



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

KNMI-publicatie
25-01

De staat van ons klimaat 2024

Nederlands weer in tijden van klimaatverandering

FOTO: RIJKSWATERSTAAT



De staat van ons klimaat 2024

Nederland

Voorwoord

3

Nederland

Het weer in 2024

4

Nederland

Opnieuw warmste jaar

5

Nederland

Weer zeer nat jaar

7

Nederland

Zowel weinig zon als weinig wind

11

Nederland

Ruimteweer

14

Caribisch Nederland

Het weer in 2024

15

Caribisch Nederland

Bovengemiddeld warm jaar

16

Europa

Temperatuur Europa

20

Europa

Stormen Europa

22

Wereld

Meer dan 1,5° C warmer dan eind 19^e eeuw

27

Wereld

Is de doelstelling van Parijs nu uit zicht?

28

Wereld

La Niña liet even op zich wachten

29

Wereld

Zeespiegelstijging zet door tot nieuw record

31

Wereld

Toename CO₂ onverminderd

32

Nieuwe Inzichten

Risico's van een tijdelijke 'overshoot'?

34

Nieuwe Inzichten

Antarctische ijskap in een opwarmend klimaat

35

Nieuwe Inzichten

Klimaatverandering over de afgelopen 485 miljoen jaar

36

Nieuwe Inzichten

AMOC-kantelpunt: dichterbij dan we dachten

37

Nieuwe Inzichten

Energiehuishouding verder uit balans

38



Grilliger klimaat is onze nieuwe realiteit

Opnieuw hebben we een recordwarm jaar gemeten, in Nederland en wereldwijd. Onze metingen bevestigen dat het klimaat opwarmt. Ieder jaar publiceert het KNMI een overzicht van het weer in klimaatperspectief, De staat van ons klimaat.

Een grote vraag van veel mensen blijft: waar maken we ons eigenlijk druk om? Die opwarming is maar een paar graden, minder dan het temperatuurverschil tussen dag en nacht of zomer en winter. Het antwoord is natuurlijk dat die opwarming ook andere effecten meebrengt die om maatregelen vragen, zoals de stijgende zeespiegel en extremere regen, hitte en droogte. Dat raakt individuele burgers en bedrijven, maar bijvoorbeeld ook het werk van Rijkswaterstaat, veiligheidsregio's, en banken en verzekeraars.

Veel mensen herinneren zich 2024 vermoedelijk niet als warm, maar vooral nat. En dat was het ook. Door de opwarming neemt extreme regenval toe, zoals we zagen in Twente, waar het water kniehoog op de snelweg A1 stond. Het weer is grillig en weersextremen zijn per definitie zeldzaam, maar we zien de patronen veranderen: in de piekbuien van 2024 en eerder bij de overstromingen in

Limburg. Maar ook in de jaren met droge en hete zomers, waarin we voor het eerst de 40°C aantikten en moesten schipperen met te weinig water voor scheepvaart, landbouw en natuur. Een grilliger klimaat is onze nieuwe realiteit.

Die realiteit zagen we in 2024 ook in heel Europa en wereldwijd terug, met dodelijke en kostbare hittegolven, bosbranden en overstromingen, in veel gevallen aanwijsbaar toegenomen door het opwarmende klimaat. En dat brengt ons terug naar die abstracte gemiddelde temperatuur. Wereldwijd gingen we voor het eerst sinds het Klimaatakkoord van Parijs door die grens van 1,5 graden, al ligt de langetermijntrend daar nog wel onder. In Nederland zaten we zelfs al 2,9 graden hoger dan begin 20e eeuw. We weten ook dat die opwarming wordt veroorzaakt door de uitstoot van broeikasgassen.

Mogelijk wordt 2025 het jaar dat de wereldwijde uitstoot gaat dalen, maar vermoedelijk te langzaam om de doelen van Parijs goed in beeld te houden. En dat betekent toenemende uitdagingen. Uitdagingen om wereldwijd toch een tandje bij te zetten om ons samen aan onze Parijse afspraken te houden. Maar ook uitdagingen om Nederland

veilig en welvarend te houden in een veranderend klimaat met nieuwe risico's. Structureel door ons aan te passen, maar ook op korte termijn door beter voorbereid te zijn op extreem weer en onze weerswaarschuwingen op orde te hebben. Het KNMI levert daaraan een bijdrage door elke dag te meten, 24/7 het weer in de gaten te houden, onderzoek te doen en zo meer te kunnen zeggen over hoe extreem weer Nederland raakt, ook in een grilliger klimaat.

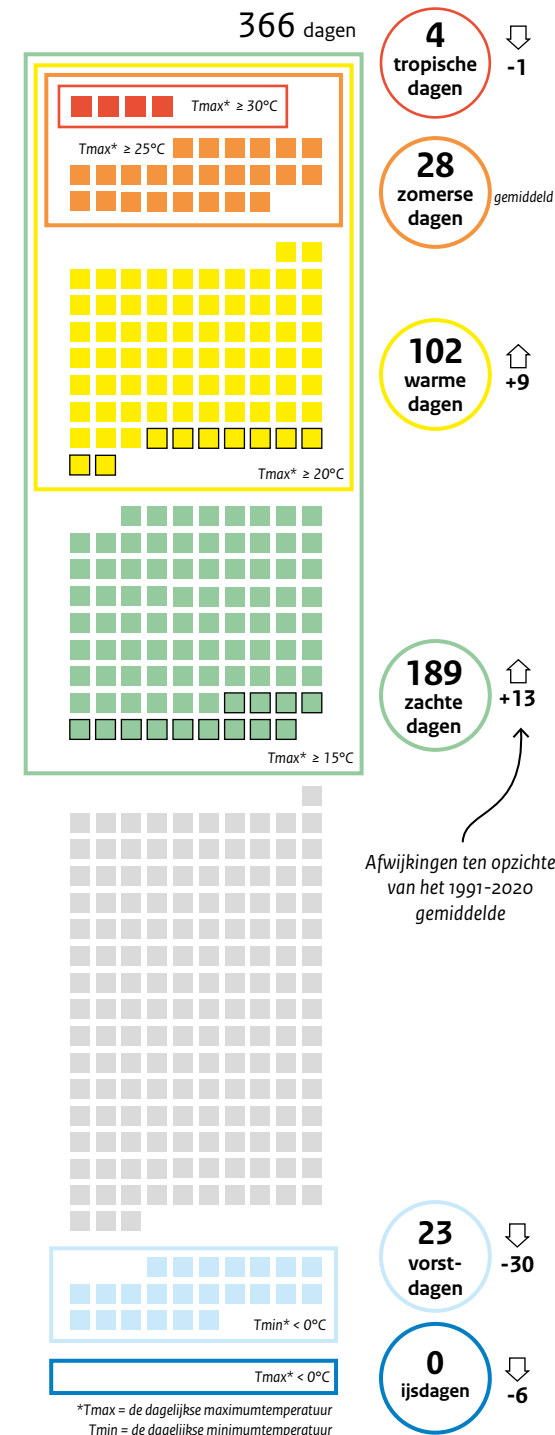
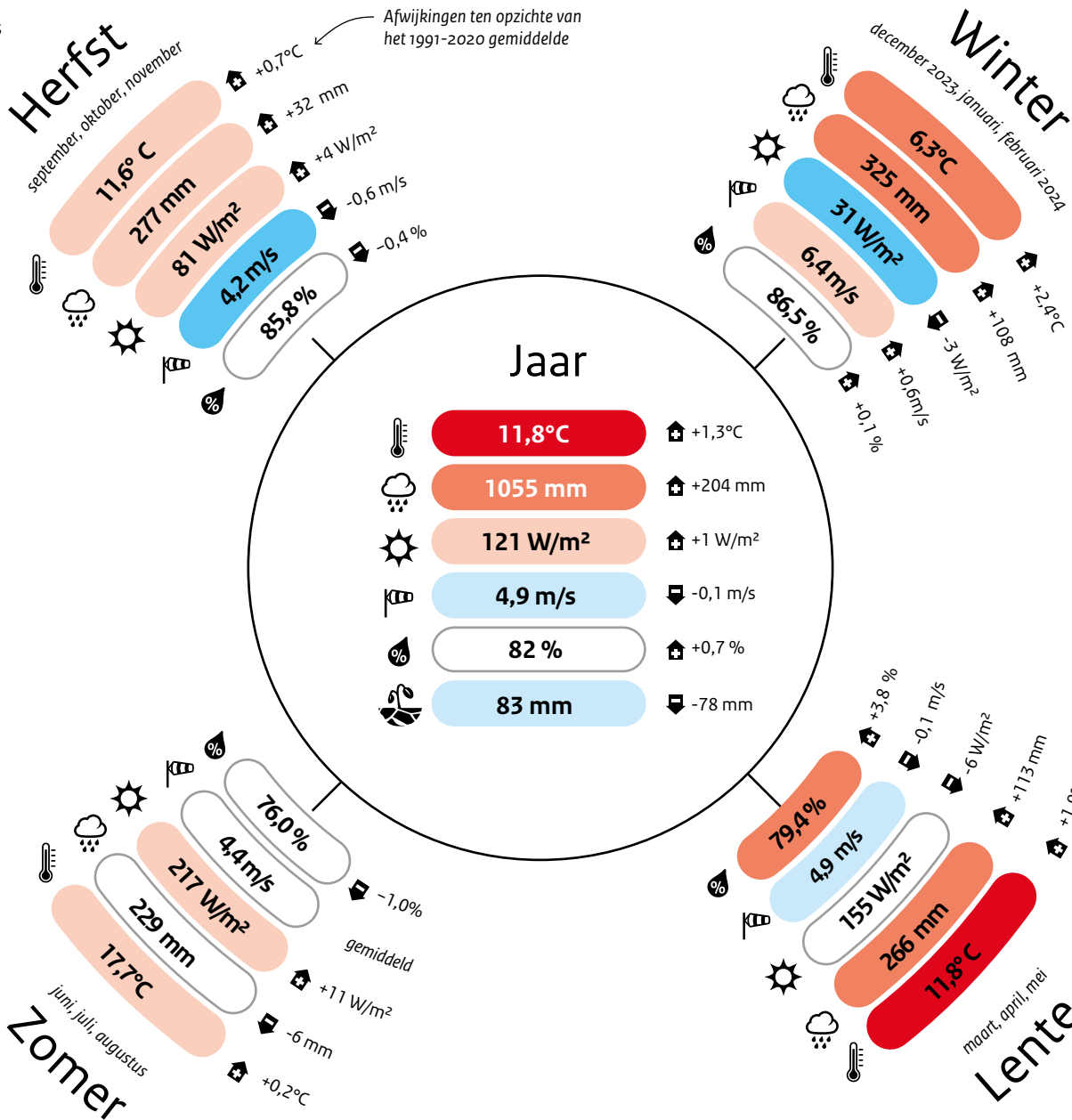
Maarten van Aalst

Hoofddirecteur en Chief Science Officer





Het weer in 2024



- Temperatuur**
Meetstation De Bilt
- Neerslag**
Gemiddelde van 13 neerslagstations (P13)
- Zonnestraling**
Gemiddelde van 5 stations: De Bilt, De Kooy, Eelde, Vlissingen, Maastricht
- Wind**
Op 10 m hoogte, Schiphol
- Relatieve vochtigheid**
Meetstation De Bilt
- Droogte**
Maximaal neerslagtekort groeiseizoen (april t/m september)

*Tmax = de dagelijkse maximumtemperatuur
 Tmin = de dagelijkse minimumtemperatuur

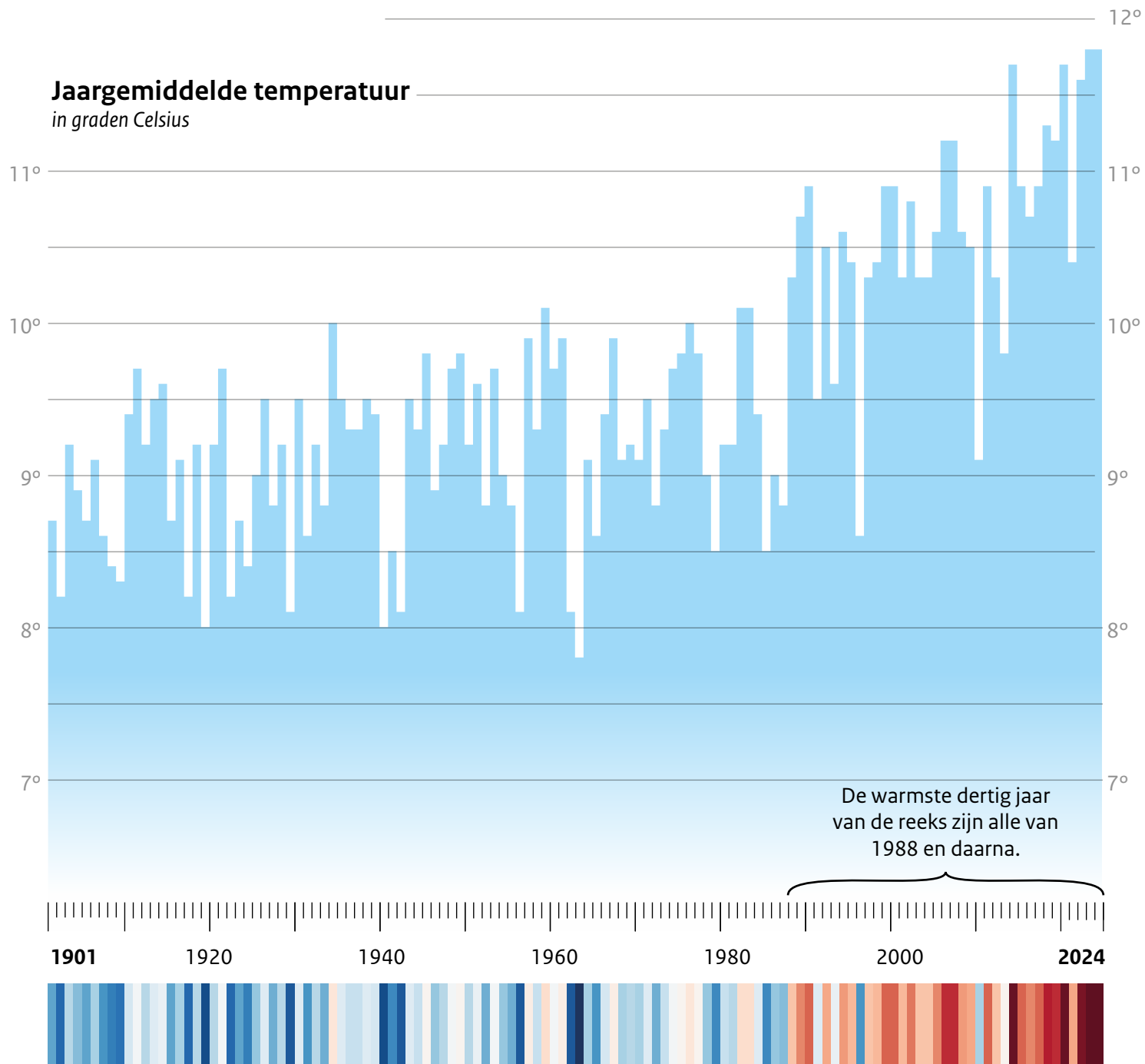




Opnieuw warmste jaar Nederland

2024 was samen met 2023 het warmste jaar sinds tenminste 1901, het begin van de meetreeks. De gemiddelde temperatuur in De Bilt was 11,8 graden Celsius. Nederland warmt op met een snelheid van ongeveer 0,4 graden per 10 jaar, twee keer zo snel als de wereldgemiddelde opwarming. De warmste dertig jaar van de reeks zijn alle van 1988 en daarna. 2024 was 2,9 graden warmer dan het gemiddelde over de periode 1901-1930.

Jaargemiddelde temperatuur
in graden Celsius



De warmste dertig jaar van de reeks zijn alle van 1988 en daarna.

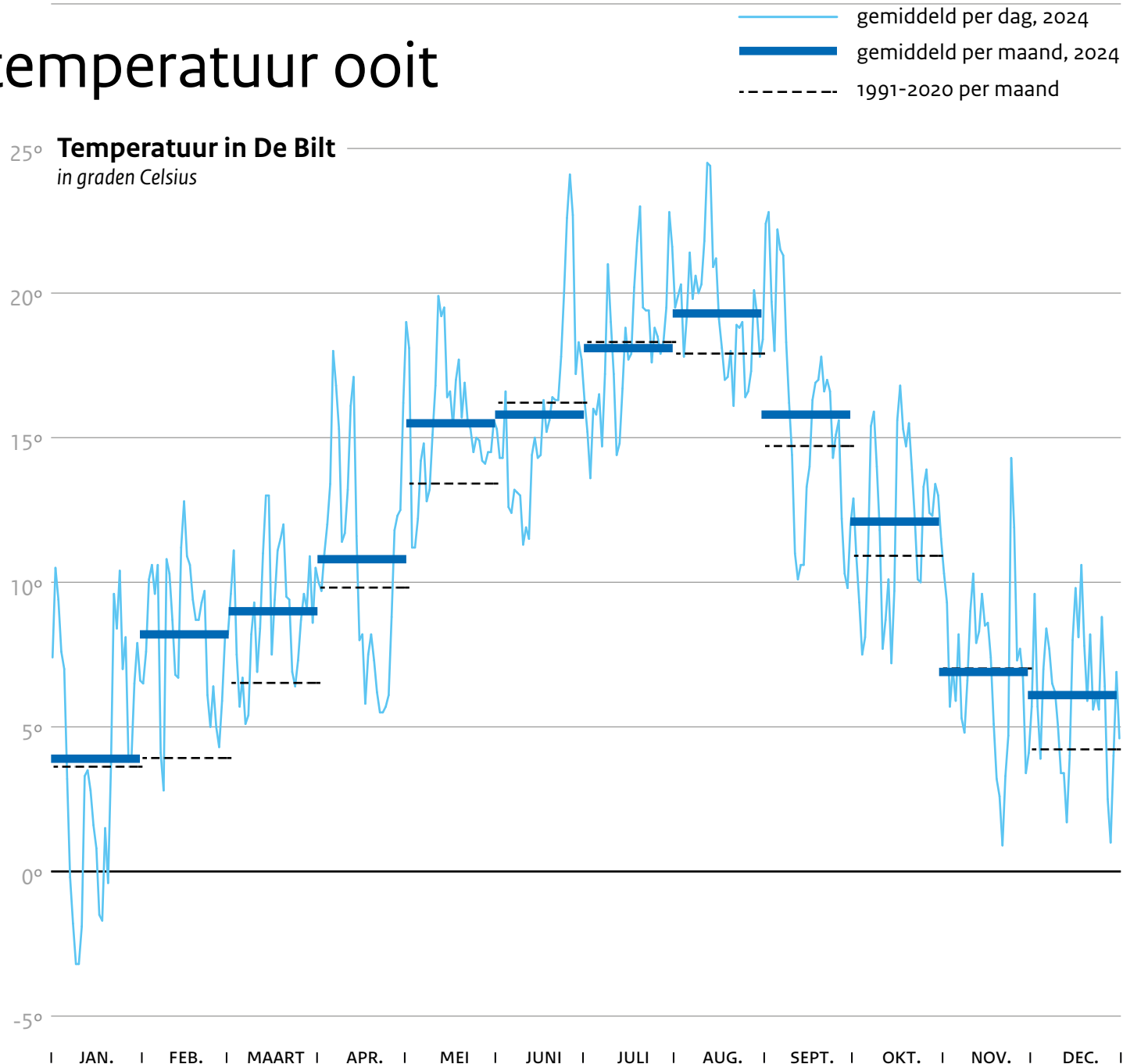


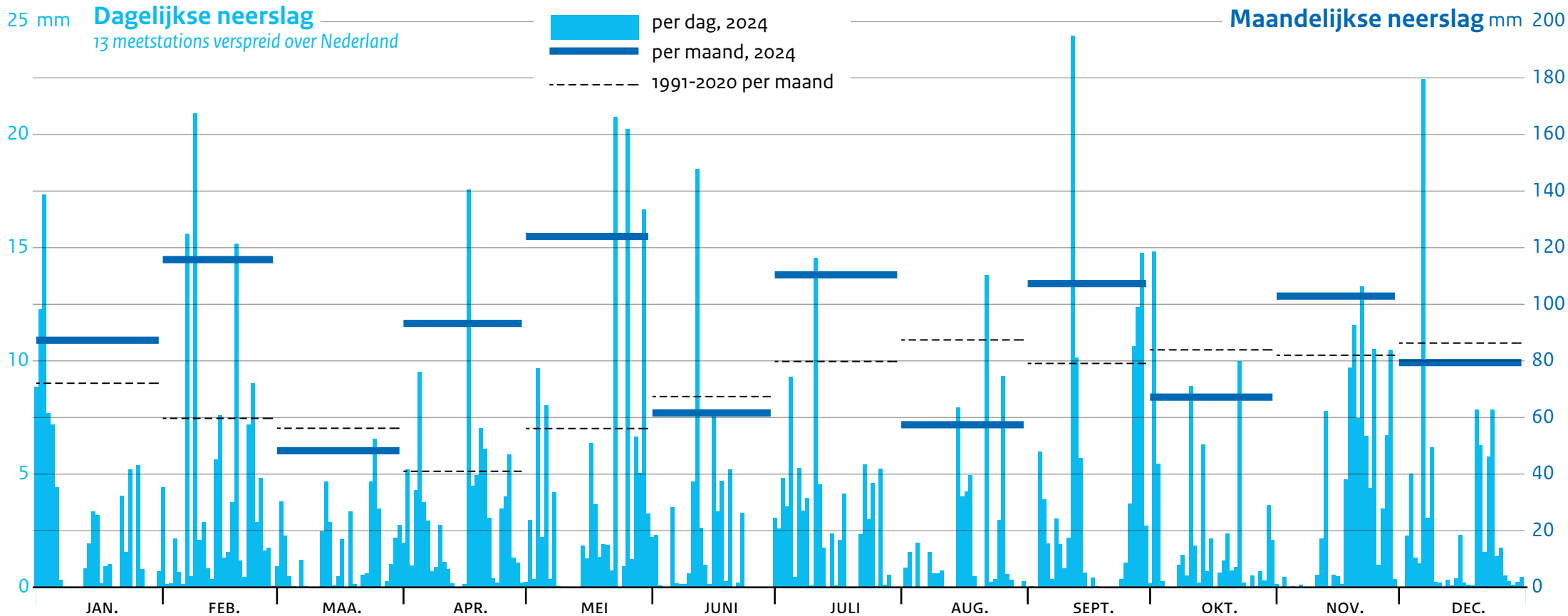
Hoogste minimumtemperatuur ooit

Ook al was 2024 samen met 2023 het warmste jaar sinds ten minste 1901, het jaar kende geen hittegolven en het aantal zomerse en het aantal tropische dagen waren ongeveer gelijk aan het langjarig (1991-2020) gemiddelde. Vooral de nachten waren warm, met name in de lente. De jaargemiddelde minimumtemperatuur was met 7,7°C de hoogste ooit gemeten, 0,1 graden hoger dan het oude record uit 2023, en de lentegemiddelde minimumtemperatuur was met 7,4°C bijna een hele graad hoger dan het oude record van 6,5°C uit 1998.

