

Regent het meer in de Randstad?

EMMA DANIELS¹ EN AART OVEREEM^{1,2} (WAGENINGEN UNIVERSITEIT¹, KNMI²)

Voor Amerikaanse steden is meermalen aangetoond dat er meer of intensievere neerslag “benedenwinds” (dus bij westenwind, ten oosten) van en in de stad valt. Ook voor Nederland wordt wel eens gespeculeerd dat dit “stadseffect” bij zou dragen aan het maximum dat op de klimatologisch gemiddelde neerslagkaarten te zien is nabij Rotterdam (www.klimaatatlas.nl). Op basis van dagelijkse stationsdata in de Randstad tonen wij aan dat dit inderdaad het geval is. Daarnaast blijkt uit uurlijkse radardata dat dit effect in zekere mate ook in steden optreedt.

Het woord stadseffect wordt zowel gebruikt voor de invloed die stedelijke bebouwing heeft op het weer en klimaat in steden, als voor de ongewenste beïnvloeding van metingen buiten de stad. Het meest bekend is de invloed op de temperatuur, het zogenaamde “stedelijk warmte-eiland”, waarvan bekend is dat het ook in Nederland optreedt. De effecten van steden op neerslag zijn echter moeilijker te kwantificeren. Wellicht heeft onderzoek hiernaar in Nederland zich daarom beperkt tot enkele pogingen ruim 30 jaar geleden (o.a. Buishand, 1979; Kraijenhoff van de Leur and Prak, 1979). Meestal gaat men ervan uit dat het stedelijk warmte-eiland effect voor extra stijgende lucht en convectie boven de stad zorgt, waardoor het in en met name benedenwinds van de stad meer zal regenen. Nu is het zo dat de typerende methodes die voor Amerikaanse steden gebruikt worden om het effect van bebouwing op neerslag te meten niet van toepassing zijn op de Nederlandse situatie. Deze methodes gaan vaak uit van een grote stad met daaromheen uitgestrekte landelijke gebieden. Nederlandse steden zijn veel kleiner en liggen bovendien veel dichters bij elkaar. Daarnaast ligt het bovenwindse gebied van de grote steden in de Randstad vaak boven de Noordzee, waar weinig metingen zijn om de bovenwindse (onverstoorde) neerslaghoeveelheid te bepalen. Daarom gebruiken wij hier een aangepaste methode. In dit artikel bespreken we eerst de methode, gelijk aan Daniels et al. (2015) en de bevindingen voor stationsdata, en daarna voor radardata.

Stationsdata

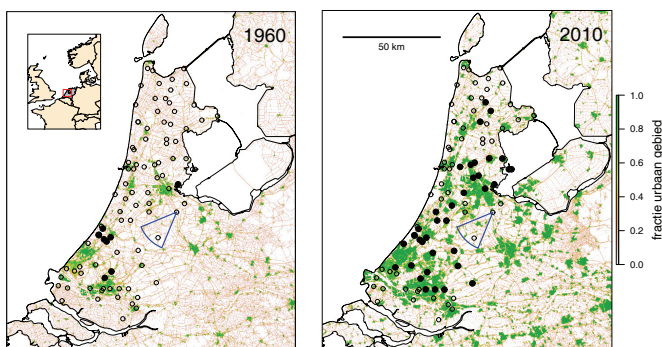
Sinds de jaren ‘50 van de vorige eeuw zijn er nauwkeurige metingen van dagelijkse neerslag beschikbaar op circa 320 KNMI-stations in Nederland (de handregenmeters). Tegelijkertijd is de hoeveelheid stedelijk gebied in de afgelopen eeuw

sterk toegenomen. Gelukkig zijn gedetailleerde landgebruikskaarten beschikbaar voor de jaren 1960, 1970, 1980, 1990, 2000 en 2010 (zie www.lgn.nl). Daarom delen wij de periode 1951-2010 op in zes periodes van 10 jaar. Aan het einde van elke periode wordt de fractie stedelijk gebied met behulp van deze landgebruikskaarten bepaald.

