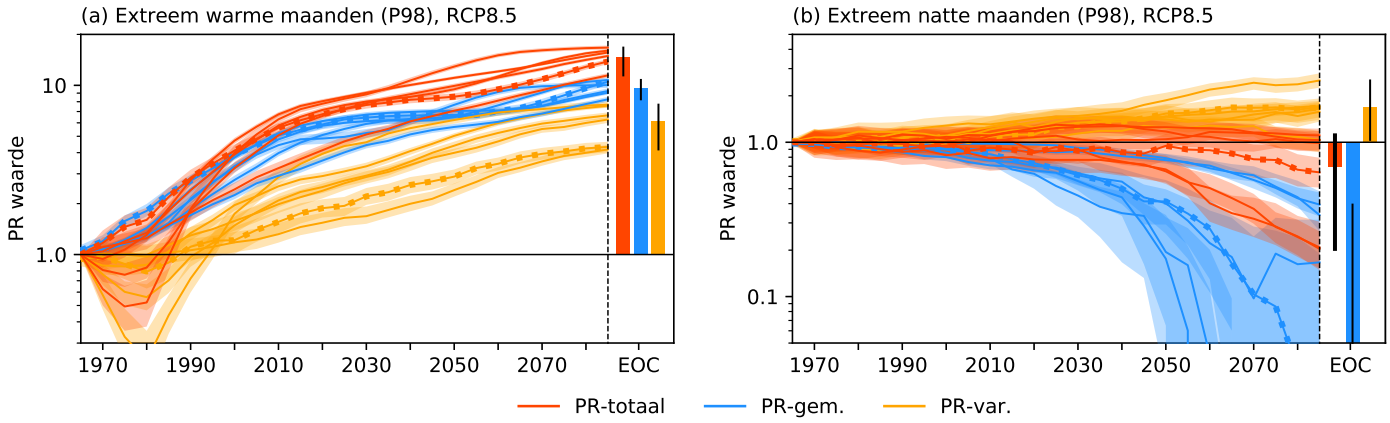
Het optreden van natte maanden neemt toe voor 85% van het aardoppervlak (Figuur 2b), en boven land is de gemiddelde PR-totaal 1.3. In tegenstelling tot de warme maanden dragen veranderingen in variabiliteit hier behoorlijk aan bij (PR-gem = 1.1; PR-var = 1.2). Dit suggereert dat we beide componenten van klimaatverandering mee moeten nemen om de verandering in natte maanden te kunnen begrijpen en kwantificeren.

Uitsplitsing helpt met identificeren regionale klimaatmechanismen

De verschillen tussen de diverse regio's suggereren dat regionale kenmerken de uitsplitsing van PR bepalen; kennelijk zijn de mechanismen die leiden tot verandering van weerextremen regionaal afhankelijk. Wanneer we bijvoorbeeld naar de gebieden rond de Noordpool kijken zien we een behoorlijke toename van warme maanden, ondanks een sterke afname van de temperatuurvariabiliteit veroorzaakt door verminderd zee-ijs (Figuur 2a). Wanneer we naar extreem natte maanden kijken in datzelfde gebied, worden deze slechts in beperkte mate beïnvloed door een toename van neerslagvariabiliteit (Figuur 2b): een interessante tegenstelling, die het belang toont van het onderzoeken van zowel gemiddelde veranderingen als veranderingen in variabiliteit, en het belang toont van het bepalen van de individuele bijdragen.

Met large ensemble simulaties uit verschillende klimaatmodellen kunnen we ook de robuustheid van deze uitsplitsing en de geprojecteerde veranderingen bestuderen, dat wil zeggen hoe (on)zeker de resultaten met betrekking tot de splitsing in PR zijn. Hiervoor gebruiken we ensemble simulaties van zes verschillende klimaatmodellen met oplopende concentraties broeikasgassen (historische concentraties tot 2005, gevolgd door een hoog emissiescenario, RCP8.5, voor de periode 2006 – 2100). Het aantal ensemblemembers varieert per model tussen 16 en 50. Met deze dataset kunnen we verschillen tussen modellen blootleggen, maar ook de PR uitsplitsing op verschillende niveaus van klimaatverandering bekijken.

We richten ons hier op één interessant gebied: het Middellandse Zeegebied (MED). De toename van extreem warme maanden in MED wordt breed gesteund in de verschillende modellen, die vergelijkbare PR-totaal waarden en vergelijkbare bijdrages van veranderingen in gemiddelde en variabiliteit geven (Figuur 3a). Voor extreem natte maanden geven de modellen qua mechanismen ook robuuste projecties (vergelijkbare PR-gem en PR-var waarden, Figuur 3b). Gemiddeld gezien laten de modellen voor MED een droger toekomstig klimaat zien (PR-gem < 1), wat verklaard kan worden door de afname in het aantal depressies in het gebied (de dominante bron van neerslag). Daarnaast is er een toename van de neerslagvariabiliteit (PR-var > 1), gerelateerd aan een toename van de neerslag uit deze depressies. Ondanks robuuste projecties van PR-gem en PR-var, is er geen robuuste schatting te maken van het totale effect van klimaatverandering op de kans op natte maanden (PR-totaal waarde). De balans tussen de twee componenten is onzeker, waardoor er modellen zijn die een toename van natte maanden geven en modellen die een afname voorzien. Deze methodiek laat dus zien voor welke regio's en voor welke klimaatprocessen verbetering van onze kennis en de modellen noodzakelijk is. Voor het MED gebied betekent dit in de praktijk dat verder onderzoek naar toekomstige veranderingen in grootschalige circulatie en 'storminess' zal helpen om de onzekerheid in de veranderingen in extreem natte maanden te verkleinen. In andere gebieden en voor andere variabelen zal de bron van onzekerheid in projecties van extremen in andere klimaatmechanismen zitten.



Figuur 3. Tijdreeksen van de Probability Ratio (PR) voor het IPCC gedefinieerde SREX-gebied Middellandse Zee (MED). (a) Extreem warme maanden, (b) extreem natte maanden, rode lijnen geven PR-totaal, blauwe lijnen PR-gem en gele lijnen PR-var. Arceringen geven het 90% betrouwbaarheidsinterval aan. Het kleine staafdiagram geeft de PR uitsplitsing aan het eind van de eeuw weer, waarbij het zwarte lijntje de model-onzekerheid weergeeft (dit lijntje is dikker afgedrukt wanneer er onzekerheid in het teken van de verandering is).

Voorbeelden hiervan zijn bijvoorbeeld de uitdroging van de bodem tijdens droogtes en hittegolven, of veranderingen in atmosferische convectie in toekomstige neerslagextremen.

Conclusies

In dit onderzoek hebben we het veelgebruikte concept Probability Ratio (PR) uitgebreid met de mogelijkheid om de individuele bijdragen van veranderingen in het gemiddelde klimaat en verandering in klimaatvariabiliteit mee te nemen. Dit hebben we vervolgens toegepast om te onderzoeken in welke mate deze componenten bijdragen aan de wereldwijde geprojecteerde veranderingen in extreem warme en in extreem natte maanden.

We hebben laten zien dat voor extreem warme maanden de gemiddelde opwarming een dominante rol speelt, terwijl veranderingen in de variabiliteit van temperatuur slechts een kleine bijdrage aan de totale verandering leveren. Voor extreem natte maanden ligt dit anders, want hier spelen veranderingen in neerslagvariabiliteit een belangrijke rol naast de verandering in gemiddelde neerslag. De verdeling over de twee bijdragen blijkt vrijwel constant te zijn voor verschillende maten van opwarming van klimaatverandering, voor verschillende herhalingstijden en voor verschillende (onafhankelijke) klimaatmodellen. Deze uitsplitsing lijkt dus een fundamenteel aspect van klimaatverandering te beschrijven waarbij trends in het gemiddelde klimaat afwijken van trends in de variabiliteit en op verschillende manieren bijdragen aan veranderend extreem weer.

Deze resultaten dragen bij aan het onderzoek naar de fysische klimaatmechanismen die leiden tot veranderingen in weerextremen. In het algemeen begrijpen we veranderingen in het gemiddelde van het klimaat beter dan veranderingen in de klimaatvariabiliteit. Met de uitsplitsing kunnen we dus ook aangeven waar en voor welke variabele de geprojecteerde veranderingen in extremen robuust zijn en waar nog niet. Ten slotte laten de resultaten zien dat een beter begrip van klimaatvariabiliteit en de veranderingen daarin van cruciaal belang is voor het maken van robuuste klimaatprojecties.

Referenties

Dit artikel komt voort uit KNMI onderzoek; meer details, verdere analyses (waaronder een vergelijking met andere klimaatmodellen) en referenties kunnen in het gepubliceerde artikel gevonden worden:

Van der Wiel en Bintanja (2021): Contribution of climatic changes in mean and variability to monthly temperature and precipitation extremes. *Communications Earth and Environment*, **2**, pp. 1-11.

Contact: karin.van.der.wiel@knmi.nl

Kader 1 – Uitbreiding van het Probability Ratio (PR) concept

Op basis van twee sets gesimuleerde klimaatdata (natuurlijk klimaat, 'NAT', en klimaat met menselijke invloed, 'CC') wordt de traditionele PR bepaald (Figuur 1a). PR is de verhouding van de kans op het plaatsvinden van een extreme gebeurtenis in de twee klimaten:

$$PR = \frac{P_{CC}}{P_{NAT}}$$

waarbij PR = 1 aangeeft dat er geen verandering in kans is, PR > 1 aangeeft dat de kans is toegenomen, en PR < 1 aangeeft dat de kans is afgenomen.

In dit onderzoek breiden we deze definitie uit, door deze PR, 'PR-totaal', op te splitsen in een bijdrage door veranderingen in het gemiddelde klimaat ('PR-gem') en in een bijdrage door veranderingen in klimaatvariabiliteit ('PR-var'). We nemen hierbij de jaargemiddelde temperatuur/neerslag als gemiddeld klimaat, en groeperen alle variatie daaromheen onder de noemer klimaatvariabiliteit.

Wanneer we de verandering in het gemiddeld klimaat aftrekken van de CC-simulatie, ontstaat een nieuwe dataset met enkel de invloed van veranderingen in klimaatvariabiliteit ('CC_v', Figuur 1b). Met deze dataset kan de waarde van PR-var bepaald worden, waarna PR-gem volgt uit de volgende relatie:

$$PR_{totaal} = PR_{gem} + PR_{var} - 1.$$

De term -1 in deze vergelijking is noodzakelijk omdat de referentiewaarde van PR gelijk aan 1 is. PR-waarden dienen op een logaritmische schaal geïnterpreteerd te worden, omdat PR = 2 en PR = 0.5 een identieke verandering in tegengestelde richting weergeven (Figuur 1c).

CaTeC
MEETINSTRUMENTATIE

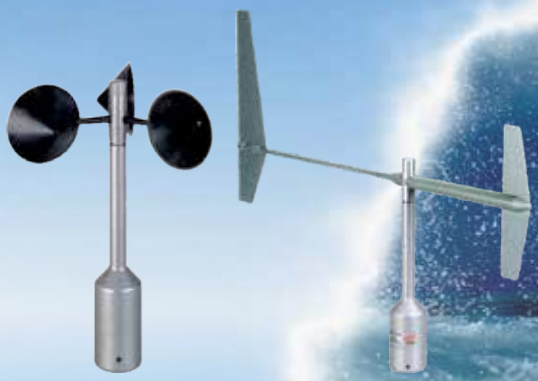
Complete weerstations

Compacte Ultrasone Windmeter 2D WP
Meetbereiken : WS 0... 75m/s - WR 0...360°
Temperatuurbereik : -40 - +70°C
Uitgangen : 0/4...20mA - 0/2...10V
Interface : ASCII, Modbus, RTU, NMEA WV

Compacte Ultrasone Windmeter 2D
Meetbereiken : WS 0... 60m/s
WR 0...360°
Temperatuurbereik : -50 - +70°C
Uitgangen : 4 - 20mA / 0-10V

Ultrasoon compleet GBS Meteo Station - USM serie
meetbereiken : 0... 60 m/s, 0 ... 360°, -30...+70°C, 0...100%RV,
300...1100 hPa, 0...150 kLux, 0...10mm/min neerslag
analoge uitgangen : 0 ... 10V, 2...10V
digitale uitgangen : RS485, RS422, ASCII, ModBus RTU

Low Cost Meteo Station Compact - WSC11
meetbereiken : 0...40 m/s, 1...360°, -30...+60°C,
0...100%RV, 300..1100 hPa, 0...150 kLux
uitgang : RS485
protocol : MODBUS RTU



First Class serie - conventionele windopnemers
meetbereiken : 0,3... 75 m/s, 0 ... 360°,
-30...+70°C, 0...100%RV
uitgangen : 0/4-20mA, 0-2/5/10V, 0-630Hz (ws)
2, 3, 4 bit Gray code (wr), 5 bit Gray code (wr)
voeding : 12 ... 24V (afhankelijk van type uitgang)

Compact serie - robuuste conventionele windmeters
meetbereiken : 0,5 ... 50 m/s / 0 ... 360°
uitgangen : 0/4-20mA, 0-2/5/10V, 0-630Hz (ws)
2, 3, 4 bit Gray code (wr), 5 bit Gray code (wr)
voeding : 12 ... 24V (afhankelijk van type uitgang)

info@catec.nl | www.catec.nl

Hoe cyclonen en Rossbygolven het Arctische zee-ijs beïnvloeden

Marte Hofsteenge (UiT, The Arctic University of Norway)

Het verlies van zee-ijs in de Arctische Oceaan is een van de duidelijkste signalen dat het klimaat verandert. Naast het feit dat er gemiddeld gezien steeds meer zee-ijs verdwijnt, laten satellietbeelden ook zien dat er sterke jaarlijkse schommelingen zijn in de bedekking van Arctisch zee-ijs. Zo was er aan het eind van de zomer van 2012 een extreem kleine hoeveelheid ijsbedekking, die in verband gebracht werd met een storm boven de Noordelijke IJszee. Dit artikel duikt verder in de invloed van stormen en Rossby-golven op zee-ijsvariabiliteit, namelijk door de warmte en het vocht dat ze naar het Noordpoolgebied kunnen brengen.