In januari, juni, juli en november was de temperatuur ongeveer gelijk aan het langjarig gemiddelde. In alle andere maanden was het minstens één graad warmer. Zowel de lente als de maanden februari en maart waren de warmste van de meetreeks. Het was voor het laatst in 1990 dat twee opeenvolgende maanden recordwarm waren en ook toen ging het om februari en maart. Het aantal vorstdagen in 2024, waarop de temperatuur onder nul komt, was kleiner dan ooit. Het jaar kende geen ijsdagen, waarop het de hele dag blijft vriezen. Hetzelfde gold voor 2023, niet eerder waren er in De Bilt twee jaren aaneen zonder ijsdagen.

25° **Temperatuur in De Bilt**
in graden Celsius





Weer zeer nat jaar

Landelijk gemiddeld, gebaseerd op 13 neerslagstations, viel er 1055 mm neerslag. Hiermee komt 2024 op de derde plaats van de meetreeks sinds 1906, na 2023 (1153 mm) en 1998 (1109 mm). De langjarig gemiddelde (1991-2020) jaarneerslag van 851 mm werd op 19 oktober gepasseerd. De extreem natte periode die in de

herfst van 2023 begon, zette zich in de eerste maanden van 2024 voort. In februari, april en mei viel ongeveer twee keer zoveel neerslag als het langjarig gemiddelde. April en mei waren de natste april en mei van de meetreeks. Gedurende april tot en met september was de totale neerslag sinds het begin van het jaar de hoogste van de meetreeks.

De maanden augustus 2023 tot en met juli 2024 waren met 1293 mm de natste 12 maanden aaneen ooit gemeten. Op de natste dag van het jaar, 13 juli, viel landelijk gemiddeld 26 mm neerslag. Lokaal de natste dag was 25 mei, met 95 mm neerslag in KNMI-neerslagstation Hoogerheide. ■



Dagen met zware neerslag

Meer dan 50 mm neerslag in één dag noemen we een dag met zware neerslag. Zware neerslag komt in Nederland steeds vaker voor. In de tweede helft van de vorige eeuw waren er per jaar gemiddeld ongeveer 5 dagen met zware neerslag in minstens één van de ruim 300 neerslagstations van het KNMI. Deze eeuw tot nu toe waren dat er ongeveer 9 per jaar, een toename van ruim 70 procent. In 2024 waren er 13 dagen

met extreme neerslag, de meeste in mei, juli en september. Op 21 juli viel in het oosten van Twente meer dan 50 mm regen en stond op de snelweg A1 bij De Lutte het water kniehoog.

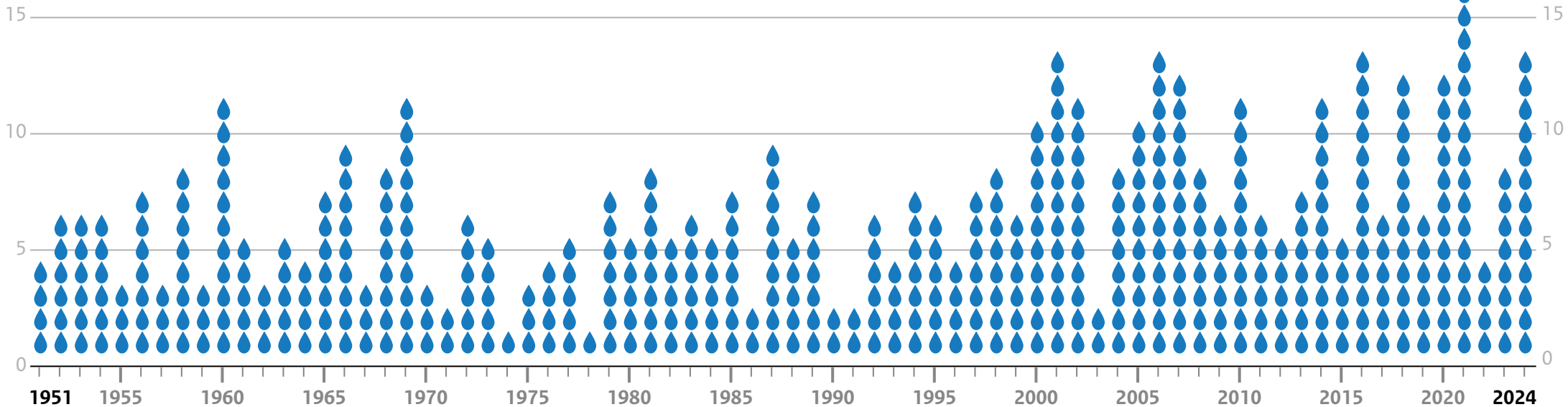
In de avond en nacht van zondag 21 op maandag 22 juli 2024 viel er extreem veel regen in het oosten van Nederland. Op onder andere de snelweg A1 bij De Lutte stond het water kniehoog en zaten mensen op het dak van hun auto om droog te blijven.

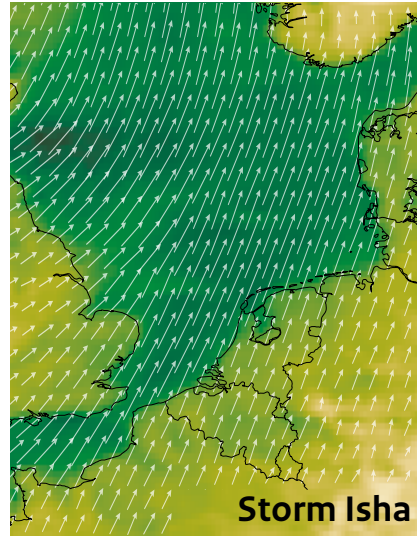
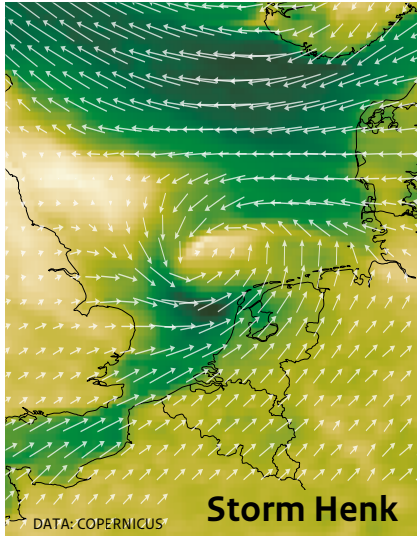
FOTO RIJKSWATERSTAAT



Aantal dagen met zware neerslag

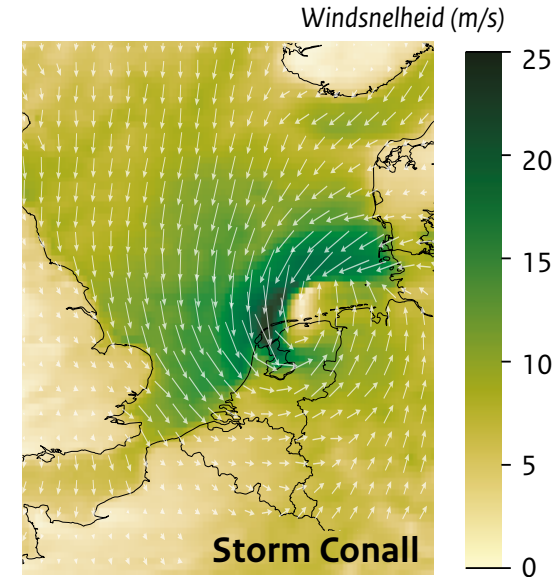
♣ = één dag met minstens 50 mm plaatselijk in Nederland



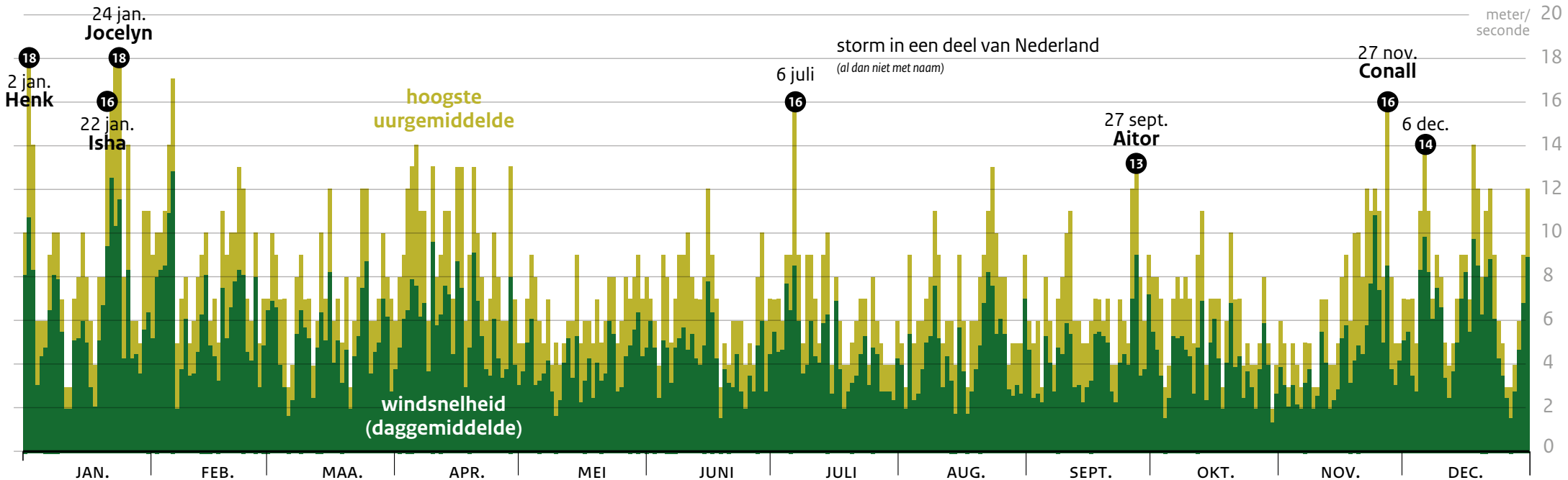


Zeven stormen treffen Nederland

In 2024 waren er in Nederland zeven stormen. Voor de stormen Henk op 2 januari, Isha op 22 januari en Conall op 27 november gaf het KNMI een code oranje uit voor zware windstoten. De jaargemiddelde windsnelheid op Schiphol was 4,9 m/s, vrijwel even hoog als het langjarig gemiddelde. De windsnelheid was gemiddeld het hoogst in februari (6,2 m/s) en het laagst in mei en oktober (4,0 m/s).



Windsnelheid Schiphol op 10 meter hoogte



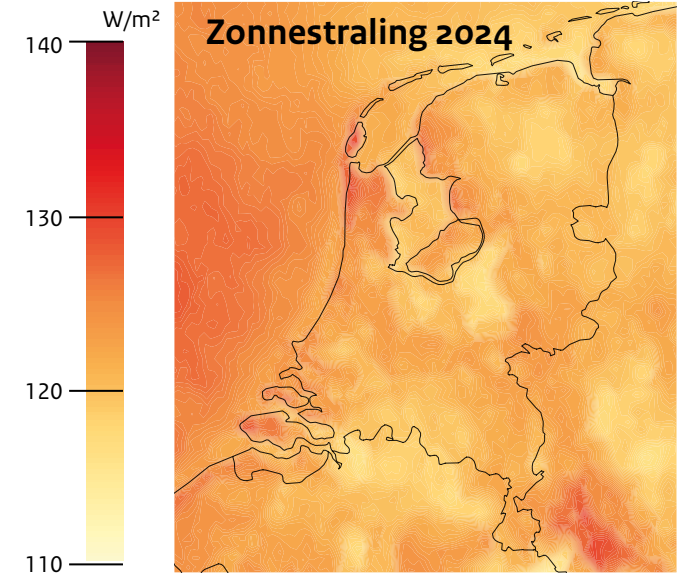
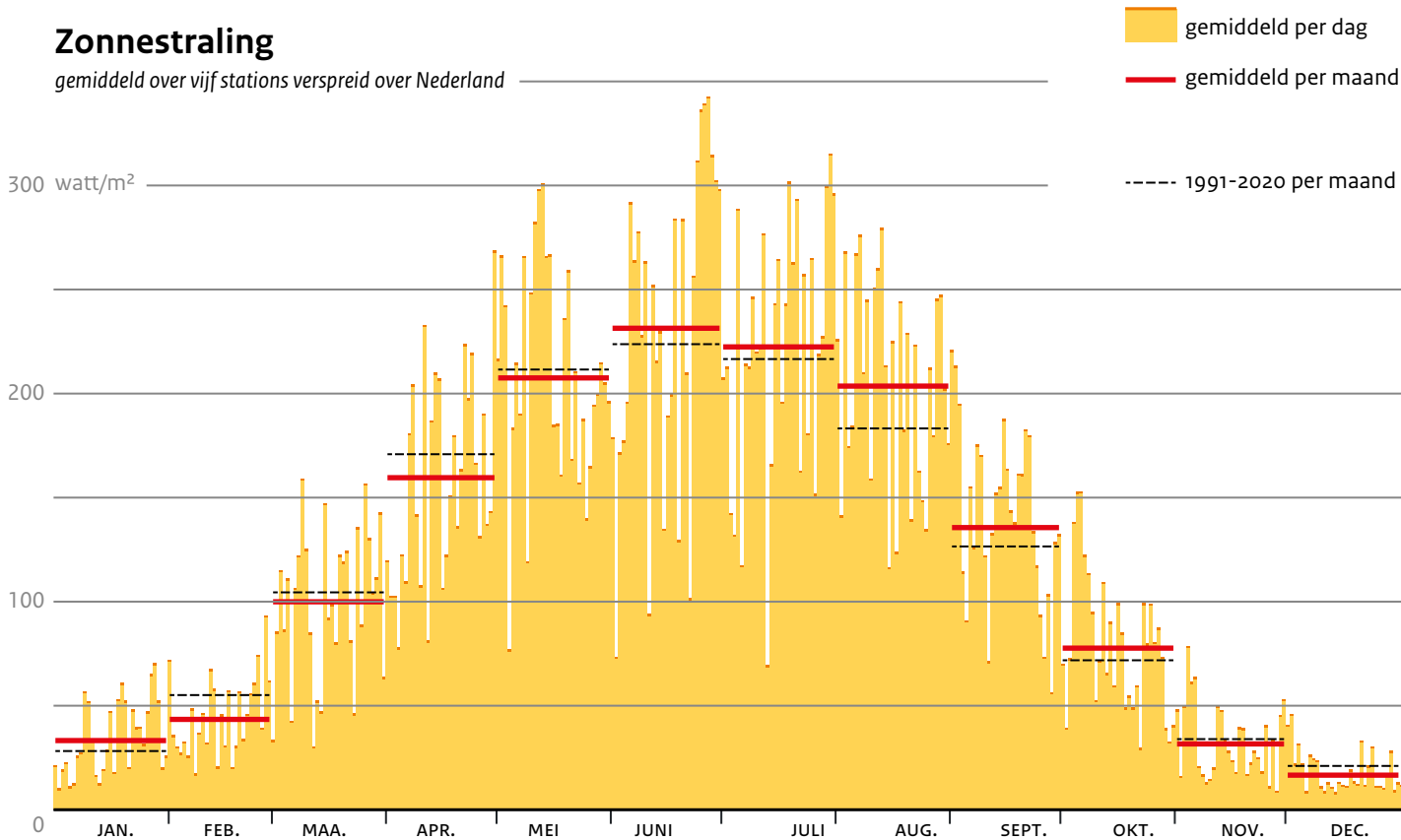
Gemiddelde zonnestraling

In 2024 was de zonnestraling gemiddeld over het land 121 W/m², vrijwel evenveel als het langjarig gemiddelde van 120 W/m². In het noorden en het zuiden van het land was er respectievelijk iets meer

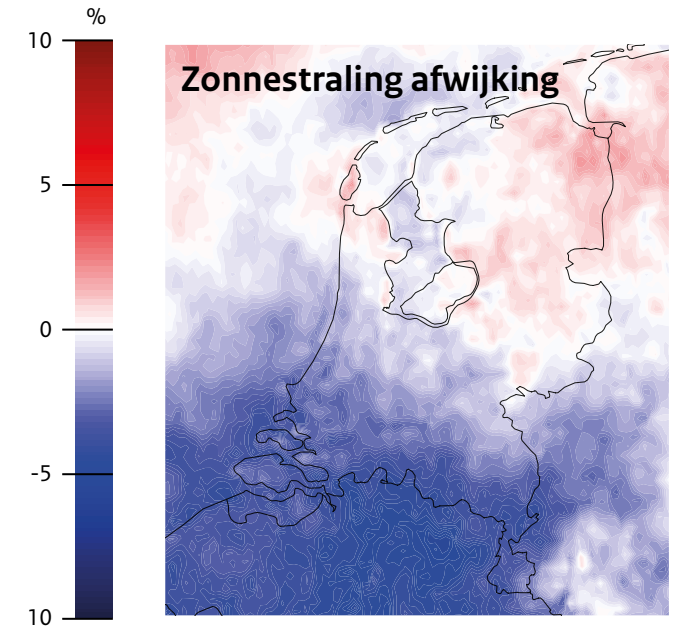
en iets minder zonnestraling dan het langjarig gemiddelde. Alle maanden waren ongeveer even zonnig als het langjarig gemiddelde, behalve augustus, waarin het 11% zonniger was.

Zonnestraling

gemiddeld over vijf stations verspreid over Nederland



Zonnestraling in Nederland in 2024 en het verschil met het langjarig gemiddelde (1991-2020), op basis van Meteosat-satellietmetingen (databron: CM SAF / SARA-3).

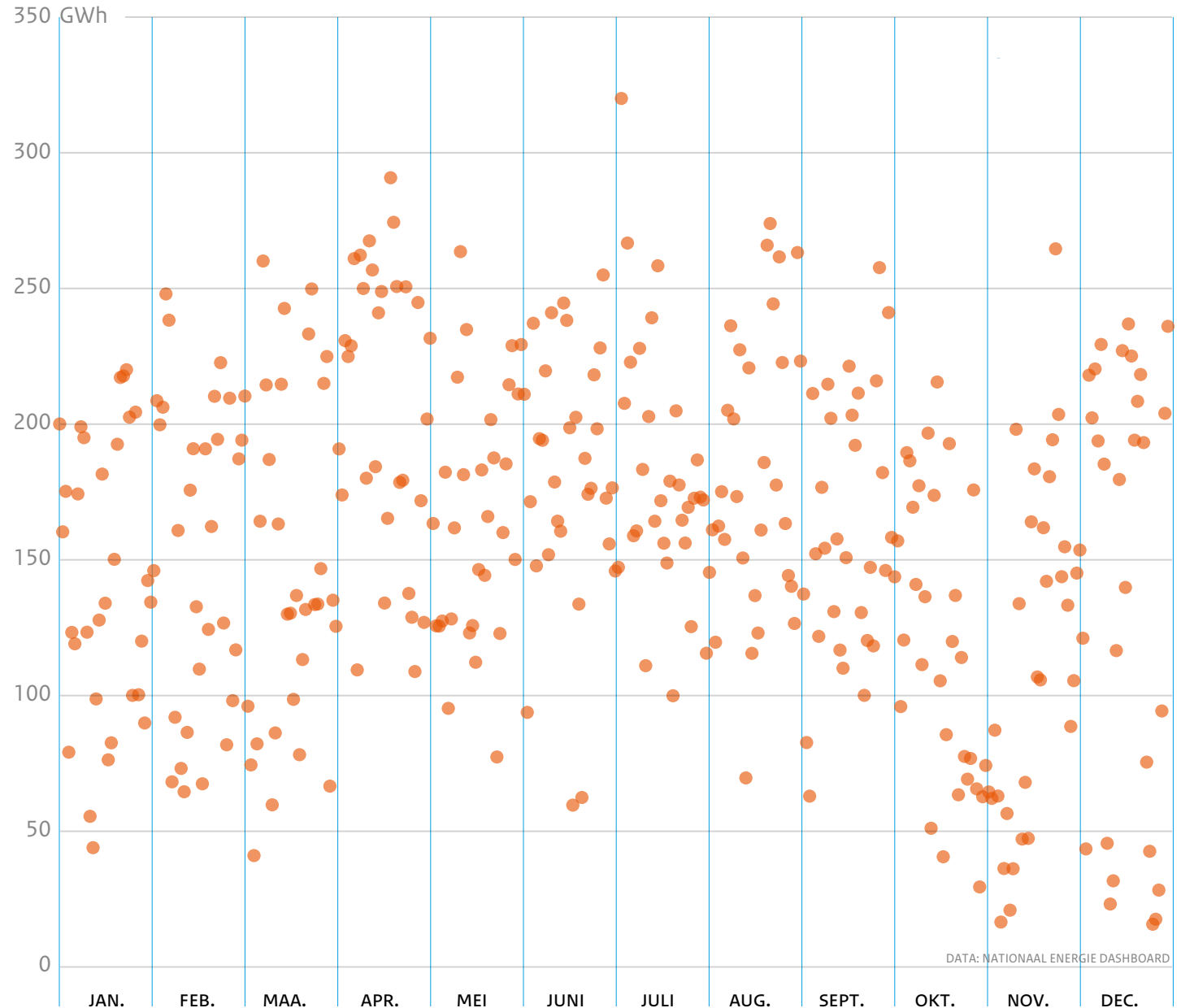


Zowel weinig zon als weinig wind

In november waren er vijf dagen aaneen met weinig zonnestraling en weinig wind, waarbij maar weinig zonne- en windenergie kon worden opgewekt. Van 6 tot 10 november was er op elk van de vijf stations waaruit het KNMI de landelijk gemiddelde zonnestraling berekent, geen zonneschijn. Bovendien was de temperatuur 1,5 graad lager dan het langjarig gemiddelde, waardoor de energievraag relatief hoog was. Bij zowel de zonnestraling als de windsnelheid komt het per jaar ongeveer tien keer voor dat het vijfdaags gemiddelde zo laag is als dat van 6 tot 10 november. Gelijktijdig zo weinig zonnestraling en wind komt ongeveer eens in de zeven jaar voor.

