

# Landsdekkende regenkaarten uit het mobiele telefonienetwerk<sup>a</sup>

Auteurs: A. Overeem<sup>1,2\*</sup>, H. Leijnse<sup>2</sup>, R. Uijlenhoet<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Leerstoelgroep Hydrologie en Kwantitatief Waterbeheer,

Wageningen University, Droevendaalsesteeg 3, 6708 PB Wageningen, Nederland

<sup>2</sup> Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), Utrechtseweg 297, 3731 GA De Bilt, Nederland

\*aart.overeem@wur.nl

<sup>a</sup> Dit artikel is een vertaling van: A. Overeem, H. Leijnse, R. Uijlenhoet, 2013. Country-wide rainfall maps from cellular communication networks, *Proc. Nat. Acad. Sciences*, 110, 2741-2745, doi:10.1073/pnas.1217961110. PNAS is not responsible for the accuracy of this translation.

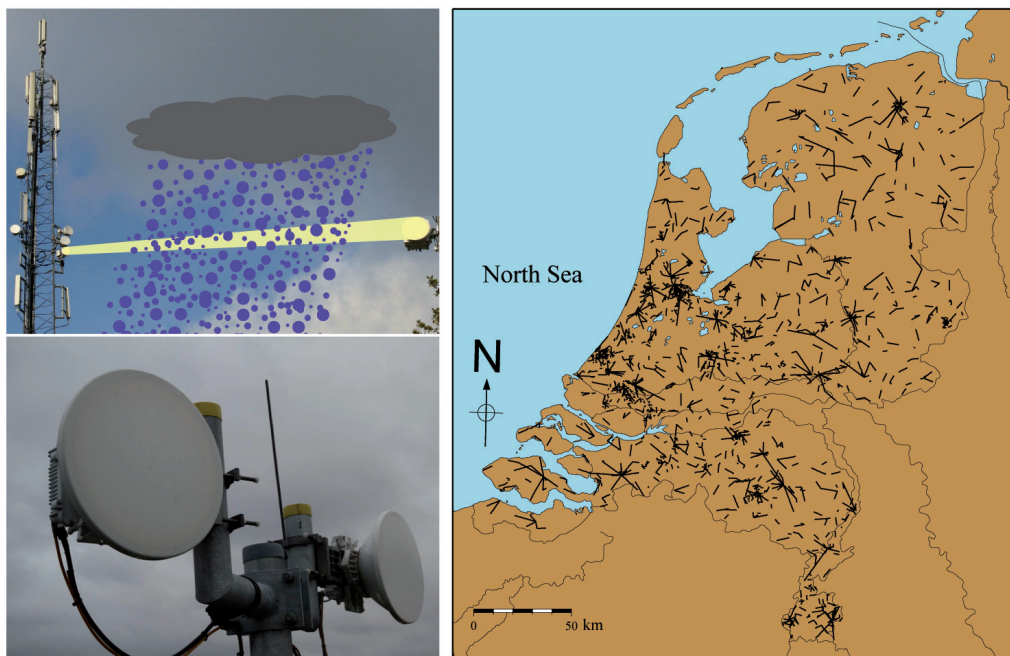
**Trefwoorden:** regenmeters, radiostraalverbindingen, klimaatmodellen, regenkaarten, telefonienetwerken

*Nauwkeurige en tijdige neerslagwaarnemingen aan het aardoppervlak zijn cruciaal voor het waterbeheer, de landbouw, de weersverwachting, het klimaatonderzoek en voor grondvalidatie van neerslagschattingen met satellieten. Echter, het overgrote deel van de aarde ontbeert deze waarnemingen en in veel gebieden neemt de dichtheid van het regenmeternetwerk in rap tempo af. Dit kan in potentie worden tegengegaan door het gebruik van ontvangen vermogens van het enorme aantal radiostraalverbindingen dat wereldwijd wordt toegepast in commerciële mobiele telefonienetwerken. Radiosignalen propageren langs deze verbindingen van een zendende antenne van de ene telefoonmast naar de ontvangende antenne van een andere telefoonmast. Uit de verzwakking van het signaal tussen zender en ontvanger kan de door regen veroorzaakte demping en vervolgens de padgemiddelde regenintensiteit worden berekend. Hier laten we zien hoe een dergelijk netwerk kan worden gebruikt om de ruimte-tijd dynamiek van regenval in kaart te brengen voor een heel land (Nederland, ~35.500 km<sup>2</sup>), gebaseerd op een ongekend aantal verbindingen (~2.400) en een methode die in realtime zou kunnen worden toegepast. Dit toont het potentieel aan van zulke netwerken voor het realtime monitoren van regen, met name in die gebieden van de wereld waar weerradars en regenmeters vrijwel afwezig zijn.*

