

RIONEDreeks 16

Neerslaginformatie voor het bebouwde gebied

Stand van zaken en ontwikkelingen



Stichting RIONED

Neerslaginformatie voor het bebouwde gebied

Stand van zaken en ontwikkelingen

© november 2011

Stichting RIONED, Ede

Stichting RIONED is zich volledig bewust van haar taak een zo betrouwbaar mogelijke uitgave te verzorgen. Niettemin kunnen Stichting RIONED en de auteurs geen enkele aansprakelijkheid aanvaarden voor eventueel in deze uitgave voorkomende onjuistheden.

Auteurs drs. H.L. Reichard (HydroLogic, projectleider), prof.dr.ir. F.H.L.R. Clemens (Witteveen+Bos), dr.ir. A.H. Lobbrecht (HydroLogic), ir. J.W. Hartemink (Witteveen+Bos), ir. W. Mantje (Witteveen+Bos), I.M. Poortinga MSc. (HydroLogic), dr.ir. J.L. Korving (Witteveen+Bos)

Tekstadvies LijnTekst, Utrecht

Vertaling Summary De Geus vertalingen, Delft

Omslag foto Harry van Luijtelaar, Stichting RIONED, Ede

Vormgeving GAW ontwerp+communicatie, Wageningen

Druk Modern, Bennekom

ISBN 97 890 73645 29 5

Voorwoord

Neerslaginformatie wordt in de bebouwde omgeving steeds belangrijker. Om het functioneren van het stedelijke (afval)watersysteem te evalueren en te toetsen, heeft een gemeente nauwkeurige en gedetailleerde informatie nodig, zowel in tijd als in ruimtelijke verdeling. Voor sturing van het systeem (RTC) kunnen ook weersverwachtingen een interessante rol spelen. En bij het anticiperen op klimaatontwikkeling wil de gemeente haar ontwerp kunnen afstemmen op de beste prognoses.

Tot voor kort gebruikten gemeenten alleen (grond)regenmeters om neerslaginformatie te verkrijgen. Maar het direct meten van neerslag met grondregenmeters is in de stad kostbaar en lastig. Een juiste en beveiligde meteropstelling is bijna niet te realiseren. Sinds 2008 biedt het KNMI meer gedetailleerde radarneerslaginformatie, die ook interessant is voor het stedelijk (afval)waterbeheer. Gemeenten gebruiken deze radargegevens steeds vaker.

| 3

Deze RIONEDreeds-uitgave geeft een overzicht van de stand van zaken en de ontwikkelingen van neerslaginformatie uit radar en regenmeters, met name gericht op bebouwd gebied. In dit boekje staat onder meer welke neerslaginformatie voor stedelijk (afval)waterbeheer van belang is en welke informatie nu beschikbaar is. Daarnaast komen de meestgebruikte meetmethoden met regenmeters en radartechnieken aan de orde, inclusief de voor- en nadelen. Ook laten experts hun licht schijnen over de toekomstige ontwikkeling van neerslagmetingen en wat dit voor het stedelijk (afval)waterbeheer kan betekenen.

Met de huidige technische mogelijkheden is waardevolle neerslaginformatie beschikbaar. Op termijn gaat verdere ontwikkeling van (radar)meetmethoden nóg nauwkeuriger informatie opleveren. Voor het bebouwde gebied is dat uiterst belangrijk. Hiermee kunnen gemeenten nog beter het functioneren van systemen evalueren en daaruit lering trekken voor mogelijke verbeteringen.

Hugo Gastkemper,
Directeur Stichting RIONED

Oktober 2011

Inhoud

Voorwoord

Samenvatting

1 Inleiding

- 1.1 Doel en doelgroep
- 1.2 Auteurs en begeleidingscommissie
- 1.3 Leeswijzer

2 Neerslagmeting met regenmeters en radar

- 2.1 Historie
 - 2.1.1 Regenmeters
 - 2.1.2 Radar
- 2.2 Neerslagmeting met regenmeters
 - 2.2.1 Opstellingseisen voor regenmeters
 - 2.2.2 Meestvoorkomende regenmeters
- 2.3 Neerslagmeting met radar
 - 2.3.1 Hoe werkt een neerslagradar?
 - 2.3.2 De neerslagradars van het KNMI
 - 2.3.3 Nieuwste weerradartechnieken
 - 2.3.4 Extreme neerslag en toegevoegde waarde van radar
 - 2.3.5 Neerslagstatistiek op basis van radarinformatie
- 2.4 Samenvatting voor- en nadelen radar en regenmeters

3 Gebruik neerslaginformatie bij stedelijk (afval)waterbeheer

- 3.1 Operationeel beheer
- 3.2 Indicatie hydraulisch functioneren
 - 3.2.1 Communicatie met burgers
 - 3.2.2 Grondwater
 - 3.2.3 Afhandelen schadeclaims
- 3.3 Analyse hydraulisch functioneren
 - 3.3.1 Toetsen aan richtlijnen
 - 3.3.2 Validatie en kalibratie rekenmodellen
 - 3.3.3 Analyse extreme neerslag
- 3.4 Sturing hydraulisch functioneren
- 3.5 Samenvatting behoefte neerslaginformatie per toepassingsgebied

4 Combinatie van radar en regenmeters

- 4.1 Welke neerslaggegevens levert het KNMI?
- 4.2 Aandachtspunten bij kalibratie radarbeelden
- 4.3 Vergelijkingsonderzoeken radar en regenmeters
 - 4.3.1 Onderzoek ongekalibreerde radargegevens in Boxtel
 - 4.3.2 Onderzoeken gekalibreerde radargegevens
- 4.4 Samenvatting

5 Toekomstperspectief

- 5.1 X-bandradar
- 5.2 Dual-pol radar
- 5.3 Integratie Duitse en Belgische neerslagradar
- 5.4 Kortetermijnverwachting neerslag
- 5.5 Integratie neerslagmeting en berekening met weermodellen
- 5.6 Neerslagmeting met gsm-masten
- 5.7 Mogelijkheden neerslagmeting met satellieten
- 5.8 Verbetering producten huidige C-bandradars
- 5.9 Regenmeternetwerk van de toekomst

6 Conclusies en aanbevelingen

7 Literatuur

8 Summary

Samenvatting

Bij het functioneren van het stedelijke watersysteem speelt de neerslagbelasting een belangrijke rol. Om bijvoorbeeld riooloverstortingen, water op straat en wateroverlast te kunnen verklaren/verantwoorden, heeft een gemeente nauwkeurige neerslaginformatie nodig. Daarbij is het belangrijk om de bui-intensiteit van moment tot moment te weten en hoe de neerslagverdeling in de ruimte is.

Regenmeters

De standaardmethode om neerslag te meten, is met regenmeters. Om een betrouwbare meting conform de (inter)nationale standaarden te kunnen doen, zijn een goede meteropstelling en een aanzienlijke vrije ruimte nodig. Die ruimte is in steden vaak niet aanwezig. Mede daarom zijn regenmeters in de stad meestal niet volgens de eisen van de World Meteorological Organisation (WMO) op te stellen. Hierdoor kunnen aanzienlijke meetfouten ontstaan. Bovendien zijn veel regenmeters nodig om de ruimtelijke spreiding van neerslag goed te kunnen bepalen.

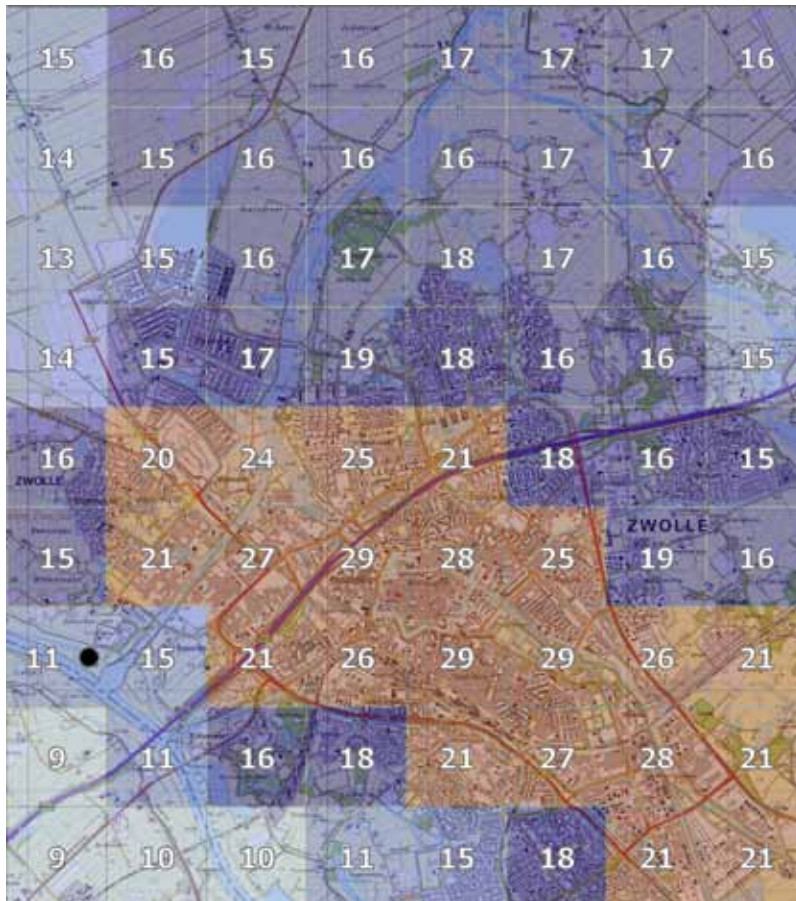
Radar

De laatste jaren is het gebruik van radar populair geworden om neerslaghoeveelheden te bepalen. De radar draait rond en zendt onder verschillende hoeken kortdurende pulsen met elektromagnetische straling uit. Zodra deze uitgezonden straling een regendruppel bereikt, wordt die gedeeltelijk teruggekaatst. Vervolgens vangt de radar de straling weer op. De tijd tussen het uitzenden van een puls en het ontvangen van het teruggekaatste signaal bepaalt de afstand van de regendruppel tot de radar. De sterkte van het teruggekaatste signaal is een maat voor de neerslagintensiteit. Een neerslag-radar meet de neerslag dus indirect en op een bepaalde hoogte boven de grond. In Nederland verzorgt het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) de radarmetingen. Het instituut heeft radarstations in De Bilt en Den Helder. Het KNMI voegt deze metingen samen tot één beeld (composiet), dat tegenwoordig beschikbaar is per 5 minuten en in grids van 1 km². Dit zijn de ongekalibreerde (ruwe) radarbeelden.

Kalibreren

Ongekalibreerde radarmetingen bevatten onnauwkeurigheden die onder meer te maken hebben met:

- de verwaaiing van de neerslag;
- de tijdsduur tussen de meting in de lucht en het moment dat de regendruppel op de grond valt;
- de uitdoving van het radarsignaal als achter een hevige bui wordt gemeten;
- indirecte meting (remote sensing) van een volume neerslag in de lucht.



Figuur 0. Gespreide neerslag in Zwolle. De getallen geven de hoeveelheid gevallen neerslag (in mm) in 24 uur. (Bron: Lobbrecht, HydroLogic)

Om het functioneren van het stedelijke (afval)watersysteem te evalueren en te toetsen, is kalibratie van de ongekalibreerde KNMI-radarinformatie met metingen van regenmeters nodig. Hierbij wordt het sterke punt van de radar (goed inzicht in ruimtelijke spreiding) met het sterke punt van de regenmeter (een goede meetwaarde op de grond) gecombineerd. Dit gebeurt zodanig dat na kalibratie de radar op de plek van de regenmeters ongeveer een vergelijkbare waarde geeft. Zo ontstaat een kwalitatief hoogwaardig, vlakdekkend neerslagbeeld.

Voor kalibratie zijn bijvoorbeeld de ruim 300 dagstations en de ruim 30 automatische stations van het KNMI te gebruiken. Deze neerslaginformatie is niet altijd direct beschikbaar. De gegevens van de dagstations zijn met maximaal 36 uur vertraging

beschikbaar; de gegevens van de automatische uurstations zijn met circa 10 minuten vertraging beschikbaar. Naarmate de tijd verstrijkt, komen meer regenmetergegevens beschikbaar en is de radarinformatie verder te kalibreren. Gemeenten kunnen ook andere (eigen) regenmeters gebruiken. Daarbij is het wel belangrijk dat de meters goed staan opgesteld (bij voorkeur conform de WMO-opstellingseisen).

De meerwaarde van de gekalibreerde radar ten opzicht van alleen regenmeters is te zien in figuur 0. Het figuur geeft de neerslagsom van 7 juli 10 uur tot en met 8 juli 10 uur in Zwolle (2009). De zwarte stip geeft de locatie aan van de regenmeter, die voor deze periode 11 mm heeft gemeten. Met alleen de gegevens van deze regenmeter zou zijn aangenomen dat ook in de rest van Zwolle 11 mm neerslag gevallen zou zijn. Dankzij de gekalibreerde radarbeelden werd duidelijk dat in het centrum veel meer neerslag was gevallen, namelijk 29 mm.

8 |

Behoeftte aan neerslaginformatie

Neerslaginformatie is voor diverse onderdelen van stedelijk (afval)waterbeheer te gebruiken. De verschillende toepassingsgebieden stellen verschillende eisen aan de actualiteit en de nauwkeurigheid. Voor sturing van systemen (RTC) heeft een gemeente actuele informatie nodig die vaak minder nauwkeurig mag zijn. Om het functioneren van systemen te analyseren, moet juist zeer nauwkeurige informatie beschikbaar zijn die minder actueel hoeft te zijn.

Combinatie radar en regenmeters

Voor de meeste toepassingsgebieden heeft een gemeente minimaal betrouwbare neerslaginformatie per 5 minuten en per 1 km² nodig. Met alleen een traditioneel grondmeetnet is dit praktisch en economisch niet haalbaar. In combinatie met radarinformatie ontstaat wél een nauwkeurig beeld van de neerslagverdeling in tijd en plaats. Op dit moment is de combinatie van radar en regenmeters dan ook de beste neerslaginformatiebron.

Ontwikkelingen

De internationale onderzoeken en ontwikkelingen op het gebied van radarneerslag volgen elkaar in hoog tempo op:

- In Europa wordt de nieuwe dual-pol radar (C-band) geïnstalleerd. Deze geeft een nauwkeuriger neerslagbeeld en kan de verschillende soorten neerslag beter onderscheiden dan de huidige C-bandradar.
- Met name voor de grensgebieden is de integratie van Duitse en Belgische radarbeelden in het Nederlandse composiet een belangrijke ontwikkeling.
- Daarnaast zijn kleinschalige X-bandradars in ontwikkeling, die een hogere resolutie in tijd en ruimte meten dan C-bandradars.

1 Inleiding

Een belangrijk onderdeel van de gemeentelijke zorgplicht is het verantwoorden van de werking van het stedelijke (afval)watersysteem. Bij het functioneren van het systeem speelt de neerslagbelasting een belangrijke rol. Om onder meer de werking van gemalen (energiegebruik), riooloverstortingen, water op straat en wateroverlast te kunnen verklaren/verantwoorden, hebben gemeenten nauwkeurige neerslaginformatie nodig.

Standaardmeetmethode

De standaardmethode om neerslag te meten, is met regenmeters. Voor een betrouwbare meting zijn een goede meteropstelling en een aanzienlijke vrije ruimte nodig. Die ruimte is vaak niet aanwezig. In de stad zijn regenmeters daarom meestal niet volgens de eisen van de World Meteorological Organisation (WMO) op te stellen. Hierdoor kunnen aanzienlijke meetfouten ontstaan. Daarnaast geeft een regenmeter alleen informatie over de hoeveelheid gevallen neerslag op het meetpunt. Om voldoende inzicht in de neerslagspreiding over een hele gemeente te krijgen, is een relatief dicht net aan regenmeters nodig. Dit is zeer duur, in zowel aanschaf als beheer. Neerslagradar biedt een mogelijke oplossing voor de praktische problemen van regenmeters in bebouwd gebied.

| 9

Hogere meeteisen

Waterschappen gebruiken al sinds 2005 neerslaginformatie op basis van radar. Destijds hadden de radarbeelden een ruimtelijke resolutie van 2,5 x 2,5 km en een tijdsresolutie van minimaal 3 uur (elk uur een neerslagsom over 3 uur). Voor het stedelijk waterbeheer zijn de meeteisen voor neerslag aanzienlijk hoger dan voor het regionaal waterbeheer. Het stedelijke (afval)watersysteem (vooral de riolering) is kleinschaliger dan het regionale watersysteem. Daarnaast reageert het stedelijke (afval) watersysteem veel sneller op neerslag. Een regendruppel die op verhard oppervlak valt, zit binnen enkele minuten in het riool. In het regionale gebied is de afstromingsvertraging van het grotendeels onverharde oppervlak veel groter. Daarom vraagt het (afval)watersysteem om gedetailleerder en nauwkeuriger informatie in ruimte en tijd.

Mogelijkheden en beperkingen van radar

Sinds 1 januari 2008 stelt het KNMI radargegevens per 5 minuten en per 1 km² beschikbaar. Hierdoor zijn de mogelijkheden voor stedelijk waterbeheer toegenomen. Maar de vraag is of de huidige radarkwaliteit voldoende is en hoeveel regenmeters nog in bebouwd gebied nodig zijn. Op diverse plaatsen in het land is hiernaar onderzoek gedaan. Op basis van die onderzoeken beschrijft deze RIONEDreeks-uitgave de mogelijkheden en beperkingen van de inzet van neerslagradar.

1.1 Doel en doelgroep

Dit boekje geeft rioleringsbeheerders en andere geïnteresseerde medewerkers van gemeenten en waterschappen antwoord op de volgende vragen:

- Waarom is goede neerslaginformatie voor stedelijk gebied belangrijk?
- Hoe worden radargegevens omgezet in neerslaginformatie?
- Wat voor regenmeters zijn er en hoe zouden ze opgesteld moeten worden?
- Wat zijn de voor- en nadelen van regenmeters en radar en wat betekent dat voor het gebruik van de neerslaginformatie voor het rioleringsbeheer?
- Welke neerslaginformatie heeft een rioleringsbeheerder nodig en wat is momenteel beschikbaar?
- Hoe wordt neerslaginformatie in de praktijk gebruikt?
- Hoe denken de experts over de ontwikkeling van radar op de korte en langere termijn?

10 |

1.2 Opstellers en begeleidingscommissie

De auteurs van deze uitgave zijn:

Leanne Reichard	HydroLogic, projectleider
François Clemens	Witteveen+Bos
Arnold Lobbrecht	HydroLogic
Jan Hartemink	Witteveen+Bos
Wim Mantje	Witteveen+Bos
Irene Poortinga	HydroLogic
Hans Korving	Witteveen+Bos

De begeleidingscommissie bestond uit:

Marco van Bijnen	Gemeente Utrecht
Robin Bos	Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
Hans Geerse	Waterschap Reest en Wieden
Michel Moens	ARCADIS
Pieter Otten	Gemeentewerken Rotterdam
Bert Palsma	STOWA
Guus Rameckers	Gemeente Weert
Harry van Luijtelaar	Stichting RIONED

Het toekomstperspectief in hoofdstuk 5 is gebaseerd op interviews met de volgende radar- en neerslagdeskundigen:

Hans Beekhuis	KNMI
Chris Collier	University of Leeds
Thomas Einfalt	Hydro & meteo GmbH&Co.KG
Iwan Holleman	Radboud Universiteit Nijmegen

Hidde Leijnse	KNMI
Aart Overeem	KNMI
Remko Uijlenhoet	Wageningen Universiteit
Patrick Willems	KU Leuven

1.3 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 geeft om te beginnen enige achtergrondinformatie. Eerst krijgt u een korte historie van neerslagmetingen door de eeuwen heen. Daarna volgt een overzicht van de huidige, meestgebruikte regenmeters en radartechnieken, en geeft een uitleg hoe deze werken. Daarbij is aandacht voor zowel de sterke als de zwakke punten.

Hoofdstuk 3 gaat in op het gebruik van neerslaginformatie voor de verschillende onderdelen van stedelijk (afval)waterbeheer. Per toepassingsgebied komen de gewenste nauwkeurigheid en actualiteit van de neerslaginformatie aan de orde.

| 11

Hoofdstuk 4 behandelt de combinatie van neerslagradar en regenmeters. Eerst krijgt u een overzicht van de neerslaginformatie die het KNMI beschikbaar stelt. Vervolgens komen aandachtspunten aan de orde om die informatie bruikbaar te maken voor stedelijk waterbeheer. Ook beschrijft dit hoofdstuk diverse praktijkonderzoeken waarin gegevens van radar- en regenmeters zijn vergeleken.

Hoofdstuk 5 geeft een overzicht van de belangrijkste (door)ontwikkelingen op het gebied van neerslagmeting.

Hoofdstuk 6 vat de belangrijkste conclusies rond neerslaginformatie voor stedelijk waterbeheer kort samen en geeft aanbevelingen.

2 Neerslagmeting met regenmeters en radar

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de verschillende methoden om neerslag te meten. Eerst krijgt u een korte historie van neerslagmetingen door de eeuwen heen. Vervolgens gaat dit hoofdstuk in op hoe de meestgebruikte regenmeters en de huidige radartechnieken werken. Daarbij is aandacht voor zowel de sterke als de zwakke punten.

2.1 Historie

2.1.1 Regenmeters

De eerste neerslagmetingen vonden plaats voor de landbouw. De oudst bekende bron die melding maakt van instrumentele neerslagwaarnemingen is een geschrift uit India uit de 4e eeuw voor Christus:

“Een kom, zo breed als een Aratni (45 cm) wordt opgezet als een regenmeter. Naar gelang de regenval meer of minder is, zal de opzichter de zaden zaaien die meer of minder water nodig hebben.”

In de 15e eeuw introduceerde Korea ook regenmeters voor de landbouw (zie figuur 2.1). Deze meters zijn ongewijzigd tot in de 20e eeuw gebruikt.