Ook van 9 tot 19 december was er weinig zonnestraling, en op enkele van deze dagen was er bovendien weinig wind. ■

Dagelijks opgewekte energie Zon en wind in Nederland 2024



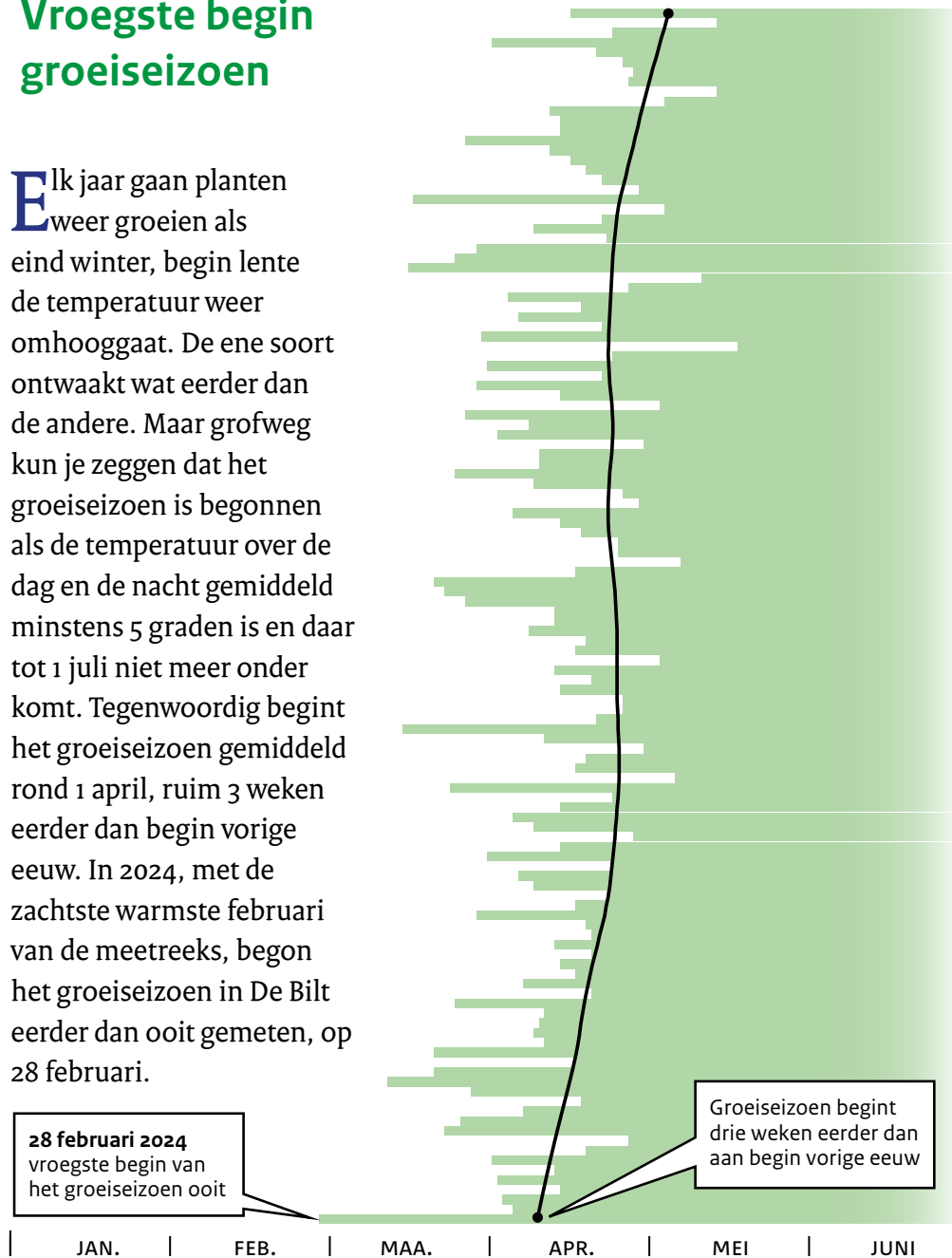


Vroegste begin groeiseizoen

Elk jaar gaan planten weer groeien als eind winter, begin lente de temperatuur weer omhooggaat. De ene soort ontwaakt wat eerder dan de andere. Maar grofweg kun je zeggen dat het groeiseizoen is begonnen als de temperatuur over de dag en de nacht gemiddeld minstens 5 graden is en daar tot 1 juli niet meer onder komt. Tegenwoordig begint het groeiseizoen gemiddeld rond 1 april, ruim 3 weken eerder dan begin vorige eeuw. In 2024, met de zachtste warmste februari van de meetreeks, begon het groeiseizoen in De Bilt eerder dan ooit gemeten, op 28 februari.

28 februari 2024 vroegste begin van het groeiseizoen ooit

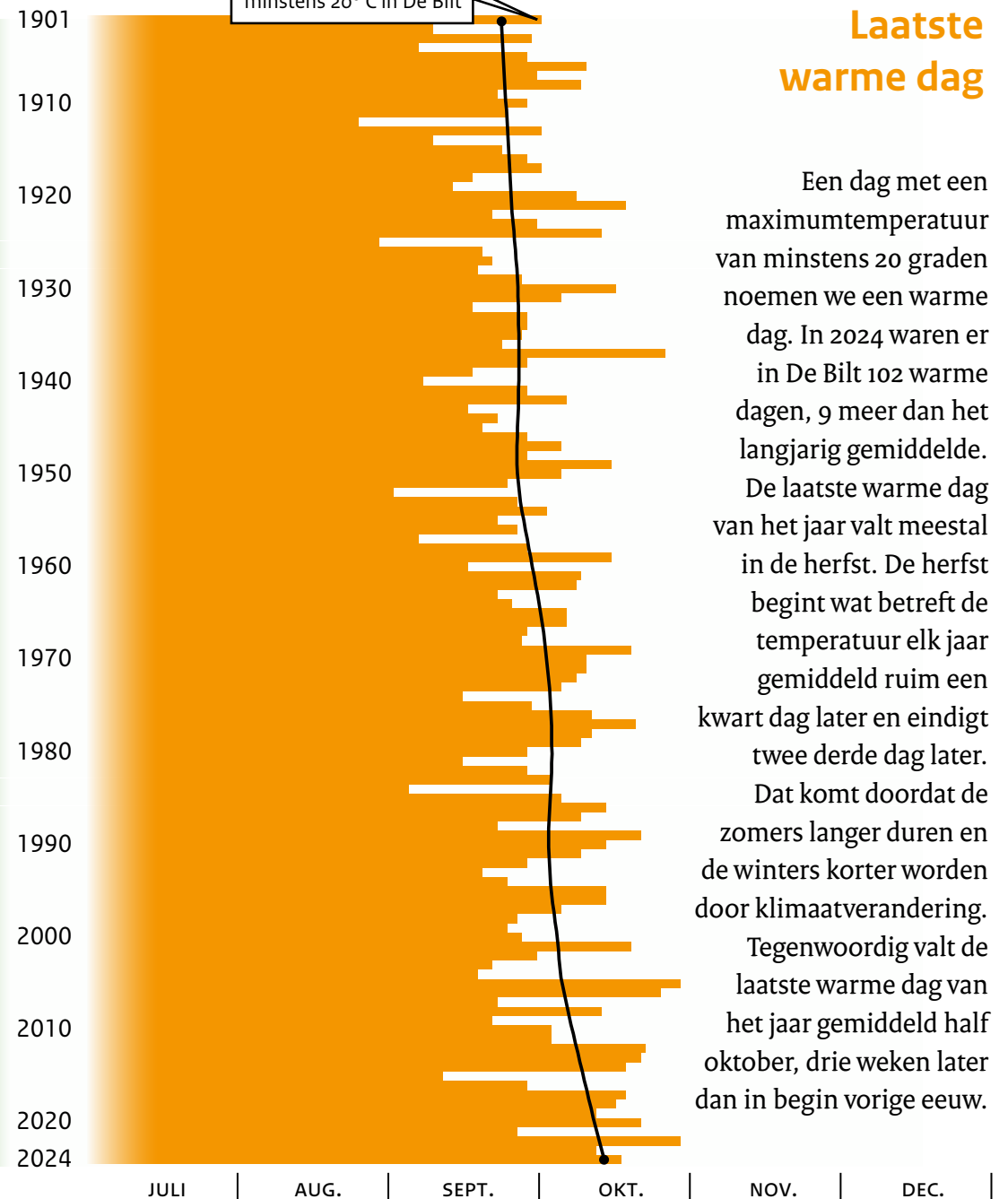
Groeiseizoen begint drie weken eerder dan aan begin vorige eeuw



Laatste warme dag

Een dag met een maximumtemperatuur van minstens 20 graden noemen we een warme dag. In 2024 waren er in De Bilt 102 warme dagen, 9 meer dan het langjarig gemiddelde. De laatste warme dag van het jaar valt meestal in de herfst. De herfst begint wat betreft de temperatuur elk jaar gemiddeld ruim een kwart dag later en eindigt twee derde dag later. Dat komt doordat de zomers langer duren en de winters korter worden door klimaatverandering. Tegenwoordig valt de laatste warme dag van het jaar gemiddeld half oktober, drie weken later dan in begin vorige eeuw.

Laatste dag met minstens 20° C in De Bilt



Nat voorjaar leidt tot uitstel voor inzaaien vanggewassen



Door de natte omstandigheden in 2024 mochten vanggewassen wat later ingezaaid worden, zoals hier winterrogge.

Een vanggewas, bijvoorbeeld gras of klaver, zorgt ervoor dat er na het hoofdgewas nog stikstof uit de bodem wordt opgenomen, waardoor dit niet kan uitspoelen naar het grondwater. Hoe eerder een vanggewas wordt ingezaaid, hoe langer het kan groeien en hoe meer stikstof het kan opnemen. Vooral na maïs blijft er relatief veel stikstof in de bodem

achter. Het vanggewas dient uiterlijk 1 oktober te worden ingezaaid. Door het natte voorjaar van 2024 werden maïs en andere gewassen later gezaaid of gepoot, waardoor lang niet alle gewassen eind september voldoende waren afgerijpt.

De Commissie Deskundigen Meststoffenwet concludeerde dat een latere oogst van een nog

groeïend gewas met een later ingezaaid vanggewas zou zorgen voor minder stikstofverliezen dan wanneer boeren onrijpe gewassen zouden oogsten en vroeg een vanggewas zouden inzaaien. Daarom kregen boeren in heel Nederland in 2024 uitstel tot 21 oktober om een vanggewas na maïs in te zaaien. ■

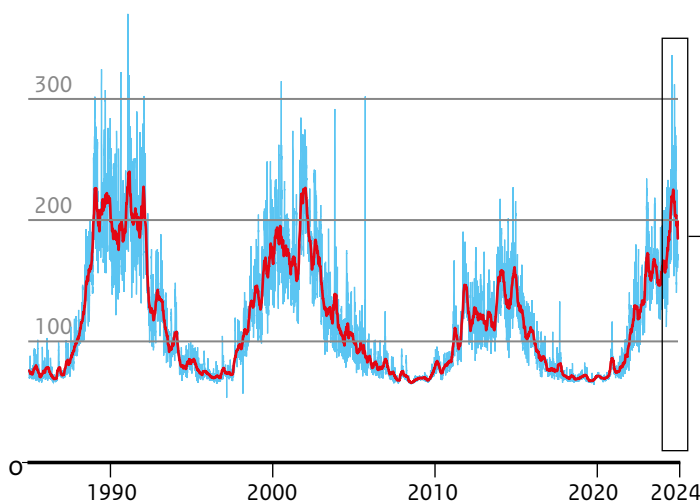
Ruimteweer

2024 was een piekjaar in de 11-jarige zonnecyclus. Op 10 mei bevond het noorderlicht zich zelfs boven Nederland. Het werd veroorzaakt door een krachtige geomagnetische storm, de sterkste in meer dan 20 jaar. Ook op 10 oktober was er een krachtige geomagnetische storm. Het ruimteweer van 10 mei gaf ongemak voor gebruikers van satellietdiensten, met name in Noord-Amerika. Ook beheerders van elektriciteitsnetwerken in sommige landen kregen met de gevolgen te maken, maar er is geen grootschalige uitval gemeld. KNMI waarschuwt voor dit soort gebeurtenissen.

Zonne-activiteit

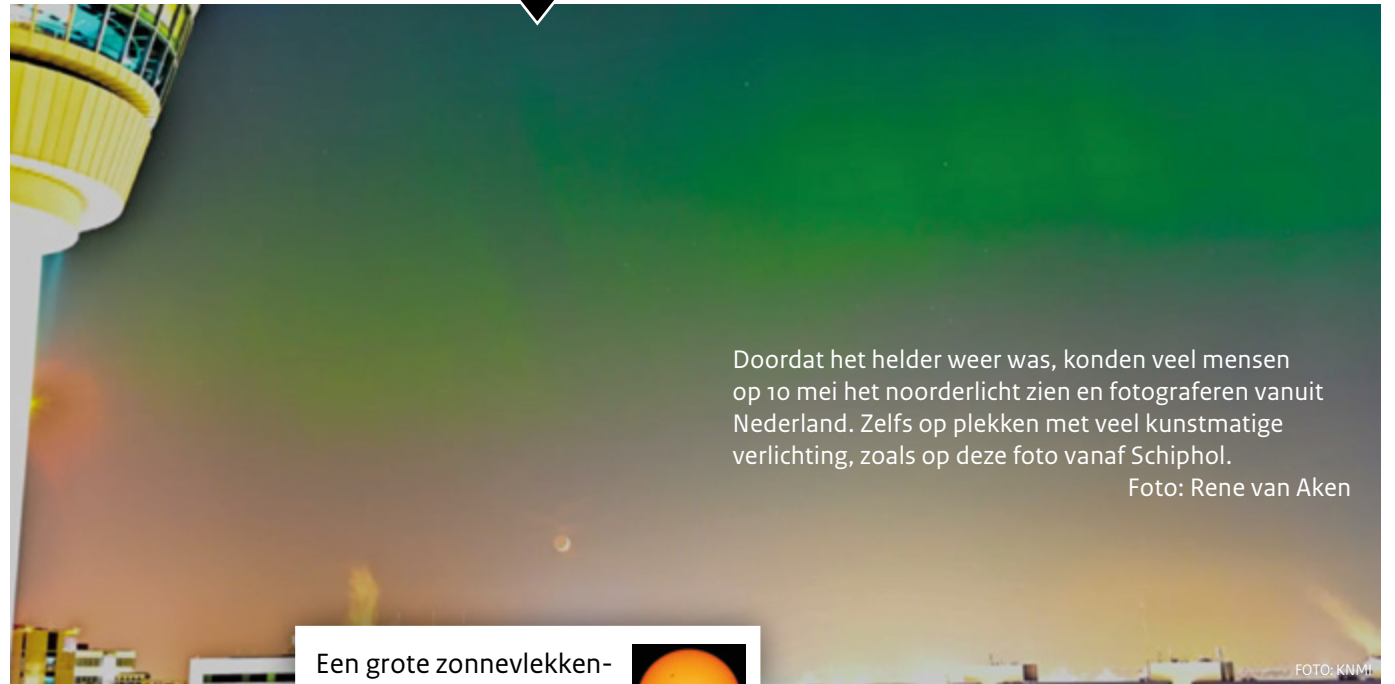
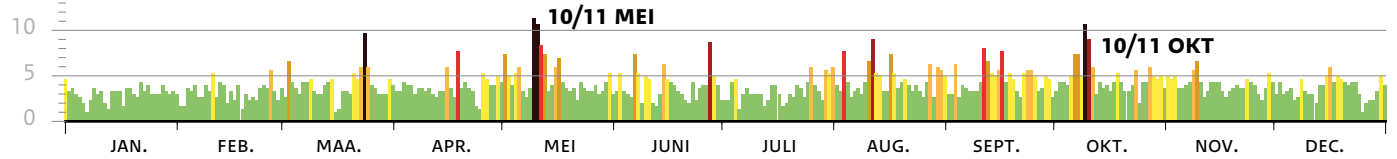
Radioflux van de zon op de golflengte van 10,7 cm

$400 \times 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$

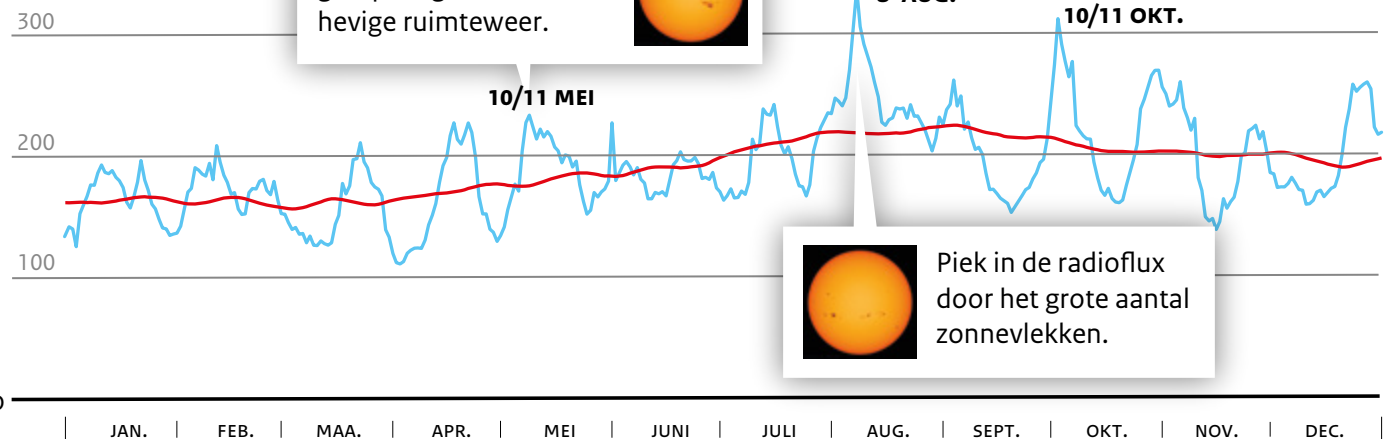


Geomagnetische activiteit

Dagelijks maximum van de Hp30 index



Een grote zonnevlekken-groep zorgt voor het hevige ruimteweer.





Caribisch Nederland

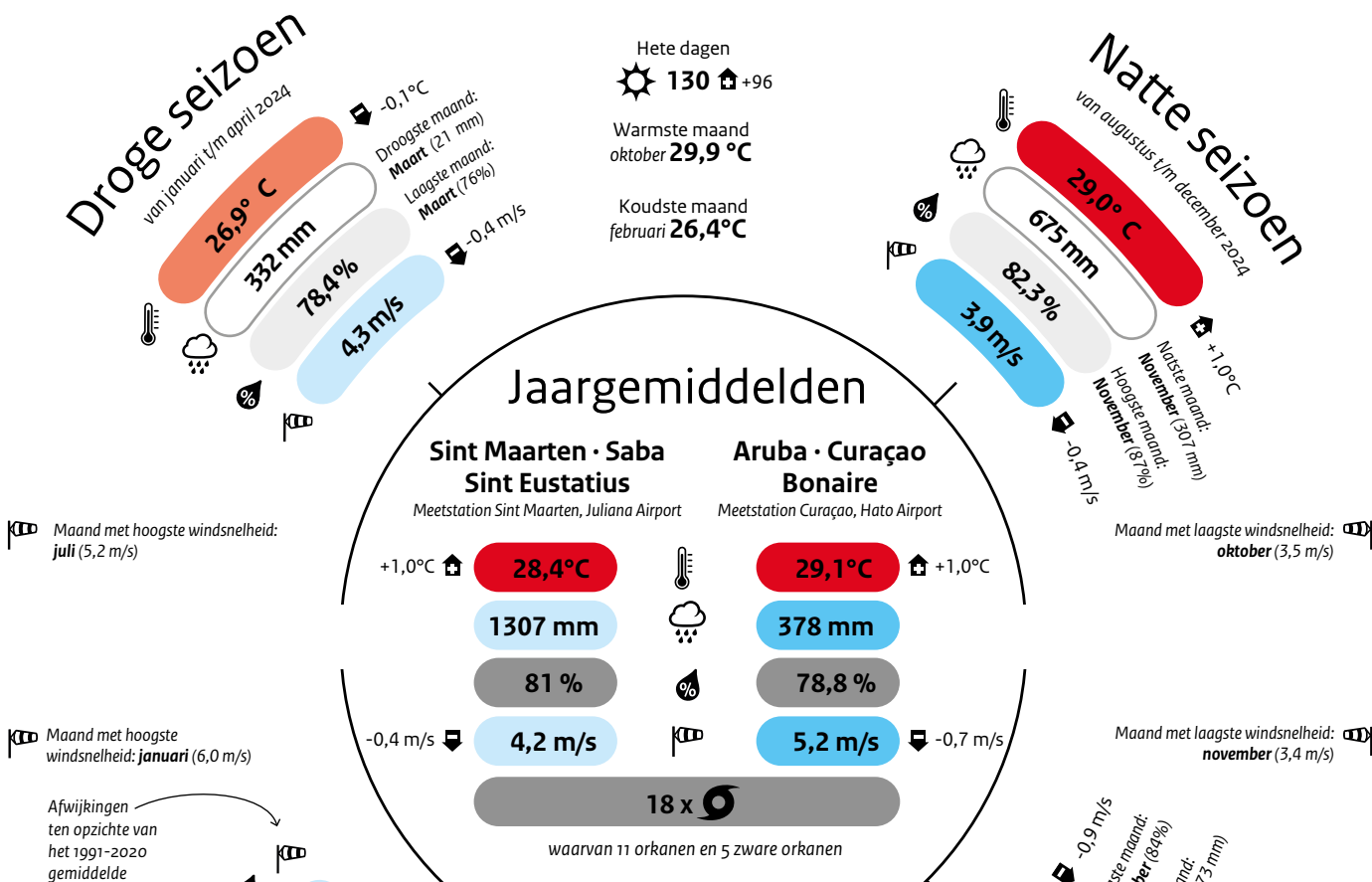
Het jaar 2024 was een bovengemiddeld warm jaar voor Caribisch Nederland. Met een gemiddelde jaartemperatuur van 28,4°C op Sint Maarten, Sint Eustatius en Saba en 29,1°C op Aruba, Bonaire en Curaçao was dit het warmste jaar ooit gemeten. Dit is in lijn met de wereldwijde opwarmende trend. De El Niño die in 2023 begon, heeft nog tot begin 2024 voortgeduurd. De rest van het jaar werden neutrale condities waargenomen, in afwachting van een nieuwe La Niña periode. Deze La Niña is op de valgreep aan het eind van 2024 ingezet (zie pagina 29). De temperatuur in de Tropische Noord-Atlantische Oceaan was in 2024 opnieuw recordhoog, ondanks de aflopende El Niño. Over het algemeen zijn de oceaantemperaturen gedurende El Niño hoger en nemen ze weer af als El Niño afloopt.