Elke dag in de periode 1951-2010 wordt gegroepeerd op basis van het concept luchtdruk op zeeniveau (MSLP) patroon met behulp van een synoptische classificatie; een objectieve versie van de Lamb weather types (Jenkinson and Collison, 1977). De 9 hieruit volgende weertypes representeren de synoptische windrichting (W, NW, ..., Z, ZW, waarbij W = 1 etc.) en er rest dan een groep met zwakke, niet te classificeren, winden. Voor al deze groepen worden de stations voor elk van de 10-jaar periodes gesplitst in stedelijk of landelijk. Dit is gedaan op basis van de fractie stedelijk gebied in het bovenwindse gebied van elk station (Figuur 1). Een station wordt stedelijk genoemd als deze fractie 0.25 of hoger is. Deze keuze voor een vaste fractie zorgt ervoor dat er door de tijd heen steeds meer stations als stedelijk worden geclassificeerd (Tabel 1). Voor weertype 9 wordt de fractie stedelijk gebied in de hele cirkel rondom het station opgeteld.

| Jaar | Aantal stations | W | NW | N | NE | E | SE | S | SW | UNDEF |
|------|-----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|
| 1960 | 57 | 5 | 7 | 2 | 5 | 2 | 2 | 4 | 4 | 0 |
| 1970 | 57 | 10 | 10 | 6 | 9 | 7 | 5 | 10 | 9 | 2 |
| 1980 | 60 | 11 | 16 | 11 | 13 | 8 | 10 | 12 | 14 | 5 |
| 1990 | 62 | 13 | 15 | 12 | 13 | 10 | 12 | 14 | 15 | 5 |
| 2000 | 57 | 13 | 17 | 17 | 18 | 21 | 17 | 19 | 20 | 13 |
| 2010 | 59 | 20 | 17 | 21 | 25 | 25 | 22 | 22 | 24 | 24 |

Tabel 1. Totale hoeveelheid stations en aantal stedelijke stations voor elke synoptische windrichting (weertype) in elke 10-jaar periode die eindigt met het aangegeven jaar.

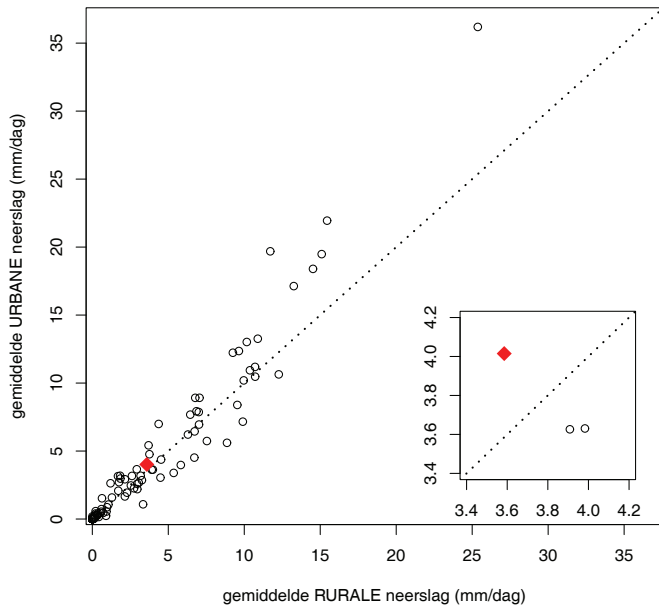


Figuur 1. Stedelijke fractie in het Randstadgebied in 1960 (links) en 2010 (rechts) met de neerslagstations geclassificeerd als stedelijk (dichte cirkels) en landelijk (open cirkels), gebaseerd op de bovenwindse stedelijke fractie in een achtste cirkel met een straal van 20 km in de richting van de dominante synoptische windrichting (hier weertype 8, dus ZW-wind).

