



# Klimaatverandering in stormen, extreme neerslag en hagel

**Stormen, extreme neerslag en hagel veroorzaken veel schade. De afgelopen decennia is in onze streken de stormactiviteit afgenomen, terwijl extreme neerslag is toegenomen. Voor de komende decennia is onzeker hoe de stormactiviteit zal veranderen, terwijl de frequentie en intensiteit van extreme neerslag en hagel waarschijnlijk zullen toenemen. De verwachte veranderingen in stormen, extreme neerslag en hagel, en hun onzekerheid, zijn te begrijpen op basis van eenvoudige natuurkunde.**

Dr. ir. P.C. Siegmund is klimaatonderzoeker bij het KNMI.



## WARME LUCHT BEVAT MEER WATERDAMP

De natuurkunde op basis waarvan je trends in stormen, neerslag en hagel kunt begrijpen is vrij eenvoudig. Misschien wel het belangrijkste is dat warmere lucht meer waterdamp kan bevatten. Dit komt doordat naarmate het warmer is meer watermoleculen voldoende snel bewegen om te ontsnappen uit de vloeibare fase naar de dampfase. De toename in waterdamp is 7% per graad Celsius. Als in stijgende, en daarbij afkoelende lucht de waterdamp condenseert, zal ook de hoeveelheid neerslag toenemen met 7% per graad. De neerslagintensiteit (de hoeveelheid per uur) kan zelfs nog meer toenemen, doordat meer condensatiewarmte vrijkomt. De stijgende lucht wordt daardoor warmer, het verschil in temperatuur en dichtheid met die van de omgeving wordt groter, de opwaartse kracht op de warmere, lichtere lucht neemt toe, de lucht stijgt sneller, en regent sneller uit. De neerslagintensiteit neemt voor de meest extreme buien toe met ongeveer 12% per graad, waarvan 7% door meer waterdamp en 5% door grotere stijgsnelheid.

## STORMEN ONTSTAAN DOOR TEMPERATUURVERSCHILLEN

Een tweede belangrijk natuurkundig gegeven is dat stormen ontstaan door temperatuurverschillen. Bij lage temperatuur neemt de luchtdruk sterker af met de hoogte dan bij hoge temperatuur. Tussen gebieden van lage en hoge temperatuur ontstaat zo een drukverschil dat toeneemt met de hoogte. Hoe groter het drukverschil, hoe sterker de wind, zodat ook de windsnelheid toeneemt met de hoogte. Bij een te sterke toename wordt de atmosfeer echter instabiel, en ontstaat er een storm. Deze mengt de koude met de warme lucht, waardoor de oorzaak van de storm, en daarmee ook de storm zelf, weer verdwijnt. Stormen in het winterseizoen in Europa ontstaan doorgaans nabij Newfoundland, waar een groot temperatuurverschil bestaat tussen het koude land en de relatief warme zee.

De vraag naar hoe stormen in de toekomst veranderen is vooral de vraag hoe temperatuurverschillen veranderen. Het antwoord is dat temperatuurverschillen onder in de atmosfeer afnemen, terwijl de verschillen hoger in de atmosfeer, boven de 10 kilometer toenemen. Onderin nemen temperatuurverschillen af omdat het poolgebied meer opwarmt dan de tropen. Het poolgebied warmt sterk op omdat de witte sneeuw en ijs smelten en zo plaats maken voor donkerdere ondergrond en zeewater, die meer zonlicht absorberen en zo de opwarming versterken. Op grote hoogte neemt de temperatuur juist het meest toe in de tropen. Dit komt doordat warmere lucht zoals gezegd meer vocht bevat, wat vooral in de tropen in de hoge atmosfeer leidt tot meer condensatiewarmte en hogere temperaturen. Door de tegengestelde veranderingen in temperatuurverschillen in de lagere en hogere atmosfeer, is klimaatverandering in stormen lastig te voorzien.

## STORMEN: WAARGENOMEN EN TOEKOMSTIGE VERANDERINGEN

In de afgelopen 60 jaar zijn de banen van stormen boven de Atlantische Oceaan ongeveer 200 km naar het noorden verschoven. Hierdoor zijn de sterkte en de frequentie van stormen op gematigde breedten afgenomen en op hogere breedten toegenomen. Mogelijk is dit een gevolg van veranderingen in het driedimensionale temperatuurpatroon als gevolg van door de mens veroorzaakte klimaatverandering.