Ranglijst t.o.v. reeks 1974-2024



- Hete dagen (maximumtemperatuur > 32,2°C)
- Temperatuur
- Neerslag
- Relatieve vochtigheid
- Wind
- Stormen/orkanen

Sint Maarten · Saba · Sint Eustatius



Aruba · Curaçao · Bonaire





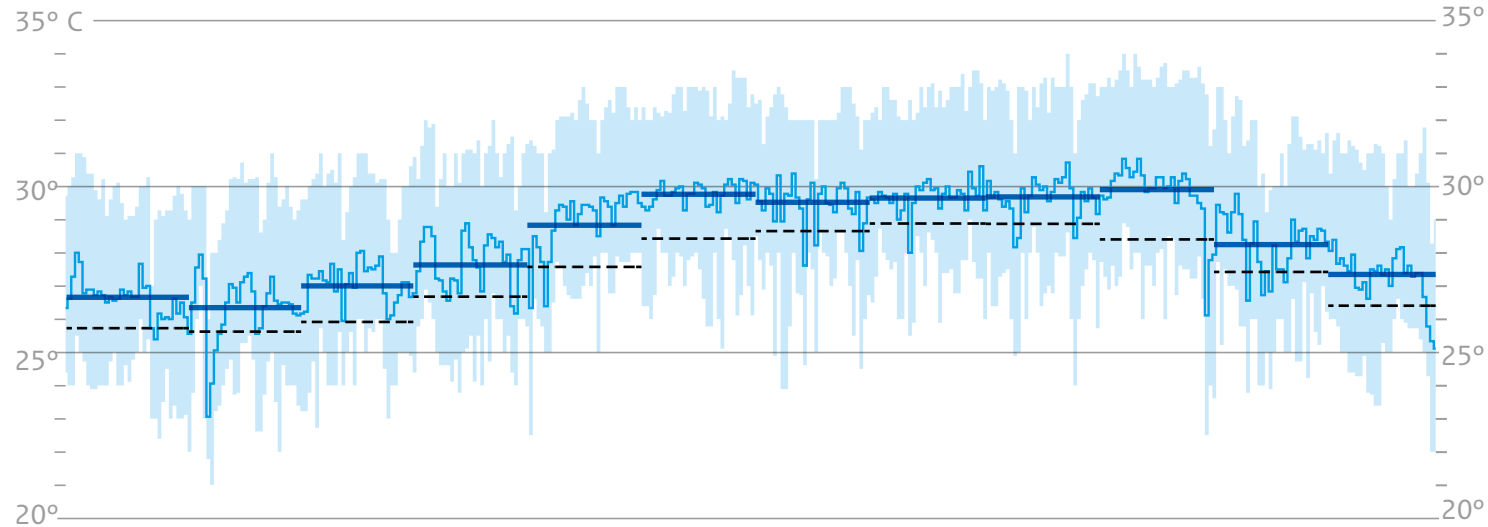
Een bovengemiddeld warm jaar

2024 was een jaar met hoge temperaturen, minder wind en een hoge relatieve luchtvochtigheid ten opzichte van het langjarig gemiddelde (1991-2020). Hoge temperaturen kunnen in combinatie met weinig wind en een hoge relatieve luchtvochtigheid voor een hogere gevoelstemperatuur zorgen dan wanneer er continu een verkoelende wind waait.

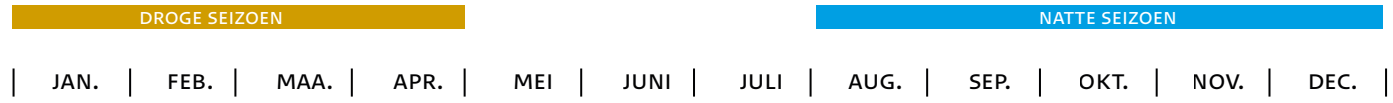
Voor de Nederlandse eilanden in de Cariben waren alle maanden in 2024 een stuk warmer dan gemiddeld over de periode 1991-2020. Op Curaçao zijn maar liefst 233 hete dagen gemeten. Dit zijn dagen waarop de maximumtemperatuur boven de 32,2°C ligt. Dit is een recordaantal hete dagen voor Curaçao, waar het vorige record op 198 dagen stond.

Het droge seizoen aan het begin van het jaar was voor alle Nederlandse eilanden in de Cariben droger dan gemiddeld. De El Niño van 2023 duurde tot in het voorjaar van 2024, wat correspondeert met de extra droge maanden aan het begin van het jaar.

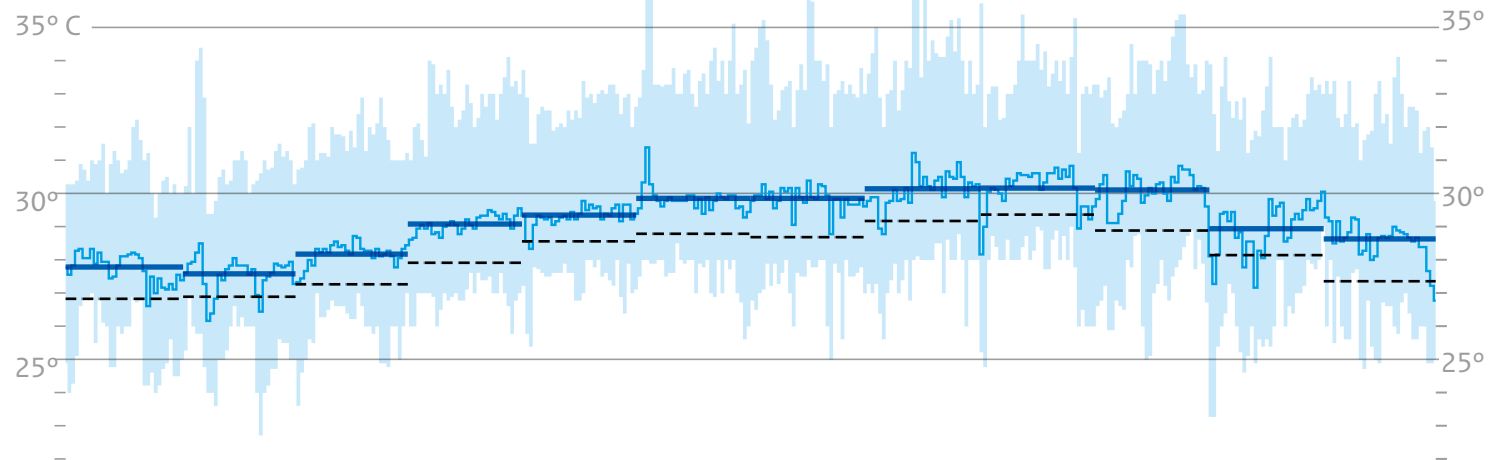
- gemiddeld per dag, 2024
- gemiddeld per maand, 2024
- 1991-2020 per maand



Temperatuur Sint Maarten, Juliana Airport

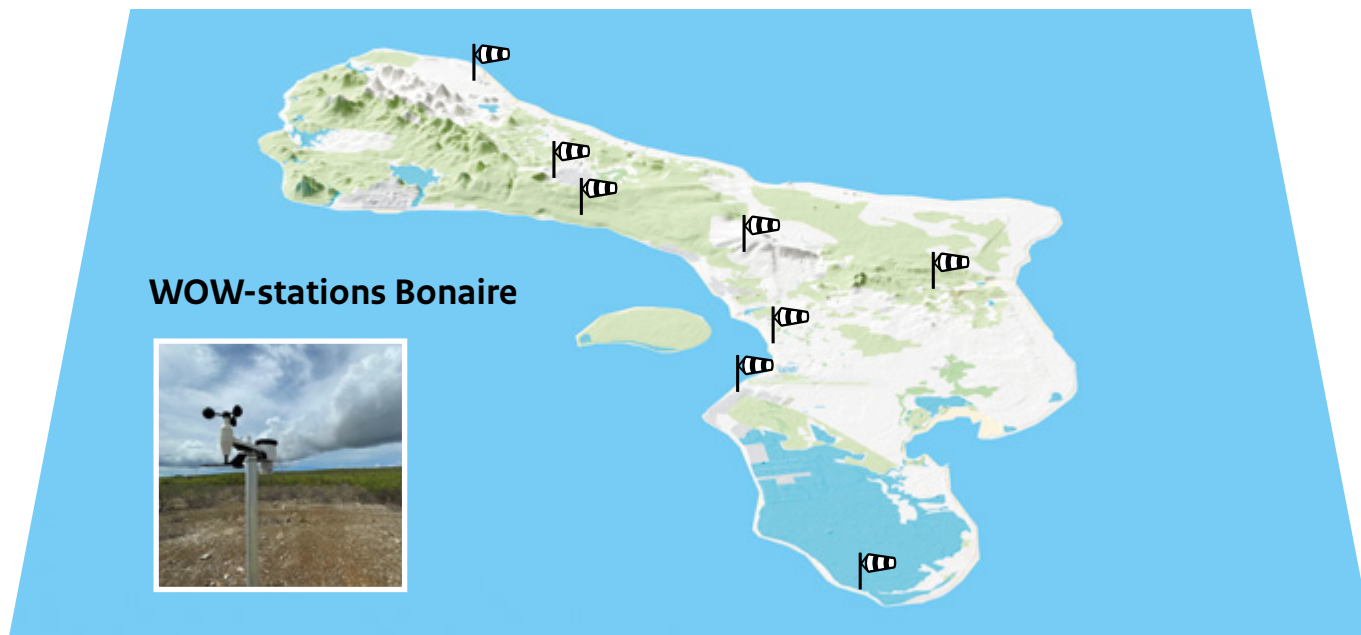


Temperatuur Curaçao, Hato Airport



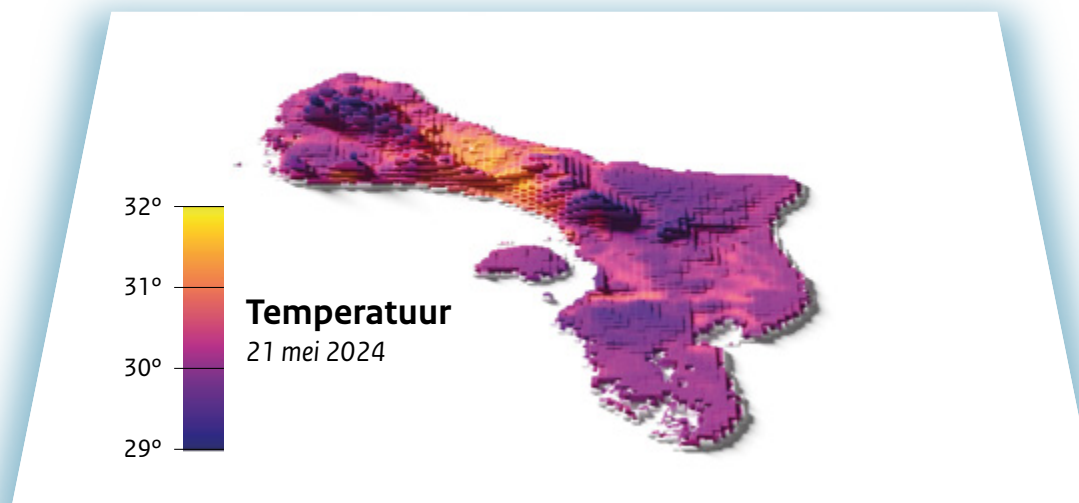


Het daaropvolgende natte seizoen was op Aruba, Curaçao en Bonaire nog steeds droger dan gemiddeld, in tegenstelling tot Sint Maarten, Saba en Sint Eustatius, waar het natte seizoen flink natter was dan gemiddeld. Dit kwam met name door enorme regenval in de maand november. Binnen een week tijd (10-17 november) viel er op Sint Maarten zo'n 260 millimeter aan regen, wat met name door een aantal kortdurende piekbuien voor veel overstromingen zorgde. In de maand mei hebben er ook op Curaçao hevige overstromingen plaatsgevonden door de vele regenval. ■



WOW-stations

Afgelopen jaar zijn er, in het kader van een pilotproject, nieuwe all-in-one weerstations geïnstalleerd op Bonaire en aangesloten op het crowdsourced platform WOW (*Weather Observations Website*). Momenteel staan er nu acht zulke stations op Bonaire, in aanvulling op het operationele KNMI-waarneemstation op de internationale luchthaven. Door meer stations verspreid over het eiland te plaatsen, kunnen lokale patronen in neerslag, wind en temperatuur beter worden onderzocht. Met name als er regenbuien zijn die maar over een deel van het eiland trekken, kan dit met extra weerstations beter in kaart worden gebracht. ■



Hoogte van de blokjes geeft onzekerheidsmarge weer. Hoog blokje = grotere onzekerheid. Vooral in afgelegen gebieden is de temperatuur minder nauwkeurig.





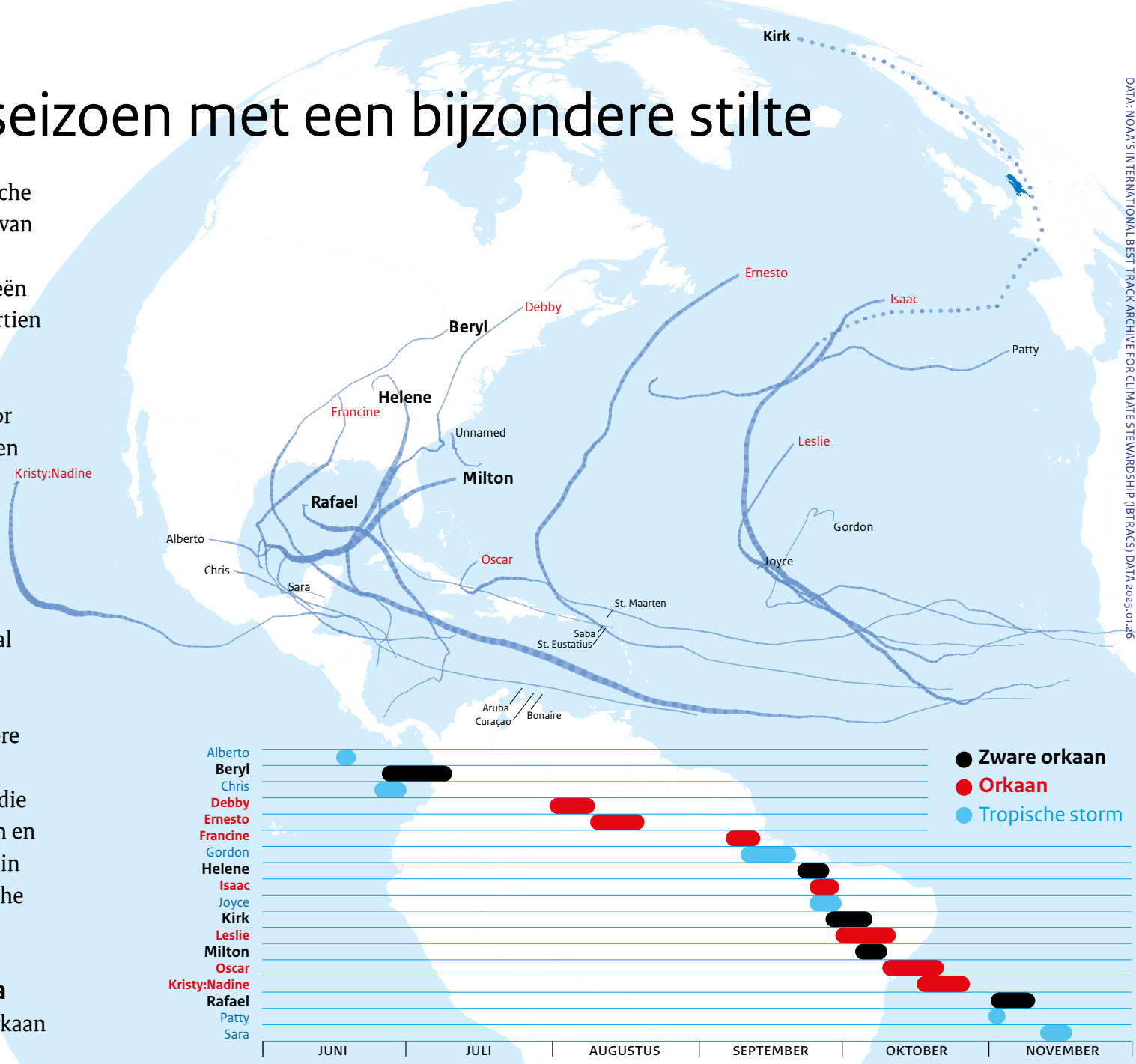
Een druk orkaanseizoen met een bijzondere stilte

Deze orkaanseizoenen waren er in het Atlantische gebied achttien tropische stormen, waarvan elf uitgroeiden tot orkanen. Vijf van deze orkanen bereikten zelfs de zwaarste categorieën (categorie 3 of sterker). Gemiddeld zijn er veertien stormen per jaar, waarvan zeven orkanen en drie zware orkanen. Deze bovengemiddelde activiteit afgelopen jaar werd veroorzaakt door een combinatie van zeer warm zeewater en een opkomende La Niña.

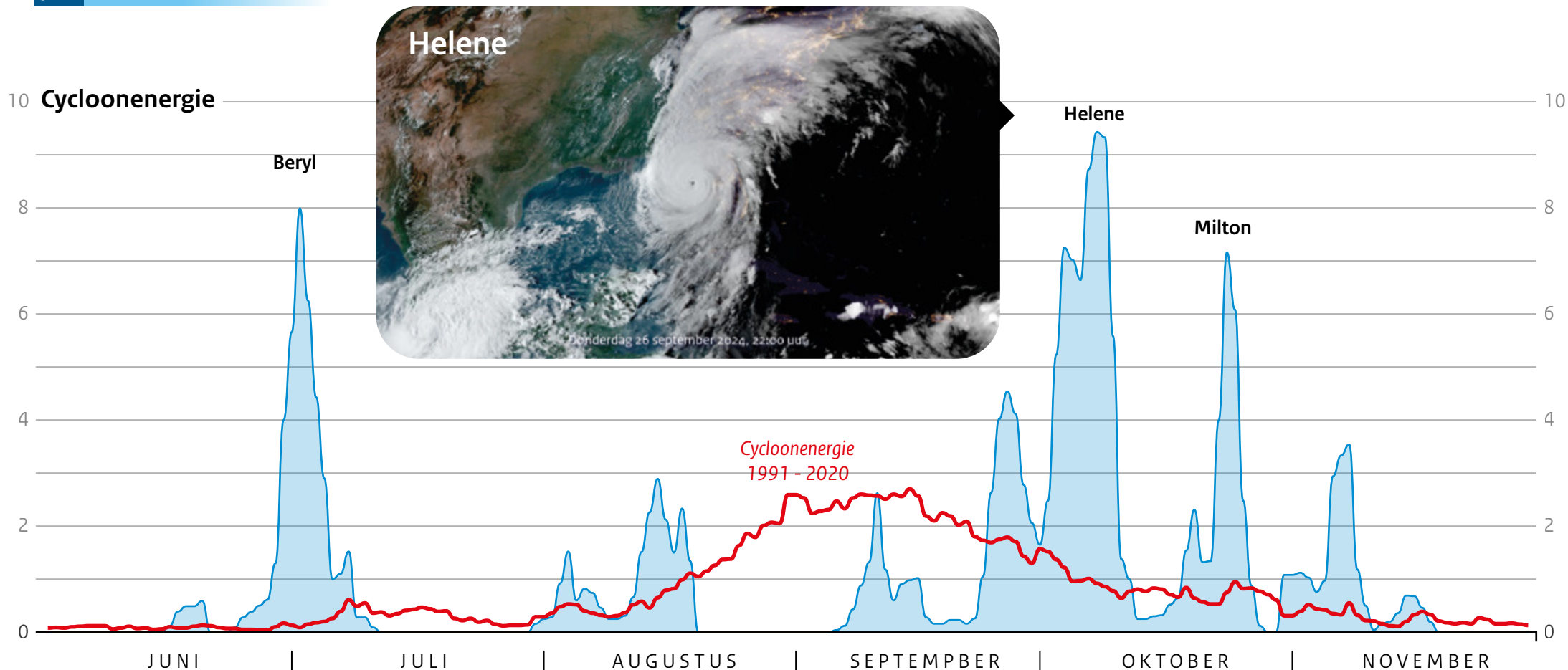
Het orkaanseizoen kende echter ook een opmerkelijke stilte: tussen medio augustus en medio september ontstond geen enkele orkaan. En dat terwijl in deze periode normaal gesproken juist de piek van het seizoen ligt. Deze opmerkelijke stilte werd waarschijnlijk veroorzaakt door een combinatie van meerdere (atmosferische) factoren. De belangrijkste factor was het feit dat stormen boven Afrika, die doorgaans de Atlantische Oceaan op trekken en dan doorgroeien tot orkanen, juist de Sahara in trokken en zo dus wegbleven van de Atlantische oceaan.

Nabij Bonaire, Sint Eustatius en Saba

Op 2 juli bereikte orkaan Beryl als vroegste orkaan ooit de hoogste intensiteit (categorie 5), met



DATA: NOAA'S INTERNATIONAL BEST TRACK ARCHIVE FOR CLIMATE STEWARDSHIP (IBTRACS) DATA 2025_01_26



windsnelheden boven de 270 kilometer per uur. Op haar tocht over de Caribische Zee richtte Beryl veel verwoesting aan; de orkaan kwam tweemaal als categorie 4 (220 kilometer per uur) aan land, eerst in Grenada, en een paar dagen later in Jamaica. Beryl trok in die periode ten noorden van Bonaire langs, waar waarschuwingen voor deining en golven waren afgegeven. Er zijn geen berichten

van schade op Bonaire door Beryl. Tropische Storm Ernesto trok op 13 augustus langs Saba en Sint Eustatius. De eilanden kregen voornamelijk te maken met de vele regen die de storm met zich meebracht. Het overvloedige water zorgde voor overstromingen en vallende rotsblokken, en door de harde wind waaiden bomen om op de eilanden.