Nederland heeft naast verstedelijking ook te maken met hogere zeewatertemperaturen van de Noordzee (Attema and Lenderink, 2014). De invloed van de Noordzee zorgt voor seizoensgebonden neerslagverschillen tussen kust en binnenland (Lenderink et al., 2009). In de Randstad (hier tot 45 km van de kust) zijn de neerslagtrends in jaarsommen, waarschijnlijk veroorzaakt door temperatuurstijgingen, gemiddeld genomen overal ongeveer even groot (Daniels et al., 2013). Op grotere afstand van de kust nemen deze trends gemiddeld af. Vanwege deze verschillen tussen Randstad en binnenland zijn de analyses alleen gedaan voor de Randstad. Bovendien liggen de grootste steden in dit gebied.

Spreiding in gemiddelde dagsommen

Omdat neerslag van nature zeer variabel in tijd en ruimte

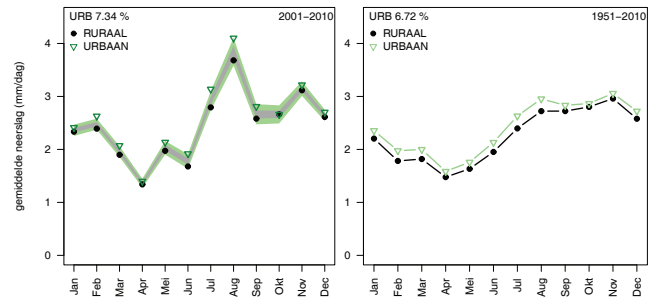


Figuur 2. Dagelijks gemiddelde zomer (JJA) neerslag, uitgezet voor stedelijke en landelijke stations, voor weertype 8 (ZW-wind) in de periode 2001-2010. Het gemiddelde is aangeduid met een rode diamant en nogmaals weergegeven in de inzetfiguur.

is, laten de gemiddelde dagsommen van de regenmeters een grote spreiding zien. Figuur 2 geeft een voorbeeld van deze spreiding: de gemiddelde neerslag van de 24 stedelijke stations is uitgezet tegen die van de 35 landelijke stations voor elke zomerdag (JJA) met zuidwestenwind (weertype 8) in de periode 2001-2010. In dit voorbeeld is stedelijke neerslag (dus neerslag gemeten op stations die als stedelijk geclassificeerd zijn) gemiddeld 11% hoger dan landelijke neerslag (zie rode diamant in inzet Figuur 2). Hoewel de metingen op de meest extreme dagen in dit geval ruim boven de 1:1 lijn liggen, is dit niet altijd het geval.

Gemiddelde jaar- en maandsommen

Gemiddeld over alle weertypes en over de gehele periode 1951-2010 is stedelijke neerslag bijna 7% hoger (Figuur 3, rechts) dan landelijke neerslag. Dit relatieve verschil is berekend door middel van gemiddelde jaarlijkse neerslag op stedelijke en landelijke stations. Over de periode 2001-2010 (Figuur 3, links) is met behulp van een Monte Carlo bootstrapmethode een onzekerheidsmarge berekend. Deze marge is verschillend voor de landelijke en stedelijke stations, omdat deze in aantal verschillen. Wanneer punten buiten deze marge vallen, is er sprake van significantie. Stedelijke neerslag is vrijwel nooit significant hoger, maar ligt wel bijzonder consistent boven de landelijke neerslag, in beide perioden. Het jaargemiddelde verschil tussen stedelijke en landelijke neerslag in de periode 2001-2010 is ruim 7% en het verschil per seizoen is 6, 12, 4 en 8% in respectievelijk lente, zomer, herfst en winter. Dat het verschil in de zomer het grootst is kan wijzen op een stadseffect. In dit seizoen valt namelijk de meeste convectieve neerslag, welke het meest vatbaar is voor interactie met het landoppervlak. Het geringe effect in het najaar zou veroorzaakt kunnen worden door de relatief grote hoeveelheid neerslag langs de kust in deze maanden (het kusteffect), die een mogelijk stadseffect verdoezelt. Bij het vergelijken van de periode 1951-2010 met 2001-2010 valt op dat de maandsom van augustus veel hoger is in de periode 2001-2010. Dit heeft onder andere te maken met de zeer natte augustusmaand van 2006.



