



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

**Als een zware orkaan
Caribisch Nederland treft**

Als een ex-orkaan Nederland treft

**Als de Rijnafvoer blijft dalen
en de binnenvaart hindert**

**Als het westnijlvirus
Nederland besmet**

**Als duisterluwte de stroomvoorziening
onder spanning zet**

**Als de natuur
in vuur en vlam staat**

**Als regen met bakken
uit de hemel komt**

**Als een koudegolf
Nederland twee weken gijzelt**

**Als de oplopende temperatuur
de gemoederen verhit**

Een **EXTREEM** rapport

Een **EXTREEM** rapport

Extreem weer in tijden van klimaatverandering

VOORWOORD	3	40 ORKAAN	Als een zware orkaan Caribisch Nederland treft
INLEIDING	5		
HITTE	8	45 DROOGTE	Als de Rijnafvoer blijft dalen en de binnenvaart hindert
Als de oplopende temperatuur de gemoederen verhit			
NATUURBRAND	16	53 NEERSLAG	Als regen met bakken uit de hemel komt
Als de natuur in vuur en vlam staat			
KOU	23	62 DUISTERLUWTE	Als duisterluwte de stroomvoorziening onder spanning zet
Als een koudegolf Nederland twee weken gijzelt			
STORM	31	70 MUGGEN	Als het westnijlvirus Nederland besmet
Als een ex-orkaan Nederland treft			

VOORWOORD

Als we het over klimaatverandering hebben, gaat het vaak over de verre toekomst. Onze eigen KNMI'23 klimaatscenario's bijvoorbeeld richten zich vooral op 2050, 2100 en 2150. Dat is relevant voor lange termijn investeringen en keuzes in ruimtelijke inrichting, en uiteraard ook om keuzes te maken over onze toekomstige uitstoot.

Maar we leven inmiddels ook vandaag al in een veranderd klimaat. En als het over die klimaatverandering in het heden gaat, dan is het onderwerp vaak extreem weer dat recent is opgetreden. Terecht, want extremen in het weer veranderen snel – sneller zelfs dan het gemiddelde. En daardoor zijn onze ervaringen uit het verleden van beperkte waarde voor wat we nu kunnen verwachten. Zo komt de maximumtemperatuur in de zomer in Nederland steeds vaker boven de 35°C, terwijl dat honderd jaar geleden nauwelijks voorkwam. Aan de andere kant herinneren veel volwassenen zich menige winter met schaatspret, waar dat tegenwoordig veel zeldzamer is.

En er zijn ook steeds meer weersextremen denkbaar, die ons vandaag zouden kunnen treffen, maar die we nog nooit hebben mee gemaakt. Dergelijke “aannemelijke extremen”

willen we met dit rapport inzichtelijk maken. Want juist extreem weer dat we niet eerder gezien hebben kan ons extra hard raken. Mijn ergste nachtmerrie is dat ik als KNMI-directeur verantwoordelijkheid zou dragen voor de gevolgen van overstromingen zoals de honderden doden bij de Duitse Ahrvallei in 2021 (die ook Limburg hard raakte), en recenter in Valencia, of van een hittegolf met duizenden of zelfs tienduizenden doden zoals in 2003 (vooral in Frankrijk, maar ook in Nederland). Allemaal extremen die snel erger worden en waar we kennelijk onvoldoende op voorbereid waren.

In veel gevallen is dat extremere weer toe te schrijven aan een al veranderd klimaat, zoals onze attributiestudies laten zien. We wisten dat het risico groeide. Maar hoewel de meteorologische instituten het extreme weer goed zagen aankomen, werd die informatie niet of onvoldoende vertaald naar actie om levens te redden. In de hele keten van het produceren van een goede weersverwachting naar het voorkomen van de (soms dodelijke) gevolgen van extreem weer valt dus wel het een en ander te verbeteren. Daar zetten we ons als KNMI voor in, samen met veiligheidsregio's en aller-

lei andere partners. Maar hopelijk ook met **alle individuele burgers die zelf in actie moeten komen** als zo'n waarschuwing zou komen.

Door mogelijke scenario's te bestuderen worden we als maatschappij weerbaarder: het kan helpen om schade te beperken of waar mogelijk te voorkomen, als zo'n extreem zich aandient. Het geeft ook richting aan onze adaptatieopgave: hoe kunnen we ons aanpassen om beter bestand te zijn tegen nieuwe of toenemende risico's?

En daarbij gaat het natuurlijk niet alleen om het voorkomen van doden. Ook als er niet



Maarten van Aalst
hoofddirecteur KNMI

direct mensenlevens op het spel staan, kan er een ontwrichtende werking vanuit gaan. Een negental voorbeelden daarvan komen in dit rapport aan bod en geven een indruk van wat ons te doen staat.

Want in dit rapport beperken we ons bewust niet alleen tot het extreme weer dat ons kan treffen. Want de echte vraag is natuurlijk wat de gevolgen zouden zijn en hoe we die kunnen beperken. Daarom kijken we in dit rapport ook naar de impact op een bepaalde sector of een bepaald gebied. Heel veel dank aan alle partners van het KNMI die hebben meegewerkt aan deze analyses. Want juist die partners hebben kennis over de gevolgen. En het zijn vaak diezelfde partners die uiteindelijk het verschil moeten maken met zulke risico-informatie, en op korte termijn zullen moeten handelen als er een waarschuwing komt.

Het KNMI heeft met deze notitie een wetenschappelijke basis willen leggen om aan te geven met welk extreem weer we in het huidige klimaat al rekening moeten houden. Zowel de specifieke weersextremen als de beschreven impact zijn uiteraard vooral illustratief: de natuurbrand en de hoosbuien hadden ook elders kunnen plaatsvinden, om maar wat te noemen. Maar we hopen dat ze duidelijk maken dat er werk te doen is. Deels om weerbaar-

der te zijn in de context van extremer weer en groeiende onzekerheid. Maar ook om slimmer gebruik te maken van wat we al wel weten. Nadere analyses van zulke risico's vragen samenwerking met al onze partners die kijken naar de impact van het gevaarlijke weer. Zo draagt het KNMI bij aan een veilige, weerbare en toekomstbestendige samenleving. ■

Maarten van Aalst

hoofddirecteur KNMI

INLEIDING

Weersextremen, hier en nu

Klimaatverandering is in feite een verandering in het gemiddelde weer. Vaak wordt daarvoor een gemiddelde genomen over tenminste 30 jaar, want over een dergelijke periode middelt de natuurlijke variatie ongeveer uit. Klimaatverandering wordt vaak beschreven als een verschuiving van het gemiddelde, maar het zijn juist de extremen die de grootste gevolgen hebben.

De KNMI-klimaatsscenario's geven een inkijkje in een mogelijk toekomstig klimaat voor Nederland. Hoe het klimaat zich in de toekomst gaat ontwikkelen, hangt natuurlijk af van hoeveel CO₂ en andere broeikasgassen we nog gaan uitstoten met z'n allen. Vandaar dat we scenario's maken met zowel een hoge als een lage-uitstoot, om beide uitersten in beeld te krijgen.

De focus bij dergelijke toekomstscenario's ligt op de verschuiving van gemiddelden, waarbij we ook aangeven hoe de extremen dan zullen veranderen. Maar ook voor het huidige klimaat willen mensen weten welke weersextremen

we kunnen verwachten, en wat daar de impact van zou zijn op bijvoorbeeld onze veiligheid, gezondheid of infrastructuur.

In tijden van snelle klimaatverandering, zoals nu, is het verleden niet langer een betrouwbare graadmeter voor wat we nu al kunnen verwachten aan weersextremen. We vergelijken het huidige weer vaak met een referentieperiode uit het recente verleden; dat is nu nog 1991-2020. Maar het Nederlandse klimaat is sindsdien al bijna een graad verder opgewarmd. Dat betekent dat weersextremen – die vaak sterker toenemen dan het gemiddelde – nu al flink anders zijn dan toen.

Toch hebben we in het recente verleden al een aantal weersextremen meegemaakt die tot grote problemen leidden. Zo waren er de overstromingen in Limburg, Duitsland en België in juli 2021. De regenval was toen zo extreem, dat het in het huidige klimaat een

kans heeft van eens in de vierhonderd jaar. De maatschappelijke impact was groot; in het buitenland verdronken zelfs 243 mensen door de overstromingen.

Veel organisaties, zoals waterschappen en veiligheidsregio's, hebben behoefte aan meer informatie over het type extreem weer dat nu al mogelijk is, ook al is het nog niet voorgekomen.

De maatschappij heeft behoefte aan meer informatie over het type extreem weer dat nu al mogelijk is

Met dit rapport willen we aan die vraag voldoen, door juist in te zoomen op de extremen in het hier en nu. Dat doen we door verschillende casussen te behandelen. Daarin koppelen we een specifiek weersextreem of combinatie van weersomstandigheden aan de

impact die dit kan hebben op een bepaalde sector of in een bepaalde regio. Op die manier schetsen we een beeld van het samenspel van weersextreem en impact, waar we als maatschappij mee te maken kunnen krijgen en dus op voorbereid moeten zijn. Deze voorbeelden kunnen daarmee ook gebruikt worden voor een stresstest.

Maatschappelijke impact

Een ontwrichtende invloed van het weer komt vaak door een samenspel van omstandigheden: het kan bijvoorbeeld veroorzaakt worden door de extremiteit van hitte of regenval, in combinatie met de kwetsbaarheid van de getroffen regio. Het kan ook zijn dat de combinatie van weersomstandigheden -en dus niet de extremiteit van één aspect- tot problemen leidt. Een voorbeeld daarvan is duisterluwte, waarbij er weinig tot geen energie kan worden opgewerkt door middel van zon en wind, en de vraag naar energie hoger dreigt te worden dan het aanbod.

Dit rapport is tot stand gekomen in samenwerking met diverse partners buiten het KNMI. We hebben er bewust voor gekozen om deze samenwerking op te zoeken, om daarmee de hele keten van de meteorologische situatie tot de impact te kunnen beschrijven. De verschillende casussen zijn niet uitputtend.

Er zijn vele andere mogelijkheden van weersextremen, die allemaal net iets anders uitpakken, bijvoorbeeld wat betreft locatie, tijdsduur, intensiteit, samenspel van factoren, etc. De beschreven situaties zijn bedoeld als illustratie voor de verschillende types van extreem weer en de mogelijke impact daarvan.

Hoe waarschijnlijk is het?

Indien mogelijk geven we een indicatie van de waarschijnlijkheid. Dat doen we aan de hand van het begrip herhalingstijd: hoe vaak verwachten we dat een dergelijke weersituatie zich kan voordoen in het huidige klimaat? Een herhalingstijd van eens in de vierhonderd jaar betekent dat elk jaar de kans van optreden ongeveer 1 op 400 is, oftewel een vierde van een procent: zo extreem dat het heel onwaarschijnlijk is, maar niet zo extreem dat het nooit zal voorkomen. De extreme regenval in Limburg en omgeving in 2021 was hier een voorbeeld van.

Een precieze berekening van de herhalingstijd is niet altijd mogelijk, en ook waar we een schatting geven, is die omgeven door een ruimte bandbreedte. Het moet vooral gezien worden als een orde van grootte, waarbij we ons hier proberen te richten op situaties met een herhalingstijd van eens in de paar eeuwen. Er zitten namelijk een aantal adders onder het gras als je de kans op extreem weer wilt

berekenen. Denk bijvoorbeeld aan een forse, plaatselijke regenbui. De kans dat die bui precies op die ene plak valt is natuurlijk heel laag. De kans dat diezelfde bui ergens in Nederland valt is al een stuk hoger. In het algemeen kun je stellen dat het voor een grootschalige weersituatie eenduidiger is om een kans van optreden te bepalen. Maar de pieken in de extremen -die gepaard gaan met de meest ontwrichtende impact- zijn soms kleinschalig.

Bij een samenloop van verschillende omstandigheden (in de meteorologie wel een samengesteld extreem of *compound event* genoemd) is het ook ingewikkeld om een kans te berekenen. Wat is de kans dat het tegelijkertijd warm en droog is, met veel wind, waardoor het risico op grote natuurbranden wordt aangewakkerd? Er zijn verschillende combinaties mogelijk van die drie factoren (temperatuur, droogte en wind) die tot een bepaald risico leiden. Daarnaast spelen niet-meteorologische factoren een grote rol in hoe de impact uiteindelijk uitpakt, wat het bepalen van een kans of herhalingstijd bemoeilijkt. Een combinatie van op zichzelf niet zo extreme weersomstandigheden kan door hun samenspel, in combinatie met niet-meteorologische factoren zoals de beschikbaarheid van brandstof, tot een extreme impact leiden.

Hoe aannemelijk is het?

Vanwege de haken en ogen die er zitten aan de kansberekening van extreme weersituaties, bekijken we voor elke casus ook hoe aannemelijk de meteorologische situatie is. Dat doen we bijvoorbeeld door met meerdere experts de modeluitkomsten kritisch te beschouwen. Hoe verhoudt het zich tot de natuurkundige kennis van de atmosfeer, en tot situaties die misschien al eens zijn opgetreden, hier of elders? Dit komt neer op een deskundigenoordeel, gebaseerd op meteorologische kennis en ervaring.

Modelberekeningen

Een aantal van de casussen in dit rapport zijn gebaseerd op een daadwerkelijk voorgekomen weersituatie, waarbij we bekijken hoeveel erger het had kunnen zijn. Dat doen we aan de hand van de toenmalige weersverwachting. Daarvoor gebruiken we de ensembleverwachtingen gemaakt met het Europese weermodel van het *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Dit is hetzelfde model dat wordt gebruikt voor de dagelijkse weerberichten.

Iedere twaalf uur maakt het ECMWF vijftig berekeningen, allemaal met een net iets andere beginsituatie. Samen vormen deze een

weerpluim. Hoe breder de pluim, hoe groter de onzekerheid in de verwachting. Deze vijftig modelberekeningen zijn allen even waarschijnlijk. De eerste paar dagen verschillen ze vaak niet heel sterk van elkaar, maar daarna beginnen ze vaak uiteen te waaiëren, als een soort rookpluim. De deels chaotische bewegingen in de atmosfeer zorgen ervoor dat een net iets andere beginsituatie tot een andere uitkomst leidt. De werkelijkheid volgt dan ook lang niet altijd het midden van die pluim.

We gebruiken de pluimverwachting dan om de

vraag te beantwoorden: *wat als de dobbelsteen van het weer net iets anders wordt gerold?* We kiezen dan een modelberekening, die tot een nog extremere weersituatie zou hebben geleid

dan in werkelijkheid is voorgevallen. Voor een aantal casussen rekenen we deze na op hogere resolutie met een regionaal weermodel. Naast meer inzicht in de kleinschalige processen, geeft dat ook een meer solide basis om te bepalen hoe aannemelijk dat alternatieve verloop van de weersituatie is.

Opzet van het rapport

Elke casus begint met een hypothetisch weerbericht. In de meeste gevallen is dit gebaseerd op één van de modelberekeningen van de

pluimverwachting, zoals hierboven uitgelegd. In andere gevallen is het een beschrijving van een mogelijke samenloop van weersomstandigheden, die tot een ontwrichtende situatie leidt.

Na een korte inleiding volgt dan, indien van toepassing, een beschrijving van het daadwerkelijk opgetreden weer, dat als uitgangspunt dient: wat is er gebeurd? Daarna wordt de casus beschreven, namelijk hoe dit event ook had kunnen uitpakken: Wat had er kunnen gebeuren? De methodologie die daarbij is gebruikt, wordt in een kader kort uitgelegd. Meer details daarover zijn te vinden in de bijlage bij het rapport.

De impact van dit “plausibele extreem” is geschreven door, of in samenwerking met, externe partners. We focussen hierbij op een specifiek gebied of specifieke sector. Dit is dus geen uitputtende beschrijving van alle te verwachte impacts, maar een specifieke illustratie daarvan. Tot slot geven we kort aan wat de rol van klimaatverandering is bij dit type weersextreem. ■

Bart Verheggen

HITTE

Als de oplopende temperatuur de gemoederen verhit

Op een dag in juli:

“Dit is al de vierde dag op een rij dat de temperatuur boven de 35°C uitkomt. Maar vooral de nachten zijn uitzonderlijk heet: komende nacht belooft alweer de zesde plaknacht met temperaturen boven de 22°C te worden in Amsterdam. Het lichaam kan dan 's nachts niet meer herstellen van de hitte, met gezondheidsrisico's tot gevolg. En dan te bedenken dat nachten in dichtbebouwde wijken zonder groenvoorziening nog een stuk warmer kunnen zijn, vaak boven de 25°C. Bewoners zijn moe en prikkelbaar en dit zorgt voor spanning op straat en in huis. De hulpdiensten in Amsterdam draaien overuren, maar ook in andere regio's lopen meldkamers over. Politie, brandweer en ambulance moeten prioriteren, omdat versterking van buitenaf nauwelijks mogelijk is. Van elke mogelijkheid tot verkoeling wordt gretig gebruikgemaakt: fonteinen en grachten lijken op openbare zwembaden, terwijl in meren en vijvers wordt gewaarschuwd voor blauwalg. Verkoelende alternatieven buiten de stad zijn moeilijk te bereiken, omdat het openbaar vervoer vrijwel volledig platligt. En voor wie probeert koel te blijven met een airco of een gevuld badje: drinkwaterbedrijven en netbeheerders roepen op om het gebruik van water en elektriciteit zoveel mogelijk te beperken.”

Zo had het kunnen gaan. Maar zo ging het niet.

AUTEURS

- **Carolina Pereira Marghidan,**
Leon van Voorst KNMI
- **Anne van Diepen**
Veiligheidsregio Amsterdam-Amstelland
- **Sjors Verhaar** Gemeente Amsterdam
- **Jantine Röttgering** GGD Amsterdam
- **Gerben Mol** AMS Institute

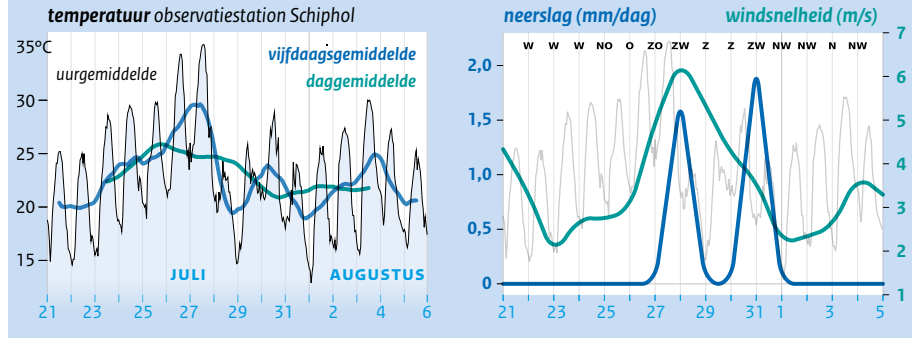
Introductie

Hittegolven zijn de dodelijkste klimaat-gereleerde weersituaties in Europa en vormen de grootste bedreiging voor de volksgezondheid, met brede gevolgen voor de maatschappij¹. De zomer van 2018 liet dat duidelijk zien: uitzonderlijk droog en warm weer hield wekenlang aan. Op 25 juli gaf het KNMI voor het eerst in de geschiedenis code oranje voor extreme hitte. Gelukkig zorgde een koel buienfront op 28 juli ervoor dat het tijdelijk wat afkoelde. Maar wat als de hitte langer had aangehouden? Dat was volgens de weersverwachtingen een reële mogelijkheid. In deze casus verkennen we hoe de hittegolf van 2018 ook extremer had kunnen uitpakken en wat dat voor effecten zou hebben gehad op de gezondheid, infrastructuur en leefbaarheid in Amsterdam.

Hoe verliep de hittegolf in 2018?

Tussen 15 juli en 7 augustus 2018 registreerde meetstation De Bilt maar liefst 23 zomerse da-

Het weer gedurende hittegolf 2018

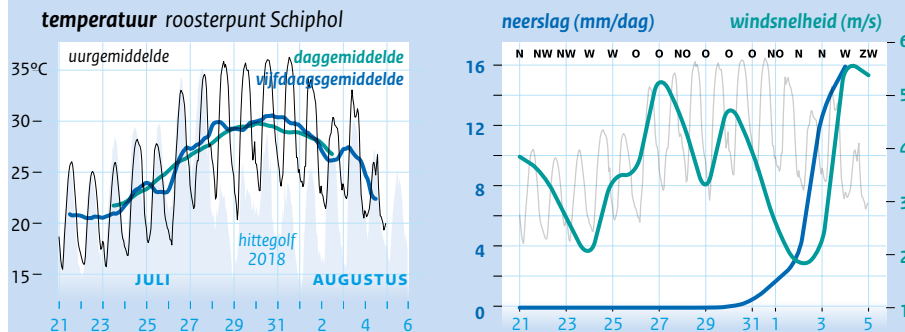


Afbeelding 1. Temperatuur (a) en windsnelheid en neerslag (b) tijdens de hittegolf van 2018. Voor de temperatuur zijn de uurgemiddelde, daggemiddelde en vijfdaags gemiddelde waarde aangegeven. De relatief koele dag op 28 juli hangt samen met de passage van een koudefront, zoals te zien aan de neerslag en de toenemende windsnelheid op die dag. Het temperatuurverloop wordt in de achtergrond van (b) weergegeven.

gen, van 25°C of hoger, waarvan vele boven de 30°C. Een standvastig hogedrukgebied boven West-Europa en langdurige droogte zorgden voor omstandigheden die de hitte versterkten. In afbeelding 1 staat het verloop van de temperatuur, wind en neerslag op Schiphol (het dichtstbijzijnde KNMI-meetstation bij Amsterdam) gedurende deze periode afgebeeld. De temperatuur steeg snel aan het einde van de maand juli. Op vrijdag 27 juli tikte de temperatuur op Schiphol een uurgemiddelde van

35°C aan, wat tot de zomer van 2025 de hoogst waargenomen temperatuur op deze locatie was. Door de invloed van een lagedrukgebied boven de Britse Eilanden trok op zaterdagochtend 28 juli een regenfront over Nederland in noordoostelijke richting, met harde wind vanuit zee. Dit leidde tot flinke verkoeling: de temperatuur op 28 juli kwam niet boven de 25°C uit. Deze tijdelijke verkoeling zorgde er ook voor dat het vijfdaagse temperatuurgemiddelde uiteindelijk niet zo extreem uitviel.

Het weer gedurende 'hittegolfXL'



Abbeelding 2. Temperatuur (a) en windsnelheid en neerslag (b) tijdens de hypothetische hittegolfXL. Voor de temperatuur zijn de uurgemiddelde, daggemiddelde en vijfdaags gemiddelde waarde aangegeven. Met name de vijfdaags gemiddelde temperatuur en de nachtelijke temperaturen zijn flink hoger dan in 2018. Het temperatuurverloop wordt in de achtergrond van (b) weergegeven.

Hoe had de hittegolf ook kunnen verlopen?

Toch had het weer zich gedurende de hittegolf ook anders kunnen ontwikkelen, met nog intensere en langdurigere hitte tot gevolg. Dat blijkt uit de pluimverwachting van het Europese weermodel ECMWF (zie kadertekst methodologie). Eén van deze verwachtingen (hierna: hittegolfXL) werken we verder uit en wordt getoond in afbeelding 2 voor de locatie Schiphol.

Abbeelding 2a toont het temperatuurverloop tijdens hittegolfXL. Het begin hiervan vertoont sterke overeenkomsten met de waargenomen temperaturen in 2018. Na 27 juli houdt de hitte in dit hypothetische scenario echter nog vier dagen aan, voordat een langzame temperatuurdaling inzet. Waar in 2018 een lagedrukgebied voor tijdelijke afkoeling zorgde, heeft deze in sommige modelberekeningen, waaronder ook hittegolfXL, een meer noordelijke route. Hierdoor heeft het nauwe-

lijks een directe invloed op het weer op het Europese vasteland en blijft het regenfront uit 2018 uit. Ook zorgt de blijvende aanvoer van warme lucht uit het oosten voor aanhoudend hoge temperaturen in Nederland. Pas vanaf 3 augustus zorgen de veranderende windrichting en neerslag voor enige verkoeling.

Etmaal (24 uur)				5 dagen		
T (°C)	GEM.	MAX.	MIN.	GEM.	MAX.	MIN.
2018	29,5	35,2	23,5	25,7	31,5	20,1
Hitte- golfXL	30,5	36,3	23,7	29,7	35,8	22,9

Herhalingstijd (jaren)						
2018	40	6	20	8	4	7
	20-100	3,5-10	10-40	4-20	2,5-9	4-10
Hitte- golfXL	200	25	25	5000	1000	2000
	50-1000	10-40	12-60	700 - 200.000	200 - 10.000	400 - 30.000

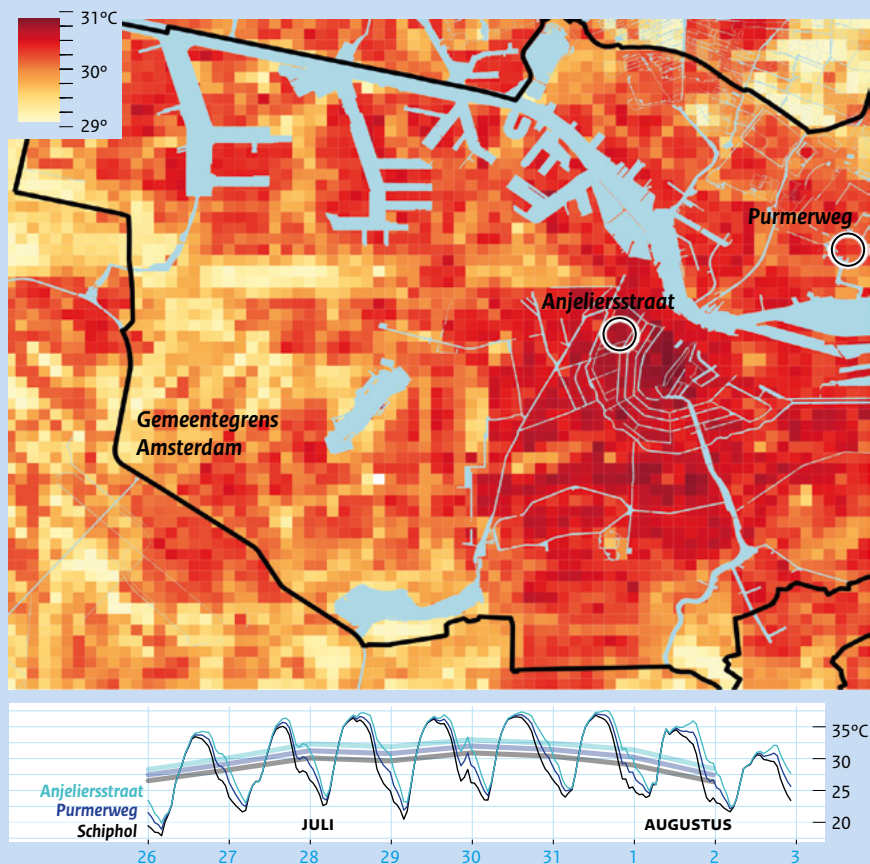
Tabel 1. Temperatuurwaarden (T) en herhalings-tijden (HT) voor beide hittegolven voor station Schiphol. De dagelijkse gemiddelden en maxima worden berekend over de periode van 0:00 tot 0:00 uur, de dagelijkse minima over de periode van 12:00 tot 12:00 uur. Voor de herhalingstijden is een 95% onzekerheidsband aangegeven. Vijfdaagse maxima en minima zijn gedefinieerd als het gemiddelde van de temperatuurextremen over een periode van 5 dagen.

Tabel 1 laat zien hoe hittegolfxL zich verhoudt tot de werkelijke hittegolf in 2018. In de hypothetische situatie is vooral de aanhoudende hitte uitzonderlijk. De daggemiddelde temperatuur blijft vier dagen achter elkaar rond de 30°C en de maximumtemperatuur zelfs hoger dan 35°C. Dit leidt tot hoge vijfdaagse gemiddelden, maximum- en minimumtemperaturen. De bijbehorende herhalingstijden voor de vijfdaagse temperaturen zijn dan ook erg lang. Deze kansen zijn echter specifiek afgeleid voor de locatie Schiphol. De kans dat vergelijkbare hitte op een willekeurige locatie in Nederland voorkomt (met name in het zuiden van het land) is een stuk groter. Omdat de modelsimulaties een meteorologisch realistisch scenario weergeven en de kans op hitte in toekomstige scenario's snel toeneemt, is in deze casus bewust gekozen voor een relatief zeldzame weersituatie, waarmee de maatschappelijke gevolgen goed kunnen worden beschreven.

Afbeelding 3. Stedelijk Hitte-eiland Effect in Amsterdam. a) Kaart met gemiddelde temperatuur in Amsterdam gedurende de 7 heetste dagen van de hypothetische hittegolfxL. Stadseffecten zijn het grootst in het centrum van de stad. Onder: b) Stadseffecten op de in a) aangegeven locaties. De dikke lijnen tonen de daggemiddelde temperatuur.

Stedelijk hitte-eiland effect op verschillende plekken in Amsterdam

Gemiddelde stadstemperatuur



Hitte in de stad

In deze casus gebruiken we temperaturen voor Schiphol. Deze locatie is representatief voor het landelijke gebied, maar niet voor stedelijk gebied. In steden is het tijdens een hittegolf gemiddeld een stuk warmer dan daarbuiten. Dit wordt ook wel het Stedelijk Hite-eiland Effect (SHE) genoemd. Door de bebouwing en bestrating wordt een groter deel van de inkomende zonnestraling geabsorbeerd. Daarnaast is er in de stad minder vegetatie dan in het landelijk gebied, waardoor er minder afkoeling is door verdamping. Afbeelding 3 toont de temperatuur van hittegolfXL in Amsterdam, inclusief SHE.

