

# CARROTS: een klimatologische correctie voor radarneerslag in een operationele context

RUBEN IMHOFF, CLAUDIA BRAUER, KLAAS-JAN VAN HEERINGEN, HIDDE LEIJNSE, ALBRECHT WEERTS EN REMKO UIJLENHOET

Artikel

*Real-time kwantitatieve neerslagschattingen (QPE) op basis van radarproducten hebben over het algemeen significante afwijkingen ten opzichte van de werkelijke neerslaghoeveelheden aan de grond. Hoewel er veel correctiemethoden beschikbaar zijn, zijn de huidige methoden afhankelijk van een dicht regenmeternetwerk dat tijdig metingen levert. Als de dichtheid van het netwerk onvoldoende is, zijn geavanceerde correctiemethoden die de radar QPE ook ruimtelijk corrigeren, niet bruikbaar. Als alternatief presenteren we CARROTS (Climatology-based Adjustments for Radar Rainfall in an Operational Setting): een gegridde, klimatologische QPE-correctie die zowel in de tijd als in de ruimte kan corrigeren. De publiekelijk beschikbare correctiefactoren zijn gebaseerd op 10 jaar (2009 – 2018) aan historische 5-min radar QPE en referentiedata van het KNMI, wat de methode onafhankelijk maakt van de real-time regenmeterbeschikbaarheid. We hebben CARROTS getest met betrekking tot de gecorrigeerde neerslagschattingen die er uit volgen en de daarmee uitgevoerde afvoersimulaties voor twaalf stroomgebieden in Nederland. Hierbij hebben we de mean field bias (MFB) correctiemethode als referentie gebruikt. De MFB-methode wordt operationeel gebruikt door het KNMI en leidt ruimtelijk uniforme correctiefactoren af in real time, gebruik makend van de 32 automatische regenmeters van KNMI. De CARROTS-factoren hebben een duidelijk ruimtelijk en temporeel patroon met hogere factoren verder van de radars af en hogere factoren van december tot en met maart dan in de overige seizoenen. Dat laatste lijkt een gevolg te zijn van radarobservaties boven de smeltlaag gedurende deze maanden. Vergeleken met de ongecorrigeerde radar QPE verbeteren beide correctiemethoden de neerslagschattingen aanzienlijk. De jaarsommen met CARROTS liggen echter wel dichter bij de referentie dan die van de MFB-methode voor Zuid- en Oost-Nederland, omdat het MFB-gecorrigeerde product hier de neerslagvolumes onderschat. Deze verschillen worden nog duidelijker in de afvoersimulaties die met beide producten zijn uitgevoerd, waarin CARROTS veel dichter bij de referentie zit dan MFB voor elf van de twaalf stroomgebieden. Onze conclusie is dat CARROTS gebruikt kan worden als referentie voor correctiemethode-ontwikkeling en operationeel een betere optie lijkt dan de MFB-methode, mits de radardata op dezelfde manier geproduceerd worden als bij het afleiden van de factoren.*

## Inleiding

Door hoge resolutie in zowel tijd als ruimte kunnen radarneerslagproducten worden gezien als een essentiële toevoeging aan hydrometeorologische voorspellingssystemen. Radarneerslagproducten in dit soort systemen worden vaak gebruikt als forcering voor hydrologische modellen, voor het initialiseren van numerieke weermodellen of als input voor nowcastingstechnieken. Menig gebruiker van kwantitatieve neerslagschattingen uit radarproducten (vanaf hier

QPE genoemd: quantitative precipitation estimations) weet dat deze producten aanzienlijke systematische afwijkingen kunnen hebben, met één of meerdere van de volgende oorzaken: (1) fouten gerelateerd aan de radarreflectiviteitsmetingen zoals demping en de smeltlaag, (2) afwijkingen in de conversie van reflectiviteit naar neerslagintensiteit en (3) fouten in de temporele en ruimtelijke sampling (zie ook Ochoa-Rodriguez e.a., 2019 voor een uiteenzetting van deze foutenbronnen, mogelijke verbeteringen en correctiemethoden). Dit soort afwijkingen kunnen zelfs groter worden wanneer de QPE voor hydrologische simulaties gebruikt worden. Hoewel aan de drie genoemde foutenbronnen in de loop der jaren veel aandacht is besteed, blijft het noodzakelijk om radar QPE te corrigeren voor gebruik in hydrometeorologische (voorspellings-)systemen.

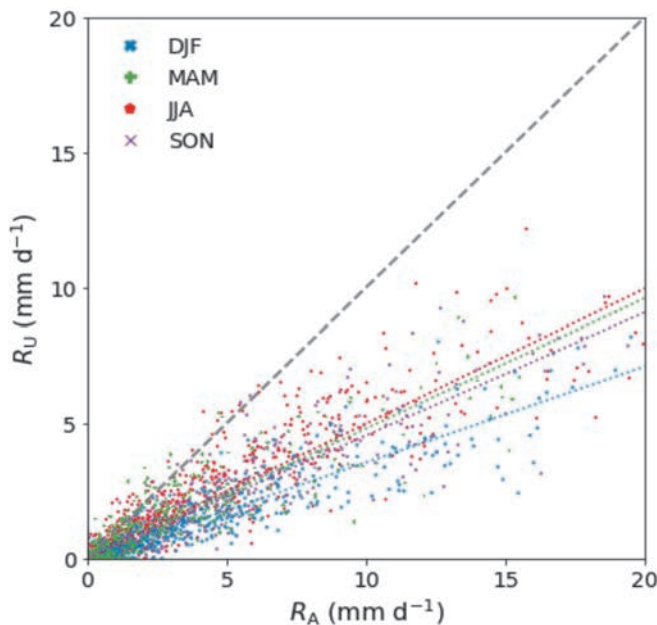
Gelukkig zijn er veel correctiemethoden voor QPE beschikbaar. Deze methoden kunnen de reflectiviteitsmetingen corrigeren voor fysische fenomenen (bijvoorbeeld signaaldemping door hevige neerslag in het signaalpad, het verticale reflectiviteitsprofiel of de druppelgrootteverdeling van regen; Hazenberg e.a., 2013), of het QPE-product statistisch nabewerken door middel van regenmeterdata. In dit artikel focussen we op de statistische nabewerking, omdat dit nog mogelijk is als nabewerking op de operationele radarproducten die worden uitgegeven door bijvoorbeeld het KNMI.