Veranderingen in het Noordpoolgebied

De Noordpool verandert in hoog tempo. Er blijft steeds minder ijs over aan het eind van de zomer en het ijs wordt dunner en kwetsbaarder. Het Arctisch gebied warmt op met een snelheid die ongeveer twee keer zo groot is als op de gematigde breedtegraden. Deze 'Arctische amplificatie' komt grotendeels door de reflecterende rol die het verdwijnende zee-ijs speelt in de energiebalans van het Arctisch gebied. Graversen et al. (2011) hebben aangetoond dat daarnaast ook veranderingen in het atmosferisch transport bijdragen aan deze versnelde opwarming. Het afzetten van warme en vochtige lucht in het Arctisch gebied kan leiden tot een lokaal versterkt broeikaseffect, waardoor meer langgolvige straling wordt vastgehouden in de atmosfeer (Hegyi and Taylor, 2018; Graversen et al., 2011). Bovendien zorgt extra wolkenvorming in de winter voor minder ijsaangroei. Extremen in dit transport zouden daarom kunnen leiden tot extremen in de zee-ijscondities. Dit artikel beschrijft het onderzoek waarin is gekeken hoe het transport van warme en vochtige lucht door stormen en Rossby-golven het zee-ijs beïnvloedt (Hofsteenge et al., 2022).

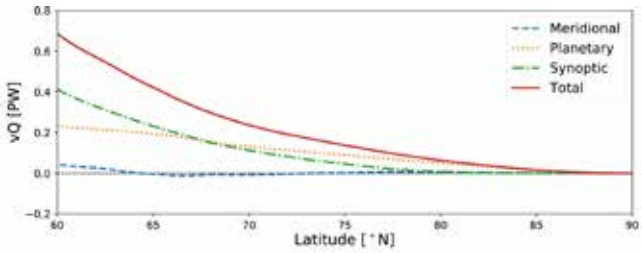
Atmosferisch vocht- en energietransport door golven

Het weer in Nederland en andere landen op de gematigde breedtegraden wordt sterk bepaald door het meanderen van de straalstroom. Deze vormt een scheiding tussen koude poollucht en warme lucht. Wanneer dit temperatuurverschil groot genoeg is, kunnen zich frontale depressies vormen, wat we ook wel barokliene instabiliteit noemen. De lagedrukgebieden die zich door deze instabiliteit vormen, kunnen ons korte tijd nat en winderig weer brengen. De grotere Rossby-golven van de meanderende straalstroom geven juist langere periodes van regenachtig of zonnig weer, bijvoorbeeld wanneer blokkades optreden. De golven meanderen met wisselende amplitude en snelheid en transporteren warme, vochtige lucht naar het noorden en koude, droge lucht naar het zuiden. De amplitude kan zo groot zijn dat het noordelijke deel van de golf grote delen van het Arctisch gebied bereikt en zo warmte en vocht vanuit het zuiden in deze noordelijke gebieden afzet.

Het transport van energie kan berekend worden uit de som van potentiële en kinetische energie, sensibele en latente warmte en het transport van luchtmassa. In deze studie is hiervoor de ERA-5 heranalyse van het ECMWF gebruikt. Het transport is geïntegreerd over alle lengtegraden en over alle hoogtes van het atmosfeermodel, om een totaal transport over de 70°N breedtegraad naar het Arctisch gebied te berekenen. Om de invloed van de onderliggende circulatie op het zee-ijs te bestuderen, is het transport opgedeeld in componenten van verschillende golfgroottes. Dit is gedaan door middel van een Fourier decompositie, waar golfnummer 0 het zonaal gemiddeld meridionaal transport is, golfnummers 1-3 Rossby-golven en golfnummers 4-20 kleinschaligere synoptische golven zijn. Figuur 1 laat zien hoe groot het transport van latente warmte is voor verschillende breedtegraden op het noordelijk halfrond. Het zonaal gemiddeld (meridionaal) transport is klein, en rond 70°N is het transport door Rossby- ('planetaire') en synoptische golven van vergelijkbare grootte.

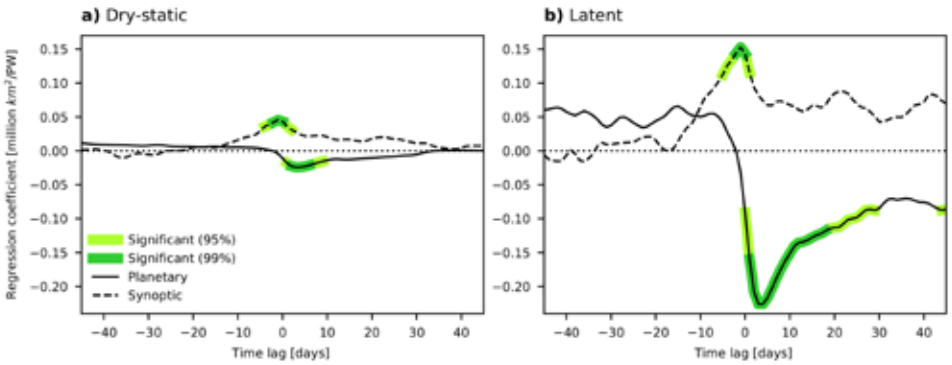
Het effect van energietransport op de zee-ijsvariabiliteit

Het verband tussen variabiliteit in energietransport en zee-ijs is onderzocht door middel van regressieanalyses. De trend en de seizoensgang is eerst uit de dagelijks transport- en zee-ijsdata verwijderd om alleen de variabiliteit over te houden. De regressie is uitgedrukt per 'timelag' om te kijken hoe "merkbaar" het effect van de transportanomalieën op het zee-ijs is. De analyse is opgesplitst in transport van latente warmte en de overige energiecomponenten, die hier 'droge' energie worden genoemd. De energie die door Rossby-golven naar het Arctisch gebied is gebracht, heeft vijf dagen na de transportanomalie het grootste effect op het zee-ijs. Dit is zichtbaar uit de negatieve regressiecoëfficiënt voor t = 5 in Figuur 2. Daarnaast houden de verminderde zee-ijscondities gedurende zo'n 30 dagen aan. Dit is goed verklaarbaar, aangezien de oceaan bij een opening in het zee-ijs meer energie kan opnemen, wat vervolgens het dichtgroeien van ijs belemmert. Dit noemen we ook wel de ijs-albedo terugkoppeling.



Figuur 1. Meridionaal transport van latente warmte per breedtegraad, met behulp van een Fourier decompositie opgesplitst in de zonaal gemiddelde meridionale circulatie (n = 0) in blauw, Rossby-golven (n = 1-3) in oranje en synoptische golven (n = 4-20) in groen. Figuur van Heiskanen et al., 2020.

Transport van latente warmte resulteert in een sterkere en langere afname in zee-ijs in vergelijking met droge energie (Figuur 2). Dit komt doordat het transport van latente warmte ook resulteert in een toename in luchtvochtigheid en wolkenvorming. De wolken zorgen er wel voor dat een kleinere hoeveelheid kortgolvige straling het zee-ijsoppervlak bereikt, maar dit effect is kleiner dan de toename van langgolvige straling die wordt vastgehouden door de atmosfeer. Hierdoor is er netto meer energie beschikbaar aan het oppervlak, wat ervoor zorgt dat het zee-ijs minder snel groeit of juist smelt. De regressies laten zien hoe sterk het effect op het zee-ijs is per 1 petawatt transport. Aangezien de variatie in het droge energietransport groter is dan dat van het latente warmtetransport, is de werkelijke impact van beide transporttypen van vergelijkbare grootte.



Figuur 2. Regressiecoëfficiënt van transportcomponenten (transport van 'droge' en vochtige lucht) door Rossby-golven (planetair) en stormen (synoptisch) per tijds-lag in dagen.

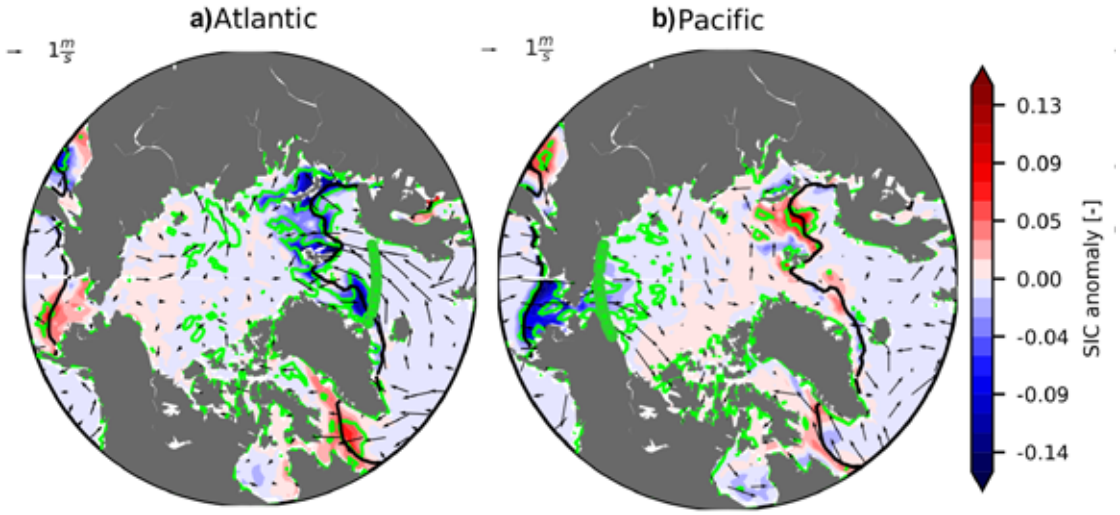
Deze afname in zee-ijs komt niet uit de analyse voor transport door kleinschaligere golven, zoals cyclonen (Figuur 2). Het resultaat oogt tegenovergesteld; er is vaak meer zee-ijs aanwezig tijdens het voorkomen van cyclonen, wat blijkt uit de significante resultaten bij lag = 0. Dit reflecteert de koude Arctische condities waarin de cyclonen vaker vormen, doordat dan het temperatuurverschil met lagere breedtegraden groter is, de atmosfeer instabieler is en cycloonvorming vaker en sterker voorkomt.

Extremen over de Atlantische en Stille Oceaan

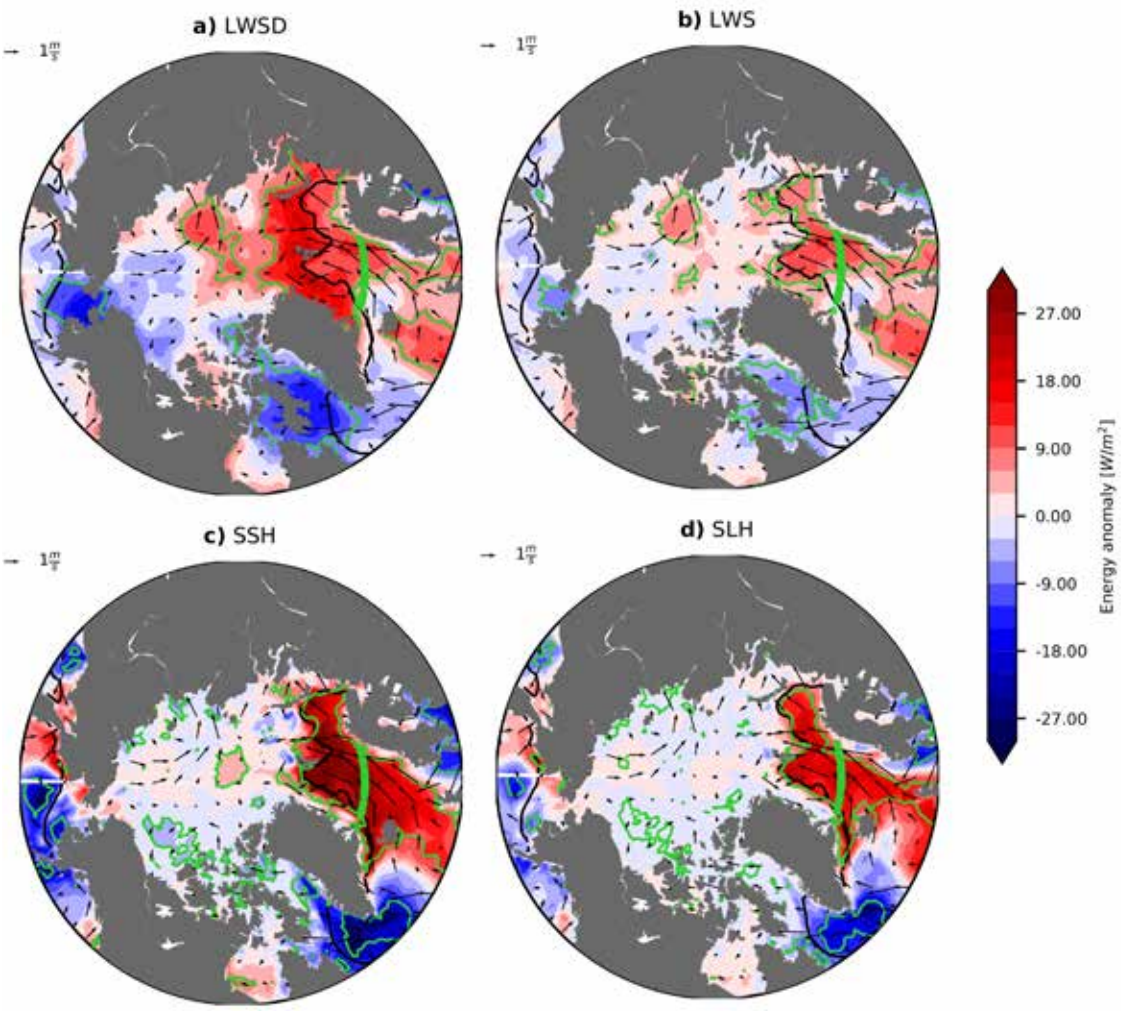
Een 'composite' figuur laat de gemiddelde invloed zien van extremen in het atmosferisch transport op de verschillende Arctische gebieden. De latente warmte getransporteerd door Rossby-golven blijkt de sterkste invloed op het zee-ijs te hebben en is daarom gebruikt in Figuur 3. De extreme transportepisodes zijn op basis van het 97.5^{ste} percentiel geselecteerd. In de winter vinden deze episodes vooral plaats over de relatief warme oceanen. Figuur 3 laat voor de wintermaanden de gemiddelde anomalie in het zee-ijsveld zien 5 dagen na zulke extreme episodes, zowel voor extremen over de Atlantische Oceaan (Figuur 3a) als de Stille Oceaan (Figuur 3b). De decompositie van het energietransport per lengtegraad is berekend door de Fourier decompositie alleen toe te passen op het massatransport. Met dit transport per lengtegraad zijn extremen over de Atlantische en Stille Oceaan geselecteerd.