Afbeelding 3a toont de gemiddelde temperatuur in Amsterdam gedurende de zeven warmste dagen van hittegolfXL. De gemiddelde temperatuur gedurende deze tijdperiode is ongeveer anderhalve graad hoger in het centrum van de stad dan in het landelijk gebied eruiten.

Afbeelding 3b toont de voor SHE gecorrigeerde temperatuur tijdens hittegolfXL op twee locaties van het netwerk van stedelijke meetstati-

Afbeelding 4. Mindmap Exceptionele Hite, gebaseerd op de versie van Stichting CAS (Climate Adaptation Services)



ons in Amsterdam, AAMS. De Anjelijsstraat in de Jordaan bevindt zich in een dichtbebouwd deel van Amsterdam met weinig vegetatie in de omgeving. De etmaalgemiddelde temperatuur ligt hier tot wel 2 graden hoger dan op Schiphol en 's nachts kan het verschil zelfs oplopen tot meer dan 4 graden. De Purmerweg in Amsterdam-Noord is door de groenere omgeving en het open karakter (bij het meetstation) al een stuk koeler dan de Anjelierstraat. De temperatuur in de stad kan dus een stuk hoger zijn dan in het buitengebied, maar groenvoorziening en openheid van het straatbeeld kunnen de warmte temperen.

De impact van hitte

De hypothetische hitegolfXL laat zien hoe de temperatuur nog extremer had kunnen worden. Maar ook de zomer van 2018 zelf was uitzonderlijk heet en droog, met grote gevolgen voor Amsterdam. Spoorrails trokken krom, bruggen kwamen vast te zitten, metro's vielen uit, en wegen raakten beschadigd². De waterkwaliteit verslechterde, en juist toen veel mensen verkoeling zochten, golden op meerdere plekken negatieve zwemadviezen door blauwalg. Er was grote druk op het water in de stad en er werd extra gehandhaafd. De drinkwatervoorziening kwam onder druk te staan, en groenvoorzieningen liepen forse schade op: de gemeente moest ruim 1,4 mil-

joen euro uittrekken voor het vervangen van dode planten en bomen, en bijna een half miljoen voor extra sproeiwater^{3,4,5}. Ook stonden funderingen van gebouwen onder druk door lage grondwaterstanden³. In Nederland werd tijdens de zomer van 2018 een relatief beperkte oversterfte van ongeveer 100 mensen in een week geregistreerd, mogelijk mede het gevolg van een uitzonderlijk zwaar griepseizoen eerder dat jaar⁶. En dit is nog maar een deel van het totaalbeeld. Veel gevolgen door hitte, zoals ziekenhuisopnames, mentale en sociale klachten en productiviteitsverlies, worden in Nederland nog niet systematisch bijgehouden. Daardoor wordt de maatschappelijke impact van hitegolven waarschijnlijk sterk onderschat.

Toch bleef de situatie in Amsterdam in 2018 beheersbaar. Een koel front op 28 juli maakte een einde aan de hitte. In het hypothetische hitegolfXL scenario houden de hoge temperaturen echter dagen langer aan, met extra tropische nachten boven de 20 °C. Daardoor zouden de effecten die in 2018 al zichtbaar waren verder kunnen toenemen en meer sectoren raken. Warme nachten bovenop hete dagen zorgen ervoor dat gebouwen niet meer afkoelen, waardoor binnentemperaturen hoog blijven en het lichaam niet kan herstellen. De hitte blijft dan hardnekkig lang hangen, soms nog

dagen nadat het buiten is afgekoeld. Dit kan leiden tot slaapproblemen, concentratieverlies, meer mensen die onwel worden, ziekenhuisopnames en oversterfte. Uit onderzoek van de gemeente Amsterdam blijkt dat de negatieve effecten van hitte vooral mensen treffen die zich moeilijker kunnen aanpassen, bijvoorbeeld door hun economische positie of omdat ze huurder zijn⁷. Recent onderzoek van het RIVM laat zien dat de grootste sterfterisico's in Amsterdam optreden bij ouderen, en bewoners van buurten met een lage sociaaleconomische status en weinig publiek groen⁸.

Verder zou een groter verbruik van elektriciteit de elektriciteitsvoorziening plaatselijk onder druk kunnen zetten, met risico op uitval van koeling en airconditioning in supermarkten, openbaar vervoer en zorglocaties. Ook voertuigen zouden kunnen uitvallen door oververhitte accu's, waardoor reizigers stranden. Zulke verstoringen zouden ook de inzet van hulpdiensten extra kunnen bemoeilijken. Door gelijktijdige piekbelasting in meerdere regio's zouden politie, brandweer en ambulance overbelast kunnen raken, terwijl het aantal meldingen - van mensen die onwel worden, branden en storingen tot ordeverstoringen - sterk zou toenemen. Tegelijk zouden hulpdiensten en zorgprofessionals in de wijk te maken kunnen krijgen met een verminder-

de inzetbaarheid, omdat personeel bij hoge temperaturen korter inzetbaar is en zelf ook gezondheidsklachten kan krijgen. Bijstand tussen regio's zou kunnen vastlopen en inzet zou scherper moeten worden geprioriteerd. Zo zou extreme hitte een groot aantal sectoren tegelijk raken (zie afbeelding 4).

De aandacht voor extreme hitte in Nederland is de laatste jaren sterk toegenomen. In juni 2025 presenteerde de overheid een nationale hitteaanpak om beter voorbereid te zijn op extreme hitte⁹. Voor Amsterdam en de regio Amsterdam-Amstelland vormt hitte-adaptatie al langer een speerpunt, met initiatieven zoals het Amsterdams Hitteplan, steun aan dakloze mensen tijdens hitte, een aangekondigde subsidie voor zonwering en een knelpuntenaanpak om de openbare ruimte in kwetsbare wijken te verkoelen. Daarnaast heeft Veiligheidsregio Amsterdam-Amstelland als een van de eerste veiligheidsregio's in Nederland een uitgebreide oefenperiode gedraaid op het thema hitte.

Aangezien hittegolven steeds extremer worden door klimaatverandering, is de komende jaren voorbereiding, opschaling en structurele verankering nodig om voorbereid te zijn op zulke ontwrichtende hitte-scenario's. Informatie over de maatschappelijke gevolgen van hitte is nu nog versnipperd en komt vaak pas achteraf

beschikbaar. Door beter gebruik te maken van actuele gegevens over maatschappelijke effecten en deze te bundelen tussen het Rijk, gemeenten, veiligheidsregio's, vervoerders, waterschappen, zorgverleners, GGD, het Rode Kruis, RIVM en KNMI, kan Nederland tijdiger reageren en voorkomen dat extreme hitte uitgroeit tot een maatschappelijke crisis.

Hittegolven in een toekomstig klimaat

De hypothetische hittegolfXL, zoals omschreven in deze casus, zou volgens de ECMWF-verwachting al op kunnen treden in het huidige klimaat. De KNMI'23-klimaatscenario's¹⁰ tonen echter aan dat temperaturen in Nederland in de toekomst flink toe zullen nemen. De kans op een vergelijkbare hittegolf wordt in de toekomst dus alleen maar groter. Ter illustratie: het hoge-uitstootscenario leidt tot een opwarming van 3 tot 3,5°C in Nederland in 2100 ten opzichte van de periode 1990-2020 (voor het lage-uitstootscenario is dit 0,7 graden). Daar komt bij dat extreme temperaturen sterker toenemen dan het gemiddelde¹¹. Dit heeft te maken met regionale effecten en terugkoppelingen (bijvoorbeeld dat land sneller opwarmt dan zee). Zo neemt het aantal tropische dagen per jaar (dagen van 30 graden of hoger) in Amsterdam volgens de klimaatscenario's toe van ongeveer 4 in het huidige klimaat naar 27 in 2100 volgens het hoge-uitstootscenario. Het

gevolg van deze veranderingen is dat hittegolven zoals omschreven in deze casus nu nog zeldzaam zijn, maar in de toekomst een stuk vaker voor kunnen komen. Dat beeld zien we ook terug in de sterftcijfers: het RIVM heeft berekend dat er in het huidige klimaat ongeveer 110 mensen per jaar overlijden in Amsterdam ten gevolge van hoge temperaturen, maar zonder hitte-adaptatie en maatregelen kan dit door vergrijzing en klimaatverandering toenemen tot 215 à 680 per jaar rond 2100⁸.

In de toekomst neemt zowel de kans en duur als de intensiteit van hittegolven toe. Met een verdichte bebouwing en een vergrijzende bevolking staat Nederland voor de uitdaging om mensen, steden en systemen beter te beschermen tegen aanhoudende extreme hitte. Dit vraagt naast een effectieve crisisrespons, ook om proactieve risicobeheersing en structurele klimaatadaptatie. Goed aanpassen en tijdig handelen levert de grootste gezondheids- en veiligheidswinst op: hoe beter we voorbereid zijn, hoe kleiner de kans dat een hittegolf uitgroeit tot een maatschappelijke crisis. Mitigatie en adaptatie vullen elkaar daarbij aan: door de opwarming te beperken voorkomen we dat toekomstige hittegolven nog veel extremer worden, terwijl aanpassing helpt om de effecten van de onvermijdelijke opwarming te verminderen. ■

Methodologie

In deze casus kijken we hoe de hittegolf van 2018 met een iets andere meteorologische ontwikkeling nog extremer had kunnen zijn. Daarvoor gebruiken we ensembleverwachtingen gemaakt met het Europese weermodel ECMWF (zie inleiding). In de eerste paar dagen van de verwachting zit er nog weinig spreiding tussen de verschillende verwachtingen en lijken ze allemaal op de daadwerkelijk opgetreden hittegolf van 2018. Maar na verloop van tijd ontstaan er steeds grotere verschillen. In een aantal modelverwachtingen gaat het koudefront aan Nederland voorbij, waardoor de hoge temperaturen na 27 juli aanhouden. Hiervan is de hittegolf met de grootste gevolgen uiteindelijk als casus geselecteerd (zie afbeelding 2).

Deze ECMWF-verwachting hebben we op hoge resolutie doorgerekend met het regionale KNMI-klimaatmodel RACMO¹². Van dit model kennen wij de systematische afwijkingen (de zogenaamde model bias) goed. De RACMO-berekeningen zijn hier vervolgens voor gecorrigeerd, zodat de modelsimulatie consistent is met waargenomen temperatuurextremen. Omdat in dit onderzoek wordt gekeken naar hitte in Amsterdam, moeten we rekening houden met het feit dat het in een stedelijke omgeving vaak warmer is dan daarbuiten, ook wel het Stedelijk Hitte-eiland Effect (SHE) genoemd. Hoeveel warmer het in de stad is, hangt onder andere af van de meteorologische omstandigheden, bijvoorbeeld de windsnelheid en de inkomende korte golfstraling. Verder zijn

ook stedelijke invloeden van belang. Dichtere bebouwing zorgt voor meer warmte, terwijl vegetatie juist weer een dempende invloed op de temperatuur heeft. Op basis van meteorologische modeldata en fijnmazige satellietbeelden bepalen we voor elke dag de maximale waarde van SHE¹³. De dagelijkse gang van SHE wordt geschaald uit deze maximale waarde. Dit gebruiken we voor een ruimtelijk beeld van de stedelijke hitte, zoals weergegeven in afbeelding 3a. Voor de locatie-specifieke tijdreeksen in afbeelding 3b zijn in plaats van fijnmazige satellietbeelden metadata van een aantal AAMS-stations gebruikt ter bepaling van stedelijke SHE-invloeden. ■

Referenties

- European Environmental Agency (2023): [Hittegolven en andere klimaatgerelateerde uitersten bedreigen de gezondheid, vooral voor de meest kwetsbaren](#).
- Parool (2018): [Dit was de hittegolf van juli 2018](#).
- Parool (2020): [De stad heeft dorst: droogte gaat Amsterdam miljarden kosten](#).
- NIPV (2023): [Lessen uit crises en mini-crisis – Klimaatverandering en extreem weer. Boom bestuurskunde](#).
- Gemeente Amsterdam (2020): [Strategie Klimaatadaptatie Amsterdam](#).
- Centraal Bureau voor de Statistiek (2018): [Hitte heeft niet geleid tot veel meer sterfte](#).
- Gemeente Amsterdam, Stedelijk Strategieteam (2024): [Klimaatverandering en bestaanszekerheid: De impact van klimaatverandering op de bestaanszekerheid van Amsterdammers](#).
- RIVM (2025): [Temperatuur-gerelateerde sterfte in Amsterdam \(Kennisinotitie KN-2025-0093\)](#).
- Rijksoverheid. (2025): [Hitte aanpak 2025: samen voorbereid op de gevolgen van hitte](#).
- van Dorland, R. et al. (2023): [KNMI National Climate Scenarios 2023 for the Netherlands](#). KNMI scientific report WR23-02.
- de Vries, H. et al. (2024): [Western Europe's extreme July 2019 heatwave in a warmer world](#). Environmental Research: Climate 3.
- van Meijgaard, E. et al. (2012): [Refinement and application of a regional atmospheric model for climate scenario calculations of Western Europe](#). Wageningen Environmental Research KVR 054/12.
- Theeuwes, N. E. et al. (2017): [A diagnostic equation for the daily maximum urban heat island effect for cities in north-western Europe](#). International Journal of Climatology 37.

NATUURBRANDEN

Als de natuur in vuur en vlam staat

Op een dag in juli

“Na een zeer warme en droge juni zet het zonnige, droge weer deze maand door. Bovendien is de temperatuur in de afgelopen dagen flink gestegen, zelfs tot 36°C. Door het aanhoudende droge, warme en zonnige weer is de begroeiing in het gehele land erg dor en zeer brandbaar. Wanneer om 14:00 uur een brand ontstaat bij de parkeerplaats van het Doldersumerveld in Wateren, krijgt de aanhoudende oostenwind vat op de vlammen. Het vuur verspreidt zich in snel tempo westwaarts. Door het warme, droge weer ontstaan op veel andere plekken in de regio branden, waar grote blusacties nodig zijn. Bovendien is de capaciteit bij de brandweer lager doordat het zomervakantie is. Het is daardoor lastig om een volgende brandweerploeg te vinden naarmate de brand langer voortduurt. Wanneer het vuur uiteindelijk onder controle is, bevindt het voorste deel van de brand zich nog maar 500 meter van de buurtschap Boschoord, waar mensen lange tijd in de rook zaten. In enkele uren is meer dan 300 hectare natuurgebied verbrand.”

Zo had het kunnen gaan.
Maar zo ging het niet.



AUTEURS

- **Lone Mokkenstorm** KNMI
- **Brian Verhoeven** NIPV

Introductie

Natuurbranden zijn een complex en actueel thema in Nederland. Het risico hierop is in ons huidige klimaat vooral hoog in het voorjaar, wanneer planten nog grotendeels in de rust-periode verkeren en het vaak relatief droog is. Een recent voorbeeld hiervan is de brand in april 2025 op de Edese heide.

Maar ook in de zomer vormen natuurbranden tijdens perioden van langdurige droogte een risico: zo vond er op 7 augustus 2018 tijdens een zeer droge en warme zomer een grote heidebrand plaats in het Drentse Wateren, in Nationaal Park Drents-Friese Wold. In deze casus schetsen we een beeld van wat er had kunnen gebeuren als deze brand niet op 7 augustus was ontstaan, maar op 27 juli, een dag met nog brandgevaarlijkere weersomstandigheden. Met de droger wordende zomers in Nederland is dit een illustratieve casus voor risico's in ons veranderende klimaat en de mogelijke gevolgen voor hulpdiensten en de maatschappij.

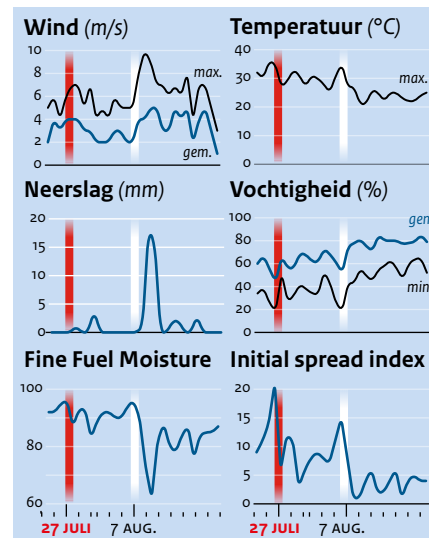
Wat is er gebeurd?

De brand bij Wateren

De zomer van 2018 staat te boek als de warmste

zomer in Nederland ooit gemeten. Ook was het een van de droogste zomers: in juli viel slechts 11 millimeter regen, de laagst gemeten waarde sinds het begin van de waarnemingen van het KNMI¹. Door deze langdurige droogte en warmte werd de begroeiing in het hele land erg dor en brandbaar. Daarnaast waren de weersomstandigheden op 7 augustus zodanig, dat er makkelijk een grote natuurbrand kon ontstaan. Een zuidelijke stroming voerde zeer warme en droge lucht aan. Op het KNMI-weerstation in Eelde, het dichtstbijzijnde station bij Wateren, werd die dag een maximumtemperatuur van 35,4°C gemeten. Daarnaast was de relatieve luchtvochtigheid die dag heel laag, met een minimum van 19% (afbeelding 1). De combinatie van de langdurige droogte en de hete en droge lucht die dag maakte dat de natuur zeer brandbaar werd. Dit uitte zich in een hoge waarde van de FFMC (*Fine Fuel Moisture Code*), een maat voor het vochtgehalte van de strooisellaag en andere fijne brandstoffen (afbeelding 1).

Rond 14:00 uur ontstond er een brand in Nationaal Park Drents-Friese Wold op het Doldersummerveld. De wind werd in de loop van de ochtend sterker en kwam steeds meer in vlagen, wat de verspreiding van de brand bevorderde (afbeelding 2). Dit is terug te zien in de waarde voor de ISI (*Initial Spread Index*) voor



Afbeelding 1: Meteorologische waarnemingen op het KNMI-weerstation in Eelde en daarvan afgeleide grootheden tussen 24 juli en 21 augustus. De *Fine Fuel Moisture Code* is een maat voor het vochtgehalte van strooisel en andere fijne brandstoffen en de *Initial Spread Index* is een maat voor de initiële verspreidingsnelheid van de brand. De dag van de daadwerkelijke brand in Wateren is aangegeven met een witte lijn, de dag van het hypothetische scenario, met nog brandgevaarlijkere weersomstandigheden, met een **rode** lijn.

die dag, een grootheid die FPMC combineert met windsnelheid om de initiële verspreidingssnelheid van een brand in te schatten (afbeelding 1). Drie campings in de omgeving werden uit voorzorg ontruimd. Er werden zestien blusvoertuigen uit drie veiligheidsregio's en een Chinookhelikopter ingezet. De eerste auto moest vluchten voor het vuur en verloor ongeveer twintig brandslangen². Rond 21:00 uur was de brand onder controle, nadat zo'n 35 hectare natuurgebied was verbrand.

Wat had er kunnen gebeuren?

Natuurbrand XL

Meerdere menselijke en natuurlijke factoren hebben invloed op het ontstaan en de uitbreiding van een natuurbrand. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de snelheid waarmee de brand wordt opgemerkt en gemeld, de beschikbaarheid van brandweerlieden en -middelen, de locatie van de ontsteking, beschikbaarheid van brandstof en verschillende meteorologische factoren.

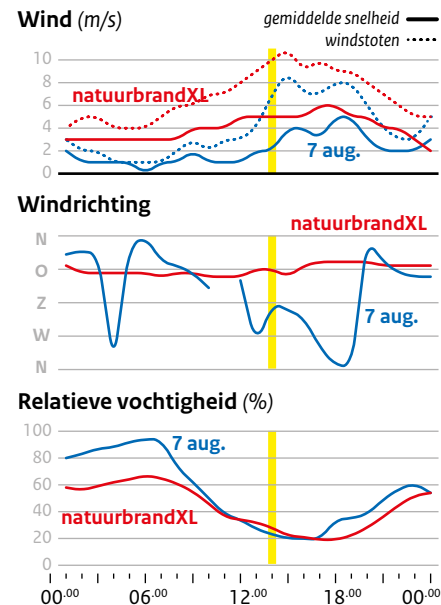
In de meetgegevens van het KNMI-weerstation in Eelde is te zien dat de brand plaatsvond in een langere periode met brandgevaarlijk weer, met meerdere warme, zonnige en droge dagen achter elkaar (afbeelding 1). Voor het hypothetische scenario (hierna: natuurbrandXL) analyseren we de gevolgen van een ontsteking op 27 juli in plaats van 7 augustus. De weers-

omstandigheden op deze twee dagen leken erg op elkaar, met een lagedrukgebied boven de Atlantische Oceaan en een front boven de Britse Eilanden. Wel was er een verschil wat betreft de wind. Op 27 juli was de windsnelheid duidelijk hoger en waaide de wind langdurig uit het oosten. Op 7 augustus was de wind meer variabel van richting en was de windsnelheid lager (afbeelding 2a en b). De relatieve vochtigheid was op beide middagen ongeveer even laag, maar was op 27 juli in de nacht, ochtend en avond lager dan op 7 augustus (afbeelding 2c).

De kans op ontsteking door menselijk toedoen (ook onbedoeld, bijvoorbeeld door een weggegooid sigaret of vonken uit een auto-uitlaat) is altijd aanwezig. Het is dus even aannemelijk dat er een ontsteking plaatsvond op 27 juli als op de dag van daadwerkelijke brand, 7 augustus.

Impact: inzet van hulpdiensten

Wanneer veel branden gelijktijdig plaatsvinden, heeft dit invloed op de inzet van mensen en middelen van hulpdiensten. Bij een tekort hieraan worden branden mogelijk minder snel of effectief bestreden, waardoor een eenmaal ontstane brand groter en sneller kan uitbreiden. Het KNMI natuurbrandimpactmodel helpt hierop te anticiperen door op basis van het weer een kansverwachting te geven van het



Afbeelding 2: Vergelijking van de meteorologische condities op de dag van de daadwerkelijke brand (7 augustus, blauw) met die van de hypothetische natuurbrandXL (27 juli, rood). Gemiddelde windsnelheid en windstoten, windrichting, relatieve vochtigheid op het KNMI-weerstation in Eelde. Het ontstaansmoment van de brand, 14.00 uur lokale tijd, is aangegeven met een gele lijn.

Methodologie

Brandgevaarlijk weer

Om het hypothetische scenario, natuurbrandXL, te bepalen is gekeken naar een tweetal scores die gebaseerd zijn op de internationaal veel gebruikte *Fire Weather Index* (FWI): de *Fine Fuel Moisture Code* (FFMC) en de *Initial Spread Index* (ISI). De FFMC geeft een inschatting van de brandbaarheid van fijne (dode) brandstoffen, zoals dode naalden of kleine takjes, op basis van de temperatuur, relatieve luchtvochtigheid, wind en neerslag. Dit zegt vooral iets over de kans op een ontsteking. De ISI combineert de FFMC-score met informatie over de wind en is een maat voor hoe snel een brand zich na ontsteking kan uitbreiden. Hierbij wordt nog geen rekening gehouden met het type brandstof dat ergens aanwezig is. Op 7 augustus had de ISI een waarde van 14,7 en de FFMC van 96, met respectievelijk een herhalingstijd van 1,5 en 16 jaar. Voor natuurbrandXL is binnen een periode van vier weken rondom de brand gezocht naar een dag

met hogere waarden. Dit bleek op 27 juli het geval (rode lijn in afbeelding 1): op deze dag was de FFMC nagenoeg hetzelfde, maar de ISI was hoger (20,5), met een herhalingstijd van 9 jaar. Het verschil in windsnelheid tussen beide dagen verklaart grotendeels het verschil in de verspreidingsnelheid, en dus de ISI. Door de vergelijkbare FFMC en de hogere ISI kan een goed beeld worden verkregen van het geïsoleerde effect van de wind op branduitbreiding.

Inzet van hulpdiensten

Om de potentiële impact van de brand op beide momenten te illustreren, is er met terugwerkende kracht een verwachting gemaakt met het KNMI natuurbrandimpactmodel voor de periode 23 juli tot en met 12 augustus 2018. Dit model is gebaseerd op de Database Natuurbranden van Brandweer Nederland en het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV) en meteorologische data van De Bilt. Op basis van meteorologische omstandig-

heden geeft dit model per dag een kansverwachting van het aantal keer dat een brandweereenheid uitrukt voor een natuurbrandmelding, als maat voor het aantal natuurbranden. Dit is relevante informatie voor de planning en inzet van capaciteit en middelen van de brandweer. Het model is nog in ontwikkeling, maar de eerste resultaten geven al een indicatie van hoe de kans van optreden van natuurbranden wordt beïnvloed door de weersomstandigheden.

Brandgedrag

Ook is er een analyse uitgevoerd met het natuurbrandverspreidingsmodel (NBVM). Dit is een model dat onder andere wordt gebruikt door de Veiligheidsregio's en landelijke natuurbrandspecialisten om een inschatting te krijgen van het brandgedrag en de potentiële impact van een actuele of potentiële natuurbrand. Het model houdt geen rekening met eventuele blusacties, maar ondersteunt het maken van strategische en

tactische keuzes bij het bestrijden van een brand.

Voor zowel 7 augustus als voor 27 juli zijn NBVM-simulaties uitgevoerd voor de originele ontstaanslocatie van de brand en voor een alternatieve locatie, die meer bevorderlijk is voor snelle verspreiding. Hierbij zijn de windrichting en -snelheid om 14:00 uur op KNMI-station Eelde gebruikt en zijn de brandstofcondities gelijk gehouden, aangezien de relatieve vochtigheid en maximumtemperatuur op beide data vrijwel identiek waren. Naast de meteorologische parameters is ook gebruikgemaakt van de brandstofmodellen en de ruimtverdeling daarvan voor het Doldersummerveld zoals bij het NIPV beschikbaar is. Met behulp van de informatie over de weersomstandigheden en de beschikbare brandstoffen is uiteindelijk de branduitbreiding gesimuleerd voor een periode van acht uur onder constante weersomstandigheden. ■

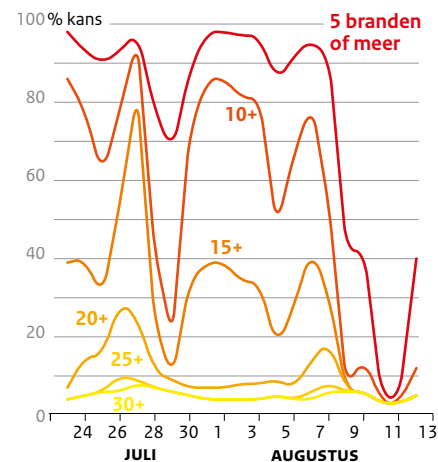
aantal natuurbranden dat op een dag in Nederland kan plaatsvinden. Het model laat zien dat er op beide dagen een grote kans was op natuurbranden (afbeelding 3), maar het weer op 27 juli was nog brandgevaarlijker dan op 7 augustus, met een nog hogere kans op veel natuurbranden tot gevolg. De berekende kans op twintig branden of meer was bijvoorbeeld 25% op 27 juli, terwijl dit op 7 augustus 19% was. Deze hoge kans op natuurbranden is het resultaat van een combinatie van factoren, waarbij met name de hoge maximumtemperaturen en de lage gemiddelde luchtvochtigheid op beide dagen een rol speelden volgens het model. Op 27 juli speelden ook de minimale relatieve vochtigheid en de 14-daagse regensom voorafgaand aan de dag een grote rol, terwijl de invloed van deze variabelen op 7 augustus kleiner was. Hoewel de weersituaties van 27 juli en 7 augustus dus subtiel van elkaar verschilden, hadden deze kleine verschillen, in combinatie met de verschillende meteorologische condities in de voorafgaande periode, wel degelijk invloed op de kans op veel natuurbranden.

Impact: brandgedrag

Om een beter beeld te krijgen van de mogelijke impact van het brandgevaarlijke weer op 27 juli en 7 augustus, is het van belang om naar meer aspecten te kijken dan alleen de kans van optreden. Als een brand eenmaal is ontstaan,

bepaalt het brandgedrag, naast de omgeving van de brand, namelijk grotendeels wat de uiteindelijke impact wordt. Bij veel wind en voldoende beschikbare brandstof kan een brand zich sneller uitbreiden. De brand heeft daardoor mogelijk meer slagkracht nodig en de brandweerinzet kan langer duren. Daarnaast kan een dergelijke brand sneller een (grotere) impact krijgen doordat het bijvoorbeeld gebouwen eerder kan bereiken. Uit simulaties met het natuurbrandverspreidingsmodel (NBVM) blijkt dat, wanneer uitgegaan wordt van dezelfde ontstaanslocatie als op 7 augustus, de uitbreidingssnelheid van de brand groter zou zijn op 27 juli dan op 7 augustus. Ook werd de gesimuleerde brand op 27 juli (afbeelding 4c) groter dan op 7 augustus (afbeelding 4a). Aangezien de temperatuur en luchtvochtigheid in het model op beide dagen gelijk zijn gehouden, is dit verschil toe te schrijven aan de verschillen in windrichting- en snelheid, in combinatie met de continuïteit en beschikbaarheid van brandstof. De brand loopt op 7 augustus alleen over het veld, terwijl deze op 27 juli daarnaast ook richting het bos loopt.

