

NEERSLAGONZEKERHEID
LITERATUURONDERZOEK NAAR DE FOUT IN DE NEERSLAG

STOWA

2010

14

ISBN 978.90.5773.462.5



COLOFON

Amersfoort, 2010

UITGAVE STOWA, Amersfoort

AUTEUR Rudolf Versteeg

BEGELEIDINGSGROEP

Henk van Norel (Waterschap Hunze en Aa's)

Ge van de Eertwegh (Waterschap Rivierenland)

Joost Heijkers (Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden)

Michelle Talsma (Stowa)

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau

STOWA rapportnummer 2010-14

ISBN 978.90.5773.462.5

TEN GELEIDE

Uitkomsten van hydrologische modellen zijn voor de Nederlandse waterbeheerders een belangrijke bouwsteen voor beleidsontwikkeling en planvorming. Denk bijvoorbeeld aan het vraagstuk van het Gewenste Grond- en OppervlaktewaterRegime (GGOR) en de Wateropgave. Hydrologische modellen, hoe geavanceerd ook, beschrijven de hydrologische systeemwerking altijd op een vereenvoudigde manier. Door deze vereenvoudigingen zijn de modeluitkomsten onzeker. Hydrologen die werkzaam zijn in het regionale waterbeheer zijn zich bewust van de onzekerheden van de modelresultaten, mede op basis waarvan bestuurders beslissen over de inrichting van het gebied. Ook bestuurders zijn zich bewust van het belang van onzekerheden en wensen hierin meer inzicht om bijvoorbeeld de kans op een foutief besluit zo klein mogelijk te maken. Om bestuurders de kans te geven gebruik te maken van kennis van onzekerheden, is het voor hydrologen de kunst om de invloed van onzekerheden te vertalen naar voor bestuurders relevante informatie. Het gaat dan niet alleen om betrouwbaarheidsbanden rondom resultaten van modelberekeningen, maar ook, en misschien vooral, om de doorvertaling naar de verwachte effectiviteit van een maatregel. Voor dat laatste ontbreekt het gereedschap.

Met dat als achtergrond heeft de STOWA met begeleiding van de Adviesgroep Modelling het onderzoek 'Hydrologische modelonzekerheid; De invloed van onzekere neerslag op hydrologische modeluitkomsten' laten uitvoeren door HKV LIJN IN WATER. We hopen dat met het beschikbaar komen van de resultaten van dit onderzoek hydrologen beter in staat worden gesteld om onzekerheden te kwantificeren en te vertalen naar voor bestuurders relevante informatie.

Amersfoort, juni 2010

De directeur van de STOWA
ir. J.M.J. Leenen

DE STOWA IN HET KORT

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. Dat zijn alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringsschappen en de provincies.

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaal-wetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand op basis van inventarisaties van de behoefte bij de deelnemers. Onderzoekssuggesties van derden, zoals kennisinstituten en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen.

Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n 6,5 miljoen euro.

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: 033 - 460 32 00.

Ons adres luidt: STOWA, Postbus 2180, 3800 CD Amersfoort.

Email: stowa@stowa.nl.

Website: www.stowa.nl

NEERSLAGONZEKERHEID LITERATUURONDERZOEK

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
2	GRONDSTATIONS	2
	2.1 Fouten in de waarneming	2
	2.2 Verwerking tot gebiedsneerslag	5
3	RADARGEGEVENS	6
	3.1 Fouten in de waarneming	6
	3.2 Verwerking tot gebiedsneerslag	8
4	FOUT IN DE GEBIEDSNEERSLAG	12
	4.1 Inleiding	12
	4.2 Inschatting fout gebiedsneerslag	12
5	ONTWIKKELINGEN EN AANBEVELINGEN	16
6	GEBRUIKTE LITERATUUR	18

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 3-1 Prestatiematrix voor de gecorrigeerde radardata ten opzichte van de waarnemingen van handmatige stations, totaal aantal waarnemingen is 433059 (bron: Holleman (2006))

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1-1 Links: automatische stations, rechts: handmatige stations (Bron: Holleman 2006)

Figuur 2-1 Regenwater volgens engels opstelling (Bron: website KNMI)

Figuur 2-2 Verschillen in jaarneerslag tussen de handregenmeter en de pluviograaf van De Bilt vanaf 1982. (bron: Smits et al, 2004)

Figuur 3-1 Overzicht van de belangrijkste foutenbronnen in de radarbeelden (bron: Holleman, 2006)

Figuur 3-2 Boven: hoogte van de radarbundel als functie van de afstand, onder: tijd-hoogte diagram van de reflectiviteit van de weerradar in De Bilt (bron: Holleman, 2006)

Figuur 3-3 Vergelijking van geaccumuleerde dagwaarnemingen van grondstations met radarbeelden, links: ruwe data, rechts: gecorrigeerde data (bron: Holleman, 2007)

Figuur 3-4 Verificatie resultaten voor de ruwe radargegevens en na dagelijkse neerslagcorrectie tegen de neerslagwaarnemingen van de automatische stations, boven: bias, onder: standaardafwijking (bron: Holleman, 2004)

Figuur 4-1 Histogrammen met per neerslagklasse van de radarbeelden de waargenomen neerslagklasse op de grondstations

Figuur 4-2 Standaarddeviatie en gemiddelde van de kansverdeling van de neerslag als functie van de geregistreerde neerslag (de gestippelde lijn is de geschatte lineaire relatie)

1

INLEIDING

Dit literatuuronderzoek is onderdeel van het project 'Neerslagonzekerheid, Invloed van onzekere neerslaginformatie op (uitvoer van) hydrologische berekeningen'.

Doel van dit onderdeel is om op basis van bestaande literatuur een schatting te maken van de fout in de gebiedsneerslag alsmede een kansverdeling van die fout. Onder gebiedsneerslag wordt in dit onderzoek een ruimtelijk gespreid beeld van de neerslag met een resolutie van 2,5x2,5km verstaan.

BASISGEGEVENS

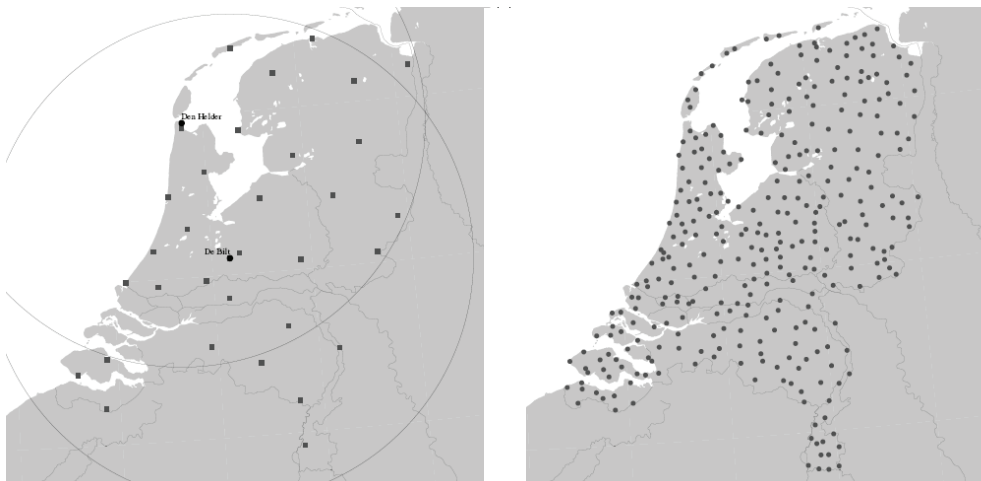
Voor de bepaling van neerslaghoeveelheden zijn twee soorten bronnen beschikbaar:

- Neerslaghoeveelheden opgevangen door grondstations (het netwerk van neerslagstations is weergegeven in Figuur 1-1). Dit type waarneming kan verder worden onderverdeeld in:
 - 325 handmatige stations, allen registreren daghoeveelheden (08-08 UTC).
 - 35 automatische neerslagstations, allen registreren momenteel 10 minuten waarden.
- Neerslaghoeveelheden bepaald op basis van radargegevens. Er zijn 2 weerradars (De Bilt en Den Helder) waarvan de reflectiviteit wordt omgerekend naar een neerslaghoeveelheid. Het bereik van de weerradars is weergegeven in Figuur 1-1. Overigens staat in Emden in het noordwesten van Duitsland een radar opgesteld die tevens een deel van Noord-Nederland beslaat.