Figuur 3. Dagelijkse neerslag gemiddeld over stedelijke en landelijke stations per maand in de periode 2001-2010 (links) en 1951-2010 (rechts). Lichtgroene en donkergrijze banden (links) geven de 90% betrouwbaarheidsintervallen aan, gebaseerd op een bootstrapmethode, voor respectievelijk stedelijke en landelijke neerslag.

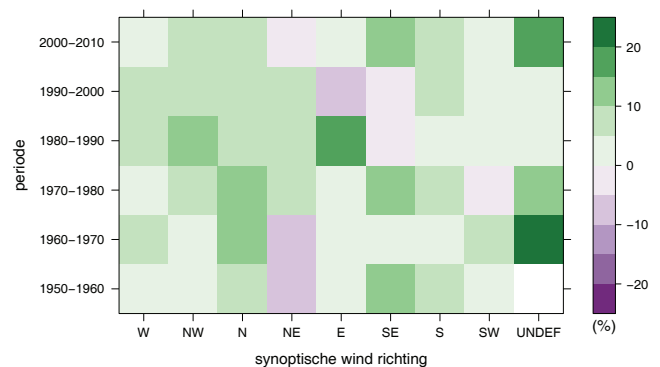
Het gemiddelde verschil tussen stedelijke en landelijke stations is per 10-jaar periode voor elk van de weertypes uitgerekend (Figuur 4). Hieruit blijkt dat het stadseffect overwegend positief is door de tijd heen, dus dat neerslag op stedelijke stations hoger is dan op landelijke. Bij de oostelijke windrichtingen (NO, O, ZO) komt af en toe een negatief effect voor. Doordat deze weertypes relatief weinig voorkomen en er gemiddeld weinig neerslag valt, heeft dit beperkte invloed op het gemiddelde.

Extreme neerslag

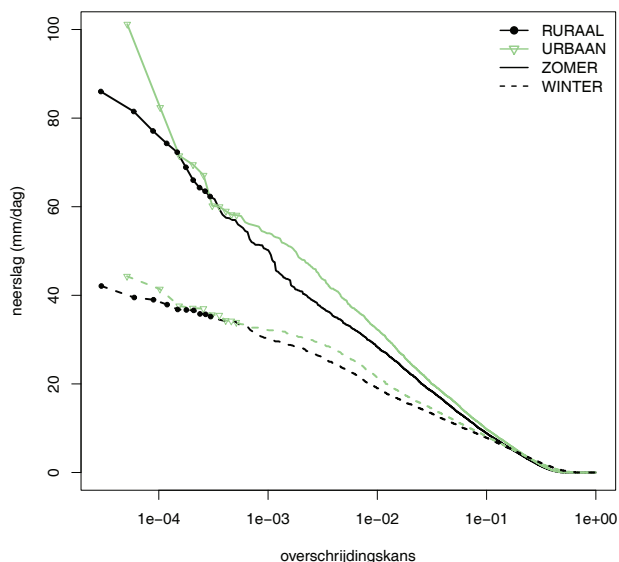
Extreme neerslag (hier het 95^{ste} percentiel) is over de periode 2001-2010 op de stedelijke stations ruim 6% hoger, en bijna 11% over de gehele periode 1951-2010 (Daniels et al., 2015). De hogere hoeveelheden op stedelijke stations blijken over de gehele neerslagverdeling voor te komen (Figuur 5). Het karakter van zomer- en winterneerslag is zeer verschillend: lokaal en convectief in de zomer, versus egaal en frontaal in de winter. Desondanks is het stadseffect in beide seizoenen terug te zien. Wel is het bijvoorbeeld zo dat weertype 9, met zwakke wind, gemiddeld grotere toenames laat zien. Deze ontstaan vrijwel alleen in de zomer, waarschijnlijk vanwege de makkelijk(er) te beïnvloeden convectieve neerslag. De staarten van de verdelingen bevatten weinig gegevens (de tien meest extreme metingen zijn met een stip aangegeven) en zijn daarom erg onzeker.