Vanwege dit grote verschil in brandstoftype en -beschikbaarheid langs de baan van het vuur kan een wat objectiever beeld van het effect van de wind en brandstof geschetst worden wanneer in het model voor beide



Afbeelding 3: De kans op het ontstaan van 5, 10, 15, 20, 25 en 30 branden of meer tussen 23 juli en 12 augustus 2018 op basis van het KNMI natuurbrandimpactmodel (in ontwikkeling).

dagen een andere, brandgevaarlijke ontstaanslocatie wordt gekozen, met een ontsteking bovenwinds en veel fijne brandstoffen benedenwinds. Deze locatie verschilt voor beide dagen. Als de brand op 7 augustus op deze brandgevaarlijkere locatie was ontstaan, was er sprake geweest van een gesimuleerde

gemiddelde uitbreidingsnelheid van 270 m/u en een brandgrootte van 196 ha. Was dit op 27 juli het geval geweest, dan was dit respectievelijk 833 m/u en 340 ha. Deze waarden kunnen niet vergeleken worden met de waargenomen verspreidingsnelheid bij de daadwerkelijk opgetreden brand, omdat de daarvoor benodigde informatie ontbreekt. Ze tonen echter wel het potentiële verschil in brandgedrag tussen beide dagen.

Dat brandgedrag zoals hierboven gesimuleerd goed mogelijk was geweest op 7 augustus, blijkt uit de ensembleverwachting op basis van het Europese weermodel ECMWF. Deze gaf op 6 augustus nog een kans van 84 procent dat de windsnelheid op 7 augustus hoger zou uitvallen dan de uiteindelijk gemeten 2 m/s. Deze gesimuleerde brandgroottes zijn voor alle vier de simulaties wel groter dan de in werkelijkheid verbrande 35 ha. Dat heeft met name te maken met het feit dat het model geen rekening houdt met eventuele blusacties. Het is dus vooral een maat voor de maximaal mogelijke grootte van de brand na 8 uur.

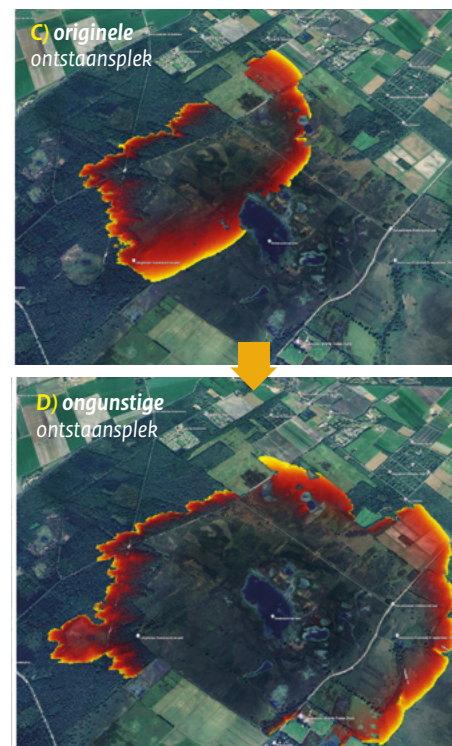
Het toekomstbeeld

Met name in de zomermaanden neemt het natuurbrandgevaar door klimaatverandering verder toe. Dat komt omdat het neerslagtekort vooral in de zomer toeneemt, al hangt de mate waarin af van het scenario: bij hoge-uitstoot

7 augustus



27 juli



Afbeelding 4: Gesimuleerde brandomvang met het natuurbrandverspreidingsmodel, 8 uur na het begin van de brand op 7 augustus op de originele ontstaanslocatie (A) en een alternatieve ontstaanslocatie (B), en op 27 juli op de originele ontstaanslocatie (C) en dezelfde alternatieve ontstaanslocatie (D).

zal dit het sterkst zijn. Dit zorgt voor een langer natuurbrandseizoen ten opzichte van nu. Tegelijkertijd betekent het natter en zachter worden van de herfst en winter dat het groeiseizoen langer wordt en de hoeveelheid vegetatie toeneemt, wat bij een droog daaropvolgend voorjaar zorgt voor een extra veel brandstof en daarmee een snellere en intensere verspreiding van vuur.

Conclusie

Deze analyse toont aan dat er binnen het huidige klimaat al extreme zomerbranden mogelijk zijn. Die kunnen door subtiele verschillen in de dagelijkse weeromstandigheden, zoals meer wind of wind uit een bepaalde richting, intenser worden en zich sneller verspreiden. Het verschil in brandgedrag tussen de twee dagen is groot, zeker als de brand op een brandgevaarlijke plek (afhankelijk van windrichting en brandstof) ontstaat. Wanneer in Nederland extreem droge omstandigheden samenvallen met een substantiële wind, zijn grootschalige en langdurige natuurbranden dus een reële mogelijkheid, ook in de zomer.

Als in 2018 de brand op het Doldersummerveld was uitgebroken op een dag met dezelfde droogtecondities als op 7 augustus, maar meer wind, dan was de brand waarschijnlijk lastiger te bestrijden geweest en had het een grotere impact kunnen hebben. Dit was niet

ondenkbaar geweest, zoals de weersverwachting op de dag voor de brand liet zien. Deze casus onderstreept daarom het belang van goede natuurbrandpreventie en –bestrijding in Nederland, ook in het klimaat van nu. ■

Referenties

- 1 KNMI (2018): [Seizoenoverzicht zomer 2018](#) (juni, juli, augustus)
- 2 Stoof, C.R. et al. (2024): In temperate Europe, fire is already here: The case of The Netherlands. *Ambio* 53.

KOU

Als een koudegolf Nederland twee weken gijzelt

Op een dag in februari:

“Er bevindt zich een krachtig hogedrukgebied boven Scandinavië dat in ons land leidt tot een sterke oostenwind, zeer lage temperaturen en veel sneeuw. Deze situatie houdt waarschijnlijk de komende twee weken aan. Het advies is alleen naar buiten te gaan als het echt nodig is. Eet voldoende en drink warme dranken. Sluit buitenkranen en waterleidingen in niet verwarmde ruimtes af. Ga goed voorbereid op reis: doe warme kleding aan, zorg voor een opgeladen telefoon en neem een deken of slaapzak mee. Bekijk voor vertrek de actuele situatie.”

Zo had het kunnen gaan. Maar zo ging het niet.



Sneeuwjacht op 7 februari 2021 in Flevoland.
FOTO TINEKE DIJKSTRA

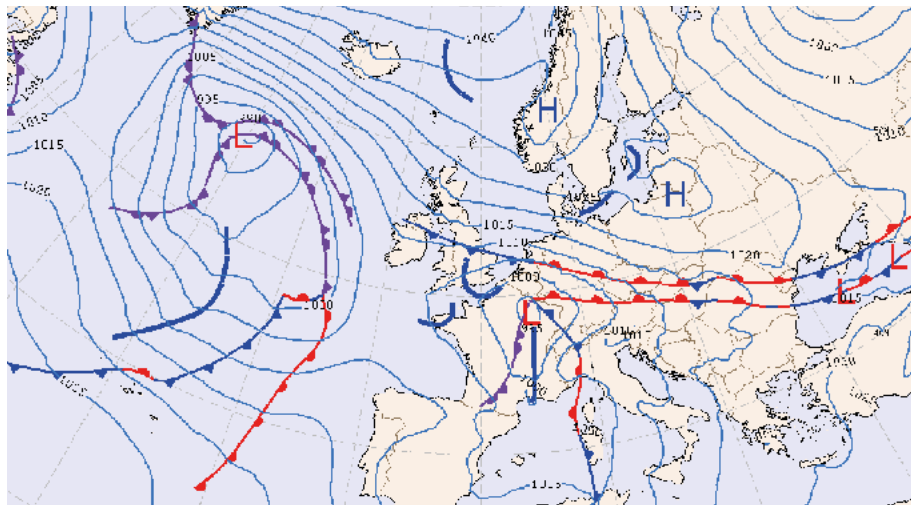
AUTEURS

- **Peter Siegmund, Hylke de Vries** KNMI
- *Gasunie*

Introductie

In het opwarmende Nederland lijkt langdurig strenge kou iets van vroeger. In de vorige eeuw was er immers gemiddeld om de drie jaar een koudegolf, terwijl er deze eeuw tot nu toe pas één was. Toch kunnen we ook in een opwarmende wereld in Nederland met een periode van koude te maken krijgen. Dat bleek

in de winter van 2021, toen de temperatuur een week lang onder het vriespunt lag. Dit gebeurde tijdens de coronapandemie, wat de schaats- en sneeuwpret extra welkom maakte. Maar volgens de 15-daagse weersverwachting (de 'weerpluim') van 7 februari had het nog veel kouder en ook langer koud kunnen zijn. In deze casus kijken we naar de extreme koudegolf die volgens de weerpluim mogelijk was, en wat daarvan het effect zou zijn op de effectieve temperatuur, een maat voor de vraag naar aardgas.



Afbeelding 1. Weerkaart van 7 februari 2021 o UTC (1 uur 's nachts Nederlandse tijd)

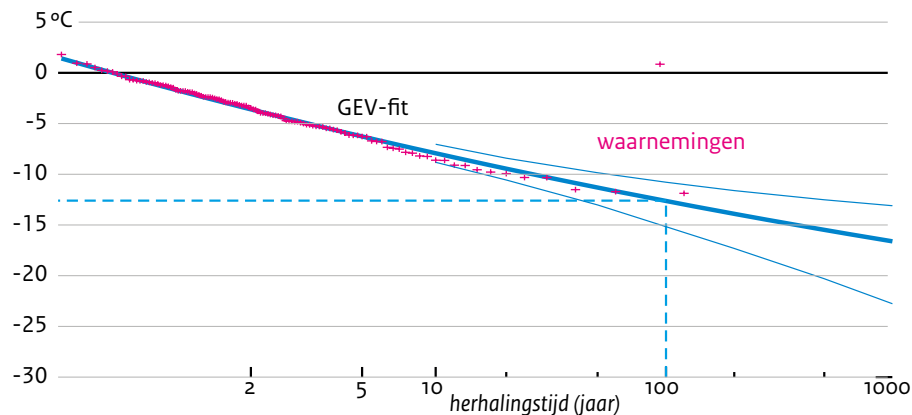
Achtergrondinfo

Effectieve temperatuur

Het gasverbruik neemt toe bij lagere temperaturen en hogere windsnelheden. De zogeheten effectieve temperatuur beschrijft dit en wordt berekend als $T - (U/1,5)$, waarbij T de daggemiddelde temperatuur is uitgedrukt in graden Celsius en U de daggemiddelde windsnelheid uitgedrukt in meters per seconde, beide in De Bilt². Herhalingstijden van lage waarden van de daggemiddelde en 7-daags gemiddelde effectieve temperatuur zijn eerder berekend voor het klimaat van 2008^{3,4}. Hierbij werd de waargenomen reeks van winterminima van de effectieve temperatuur vanaf 1905 omgerekend naar het klimaat van 2008, door de temperatuur van elk jaar te verhogen met de geleidelijke trend van de wintergemiddelde temperatuur tussen dat jaar en het jaar 2008.

Deze methode wordt ook in deze casus toegepast om herhalingstijden bij het huidige klimaat te berekenen. De methode geeft een conservatieve schatting van herhalingstijden van de winterminima, omdat de winterminima sneller zijn toegenomen dan de wintergemiddelde temperatuur. ■

Afbeelding 2. Herhalingstijd van winterminimum van de 7-daags gemiddelde effectieve temperatuur in De Bilt volgens een GEV-(gegeneraliseerde extreme waarde) benadering van waarnemingen in de Bilt in de periode 1906-2023, met 95%-betrouwbaarheidsinterval. De effectieve temperatuur is een maat voor de vraag naar aardgas en wordt berekend uit de temperatuur en de windsnelheid.



Achtergrondinfo

Leveringszekerheid van aardgas tijdens koude periodes

Gasunie Transport Services (GTS) is verantwoordelijk voor het transport en levering van gas binnen Nederland. In de Gaswet staat dat GTS als netbeheerder van het landelijk gastransportnet moet zorgen voor voorzieningen die voldoende zijn om pieklevering te kunnen verzorgen op een dag met een etmaalgemiddelde effectieve temperatuur (T_{eff_1d}) van -17°C . In de referentieperiode 1994-2023 heeft deze een herhalingstijd van 84 jaar².

GTS heeft verder de wettelijke plicht om het ministerie van Klimaat en Groene Groei jaarlijks een overzicht aan te bieden van de leveringsze-

kerheid van aardgas. Onderdeel van de leveringszekerheid is het waarborgen van de gaslevering aan beschermde afnemers in een periode met een uitzonderlijke hoge gasvraag. Volgens de Europese verordening gasleveringszekerheid moet een lidstaat onder meer voorzieningen treffen om de leveringszekerheid aan beschermde afnemers te garanderen in de volgende gevallen:

- extreme temperaturen gedurende een zeven dagen durende piekperiode die voorkomt met een statistische waarschijnlijkheid van eens in de 20 jaar;
- een periode van 30 dagen met een uitzonderlijk hoge gasvraag die voorkomt met een

statistische waarschijnlijkheid van eens in de 20 jaar;

- een periode van 30 dagen in het geval van versterking van de grootste afzonderlijke gasinfrastructuur onder gemiddelde winterse omstandigheden.

Omdat er een sterke relatie is tussen de gasvraag over een bepaalde periode en de effectieve temperatuur over diezelfde periode, is GTS zeer geïnteresseerd in onderzoek naar de statistische waarschijnlijkheid van extreem lage gemiddelde effectieve temperaturen gedurende periodes van 7 en 30 dagen. Daarbij is het ook belangrijk inzicht te krijgen in wat het effect van de opwarming is op de kans op deze extreme temperaturen. ■

Wat is er gebeurd?

De winterkou van 2021

Op 7 februari 2021 gaf het KNMI voor het hele land een weeralarm (code rood) voor sneeuw in combinatie met lichte tot matige vorst en veel wind¹. Er lag een hogedrukgebied boven Scandinavië en een lagedrukgebied boven Noordoost-Frankrijk. Daartussen voerde een krachtige oostenwind koude lucht onze kant op (afbeelding 1). Vanwege veel wind kreeg de weersituatie de stormnaam Darcy. In vrijwel het hele land viel sneeuw, plaatselijk meer dan 20 centimeter. De combinatie van harde wind en sneeuw zorgde voor sneeuwjacht, waarbij de sneeuw door de wind wordt voortgejaagd. De daggemiddelde temperatuur en windsnelheid in De Bilt waren $-4,1^{\circ}\text{C}$ en $8,0\text{ m/s}$. De daggemiddelde effectieve temperatuur ($T_{\text{eff_1d}}$) was $-9,4^{\circ}\text{C}$ (zie kader Effectieve temperatuur). Deze heeft in het klimaat van 2021 een betrekkelijk korte herhalingstijd van ongeveer 4 jaar en is dus niet heel erg extreem. Het was de laagste waarde sinds 1 maart 2018 ($T_{\text{eff_1d}} = -11,0^{\circ}\text{C}$), toen zowel de temperatuur lager ($T = -4,7^{\circ}\text{C}$) als de windsnelheid hoger was ($U = 9,4\text{ m/s}$). Er viel in 2018 echter geen sneeuw van betekenis.

Achtergrondinfo

Dagen met extreem hoog gasverbruik

De extreemste dag die Gasunie in haar bestaan heeft meegemaakt was 14 januari 1987 met een daggemiddelde effectieve temperatuur van -17°C . Die dag zijn alle zeilen bijgezet om alle gas te kunnen transporteren. Deze dag resulteerde in een transporthoeveelheid van 524 miljoen m^3 gas.

De hoogste top is 567 miljoen m^3 op 2 januari 1997. De effectieve temperatuur was toen -14°C maar de markt was veel groter dan in 1987. De kans op nog een dag met een daggemiddelde effectieve temperatuur van -17°C werd destijds geschat op eens in de 50 jaar en deze temperatuur is toen in bovengenoemde

gaswet opgenomen.

In maart van 1987 was het weliswaar minder koud dan in januari, maar omdat Noord-Nederland op 2 maart overvallen werd door een ijzelstorm waren de omstandigheden voor het verkeer en het gastransport veel moeilijker. In het gastransport is namelijk de bereikbaarheid en de ijsafzetting op installatie-onderdelen potentieel het grootste probleem.

Het besturingssysteem van GTS bevat een early warning systeem dat gebruik maakt van actuele meteorologische gegevens. Dit systeem attendeert op preventieve maatregelen die nodig zijn om extreme situaties het hoofd te bieden. ■

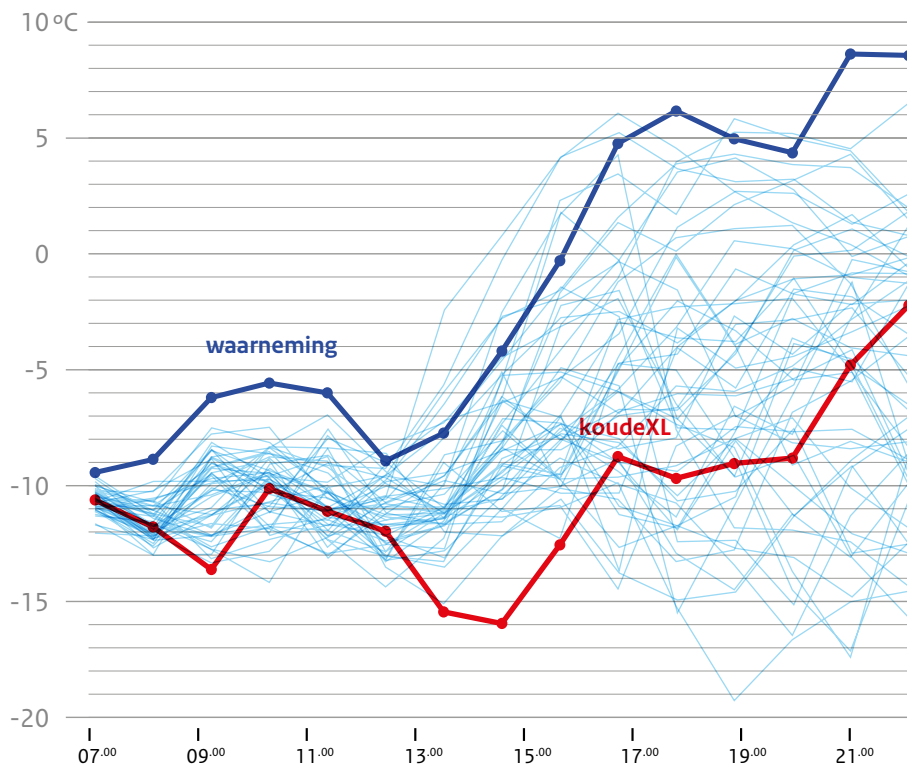
Wat had er kunnen gebeuren?

KoudeXL

We presenteren hier een voorbeeld van een meteorologische situatie met aanhoudende strenge kou, waarbij de 7-daags gemiddelde effectieve temperatuur, $T_{\text{eff_7d}}$, in het huidige

klimaat van 2025 een herhalingstijd heeft van ongeveer 100 jaar (zie kader Effectieve temperatuur). De $T_{\text{eff_7d}}$ bij een herhalingstijd van 100 jaar is $-12,6^{\circ}\text{C}$ (afbeelding 2, blauwe stip-pellijnen). We hebben naar zo'n extreme situatie gezocht in het KNMI-archief met dagelijkse

Effectieve temperatuur De Bilt weerpluim van 7 februari 2021 o UTC



Afbeelding 3. Weerpluim en waarnemingen van de daggemiddelde effectieve temperatuur in De Bilt van 7 februari 2021 o UTC.

weerpluimen voor De Bilt sinds 2008, gemaakt met het ECMWF-weermodel. Een weerpluim bestaat uit 50 verwachtingen met gelijke kans van optreden, die de onzekerheid van het weer in de komende 15 dagen laten zien. Een extreem lage $Teff_{7d}$ met een herhalingsjijd van ongeveer 100 jaar blijkt voor te komen in de weerpluim van 7 februari 2021, de dag waarop een weeralarm (code rood) werd gegeven.

De weerpluim van 7 februari 2021

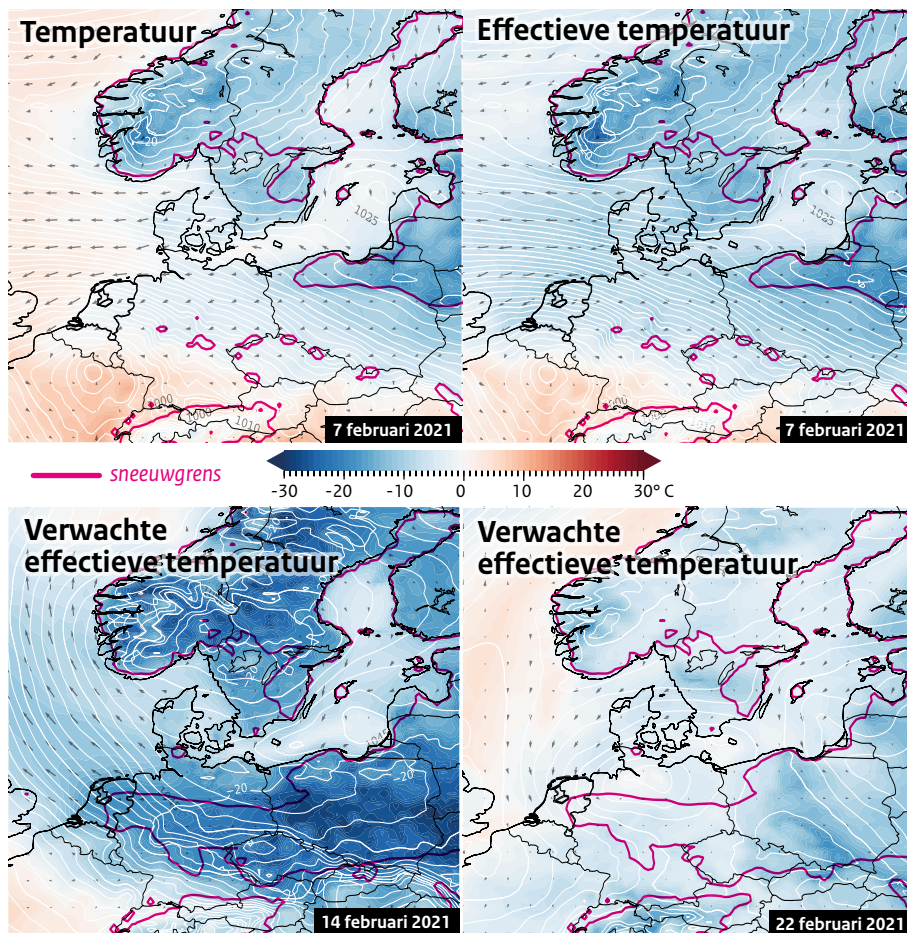
De weerpluim van de effectieve temperatuur voor de 15 dagen vanaf 7 februari 2021 is weergegeven in afbeelding 3. Bijna alle verwachtingen zijn kouder dan de waarnemingen (rode lijn): er was dus een aanzienlijke kans dat de effectieve temperatuur (veel) lager zou uitvallen dan uiteindelijk het geval was.

We richten ons op de verwachting die in afbeelding 3 is aangegeven met een blauwe lijn. Deze heeft voor de 7-daagse periode 9-15 februari een $Teff_{7d}$ van $-13,0^{\circ}\text{C}$, met in het klimaat van 2025 een herhalingsjijd van 122 jaar: een aannemelijk extreem. We noemen deze verwachting koudeXL. Tegen het einde van deze verwachting verdwijnt de kou weer, zodat de koude periode in zijn geheel kan worden beschouwd, inclusief het einde ervan. De 15-daags gemiddelde temperatuur van koudeXL is $-7,5^{\circ}\text{C}$, ruim 3 graden lager dan de $-4,2^{\circ}\text{C}$ die als vuistregel geldt voor het organiseren van

een Elfstedentocht.

Aan het begin van de verwachting, op 7 februari, is de pluim van de effectieve temperatuur iets te koud. Dat komt doordat de windsnelheid van de modelsimulatie dan systematisch te hoog is. Mogelijk heeft dit te maken met lokale factoren die de windsnelheid in De Bilt verminderen die niet in het weermodel zijn opgenomen. De pluim van de temperatuur is aan het begin van de verwachting wel vrijwel gelijk aan de waargenomen temperatuur. Verderop in de verwachting wordt de temperatuur echter systematisch te laag ingeschat: er is sprake van een systematische afwijking bij lage temperaturen. Als we daarvoor zouden corrigeren, zou de herhalingstijd aanmerkelijk korter zijn dan 122 jaar. We kiezen in deze casus niet voor een dergelijke correctie. In plaats daarvan beoordelen we of de meteorologische situatie, zoals het model die simuleert, ook

Afbeelding 4. Temperatuur of effectieve temperatuur (kleuren), windsnelheid en windrichting (pijlen), luchtdruk op zeeniveau (zwarte lijnen) en 20 centimeter-sneeuwdek contouren (roze lijnen), in de koudeXL-verwachting van de weerpluim van 7 februari 2021 o UTC: Temperatuur (linksboven) en effectieve temperatuur aan het begin van de weerpluim (rechtsboven); verwachte effectieve temperatuur op 14 februari o UTC (linksonder) en 22 februari o UTC (rechtsonder).



in het echt zou kunnen voorkomen, met een herhalingstijd in het huidige klimaat van eens in de ongeveer 100 jaar.

De leveringszekerheid van gas moet gegarandeerd zijn voor een T_{eff_7d} met een herhalingstijd van 20 jaar (zie kader Leveringszekerheid). In het klimaat van 2025 heeft deze een waarde van $-9,4^{\circ}\text{C}$. In de weerpluim van 7 februari wordt deze waarde in bijna alle verwachtingen bereikt. In de meeste verwachtingen betreft dit de eerste 7 dagen van de verwachting. De laagste waargenomen T_{eff_7d} in deze periode is $-7,5^{\circ}\text{C}$. Deze heeft in het klimaat van 2025 een herhalingstijd van 8 jaar.

Meteorologische situatie

In koudeXL is in de eerste 14 dagen de maximumtemperatuur lager dan 0°C (ijsdag) en op de meeste dagen komt de minimumtemperatuur onder de $-10,0^{\circ}\text{C}$ (strengte vorst). Er is daarmee sprake van een koudegolf, die gedefinieerd is als een aaneengesloten periode in De Bilt van minstens 5 ijsdagen, waarvan minstens 3 dagen met strengte vorst. In werkelijkheid was er net geen koudegolf. Er waren weliswaar voldoende ijsdagen (7 dagen achter elkaar) en er waren twee dagen met strengte vorst, maar de laagste temperatuur op de andere dagen bleef steken op $-10,0^{\circ}\text{C}$, dus net geen strengte vorst.

Afbeelding 4 toont op verschillende momenten in de verwachting het patroon in Noordwest-Europa van de temperatuur, de effectieve temperatuur, de windsnelheid en windrichting, de luchtdruk op zeeniveau en het gebied met minstens 20 cm sneeuwdek. Aan het begin, op 7 februari, lijkt de verwachting nog sterk op het waargenomen patroon (afbeelding 1), met een hogedrukgebied boven Scandinavië en een lagedrukgebied boven Noordoost-Frankrijk, met daartussen een sterke oostenwind.

Voor 7 februari is zowel het patroon van de temperatuur als dat van de effectieve temperatuur weergegeven (afbeeldingen 4a en 4b). Op die dag is met name boven de Noordzee, waar de windsnelheid hoog is, de effectieve temperatuur een stuk lager dan de temperatuur zelf. In de week na 7 februari neemt het hogedrukgebied boven Scandinavië in kracht toe. Op 14 februari bereikt de luchtdruk boven Scandinavië een hoge waarde van 1050 mbar (afbeelding 4c). Tot ver ten oosten van Nederland ligt er dan een dik pak sneeuw, waardoor er weinig of geen warmte van de bodem naar de atmosfeer gaat.

Er ontstaat vanaf 13 februari een zogeheten inversie, waarbij de temperatuur niet zoals gebruikelijk afneemt, maar toeneemt met de hoogte. De lucht wordt daardoor zeer stabiel, waardoor er nauwelijks of geen menging

is tussen de koude lucht bij de grond en de warmere lucht daarboven. In dergelijke omstandigheden kan de lucht bij de grond fors afkoelen. Door deze koelende effecten en door de krachtige wind, daalt de effectieve temperatuur op 13 februari tot -16°C (de daggemiddelde temperatuur en windsnelheid waren -12°C en 6 m/s). Deze T_{eff_1d} heeft in het klimaat van 2025 een herhalingstijd van 73 jaar.

Na 14 februari veranderen de sterkte en positie van de hoge- en lagedrukgebieden. De wind in Nederland draait naar het noordwesten en komt daarmee uit de richting van de relatief warme Noordzee, waardoor de effectieve temperatuur geleidelijk stijgt tot net onder het vriespunt aan het einde van de verwachting op 22 februari (afbeelding 4d). De koudegolf in de koudeXL-verwachting uit de weerpluim van 7 februari 2021, met daarin een extreem lage 7-daags gemiddelde effectieve temperatuur van $-13,0^{\circ}\text{C}$ die eens in de ruim 100 jaar voorkomt, is voorbij.