Voor de komende decennia voorzien klimaatmodellen een verdere verschuiving van stormen naar het noorden, maar sommige modellen geven desondanks meer en sterkere stormen in West-Europa. Dit komt doordat de golfstroom verzwakt, waardoor het noordelijke deel van de Atlantische Oceaan relatief weinig opwarmt en het temperatuurverschil met lagere breedtes hier toeneemt. De golfstroom ontstaat doordat op hoge breedtes koud en zout, en daardoor zwaar water omlaag beweegt. Omdat dit water door klimaatverandering opwarmt en bovendien minder zout wordt door het smelten van land- en zee-ijs en door meer neerslag, wordt het minder zwaar, beweegt minder sterk omlaag, en verzwakt zo de golfstroom. Het vertrouwen in de stormverwachtingen is betrekkelijk klein, omdat verwachtingen van verschillende modellen nogal uiteen lopen. Dit hangt weer samen met de genoemde tegengestelde veranderingen in temperatuurverschillen in de lagere en hogere atmosfeer.

## EXTREME NEERSLAG: WAARGENOMEN EN TOEKOMSTIGE VERANDERINGEN

Extreme neerslag is wereldwijd toegenomen. Dit uit zich bijvoorbeeld in een toename van het wereldgemiddelde van de jaarlijkse maximum hoeveelheid neerslag per dag. Ook is er een toename van de bijdrage van zeer natte dagen (natste 5%) aan de totale hoeveelheid neerslag.

De toename in extreme neerslag komt kwantitatief overeen met de genoemde toename in waterdamp van 7% per graad opwarming. De toename in extreme neerslag in langere periodes, van vijf dagen, is vergelijkbaar met de toename in extreme neerslag per dag. De toename in extreme neerslag wordt waargenomen in de zomer en in de winter, maar niet in de lente en de herfst. In Europa is er een bijna verdubbeling van de hoeveelheid extreme neerslag per graad opwarming, vooral omdat extreme neerslag vaker voorkomt, en ook omdat de intensiteit ervan toeneemt. De procentuele toename in de frequentie van extremen is groter naarmate de extremen zeldzamer zijn. Tussen 1961-1990 en 1991-2020 nam in Nederland de jaarlijkse maximum hoeveelheid neerslag per dag toe van gemiddeld 33 naar 37 mm, en in De Bilt nam de jaarlijkse maximum hoeveelheid neerslag per uur toe van 15 naar 19 mm.

De verwachte veranderingen in extreme neerslag in de komende decennia lijken op de veranderingen zoals waargenomen in de afgelopen periode. De extreme neerslag neemt waarschijnlijk sterker toe dan de gemiddelde neerslag. Klimaatmodellen voorzien voor West-Europa in de periode 2016-2035 een toename van de hoeveelheid neerslag op zeer natte dagen van ongeveer 5% ten opzichte van 1986-2005. De toename in extreme neerslag volgt de toename van waterdamp van 7% per graad opwarming. Dit geldt ook voor de toename van zeldzaam extreme dagelijkse neerslag met een herhalingsperiode van 50 jaar. Doordat buien sneller uitregenen loopt de intensiteit van de neerslag mogelijk verder op tot ruim 10% per graad opwarming. De toename in de hoeveelheid extreme neerslag is evenredig met de opwarming, maar de frequentie van extreme neerslag bij gegeven hoeveelheid neemt sterker dan evenredig toe, en bovendien sterker naarmate de extremen zeldzamer zijn.

## HAGEL

Door gebrek aan lange meetreeksen van goede kwaliteit is er weinig bekend over mogelijke trends in de frequentie en intensiteit van hagel. Door klimaatverandering worden hagelstenen gemiddeld waarschijnlijk groter. Omdat bij toenemende temperatuur de stijgsnelheid van de lucht in buien toeneemt, blijft de neerslag langer in de lucht voordat deze op aarde valt, wat bij hagel tot grotere korrels kan leiden. Daarnaast stijgt door de opwarming de hoogte van het vriesniveau, waardoor kleinere hagelkorrels vaker smelten. Met regionale klimaatmodellen is voor Europa de frequentie bepaald van hagel met doorsnede van 50 mm of meer. In Nederland is de frequentie het hoogst in het zuidoosten, ongeveer eens per 15 jaar. Eind deze eeuw stijgt deze frequentie, bij een wereldgemiddelde opwarming van 2 graden, naar ongeveer eens per 10 tot 12 jaar. Daarnaast neemt, net als bij extreme neerslag, waarschijnlijk ook de intensiteit van de hagel toe. ■