Bij extreme episodes van poolwaarts transport over de Atlantische oceaan is er minder zee-ijs in de ijszone rond Spitsbergen en in de Barentszzee (Figuur 3a). In deze marginale ijszone is het ijs het dunst en het meest kwetsbaar. Boven de Atlantische Oceaan, waar veel vocht wordt getransporteerd, is een krachtige wind aanwezig die het dunne ijs kan bewegen. De vochtige lucht die vanuit de lagere breedtegraden hierheen is gebracht, zorgt voor extra wolken en een versterkt broeikaseffect. Figuur 4 laat zien hoe de energiebalanscomponenten over de Noordelijke IJszee zijn veranderd na transportepisodes boven de Atlantische Oceaan (als in Figuur 3a). De waterdamp die naar het gebied rond Spitsbergen is gebracht, leidt tot extra inkomende langgolvige straling, wat weer zorgt voor de verminderde ijsgroei in dit gebied (Figuur 4a).

De anomalieën zijn kleiner in het midden van de Noordelijke IJszee, waar het zee-ijs vaak dichter en steviger is en waar daarom meer energie nodig is om het zee-ijsveld te openen. De extra langgolvige straling leidt hier wel tot een warmer en waarschijnlijk dunner zee-ijspakket. Dit kunnen we afleiden uit Figuur 4a en 4b, waarin er meer inkomende langgolvige straling in het midden van de Noordelijke IJszee is, maar waar de netto stralingsanomalie beperkt is door meer uitstraling van het opgewarmde



Figuur 3. Gemiddelde anomalie in zee-ijsconcentratie 5 dagen na extreem latent energietransport door planetaire golven boven de Atlantische (a) en Stille Oceaan (b). De groene contourlijn geeft de significantie van anomalie aan, de stippen de locatie van extreem transport en pijlen de wind anomalie. De zwarte contour laat de gemiddelde zee-ijsgrens zien over de 40-jarige periode.



Figuur 4. Gemiddelde anomalie in inkomende langgolvige straling (LWSD, a), netto langgolvige straling (LWS, b), voelbare warmteflux (SSH, c) en latente warmteflux (SLH, d) 5 dagen na extreme latente energietransportepisodes door planetaire golven boven de Atlantische oceaan. De significante anomalieën zijn aangegeven met groene contouren, de locatie van extreem transport is weergeven in groene stippen en de zwarte pijlen laten de anomalie in het 10-m windveld zien.

ijs. In deze analyse is zee-ijsconcentratie gebruikt, waardoor alleen verschillen in de aanwezigheid van zee-ijs in de oceaan zichtbaar zijn. Verschillen in de ijsdikte zijn niet meegenomen.

Aan de andere kant van de Noordpool leidt dat transport van latente warmte over de Stille Oceaan tot verminderde zee-ijscondities in de Beringstraat. Opvallend is dat voor zowel Atlantisch en Pacifisch transport een lichte toename in het zee-ijsveld zichtbaar is aan de tegenovergestelde kant van de Noordelijke IJszee. In de zomer kan dit voorkomen doordat de wind het ijs over de Noordelijke IJszee verplaatst. In de wintermaanden (Figuur 3) is het ijspakket vaster en minder beweeglijk, en dan komt deze tegenstelling vermoedelijk door de luchtmassa die boven de Noordelijke IJszee droger is geworden, is afgekoeld en voor sterkere ijsgroei zorgt aan de andere kant van de Noordpool.

Conclusies

Deze studie laat zien dat grootschalige golven zoals Rossbygolven een grotere invloed hebben op de bedekking van Arctisch zee-ijs dan synoptische golven. Dit komt overeen met eerdere studies waarin de rol van het atmosferisch energietransport op Arctische temperaturen werd bestudeerd (Graversen en Burtu 2016). Hoewel eerdere studies hebben beschreven hoe de banen van cyclonen juist wel het Arctisch zee-ijs beïnvloeden, is dit niet per se tegenstrijdig met deze studie. Cyclonen komen vaak voor op de grens tussen Arctische en subtropische lucht waar dan ook een Rossby-golf vormt. De cyclonen die beschreven werden in deze onderzoeken kunnen daarom samenvallen met het optreden van Rossby-golven. Cyclonen spelen wel een rol in het transport van vocht naar het Arctisch gebied, maar vaak wanneer de stormbanen onderdeel zijn van de Rossbygolven.

Een tweede conclusie is dat transport van latente warmte meer invloed heeft op het zee-ijs vergeleken met 'droog' transport: bij een anomalie in transport met latente en droge energie met dezelfde hoeveelheid energie, neemt het zee-ijs sterker af na het transport van latente warmte. In werkelijkheid is er meer variabiliteit in droog energietransport en daardoor is de invloed van schommelingen van beide energiecomponenten op het zee-ijs van vergelijkbare grootte. Maar als we kijken naar modelvoorspellingen van energietransport in de toekomst, laten Graversen en Langen (2019) zien dat de algehele trend nog steeds een opwarming is door de sterkere invloed van de latente warmte op het Arctisch klimaat, ondanks dat droog energietransport meer afneemt dan de toename in transport van latente warmte.

Literatuur

Graversen RG, Mauritsen T, Drijfhout S, Tjernstrom M, Martensson S, 2011: Warm winds from the Pacific caused extensive Arctic sea-ice melt in summer 2007. *Climate Dynamics* 36 (11-12): 2103-2112.

Graversen RG, Burtu M, 2016: Arctic amplification enhanced by latent energy transport of atmospheric planetary waves. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 142(698): 2046-2054.

Graversen RG, Langen PL, 2019: On the role of the atmospheric energy transport in 2×3CO2-induced polar amplification in CESM1. *Journal of Climate* 32(13): 3941–3956.

Hegyi BM, Taylor PC, 2018: The unprecedented 2016-2017 Arctic sea ice growth season: The crucial role of atmospheric rivers and longwave fluxes. *Geophysical Research Letters* 45(10):5204-5212

Heiskanen T, Graversen RG, Rydsaa JH , Isachsen PE (2020). Comparing wavelet and Fourier perspectives on the decomposition of meridional energy transport into synoptic and planetary components. *Q J R Meteorol Soc* 146: 2717– 2730.

Hofsteenge MG, Graversen RG, Rydsaa JH, Rey Z (2020). The impact of atmospheric Rossby waves and cyclones on the Arctic sea ice variability. Climate Dynamics.

Contact: marte.hofsteenge@postgrad.otago.ac.nz

WEERSTATION ONLINE

MetStream™

Gill introduceert de MetStream™. De volgende stap in het zichtbaar maken van meetgegevens. Via een browserinterface kunt u actuele – live - meetgegevens weergeven op uw pc, tablet of smartphone (via internet of draadloos) en opslaan op server of pc. Ontwikkeld voor de meteorologische instrumenten van Gill, maar geschikt voor alle sensoren met digitale en analoge uitgangen.

Vanaf het dashboard kunt u individuele instrumenten configureren en weergeven zoals u wilt. Gill sensoren zijn zelfs via de "pick and click" methode het dashboard te synchroniseren.

ingenieursbureau wittich & visser bv

scientific and meteorological instruments

Handelskade 76
2288 BG Rijswijk

Tel. 070 3070706
Fax 070 3070938

www.wittich.nl
info@wittich.nl

Drukgolven in Nederland na de eruptie in Tonga op 15 januari 2022

Jelle Assink (KNMI), Fred Bosveld (KNMI), Jan Fokke Meirink (KNMI), Frank Selten (KNMI), Wouter Mol (WUR)

Op 15 januari 2022 vond een explosieve uitbarsting plaats van de vulkaan Hunga in Tonga. De drukgolven die door de explosie werden opgewekt zijn vastgelegd door diverse sensoren op de aarde en vanuit de ruimte. Over de gehele wereld werden drukgolven met amplitudes van enkele hectopascal gemeten. Dit zijn zogenaamde Lamb-golven die kunnen ontstaan bij grote explosies zoals vulkaanuitbarstingen. Metingen in Nederland laten zien dat de Lamb-golf tenminste drie keer om de aarde heeft gecirkeld. Na de passage van de Lamb-golf werd ook hoogfrequenter infrageluid gemeten, wat uitzonderlijk is voor deze propagatieafstand. Uit onze analyse volgt dat de Lamb-golf gepaard ging met een variatie in de windsnelheid van 0.36 m/s.

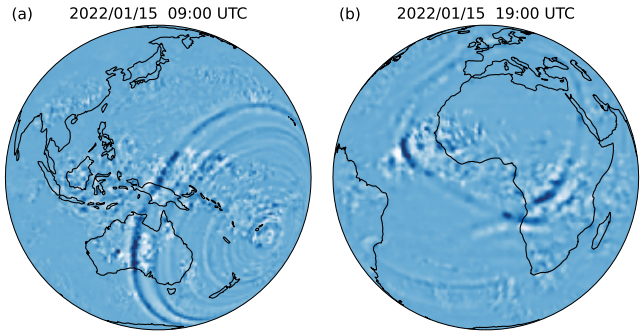
De uitbarsting

Op 15 januari 2022 vond omstreeks 04:15 UTC een krachtige uitbarsting plaats van de vulkaan Hunga, in de eilandengroep Tonga. De explosie markeerde de climax van een uitbarstingsfase die op 20 december 2021 was begonnen, na enkele jaren van rust. De explosie was de grootste sinds de uitbarsting van de Filipijnse vulkaan Pinatubo in 1991. Over de gehele wereld werden drukgolven met amplitudes van enkele hectopascal gemeten. Dit zijn zogenaamde Lamb-golven die kunnen ontstaan bij grote explosies zoals vulkaanuitbarstingen (Press en Harkrider, 1962), meteoorexplosies (Brown et al., 2013) en nucleaire testen (Donn et al., 1963).

Hunga maakt deel uit van de zeer actieve vulkanische boog van de Tonga-Kermadec-eilanden, een subductiezone die zich uitstrekt van het noordoosten van Nieuw-Zeeland tot Fiji. De vulkaan bevindt zich grotendeels onder water, met uitzondering van de twee eilanden Hunga Tonga en Hunga Ha'apai die deel uitmaken van de noordwestelijke rand van de caldera. Sinds de vorige eruptiefase in 2014 – 2015 waren de twee eilanden met elkaar verbonden, maar sinds 15 januari zijn de eilanden weer los van elkaar.

De uitbarsting heeft een ontwrichtend effect gehad op mens en samenleving, zelfs tot op grote afstanden van de vulkaan. De aspluim, die tot ver in de stratosfeer reikte, sloeg deels neer op de omliggende eilanden. Door de waterverplaatsing ten gevolge van de vulkaanuitbarsting ontstonden tsunami's die met name in Tonga, maar ook elders rondom de Stille Oceaan voor schade zorgden. Ook ontstonden (kleinere) meteo-tsunami's in het Caribisch gebied en de Middellandse Zee ten gevolge van de atmosferische drukgolf.