Radarbeelden zoals momenteel geleverd aan de waterschappen hebben een resolutie van 2,5x2,5 km. Dit betekent dat per cel van 2,5x2,5 km (625 ha) een neerslaghoeveelheid is bepaald. Per 1 januari 2008 is de resolutie standaard 1x1 km (100 ha). Ter vergelijking: tien minuten waarnemingen hebben een gemiddelde dichtheid van 1 station per 35x35 km (120.000 ha) en dagwaarnemingen hebben een gemiddelde dichtheid van 1 station per 11,5x11,5 km (13.000 ha).

FIGUUR 1-1

LINKS: AUTOMATISCHE STATIONS, RECHTS: HANDMATIGE STATIONS (BRON: HOLLEMAN, 2006)



2

GRONDSTATIONS

2.1 FOUTEN IN DE WAARNEMING

Over het algemeen wordt verondersteld dat de grondstations de gevallen neerslaghoeveelheid zeer nauwkeurig registreren. Er komen in de stationswaarnemingen echter regelmatig significante afwijkingen voor. De fout in de geregistreerde neerslaghoeveelheden van de grondstations wordt grotendeels bepaald door invloed van de wind. Daarnaast zijn er nog fouten zoals een verdampingsfout, een bevochtigingsfout, waarnemingsfouten en fouten door het inspaten en uitspatten van regendruppels (Buishand, 1980 en Massop et al, 2005).

WINDFOUTEN

Een regenmeter werkt als een verstorend element op de luchtbeweging. Dit leidt tot een verhoging van de turbulentie van de lucht in de omgeving van het instrument waardoor een deel van de neerslag die in de opvangtrechter zou komen er overheen wordt geblazen. Daarnaast kunnen allerlei obstakels in de omgeving van de regenmeter de luchtbeweging rond het instrument beïnvloeden en daardoor de op te vangen hoeveelheid neerslag. Aanzienlijke tekorten kunnen optreden bij hoge windsnelheden. Omdat de windsnelheid toeneemt bij grotere hoogte neemt de fout toe naarmate het instrument hoger staat opgesteld. Bovendien speelt de grootte van de druppels een belangrijke rol. De wind heeft een kleinere invloed bij neerslag met grote zware druppels dan bij kleine lichte druppels (motregens). De windinvloed is in de zomer kleiner dan in de winter. Enerzijds veroorzaakt door hogere windsnelheden in de winter, anderzijds veroorzaakt door de druppelgrootteverdeling. In de zomer komt meer convectieve neerslag voor met in het algemeen grotere druppels. De fout in de zomer is daardoor tweemaal zo klein als in de winter.

De handmatige stations kennen een opstelling met standaardregenmeters met een trechteropening op een hoogte van 40 cm. Voor dit type regenmeter is de windinvloed significant. De betreffende stations registreren in de winter (dec-feb) een neerslaghoeveelheid die circa 4 tot 10% lager ligt dan de werkelijk gevallen neerslag. In de zomer (jun-aug) ligt de fout rond 2 tot 5%. In de herfst en lente ligt de fout tussen deze waarden in. Per station zijn de fouten verschillend door invloeden die worden bepaald door de ligging van het station zoals beschutting en nabijheid van de kust. Een betrouwbare correctie is daarom alleen mogelijk als de neerslaghoeveelheden van de standaardregenmeter op locatie worden vergeleken met de neerslaghoeveelheden van een standaardregenmeter in een zogenaamde engelse opstelling of grondregenmeter (Buishand, 1980). Dit is tijdrovend en kostbaar, de neerslaghoeveelheden worden daarom door het KNMI niet gecorrigeerd voor deze windinvloeden.

FIGUUR 2-1

REGENMETER VOLGENS ENGELSE OPSTELLING (BRON: WEBSITE KNMI)

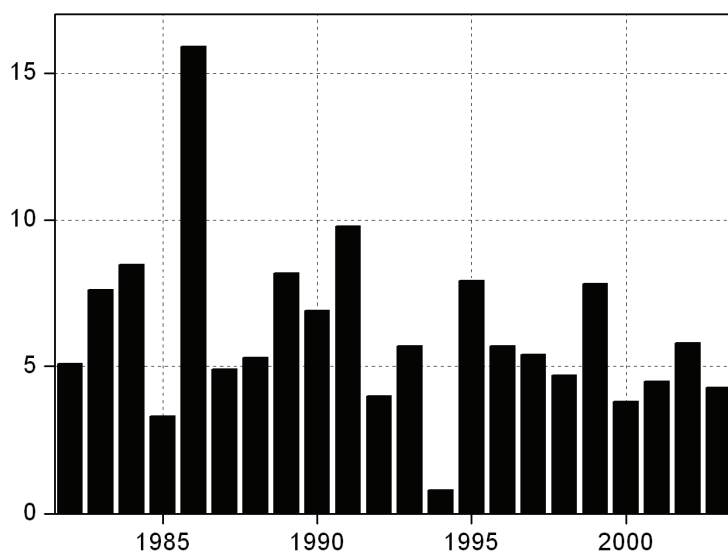


Bekend is dat standaard handregenmeters die eenmaal per dag worden geleegd hogere neerslaghoeveelheden registreren dan de pluviograaf en de elektrische regenmeter die zijn opgesteld voor de automatische stations. Dit komt onder meer door verdampingsfouten als gevolg van het verwarmingselement in de pluviograaf en de elektrische regenmeter en de minder gunstige aërodynamische vorm van deze twee regenmeters ten opzichte van de standaard handregenmeter. Gemiddeld gezien zijn daardoor de met de pluviograaf en elektrische regenmeter gemeten hoeveelheden structureel lager dan de hoeveelheden afgetapt met behulp van de handregenmeter. Het effect van het verschil in aërodynamica is ook hier het grootst bij hoge windsnelheden. In Smits et al (2004) zijn voor station De Bilt de verschillen in jaarsommen tussen de pluviograaf en de gewone handregenmeter vanaf 1982 bepaald. Het resultaat is weergegeven in Figuur 2-2. Duidelijk is te zien dat 1986 het jaar is met het grootste relatieve verschil. Dit is tevens het jaar in dit tijdvak met gemiddeld de hoogste windsnelheid en verklaart voor een belangrijk deel het grote verschil tussen de pluviograaf en de handregenmeter in dat jaar.

Bovenstaande geldt voor de jaarsommen. Op dagbasis is echter niet te zeggen welk type regenmeter nauwkeuriger is, of beter gezegd: op dagbasis is niet te zeggen welk type regenmeter de juiste neerslaghoeveelheid registreert.