Een vaak gebruikte methode is de zogenaamde mean field bias (MFB) correctiemethode, waarmee een ruimtelijk gemiddelde correctiefactor wordt afgeleid aan de hand van de verhouding van het neerslagvolume in de regenmeterobservaties en de radar QPE van de bovenliggende gridcellen op de regenmeterlocaties (Smith en Krajewski, 1991; Seo e.a., 1999). Deze methode wordt wereldwijd vaak gebruikt (ook in Nederland; Holleman, 2007), door de korte rekentijd en het relatief kleine aantal regenmeters dat ervoor nodig is. Het nadeel van de methode is dat het geen rekening houdt met de ruimtelijke variabiliteit in de QPE-foutenbronnen, hoewel we weten dat de fouten die ze veroorzaken, toenemen met de afstand tot de radars (zie bijvoorbeeld afbeelding 1 verderop in dit artikel).

Het is mogelijk om ook de ruimtelijke variabiliteit in de QPE-foutenbronnen mee te nemen met geostatistische en Bayesiaanse (combinatie-)methoden ("merging", zie bijvoorbeeld Krajewski, 1987; Creutin e.a., 1988; Todini, 2001; Schuurmans e.a., 2007; Goudenhoofd en Delobbe, 2009; Ochoa-Rodriguez e.a., 2019). Hoewel deze methoden de radar QPE substantieel verbeteren in de ruimte, is voor alle statistische QPE-nabewerkingsmethoden op basis van regenmeterdata de tijdige beschikbaarheid van voldoende (gevalideerde) regenmeterobservaties een beperkende factor. Het regenmeternetwerk van het KNMI is vrij dicht met gemiddeld één station per 100 km<sup>2</sup> (afbeelding 2b). Helaas zijn slechts 32 van de 351 regenmeters automatisch, met een tijdstap van 10 minuten, terwijl de overige 319 regenmeters slechts 24-uur sommen rapporteren. Voor een operationele toepassing van de statistische nabewerkingen is dus eigenlijk alleen het automatische netwerk (met een dichtheid van ongeveer één station per 1000 km<sup>2</sup>) beschikbaar, wat het te beperkt maakt voor geostatistische en Bayesiaanse methoden. In plaats daarvan wordt de MFB-correctie toegepast, die in theorie iedere tien minuten kan plaatsvinden.

Kortom, voor optimaal gebruik van radar QPE in hydrometeorologische voorspellingssystemen zijn we op zoek naar een correctiemethode die (1) de ruimtelijke variabiliteit in de afwijkingen van het werkelijke volume meeneemt en die (2) continu beschikbaar is in real-time. In dit artikel presenteren we CARROTS (Climatology-based Adjustments for Radar Rainfall in an OperATional Setting). Het CARROTS algoritme levert een verzameling gegridde correctiefactoren voor iedere dag van het jaar, gebaseerd op een historische reeks van tien jaar aan vijf-minuten radarneerslag voor Nederland. Met CARROTS zijn radar QPE-correcties in zowel de tijd als ruimte mogelijk. Bovendien zijn de correcties door het vooraf berekenen van de klimatologische reeks altijd beschikbaar. Wanneer meer geavanceerde geostatistische en Bayesiaanse methoden mogelijk zijn, kan CARROTS ook goed als een benchmark gebruikt worden.

## Biascorrectiemethode



**Afbeelding 1** De systematische afwijking tussen de ongecorrigeerde radar QPE ( $R_U$ ) en het referentieproduct ( $R_A$ ). Getoond worden daggemiddelde neerslagsommen, gekleurd per seizoen, voor de jaren 2009 – 2018. De gekleurde stippellijnen zijn lineaire regressielijnen per seizoen tussen  $R_A$  en  $R_U$ .

Dat een correctiemethode noodzakelijk is voor het operationele radarproduct voor de periode 2009 – 2018 wordt direct duidelijk uit afbeelding 1. De systematische onderschatting is gemiddeld 55% voor het landoppervlak van Nederland; 's winters zelfs 65%. Als we dit product direct voor neerslag-afvoersimulaties zouden gebruiken, leidt dat tot vrijwel geen afvoerrespons (zie ook de lichtblauwe lijnen verderop in afbeelding 6). In de volgende twee paragrafen beschrijven we de MFB- en CARROTS-correctiemethoden, die deze onderschattingen kunnen reduceren.

### **Mean field bias correctie**

De mean field bias (MFB) correctiemethode is momenteel de operationeel gebruikte radar QPE-correctiemethode in Nederland en is daarom ook in deze studie gebruikt als benchmark voor de CARROTS-methode. De MFB-methode resulteert in een correctiefactor die varieert in de tijd, maar niet in de ruimte, en kan direct worden toegepast op de ongecorrigeerde radar QPE. De correctiefactor wordt als volgt berekend (Holleman, 2007; Overeem e.a., 2009):

$$F_{MFB} = \frac{\sum_{n=1}^N G(i_n, j_n)}{\sum_{n=1}^N R_U(i_n, j_n)} \quad (1)$$

Waarbij

$F_{MFB}$  : de MFB-correctiefactor [-]

$G(i_n, j_n)$  : de uurlijkse neerslagsom voor regenmeter  $n$  op locatie  $(i_n, j_n)$  [mm]

$R_U(i_n, j_n)$  : de uurlijkse neerslagsom van de ongecorrigeerde radar QPE voor de bovenliggende gridcel [mm]

$F_{MFB}$  wordt alleen berekend als de sommen van zowel  $G(i_n, j_n)$  als  $R_U(i_n, j_n)$  1,0 mm of groter zijn. In alle andere gevallen is de correctiefactor gelijk aan 1,0. We hebben  $F_{MFB}$  afgeleid voor de 1-uursaccumulaties van de ongecorrigeerde radar QPE en de 32 automatische regenmeters, omdat de automatische regenmeterwaarden ieder uur beschikbaar zijn (de eerder genoemde 10-minuten regenmeterwaarden waren op het moment van deze studie nog niet beschikbaar voor de onderzochte periode). Bij de toepassing van deze correctiefactor nemen we aan dat  $F_{MFB}$  op de tijdsresolutie van het radarproduct (5 min) gelijk is aan de uurwaarden.

### **CARROTS-methode**

De CARROTS-correctiefactoren zijn gebaseerd op de neerslagreferentiedata en de ongecorrigeerde radar QPE voor de jaren 2009 – 2018. De referentiedata, het klimatologische radarneerslagproduct (Overeem e.a., 2009), kan worden gezien als het meest accurate neerslagproduct dat voor deze periode beschikbaar is in Nederland. De basis van het product is de radar QPE, dat vervolgens is gecorrigeerd in de tijd met een MFB-correctie gebruik makend van de 32 automatische regenmeters en daarna ruimtelijk is gecorrigeerd met de 319 handregenmeters. Dit product is niet beschikbaar in real time, maar kan ongeveer een maand na dato verkregen worden. Omdat de CARROTS-correctiefactoren niet in real time berekend worden, kunnen de referentiedata gebruikt worden.