Nog nooit zijn drukgolven van een dergelijke explosie zo uitgebreid vastgelegd op digitale sensornetwerken aan het aardoppervlak en vanuit de ruimte. Metingen laten zien dat de golven tenminste drie keer om de aarde zijn getrokken. De uitbarsting van de Krakatau in 1883 heeft vergelijkbare golven opgewekt die minstens vier keer de aarde over zijn gegaan. Dit artikel gaat verder in op dit fenomeen en beschrijft de observaties in Nederland in het bijzonder.

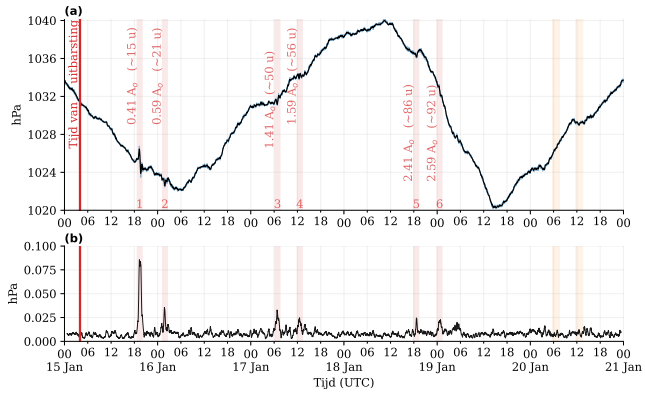


Figuur 1. Visualisatie van golven in de atmosfeer op basis van geostationaire satellietbeelden: (a) opname van Himawari-8 ongeveer vijf uur na de uitbarsting; (b) opname van Meteosat-11 op het moment dat de Lamb-golf voor het eerst Nederland bereikt. De afbeeldingen tonen de tweede afgeleide van de helderheidstemperatuur gemeten in het ozon-absorptiekanaal rond 9.7 μm, dat behalve voor de (lage) troposfeer ook gevoelig is voor de stratosfeer. Verstoringen door de Lamb-golf, in de orde van 0.1 K, zijn naar voren gehaald door toepassing van een low-pass filter.

Meteorologische golven

Een scala aan atmosferische golven kan zich voortplanten door de atmosfeer na opgewekt te zijn door een verstoring, zoals een explosieve vulkaanuitbarsting. Vlak bij de bron worden schokgolven opgewekt, die sneller dan het geluid propageren. Op grotere afstand ontstaan hieruit zwaartegolven en akoestische golven. Het verschil tussen akoestische golven en zwaartegolven is het mechanisme waardoor de verplaatste lucht in de golven weer teruggedreven wordt naar de evenwichtspositie. Voor akoestische golven is dit de drukkracht als gevolg van het samendrukken van de lucht, voor pure zwaartegolven is dit de balans tussen zwaartekracht en drijfvermogen. De voortplantingssnelheid van geluidsgolven in de lucht, bepaald door de temperatuur en de horizontale wind in de voortplantingsrichting, is een orde van grootte hoger dan die van zwaartegolven.

Akoestische-zwaartegolven (AGW) zijn drukgolven die zowel eigenschappen van zwaartegolven als akoestische golven hebben, met een trillingstijd van een uur tot enkele minuten. De Lamb-golf (Lamb, 1911) is een speciale AGW die zich langs het aardoppervlak voortplant, met een snelheid van ongeveer 310 m/s. De Lamb-golf wordt opgewekt door bronnen dicht bij de grond en dempt nauwelijks omdat de verspreiding enkel langs het aardoppervlak gaat en de absorptie te verwaarlozen is. De golf strekt zich in verticale richting uit waarbij de drukamplitude afneemt met de hoogte. Voor frequenties boven de 10 mHz wordt



Figuur 2. Luchtdrukobservaties van meetveld De Veenkampen (Wageningen Universiteit) op 51.981 °N, 5.620 °E met gemarkeerde passages van de drukgolf. (a) toont de luchtdruk op zeeniveau, met daarin per passage de afgelegde afstand en verstreken tijd. De afstand is uitgedrukt in Ao (omtrek Aarde: 40.103 km), en tijd in uur na uitbarsting. (b) toont de absolute luchtdrukafwijking (20 minuten gemiddeld) ten opzichte van de 60 minuten gemiddelde luchtdruk, dit om meteorologische variatie te filteren. Passages 7 en 8 komen bij dit station niet boven de ruis uit, maar de geschatte timing is wel gemarkeerd ter referentie.

de invloed van de zwaartekracht op de voortplanting van AGWs verwaarloosbaar. De onhoorbare geluidsgolven tussen de 10 mHz en 20 Hz worden infrageluid genoemd.

Metingen van de drukgolf vanuit de ruimte

De Lamb-golven van de uitbarsting zijn met geostationaire weersatellieten goed te volgen. De drukvariaties veroorzaken kleine temperatuurvariaties, die zich vertalen in de hoeveelheid infrarood licht die deze satellieten meten. Opnames van de Japanse satelliet Himawari-8 (Figuur 1a) laten zien hoe de drukgolven zich in cirkels uitbreiden vanuit het punt waar de uitbarsting plaatsvindt. Het beeld van Meteosat-11 in Figuur 1b, zo'n 15 uur na de eruptie, toont de golf die op dat moment aan het convergeren is richting het noorden van Afrika. Daar bevindt zich de zogenoemde antipode, het punt dat ten opzichte van Tonga precies aan de andere kant van de aarde ligt. Boven de zuidelijke Atlantische Oceaan en de Indische Oceaan zijn ook andere golven zichtbaar.

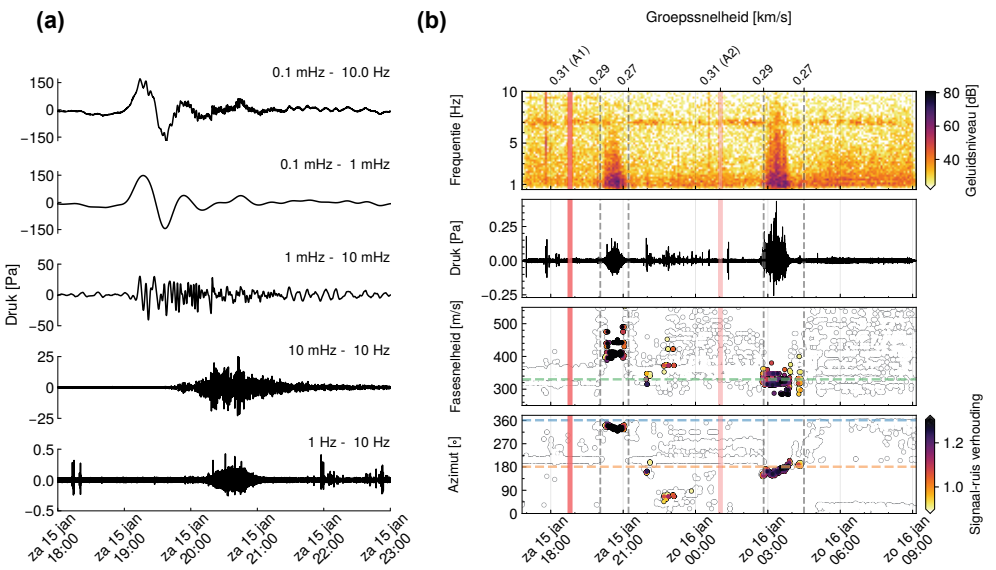
Vanuit de antipode vervolgt de golf zijn weg terug naar de locatie van de vulkaan om vervolgens aan een tweede ronde te beginnen. Op satellietbeelden zijn sporen te vinden van vijf rondgangen. Tijdens elke ronde passeert de golf dus tweemaal ons land, eenmaal op weg naar de antipode, en een tweede maal op de weg terug richting zijn oorsprong in Tonga.

(Micro)barometer observaties Nederland

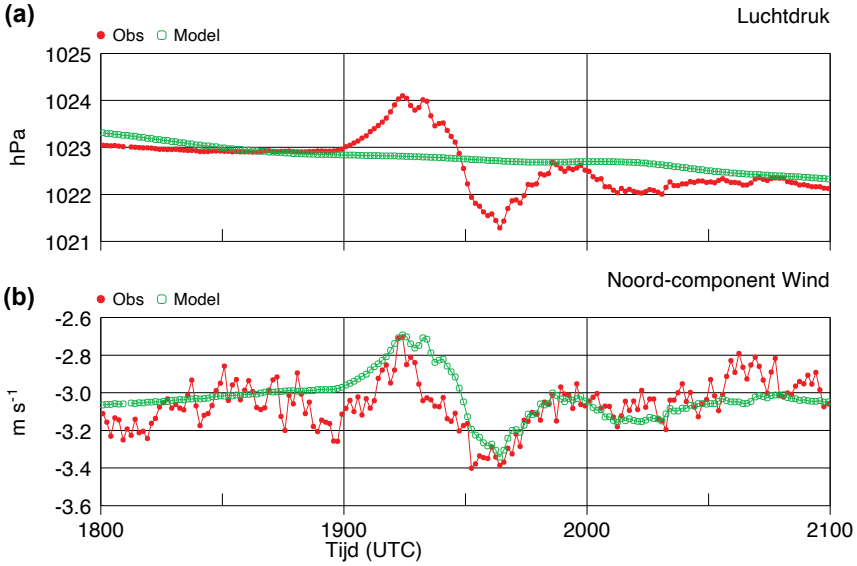
Na 16.400 km afgelegd te hebben via de Noordpool trok de Lamb-golf zaterdag even na 20.00 uur (lokale tijd) vanuit het noorden over Nederland, waar de golf op barometers werd gemeten. Ongeveer zes uur later volgde een zwakkere passage van de golf die via de antipode was gereisd. Deze eerste passages zijn ook goed waargenomen op amateurweerstations, met bijvoorbeeld meldingen vanuit het WOW-NL netwerk van het KNMI.

Figuur 2 geeft de barometerregistraties van alle passages weer op de Veenkampen, het meetveld van de Wageningen Universiteit. De roze balkjes komen overeen met een golfsnelheid van ongeveer 310 m/s. Door het filteren van meteorologische variaties in luchtdruk (Figuur 2b) kunnen zes passages van de Lamb-golf beter zichtbaar worden gemaakt tijdens de eerste drie ronden van de golf. De passages van de vierde ronde worden niet meer waargenomen.

De drukgolf kan verder worden bestudeerd met een microbarometer, een gevoelige barometer waarmee zeer kleine drukverstoringen kunnen worden gemeten (Mentink en Evers, 2011). Figuur 3a laat de gemeten drukgolf zien in verschillende frequentiebanden op een microbarometer op het terrein van het KNMI. De bovenste golfvorm (0.1 mHz – 10 Hz) laat een samengesteld signaal zien dat naast de Lamb-golf ook uit hogere frequenties bestaat. Door het signaal te filteren in verschillende banden wordt een karakteristieke dispersie zichtbaar (Press en Harkrider, 1962). In de 0.1 – 1.0 mHz band is de Lamb-golf het beste zichtbaar als een sinusvormig signaal met een amplitude van ongeveer 1.5 hPa. Hogere frequentieban-



Figuur 3. (a) Microbarometer-registraties in verschillende frequentiebanden waarin de dispersie te zien is van de Lamb-golf en het hoogfrequentere infrageluid. (b) Beamform analyse van infrageluid na de eerste twee Lamb-golf aankomsten (A1, A2). De coherente signalen zijn gekleurd als functie van signaal-ruis verhouding (SNR). Het infrageluid reist met groepssnelheden tussen 270 en 290 m/s (grijze stippellijnen) en is coherent tot 10 Hz. Het gemeten azimut wijkt iets af van de theoretische waarden (blauwe en oranje stippellijnen voor resp. A1 en A2) door horizontale refractie. De variaties in fasesnelheid zijn gerelateerd aan variaties in de temperatuur en horizontale wind met hoogte. De groene stippellijn geeft de geluidssnelheid op de grond aan (~ 333 m/s).



Figuur 4. (a) Landelijk gemiddelde en gesynchroniseerde luchtdruk (23 stations). (b) Noordcomponent van de windsnelheid, gemiddeld over 37 stations. De referentiedruk zonder Tonga-event is bepaald met het atmosferisch model RACMO. Op basis van het luchtdrukverschil is de verwachte windsnelheidsvariatie berekend zoals weergegeven in (b). Deze schatting is -3 m/s verschoven om te kunnen vergelijken met de geobserveerde wind. De wind boven Nederland was zuidelijk wat resulteert in een gemiddelde noordcomponent die negatief is.

den bevatten coherente golfvormen met lagere amplitudes en latere aankomsttijden, relatief tot de Lamb-golf.

Omdat er meerdere microbarometers op de grond staan opgesteld, kan met een beamform analyse (Evers, 2008) de horizontale invalshoek (azimut) en horizontale fasesnelheid van het infrageluid worden bepaald (Figuur 3b). De horizontale fasesnelheid is een maat voor de verticale invalshoek. Na de eerste twee Lamb-golfaankomsten (A1, A2) wordt infrageluid gemeten met een groepssnelheid tussen 270 en 290 m/s. De groepssnelheid geeft de snelheid van het gehele golfpakket aan. Voor het infrageluid is de groepssnelheid lager dan de geluidssnelheid omdat het infrageluid verticaal voortbeweegt tussen de grond en de stratopauze en daarom een langer pad heeft. Het gemeten azimut wijkt iets af van de grootcirkel voor de aankomst die over de noordpool aankomt (A1). Dit is te verklaren doordat het infrageluid horizontaal afbuigt door de sterke polaire vortex in de stratosfeer (Smets et al., 2016). De variaties in fasesnelheid zijn gerelateerd aan de verticale invalshoek en worden bepaald door temperatuur- en windvariaties in de voortplantingsrichting (Assink et al., 2019). De relatief hoogfrequente signalen zijn verrassend voor deze enorme propagatie-afstanden.