Figuur 2.1 Koreaanse regenmeter uit de 15e eeuw

17e en 18e eeuw

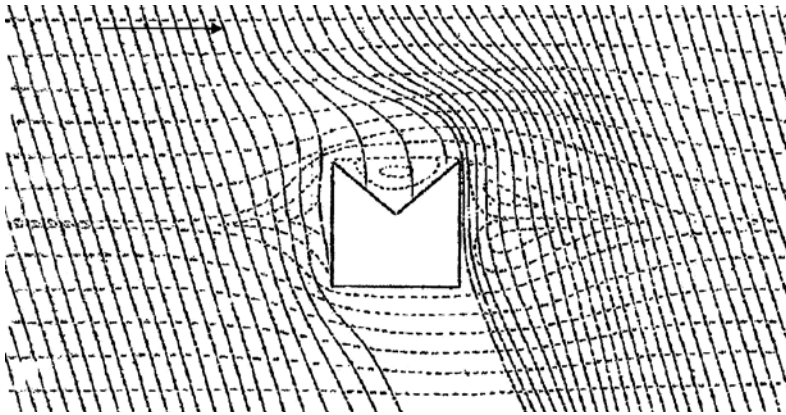
In Europa vonden de eerste neerslagmetingen pas in de 17e eeuw plaats. Ook werden toen diverse meetinstrumenten uitgevonden, zoals in Engeland de kantelbakregometer van Christopher Wren. Uit deze tijd stammen ook de eerste systematische neerslagmetingen.

De eerste geregistreerde neerslagmetingen komen uit Frankrijk van de Académie Royale des Sciences. Vanaf de 18e eeuw worden ook in Nederland systematisch neerslagmetingen geregistreerd. Deze staan op de website van het KNMI.

19e eeuw

Dankzij de ontwikkelingen in de wetenschap wordt in de 19e eeuw steeds meer bekend over natuurwetenschappelijke processen rond neerslag. De Engelse wetenschapper William Jevons laat met windtunnelproeven zien dat windstromingen regendruppels over de regenmeter kunnen voeren, waardoor de door de regenmeter opgevangen hoeveelheid neerslag vermindert (zie figuur 2.2).

| 13



Figuur 2.2 Tekening van windstroming over een regenmeter (19e eeuw)

2.1.2 Radar

Net als de regenmeter kent de ontwikkeling van radar een lange geschiedenis. In 1886 liet de Duitse natuurkundige Heinrich Hertz zien dat radiogolven weerkaatsen op vaste objecten, het basisprincipe achter radar. Tijdens WOII was neerslag een hinderlijk bijverschijnsel dat de detectie van vijandelijke vliegtuigen via radar bemoeilijkte. Na de oorlog is de toepassing van radar om neerslag te meten verder ontwikkeld. Het KNMI kreeg in 1959 zijn eerste radar op Schiphol, in 1962 gevolgd door De Bilt. De informatie is vanaf 1990 beschikbaar gesteld voor het publiek via teletekst.

In 1996 en 1997 kwamen er nieuwe radars in Den Helder en De Bilt. Deze zijn speciaal ingesteld op het registreren van neerslag. Hierdoor is in Nederland sinds 1998 neerslaginformatie op basis van radar beschikbaar.

21e eeuw

In 2001 gaf de Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA) opdracht tot het onderzoek Neerslaginformatie voor het waterbeheer (Lobbrecht et al., 2001). Het onderzoek toonde duidelijk de meerwaarde van radarinformatie voor het waterbeheer aan. Daarom gebruiken waterschappen vanaf 2004 radarinformatie in het regionale waterbeheer. Destijds stelde het KNMI alleen nog neerslaginformatie beschikbaar per $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$ (=ruim 6 km^2). Dankzij ontwikkelingen in de radartechniek heeft het KNMI vanaf 2008 de ruimtelijke resolutie van de radar verbeterd naar 1 km^2 . Omdat deze neerslaginformatie per 5 minuten beschikbaar is, is radarinformatie sinds 2008 ook relevant voor het stedelijke (afval)waterbeheer.

14 |

2.2 Neerslagmeting met regenmeters

De meest directe methode om neerslag te meten, is met een regenmeter op de grond. Er bestaan veel soorten regenmeters die allemaal eigen voor- en nadelen hebben (zie paragraaf 2.2.2). De kwaliteit van de neerslagmeting is niet alleen afhankelijk van het type regenmeter, maar ook van de opstelling. Deze paragraaf gaat daarom eerst in op



Figuur 2.3 De KNMI-radar in De Bilt (Bron: Overeem KNMI)



Figuur 2.4 Verkeerde opstelling regenmeter: te dicht bij bomen

de belangrijkste opstellingseisen voor een goede regenmeting. Vervolgens komen de in praktijk meestgebruikte regenmeters aan bod.

2.2.1 Opstellingseisen voor regenmeters

Een goede meting begint bij het juiste gebruik van het meetinstrument. Bij regenmeters gaat het dan vooral om een goede opstelling en regelmatig onderhoud. Een onjuiste meteropstelling of slecht onderhoud kan tot zeer grote meetafwijkingen leiden.

De locatie van de regenmeter is erg belangrijk. Uit recent gepubliceerd onderzoek (Schilperoord, 2011) blijkt dat een verkeerde meterlocatie al snel kan leiden tot een onderschatting van de gemeten neerslag van meer dan 10%. Dit kwam naar voren uit een analyse van de meetreeksen van twaalf kantelbakregenmeters. Voor een betrouwbare neerslagmeting is het dus belangrijk zo goed mogelijk aan te sluiten bij de opstellingseisen van de World Meteorological Organization (WMO 2009).

| 15

De WMO-eisen voor de opstelling van een regenmeter zijn:

- de bovenrand van de meter moet waterpas zijn;
- om windinvloeden te beperken, mag de meter maximaal 0,4 m boven het maaiveld staan;
- om opspatten van neerslag in de regenmeter te voorkomen, mag het gebied om de meter niet verhard zijn;
- het dichtstbijzijnde obstakel moet op een afstand van minimaal 4 maal de obstakelhoogte van de meter staan.

Windeffecten

De laatstgenoemde WMO-eis betekent dat een regenmeter minimaal 12 m van een 3 m hoge boom moet staan of minimaal 80 m van een 20 m hoog gebouw. Zo veel vrije ruimte is in Nederlandse steden meestal niet beschikbaar. Daarom plaatsen gemeenten de regenmeter vaak op het dak van een gemeentelijk gebouw. Daar is voeding beschikbaar en is de meter relatief veilig voor vandalisme. Het nadeel is dat wind de neerslagmeting op een gebouw sterk beïnvloedt. Wind die om en over de regenmeter waait, kan voor turbulentie boven de meter zorgen. Hierdoor kan de wind regen druppels tot over de regenmeter voeren, wat tot een afwijking (vaak onderschatting) van de regenmeting leidt.

Uit onderzoek (Braak, 1945) blijkt dat de onderschatting van de hoeveelheid neerslag als gevolg van wind direct afhankelijk is van de windsnelheid. Als vuistregel geldt dat bij een windsnelheid van x m/s, $x\%$ registratieverlies optreedt. Dit betekent bij een windsnelheid van 10 m/s een gemiddeld registratieverlies van 10%. In de praktijk kan dit bij harde wind dus tot grote meetfouten leiden. Tegenwoordig zijn regenmeters verkrijgbaar met windschermen die dit effect deels tegengaan.

Engelse opstelling

Om de windeffecten te minimaliseren, past het KNMI de zogenaamde Engelse opstelling toe. Hierbij staat de regenmeter in een opgehoogde kuil van 3 m doorsnede, waarin een bodem van kiezelstenen ligt. De regenmeter steekt niet boven de rand van de kuil uit. Hierdoor heeft de wind weinig invloed op de vallende neerslag en zijn de metingen nauwkeuriger.

Bij neerslagmetingen met een regenmeter spelen in de zomer verdamping en bevochtigingsverliezen ook een rol. Maar bij flinke neerslaghoeveelheden zijn deze invloeden verwaarloosbaar klein.

2.2.2 Meestvoorkomende regenmeters

16 | Voor neerslagmetingen zijn veel soorten meters verkrijgbaar. Elk type heeft zijn voor- en nadelen. Tabel 2.1 geeft een samenvatting van de meest toegepaste typen regenmeters en de belangrijkste bijbehorende kenmerken.

De KNMI regenmeters

Een handregenmeter vangt de neerslag op in een trechter, waarna het water in een reservoir terechtkomt. Elke dag om 8 uur Universal Time (in Nederland: 10 uur zomertijd en 9 uur wintertijd) gieten KNMI-vrijwilligers de neerslag handmatig in een maatbeker leeg. Zo bepaalt het KNMI dagelijks de hoeveelheid gevallen neerslag. De handregenmeters zijn zeer betrouwbaar. In tegenstelling tot andere regenmeters hebben ze geen mechanische onderdelen en het gaat om een directe meting.

Omdat het KNMI met de handregenmeters alleen 24-uurssommen meet, is de operationele toepassing voor stedelijk waterbeheer beperkt. De gegevens van de handregenmeters zijn alleen te gebruiken om andere regenmeters te controleren en radarbeelden te kalibreren. De kwaliteit van de geregistreeerde neerslagmetingen is afhankelijk van de persoon die de meting uitvoert. Bij het uitlezen en registreren van de neerslaghoeveelheden kunnen fouten ontstaan. Een groot voordeel van de handregenmeter is de relatief lage prijs.

Het KNMI beschikt over ruim 30 automatische weerstations, die elke 10 minuten de 10-minutenneerslagsom geven. De stations zijn voorzien van een Present Weather Sensor (PWS), die ter plaatse het zicht bepaalt. Bovendien geeft de PWS aan wat het zicht belemmert: stof in de lucht, mist of neerslag. Met de informatie van deze automatische regenmeters zijn radarbeelden met een vertraging van 15 tot 30 minuten te kalibreren.

Tabel 2.1 Overzicht voor- en nadelen per type regenmeter.

Type regenmeter	K*	N*	O*	Voordelen	Nadelen
Handregenmeter van het KNMI	++	++	++	Eenvoudige en degelijke meting.	- Meet alleen dagsommen (van 8 u. tot 8 u. Universal Time). - Informatie is vertraagd beschikbaar. - Afhankelijk van derden.
Automatische regenmeter van het KNMI	++	++	++	Eenvoudige en degelijke neerslag meting per 10 minuten die snel beschikbaar is.	
Kantelbak-regenmeter	o	o	-	Wordt het meest gebruikt en is daarom goed verkrijgbaar.	- Kwetsbaar systeem: onderhoudsgevoelig, kan verstopt raken. - Meet onnauwkeurig bij zeer lage en zeer hoge neerslagintensiteit. - Moet exact waterpas staan.
Optische disdrometer	o	o	+	Geeft tevens informatie over druppelgrootteverdeling en type neerslag (hagel, sneeuw, regen, ijs).	- Indirecte meting.
Akoestische disdrometer	++	?	+	Geeft tevens informatie over druppelgrootteverdeling.	- Indirecte meting. - Lijkt minder nauwkeurig dan andere regenmeters, maar is in de praktijk nog weinig beproefd.
Weegregenmeter	-	++	o	Geschikt voor het meten van sneeuw.	- Regelmatig kalibratie nodig.

K = kosten, N = nauwkeurigheid en O = Onderhoud.

++ = zeer goed, + = voldoende, o = matig, - = onvoldoende, -- = zeer slecht

Wat verstaan we onder kalibratie?

Professionals in verschillende vakgebieden gebruiken het begrip kalibratie verschillend.

- De radars van het KNMI zijn gekalibreerd; technisch gezien betekent dit dat als er 1 Watt aan radiovermogen op de radarantenne valt, die ook als zodanig wordt geregistreerd. Dat gaat over de werking van de apparatuur.
- Een aantal typen regenmeters moet ook (regelmatig) gekalibreerd worden voor een nauwkeurige werking.
- De correctie van de neerslagmeting via radarbeelden naar regenmeters op de grond noemen we ook kalibratie. Dit gebeurt zodanig dat na kalibratie de radar op de plek van de regenmeters ongeveer een vergelijkbare waarde geeft.
- Het rekenmodel voor de simulatie van het hydraulisch functioneren van een rioelstelsel kan ook worden gekalibreerd. Bij de kalibratie streeft de rekenaar naar een set modelparameters die na aanpassing leidt tot een – in absolute zin – zo goed mogelijke overeenkomst tussen model en metingen.



Figuur 2.5 KNMI-handregenmeter (links) en de KNMI (grond)regenmeter in De Bilt (rechts, Nieuw Beerta, Engelse opstelling) (Bron: text.weeronline.nl en Aart Overeem)

18 |

Belangrijk voordeel van de KNMI regenmeters is dat de meters goed zijn opgesteld en goed worden onderhouden en dat de gegevens eenvoudig toegankelijk zijn (bijvoorbeeld via de KNMI website).

Kantelbakregenmeter

De meestgebruikte regenmeter in stedelijk waterbeheer is de kantelbakregenmeter. Deze bestaat uit een wip met twee bakjes. Zodra het ene bakje vol is, kantelt de meter waardoor het volle bakje leegloopt en de regen het andere bakje vult. Met elke kanteling registreert de meter een vaste hoeveelheid neerslag. De meeste kantelbakregenmeters kantelen bij 0,1 of 0,2 mm.

Voor betrouwbare meetresultaten gelden een minimale en een maximale neerslagintensiteit. Voor vrijwel alle verkrijgbare typen ligt de ondergrens op ongeveer 10 mm/ uur. De bovengrens ligt in het algemeen bij neerslagintensiteiten groter dan 200 mm/ uur. Dan kan het kantelmechanisme van de meter de hoeveelheid neerslag niet goed meer aan. Onder de minimale en boven de maximale intensiteit zijn geen betrouwbare waarnemingen mogelijk.

Uit onderzoek (Luyckx en Berlamont, 2001) blijkt dat kantelbakregenmeters zonder apparaatspecifieke kalibratie en correctie binnen het meetbereik aanzienlijke meetfouten kunnen hebben. Bij hoge neerslagintensiteiten tot ongeveer 15%. Voor een hogere nauwkeurigheid is jaarlijkse kalibratie van het apparaat noodzakelijk. Volgens Luyckx en Berlamont is na kalibratie en correctie een nauwkeurigheid van circa 2% haalbaar. Meer informatie hierover vindt u in het genoemde onderzoek.

De kantelbakregenmeter is inmiddels veelvuldig beproefd. Over de nauwkeurigheid is veel bekend. De mechanische registratie kan op den duur afwijkingen vertonen. Via kalibratie is dit mechanisme weer correct af te stellen. Dit moet in elk geval jaarlijks



Figuur 2.6 Kantelbakregenmeter



Figuur 2.7 Een optische disdrometer
(bron: www.thiesclima.com/disdrometer.html)

gebeuren. Een ander nadeel is dat de kantelbakregenmeter snel verstopt kan raken. Daarom is regelmatige controle (en eventuele reiniging) noodzakelijk. Dit moet minimaal twee keer per jaar gebeuren. In de herfstmaanden bij voorkeur wekelijks, afhankelijk van de locatie en de aanwezigheid van bladverliezend gewas. Als de meter in de winter ook sneeuw en ijs zonder een al te grote vertraging moet meten, is een verwarmingselement nodig.

| 19

Optische disdrometer

Een optische disdrometer meet neerslag indirect met een laser. Neerslag die door de laserstraal valt, dooft de straal deels uit. Een sensor vangt de uitgezonden laserstraal op en meet de mate waarin de neerslag de straal heeft uitgedoofd. Op basis hiervan bepaalt de meter de neerslagintensiteit op dat moment. De disdrometer heeft een zeer groot meetbereik (van 0,001 mm/h tot 1.200 mm/h) met een nauwkeurigheid van ongeveer 5%.

Optische disdrometers vergen weinig onderhoud. Bij een goede opstelling kan de meter lange tijd goed werken. Kalibratie van dit apparaat is niet of nauwelijks nodig. Bovendien kan de optische disdrometer het type neerslag herkennen (sneeuw, hagel, regen). Hierdoor is eenvoudig te constateren of er regen of sneeuw is gevallen. Dit is van belang bij gebruik voor verdere analyses. Omdat de optische disdrometer erg gevoelig is, kan deze ook zeer kleine hoeveelheden neerslag (mist of motregen) detecteren. De meeste andere regenmeters kunnen dat niet.

Het grootste nadeel is dat de optische disdrometer de neerslag indirect bepaalt. De meter converteert de gemeten uitdoving van de laser namelijk naar een neerslagintensiteit. Deze conversie brengt onzekerheden met zich mee.



Figuur 2.8 Akoestische disdrometer
(bron: www.tudelft.nl)



Figuur 2.9 Een weegregenmeter

Akoestische disdrometer

Iedereen die weleens in een tent heeft gelegen tijdens een regenbui, weet dat je aan het geluid op het tentdoek kunt horen hoe hard het regent. Dat principe heeft de TUDelft toegepast in het ontwerp van een regenmeter door gebruik te maken van kleine luidsprekers die ook wel in wenskaarten zitten. Deze luidsprekers meten het geluid van vallende regendruppels. Door het toepassen van deze simpele techniek zijn de kosten voor een akoestische disdrometer zeer laag. Omdat de akoestische disdrometer pas sinds kort beschikbaar is en nog onvoldoende in de praktijk is toegepast, is het nog onduidelijk hoe nauwkeurig deze meter neerslag kan meten. De akoestische disdrometer lijkt op dit moment onnauwkeuriger dan de andere, duurdere regenmeters, zoals de optische disdrometer of de weegregenmeter (zie hierna).

Weegregenmeter

Een weegregenmeter vangt de neerslag op in een reservoir dat varieert van 150 tot 750 mm. Het reservoir wordt continu gewogen en de meter registreert automatisch de gewichtstoename.

Het reservoir van de weegregenmeter wordt niet automatisch geleegd. Dit moet tijdens het onderhoud gebeuren. Hoe vaak onderhoud nodig is, hangt mede af van de reservoirinhoud.

Weegregenmeters hebben een groot meetbereik (6 mm/h tot 1.800 mm/h) met een hoge nauwkeurigheid (afwijking van minder dan 5%). Wel zijn ze relatief duur. Doordat ze weinig mechanische onderdelen hebben, zijn ze niet onderhoudsgevoelig en is kalibratie minder vaak nodig. Dit is een van de redenen dat gemeenten dit type apparaat vaak gebruiken op slecht toegankelijke locaties. Een belangrijk voordeel is dat de meter alle neerslag (ook sneeuw en ijs) zonder vertraging meet. Nadeel is dat de weegregenmeter niet het type neerslag kan meten.



Figuur 2.10 De werking van radar, uitgezonden en teruggekaatst signaal

2.3 Neerslagmeting met radar

| 21

2.3.1 Hoe werkt een neerslagradar?

De naam radar staat voor 'RAdio Detection And Ranging'. Een neerslagradar bestaat uit een zender en een ontvanger die samen één antenne gebruiken. Deze antenne bevindt zich in een koepel van kunststof die de draaiende antenne beschermt tegen vuil en (harde) wind. Voor een optimale ontvangst en onbelemmerde zendmogelijkheid staat de schotelantenne van de radar op een hoge en vrijstaande plek.

De neerslagradar draait rond en zendt onder verschillende hoeken kortdurende pulsen met elektromagnetische straling uit. Als deze straling een regendruppel bereikt, wordt de straling gedeeltelijk teruggekaatst. Vervolgens vangt de radar deze straling weer op. De tijd tussen het uitzenden van een puls en het ontvangen van het teruggekaatste signaal bepaalt de afstand van de regendruppel tot de radar. De sterkte van het teruggekaatste signaal is een maat voor de neerslagintensiteit. Een neerslagradar meet de neerslag dus indirect. Om de vertaling van het teruggekaatste signaal naar de neerslagintensiteit te verfijnen, vindt voortdurend onderzoek plaats.

2.3.2 De neerslagradars van het KNMI

Het KNMI beschikt over twee C-band-Dopplerradars. Deze staan in De Bilt en Den Helder. Het KNMI heeft de radars in eigen beheer en is verantwoordelijk voor het onderhoud en de verwerking van de gegevens. Deze Doppler-radars kunnen ook windsnelheid meten en neerslag van valse echo's scheiden.

Radarbereik

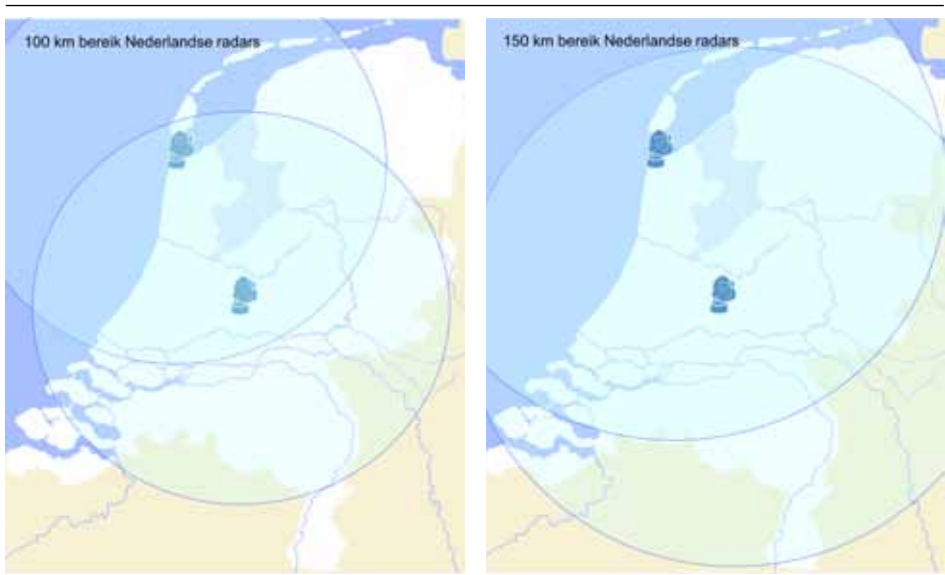
De radarantenne maakt elke 5 minuten 14 omwentelingen met een veranderende horizontale hoek tussen 0,3 en 25 graden, en zendt daarbij zo'n 200.000 pulsen uit. Door zijn relatief lange golflengte heeft de radar een bereik van 200 tot 300 km. Het

bruikbare bereik van de radar is beperkter en hangt als gevolg van de kromming van de aarde af van de hoogte waarop de neerslag zich bevindt: hoe hoger de neerslag, hoe groter het bereik van de radar. Meestal hangen de wolken in de winter lager dan in de zomer. Daarom is het bruikbare bereik van de radar voor kwantitatieve neerslagmetingen in de zomer over het algemeen groter dan in de winter.

De radar meet ook sneeuw. De mate waarin het radarsignaal wordt teruggekaatst, wordt onder andere bepaald door het oppervlak en de reflectiviteit van een regendruppel of een sneeuwvlok. Een sneeuwvlok is over het algemeen groter dan een regendruppel. Maar omdat een sneeuwvlok uit lucht en ijs bestaat, reflecteert deze in totaal minder straling dan een regendruppel met een gelijk volume aan water. De radar kan daarom het neerslagvolume in een sneeuwsituatie onderschatten.

22 |

De wolken waaruit sneeuw valt, bevinden zich vaak dicht bij het aardoppervlak. De radar kan daarom sneeuw tot op een afstand van ongeveer 100 km meten. Verderop zit de radarbundel 'boven de wolken'. Zomerse (onweers)buien bevinden zich juist vaak op grote hoogte (tot ruim 10 km), waardoor de radar deze tot op een afstand van circa 320 km kan meten. Het bruikbare bereik van radar ligt over het algemeen rond de 150 km.



Figuur 2.11 Bereik van de Nederlandse radar: ca. 100 km in sneeuw- en mistsituaties, ca. 150 km in gemiddelde neerslagsituaties en ca. 300 km in situaties met zomerse (onweers)buien.

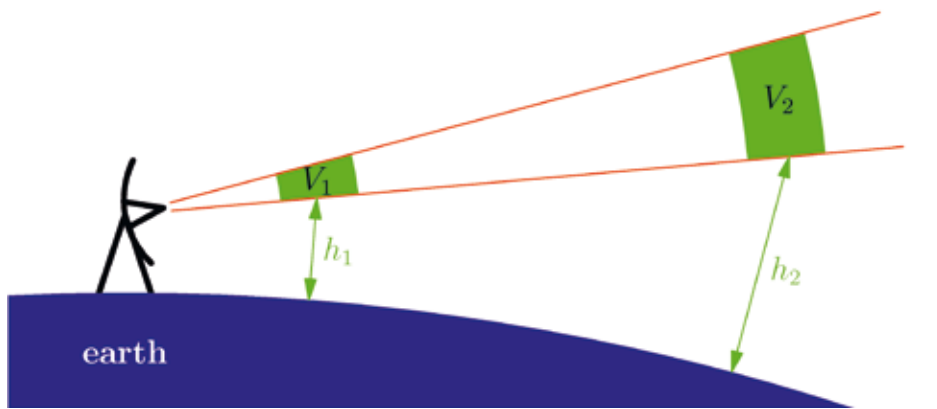
Correctie van radardata

Beide Nederlandse radars meten elke 5 minuten voor heel Nederland. Het KNMI corrigeert de radarreflecties voor de belangrijkste fouten, zoals valse reflecties door objecten (bijvoorbeeld vliegtuigen en vogels) in de lucht en op de grond (Wessels, 2006; Holleman, 2006; Holleman, 2007). Vervolgens combineert het KNMI de metingen van de twee radars tot één radarcomposiet van Nederland, met een ruimtelijke resolutie van 1 km^2 en een temporele resolutie van 5 minuten. Na de samenstelling van het composiet stelt het KNMI op verschillende momenten de radargegevens beschikbaar (zie paragraaf 4.1).

Voordelen neerslagmetingen radar

- De twee KNMI-radars geven voor heel Nederland een neerslagbeeld per 5 minuten en per 1 km^2 .
- Door het vlakdekkende beeld geeft de radar meer inzicht in lokale, extreme neerslag (Overeem et al., 2009). Regenmeters kunnen extreme buien missen (zie paragraaf 2.3.4).
- Dankzij het grote bereik kan de radar neerslagfronten vanaf een grote afstand detecteren, ook boven de Noordzee.
- Het KNMI onderhoudt en beheert de radars en zorgt voor de continuïteit van de datastroom.

| 23

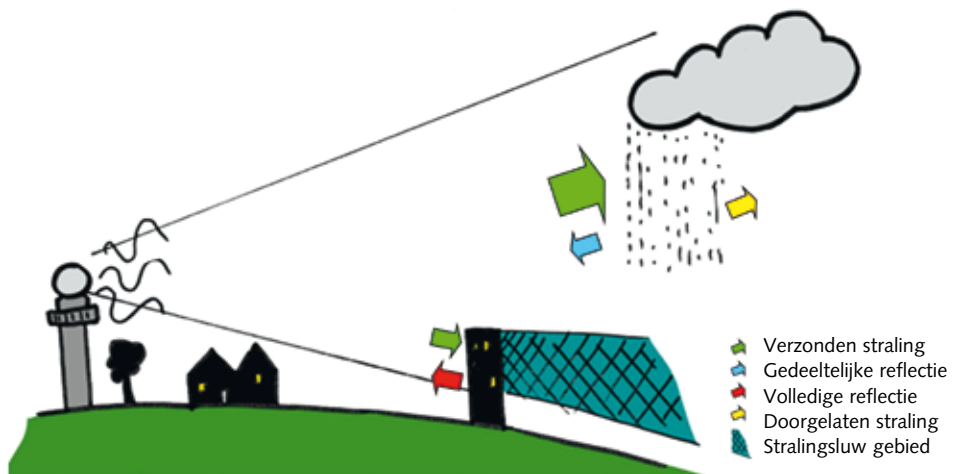


Figuur 2.12 De aardekromming beperkt het radarbereik (Bron: Leijnse, KNMI)

Belangrijke aandachtspunten voor het gebruik van radar

- De kromming van de aarde beperkt het bereik van de radar. Hoe groter de afstand tot de radar, hoe hoger de radarbundel boven het oppervlak meet (h_1 versus h_2) en hoe wijder de radarbundel is (V_1 versus V_2) (zie figuur 2.12). Vanaf een bepaalde afstand komt het radarsignaal in of boven het wolkendek. Deze 'overshooting'

- komt vooral voor in de winter of tijdens motregen (laaghangende bewolking).
- Een radar meet neerslag op een bepaalde hoogte ten opzichte van de grond. De neerslag die de radar boven de grond meet, valt niet op precies dezelfde locatie eronder op de grond (bijvoorbeeld door windinvloeden). Bovendien duurt het nog even totdat de op een bepaalde hoogte gemeten neerslag de grond bereikt of kan de neerslag (gedeeltelijk) verdampen. De tijdsvertraging is afhankelijk van de valsnelheid van de druppels en kan oplopen tot meerdere minuten.
 - Hoge objecten in de (directe) omgeving van de radar kunnen het radarzicht blokkeren. Hierdoor ontstaat een stralingsluw gebied in het radarbeeld achter het object ('beamblocking').
 - In de lucht bevinden zich objecten die in meer of mindere mate radarsignalen reflecteren, bijvoorbeeld vogels of vliegtuigen. Dit zijn zogenaamde valse reflecties. Met automatische correctieprocessen filtert het KNMI deze valse reflecties grotendeels uit het radarbeeld (Wessels, 2006).
 - Een heftige regenbui verzwakt het radarsignaal; een deel van het signaal gaat in de bui verloren (uitdoving). Hierdoor kan de radar de neerslag onderschatten die achter deze bui valt. Dit probleem is het grootst bij de kortgolvlige X-bandradars (zie paragraaf 2.3.3). Dankzij de lange golflengte van de straling kan de C-bandradar relatief goed door buien heen meten.
 - De radar meet neerslag indirect. Bij de omzetting van reflectie naar neerslag-intensiteit spelen de druppelgrootte en -verdeling een belangrijke rol (Uijlenhoet, 2008). Omdat de druppelgrootte en -verdeling niet altijd bekend zijn, ontstaat onzekerheid in deze bepaling.



Figuur 2.13 Afzwakking of volledige reflectie van het radarsignaal (Bron: K.A. Gortmaker, 2010)

2.3.3 Nieuwste weerradartechnieken

- Dual polarisatie radar

Diverse landen gebruiken inmiddels een verbeterde C-bandradar: een dual polarisatie radar (dual-pol radar). Dit type kan zowel verticaal als horizontaal gepolariseerd meten. Hierdoor geeft de dual-pol radar meer informatie over het type neerslag en druppelgrootteverdeling. Met deze informatie is een betere vertaling mogelijk naar de regenintensiteit. Meer informatie over de ontwikkeling van deze radar vindt u in paragraaf 5.2.

- X-bandradar

De scheepvaart gebruikt de X-bandradar al tientallen jaren om schepen in de omgeving te detecteren. Voor weerkundige toepassingen zijn inmiddels speciale X-bandradars ontwikkeld. Deze zijn vooral bruikbaar tot afstanden van zo'n 40 km van de radar. Ze hebben wel een zeer hoge ruimtelijke resolutie, wat ze interessant maakt voor stedelijk waterbeheer.

| 25

Werking

De X-bandradar zendt een puls uit met een golflengte van ongeveer 3 cm en een frequentie van ongeveer 8 tot 10 GHz. De golflengte van deze radar is kleiner dan die van een C-bandradar. Hierdoor kan de X-bandradar minder goed door regenbuien heen meten en heeft deze meer last van uitdoving. Daarom mist of onderschat de X-bandradar vaker de neerslag in of achter een heftige bui dan de C-bandradar.

Eigenschappen

Het piekvermogen van de radar, de instelling van de antenne en de weersituatie bepalen het bereik van de X-bandradar. Over het algemeen is het bereik 25 tot 50 km. X-bandradars hebben een hogere resolutie in ruimte en tijd dan C-bandradars. Ze kunnen elke minuut neerslag meten in grids tot 100 m² (Jensen en Overgaard, 2002). Ze zijn vrij compact en daarom eenvoudig te plaatsen in stedelijk gebied. De X-bandradar is per locatie goedkoper in aanschaf dan een C-bandradar. Maar om eenzelfde gebied te meten, is de X-bandradar uiteindelijk niet goedkoper dan een C-bandradar. Dit komt door het beperkte bereik en de relatief hoge operationele kosten.

Aanvulling op C-bandradar

Om inzicht te krijgen in de meerwaarde van de X-bandradar, zijn tussen Cabauw en Lopik 4 soorten radars geplaatst op de Cabauw Experimental Site for Atmospheric Research (CESAR). Een daarvan is een dual-pol X-bandradar (IDRA), die in 2008 is geplaatst. Op dit onderzoeksterrein staan naast radars nog vele andere meetinstrumenten, zoals 15 kantelbakregenschommers en 3 optische disdrometers. Sinds 2008 wordt de informatie van de radars onderzocht (Otto et al., 2010). Uit het onderzoek

komt naar voren dat vooral de slimme combinatie van de diverse meetinstrumenten (C-bandradar, X-bandradar en regenmeters) de grootste potentie heeft voor betrouwbare neerslaginformatie (Leijnse et al., 2010).



Figuur 2.14 Voorbeeld van X-bandradar op de mast in Cabauw (IDRA project)

Vanwege de positieve resultaten uit Cabauw hebben de gemeente Rotterdam, de provincie Zuid-Holland en de TUDelft besloten gezamenlijk een project te starten met een X-bandradar. Naar verwachting is deze radar in de loop van 2012 operationeel. Tot voor kort was nog weinig bekend over de mogelijkheden van X-bandradars voor het stedelijke gebied.

Tabel 2.2 Belangrijkste verschillen X-bandradar en C-bandradar

	X-bandradar	C-bandradar
Maximaal bereik	- Tot 100 km	- Tot 320 km
Bruikbaar bereik	- 50 km	- 150 km
Range ruimtelijke resolutie	- 3 tot 30 m	- 0,5 tot 1 km
Temporele resolutie	- Vanaf 1 minuut	- Vanaf 5 minuten
Belangrijkste voordelen	- Eenvoudig te plaatsen. - Hoge resolutie in ruimte en tijd mogelijk. - Beschikbaar als dual-pol radar.	- Het KNMI verzorgt het beheer. - De radar kan door een bui meten. - Radar heeft een groot bereik.
Belangrijkste nadelen	- Kan niet goed door neerslag heen meten (heeft last van uitdoving). - De eigenaar moet de X-bandradars onderhouden.	- Grote eenmalige investering. - In Nederland nog niet beschikbaar als dual-pol radar.

De laatste jaren is het aantal onderzoeken op het gebied van X-bandradar in binnen- en buitenland sterk toegenomen. Sinds 2008 staat een X-bandradar geïnstalleerd in Leuven (Goormans et al., 2008). De komende jaren wordt duidelijk wat de X-bandradar precies voor het stedelijk waterbeheer kan betekenen.

Een studie van Van Beek e.a. (2010) geeft een goed beeld van de huidige stand van zaken.

In tabel 2.2 staan de belangrijkste verschillen tussen de X-bandradar en de C-bandradar op een rij. De beschreven onderzoeken in het vervolg van dit boekje zijn gebaseerd op de meteorologische gegevens van de huidige C-bandradars van het KNMI.

2.3.4 Extreme neerslag en toegevoegde waarde van radar

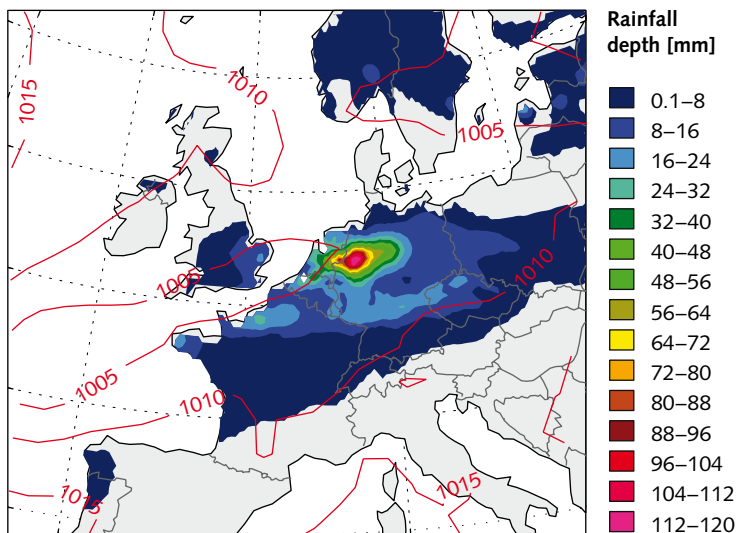
Voor het bebouwde gebied zijn vooral de korte, lokale buien van belang. Voor het (trager afvoerende) landelijke gebied gaat het om wat langer durende extremen. Met het huidige regenmeternetwerk in Nederland komt het voor dat stations deze (vaak kortdurende en locale) extreme buien niet registreren. De afstand tussen de regenmeters is soms te groot en de buien zijn soms te lokaal. De neerslag valt dan tussen de stations in plaats van boven de stations. Juist de extreme buien die van groot belang zijn voor het stedelijke (afval)waterbeheer zijn vaak erg lokaal. Dankzij de vlakdekkende radarinformatie zijn de extreme buien die tussen de regenmeters vallen wel te registreren.

| 27

Een ander punt is dat buitenwaterstanden ook de werking van de stedelijke riolering beïnvloeden. Deze standen worden beïnvloed door neerslag in de omgeving. Daarom is ook neerslaginformatie over de omgeving gewenst. Radar kan deze informatie leveren.

Hupselse Beek 2010

Op 26 en 27 augustus 2010 trof extreme neerslag het stroomgebied van de Hupselse Beek: 160 mm in 24 uur (herhalingsijd: meer dan 1.000 jaar). De kern van het regengebied trok precies over het stroomgebied van de Hupselse Beek, dat de



Figuur 2.15 Luchtdrukverdeling (hPa) en dagsom neerslag (mm) op 26 augustus 2010 (Brauer et al., 2011)

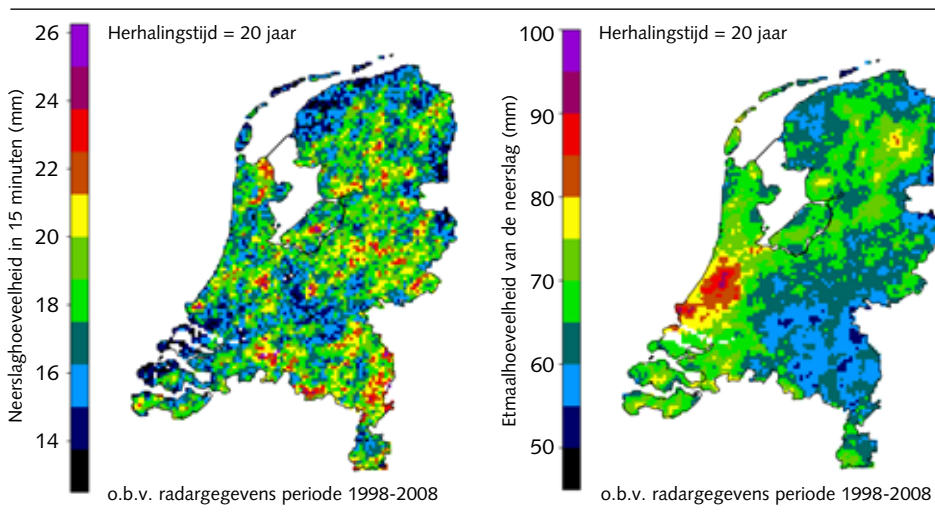
Wageningen Universiteit sinds de jaren 60 als experimenteel stroomgebied gebruikt. Door deze bui steeg de afvoer in de beek in 22 uur van 4 naar 5.000 l/s. Deze samenloop van omstandigheden beïnvloedde de werking van de stedelijke riolering. De snel stijgende buitenwaterstanden belemmerde de capaciteit van de overstorten.

De ruimtelijke omvang van gebiedsneerslag kan voor het functioneren van de landelijke watersystemen essentieel zijn. Niet alleen de neerslaghoeveelheid op het gebied van de Hupselse Beek was een record, maar ook de omvang van de bui. Radarbeelden verschaffen deze gewenste informatie over de uitgestrektheid van de neerslag. De 24-uursom overschreed 100 mm in een gebied van ongeveer 2.100 km², 120 mm in 740 km² en 140 mm in 170 km². De schaal van deze gebeurtenis is met stip de grootste in de afgelopen 11 jaar: in de op een na grootste bui werd in een gebied van 450 km² meer dan 100 mm gemeten.

28 |

2.3.5 Bepalen van neerslagstatistiek op basis van radarinformatie

De neerslagstatistiek in Nederland is hoofdzakelijk gebaseerd op de honderdjarige uursommenreeks van De Bilt. De maximum uursom in die reeks bedraagt ruim 43 mm neerslag op 13 juni 1953. Sinds 2003 beschikt het KNMI over informatie van ruim 30 automatische stations, die de neerslag digitaal registreren in intervallen van 10 minuten. De afstanden tussen deze stations zijn groot (gemiddeld 1 station per 1.000 km²). Daarom is het goed mogelijk dat een lokale, extreme bui deze stations mist, zodat ze niet wordt geregistreerd en daarom niet wordt meegenomen in de neerslagstatistiek.



Figuur 2.16 Neerslaghoeveelheden in 15 minuten (links) en etmaalhoeveelheden van de neerslag (rechts) die gemiddeld eens in de twintig jaar worden overschreden op basis van radargegevens (Overeem, 2009)

Omdat radarinformatie vanaf 1998 beschikbaar is, is deze informatie waardevol voor het bepalen van neerslagstatistiek (Overeem, 2009). De 10-jarige neerslagradarreeks biedt nieuwe mogelijkheden voor het maken van statistieken van extreme neerslag. Vooral voor korte duren zoals 15 minuten, waarvan slechts weinig stationsmetingen beschikbaar zijn. Ook regionale verschillen zijn beter dan ooit in kaart te brengen. Figuur 2.16 geeft hiervan een voorbeeld. Hierin ziet u de neerslagsom per 15 minuten (links) of per etmaal (rechts) die gemiddeld eens in de twintig jaar voorkomt op basis van radargegevens. Voor de etmaalhoeveelheid zijn de neerslagextremen in Zuid-Holland duidelijk hoger dan in de rest van het land. Voor de neerslaghoeveelheid over 15 minuten zijn geen duidelijke voorkeursgebieden te vinden.

Het voordeel van het gebruik van radarbeelden in neerslagstatistiek is dat de neerslag die tussen de stations valt ook wordt meegenomen. De huidige neerslagstatistiek geeft de kans op een bepaalde neerslaghoeveelheid op één punt (De Bilt). Met een voldoende lange reeks van radarbeelden zijn uitspraken te doen over hoe vaak een extreme gebeurtenis ergens in Nederland optreedt. Een neerslagsom van 43 mm in een uur heeft voor één locatie een herhalingstijd van 100 jaar. Maar een klokuurwaarneming van een radarpixel groter dan 43 mm komt gemiddeld grofweg 35 keer per jaar ergens in Nederland voor. Deze waarde is gebaseerd op het tellen van het aantal radarpixels van 6 km² met meer dan 43 mm regen over de periode 1998-2007 (Bron: Overeem, KNMI). De kans op een extreme neerslaghoeveelheid op één bepaalde locatie is dus wezenlijk iets anders dan de kans op een extreme neerslaghoeveelheid ergens in Nederland.

2.4 Samenvatting voor- en nadelen radar en regenmeters

Tabel 2.3 Overzicht voor- en nadelen radar en regenmeters

Neerslaginformatiebron	Voordelen	Nadelen
Gekalibreerde radarinformatie (C-bandradar)	<ul style="list-style-type: none"> - Geeft een ruimtelijk beeld van de neerslag per 5 minuten en per 1 km² voor heel Nederland. - Meer inzicht in lokale, extreme neerslag. - Het KNMI voert onderhoud en beheer uit. - Lage kosten voor gemeenten. 	<ul style="list-style-type: none"> - Radar meet neerslag indirect; de conversie van reflectie naar neerslagintensiteit brengt onzekerheid met zich mee. - Radar meet op een bepaalde hoogte in plaats van op de grond. Bovendien duurt het even voordat de gemeten neerslag de grond bereikt. (Plaatsverschuiving en tijdsvertraging). - De kwaliteit van radarinformatie neemt af naarmate de afstand tot de radar toeneemt.
Regenmeters	<ul style="list-style-type: none"> - Directe en nauwkeurige neerslagmeting bij juiste opstelling. - Meet de actuele neerslag op de grond. - Informatie is snel beschikbaar. 	<ul style="list-style-type: none"> - Voor een goed beeld van de neerslag-spreiding zijn veel regenmeters nodig. - Goede opstelling is essentieel, maar lastig te realiseren in bebouwd gebied (benodigde ruimte en vandalismegevoeligheid). - Hoge onderhouds- en beheerkosten. - Wind beïnvloedt regenmeting.

3 Gebruik neerslaginformatie bij stedelijk (afval) waterbeheer

Dit hoofdstuk gaat in op het gebruik van neerslaginformatie voor de verschillende toepassingsgebieden binnen het stedelijk (afval)waterbeheer, zoals het toetsen van het rioolmodel en de analyse van extreme neerslag. Elk toepassingsgebied stelt eigen eisen aan de actualiteit en de nauwkeurigheid van de neerslaginformatie. Dit hoofdstuk geeft inzicht in de behoefte aan neerslaginformatie (wat wil de gemeente weten met welke kwaliteit?) voor de volgende toepassingen:

- Operationeel beheer: het plannen van werkzaamheden waarbij neerslag tot problemen kan leiden, bijvoorbeeld tijdens het vervangen van een pomp (zie par. 3.1).
- Indicatie van het hydraulisch functioneren van het rioolstelsel:
 - het informeren van burgers in relatie tot wateroverlast of overstortingen (zie paragraaf 3.2.1);
 - het analyseren van de oorzaak van verhoogde grondwaterstanden (zie par. 3.2.2);
 - het afhandelen van schadeclaims na wateroverlast (zie paragraaf 3.2.3).
- Analyse van het hydraulisch functioneren van het rioolstelsel in samenhang met het watersysteem:
 - het toetsen aan richtlijnen (optreden water op straat, werking overstort) (zie paragraaf 3.3.1);
 - het toetsen van modelresultaten aan praktijkmetingen (validatie en kalibratie van rekenmodellen) (zie paragraaf 3.3.2);
 - het analyseren van gevolgen van extreme neerslag (zie paragraaf 3.3.3).
- Sturing van het hydraulisch functioneren van het rioolstelsel (RTC) (zie par. 3.4):
 - het optimaliseren van de capaciteit van het afvalwatersysteem (optimaal benutten berging);
 - het verwerken van extreme neerslaghoeveelheden (dreigende overbelasting van het systeem), bijvoorbeeld door het in- of uitschakelen van overstortbemalingen of het voormalen van watersystemen.

3.1 Operationeel beheer

Bij het plannen van werkzaamheden moet de gemeente weten of de komende dagen geen of nauwelijks neerslag is te verwachten.

Radar en regenmeters meten de neerslag die al is gevallen. Daarnaast kan door het extrapoleren van radarbeelden een neerslagvoorspelling tot enkele uren vooruit worden gemaakt (nowcasting, zie paragraaf 5.4). Om voor de komende 24 of 48 uur inzicht te krijgen in de verwachte hoeveelheid neerslag, kan een gemeente de informatie van neerslagverwachtingsmodellen gebruiken. Voorbeelden zijn het HiRLAM-model van het KNMI of het Europese ECMWF-model (zie ook paragraaf 5.4).

Voor het plannen van werkzaamheden waarbij alleen informatie nodig is over de kans dat het wel of niet gaat regenen, kan een gemeente de reguliere KNMI-weersverwachting gebruiken. Deze is beschikbaar via de KNMI-website, teletekst en het NOS-journaal.

3.2 Indicatie hydraulisch functioneren

3.2.1 Communicatie met burgers

De laatste jaren is voor de burger steeds meer neerslaginformatie beschikbaar gekomen. Niet alleen via de tv en websites, maar ook via zogenaamde apps op smartphones. Hierdoor is de toegankelijkheid van neerslaginformatie de afgelopen jaren sterk toegenomen. Recent onderzoek onder ruim honderd Amersfoortse burgers toont aan dat 82% van de geïnterviewden minimaal eenmaal per maand de buienradar opvraagt via internet (Dieker et al., 2010).

| 31

Eigenaren of bewoners van panden die zijn getroffen door wateroverlast als gevolg van neerslag willen een duidelijke uitleg van de oorzaak. Om inzicht te krijgen in de oorzaak van overlast, moet de gemeente over goede neerslaginformatie beschikken (minstens zo goed als de informatie die de burger heeft).

Radarbeelden vormen bij de communicatie een goed middel. Hiermee kan de gemeente visueel duidelijk maken hoe lokaal en hevig de buien waren en dat soortgelijke buien op andere locaties ook tot wateroverlast hebben geleid.

Neerslaginformatie via waterloket

Diverse gemeenten delen neerslaginformatie met burgers. Zo heeft de gemeente Dalfsen een link op haar waterloket geplaatst, waarmee de burger informatie krijgt over de hoeveelheid gevallen neerslag op wijkniveau (www.dalfsen.nl/neerslaginformatie). Hiermee biedt de gemeente een meerwaarde ten opzichte van de 'gewone' onlineneerslaginformatie, die vaak alleen in de vorm van plaatjes beschikbaar is. Op de website van de gemeente Dalfsen kan de burger op een kaart inzoomen, eventueel door een postcode in te vullen. Vervolgens geeft de website de hoeveelheid neerslag die in de afgelopen 24 uur én week is gevallen. Door gedetailleerde neerslaginformatie via het waterloket aan te bieden, maakt de gemeente het loket voor burgers aantrekkelijker.

Gemeenten zouden burgers ook kunnen vragen om via het waterloket specifiek aan te geven waar en wanneer wateroverlast of -schade is ontstaan. Zo gééft de gemeente niet alleen informatie, maar ontvangt ze ook relevante informatie van burgers. Door deze interactie met burgers kan de gemeente over steeds meer actuele informatie

beschikken, bijvoorbeeld over:

- veelvuldig werkende overstorten, bij meldingen van stank over ronddrijvend toiletpapier;
- verstoppingen in kolken of riolen, bij meldingen van locaties waar water na een hevige bui lang op straat staat (Ten Veldhuis, 2010);
- regelmatig optreden van water op straat.

Dit soort informatie speelt een belangrijke rol bij het valideren van modelresultaten en het begrijpen van de werking van het systeem.

Benodigde informatie

Om betrouwbare informatie aan de burger te verstrekken, moet de gemeente in elk geval beschikken over het neerslagverloop per 1 km².

32 |

3.2.2 Grondwater

Het grondwatersysteem reageert normaliter trager dan de riolering of het oppervlaktewatersysteem. De gemeente is aanspreekpunt voor de burger met klachten over grondwater. Mogelijke oorzaken van grondwateroverlast zijn onder te verdelen in natuurlijke oorzaken en oorzaken die samenhangen met menselijk ingrijpen in de waterhuishouding.

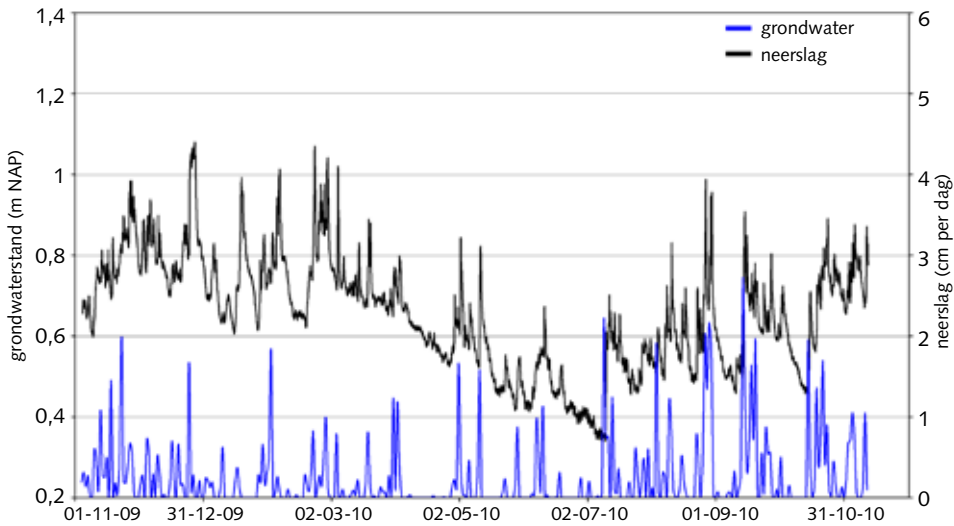
Mogelijke natuurlijke oorzaken:

- hevige neerslag;
- bodemopbouw (aanwezigheid van veenlagen);
- maaiveld daling;
- zeespiegelstijging.

Mogelijke oorzaken samenhangend met ingrepen waterhuishouding:

- dempen van watergangen;
- onvoldoende bouwrijp maken van woonwijken;
- vernieuwen van riolering;
- aanleg barrières voor grondwater (parkeerkelders, damwanden, etc.);
- dichtslibben van watergangen;
- rooien van bomen;
- reductie van grondwateronttrekkingen.

In figuur 3.1 ziet u een grafiek met het neerslag- en grondwaterverloop in de gemeente Zuidhorn. De grafiek laat de relatie zien tussen de hoeveelheid gevallen neerslag en de hoogte van de grondwaterstand.



Figuur 3.1 Relatie tussen gevallen neerslag en grondwaterstanden in gemeente Zuidhorn

Benodigde informatie

Om te bepalen in hoeverre neerslag bij verhoogde grondwaterstanden een rol speelt of heeft gespeeld, heeft de gemeente neerslagdagsommen over een langere periode nodig. Niet alleen van de gemeente zelf, maar ook van de directe omgeving.

3.2.3 Afhandelen schadeclaims

Voor het afhandelen van schadeclaims moet de gemeente over betrouwbare neerslaginformatie beschikken. Dat maakt discussies over schadeclaims en eventuele vergoedingen eenvoudiger.

Op het gebied van wateroverlast heeft de wetgever de verantwoordelijkheden en de invulling van de zorgplicht slechts summier vastgelegd. Maar inmiddels is vanuit enkele rechtszaken jurisprudentie ontstaan (zie het voorbeeld in het kader). Naar verwachting zal het aantal rechtszaken over schadeclaims als gevolg van extreem weer de komende jaren toenemen.

Ruimere interpretatie gemeentelijke zorgplicht

De voorzieningenrechter in Middelburg heeft op 10 juni 2009 een gemeente veroordeeld tot “het treffen van zodanige maatregelen dat daarmee de overstroming van de tuin en het huis van eisers door tijdelijk op straat geborgen hemelwater wordt voorkomen”.

Het gemeentelijke beroep op artikel 5:38 Burgerlijk Wetboek, dat bepaalt dat lagergelegen erven het water ontvangen dat van nature van hogergelegen erven afloopt, is volgens de rechter niet van toepassing. Deskundigen hebben namelijk vastgesteld dat de wateroverlast grotendeels het gevolg is van het door de gemeente aangebrachte straatprofiel. Volgens artikel 10.33 Wet milieubeheer en artikel 9a van de huidige Wet op de waterhuishouding heeft de gemeente een zorgplicht voor de inzameling en het transport van stedelijk afvalwater (waaronder hemelwater). De rechter vindt dat de gemeente hier niet aan deze zorgplicht heeft voldaan. De rechter interpreteert in deze zaak de zorgplicht ruimer dan tot nu toe gebruikelijk. Na deze uitspraak is duidelijk dat de gemeente behalve de afvoercapaciteit van het rioolstelsel ook de verwerkingscapaciteit van water op straat moet beoordelen.

34 |



Figuur 3.2 Water op straat. Overlast? (Bron: HydroLogic)

Goed huisvaderschap

Juridisch gezien is bij wateroverlast een benadering van goed huisvaderschap mogelijk. Dit houdt in dat de gemeente moet laten zien serieus werk te maken van wateroverlast, rekening houdend met het gegeven dat niet elk probleem te voorkomen is. Bij de aanpak van wateroverlast moet de gemeente bewust keuzes maken. Dat gaat verder dan het toetsen van de afvoercapaciteit met een maatgevende bui. Daar hoort bij dat zij een goed beeld moet hebben van de werking van het systeem en de zwakke punten daarin. Bij extreme buien moet de gemeente goed inzicht hebben in de hoeveelheid gevallen neerslag. Dan kan zij nagaan of het systeem heeft gewerkt zoals gewenst.

Benodigde informatie

De gemeente moet dus niet alleen weten hoeveel neerslag op een bepaalde dag is gevallen, maar ook wanneer de bui viel, hoe de bui was opgebouwd (neerslag per tijdstap) en hoe de neerslag over de gemeente was verdeeld. Dus het neerslagverloop van een bui per 1 km² en per 5 minuten.

| 35

3.3 Analyse hydraulisch functioneren

Gemeenten gebruiken neerslagmetingen vooral om het functioneren van de riolering te analyseren. Het functioneren van de riolering omvat:

- Het hydraulisch functioneren: is de capaciteit voldoende of krijgen we natte voeten?
- Het milieutechnisch functioneren: wat is de vervuiling van het oppervlaktewater?
- Het functioneren van een deel van het systeem, zoals een bergbezinkbassin of gemaal (randvoorziening).

Bij de vragen over het functioneren van de riolering moet de gemeente weten hoe de riolering wordt belast. Hoe functioneert het stelsel bij droog weer? En hoe bij een bepaalde neerslaggebeurtenis? Vaak is juist de extreme belasting van belang, waarbij een flinke neerslaggebeurtenis (een onderdeel van) het rioolsysteem treft.

3.3.1 Toetsen aan richtlijnen

Om het functioneren van het stedelijke (afval)watersysteem aan richtlijnen te toetsen, gebruiken gemeenten historische neerslaginformatie (zie de Leidraad Riolering, module C2100).

Afvoercapaciteit

Een gemeente controleert de afvoercapaciteit van een stelsel vaak met een (serie) ontwerpbui(en). De (traditionele) maatstaf is dat bij de maatgevende ontwerpbui (net) geen water op straat mag optreden. Een rioolstelsel moet voldoende capaciteit hebben

om het (overtollige) hemelwater af te voeren naar de overstorten of uitlaten. Meestal gaan gemeenten uit van ontwerp-bui 08, dus niet van werkelijk gevallen neerslag. Een gemeente legt in haar GRP vast op welke bui zij het hydraulisch functioneren toetst. (Zodra water op straat optreedt, worden de resultaten van de rekenmodellen ongeldig. Voor wateroverlast zijn deze modellen dus niet bruikbaar. De benadering van wateroverlast bij extreme neerslag komt aan de orde in paragraaf 3.3.3.)

Gemeenten zijn niet verplicht de ontwerp-buizen uit de Leidraadmodule te gebruiken. Een gemeente kan ook uitgaan van een lokaal gemeten bui waarvan zij heeft besloten dat deze in de toekomst niet meer tot problemen mag leiden. Het voordeel van het gebruik van standaardontwerp-buizen is dat het functioneren van systemen onderling beter te vergelijken is.

36 |

Milieubelasting

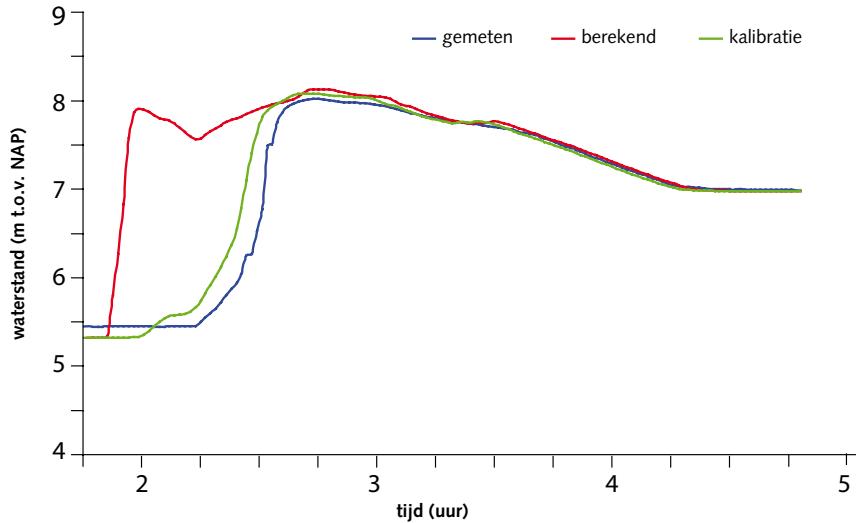
Gemeenten controleren het milieutechnisch functioneren van rioolstelsels (overstortingen) of infiltratievoorzieningen (lozingen) met een standaardregenreeks van De Bilt. De traditionele maatstaf voor de vuiluitworp wordt getoetst aan een gemiddelde waarde, een referentievuiluitworp. De gemeente maakt met de waterbeheerder afspraken over deze referentievuiluitworp. Als generieke maatstaf gaan de partijen vaak uit van de eenduidige basisinspanning van de Commissie Integraal Waterbeheer (CIW). Op plekken waar de waterkwaliteit om speciale aandacht vraagt, maken gemeente en waterbeheerder maatwerkafspraken.

Benodigde informatie

Gemeenten controleren de bergings-/ledigingscapaciteit van rioolstelsels of infiltratievoorzieningen met de 15-minutenregenreeks van De Bilt, periode 1955-1979. De afvoercapaciteit van rioolstelsels controleren zij met (een van) de ontwerp-bui(en) 05 t/m 10 (meestal bui 08, 09 of 10), met een herhalings-tijd van 1 tot 10 jaar. Deze buien zijn afgeleid uit de 15-minutenregenreeks van De Bilt, periode 1955-1979. Uitgangspunt bij deze ontwerp-buizen is dat de neerslagverdeling en het neerslagverloop over een gebied gelijkmatig zijn.

3.3.2 Validatie en kalibratie rekenmodellen

Bij het opzetten van een rioolmodel streeft een gemeente naar een model dat de werkelijkheid zo goed mogelijk benadert. Bij validatie van het model gaat zij na of de modelresultaten (bijvoorbeeld het waterstandverloop in de tijd) in grote lijnen lijken op de meetresultaten. Bij de kalibratie zoekt de rekenaar naar een set modelparameters die na aanpassing leidt tot een – in absolute zin – zo goed mogelijke overeenkomst tussen model en metingen. Om de werkelijkheid zo dicht mogelijk te benaderen, past zij/hij het model aan.



Figuur 3.3 Vergelijking van gemeten, berekende en gekalibreerd berekende waterstand in een rioelstelsel. De verticale as: het waterpeil in rioelstelsel, de horizontale as: tijd (eenheid niet relevant).

Met modelvalidatie en -kalibratie haalt de gemeente dus zo veel mogelijk fouten uit een model om tot nauwkeuriger berekeningsresultaten te komen. Dit is belangrijk, want op basis van modelberekeningen neemt de gemeente vaak besluiten over aanpassingen in het rioelstelsel, met verstrekende gevolgen voor het hydraulisch en milieutechnisch functioneren.

In meer uitgestrekte stedelijke gebieden of bij neerslag met een zeer buig karakter (grote ruimtelijke spreiding) zou een zeer uitgebreid grondmeetnet van meerdere regenmeters per 1 km² noodzakelijk zijn. Daarom selecteren gemeenten die met een grondmeetnet werken meestal alleen buien met een vrij homogeen intensiteitsverloop voor de modelkalibratie of -validatie (zie het voorbeeld in het kader).

Selectie buien voor validatie en kalibratie

In 1998-2000 voerde de gemeente Apeldoorn in het kader van een modelvalidatie voor een optimalisatiestudie een meetproject in de kern Apeldoorn uit. Het ging om een rioelstelsel van meer dan gemiddelde omvang, met zowel vlakke als lichthellende gebieden. Destijds toonden de vijf regenmeters in het gebied regelmatig de inhomogeniteit van de neerslag aan. Daarom kon de gemeente slechts een beperkt aantal buien voor de modelvalidatie gebruiken.

Noodzakelijke voorwaarden

Om een goede kalibratie of validatie te kunnen uitvoeren, moeten de neerslagmetingen voldoen aan hoge eisen. Daarbij gaat het vooral om het neerslagverloop in de tijd. Het tijdsinterval van de neerslag moet bij voorkeur zo klein mogelijk zijn. Ook belangrijk is dat tijdschalen van berekening en meting synchroon lopen.

Tijdverschuivingen van enkele minuten kunnen al zeer verstrend werken op het kalibratieresultaat. Bij hevige neerslag kunnen rioolstelsels namelijk binnen enkele minuten vollopen. Daarom gaat de voorkeur uit naar het gebruik van een data-acquisitiesysteem, dat centraal wordt gesynchroniseerd met een atoomklok.

Meerwaarde radar

Bij grotere rioleringsgebieden is inzicht in de neerslagverdeling over het gebied eigenlijk ook een noodzakelijke voorwaarde. Dit inzicht kan radarinformatie bieden. De relatief kleine investering hierin vergroot de waarde van de investering in het regenmeternetwerk, het data-acquisitiesysteem, het datavalidatiesysteem en de inzet van mensuren.

Benodigde informatie

In de praktijk is een zo hoog mogelijke nauwkeurigheid van de neerslag per tijdstap wenselijk (in rioleringsberekeningen meestal 1 minuut). Idealiter zou dat moeten neerkomen op minder dan 0,1 mm nauwkeurigheid. Maar dit is helaas praktisch niet goed haalbaar. Daarom is het streven een nauwkeurigheid van 0,5 mm per 5 minuten. Voor het inzicht in de ruimtelijke verdeling van de neerslag moet de hoeveelheid neerslag in elk geval per 1 km² beschikbaar zijn.

Meer informatie over modelvalidatie en -kalibratie vindt u in de RIONEDreeks-uitgave 1 (2001) en de RIONEDreeks-uitgave 2 (2003).

3.3.3 Analyse extreme neerslag

Om wateroverlast in de bebouwde omgeving te voorkomen, moet een gemeente extreme hoeveelheden neerslag op een acceptabele wijze kunnen verwerken. Het tijdelijk bergen van water op straat is daarbij vroeg of laat onvermijdelijk.

In vlak gebied kan het water op straat zich verdelen over een groot oppervlak. Hierdoor zal zelden (materiële) schade ontstaan. Het gaat vaak mis waar woningen op een te laag peil zijn aangelegd. De kans dat water vanuit de riolering op straat komt, is niet zo groot. Meestal wordt wateroverlast veroorzaakt omdat het afstromende water het riool niet in kan. In (licht)hellend gebied stroomt het water vaak via de straat naar lage punten in het maaiveld. Op plekken waar veel water zich op een relatief klein oppervlak verzamelt, kan water woningen of gebouwen binnenlopen. Hierdoor kan schade ontstaan.

Rol water op straat

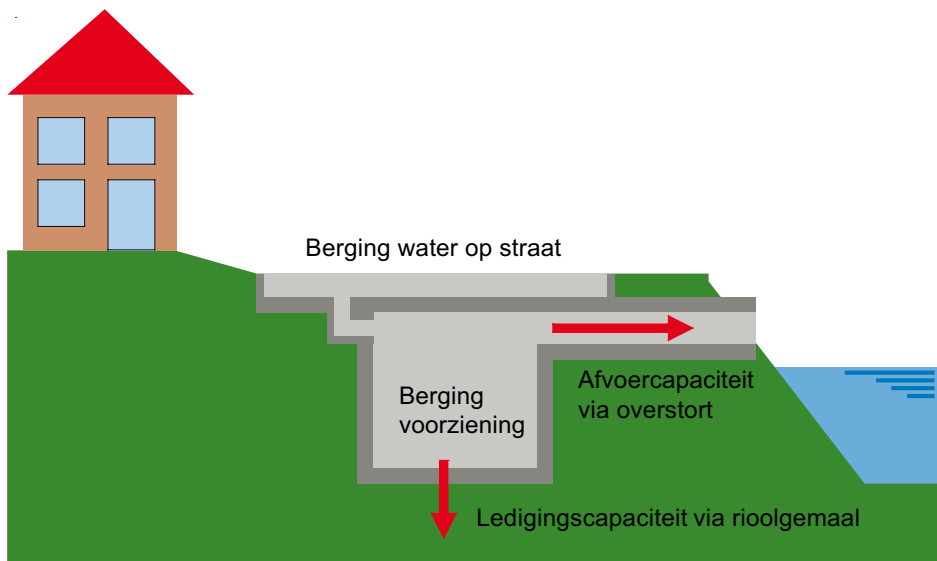
Een rioelstelsel is meestal ontworpen op een ontwerpbeurt met een herhalingstijd van circa $T = 2$ jaar (Leidraad Riolering bui 08). Het toetsingscriterium is dat het stelsel de ontwerpbeurt moet kunnen verwerken zónder dat water op straat optreedt.

Om de schade als gevolg van wateroverlast te beperken, moet een gemeente niet alleen kijken naar het functioneren van de riolering. Met de huidige klimaatontwikkelingen en toenemende kans op hevige neerslag speelt het (tijdelijk) bergen van water op straat een steeds belangrijkere rol. Om ervoor te zorgen dat de neerslag wordt geborgen op locaties waar de overlast is te beperken, moet een gemeente inzicht hebben in de weg die de neerslag aflegt. Hoe stroomt de neerslag af en waar verzamelt die zich? Om hierop een antwoord te geven, gebruiken gemeenten afstromingsmodellen. Op basis van de modelresultaten kan de gemeente maatregelen in de openbare ruimte treffen, zoals de aanleg van waterpleinen, groene daken en verkeersdrempels. Hierdoor verandert het neerslagafstromingspatroon zodanig dat het water zich op een locatie verzamelt waar de overlast beperkt is.

| 39

Benodigde informatie

Om de gevolgen van extreme neerslag te analyseren, moet een gemeente beschikken over betrouwbare neerslaginformatie per 1 km^2 en per 5 minuten. Deze neerslaginformatie dient als input voor het rioelstelselmodel.



Figuur 3.4 Werking rioelstelsel (de buffer van water op straat speelt een belangrijke rol in het voorkomen van overlast)

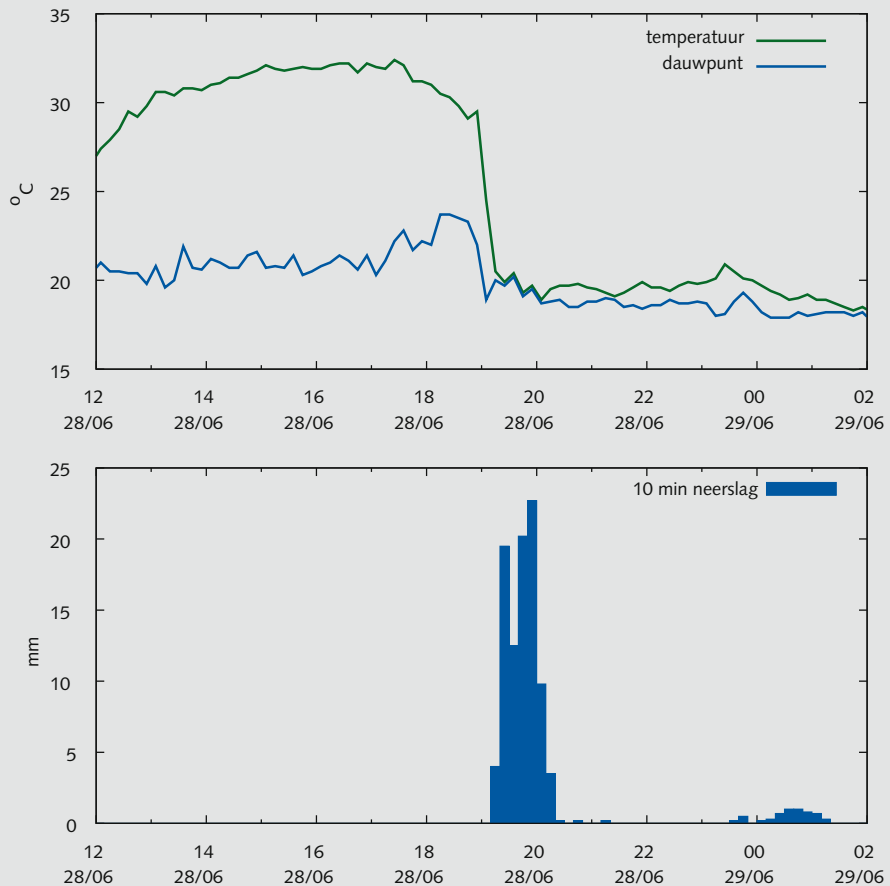
Voorbeeld extreme neerslag: Herwijnen 2011

Op 28 juni 2011 heeft het automatische KNMI-station in Herwijnen een bui geregistreerd van circa 94 mm in 70 minuten. In drie 10-minutenintervallen was de neerslaghoeveelheid groter dan van bui08 als geheel. De bui had een maximum (10 minuten) intensiteit van meer dan 120 mm/h, dat is ruim meer dan 300 l/s/ha. De officiële (klok)uursom van die waarneming bedraagt 79 mm, tussen 20.00 uur en 21.00 uur. De maximale (schuivende) uursom bedraagt 90 mm.

Toelichting KNMI

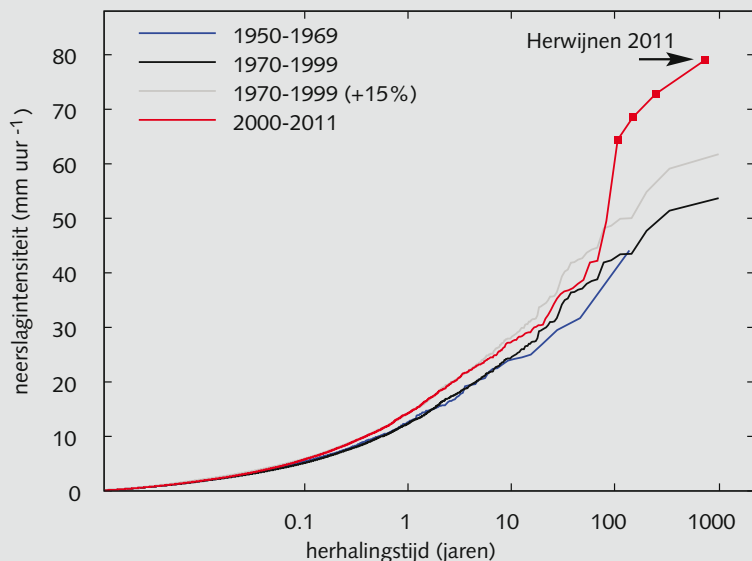
Het KNMI plaatst de bui van Herwijnen in het volgende perspectief (Lenderink, 2011). Figuur 3.6 laat de verdelingen van neerslaguursommen in Nederland in

40 |



Figuur 3.5 10-minutenwaarnemingen automatische KNMI-station in Herwijnen op 28/29 juni 2011 (Bron: Jilderda, Lenderink, KNMI)

verschillende tijdvakken zien, samengesteld uit waarnemingen van circa 30 stations. Herhalingstijden zijn berekend uit de empirische verdeling van deze waarnemingen. De daadwerkelijke herhalingstijden kunnen afwijken, in het bijzonder voor herhalingstijden groter dan 10 jaar. De vier punten in de grafiek corresponderen met de vier hoogste, in Nederland gemeten waarnemingen.



Figuur 3.6 Herhalingstijd van (klok)uursommen in Nederland voor verschillende tijdvakken (Bron: Lenderink, KNMI)

De gemeten hoeveelheid neerslag in Herwijnen is zeer uitzonderlijk; het KNMI spreekt van de hoogste waarneming van uurneerslag ooit gemeten in Nederland. Op andere waarnemingstations heeft het op 28 juni 2011 niet zo hard geregend. Wel rapporteerden zes stations op die dag een uursom van rond de 20 mm (tussen 17,8 en 26,3 mm). Dit komt overeen met een herhalingstijd van tussen de 2 en 10 jaar. Overigens is de ruimtelijke schaal van de intense kern van deze bui ongeveer 10 km. Daarom kan het waarnemingsnetwerk van circa 30 stations intense buien hebben gemist en kan het elders ook erg hard hebben geregend.

Niet-officiële regenmeters meten met enige regelmaat hogere waarden. Dit bevestigt dat de statistische onzekerheid van deze zeldzame buien redelijk groot is. Bij het anticiperen op extreme neerslag zouden gemeenten ervoor kunnen kiezen een redelijke veiligheidsmarge in de grootte van de maatgevende buien aan te nemen.

Statistiek

De vraag is naar welke extreme neerslaghoeveelheden gemeenten moeten kijken om te anticiperen op wateroverlast. Het bebouwde gebied is vooral kwetsbaar voor korte extreme buien. Te denken valt aan herhalingstijden in een range van bijvoorbeeld $T = 5 - 500$ jaar. Maar de statistiek van buien met grote herhalingstijden is zeer onzeker. In een (mogelijk) veranderend klimaat zijn resultaten uit het verleden zeker geen garantie voor de toekomst.

De neerslagstatistiek in Nederland is hoofdzakelijk gebaseerd op de honderdjarige uursommenreeks van De Bilt. De maximum uursom in die reeks bedraagt ruim 43 mm neerslag op 13 juni 1953. Sinds 2003 beschikt het KNMI over ruim 30 automatische stations, die de neerslag digitaal registreren in intervallen van 10 minuten. De afstanden tussen deze stations zijn groot (ongeveer 1 per 1000 km²). Daarom is het goed mogelijk dat de stations het verloop (10 minuten) van een lokale extreme bui (officieel) niet waarnemen. Dit kan leiden tot een onderschatting van de kans op extreme neerslag.

42 |

Met radarbeelden is de neerslag die tussen de stations valt eenvoudiger te analyseren. De huidige neerslagstatistiek geeft de kans op een bepaalde neerslaghoeveelheid op één punt (De Bilt). Met een voldoende lange reeks van radarbeelden zijn uitspraken te doen over hoe vaak een extreme gebeurtenis ergens in Nederland optreedt. Een dagsom van 100 mm heeft voor één locatie een herhalingstijd van 100 jaar, maar komt waargenomen in een radarpixel van 6 km² gemiddeld grofweg 28 keer per jaar ergens in Nederland voor. Dit is een telling over de periode 1998-2007 (Bron: Overeem, KNMI).

3.4 Sturing hydraulisch functioneren

Voor de sturing van rioolssystemen is al geruime tijd veel belangstelling. Via sturing kan een gemeente de capaciteit in het systeem optimaliseren en onbenutte capaciteit gebruiken voordat een overstorting in oppervlaktewater of water op straat optreedt. Met sturing kan de gemeente pompen en schuiven in het rioolstelsel zodanig regelen dat het stelsel zich gelijkmatig vult en daarmee overstorting of water op straat beperkt. Over het algemeen is hiervoor een centrale aansturing nodig, met telemetrie en besturingssystemen. Om de optimale inzet van gemalen, schuiven en eventueel ook overstorten te bepalen, moet de informatie uit verschillende rioleringsgebieden beschikbaar zijn.

Via sturing kan een gemeente het hydraulisch functioneren van de riolering verbeteren door:

- Het optimaliseren van de capaciteit van het afvalwatersysteem, de berging en de lediging door bijvoorbeeld het reguleren van de aanvoer van de rwzi op basis van

neerslagspreiding of het sturen van de interne afvoer om de berging in het rioolstelsel volledig te benutten.

- Het verwerken van extreme neerslaghoeveelheden bij dreigende overbelasting van het systeem door het variëren van het overstortdrempel niveau, het verlagen van de oppervlaktewaterstand (voormaling) of door overstortbemalingen naar het buitenwater.

Sturing en neerslaginformatie

Sturing in afvalwatersystemen vindt vaak plaats op basis van waterstanden in rioolstelsels. Gemeenten gebruiken nog maar weinig neerslaginformatie. Daarvoor zijn twee redenen: de precieze neerslagafvoer naar het riool is vaak onbekend (de rioolinloop) en er is nauwelijks tijd tussen het moment dat de neerslag valt en het moment dat het riool wordt belast. Om een stap te maken in de sturing, heeft een gemeente een nauwkeurige, actuele beschrijving van het stedelijke oppervlak én een hoge resolutie kortetermijnneerslagverwachting voor het stedelijke gebied nodig. Op dit moment zijn wel HIRLAM-neerslagverwachtingen beschikbaar, maar de bijbehorende resolutie in ruimte (7 x 11 km grid) en tijd (1 uur) zijn nog te grof (zie paragraaf 5.4) voor sturing op basis van neerslaginformatie.

| 43

Om inzicht te krijgen in de neerslagverwachting per 1 km² en per 5 minuten tot enkele uren vooruit, zijn nowcastinggegevens nodig. Via nowcasting worden de radarbeelden van de afgelopen uren op slimme wijze geëxtrapoleerd, zodat inzicht ontstaat in de verwachte neerslagverwachting per 5 minuten en per 1 km² tot enkele uren vooruit. Op dit moment zijn de nowcastinggegevens nog van onvoldoende kwaliteit voor sturingstoepassingen. Maar in Nederland wordt nu hard gewerkt aan het verbeteren van de nowcasting. Waarschijnlijk verbetert de kwaliteit van de neerslagverwachting de komende jaren en nemen de mogelijkheden voor het stedelijke (afval) waterbeheer hierdoor toe.

Benodigde informatie

Doordat neerslaggegevens van regenmeters en radar vertraagd beschikbaar komen, is sturing op basis van radarinformatie niet mogelijk. Tabel 3.1 geeft een overzicht van de benodigde informatie voor de meestvoorkomende sturingssituaties.

Beperkingen

De mogelijkheden van neerslaginformatie voor sturing in de (afval)waterketen zijn op dit moment nog beperkt. Als enkele uren tot een dag vóór de neerslaggebeurtenis duidelijk is waar deze optreedt en met welke intensiteit, is die informatie te gebruiken om het afvalwatersysteem in die situatie beter te laten functioneren. Maar de neerslagverwachting is op dit moment nog te grof en met onzekerheid omkleed,

Tabel 3.1 Overzicht benodigde neerslaginformatie per type sturing

Sturings situatie		Benodigde neerslaginformatie	Toelichting
Verwerken extreme neerslaghoeveelheden	Variëren overstortdrempelniveau.	Geen.	Neerslaginformatie biedt geen meerwaarde.
	Oppervlaktewaterstand verlagen door voormalen oppervlaktewater.	Meting van gevallen neerslag en kansverwachting van de neerslag tot enkele dagen vooruit.	De huidige bij het KNMI beschikbare metingen (regensmeters en radar) en verwachtingen (HIRLAM en EPS) zijn van voldoende kwaliteit om met een tijdreeksmodel een verwachte waterstand te berekenen die het gevolg is van al dan niet voormalen.
	Overstortbemalingen naar buitenwater.	Betrouwbare neerslagverwachting tot enkele uren vooruit, bij voorkeur per 5 minuten en per vierkante kilometer.	De huidige bij het KNMI beschikbare radarverwachtingen (nowcasting) zijn van onvoldoende kwaliteit. De verwachting is dat de kwaliteit in de nabije toekomst aanmerkelijk beter wordt.
Optimaliseren capaciteit regionaal afvalwatersysteem	Aanvoer rwzi op basis van neerslagspreiding.	Betrouwbare neerslagverwachting tot enkele uren vooruit, bij voorkeur per 5 minuten en per vierkante kilometer.	De huidige bij het KNMI beschikbare radarverwachtingen (nowcasting) zijn van onvoldoende kwaliteit. De verwachting is dat de kwaliteit in de nabije toekomst aanmerkelijk beter wordt.
	Stuwafvoer: sturen van de interne afvoer om de berging in het rioolstelsel volledig te benutten.	Geen.	Neerslaginformatie biedt geen meerwaarde ten opzichte van waterstandmetingen in het stelsel.

waardoor ook ongewenste regelacties mogelijk zijn. Bijvoorbeeld als de verwachte neerslag niet valt en een gemeente wel daarop heeft geanticipeerd. Ook zijn de te behalen rendementsverbeteringen in Nederland vaak beperkt, omdat de regelmacht – in termen van pomp- en bergingscapaciteit – beperkt is.

3.5 Samenvatting behoefte neerslaginformatie per toepassingsgebied

Tabel 3.2 Overzicht behoefte neerslaginformatie per toepassingsgebied

Toepassing	Onderdeel	Uitwerking	Benodigde informatie	Toelichting
§ 3.1 Operationeel beheer	Plannen uitvoering werkzaamheden.	Droge dag gewenst.	Weersverwachting voor een dag vooruit.	Voorbeeld: vervangen regenpomp in gemaal.
§ 3.2 Indicatie hydraulisch functioneren	Informerende burgers in relatie tot wateroverlast of overstortingen.	Wateroverlast.	Neerslagverloop bui per km ² en per 5 min.	
		Overstortingen.	Neerslagverloop bui per km ² en per 5 min.	
	Onderzoek grondwaterstanden.		Neerslagdagsommen over langere periode.	Bij voorkeur ook van de omgeving.
	Onderbouwen claims na wateroverlast.		Neerslagverloop bui per km ² en per 5 min.	
§ 3.3 Analyse hydraulisch functioneren	Toetsen aan richtlijnen Leidraad Riolerings (module C2100).	Water op straat (afvoer- capaciteit rioolstelsel).	Ontwerpbui 08, 09 of 10, eventueel met klimaatfactor.	De toetsing met ontwerpbuizen en -reeks is bedoeld om werking van systemen onderling te kunnen vergelijken.
		Vuiluitwerp (werking overstorten).	15 minutenregenreeks van De Bilt (1955-79).	
	Toetsen modelresultaten aan metingen.	Valideren en kalibreren rekenmodel.	Neerslagverloop per km ² en per 5 min., selectie enkele uiteenlopende en relevante buien die (zo) nauwkeurig (mogelijk) zijn gemeten.	Informatie uit regenmeters en radarbeelden in samenhang bekijken om buien te selecteren die voor deze toetsing geschikt zijn.
	Analyseren gevolgen extreme neerslag.		Neerslagverloop per 1 km ² en per 5 minuten.	Bij voorkeur een zo lang mogelijke meetreeks
§ 3.4 Sturing hydraulisch functioneren (RTC)	Optimaliseren capaciteit afvalwatersysteem.	Optimaliseren benutten berging rioolstelsel en aanvoer naar rwzi.	Neerslaginformatie minder relevant dan metingen in het systeem.	Effectiviteit hangt vooral af van de regelmacht.
	Verwerken extreme neerslaghoeveelheden.	Dreigende overbelasting systeem.	Verwachte neerslaghoeveelheden enkele uren/dagen vooruit.	Benodigde duur vooruit hangt af van de regelmacht.

4 Combinatie van radar en regenmeters

Uit hoofdstuk 3 blijkt dat een gemeente voor doelmatig stedelijk waterbeheer minimaal betrouwbare neerslaginformatie per 5 minuten en per 1 km² nodig heeft. Met alleen een traditioneel grondmeetnet is dit praktisch en economisch niet haalbaar. In combinatie met radarinformatie ontstaat wél neerslaginformatie van voldoende kwaliteit.

Dit hoofdstuk gaat over de combinatie van neerslaginformatie uit regenmeters en radar. Allereerst geeft paragraaf 4.1 een overzicht van de neerslaggegevens die het KNMI levert. Om hieruit betrouwbare, lokale neerslaginformatie af te leiden, moeten gemeenten deze gegevens (laten) kalibreren met metingen van grondregenmeters. De belangrijkste aandachtspunten hiervoor komen in paragraaf 4.2 aan de orde. Vervolgens beschrijft paragraaf 4.3 diverse onderzoeken waarin neerslaginformatie uit radar en regenmeters zijn vergeleken.

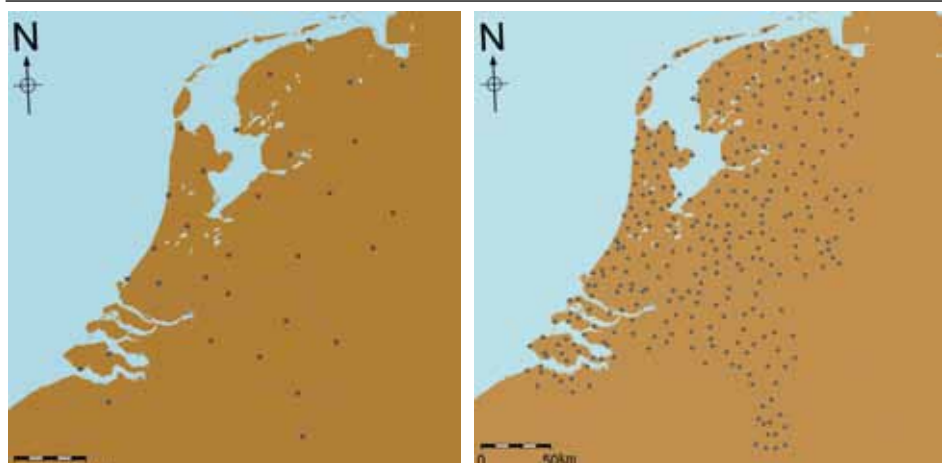
46 |

4.1 Welke neerslaggegevens levert het KNMI?

Het KNMI is in Nederland de belangrijkste bron van neerslagdata. Het instituut beheert en onderhoudt twee radars en een uitgebreid regenmeternetwerk. Overheden, universiteiten en verschillende marktpartijen gebruiken de neerslagdata van het KNMI.

Data uit regenmeters

Figuur 4.1 geeft een overzicht van de KNMI-regenmeters in Nederland. Het instituut beschikt over:



Figuur 4.1 De KNMI-regenmeters in Nederland: ruim 30 automatische regenmeters (links) en ruim 300 dagstations (rechts) (Bron: Overeem, KNMI)

- Ruim 30 automatische stations die per 10 minuten en per uur een meting registreren. Naast neerslag meten deze stations ook andere meteorologische variabelen, zoals de windrichting, windsnelheid en temperatuur. De dekking van de automatische stations in Nederland is ongeveer 1 regenmeter per 1.000 km².
- Ruim 300 handregenmeters die KNMI-vrijwilligers elke dag om 08.00 Universal Time (in Nederland: zomertijd 10 uur, wintertijd 9 uur) aflezen. De dekking van deze dagstations is ongeveer 1 regenmeter per 100 km².

Data uit radars

De twee KNMI-radars in De Bilt en Den Helder geven samen een vlakdekkend neerslagbeeld van Nederland (zie figuur 2.11).

Het KNMI levert sinds 2008 de volgende radarproducten met een resolutie van 1 km²:

| 47

- Per 5 minuten: ongekalibreerde 5-minutenneerslagintensiteit (dit is een momentopname en geen neerslagsom over 5 minuten). Deze informatie is met circa 5 tot 10 minuten vertraging beschikbaar.
- Per uur: 3-uursneerslagsom, minimaal gekalibreerd met ruim 30 automatische regenmeters die neerslag per 10 minuten registreren. Hierbij wordt het gehele radarbeeld gecorrigeerd met 1 correctiefactor. Deze informatie is circa 30 minuten na afloop van de meting beschikbaar. Uit de voortschrijdende 3-uurssom zijn uursommen af te leiden.
- Per 24 uur: 24-uursneerslagsom van 8 tot 8 uur (Universal Time), lokaal gekalibreerd met een neerslagcorrectieveld verkregen uit de ruim 300 handregenmeters (zie figuur 4.1 rechts). Deze informatie komt elke dag rond 14 uur 's middags Universal Time beschikbaar (vertraging van circa 6 uur).

Kalibratie radarbeelden noodzakelijk

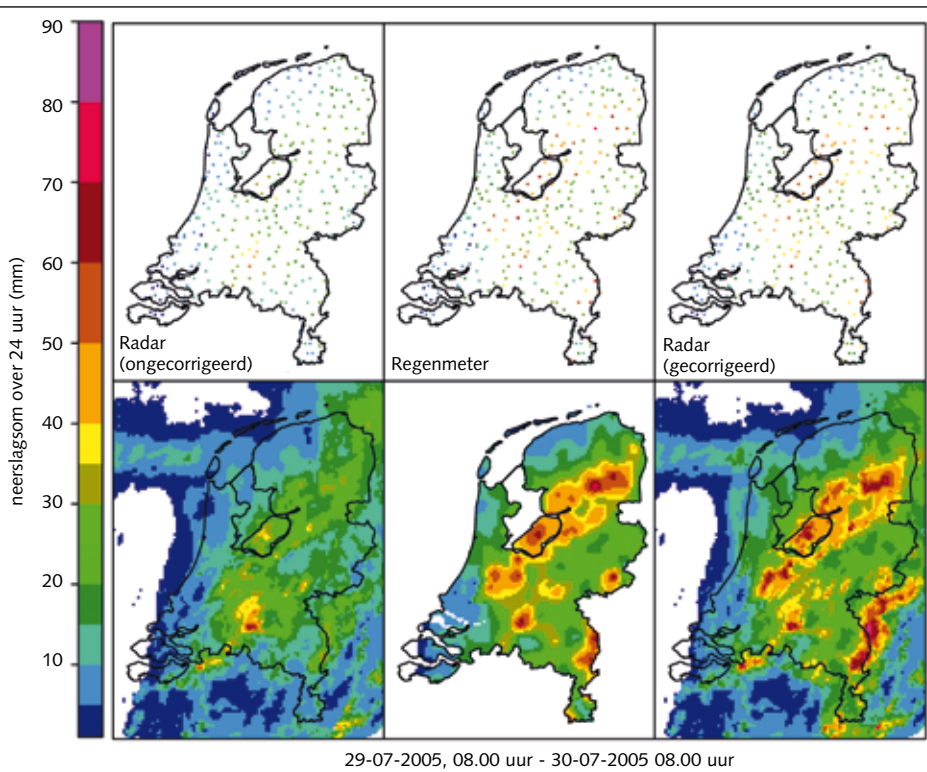
Zoals uit hoofdstuk 3 blijkt, is voor het stedelijk (afval)waterbeheer minimaal neerslaginformatie per 5 minuten en per 1 km² nodig. De 5-minuteninformatie die direct afkomstig is van het KNMI, is ongekalibreerd. Dat wil zeggen dat de radarbeelden nog niet zijn getoetst aan de neerslagmetingen van de grondstations. Deze ongekalibreerde radarinformatie bevat onnauwkeurigheden (soms wel meer dan 50% afwijking) die onder meer te maken hebben met:

- de verwaaiing van de neerslag;
- de tijdsduur tussen de meting in de lucht en het moment dat de regendruppel op de grond valt;
- de uitdoving van het radarsignaal als achter een bui wordt gemeten.

Daarom is voor de toepassing van 5-minutenradarinformatie in het stedelijk (afval) water een kalibratieslag nodig met grondstations. Hiervoor zijn de ruim 300

dagstations en de ruim 30 automatische stations van het KNMI te gebruiken, maar ook regenmeters van gemeenten of waterschappen. Bij gebruik van andere dan de KNMI-regenmeters is een juiste meteropstelling in of nabij de stad essentieel, bij voorkeur volgens de WMO-opstellingseisen. Na de kalibratie ontstaat een kwalitatief hoogwaardig, vlakdekkend neerslagbeeld dat voor de meeste toepassingen in stedelijk waterbeheer geschikt is (zie hoofdstuk 3).

Figuur 4.2 toont het verschil tussen het ongekalibreerde radarbeeld (linksonder) en het gekalibreerde radarbeeld (rechtsonder).



Figuur 4.2 Combinatie regenmeter- en radargegevens (Bron: Overeem, KNMI)

Door de combinatie van beide neerslaginformatiebronnen worden de sterke punten van de radar (goed inzicht in ruimtelijke spreiding) verenigd met de kracht van de regenmeter (een goede meetwaarde op de grond).

4.2 Aandachtspunten bij kalibratie radarbeelden

Het samenvoegen van neerslaggegevens van radar en grondstations is een wiskundige uitdaging. Hierbij spelen een rol:

- De nauwkeurigheid van de radar- en de grondstationsmetingen. Het is bij kalibratie de bedoeling om het ruimtelijke radarbeeld als het ware naar de gemeten waarde van het grondstation toe te trekken. Uitgangspunt is dat een regenmeter een representatief beeld van de gevallen neerslag op de grond geeft.
- Voordat u een vergelijking maakt tussen regenmeter- en radargegevens, is het goed te beseffen dat het om verschillende soorten metingen gaat:
 - Een regenmeter geeft een puntmeting over een heel klein oppervlak (circa 200 cm²) op de grond, een radar een volumemeting (orde 1-10 km³).
 - Een regenmeter meet direct (behalve de optische en akoestische disdrometer, zie paragraaf 2.2.2), een radar indirect.

| 49

De gegevens van een regenmeter en de radar komen daarom nooit precies overeen.

- De neerslag varieert binnen een radarvlak van 1 km² (Jafrain, 2010). Zo zal er weinig verschil zitten tussen de gevallen neerslag op een willekeurige locatie en een tweede locatie een meter daarnaast. Wanneer dit punt enkele kilometers verderop ligt, kan dit verschil wel aanzienlijk zijn. Bij de kalibratie wordt aangenomen dat de waarde van de regenmeter representatief is voor een radarvlak van 1 km². In hoeverre een puntmeting werkelijk representatief is voor een groter gebied, hangt af van verschillende factoren, bijvoorbeeld het type bui en het tijdsinterval. Een zomerse, convectieve bui heeft een grotere ruimtelijke spreiding dan frontale, winterse neerslag. In de winter is de puntmeting van een regenmeter dan ook representatiever voor een groter gebied dan in de zomer. Op uur-, bui- of dagbasis is dat weer anders. Hoe groter het tijdsinterval, hoe representatiever een regenmeter is voor een groter gebied. Daarom zal de correlatie tussen een radarmeting (vlak) en een regenmeter (punt) op kleinere tijdschaal kleiner zijn dan op grotere tijdschaal. Dit betekent overigens niet dat de radar of de regenmeter op kleinere tijdschaal minder goed meet dan op grotere tijdschaal.
- De kwaliteit van het gekalibreerde radarbeeld is afhankelijk van het aantal gebruikte grondstations. Hoe meer regenmeters u gebruikt, hoe beter het gekalibreerde neerslagbeeld is. Bij een bepaalde dichtheid van het meetnetwerk heeft de toevoeging van extra regenmeters wel steeds minder meerwaarde. Afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid ontdekt u tijdens het kalibratieproces met hoeveel toegevoegde regenmeters een optimaal resultaat is te behalen.

Ingewikkelde materie

Het combineren van punt- en vlakmetingen is een ingewikkelde materie. Hiervoor zijn vele wiskundige technieken beschikbaar, variërend van heel eenvoudig tot zeer

geavanceerd. Volgens een onderzoek van het Koninklijk Meteorologisch Instituut België geeft 'kriging with external drift' de beste resultaten. Hierbij ontstaat door ruimtelijke interpolatie van de puntmetingen een ruimtelijk neerslagbeeld. Vervolgens worden de radarmetingen gebruikt om dit ruimtelijke beeld te verbeteren. Ook eenvoudige methodes leveren volgens het onderzoek al een grote verbetering op van de radarbeelden. Zoals een 'mean field bias correction', waarbij de radarmetingen met één uniforme factor worden vermenigvuldigd. Deze kalibratiemethode past het KNMI toe op haar 3-uursradarbeelden.

De komende jaren moet duidelijk worden welke techniek voor de Nederlandse situatie de beste resultaten oplevert.

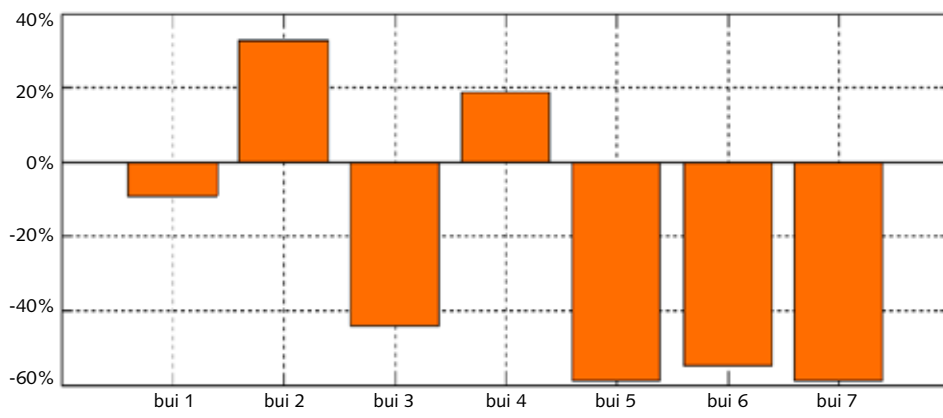
50 | 4.3 Vergelijkingsonderzoeken radar en regenmeters

4.3.1 Onderzoek ongekalibreerde radargegevens in Boxtel

De gemeente Boxtel heeft een onderzoek (Mantje et al., 2009) laten doen naar de betrouwbaarheid van de ongekalibreerde radargegevens per 5 minuten die het KNMI beschikbaar stelt. Hiervoor zijn de ongekalibreerde radarmetingen vergeleken met de metingen van twee kantelbakregenmeters van de gemeente Boxtel. Deze vergelijking is voor zeven neerslaggebeurtenissen uitgevoerd (zie figuur 4.3).

Uit het onderzoek blijkt dat tussen de gemeten neerslagvolumes van de radar en de grondstations aanzienlijke verschillen bestaan. De gemiddelde afwijking op buibasis was meer dan 30%.

Dit onderzoek geeft aan hoe belangrijk het is radarinformatie met gegevens van



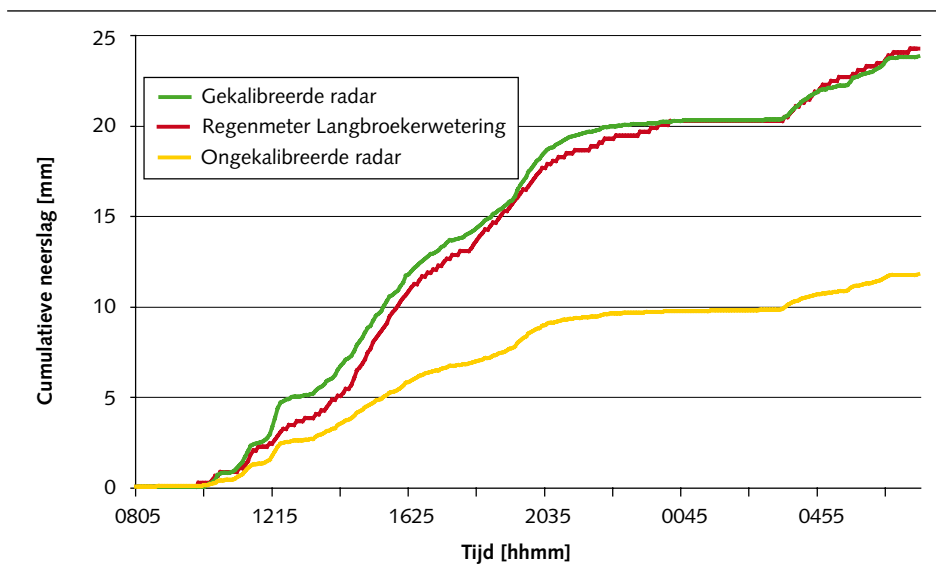
Figuur 4.3 Afwijkingen in gemeten buivolumes (ongekalibreerde radargegevens versus kantelbakregenmetergegevens) voor zeven neerslaggebeurtenissen in Boxtel

grondregensmeters te kalibreren. De ongekalibreerde radargegevens van het KNMI geven wel een goede indicatie van of het wel of niet heeft geregend. Maar ze geven geen goede schatting van de hoeveelheid regen die is gevallen.

4.3.2 Onderzoeken gekalibreerde radargegevens

Deze paragraaf toont alleen onderzoeksresultaten waarbij voor de kalibratie de ruim 300 KNMI-dagstations zijn gebruikt. Figuur 4.4 laat het belang van deze kalibratie zien voor een representatieve bui van 9 maart 2006. De groene lijn geeft het neerslagverloop volgens de ongekalibreerde radar weer. De blauwe lijn geeft het neerslagverloop van het station Langbroekerwetering weer en de paarse lijn het verloop volgens de radar die is gekalibreerd met de ruim 300 stations van het KNMI (regenmeter Langbroekerwetering is dus niet gebruikt in het kalibratieproces). Zoals in figuur 4.6 te zien is, heeft de ongekalibreerde radar een afwijking van ruim 50% (11 mm versus 23 mm). Na kalibratie is het verschil van de cumulatieve neerslagsom tussen de regenmeter en de radar minder dan 1 mm.

| 51

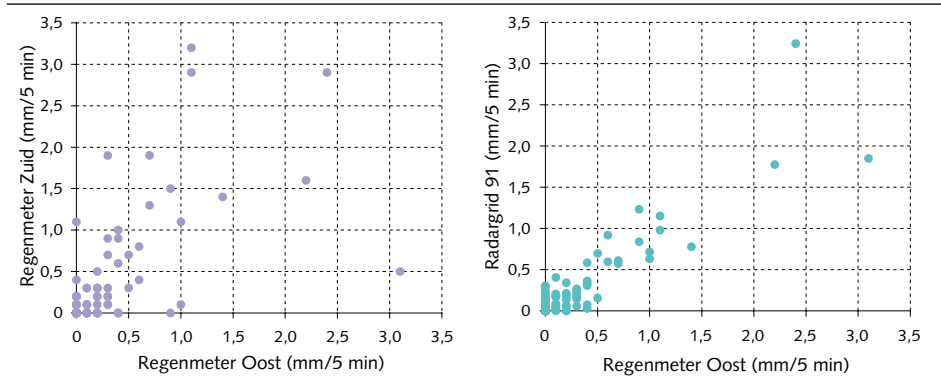


Figuur 4.4 Effect kalibratie radargegevens met alleen KNMI-handregensmeters (Bron: Lobbrecht, HydroLogic).

Vergelijkbare onderzoeken zijn op diverse locaties uitgevoerd, zoals in Limburg, Overijssel, Noord-Holland en Brabant. Uit alle onderzoeken blijkt dat de correlatie tussen de radar- en de regenmetermetingen op buibasis hoog is: rond de 0,9. Voor extremere neerslaggebeurtenissen is deze correlatie zelfs hoger (Mantje en Clemens, 2011).

Vergelijking op 5-minutenbasis in Amersfoort

Er zijn diverse vergelijkingen van neerslaggegevens op basis van regenmeters of radar te maken. Bijvoorbeeld een vergelijking op 5-minuten-, uur- of buibasis, zowel cumulatief als per tijdstap. Voor de gemeente Amersfoort is een vergelijking gemaakt van de regenmeter- en radargegevens op 5-minutenbasis (Lobbrecht 2010).



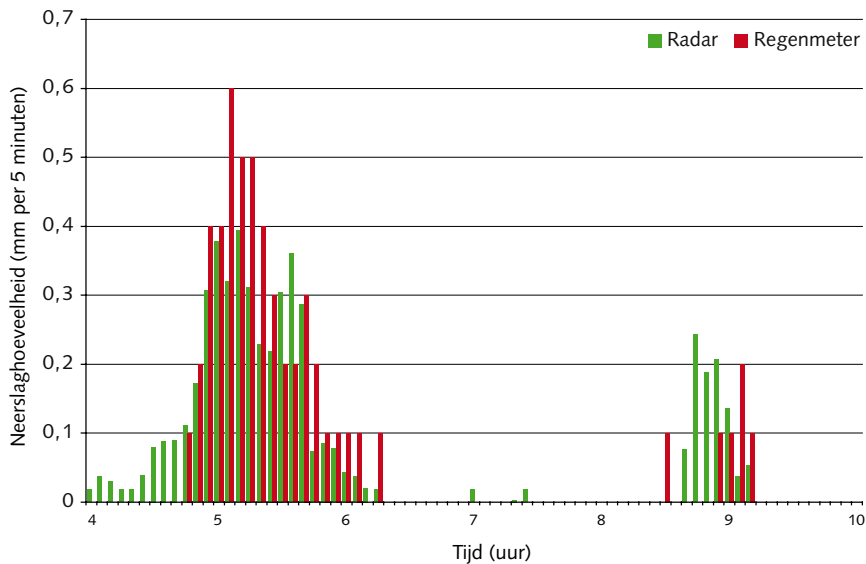
Figuur 4.5 Vergelijking neerslaggegevens op 5-minutenbasis in Amersfoort (Bron: Lobbrecht, HydroLogic).

In figuur 4.5 ziet u links de vergelijking van gegevens op 5-minutenbasis tussen de regenmeter Oost en de gekalibreerde radar. Rechts ziet u de vergelijking tussen de regenmeters Oost en Zuid, die slechts 2 km van elkaar staan. Zowel tussen radar en regenmeter als tussen de regenmeters onderling bestaan verschillen.

Ondanks het feit dat de twee regenmeters rechts maar 2 km van elkaar vandaan staan, zijn de onderlinge verschillen hier groter dan het verschil tussen de gekalibreerde radar en de regenmeter. Maar dit betekent niet dat de radar- of regenmeterinformatie onbetrouwbaar is op 5-minutenbasis. De verschillen komen onder andere door de grote neerslagvariatie op korte afstand. Daarnaast meet de radar iets anders dan de regenmeter, namelijk de gemiddelde neerslag over 1 km² op een bepaalde hoogte boven de grond.

Vergelijking op 5-minutenbasis in Weert

Figuur 4.6 laat de vergelijking van radar- en regenmetergegevens op 5-minutenbasis zien voor een bui in de gemeente Weert. De figuur laat zien dat de gekalibreerde radar al eerder neerslag meet dan de regenmeter. Mogelijk valt binnen de radarpixel van 1 km² al ergens neerslag, maar heeft deze bui de regenmeter nog niet bereikt. Als een bui zich langzaam verplaatst, kan het een half uur tot een uur duren voordat de bui de regenmeter bereikt. Bij zeer lokale neerslag kan het zelfs voorkomen dat de bui de



Figuur 4.6 Vergelijking radar en regenmeter op 5-minutenbasis in Weert

regenmeter helemaal niet bereikt. Daarnaast valt op dat de regenmeter tijdens de piek van de bui (tijdstep 15) meer neerslag meet dan de radar. Blijkbaar bevindt op tijdstep 15 de piek van de bui zich precies boven de regenmeter. De gemiddelde neerslag over de radarpixel van 1 km² zal dan lager zijn.

Vergelijking op basis van meetreeks van 1 jaar

Ook het Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier heeft onderzoek laten doen (Mantje en Clemens, 2011) naar de mogelijkheden om radarneerslagmetingen als vervanging of aanvulling van grondstationsmetingen te gebruiken voor riolerings-toepassingen. Voor de vergelijking is een meetreeks gebruikt van één jaar met veel neerslaggebeurtenissen.

Figuur 4.7 laat links de locatie van de grondstations zien en rechts de in de vergelijking meegenomen gridcellen van de radarmetingen. Hierbij gaat het om de gridcel waarin het grondmeetstation ligt plus de acht omliggende gridcellen.



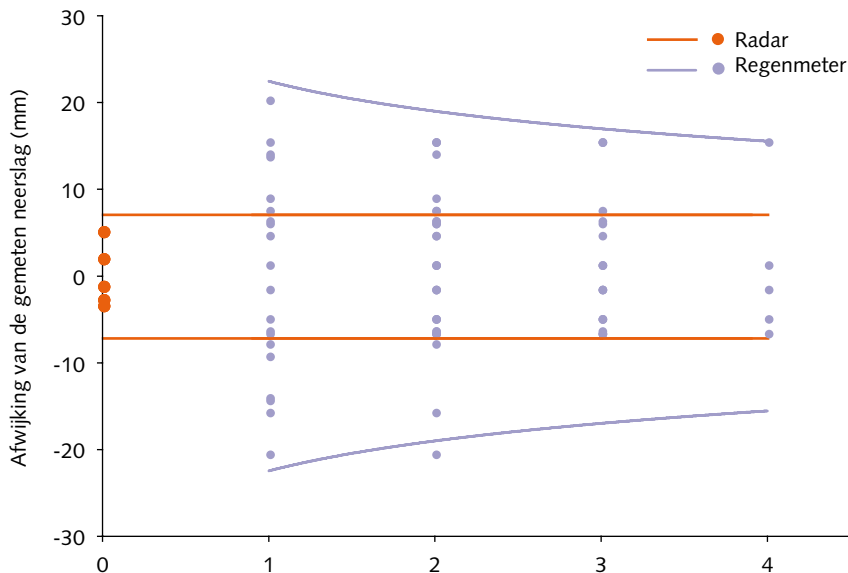
54 | **Figuur 4.7** Locaties grondstations (links) en gridcellen radarmetingen (rechts)

Uit de vergelijking kwamen de volgende resultaten naar voren:

1. De neerslagreeks op basis van radargegevens was voor één jaar vrijwel volledig. De reeks op basis van de regenmeters was minder compleet. Van de veertien regenmeters waren de data van twee regenmeters onbruikbaar. Van de overige twaalf regenmeters waren de data gedurende de dooi- en sneeuwperiode van 2,5 maanden niet bruikbaar. In de overige periode waren de data beschikbaar en bruikbaar.
2. De gemeten totale buivolumes van gekalibreerde radar en grondstations komen goed overeen.
3. Het verloop van een neerslaggebeurtenis volgens radar en grondstations komt in het algemeen goed overeen.
4. Op korte tijdschalen (kleiner dan 30 minuten) zijn de overeenkomsten in gemeten intensiteiten beperkt.
5. De radarneerslagmetingen vertonen een tijd- en/of plaatsverschuiving ten opzichte van de grondstations. Windinvloeden kunnen bijvoorbeeld voor deze verschuiving zorgen.

Onderzoek uitsluitend gebruik van regenmeters

Een veelgestelde vraag is of alleen het gebruik van regenmeters betrouwbare neerslaginformatie voor het bebouwde gebied kan bieden. Hiernaar heeft de gemeente Amersfoort onderzoek laten doen (Lobbrecht et al., 2010). De gemeente Amersfoort had op dat moment 5 regenmeters opgesteld. De hoofdvraag was hoeveel regenmeters nodig zijn om voor Amersfoort (60 km²) neerslaginformatie te krijgen met dezelfde kwaliteit als de gekalibreerde neerslagradar voor zomerse buien met ruimtelijke spreiding. Het resultaat ziet u in figuur 4.8.



Figuur 4.8 Nauwkeurigheid van de geschatte neerslag op een locatie in Amersfoort. Punten zijn (gekalibreerde) registratie radar, registratie regenmeter, lijnen zijn 95% betrouwbaarheids intervallen (gekalibreerde) radar en regenmeter. (Bron: Lobbrecht, HydroLogic)

Figuur 4.8 laat de nauwkeurigheid van de geschatte neerslag op een locatie zien, op basis van de neerslagmetingen van een tot vier andere locaties. De rode, grotere punten geven de afwijking (in mm) tussen de registraties van de regenmeters en die van de gekalibreerde radar weer. De lijnen presenteren de 95%-betrouwbaarheidsintervallen voor regenmetingen en radarmetingen. Op de horizontale as ziet u het aantal gebruikte regenmeters om de hoeveelheid neerslag op de locaties van de overige regenmeters te schatten. Op de verticale as staat de afwijking van de schatting ten opzichte van de werkelijk gemeten waarde op die locatie in mm.

Uit figuur 4.8 blijkt dat hoe meer meetpunten worden gebruikt om ruimtelijk gespreide neerslag vast te stellen, hoe nauwkeuriger de informatie wordt. Maar de omhullende van 95% betrouwbaarheid komt met vier regenmeters nog niet in de buurt van die van de radarmeting (horizontale lijnen). Hieruit is te concluderen dat Amersfoort veel meer dan vijf regenmeters nodig zou hebben voor een resultaat dat kwalitatief vergelijkbaar is met de gekalibreerde radarmeting.

Om een bruikbaar beeld van de ruimtelijke spreiding van neerslag te krijgen, is ongeveer één regenmeter per 1 km² nodig. Dit is zowel onderhouds- en kosten-technisch als praktisch niet effectief.

4.4 Samenvatting

Neerslagradar is in de afgelopen jaren uitgegroeid tot een volwaardige methode om neerslag te registreren. Naast het gebruik als globale indicator voor neerslagspreiding in plaats en tijd wordt radar ook steeds geschikter om tot kwantitatieve metingen te komen. De belangrijkste toegevoegde waarde van neerslagradar is de relatief goedkope manier om een vlakdekkend beeld te krijgen van de neerslagspreiding in ruimte en tijd. Dit is met een traditioneel meetnet van grondmetingen praktisch en economisch niet haalbaar. De combinatie van gegevens uit radar en regenmeters biedt al met al de beste neerslaginformatie voor stedelijk (afval)waterbeheer.

Tabel 4.1 geeft voor de toepassingsgebieden uit hoofdstuk 3 aan welke neerslaginformatiebronnen geschikt zijn.

Neerslaginformatiebron	Communicatie met burgers	Grondwateranalyse	Afhandelen schadeclaims	Toetsen aan richtlijnen	Validatie en kalibratie	Analyse van extreme neerslag	Sturen hydraulisch functioneren
Radar, gekalibreerd met ruim 300 KNMI-dagstations. Gevalideerd met eigen, goed opgestelde automatische regenmeters.	+	+	+	+/-	+	+	-
Radarinformatie gekalibreerd met ruim 300 KNMI-dagstations.	+	+	+	+/-	-	+/-	-
Een of enkele goed opgestelde regenmeters met ongekalibreerde radar.	+/-	+/-	-	-	-	-	-
Slecht opgestelde regenmeter(s).	-	-	-	-	-	-	-
Neerslagverwachting op basis van KNMI-weersverwachting, HIRLAM of nowcasting.	-	-	-	-	-	-	+/-
Standaardneerslaginformatie (normbui 08 of de KNMI-reeksen).	-	-	-	+	-	-	-

Rood (-): niet geschikt; Geel (+/-): mogelijk geschikt, afhankelijk van de situatie; Groen (+): geschikt.

5 Toekomstperspectief

Met de huidige technische mogelijkheden beschikken we al over waardevolle neerslaginformatie. Maar het kan altijd beter. Voor doelmatig stedelijk (afval)waterbeheer is nóg gedetailleerder informatie wenselijk, die sneller beschikbaar en bruikbaar is. Dit hoofdstuk schetst de belangrijkste doorontwikkelingen op het gebied van neerslagmeting. Deze informatie is gebaseerd op interviews met enkele neerslagdeskundigen uit Nederland, België, Duitsland en Engeland (zie paragraaf 1.2).

5.1 X-bandradar

De X-bandradar is een nieuwe ontwikkeling waarvan internationaal de komende 5 à 10 jaar veel wordt verwacht. De hoge resolutie van de neerslagmeting in tijd en ruimte (informatie per 100 m² en per minuut) biedt kansen voor het gedetailleerd meten van neerslag in stedelijk gebied. Een duidelijk voordeel van de X-bandradar is de meting per minuut, waardoor de 5-minutensom nauwkeuriger wordt.

Daarnaast zijn de X-bandradars vrij compact en daarom ook in stedelijk gebied eenvoudig te plaatsen. Een X-bandradar is goedkoper in aanschaf dan een C-bandradar. Maar door het beperkte bereik en de relatief hoge operationele kosten is de X-bandradar per saldo/overall (nog) niet goedkoper.

Voor stedelijk waterbeheer is de integratie van de gegevens van C- en X-bandradars een interessante ontwikkeling. Met de C-bandradar is dan de gemiddelde intensiteit van de neerslag boven een stedelijk gebied (in grids van 1 km²) te bepalen en de X-bandradar kan de data lokaal gedetailleerder maken (bijvoorbeeld in grids van 100 m²). Helaas kan de X-bandradar door de kortgolvlige straling minder goed door regenbuien heen meten. Mogelijk is dit op te lossen door meer X-bandradars rond een stedelijk gebied te gebruiken of door dual-pol X-bandradars te gebruiken.

Zoals het er nu naar uitziet, gaat het KNMI geen centrale rol spelen bij de aanschaf en het beheer van X-bandradars. Daarom is niet te verwachten dat de X-bandradar wordt ingezet voor grootschalige landelijke metingen. Zoals in paragraaf 2.3.3 staat, vindt in Cabauw, Delft en Rotterdam onderzoek plaats naar de meerwaarde van X-bandradars voor stedelijk waterbeheer. Te verwachten is dat aan de hand van de onderzoeksuitkomsten meerdere initiatieven zullen volgen.

5.2 Dual-pol radar

Sinds enkele jaren is er een nieuwe radar op de markt: de dual-pol radar. Deze biedt een beter beeld van de neerslag dan de C-bandradar. Voor neerslagschattingen hebben dual-pol radars enkele voordelen boven de huidige C-bandradars.

Dual-pol geeft meer informatie over de vorm en grootte van de reflecterende deeltjes en kan daarom regendruppels, sneeuwvlokken en hagelstenen onderscheiden. Deze aanvullende informatie maakt een betere schatting van de regenintensiteit mogelijk. Verder geeft het ook informatie over de afzwakking van het radarsignaal nadat deze een bui heeft gepasseerd. Hiermee kan in de conversie naar neerslaginformatie rekening worden gehouden. Daarnaast zijn ongewenste reflecties beter uit het ruwe radarbeeld te verwijderen, wat een betrouwbaarder beeld oplevert.

Verskillende Europese landen (zoals Duitsland) zetten de dual-pol radar al actief in. Nederland gaat deze radar naar verwachting in 2016 gebruiken. Dit is een belangrijke ontwikkeling voor de verbetering van radarinformatie.

58 |

5.3 Integratie Duitse en Belgische neerslagradar

Een belangrijke ontwikkeling op Europees niveau is OPERA: Operational Programme for the Exchange of weather RADar information. Hierin werken veel Europese landen (ook Nederland) al enkele jaren samen aan de integratie van radardata om tot één Europees radarcomposiet te komen. OPERA verzamelt de data van ongeveer 200 Europese radars. Het programma heeft al grote stappen gemaakt. Zo is nu een operationeel composiet in de maak van 2 x 2 km en per 15 minuten (op termijn 1 x 1 km en per 5 minuten), op basis van volumegegevens van radars uit zeker tien West-Europese landen. Deze resolutie in ruimte en tijd is nog niet goed genoeg voor het stedelijk (afval)waterbeheer.

De Nederlandse C-bandradars dekken niet altijd de grensstreken. Voor stedelijk waterbeheer is dan ook vooral de integratie van radargegevens met Duitsland en België van belang, met een kleinere resolutie in ruimte en tijd dan OPERA. Enkele Nederlandse marktpartijen zijn op dit moment bezig met de integratie van de Nederlandse en buitenlandse radar. In het onderzoek van Einfalt en Lobbrecht (2011) is de koppeling al offline succesvol gerealiseerd. Naar verwachting zal in 2012 een gecombineerd radarbeeld beschikbaar zijn.

5.4 Kortetermijnverwachting neerslag

Voor sturing van stedelijke watersystemen kunnen neerslagverwachtingen interessant zijn. Het vergaren van informatie over neerslagverwachting uit radarbeelden (nowcasting) is relatief nieuw. Dit wordt in Nederland nog maar weinig toegepast.

De volgende weerkundige producten zijn interessant:

- Nowcasting/radarverwachting (in grids van 1 km², tot circa 1,5 uur vooruit met een verwachtingsinterval van 5 tot 15 minuten).
- HIRLAM (in grids van 7 x 11 km, 0 tot 48 uur vooruit, elke 6 uur met een

- neerslagverwachting per uur).
- ECMWF-EPS-verwachting (in grids van ca. 40 x 40 km, tot 15 dagen vooruit, elke 12 uur met een neerslagverwachting per 6 uur).

Bij nowcasting wordt op basis van automatisch in het neerslagbeeld geïdentificeerde neerslagcellen een berekening gemaakt van het traject dat deze cellen afleggen. Vervolgens wordt dit traject geëxtrapolerd. Dit gebeurt voor het hele radarbeeld. Daarmee is een neerslagberekening mogelijk tot circa 1,5 uur vooruit, puur op basis van de neerslag die in het afgelopen uur is gevallen.

Verwachtingsensembles

Vanzelfsprekend heeft de extrapolatietechniek van nowcasting nadelen. De belangrijkste is dat bij hevige zomerse buien het lokaal ontstaan van een bui wordt gemist. Verder kan onder deze zomerse condities de neerslagintensiteit lokaal sterk variëren. Om dit laatste aan te pakken, vindt nu veel onderzoek plaats naar de zogenaamde verwachtingsensembles. Hierbij wordt een bandbreedte van neerslag in tijd en ruimte berekend, die ook een maat geeft voor de onzekerheid van de verwachting. Dat is voor stedelijk waterbeheer een interessante optie. Daarmee wordt niet alleen duidelijk hoeveel neerslag we kunnen verwachten, maar ook de foutmarge rond die verwachting.

| 59

De huidige techniek is al goed te gebruiken om het moment te voorspellen waarop in een bepaald stedelijk gebied kans is op extreme neerslag. Op basis van die informatie is al een waarschuwing af te geven.

5.5 Integratie neerslagmeting en berekening met weermodellen

Een nieuwe ontwikkeling in de radartechnologie is de combinatie van radargegevens met numerieke weersverwachtingsmodellen. Deze modellen hebben als input nauwkeurige, snel beschikbare radarinformatie nodig. Nowcasting is gebaseerd op het extrapoleren van geregistreerde neerslag op basis van radar. In de weersverwachtingsmodellen wordt extra informatie meegenomen over verwachte buiontwikkeling, wind en andere variabelen. Het combineren van deze verwachtingsmodellen met nowcasting is momenteel een belangrijk onderzoeksonderwerp.

Naar verwachting duurt het nog zeker 5 à 10 jaar voordat deze integratie in de praktijk toepasbaar is. Maar als het zover is, kan het stedelijke waterbeheer daarvan zeker profiteren. Dan zijn nauwkeurige actuele neerslaggegevens én verwachte neerslaginformatie tot enkele uren vooruit beschikbaar.

5.6 Neerslagmeting met gsm-masten

Ook nieuw is neerslagmeting met gebruik van gsm-masten. Gsm-masten houden via radiostraalverbindingen contact met elkaar. Deze verbinding is gevoelig voor verstoring door regendruppels. Onderzoek wijst uit dat er een vrijwel direct lineair verband is tussen het verlies aan vermogen tussen twee gsm-masten en de neerslagintensiteit.

Het voordeel is dat in stedelijk gebied een dicht netwerk van gsm-masten beschikbaar is. Bovendien meten de masten tussen de ruimtelijke schaal van radar en regenmeters. Hierdoor is beter een relatie te leggen tussen de neerslagintensiteit en de radarinformatie. De gsm-masten bieden een mooie aanvulling op de huidige neerslaggegevens. Belangrijk voordeel is dat de masten (in tegenstelling tot radar) vlak bij de grond meten. Daarnaast is de informatie geschikt om de radar te corrigeren op signaalverzwakking. Bovendien zijn extra data te halen op locaties waar de radar niet goed kan meten. Maar de verwachting is niet dat gsm-masten radar zullen vervangen.

60 |

De komende jaren wordt geprobeerd een kwalitatief goed, met gsm-data gekalibreerd radarbeeld te ontwikkelen. Randvoorwaarde hierbij is dat dataopslag en hoge databeschikbaarheid gewaarborgd blijven.

5.7 Mogelijkheden neerslagmeting met satellieten

Hoewel satellieten veel informatie over neerslag genereren, is de toepassing van deze informatie voor de hydrologie beperkt. Een belangrijk nadeel is dat satellieten niet per uur of per 5 minuten meten, maar bijvoorbeeld per 3 uur of per dag. Feitelijk zijn satellietwaarnemingen niet bedoeld om de dagelijkse neerslag te monitoren, maar om klimatologische processen in kaart te brengen. Dergelijke processen spelen zich af op aanzienlijk grotere tijd- en ruimteschalen dan de processen die voor stedelijk waterbeheer van belang zijn.

Global Precipitation Measurement

Momenteel loopt het programma GPM (Global Precipitation Measurement), dat bestaat uit meerdere satellieten. Hierbij wordt hetzelfde principe toegepast als in het oudere programma TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), maar met verbeterde technologie en een hogere resolutie. De polaire satelliet heeft een neerslagradar aan boord. Door de combinatie van gegevens van meerdere satellieten is de dekking groter en neemt de tijdresolutie toe. De dekking is ongeveer 70 graden noorderbreedte tot 70 graden zuiderbreedte. Het GPM levert elke 3 uur een beeld van 5x5 km op 250 m hoogte. Het doel van het programma is om 3D-neerslagkaarten te maken met een verticale resolutie van 250 m.

Meteosat

Een interessante satelliet is bijvoorbeeld de geostationaire satelliet Meteosat. Deze hangt boven de evenaar en maakt elk kwartier een opname van eenzelfde stuk aarde. Meteosat heeft geen radar, maar meet optisch via infrarode straling. Uit deze metingen zijn neerslageigenschappen af te leiden, waaruit weer indirect neerslag-intensiteiten zijn te bepalen.

Het KNMI heeft een methode ontwikkeld om neerslaginformatie uit Meteosat af te leiden. Deze methode werkt (vooralsnog) alleen overdag, maar is veelbelovend. Mogelijk vullen de satellietbeelden de neerslagradars in Nederland aan. Het lijkt vooral een goede aanvulling op de weersverwachting, omdat buien zichtbaar zijn die vanaf de oceaan in aantocht zijn.

Voor de stedelijke hydrologie in Nederland zal de waarde van satellietwaarnemingen beperkt blijven. Ze helpen hooguit indirect (via een verbetering van de algemene weersverwachting) om een beter beeld te krijgen van de neerslagverdeling.

5.8 Verbetering producten huidige C-bandradars

De huidige C-bandradars van het KNMI meten indirect neerslag onder het wolkendek. Hiermee is de neerslag die op die hoogte valt redelijk goed vast te stellen. Door toepassing van enkele nieuwe ontwikkelingen is de vertaling van neerslaginformatie van de huidige C-bandradars te verbeteren.

Verticale profielenreflecties

De radar zendt onder verschillende hoeken kortdurende pulsen uit. Op basis van deze informatie is de neerslag op verschillende hoogten te bepalen. Nu vertaalt het KNMI de ruwe 3D-neerslaggegevens naar een 2D-vlak. Zo gebruikt het instituut voor het radarbeeld bijvoorbeeld neerslaggegevens gemeten van 28 tot 121 km afstand van de radars en op 1.500 m hoogte. Ook meet de radar op nog grotere hoogten op plekken die meer dan 121 km van de radar vandaan liggen. Vooral in de winterperiode kan het voorkomen dat het grootste deel van de neerslag onder de 1.500 m ontstaat en de radar dit daarom niet of minder goed signaleert. In deze situatie onderschat de radar de neerslag. Momenteel loopt veel onderzoek naar het bepalen van het verticale profiel van de neerslag. Hiermee kan de vertaling van het 3D-neerslagbeeld naar een 2D-radarcomposiet nauwkeuriger plaatsvinden. Dichter bij de radar is meer bekend over dit verticale profiel. Dit is bijvoorbeeld te gebruiken voor correcties op grotere afstanden van de radar, waar minder bekend is over dit profiel omdat de radar daar hoger in de atmosfeer meet. Hierdoor zal de kwaliteit van het radarbeeld toenemen.

Verwaaiing van neerslag

Voor stedelijk waterbeheer is het van belang rekening te houden met advection door wind (verwaaiing van de neerslag). De radar meet immers op een zekere hoogte boven de grond en uiteindelijk is het belangrijk te weten waar de neerslag terechtkomt. Voor een deel is informatie over windsnelheid en -richting uit de radarinformatie zelf af te leiden door een vast punt in het beeld als referentie te nemen. Maar dit geeft slechts een indicatie van de windvelden op de hoogte waar de radar meet. Dit houdt in dat op een redelijk fijnmazig grid de windsnelheid en -richting op verschillende hoogten bekend moeten zijn. Die informatie is nu helaas nog niet beschikbaar.

5.9 Regenmeternetwerk van de toekomst

De neerslagradar zal steeds meer en betrouwbaarder neerslaggegevens opleveren, die goed toepasbaar zullen zijn voor stedelijk waterbeheer. Toch is en blijft een meetnet van regenmeters noodzakelijk voor een betrouwbare interpretatie van radargegevens. Een grote verbetering is mogelijk als het KNMI zijn netwerk met automatische stations uitbreidt, bijvoorbeeld door alle dagstations te vervangen door of aan te vullen met een automatische regenmeter. Dan zijn de gegevens van het grondmeetnet sneller beschikbaar en van nóg betere kwaliteit. Vooralsnog is nog geen sprake van vervanging van de handregenmeters door het KNMI.

Feitelijk zal een gemeente in de toekomst dus meetgegevens hebben die bestaan uit een combinatie van regenmeters, radarmetingen, windmetingen, satellietwaarnemingen en gegevens uit gsm-masten. Via een snelle automatische verwerking komt eens per minuut of per 5 minuten nóg betere neerslaginformatie beschikbaar. Deze gegevens worden vervolgens gecombineerd tot één vlakdekkend neerslagbeeld. Dit verbeterde neerslagbeeld zal samen met de verbeterde numerieke weersverwachtingsmodellen leiden tot betere neerslagvoorspellingen. In hoeverre deze verbeterde voorspellingen de sturingsmogelijkheden in het bebouwde gebied vergroten, zal de komende jaren nog moeten worden bewezen.

6 Conclusies en aanbevelingen

Voor doelmatig stedelijk waterbeheer heeft een gemeente minimaal betrouwbare neerslaginformatie per 5 minuten en per 1 km² nodig. Met alleen een traditioneel grondmeetnet is dit praktisch en economisch niet haalbaar. In combinatie met radarinformatie ontstaat wél een nauwkeuriger beeld van neerslagverdeling in tijd en plaats.

Kalibratie essentieel

Het KNMI beschikt over twee radars en een uitgebreid grondmeetnet met ruim 30 automatische en 300 handmatige stations. Om de radarinformatie te kunnen gebruiken voor stedelijk waterbeheer, is kalibratie van de 5-minutenradarinformatie van het KNMI met metingen van grondregenmeters nodig. Hiervoor zijn de ruim 300 dagstations en de ruim 30 automatische stations van het KNMI te gebruiken. Of andere goed opgestelde regenmeters, die bij voorkeur in of nabij de stad staan. Na kalibratie ontstaat een kwalitatief hoogwaardig, vlakdekkend neerslagbeeld dat voor de meeste toepassingen in stedelijk waterbeheer relevant is.

| 63

Tabel 6.1 vat de kwaliteit van de neerslaginformatie samen zoals deze nu beschikbaar is en hoe deze zich de komende jaren naar verwachting ontwikkelt. Op dit moment biedt de combinatie van gegevens uit radar en regenmeters de beste neerslaginformatie.

Aanbevelingen voor de inzet van (aanvullende) grondmeters

- Kies de locaties zorgvuldig en zorg voor een juiste opstelling conform de WMO-eisen. Een verkeerde locatie of een slechte opstelling kan de grondmetingen nagenoeg waardeloos maken.
- Zorg voor voldoende onderhoud en kalibreer de apparatuur regelmatig. Hiermee voorkomt u onnodig dataverlies door storingen of systematische meetfouten.
- Zorg voor voldoende expertise. Het combineren van neerslagradar en grondmetingen is een gecompliceerd proces.

Samenwerken

Het combineren van metingen uit een grondmeetnet en radar (punt- en vlakmetingen) is en blijft een ingewikkelde materie. Hiervoor zijn vele wiskundige technieken beschikbaar, variërend van heel eenvoudig tot zeer geavanceerd. De komende jaren zullen de kalibratiealgoritmes steeds verder verbeteren, bijvoorbeeld door nieuwe kalibratietechnieken, door de integratie met de Duitse en Belgische radar of door de komst van dual-pol radar of andere neerslaginformatiebronnen (zoals gsm-masten). Willen we als Nederland op korte termijn een grote sprong vooruit maken, dan is het

belangrijk de kennis te bundelen en de verschillende experts op dit gebied van het KNMI, universiteiten en marktpartijen samen te laten werken aan nieuwe ontwikkelingen.

Meetnet van regenmeters blijft noodzakelijk

In de nabije toekomst zullen de weerradartechnieken steeds gedetailleerder en betrouwbaarder neerslaggegevens opleveren. Voor stedelijk waterbeheer is onder andere de integratie van de gegevens van C- en X-bandradars een interessante ontwikkeling. Toch zal voor een betrouwbare interpretatie van radargegevens altijd een meetnet van regenmeters noodzakelijk zijn. Op korte termijn is onderzoek nodig naar hoe het optimale regenmeternetwerk er voor het stedelijke (afval)waterbeheer zou moeten uitzien. Wees in elk geval terughoudend met het weghalen van kwalitatief goede regenmeters met als argument dat de radargegevens deze vervangen.

	Niveau van neerslaginformatie	Neerslag-informatiebron	Welke informatie is beschikbaar?
Kwaliteit van de neerslaginformatie	Hoogst haalbare neerslaginformatie in de toekomst.	Nu nog onbekend.	Betrouwbare neerslaginformatie per minuut en per gebied < 1 km ² .
	Best haalbare neerslaginformatie binnen 10 jaar.	Radarinformatie gekalibreerd met ruim 300 KNMI-uurstations en gebruik van dual-pol radar (C-band). Gebruik uursommen maakt snellere levering gekalibreerde neerslaginformatie mogelijk	Kansrijke kortetermijntoekomst voor verdere verbetering van neerslaginformatie per 1 km ² en per 5 minuten. Bij gebruik van ruim 300 uurstations is de kalibratie sneller uit te voeren.
	Best haalbare neerslaginformatie op dit moment.	Radarinformatie gekalibreerd met ruim 300 KNMI-dagstations en gevalideerd met eigen, goed opgestelde automatische regenmeters met een meetfrequentie van maximaal 5 minuten.	Voor de buien waar de goed opgestelde regenmeters met de gekalibreerde radar vergelijkbare informatie geven: betrouwbare informatie over buivolume, dagneerslagsommen en verloop van neerslag per 1 km ² en per 5 minuten.
	Nauwkeurige vlakdekkende neerslaginformatie op een grovere tijdsresolutie.	Radarinformatie gekalibreerd met ruim 300 KNMI-dagstations.	Betrouwbare informatie over buivolume, dagneerslagsommen en verloop van neerslag per 1 km ² .
	Nauwkeurige neerslaginformatie op één locatie	Eén of enkele goed opgestelde regenmeters met ongekalibreerde radar.	Nauwkeurige puntmeting en indicatie van ruimtelijke spreiding van neerslag.
	Onbetrouwbare neerslaginformatie.	Slecht opgestelde regenmeter(s).	

Tabel 6.1 Classificatie van neerslaginformatie

7 Literatuur

- Beek, C.Z. van de, H. Leijnse, J.N.M. Stricker, R. Uijlenhoet and H.W.J. Russchenberg (2010). Performance of high-resolution X-band radar for rainfall measurement in The Netherlands. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 205-221.
- Braak, C. (1945). Invloed van den wind op regenwaarnemingen. Koninklijk Meteorologisch Instituut, Mededelingen en verhandelingen 48, Rijksuitgeverij, Den Haag.
- Brauer, A.J. Teuling, A. Overeem, Y. van der Velde, P. Hazenberg, P.M.M. Warmerdam, R. Uijlenhoet, (2011). Anatomy of extraordinary rainfall and flash flood in a Dutch lowland catchment, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15 , 1991-2005, doi:10.5194/hess-15-1991-2011.
- Clemens, F.H.L.R. en Mantje, W.J. (2011). Hollands Noorderkwartier. Vergelijking neerslagradar en grondstations. Witteveen+Bos.
- Commissie Integraal Waterbeheer (CIW) (2001). Riooloverstorten (deel 2). Eenduidige basisinspanning: nadere uitwerking van de definitie van de basisinspanning.
- Dieker, E., Kootstra, D.S., Spijker, M., Reichard, H.L. (2010). Communicatiestrategie: burgers informeren over en betrekken bij wateroverlast. HydroLogic BV.
- Einfalt, T., Arnbrjerg-Nielsen, K., Golz, C., Jensen., N, Quirmback, M., Vaes, G. en Vieux, B. (2004). Towards a roadmap for use of radar rainfall data in urban drainage. *Journal of Hydrology*, 299, issues 3-4, pp. 186-202.
- Goormans, T, Willems, P, van Assel, J. en Berlamont, J. (2008). Het meten van de neerslag met behulp van een lokale neerslagradar: eerste resultaten. *Rioleringswetenschap*, jaargang 8, nr. 32, pp 56-71, Holapress, ISBN 1568-3788.
- Gortmaker, K.A. (2010). Verkenning naar de toepassingsmogelijkheden van neerslagradar in Utrecht. Gemeente ARCADIS.
- Holleman, I., (2006). Bias adjustment of radar-based 3-hour precipitation accumulations. Technical report, TR-290, Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI). Verkrijgbaar via http://www.knmi.nl/publications/fulltexts/tr_3houraccu.pdf
- Holleman, I., (2007). Bias adjustment and long-term verification of radar-based precipitation estimates. *Meteorological Applications*, 14: 195-203, is verkrijgbaar via http://www.knmi.nl/publications/fulltexts/tr_3houraccu.pdf

Jafrain, J., Studzinski, A., Berne, A. (2010). A network of disdrometers to quantify the small scale variability of the raindrop size distribution. *Water Resources Research*, 47, 8 pp.

Jensen, N.E. en Overgaard, S. (2002). Performance of small x-band weather radar, Western Pacific Geophysics meeting, Wellington New Zealand.

Mameren, Van H. (2001). Afvalwatersysteembenadering Apeldoorn, onderdeel metingen. Witteveen + Bos.

Mantje, W., Korving, J.L. en Geerse, J.M.U. (2009). aToepasbaarheid van regenradar voor stedelijk waterbeheer. *Rioleringswetenschap*, jaargang 9, nr. 35, Holapress.

66 |

Lanza, L.G., Leroy, M., Alexadropoulos, C d Wauben, W. (2005b). WMO Laboratory Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges - Final Report. Instruments and Observing Report No. 84, WMO/TD No. 1304`

Leijnse, H., Uijlenhoet, R., Van de Beek C.Z., Overeem, A., Otto, T., Unal, C.M.H., Dufournet, Y., Russchenberg, H.W.J., Figueras i Ventura, J., Klein Baltink H., en Holleman, I. (2010). Precipitation Measurement at CESAR, the Netherlands. *Journal of Hydrometeorology*, 11, pp. 1322-1329.

Leijnse, H., en Uijlenhoet, R. (2010). The effect of reported high-velocity small raindrops on inferred drop size distributions and derived power laws. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, pp.6807 – 6818.

Lenderink, G (2011), Weer en klimaat Nederland Extreme neerslagsom in Herwijnen, KNMI website, http://www.knmi.nl/cms/content/99326/extreme_neerslagsom_in_herwijnen

Lobbrecht, A.H., Hiemstra, G., Talsma, M. en Vonk, Z. (2003). Neerslaginformatie voor het waterbeheer. *H2O*, 23, pp. 22-25.

Lobbrecht, A.H., en Knippers, T.S. (2010). Neerslagspreiding in beeld voor stedelijk waterbeheer. *Vakblad Riolering*, 17, pp. 54-55

Lobbrecht, A.H. Einfalt, T., Reichard, H.L, Poortinga, I.M (2011). Decision support for urban drainage using radar data of HydroNET-SCOUT. *International Symposium Weather Radar and Hydrology*, Exeter.

Luyckx, G en Berlamont, J. (2001). "Vereenvoudigde methode om neerslagmetingen van kantelbakpluviografen te corrigeren". Rioleringswetenschap, jaargang 1, nr. 4, pp 51-65, Holapress.

Otto, T., Russchenberg H.W.J. (2010). Estimation of the raindrop-size distribution at X-band using specific differential phase and differential backscatter phase. ERAD 2010 – The sixth European conference on radar an meteorology and hydrology.

Overeem A, T. Buishand, I. Holleman en R. Uijlenhoet (2010). Extreme value modeling of areal rainfall from weather radar. Water Resources Research 46, pag. W09514.

Overeem, A. (2009). Climatology of extreme rainfall from rain gauges and weather radar. PhD thesis, Wageningen University. (132 pagina's). ISBN 978-90-8585-517-0. Supervisor: Prof. dr. ir. R. Uijlenhoet. Verkrijgbaar via <http://edepot.wur.nl/14584>

| 67

TNO/SAMWAT (1988), Neerslagmeting en -voorspelling; toepassing van moderne technieken zoals radar- en satellietwaarnemingen, Verslag van: de 7e CHO-studiebijeenkomst georganiseerd in samenwerking met SAMWAT bij het KNMI te De Bilt, op 16 november 1988, (Rapporten en Nota's fCommissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO; no. 21), samenstelling J.C. Hooghart.

Schilperoort, R.P.S. (2011). Monitoring as a tool for the assessment of wastewater quality dynamics. Proefschrift TU Delft (319 pagina's). ISBN /EAN 978-90-8957-021-5. Prom: Prof. dr. ir. FHLR Clemens en prof. ir. J.H.J.M. van der Graaf.

Schuurmans J., M. Bierkens, E. Pebesma en R.Uijlenhoet (2007). Automatic prediction of highresolution daily rainfall fields for multiple extents:the potential of operational radar. J. Hydrometeor.8, pag. 1204-1224.

Stichting RIONED (2001) RIONEDreeks 1 Hydrodynamische modellen in de riolering, het proefschrift van F. Clemens samengevat en bediscussieerd.

Stichting RIONED (2003) RIONEDreeks 3 Meten en berekenen rioolstelsels, een systematische en stapsgewijze methodiek voor het verbeteren van de betrouwbaarheid van hydrodynamische modelberekeningen.

Stichting RIONED. (2004). Module C2100, Rioleringsberekeningen en hydraulisch functioneren. Leidraad Riolering.

Uijlenhoet, R., 2008: Precipitation physics and rainfall observation. Chapter 4, in: Climate and the Hydrological Cycle (Marc Bierkens, Peter Troch, and Han Dolman, editors), IAHS Special Publications 8, IAHS Press, Wallingford, UK, 59-97.

VNG (2007). Van rioleringzaak naar gemeentelijke watertaak. De Wet gemeentelijke watertaken toegelicht. Geraadpleegd op 31 mei 2011 via het internet op: <http://www.riool.net/riool/binary/retrieveFile?itemid=3375&instanceid=129>.

Veldhuis, ten J.A.E. (2010). Quantitative risk analysis of urban flooding in lowland areas. Proefschrift TU Delft (256 pagina's). Gildeprint Drukkerijen, Enschede. Prom: Prof. dr. ir. FHLR Clemens.

Wessels, H.R.A., (2006). KNMI Radar Methods, KNMI Technical Report, TR-293, December 2006, Verkrijgbaar via http://www.knmi.nl/publications/fulltexts/tr_hwessels.pdf

World Meteorological organization (WMO). (2006). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland

World Meteorological organization (WMO), (2009). Instruments and observing methods no. 99: Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland

8 Summary

A major performance parameter of any urban water management system is the precipitation load. To explain or justify the occurrence of sewer overflows, road flooding, and water nuisance in general, municipal authorities require access to accurate precipitation figures. These figures should reflect both the precipitation's intensity at any given time and its geographical distribution.

Rain gauges

The standard method of measuring precipitation is by means of rain gauges. Reliable readings that comply with national and international standards require properly set up equipment and considerable free space. The latter is often at a premium in urban environments, which is one of the reasons why it is almost impossible to site urban rain gauges in accordance with the requirements of the World Meteorological Organisation (WMO). The resulting measuring errors can be considerable. Also, a high number of rain gauges may be required to accurately establish the geographical distribution of precipitation.

| 69

Radar

In recent years, radar as a means of measuring precipitation has become more popular. A radar antenna emits electromagnetic pulses of short duration as it rotates. Any radiated beam that hits a raindrop is partially reflected and received back by the radar system. The time between the transmission of a pulse and the reception of its reflected signal gives the distance between the raindrop and the radar set. The strength of the reflected signal is a measure of precipitation intensity. The radar system therefore measures precipitation indirectly and at a given level above ground. In the Netherlands, radar measurements are the responsibility of the Royal Netherlands Meteorological Institute (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, KNMI). The institute operates two radar stations, located at De Bilt and at Den Helder. The KNMI consolidates the data into a single composite image giving the precipitation situation at 5-minute intervals for a grid with a resolution of 1 km . These are the uncalibrated (raw) radar images.

Calibration

Raw radar images contain inaccuracies caused by such factors as:

- wind dispersal of precipitation;
- the time that elapses between the detection of airborne precipitation and the moment raindrops hits the ground;
- attenuation of radar signals when obscured by heavy rainfall.
- indirect measurement (remote sensing) of an airborne precipitation volume

To enable the performance of an urban water or wastewater management system to be evaluated and assessed, the raw KNMI radar data will need to be calibrated using rain gauge readings. This combines the strength of radar (accurate geographical distribution data) with that of rain gauges (accurate ground-level readings). The calibration aims to ensure that the radar information matches the rain gauge readings to obtain a high-quality, geographically accurate precipitation image.

Calibration data can be provided by KNMI's 300+ daily measuring stations and its automatic weather stations, of which there are more than 30. However, this information is not always readily available, the daily stations releasing data with delays of up to 36 hours, while the automatic stations take approximately 10 minutes

70 |

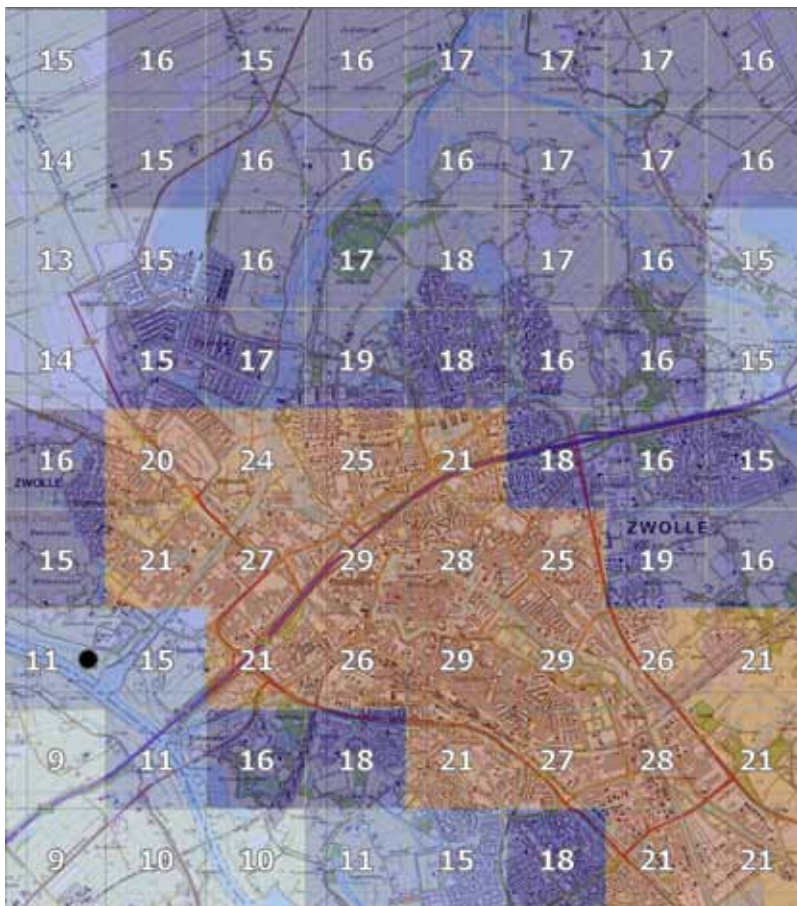


Figure 0 24-Hour aggregate precipitation distribution for the town of Zwolle (in mm).
(Source: Lobbrecht, HydroLogic)

to provide their data. In time, additional rain gauge information becomes available, enabling the radar data to be further calibrated. Municipalities may choose to use other rain gauges, perhaps even systems of their own. In such cases it is of course important to ensure that the rain gauges are properly set up (preferably in compliance with the WMO standards).

Figure 0 gives an idea of the added value of calibrated radar data over the use of rain gauges alone. The figure shows the aggregate precipitation as measured over a 24-hour period in the town of Zwolle. The black dot indicates the location of a rain gauge, which measured 11 mm during this period. Using only the data provided by this rain gauge, an overall precipitation figure of 11 mm might have been arrived at. Thanks to the calibrated radar images however, it is clear that the precipitation reached much higher values in the centre of town, as high as 29 mm.

| 71

Precipitation information requirements

Precipitation information is useful in a number of urban water and wastewater management scenarios, each application having its own set of requirements regarding currentness and accuracy. Real-time system control, for example, requires up-to-date information that need not always be highly accurate. System performance analysis on the other hand requires highly accurate information that doesn't necessarily have to be current.

Combining radar and rain gauges

For most applications, a municipality will at least need reliable precipitation information with a resolution of 1 km and 5-minute intervals. This cannot be practically and economically achieved using only a traditional ground-level rain gauge network. In combination with radar information however, it becomes possible to obtain an accurate image of the precipitation distribution in time and space. Currently the combination of radar and rain gauges offers the best available source of precipitation information.

Developments

International research and developments in the weather radar field are showing rapid progress. One example is the installation in Europe of a new dual polarization radar system (C band), which offers more accurate precipitation imaging and improved powers of distinguishing between various types of precipitation over current C-band radar sets. Along our borders in particular, the integration of German and Belgian radar images in the Dutch composite is a major development. In addition, small-scale X-band radar sets are being developed that offer higher resolution in both time and space than C band radar does.

Neerslaginformatie voor het bebouwde gebied

Neerslagmeting is een belangrijke informatiebron voor inzicht in het functioneren van het stedelijke regen- en afvalwatersysteem. (Grond)regenmeters zijn lastig te plaatsen in het bebouwde gebied, terwijl radarbeelden door hun kwaliteit en gedetailleerdheid steeds beter bruikbaar maken voor een nauwkeurige bepaling van de omvang en plaats van de neerslag. De beste neerslaginformatie komt uit een combinatie van radarbeelden en gegevens van regenmeter, d.w.z. regenmeters in het bebouwde gebied meten de neerslag lokaal om de nauwkeurigheid van de radarbeelden te controleren. Het gaat dus niet om welke meetmethode beter of slechter is, maar welke buien al of niet nauwkeurig zijn gemeten. Dit boek biedt u een toegankelijke introductie tot deze specialistische materie.