De meteorologische situatie in koudeXL lijkt sterk op de waargenomen meteorologische situatie in de winter van 1942, toen T_{eff_7d} in de periode 21-27 januari de laagste waarde ($-14,3^{\circ}\text{C}$) had van de meetreeks. Ook toen ontwikkelde zich boven Scandinavië een krachtig hogedrukgebied⁵, was er in Nederland overwegend oostenwind, en lag er een dik pak sneeuw⁶. Op 22 januari werd de achtste

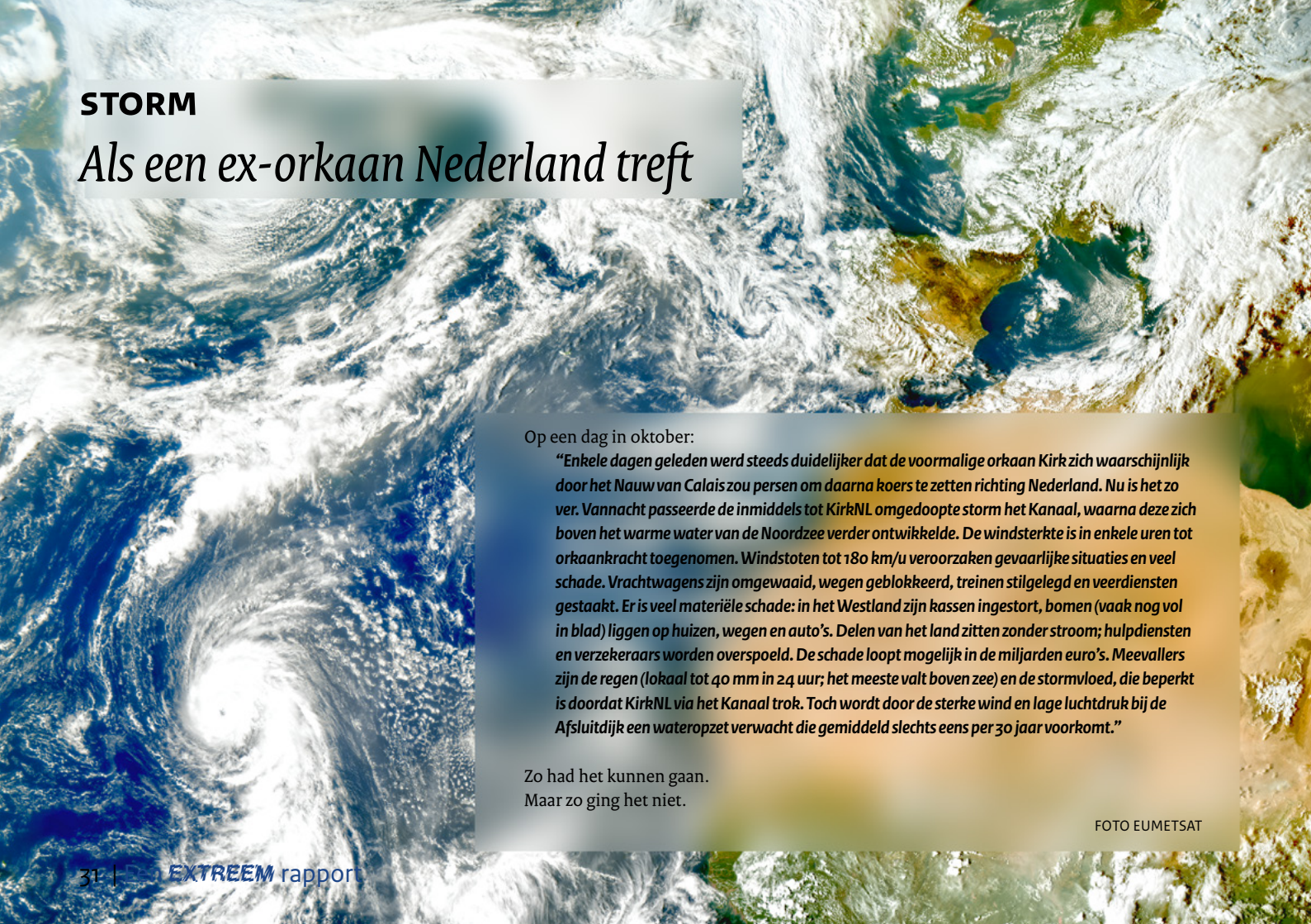
Elfstedentocht verreden. De meteorologische situatie in koudeXL ziet er dus geloofwaardig uit, en laat zien dat aanhoudende strenge kou, en de bijbehorende hoge vraag naar aardgas, in Nederland in het huidige, warmere klimaat nog steeds mogelijk is.

Klimaatverandering

Door klimaatverandering is de kans op kou afgenomen. In de vorige eeuw waren er in De Bilt 32 koudegolven, terwijl er in deze eeuw tot nu toe pas één was, in 2012. De *Teff_7d* in koudeXL van $-13,0^{\circ}\text{C}$ heeft in het klimaat van 2025 een herhalingstijd van 122 jaar, terwijl in 2008 de herhalingstijd nog 80 jaar was⁴. Door de opwarming van Nederland worden dagen met een lage effectieve temperatuur steeds minder waarschijnlijk: de herhalingstijd neemt toe. In het klimaat van 2050, zoals voorzien in de KNMI'23-klimaatsscenario's, is de herhalingstijd van een *Teff_7d* van $-13,0^{\circ}\text{C}$ 100 tot 150 jaar. In het klimaat van 2100 is de herhalingstijd 100 tot 700 jaar, afhankelijk van hoeveel broeikasgassen de mensheid nog gaat uitstoten. Een koudegolf als koudeXL kan dus ook in de toekomst nog steeds plaatsvinden, al wordt in een opwarmende wereld de kans hierop wel steeds kleiner. ■

Referenties

1. KNMI (2021): Code rood voor sneeuwstorm Darcy.
2. Uitvoeringsregeling Gaswet (2019).
3. de Valk, C. en P. Siegmund (2023): Update van de verwachte frequenties van extreem lage effectieve temperaturen, KNMI.
4. Kruizenga, G. (2024): Onderzoek naar periodes met uitzonderlijk lage temperaturen, GTS.
5. Lejenäs, H. (1989): The severe winter in Europe in 1941-42: the large-scale circulation, cut-off lows and blocking, Bulletin American Meteorological Society 70.
6. Piekema, J.J. (1984): Het sneeuwdek in Midden Nederland: dagelijkse metingen van de sneeuwhoogte 1950-1984, KNMI TR-50.

A satellite image of a large storm system over the North Sea, with swirling white clouds and dark blue water. The storm's eye is visible in the lower-left quadrant.

STORM

Als een ex-orkaan Nederland treft

Op een dag in oktober:

“Enkele dagen geleden werd steeds duidelijker dat de voormalige orkaan Kirk zich waarschijnlijk door het Nauw van Calais zou persen om daarna koers te zetten richting Nederland. Nu is het zo ver. Vannacht passeerde de inmiddels tot KirkNL omgedoopte storm het Kanaal, waarna deze zich boven het warme water van de Noordzee verder ontwikkelde. De windsterkte is in enkele uren tot orkaankracht toegenomen. Windstoten tot 180 km/u veroorzaken gevaarlijke situaties en veel schade. Vrachtwagens zijn omgewaaid, wegen geblokkeerd, treinen stilgelegd en veerdiensten gestaakt. Er is veel materiële schade: in het Westland zijn kassen ingestort, bomen (vaak nog vol in blad) liggen op huizen, wegen en auto's. Delen van het land zitten zonder stroom; hulpdiensten en verzekeraars worden overspoeld. De schade loopt mogelijk in de miljarden euro's. Meevallers zijn de regen (lokaal tot 40 mm in 24 uur; het meeste valt boven zee) en de stormvloed, die beperkt is doordat KirkNL via het Kanaal trok. Toch wordt door de sterke wind en lage luchtdruk bij de Afsluitdijk een wateropzet verwacht die gemiddeld slechts eens per 30 jaar voorkomt.”

Zo had het kunnen gaan.
Maar zo ging het niet.

FOTO EUMETSAT

AUTEURS

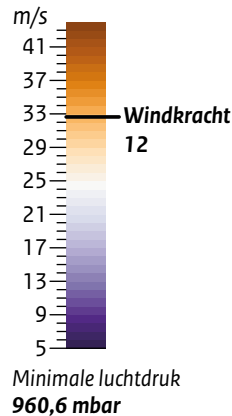
- **Hylke de Vries** KNMI
- **Maria del Socorro Fonseca-Cerda**
Vrije Universiteit Amsterdam

Introductie

Op 9 oktober 2024 bereikte voormalige orkaan Kirk het Europese vasteland met harde wind en veel regen. Kirk trok dwars door Frankrijk. De vele regen veroorzaakte overstromingen, door de wind vielen bomen om, en er overleed iemand door de storm. In Nederland had Kirk weinig impact. Kirk was niet de eerste voormalige orkaan die Europa trof. Meestal zijn ze tegen die tijd flink afgezwakt, na eerste het Caribisch gebied of de oostkust van de Verenigde Staten te hebben aangedaan. Maar soms nemen orkanen een meer directe route richting Europa, en zwaaien ze al eerder noordwaarts af. Kirk was ook zo'n 'afzwaaiër' en leek daarmee op orkaan Ophelia die in oktober 2017 Ierland trof. Ophelia is tot nu toe de meest noordoostelijk ontstane orkaan in de Atlantische Oceaan¹. Klimaatprojecties wijzen op een mogelijke toename in aantal en intensiteit van zulke orkanen in een verder opwarmende wereld. Daarmee neemt de kans toe dat Nederland een keer getroffen wordt. Om de maatschappij hierop voor te bereiden richt dit hoofdstuk zich op een voor Nederland extreme

Maximale windstoten

uurmaximum
windstoten 52,1 m/s



Abbeelding 1: KirkNL ligt pal boven Nederland op 10 oktober 2024 17 UTC. Kleuren tonen de maximale windstoten (m/s, dikke lijn markeert windkracht 12), contourlijnen de druk op zeeniveau (mbar).

Kirk-variant. Vragen die aan de orde komen zijn: (1) Hoe extreem had Kirk kunnen worden in termen van wind, windstoten, stormvloed en neerslag? (2) Kunnen we een schatting maken van de mogelijke schade? (3) Hoe gevoelig is de Kirk-variant voor klimaatverandering?

Wat is er gebeurd?**Orkaan Kirk (2024)**

In de eerste en tweede week van oktober 2024 domineerde orkaan Kirk de weerkaarten aan de Europese kant van de Noord-Atlantische Oceaan. Kirk vormde zich in de laatste dagen

van september boven de warme wateren van de oostelijke Atlantische Oceaan en bereikte al snel een intensiteit van Categorie-4 op de Saffir-Simpson schaal, met snelheden tot 240 km/u op 4 oktober. Maar in plaats van met de passaatwinden westwaarts mee te drijven richting het Caribisch gebied, zoals meestal het geval is, sloeg Kirk al snel rechtsaf, richting Europa, onder andere door afnemende zeewatertemperatuur en toenemende windschering (verandering van de windsnelheid en –richting met de hoogte). Tijdens de route naar het noorden veranderde Kirk geleidelijk in een normale extra-tropische stormdepressie (de zogenoemde extra-tropische transitie), maar de hoge luchtvochtigheid in zijn kern verraadde nog wel zijn tropische oorsprong. Voor de kust van Engeland lag rond 7 oktober een ander lagedrukgebied waardoor Kirk oostwaarts afboog in plaats van zijn route te vervolgen richting de Noordzee. Bij het aan land gaan werden aan de kusten van Portugal, Spanje en Frankrijk naast 6 tornado's ook zeer zware windstoten tot 138 km/u geregistreerd. Daarnaast veroorzaakte zware regenval overstromingen in Frankrijk en de Belgische Ardennen. De opgetreden storm Kirk zorgde voor minimaal 110 miljoen dollar aan schade. Voor Nederland had Kirk weinig gevolgen.

Methodologie

W e gebruiken ensembleverwachtingen van het Europese weermodel ECMWF. De verwachtingen die we gebruiken starten tussen 3 en 7 oktober 2024, toen Kirk op de Atlantische Oceaan lag en noordwaarts begon af te zwaaien. Iedere 12 uur worden vijftig meerdaagse verwachtingen gemaakt vanuit een net iets van elkaar verschillende beginsituatie (die nog steeds overeenkomt met de beschikbare waarnemingen). Door het chaotische karakter van de atmosfeer lopen die simulaties al snel verder uit elkaar. Hierdoor ontwikkelt Kirk zich in al deze simulaties ook weer net anders (sterker/zwakker, verder/minder ver naar het noorden etc.). Sommige van deze Kirk-varianten trokken recht over Nederland en hadden hier daarom mogelijk veel meer impact.

Om die impact in meer detail te kunnen bestuderen hebben we één zo'n voor Nederland extreme verwachting/mogelijkheid (hierna KirkNL) opnieuw gesimuleerd met behulp van een hoge-resolutie regionaal model. Bij de selectie hebben we vooral gekeken naar de sterkte van de windvlagen. In de analyse ligt de nadruk dan ook op de windvlagen en mogelijke stormschade, maar wateropzet en neerslag komen ook aan bod. De gevoeligheid van KirkNL voor klimaatverandering is bepaald door in de regionale model-simulaties de zeewatertemperatuur te verhogen of verlagen. Een schatting van de stormschade aan huizen en gebouwen is bepaald met behulp van een door de afdeling IVM aan de Vrije Universiteit Amsterdam ontwikkeld stormschade impactmodel^{2,3}. ■

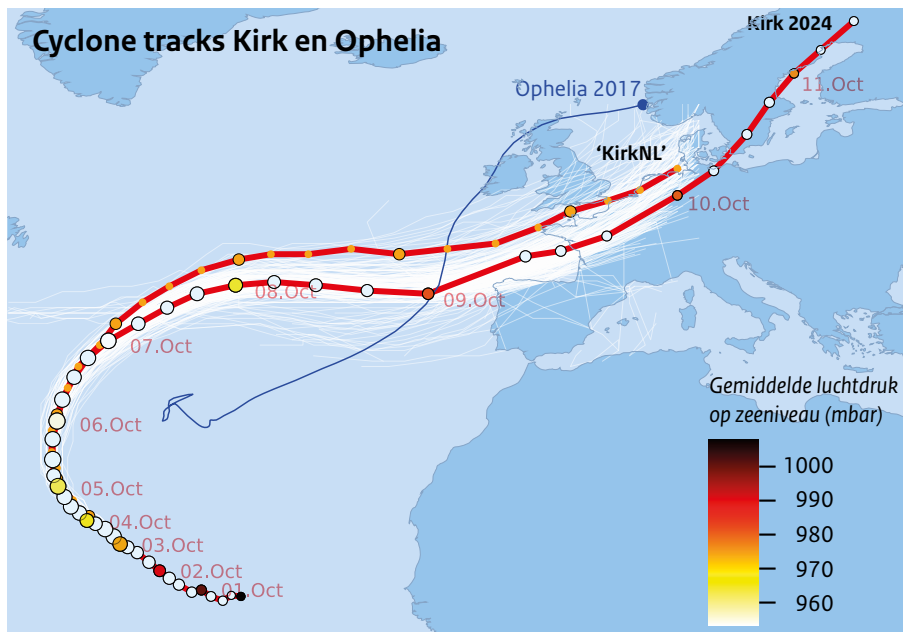
Wat had er kunnen gebeuren?

KirkNL

De weersverwachting van een paar dagen eerder liet zien dat Kirk zich ook heel anders had kunnen ontwikkelen. Het was een reële mogelijkheid dat Kirk over de Noordzee zou trekken en daar windsnelheden van orkaankracht zou hebben bereikt, met daarna windstoten boven land tot mogelijk 180 km/u. Zo'n voor Nederland extreme Kirk-variant zou hier tot grote schade hebben geleid, zeker omdat bomen begin oktober nog vol in blad staan.

Afgelegde route van Kirk en mogelijke varianten

Afbeelding 2 toont de route van de opgetreden orkaan Kirk (2024) en van Kirk-varianten (grijze lijnen) die voorkwamen in ECMWF-ensembleverwachtingen gemaakt tussen 3 en 7 oktober 2024. Voor de volledigheid is ook de route van orkaan Ophelia (2017) gegeven. Kirk ontstond zuidelijker dan Ophelia, maar trok snel noord- en oostwaarts om uiteindelijk in Frankrijk aan land te komen. De spreiding in de routes laat zien dat Kirk zowel een noordelijker als zuidelijker pad had kunnen nemen. Naast verschillen in route variëren de Kirk-varianten ook in intensiteit (luchtdruk in de kern van de storm) en in maximale wind(stoten), neerslag en wateropzet. Een aantal Kirk-varianten trok door het Kanaal. De oranje

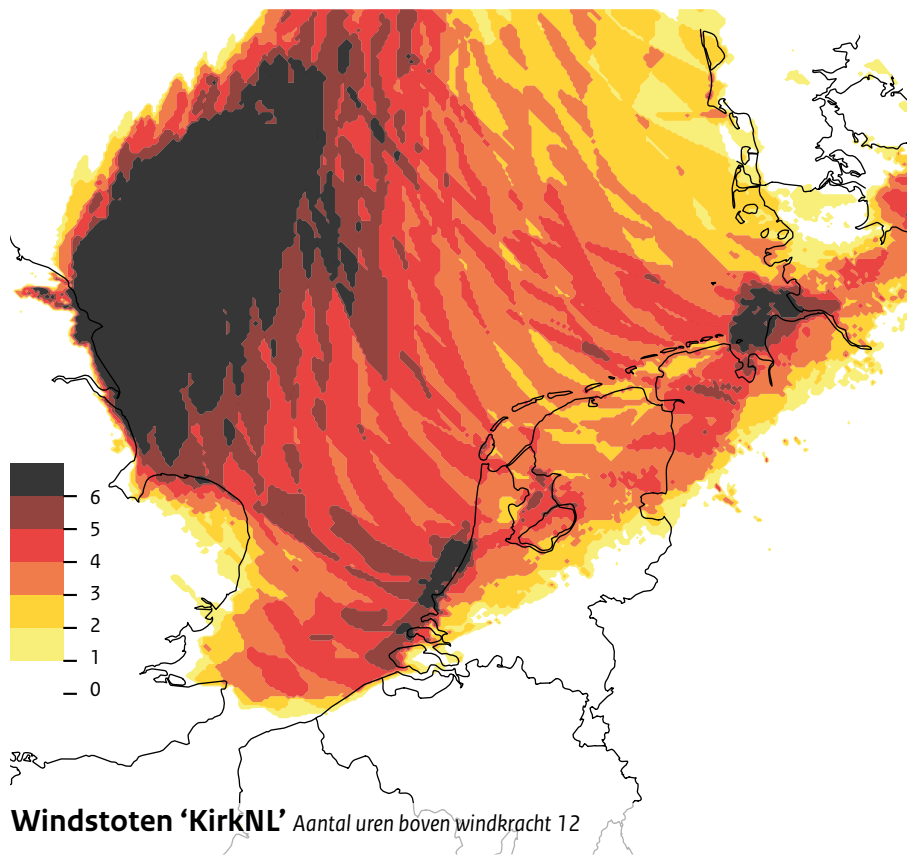


Afbeelding 2: De afgelegde baan van Kirk (2024) en van KirkNL (oranje). Grijze lijnen tonen andere stormbanen die op enig moment Noordwest-Europa bereikten, bepaald uit de ECMWF-ensembles gestart tussen 3 en 7 oktober (iedere 12 uur). Ter referentie is ook de baan van Ophelia (2017) getoond (blauw).

lijn geeft de baan van KirkNL. Duidelijk is dat de route hiervan in het begin erg veel leek op die van de opgetreden Kirk.

Plausibiliteit

Op het moment van het berekenen van de ensembleverwachting, zijn alle vijftig oplossingen van het ensemble ongeveer even



Afbeelding 3. Aantal uren met windstoten van tenminste windkracht 12 gedurende de passage van KirkNL.

waarschijnlijk. Hiermee is KirkNL dus een voor Nederland weliswaar extreme, maar aannemelijke variant die had kunnen plaatsvinden. Uit ieder ensemble kunnen we de kans op zware windstoten schatten. De kans op windstoten van meer dan 120 km/u in Nederland was maximaal 20 procent. Om een inschatting te maken van de algemene herhalingstijd van een storm met een sterkte zoals KirkNL, is verder onderzoek nodig.

Voor stormen die over de Atlantische oceaan Europa bereiken lijkt Nederland redelijk beschermt te liggen achter de Britse eilanden. Toch kostte het KirkNL in de modelverwachtingen weinig tot geen moeite om door het Kanaal te trekken. Eerder hebben we dit al geconstateerd door orkaan Ophelia (2017) met een (model) kunstgreep voor de ingang van het Kanaal te leggen en haar er doorheen te laten gaan⁴. Ook toen vormde het Nauw van Calais geen belemmering. Eenmaal op de Noordzee aangekomen nam KirkNL weer toe in intensiteit. Dit trad ook op bij andere varianten die de Noordzee bereikten. Deze snelle intensivering wordt ook gezien bij een ander type depressie dat door het Kanaal trekt (beter bekend onder de naam 'Kanaalratten').

Wind

Het grote gevaar bij harde wind en windstoten is onderschatting ("Het waait in Nederland

toch altijd?”). De rukwinden die vaak om hoge gebouwen spelen geven een indruk hoe gevaarlijk en heftig zware windstoten kunnen zijn. In het geval van KirkNL zouden die oplopen tot 187 km per uur (52 m/s, zie afbeelding 1). Meer dan de helft van Nederland

zou gedurende meerdere uren windstoten van (ruim) boven de 120 km/u te verduren krijgen (afbeelding 3). Deze extreem sterke windstoten begonnen 's ochtends in Zeeland, bereikten de Randstad rond lunchtijd, en verlieten pas tegen middernacht het land bij Groningen.

Wind versus regen

landelijk gemiddelde

50 - maximale 24-uurs
neerslagsom
(mm)

40 -

30 -

20 -

10 -

0 -

10

15

20

25

30

maximale windvlagsterkte (m/s)

Min. luchtdruk
(mbar)

1000

995

990

985

980

975

970

965

960

'KirkNL'

Afbeelding 4. Maximale 24-uurs neerslagsom, gemiddeld over Nederland, uitgezet tegen de maximale windvlagsterkte voor de verschillende verwachtingen zoals bepaald met het Europese weermodel ECMWF. De grotere cirkel is KirkNL. Kleuren geven de minimale luchtdruk boven Nederland.

Regen

De regen was een meevaller in KirkNL. Met plaatselijk 40 mm in 24 uur viel er in Nederland veel regen, maar toch minder dan verwacht op basis van zijn tropische oorsprong. De meeste regen viel boven de Noordzee en het oosten van Engeland. Dat er minder viel kwam ook doordat KirkNL vrij snel over het land trok. Er zit echter veel variatie in de Kirk-varianten (afbeelding 4). KirkNL was een van de meest extreme mogelijke verwachtingen in termen van windstoten, maar andere (iets zuidelijker passerende) mogelijkheden gingen bijvoorbeeld gepaard met minder wind maar meer neerslag boven Nederland (tot plaatselijk 80 mm in 24 uur boven delen van de Randstad). Details van de route en de treksnelheid zijn dus uitermate belangrijk en medebepalend hoeveel neerslag uiteindelijk plaatselijk valt.

Stormvloed en extremiteit

Een andere meevaller was de stormopzet voor de Noordzeekust. Omdat Kirk vanuit het zuidwesten kwam, gaven de meeste Kirk-mogelijkheden geen extreem hoge waterstanden voor de Nederlandse kust, wat vooral bij een noordwesterstorm een risico is. Toch veroorzaakte KirkNL door zijn zeer sterke windveld en lage luchtdruk langs de Afsluitdijk bij Kornwerderzand hoog water. Daar nam de totale waterhoogte in slechts enkele uren toe

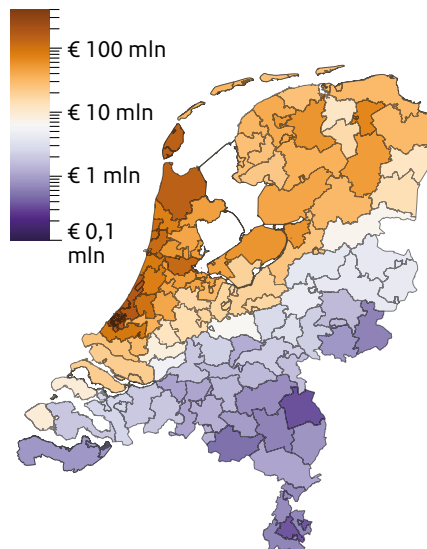
tot ongeveer 3,5 meter boven NAP. Deze snelle toename is opmerkelijk. Wanneer we corrigeren voor het astronomisch getij is de scheve opzet (die de meteorologische component van de wateropzet meet) ongeveer 2,6 meter. Dit correspondeert met een herhalingstijd van 30 tot 40 jaar. Nederlandse dijken zijn hier tegen bestand.

Eerder hebben we in een modelstudie orkaan Ophelia (2017) kunstmatig verplaatst en over Nederland laten trekken*. Met name op het IJsselmeer leidde dit toen tot hoge golven maar net geen kritieke waterstanden. De verwachting is dat ook bij KirkNL de wateropzet en golfhoogte op het IJsselmeer geen kritieke waarden zouden bereiken. Om hierover uitsluitsel te geven zouden meer gedetailleerde berekeningen uitgevoerd moeten worden.

Stormschade

De stormschade aan gebouwen door de heftige windstoten zou mogelijk in de miljarden euro's lopen (met als beste schatting 2,7 miljard euro, zie afbeelding 5a). Noord- en Zuid-Holland worden het hardst getroffen terwijl het zuiden gespaard blijft. De kustregio en verstedelijkte Randstad springen eruit. Het stormschademodel is getraind en getest op winterstormen, maar wordt hier toegepast op een storm in de herfst. Omdat in oktober een groot deel van de bomen nog in blad staat,

Potentieel verlies: € 2,7 miljard

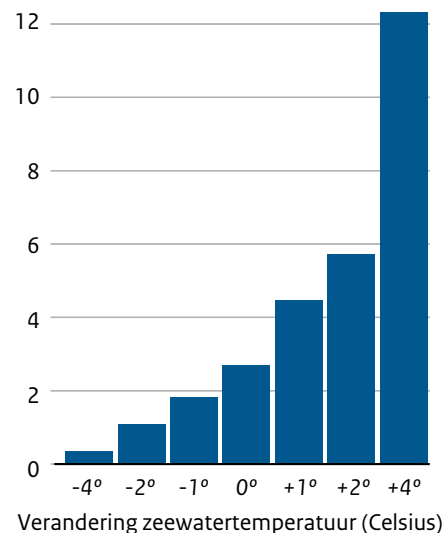


Afbeelding 5: (a) Geschatte kosten door stormschade aan huizen en gebouwen ten gevolge van KirkNL, in miljoenen euro's. Hierbij is onderscheid gemaakt tot op postcode level-2 niveau. (b) Geschatte kosten door KirkNL, verkregen uit modelsimulaties met aangepaste zeewatertemperatuur.

worden schade en risico's aan infrastructuur door vallende bomen onderschat. Validatie van (model)windstoten onder zulke extreme situaties is lastig. We schatten in dat het hoge-resolutie model (HCLIM-AROME) de hardste

Potentiële verliezen

in miljarden €



windstoten in KirkNL met maximaal 5% zal over- of onderschatten. Onderschatting van 5% leidt tot een 58% toename in de kosten, terwijl bij een 5% overschatting van de windstoten de schade 48% lager uit zou komen. De windscha-

de hangt dus sterk af van de windstootsterkte: iets hardere (of juist zachtere) windstoten zorgen voor meer (of juist minder) schade.

De berekende schade ten gevolge van KirkNL is zeer fors, zelfs als het model de windstoten enigszins zou overschatten. De voornaamste oorzaak hiervan is dat bij KirkNL de zeer zware windstoten tot diep in het binnenland voorkwamen. Ter vergelijking, de gerapporteerde stormschade in Nederland (huizen, infrastructuur, bomen, etc.) ten gevolge van winterstorm Eunice (februari 2022) was met ongeveer 750 miljoen euro een stuk lager. Hetzelfde schade-model als we hier gebruiken komt bij storm Eunice tot 210 miljoen euro aan geschatte schade aan huizen en gebouwen. De totale schade is dus substantieel hoger dan alleen die aan huizen en gebouwen (zoals berekend uit het stormschademodel). Vergeleken met KirkNL was zomerstorm Poly (5 juli 2023, met grote problemen Noord-Holland) helemaal een 'kleintje' (ongeveer 70 miljoen euro gerapporteerde schade).

Gevoeligheid voor zeewater-temperatuur en klimaatverandering

Al in het huidige klimaat heeft een relatief groot percentage van de sterkste Europese stormen in de herfst een tropische voor- geschiedenis⁵. Ze hebben sterkere wind en

intensere neerslag. Modelstudies tonen aan dat orkanen in een warmere wereld sterker worden en mogelijk vaker Europa bereiken. Nu nemen orkanen slechts sporadisch de 'directe' route richting Europa (dat wil zeggen zonder eerst naar het Caribisch gebied of de oostkust van de Verenigde Staten te trekken). Kirk deed dit ook en leek daarmee op de al genoemde orkaan Ophelia (2017). Door opwarmende oceanen breidt het orkaan gebied zich langzaam noordwaarts uit en wordt het orkaanseizoen langer. Hierdoor groeit de kans dat tropische stormen Europa en Nederland treffen. Dat we nu al zo noordelijk orkanen zoals Ophelia in de waarnemingen zien, is wel opmerkelijk. Ophelia leek op een orkaan die voorkwam in een hoge-resolutie klimaatsimulatie gemaakt voor het eind van de 21ste eeuw bij een scenario met hoge emissies⁶. De waarnemingen lijken dus op de klimaatprojecties vooruit te lopen.

Om de gevoeligheid van KirkNL voor klimaatverandering te bepalen, hebben we de regionale modelberekeningen van KirkNL herhaald met hogere en lagere zeewatertemperatuur (ten opzichte van de waarnemingen). De Noord-Atlantische Oceaan was in oktober 2024 een graad warmer dan gemiddeld in oktober (langjarig gemiddelde 1991-2020). Deze afwijking komt door een combinatie van de systematische opwarming en natuurlijke

fluctuaties. De maximale toegepaste opwarming is 4 graden. Dit is vergelijkbaar met de opwarming van de herfst in Nederland in 2100 in een hoge-uitstoot scenario.