Verandering in de wind

We verwachten dat de Lamb-golf ook een effect op het windveld heeft. Uit de Navier-Stokes-vergelijking leiden we af dat de het geïnduceerde windveld parallel staat aan de voortplantingsrichting van het geluid, en dat de windsnelheid op ieder moment evenredig is met de drukverstoring, waarbij de evenredigheidsconstante 0.24 m/s per hPa bedraagt. De Lamb-golf komt uit het noorden en start met een toename van de druk. De geassocieerde wind zal dus in eerste instantie vanuit het noorden komen. We verwachten een windamplitude van ongeveer 0.36 m/s, gezien de gemeten drukgolf in Nederland.

Het blijkt dat natuurlijke lokale variaties in de wind te groot zijn om op basis van één meetstation het gezochte effect te vinden. Daarom kijken we naar windmetingen op meerdere locaties. Het idee is dat door middeling van de lokale variaties in de tijd het kleine gezochte signaal boven de resterende ruis uitkomt. In het landelijk meetnet van het KNMI wordt op 23 locaties de luchtdruk en op 37 locaties de 10-m-wind gemeten.

Op basis van 1-minuutwaarnemingen kunnen we de windmetingen synchroniseren op het tijdstip van binnenkomst van de drukgolf, die in 15 minuten tijd van noord naar zuid over Nederland loopt. Figuur 4 laat de gesynchroniseerde luchtdruk en noordcomponent van de wind zien, gemiddeld over respectievelijk 23 en 37 stations. Ondanks de sterke middeling blijven er allerlei variaties zichtbaar in de wind, maar er is een duidelijke respons te zien die synchroon verloopt met de drukvariatie geïnduceerd door de Tonga-eruptie.

Om de te verwachten windvariatie te kunnen schatten, moeten we bepalen welk deel van de waargenomen drukvariatie hoort bij de Lamb-golf. Daarvoor gebruiken we het drukveld zoals dat door het atmosferische model RACMO is berekend. We zien in Figuur 4a dat deze modelrun afgezien van de Lamb-golf behoorlijk dicht bij de waarnemingen ligt. Met behulp van de evenredigheidsfactor van 0.24 m/s per hPa kan nu het verwachte windsignaal berekend worden. Hoewel er afgezien van de passage van de Lamb-golf afwijkingen tot 0.2 m/s te zien zijn, lijkt er toch een door de golf geïnduceerde windvariatie zichtbaar met de juiste timing, het juiste teken en de verwachte amplitude.

Dankwoord

Met dank aan Wiel Wauben (KNMI) voor het beschikbaar maken van de 1-minuutgegevens van het landelijk meetnet, Erik van Meijgaard (KNMI) voor de RACMO-drukgegevens en Sander Tijm (KNMI) voor HIRLAM-drukgegevens.

Referenties

Assink J. et al. (2019) Advances in Infrasonic Remote Sensing Methods. In: Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A. (eds) Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75140-5_18.

Brown, P. G., and Coauthors, 2013: A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. Nature, 503 (7475), 238–241, doi:10.1038/nature12741.

Donn, W. L., R. L. Pfeffer, and M. Ewing, 1963: Propagation of air waves from nuclear explosions. Science, 139 (3552), 307–317, doi: 10.1126/science.139.3552.307.

Evers, L., 2008: The inaudible symphony: On the detection and source identification of atmospheric infrasound. 160 pp.

Lamb, H., 1911: On atmospheric oscillations. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character, 84 (574), 551–572, doi:10.1098/rspa.1911.0008, https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1911.0008.

Mentink, J. H., and L. G. Evers, 2011: Frequency response and design parameters for differential microbarometers. The Journal of the Acoustical Society of America, 130 (1), 33–41, doi:10.1121/1.3596718.

Press, F., and D. Harkrider, 1962: Propagation of acoustic-gravity waves in the atmosphere. Journal of Geophysical Research, 67 (10), 3889–3908.

Smets, P. S., J. D. Assink, A. le Pichon, and L. G. Evers, 2016: ECMWF SSW forecast evaluation using infrasound. Journal of Geophysical Research, 121 (9), 4637–4650, doi:10.1002/2015JD024251.

Contact: jelle.assink@knmi.nl

Alles is zeldzaam

Huug van den Dool

In 2006 werd ik ernstig ziek. Door uitsluiting van een groot aantal ziektes waar men mij wekenlang voor testte, waaronder de gekkekoeienziekte, besloten de doktoren dat het niet anders kon zijn dan een zeldzame auto-immuun ziekte. Zeldzaam? Wat een domme pech. Ik zocht wat rond op het internet en vond dat er bijna 100 bevestigde en 1000 vermoedde auto-immuun ziektes bestaan die grotendeels zeldzaam zijn. De kans dat je je hele leven zonder een van deze vele zeldzame ziektes doorkomt is helaas klein. Dit was mijn beurt (ik was overigens na enkele maanden ongeveer 90% hersteld).

In februari 2022 arriveerde een 'rogue wave' bij Vancouver Island. Een oceaangeleerde had blijkbaar een PDF (Probability Density Function) bij de hand, want hij vertelde de pers dat zoiets eens in de 1300 jaar gebeurt. Je moet maar geluk hebben als wetenschapper, of pech als hedonist als je onbekommerd in je bootje dobbert. Dit klinkt inderdaad zeldzaam, want tot 1995 was er geen enkele directe waarneming van rogue waves, alleen mythologie, dat wil zeggen, verhalen uit de monden van overlevende scheepslieden op de grote vaart.

Regelmatig is er extreem weer, ergens. De media zijn er als de kippen bij om mensen te interviewen die nog verdwaasd zijn van hun weggeblazen huis, dat zij nog leven terwijl de buren worden vermist. Vaak zegt zo iemand: "Ik heb hier m'n hele leven gewoond, maar zoiets heb ik nog nooit meegemaakt." Dat is dus zeldzaam. Maar vanwege de zeker voor neerslag beperkte ruimtelijke decorrelatieschaal zijn er op aarde elke dag een flink aantal extremen die mensen doen verzuchten dat ze dit nog nooit hebben meegemaakt. Het is een klein stapje naar de vragen "waarom", "hoe kan dit" en tegenwoordig valt dan al gauw de term klimaatverandering als antwoord. Met name extremen eisen een verklaring in de psychologie van de mens. Hoor ik iemand 'attributie' roepen? Vroeger de straffende hand van God, de constellatie der planeten, luchtvervuiling, supersonisch vliegen, atoomkernproeven, het ongewone pad van een diepe depressie, een zeer grote waarde van de NAO-index, noem maar op.

Men kan dit probleem uiteraard beperkt-wetenschappelijk benaderen en bijvoorbeeld met een voldoende lange dataset een uitspraak doen over hoe zelden op die locatie een bepaalde vernielende windsnelheid wordt overschreden. Dat zal niet vaak zijn. Men kan zich de enigszins hypothetische vraag stellen wat er gebeurt als IK, geobsedeerd door het verlangen een tornado te mogen meemaken, vanaf mijn geboorte 74 jaar lang in een stacaravan in Tornado Alley woonde. De kans dat ik een tornado meemaak is vreselijk klein, zelfs dan. Je moet met tornado-chasers meerijden om de kans te verhogen, maar zelfs dan is er geen garantie. De kans neemt snel toe als we een tolerantie inbouwen. Bijvoorbeeld een tornado binnen 1 km van mijn huis telt als treffer, of binnen 50 km. Bij een drempel van 50 km begin je te begrijpen waarom het midden van de VS Tornado Alley heet, want met zoveel tolerantie krijg je veel treffers in Tornado Alley.

Er doet zich hier overigens een hoogst intrigerend probleem voor. Wat is de kans op iets dat gisteren is gebeurd? (In verificatie telt de waarneming als 100% kans). Hoewel ik het antwoord niet weet, wist ik als student al hiermee anderen in verwarring te brengen. In die tijd vroeg ik mij af wat de kans op die vreselijke kou van februari 1956 was. Ik kreeg mensen aan het nadenken als ik hen vertelde hoeveel standaarddeviaties onder normaal februari 1956 was, als men de datum februari 1956 zelf ja dan nee in de bepaling van de standaarddeviatie meeneemt. Het verschil is enorm. Een rogue wave bij Vancouver is meteen een stuk minder uitzonderlijk geworden door die ene verrassende waarneming. Ik moet dit ook ooit aan Geert Jan van Oldenborgh hebben verteld en inderdaad ziet men in attributieverhalen uit zijn school wel eens de uitkomst van beide berekeningen. Dit probleem zou vermoedelijk niet bestaan als we oneindig veel waarnemingen hadden, dan kan één nieuwe datum (zelfs een extreme) de eigenschappen van de PDF niet veranderen. Maar we zijn behept met beperkt waarnemingsmateriaal. Bepaalde gebeurtenissen zijn zeldzaam, ten dele omdat we nog maar kort meten. Neem december 2015, bloedzacht in De Bilt, met 9.6 °C was het 2.3 °C warmer dan het vorige record voor die maand. Records 'horen' met tienden verbeterd te worden, hoor je wel eens zeggen, niet met hele graden. Maar dat gevoel is alleen gerechtvaardigd als we aannemelijk kunnen maken dat we lang genoeg hebben waargenomen. Hebben we dat? Of was December 2015 soms een 'rogue' event?

Ik heb ongeveer 25 jaar naar attributieverhalen geluisterd. Niet alleen over klimaatverandering, maar meer nog over anomalieën die een maand of seizoen duren. In het laatste geval is vaak deze of gene anomalie in zeewatertemperatuur (zeg El Niño) de aangewezen boosdoener die de PDF verschuift. Maar ik ben wel een forecaster. Een zwak punt van attributie is dat het a) achteraf is en b) uitsluitend over extremen gaat. Ik vind dat als je claimt te weten waardoor een extreem wordt veroorzaakt, dan had je het moeten verwachten (kansverwachting mag ook), anders schiet je tekort. Mijn regel: geen attributeerbaarheid zonder voorspelbaarheid. Toegegeven, het is wat provocerend, en ik ben er ook niet 100% zeker van.

Het weer van vandaag is zeer zeldzaam. Wist u dat? Ik heb ooit berekend dat de herhalingstijd (binnen de huidige meetfout) van het weer van vandaag op hemisferische schaal van de orde 10^{30} jaar is. Kortom, je moet lang wachten op een analoog. En het weer van morgen is evenzeer zeldzaam. Alle dagen hebben we een stromingspatroon dat zich nog nooit exact zo heeft voorgedaan in de ongeveer 100 jaar dat we meten. Dat geldt ook voor hoogst oninteressante weersituaties, dus niet alleen extreem weer wanneer iedereen vragen gaat stellen over het waarom. Waarom treedt een normale waarde op? Klimaatverandering? Alles is zeldzaam. Panta Rhei.

Ik ben zelf zeer zeldzaam. De kans op een individu met net deze merkwaardige verzameling genen is zo goed als nul. Niettemin ben ik er. Verklaar dat maar eens. En u als lezers bent ook erg zeldzaam, niemand uitgezonderd. Alle 7+ miljard bewoners van de aardbol zijn zeldzaam. Er zijn natuurlijk andere woorden die deze lading dekken. Een van mijn opvoeders sprak met zichtbare voldoening over de uniciteit van de mens. Allemaal heel bijzonder.

Mistklanken

Harry Geurts (KNMI, voormalig persvoorlichter)

Wie in de buurt van een spoorlijn woont kan horen of het mistig is. De machinist drukt in dichte mist op de claxon, ook wel tyfoon genoemd, zodra zijn trein een overweg nadert. Zo'n tyfoon, niet te verwarren met een tropische cycloon in de Stille Oceaan, herken je aan een hoge en een lage toon. Bij mistig weer is het tweetonige geluid over grotere afstanden te horen door weerkaatsing tegen de inversie.

Horen en zien vergaat je bij een stoomfluit

Stoomboten en stoomtreinen waren uitgerust met een stoomfluit als waarschuwingssignaal om hun komst aan te kondigen. Marcel Minnaert schrijft in zijn 'Natuurkunde van 't vrije veld (deel 2)' dat "men dikwijls de toon hoort oplopen tussen de eerste en de tweede stoot." De verklaring is dat de lucht in de pijp geleidelijk door de stoom verdrongen wordt. De stoomketel op een klassieke trein produceert stoom onder hoge druk, waardoor de stoomfluit hard klinkt. Horen en zien vergaat je tijdens een ritje met zo'n trein. De Deense walskoning Hans Christian Lumbye (1810 – 1874) verwerkte de stoomfluit in zijn 'Steam Railway Galop.' Een muzikale aanrader op YouTube, zeker als je liefhebber bent van het tv-programma 'Rail Away', is de uitvoering tijdens het nieuwjaarsconcert van 2012. De stoomtrein toert in het ritme van de muziek toeterend door het Oostenrijkese landschap. Maar houd dus de geluidsknop in de gaten.

Figuur 1. Misthoorn op een voormalig lichtschip in Amsterdam (2008). Bron: Wikimedia Commons.