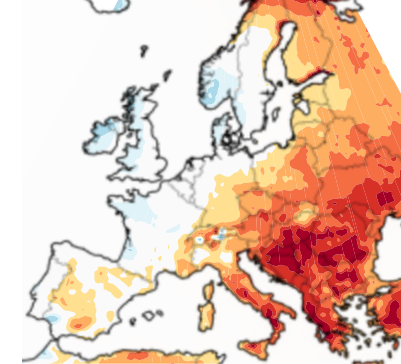
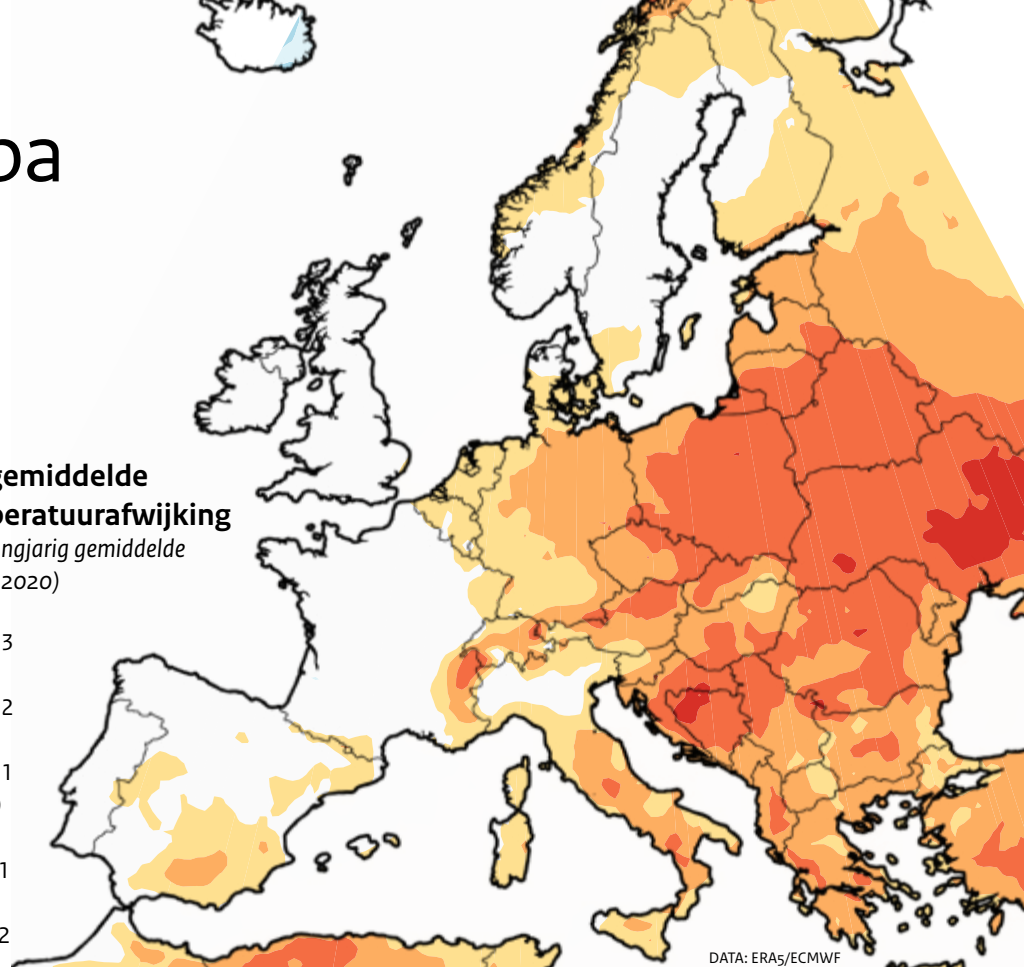
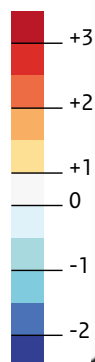
Orkanen voeden zich met warm zeewater. Naarmate het zeewater verder opwarmt, komt er meer energie beschikbaar voor een orkaan om sterker te worden. De verwachting is dus ook dat we vaker zware orkanen gaan zien.



Temperatuur Europa

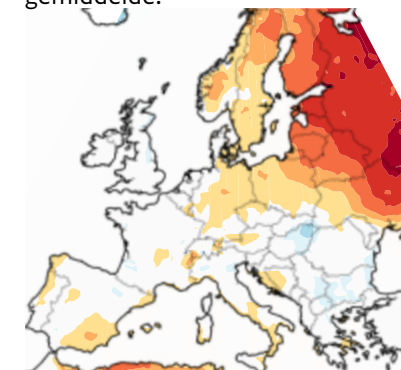
2024 was het warmste jaar in Europa sinds tenminste 1940 met een gemiddelde temperatuur van 10,69°C, 1,47 graden warmer dan het langjarig gemiddelde van 1991-2020 en 0,28 graden warmer dan het vorige record uit 2020. Alle seizoenen waren warmer dan gemiddeld. Vooral in Centraal-, Oost- en Zuidoost-Europa was het zeer warm, tot ruim 2,5 graden boven het langjarig gemiddelde. Alleen in IJsland lag de temperatuur onder het langjarig gemiddelde.

Jaargemiddelde temperatuurafwijking
t.o.v. langjarig gemiddelde (1991 - 2020)



Zomer

Was de warmste sinds tenminste 1940. De temperatuur lag gemiddeld 1,54 graden hoger dan het langjarig gemiddelde. Vooral het Middellandse Zeegebied, het zuidoosten van Europa en het noorden van Scandinavië hadden te maken met recordhoge temperaturen. In overige delen lag de temperatuur rond het langjarig gemiddelde.

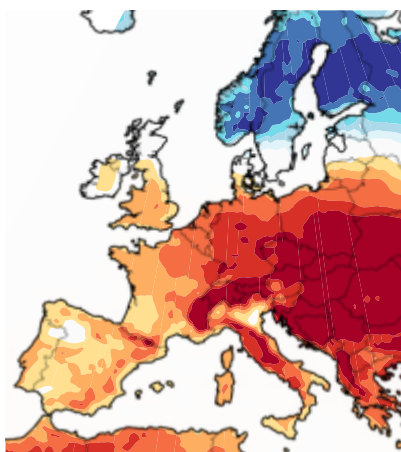


Herfst

Was de op twee na warmste, 1,25 graden boven het langjarig gemiddelde. Vooral in het oosten en noordoosten van Europa was het warm. In Zuidoost Europa lag de temperatuur op veel plekken onder het langjarig gemiddelde.

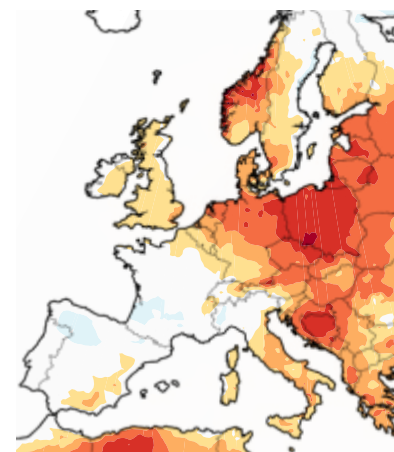
Winter (DEC. 2023, JAN.FEB.)

Was de op een na warmste sinds tenminste 1940 (gebaseerd op de ERA5 data), 1,44 graden boven het langjarig gemiddelde van 1991-2020. Alleen de winter van 2019/2020 was nog warmer. Vooral in de landen rond de Middellandse Zee, in de Alpen en in het oosten van Europa was het uitzonderlijk warm. In Scandinavië was het kouder dan gebruikelijk.



Lente

Was de warmste sinds het begin van de metingen, 1,50 graden warmer dan het langjarig gemiddelde. Het was vooral warm in het midden en oosten van Europa en in delen van Noorwegen en Zweden. Het zuiden van Frankrijk, Portugal en delen van Spanje kenden temperaturen rond het langjarig gemiddelde.



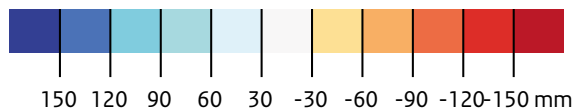


Neerslag Europa

Het was een droog jaar in het (zuid)oosten van Europa en een groot deel van het Middellandse Zeegebied. Nat was het in het grootste deel van West-Europa, met vooral veel neerslag langs de Noorse Kust en in het noorden van Italië. Na een natte winter brachten daar in het voorjaar storm Monica en in het najaar storm Boris veel neerslag.

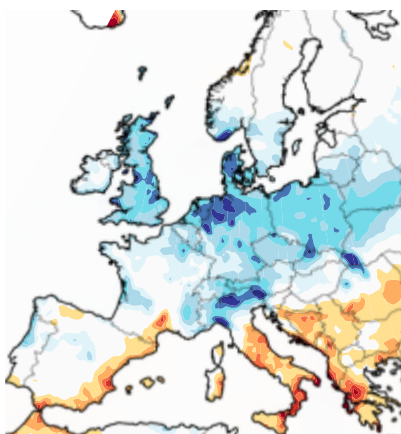
Afwijking maandgemiddelde neerslag

t.o.v. langjarig gemiddelde (1991 - 2020)



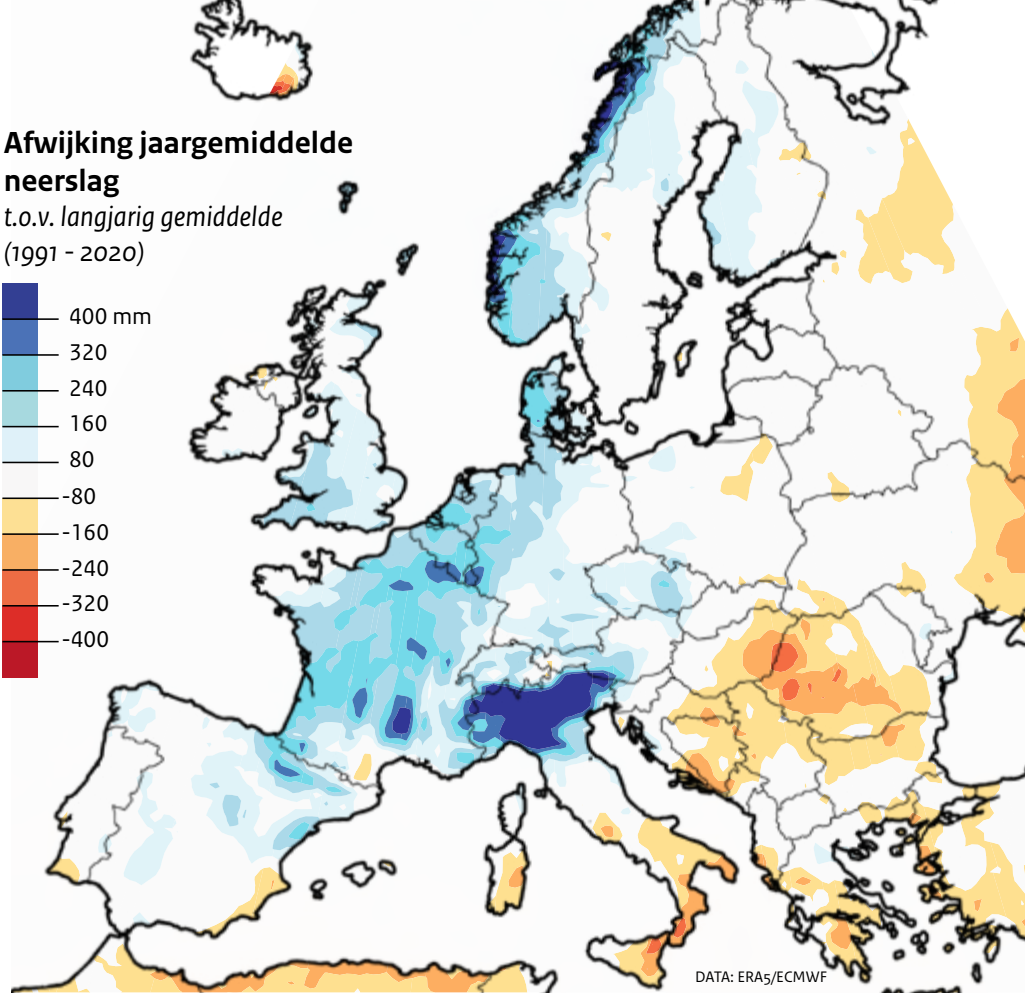
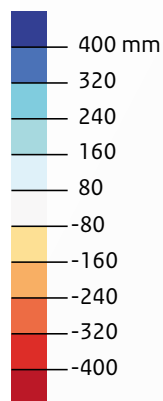
Winter

Nat was het in een brede band van west naar oost over het midden van Europa, waar een continue aanvoer van lagedrukgebieden voor veel neerslag zorgde. In de landen rond de Middellandse Zee was het daarentegen droog.



Afwijking jaargemiddelde neerslag

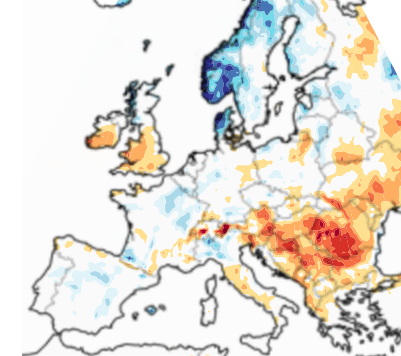
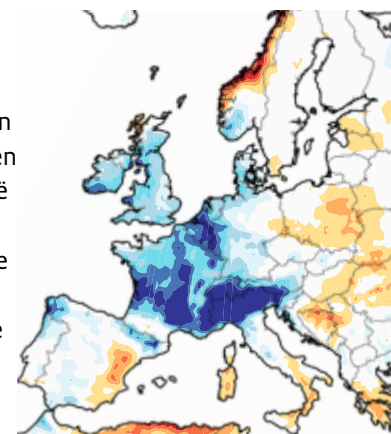
t.o.v. langjarig gemiddelde (1991 - 2020)



DATA: ERA5/ECMWF

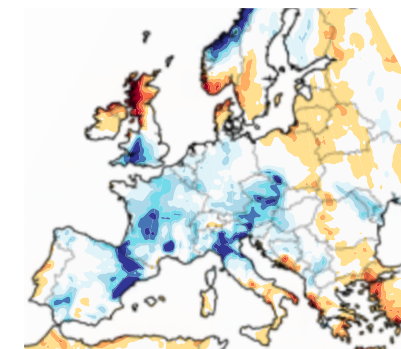
Lente

In grote delen van West-Europa was het voorjaar nat. Recordhoeveelheden neerslag werden geregistreerd in delen van Frankrijk, Italië, Nederland, België en Ierland. Een deel van de neerslag viel tijdens stormen, wat op meerdere plaatsen tot overstromingen leidde. In Noorwegen, het oosten van Spanje en een groot deel van Oost-Europa was het droger dan normaal.



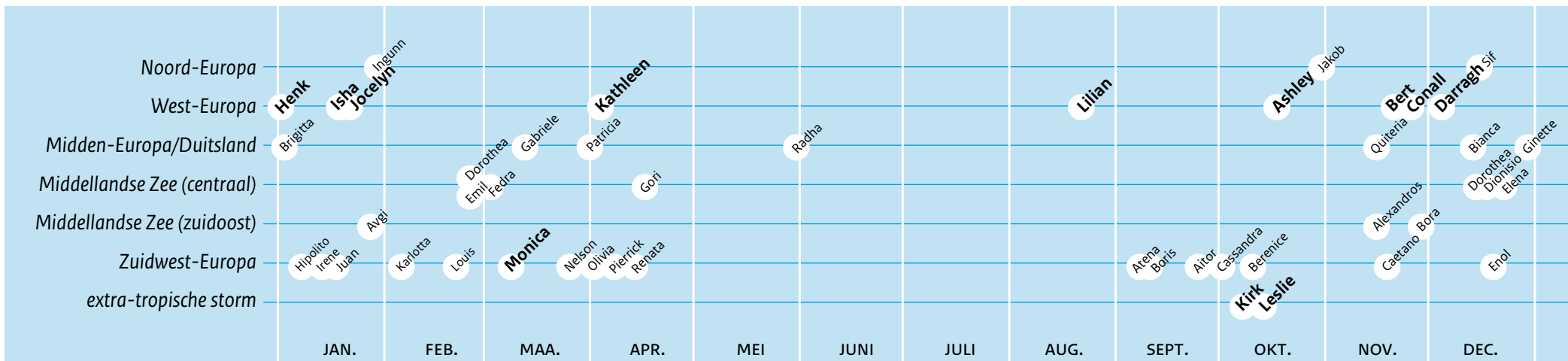
Zomer

Vooral in Scandinavië was de zomer nat, maar ook in een groot deel van het westen van Europa was de zomer natter dan gemiddeld. Een uitzondering was het zuiden van het Verenigd Koninkrijk en Ierland, waar het juist droger was dan normaal. Ook in het grootste deel van Italië en het zuidoosten van Europa was het droog.



Herfst

Sommige plekken hadden door extreem weer veel neerslag, zoals delen van Wales (storm Bert), de regio rondom Valencia en Centraal-Europa (storm Boris). Droog was het net als in de zomer in het oosten en zuidoosten van Europa. Ook in Ierland, Schotland en het zuiden van Scandinavië was het droog.

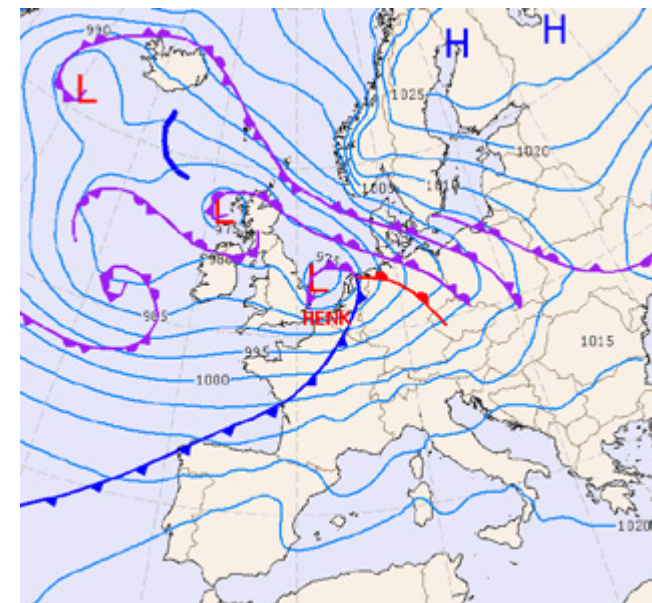


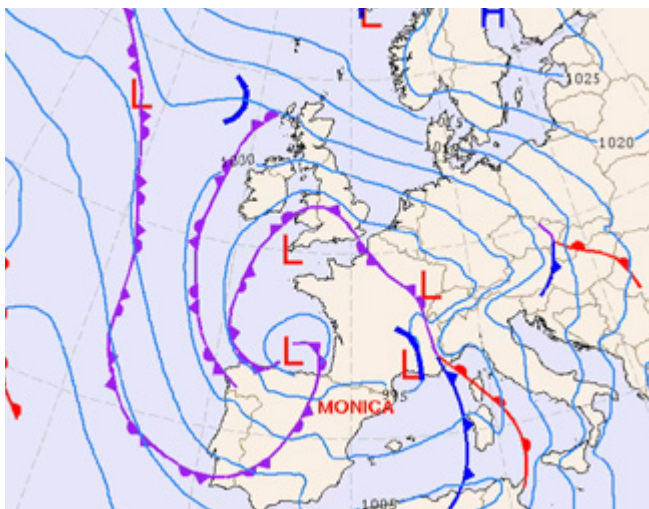
Stormen Europa

2024kende vele stormen. De eerste storm van het jaar was Henk, die vanuit Zuidwest-Engeland via de Noordzee naar Denemarken trok. Al snel volgden Isha, Jocelyn en Ingunn over het westen van Europa. Aan het einde van het jaar hadden we te maken met stormen Ashley, Bert, Conall en Darragh. De laatste storm van het jaar was Ginette, die aan het einde van het jaar veel neerslag bracht naar het Verenigd Koninkrijk en in Nederland veel wind rond de jaarwisseling veroorzaakte.

Storm Henk

Storm Henk zorgde voor veel wind en neerslag in het westen van Europa. De hevige neerslag volgde op een periode in 2023 waarin al veel neerslag was gevallen en de waterpeilen al zeer hoog stonden. In Frankrijk was code rood van kracht vanwege het risico op nieuwe overstromingen. Ook in Duitsland namen de problemen toe door opnieuw stijgende peilen in de rivieren na eerdere overstromingen in december. In Nederland gold in Noord-Holland en Friesland code oranje voor zware tot zeer zware windstoten. Tot grote problemen kwam het hier niet.



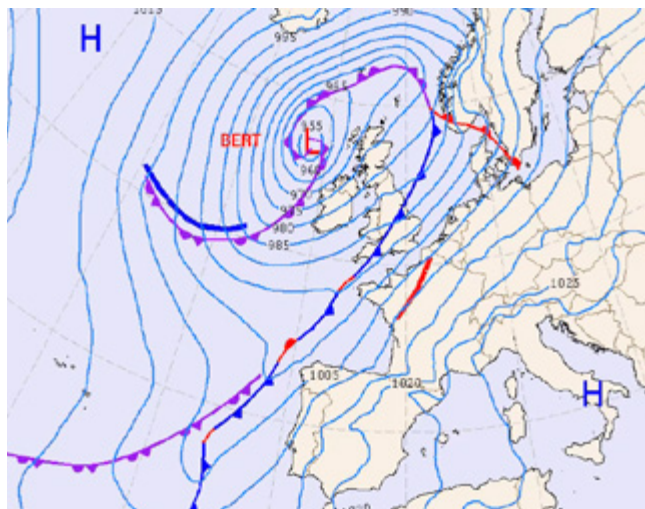


Storm Monica

Storm Monica trok op 9 en 10 maart over Frankrijk, Portugal, Spanje en Italië. In Frankrijk werden windstoten tot 130 kilometer per uur gemeten en werden neerslaghoeveelheden tot 224 millimeter in 24 uur tijd geregistreerd. De Alpen en Pyreneeën hadden te maken met zware sneeuwval. Lawines en extreme neerslag zorgden daar voor landverschuivingen en overstromingen. Meerdere mensen kwamen om het leven.



Stormen vergelijkbaar als Monica zijn nu 5-10 kilometer per uur sterker bij de Atlantische kust van Frankrijk en in de westelijke Middellandse Zee en 6-13 millimeter per dag natter boven het noorden van Italië dan in de periode 1971-2001. Bovendien kwamen vergelijkbare stormen vroeger vooral voor in de periode maart/april en nu in de periode februari/maart. ■



Storm Bert

Storm Bert ontwikkelde zich boven de Atlantische Oceaan en trok op 24 en 25 november via Schotland richting Scandinavië, waar hij snel in kracht afnam. Zowel in Ierland als in het Verenigd Koninkrijk was de schade groot, niet alleen door de wind, maar ook door de sneeuwval en grote hoeveelheden regen die tot overstromingen leidden. In Wales en Devon werd volgens de Britse weerdienst meer dan 175 millimeter neerslag in twee dagen geregistreerd. Er werden windstoten gemeten tot 130 kilometer per uur. De storm eiste het leven van vier mensen.

Door storm Bert stond in het westen van Europa een stevige zuidelijke wind die vanuit Spanje zeer warme lucht naar Frankrijk, Duitsland en de Benelux bracht. In het zuiden van Frankrijk werden zeer uitzonderlijke temperaturen van meer dan 26°C gemeten. In Nederland werd het in Ell 19,1°C.



De intensiteit van de neerslag in Groot-Brittannië en Ierland op een stormachtige dag is gemiddeld met 20 procent toegenomen door klimaatverandering. In een toekomstig warmer klimaat verwachten we dat deze trend doorzet. Voor het aantal stormen en de bijbehorende wind worden geen grote veranderingen verwacht. ■



Storm Kirk

Storm Kirk ontwikkelde zich als orkaan voor de kust van West-Afrika en trok vervolgens noordoostwaarts richting Europa. Aanvankelijk leek de orkaan, inmiddels afgezwakt tot extratropische storm, richting Nederland te trekken, maar uiteindelijk verlegde de koers zich naar het zuiden en kwam de storm in Frankrijk aan land. De storm veroorzaakte veel neerslag in Zuid- en Centraal-Europa, met plaatselijk overstromingen tot gevolg. In het zuiden van Frankrijk kwamen tienduizenden mensen zonder stroom te zitten. Het zuidoosten van Nederland, met name Limburg, kreeg ook te maken met veel regen.