De CARROTS-correctiefactoren worden afgeleid per gridcel in het radardomein volgens de volgende drie stappen:

1. Voor iedere dag in de periode 2009 – 2018 zijn alle 5-minutensommen van de referentie en ongecorrigeerde radar QPE gesommeerd over een voortschrijdend venster van 31 dagen (15 dagen voor en na de dag in kwestie). Het doel van dit venster is het verminderen van de invloed van de dag-tot-dagvariabiliteit in de geschatte neerslag.

- Deze 31-daagse accumulaties zijn vervolgens voor iedere jaardag gemiddeld over de tien beschikbare jaren. Dat betekent dat bijvoorbeeld de gemiddelde neerslagsom voor 16 januari bestaat uit de gemiddelde 31-dagen som voor de periode 1 – 31 januari over tien jaren. Tijdens schrikkeljaren hebben we 29 februari niet meegenomen in deze analyse, omdat er maar twee schrikkeljaren voorkwamen in de studieperiode van tien jaar.
- Als laatste zijn de klimatologische correctiefactoren van CARROTS berekend per dag van het jaar met:

$$F_{clim}(i,j) = \frac{\overline{R_A(t,j)}}{\overline{R_U(t,j)}} \quad (2)$$

Waarbij:

$\overline{F_{clim}(i,j)}$  : de CARROTS-correctiefactor voor gridcel (i,j) [-]

$\overline{R_A(t,j)}$  : de 10-jaargemiddelde referentieneerslagsom binnen het 31-dagen venster voor gridcel (i,j) [mm]

$\overline{R_U(t,j)}$  : de 10-jaargemiddelde ongecorrigeerde radar QPE som binnen het 31-dagen venster voor gridcel (i,j) [mm]

## Hydrometeorologische onderzoeksopzet

Beide correctiemethoden (MFB en CARROTS) hebben we toegepast op de beschikbare radar QPE voor 2009 – 2018. Dit is dezelfde periode als waarmee de factoren zijn afgeleid, wat de testdataset niet onafhankelijk maakt. Deze keuze hebben we gemaakt om de beperkte lengte van de historische radardata volledig mee te nemen in de afleiding van de CARROTS-factoren. Om deze afhankelijkheid te testen, maar ook om te testen of bijvoorbeeld een kortere dataset al afdoende is om de CARROTS-factoren te berekenen, is een voldoende lange historische datareeks nodig die gesplitst kan worden in een 'kalibratie-' en 'validatieset' (dit is een aanbeveling voor vervolgonderzoek en een eerste gevoeligheidsanalyse is te vinden in Imhoff e.a., 2021).

Om de hydrometeorologische toepassing van de producten te testen, hebben we ingezoomd op twaalf Nederlandse stroomgebieden en polders (afbeelding 2). Allereerst zijn voor de twaalf stroomgebieden de geschatte neerslagsommen van de twee gecorrigeerde producten vergeleken met de referentieneerslag voor de tien jaren. Vervolgens zijn de neerslagproducten gebruikt voor afvoersimulaties met de neerslag-afvoermodellen die bij de betrokken waterschappen operationeel worden gebruikt of die zijn gebruikt voor onderzoek (afbeelding 2c) en vergeleken met eenzelfde modelrun gebruik makend van de referentieneerslag. De neerslag-afvoermodellen zijn met dezelfde tijdstap als de radardata (5 min) gedraaid.

De neerslagsommen zijn gevalideerd met de gemiddelde absolute fout en de Kling-Gupta efficiency score (Gupta e.a., 2009). Deze, inmiddels vrij bekende, score is een combinatie van drie scores:

$$KGE = 1 - \sqrt{(\rho - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (3)$$

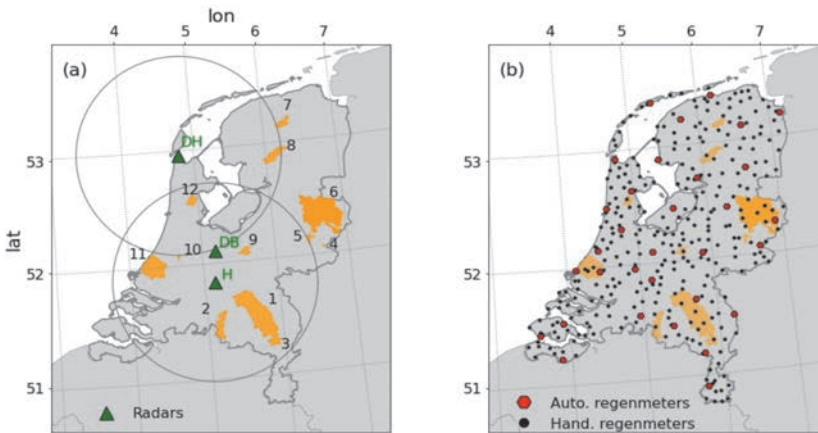
Waarbij:

$\rho$  : Pearson's correlatie [-].

$\alpha$  :  $\sigma_{sim} / \sigma_{obs}$ , een maat voor de relatieve variabiliteit in de gesimuleerde en geobserveerde waarden [-].

$\beta$  : De afwijking (bias) tussen het gemiddelde van de simulaties en observaties ( $\mu_{sim} / \mu_{obs}$ ) [-].

De score heeft een maximale waarde van 1, in het geval van een perfecte fit tussen model en observaties, en een minimum van  $-\infty$ . Bij een KGE van  $-0,41$  presteert het model even goed als wanneer de gemiddelde afvoer als voorspelling zou worden gebruikt (Gupta e.a., 2009; Knoben e.a., 2019).