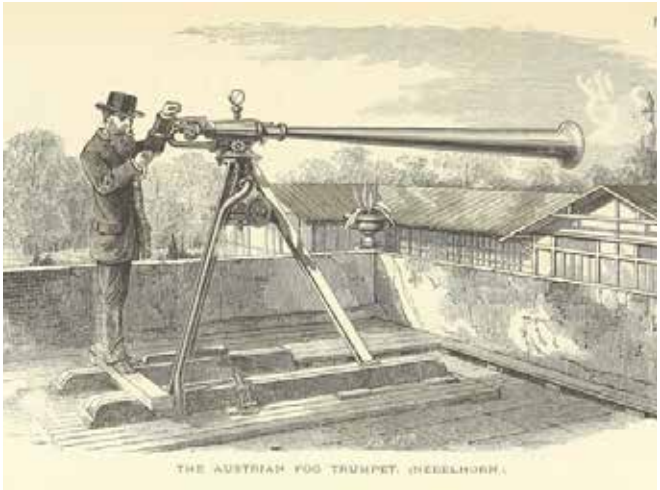
Op vuurtorens en aan boord van schepen wordt gebruik gemaakt van misthoorns, ook wel nautofoons genoemd (Figuur 1). Die instrumenten produceren een luide lage waarschuwingstoon omdat een lage toon over grote afstanden op zee beter te horen is dan een hoge toon. Minnaert: "op de straatweg Stavoren-Warns, ongeveer 150 meter voorbij station Stavoren, kan men de misthoorn in de haven horen loeien, gevolgd door wel vijf echo's; deze schijnen te wijten zijn aan terugkaatsing door boerderijen in de buurt." Een misthoorn produceert geluid door lucht in trilling te brengen zoals dat ook het geval is bij een orgelpijp.

Mysterieuze mistmuziek

Het bijzondere geluid dat een misthoorn produceert en de echo daarvan laten zich bij uitstek combineren met muziek. Luister maar naar de opening (The Ship) van 'A night at the Opera' van Teitur Lassen (1977). Deze singer-songwriter is afkomstig van de vaak in mist gehulde Faeröer-eilanden tussen Schotland en IJsland. Het misttoontje dat door de blazers van een groot orkest wordt nagebootst roept een mysterieuze sfeer op die het hele album kenmerkt. Volgens een muziekrecensent van Trouw "contrasteert de hoge heldere stem van Teitur met de donkere klankkleuren die het orkest produceert als een straal zonlicht die door de mist breekt." Mooi beschreven en je begrijpt wat de recensent bedoelt als je naar de muziek luistert. Teitur Lassen beweegt zich op het grensvlak van pop en klassiek en is ook in de Nederlandse concertzaal geen onbekende. Hij werkte recent samen met gerenommeerde gezelschappen als Holland Baroque en het Nederlands Blazersensemble.

In de mist

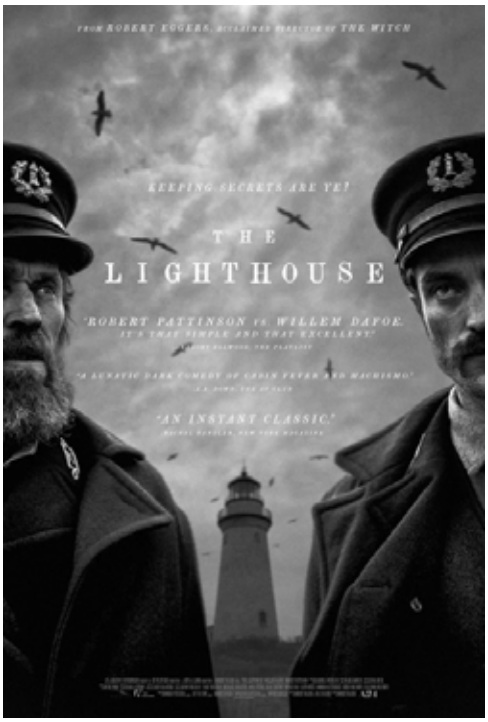
Mistmuziek is rijkelijk voorhanden omdat die muziek zich goed leent voor de dromerige sfeer die mist kan oproepen. Die stemming is treffend vastgelegd in 'Brouillards' (mist of nevel) van de Franse componist Claude Debussy (1862 – 1918). Toen hij deze prelude voor piano schreef had hij waarschijnlijk een droomlandschap van een rivier in de mist in gedachten. Volgens musicologen een jeugdherinnering van het beeld dat hij zag toen hij als kind uit het raam staarde. Mistige toonsoorten klinken ook in het vierdelige pianowerk 'In the Mists' (in de nevels) van de Tsjechische componist Leos Janaçek (1854 – 1928). Hij schreef deze pianocyclus in 1912 waarschijnlijk uit melancholie en frustratie in de moeilijke en droevige levensfase waarin hij was verzand. Enkele jaren daarvoor was zijn dochter overleden en hij zat in een periode van rouw.



Figuur 2. Nebelhorn, Austrian Trumpet (1870). Bron: Wikimedia Commons.

Bovendien kreeg Janaçek nog niet de waardering die hij verdiende voor zijn compositietalent. Het gaat hier dus niet om de meteorologische mist, door weerwaarnemers van Huize Swanenburgh gerapporteerd als 'beneveld', maar om zijn persoonlijke in nevels gehulde leven.

De wazige sfeer klinkt ook door in de derde symfonie (Västkustbilder) van de Zweedse componist Kurt Atterberg (1887 – 1974). Het openingsdeel (Soldis) doet denken aan La Mer van Debussy met een kalme zee in het gedempte licht van een heiige zon. Het tweede deel van de symfonie is onrustiger en verwijst naar een storm, waarna het derde deel (Zomernacht) weer heel romantisch klinkt. Mist bij zonsopkomst is het thema in 'Dans van de Ochtendmist' uit de Alladin Suite van de Deense componist Carl Nielsen (1865 – 1931). Ook de orkestsuite Zeebeelden van de Finse componist Uuno Klami (1900 – 1961) gaat over een mistige ochtend (Sumuinen aamu). De componist die aan de Finse Golf woonde en zelf vaak op het water dobberde beschrijft het gevoel dat het weer aan zee bij hem opriep. De Engelse componist Lilian Elkington (1900 – 1969) gebruikt de mist op zee ter illustratie van een sombere boodschap. Haar compositie 'Out of Mist' is een kort toongedicht voor Armistice Day (Onafhankelijkheidsdag, 11 november) dat herinnert aan het lijden van de mensheid in de Eerste Wereldoorlog. Engeland rouwt om haar doden: toen de 'Onbekende Soldaat' naar zijn laatste rustplaats werd gebracht, hing er dichte mist waaruit een oorlogsschip langzaam opdoemt terwijl het de haven Dover nadert. Vervolgens wordt de kist per koets naar Westminster Abbey gebracht voor de laatste rustplaats. Dat mysterieuze beeld roept de componist op in de droevig klinkende, langzaam aanzwellende en beladen War Elegy voor orkest zoals zij het werk noemde.



Figuur 3. De film 'The Lighthouse' (2019).

De Engelse componist Theodore Samuel Holland (1878 – 1947) schetst in Ellingham Marshes voor altviool en orkest de dromerige sfeer van de moerassen van Suffolk in East Anglia met wisselende stemmingen, somber, weemoedig en idyllisch. De dag begint met de vroege ochtendnevels boven de rivier en het moeras waarna de zon geleidelijk doorbreekt. Bij het vallen van de avond keert de mistige atmosfeer terug. Die drie fases in deze muzikale aquarel worden verklankt door drie improvisaties op de altviool.

In Winterdromen, de eerste symfonie van Peter Tsjaikovsky, breekt de zon niet door. Tsjaikovsky droomt in de symfonie over de strenge winters in zijn kinderjaren in Rusland. Een half jaar lang keek hij vanuit zijn geboortehuis naar een eindeloos kale sneeuwvlakte. "Land van somberheid, land van mist en nevels," zo noemde hij zijn vaderland en dat komt terug in de dromerige en sombere stemming die hij in deze symfonie laat horen, met name in het romantische tweede deel. Ook Richard Strauss verklankte de mist in zijn Alpensymfonie, een muzikale bergwandeling waarin hij de natuur en het weer van zonsopkomst tot zonsondergang in muzieknoten heeft omgezet. 'Opstijgende mist' is het veertiende deel van de symfonie nadat hij op de top van de berg is aangekomen en de muziek ook de climax bereikt. Geleidelijk verduisteren de mistflarden de zon als een voorbode van de in gedachten naderende onweersbui. Indrukwekkend zoals de componist dat heeft kunnen vangen in zijn symfonie.

Een song die zeker niet mag ontbreken in deze weerklanken over mistmuziek is 'A Foggy Day' van George Gershwin (1898 – 1937). Hij schreef het sfeervolle lied in 1937 op een tekst van zijn broer Ira Gershwin (1896 – 1983). Oorspronkelijk was de titel 'A Foggy Day (In London Town)', een verwijzing naar de smog die Londen vaak trof.

A foggy day, in London town
Had me low, had me down
I viewed the morning, with much alarm
British Museum, had lost its charm

How long I wondered,
Could this thing last
But the age of miracles, hadn't past
For suddenly, I saw you there

And through foggy London town,
The sun was shining everywhere

Uit: A Foggy Day van Ira en George Gershwin

The Great Smog van 1952 lag nog in het verschiet maar

Figuur 4. Historische misthoorn op het Wierhoofd in Den Helder. Bron: Verkeers en Coördinatie Centrum van Rijkswaterstaat Den Helder en de Helderse Historische Vereniging.

"Een door God verlaten rotseiland. Je kan de zilte zeelucht ruiken, strijdlustige zeemeeuwen krijsen, en de regen slaat genadeloos neer. Waanzin. Langdurige isolatie kan je blik benevelen waardoor de tijd steeds sneller wegglijdt en rondwervelende irreële gedachten de overhand krijgen".

(Bron: De Filmkrant, nr. 429, 2019)

Sabotage op de Zuiderpier

Misthoorns (Figuur 4) houden de gemoederen nog altijd bezig maar de kans om het hoorngeschal in de mist te horen wordt steeds kleiner. Veel vuurtorens verdwijnen of krijgen een andere bestemming, bijvoorbeeld als hotel of restaurant waarbij de misthoorns naar musea verhuizen.

In Harlingen brak een heuse opstand uit tussen voor- en tegenstanders nadat de lokale misthoorn in 2014 het zwijgen was opgelegd. De voorstanders lagen er 's nachts wakker van als ze het vertrouwde geluid niet hoorden en vonden dat het instrument cultureel erfgoed zou moeten worden. De tegenstanders "ervoeren het sonore geluid vooral 's nachts als ergerlijk" (bron: Gijs van Hesteren, Fryske Dagen, 2017). Eigenaar Rijkswaterstaat vond de misthoorn overbodig nu schepen zijn uitgerust met radar en digitale navigatieapparatuur. "Sabotage op de Zuiderpier" schreef de Harlinger Courant naar aanleiding van geruchten dat de misthoorn door een monteur met opzet onklaar was gemaakt. Er werd zelfs een actiegroep "Misthoorn terug" in het leven geroepen. Zonder succes, de politiek stemde het instrument weg en in 2019 viel definitief het doek. Een gemeenteraadslid schreef uit protest een misthoornlied dat gezongen wordt door een lokale zanger en waarin ook de misthoorn is te horen. Dankzij hen is het vertrouwde geluid tot genoegen van de voorstanders onder de Harlingers alsnog op YouTube vereeuwigd.

'Ut loeien van de misthoorn
Ik mis ut nog elke dag
Ut loeien van de misthoorn
Ut paste bij onze stad
Ut loeien van de misthoorn
Ik viel ur op in slaap
Maar ut loeien is nou over
En dat maakt mie een bitsje kwaad'

De misthoorn (tekst Wiebe van Dijk, muziek Ko Bennema)

was ongetwijfeld de aanleiding voor beroemde zangers als Ella Fitzgerard, Louis Armstrong en Frank Sinatra om dit lied in hun repertoire op te nemen.

Ode aan de misthoorn

Hun stemmen waren gepolijster dan die van rockzangeres Helen Shapiro waarover Boudewijn Büch (1948 – 2002) schrijft in 'De erotiek van een misthoorn' (Rock en Roll, Uitgeverij De Arbeiderspers, 1991). Zij kreeg door haar bijzondere stem in haar jonge jaren de bijnaam 'foghorn' (misthoorn), zie Figuur 2.

Een regelrechte ode aan de misthoorn is de angstaanjagende muziek bij de film 'The Lighthouse', een horrordrama uit 2019 (Figuur 3). Het verhaal speelt in 1890 bij een vuurtoren op het schiereiland Nieuw-Schotland in de Atlantische Oceaan waar twee eenzame vuurtorenwachters verdrinken in illusies. Op de achtergrond is van de eerste tot de laatste minuut een loeiende misthoorn te horen als een akelige voorbode van wat er staat te gebeuren.

Bert Holtslag ontvangt de eerste Sergej Zilitinkevich Memorial Award

Bestuur NVBM

Op 7 december 2021 is aan Bert Holtslag de eerste Sergej Zilitinkevich Memorial Award uitgereikt tijdens de Impact week van het Finse 'Atmosphere and Climate Competence Center (ACCC)' (Figuur 1). Deze prijs is ingesteld ter nagedachtenis aan Sergej Zilitinkevich, onder auspiciën van het ACCC, de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO), de EMS, de Internationale Euro-Aziatische Academie van Wetenschappen en andere vooraanstaande organisaties.