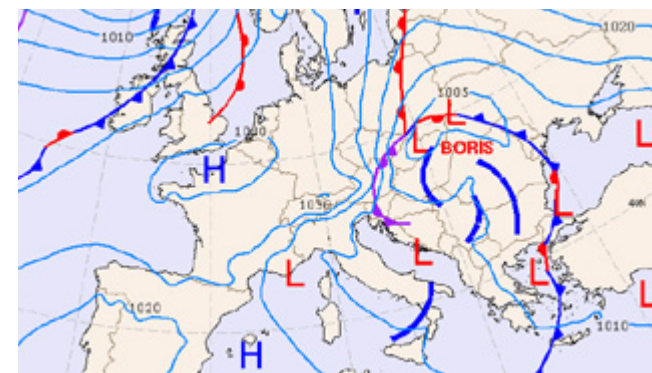
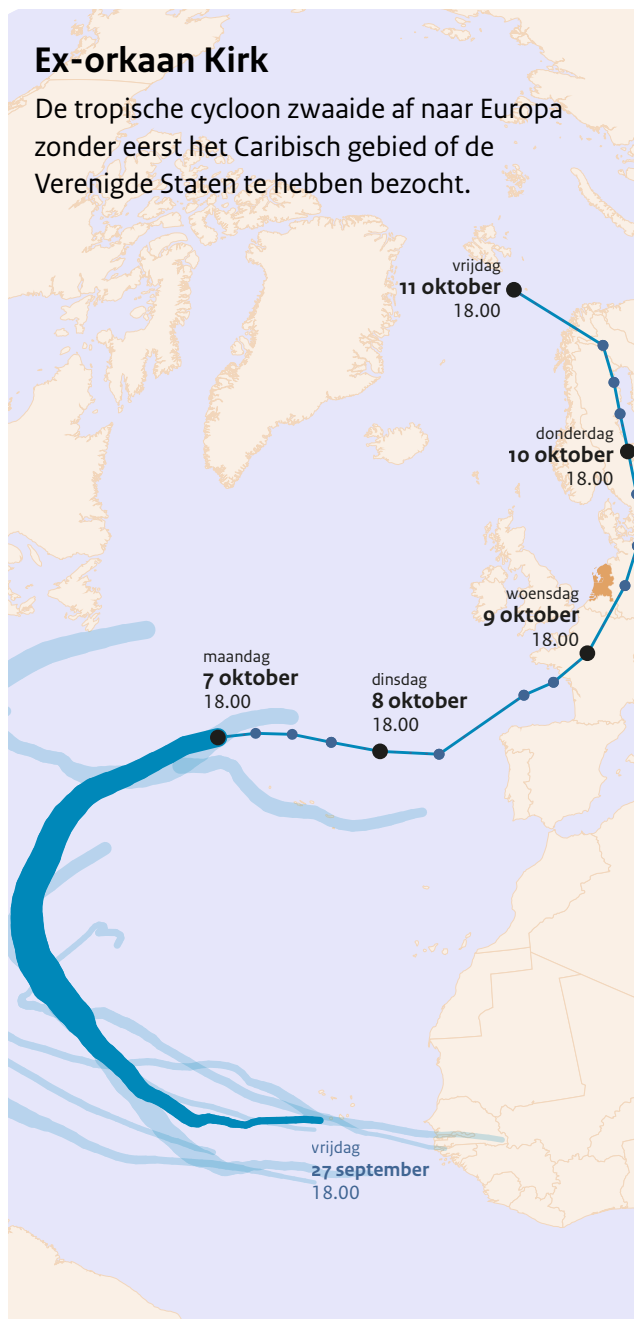
Na orkaan Ophelia die in oktober 2017 in Ierland aan land kwam, was Kirk opnieuw een tropische cycloon die direct naar Europa 'afzwaaide', zonder eerst het Caribisch gebied of de Verenigde Staten te hebben bezocht. In de afgelopen 40 jaar kwam 10 procent van de Atlantische orkanen in Europa aan land, dat is ongeveer één per jaar.



Door klimaatverandering breidt het gebied waar tropische cyclonen kunnen voorkomen zich geleidelijk naar het noorden uit. Dit kan leiden tot meer 'afzwaaiers', tropische cyclonen die vrijwel direct na hun ontstaan richting het noorden trekken en zo dus ook vaker Europa kunnen bereiken. Bij elke graad opwarming kan de atmosfeer 7 procent meer water bevatten.

Ex-orkaan Kirk

De tropische cycloon zwaaide af naar Europa zonder eerst het Caribisch gebied of de Verenigde Staten te hebben bezocht.

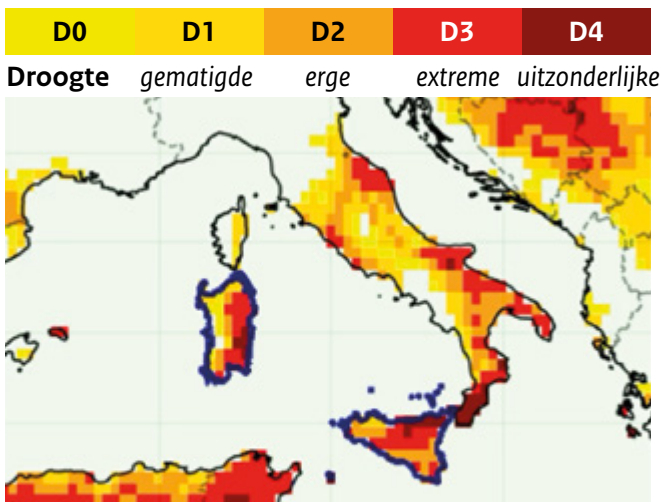


Storm Boris

Midden september ontwikkelde zich een sterk lagedrukgebied, Boris, dat zich van het westelijke Middellandse Zeegebied naar midden Europa verplaatste. Omdat het lagedrukgebied ingeklemd lag tussen hogedrukgebieden en zich dus nauwelijks verplaatste, veroorzaakte het in met name Oostenrijk, Tsjechië, Slowakije en het zuidwesten van Polen langdurige regenval. Over een groot gebied viel in een paar dagen tijd evenveel regen als normaal in een paar maanden. De aanhoudende regen werd gevoed door de aanvoer van warme en vochtige lucht uit het Middellandse Zeegebied. Het zeewater was daar tot wel drie graden warmer dan gemiddeld voor die tijd van het jaar.



Zelfs nu, met klimaatverandering, was dit een extreme gebeurtenis die niet vaker voorkomt dan eens in de honderd jaar. Door klimaatverandering is de kans op zo'n extreme regenval verdubbeld en viel er minstens 7 procent meer regen. De intensiteit van piekbuien neemt nog veel sterker toe.



Droogteclassificatie op basis van het Global Drought Information System.

Extreme droogte in Sardinië en Sicilië

Op Sicilië werd in mei de noodtoestand afgeroepen vanwege extreme droogte, veroorzaakt door zowel zeer weinig neerslag als zeer hoge temperaturen. Ook op Sardinië was de droogte extreem en leidde deze tot grote watertekorten. De droogte hield de hele zomer aan. Het watertekort had grote invloed op de agrarische sector en het toerisme, de belangrijkste bron van inkomsten op deze eilanden.



Een vergelijkbare droogte komt in het huidige klimaat op Sardinië ongeveer eens in de tien jaar voor, op Sicilië ongeveer eens in de honderd jaar. De kans op een vergelijkbare droogte is door klimaatverandering met ongeveer 50 procent toegenomen.



FOTO: VALTTERI HÄRKÖNEN

Koude in het noorden van Scandinavië

Begin januari stroomde ijskoude lucht uit het noordpoolgebied over het noorden van Scandinavië. Tijdens de koudegolf daalde de minimumtemperatuur tot onder de 25 graden onder nul in grote delen van het noorden van Scandinavië. In Abisko in het noorden van Zweden werd het maar liefst 35 graden onder nul. Toch was het geen record. In de ERA5 dataset (1950-nu) zijn er 11 koudegolven die kouder waren.



Een dergelijke koudegolf zou zonder klimaatverandering zo'n 4 graden kouder zijn geweest.

Hittegolf Middellandse Zeegebied

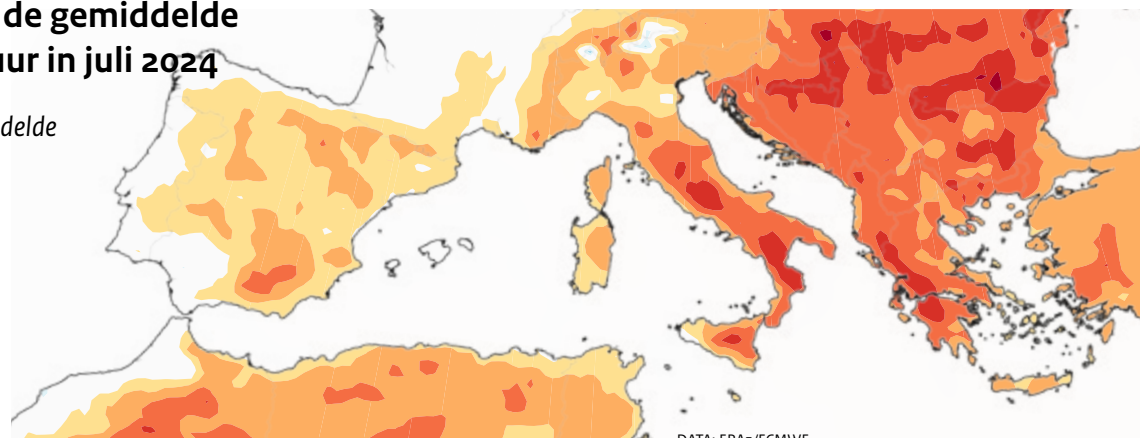
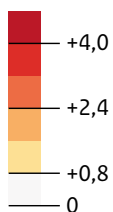
Griekenland, Italië, Spanje, Portugal, Frankrijk en Marokko hadden in juli te maken met extreme hitte, nadat het oosten van Europa begin juli al te maken had gehad met extreme hitte. In Marokko werden temperaturen tot 48°C gemeten. Minstens 21 mensen kwamen daar om het leven, al waren dat er waarschijnlijk meer omdat de werkelijke impact van hitte vaak pas maanden later duidelijk wordt. Door de hitte ontstonden meerdere natuurbranden.



Klimaatverandering maakt hittegolven langer, heter en dodelijker. De hitte zoals in juli 2024 is door klimaatverandering in deze regio niet meer zeldzaam en komt gemiddeld eens in de tien jaar voor. Een hittegolf met eenzelfde terugkeertijd zou in een pre-industrieel klimaat ongeveer 3 graden koeler zijn.

Anomalie van de gemiddelde dagtemperatuur in juli 2024

t.o.v. langjarig gemiddelde (1991 - 2020)



DATA: ERA5/ECMWF



Zware regenval in Duitsland en Zwitserland

Begin juni werd het zuiden van Duitsland getroffen door extreme neerslag en grootschalige overstromingen. Veel plaatsen in Baden-Württemberg en Beieren moesten worden geëvacueerd vanwege het gevaar van dam- en dijkdoorbraken. Op veel plekken viel in 24 uur net zoveel neerslag als normaal in een maand. Later in de maand had het zuiden van Zwitserland te maken met zware onweersbuien die in combinatie met smeltende sneeuw landverschuivingen en overstromingen veroorzaakten. Meerdere mensen kwamen hierbij om het leven. ■



BRON: NASA

Overstromingen Valencia

Op woensdag 29 oktober werd Spanje getroffen door de zwaarste overstroming van deze eeuw. Het weersfenomeen dat de hevige regenval had veroorzaakt, was een lagedrukgebied gevuld met koude lucht op grote hoogte. In Spanje staat dit bekend onder de naam Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA), wat letterlijk 'geïsoleerde depressie op hogere niveaus' betekent. Dit komt in Spanje wel vaker voor, maar nooit eerder veroorzaakte een DANA zoveel neerslag. Dit werd mede veroorzaakt door de warme Middellandse

Zee, die tot twee graden warmer was dan gebruikelijk, waardoor extra veel water kon verdampen. Op sommige plekken viel meer dan 400 millimeter in 24 uur. Meer dan 200 mensen kwamen door de overstromingen om het leven en de schade liep in de miljarden.



Klimaatverandering heeft ervoor gezorgd dat uit een DANA tegenwoordig gemiddeld meer regen valt dan vroeger het geval was, tenminste 12 procent meer. De kans op een dergelijke gebeurtenis is ongeveer verdubbeld. ■



FOTO: WWA



2024 wereldwijd meer dan 1,5 °C warmer dan eind 19e eeuw

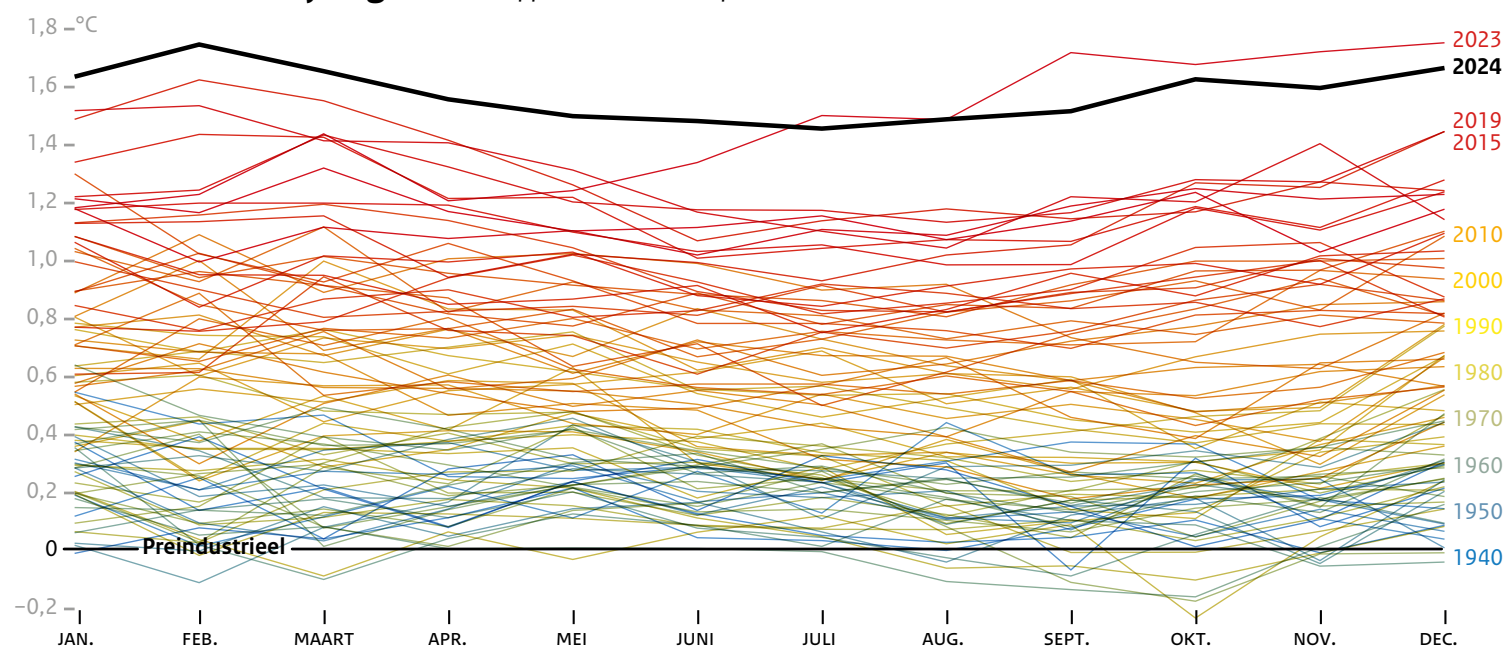
Waar de warmte in 2023 al met kop en schouders uitstak boven de voorgaande temperatuurrecords, is 2024 daar nog eens met 0,1 graden overheen gegaan. Gemiddeld over het hele aardoppervlak kwam de opwarming uit op 1,55 graden ten opzichte van eind 19^e eeuw.

De hoofdoorzaak van de opwarming – en dus van het warmterecord- is de toename van broeikasgassen in de atmosfeer. De CO₂-uitstoot was vorig jaar weer recordhoog (zie pagina 32), vooral door het gebruik van fossiele brandstoffen. Daar bovenop kwam extra opwarming door de El Niño (zie pagina 29).

Toch kan de recordwarmte van afgelopen twee jaar niet alleen daardoor verklaard worden. Andere factoren die daar mogelijk aan hebben bijgedragen:

- Door een afname van de hoeveelheid lage bewolking werd er minder zonlicht weerkaatst en bereikte een groter deel ervan het aardoppervlak. Volgens recent onderzoek kan dit een belangrijke bijdrage hebben geleverd aan de recordwarmte (zie pagina 38).
- De zwaveluitstoot door de internationale scheepvaart en door China is sterk afgenomen.

Mondiale afwijkingen van de oppervlakteluchttemperatuur



Daardoor komen er minder zwaveldeeltjes in de lucht, die zonlicht weerkaatsen en een afkoelende werking hebben.

- Door de warme zeewatertemperaturen kon er extra veel water verdampen. Aangezien waterdamp een sterk broeikasgas is, werkt dit als een versterkingsmechanisme voor de opwarming. De atmosfeer was niet eerder sinds metingen begonnen zo vochtig als in 2024.

- De zonneactiviteit heeft recent het maximum bereikt van haar 11-jarige cyclus. Dit heeft een relatief klein effect op de wereldwijde temperatuur.
- De uitbarsting van de Hunga Tonga–Hunga Ha'apai vulkaan in januari 2022 bracht extra zwavel en waterdamp in de stratosfeer. Het is niet duidelijk of het netto-effect hiervan afkoelend of opwarmend is geweest – maar groot was de invloed waarschijnlijk niet. ■



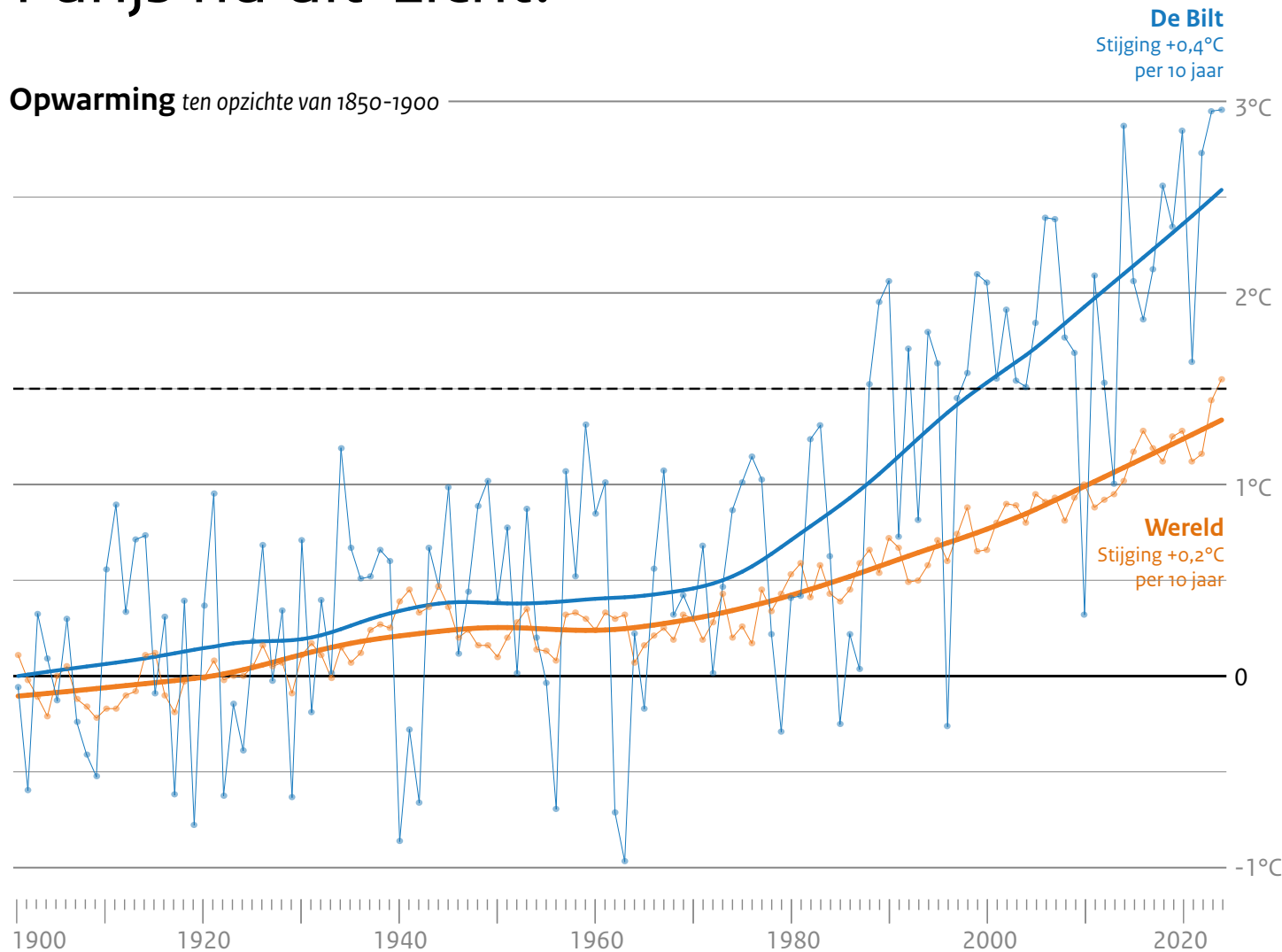
Is de doelstelling van Parijs nu uit zicht?

In het klimaatakkoord van Parijs in 2015 is afgesproken om de wereldwijde opwarming te beperken tot ruim minder dan 2 graden en te streven naar een opwarming van maximaal 1,5 graden. Die grenzen zijn niet willekeurig gekozen: de nadelige gevolgen van klimaatverandering worden steeds sterker bij meer opwarming (zie pagina 34).

Om te bepalen of de wereldwijde opwarming een bepaalde grenswaarde is overgegaan, volstaat een individueel jaar niet. Vanwege de grote jaarlijkse variatie geeft de langetermijntrend daarvoor een betere indicatie. Dus hoewel 2024 het eerste jaar was waarin de 1,5 graden werd overschreden, betekent dit niet dat we de grens van Parijs al officieel voorbij zijn.