---

## Introductie

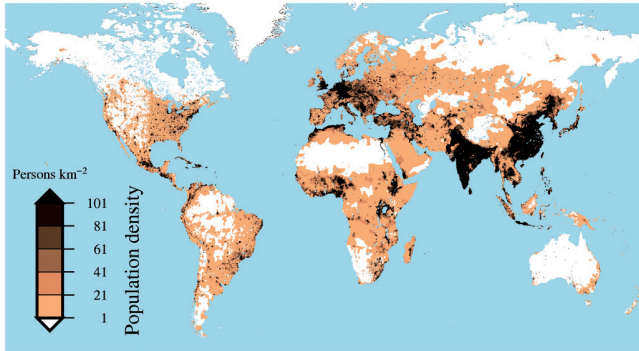
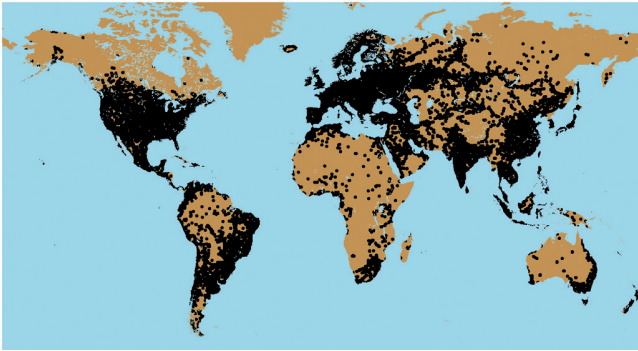
Het sterk afnemende aantal regenmeters in Europa, Zuid-Amerika en Afrika (grofweg 50% afname in de periode 1989-2006 voor GPCC v.5.0 (1,2)), alsook in Azië (ongeveer 50% afname in aantal geldige dagelijkse rapportages in de periode 2000-2007 voor APHRDITE (3)) en daarbij de erg beperkte omvang van het Afrikaanse waarnemnetwerk (4), vraagt om alternatieve bronnen van regeninformatie aan de grond. Radiostraalverbindingen van commerciële mobiele telefonienetwerken zouden gebruikt kunnen worden om regen te monitoren (5,6). Radiosignalen langs zulke verbindingen propageren van de zendende antenne van de ene telefoonmast naar de ontvangende antenne van een andere telefoonmast (figuur 1, linker paneel). Uit de verzwakking van het signaal tussen zender en ontvanger kan de door regen veroorzaakte demping en vervolgens de padgemiddelde regenintensiteit worden berekend (5-10).



**Figuur 1: Foto's en locaties van commerciële radiostraalverbindingen. Linksboven: regen dempt het elektromagnetische signaal dat wordt verzonden van de paraboolantenne van de ene telefoonmast naar die van de andere. Linksonder: een close-up van twee antennes. Rechts: kaart van Nederland met de locaties van de gebruikte 1.751 paden van 2.902 commerciële radiostraalverbindingen voor de validatie (zwarte lijnen).**

Figuur 2 (bovenste paneel) laat zien dat mobiele telefonienetwerken grote delen van het landoppervlak van de aarde bedekken (20% in 2007 (11)). Deze netwerken hebben een hoge dichtheid in stedelijke gebieden en worden op uitgebreide schaal gebruikt in ontwikkelingslanden, opkomende economieën en ontwikkelde landen. Figuur 2 (onderste paneel) toont aan dat de dekking van mobiele telefonienetwerken samenvalt met hogere bevolkingsdichtheden. Tegenwoordig bedekken deze netwerken de gebieden waar meer dan 90% van de wereldbevolking woont (12). Daarnaast heeft ongeveer 75% van de mensen toegang tot een mobiele telefoon (13). Omdat de eigenschappen van commerciële mobiele telefonienetwerken wereldwijd gelijksoortig zijn, hebben deze netwerken een grote potentie om regen te monitoren. Bovendien zouden op radiostraalverbindingen gebaseerde regenschattingen kunnen gaan dienen voor grondvalidatie van of aanvulling op satellietwaarnemingen boven land en zijn ze veelbelovend voor assimilatie in numerieke weersmodellen en overstromingsmodellen, alsook voor vergelijking met klimaatmodellen. Voor landen die over weerradars beschikken zou het mogelijk zijn om radarbeelden te verbeteren door combinatie met data van radiostraalverbindingen, met name om regenschattingen te verbeteren op ver van de radars gelegen locaties. In het algemeen zal het aantal radiostraalverbindingen in een land veel groter zijn dan het aantal automatische, of zelfs dagelijkse, regenmeters en dat geeft nieuwe mogelijkheden om radardata te corrigeren.

Hier laten we zien hoe een commercieel mobiel telefonienetwerk kan worden gebruikt om de ruimtetijd dynamiek van regenval voor een heel land in kaart te brengen, gebaseerd op ongeveer 2.400 radiostraalverbindingen en een methode die in realtime zou kunnen worden toegepast. Hiertoe zijn ontvangen vermogens verkregen van een netwerk dat Nederland bedekt (35.500 km<sup>2</sup>). De beschikbare data zijn minimum en maximum ontvangen vermogens over intervallen van 15 minuten, gebaseerd op



**Figuur 2: Wereldkaarten van mobiele telefoniedekking en bevolkingsdichtheid. Boven: geschatte mobiele telefoniedekking gebaseerd op data verzameld door gebruikers van een Android applicatie over de periode september 2009 - augustus 2012 (data ter beschikking gesteld door opensignal.com). Onder: bevolkingsdichtheid in 2000 (aangepast zodat het overeenkomt met VN totalen). Gebruikte dataset: Gridded Population of the World Version 3 (28).**

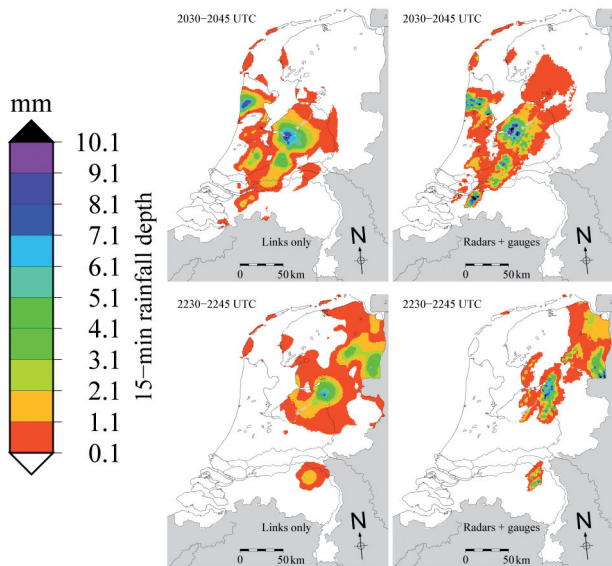
10 Hz bemonstering en gemeten met een precisie van 1 dB. Er wordt een 12-daagse kalibratie- en een 12-daagse validatiedataset over de periode juni tot september 2011 gebruikt. Vermogensverliezen over radiostraalverbindingen worden gemeten en opgeslagen door telecombedrijven om de stabiliteit van hun mobiele telefonienetwerken te monitoren. Bij de gebruikte radiofrequenties 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 toeneemt. Figuur 1 (rechter paneel) toont de locaties van de gebruikte commerciële radiostraalverbindingen. De radiostraalverbindingen dekken een groot deel van het land af, hoewel ze niet homogeen over het land zijn verdeeld. In stedelijke gebieden zijn de verbindingen het kortst en de dichtheden het grootst. Overigens vormen deze verbindingen maar een deel van het netwerk van één van de drie telecombedrijven in Nederland. Het totale aantal paden in Nederland is ongeveer 5.000 voor dit bedrijf en tenminste 8.000 voor alle drie de bedrijven samen (vergeleken met ~325 dagelijkse en ~32 automatische, d.w.z. 10-minuten, regenmeters van het KNMI). In veel gevallen meten de radiostraalverbindingen in beide richtingen over hetzelfde pad. De verbindingen meten meestal op een hoogte van tien tot enkele tientallen meters boven het aardoppervlak, gebruiken frequenties van ongeveer 13 tot 40 GHz (met name 37-40 GHz) en hebben een gemiddelde lengte van 3,1 km.

## Resultaten en Discussie

Voor het gebruikte mobiele telefonienetwerk wordt het vermogensverlies verkregen uit de afname in het ontvangen vermogen, waarbij het verzonden vermogen vrijwel constant is ( $\pm 0,2$  dB). De ontvangen vermogens moeten worden gecorrigeerd alvorens nauwkeurige padgemiddelde regenintensiteiten kunnen worden verkregen. Hoewel vermogensverliezen tijdens droge perioden meestal kleiner zijn dan die tijdens natte perioden, treden ze wel regelmatig op en kunnen ze resulteren in een overschatting van de regenintensiteit wanneer ze niet worden verdisconteerd. Hiertoe wordt een methode toegepast om niet-

gewenste signaalfluctuaties te verwijderen. Bovendien wordt een filter toegepast om een verbinding te verwijderen wanneer haar ontvangen vermogen teveel afwijkt van die van de omliggende verbindingen over de afgelopen 24 uur (zie bijlage 'Materialen en Methoden').

Demping langs de verbinding wordt berekend uit het verschil tussen het gecorrigeerde signaalniveau en het referentieniveau (6,8,14), dat representatief is voor droog weer gedurende de voorgaande 24 uur. Padgemiddelde regenintensiteiten worden berekend uit de minimum en maximum uitdoving voor elke 15 minuten. Een gedeelte van de daling in het vermogen wordt veroorzaakt door waterdruppels op de antenne. Indien hier niet voor wordt gecorrigeerd leidt dit tot een overschatting van de demping en daardoor tot een overschatting van de padgemiddelde regenintensiteit. Het algoritme om regen te berekenen omvat een correctie voor dit fenomeen. De maximale fout veroorzaakt door veranderingen in specifieke vochtigheid kan dezelfde orde van grootte aannemen als de resolutie, d.w.z. 1 dB, voor de wereldwijd gebruikte frequenties voor radiostraalverbindingen, d.w.z. 7-40 GHz (15). Deze fout wordt beïnvloed door de grootte van de specifieke uitdoving veroorzaakt door waterdamp en de relatie tussen uitdoving en regenintensiteit. Beiden zijn afhankelijk van de gebruikte frequentie. Een met regenmeter-data gecorrigeerde radardataset wordt gebruikt om het algoritme te kalibreren en de op data van radiostraalverbindingen gebaseerde regenkaarten te valideren (zie bijlage 'Materialen en Methoden'). Overigens zijn de radiostraalverbindingen in het algemeen niet bruikbaar voor het meten van niet-smeltende vaste neerslag (16).



**Figuur 3: Ruimte-tijd dynamiek van regenhoeveelheden over 15 minuten (twee panelen per tijdstap) van radiostraalverbindingen (linker paneel) en radars + regenmeters (rechter paneel) voor 10 september 2011 2030-2045 en 2230-2245 UTC (validatie). Filmpje voor 10 september 2011 1845 - 2315 UTC is verkrijgbaar via <http://www.pnas.org/content/suppl/2013/01/29/1217961110.DCSupplemental/sm01.mp4>. Gebaseerd op 6% minder paden dan het gemiddelde aantal paden voor de 12-daagse validatiedataset.**

De 15-minuutsummen worden gebruikt om landelijke regenkaarten te verkrijgen. Om ruimtelijke interpolatie te vergemakkelijken, wordt aangenomen dat de padgemiddelde regenintensiteiten puntmetingen zijn. De waarde van de padgemiddelde regenhoeveelheid wordt toegekend aan het midden van de verbinding. De regensommen worden geïnterpoleerd met gebruikmaking van de geostatistische methode "ordinary kriging" (17) om regenkaarten te verkrijgen. Figuur 3 toont een voorbeeld van op radiostraalverbindingen en op radar gebaseerde landelijke regenkaarten van 15-minuutsummen van 10 september 2011 1845 - 2315 UTC, een onafhankelijke validatie. Deze regenkaarten zijn alleen gebaseerd op data van gemiddeld 2.272 radiostraalverbindingen (gemiddeld 1.420 paden, waarvan veel in beide richtingen). Regengebieden trekken van het zuidwesten naar het noordoosten van het land. De globale verandering van regenvelden kan nauwkeurig worden afgeleid uit de data van radiostraalverbindingen. Individuele buien kunnen vaak worden herkend door het mobiele telefonienetwerk. Hoewel lokale ver-

schillen optreden vergeleken met op radardata gebaseerde sommen is de algemene overeenkomst goed, met name als wordt bedacht dat de verbindingen niet zijn ontworpen om als padgemiddelde regenmeters te dienen. Dit voorbeeld bevestigt de potentie van radiostraalverbindingen voor het monitoren van regenval op korte tijdschalen en dat is bijzonder relevant voor gebieden zonder weerradar en/of regenmeterdata.

De regenkaarten van 15-minuutsummen van de 12-daagse validatiedataset worden opgeteld tot dagelijkse regenkaarten en vergeleken met de op radar gebaseerde accumulaties in figuur 4. Merk op dat de radar complete dekking geeft over Nederland, met bovendien een meting per 1 km<sup>2</sup> elke 5 minuten, terwijl het mobiele telefonienetwerk elke 15 minuten waarnemingen voor gemiddeld 1.514 paden geeft met een gemiddelde lengte van 3,1 km. Hoewel de radar veel meer detail toont in de dagelijkse regensommen komen de regenpatronen van de verschillende waarneemsystemen voor de meeste dagen goed overeen. De kwaliteit van de 12-daagse op radiostraalverbindingen gebaseerde regenkaarten wordt bevestigd door het linker paneel van figuur 5: de systematische fout is vrijwel nul, de variatiecoëfficiënt (d.w.z. de verhouding van de standaarddeviatie van de verschillen en de gemiddelde radarregensom,  $CV$ ) is 0,53 en de determinatiecoëfficiënt (d.w.z. de fractie van de verklaarde variantie,  $\rho^2$ ) is 0,73. Figuur 5 toont ook een spreidingsdiagram met dichtheden voor de regenkaarten met 15-minuutsummen van de 12-daagse validatiedataset (rechter paneel). De regenhoeveelheden zijn gemiddeld in de ruimte. Een gebiedsgrootte van 81 km<sup>2</sup> (d.w.z. 9 km × 9 km, de grootte van een kleine stad) is gekozen om representativiteitsverschillen in ruimte en tijd te beperken. De systematische fout is vrijwel nul,  $CV$  is 1,13 en  $\rho^2$  is 0,49.

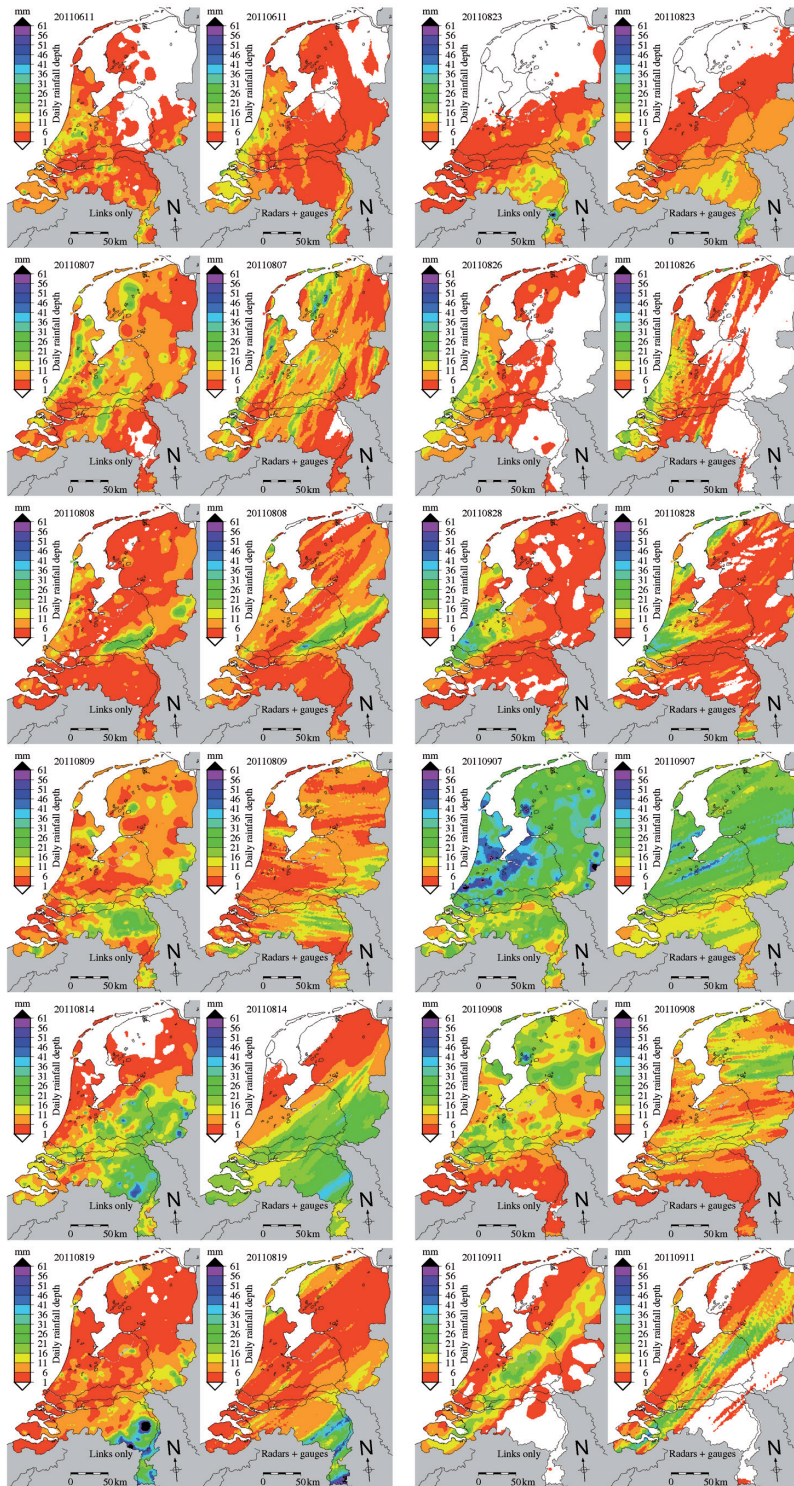
## Conclusies

De resultaten bevestigen de bruikbaarheid van radiostraalverbindingen voor het instantaan monitoren van regenval over grote gebieden. Merk op dat de beperkingen van de data van de radiostraalverbindingen die aan ons ter beschikking waren gesteld m.b.t. precisie (1 dB), aantal waarnemingen in de tijd (d.w.z. minimum en maximum ontvangen vermogen over 15 minuten), en gebruikte ruimtelijke interpolatie (gebaseerd op punten i.p.v. paden), in geen geval optimaal zijn. Hoewel sommige mobiele telefonienetwerken een grovere precisie hebben of alleen maar een instantane waarde per 15 minuten opslaan, hebben andere netwerken juist weer een hogere precisie (b.v. 0,1 dB (8)) en passen die meer frequente bemonstering toe (b.v. elke minuut). Merk op dat in de tropen radiostraalverbindingen meestal met lagere frequenties werken, typisch 7-13 GHz. Dit kan fouten in regenschattingen verhogen wegens de toegenomen niet-lineariteit van de relatie tussen regenintensiteit en specifieke uitdoving bij lagere frequenties (8,18,19). Radiostraalverbindingen kunnen ook worden gebruikt om regenintensiteiten te schatten in regio's met een groot reliëf. Dan worden padgemiddelde regenintensiteiten over hellingen verkregen (20). Bij voorkeur zouden de parameters  $\alpha$  en  $A_a$  van het algoritme opnieuw moeten worden gekalibreerd voor regenval met andere eigenschappen, d.w.z. voor andere regio's, klimaten en seizoenen. De International Telecommunication Union (ITU) beveelt waarden van de coëfficiënten  $a$  en  $b$  aan voor een scala aan frequenties voor wereldwijde toepassing (21). Deze coëfficiënten hangen relatief weinig af van temperatuur en druppelgrootteverdeling (22).

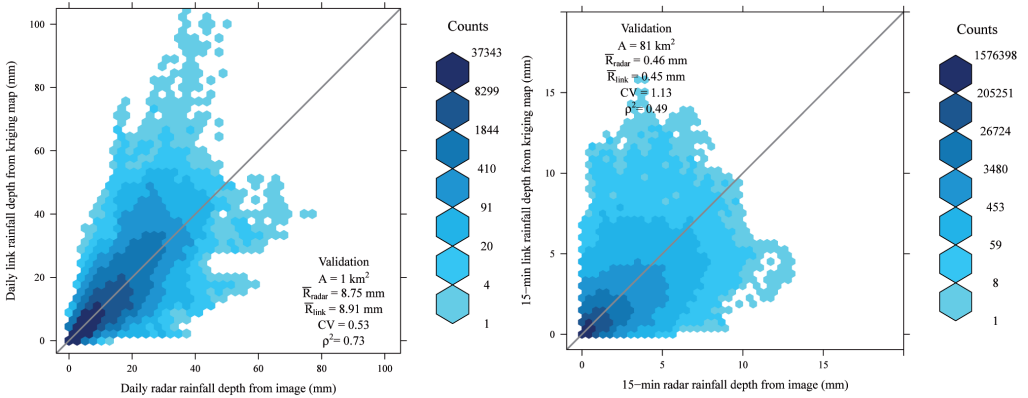
Het gebruik van mobiele telefonienetwerken voor regenmeting past in een bredere ontwikkeling waar sensoren worden gebruikt voor het monitoren van omgevingsvariabelen waarvoor ze niet specifiek zijn ontworpen. Zo kunnen op gps gebaseerde metingen van op de grond gestationeerde ontvangers en van satellieten in lage banen (b.v. 23,24) worden gebruikt om waterdamp in de atmosfeer te schatten en Mode-S waarnemingen van radars van de luchtverkeersleiding bevatten informatie over wind en temperatuur (25).

Het meten van regenval m.b.v. mobiele telefonienetwerken zou het aantal dodelijke slachtoffers en eco-





**Figuur 4: Validatie van op radiostraalverbindingen gebaseerde regenkaarten van dagsommen voor 12 dagen (twee panelen voor elke dag). Regenkaarten alleen gebaseerd op data van radiostraalverbindingen (links) en gebaseerd op met regenmeterdata gecorrigeerde radardata (rechts).**



**Figuur 5: Validatie van op radiostraalverbindingen gebaseerde regenkaarten met radarregenkaarten. Linker paneel: dagsommen van regen voor elke radarpixel van 1 km². Rechter paneel: regenhoeveelheden over 15 minuten voor een gebiedsgrootte A van 81 km². De grijze lijn is de y = x lijn,  $\bar{R}$  betekent gemiddelde regenhoeveelheid van de radarpixel, CV is de variatiecoëfficiënt en  $\rho^2$  is de determinatiecoëfficiënt. Alleen die regenhoeveelheden zijn gebruikt waarvoor verbinding en/of radar meer dan 0,1 mm regen hebben gemeten.**

nomische schade aanzienlijk kunnen verminderen, b.v. door het verbeteren van vroegtijdige waarschuwingen voor overstromingen (26). Dit is vooral van belang voor dichtbevolkte delta's waar regeninformatie cruciaal is voor operationeel waterbeheer (27). Daarom hopen we dat deze publicatie zal bijdragen aan het overtuigen van telecommunicatiebedrijven wereldwijd om data van ontvangen vermogens van hun netwerk van radiostraalverbindingen vrijelijk ter beschikking te stellen voor onderzoeksdoeleinden en andere toepassingen die voor de maatschappij van belang zijn. Wellicht dat (inter)nationale wetgeving ook zou kunnen bijdragen aan het bereiken van dit doel.

### Bijlage Materialen en Methoden

Er is aangetoond dat data van een mobiel telefonienetwerk geschikt zijn voor kwantitatieve regenmeting in een stedelijk gebied in Nederland (8). De algoritmen zijn op diverse punten aangepast, met name om de realtime toepasbaarheid over grote gebieden te verbeteren. Bovendien is een filter ontwikkeld om uitschieters te verwijderen.

Een aangepaste methode is toegepast om natte en droge perioden te onderscheiden en om de minimum en maximum ontvangen vermogens om te rekenen naar, respectievelijk, maximum en minimum dempingen (8). Een interval van 15 minuten wordt als nat aangemerkt als de gelijktijdige daling in minimum ontvangen vermogens van nabijgelegen straalverbindingen twee drempelwaarden overschrijdt in hetzelfde tijdsinterval. De achterliggende gedachte van deze methode is dat regen ruimtelijk gecorreleerd is (29,30). Een filter wordt gebruikt om uitschieters te verwijderen die het gevolg kunnen zijn van het niet goed functioneren van de antennes. Het principe van dit filter is dat een verbinding wordt verwijderd als het cumulatieve verschil tussen haar specifieke demping en die van de nabijgelegen verbindingen over de afgelopen 24 uur lager wordt dan  $-130 \text{ dB km}^{-1}$ . Dit criterium wordt toegepast op de specifieke demping afgeleid uit het minimum ontvangen vermogen. Het algoritme om natte en droge perioden te classificeren en het filter leiden gezamenlijk tot een afname van 9% in het aantal geselecteerde radiostraalverbindingen.