Begin 2021 overleed Sergej Zilitinkevich, één van de boegbeelden in het onderzoek naar atmosferische turbulentie, op 84-jarige leeftijd. Sergej legde in alle aspecten van zijn werk energie en passie aan de dag, en heeft meer dan 50 jaar baanbrekend werk verricht. In 1972 werd hij professor in de geofysica bij de academie van wetenschappen van de Sovjetunie, en schreef meer dan 100 wetenschappelijke artikelen en zes boeken over planetaire grenslagen, lucht-zee-interactie, omgevingsturbulentie, algemene circulatie van planetaire atmosferen, en klimaattheorie. Vanaf 1990 zette hij zijn wetenschappelijke carrière voort in Europa (onder meer bij het Risø National Laboratory, het Max-Planck Instituut voor Meteorologie, en de universiteit van Helsinki) om te werken aan zijn herziene grenslaagtheorieën die rekening houden met niet-lokale effecten en potentiële energie. Sergej wordt herinnerd als een positief persoon, altijd vooruitkijkend, enthousiast om nieuwe ontdekkingen te doen uit ingewikkelde vergelijkingen. Dit moet worden gezien in het perspectief van zijn soms harde jeugdjaren: het doorstaan van de belegering en hongersnood in Leningrad (1941 – 1944), het leven in een werkkamp na een verzonnen veroordeling, en allerlei beperkingen op internationale wetenschappelijke samenwerking. Hij gaf echter nooit op en vond nieuwe onderzoeksonderwerpen om zijn brein uit te dagen.

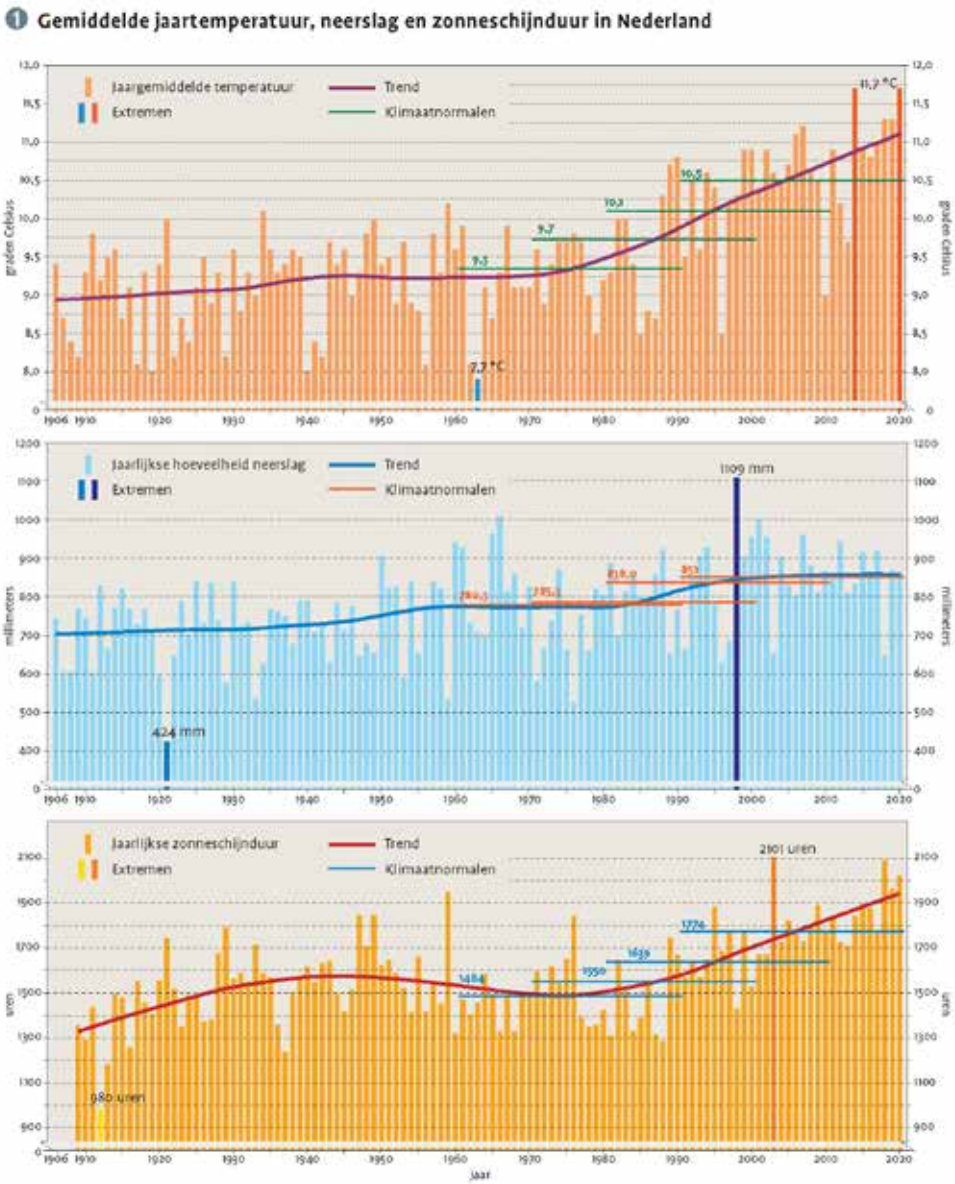
Bert Holtslag en Sergej Zilitinkevich delen hun interesse in het begrijpen van de fundamenten achter turbulentie in de atmosferische grenslaag. Bert begon zijn carrière bij het KNMI met het bestuderen van de verspreiding van luchtverontreiniging aan de hand van de waarnemingen op de net opgezette meetmast in Cabauw. Hierin is het begrip van atmosferische turbulentie en de hoogte van de grenslaag cruciaal. Aan de hand van waarnemingen van de onderzoektoren te Cabauw ontwikkelde en toetste Bert diverse theorieën voor de atmosferische grenslaag en schema's om deze theorieën praktisch toepasbaar te maken. Daarnaast heeft Bert een groot deel van zijn latere carrière bij het IMAU en bij Wageningen Universiteit gewijd aan de representatie van grenslagen boven land en ijs in weer- en klimaatmodellen, een gedeelde onderzoeksinteresse met Sergej Zilitinkevich. Een van deze meest in het oog springende activiteiten zijn de vier GABLS-modelvergelijkingsonderzoeken die Bert heeft geïnitieerd en geleid. Hierin hebben onderzoekers van een breed scala aan universiteiten, onderzoekscentra en operationele centra samengewerkt om de dynamiek van de nachtelijke grenslaag te begrijpen. Zowel Bert als Sergej delen de visie dat wetenschappelijke inzichten moeten bijdragen aan toepassingen in verbeterde weer- en klimaatmodellen. Daarnaast zijn beiden inspirators geweest voor volgende generaties onderzoekers.

Figuur 1. Markku Kulmala (voorzitter selectiecommissie), Bert Holtslag, en Hanna Lappalainen (secretaris selectiecommissie).

De Bosatlas van weer en klimaat

Peter Siegmund (KNMI)

Afgelopen november is de nieuwe Bosatlas van weer en klimaat verschenen. Via allerlei invalshoeken en in honderden kaarten, grafieken, infographics en foto's gaat de atlas uitgebreid in op het weer, het klimaat, klimaatverandering, en de effecten daarvan.

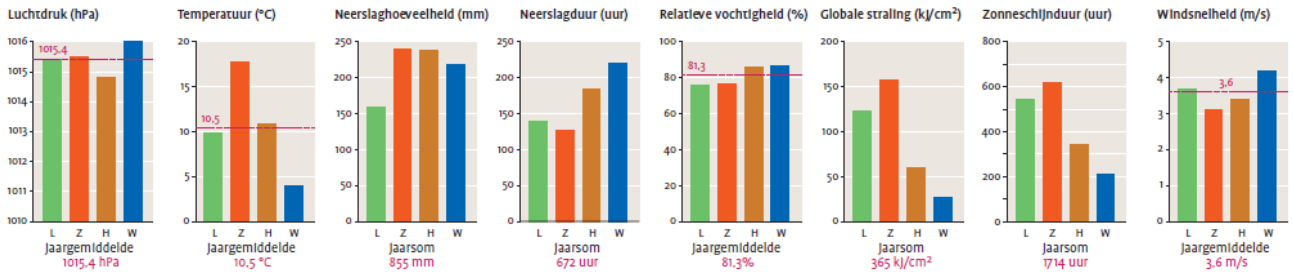


Figuur 1. Weer en Klimaat. Sinds het begin van de vorige eeuw zijn in Nederland de temperatuur, de neerslag en de zonneschijnduur toegenomen.

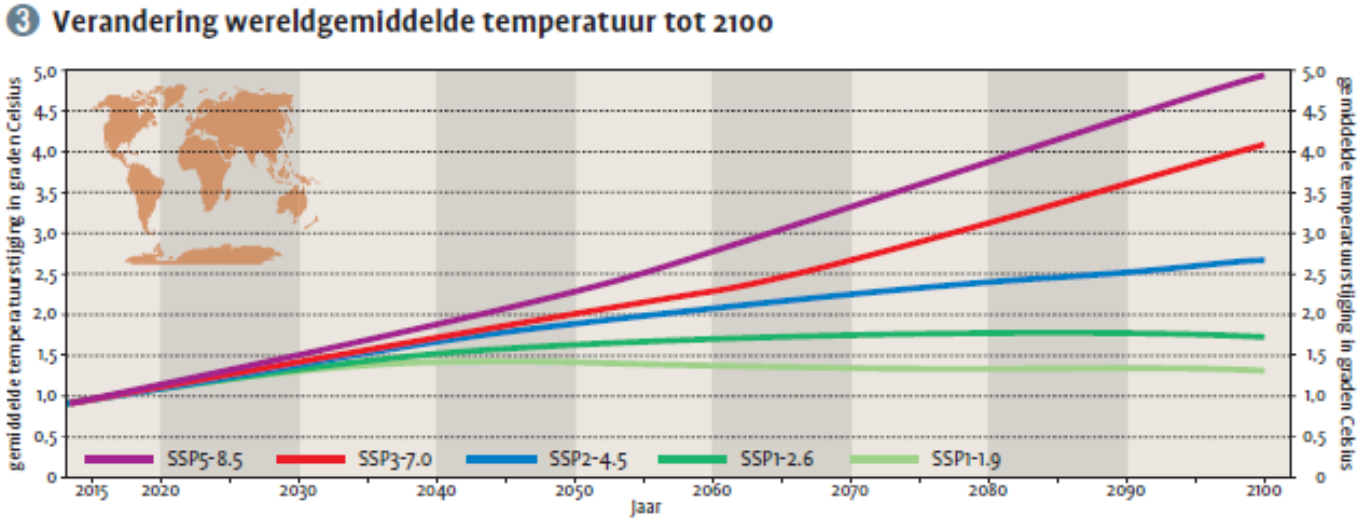
De atlas is samengesteld door het KNMI, geproduceerd door Lijn43, en uitgegeven door Noordhoff. De directe aanleiding voor de atlas is de nieuwe klimaatnormaal voor de periode 1991 – 2020 die het KNMI begin 2021 heeft gepubliceerd. Ook het succes van de vorige Bosatlas van het klimaat, tien jaar geleden uitgegeven naar aanleiding van de toen nieuwe klimaatnormaal voor de periode 1981-2010, en het grote belang van klimaatverandering zijn aanleiding voor de nieuwe atlas.

De vorige atlas ging vooral over het klimaat, terwijl de nieuwe atlas, zoals de titel al aangeeft, ook het Nederlandse weer bespreekt, met aandacht voor normaal weer, gevaarlijk weer, sportief weer en extreem weer door de eeuwen heen. Ook informeert de nieuwe atlas over klimaatverandering wereldwijd en in Nederland, zoals waargenomen sinds de vorige eeuw en geprojecteerd voor de komende tijd. De atlas beschrijft bovendien de effecten van klimaatverandering op de natuur, wateroverlast, gezondheid, energie, en de zeespiegel, en bespreekt het klimaat van Caribisch Nederland. En uiteraard zijn in de nieuwe atlas tijdreeksen uit de vorige atlas met tien jaar verlengd.