(c)

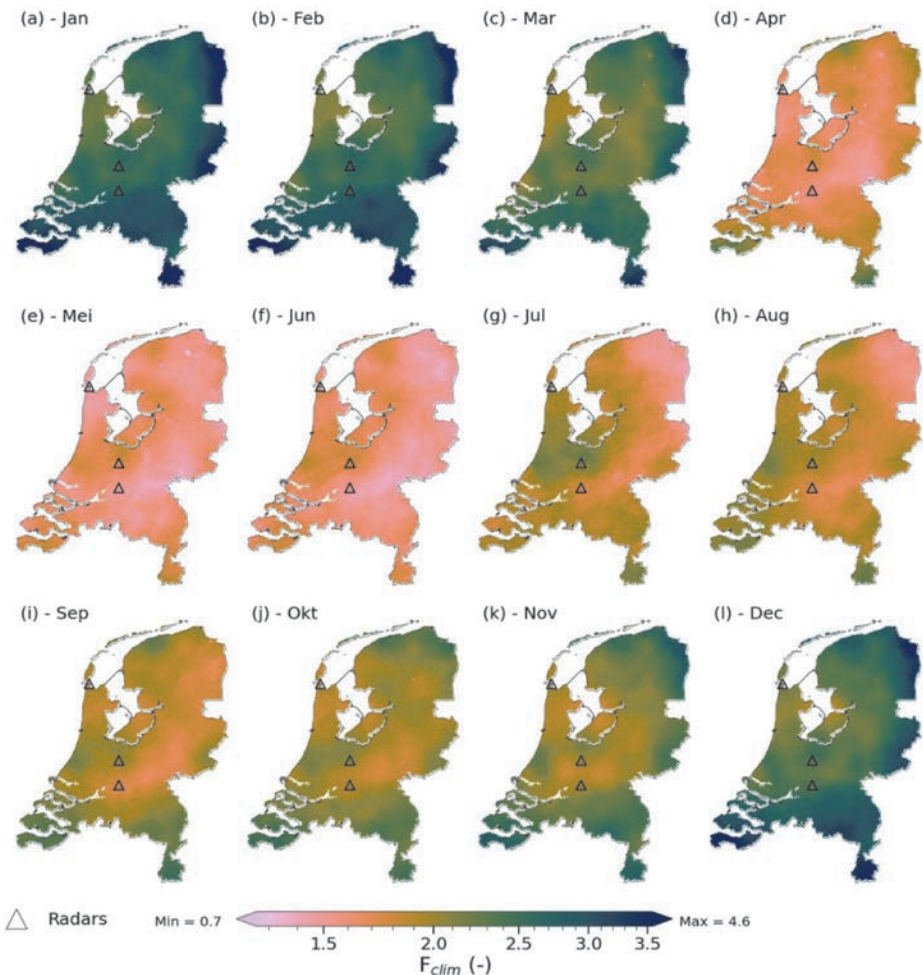
Nr.	Naam	Oppervlak (km <sup>2</sup> )	Nr. Automatische regenmeters	Nr. Handmatige regenmeters	Gebruikt model
1	Aa	836	0	5	WALRUS
2	Reusel	176	0	1	WALRUS
3	Roggelsebeek	88	0	1	WALRUS
4	Hupsel Brook	6.5	1	1	WALRUS
5	Grote Waterleiding	40	0	0	WALRUS
6	Regge	957	1	8	WALRUS
7	Dwarsdiep	83	0	0	WALRUS
8	Linde	150	0	1	Sobek RR
9	Luntersebeek	63	0	1	WALRUS
10	Gouwepolder	10	0	1	Sobek RR
11	Delfland	379	1	4	Sobek RR
12	Beemster	71	0	1	Sobek RR-CF

**Afbeelding 2** Overzicht van de twaalf stroomgebieden in deze studie. (a) locaties van de stroomgebieden (oranje) met in groene driehoeken de radarlocaties. De twee grijze cirkels komen overeen met een straal van 100 km rond de radars in Den Helder (DH) en Herwijnen (H). Let wel, de radars geven observaties tot ca. 250 km van de radars, maar de fout neemt substantieel toe voor grotere afstanden dan 100 km. De radar in Herwijnen heeft rond januari 2017 de radar in De Bilt (DB) vervangen. (b) Locatie van de 32 automatische en 319 handregenmeters van het KNMI. (c) Lijst van stroomgebieden, stroomgebiedsinformatie en gebruikte (operationele) hydrologische modellen. De nummers in de meest linker kolom verwijzen naar de nummers in (a).

## Gevoeligheidsanalyse

Een belangrijke keuze in de CARROTS-methode is de lengte van het voortschrijdende venster (31 dagen). Om de gevoeligheid van de factor en de resulterende neerslagschattingen en afvoersimulaties te testen, hebben we de bovenstaande procedures herhaald voor venstergroottes van één dag, één week, twee weken, zes weken en twee maanden en de resulterende neerslagschattingen en afvoersimulaties getest voor het stroomgebied van de Aa.

Naast de keuze van de venstergrootte (zie hierboven), was ook de lengte van het radarneerslagarchief (gegeven dat de producten upgrades hebben gehad voor en na deze periode) beperkt. Om het effect van individuele jaren op de uiteindelijke factoren en resultaten te testen, hebben we bovenstaande procedures nogmaals herhaald door iedere keer één van de tien jaren niet mee te nemen in de factorafleiding.



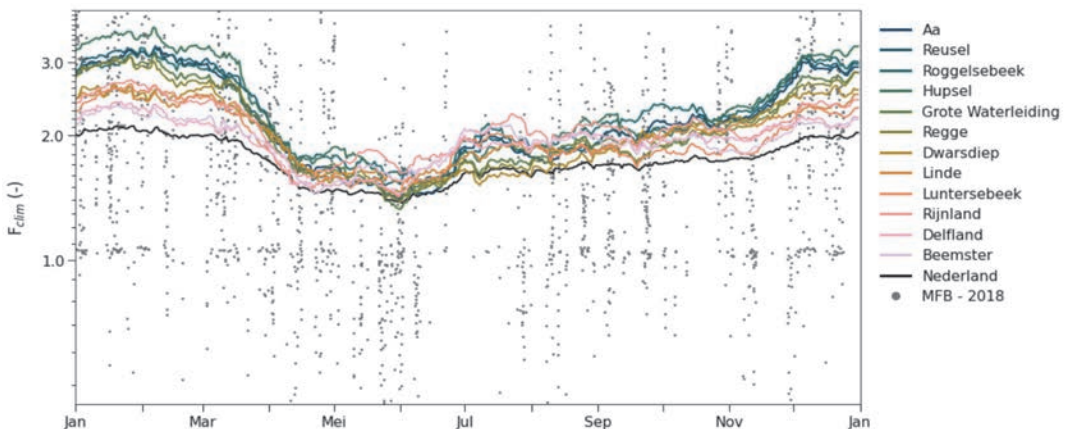
**Afbeelding 3** De ruimtelijke variabiliteit in de CARROTS-factoren voor het landoppervlak van Nederland. Getoond worden de maandgemiddelde factoren ter indicatie van het seizoenseffect (de kleurschaal is niet-lineair).

De resultaten hiervan zullen we hier niet in detail bespreken, maar zijn te vinden in Imhoff e.a. (2021). Uit de gevoeligheidsanalyse volgde dat de keuze van het voortschrijdend venster enkel tot kleine veranderingen in de correctiefactoren leidt wanneer dit venster groter is dan één week. Ook het weglaten van individuele jaren in de CARROTS-afleiding had vrijwel geen effect op de uiteindelijke factoren en daarmee ook niet op de uiteindelijke afvoersimulaties. Kortom, een archief van 10 jaar en venstergrootte van 31 dagen lijken voldoende om de CARROTS-factoren af te leiden.