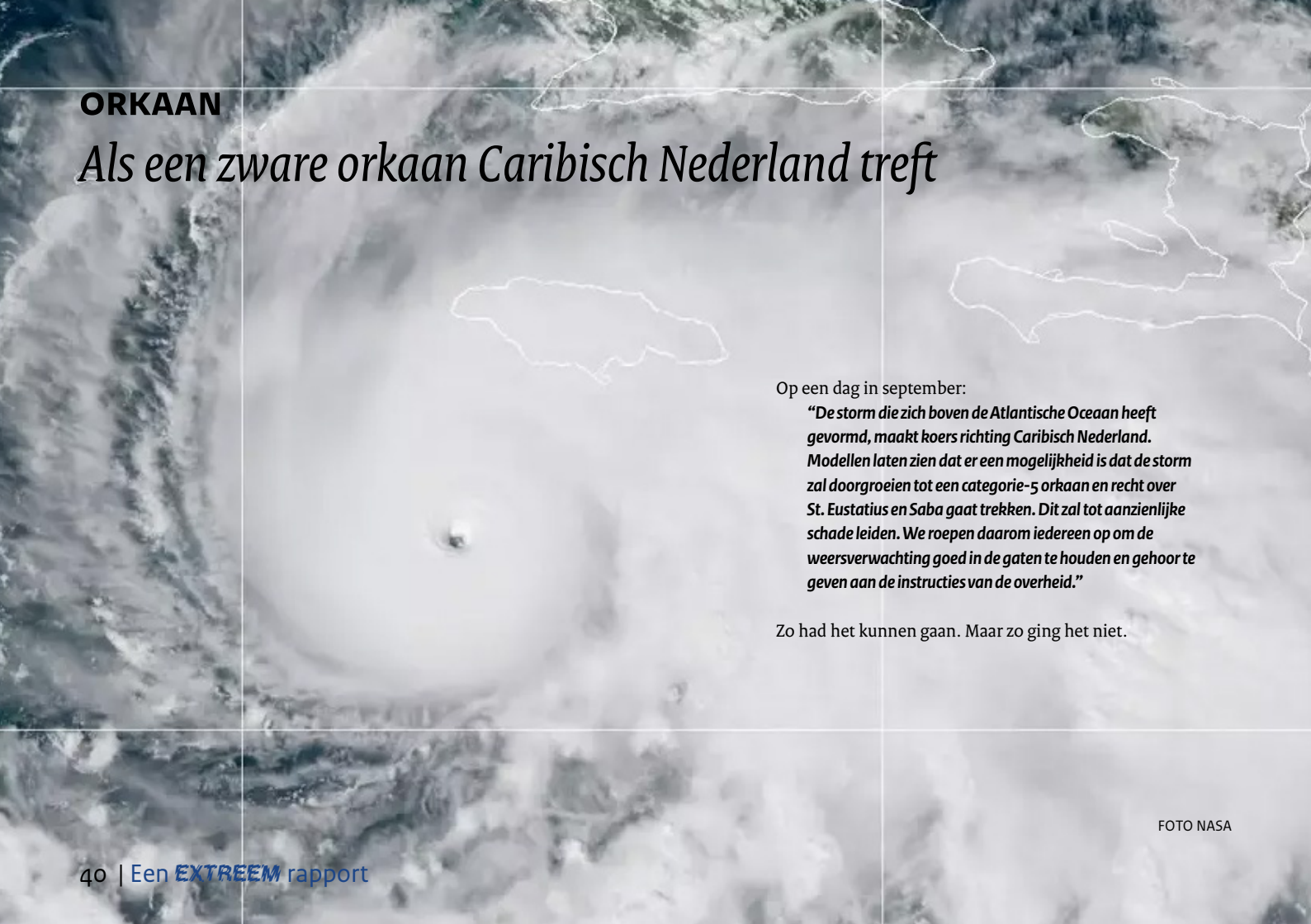
KirkNL reageert heftig op de verandering van zeewatertemperatuur: Bij toename van zeewatertemperatuur wordt KirkNL sterker, bij een afname zwakker. Bij de hier maximaal toegepaste opwarming van +4 graden ten opzichte van de referentie simulatie verdiept de luchtdruk in de kern zich met ongeveer 10 mbar en neemt de maximale windstootsterkte toe tot 234 km/u (65 m/s). Toename in de neerslag boven de Noordzee bevestigt dat de storm hieraan veel energie onttrekt. Door de intensivering zou de schade aan gebouwen sterk oplopen, tot meer dan 10 miljard euro in het meest extreme geval (afbeelding 5b). Omgekeerd geeft het experiment met koelere zeewatertemperatuur een afname in stormintensiteit (en daarmee in stormschade). Dit laat zien dat zonder de al opgetreden klimaatverandering de schade dus minder groot geweest zou zijn. Daarnaast zou zonder klimaatverandering de kans op een afzwaaiër zoals Ophelia of Kirk ook kleiner zijn. Bij toenemende opwarming wordt deze kans juist groter.

Samenvatting

In dit hoofdstuk is gekeken naar de ontwikkeling van orkaan Kirk (2024) en naar een variant (genaamd KirkNL) met een grote impact op Nederland. De resultaten laten zien dat zelfs in het huidige klimaat voormalig tropische stormen Nederland kunnen bereiken, hier veel impact hebben, met mogelijk miljarden euro's schade tot gevolg. Daarnaast reageert KirkNL sterk op de zeewatertemperatuur, net zoals Ophelia (2017) en zomerstorm Poly (2023), waardoor de verwachting is dat zulke stormen bij verdere mondiale opwarming nog sterker kunnen worden. ■

Referenties

1. Ribberink, M., et al. (2025): Tropical Cyclone Intensification and Extratropical Transition under Alternate Climate Conditions: A Case Study of Hurricane Ophelia (2017). *EGUsphere Preprint*.
2. Fonseca Cerda, M. D. S. et al. (2024): Empirical evaluation of windstorm losses and meteorological variables over the Netherlands. *Natural Hazards* 121.
3. Ederen, D. van, et al. (2025): A high-resolution compound vulnerability function for European winter storm losses. *NPJ Nat. Hazards* 2
4. de Vries, H. et al. (2018): Als orkaan Ophelia Nederland had bereikt. *Meteorologica* 2018–3
5. Dekker, M. M. et al. (2018): Characteristics and Development of European Cyclones with Tropical Origin in Reanalysis Data. *Climate Dynamics* 50.
6. Baatsen et al. (2014): Severe Autumn Storms in Future Western Europe with a Warmer Atlantic Ocean. *Climate Dynamics* 45.



ORKAAN

Als een zware orkaan Caribisch Nederland treft

Op een dag in september:

“De storm die zich boven de Atlantische Oceaan heeft gevormd, maakt koers richting Caribisch Nederland. Modellen laten zien dat er een mogelijkheid is dat de storm zal doorgroeien tot een categorie-5 orkaan en recht over St. Eustatius en Saba gaat trekken. Dit zal tot aanzienlijke schade leiden. We roepen daarom iedereen op om de weersverwachting goed in de gaten te houden en gehoor te geven aan de instructies van de overheid.”

Zo had het kunnen gaan. Maar zo ging het niet.

FOTO NASA

AUTEURS

- **Nadia Bloemendaal**
KNMI, Vrije Universiteit Amsterdam
- **Elco Koks** Vrije Universiteit Amsterdam

Introductie

Orkanen behoren tot de schadelijkste en dodelijkste natuurrampen op aarde, en kunnen voor veel impact zorgen wanneer ze aan land komen. De Caribisch Nederlandse eilanden, Bonaire, St. Eustatius, en Saba (de zogenoemde BES-eilanden), liggen in een gebied waar orkanen regelmatig voorkomen. Het is daarom belangrijk om te begrijpen hoe de mogelijke gevolgen van een zware orkaan op de eilanden eruit kunnen zien.

In deze casus kijken we wat de gevolgen zouden zijn voor de bebouwing, als een tweetal orkanen, die het dichtst bij de eilanden in de buurt kwamen (Irma en Ivan), direct over de eilanden heen zouden zijn getrokken.

Wat is er gebeurd?

Orkanen Irma (2017) en Ivan (2004)

De zwaarste orkaan die sinds de jaren negentig nabij Saba en St. Eustatius voorbij is getrokken, is orkaan Irma (2017). Orkaan Irma was een categorie 5-orkaan met windsnelheden boven de 280 km/u toen ze door het Caribisch gebied raasde. Het oog (de kern) van Irma trok

op ongeveer 50 km van Saba en St. Eustatius langs en kwam op 6 september 2017 aan land in het nabijgelegen St. Maarten. Aan de Nederlandse zijde van dat eiland was ongeveer 70% van de gebouwen zwaar beschadigd; aan de Franse zijde was dit 90%, waarvan meer dan de helft onbewoonbaar verklaard werd¹. Het vliegveld en de haven raakten ook zwaar beschadigd. Er vielen 4 doden als gevolg van orkaan Irma.

Saba en St. Eustatius ondervonden voornamelijk windschade van de orkaan, waarbij bomen omwaaiden en daken van huizen loskwamen². Saba en St. Eustatius ondervonden ook problemen in de aanvoer van goederen vanuit St. Maarten, omdat de haven en het vliegveld daar zwaar beschadigd waren³.

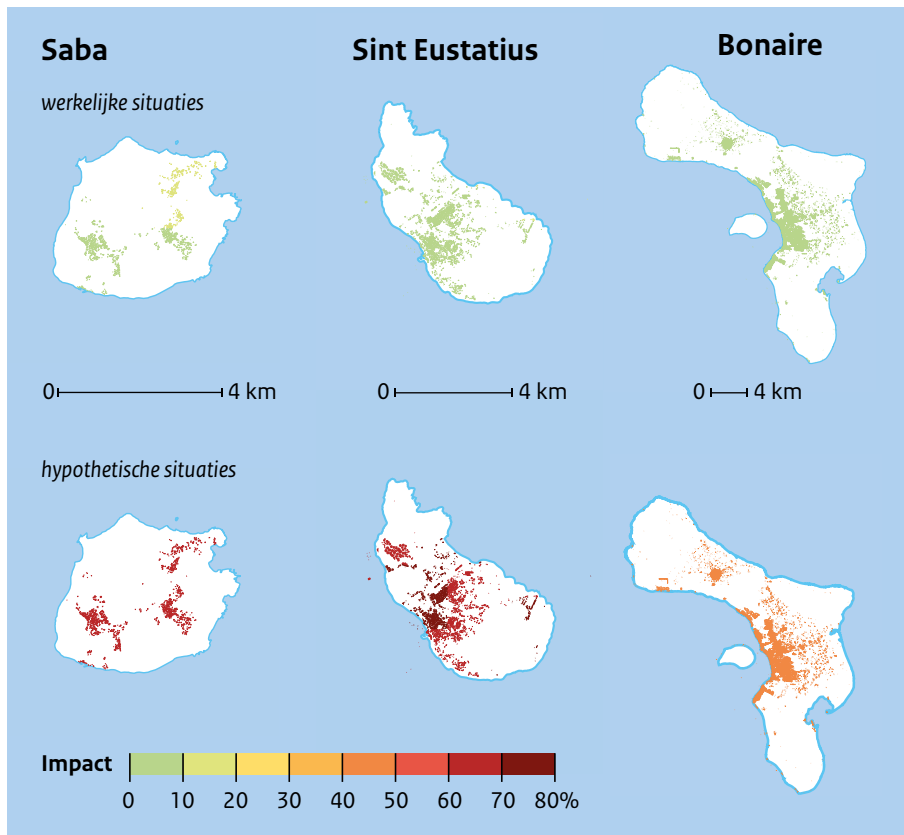
Voor Bonaire, dat een stuk zuidelijker ligt dan St. Eustatius en Saba, was orkaan Ivan de zwaarste nabije orkaan in de recente geschiedenis (1990-2024). Op 9 september 2004 trok Ivan op ongeveer 125 km ten noorden van Bonaire langs. De orkaan had toen een windsnelheid van ruim 240 km/u, en was daarmee een categorie-4 orkaan. De orkaan trok verder noordwestwaarts en intensiverde toen door tot een categorie-5 orkaan, de zwaarste categorie. In het Caribisch gebied vielen 67 doden en was er op grote schaal schade aan gebouwen door orkaan Ivan⁴. Bonaire werd weliswaar niet direct geraakt door orkaan Ivan, maar

ondervond wel schade en behoorlijke overlast door de overvloedige regenval, harde wind en hoge golven.

Wat had er kunnen gebeuren?

Hypothetisch scenario

In dit onderzoek beantwoorden we de “Wat als?” – vraag: wat als de orkanen Irma en Ivan, in plaats van het daadwerkelijk afgelegde pad, direct over Saba en St. Eustatius (Irma), en Bonaire (Ivan) getrokken waren? Hoeveel meer schade hadden de eilanden dan opgelopen ten opzichte van wat er in werkelijkheid gebeurde? Orkanen die door het Caribisch gebied heen trekken, ontstaan vaak boven de tropische Atlantische Oceaan, ten noorden van de evenaar tussen Afrika en Zuid-Amerika. Vervolgens trekken ze meestal richting het westen of noordwesten richting het Caribisch gebied. Hierbij kunnen de stormen energie uit het warme zee-water halen, waardoor ze sterker worden. Het gevolg is dat Saba en St. Eustatius, die verder noordelijk liggen, vaker orkanen voorbij zien trekken dan Bonaire, wat een stuk zuidelijker ligt. Daarnaast zijn deze noordelijke orkanen doorgaans ook zwaarder dan de orkanen die Bonaire passeren. Daarom analyseren we voor Saba en St. Eustatius een categorie-5 orkaan, en voor Bonaire een categorie-4 orkaan: een categorie-5 orkaan binnen 150 km van Bonaire is namelijk (nog) niet voorgekomen. Het is hi-



Afbeelding 1: schade aan gebouwen op Bonaire, Saba en St. Eustatius in de werkelijke situatie (zoals deze daadwerkelijk is opgetreden) en in de gesimuleerde hypothetische situatie (waarin de orkaan over het eiland getrokken zou zijn).

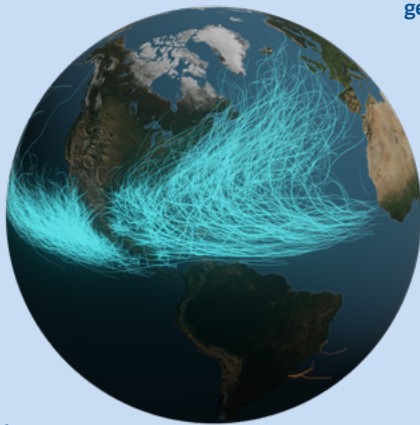
erbij niet gezegd dat zo'n categorie-5 orkaan in de buurt van Bonaire überhaupt niet voor kan komen – het is mogelijk dat dit in de (nabije) toekomst waarschijnlijker wordt (zie “Hoe zou dit in de toekomst kunnen veranderen?”).

Wat zou dan de impact geweest zijn?

Voor Saba en St. Eustatius laat ons impactmodel zien dat er in de oorspronkelijke situatie gemiddeld voor ongeveer 9% (Saba) en 8% (St. Eustatius) schade aan gebouwen optrad op het eiland. In het scenario waarin orkaan Irma direct over de eilanden getrokken zou zijn, neemt deze impact substantieel toe, tot ongeveer 70% schade op beide eilanden (afbeelding 1). Hierbij merken we op (zie ook kadertekst methodologie) dat dit dus betekent dat de gebouwen gemiddeld 70% schade hebben; niet dat 70% van alle gebouwen schade heeft. Hiermee kunnen we helaas niet 1-op-1 de vergelijking maken met de geobserveerde schade van orkaan Irma op St. Maarten, waar namelijk 70% van de gebouwen aan de Nederlandse zijde zwaar beschadigd waren. Daarbij komt ook nog dat de geobserveerde schade veroorzaakt is door een combinatie van de wind, stormvloed, en regenval; in onze gesimuleerde situatie bekijken we alleen de effecten van de wind. In werkelijkheid zorgen de stormvloed en de neerslag vaak voor de meeste schade. De totale schade wordt dus waarschijn-

Methodologie

Voor dit onderzoek hebben we de geobserveerde data van orkanen Irma en Ivan gebruikt, welke gearhiveerd worden in de IBTrACS dataset⁵. Uit deze dataset hebben we voor beide orkanen de positie van het oog van de orkaan (gegeven als lengte- en breedtegraad; dit wordt ook wel het pad van de orkaan genoemd) en de maximale windsnelheid (in meter per seconde) gehaald. Vervolgens hebben we gekeken op welk tijdstip het originele pad van de orkaan het dichtst bij het desbetreffende eiland lag. Op dat tijdstip hebben we het pad van de orkaan verplaatst over het eiland. Hiermee bootsen we dus de situatie na dat de orkaan niet langs, maar



direct over het eiland getrokken zou zijn. De intensiteit die de orkaan op dat moment had, hebben we daarbij hetzelfde gehouden.

Vervolgens hebben we deze data gekoppeld aan een model dat het tweedimensionale windveld op 10 meter hoogte simuleert. Daarmee kunnen we op 1 km resolutie de gesimuleerde windsnelheden analyseren, zowel voor de daadwerkelijk opgetreden orkaan, als voor het hypothetische scenario, waarbij het pad van de orkaan verlegd is.

Om een inschatting te maken van de mogelijke gevolgen op de drie eilanden, maken we gebruik van publiekelijk beschikbare informatie over de locatie van

gebouwen. Voor elk gebouw bepalen we vanuit de 2D-windvelden welke maximale windsnelheden in de originele situatie het gebouw geraakt zouden hebben, en wat de windsnelheden zouden zijn in de hypothetische situatie. De mogelijke schade aan gebouwen bepalen we voor beide situaties met behulp van een zogenaamde kwetsbaarheidsfunctie, die geldig is voor het Caribisch gebied. Deze mogelijke schade wordt uitgedrukt in een percentage tussen 0 en 100%, waarbij 100% betekent dat het gebouw volledig beschadigd zou raken. Hierbij merken we op dat het model niet kan berekenen *hoeveel* gebouwen er precies schade hebben, omdat het model aanneemt dat elk gebouw even kwetsbaar is. Daarom kijken naar hoeveel schade er *per gebouw* op kan treden – heeft een gebouw een beetje schade (zeg, 10%), of is een gebouw volledig verwoest (100% schade)? In werkelijkheid zijn sommige huizen kwetsbaarder dan andere huizen, maar dat detailniveau zit niet in het model. ■

lijk onderschat door alleen naar de wind-gelateerde schade te kijken. Toch zou ook in onze gesimuleerde situatie, waarbij Irma dus direct over St. Eustatius en Saba getrokken zou zijn, de windschade aanzienlijk geweest zijn. Op Bonaire hadden de gebouwen, volgens onze berekeningen, in de oorspronkelijke situatie geen schade opgelopen door de passage van orkaan Ivan. In het hypothetische scenario waarbij Ivan direct over Bonaire heen getrokken zou zijn, zou er wel veel schade zijn opgetreden, tot een gemiddelde van 46% schade aan gebouwen.

Natuurlijk heeft een zware orkaan vaak meer gevolgen dan alleen voor gebouwen, waar we ons in deze analyse toe hebben beperkt. Denk daarbij aan schade aan bomen, auto's, infrastructuur zoals wegen, vliegvelden, havens, elektriciteitsopwekking. En nog belangrijker: het risico op overlijden als direct of indirect gevolg van de orkaan. Deze gevolgen hebben we hier buiten beschouwing gelaten.

Hoe zou dit in de toekomst kunnen veranderen?

De verwachting is dat in de toekomst er niet meer orkanen komen, maar dat orkanen wel sterker worden. Dit laatste komt doordat orkanen hun energie uit het warme zeewater halen. Hiervoor zijn zeewatertemperaturen van minstens 27 graden Celsius nodig – en hoe warmer het zeewater dan is, hoe meer energie er in principe beschikbaar is voor de orkaan. Hiermee neemt de kans dus ook toe dat er bijvoorbeeld een categorie-5 orkaan nabij Bonaire voor kan komen, al blijft de kans erg klein. Daarnaast is ook de verwachting dat orkanen meer regen met zich mee zullen brengen, omdat warme lucht meer vocht kan vasthouden. Als laatste zal de stormvloed van de orkaan naar verwachting hoger zijn. Deze toename wordt vooral gedreven door de zeespiegelstijging. ■

Referenties

1. National Hurricane Center (2017): [Tropical cyclone report: Hurricane Irma](#).
2. NOS (2017): [Irma ging als "goederentrein" over Saba, maar schade lijkt mee te vallen](#).
3. Instituut Fysieke Veiligheid (2018): [Orkaan Irma treft Sint Maarten en Caribisch Nederland](#).
4. National Hurricane Center (2004): [Tropical cyclone report: Hurricane Ivan](#).
5. NOAA & WMO, [International Best-Track Archive for Climate Stewardship](#) (IBTrACS).

DROOGTE

Als de Rijnafvoer blijft dalen en de binnenvaart hindert

Op een dag in oktober:

“De Rijnafvoer ligt al sinds half augustus rond de 800 m³/s, wat ver onder het gemiddelde is voor deze tijd van het jaar. Hardnekkige hogedrukgebieden domineren al weken het weerbeeld in het stroomgebied van de Rijn, met weinig neerslag en veel verdamping tot gevolg. Het effect op de binnenvaart is groot.

Steeds meer schepen kunnen niet meer uitvaren vanwege de geringe diepgang, en de kleinere schepen die nog wél varen, moeten met sterk beperkte lading opereren. Slechts de helft van de normale transportcapaciteit van de Nederlandse binnenvaartvloot kan momenteel worden benut. Langs de Rijn en de IJssel stokt de aanvoer van grondstoffen en producten. Sommige bedrijven die afhankelijk zijn van deze rivieren voor de aanvoer van goederen zien zich gedwongen hun productie tijdelijk stil te leggen. Herstel lijkt voorlopig niet in zicht: volgens de weersverwachtingen van het KNMI blijft tegen in het stroomgebied van de Rijn voorlopig uit. Naar verwachting zal de Rijnafvoer de komende twee weken nog verder dalen richting de 660 m³/s.

Zo had het kunnen gaan. Maar zo ging het niet.

FOTO MARTIN VAN LOKVEN, RIJKSWATERSTAAT

AUTEURS

- **Job Dullaart-van Veen** KNMI
- **Nathaly Dasburg-Tromp en Jourian Ligtenberg** Rijkswaterstaat WVL
- **Olaf Jonkeren, Maurits Terwindt** Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid (interview)

Introductie

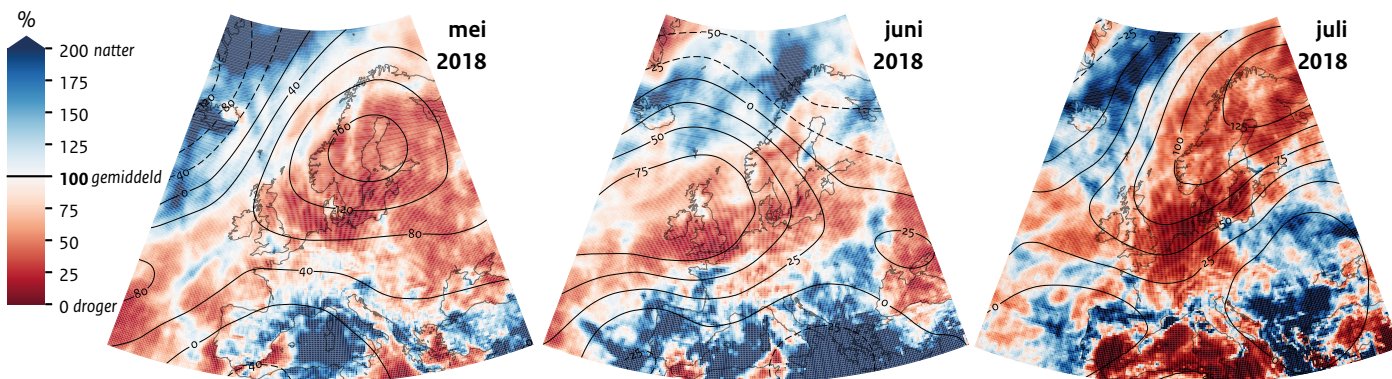
De zomer van 2018 was extreem droog in grote delen van Noordwest-Europa, waaronder Nederland. Dit resulteerde in langdurig lage afvoeren op de Rijn waar de binnenvaartsector grote hinder van ondervond. Schepen konden minder vracht vervoeren, moesten soms omva-

ren, bijvoorbeeld omdat ze sluis Weurt in het Maas-Waalkanaal niet meer konden passeren, en de grotere binnenvaartschepen konden helemaal niet meer varen. Dit had grote gevolgen voor de scheepvaartsector en andere sectoren die afhankelijk zijn van de scheepvaart, zoals de industrie langs de Rijn. Vooral in de bouw-, staal-, chemie-, en aardolie-industrie moesten bedrijven hun productie afschalen of zelfs stilleggen omdat ze niet meer bevoorrad konden worden met de benodigde grondstoffen. Partijen die voor transport gebruik maken van de binnenvaart leden financiële schade door productieverlies, hogere logistieke kosten en extra kosten voor voorraadaanvulling. Voor

2018 wordt de schade hiervan geschat op bijna 300 miljoen euro^{1,2}. Dit roept de vraag op: in hoeverre is een nog lagere Rijnafvoer mogelijk dan in 2018 het geval was? En welke impact zou dat hebben op de vaarkosten van de binnenvaartsector?

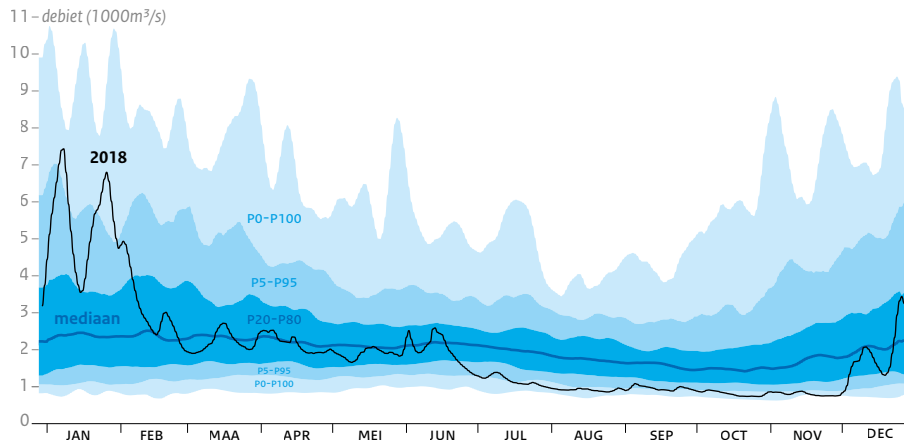
*Wat is er gebeurd?***De droge zomer van 2018**

De meteorologische droogte van 2018, die leidde tot laagwater op de Rijn, was één van de warmste en droogste ooit in Noordwest-Europa³. Het zomerhalfjaar (april-september) van 2018 was zelfs de warmste sinds het begin van de metingen in 1901⁴. Deze uitzonderlijke



Afbeelding 1: In kleur de neerslaganomalie [%] en in contouren de drukanomalie afgebeeld als de hoogte van het 500 hPa vlak [in meters]. Beide ten opzichte van het langetermijngemiddelde (1991-2020) in de maanden mei, juni en juli 2018.

Rijnafvoer bij Lobith



Afbeelding 2: Mediane Rijnafvoer (7-daags gemiddeld) bij Lobith in 1000 m³/s in de periode 1901-2022 (blauw) en de dagelijks gemiddelde afvoer in 2018 (zwart). De verschillende blauwtinten representeren een afvoer-percentiel. Bijvoorbeeld P5-P95 geeft het 5de t/m 95ste percentiel weer.

situatie was het gevolg van aanhoudende hogedrukgebieden boven Oost-, Noord- en Centraal-Europa, die van april tot en met oktober het weerbeeld domineerden⁵. Deze systemen veroorzaakten op grote schaal dalende luchtbewegingen, wat resulteerde in weinig bewolking, veel zonnestraling en een lage relatieve luchtvochtigheid. In grote delen van het Europese continent lag de tempera-

tuur ver boven het langjarig gemiddelde. Het zwaartepunt van de droogte bevond zich in Noordwest-Europa, waar gedurende de zomermaanden vrijwel geen neerslag viel (afbeelding 1), op enkele onweersbuien na. In deze regio, waaronder Nederland en het stroomgebied van de Rijn, leidde dit tot een aanzienlijk neerslagtekort, uitdroging van de bodem en uitzonderlijk lage grondwaterstanden en

rivierafvoeren. De afvoer van de Rijn bij Lobith (afbeelding 2) lag in 2018 tot begin juni nog rond de mediaan (1901-2022). De afvoer van de Rijn bleef nog zo lang op een normaal niveau, ondanks de droge meteorologische condities vanaf begin mei, omdat smeltwater van de relatief grote hoeveelheid sneeuw, gevallen in de voorgaande winter, de Rijn voedde. Vanaf half juni nam de afvoer snel af tot onder de 1000 m³/s begin augustus. De laagste afvoer van 732 m³/s werd bereikt op 29 oktober. Begin december herstelde de afvoer en keerde deze terug op een normaal niveau.

Wat had er kunnen gebeuren?

LaagwaterXL

We gebruiken 240 jaar aan gesimuleerde KNMI'23-afvoerscenario's voor de Rijn⁷ voor de periode rond 2033 om te onderzoeken of zich in de nabije toekomst een nog extremer jaar kan voordoen. Concreet kijken we of een jaar mogelijk is met nog hogere vaarkosten dan in 2018 als gevolg van een lage Rijnafvoer. Uit deze dataset selecteren we het jaar met de hoogste vaarkosten door laagwater op de Rijn (zie kader methodologie). Dit noemen we het laagwaterXL scenario (afbeelding 4). In zowel 2018 (124 dagen) als in laagwaterXL (117 dagen) ligt de afvoer ongeveer even lang onder de "Overeengekomen Lage Afvoer" (OLA) van 1020 m³/s. Deze drempelwaarde is in 2022

Methodologie

Om een aannemelijk extreem te bepalen dat in de nabije toekomst zou kunnen optreden, selecteren we het meest extreme jaar uit de KNMI'23 afvoerscenario's voor de Rijn voor de periode rond 2033 (2019-2048). Deze dataset bestaat uit 240 jaar aan data. Het meest extreme jaar kan op verschillende manieren worden gedefinieerd. In deze studie doen we dit aan de hand van de extra vaarkosten per jaar die optreden als gevolg van laagwater. Dit betekent dat zowel de intensiteit als de duur worden meegenomen in de selectie van het meest extreme jaar.

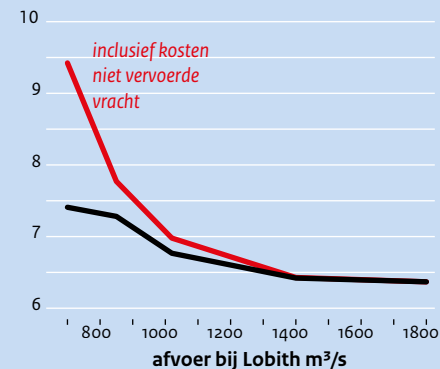
Voor het bepalen van de vaarkosten in jaren met een lage Rijnafvoer maken we gebruik van informatie uit het Rijkswaterstaat-rapport 'Klimaatbestendige Netwerken: Stresstest Hoofdvaarwegennet – Deelrapport Droogte (2022)⁶. Dit rapport geeft voor bepaalde afvoergrenzen de totale vaarkosten per dag in en door Nederland (afbeelding 3). Onze berekening gaat alleen over Nederlands grondgebied, berekend met het Binnenvaart Analyse Systeem (BIVAS), waarin de vaarkosten gebaseerd zijn op kostengetallen met als

referentiejaar 2018. Hierin zijn de hogere vaarkosten meegenomen, omdat er vaker gevaren moet worden om dezelfde hoeveelheid vracht vervoerd te krijgen, maar ook de misgelopen inkomsten vanwege niet-vervoerde vracht. Deze niet-vervoerde vracht kan hetzij helemaal niet vervoerd zijn, hetzij er is gebruik gemaakt van een andere vorm van transport, zoals bijvoorbeeld het spoor.

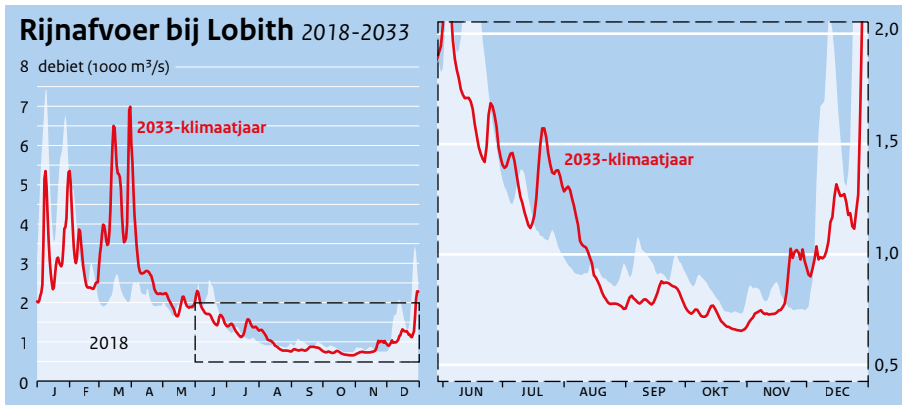
De extra vaarkosten in dit rapport worden gegeven ten opzichte van een jaar waarin de afvoer bij Lobith niet onder de 1800 m³/s komt, omdat voor die afvoer verondersteld wordt dat alle schepen volledig afgeladen kunnen varen. Onder die omstandigheden zouden de totale vaarkosten 6,37 miljoen euro per dag bedragen, wat neerkomt op 2,33 miljard euro per jaar. Bij afvoeren onder de 1800 m³/s worden de kosten voor de betreffende afvoer berekend door de kosten te interpoleren. Bij een afvoer van 800 m³/s komen de vaarkosten per dag bijvoorbeeld uit op ongeveer 8,3 miljoen euro; de extra vaarkosten bedragen dan 1,6 miljoen euro per dag. Resultaten gepresenteerd in

dit rapport gaan uit van de economische situatie, samenstelling van de binnenvaartvloot, en de ligging van het rivierbed, in 2018. Verschillen in berekende vaarkosten worden dus enkel veroorzaakt door een verschil in afvoer tussen jaren. ■

Vaarkosten per dag *miljoenen €*



Afbeelding 3: Toename dagelijkse vaarkosten bij afnemende afvoer⁶. De zwarte lijn geeft de vaarkosten per dag weer en de rode lijn geeft de vaarkosten per dag én de kosten voor niet vervoerde vracht weer.



Afbeelding 4: Rijnaafvoer bij Lobith [m³/s] in 2018 en in het laagwaterXL scenario.

vastgesteld op basis van de tijdreeks Rijnaafvoer 1921-2020 en wordt gemiddeld 20 dagen per jaar onderschreden^{8,9}. Opvallend is dat in laagwaterXL de afvoer gedurende 85 dagen onder de 850 m³/s ligt - bijna twee keer zo lang als in 2018, waarin dit 45 dagen duurde. Bovendien daalt de afvoer in laagwaterXL gedurende 15 dagen onder de 700 m³/s. Dit niveau wordt aangemerkt als 'extreem laagwater', en werd in 2018 niet onderschreden. Het is dus niet ondenkbaar dat we in de komende jaren op de Rijn nog extremer laagwater gaan zien dan in 2018.

De economische impact

Om de economische impact van de laagwaterperioden in 2018 en in het laagwaterXL scenario te bepalen, kijken we naar de extra

vaarkosten in die jaren. Daarnaast interviewen we een bedrijf om een kwalitatief beeld te krijgen van de impact van laagwater op bedrijven die gebruik maken van de binnenvaart.

Extra vaarkosten

In laagwaterXL bedragen de berekende extra vaarkosten 269 miljoen euro, fors hoger dan de 197 miljoen euro in 2018 (tabel 1). Deze bedragen vertegenwoordigen de meerkosten ten opzichte van een situatie zonder beperkingen voor de scheepvaart, waarbij de Rijnaafvoer niet onder de 1800 m³/s zakt. In een dergelijk jaar bedragen de totale vaarkosten ongeveer 2,33 miljard euro. De extra vaarkosten als gevolg van droogte in laagwaterXL zijn dus meer dan 10% van de totale vaarkosten in dat jaar.

Om te onderzoeken of de extra vaarkosten voor de geobserveerde Rijnaafvoer en de gesimuleerde afvoerscenario's overeenkomen, is van deze kosten de mediaan, het gemiddelde en de

	historisch 1901-2022				simulaties 2019 - 2048			
	mediaan	gemiddeld	P90	2018	mediaan	gemiddeld	P90	'Laagwater XL'
extra vaarkosten mln €/jaar	22	47	111	197	34	53	137	269

Tabel 1: Extra vaarkosten per jaar voor het verleden en het KNMI'23-afvoerscenario voor de periode rond 2033. Om de kosten te berekenen is uitgegaan van de binnenvaartvloot en de economische situatie in 2018.

90^{ste} percentiel (P90) berekend. Hierbij is het belangrijk in het achterhoofd te houden dat het hierbij meegenomen verleden in totaal 122 jaar aan data bevat en de gesimuleerde afvoerscenario's 240 jaar. De hogere extra vaarkosten in laagwaterXL zijn in lijn met de verwachtingen: als gevolg van klimaatverandering komen droogteperiodes in de zomer vaker en langduriger voor¹⁰, wat leidt tot meer beperkingen en dus hogere kosten voor de scheepvaart.

INTERVIEW

Impact op binnenvaart-afhankelijke bedrijven

Ter illustratie van wat laagwater kan betekenen voor bedrijven die gebruik maken van de binnenvaart, spraken we met een bedrijf dat meerdere productievestigingen langs vaarwegen in Nederland heeft. Een van die vestigingen ligt aan het Twentekanaal. De producten die worden geproduceerd op die locatie zijn een input voor productieprocessen van bedrijven (klanten) in West-Europa, waaronder Nederland. De producten (droge bulk) worden per binnenvaart naar die klanten vervoerd. De aanvoer van goederen naar de locatie aan het Twentekanaal gebeurt per vrachtauto. Het Twentekanaal is een

doodlopende waterweg die verbonden is met de IJssel. Om het Twentekanaal op en af te kunnen varen moeten binnenvaartschepen Sluiscomplex Eefde passeren. Dat sluiscomplex ligt vlak bij het punt waar het Twentekanaal aftakt van de IJssel.

Als in perioden van droogte de waterstand in het Twentekanaal onder een bepaalde drempelwaarde daalt, dan stopt de sluis bij Eefde met schutten om verder verlies van water te voorkomen. Binnenvaartschepen die zich dan op het Twentekanaal bevinden raken dan opgesloten. Schippers willen dat voorkomen en nemen daardoor al geen reizen meer aan vanaf of naar locaties langs het Twentekanaal wanneer de waterstand in dat kanaal een aantal centimeter boven de drempelwaarde staat. De duur van het niet bevaarbaar zijn van het Twentekanaal bepaalt de mate waarin het geïnterviewde bedrijf hinder ondervindt met het afvoeren van goederen. Alle bedrijven die bevoorrad worden door het bedrijf gelegen aan het Twentekanaal zijn afhankelijk van wekelijkse aanleveringen. Ze hebben voor een aantal dagen voorraad.

Potentiële problemen bij laagwater

Als een periode van laagwater maar lang genoeg aanhoudt dan kunnen de potentiële problemen voor de klanten groot zijn. Vaak zijn de klanten volledig afhankelijk van de grondstoffen die afkomstig zijn van het bedrijf gelegen aan het Twentekanaal. Als er niet genoeg grondstoffen worden aangeleverd bij de fabrieken van klanten kan dat leiden tot uitval van de productie aldaar. Dat kan in dit specifieke geval resulteren in schade aan onderdelen van het productieproces, die vervolgens moeten worden vervangen. Gevolg daarvan kan weer zijn dat de productie niet alleen stilstaat in de periode van laagwater, maar ook daarna. Bij het opnieuw opstarten van de fabrieken kunnen zich ook problemen voordoen. De kosten van deze gevolgen van laagwater zijn naar verwachting erg hoog voor de klanten. Het op peil blijven van de bevoorrading van hun productielocaties is daarom erg belangrijk.

Maatregelen bij laagwater

Om periodes van laagwater het hoofd te bieden nemen het bedrijf aan het Twentekanaal en hun klanten een aantal

maatregelen. We maken onderscheid naar twee typen maatregelen:

- Maatregelen die buiten perioden van laagwater worden genomen, om goed voorbereid te zijn op laagwaterperiodes. Dit type maatregelen brengen ieder jaar kosten met zich mee, en leveren alleen wat op in jaren met laagwaterperiodes. In het geval van deze casus is daarom meestal sprake van een negatieve businesscase bij dit type maatregelen. Dat geldt in het geval van dit bedrijf bijvoorbeeld voor het aanleggen van extra voorraadcapaciteit (om extra gereed product op te slaan als het afvoeren ervan tijdens laagwaterperiodes wordt bemoeilijkt). Ook kijkt ze in samenwerking met externe partijen of de waterstand op het Twentekanaal en de IJssel verder vooruit voorspeld kan worden.
- Maatregelen die alleen ten tijde van laagwater worden genomen. Het bedrijf aan het Twentekanaal gebruikt ten tijde van laagwater vrachtwagens om een deel van het binnenvaartvervoer over het Twentekanaal te vervangen. Ook kunnen ze de productie verlagen (maar niet stilleggen). Tenslotte worden meer binnenvaartschepen ingezet en laagwater toeslagen betaald,

waardoor de kosten van binnenvaartvervoer toenemen. Hierbij merkte het bedrijf op dat het vinden van extra vervoerscapaciteit lastig is, omdat in perioden van laagwater de vraag naar binnenvaartschepen toeneemt. Andere bedrijven zitten immers met hetzelfde probleem.

Laagwater in 2018

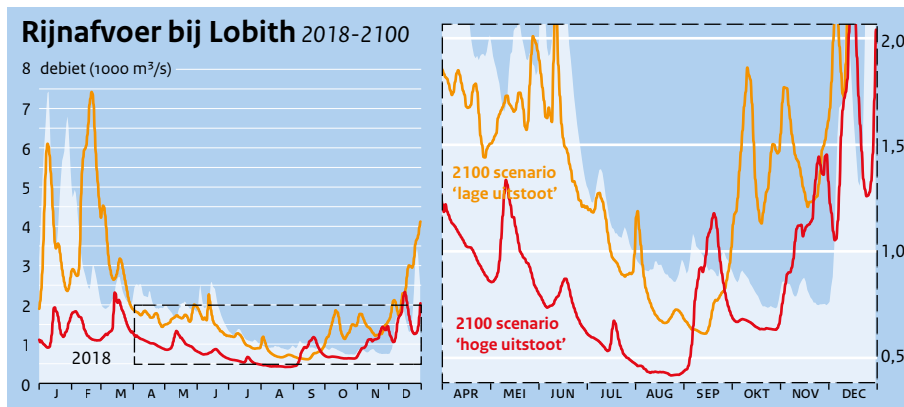
Gedurende de laagwaterperiode in 2018 heeft het vervoeren van grondstoffen van af het bedrijf gelegen aan het Twentekanaal door kunnen gaan, zij het in mindere mate. Dat werd bewerkstelligd door het deels verschuiven van binnenvaartlading naar vrachtwagens, de inzet van meer binnenvaartschepen, en het verlagen van het productieniveau. Dat was een uitdagende logistieke operatie, maar zorgde er wel voor dat productieprocessen van klanten niet stil kwamen te liggen.

Vooruitblik richting 2100

Tot slot kijken we vooruit richting het jaar 2100. Voor deze tijdshorizon zijn er zes KNMI'23-afvoerscenario's beschikbaar. Deze zijn gebaseerd op drie uitstootniveaus van broeikasgassen – laag (L), midden (M) en hoog (H) – en voor ieder daarvan een relatief natte (n) en een relatief droge (d) variant. Voor elk

van deze scenario's, bestaande uit 240 jaar aan data, zijn de extra vaarkosten per jaar berekend. Tabel 2 toont steeds het meest extreme jaar per scenario. Ook is weergegeven hoeveel dagen per jaar de afvoer onder bepaalde drempelwaarden zakt. Opvallend is dat de afvoer in deze extreme scenariojaren aanzienlijk lager ligt dan tot nu toe waargenomen. Zo ligt de minimale afvoer in het 2100_Md-klimaatjaar op 615 m³/s. In het 2100_Hd-klimaatjaar gaat de afvoer zelfs omlaag naar 419 m³/s (afbeelding 5), een afvoer waarbij de binnenvaart op de Rijn stil zal komen te liggen.

Tabel 2 geeft ook het 90^{ste} percentiel (P90) weer, een situatie die zich gemiddeld eens in de tien jaar voordoet, welke een robuuster beeld geeft dan het meest extreme jaar uit elk van de afvoerscenario's. In het 2100_Ln scenario liggen de extra vaarkosten (hoogste: €249M; P90: €115M) nog dicht bij de historische waarden (hoogste: €253M; P90: €83M). Dat is weinig verwonderlijk, omdat in dat scenario de opwarming beperkt blijft tot ruim onder de twee graden. Onder het midden en hoge-uitstootscenario lopen de vaarkosten echter snel op, met de hoogste vaarkosten in het 2100_Hd scenario (hoogste: €492M; P90: €273M). De extra vaarkosten worden in de achterliggende berekeningen gemaximeerd op 3,1 miljoen euro per dag bij een afvoer van 700



Afbeelding 5: Rijnaflow bij Lobith [m³/s] in 2018, en het 2100_Ln- en 2100_Hd-klimaatjaar.

afvoerscenario 2100	Ln laag	Ld	Mn midden	Md	Hn hoog	Hd
extra vaarkosten mln €/jaar	249 115	312 151	403 123	378 172	452 180	492 273
afvoergrens m³/s	onderschrijding dagen/jaar					
1800	250 243	271 267	271 242	241 275	323 218	339 266
1400	197 164	235 181	248 166	190 199	287 164	306 202
1020	89 64	122 74	174 66	140 81	177 85	191 128
850	75 20	96 35	125 27	115 40	132 48	138 80
700	22 0	31 0	69 0	90 4	85 11	104 35

Tabel 2: Extra vaarkosten, en het aantal dagen per jaar dat bepaalde afvoergrenzen worden overschreden, in het meest extreme jaar uit het betreffende KNMI'23-afvoerscenario. In kleine getallen wordt het 90^{ste} percentiel (P90) weergegeven.

m³/s, wat neerkomt op een jaarlijks maximum van 1,1 miljard euro. In jaren waarin de afvoer gedurende langere tijd onder deze grens blijft, zoals in het 2100_Md- en 2100_Hd-afvoerscenario, worden de extra vaarkosten dus mogelijk onderschat.

Samenvattend zien we dat hogere vaarkosten dan in 2018 als gevolg van lage Rijnaflowen in het huidige klimaat al mogelijk zijn en dat de kans hierop in de toekomst zal toenemen. De mate waarin deze kans toeneemt is sterk afhankelijk van de toekomstige mondiale broeikasgasuitstoot.

Referenties

- Erasmus UPT (2020): *Economische Impact Laagwater: Een Analyse van de Effecten van Laagwater Op de Binnenvaartsector En de Nederlandse En Duitse Economie*.
- Ecorys (2019): *Economische Schade Door Droogte in 2018*.
- Aalbers, E. E. et al. (2023): The 2018 west-central European drought projected in a warmer climate: how much drier can it get? *Natural Hazards and Earth System Sciences* 23.
- Hoy, A. et al. (2020): An endless summer: 2018 heat episodes in Europe in the context of secular temperature variability and change. *International Journal of Climatology* 40.
- Blunden, J. en Arndt, D. S. (2019): State of the Climate in 2018. *Bull Am Meteorol Soc* 100.
- Rijkswaterstaat (2022): *Klimaatbestendige Netwerken: Stresstest Hoofdvaaarwegennet - Deelrapport Droogte*.
- Buitink, J. et al. (2023): *Implications of the KNMI'23 Climate Scenarios for the Discharge of the Rhine and Meuse*.
- Rijkswaterstaat (2022): *OLR 2022: Bepaling Overeengekomen Lage Rivierwaterstand 2022 Voor de Nederlandse Rijntakken*.
- Centrale Commissie voor de Rijnvaart (2014): *Najaarszitting 2014 - Aangenomen besluiten (2014-II)*.
- van Dorland, R. et al. (2023): *KNMI National Climate Scenarios 2023 for the Netherlands. KNMI scientific report WR23-02*.



NEERSLAG

Als neerslag met bakken uit de hemel komt

Op een dag in juni:

“Het is een warme zomerdag; overal staan barbecues aan, kinderen spelen buiten, en op verschillende locaties vinden evenementen plaats. De temperatuur is eind van de middag in het zuidoosten opgelopen tot 35°C. In deze zeer warme, vochtige lucht ontstaan in België plotseling de eerste buien, die rond zes uur Nederland binnenkomen. Deze buien geven plaatselijk 80 tot 100 mm neerslag in een uur, en gaan gepaard met valwinden, zware windstoten tot 110 km/uur, en hevig onweer. De neerslagsom loopt in een aantal uren op tot plaatselijk 150-170 mm. Door het plotseling opkomende noodweer verandert de zomerse sfeer in chaos: straten stromen vol, mensen vluchten naar binnen, parasols en tenten waaien weg. Auto's lopen vast in ondergelopen straten, op festivals zoeken mensen naar schuilplekken. Door het warme weer hadden veel mensen verkoeling gezocht op het water, en werden ze verrast door het snel opkomende noodweer. “

Zo had het kunnen gaan. Maar zo ging het niet.

FOTO RIJKSWATERSTAAT

AUTEURS

- **Geert Lenderink** KNMI
- **Tessa Trommelen**
Veiligheidsregio Brabant-Noord
- **Michael van der Valk** HydrologyNL
- **Harry van Luijtelea**

Introductie

Extreme neerslag heeft de laatste jaren regelmatig geleid tot overlast en schade. Voorbeelden zijn de overstroming van de Geul in Limburg in juli 2021, en overstromingen van snelwegen, wijken en straten (Alphen aan de Rijn, 2014; Enschede, 2024). Door klimaatverandering wordt neerslag intenser. Tegelijkertijd neemt de kwetsbaarheid van Nederland toe door een toename van bebouwing op plekken die voor overstromingen gevoelig zijn, en door grotere economische activiteit. Daarom is het belangrijk om maatregelen te nemen die schade en overlast kunnen beperken. In de landen om ons heen is er in de afgelopen tientallen jaren extremere neerslag gevallen dan bij ons. Maar ook hier is dit mogelijk.

We bespreken hier een extreme zomerse bui die gebaseerd is op de periode 18-20 juni 2013. Op deze dagen kwamen zware buien tot ontwikkeling, die Nederland voor een groot gedeelte net gemist hebben. De casus is gebaseerd op een kleine meteorologische

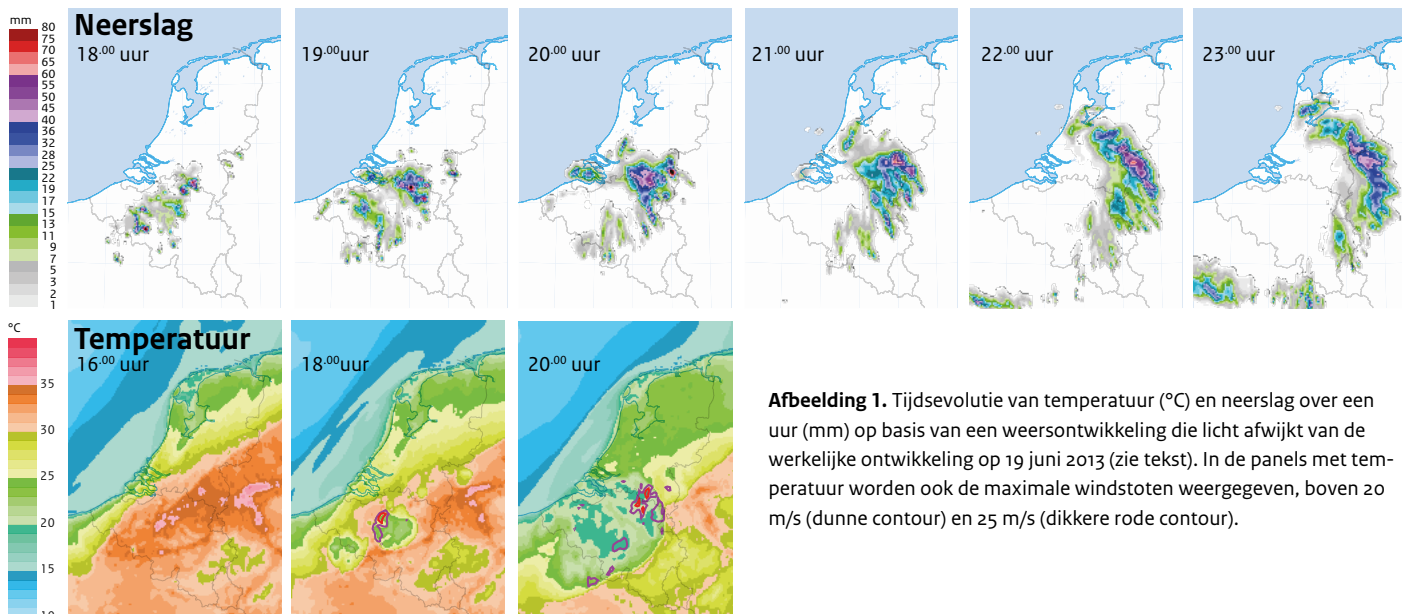
variëte voor deze periode, waarbij de warmte net iets langer blijft hangen en de buien wel in Nederland tot ontwikkeling komen. Om dit door te rekenen, gebruiken we een zeer nauwkeurig weer- en klimaatmodel, waarbij we de bewegingen in een bui in detail kunnen simuleren. Daarmee kunnen we ook goed in beeld brengen hoeveel neerslag er plaatselijk kan vallen en hoeveel over grotere gebieden. Dit is van belang, omdat de gevolgen van extreme neerslag afhangen van verschillende factoren: de maximale intensiteit, hoe lang het regent, hoe plaatselijk dit gebeurt en hoeveel de totale hoeveelheid neerslag is.

Wat is er gebeurd?

Op 18 juni 2013 was het in Nederland tropisch warm, waarbij zeer warme en vochtige lucht werd aangevoerd vanuit het zuiden. Door een lagedrukgebied vanuit het zuidwesten werd deze warme lucht verdreven op 19 en 20 juni. Hierbij kwamen in de omgeving van Nederland zeer zware buien voor, waarbij in enkele uren tot ongeveer 90 mm neerslag viel. De meeste extreme neerslag heeft ons land echter niet getroffen, maar viel in Noordwest-Duitsland; in een strook net ten oosten van Nederland viel in een aantal uren 100-120 mm, met piekhoeveelheden van 70-80 mm/uur. Had deze weersituatie ook voor Nederland extremer kunnen uitpakken?

Wat had er kunnen gebeuren?

We beschrijven hier een variant op deze weersituatie gebaseerd op een weer- en klimaatmodel (HCLIM), waarmee we buienprocessen en neerslagvorming in detail kunnen modelleren. In deze hypothetische situatie is het lagedrukgebied boven Frankrijk iets sterker ontwikkeld, ligt de kern net iets westelijker en is de band van hogedruk over de Noordzee ook iets sterker. Hierdoor waait het in Nederland net iets sterker uit het oosten waardoor de warmte langer blijft hangen. In modelsimulaties van deze situatie wordt het op 19 juni nu 34°C in het zuidoosten van Nederland, terwijl de temperatuur in het westen van Nederland al sterk is afgekoeld. Op dit scheidingsvlak van warme en koelere lucht is de lucht erg vochtig, met een dauwpunttemperatuur van 23 tot 25°C, en ontwikkelen zich in de namiddag sterke buien. Deze buien ontstaan rond 17:00 in België. Een cirkel van koude lucht om 18:00 geeft aan dat er koude lucht uit een bui uitstroomt (afbeelding 1). Deze koude lucht is het gevolg van een valwind die wordt gedreven door (het gewicht van) de neerslag, samen de afkoeling door verdamping van neerslag. De zogenaamde koude poel breidt zich aan het aardoppervlak uit en geeft aanleiding tot sterke windstoten op het grensvlak van de warme en koude lucht, om 18:00 aan de westkant van de koude poel. Ook duwt de koude poel voor zich uit lucht



Afbeelding 1. Tijdsevolutie van temperatuur (°C) en neerslag over een uur (mm) op basis van een weersontwikkeling die licht afwijkt van de werkelijke ontwikkeling op 19 juni 2013 (zie tekst). In de panels met temperatuur worden ook de maximale windstoten weergegeven, boven 20 m/s (dunne contour) en 25 m/s (dikkere rode contour).

omhoog waardoor er nieuwe buien kunnen ontstaan. Aan de noordkant van de koude pool ontstaan er zo heftige buien op de grens van België en Nederland. Deze buien geven plaatselijk 80-100 mm neerslag in een uur. Ook gaan ze plaatselijk gepaard met windstoten van 90-110 km/uur en hevig onweer. Na 20:00 klusteren deze kleinere buien samen tot een buienlijn in het oosten van Nederland, die langzaam naar het noorden trekt.

De ene bui is de andere niet

De impact van extreme neerslaggebeurtenissen is afhankelijk van veel factoren: weersfactoren, zoals hoe hard en hoe lang het regent en de grootte van het neerslaggebied. Maar ook is belangrijk waar de neerslag valt, hoeveel neerslag de bodem kan opnemen en hoeveel water er via het oppervlak afstroomt. Een drogere bodem in de zomer kan in vlak gebied vaak meer water opnemen. Maar als de grond

te ver is uitgedroogd, dan stroomt het water er juist vanaf zonder erin te kunnen trekken. Een hoge neerslagintensiteit kan in heuvelachtig gebied leiden tot erosie en modderstromen. In de stad leidt extreme neerslag al snel tot water op straat, zeker in de lageregelegen gebieden of tunnels.

Ook de mens speelt hierin een rol. Hevige neerslag kan sneller tot een overstroming leiden als er veel water is vastgehouden om

als buffer voor droogte te dienen. Extreme neerslag kan dus heel verschillende gevolgen hebben, afhankelijk van de situatie. Wel is duidelijk dat de intensiteit, duur en het volume van de neerslag een belangrijke rol spelen.