Een met regenmeterdata gecorrigeerde radardataset wordt gebruikt voor kalibratie van het algoritme om regenintensiteiten te berekenen. Tevens wordt deze dataset gebruikt om de op data van radiostraal-

verbindingen gebaseerde regenkaarten te valideren. De kwaliteit van een gelijksoortige radardataset voor een andere periode is hoog, waardoor die dataset gebruikt is voor het afleiden van statistieken van extreme gebiedsneerslag (31,32,33). Voor de kalibratie wordt een radardataset van padgemiddelde regenintensiteiten over elke radiostraalverbinding geconstrueerd (8). Vanwege de hoge ruimtelijke resolutie van radardata (1 km<sup>2</sup>), kunnen deze worden gebruikt om meer representatieve regenmetingen langs de verbinding te verkrijgen dan met data van een typisch regenmeternetwerk, die vaak niet beschikbaar zijn in de buurt van een verbinding vanwege de relatief lage dichtheid van het regenmeternetwerk, met name voor uren korter dan een dag.

De kern van het algoritme om regenintensiteiten te berekenen kan als volgt worden samengevat (8).

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

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

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

Dit is het algoritme om padgemiddelde regenintensiteiten te berekenen, gemiddeld over 15 minuten: waar  $\langle R_{\max} \rangle$  en  $\langle R_{\min} \rangle$  de maximum en minimum padgemiddelde regenintensiteiten zijn (mm h<sup>-1</sup>),  $H$  is de Heaviside functie (als het argument van  $H$  kleiner is dan nul, dan geldt  $H = 0$ , anders  $H = 1$ ),  $A_a$  is de demping wegens natte antennes (dB), en de coëfficiënt  $\alpha$  bepaalt de verdeling tussen de minimum en maximum regenintensiteit gedurende een periode van 15 minuten. Het effect van demping door natte antennes wordt dus constant verondersteld. Waarden van de coëfficiënten  $a$  and  $b$ , zoals gebruikt in deze studie, zijn bepaald met behulp van gemeten druppelgrootteverdelingen (34). Om het algoritme te kalibreren worden op verbindingen gebaseerde dagsommen van regen vergeleken met dagsommen die gebaseerd zijn op met regenmeterdata gecorrigeerde radardata. Een 12-daagse kalibratiedataset van juni en juli 2011 wordt gebruikt om optimale waarden te bepalen: 0,33 voor  $\alpha$  en 2,3 dB voor  $A_a$ . Met gebruikmaking van deze optimale waarden worden gemiddelde regenintensiteiten berekend voor elke radiostraalverbinding en tijdstap van 15 minuten voor de 12-daagse validatiedataset van juni, augustus en september 2011.

Om regenkaarten te construeren wordt de geostatistische methode "ordinary kriging" gebruikt, omdat die specifiek geschikt is voor het omgaan met heterogeen verdeelde locaties van data. Deze methode vereist een zogenaamd variogrammodel (een functie die de ruimtelijke afhankelijkheid van de data beschrijft). Fouten kunnen optreden wanneer de schatting van de coëfficiënten van het variogrammodel zou worden uitgevoerd voor elke tijdstap apart. Daarom wordt een meer robuuste methode gebruikt. De "sill" (totale variantie) en "range" (decorrelatieafstand) van het sferische variogrammodel zijn uitgedrukt als functie van duur (1 - 24 uren) en dag van het jaar met gebruikmaking van regenmeterdata van Nederland (30). Deze relaties worden geëxtrapoleerd naar 15 minuten. De "nugget" (die samenhangt met de meetonauwkeurigheid) wordt gelijkgesteld aan 0,1 maal de "sill".

## Dankwoord

De auteurs bedanken Ronald Kloeg en Ralph Koppelaar van T-Mobile NL voor het verstrekken van de data van radiostraalverbindingen. We bedanken Marc Bierkens (Universiteit Utrecht) voor zijn advies m.b.t. de interpolatiemethode en Manuel Rios Gaona (Wageningen University) voor het programmeren van een deel van de interpolatiemethode. Verder bedanken we James Robinson van OpenSignal voor het verstrekken van de data van wereldwijde dekking van het mobiele telefonienetwerk. We bedanken Adriaan J. Teuling (Wageningen University) voor zijn commentaar op ons manuscript. Dit werk wordt