## Resultaten

### Ruimtelijke en seizoensvariabiliteit

De ruimtelijke variabiliteit in de radar QPE-fouten is direct zichtbaar in de resulterende CARROTS-correctiefactoren, met veelal hogere factoren richting de randen van het Nederlandse landoppervlak; vooral in winter is de referentie-neerslag vaak tot 2x hoger dan de ongecorrigeerde radar QPE, zie afbeelding 3. Daarnaast is er ook een duidelijk seizoenseffect, met hogere correctiefactoren in de maanden december tot en met maart vergeleken met de rest van het jaar. Dit is voor de afzonderlijke stroomgebieden ook zichtbaar in afbeelding 4: de factoren variëren van 2,1 voor de Beemster tot 3,2 voor de Hupselse Beek in januari, terwijl ze variëren van 1,3 voor de Grote Waterleiding tot 1,6 voor de Roggelsebeek in juni.



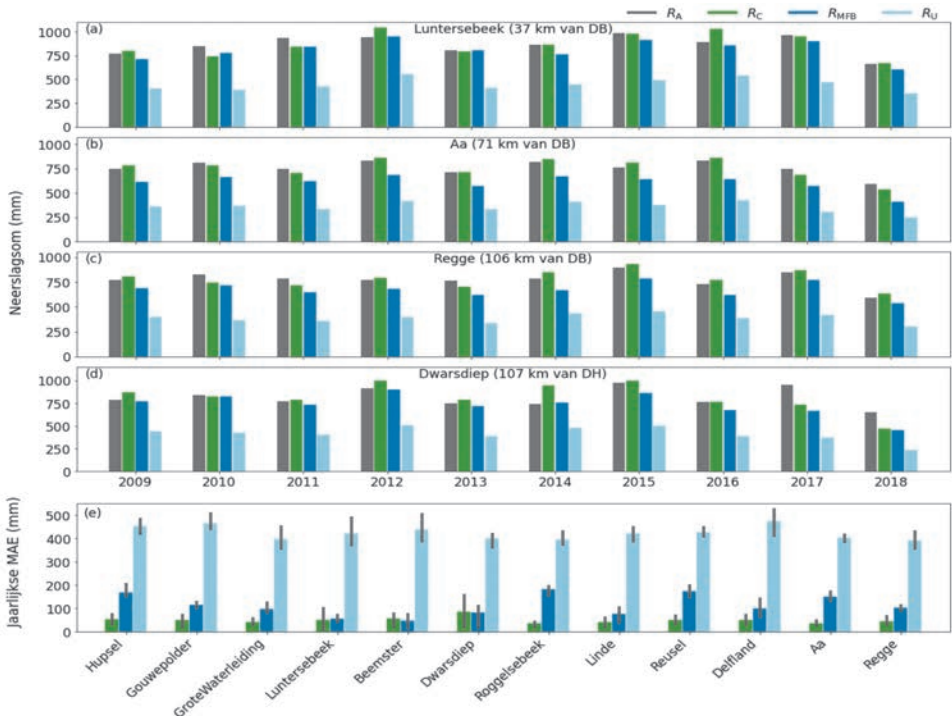
**Afbeelding 4** De seizoensgang van de CARROTS-factoren vergeleken met de operationele MFB-factor. Getoond wordt de temporele variabiliteit van de factoren gemiddeld over de twaalf stroomgebieden (in kleur), gemiddeld over het landoppervlak van Nederland (zwart) en de MFB-factoren voor het jaar 2018 (grijze punten, sommige vallen ook buiten het bereik van de afbeelding).

De reden voor dit seizoenseffect is dat de radar QPE, die bestaat uit neerslag-schattingen van radarobservaties op gemiddeld 1500 m hoogte, vaak flink onderschat wordt voor (winterse) stratiforme systemen. Dit effect wordt versterkt wanneer de metingen plaatsvinden boven de smeltlaag (bijvoorbeeld in een deel van de winter) en de radar dus veelal ijskristallen observeert in plaats van regendruppels (zie bijvoorbeeld Fabry e.a., 1992; Kitchen en Jackson, 1993; Hazenberg e.a., 2013). Zie Imhoff e.a. (2021) voor een uitgebreidere analyse over de oorzaak van de onderschatting.



## Evaluatie van de geschatte regensommen

Een voordeel van de MFB-correcties is dat het de radar QPE bijstuurt aan de hand van de huidige omstandigheden, terwijl CARROTS dit slechts op basis van klimatologische factoren kan doen. Daar staat tegenover dat MFB-correcties ruimtelijk uniform zijn, terwijl de CARROTS-factoren de ruimtelijke variabiliteit in de QPE-fouten mee kunnen nemen (afbeeldingen 3 en 4). Hoe dit uitpakt voor de geschatte neerslagsommen voor de twaalf stroomgebieden is te zien in afbeelding 5. Vergeleken met de ongecorrigeerde radar QPE (lichtblauw) weten beide producten de neerslagsommen significant te verbeteren richting de referentie (grijs). Echter, voor negen van de twaalf stroomgebieden liggen de neerslagschattingen met de CARROTS-methode (groen) dicht bij de referentie dan de MFB methode (donkerblauw). Voor de drie stroomgebieden waar dit niet voor geldt (Beemster, Luntersebeek en Dwarsdiep), zijn de prestaties van beide methoden vergelijkbaar. Dit kan verklaard worden door de ligging van deze drie gebieden: ze liggen dicht bij de radars (resultierend in een lagere fout die gecorrigeerd moet worden) en dichtbij enkele automatische regenmeters waardoor de ruimtelijk uniforme MFB-correctie goed uitpakt.



**Afbeelding 5** De geschatte jaarlijkse neerslagsommen voor de verschillende producten. (a – d) Neerslagsommen voor vier van de twaalf stroomgebieden.  $R_A$  is de referentieneerslag (grijs),  $R_C$  is de CARROTS-gecorrigeerde radar QPE (groen),  $R_{MFB}$  is de MFB-gecorrigeerde radar QPE (donkerblauw) en  $R_U$  is de ongecorrigeerde radar QPE (lichtblauw). De afstand tot de dichtstbijzijnde radar (Herwijnen is hier weggelaten, omdat die radar maar voor een klein deel van de periode actief was) is weergegeven aan de bovenkant van iedere afbeelding. (e) De gemiddelde absolute fout (MAE) van de jaarlijkse neerslagsom over de tien jaren tussen de drie QPE-producten en de referentie. De verticale grijze lijnen zijn een indicatie van de interkwartielafstand.