Tekortkomingen van de methode

Sommige stations worden door de gebruikte methode (bijna) nooit en andere (vrijwel) altijd ingedeeld als stedelijk. De neerslag op deze stations kan gemiddeld hoger of lager zijn dan op de omringende stations vanwege de



Figuur 4. Relatieve verschillen tussen gemiddelde neerslag op stedelijke en landelijke stations voor elk weertype (windrichting) in elke 10-jaar periode. Hierbij staan positieve waarden voor meer stedelijke neerslag.



Figuur 5. Empirische overschrijdingskans van neerslag op stedelijke en landelijke stations in zomer (JJA) en winter (DJF) in de periode 2001-2010.

nabijheid van steden of door externe invloeden. Dit heeft invloed op de sterkte van het gevonden stadseffect. Om te testen hoe groot de invloed van de stationskeuze is, kennen we een willekeurig weertype toe aan elke dag uit de periode 2001-2010 en herhalen de berekeningen 1000 keer. De resulterende verdeling toont aan dat de stationskeuze voor een gemiddeld stadseffect van 4.5% ($\sigma = 0.5\%$) zorgt. Hoewel het stadseffect dus altijd positief is, ligt de werkelijk gevonden waarde van ruim 7% ver buiten de verdeling en heeft de windrichting (dat wil zeggen, de bovenwinds gelegen stad) dus wel degelijk effect.

De grootte van de “taartpunt” waarin het percentage stedelijk gebied bepaald wordt, heeft natuurlijk ook effect op het gevonden resultaat. Bij hoge windsnelheden kunnen de wolken die beïnvloed zijn door de stad makkelijk de 20 km afleggen (de grootte van de taartpunt). De regen valt dan nog verder benedenwinds van de stad waardoor het effect zal worden onderschat. Bij lage windsnelheden blijft de luchtmassa veel langer boven een stad hangen en kan daardoor meer beïnvloed worden door de stad.

Radardata

Regenmeters zijn opzettelijk buiten het stedelijk gebied geplaatst, om zoveel mogelijk volgens WMO-normen te meten (in de stad zijn veel obstakels). Daardoor is doorgaans weinig of geen informatie van stedelijke neerslag beschikbaar. Door middel van regenradardata kunnen we daarentegen wel onderzoeken of er ook verschillen zijn in en buiten de stad. Radardata zijn echter voor een minder lange periode beschikbaar. Daarom herhalen we de analyses voor de laatste periode (2001-2010) met radardata, alleen kijken we nu dus niet naar neerslag benedenwinds van steden, maar in de steden zelf. Hiervoor gebruiken we dezelfde landgebruikskaart en worden steden geïdentificeerd als de fractie stedelijk gebied in een pixel 0.25 of meer is (Figuur 6, links). De regenradardata die we gebruiken zijn (klok)uursommen, gecorrigeerd met data van de beide KNMI-regenmeternetwerken (Overeem et al., 2009). Dit is de klimatologische radardataset van het KNMI¹. De resolutie van de dataset is hier 2.4 km dus een pixel is

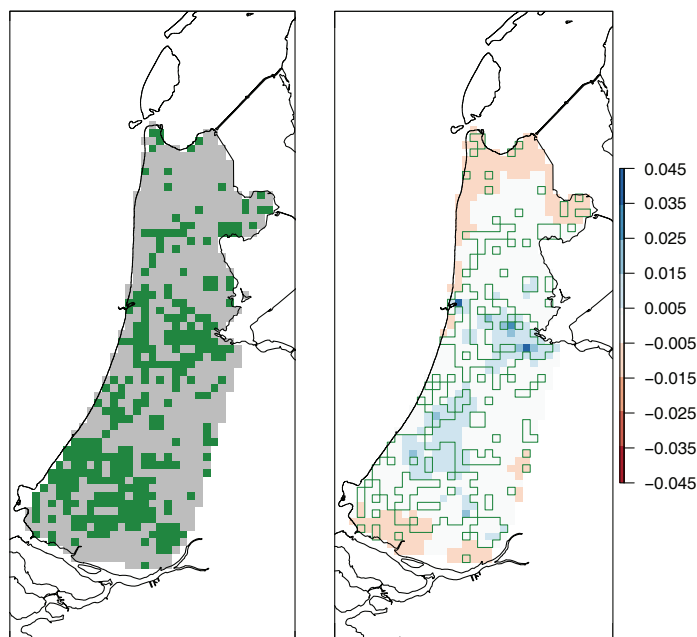
bijna 6 km² groot. Alhoewel de radarneerslagschattingen bruikbaar zijn, kunnen ze bijvoorbeeld te laag uitvallen door demping ten gevolge van extreme regenval in de radarbundel. Daarnaast meet de radar typisch op enkele kilometers hoogte boven het aardoppervlak. De correctie met regenmeterdata kan deze en andere fouten(bronnen) niet volledig verwijderen, zie ook Overeem (2014).

Gemiddelde regensommen in de stad

Het relatieve verschil tussen neerslag in en buiten stedelijke pixels in de Randstad op basis van de klokuursommen bedraagt 3.5% (Figuur 6). Dit verschil kan in principe verklaard worden door het vaker plaatsvinden van neerslag in stedelijke pixels, of door een grotere hoeveelheid neerslag met dezelfde duur. Onze bevindingen suggereren dat er gemiddeld per uur niet meer neerslag valt, maar dat neerslag in de Randstad iets vaker voorkomt. In de figuur is te zien dat de positieve afwijking van neerslag in de Randstad met name optreedt boven Amsterdam en ten noorden van Rotterdam (dus benedenwinds bij zuidenwind). De gemiddelde neerslag in en buiten stedelijk gebied door het jaar heen is weergegeven in Figuur 7. Het verschil tussen neerslag in en buiten steden volgt vrijwel hetzelfde patroon als dat van de stationsdata (Figuur 3, links), maar aan de onzekerheidsmarges is te zien dat wanneer er gebruik wordt gemaakt van radardata er bij lange na geen sprake is van een significant verschil.

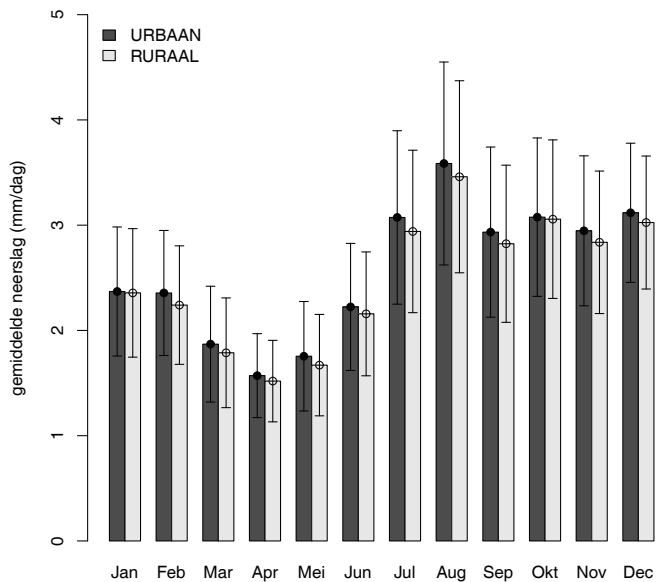
Extreme neerslag in de stad

Overeem (2014) heeft door middel van eerder onderzoek laten zien dat er voor de hier gebruikte radardataset van 2.4 km geen verschillen tussen steden en de rest van het land voorkomen met betrekking tot extreme neerslag. Hierbij is gekeken naar het overschrijden van drempelwaarden voor 15- en 60-minutensommen, afgeleid uit 5-minutendata. Het zijn vooral extremen van deze korte tijdsduren die relevant zijn voor het stedelijk waterbeheer. Dit verschilt dus van de eerdere aanpak waarbij slechts klokuursommen zijn gebruikt. Daarnaast zijn de analyses voor het hele land en niet alleen



Figuur 6. Stedelijk (groen) en landelijk (grijs) gebied in de Randstad (links) en gemiddelde neerslagafwijking (mm/uur) van het gemiddelde over het hele gebied (rechts) op basis van met regenmeterdata gecorrigeerde radardata waarbij de stedelijke gebieden groen omlijnd zijn.

¹ Te verkrijgen via: <http://climate4impact.eu/impactportal/data/catalogbrowser.jsp?catalog=http://opendap.knmi.nl/knmi/thredds/radarprecipclim.xml>



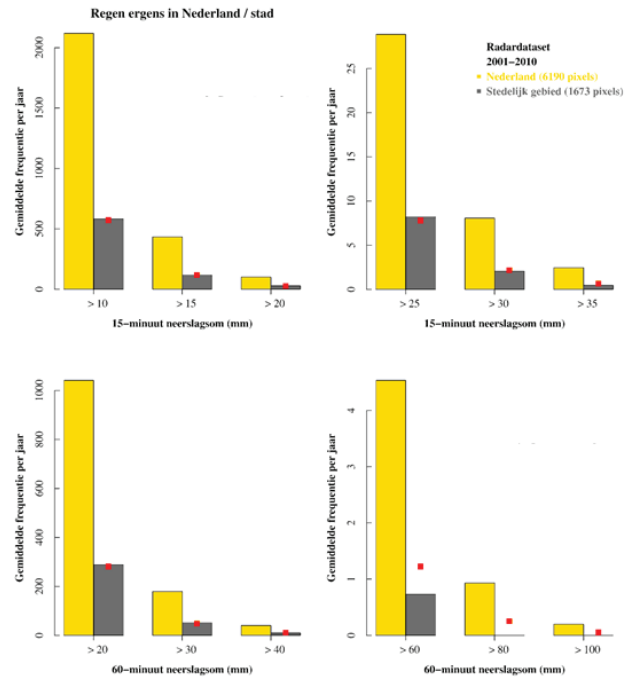
Figuur 7. Staafdiagram met gemiddelde dagelijkse neerslagsom per maand in en buiten stedelijke pixels op basis van met regenmeterdata gecorrigeerde radardata. De weergegeven 90% onzekerheidsmarges zijn bepaald m.b.v. de standaardafwijking.

voor de Randstad gedaan en is gebruik gemaakt van een iets andere landgebruikskaart en definitie voor het stedelijk gebied. Figuur 8 toont deze overschrijdingsfrequentie per jaar over de periode 2001-2010. Hieruit blijkt dat een 15-minutensom van 30 mm of meer gemiddeld acht keer per jaar optreedt op een willekeurige pixel in Nederland, waarvan ongeveer twee keer in stedelijk gebied. Deze twee keer is ook wat verwacht mag worden op basis van de oppervlakte van het stedelijk gebied. Deze verwachte overschrijdingsfrequenties zijn in Figuur 8 weergegeven als rode vierkanten. Dat de grijze staven tot aan of onder de ingetekende rode vierkanten reiken, geeft aan dat er in de stad niet meer extremen optreden dan te verwachten is op basis van het stedelijk gebied. Extreme buien lijken dus even vaak op te treden zowel in als buiten de stad.

Conclusies

Naast het meer bekende warmte-eiland van steden, dat ook in Nederland gemeten is, blijken steden ook een (klein) effect te hebben op de neerslag. In de Randstad valt op jaarbasis in de periode 2001-2010 gemiddeld 3.5% meer neerslag dan buiten steden (op basis van met regenmeterdata gecorrigeerde radardata). Voor stedelijk waterbeheer is het vooral van belang of het in de steden harder regent op korte tijdschalen. Dit artikel bewijst dat echter niet; daarom zou het interessant zijn om dit onderzoek te herhalen met bijvoorbeeld 15-minutensommen van radardata. Daarvoor kan echter geen gebruik worden gemaakt van de weertypes, omdat de daarvoor benodigde gegevens niet op zulke korte tijdschalen beschikbaar zijn, maar zouden windmetingen van de weerstations kunnen worden gebruikt.