financieel ondersteund door Technologiestichting STW (project 11944). ■

## Literatuurlijst

1. The New York Times, <http://green.blogs.nytimes.com/2012/07/02/do-not-publish-the-tricky-business-of-counting-rain>
2. Lorenz C, Kunstmann H (2012) The hydrological cycle in three state-of-the-art reanalyses: Intercomparison and performance analysis. *Journal of Hydrometeorology* 13, 1397–1420.
3. Yatagai A et al. (2012) APHRODITE: Constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93, 1401–1415.
4. Trans-African Hydro-Meteorological Observatory, <http://www.tahmo.org/>
5. Messer H, Zinevich A, Alpert P (2006) Environmental monitoring by wireless communication networks. *Science* 312, 713.
6. Leijnse H, Uijlenhoet R, Stricker J N M (2007) Rainfall measurement using radio links from cellular communication networks. *Water Resources Research* 43, W03201.
7. Zinevich A, Messer H, Alpert P (2009) Frontal rainfall observation by a commercial microwave communication network. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48, 1317–1334.
8. Overeem A, Leijnse H, Uijlenhoet R (2011) Measuring urban rainfall using microwave links from commercial cellular communication networks. *Water Resources Research* 47, W12505.
9. Overeem A, Leijnse H, Uijlenhoet R (2012) Quantitative precipitation estimation using commercial microwave links. In: *Weather Radar and Hydrology, Proceedings of a symposium held in Exeter, UK, April 2011*, Eds. R J Moore, S J Cole, A J Illingworth, 129–134, IAHS Publ. 351 (IAHS Press, Wallingford).
10. Rayitsfeld A, Samuels R, Zinevich A, Hadar U, Alpert P (2012) Comparison of two methodologies for long term rainfall monitoring using a commercial microwave communication system. *Atmospheric Research* 104–105, 119–127.
11. GSM Association, Universal access. How mobile can bring communications to all. Available at <http://www.gsma.com/publicpolicy/wp-content/uploads/2012/03/universalaccessfullreport.pdf>
12. GSM Association, <http://www.gsma.com/aboutus/gsm-technology/gsm/>
13. The World Bank, <http://www.worldbank.org/en/news/2012/07/17/mobile-phone-access-reaches-three-quarters-planets-population>
14. Fenicia F et al. (2012) Microwave links for rainfall estimation in an urban environment: Insights from an experimental setup in Luxembourg-City. *Journal of Hydrology* 464–465, 69–78.
15. Ulaby F T, Moore R K, Fung A K (1981) *Microwave remote sensing: Active and passive*, vol. I, *Microwave remote sensing fundamentals and radiometry*, Chapter 5 (Addison-Wesley, Reading).
16. Vivekanandan, J, Martner B E, Politovich M K & Zhang G (1999) Retrieval of atmospheric liquid and ice characteristics using dual-wavelength radar observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 37, 2325–2334.
17. Matheron G (1963) Principles of geostatistics, *Economic Geology* 58, 1246–1266.
18. Berne A, Uijlenhoet R (2007) Path-averaged rainfall estimation using microwave links: Uncertainty due to spatial rainfall variability. *Geophysical Research Letters* 34, L07403.
19. Leijnse H, Uijlenhoet R, Berne A (2010) Errors and uncertainties in microwave link rainfall estimation explored using drop size measurements and high-resolution radar data. *Journal of Hydrometeorology* 11, 1330–1344.
20. Chwala C et al. (2012) Precipitation observation using microwave backhaul links in the alpine and pre-alpine region of Southern Germany. *Hydrology and Earth System Sciences* 16, 2647–2661.
21. ITU report, [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-!PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.838-3-200503-!PDF-E.pdf)
22. Leijnse H, Uijlenhoet R, Stricker J N M (2007) Hydrometeorological application of a microwave link: 2. Precipitation. *Water Resources Research* 43, W04417.

23. Bengtsson, L et al. (2003) The use of GPS measurements for water vapor determination. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84, 1249-1258.
24. de Haan S, Holleman I, Holtslag A A M (2009) Real-time water vapor maps from a GPS surface network: Construction, validation, and applications. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48, 1302-1316.
25. de Haan S, Stoffelen A (2012) Assimilation of high-resolution Mode-S wind and temperature observations in a regional NWP model for nowcasting applications. *Weather and Forecasting*, 27, 918-937.
26. di Baldassarre G et al. (2010) Flood fatalities in Africa: From diagnosis to mitigation. *Geophysical Research Letters* 37, L22402.
27. Syvitski J P M et al. (2009) Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience* 2, 681-686.
28. Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University; and Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Gridded Population of the World Version 3 (GPWv3): Population Density Grids. Palisades, NY: Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), Columbia University. Data available at <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw> (2005).
29. Berne A, Delrieu G, Creutin J, Obled C (2004), Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology* 299, 166-179.
30. van de Beek C Z, Leijnse H, Torfs P J J F, Uijlenhoet R (2012) Seasonal semi-variance of Dutch rainfall at hourly to daily scales. *Advances in Water Resources* 45, 76-85.
31. Overeem A, Buishand T A, Holleman I (2009) Extreme rainfall analysis and estimation of depth-duration-frequency curves using weather radar. *Water Resources Research* 45, W10424.
32. Overeem A, Holleman I, Buishand T A (2009) Derivation of a 10-year radar-based climatology of rainfall. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48, 1448-1463.
33. Overeem A, Buishand T A, Holleman I, Uijlenhoet R (2010) Extreme value modeling of areal rainfall from weather radar. *Water Resources Research* 46, W09514.
34. Leijnse H, Uijlenhoet R, Stricker J N M (2008) Microwave link rainfall estimation: Effects of link length and frequency, temporal sampling, power resolution, and wet antenna attenuation. *Advances in Water Resources* 31, 1481-1493.