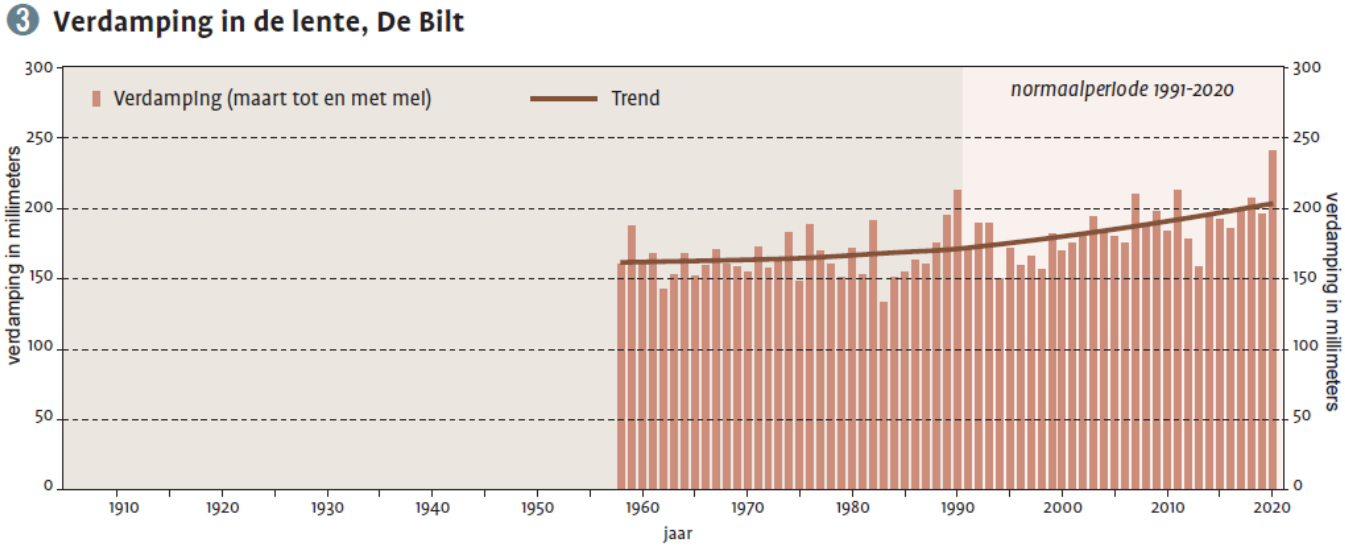
In de atlas voert het beeldmateriaal de boventoon, de tekst is secundair. In de geest daarvan laten we hier enkele figuren zien (Figuren 1 – 6) met daarbij de titel van het hoofdstuk en een korte beschrijving van de figuur. Voor wie dit naar meer smaakt, is de Bosatlas van weer en klimaat de aanschaf waard.



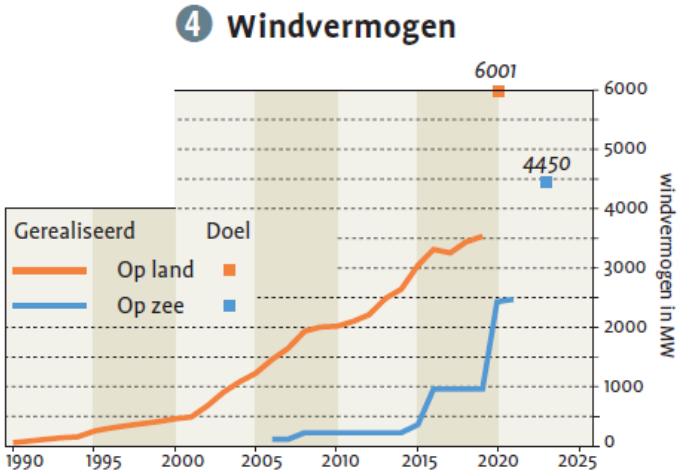
Figuur 2. Nederlands weer. De klimaatnormaal 1991-2020 voor De Bilt in een notendop.



Figuur 3. Klimaatverandering. Zonder klimaatbeleid neemt de CO_2-uitstoot meer toe en is de temperatuurstijging veel groter dan wanneer wél maatregelen worden genomen. Om de temperatuurstijging te beperken tot 1.5 °C, moet de uitstoot van broeikasgassen rond 2050 zijn teruggebracht tot bijna nul (SSP1-1.9).



Figuur 4. Neerslag en verdamping. De afgelopen decennia is de verdamping in de lente toegenomen, door toename van de temperatuur en van de zonnestraling.



Figuur 5. Luchtdruk en wind. Het geïnstalleerde windvermogen op land en zee in Nederland in 2020 is 8500 megawatt, oftewel een halve kilowatt per Nederlander.

Figuur 6 Klimaateffecten. De eerste dag van het groeiseizoen, als de gemiddelde temperatuur minstens 6 dagen achtereen minstens 5 °C is, valt steeds eerder in het jaar.

column

Geo-engineering

Leo Kroon

Het zijn de jaren zeventig van de vorige eeuw. In Centraal-Azië smachten de katoenvelden in Oezbekistan en Turkmenistan (op dat moment beide nog onderdeel van de Sovjet-Unie) om irrigatie. Het water daarvoor is afkomstig van de rivieren Syr Darya en Amu Darya die allebei in de Aral Zee uitmonden. Katoen is het product van een erg dorstig plantje maar is wél heel belangrijk voor de export. Om die redenen hebben de Sovjets een gigantisch irrigatiesysteem van zo'n 50.000 km aan kanalen aangelegd. In totaal wordt er zoveel water aan deze rivieren onttrokken dat het waterpeil van de Aral Zee dramatisch daalt. De Aral Zee was eens het op drie na grootste meer ter wereld met een oppervlak van 68.000 km^2 (bijna tweemaal Nederland). Momenteel is er nog minder dan 10% van dit oppervlak over. Verder voerden de twee rivieren zoveel pesticiden, insecticiden, kunstmeststoffen en andere onfrisse chemicaliën mee dat het hele gebied van de voormalige Aral Zee een ecologisch rampgebied genoemd mag worden. Ban Ki-moon, de vorige Secretaris-Generaal van de UN, noemde de Aral Zee "one of the planet's worst environmental disasters".

Om het watertekort in Centraal-Azië te verminderen bedachten de Sovjets in de jaren tachtig een volgend megaproject: het zuidwaarts laten vloeien van water uit Siberische rivieren. Via een aan te leggen kanaal van 2500 km lengte kon water van zo'n 12 rivieren die uitmonden in de Noordelijke IJszee worden getransporteerd naar het zuiden. Men was echter beducht dat de veranderingen in de watersamenstelling van de Noordelijke IJszee het lokale klimaat aanzienlijk zouden kunnen beïnvloeden. Van een langere winter, veranderingen in de windsystemen, de hoeveelheid zee-ijs, de oceaancirculatie tot de lokale hoeveelheid neerslag aan toe. Ook zouden de socio-economische veranderingen dramatisch kunnen uitpakken. Na rijp beraad werd het hele project door de toenmalige president Gorbachov stopgezet. In 2004 werd het plan echter tóch weer opgepakt omdat door klimaatverandering de afvoer van de Siberische rivieren toenam en men toen beducht was dat een afname van het zoutgehalte van de Noordelijke IJszee de circulatie ervan, en ook de Golfstroom, danig zou verstoren met als een van de mogelijke gevolgen ijskoude winters in Noordwest-Europa. Intussen zijn de irrigatiekanalen in Centraal-Azië echter verouderd; naar schatting 60% van het aangevoerde water gaat verloren door lekkage. Het plan is blijkbaar voorlopig weer in de ijskast gezet.

Deze voorbeelden tonen aan dat als de mens op grote schaal gaat ingrijpen in natuurlijke processen, ook wel geo-engineering genoemd, het ook op grote schaal fout kan gaan. Dit komt omdat het vrijwel onmogelijk is om bij dit soort grootschalige, complexe en niet-lineaire processen vooraf in te schatten wat de gevolgen zijn van drastische ingrepen in het systeem. Daarnaast zijn er nog wel een aantal andere tekortkomingen te noemen. Deze werden goed samengevat in een recent overzichtsartikel [1]. De auteurs kwamen daarin tot de conclusie dat toepassingen van een aantal voorgestelde mogelijkheden van geo-engineering, zoals de afvangst van kooldioxide en de vermindering van de hoeveelheid zonlicht die de aarde bereikt, vooralsnog (1) pas in het eerste stadium van ontwikkeling zijn, (2) behoorlijke risico's en onzekerheden bevatten, en (3) gepaard kunnen gaan met grote politieke en ethische problemen. Kortom: geo-engineering is (nog) niet geschikt om de klimaatdoelen van het Akkoord van Parijs te behalen. Het grootste argument tegen geo-engineering is wel dat het het onderliggende probleem, namelijk te veel uitstoot van kooldioxide, niet aanpakt. Dan blijft het dweilen met de kraan open. Op zijn best kan geo-engineering als een soort noodrem worden gezien: alleen als niets meer helpt is het wellicht een redmiddel.

In de NRC van 22 januari werd nog eens stilgestaan bij een van de methoden om de zonnestraling te verminderen door het in de ruimte brengen van grote aantallen zonlicht reflecterende schilden. De eerdere conclusie werd in die editie treffend samengevat door de dichteres Marlies ter Voorde. Onder de titel "Terugblik Met Spijt" schreef zij:

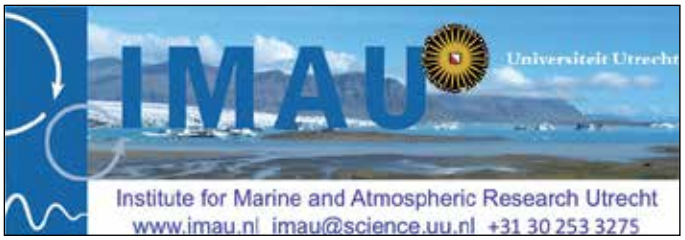
De aarde omcirkeld door zwermen
Zonlicht reflecterende schermen
Zat vroeger vol leven
Tot dat (men) zich wel even
Over het klimaat zou ontfermen

De mens zag de rekenmodellen
Twee graden verkoeling voorspellen
Dat werden er meer maar
Het was onomkeerbaar
Dus pech gehad... niet te herstellen

Literatuur

[1] Lawrence, M.G., Schäfer, S., Muri, H. et al. Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. Nat Commun 9, 3734 (2018), https://doi.org/10.1038/s41467-018-05938-3

Sponsors van de Nederlandse Vereniging ter Bevordering van de Meteorologie



Colofon

Redactie
Hoofdredacteur: Richard Bintanja (e-mail: richard.bintanja@knmi.nl).
Redactieleden: Wim van den Berg, Aarnout van Delden, Robert Mureau, Rob Sluijter, Fiona van der Burgt, Ben Lankamp en Lone Mokkenstorm.

Artikelen en bijdragen
Deze dienen uitsluitend digitaal (bijvoorbeeld per e-mail) te worden aangeleverd, als Word document met figuren apart. Uiterste inleverdata hiervoor zijn: 1 februari, 1 mei, 1 augustus en 1 november voor respectievelijk nummer 1, 2, 3 en 4. Voor meer informatie over de procedure, zie http://www.nvbm.nl/meteorologica/informatie_voor_auteurs/.

Artikelen uit Meteorologica mogen uitsluitend worden overgenomen na voorafgaande schriftelijke toestemming van de redactie.

Meteorologica (ISSN 0929-1504) verschijnt vier maal per jaar en is een uitgave van de Nederlandse Vereniging ter Bevordering van de Meteorologie (NVBM).
Penningmeester en administratie: Mike Budde (penningmeester@nvbm.nl).
Vormgeving: Colorhouse, Almelo.
Vermenigvuldiging: Colorhouse, Almelo.

Abonnementen
Alle leden van de NVBM zijn automatisch geabonneerd op Meteorologica. Ook niet-leden kunnen zich abonneren door 31,- euro voor vier nummers over te maken naar IBAN: NL66INGB0000626907, BIC: INGBNL2A, ten name van:

NVBM-Meteorologica
Postbus 464
6700 AL Wageningen

onder vermelding van:
"Abonnement Meteorologica" en uw adres.

Abonnementen worden telkens aangegaan voor een heel kalenderjaar; bij tussentijdse betaling worden de reeds verschenen nummers van dat jaar toegestuurd. Voor abonnees in het buitenland zijn de kosten 38,- euro per jaar. Ook losse nummers kunnen op deze manier worden besteld (zolang de voorraad strekt) voor 10,- euro per stuk, onder vermelding van de gewenste jaargang en nummer(s). Instellingen betalen 65,- euro voor een abonnement. Een student-abonnement kost 16,- per jaar. Opzeggingen per email naar het bestuur (bestuur@nvbm.nl); hierbij geldt een opzegtermijn van drie maanden.

Lid worden van de NVBM
Het lidmaatschap van de NVBM kost 55,- euro per jaar. Meer informatie hierover is te vinden op de NVBM website: www.nvbm.nl. Opzeggingen per email naar het bestuur (bestuur@nvbm.nl); hierbij geldt een opzegtermijn van drie maanden.

Advertenties
Adverteren in Meteorologica is mogelijk. Advertenties worden geplaatst op 3 formaten: A5, A4 of A3. Uiterste inleverdata voor advertenties zijn: 1 februari, 1 mei, 1 augustus en 1 november voor respectievelijk nummer 1, 2, 3 en 4. Tarieven zijn op te vragen bij Richard Bintanja (e-mail: richard.bintanja@knmi.nl).

Sponsorschap NVBM
Men kan sponsor worden van de NVBM. Een sponsorschap wordt afgesloten voor minimaal 1 jaar. Een sponsor heeft diverse rechten, o.a.:
- Het plaatsen van advertenties in Meteorologica,
- Plaatsing van het firmalogo in het blad,
- Het bijwonen van congressen e.d. georganiseerd door de NVBM.

Voor meer informatie over het sponsorschap kunt u contact opnemen met Richard Bintanja of Mike Budde (zie boven).

Come and study *Meteorology and Air Quality* at Wageningen University

Bachelor of Science
Soil, Water, Atmosphere

Master of Science
Meteorology and Air Quality

Wageningen University
Meteorology and Air Quality
http://www.maq.wur.nl

Contact:
Michiel van der Molen
Michiel.vanderMolen@wur.nl

Information:
BSc: http://www.wur.nl/bbw
MSc: http://www.wur.nl/mee

WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH