
Twee en een half jaar landsdekkende regenkaarten uit radiostraalverbindingen van een mobiel telefonienetwerk¹

Aart Overeem², Hidde Leijnse³, Remko Uijlenhoet⁴

Alhoewel regenschatting met radiostraalverbindingen van mobiele telefonienetwerken wordt gezien als een nieuwe, veelbelovende meettechniek, moeten de mogelijkheden voor operationele regenmonitoring op grote schaal nog worden aangetoond. Deze studie draagt bij aan deze uitdaging door een dataset van 2,5 jaar aan regenkaarten af te leiden op basis van gemiddeld 3383 straalverbindingen (2044 paden) in Nederland. Kaarten zijn uitgebreid vergeleken met onafhankelijke, met regenmeterdata gecorrigeerde, radarbeelden. De meettechniek werkt vooral goed voor de zomermaanden en geeft dan zelfs betere resultaten dan kaarten gebaseerd op automatische regenmeterdata (1 regenmeter per 1000 km²). In de wintermaanden worden echter grote afwijkingen gevonden. Deze studie laat zien wat de mogelijkheden zijn van commerciële radiostraalverbindingen voor het op grote schaal in kaart brengen van regen in real time.

Inleiding

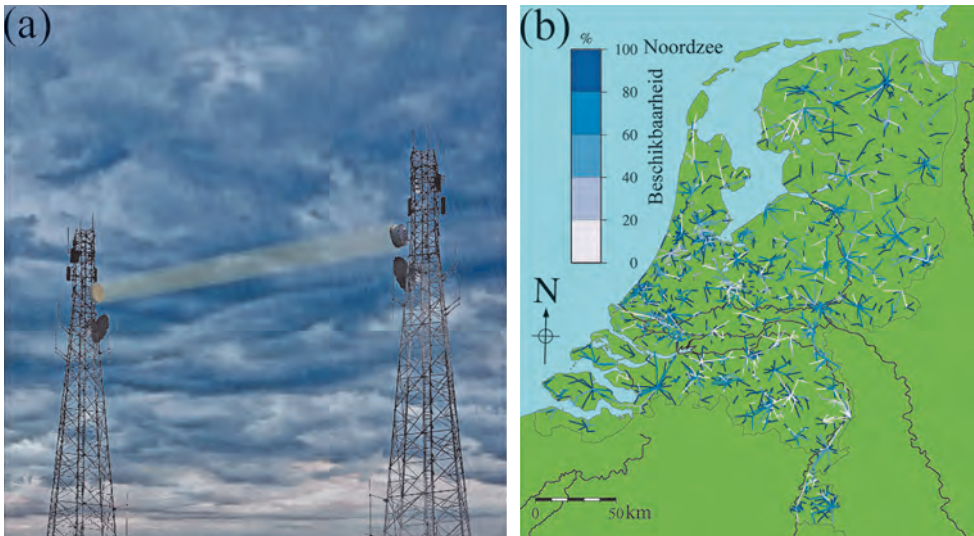
Sinds 2006 zijn enkele tientallen studies gepubliceerd waarin de mogelijkheden voor regenmeting met radiostraalverbindingen van mobiele telefonienetwerken worden aangetoond (zie bijvoorbeeld Messer e.a., 2006, Leijnse e.a., 2007, Overeem e.a., 2011, Chwala e.a., 2012, Rayitsfeld e.a., 2012, en Doumounia e.a., 2014). Radiosignalen planten zich voort van een zendende antenne van de ene telefoonmast naar de ontvangende antenne van een andere telefoonmast (afbeelding 1a). Vermogensverliezen over straalverbindingen worden door telecombedrijven gemeten en opgeslagen om de stabiliteit van hun mobiele telefonienetwerken te monitoren. Bij de gebruikte radiofrequenties (enkele tientallen GHz) zijn deze verliezen vooral het gevolg van demping door regenval. Regendruppels absorberen een gedeelte van de inkomende straling en verstrooien bovendien een gedeelte van de energie uit de bundel. De demping wordt groter naarmate het aantal en de grootte van regendruppels in de bundel tussen zender en ontvanger toeneemt. Uit de verzwakking van het signaal tussen zender en ontvanger kan de door regen veroorzaakte demping en vervolgens de pad-

1 Dit artikel is een verkorte bewerking van de Engelstalige publicatie van Overeem e.a. (2016b).

2 KNMI, De Bilt en Wageningen University & Research, Wageningen (overeem@knmi.nl)

3 KNMI, De Bilt (leijnse@knmi.nl)

4 Wageningen University & Research (remko.uijlenhoet@wur.nl)



Afbeelding 1: a) Regen dempt elektromagnetische signalen verzonden van de parabolantenne van de ene gsm-mast naar de andere. Uit de demping kan de gemiddelde regenintensiteit tussen de gsm-masten worden berekend (bron: identim/Shutterstock). b) Kaart van Nederland met de locaties van de gebruikte radiostraalverbindingen en hun gemiddelde databeschikbaarheid.

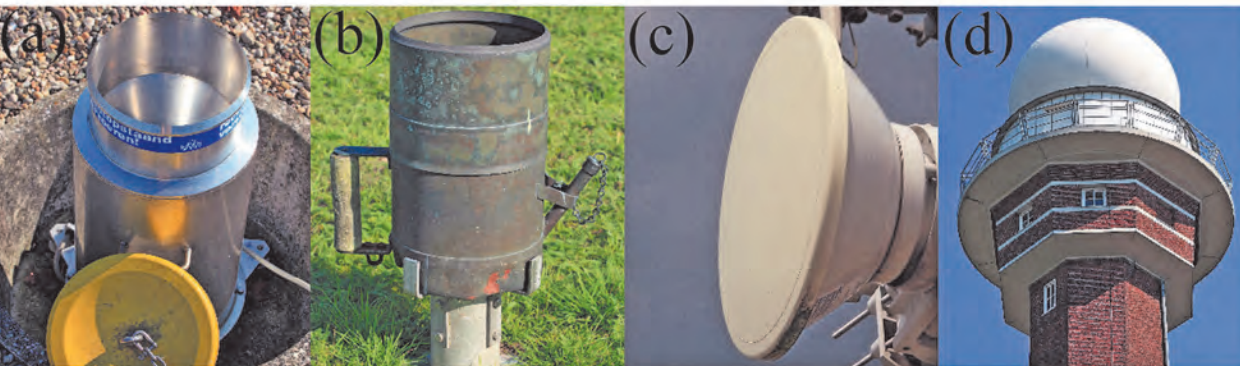
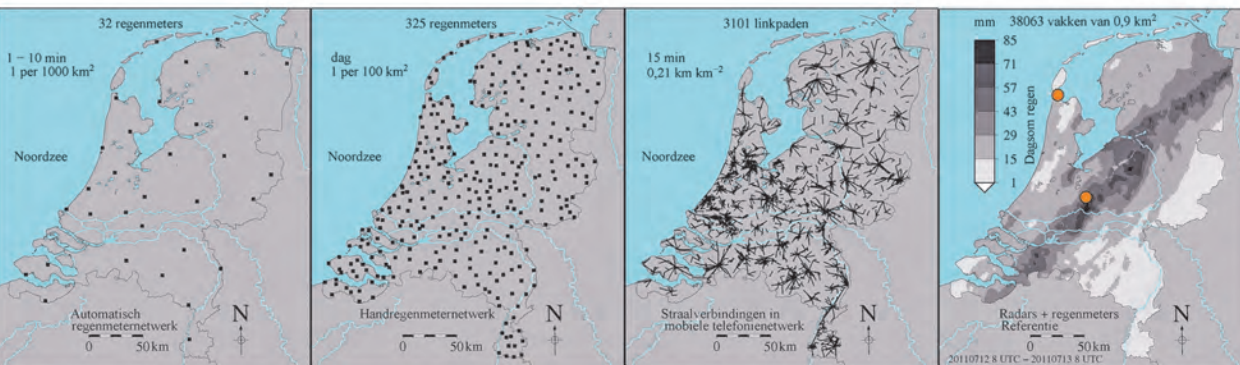
gemiddelde regenintensiteit worden berekend. Afbeelding 1b toont de locaties van de gebruikte commerciële straalverbindingen.

Deze nieuwe techniek biedt mogelijkheden voor het operationeel meten van regen. Dat is in het bijzonder van belang voor gebieden met weinig regenwaarnemingen aan de grond. In 2007 was er al op 20% van het landoppervlak van de aarde mobiel bereik (GSMA, 2012); in die gebieden kunnen in principe regenhoeveelheden worden gemeten met straalverbindingen. De wereldkaart in afbeelding 2 toont deze uitgebreide dekking in 2013. Meer dan 90% van de wereldbevolking leeft in die gebieden (GSMA, 2015). Verder is het aantal straalverbindingen doorgaans hoger dan het aantal regenmeters. Zo laat afbeelding 3 zien dat het aantal straalverbindingen in Nederland ongeveer tien keer zo groot is als het aantal KNMI-handregenmeters en ongeveer 100 keer zo groot als het aantal KNMI automatische regenmeters. Het totaal aantal bruikbare regenmeters in Nederland (d.w.z. inclusief die van andere instanties, zoals waterschappen en gemeenten) zal nog steeds veel kleiner zijn dan het aantal straalverbindingen.

De dekking en dichtheid van straalverbindingen toont de potentie van deze netwerken aan voor regenmonitoring (Gosset e.a., 2016). Desondanks zijn er nog geen operationele regenproducten op basis van deze instrumenten beschikbaar. Voordat die stap kan worden gezet, is het essentieel om de kwaliteit van de meettechniek inzichtelijk te maken. Dit artikel draagt daaraan bij, door de analyse van een grote dataset over een lange periode. Het is een vervolgstudie van Overeem e.a. (2013a, b). Zij maakten toen landsdekkende regenkaarten voor 12 dagen. Hier wordt een dataset van 2,5 jaar van gemiddeld 3383 straalverbindingen van een mobiel telefonienetwerk gebruikt om



Afbeelding 2: Wereldkaart met de mobiele telefoniedekking in 2013 (groene en paarse gebieden), zoals gerapporteerd door de GSM Association (bron: GSMA en Collins Bartholomew).



Afbeelding 3: Aantal automatische regenmeters (a; ~ 1 per 1000 km^2) en handregenmeters (b; ~ 1 per 100 km^2) van het KNMI. (c) Aantal T-Mobile NL radiostraalverbindingen (~ 1 per 10 km^2), en (d) aantal vakken waarin de weerradars meten (~ 1 per 1 km^2). Berekend over de periode januari 2011 tot en met juli 2013.

regenkaarten te maken voor heel Nederland. Veel straalverbindingen zijn "full-duplex", oftewel, ze meten in twee richtingen over hetzelfde pad. Dan hebben we twee verbindingen, maar slechts één pad. Daarom is het aantal onafhankelijke paden lager: 2044.

Verificatie van de regenkaarten vindt plaats door een vergelijking met de klimatologische radardataset van het KNMI. We onderzoeken of het gebruikte mobiele telefonienetwerk regenkaarten met vergelijkbare kwaliteit kan geven als die gebaseerd op regenmeterdata (1 regenmeter per 1000 km²). Deze benadering helpt om de potentieel toegevoegde waarde van regenkaarten afgeleid uit data van straalverbindingen ten opzichte van die op basis van regenmeterdata te beoordelen. Dit is vooral van belang voor de vele gebieden op de wereld die alleen of (vrijwel) geen regenmeters hebben. Het gaat daarbij niet alleen om ontwikkelingslanden, maar ook om stedelijke gebieden in ontwikkelde landen. Voor Nederland kunnen de data van straalverbindingen vooral interessant zijn om operationele radarneerslagproducten te verbeteren, met name in de grote steden en in gebieden die op grote afstand van de radars liggen.

Data

Regenmeterdata

Het KNMI heeft twee regenmeternetwerken, één met automatische regenmeters en één met handregenmeters. Uurlijkse (elk klokuur) en dagelijkse (8-8 UTC) regensommen werden hier verkregen van het automatische regenmeternetwerk (32 regenmeters; ~1 regenmeter per 1000 km²). Dagsommen (8-8 UTC) werden verkregen van het handregenmeternetwerk (~1 regenmeter per 100 km²).

Klimatologische radardataset

Voor de verificatie van regenkaarten afgeleid uit data van straalverbindingen is één van de twee klimatologische radardatasets van het KNMI gebruikt als referentie, namelijk die met de hoogste ruimtelijke resolutie van 0,9 km². Deze dataset met een temporele resolutie van 5 minuten is gebaseerd op de data van de twee C-band weer-radars van het KNMI (toen in De Bilt en in Den Helder). De dataset is vrijelijk beschikbaar¹. Beide KNMI-regenmeternetwerken zijn gebruikt om zo goed mogelijke regenschattingen te krijgen. Voor meer informatie zie Overeem e.a. (2009a, b) en Overeem e.a. (2011).

Data van straalverbindingen

T-Mobile NL was zo vriendelijk om ontvangen vermogens van hun Nokia en NEC straalverbindingen in hun toenmalige netwerk aan ons te verstrekken. Het betreft hier het minimum- en maximumvermogen over intervallen van 15 minuten. Naast het ontvangen vermogen werden ook de gebruikte radiofrequentie, datum en tijd van waarneming, en de coördinaten van de verzendende en ontvangende antenne gegeven. De dataset loopt van 14 januari 2011 tot 30 juli 2013, waarvan 894 dagen behoren tot de onafhankelijke verificatiedataset en 12 dagen tot de kalibratiedataset. Het verzonden vermogen is constant.

¹ Zie "Radar precipitation climatology" op <http://climate4impact.eu>

Afbeelding 1b toont de locaties en de gemiddelde databeschikbaarheid voor de paden van de straalverbindingen. Een lagere databeschikbaarheid heeft niets te maken met het al dan niet functioneren van het netwerk, maar komt door verwijdering, bijvoorbeeld wegens verglazing (vervanging door glasvezelkabels), en vervanging van straalverbindingen. Daarnaast spelen opslagproblemen bij het telecombedrijf een rol. Het gemiddelde aantal straalverbindingen en paden in de verificatiedataset is, respectievelijk, 3383 en 2044. Het minimum en maximum aantal paden is, respectievelijk, 754 en 2785. De meerderheid van de straalverbindingen is korter dan 5 km, de gemiddelde lengte bedraagt 3,6 km. De meeste straalverbindingen gebruiken een radiofrequentie tussen 37 en 40 GHz, oftewel een golflengte van iets minder dan 1 cm, dezelfde orde van grootte als een forse regendruppel.

Methode

Overeem e.a. (2016a, b) geven een uitgebreide beschrijving van het algoritme en de code om regen te meten met straalverbindingen en van de interpolatiemethode. De code, geschreven in de taal R, is vrijelijk beschikbaar op GitHub². Ook is daar een dataset van straalverbindingen van twee dagen te downloaden. Hier geven we een korte beschrijving van het algoritme en de fouten(bronnen) in regenmeting met straalverbindingen. De basis van het algoritme is gelegd in Overeem e.a. (2011)³. Overzichten van fouten en foutenbronnen worden gegeven door bijvoorbeeld Leijnse e.a. (2008) en Overeem e.a. (2016a).

Na een kwaliteitscontrole wordt voor elke straalverbinding bepaald voor welke intervallen het regent en voor welke niet. Signaalniveaus kunnen ook gedurende droge perioden dalen, bijvoorbeeld door reflectie of refractie van de bundel, of door dauwvorming op de antennes. Dit kan leiden tot overschatting van regenval. Om deze overschatting te voorkomen is het belangrijk om op een betrouwbare manier natte en droge perioden van elkaar te onderscheiden. Dat is ook van belang voor de bepaling van een juist referentieniveau, dat representatief is voor droog weer (Chwala e.a., 2012 en Doumounia e.a., 2014).

Het algoritme omvat een nat-droog classificatie, waarbij een interval van 15 minuten als nat wordt aangemerkt als de gelijktijdige daling in minimum ontvangen vermogens van nabijgelegen straalverbindingen twee drempelwaarden overschrijdt. De achterliggende gedachte van deze methode is dat regen ruimtelijk gecorreleerd is (Van de Beek e.a., 2012), en dat daarom bij regen meerdere straalverbindingen in een bepaald gebied een gelijktijdige daling in het ontvangen vermogen zullen ondervinden.

Vervolgens wordt het referentieniveau berekend op basis van de signaalniveaus van de als droog geclassificeerde intervallen. Daarna worden uitschieters verwijderd met een statistisch filter. Het principe van dit filter is dat een verbinding wordt verwijderd uit de analyse als het absolute cumulatieve verschil tussen de specifieke demping van

² <https://github.com/overeem11/RAINLINK>

³ Dit artikel is bekroond met de NHV-Hydrologieprijs 2010-2012.

die verbinding (dB km⁻¹) en die van de nabijgelegen verbindingen over de afgelopen 24 uur groter wordt dan een bepaalde drempelwaarde. Ook dit filter is gebaseerd op het feit dat regen ruimtelijk gecorreleerd is. Deze uitschieters worden waarschijnlijk veroorzaakt door niet-functionerende antennes en mogelijk door andere fenomenen. Daarna worden de gecorrigeerde ontvangen vermogens berekend: de ontvangen vermogens worden gelijkgesteld aan het referentieniveau voor de als droog geclassificeerde perioden of wanneer ze hoger zijn dan het referentieniveau.

Uit de daling in signaalniveau ten opzichte van het referentieniveau wordt de demping berekend. Demping wegens natte antennes leidt tot overschatting van de padgemiddelde regenintensiteit (Leijnse e.a., 2007). Het algoritme bevat daarom een parameter om voor deze demping te corrigeren. Een andere belangrijke onzekerheid is de bemonsteringsfrequentie en -resolutie van de signalen (Leijnse e.a., 2008). De kern van het algoritme bestaat uit de transformatie van ontvangen signaalniveaus naar padgemiddelde regenintensiteiten, gemiddeld over 15 minuten:

$$\langle R_{\min} \rangle = a \left(\frac{A_{\min} - A_a}{L} H(A_{\min} - A_a) \right)^b \quad (1)$$

$$\langle R_{\max} \rangle = a \left(\frac{A_{\max} - A_a}{L} H(A_{\max} - A_a) \right)^b \quad (2)$$

$$\langle R \rangle = \alpha \langle R_{\max} \rangle + (1 - \alpha) \langle R_{\min} \rangle \quad (3)$$

Waarbij

- A_a : Demping wegens natte antennes [dB]
- α : Bepaalt de verdeling tussen de minimum- en maximumregenintensiteit gedurende een periode van 15 minuten [-]
- A_{\min} : Minimumdemping door regen over 15 minuten [dB]
- A_{\max} : Maximumdemping door regen over 15 minuten [dB]
- a : Coëfficiënt van machtsrelatie tussen regenintensiteit en specifieke padgemiddelde demping [mm uur⁻¹ dB^{-b} km^b]
- b : Exponent van machtsrelatie tussen regenintensiteit en specifieke padgemiddelde demping [-]
- L : Padlengte van straalverbinding [km]
- $\langle R_{\min} \rangle$: Minimum padgemiddelde regenintensiteit over 15 minuten [mm uur⁻¹]
- $\langle R_{\max} \rangle$: Maximum padgemiddelde regenintensiteit over 15 minuten [mm uur⁻¹]
- $\langle R \rangle$: Padgemiddelde regenintensiteit over 15 minuten [mm uur⁻¹]

H is de Heaviside functie. Als het argument van H kleiner is dan nul, dan geldt $H = 0$, anders $H = 1$. Waarden van de coëfficiënten a en b hangen voornamelijk af van de gebruikte radiofrequentie en zijn afgeleid uit gemeten druppelgrootteverdelingen en berekeningen van elektromagnetische verstrooiing door regendruppels (Leijnse e.a., 2008). De techniek ontleent een deel van zijn kracht uit het feit dat voor de radiofrequenties die telecombedrijven gebruiken de waarde van de exponent b nooit ver van 1 afligt, wat betekent dat de bepaalde specifieke demping van het signaal

over het pad tussen zender en ontvanger (in dB km⁻¹) nagenoeg evenredig is met de padgemiddelde regenintensiteit (in mm uur⁻¹). Om het algoritme te kalibreren zijn op verbindingen gebaseerde dagsommen vergeleken met dagsommen van de referentie. Een 12-daagse kalibratiedataset van juni en juli 2011 is gebruikt om optimale parameterwaarden te bepalen: 0,34 voor α en 2,15 dB voor A_σ . Met gebruikmaking van deze optimale waarden worden gemiddelde regenintensiteiten berekend voor elke straalverbinding en voor ieder tijdsinterval van 15 minuten voor de verificatiedataset.

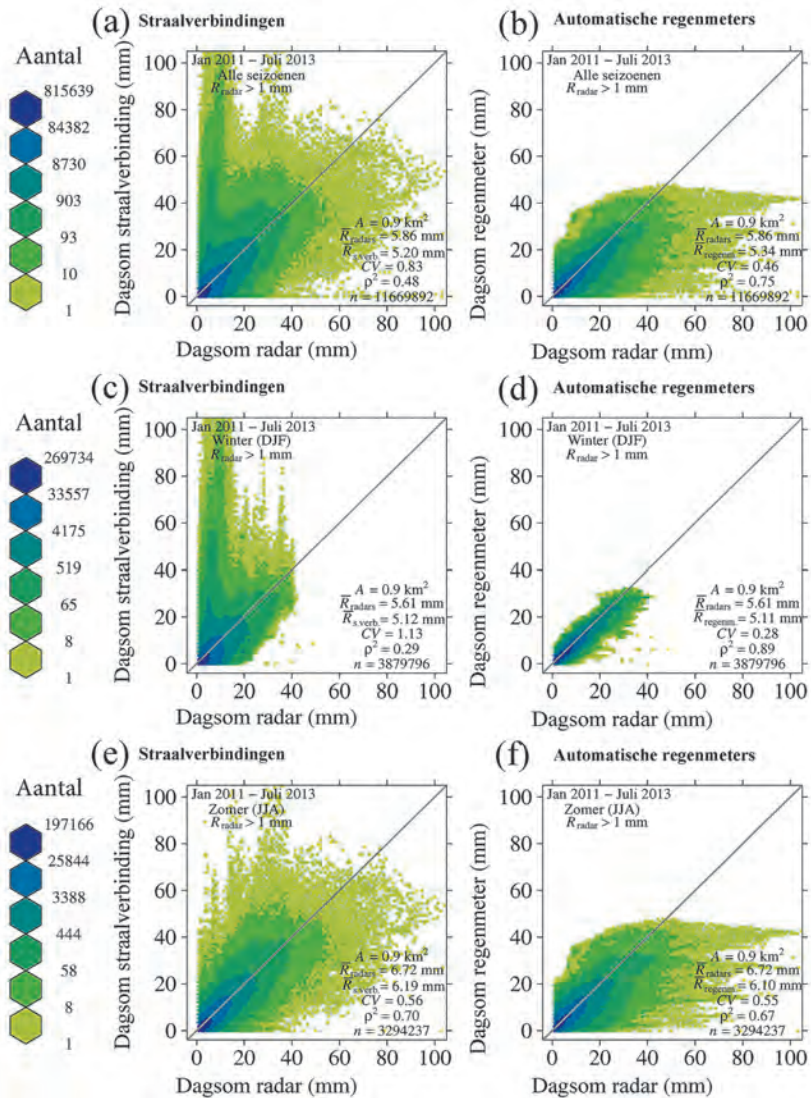
Dauwvorming op antennes leidt tot demping en dit kan leiden tot overschattingen tijdens droog weer. In deze studie wordt het algoritme uitgebreid met een statistische correctie voor dit fenomeen. Minimum en maximum ontvangen vermogens zitten naar verwachting dichtbij elkaar tijdens dauw op de antennes, omdat er een continue demping is van het signaal door de waterlaag. Deze kennis wordt aangewend om door dauw veroorzaakte overschattingen te voorkomen.

Ten slotte worden de aldus afgeleide padgemiddelde regenintensiteiten toegekend aan een punt in het midden van de betreffende straalverbinding. Via kriging wordt per tijdsinterval een geïnterpoleerde regenkaart geproduceerd op het grid van de radardata. Dezelfde interpolatiemethode wordt ook toegepast op de automatische regenmeterdata.

Resultaten

Nu wordt de kwaliteit van regenkaarten afgeleid uit data van straalverbindingen en die afgeleid uit regenmeterdata onderzocht door vergelijking met de referentie. Afbeelding 4 toont spreidingsdiagrammen van dagelijkse regensommen voor de gehele periode, de wintermaanden en de zomermaanden. De straalverbindingen laten gemiddelde onderschattingen van 8,0-11,3% zien (a, c, e). Automatische regenmeters geven veel betere dagelijkse regenkaarten voor de gehele periode en voor de wintermaanden. In de zomer is de kwaliteit van de kaarten gebaseerd op data van straalverbindingen vergelijkbaar met die op basis van de geïnterpoleerde regenmeterdata. De variatiecoëfficiënt, dat is de verhouding van de standaarddeviatie van de verschillen en de gemiddelde radarregensom, CV , is 0,56 en de determinatiecoëfficiënt, dat is de fractie van de verklaarde variantie, ρ^2 , is 0,70. Dat is een hele prestatie, aangezien het mobiele telefonienetwerk niet is ontworpen om regen te meten.

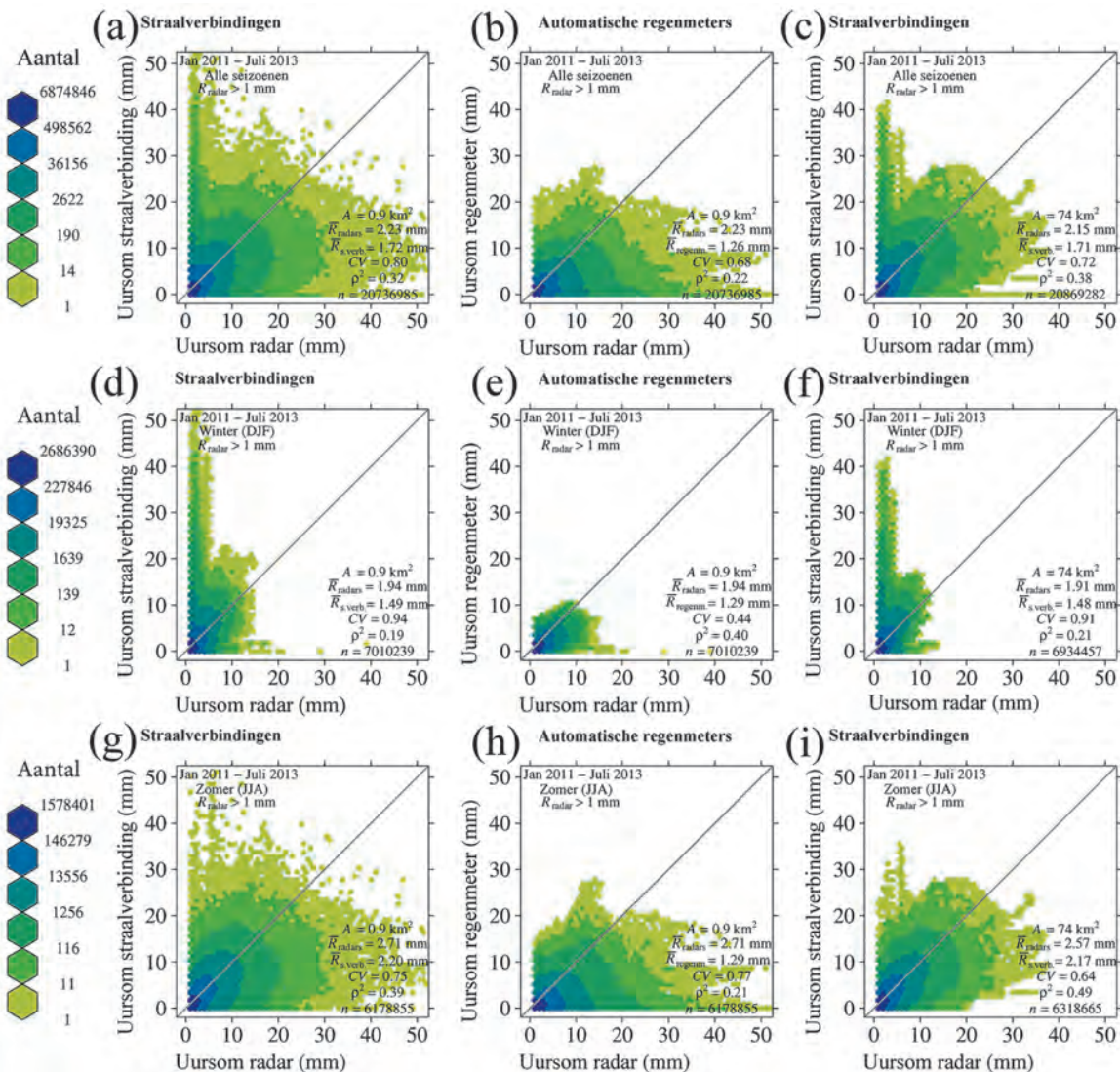
Afbeelding 5 toont de kwaliteit van uurlijkse regenkaarten. Voor korte duren is het belangrijk om op veel locaties in de ruimte te meten. Regen wordt, gemiddeld, sterk onderschat door de regenmeters, vooral in de zomer (gemiddelde onderschatting van 52,3%). Voor de straalverbindingen wordt een veel kleinere onderschatting gevonden (18,7-23,2%). Opnieuw is de kwaliteit van de kaarten gebaseerd op data van straalverbindingen lager in de winter. In de zomer zijn de variatiecoëfficiënten van regenmeters en straalverbindingen vergelijkbaar ($CV \sim 0,76$), maar is de determinatiecoëfficiënt veel hoger voor straalverbindingen ($\rho^2 = 0,39$). Dit betekent dat de kwaliteit van de uurlijkse regenkaarten op basis van data van straalverbindingen veel beter is dan die afgeleid uit regenmeterdata. Het beperkte aantal regenmeters, 32, leidt logischerwijs tot veel gemiste buien, in ieder geval ten opzichte van het grote aantal straalverbindingen.



Afbeelding 4: Spreidingsdiagrammen voor dagsommen uit regenkaarten. Verificatie van radiostraalverbindingen (linkerkolom) en automatische regenmeters (rechterkolom) tegen de referentie voor de hele periode van 2,5 jaar (boven), de wintermaanden (midden) en de zomermaanden (onder) voor een gebiedsgrootte van 0,9 km².

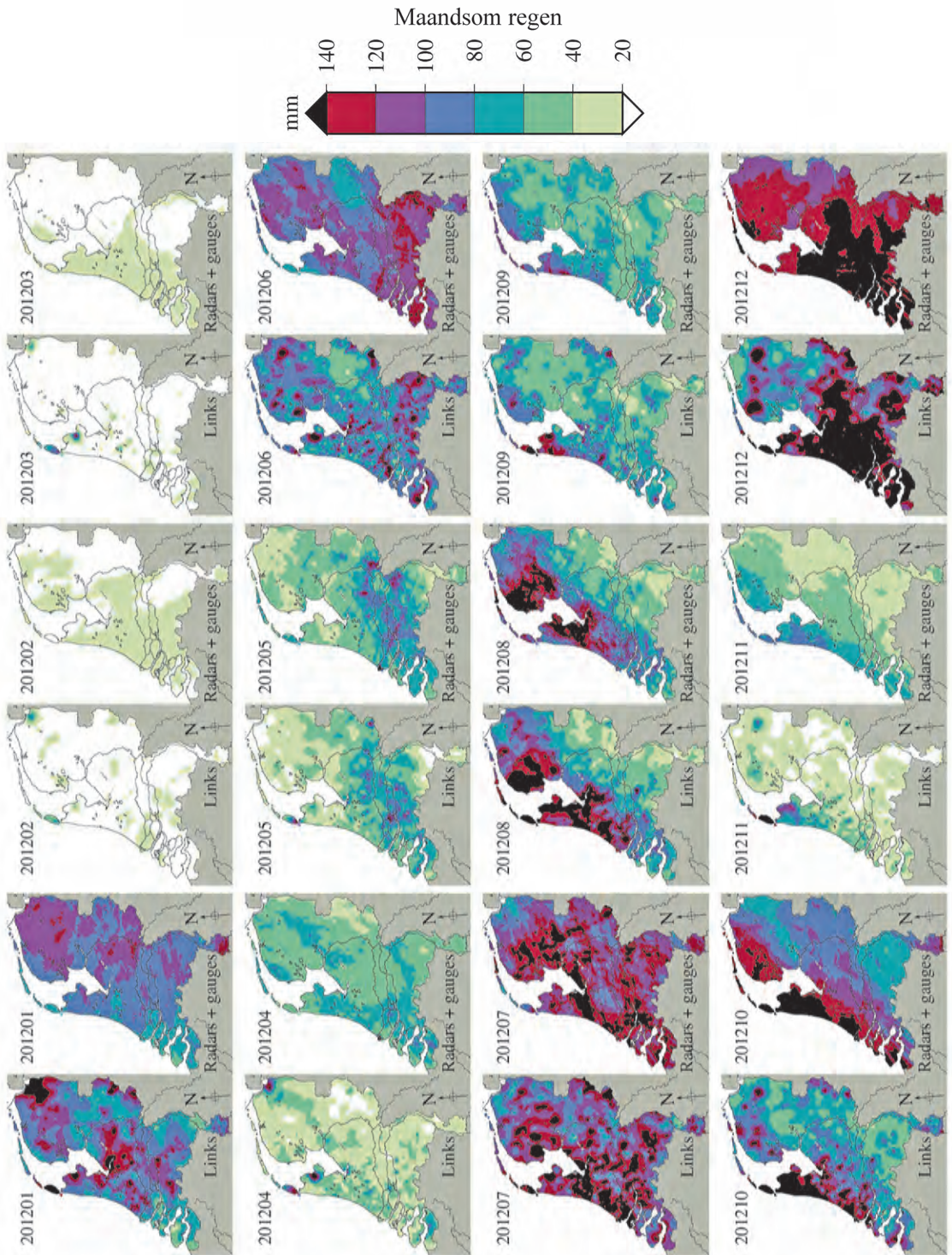
Afbeelding 5 toont voor de straalverbindingen ook de kwaliteit van uurlijkse regenkaarten op een lagere ruimtelijke resolutie van 74 km². Voor de zomer wordt een duidelijke verbetering gevonden: de variatiecoëfficiënt neemt af van 0,75 naar 0,64 en de determinatiecoëfficiënt neemt toe van 0,39 naar 0,49.

De determinatiecoëfficiënt voor regenmeters neemt af in de zomer vergeleken met de winter, voor zowel uurlijkse als dagelijkse regenval. Dit kan worden verklaard door de



Afbeelding 5: Spreidingsdiagrammen voor uursommen uit regenkaarten. Verificatie van radiostraalverbindingen (linkerkolom en rechterkolom) en automatische regenmeters (middelste kolom) tegen de referentie voor de hele periode van 2,5 jaar (boven), de wintermaanden (midden) en de zomermaanden (onder) voor een gebiedsgrootte van $0,9 \text{ km}^2$ (a, b, d, e, g, h) en voor een gebiedsgrootte van 74 km^2 voor straalverbindingen (c, f, i).

hogere ruimtelijke regenvariabiliteit in de zomer (Van de Beek e.a., 2012). De straalverbindingen tonen omgekeerde resultaten. Ze lijken minder gevoelig voor meetfouten in de zomer en dat compenseert voor interpolatiefouten wegens de hogere ruimtelijke variabiliteit. Daarnaast zullen interpolatiefouten bij straalverbindingen kleiner zijn wegens de veel hogere dichtheid vergeleken met regenmeters. Voor de straalverbindingen worden grote overschattingen gevonden in de winter, terwijl de radar dan weinig neerslag meet. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door dauwvorming op de



Afbeelding 6: Maandsommen voor het jaar 2012 op basis van straalverbindingen (linkerkolommen) en op basis van een combinatie van regenmeters en weerradars (rechterkolommen).

antennes en, met name, smeltende neerslag op het pad (Paulson en Al-Mreri, 2011) en op de antennes. Over de hele dataset van de winter wordt een systematische fout van -22,6% gevonden in uursommen, als alleen data wordt geselecteerd waarvoor de radar meer dan 1 mm heeft gemeten. Dit is mogelijk te wijten aan ijsdeeltjes, die erg kleine specifieke dempingen geven (Paulson en Al-Mreri, 2011).

Ten slotte is de kwaliteit van maandsommen onderzocht. Afbeelding 6 toont de maandelijkse regensommen voor straalverbindingen en voor de referentie voor het jaar 2012. De meeste maanden laten een behoorlijk goede overeenkomst zien. Voor de gehele periode van 2,5 jaar is die overeenkomst er voor ongeveer 50% van de maanden. Grote lokale overschattingen worden gevonden voor de straalverbindingen voor verscheidene wintermaanden, zoals voor januari 2012.

Discussie

Interpretatie van verificatie

Met deze resultaten wordt de bruikbaarheid van straalverbindingen voor het monitoren van regen in de zomer in een gematigd klimaat bevestigd. Merk op dat de verificatie is uitgevoerd voor relatief kleine ruimtelijke schalen (0,9 en 74 km²). Resultaten zullen naar verwachting verbeteren voor grotere ruimtelijke aggregaties. Verder is de (kleuren)schaal van de tellingen in de spreidingsdiagrammen logaritmisch. De spreiding lijkt groot, maar de grootste afwijkingen komen veel minder vaak voor dan de punten die rond de 1:1 lijn liggen. Het grote aantal paden, gemiddeld 2044, helpt om lokale regenval te detecteren en om betere resultaten te verkrijgen dan kaarten gebaseerd op regenmeterdata van 32 regenmeters. De kwaliteit voor uurlijkse sommen op een ruimtelijke resolutie van 0,9 km² onthult de beperkingen van straalverbindingen om regen te meten op deze resolutie, hetgeen niet verbaast gezien de gemiddelde padlengte van 3,6 km. Aan de andere kant is de kwaliteit al redelijk goed te noemen voor een resolutie van 74 km² voor uursommen en van 0,9 km² voor dagsommen.

Referentiedata

In de verificatie wordt aangenomen dat de klimatologische radardataset de waarheid is. Echter, radars meten op grotere hoogte boven het aardoppervlak en in een volume (waarvoor deels gecompenseerd wordt door de combinatie met regenmeters), terwijl de straalverbindingen dichtbij het aardoppervlak meten over een pad. Dit veroorzaakt representativiteitsverschillen. Daarnaast heeft de radardataset zijn beperkingen. Zo melden Overeem e.a. (2009b) een onderschatting tijdens kortdurende extreme regen.

Algoritme

Alhoewel het algoritme een fysische basis heeft, bevat het ook verscheidene empirisch afgeleide methoden en parameters. Dit zijn echter geen pure black box modellen. Ze maken bijvoorbeeld gebruik van het feit dat regenval ruimtelijk gecorreleerd is. Zulke statistische benaderingen zijn gekozen, omdat slechts beperkte informatie van de straalverbindingen beschikbaar is, namelijk minimum en maximum ontvangen vermogens over intervallen van 15 minuten. Een meer fysisch georiënteerd algoritme zou ontwikkeld kunnen worden als de ontvangen vermogens met veel hogere frequentie

worden opgeslagen, bijvoorbeeld met 1 Hz, en als er aanvullende weerwaarnemingen beschikbaar zijn in de buurt van de straalverbindingen. Verder zijn de meeste parameters van het algoritme gebaseerd op data van een andere periode of op de 12 dagen van de kalibratiedataset. Alleen de drempelwaarde gebruikt voor het dauwfilter is gebaseerd op de gehele verificatiedataset. Uitgebreide discussies over het algoritme en de toepassingsmogelijkheden zijn te vinden in Overeem e.a. (2016a, b).

Operationele toepassing

Om een operationele toepassing en het opschalen van deze nieuwe meettechniek te bespoedigen, moeten lange tijdreeksen van verschillende netwerken in diverse klimaten worden geanalyseerd. Deze studie vormt daartoe een eerste aanzet. Alhoewel de wereldwijde mobiele infrastructuur overeenkomsten vertoont, zijn er ook grote verschillen. De bemonstering, gebruikte radiofrequenties en padlengtes kunnen bijvoorbeeld verschillen en het verzonden vermogen kan bijvoorbeeld fluctueren in plaats van constant zijn. Analyses voor kleinere datasets zijn al wel gedaan voor bijvoorbeeld Burkina Faso (Doumounia e.a., 2014), Duitsland (Chwala e.a., 2012), Israël (zie bijvoorbeeld Messer e.a., 2006, Rayitsfeld e.a., 2012) en Kenya (Hoedjes e.a., 2014). In het algemeen is het vrij lastig om data van straalverbindingen te bemachtigen.

Naast regenmeting met alleen straalverbindingen, zou het ook waardevol kunnen zijn om data van diverse bronnen te combineren of om de straalverbindingen te gebruiken voor de validatie van satellietneerslagproducten. Zo zouden radardata of satellietdata kunnen worden gecorrigeerd met data van straalverbindingen. De reenschattning met satellieten is vaak indirect of de temporele resolutie laat te wensen over, waardoor de reenschattningen doorgaans minder nauwkeurig zijn.

Conclusies

De potentie van straalverbindingen uit mobiele telecommunicatienetwerken voor regenmonitoring op grote schaal is aangetoond voor een uitgebreide dataset van 2,5 jaar uit Nederland. In de zomer hebben dagelijkse regenkaarten die zijn afgeleid uit data van straalverbindingen een vergelijkbare kwaliteit als die afgeleid uit regenmeterdata, terwijl de uurlijkse regenkaarten zelfs veel beter zijn. Het grote aantal paden, (2044), kan compenseren voor de lagere kwaliteit van de reenschattningen, en daardoor ruimtelijk betere resultaten geven dan het kleine aantal, 32, meer nauwkeurige metingen van regenmeters. In de winter zijn de regenkaarten afgeleid uit regenmeterdata duidelijk beter. Het goede resultaat voor de zomer in een gematigd klimaat biedt perspectief voor toepassing op grote schaal in ontwikkelingslanden in (sub)tropische klimaten, waar de dichtheid van automatische regenmetersnetwerken doorgaans lager zal zijn dan die van het KNMI-netwerk. Aan de andere kant kan de dichtheid van het netwerk van straalverbindingen daar ook lager zijn, waardoor de kwaliteit van kaarten lager kan worden dan hier.

Regenmeting met straalverbindingen past in de opmars van weerinformatie via crowdsourcing (Muller e.a., 2015). Alhoewel hun kwaliteit in het algemeen lager zal zijn dan die van traditionele waarnemingen, kan hun (veel) hogere resolutie in tijd en ruimte resulteren in belangrijke aanvullende informatie.

We hopen dat onze studie bijdraagt aan het ontwikkelen van een operationeel regenproduct op basis van data van het mobiele telefonienetwerk. Brauer e.a. (2016) gebruiken een jaar data van straalverbindingen voor hydrologische simulaties in het stroomgebied van de Hupselse Beek en bevestigen de bruikbaarheid. Dit biedt perspectief voor reductie van materiële schade en slachtoffers in die gebieden met weinig regenmetingen elders ter wereld, zoals in ontwikkelingslanden.

Voor Nederland ligt de meerwaarde van straalverbindingen vooral in het verder verbeteren van de operationele neerslagproducten op basis van radars (en regenmeters), speciaal in de grote steden en in gebieden die op grote afstand van de radars liggen (Overeem e.a., 2012). Voor kwantitatieve regenschattingen is een combinatie weerradar- en regenmeterdata onontbeerlijk. De dichtheid van automatische regenmeternetwerken is doorgaans beperkt, waardoor vaak dezelfde correctiefactor over het hele land wordt toegepast. Hierdoor blijft de kwaliteit van realltime radarbeelden lokaal tamelijk beperkt, terwijl die voor het stedelijke en regionale waterbeheer van groot belang kan zijn. Het grote aantal straalverbindingen maakt het in principe mogelijk om de radarbeelden ruimtelijk te corrigeren, waardoor de kwaliteit daarvan behoorlijk toe zou kunnen nemen. Dit vereist echter wel een betrouwbare realtime levering van data van straalverbindingen, waar telecombedrijven waarschijnlijk leveringskosten aan zullen verbinden. Daarnaast is het, vanwege de afname van het aantal straalverbindingen in Nederland wegens verglazing, gewenst om de data van alle vier de telecombedrijven te gaan gebruiken. Het totaal aantal paden van alle vier telecombedrijven samen zal naar verwachting minstens 1000 bedragen tot 2025; in rurale gebieden en minder ontwikkelde landen zal verglazing waarschijnlijk maar beperkt plaatsvinden (R. Koppelaar, persoonlijke communicatie, 2016).

Het KNMI streeft naar een zo goed mogelijk landsdekkend neerslagproduct, gebaseerd op data van radars, regenmeters, en satellieten en uiteindelijk ook op data verkregen via crowdsourcing. Hiertoe wordt de integratie van regendata van verschillende bronnen op dit moment verder onderzocht in een promotieonderzoek. Overigens kan met de nieuwe KNMI-weerradars naar verwachting al een aanzienlijke verbetering worden bereikt.

Dankbetuiging

We bedanken Ronald Kloeg en Ralph Koppelaar van T-Mobile NL voor het leveren van de data van radiostraalverbindingen. Dit onderzoek is financieel ondersteund door Technologiestichting STW (project 11944). We bedanken Arnaut van Loon voor zijn commentaar.

Literatuur

Brauer, C. C., A. Overeem, H. Leijnse en R. Uijlenhoet (2016) The effect of differences between rainfall measurement techniques on groundwater and discharge simulations in a lowland catchment; in: *Hydrological Processes*, vol 30, pag 3885-3900.

Chwala, C., Gmeiner, A., Qiu, W., Hipp, S., Nienaber, D., Siart, U., Eibert, T., Pohl, M., Seltmann, J., Fritz, J. en H. Kunstmann (2012) Precipitation observation using microwave backhaul links in the alpine and pre-alpine region of Southern Germany; in: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol 16, pag 2647-2661.

Doumounia, A., M. Gosset, F. Cazenave, M. Kacou en F. Zougmore (2014) Rainfall monitoring based on microwave links from cellular telecommunication networks: First results from a West African test bed; in: *Geophysical Research Letters*, vol 41, pag 6016-6022.

Gosset, M., e.a. (2016) Improving rainfall measurement in gauge poor regions thanks to mobile telecommunication networks; in: *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol 97, pag ES49-ES51.

GSM Association (2012) Universal Access. How mobile can bring communications to all, Dublin, Ireland & London, U.K., beschikbaar via <http://www.gsma.com/publicpolicy/wp-content/uploads/2012/03/universalaccessfullreport.pdf>.

GSM Association (2015) GSM: About us, beschikbaar via <http://www.gsma.com/aboutus/gsm-technology/gsm/>

Hoedjes, J. C. B., A. Kooiman, B. H. P. Maathuis, M. Y. Said, R. Becht, A. Limo, M. Mumo, J. Nduhiu-Mathenge, A. Shaka en B. Su (2014) A conceptual flash flood early warning system for Africa, based on terrestrial microwave links and flash flood guidance; in: *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol 3, pag 584-598.

Leijnse, H., R. Uijlenhoet en J. N. M. Stricker (2007) Rainfall measurement using radio links from cellular communication networks; in: *Water Resources Research*, vol 43, W03201.

Leijnse, H., R. Uijlenhoet en J. N. M. Stricker (2008) Microwave link rainfall estimation: Effects of link length and frequency, temporal sampling, power resolution, and wet antenna attenuation; in: *Advances in Water Resources*, vol 31, pag 1481-1493.

Messer, H. A., A. Zinevich en P. Alpert (2006) Environmental monitoring by wireless communication networks; in: *Science*, vol 312, pag 713.

Muller, C. L., L. Chapman, S. Johnston, C. Kidd, S. Illingworth, G. Foody, A. Overeem en R. R. Leigh (2015) Crowdsourcing for climate and atmospheric sciences: Current status and future potential; in: *International Journal of Climatology*, vol 35, pag 3185-3203.

Overeem, A., I. Holleman en A. Buishand (2009a) Derivation of a 10-year radar-based climatology of rainfall; in: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol 48, pag 1448-1463.

Overeem, A., T. A. Buishand en I. Holleman (2009b) Extreme rainfall analysis and estimation of depth-duration-frequency curves using weather radar; in: *Water Resources Research*, vol 45, W10424.

Overeem, A., H. Leijnse en R. Uijlenhoet (2011) Measuring urban rainfall using microwave links from commercial cellular communication networks; in: *Water Resources Research*, vol 47, W12505.

Overeem, A., H. Leijnse en R. Uijlenhoet (2012) Quantitative precipitation estimation using commercial microwave links; in: R.J. Moore, S.J. Cole en A.J. Illingworth (red) *Weather Radar and Hydrology*, Proceedings of a symposium held in Exeter, UK, April 2011; IAHS Publ. 351, IAHS Press, Wallingford, Oxfordshire, U.K., pag 129-134.

Overeem, A., H. Leijnse en R. Uijlenhoet (2013a) Country-wide rainfall maps from cellular communication networks; in: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol 110, pag 2741-2745.

Overeem, A., H. Leijnse en R. Uijlenhoet (2013b) Landsdekkende regenkaarten uit het mobiele telefonienetwerk; in: *WT-Afvalwater*, vol 13, pag 194-203.

Overeem, A., H. Leijnse en R. Uijlenhoet (2016a) Retrieval algorithm for rainfall mapping from microwave links in a cellular communication network; in: *Atmospheric Measurement Techniques*, vol 9, pag 2425-2444.

Overeem, A., H. Leijnse en R. Uijlenhoet (2016b) Two and a half years of country-wide rainfall maps using radio links from commercial cellular telecommunication networks; in: *Water Resources Research*, vol 52, pag. 8039-8065.

Paulson, K. en A. Al-Mreri (2011) A rain height model to predict fading due to wet snow on terrestrial links; in: *Radio Science*, vol 46, RS4010.

Rayitsfeld, A., R. Samuels, A. Zinevich, U. Hadar en P. Alpert (2012) Comparison of two methodologies for long term rainfall monitoring using a commercial microwave communication system; in: *Atmospheric Research*, vol 104-105, pag 119-127.

Van de Beek, C. Z., H. Leijnse, P. J. J. F. Torfs en R. Uijlenhoet (2012) Seasonal semi-variance of Dutch rainfall at hourly to daily scales; in: *Advances in Water Resources*, vol 45, pag 76-85.

Two and a half years of country-wide rainfall maps using radio links from a cellular telecommunication network

Aart Overeem, Hidde Leijnse, Remko Uijlenhoet

Although rainfall estimation employing microwave links from cellular telecommunication networks is regarded as a promising new measurement technique, its opportunities for operational rainfall monitoring at a large scale still need to be demonstrated. This study contributes to this challenge by deriving 2.5 years of rainfall maps from, on average, 3383 microwave links (2044 link paths) for the Netherlands. Maps are extensively verified with independent gauge-adjusted radar data. The measurement technique works well, especially in the summer months, and then even improves upon maps based on automatic rain gauge data (1 gauge per 1000 km²). In contrast, large deviations are found in the winter months. This study shows the potential of commercial microwave links for real-time rainfall mapping at a large scale.