FIGUUR 2-2

VERSCHILLEN IN JAARNEERSLAG TUSSEN DE HANDREGENMETER EN DE PLUVIOGRAAF VAN DE BILT VANAF 1982 (BRON: SMITS ET AL, 2004)



OVERIGE FOUTEN

Naast de windfout is er een aantal fouten van hoofdzakelijk instrumentele aard, waarvan de grootte bij een goede constructie van het instrument gering is. De toelaatbaarheid in deze fouten is weergegeven in het Handboek Waarnemingen van het KNMI (KNMI, 2001). De opstellingen voldoen aan de daarin genoemde normen. Hieronder is de vereiste nauwkeurigheid van het instrument zoals opgenomen in het handboek weergegeven:

- De onzekerheid in de gemeten hoeveelheid vloeibaar water dient niet groter te zijn dan:
 - 0,1 mm in het geval van een geregistreeerde hoeveelheid ≤ 5 mm;
 - 2 % in het geval van een geregistreeerde hoeveelheid > 5 mm;
- De gewenste operationele nauwkeurigheid van de neerslaghoeveelheid in de KLIM-berichtgeving is:
 - $\pm 0,05$ mm in het geval van een geregistreeerde hoeveelheid ≤ 5 mm (voorbeeld: registratie is 3,4: neerslaghoeveelheid $> 3,35$ en $\leq 3,45$ mm);
 - ± 1 % in het geval van een geregistreeerde hoeveelheid > 5 mm (voorbeeld: registratie is 41,3: neerslaghoeveelheid $> 40,9$ en $\leq 41,7$ mm);
- De gewenste operationele nauwkeurigheid van de neerslaghoeveelheid in de SYNOP-berichtgeving is:
 - $\pm 0,05$ mm in het geval van een geregistreeerde hoeveelheid ≤ 1 mm (voorbeeld: registratie is 0,4: neerslaghoeveelheid $> 0,35$ en $\leq 0,45$ mm);
 - $\pm 0,5$ mm in het geval van een geregistreeerde hoeveelheid > 1 mm en ≤ 50 mm (voorbeeld: registratie is 34: neerslaghoeveelheid $> 33,5$ en $\leq 34,5$ mm);
 - ± 1 % in het geval van een geregistreeerde hoeveelheid > 50 mm (voorbeeld: registratie is 81: neerslaghoeveelheid $> 80,2$ en $\leq 81,8$ mm);
- De gewenste operationele nauwkeurigheid van de neerslagduur in de KLIM-berichtgeving is:
 - $\pm 0,05$ uur (=3 minuten) (voorbeeld: registratie is 3,4: neerslagduur $> 3,35$ en $\leq 3,45$ uur);
- De gewenste (aflees) nauwkeurigheid van de conventionele handregenmeter:
 - $\pm 0,1$ mm (voorbeeld: aflezing is 3,4: neerslaghoeveelheid $> 3,3$ en $\leq 3,5$ mm);

Bij de handmatige stations kunnen tevens aflees- en waarnemingsfouten voorkomen. Deze kunnen liggen in bijvoorbeeld onnauwkeurigheid bij het aflezen van de handregenmeter, het registreren van de neerslag op een verkeerde dag en het door omstandigheden niet op het juiste tijdstip aflezen van de regenmeter. Dit laatste wordt opgevangen door de waarnemer de mogelijkheid te bieden naast de neerslaghoeveelheid het tijdstip van waarnemen door te geven. Naar de grootte van dergelijke fouten is geen onderzoek gedaan.

Daarnaast wordt opgemerkt dat sneeuw niet goed door de regenmeters kan worden geregistreeerd. De hoeveelheid neerslag die valt in de vorm van sneeuw wordt op een andere manier ingeschat, veelal op basis van meting van de sneeuwdikte. Op fouten in deze metingen wordt in dit stuk niet verder ingegaan. In de meeste in Nederland toegepaste hydrologische model-instrumentaria is de berekening van het effect van sneeuw op grondwaterstand en afvoer niet opgenomen.

2.2 VERWERKING TOT GEBIEDSNEERSLAG

Voor de bepaling van een gebiedsneerslag met een voldoende nauwkeurige ruimtelijke en temporele verdeling op basis van grondstations dienen de beschikbare handmatige stations en automatische stations met elkaar te worden gecombineerd. Hierbij wordt gebruik gemaakt van interpolatietechnieken. De handmatige stations leveren daarbij de ruimtelijke spreiding, de uurstations de noodzakelijke temporele spreiding binnen de dag. Het moge duidelijk zijn dat het bepalen van een neerslagreeks voor een willekeurige polder in Nederland door de beperkte dichtheid van de handmatige stations en automatische stations onzekerheden met zich meebrengt. De grootte van deze onzekerheid is voornamelijk afhankelijk van de afstand tot en de ligging ten opzichte van de grondstations, het type neerslag (in uitersten: een neerslagfront of een zomerbui), de fout in de neerslagmeting en de grootte van het te beschouwen gebied.

Uit onderzoek van Schuurmans and Bierkens (2006) en Tsintikidis et al (2002) blijkt dat een netwerk van neerslagmeters dat de ruimtelijke en temporele spreiding van de neerslag voldoende nauwkeurig beschrijft een dichter netwerk van zowel handregenmeters en vooral automatische stations vereist dan momenteel opgesteld in het KNMI-netwerk.

Afhankelijk van het op te lossen hydrologisch vraagstuk is de dichtheid van de gegevens voldoende of onvoldoende. Veelal zal de onzekerheid in de ruimtelijke en temporele verdeling van een neerslaggebeurtenis echter te groot zijn om bijvoorbeeld kalibratie van gedetailleerde ruimtelijk gedistribueerde modellen of een nauwkeurige modelanalyse van een specifieke historische neerslaggebeurtenis mogelijk te maken, danwel de onzekerheden daarin te verkleinen.

De fout in de neerslag op basis van de grondstations is bij kalibratie doorgaans zo groot dat kalibratie enkel op basis van langjarige reeksen kan worden toegepast. Door op langjarige reeksen te kalibreren wordt de invloed van afwijkingen in de neerslag op de modelparameters gedempt. De niet-systematische fout in de neerslag zorgt bij een lange reeks immers bij de ene gebeurtenis in de reeks voor negatieve afwijkingen ten opzichte van de metingen en bij de andere gebeurtenis voor positieve afwijkingen ten opzichte van de metingen. Een optimalisatiealgoritme kan de modelparameters zo berekenen dat het verschil tussen metingen en berekeningen over alle gebeurtenissen in de reeks het kleinst is en zal derhalve een optimum vinden in een set van modelparameters waarbij een evenwicht bestaat tussen de negatieve en positieve afwijkingen. Met de optimale set van parameters berekent het model een onderschatting van de afvoer bij een te geringe neerslaginvoer en een overschatting van de afvoer bij een te hoge neerslaginvoer. Hoe meer gebeurtenissen in de kalibratie worden beschouwd, hoe minder gevoelig de bepaling van de modelparameters is voor de fout in de neerslag. Systematische fouten in de neerslag en niet-gevalideerde neerslaggegevens zullen echter ook bij kalibratie met langjarige reeksen invloed hebben op de modelparameters.

Om de onzekerheden in de gevallen neerslaghoeveelheden te verkleinen wordt momenteel gebruik gemaakt van een combinatie van gegevens uit de grondstations en radarbeelden. Door recente ontwikkelingen vanaf vooral de jaren '90 in zowel de radartechnologie, de manier van vertalen van de radarreflectiviteit naar neerslaghoeveelheden, als de verbetering in de correcties van radarbeelden op basis van metingen van grondstations, geven de radarbeelden een meer en meer nauwkeurig beeld van de gevallen neerslag (Uijlenhoet, 2006). Momenteel wordt op al deze vlakken onderzoek gedaan naar verdere verbeteringen, in Nederland onder andere door het KNMI (Holleman), Wageningen Universiteit (Uijlenhoet) en Universiteit Utrecht (Bierkens).

3

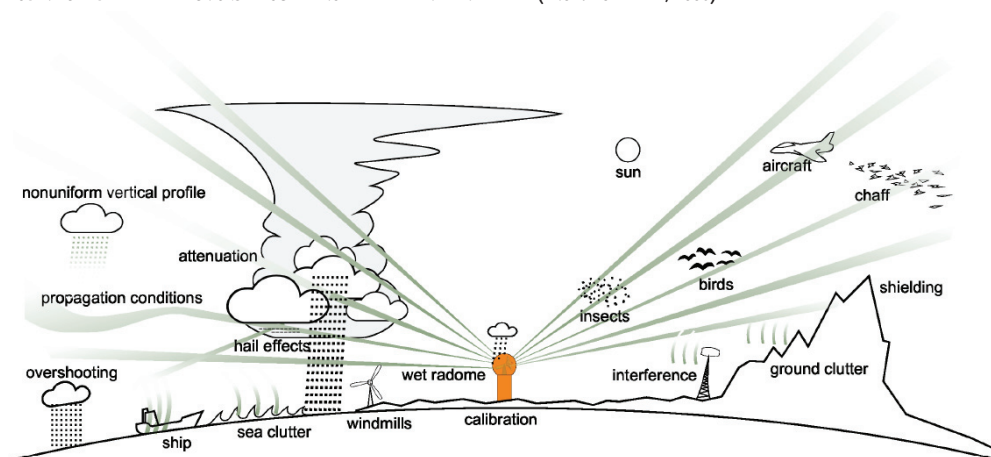
RADARGEGEVENS

3.1 FOUTEN IN DE WAARNEMING

Momenteel worden door het KNMI radarbeelden met een resolutie van 2,5x2,5 km beschikbaar gesteld. Deze radarbeelden zijn desgewenst geverifieerd en gecorrigeerd op basis van neerslagmetingen van de grondstations.

Een overzicht van de fouten in de radargegevens is opgenomen in Holleman (2006), overgenomen uit Michelson et al (2005). Het gaat te ver om in dit kader alle foutenbronnen te noemen. Het gaat om zowel fouten die ontstaan door de onnauwkeurigheid in de apparatuur en de opstelling, fouten die ontstaan door verstoringen van buitenaf, als fouten bij de vertaling van het radarbeeld naar neerslaghoeveelheden. Een deel van de fouten is weergegeven in Figuur 3-1.

FIGUUR 3-1 OVERZICHT VAN DE BELANGRIJKSTE FOUTENBRONNEN IN DE RADARBEELDEN (BRON: HOLLEMAN, 2006)



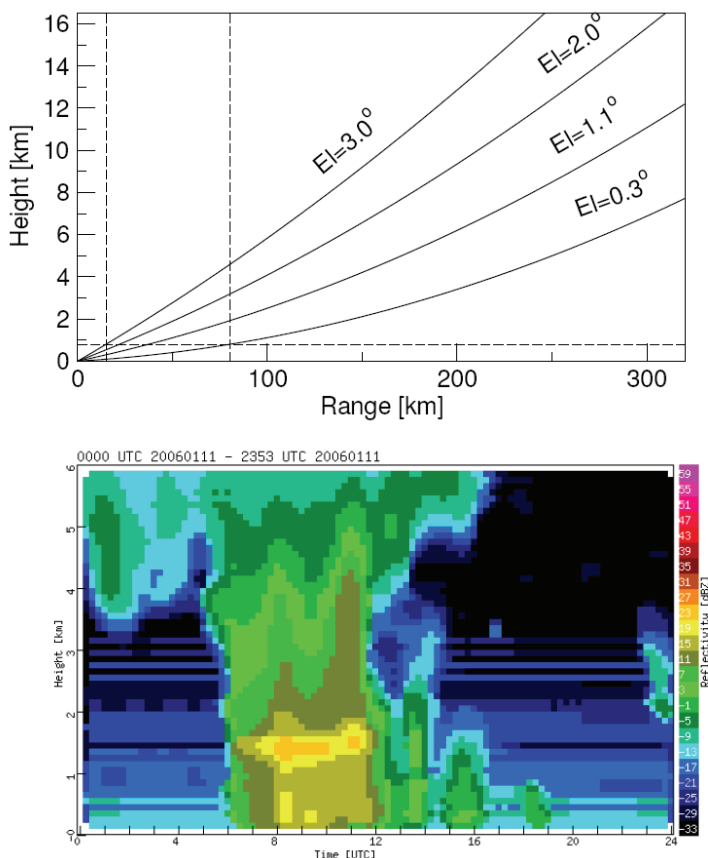
De belangrijkste fouten in de neerslaghoeveelheden die worden bepaald op basis van de beschikbare radarbeelden zijn de hoogte boven het aardoppervlak van de radarwaarnemingen (overshooting in Figuur 3-1), verzwakking van het radarbeeld door neerslag (attenuation in Figuur 3-1) en de variatie van het druppelgroottespectrum.

HOOGTE BOVEN HET AARDOPPERVLAK

De verandering van de radarreflectiviteit met de hoogte is in een deel van Nederland een belangrijke foutenbron. Door de kromming van de aarde en de minimale elevatie van de radar neemt de hoogte van de radarbundel sterk toe met de afstand van de radar. Op bijvoorbeeld 200 km afstand is de hoogte van een radarbundel met een elevatie van slechts 0.3 graden ongeveer 3.5 km en op 300 km is deze al bijna 7 km. Dit is weergegeven in de bovenste afbeelding van Figuur 3-2. Om een betrouwbaar beeld van de neerslag te construeren dienen de radarwaarnemingen een verticaal profiel met een minimum van 800 meter boven het aardoppervlak te beschrijven (de horizontaal gestippelde lijn in de figuur). Dit betekent dat

op afstanden van de weerradar groter dan 80 km onderschatting van de neerslag optreedt. In de onderste helft van Figuur 3-2 is een tijd-hoogte diagram van de reflectiviteit weergegeven voor een willekeurige dag in De Bilt. Het is duidelijk dat het verticale reflectiviteitsprofiel verre van constant is en sterk varieert over de dag. Radarwaarnemingen op bijvoorbeeld 6 km hoogte zullen de neerslagintensiteit aan de grond onderschatten (06-12 UTC), leiden tot foutieve melding van neerslag (00-06 UTC), of het missen van neerslag (16-19 UTC), afhankelijk van het actuele reflectiviteitsprofiel.

FIGUUR 3-2 BOVEN: HOOGTE VAN DE RADARBUNDEL ALS FUNCTIE VAN DE AFSTAND, ONDER: TIJD-HOOGTE DIAGRAM VAN DE REFLECTIVITEIT VAN DE WEERRADAR IN DE BILT (BRON: HOLLEMAN, 2006)



VARIATIE VAN HET DRUPPELGROOTTESPECTRUM

Bij conventionele radarmetingen wordt het terugkomende signaal omgezet in een grootte Z , de zogenaamde radarreflectiviteit. Voor deze radarreflectiviteit geldt:

$$Z = \sum_i n_i \cdot D_i^6$$

Waarbij n_i staat voor het aantal deeltjes per volume-eenheid met diameter D_i . Onder de aanname van een vooraf vastgestelde klimatologische druppelgrootteverdeling van de neerslag en een afhankelijkheid van de valsnelheid van druppels met hun diameter, kan de radarreflectiviteit worden omgerekend naar een hoeveelheid neerslag per tijdseenheid (R). Het verband tussen de radarreflectiviteit en de neerslagintensiteit is geschat op basis van waarnemingen. Dit verband is bepaald met behulp van metingen van de druppelgrootteverdelingen van neerslag bij verschillende intensiteiten. Er is een duidelijke correlatie tussen beide grootheden maar de spreiding rond het gemiddelde (klimatologische) verband is groot.

Deze spreiding wordt veroorzaakt door verschillen in de meteorologische omstandigheden, bijvoorbeeld door stratiforme of convectieve neerslag. Omdat gegevens over de actuele druppelgrootteverdeling van de neerslag niet beschikbaar zijn, wordt momenteel het volgende verband tussen de Z en R gebruikt om de neerslagintensiteiten af te leiden uit de radarwaarnemingen:

$$Z = 200 \cdot R^{1.6}$$

waarbij Z gegeven is in mm^6/m^3 en R in mm/h . Deze relatie wordt ook internationaal veel gebruikt, maar in individuele gevallen kunnen behoorlijke afwijkingen optreden. De volgende generatie operationele weerradars zal zeer waarschijnlijk in staat zijn om zogenaamde 'dual-polarisatie' waarnemingen te doen waardoor de nauwkeurigheid van de afleiding van neerslagintensiteiten sterk toeneemt (Holleman, 2004).

VERZWAKKING

Het door de radar uitgezonden en ontvangen signaal wordt verstrooid door neerslag. Tijdens zeer sterke neerslag of hagelbuien kan de verstrooiing zo groot zijn dat de bundel wordt verzwakt of zelfs geblokkeerd. Dit veroorzaakt onderschatting van de neerslagintensiteit of zelfs het verdwijnen van de neerslag achter de sterke neerslag. Deze verzwakking kan deels worden voorkomen door combinatie van overlappende radarwaarnemingen (de Bilt en Den Helder). Detectie van verzwakking en een methode voor correctie van de radarwaarnemingen is niet onderzocht noch operationeel. De fout die door verzwakking optreedt kan groot zijn en treedt op in de voor de hydrologie juist interessante situaties met hoge neerslagintensiteiten. Bij welke intensiteit fouten optreden en de grootte van de fout is niet bekend. Er zijn situaties van blokkering bekend, de neerslagintensiteiten die in die situaties voor blokkering zorgen zijn groter dan $50 \text{ mm}/\text{h}$.

Voor de bepaling van gebiedsneerslag kunnen bovenstaande fouten worden gecorrigeerd op basis van de waarnemingen van grondstations. Dit wordt besproken in paragraaf 3.2.

3.2 VERWERKING TOT GEBIEDSNEERSLAG

Uit de radarbeelden wordt in de huidige praktijk een neerslagintensiteit per cel van $2,5 \times 2,5 \text{ km}$ gegenereerd. In de toekomst wordt de resolutie waarschijnlijk vergroot naar $1 \times 1 \text{ km}$. Een radarbeeld levert in tegenstelling tot de noodzakelijke interpolatie van de waarnemingen van de grondstations direct een beeld van de gebiedsneerslag. Fouten in ruimtelijke interpolatie voor de bepaling van de gebiedsneerslag zijn daardoor bij radarbeelden niet aanwezig.

Overigens zijn geen technieken in de literatuur gevonden om binnen de cellen van het radarbeeld verder te interpoleren om zo een ruimtelijk verder gedifferentieerd en vereffend beeld te construeren. Wel is door de Universiteit van Utrecht (Schuurmans and Bierkens, 2006) een zeer dicht netwerk van automatische neerslagstations opgesteld om in combinatie met radargegevens een betere neerslag in ruimtelijke en temporele zin te construeren. Het blijkt dat een dicht netwerk van grondstations (dichter dan $2,5 \times 2,5 \text{ km}$) aanvullende informatie kan opleveren voor de bepaling van de ruimtelijke en temporele variatie in de neerslag.

CORRECTIE VAN DE RADARBEELDEN

Door de fouten zoals genoemd in de vorige paragraaf kennen de ruwe radarbeelden grote onzekerheden. Deze fouten onderschatten meestal de neerslag. De fout kan door post-processing van de radarwaarnemingen worden verkleind. Het radarbeeld dat ontstaat door deze

post-processing wordt door het KNMI desgewenst geleverd. In het vervolg van deze studie wordt enkel gewerkt met deze gecorrigeerde radarbeelden. De post-processing zoals toegepast door het KNMI - en meteorologische instituten van andere landen - is hieronder beschreven. Uit literatuur (Holleman, 2003) blijkt dat het toepassen van lange-termijn correcties op radar-accumulaties geen verbetering oplevert ten opzichte van de ruwe radaraccumulaties. Van de dagelijkse combinatie van radar- en stationaccumulaties zoals ontwikkeld door Klein-Tank (2000) zijn geen kwantitatieve verificatiegegevens beschikbaar, maar uit regelmatige inspectie is gebleken dat door de strakke schaling van de radaraccumulaties op de stationswaarden kleinschalige neerslagpatronen (buien) werden weggecorrigeerd. Vervolgens is gezocht naar een correctie op dagbasis waarmee een optimale combinatie van de ruwe radaraccumulaties en de actuele, handmatige stationswaarnemingen wordt gegenereerd. Bij deze correctie op dagbasis worden de stationsgegevens gebruikt om een aantal bekende (systematische) fouten in de ruwe radaraccumulaties te corrigeren met behoud van de ruimtelijke informatie.

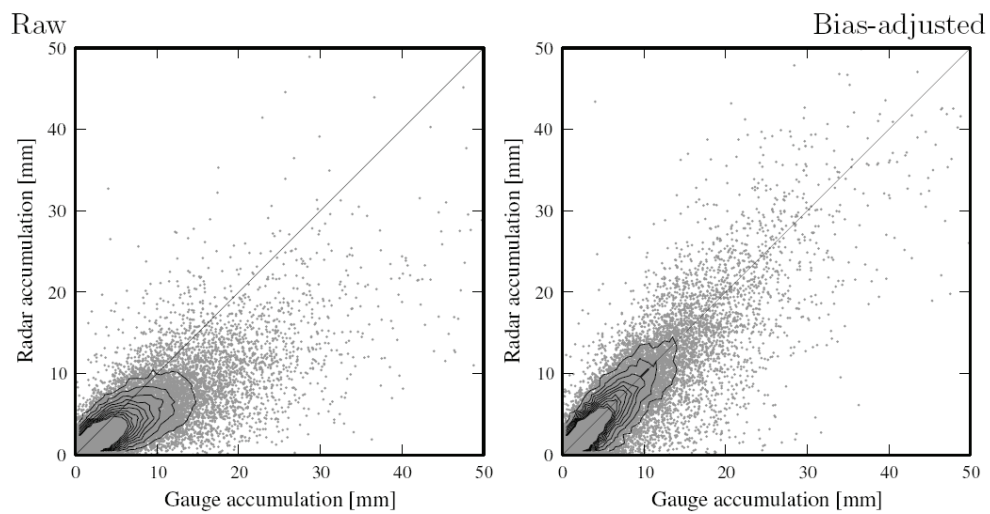
De methode omhelst de bepaling van een aanpassingsfactor voor schaling van de radarbeelden. De aanpassingsfactor wordt per dag bepaald op basis van de verschillen tussen de neerslaghoeveelheden van de radarbeelden en de neerslaghoeveelheden van een verzameling van grondstations. Momenteel worden voor de drieuurlijkse accumulaties de 35 automatische stations in plaats van de dagstations gebruikt. De aanpassingsfactor wordt bepaald voor elk beschouwd tijdvak en is daardoor variabel. Meer detail over de methode is opgenomen in Holleman (2007). Deze methode doet recht aan het verschil in de representativiteit van de grondstations en de radarbeelden. De grondstations leveren immers de neerslaghoeveelheid op 1 punt (en strikt genomen hoeft deze neerslag niet representatief te zijn voor de omgeving rond het station), de radarbeelden leveren de gemiddelde neerslaghoeveelheden binnen een cel van 2,5x2,5 km. Een voorbeeld van het verschil in representativiteit voor een specifieke gebeurtenis is weergegeven in Holleman (2004). Het verschil tussen de radarhoeveelheden en de hoeveelheden van grondstations wordt voor een groot deel bepaald door verschillen in representativiteit en is daarom niet per definitie de fout in de radarhoeveelheden.

Naast de correctie van de radarbeelden wordt onderzoek gedaan naar verdere kalibratie van de radarbeelden. Een voorbeeld hiervan is de kalibratie zoals genoemd in Schuurmans and Bierkens (2006). Deze kalibratietechniek maakt gebruik van de geostatistische interpolatietechniek Kriging. Bij deze techniek worden de onbekende neerslagwaarden beschouwd als een set van ruimtelijk afhankelijke, stochastische variabelen. De kalibratie maakt gebruik van een combinatie van neerslagstations en regenradar. Van de resultaten zijn in de literatuur geen waarden gevonden om een schatting te geven van de fout in de uiteindelijke gebiedsneerslag.