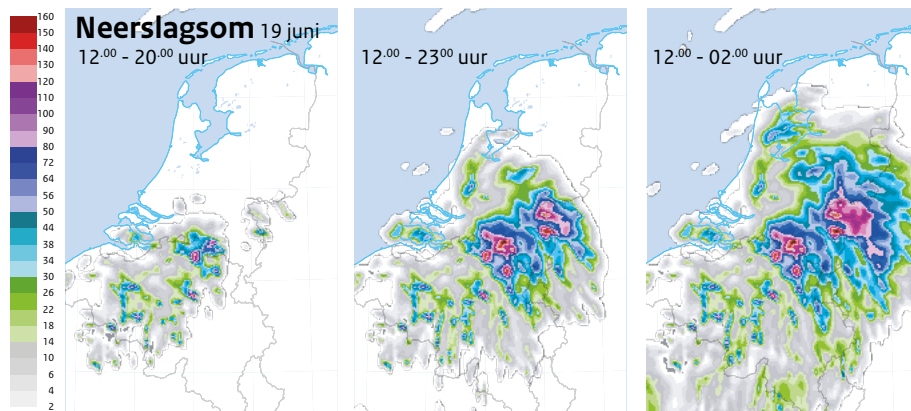
Neerslagsommen in ruimte en tijd

Voor verschillende tijdsduren en gebiedsgroottes hebben we de maximale neerslaghoeveelheid berekend voor dit hypothetische scenario. Dit is gedaan voor een neerslagduur van 1, 2, en 4 uur, en gebiedsgroottes van $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$ (het rekenrooster van het model) en $20 \times 20 \text{ km}^2$. Het maximum hiervan tussen 12 uur 's middags en 2 uur 's nachts staat weergegeven in afbeelding 3, en een tijdserie van het maximum in Nederland in afbeelding 4. De maximale neerslagsom in een uur is ruim 100 mm, voor twee uur is dat 130 mm, en voor vier uur ongeveer 170 mm. Deze maxima zijn neerslagsommen op het rekenrooster van het model van 2,5 bij 2,5 km. Evaluatie van het model laat zien dat de gesimuleerde neerslagsommen op het rekenrooster zeer vergelijkbaar zijn met een waarnemingen van meetstations voor een duur van 1 uur¹; binnen het uur kunnen plaatselijk hogere intensiteiten bereikt worden maar voor een uur middelt dat grotendeels uit. Gemiddeld over grotere gebieden zijn de hoeveelheden neerslag, in millimeters uitgedrukt, lager. Bijvoorbeeld in 2 uur en $20 \times 20 \text{ km}^2$ valt

er zo'n 70-75 mm maximaal in Nederland, en dit loopt op tot 110 mm in 4 uur tijd. In buien kan plaatselijk zeer veel neerslag vallen, terwijl er 20 km verderop slechts de helft of minder valt, en dit middelt uit over $20 \times 20 \text{ km}^2$. Een intensiteit van 90 mm in een uur betekent niet dat het gedurende het uur altijd even hard regent. In zeer extreme buien kan er in 10 minuten wel zo'n 20-30 mm neerslag vallen. Omdat de modeldata alleen per klokuur beschikbaar is, kunnen de maximale sommen over een willekeurig uur nog net iets hoger uitvallen.

Zo veel water valt er naar beneden

Naast de neerslagintensiteit speelt de totale hoeveelheid neerslag ook een rol, dus gesommeerd over de tijd en ruimte. De totale hoeveelheid neerslag uit een buiencomplex (een clustering van buien tot een groot systeem) kan zeer groot zijn. Wanneer we als maat voor dit volume aan water een olympisch zwembad nemen (50 bij 25 meter en 2 meter diep, oftewel 2,5 miljoen liter water) dan valt er over een gebied van $20 \times 20 \text{ km}^2$ en 2 uur het equivalent van 10 duizend olympische zwembaden: een enorme hoeveelheid water.



Afbeelding 2. Neerslagsom van de casus (in mm) op 19 juni van 12 uur 's middags tot 20 uur, 23 uur en 2 uur 's nachts.

Hypothetische gevolgen

“De meldkamer in Oost-Brabant krijgt honderden meldingen binnen van mensen die verrast zijn door het water: vastzittende automobilisten, omgewaaide bomen, kortsluitingen, mensen waarbij het water via de drempel hun huis in stroomt of zelfs waar het water omhoogkomt uit het toilet. De andere meldkamers in Nederland kunnen gelukkig helpen bij het aannemen van 112-telefoontjes, maar deze moeten wel allemaal verwerkt worden.

Brandweer, ambulance en politie worden overspoeld en moeten keuzes maken: levensbedreigende situaties eerst, stormschade en wateroverlast later. Ook worstelen ze met bereikbaarheid omdat hoofdwegen en spoorlijnen geblokkeerd zijn. Het liefst wordt extra capaciteit ingezet, maar voor collega's

is het lastig om de meldkamer te bereiken. Evenementen in de regio worden halsoverkop ontruimd. Op campings en recreatieplassen ontstaan gevaarlijke situaties wanneer plotselinge windstoten tenten en boten verplaatsen. Een zorginstelling is overgeschaald op noodstroom, maar heeft wel hulp nodig bij het verplaatsen van patiënten naar droge locaties.

Op sociale media delen bewoners beelden van hun ondergelopen straat; het besef groeit dat dit niet zomaar een zomerbui is, maar iets wat door klimaatverandering vaker voor gaat komen. Terwijl het water langzaam zakt, blijft de nasleep groot: frustratie over schade, zorgen over herstel en verzekeringen. Ook groeit het wantrouwen richting gemeente en waterschap over het voorkomen van zulke wateroverlast.”

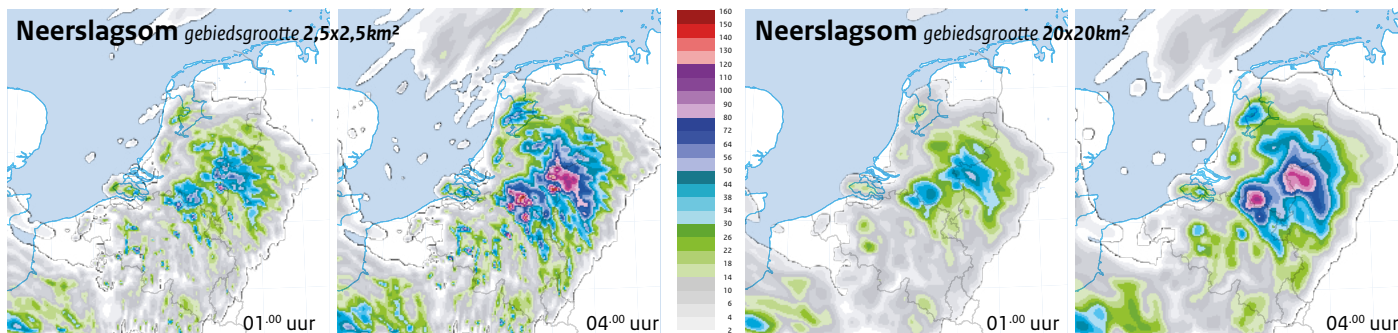
De piekintensiteit van een bui kan een stuk hoger zijn dan het gemiddelde over een langere tijd of over een groter oppervlak. Op verharde ondergrond, zoals in de stad, leidt een hoge piekintensiteit al snel tot waterschade en overlast. Zo kan een rioelstelsel maximaal zo'n 25 tot 30 mm per uur afvoeren. Bij hogere regenintensiteiten komt er al snel water op

straat. Maar de totale hoeveelheid regenwater, het neerslagvolume, is veel groter voor de totale neerslag over grotere gebieden. Een rekenvoorbeeld kan dit verduidelijken. Uit afbeelding 4 blijkt dat er ongeveer 25 miljoen kubieke meter water als neerslag kan vallen over een gebied van 20x20 km² in 2 uur tijd. Wanneer we aannemen dat daarvan 20%

niet door de bodem kan worden opgenomen en afstroomt, betekent dit dat er gemiddeld over 2 uur ongeveer 700 kubieke meter per seconde moet worden afgevoerd. Ter vergelijking, gedurende de overstromingen in juli 2021 viel er in het stroomgebied van de Ahr in Duitsland, met een grootte van 900 km², veel neerslag op 14 juli (ongeveer 120 mm in 12 uur en maximaal 30-40 mm in een uur) en bereikten de piekwaardes van de afvoer in enkele uren tijd meer dan 1000 kubieke meter per seconde, met desastreuze gevolgen².

Hoe aannemelijk zijn deze gemodelleerde neerslaghoeveelheden?

Vergeleken met neerslagstation waarnemingen in Nederland en ook Frankrijk zien we dat de neerslagstatistiek van het hier gebruikte model HCLIM in het algemeen zeer goed is¹. Ook reproduceert het model waargenomen afhankelijkheden van vocht op een goede manier⁴. Hoe realistisch het model presteert onder specifieke omstandigheden is echter niet precies vast te stellen; daarvoor is tijdsduur van de waarnemingen en modelsimulaties te kort. Maar we kunnen de uitkomsten wel vergelijken met waargenomen gebeurtenissen in Nederland en omgeving en het plaatsen binnen de statistiek van extremen. Ten opzichte van waarnemingen in Nederland en omliggende landen lijken de gesimuleerde



Afbeelding 3. Maximale neerslagsommen over verschillende tijdsduren (1 en 4 uur, links en rechts) en gebiedsgroottes (2,5x2,5km² en 20x20km²). Voor een gebiedsgrootte 20x20km² is voor ieder rekenpunt in het omliggende gebied gekeken. Het maximum (99.99% percentiel, representatief voor 5 gridpunten met de hoogste waarden) voor Nederland is linksboven weergegeven als indicatie van de hoogste waarden. Binnen een stroomgebied kan er lokaal aanzienlijk meer neerslag vallen dan voor het stroomgebied gemiddeld; bijvoorbeeld voor een duur van 4 uur valt er voor 20x20 km² maximaal ruim 100 mm neerslag gemiddeld over het gebied nabij Arnhem en Eindhoven, maar lopen de lokale maximale hoeveelheden op tot 160 mm.

waardes realistisch. Om een aantal observaties van extremen te noemen: op 28 juni 2011 viel er 90 mm in een uur in Herwijnen. Op 2 juli 2011 viel er ongeveer 135 mm in 2 uur in Kopenhagen (Denemarken), waardoor grote delen van de stad onder water kwamen te staan. De totale neerslagsom van 170 mm maximaal in een aantal uur is vergelijkbaar met een extreme bui in Norfolk (Verenigd Koninkrijk, 16 augustus 2020).

Op 28 juli 2014 viel er in Zuid-Holland ook meer dan 100 mm in een aantal uur, met een

overstroming van een dijk in Alphen aan de Rijn als gevolg. Waarnemingen uit diverse landen geven ook aan dat bij een dauwpunt van boven 22°C de neerslagintensiteit kan oplopen tot 100 mm in een uur. Daaruit leiden we af dat de gevonden piekintensiteit weliswaar extreem, maar ook aannemelijk is.

Hoe vaak kunnen we een dergelijke piekbui verwachten in het huidige klimaat?

De kans dat een bui precies op één specifieke locatie valt kan worden afgeleid uit de neer-

slagstatistieken. Op basis van observaties van 2003-2016 komen we op een lokale herhalings-tijd van ongeveer 1000 jaar³. Omdat het hier gaat om zeldzame gebeurtenissen en de waarnemingsreeks relatief kort is, zijn schattingen hiervan onzeker. Ook voor de 2- en 4-uurlijkse neerslag geldt dat de gemodelleerde waarde binnen de bandbreedte valt van de neerslagstatistiek voor eens per 1000 jaar. Maar met een veelvoud aan mogelijke plekken waar de bui kan vallen, is de kans dat dit ergens in Nederland gebeurt veel groter. Terwijl plaatselijk de kans dat er 50 mm per uur valt

Methodologie

We maken gebruik van een zeer fijn-schalig regionaal weer- en klimaatmodel. Een regionaal model berekent het weer of klimaat in een regionaal gebied (het modeldomein), typisch ter grootte van 2000 bij 2000 km. Dit model type, zoals ook wordt gebruikt voor de dagelijkse weersverwachting van het KNMI, wordt aan de rand van het domein gevoed met waargenomen stromingspatronen (onder andere, de ligging van hoge- en lagedrukgebieden) uit een zogenaamde re-analyse⁶.

Waar bij de weersverwachting iedere keer de begintoestand van de simulatie bepaald wordt op grond van eerdere modelsimulaties gewogen met waarnemingen, draait een klimaat simulatie vrij door, alleen geforceerd vanuit de rand. Hierdoor heeft de atmosfeer binnen het domein net iets meer vrijheid om zichzelf te ontwikkelen.

De statistiek uit dit soort klimaatsimulaties vergelijkt (zeer) goed met de waarnemingen¹⁷, maar wijkt van dag tot dag licht af van de werkelijkheid (zie bijlage). Dit komt bijvoorbeeld doordat kleinschalige, onvoorspelbare processen (bijvoorbeeld de condensatie van vocht en turbulentie) van invloed kunnen zijn op deze stromingspatronen. Kortweg betekent dit dat de simulatie zich net iets anders ontwikkelt dan de werkelijk opgetreden situatie op 19 juni, doordat de begintoestand van de atmosfeer aan het begin van de dag net iets anders is door toevallige variaties in de dagen ervoor. Dit is grotendeels vergelijkbaar met de ECMWF-ensembleverwachting, maar dan met een meer toevallige en kleinschaligere verstoring. Dit is dus een variant die had kunnen optreden, gegeven de grootschalige atmosferische toestand van dat moment. ■

ongeveer eens per 50 jaar is, weten we uit data van de neerslagradar dat deze hoeveelheid vrijwel ieder jaar wel ergens in Nederland valt in één uur. De kans dat de hier gevonden neerslaghoeveelheden ergens in Nederland voorkomen, is dan ongeveer eens per 10-50 jaar. Om dit preciezer vast te stellen zou een uitgebreidere analyse nodig zijn. Dit is echter geen eenvoudige vraag, omdat het afhangt van de ruimtelijke schaal van een bui. Hoe kleiner de bui, des te groter is de kans dat deze ergens in Nederland optreedt. Ook verandert de kans door klimaatverandering.

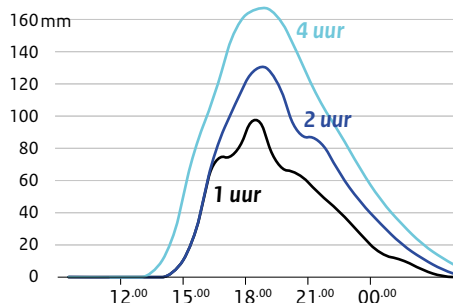
Kan deze gebeurtenis overal in Nederland optreden?

Voor uursommen in neerslag kunnen we statistisch niet vaststellen dat er ruimtelijke verschillen in extremen zijn binnen Nederland. Dit betekent echter niet dat er geen verschillen bestaan; neerslag is zeer variabel en extremen zijn zeldzaam, waardoor verschillen vaak niet boven de ruis uitkomen. Op basis van de typische ontwikkelingen van buien lijkt de kans op een soortgelijke neerslaggebeurtenis in Zuidoost-Nederland wel groter dan op andere plekken.

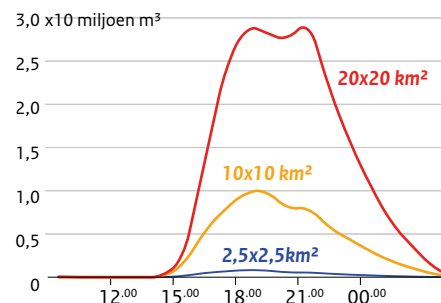
Klimaatverandering: vaker intense buien

Door klimaatverandering neemt extreme neerslag toe. Dit komt grotendeels door meer waterdamp in de atmosfeer bij hogere temperaturen. Dit wordt nog eens versterkt, omdat de warmte die vrijkomt, door condensatie van waterdamp in een wolk, kan leiden tot sterkere stijgbewegingen. Daardoor kan er nog meer waterdamp condenseren en uiteindelijk nog meer water als neerslag naar beneden vallen. Door klimaatverandering kan neerslag zich ook herverdelen in ruimte en tijd. In drogere situaties (lage relatieve vochtigheid) kan neerslag zich *buiiger* gaan gedragen, waarbij de neerslag valt over een kleiner gebied maar met (veel) hogere intensiteit. In vochtigere situaties kunnen buien juist uitgroeien tot grotere complexen, waarbij de neerslagsom extra toeneemt. Ook zien we dat de temperatuurverschillen kunnen toenemen, bijvoorbeeld aan de rand van een koude poel⁴ en in de overgangszone tussen de opdringende koude lucht uit het westen en de warme lucht boven land. Dat kan aanleiding geven tot sterkere windstoten. Hoewel de processen die hier een rol in spelen deels bekend zijn, kunnen we nog niet goed inschatten hoe dit precies uitpakt in de toekomst. Hoe snel de neerslagintensiteit omhooggaat met verdergaande opwarming is daarmee onzeker.

Maximum neerslagsom 2,5 x 2,5 km²



Maximum neerslagvolume 2 uur



Afbeelding 4. Tijdsreeks van de maximale neerslag in Nederland. Links de neerslag som over 1, 2 en 4 uren, en rechts het neerslag volume voor 2 uur over een gebied van 2,5x2,5km², 10x10km², en 20x20km².

De hoeveelheid neerslag in extreme gebeurtenissen neemt dus toe en neerslag krijgt een ander, meer buig karakter waardoor plaatselijk de hoeveelheden sterker kunnen toenemen dan de gemiddelden over grotere gebieden suggereren⁵.

Omdat de bodem een beperkte infiltratiecapaciteit heeft (wateropname per tijdsduur), kunnen hogere neerslagintensiteiten leiden tot grotere hoeveelheden water die als oppervlaktewater moeten worden afgevoerd. In sommige gevallen kan een drogere bodem meer en sneller water opnemen, maar in

andere gevallen leidt een drogere bodem juist tot minder opname van water, met bodemerosie en modderstromen tot mogelijk gevolg. Door dit soort cumulatieve effecten kunnen de gevolgen van neerslagextremen sneller veranderen dan verwacht. ■

Referenties

1. Lenderink, G. et al. (2025): Are dependencies of extreme rainfall on humidity more reliable in convection-permitting climate models? *Hydrology and Earth System Sciences* 29.
2. Tradowsky, J. S. et al. (2023): Attribution of the heavy rainfall events leading to severe flooding in Western Europe during July 2021. *Climatic Change* 176.
3. Beersma, J. et al. (2019): Neerslagstatistiek en reeksen voor het waterbeheer 2019.
4. Lochbihler, K. et al. (2021): Cold Pool Dynamics Shape the Response of Extreme Rainfall Events to Climate Change. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 13.
5. Lenderink, G. et al. (2025): A pseudo global warming-based system to study how climate change affects high impact rainfall events. *Weather and Climate Extremes* 49.
6. Hersbach, H. et al. (2020): The ERA5 global reanalysis. *Quart J Royal Meteor Soc* 146.
7. Ban, N. et al. (2021): The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, part I: evaluation of precipitation. *Climate Dynamics* 57.

DUISTERLUWTE

Als duisterluwte de stroomvoorziening onder spanning zet

Op een dag in december

“Doordat het al een week lang windstil is in Noordwest-Europa en de zon in de winter überhaupt vrij zwak is, wordt er weinig hernieuwbare elektriciteit geproduceerd. Tegelijkertijd is de vraag naar elektriciteit juist hoog, onder andere omdat het al de hele week vriest. De stroomvoorziening komt onder spanning te staan, er is moeite om aan de vraag te kunnen voldoen.”

Zo zou het kunnen gaan. Maar zover is het nog niet.



ILLUSTRATIE KNMI

AUTEURS

- **Bram van Duinen** KNMI
- **Koen Gorrissen** TenneT TSO

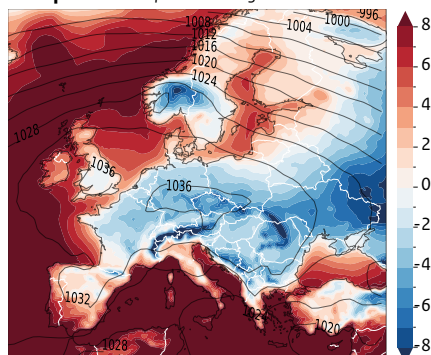
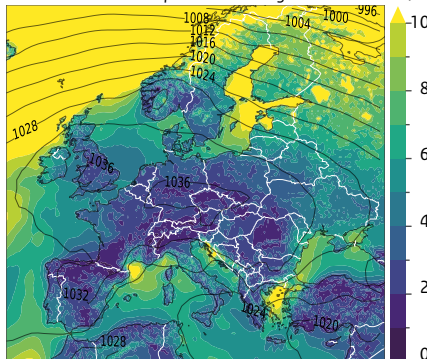
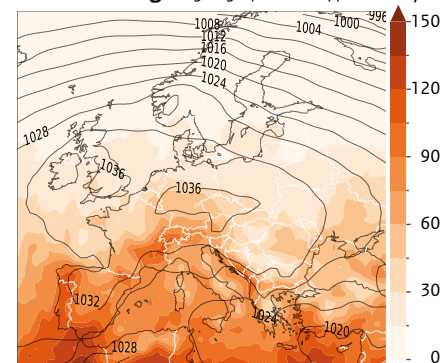
Introductie

Door de energietransitie speelt het weer een steeds grotere rol in het energiesysteem. Wanneer het tegelijkertijd bewolkt of donker is, en er weinig wind staat, wordt er weinig zonne- en windenergie opgewekt. Zo'n periode noemen we een duisterluwte (naar het Duitse dunkelflaute).

Naast de productie van duurzame energie, is ook de vraag naar elektriciteit afhankelijk van het weer. Als het koud is, is de vraag hoog, doordat er veel elektrische verwarming met warmtepompen nodig is. Tijdens een koude duisterluwte is er dus tegelijkertijd weinig aanbod en een hoge vraag, waardoor elektriciteitstekorten kunnen ontstaan, een zogenoemde energiedroogte. Het stroomnet in Noordwest-Europa is sterk verbonden. Daarom ontstaat een extreme energiedroogte in Nederland niet in afzondering, maar is het

ook van belang wat de weersomstandigheden zijn in de rest van Europa.

De intensiteit van een energiedroogte wordt uitgedrukt in de restvraag. Dit berekenen we als de vraag naar elektriciteit min de opwek van hernieuwbare elektriciteit op dat moment. Een restvraag op zich is niet bijzonder en wordt in Nederland momenteel vooral opgevuld door gascentrales. Een extreme duisterluwte gecombineerd met koude kan echter voor zo'n hoge restvraag zorgen dat er mogelijk niet genoeg alternatieve manieren zijn om elektriciteit op te wekken.

Temperatuur op 2 meter hoogte**Windsnelheid op 100 meter hoogte****Zonnestraling kortgolvig, op het aardoppervlak**

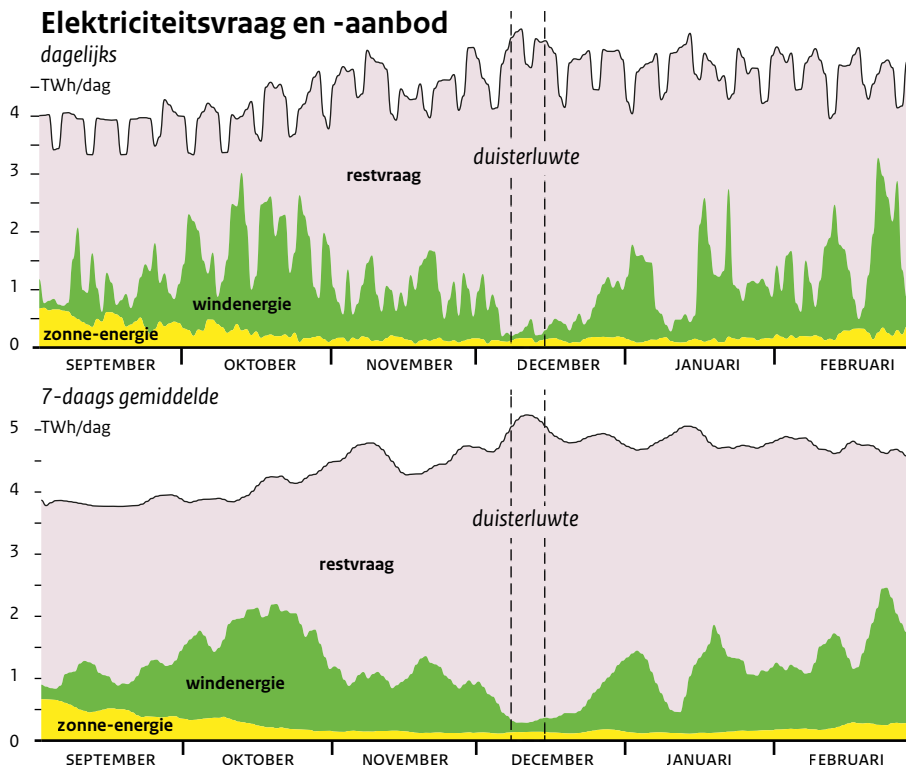
Afbeelding 1: de gemiddelde meteorologische condities gedurende de week van 9 december t/m 15 december in een klimaatsimulatie. Van links naar rechts: a) de gemiddelde temperatuur, b) windsnelheid op 100 m hoogte en c) kortgolfige zonnestraling die aankomt op het aardoppervlak. De zwarte lijnen geven de gemiddelde luchtdruk van die week aan in mbar.

Welke weerssituaties zorgen daarvoor? En wat kunnen energiegebruikers hiervan merken?

Meteorologie

Koude duisterluwtes in Europa worden vaak veroorzaakt door sterke, grootschalige hogedrukgebieden in de wintermaanden¹. In afbeelding 1 zien we de gemiddelde weersomstandigheden tijdens een extreme duisterluwte in december, zoals dat volgens de gebruikte klimaatmodellen kan voorkomen in het huidige klimaat. Het weerbeeld wordt gedomineerd door een groot hogedrukgebied dat zich uitstrekt van West- tot Oost-Europa. Dit hogedrukgebied brengt een stroming van koude, droge lucht uit het oosten van Europa richting Noordwest-Europa op gang. Dit zorgt voor weekgemiddelde temperaturen van zo'n -3°C in een groot deel van deze regio. Die kou zorgt voor een piek in de elektriciteitsvraag in Noordwest-Europa (afbeelding 2, zwarte lijn).

Daarnaast zorgt het hogedrukgebied voor weinig wind over vrijwel geheel Noordwest-Europa. In afbeelding 1b is te zien dat in Nederland de weekgemiddelde windsnelheid op 100 meter hoogte tussen de 2 en 3 meter per seconde (m/s) ligt, op 10 meter hoogte is er weekgemiddeld windkracht 1 à 2. Op het Nederlandse deel van de Noordzee is de windsnelheid op 100 meter iets hoger, tot 4



Afbeelding 2: Gemodelleerde weersafhankelijke elektriciteitsvraag en -aanbod in Noordwest-Europa op basis van het eenvoudige energiemodel per dag (boven), en 7-daags (onder) gemiddeld. Het 7-daagse gemiddelde is gecentreerd berekend. Dat betekent dat het gemiddelde is berekend op basis van de dag zelf, drie dagen ervoor en drie dagen erna. De waarden zijn opgeteld voor het hele gebied in Noordwest-Europa (Nederland, België, Duitsland, Denemarken, Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk).

Methodologie

We bestuderen de interactie tussen het weer en de vraag en aanbod van duurzame elektriciteit met een combinatie van klimaatmodellen en energiemodellen. Met drie klimaatmodellen (EC-Earth3³, CMCC-CM2-SR5⁴, en MPI-ESM1-2-HR⁵) wordt het *mogelijke* weer voor het klimaat van 2025 tot en met 2036 gesimuleerd onder een matig uitstootscenario (SSP2-4.5). De totale simulatie beslaat (3x12 =) 36 jaar⁶. De belangrijkste weervariabelen voor deze casus zijn de temperatuur op 2 meter hoogte, de windsnelheid op 100 meter hoogte, en de intensiteit van zonnestraling aan het aardoppervlak.

Deze variabelen uit de klimaat simulaties dienen vervolgens als input voor een eenvoudig energiemodel voor elektriciteit⁷. Op basis van de temperatuur berekent dit model de elektriciteitsvraag. Het opgewekt vermogen van zonne- en windenergie volgt uit de inkomende zonnestraling en de windsnelheid, respectievelijk. Dit model is geschikt om de directe weersinvloed op het elektriciteitssysteem te isoleren, zonder alle complexiteit van de energiemarkt mee te nemen. Daarom

wordt dit model gebruikt om de casus te bepalen. Het eenvoudige energiemodel houdt rekening met de locatie en totale capaciteit van windturbines en zonnepanelen in 2023.

TenneT werkt met een ander, gedetailleerder energiemodel voor de elektriciteitssector, om de energie-impact van de gedefinieerde extreme duisterluwte in meer detail door te rekenen. TenneT rekent met dit model toekomstige versies voor het energiesysteem door, bijvoorbeeld met meer zonnepanelen en windturbines. Dit model gebruikt TenneT voor de monitoring van leveringszekerheid van elektriciteit in toekomstige scenario's. Voor de impact-bepaling van deze casus gebruiken we een scenario voor het energiesysteem in 2035². Een sterk hernieuwbaar energiesysteem is gevoeliger voor duisterluwttes.

De variabele die bepaalt hoe extreem een weerssituatie is voor het energiesysteem is de restvraag. Dit is de elektriciteitsvraag min de opwek van zonne- en windenergie. We definiëren een extreme situatie dus op basis van een piek in de restvraag, en ki-

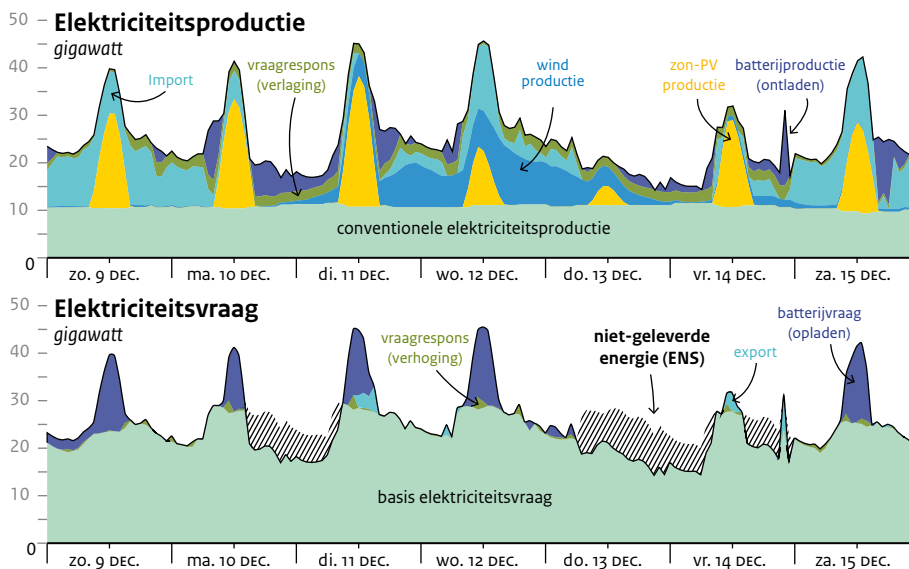
jken dan wat voor weersomstandigheden voor die piek hebben gezorgd. We bekijken de 7-daags gemiddelde restvraag, omdat deze langdurige pieken momenteel nog relatief lastig zijn om op te vangen met energieopslag.

