

SAMENVATTING

Terwijl ik dit schrijf, worden delen van Centraal-Europa geteisterd door een reeks hevige regenbuien die in minder dan twee dagen rivieren in krachtige stromen hebben veranderd, overstromingen veroorzaakt, vele dodelijke slachtoffers geëist en infrastructuur en eigendommen beschadigd. De frequentie van extreme buien, die gepaard gaan met veel economische schade en slachtoffers, is de afgelopen decennia sterk toegenomen. Hoe kan dit en wat is de mogelijke relatie tussen de toename van deze extreme convectieve buien en opwarming ten gevolge van klimaatverandering?

Om deze vragen te beantwoorden, beschouw de volgende vereenvoudigde versie van een convectieve bui. Stel je een verticale luchtkolom voor met een deel van de atmosfeer en een wolk erin. Dicht bij het landoppervlak stroomt lucht in de kolom waarna het verticaal begint te stijgen. Tijdens het stijgen koelt de lucht af, en raakt de waterdamp uiteindelijk oververzadigd zodat er kleine wolkruppeltjes worden gevormd door condensatie. Vanaf deze hoogte, de wolkenbasis, blijft de luchtmassa stijgen terwijl de hoeveelheid gecondenseerd water blijft toenemen, zodat de wolkruppels groter worden. Ten slotte, wanneer ze groot genoeg zijn, zal er neerslag vallen, maar slechts in het meest extreme geval zal al het wolkenwater de grond bereiken als regen. Volgens dit conceptuele model is het verhogen van het vochtgehalte van de lucht die de wolk binnenkomt een manier om de hoeveelheid neerslag te vergroten.

Hierbij speelt de Clausius-Clapeyron (CC) vergelijking een belangrijke rol. Deze laat zien dat het waterdamp houdend vermogen van lucht exponentieel toeneemt met de temperatuur. Dit heeft als gevolg dat voor een gelijkblijvende relatieve vochtigheid, de hoeveelheid vocht in de vorm van waterdamp in de atmosfeer toeneemt met ongeveer 7% per graad opwarming. Op globale schaal is inderdaad aangetoond dat extremen in dagelijkse neerslaghoeveelheden gebonden zijn aan deze veranderingssnelheid. Lokale uurlijkse en 10 minuten neerslagextremen bleken echter grotere toenames te vertonen dan de verwachte 7% per graad opwarming volgens de CC vergelijking. Dit fenomeen wordt ook wel “super CC-gedrag” genoemd. De gangbare theoretische verklaring hiervoor is dat er niet alleen 7% meer water condenseert maar dat er hierdoor ook meer energie vrijkomt door condensatie waardoor de convectieve opwaartse luchtstroom in wolken ook toeneemt. Dit zal tot sterkere opwaartse stromingen en uiteindelijk tot een sterkere vochtconvergentie in de wolkenkolom leiden.

Ondanks dat stationswaarnemingen inderdaad het super CC-gedrag bevestigen, blijft de precieze reden voor dit gedrag nog steeds onbekend. Daarnaast is het onbekend hoe individuele convectieve buien in grootte en neerslagintensiteit zullen reageren op een warmere en vochtigere atmosfeer. In dit proefschrift gebruiken we regenradargegevens voor heel Nederland en analyseren we individuele buien met een volgalgoritme. Vervolgens onderzoeken we de statistieken van de grootte en intensiteit van buien op het moment van hun piekintensiteit. De resultaten hiervan laten zien dat de ruimtelijke omvang en de intensiteit van extreme convectieve buien nauw met elkaar verbonden

zijn. Beide kenmerken nemen gezamenlijk toe, waardoor intensievere regenbuien over het algemeen ook groter zijn. Onder warmere en vochtigere omstandigheden neemt de omvang van de regenbuien snel toe bij dauwpunttemperaturen boven ongeveer 15 °C. Super CC-gedrag wordt gevonden voor alle buien in de analyse. De grootste buien zijn echter cruciaal om super CC-gedrag bij hogere temperaturen in stand te houden. Toenames van de neerslag intensiteit bij opwarming vinden plaats over het hele neerslaggebied.

Om de dynamiek van convectieve neerslagextremen in een gecontroleerde omgeving verder te bestuderen, maken we gebruik van een large eddy simulatie (LES) model. Een LES model wordt gebruikt met een ruimtelijke resolutie die fijn genoeg is om processen numeriek op te lossen die nodig zijn voor de vorming van kleinschalige onweersbuien. Verder is het mogelijk om rekening te houden met tijdsafhankelijke invloeden op het simulatiedomein, zoals een grootschalig windprofiel en grootschalige convergentie van luchtmassa's. Hiertoe gebruiken we geïdealiseerde simulaties die representatief zijn voor de geobserveerde hevige zomerse neerslag in Nederland. We simuleren een basisscenario, evenals een aantal experimenten met veranderde temperatuur en vochtigheid maar houden daarbij de relatieve vochtigheid constant. Om de kenmerken van regenbuien te bestuderen, markeren we aaneengesloten gebieden met neerslag als individuele regencellen. Op basis daarvan kunnen we de relatie tussen grootte en intensiteit van regencellen bepalen. Uit de analyses blijkt duidelijk dat in de warmere en vochtigere simulaties de regencellen groter en intenser worden terwijl het aantal kleinere regencellen juist afneemt. Deze resultaten geven een consistent beeld samen met het eerdergenoemde empirische onderzoek op basis van de neerslagradar.