De opwarming op aarde gaat niet overal even snel. Zo was het in De Bilt vorig jaar bijna 3 graden warmer dan aan het begin van de vorige eeuw. Dit verschil is niet verrassend: in de wereldgemiddelde waarden zijn ook de oceanen meegenomen en water warmt een stuk minder snel op dan land. Het noordelijk halfrond, dat voor een groter deel uit land bestaat dan het zuidelijk halfrond, passeerde de 1,5 gradengrens al in 2020 en De Bilt zelfs al rond de eeuwwisseling.

Opwarming ten opzichte van 1850-1900



De Bilt warmt sterker op dan het wereldgemiddelde, mede omdat land nu eenmaal sterker opwarmt dan water. Daarnaast schommelt de jaargemiddelde temperatuur in De Bilt veel sterker heen en weer. Door het gemiddelde te nemen over het hele aardoppervlak worden toevallige variaties meer uitgesmeerd.

DATA: KNMI / GISTEMP Team



La Niña liet even op zich wachten

Elke twee tot zeven jaar vindt een natuurlijke schommeling plaats in de zee- en luchtstromen boven de Stille Oceaan: El Niño. Tijdens deze periode is het water rond de evenaar voor de westkust van Zuid-Amerika enkele graden warmer dan normaal.

Warm oppervlaktewater wordt tijdens een El Niño met een westenwind richting de oostelijke Stille Oceaan gebracht. Dit is in de figuur te herkennen aan de rode kleur voor de westkust van Zuid-Amerika in januari.

El Niño's variëren in sterkte en lengte. De El Niño die in 2023 begon en duurde tot het voorjaar van 2024 behoorde tot de sterkste vijf ooit gemeten. Dit zorgde wereldwijd voor buitengewoon weer: van overstromingen in Afghanistan, Pakistan en Iran en Brazilië tot een wereldwijd verhoogde zeespiegel.

In Zuidelijk Afrika en in het Amazonegebied veroorzaakte de El Niño juist droogte. Dit komt doordat de afwijkende watertemperaturen de ligging van hoge- en lagedrukgebieden beïnvloeden.

Na de El Niño kwamen de zeewatertemperaturen in neutrale condities terecht, waarbij de wind vooral uit het oosten waait. Daarna was het wachten op tegenpool La Niña, die op de valreep van 2024 begon. Tijdens een La Niña gebeurt het tegenovergestelde van een El Niño en is het water voor de westkust van Zuid-Amerika juist kouder dan normaal door een versterkte oostenwind. Het Amerikaanse instituut NOAA verwacht dat deze zwakke, kortdurende La Niña aanhoudt tot februari-april, waarna we waarschijnlijk zullen terugkeren naar een neutrale staat.

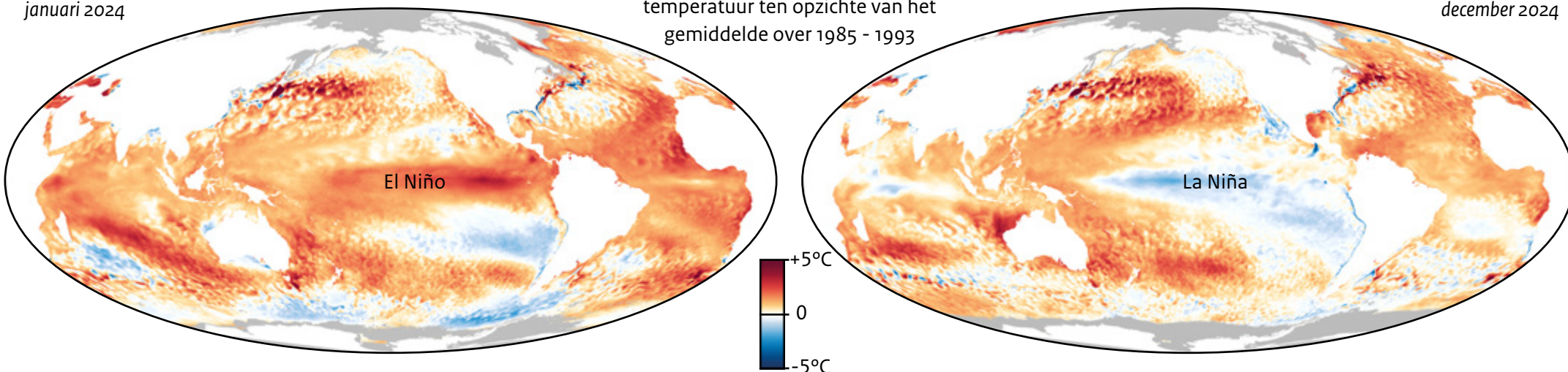
El Niño

januari 2024

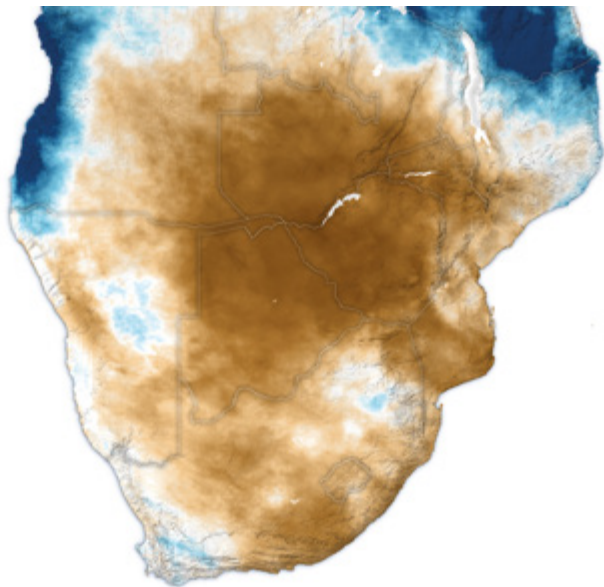
Afwijking van de zeewater-temperatuur ten opzichte van het gemiddelde over 1985 - 1993

zwakke La Niña

december 2024



DATA: NOAA



BRON: NASA EARTH OBSERVATORY IMAGES BY WANMEI LIANG

Droogte in zuidelijk Afrika

In februari trof een extreme droogte zuidelijk Afrika. De temperaturen waren hoog en er viel slechts 20 procent van de gebruikelijke hoeveelheid neerslag voor februari. Dit terwijl deze landen grotendeels afhankelijk zijn van regenwater voor voedselproductie. De impact was extra groot omdat de regio al kampte met hoge voedselprijzen, landbouwziektes, en een cholera uitbraak.



Klimaatverandering heeft geen duidelijke invloed op droogte in dit deel van Zuidelijk Afrika. In het huidige klimaat komt een droogte als deze eens in de tien jaar voor. Wel verdubbelt de kans in jaren met een El Niño, doordat er dan minder regen valt en de temperaturen hoger zijn. El Niño was dan ook één van de belangrijkste aandrijvers van de droogte dit jaar.

Overstromingen in Brazilië

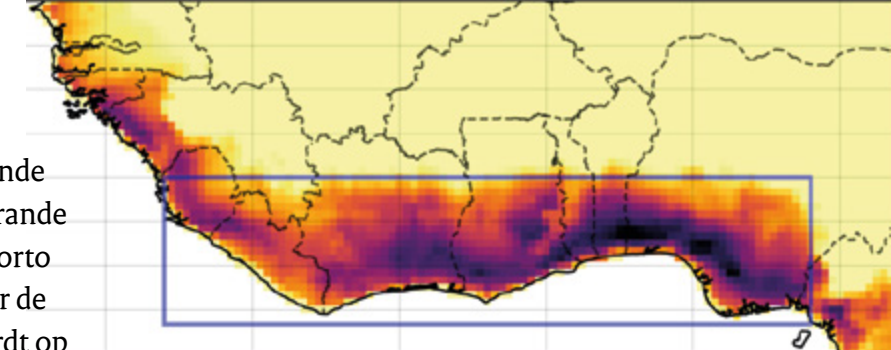
Eind april en begin mei waren er verwoestende overstromingen in de zuidelijke staat Rio Grande do Sul in Brazilië. Grote delen van de stad Porto Alegre stonden onder water. De schade door de overstromingen en landverschuivingen wordt op miljarden dollars geschat en er vielen meer dan 180 dodelijke slachtoffers.



Door klimaatverandering is de kans op hevige regenval in Brazilië toegenomen. Maar ook in het huidige klimaat was deze gebeurtenis uitzonderlijk. De neerslaghoeveelheden die werden gemeten komen nu eens in de 100-250 jaar voor. Naast klimaatverandering speelde El Niño hierbij ook een rol. In jaren met een El Niño is de kans op extreme regenval en de intensiteit ervan namelijk hoger.

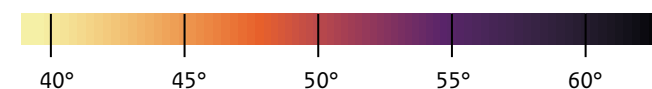


FOTO: NASA EOSDIS LANCE AND GIBS/WORLDVIEW



Gevoelstemperatuur 11-15 februari 2024

BRON: WWA



Hoge gevoelstemperaturen West-Afrika

Zuidelijk West-Afrika had in februari dit jaar te maken met uitzonderlijk hoge temperaturen die vroeger in het jaar kwamen dan normaal. Vanwege de hoge luchtvochtigheid in de regio voelde de hitte nog extremer aan: met gevoelstemperaturen van 50 graden en lokaal zelfs 60 graden was het gevaarlijk tot zeer gevaarlijk warm. Dit bracht verhoogde gezondheidsrisico's met zich mee, zoals hittekrampen, hitte-uitputting en hitteberoertes.

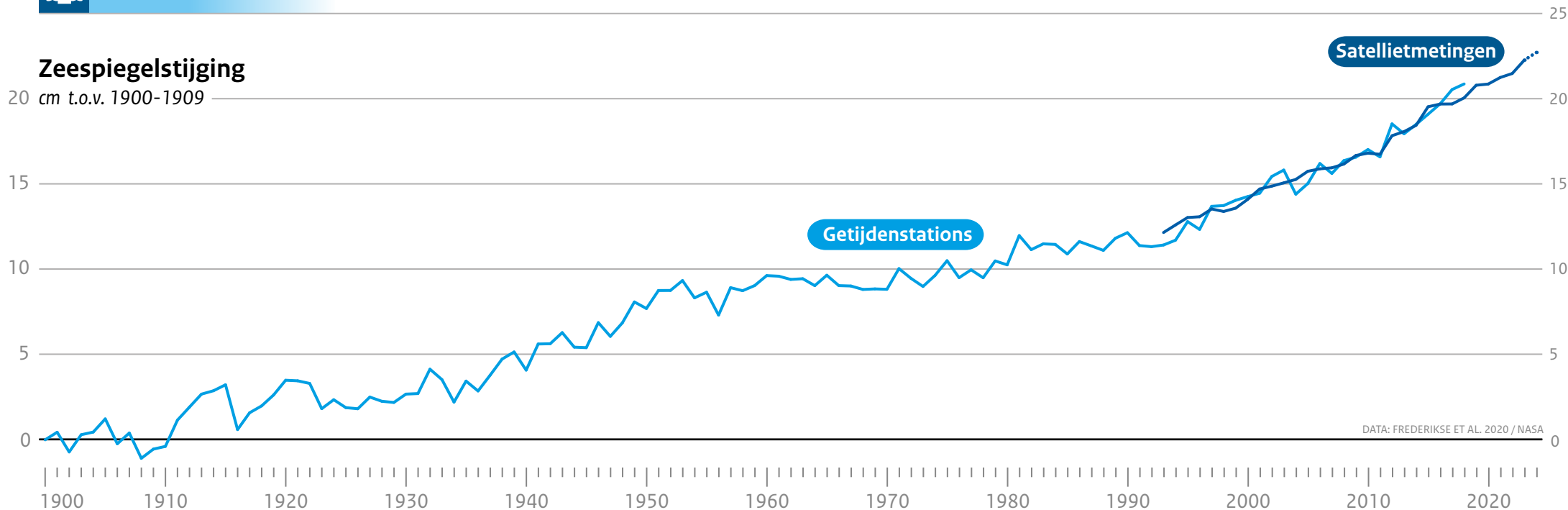


De hoge gevoelstemperaturen die in februari in zuidelijk West-Afrika voorkwamen liggen door klimaatverandering 4 graden hoger dan rond 1900. Nu komen deze gevoelstemperaturen ongeveer eens in de 10 jaar voor, terwijl dit toen ongeveer eens in de 100 jaar was. Als de wereldwijde opwarming 2 graden bereikt, zal dit verder toenemen tot ongeveer eens in de twee jaar.



Zeespiegelstijging

cm t.o.v. 1900-1909



Zeespiegelstijging zet door tot nieuw record

In 2024 bereikte de wereldgemiddelde zeespiegel het hoogste niveau ooit. De El Niño-periode zorgde in 2023 en 2024 tijdelijk voor extra hoge oceaantemperaturen en dus ook een hogere zeespiegel. Als water opwarmt, zet het namelijk uit. Bovendien viel er door El Niño minder neerslag boven land en meer boven zee, wat tijdelijk tot extra verhoging van de zeespiegel leidde.

Naast de uitzetting van warmer wordend water

draagt ook het smelten van landijs bij aan de lange termijn zeespiegelstijging: gletsjers trekken zich terug en smelten in hoog tempo; de grote ijskappen op Groenland en Antarctica slinken en kalven af aan de randen. Smeltend zee-ijs draagt niet noemenswaardig bij aan zeespiegelstijging, omdat het al op zee drijft.

De zeespiegel wordt op verschillende plekken gemeten met getijdenstations. Ook meten

satellieten sinds 1993 hoe de zeespiegel wereldwijd verandert. In totaal is de wereldgemiddelde zeespiegel al met ruim 22 centimeter gestegen sinds het begin van de vorige eeuw.

De snelheid van de wereldwijde zeespiegelstijging is de laatste 30 jaar meer dan verdubbeld van 2,1 millimeter per jaar in 1993 tot 4,5 millimeter per jaar in 2023. Ook langs de Nederlandse kust gaat de zeespiegelstijging steeds sneller. ■

CO₂ blijft toenemen

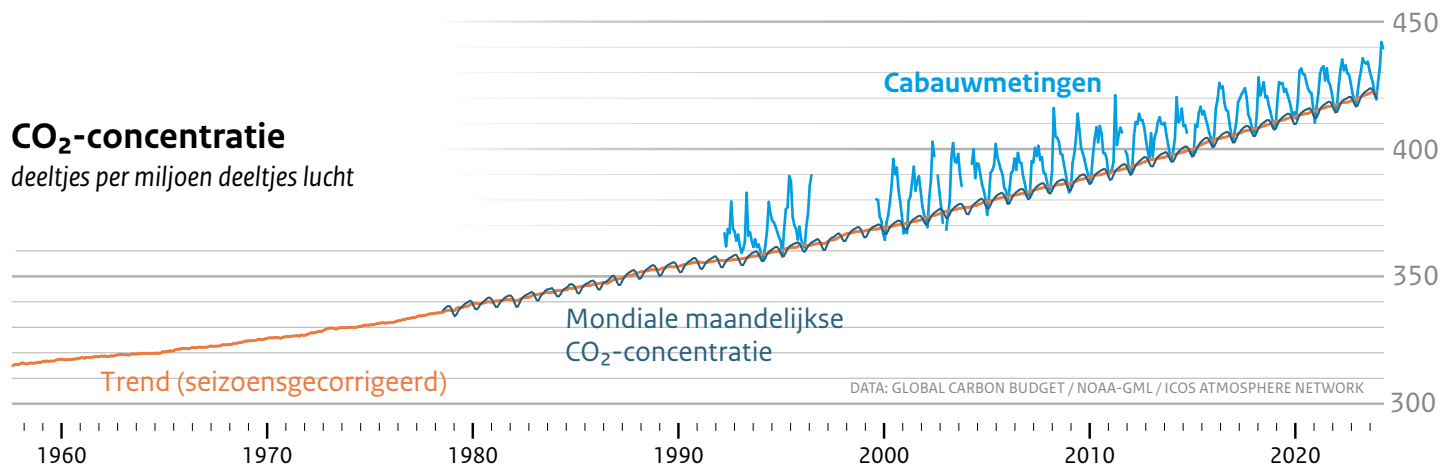
De totale wereldwijde CO₂-uitstoot was recordhoog in 2024: 41,6 miljard ton, 2 procent meer dan in 2023. Deze toename komt zowel door een stijging in het gebruik van fossiele brandstoffen als door veranderingen in landgebruik (vooral ontbossing). Dat laatste is opvallend, want de afgelopen 10 jaar nam die uitstoot juist af. Bosbranden in 2024 in zowel Canada als de Amazone, mede versterkt door El Niño en klimaatverandering, zorgden ook voor extra uitstoot.

Het CO₂-gehalte in de lucht neemt toe zolang we meer CO₂ uitstoten dan planten en oceanen kunnen opnemen. Om de doelstelling van het Parijs-akkoord te halen moet de CO₂-uitstoot in de komende decennia naar netto nul. Netto nul wil zeggen dat de restuitstoot gecompenseerd wordt door menselijke CO₂-verwijdering (zie pagina 34). De natuurlijke CO₂-opname door planten en oceanen telt niet mee voor netto nul.

Sinds 1992 meet Nederland broeikasgassen op verschillende hoogtes in de meetmast van het KNMI in Cabauw in de provincie Utrecht, als onderdeel van de Europese ICOS-meetinfrastructuur. Hiermee kunnen

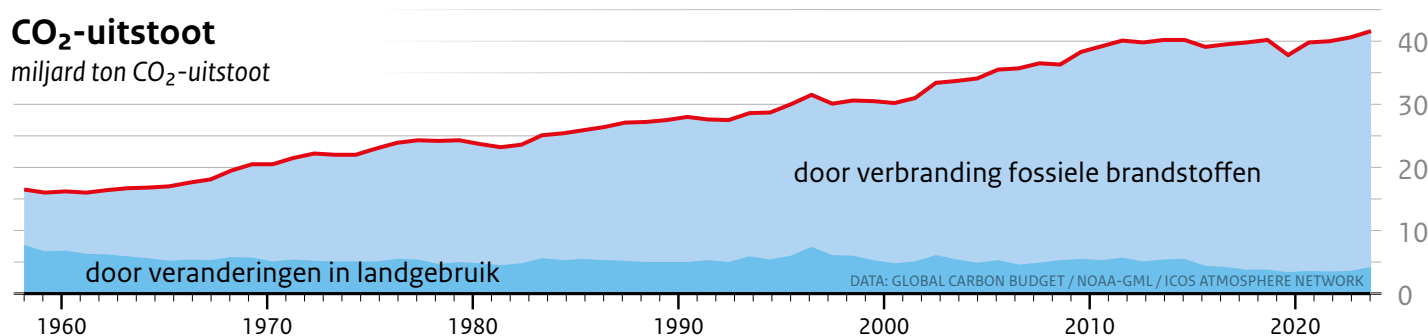
CO₂-concentratie

deeltjes per miljoen deeltjes lucht



CO₂-uitstoot

miljard ton CO₂-uitstoot



de belangrijkste bronnen en putten van broeikasgassen in beeld worden gebracht.

De gemeten concentraties bij Cabauw op 207 meter zijn hoger dan het wereldwijde gemiddelde. Dit komt mede omdat Europa een belangrijk brongebied van CO₂-emissies door menselijk handelen is. Ook is de seizoenschommeling er een

stuk groter, omdat er op het noordelijk halfrond meer land is dan op het zuidelijk halfrond. In het groeiseizoen nemen planten en bomen CO₂ op om te groeien, terwijl ze dit in de winter weer afgeven als de bladeren vallen. Daarnaast heeft het Nederlandse klimaat veel variatie in temperatuur en straling en dus in plantenactiviteit door het jaar heen. ■



Nieuwe inzichten

Wetenschap is nooit af. We weten in essentie hoe en waarom het wereldwijde klimaat verandert, maar er zijn nog genoeg open vragen en details die we graag nog beter zouden begrijpen. Ook het afgelopen jaar is weer veel onderzoek gedaan, wat diverse nieuwe inzichten heeft opgeleverd. Enkele daarvan bespreken we hier.

In de selectie van onderwerpen en wetenschappelijke publicaties hebben we gelet op zowel maatschappelijke relevantie als het wetenschappelijke belang. We schetsen van elk onderwerp kort de context en betekenis, en gaan vervolgens in op de nieuwe inzichten en de betekenis ervan.

Dit is natuurlijk geen uitputtende beschrijving, en ook zullen deze onderzoeken niet het laatste woord zijn over het betreffende onderwerp. Integendeel, baanbrekend onderzoek is vaak een aanleiding voor een heleboel vervolgstudies, omdat het nu eenmaal veel nieuwe vragen oproept.

Lees dit dus vooral als een momentopname van het klimaatonderzoek, net zoals de rest van de Staat van het Klimaat een momentopname is van het weer van afgelopen jaar, in de context van de verdergaande klimaatverandering. ■





Hoe realistisch en riskant is een tijdelijke ‘overshoot’?

De 1,5 gradengrens van het Klimaatakkoord van Parijs komt steeds dichterbij (zie pagina 28). De hoop wordt daarom steeds meer gevestigd op het tijdelijk overschrijden (*overshoot*) van 1,5 graden, waarna we grootschalig CO₂ uit de atmosfeer zouden moeten verwijderen om de temperatuur weer naar beneden te brengen.

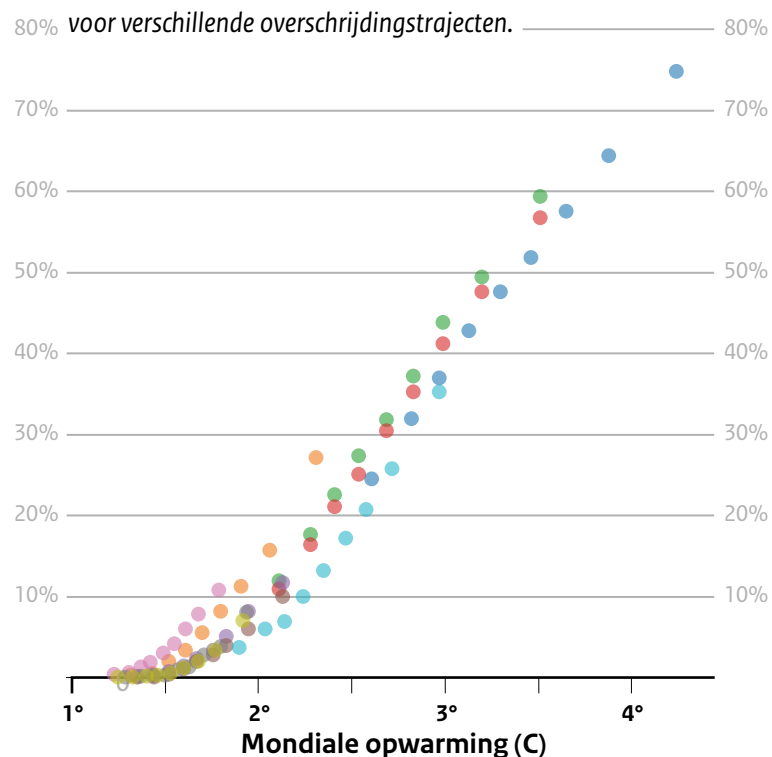
Risico's onderschat

De risico's van een dergelijke *overshoot* worden echter onderschat (Schleussner et al., 2024). Hoe hoger de piek in de opwarming, hoe extremer weersverschijnselen, zoals hitte, neerslag en droogte, zullen uitpakken. Het tijdelijk overschrijden van 1,5 graden opwarming kan ook betekenen dat het smelten van ijskappen, en dus zeespiegelstijging, langer en steviger doorzet.