VERSCHILLEN TUSSEN REGISTRATIES VAN RADARBEELDEN EN GRONDSTATIONS

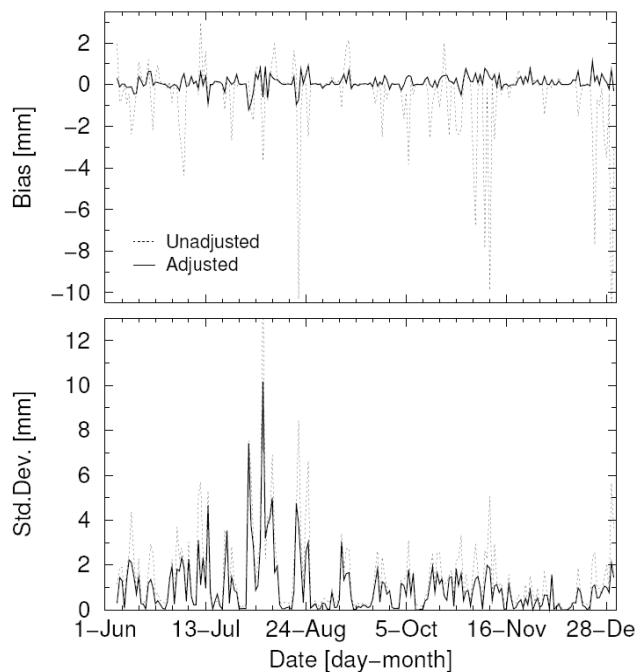
Om een indruk te krijgen van de verschillen tussen de waarnemingen van de grondstations en de ruwe en gecorrigeerde radarbeelden is Figuur 3-3 opgenomen (Holleman, 2007). De horizontale as representeert de waarnemingen van grondstations, de verticale as de waarneming uit de radarbeelden. De waarnemingen zijn vergeleken door de neerslaghoeveelheid van het grondstation te vergelijken met de neerslaghoeveelheid van de cel in het radarbeeld waarin het betreffende grondstation ligt. Het totaal aantal waarnemingspunten in de figuur is 33.453. Binnen de buitenste contourlijn in de figuur valt 99% van de waarnemingen. Uit de figuur is af te leiden dat de systematische onderschatting van de ruwe radardata effectief is gecorrigeerd. Verschillen tussen de intensiteiten van grondstation en radarbeeld van 50 tot 100% blijven ook na correctie bestaan.

FIGUUR 3-3 VERGELIJKING VAN GEACCUMULEERDE DAGWAARNEMINGEN VAN GRONDSTATIONS MET RADARBEELDEN, LINKS: RUWE DATA, RECHTS: GECORRIGEERDE DATA (BRON: HOLLEMAN, 2007)



Verder inzicht in de verschillen wordt gegeven in Holleman (2004), samengevat in Figuur 3-4. Door de correctie wordt de bias effectief gereduceerd. De standaardafwijking wordt tevens gereduceerd. In Holleman (2007) wordt een gemiddelde neerslag, gemiddelde afwijking en standaarddeviatie gepresenteerd. Voor de gecorrigeerde radarbeelden is de gemiddelde dag-neerslag over de beschouwde periode van 6 jaar 2,34 mm, de gemiddelde afwijking 0,01 mm en de standaardafwijking 1,79 mm.

FIGUUR 3-4 VERIFICATIE RESULTATEN VOOR DE RUWE RADARGEGEVENS EN NA DAGELIJKSE NEERSLAGCORRECTIE TEGEN DE NEERSLAGWAARNEMINGEN VAN DE AUTOMATISCHE STATIONS, BOVEN: BIAS, ONDER: STANDAARDAFWIJKING (BRON: HOLLEMAN, 2004)



Daarnaast is in Holleman (2006) en Uijlenhoet (2006) aangegeven dat de gemiddelde afwijking en de standaardafwijking afhankelijk zijn van de neerslaghoeveelheid en de afstand van de radar tot het station. Zowel de gemiddelde afwijking als de standaardafwijking neemt

toe bij grotere neerslag-intensiteiten. Data hiervoor zijn opgenomen in Tabel 3-1. De tabel is gebaseerd op de gecorrigeerde radardata en de dagstations. De radar is gecorrigeerd met de waarnemingen van automatische stations. Het betreft daarmee een onafhankelijke dataset.

Uit de tabel is te concluderen dat de spreiding in de verschillen tussen grondstations en radar-waarnemingen bij hogere neerslaghoeveelheden groter wordt. In de prestatiematrix is overigens geen afstandsafhankelijkheid opgenomen. Dit betekent dat de prestaties voor ver van de radar gelegen stations in Groningen en Limburg, die meer last hebben van overshooting en blokkering dan de dichtbij gelegen stations (een indruk van de effecten van de afstandsafhankelijkheid is weergegeven in Uijlenhoet, 2006), zijn opgenomen in de matrix. Mogelijk geeft een analyse met enkel de dicht bij Den Helder en de Bilt gelegen locaties betere prestaties.

TABEL 3-1

PRESTATIEMATRIX VOOR DE GECORRIGEERDE RADARDATA TEN OPZICHTE VAN DE WAARNEMINGEN VAN HANDMATIGE STATIONS,
TOTAAL AANTAL WAARNEMINGEN IS 433059 (BRON: HOLLEMAN, 2006)

		Gauges					
		0 – 0.5	0.5 – 10	10 – 20	20 – 30	30 – 40	> 40
Radar	0 – 0.5	217012	19199	7	1	0	0
	0.5 – 10	15253	145209	7901	300	28	3
	10 – 20	15	6118	13918	2031	189	37
	20 – 30	1	101	1739	1895	480	113
	30 – 40	1	12	122	466	342	154
	> 40	0	7	22	50	119	214

Uit de tabel kan een kansverdeling worden afgeleid die geschikt is voor deze studie. Als bijvoorbeeld de radar een neerslaghoeveelheid tussen 30-40 mm registreert is in 466 gevallen op een grondstation 20-30 mm geregistreerd en in 342 gevallen 30-40 mm. De kans dat de radar in de betreffende klasse een te grote neerslagwaarneming registreert is daarmee groter dan de kans dat de radar de juiste neerslagwaarneming registreert. Hierbij is dan wel (ten onrechte) verondersteld dat de stationswaarnemingen de werkelijk gevallen neerslag in de radarcel beschrijven en dat elke locatie in Nederland eenzelfde fout kent.

4

FOUT IN DE GEBIEDSNEERSLAG

4.1 INLEIDING

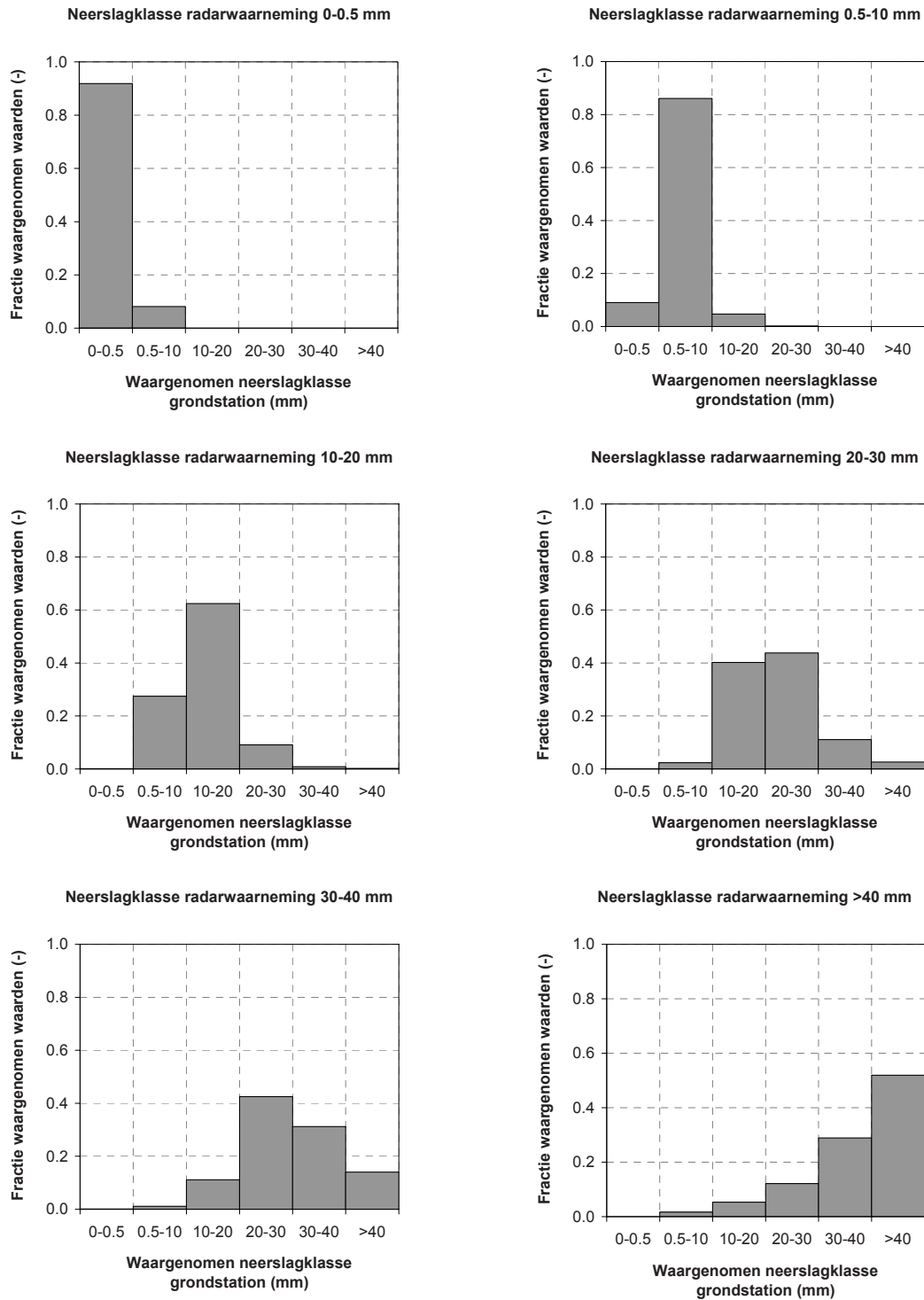
Bij de constructie van gebiedsneerslag voor hydrologische eenheden in Nederland is door de beperkte dichtheid van de grondstations aanvullende informatie noodzakelijk om een voldoende nauwkeurige gebiedsneerslag in ruimte en tijd te bepalen. Om de ruimtelijke en temporele verbetering van de neerslag beter te beschrijven zijn naast de waarnemingen van grondstations radarwaarnemingen beschikbaar.

Zowel in de radarwaarnemingen als in de waarnemingen van de grondstations zitten fouten. Doorgaans wordt het verschil tussen de radarwaarnemingen en waarnemingen van de grondstations (ten onrechte) beschouwd als de fout van de radarwaarnemingen. Door de fouten in de radarwaarnemingen en de waarnemingen van de grondstations en het verschil in representativiteit tussen de radarwaarnemingen (een gemiddelde neerslag per cel van 2,5x2,5 km) en de waarnemingen van grondstations (een neerslag op 1 punt) is de fout in de neerslag moeilijk te bepalen.

4.2 INSCHATTING FOUT GEBIEDSNEERSLAG

Om een redelijke fout in de neerslag in te schatten die geschikt is voor dit onderzoek kan gebruik worden gemaakt van recente resultaten van een onderzoek van Holleman (2006). Voor dit onderzoek is een continue beschrijving van de fout als functie van de neerslaghoeveelheid nodig. Om te komen tot een dergelijke continue beschrijving van de fout is allereerst de data uit de betreffende literatuur (zoals opgenomen in Tabel 3-1) omgewerkt tot de in Figuur 4-1 weergegeven histogrammen. Het betreft de gecorrigeerde radargegevens. De histogrammen representeren de kans op een neerslagklasse zoals gemeten op een grondstation, gegeven een in de radar geregistreerde klasse, uitgedrukt per neerslagklasse zoals opgenomen in Tabel 3-1.

FIGUUR 4-1 HISTOGRAMMEN MET PER NEERSLAGKLASSE VAN DE RADARBEELDEN DE WAARGENOMEN NEERSLAGKLASSE OP DE GRONDSTATIONS

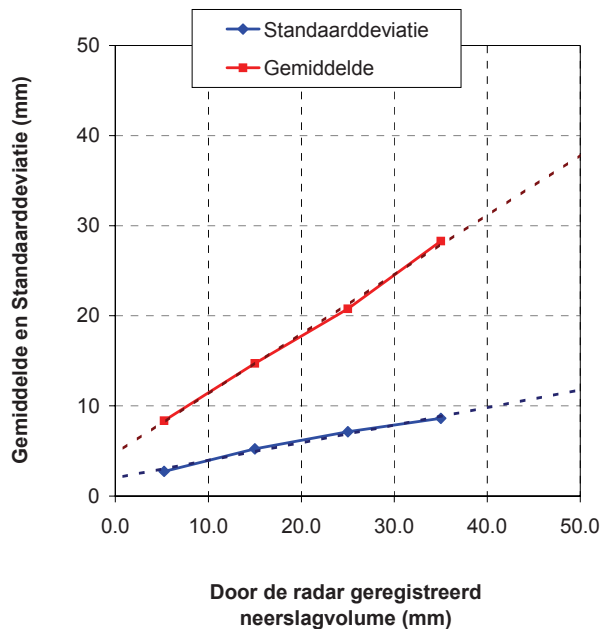


Elk histogram (oftewel per neerslagklasse zoals geregistreerd door de radar) kan worden beschreven met een histogram dat volgt uit een kansverdeling. Uit analyse volgt dat een normale verdeling voor de meeste klassen goed voldoet. Enkel de uiterste klassen (0 tot 0.5 mm en groter dan 40 mm) voldoen niet aan dit type kansverdeling en zijn daarom uit de analyse weggelaten. Voor de hoogste klasse omdat geen informatie beschikbaar is over de neerslagklassen boven 40 mm en daardoor de informatie te beperkt is om een kansverdeling te bepalen. Voor een juiste analyse in het hoge bereik dient ook data over klassen hoger dan 40 mm beschikbaar te zijn. De laagste klasse is uit de analyse weggelaten omdat negatieve neerslag niet voor kan komen en een normale verdeling deze wel zou voorspellen. Per neerslagklasse is de standaarddeviatie en het gemiddelde van de normale verdeling bepaald. Hierbij wordt opgemerkt dat de methodiek een fit betekent op beperkte data, namelijk de data zoals opgenomen in de histogrammen. Dit betekent een schatting van de parameters van de verdeling op 3 tot 5 punten. De schatting levert dus onzekerheid op.

Uit analyse van de standaarddeviaties en de gemiddelden van de normale verdelingen kan worden geconcludeerd dat beiden een lineaire relatie met het neerslagvolume vertonen. De relaties tussen het door de radar geregistreerde neerslagvolume enerzijds en het gemiddelde en de standaarddeviatie van de normale verdelingen anderzijds zijn weergegeven in Figuur 4-2. In de figuur zijn tevens de geschatte lineaire relaties afgebeeld. Voor het doel in deze studie kunnen de normale verdelingen met als basis de standaarddeviatie en het gemiddelde zoals bepaald met de genoemde lineaire relaties direct geponeerd worden op de radarbeelden. Vooralnog kan binnen dit onderzoek gebruik worden gemaakt van extrapolatie van de lineaire relaties naar het hoge en lage bereik.

FIGUUR 4-2

STANDAARDDEVIATIE EN GEMIDDELDE VAN DE KANSVERDELING VAN DE NEERSLAG ALS FUNCTIE VAN DE GEREГИSTREERDE NEERSLAG
(DE GESTIPPelde LIJN IS DE GESCHATTE LINEAIRE RELATIE)



OVERIGE ASPECTEN

Naast bovenstaande fout in de neerslag dient tevens de fout in de grondstations door windfouten te worden gecorrigeerd. Deze fouten zijn immers bij de correctie van de radarbeelden als het ware in de radarbeelden gestopt. Voorgesteld wordt deze systematische onderschatting door windfouten te corrigeren door 5% bij de winterneerslag op te tellen en 2% bij de zomerneerslag op te tellen.

Er bestaat mogelijk een autocorrelatie van de fout in de tijd. Deze is afhankelijk van de oorzaak van de fout. Afhankelijk van de oorzaak van de fout kan autocorrelatie sterk of geheel niet aanwezig zijn. De literatuur geeft geen inzicht in de autocorrelatie in de tijd. Uit gesprekken met het KNMI blijkt dat autocorrelatie in de tijd voorkomt. Aangenomen kan worden dat de fout per neerslaggebeurtenis eenzelfde kant op werkt.

5

ONTWIKKELINGEN EN AANBEVELINGEN

RUIMTELIJKE VERFIJNING

In de toekomst wordt de resolutie van de radarbeelden groter. Per 1 januari 2008 is de resolutie 1x1 km. Dit is een ruimtelijke verfijning waardoor het verschil in representativiteit tussen de waarnemingen van de grondstations en de radarwaarnemingen wordt verkleind. Het oppervlak waarover de radarwaarnemingen een gemiddelde neerslag genereren wordt immers kleiner, waardoor deze beter de puntneerslag van een inliggend grondstation benadert. Gevolg hiervan is dat de waarnemingen van de grondstations en de radar beter met elkaar kunnen worden vergeleken. Hierdoor ontstaan drie voordelen:

1. De correctie van de radarbeelden krijgt mogelijk een hogere nauwkeurigheid. Nog niet bekend is in hoeverre de ruimtelijke verfijning een daadwerkelijke nauwkeurigere correctie oplevert. De (bias-)correctie zoals deze momenteel wordt toegepast is immers gebaseerd op de waarnemingen van meerdere grondstations en is daardoor niet volledig afhankelijk van de verschillen op één enkel grondstation, maar afhankelijk van de gemiddelde verschillen over meerdere grondstations. Het is daarmee niet evident dat de aanpassingsfactor van de radarwaarnemingen, bij gelijkblijvende correctiemethode, verandert bij een grotere resolutie. Het is dan ook niet evident dat de gemiddelde neerslag over een gebied beter wordt berekend bij een grotere resolutie.
2. Door de hogere resolutie is een meer gespreid beeld van de neerslag beschikbaar. De neerslag is ruimtelijk nauwkeuriger gedistribueerd. Afhankelijk van de beschouwde gebiedsgrootte, de homogeniteit van het gebied en het karakter van de beschouwde neerslaggebeurtenis betekent de ruimtelijke verfijning een verbetering in de bepaling van de gebiedsneerslag. Bij grote homogene gebieden zal de positieve invloed van een grotere resolutie over het algemeen beperkt zijn. Bij kleinere gebieden kan de verbetering significant zijn.
3. Door het verkleinen van het verschil in representativiteit kan de fout in de neerslag zoals beschreven in paragraaf 4.2 beter worden geschat. De radarwaarnemingen met grotere resolutie zijn beter vergelijkbaar met de waarnemingen van de grondstations. De verschillen tussen de radarwaarnemingen en grondstations worden door de betere representativiteit nauwkeuriger in te schatten en hoogstwaarschijnlijk kleiner. De fout in de neerslag zoals voorgesteld als input voor dit onderzoek en beschreven in paragraaf 4.2 wordt daarmee tevens kleiner. Het onderzoek geeft echter, ongeacht de grootte van de fout, een bandbreedte aan van de schatting van de modelparameters, gegeven een onzekerheid in de opgelegde neerslag.

Verder wordt opgemerkt dat de radarbeelden met hoge resolutie niet beschikbaar komen voor historische reeksen. De historische reeksen zullen de komende jaren nog steeds gebruikt worden voor kalibratie van modellen.

VERBETERING VERTALING REFLECTIVITEIT NAAR NEERSLAG

Daarnaast zijn er ontwikkelingen gaande rondom het nauwkeuriger inschatten van de druppelgrootteverdeling op basis van aanvullingen in radarbeelden. Met huidige ontwikkelingen en nieuwe radartechnieken is het mogelijk om een inschatting te maken van de druppelgrootteverdeling. Dit levert een radarbeeld op met de druppelgrootteverdeling. Combinatie met de reflectiviteit van de huidige radar levert betere informatie over de neerslaghoeveelheden. Het type radar zoals opgesteld in De Bilt en Den Helder is vooralsnog niet geschikt voor deze technieken.

DICHTHEID RADARNETWERK

Naast de gegevens van de in Nederland opgestelde radars beslaan ook radars in Duitsland en (in de toekomst) België een deel van Nederland. Een voorbeeld hiervan is de radar in Emden in het noordwesten van Duitsland die het Groningse deel van Noord-Nederland beslaat. De data van de Nederlandse weerradars in combinatie met de buitenlandse weerradars kan een kwaliteitsverbetering opleveren. Zowel fouten veroorzaakt door de grote afstand tot de radar en door blokkering kunnen met aanvullende data effectief worden verkleind.

VERBETERING CORRECTIE RADARBEELDEN

Door bovenstaande ontwikkelingen en verbeterd inzicht in de verschillen tussen de waarnemingen van grondstations en radarbeelden worden meer geavanceerde correctietechnieken onderzocht. Momenteel wordt onderzoek gedaan naar verdere kalibratie van de radarbeelden (Schuurmans and Bierkens, 2006) op basis van grondstations.

6

GEBRUIKTE LITERATUUR

- Bastiaansen, W.G.M, E.J.M. Noordman en G. Hiemstra (2003). Remote sensing Ondersteund Waterbeheer. Stowa, februari 2003.
- Buishand, T.A. (1977). De variantie van de gebiedsneerslag als functie van puntneerslagen en hun onderlinge samenhang. Uitgeverij Veenman, 1977.
- Buishand, T.A. en C.A. Velds (1980). Klimaat van Nederland 1, Neerslag en Verdamping. KNMI, april 1980.
- Heijkers, J., I. Holleman en P. Schaper (2006). Neerslagradar verdringt neerslagmeters. H₂O nr. 5 2005.
- Holleman, I. (2003). Neerslaganalyse uit radar- en stationswaarnemingen. Internal Report, KNMI IR-2003-06, 2003.
- Holleman, I. (2004). Weerradar en de neerslag van augustus 2004. Meteorologica, december 2004.
- Holleman, I. (2006). Bias adjustment of radar-based 3-hour precipitation accumulations. Technical Report, KNMI TR-290, 2006.
- Holleman, I. (2007). Bias adjustment and long-term verification of radar-based precipitation estimates. Meteorological Applications (Royal Meteorological Society), 2007.
- Klein-Tank, A (2000). Intranet presentation of precipitation data from stations and radar. Memorandum. WM 00-06, KNMI, 2000.
- KNMI (2001). Handboek Waarnemingen; 6. Neerslag; versie maart 2001.
- Massop, H.Th.L, P.J.T. van Bakel, T. Kroon, J.G. Kroes, A.Tiktak en W. Werkman (2005). Op zoek naar de 'ware' neerslag en verdamping. Alterra-rapport 1158, Wageningen 2005.
- Michelson, D., T. Einfalt, I. Holleman, U. Gjertsen, K. Friedrich, G. Haase, M. Lindskog, and A. Jurczyk, 2005. Weather radar data quality in Europe: Quality control and characterization. Technical Report EUR 21955, EU (Brussels), 2005
- Schuurmans, J.M. en M.F.P. Bierkens (2007). Belang van betere neerslaginformatie voor hydrologen. H₂O nr 12, 2007.
- Schuurmans, J.M. en M.F.P. Bierkens (2006). Effect of spatial distribution of daily rainfall on interior catchment response of a distributed hydrological model. Hydrology and earth system sciences discussions, maart 2006.
- Smits, I., J. Wijngaard, M. Kok en R. Versteeg (2004). Statistiek van extreme neerslag in Nederland. STOWA-rapport nr. 26, 2004.
- Stellman, K.M. and H.E. Fuelberg (2001). An Examination of Radar and Rain Gauge-Derived Mean Precipitation over Georgia Watersheds. Weather and Forecasting, volume 16, februari 2001.
- Tsintikidis, D. et al (2002). Precipitation uncertainty and raingauge network design within Folsom Lake watershed. Journal of hydrologic engineering, maart/april 2002.
- Uijlenhoet, R., S.H. van der Wielen en A. Berne (2006). Uncertainties in rainfall retrievals from ground-based weather radar: overview, case study and simulation experiment. Hydrology and earth system sciences discussions, augustus 2006.