Tot nu toe hebben we buien beschouwd als geïsoleerde entiteiten. Een andere factor die de omvang van regenbuien kan beïnvloeden, is het proces van convectieve organisatie. Vergelijk bijvoorbeeld een geïsoleerde convectieve regencel met een convectief systeem op de mesoschaal dat kan worden gezien als een cluster van meerdere regencellen. Deze laatste is een meer georganiseerde vorm van een convectieve regenbui. In dit geval verschilt de horizontale omvang van beide typen met ongeveer een factor tien. Lokale dynamische processen veroorzaakt door zogenaamde koude poelen ("cold pools") spelen een belangrijke rol bij de vorming van meer georganiseerde convectieve systemen. Koude poelen ontstaan door verdamping van regendruppels in de atmosfeer. Dit leidt tot een afkoeling van luchtmassa's, die sterke neerwaartse luchtstromingen veroorzaken vanwege de hogere dichtheid van koude lucht. Aan de oppervlakte spreidt de neerwaartse stroming zich horizontaal uit over een afstand van tientallen kilometers. Dit effect is voelbaar, bijvoorbeeld bij het observeren van een nabijgelegen onweersbui. De relatief dichte, bewegende luchtmassa verplaatst de omringende lucht verticaal en kan aan de rand van een dergelijke koude poel de vorming van nieuwe convectieve wolken veroorzaken. Het effect is nog sterker wanneer twee of meer koude poelen op elkaar botsen. Bovendien transporteren en brengen koude poelen vocht bijeen in geconcentreerde gebieden die geschikte locaties zijn voor nieuwe convectieve buien.

Naast het duidelijke effect van koude poelen op de vorming en organisatie van convectieve regenval is er weinig bekend over hoe deze processen veranderen in een warmer klimaat. Ook is het nog niet duidelijk hoe de dynamiek van koude poelen onder deze omstandigheden reageert en hoe dit zich verhoudt tot neerslagkenmerken. Om

dit te bestuderen gebruiken we vergelijkbare large eddy simulaties als in de voorgaande studies. We herhalen de experimenten ook onder warmere en vochtiger condities. Vergelijkbaar met de eerdergenoemde methode van clustering van regencellen, passen we dezelfde techniek toe op lage temperatuur- en vochtvelden om koude poelen en relatief vochtige gebieden, zogenaamde vochtige plekken (“moist patches”), vast te stellen.

We zien dat de grotere omvang en intensiteit van regencellen onder warmere en vochtigere omstandigheden een sterke correlatie hebben met de grootte en verspreidingsnelheid van koude poelen. Dit houdt op hun beurt goed verband met de grootte en hoeveelheid vocht in vochtige plekken. Deze correlaties suggereren een positieve terugkoppeling, waarin koude poelen, die afkomstig zijn van aanvankelijk nogal willekeurig verdeelde en zwakke buien, een hogere variabiliteit in het lage vochtveld veroorzaken en buien veroorzaken die meer georganiseerd zijn en een hogere intensiteit hebben. De dynamiek van koude poelen kan dus de lokale vochtbeschikbaarheid en -toevoer naar nieuw vormende buien vergroten bij gelijkblijvende grootschalige convergentie van vocht. Uit een aparte groep experimenten leiden we af dat deze laatste grootschalige convergentie het regenceloppervlak beïnvloedt, maar niet de intensiteit.

Maar passen deze bevindingen in een realistisch scenario van klimaatopwarming? Het is bijvoorbeeld bekend dat de relatieve vochtigheid in veel regio's boven het land zal afnemen bij opwarming. Verder wordt verwacht dat de atmosfeer niet gelijkmatig met de hoogte warmer zal worden. Als gevolg van convectie zal de atmosfeer op hoogte sterker opwarmen waardoor de atmosfeer stabielere wordt ten opzichte van een gelijkmatige opwarming met de hoogte.

Ons experimentontwerp past deze principes toe en voor beide situaties worden simulatiegroepen gemaakt. We vinden dat een verminderde relatieve vochtigheid bij opwarming over het algemeen de regenbuien, de dynamiek van koude poelen en vochtige plekken verder versterkt. Dit benadrukt dat de relatieve vochtigheid, naast de neerslagintensiteit, een andere factor is die de verdampingssnelheid van regendruppels regelt en uiteindelijk de sterkte van koude poelen. Ondanks een dempend effect leiden stabielere omstandigheden met opwarming nog steeds tot intensere en grotere regenval die gepaard gaat met een sterkere koude poedynamiek en vochtige plekken.

Ten slotte laten de resultaten gepresenteerd in dit proefschrift zien dat extreme convectieve buien een sterke reactie vertonen op klimaatopwarming en benadrukken ze het belang van kleinschalige dynamiek in deze context. Hier moet rekening mee worden gehouden voor accuratere voorspellingen van toekomstige neerslagextremen.