De elektriciteitsnetten in Noordwest-Europa zijn sterk met elkaar verbonden via internationale stroomverbindingen. Daarom worden eventuele tekorten als het ware 'gedeeld' tussen deze landen. Daarom bekijken we de restvraag op het niveau van Noordwest-Europa (Nederland, België, Duitsland, Denemarken, Frankrijk en het Verenigd Koninkrijk) om een extreem event te definiëren. Met het meer gedetailleerde model voor de elektriciteitssector van TenneT zoomen we in op de specifieke invloed op de Nederlandse elektriciteitsmarkt.

Zie de bijlage voor meer details en achtergrond over de gebruikte datasets, modellen, event-bepaling en de berekening van de herhalingstijden. ■

m/s. Windturbines gaan echter pas draaien en energie opwekken vanaf windsnelheden van 3 à 4 m/s (afhankelijk van het model windturbine). Grote delen van de week produceren de windparken in Noordwest-Europa vrijwel niets (afbeelding 2, groene vlak).

Dankzij het hogedrukgebied is de hoeveelheid zon (afbeelding 1c) juist aan de hoge kant voor de tijd van het jaar. Maar in de donkere wintermaanden is er sowieso relatief weinig instraling van de zon, doordat de dagen zo kort zijn en de zon laag boven de horizon staat.



Afbeelding 3: Uurlijkse waarden van de elektriciteitsproductie en -vraag in Nederland tijdens de extreme energiedroogte in een energiesysteem-scenario van 2035, volgens het gedetailleerde energiemodel van TeneT. De gearceerde blokken met niet-geleverde energie tonen de momenten van tekorten. Deze momenten bepalen de impact van het event.

Daardoor is er dus ook weinig productie van zonne-energie. In het algemeen hebben variaties in zonnestraling in de winter een beperkte invloed op de totale elektriciteitsproductie en dus op een eventuele energiedroogte.

Samenloop van omstandigheden

Ook wanneer de individuele factoren (temperatuur, windsnelheid, en in mindere mate zonnestraling) niet zo extreem zijn, kan de combinatie zorgen voor een intense energiedroogte. Dit wordt ook wel een *compound event*, of *samengesteld extreem*, genoemd.

Een weekgemiddelde elektriciteitsvraag, zo hoog als in deze casus, komt ongeveer eens per 2 jaar voor (met een onzekerheidsmarge van 1,3 tot 3,9 jaar). De lage weekgemiddelde productie van windenergie is iets zeldzamer, met een herhalings tijd van 6,7 jaar voor (onzekerheidsmarge 3 tot 28 jaar). De weekgemiddelde zonne-energieproductie van deze casus is niet bijzonder laag en komt meerdere keren per jaar voor.

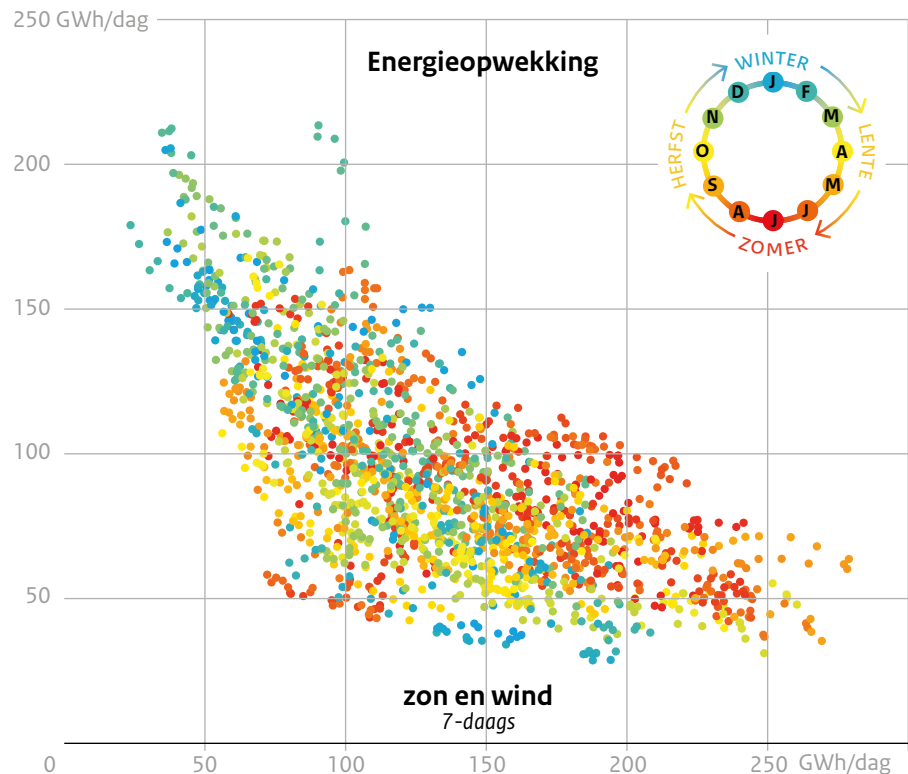
Maar deze drie factoren samen resulteren in een extreem hoge restvraag naar elektriciteit, die naar schatting slechts eens in de 141 jaar voorkomt (met een forse onzekerheid van 33 tot meer dan 10.000 jaar).

Het samenvallen van een relatief koude week met een zeer windstille week komt dus zelden voor, maar kan voor een flinke impact op het energiesysteem zorgen. Ondanks de zeldzaamheid ervan is het een aannemelijk meteorologisch scenario. De berekening van de restvraag hangt af van aannames over het energiesysteem. Deze herhalingstijden zijn berekend op basis van de restvraag zoals die zou optreden in het energiesysteem van 2023.

Impact

De casus is bepaald met een eenvoudig energiemodel, maar om de impact van de beschreven duisterluwte beter te bepalen rekende netbeheerder TenneT dezelfde casus ook door in hun gedetailleerde model van de elektriciteitssector van Europa². Hierin wordt ook de niet-weersafhankelijke elektriciteitsproductie, bijvoorbeeld uit gascentrales, gemodelleerd. Ook is in dit model de berekende vraag naar elektriciteit afhankelijk van de elektriciteitsprijs.

TenneT drukt de impact van de energiedroogte uit in de mogelijk niet-geleverde energie (vakterm: *Energy not Served*), in het geval van deze casus dus elektriciteit. Dat energietekort ontstaat door het verschil tussen de *verwachte* vraag naar en aanbod van elektriciteit. De berekening is vergelijkbaar met de eerdergenoemde restvraag (electriciteitsvraag min productie



Afbeelding 4: De zevendaags gemiddelde productie van elektriciteit uit zonne- en windenergie, en de daaraan complementaire productie van elektriciteit door gascentrales, over de periode januari 2021 tot en met oktober 2025. Te zien is dat periodes met weinig opwek uit zonne en wind gecompenseerd worden door meer elektriciteitsopwek uit gas, en vice versa. Correlatiecoëfficiënt R is -0.69 . Bron: NED.nl en GasUnie.

uit zon en wind), maar de berekening van 'niet-geleverde energie' neemt alle elektriciteitsproductie en -vraag in meer detail mee.

De impact van deze weerssituatie is sterk afhankelijk van het bestudeerde energiesysteem. De hoeveelheid wind- en zonneparken zal naar verwachting sterk toenemen in de komende jaren. Het TenneT-model beoordeelt de impact in het energiesysteem van de nabije toekomst, in 2035, om risico's in het toekomstige energiesysteem in te kunnen schatten en te verminderen. De impact van een duisterluwte is groter in een sterk hernieuwbaar energiesysteem. In dit systeem is er een grotere afhankelijkheid van zon en wind, en is elektriciteit een groter onderdeel van de totale energievraag in Nederland. De koude duisterluwte zorgt er in dat scenario voor dat 353 GWh aan gevraagde elektriciteit die week níét geleverd kan worden. Dat komt neer op zo'n 8,6% van de totale elektriciteitsvraag in Nederland van die week (afbeelding 3).

In dit geval is er simpelweg niet genoeg elektriciteit beschikbaar om aan de vraag te voldoen, ondanks dat de vraag daalt als gevolg van de hoge elektriciteitsprijzen tijdens de schaarste. Doordat de energiedroogte relatief lang aanhoudt en een groter gebied dan alleen Nederland treft, zijn op een gegeven moment de batterijen leeg en is er beperkt mogelijkheid

voor import van elektriciteit uit buurlanden. Hierdoor lopen de tekorten snel op, tijdens piekmomenten zelfs tot 8,9 GW, oftewel zo'n 38% van de totale elektriciteitsvraag op dat moment. Dit soort extreme tekorten komen vooral voor rond het avondeten, wanneer de elektriciteitsvraag piekt.

Op momenten van tekorten gaan de prijzen op de elektriciteitsmarkt naar het wettelijke maximum. Nu is dat 4 euro per kWh als wettelijk bepaald maximum; meer dan vijftig keer de gemiddelde elektriciteitsprijs. Dit bedrag kan in de toekomst hoger worden. Bij deze prijs zullen sommige industriële partijen besluiten hun elektriciteitsvraag te verlagen, of zelfs fabrieken compleet stil te zetten.

Wanneer alle flexibiliteit benut is, maar er nog steeds een energietekort is - zoals in deze extreme week - zal de netbeheerder een deel van de elektriciteit afschakelen. Dan wordt de elektriciteitslevering in een deel van het land tijdelijk stilgelegd om een grootschalige stroomstoring te voorkomen. Afschakelen mag alleen in noodsituaties, zoals hier het geval zou zijn. Bij zo'n afschakeling wordt rekening gehouden met kritische infrastructuur, zoals waterkeringen en ziekenhuizen. Desondanks zou deze energiedroogte tijdelijk maatschappij-ontwrichtende effecten kunnen hebben, waarbij bijvoorbeeld industrie moet stoppen

met produceren, treinen stilstaan, en huishoudens tijdelijk geen toegang tot elektriciteit hebben.

In het huidige energiesysteem zou de duisterluwte behalve hoge stroomprijzen nog niet zulke drastische effecten hebben. Dat komt omdat een groot deel van de elektriciteit nu nog wordt geproduceerd door gascentrales. Op momenten dat er weinig elektriciteit geproduceerd wordt uit zon en wind, wordt dit gecompenseerd door een toename in elektriciteitsproductie uit gascentrales. In afbeelding 4 is te zien dat de productie van elektriciteit uit gas piekt tijdens duisterluwttes. Daarnaast speelt elektriciteit nu nog een relatief kleine rol in de warmtevoorziening van Nederland, waarvoor nu nog vooral gas wordt gebruikt.

Wanneer het gasvermogen afneemt in de elektriciteitsproductie en de elektriciteitsvraag sterker gaat stijgen bij koud weer, wordt het energiesysteem veel gevoeliger voor weersinvloeden. Om ook in de toekomst een veilige energievoorziening te houden wordt er nagedacht over manieren om back-up productie beschikbaar te houden voor noodsituaties. Daarnaast wordt er onderzoek gedaan naar energieopslag en naar manieren hoe de vraag naar elektriciteit kan worden gestuurd, zodat verbruik en opwek beter op elkaar afgestemd zijn. ■

Referenties

1. Van Duinen, B. et al. (2025): *Meteorological drivers of co-occurring renewable energy droughts in Europe*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 223.
2. TenneT TSO B.V. (2025): *Monitor Leveringszekerheid 2025*. TenneT TSO B.V.
3. Döscher, R. et al. (2022): *The EC-Earth3 Earth system model for the Coupled Model Intercomparison Project 6*. *Geoscientific Model Development* 15.
4. Cherchi, A. et al. (2019): *Global mean climate and main patterns of variability in the CMCC-CM2 coupled model*. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 11.
5. Gutjahr, O. et al. (2019): *Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for the high-resolution model intercomparison project (HighResMIP)*. *Geoscientific Model Development* 12.
6. Copernicus Climate Change Services (C3S) (2023): *Pan-European Climate Database v4.1*.
7. Van der Most, L. et al. (2022): *Extreme events in the European renewable power system: Validation of a modeling framework to estimate renewable electricity production and demand from meteorological data*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 170.

MUGGEN

Als het westnijlvirus Nederland besmet

Op een dag in september:

“De balans van de zomer opgemaakt. Weer één die warmer is dan het langjarig gemiddelde en daarmee past de zomer in een opwarmende trend. In een land dat rijk is aan slotjes, vijvers en vaarten en nu ook een hogere zomertemperatuur heeft, zijn de omstandigheden optimaal geworden voor de gewone mug, die het westnijlvirus verspreidt. Waar enkele decennia geleden besmettingen met het westnijlvirus nog incidenteel waren in Nederland, zijn dit jaar opnieuw alle records gebroken en is het westnijlvirus in Nederland endemisch geworden.”

Zo zou het kunnen gaan. Maar zover is het nog niet.

FOTO RIVM



AUTEURS

- Gerard van der Schrier KNMI
- Maarten Boonekamp KNMI, TU Delft

Introductie

In 2020 wordt de eerste menselijke besmetting met het westnijlvirus in Nederland waargenomen. Dit virus kan via de gewone mug overgedragen worden op mensen. In het najaar worden de eerste besmettingen bij mensen vastgesteld¹.

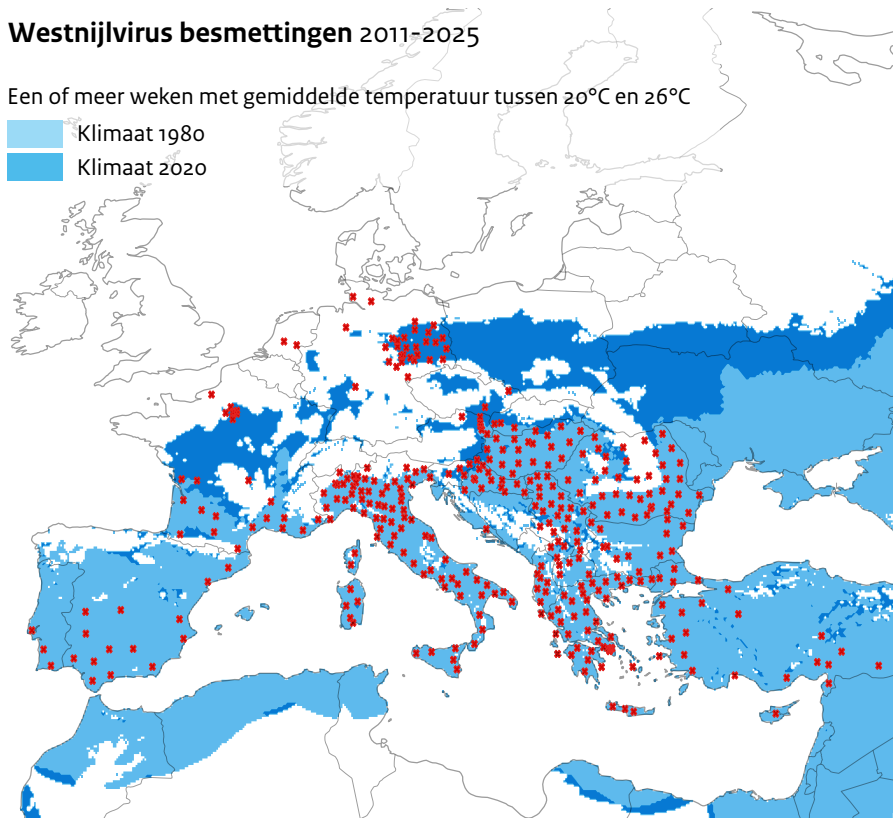
Het westnijlvirus is in Europa aan een noordelijke opmars begonnen. Waar enkele decenia geleden het virus enkel nog voorkwam in de buurt van de Middellandse zee, wordt het nu ook regelmatig in noordelijkere gebieden gevonden zoals Duitsland, Frankrijk en nu dus ook in Nederland. In 2018 – waarin Europa de warmste zomer ooit beleefde – werd in Europa een recordaantal mensen met westnijlkoorts gemeld¹; meer dan het totale aantal in de zeven jaren ervoor.

Hoe kan het dat dit virus nu ook in Nederland voorkomt? De kans op een besmetting met westnijlvirus neemt toe naarmate het klimaat warmer wordt en de temperatuur stijgt². Dat komt enerzijds doordat de grootte van muggenpopulaties en muggenactiviteit temperatuur- afhankelijk zijn³, en anderzijds omdat het

Westnijlvirus besmettingen 2011-2025

Een of meer weken met gemiddelde temperatuur tussen 20°C en 26°C

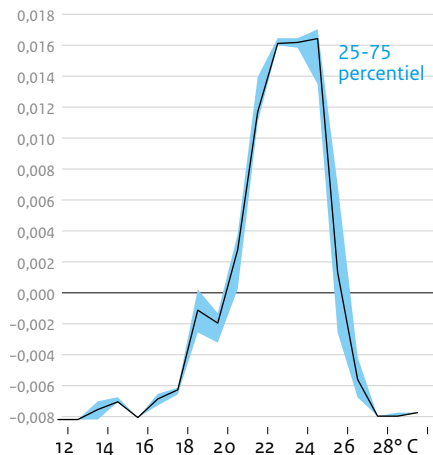
- Klimaat 1980
- Klimaat 2020



Afbeelding 1: Kaart van Europa waarop aangegeven is waar een weekgemiddelde temperatuur tussen 20°C en 26°C gemiddeld eens of vaker per jaar voorkomt in het klimaat van 1980 (lichtblauw) en 2020 (donkerder blauw). Getoonde westnijlvirus besmettingen (rood) zijn uit de periode 2011-2025.

Gevoeligheid virusuitbraak

per daggemiddelde temperatuur



Afbeelding 2: De gevoeligheid voor een uitbraak van westnijlvirus als functie van de daggemiddelde temperatuur, uitgedrukt in de zogenaamde SHAP-waardes (zie methodologie).

virus makkelijker vermeerderd in muggen met hogere temperaturen⁴. Muggenaantallen en -activiteit hangen ook samen met neerslag en relatieve luchtvochtigheid, door een complexe samenhang van factoren die uiteindelijk zorgen voor grotere aantallen muggen⁵. Het is dan ook geen toeval dat veel uitbraken van

westnijlvirus in waterrijke gebieden plaatsvinden, omdat juist daar de luchtvochtigheid relatief hoog is⁵. Dat geldt ook voor de uitbraak van 2020 die is vastgesteld in een waterrijke Utrechtse polder.

Het is overigens niet alleen het klimaat dat een belangrijke rol speelt in de verspreiding van het westnijlvirus. Trekbewegingen van vogels – die het virus met zich kunnen dragen – kunnen

ervoor zorgen dat het virus geïntroduceerd wordt op plekken waar het eerst niet voorkwam⁶. Daarbij speelt, naast het klimaat, ook landgebruik⁷ een rol. Wij richten ons hier op de invloed van het klimaat, maar dat neemt niet weg dat in werkelijkheid meer factoren een rol spelen.

Methodologie

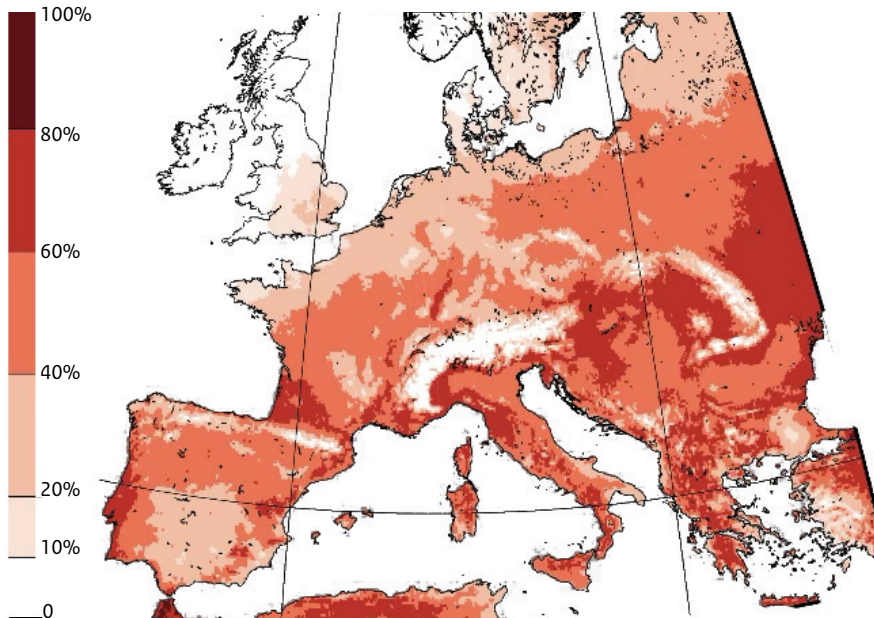
Om te kijken of de seizoenscyclus, of juist de afwijking daarvan, het meest met de timing en locatie van een uitbraak samenhangt, hebben we een vorm van *machine learning* toegepast. We hebben we de seizoenscycli en anomalieën van temperatuur, luchtvochtigheid en neerslag, naast uitbraakdata van het *European Centre for Disease Prevention and Control* gelegd, om te kijken of het *machine learning* model daar patronen in kon ontdekken.

Door het model meerdere keren te trainen op verschillende variabelen, kan worden bepaald in welke mate de verschillende parameters samenhangen met een uitbraak. Hieruit blijkt dat met

name de seizoenscyclus van temperatuur belangrijk is, en in mindere mate de seizoenscyclus van luchtvochtigheid. In hoeverre een bepaalde waarde voor de temperatuur gerelateerd wordt aan een uitbraak in ons model, kan worden weergegeven met behulp van zogeheten SHAP-waardes (zie bijlage). Een hoge positieve SHAP-waarde geeft aan dat de waarde richting een uitbraak wijst, een lage negatieve waarde wijst juist op een lage kans op een uitbraak. In ons model zien we dat voor weekgemiddelde temperaturen boven de 22 graden, de SHAP-waarde toeneemt, en daarmee de kans op een uitbraak in de daaropvolgende weken (afbeelding 2). ■

Daggemiddelde temperatuur tussen de 20°C en 26°C

zomerseizoen 2030-2034



Afbeelding 3: De fractie van het aantal dagen in het zomerseizoen waarbij de daggemiddelde temperatuur tussen de 20°C en 26°C is, gemiddeld over de 5-jarige periode 2030-2034. Dit volgt het KNMI'23 scenario waarbij de wereld 1,5°C opgewarmd is en wat naar verwachting voor 2035 gehaald zal zijn.

De afhankelijkheid van temperatuur

Op basis van ons onderzoek (zie bijlage), lijkt met name de gemiddelde seizoenscyclus van

de daggemiddelde temperatuur belangrijk voor virusuitbraken. Die gemiddelde seizoenscyclus is gedefinieerd als de trend die je krijgt,

als je voor elke dag in het jaar, het klimatologisch gemiddelde berekent. Als de weekgemiddelde temperatuur tussen 20°C en 26°C komt, is er een verhoogde kans op een uitbraak in de daaropvolgende weken (afbeelding 2).

Door het opwarmen van het klimaat is het voor West- en Centraal-Europa niet meer uitzonderlijk als de weekgemiddelde temperatuur de drempelwaarde van 20°C bereikt; de typische gemiddelde seizoenscyclus van Mediterraan Europa schuift langzaam naar het noorden. Dat is goed te zien als we voor Europa een kaart maken waarop is aangegeven waar een weekgemiddelde temperatuur tussen 20 en 26°C gemiddeld één of meer keer per jaar voorkomt (afbeelding 1). Waar in het klimaat van 1980 dit soort weken niet voorkwamen in Noordwest-Europa, komen die nu wel gemiddeld eens per jaar voor in bijvoorbeeld Frankrijk en Duitsland, tot vlakbij Nederland.

De vergelijking met alle uitbraken tot nu toe (afbeelding 1) laat zien dat inderdaad gebieden als Noord-oost-Duitsland, maar ook de Po-vlakte in Italië en de Griekse en Spaanse kust naar voren komen als gebieden waar frequent uitbraken van het westnijlvirus gerapporteerd worden – gebieden die samenvallen met de gunstige temperatuur voor verspreiding van het virus.

Wat is de impact?

In het algemeen is de kans niet heel groot dat iemand besmet raakt met het westnijlvirus; het wordt alleen door besmette muggen overgebracht, en dus niet van mens tot mens. Symptomen van een besmetting zijn koorts, hoofdpijn en spierpijn. Van de geïnfecteerde mensen ontwikkelt ongeveer 1% een neuro-invasieve ziekte, wat in 10% van die gevallen fataal is.

Als voorbeeld van een gebied waarin sinds een aantal jaar uitbraken zijn, kunnen we Noord-Duitsland nemen. Sinds 2018 wordt het westnijlvirus daar aangetroffen bij mensen, muggen, vogels en paarden. In Leipzig werden er bijvoorbeeld tussen 15 augustus en 9 september bij negen mensen symptomen vastgesteld. Daarvan ontwikkelden zeven neuro-invasieve ziekte, waaraan één patiënt overleden is. Hoewel het aantal fatale gevallen nu dus nog beperkt is, kan dat aantal toenemen zodra het aantal besmettingen toeneemt. Daarom is het van belang dat we een inschatting kunnen maken waar en wanneer in de toekomst uitbraken zullen plaatsvinden.

Hoe zou dit in de toekomst kunnen veranderen?

Met de opwarming van de aarde zien we dat het gebied waar de daggemiddelde temperatuur op een zomerdag tussen de 22°C en 26°C is steeds verder naar het noorden kruipt (afbeelding 3). In delen van Spanje en Italië zien we dat deze dagen steeds minder voorkomen – het wordt daar ook voor de mug te warm.

De verwachting is dat de temperatuur in Europa nog verder toe zal nemen, ook in Nederland. De gemiddelde temperatuur in Nederland is nu al 0,8°C warmer dan wat in 1991-2020 gebruikelijk was. Bij een mondiale opwarming van 1,5°C, wat waarschijnlijk ruim voor 2035 bereikt wordt, zal het gebied met gunstige temperatuur voor het westnijlvirus tot in Zuid-Scandinavië zijn uitgebreid. En heel Nederland heeft dan tot 40% van de zomerdagen gunstige temperaturen voor de verspreiding van dit virus. Het is dan ook aannemelijk dat het westnijlvirus in de toekomst vaker in Nederland aanwezig zal zijn en dat ook meer mensen zullen worden besmet.

Referenties

1. Van Ewijk, C. et al. (2024): Westnijlvirus in Nederland. *Surveillance en Respons 2021-2023*. RIVM.
2. Moirano, G. et al. (2025): Short-term effect of temperature and precipitation on the incidence of West Nile Neuroinvasive Disease in Europe: a multi-country case-crossover analysis, *The Lancet* 48.
3. Lebl, K. et al. (2013): Predicting Culex pipiens/restuans population dynamics by interval lagged weather data. *Parasites and Vectors* 6.
4. Heidecke, J. et al. (2025): Uncovering temperature sensitivity of West Nile virus transmission: Novel computational approaches to mosquito-pathogen trait responses. *PLOS Comp Bio*.
5. Garcia-Carrasco, J.M. et al. (2021): Predicting the spatio-temporal spread of West Nile virus in Europe. *PLOS Negl Trop Dis* 15.
6. Mancuso, E. et al. (2022): West Nile and Usutu Virus Introduction via Migratory Birds: A Retrospective Analysis in Italy. *Viruses*.
7. Lu, L. et al. (2024): West Nile virus spread in Europe: Phylogeographic pattern analysis and key drivers. *PLOS Path*.
8. Frank, C. (2022): West Nile Virus in Germany: An Emerging Infection and Its Relevance for Transfusion Safety. *Transfus Med Hemother* 49.

Colofon

Publicatiedatum

12 december 2025

Auteurs

KNMI-auteurs: Nadia Bloemendaal, Maarten Boonekamp, Bram van Duinen, Job Dullaart-van Veen, Geert Lenderink, Erik van Meijgaard, Lone Mokkenstorm, Carolina Pereira Marghidan, Gerard van der Schrier, Peter Siegmund, Bart Verheggen, Leon van Voorst, Hylke de Vries

Externe auteurs: Nathaly Dasburg-Tromp (Rijkswaterstaat WVL), Anne van Diepen (Veiligheidsregio Amsterdam-Amstelland), Maria Fonseca Cerda (Vrije Universiteit Amsterdam), Gasunie, Koen Gorrisen (TenneT TSO B.V.), Olaf Jonkeren (Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid), Elco Koks (Vrije Universiteit Amsterdam), Jourian Ligtenberg (Rijkswaterstaat WVL), Harry van Luijelaar, Gerben Mol (AMS Institute), Jantine Röttgering (GGD Amsterdam), Maurits Terwindt (Kennisinstituut voor Mobiliteitsbeleid), Tessa Trommelen (Veiligheidsregio Brabant-Noord), Michael van der Valk, Sjors Verhaar (Gemeente Amsterdam), Brian Verhoeven (NIPV)

Eindredactie

Bart Verheggen, Peter Siegmund, Jet van Paassen, Josine Camps

Vormgeving en datavisualisaties

Frédéric Ruys

Aan dit rapport kan als volgt worden gerefereerd

KNMI, 2025: Een extreem rapport; Extreem weer in tijden van klimaatverandering, KNMI, De Bilt, KNMI-Publicatie 25-05

Postadres

Postbus 201
3730 AE De Bilt

Website

<https://www.knmi.nl/een-extreem-rapport/>