Boven 1,5 graden wordt risico snel groter

Bovendien wordt het risico van overschrijding van kantelpunten steeds groter naarmate de opwarming langer en hoger boven de 1,5 graden uitkomt. Kantelpunten zijn abrupte veranderingen, waarbij (een onderdeel van) het klimaatstelsel instabiel raakt en in een nieuwe evenwichtssituatie terecht komt. Vaak zijn deze veranderingen onomkeerbaar op menselijke tijdschalen. Met elke overschrijding van 1,5 graden

Risico op kantelpunten 2300



opwarming neemt het risico op kantelpunten toe (Möller et al., 2024). Zelfs als de opwarming na een piek weer wordt teruggebracht tot 1,5 graden door grootschalige CO₂-verwijdering blijft dit risico hoog. In deze studie zijn vier kantelpunten meegenomen: het instabiel raken van de AMOC, de Amazone en de ijskappen van Groenland en Antarctica.

Wensdenken of niet?

Om de opwarming te beperken tot ruim onder de 2 graden is het volgens scenario studies noodzakelijk om op grote schaal CO₂ uit de atmosfeer te verwijderen. Het gaat dan om honderden miljarden tonnen CO₂, gegeven de huidige wereldwijde uitstoot van ruim 40 miljard ton per jaar.

De mogelijkheden voor permanente opslag van CO₂ op een dergelijke schaal zijn op dit moment nog onvoldoende duidelijk. Opslag in de geologische ondergrond -waar de fossiele brandstoffen ook vandaan kwamen- is het meest permanent, terwijl bijvoorbeeld bosaanplant een minder gegarandeerde en minder langdurige manier van CO₂-vastlegging is (Allen et al., 2024). Er zijn serieuze twijfels over de haalbaarheid om later deze eeuw de temperatuurstijging om te keren naar een daling. Snelle emissiereductie blijft het meest effectief om de klimaatrisico's te beperken. ■

REFERENTIES

- Allen, M. R. et al., Geological Net Zero and the need for disaggregated accounting for carbon sinks, Nature, 2024
- Möller, T. et al., Achieving net zero greenhouse gas emissions critical to limit climate tipping risks, Nature 2024
- Schleussner, C.F. et al., Overconfidence in climate overshoot, Nature, 2024



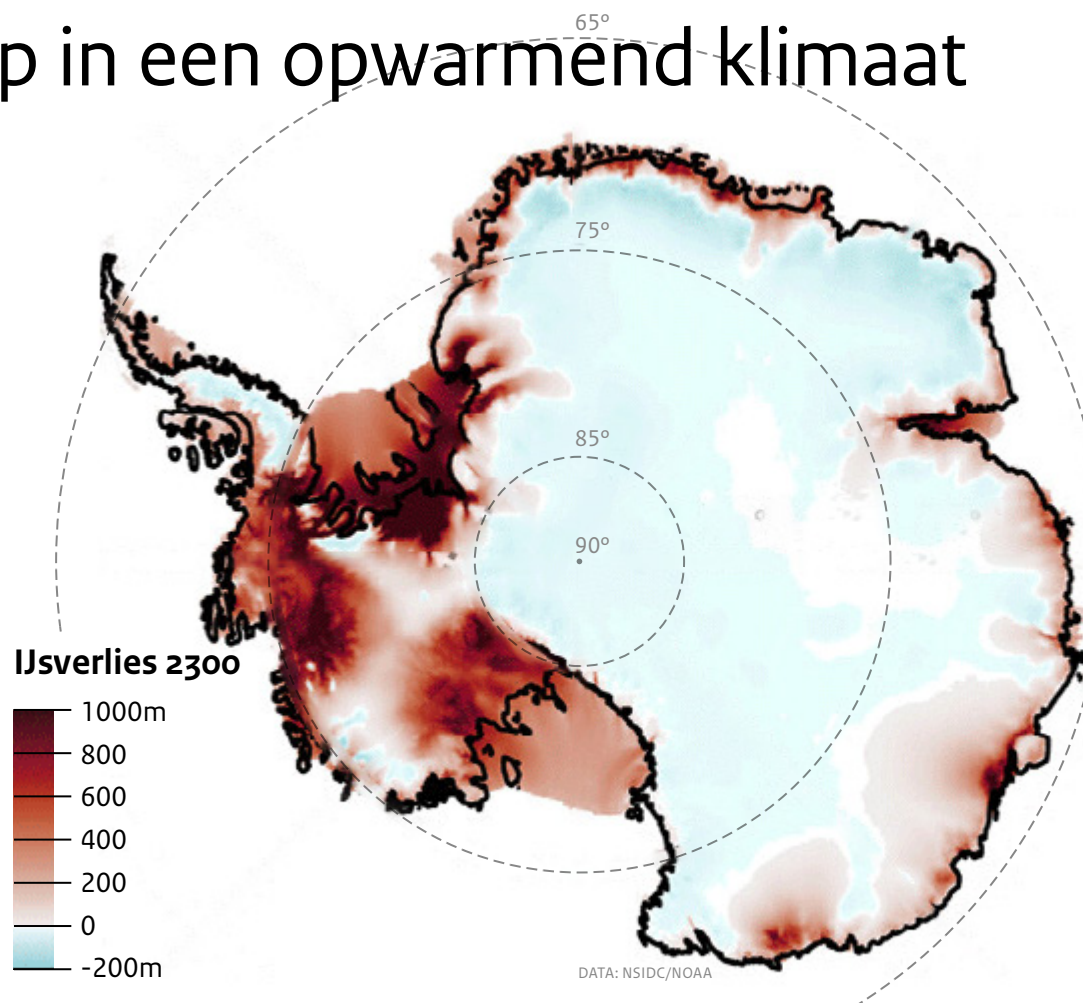
De Antarctische ijskap in een opwarmend klimaat

De huidige uitstoot van broeikasgassen zal een langdurige invloed hebben op de zeespiegelstijging, omdat de oceaan en de ijskappen heel langzaam reageren op het veranderende klimaat. De grote ijskappen op Groenland en Antarctica verliezen al meer ijs dan er aan sneeuw bij komt. Een belangrijke vraag is hoe dat in de toekomst verder zal gaan.

Volgens een recente overzichtsstudie zal Antarctica onder een hoog emissiescenario tussen de -0,6 en +4,4 meter aan de zeespiegelstijging in 2300 bijdragen (Seroussi et al., 2024). De totale zeespiegelstijging (dus inclusief uitzetting van water en smelten van de Groenlandse ijskap en berggletsjers) zal hoger uitpakken dan deze bandbreedte.

Instabiele ijskappen?

Niet alle relevante processen zijn meegenomen in deze getallen. Door het instorten van ijsplaten als gevolg van smeltwater aan het oppervlak kan het ijsverlies op Antarctica oplopen tot 6,9 meter in 2300. En het mogelijk instabiel raken van mariene ijskliffen, waardoor de zeespiegelstijging nog een stuk hoger zou kunnen uitkomen, ontbreekt in deze modellen.

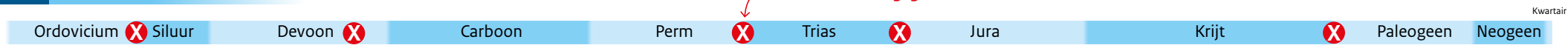


Ijsverlies in Antarctica in 2300 onder een hoog emissiescenario (modelgemiddelde verwachting). Vooral op West-Antarctica en aan de randen van het continent zal veel ijs smelten. Het ijs in het binnenland van Oost-Antarctica kan juist dikker worden door toenemende sneeuwval.

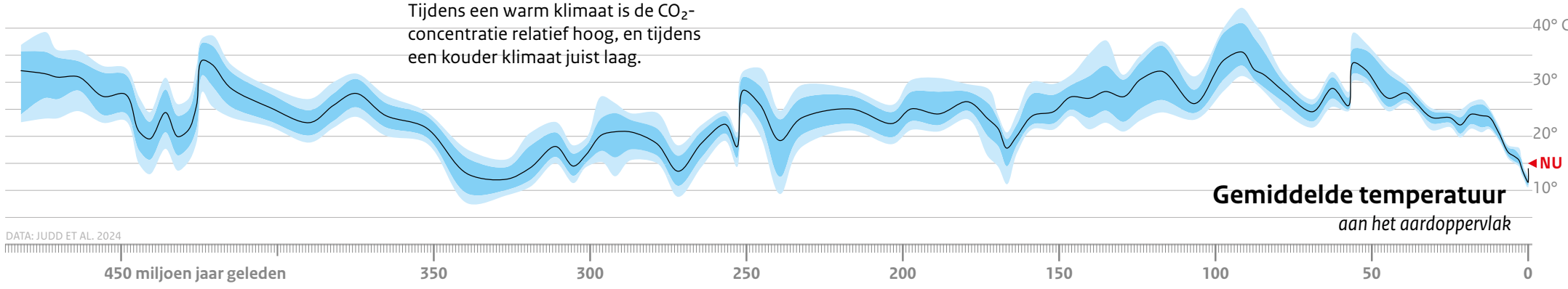
Dat speelt bijvoorbeeld een rol in de KNMI'23-scenario's met een grote impact en een lage waarschijnlijkheid. De mate waarin dat proces het smelten van de ijskap kan versnellen is nog steeds onderwerp van wetenschappelijke discussie (Morlighem et al., 2024).

REFERENTIES

- Morlighem, M. et al., The West Antarctic Ice Sheet may not be vulnerable to Marine Ice Cliff Instability during the 21st Century, *Science Advances*, 2024
- Seroussi, H. et al., Evolution of the Antarctic Ice Sheet over the next three centuries from an ISMIP6 model ensemble, *Earth's Future*, 2024



Tijdens een warm klimaat is de CO₂-concentratie relatief hoog, en tijdens een kouder klimaat juist laag.



DATA: JUDD ET AL. 2024

Klimaatverandering over de afgelopen 485 miljoen jaar

De gemiddelde temperatuur van de aarde heeft in het verre verleden sterk gevarieerd. De reconstructie van het prehistorische klimaat is belangrijk om de huidige snelle opwarming in context te plaatsen. Daarnaast draagt het bij aan een beter begrip van het klimaatsysteem.

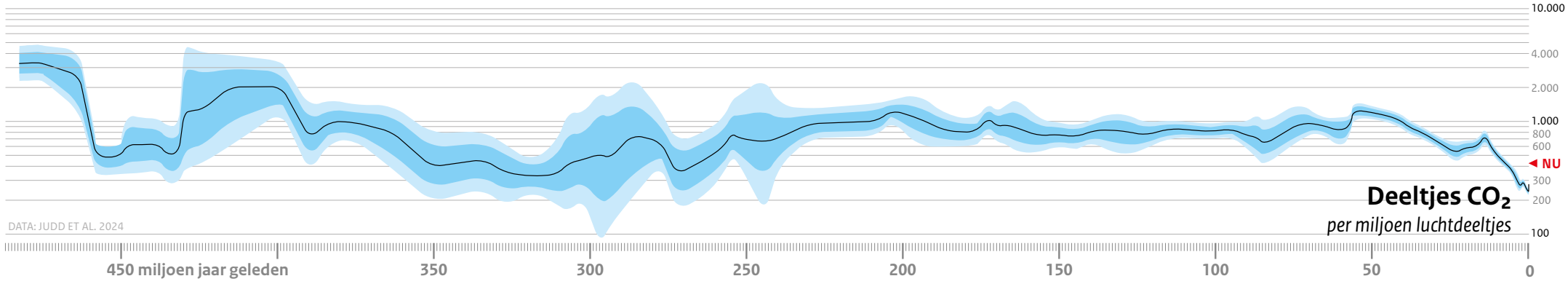
Sleutelrol voor CO₂
Ook in het verre verleden blijkt de temperatuur

sterk samen te hangen met de hoeveelheid CO₂ in de atmosfeer. Om die reden noemde de bekende geoloog Richard Alley CO₂ al eens de “regelknop van het aardse klimaat”. Volgens een nieuwe reconstructie van het aardse verleden is de wereldgemiddelde temperatuur op lange tijdschalen zo'n 7,7 graden warmer bij elke verdubbeling van de CO₂-concentratie (Judd et al, 2024). In het onderzoek is gebruik

gemaakt van vele indirecte gegevens over de temperatuur (zogenaamde proxies) en van een aardsysteemmodel, waarbij rekening is gehouden met bijvoorbeeld de ligging van de continenten en de gestaag toenemende zonkracht over die tijdsperiode.

REFERENTIES

- Judd, E.J. et al., A 485-million-year history of Earth's surface temperature, Science 2024



DATA: JUDD ET AL. 2024



AMOC-kantelpunt is dichterbij dan we dachten

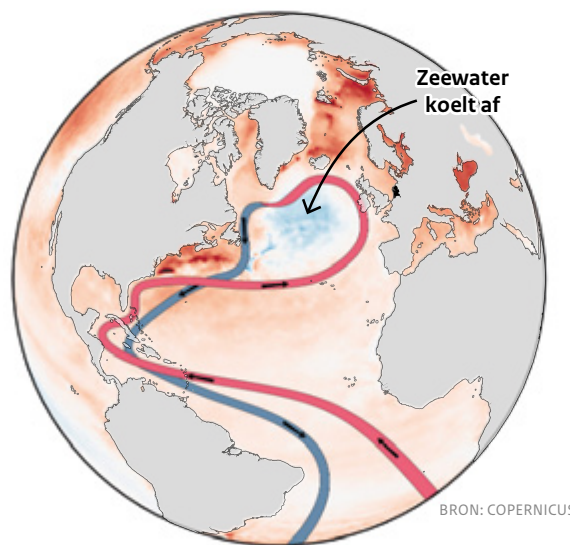
Een kantelpunt dat in 2024 veelvuldig in het nieuws was, is de mogelijke ineenstorting van de AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation), waar de Golfstroom onderdeel van is. De kans daarop is volgens recent onderzoek een stuk groter dan tot voor kort werd gedacht. De gevolgen voor met name Noordwest-Europa zouden enorm zijn.

Transportband van water en energie

Warm water wordt vanuit de Golf van Mexico onze kant op gedreven en koelt langzaam af. Door verdamping wordt het steeds zouter. Die combinatie (koud en zout) maakt het water zwaar, waardoor het afzinkt. Daarmee wordt als het ware een 'transportband' van oceaanwater aangedreven.

Opwarming zorgt voor zand in de motor

Maar die transportband hapert. Door klimaatverandering valt er meer neerslag boven de Noord-Atlantische Oceaan. Daarnaast zorgt ook het smelten van de Groenlandse ijskap ervoor dat het water minder zout -en dus minder zwaar- wordt. Daardoor zinkt het water minder makkelijk naar beneden. Het kouder worden van het oppervlaktewater in die regio lijkt er op te duiden dat er inderdaad minder water afzinkt naar de diepte.



Trend in de zeevatertemperatuur

van 1993 tot 2021



Het noordwaarts stromende oppervlakte water zinkt ten zuidoosten van Groenland, waarna het diepe water terug naar het zuiden stroomt (blauwe lijn).

Kantelpunt

Het zoutgehalte van het noordwaarts stromende water blijkt een signaal te zijn van hoe stabiel de AMOC is (van Westen et al., 2024). Waarnemingen van het zouttransport in het zuiden van de Atlantische Oceaan wijzen er volgens hen op dat de AMOC het kantelpunt nadert, al geven ze geen schatting van wanneer dat het geval zal zijn.

Effecten

Als de AMOC abrupt tot stilstand komt, zou Noordwest-Europa in enkele decennia meerdere graden afkoelen. De mate van afkoeling hangt af van de begintoestand: beginnend vanuit een pre-industrieel klimaat zou Nederland zo'n 7 graden afkoelen (meer in de winter, minder in de zomer). Dat komt omdat de hoeveelheid zee-ijs zich dan flink kan uitbreiden, en door de extra reflectie van zonlicht versterkt dat de afkoeling. In een warmer klimaat zoals nu zou de hoeveelheid zee-ijs niet in dezelfde mate toenemen als de AMOC stilvalt, en de verwachte afkoeling zou dan ook minder sterk zijn (ongeveer half zoveel). Door de afkoeling en verdroging zullen landbouwopbrengsten fors dalen. De effecten blijven niet beperkt tot Europa. Tropische regenzones verschuiven, waardoor bijvoorbeeld het Amazoneregenwoud in zijn voortbestaan bedreigd wordt.

REFERENTIES

- Rahmstorf, S. Is the Atlantic Overturning Circulation approaching a tipping point? *Oceanography*, 2024
- van Westen, R.M. et al., Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course, *Science Advances*, 2024





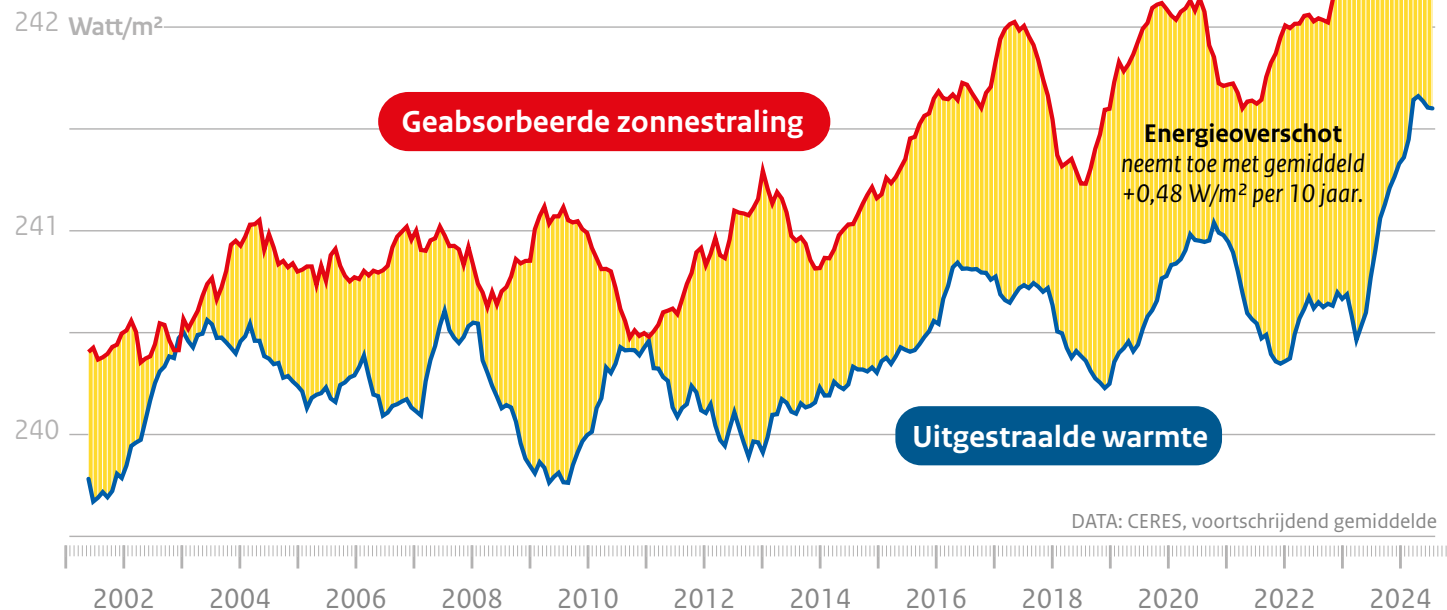
Energiehuishouding aarde verder uit balans

Door de toenemende hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer houdt de aarde meer warmte vast. Dit veroorzaakt een onbalans: de aarde straalt minder energie uit dan ze opneemt van de zon. Dit energieoverschot leidt tot opwarming, wat de warmtestraling weer verhoogt. Tegelijkertijd neemt de hoeveelheid ijs en lage bewolking af, waardoor de aarde minder zonnestraling reflecteert en verder opwarmt.

De energiebalans en klimaatverandering

Satellieten meten continu de balans tussen inkomende en uitgaande straling. Daaruit blijkt dat de netto energietoevoer naar het klimaatsysteem blijft toenemen. In de afgelopen 20 jaar is dit energieoverschot verdubbeld van $+0,5 \text{ W/m}^2$ naar $+1,0 \text{ W/m}^2$ (Loeb et al., 2024). Dit wijst op een versnellende opwarming van de aarde.

Een belangrijke oorzaak is dat de aarde meer zonnestraling absorbeert. Dit komt deels door een afname van reflecterende bewolking (Goessling et al., 2024), waarvan de oorzaak nog onduidelijk is. Mogelijk versterkt de opwarming dit proces, wat de opwarming verder versnelt. Ook de afname van sneeuw en ijs en het terugdringen van luchtvervuiling vergroot de absorptie van zonnestraling.



De **warmtestraling** van de aarde neemt toe door de opwarming. De **geabsorbeerde zonnestraling** neemt zelfs nog sterker toe, onder andere door afnemende bewolking. Het groeiende verschil versnelt klimaatverandering.

Oceaan neemt meeste warmte op

Ongeveer 90 procent van de extra energie die in het klimaatsysteem ophoopt, wordt opgenomen door de oceanen. De warmte-inhoud van de oceanen is in de afgelopen 60 jaar steeds sneller toegenomen (Cheng et al., 2024), 'wat overeenkomt met de satellietmetingen en een huidige energieoverschot van $+1,1 \text{ W/m}^2$.

REFERENTIES

- Cheng, L. et al., Ocean heat content in 2023, Nature Reviews, 2024
- Goessling, H.F. et al., Recent global temperature surge intensified by record-low planetary albedo, Science, 2024
- Loeb, N.G. et al., Observational Assessment of Changes in Earth's Energy Imbalance Since 2000, Surveys in Geophysics, 2024

Colofon

Publicatiedatum

30 januari 2025

Productie

Nadia Bloemendaal, Eelco Doornbos, Rob van Dorland, Rianne Giessen, Carine Homan, Emma Koole, Jan Fokke Meirink, Lone Mokkenstorm, Frédéric Ruijs, Frank Selten, Peter Siegmund, Bart Verheggen

Aan dit rapport kan als volgt worden gerefereerd

KNMI 2025: De staat van ons klimaat 2024; Nederlands weer in tijden van klimaatverandering, KNMI, De Bilt, KNMI-Publicatie 25-01

Postadres

Postbus 201
3730 AE De Bilt



Website

<https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/de-staat-van-ons-klimaat-2024>