De verschillen tussen de MFB- en CARROTS-gecorrigeerde neerslagschattingen worden voornamelijk duidelijk verder van de radars af, met name in het zuiden en oosten van Nederland. Hier nemen de systematische onderschattingen van de radar QPE toe en gaan ruimtelijke correcties echt lonen. Het MFB-gecorrigeerde product onderschat de jaarlijkse neerslagsom voor de Aa bijvoorbeeld nog met 20% en met 13% voor de Regge, terwijl dit afneemt tot zo'n 5% (zowel onder- als overschattingen) voor het CARROTS-gecorrigeerde product (afbeelding 5). Kortom, het feit dat de CARROTS-factoren niet alleen in de tijd, maar ook in de ruimte variëren (afbeelding 3 en 4), resulteert in neerslagschattingen die vergelijkbaar of zelfs beter zijn dan met de MFB-factoren, en dat terwijl de MFB-factoren in real time berekend worden.

### **Effect op de gesimuleerde afvoeren**

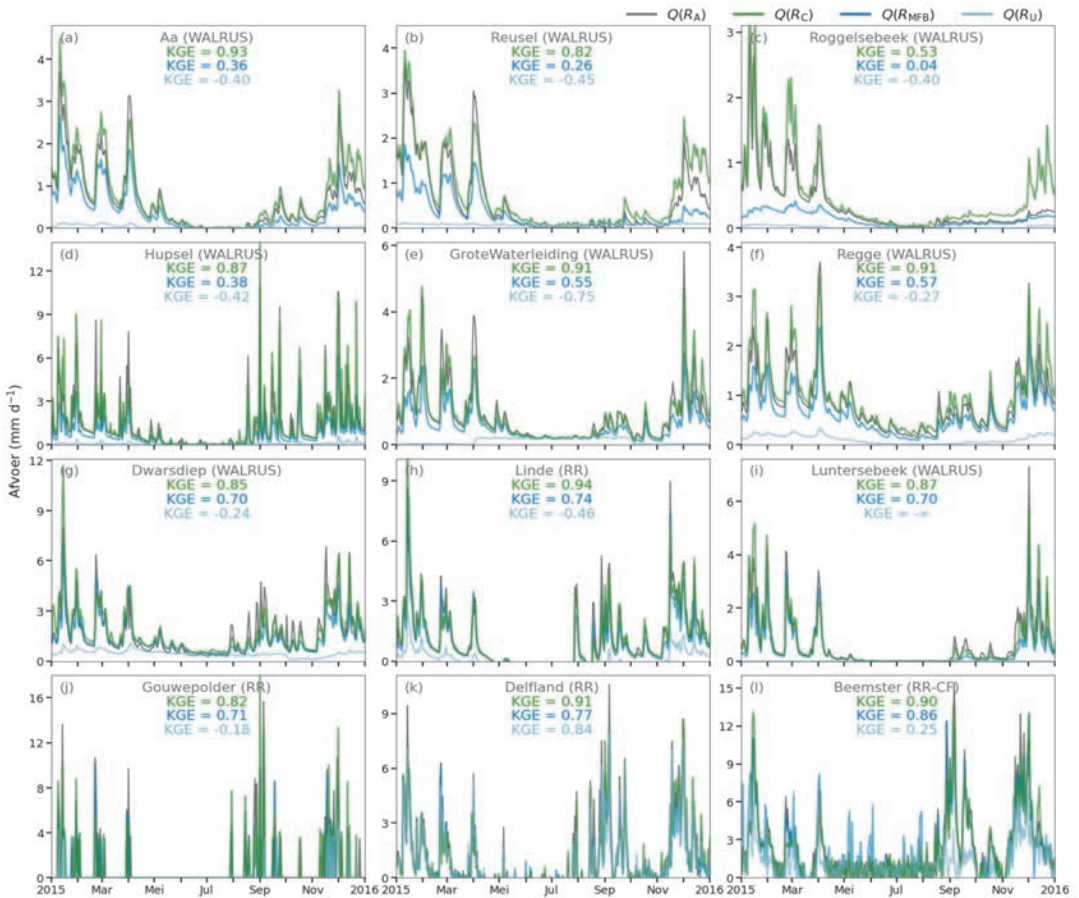
Dat overgebleven afwijkingen en onderschattingen van de neerslagvolumes doorwerken in de gesimuleerde afvoeren voor de twaalf stroomgebieden, zal geen verrassing zijn. Dit is direct zichtbaar in de flinke onderschattingen van de afvoer wanneer de ongecorrigeerde radar QPE wordt gebruikt voor de afvoersimulaties (afbeelding 6, lichtblauwe lijnen). Vooral voor de vrij-afwaterende stroomgebieden, die voor een groter deel door grondwaterstroming gevoed worden, is de onderschatting groot. Dit resulteert in soms vrijwel geen afvoer en bijna altijd negatieve KGE-waarden.

Hoewel de afvoersimulaties met de MFB-gecorrigeerde radar QPE de afvoervolumes significant verbeteren, blijft er net zoals in de vorige paragraaf voornamelijk in Zuid- en Oost-Nederland een onderschatting over (afbeelding 6a-f). Uitschieters daarbij zijn de Reusel (KGE = 0,26) en de Roggelsebeek (KGE = 0,04).

De afvoersimulaties met de CARROTS-gecorrigeerde radar QPE daarentegen presteren beter dan de simulaties met de MFB-gecorrigeerde QPE voor elf van de twaalf stroomgebieden, met KGE-waarden die veelal groter zijn dan 0,8. De enige uitzondering is de Beemster polder, waar beide producten een hoge KGE (0,92 met CARROTS en 0,96 met MFB) behalen, waarschijnlijk als gevolg van de continue kwelflux die voor een voorspelbaardere basisafvoer zorgt.

### **Discussiepunten**

De CARROTS-methode maakt het mogelijk om correcties van radar QPE operationeel uit te voeren in zowel tijd als ruimte op basis van historische radargegevens. Het doel van deze methode is niet om meer geavanceerde geostatistische en Bayesiaanse methoden te verslaan. We zien CARROTS als een benchmark (het minimale dat een methode zou moeten kunnen verslaan) voor de ontwikkeling van dit soort geavanceerde radar QPE-correctiemethoden. Daarnaast is CARROTS wel een praktische oplossing voor het gebrek aan een tijdig rapporterende regenmeternetwerk met een hoge dichtheid en vereist het geen grote rekenkracht, omdat de factoren al vooraf berekend zijn.