Benedenwinds van steden is de neerslag gemiddeld 7% hoger en extreme neerslag gemiddeld 10% hoger gedurende de periode 1951-2010 (op basis van de KNMI handregenmeters). De sterkte van het gevonden stadseffect varieert door het jaar heen, maar is in alle seizoenen positief. Hoewel dit relatieve stadseffect in de loop der jaren nagenoeg gelijk is gebleven, moet het in absolute zin zijn toegenomen. Dit komt omdat zowel het stedelijk gebied flink is uitgebreid, en ook omdat de jaarlijkse hoeveelheid neerslag in het kustgebied met 25% is toegenomen (Buishand et al., 2011). Dezelfde relatieve



Figuur 8. Gemiddelde frequentie per jaar waarmee drempelwaarden worden overschreden voor 15- en 60-minutensommen over de periode 2001-2010, op een willekeurige plek in Nederland (geel) en op een willekeurige plek in stedelijk gebied (grijs). De rode vierkanten geven de gemiddelde frequentie in Nederland maal de fractie stedelijk landoppervlak weer.

toename op een hogere neerslagsom geeft immers grotere absolute hoeveelheden.

Dankwoord

Met dank aan Geert Lenderink, Ronald Hutjes en Bert Holtslag voor hun bijdrage aan het werk dat heeft geleid tot dit artikel.

Literatuur

- Attema, J. J. and G. Lenderink. 2014: The influence of the North Sea on coastal precipitation in the Netherlands in the present-day and future climate. *Climate Dynamics*, 42, 505-519.
- Buishand, T.A. 1979: Urbanization and changes in precipitation, a statistical approach. *Journal of Hydrology*, 40, 365-375.
- Buishand, T.A., T. Brandsma, G. De Martino and J. N. Spreuw. 2011: Ruimtelijke verdeling van neerslag-trends in Nederland in de afgelopen 100 jaar. *H2O*, 24, 31-33.
- Daniels, E. E., G. Lenderink, R. W. A. Hutjes and A. A. M. Holtslag. 2013: De ruimtelijke verdeling van neerslagveranderingen in Nederland tussen 1951 en 2009. *Meteorologica*, 22, 13-15.
- Daniels, E. E., G. Lenderink, R. W. A. Hutjes and A. A. M. Holtslag. 2015: Observed urban effects on precipitation along the Dutch West coast. *International Journal of Climatology*, n/a, 9.
- Jenkinson, A. F. and B. P. Collison. 1977: An Initial Climatology of Gales Over the North Sea. In *Synoptic Climatology Branch*. Meteorological Institution: London, UK; 18.
- Kraijenhoff van de Leur, D. A. and H. Prak. 1979: Verstedelijking, industrie en zware zomerregens: een verkennende studie. *H2O*, 12 75-82.
- Lenderink, G., E. van Meijgaard and F. Selten. 2009: Intense coastal rainfall in the Netherlands in response to high sea surface temperatures: analysis of the event of August 2006 from the perspective of a changing climate. *Climate Dynamics*, 32, 19-33.
- Overeem, A., I. Holleman and T. A. Buishand. 2009: Derivation of a 10-year radar-based climatology of rainfall. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48, 1448-1463.
- Overeem, A. 2014: Inzicht in extreme neerslag in de stad op basis van langjarige radardatasets met veel ruimtelijk detail. In: *Ervaringen met de aanpak van regenwateroverlast in bebouwd gebied. Voorbeelden en ontwikkelingen anno 2014*, van Luijtelar, H. (ed.). RIONEDreks 18, Stichting RIONED: Ede, the Netherlands; 284-305.