**Afbeelding 6** Effect van de verschillende radar QPE-producten op de gesimuleerde afvoer van de twaalf stroomgebieden t.o.v. de referentiesimulatie met  $R_A$ . De modelsimulaties zijn uitgevoerd voor de volledige periode (2009 – 2018) met de volgende producten: het referentieproduct ( $R_A$ ; grijs), het CARROTS-gecorrigeerde QPE-product ( $R_C$ ; groen), het MFB-gecorrigeerde QPE-product ( $R_{MFB}$ ; donkerblauw) en het ongecorrigeerde radar QPE-product ( $R_U$ ; lichtblauw). De KGE is gebaseerd op alle tien de jaren, maar alleen 2015 wordt getoond voor de duidelijkheid.

De resultaten laten zien dat de CARROTS-methode over het algemeen, vooral in Zuid- en Oost-Nederland, betere neerslagschattingen en resulterende afvoersimulaties geeft dan de MFB-methode. Dit suggereert dat we het operationele gebruik van de MFB-factoren misschien moeten heroverwegen of moeten verbeteren.

We hebben de kwaliteit van de CARROTS-correcties tijdens extreme neerslaggebeurtenissen niet getest hier, maar Schleiss e.a. (2020) concludeerden dat de afwijkingen in radar QPE-producten, zelfs na (MFB)-correcties, aanzienlijk toenemen voor extreme neerslaggebeurtenissen. We verwachten dat hetzelfde geldt voor de CARROTS-correcties. Dit vraagt eigenlijk om verdere verbeteringen in bijvoorbeeld de conversie van reflectiviteit naar neerslagintensiteit en bijvoorbeeld het optimaal gebruik maken van de dubbele polarisatie van het radarsignaal.

## Toepassing in het Nederlandse waterbeheer

De toepassing van CARROTS binnen het Nederlandse waterbeheer is mogelijk, maar vereist een herberekening van de factoren. De huidige factoren zijn gebaseerd op het operationele radar QPE-product voor de periode 2009 – 2018, maar dat is inmiddels vervangen door het Internationaal Radar Composiet dat ook enkele radars van onze buurlanden meeneemt. We verwachten dat dit de systematische fouten in Zuid- en Oost-Nederland wat vermindert (maar zeker niet laat verdwijnen) en ook de ruimtelijke structuur van de fouten ietwat zal veranderen. Daarnaast komt er binnenkort nog een update van het product waarin er meerdere verbeteringen verwerkt zullen worden in de correcties die plaatsvinden vóór de conversie van reflectiviteit naar neerslagintensiteit (Hazenbergh e.a., 2013).

Een herberekening van de CARROTS-factoren vereist een historisch archief met radardata. Een belangrijke vraag daarbij is wat het minimale aantal jaren aan benodigde radardata is om stabiele CARROTS-factoren af te leiden die representatief zijn voor een langere periode. Dit kan ook meteen leiden tot een advies over de minimale archieflengte die benodigd is voor het nieuwe radarproduct.

Om het beste uit de mogelijke opties voor het waterbeheer te halen, lijkt een combinatie tussen CARROTS- en de MFB-correcties het uitproberen waard. In dat geval zou de CARROTS-gecorrigeerde radar QPE de basis zijn en kan met een MFB-correctie het volume in real time naar boven of beneden bijsturen. Dit zou het mogelijk maken om de real-time temporele MFB-correcties met de automatische regenmeters te gebruiken, zonder de ruimtelijke correcties van CARROTS te verliezen.

## Conclusies

Kwantitatieve neerslagschattingen (QPE) van radarproducten hebben over het algemeen significante systematische afwijkingen ten opzichte van de werkelijke neerslaghoeveelheden. Hoewel er een verscheidenheid aan methoden is om hiervoor te corrigeren, zijn de huidige correctiemethoden afhankelijk van een dicht regenmeternetwerk dat tijdig metingen levert. Als zo'n netwerk afwezig is, zijn de meer geavanceerde correctiemethoden, die de radar QPE zowel in tijd als ruimte corrigeren, niet haalbaar. In dit artikel presenteren we CARROTS (Climatology-based Adjustments for Radar Rainfall in an Operational Setting): een klimatologische radar QPE-correctie die zowel in de tijd als ruimte kan corrigeren en als benchmark voor methodeontwikkeling kan dienen of zelfs operationeel gebruikt kan worden.

De kwaliteit van het product hebben we getest op zowel de geschatte neerslag-sommen als de resulterende afvoersimulaties voor twaalf Nederlandse stroomgebieden. Vervolgens hebben we deze resultaten vergeleken met de mean field bias (MFB) correctiemethode. Deze ruimtelijke uniforme correctiemethode is momenteel de operationele correctiemethode in Nederland en gebruikt alleen de automatische KNMI-regenmeters.

De CARROTS-factoren laten een duidelijk ruimtelijk patroon zien, met hogere correctiefactoren voor toenemende afstand tot de radars en een seizoensgang

waarin de factoren hoger zijn van december tot en met maart dan in de andere maanden. Ten opzichte van de ongecorrigeerde radar QPE zorgen de MFB-correcties voor aanzienlijk betere jaarsommen van de neerslag, maar vooral in Zuid- en Oost-Nederland blijft er sprake van een onderschatting van het neerslagvolume. Met de CARROTS-factoren zijn de resultaten vergelijkbaar, maar worden ook de volumes in Zuid- en Oost-Nederland beter geschat en neemt de fout af tot gemiddeld zo'n 5% aan onder- en overschattingen van het volume. Deze effecten op de neerslagschattingen werken door in de afvoersimulaties voor de twaalf gebieden: vergeleken met MFB resulteren de CARROTS-correcties in betere afvoersimulaties voor elf van de twaalf stroomgebieden.

Een aanbeveling voor verdere verbetering van het correctieproduct zou zijn om de CARROTS- en MFB-correcties te combineren om op die manier de radar QPE in de ruimte te corrigeren met CARROTS en het volume in real time bij te sturen met de MFB-methode.

### Data- en softwarebeschikbaarheid en overige informatie:

Het historische klimatologische (referentie) radarneerslagproduct en het ongecorrigeerde, (destijds) operationele radarneerslagproduct zijn beschikbaar via <https://dataplatform.knmi.nl/dataset/rad-nl25-rac-mfbs-em-5min-2-0> en <https://doi.org/10.4121/uuid:05a7abc4-8f74-43f4-b8b1-7ed7f5629a01>. De CARROTS-factoren voor Nederland, op basis van deze producten, zijn hier te vinden: <https://doi.org/10.4121/13573814>. Stroomgebiedsdata, modelparameters, operationele Delft-FEWS systemen en informatie zijn aangeleverd door de betrokken waterschappen (waarvoor dank!): Hoogheemraadschap Delfland, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, Hoogheemraadschap Rijnland, Waterschap Aa en Maas, Waterschap De Dommel, Wetterskip Fryslân, Waterschap Limburg, Waterschap Noorderzijlvest, Waterschap Rijn en IJssel, Waterschap Vallei en Veluwe, en Waterschap Vechtstromen.

Dit artikel is gebaseerd op het gelijknamige Engelstalige artikel *A climatological benchmark for operational radar rainfall bias reduction* (Imhoff e.a., 2021) in het tijdschrift *Hydrology and Earth System Sciences*, dat vrij beschikbaar is via <https://doi.org/10.5194/hess-25-4061-2021>. Dit onderzoek werd uitgevoerd met steun van het Europese Regionaal Ontwikkelingsfonds DAISY-2 (grant nummer PROJ-00581) en het strategisch onderzoeksprogramma van Deltares (programma Real-Time Information).

### Literatuur

**Creutin, J., G. Delrieu en T. Lebel** (1988) Rain measurement by raingage-radar combination: A geostatistical approach; in: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol 5, pag 102-115.

**Fabry, F., G. Austin en D. Tees** (1992) The accuracy of rainfall estimates by radar as a function of range; in: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol 188, pag 435-453.

- Goudenhoofd, E. en L. Delobbe** (2009) Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 13, pag 195-203.
- Gupta, H., H. Kling, K. Yilmaz en G. Martinez** (2009) Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling; in: *Journal of Hydrology*, vol 377(1), pag 80-91.
- Hazenbergh, P., P. Torfs, H. Leijnse, G. Delrieu en R. Uijlenhoet** (2013) Identification and uncertainty estimation of vertical reflectivity profiles using a Lagrangian approach to support quantitative precipitation measurements by weather radar: VPR estimation and uncertainty; in: *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, vol 118, pag 10243-10261.
- Holleman, I.** (2007) Bias adjustment and long-term verification of radar-based precipitation estimates; in: *Meteorological Applications*, vol 14, pag 195-203.
- Imhoff, R., C. Brauer, K.-J. Van Heeringen, H. Leijnse, A. Overeem, A. Weerts en R. Uijlenhoet** (2021) A climatological benchmark for operational radar rainfall bias reduction; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 25, pag 4061-4080.
- Kitchen, M. en P. Jackson** (1993) Weather radar performance at long range – simulated and observed; in: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol 32, pag 975-985.
- Knoben, W., J. Freer, R. Woods** (2019) Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 23(10), pag 4323-4331.
- Krajewski, W.** (1987) Cokriging radar-rainfall and rain gage data; in: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol 92, pag 9571-9580.
- Ochoa-Rodriguez, S., L.-P. Wang, P. Willems en C. Onof** (2019) A review of radar-rain gauge data merging methods and their potential for urban hydrological applications; in: *Water Resources Research*, vol 55, pag 6356-6391.
- Overeem, A., I. Holleman en A. Buishand** (2009) Derivation of a 10-year radar-based climatology of rainfall; in: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol 48, pag 1448-1463.
- Schleiss, M., J. Olsson, P. Berg, T. Niemi, T. Kokkonen, S. Thorndahl, R. Nielsen, J. Allerbaek Nielsen, D. Bozhinova en S. Pulkkinen** (2020) The accuracy of weather radar in heavy rain: a comparative study for Denmark, the Netherlands, Finland and Sweden; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 24, pag 3157-3188.
- Schuermans, J., M. Bierkens, E. Pebesma en R. Uijlenhoet** (2007) Automatic prediction of high-resolution daily rainfall fields for multiple extents: The potential of operational radar; in: *Journal of Hydrometeorology*, vol 8, pag 1204-1224.
- Seo, D.-J., J. Breidenbach en E. Johnson** (1999) Real-time estimation of mean field bias in radar rainfall data; in: *Journal of Hydrology*, vol 223, pag 131-147.
- Smith, J. en W. Krajewski** (1991) Estimation of the mean field bias of radar rainfall estimates; in: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol 30, pag 397-412.

**Todini, E.** (2001) A Bayesian technique for conditioning radar precipitation estimates to rain-gauge measurements; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 5, pag 187-199.

## Summary **CARROTS: A climatological correction product for radar rainfall in an operational setting**

*Real-time radar quantitative precipitation estimations (QPEs) generally show significant biases from the true rainfall amount. Despite the abundant number of adjustment methods, the absence of a timely reporting high-density rain gauge network limits the use of these methods. This especially holds for more advanced geostatistical and Bayesian methods that can also correct the radar QPE in space. As an alternative, we present CARROTS (Climatology-based Adjustments for Radar Rainfall in an Operational Setting), a gridded climatological QPE correction product, which corrects the radar QPE both in space and time. The publicly available CARROTS factors are based on a historical set of 10 years of 5-min radar and reference rainfall data from KNMI, which makes CARROTS independent of real-time rain gauge availability. We tested the CARROTS factors on the resulting corrected radar QPE and subsequent discharge simulations for 12 Dutch catchments. We regarded the mean field bias (MFB) adjustment method as benchmark in this study. This real-time adjustment method determines spatially uniform adjustment factors based on the 32 automatic rain gauges of KNMI and is operationally used in the Netherlands. The CARROTS factors show clear spatial and temporal patterns. From December through March, the factors are higher than in other seasons, which is likely a result of sampling above the melting layer during these months. Compared to the unadjusted radar QPE, both adjustment methods significantly improve the estimated rainfall sums, but annual rainfall sums from CARROTS outperform the MFB-adjusted QPE for catchments in the south and east of the Netherlands. In these regions, the MFB-adjusted QPE still underestimates the rainfall amounts. Differences in the rainfall estimations are amplified in the discharge simulations, where CARROTS outperforms the simulations with the MFB-adjusted product for all but one basin. Concluding, CARROTS can be a benchmark for QPE adjustment method development, and it has shown to be a better operational option than the MFB method, provided that the radar data it is used on, was processed in a similar way as the radar data the factors are based on.*

## Auteurs

RUBEN IMHOFF

Deltares | Wageningen University & Research

*Ruben.Imhoff@deltares.nl*

CLAUDIA BRAUER

Wageningen University & Research

*Claudia.Brauer@wur.nl*

KLAAS-JAN VAN HEERINGEN

Deltares

*KlaasJan.vanHeeringen@deltares.nl*

HIDDE LEIJNSE

KNMI

*hidde.leijnse@knmi.nl*

ALBRECHT WEERTS

Deltares | Wageningen University & Research

*Albrecht.Weerts@deltares.nl*

REMKO UIJLENHOET

Technische Universiteit Delft

*R.Uijlenhoet@tudelft.nl*