

HYDROLOGISCHE MODELONZEKERHEID SAMENVATTING



RAPPORT

2010
16

HYDROLOGISCHE MODELONZEKERHEID
DE INVLOED VAN ONZEKERE NEERSLAG OP HYDROLOGISCHE MODELUITKOMSTEN

SAMENVATTING

STOWA

2010

16

ISBN 978.90.5773.470.0



Publicaties van de STOWA kunt u bestellen op www.stowa.nl

COLOFON

COLOFON

Amersfoort, 2010

UITGAVE STOWA, Amersfoort

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 2010-16
ISBN 978.90.5773.470.0

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.

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

HYDROLOGISCHE MODELONZEKERHEID SAMENVATTING

INHOUD

	TEN GELEIDE STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
2	DOELSTELLING	3
3	AFBAKENING	4
4	AANPAK OP HOOFDLIJNEN	5
5	NADERE UITWERKING VAN DE GEVOLGDE WERKWIJZE	6
6	RELEVANTE CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN VOOR BESTUURDERS EN HYDROLOGEN	14
7	TECHNISCH-WETENSCHAPPELIJKE CONCLUSIES	16
8	TECHNISCH-WETENSCHAPPELIJKE AANBEVELINGEN	17
9	GEBRUIKTE LITERATUUR	18

1

INLEIDING

Voor de beleidsontwikkeling, planvorming en uitvoering in het regionale waterbeheer zijn uitkomsten van hydrologische modellen een belangrijke bouwsteen. Hydrologische modellen, hoe geavanceerd ook, beschrijven de hydrologische systeemwerking op een vereenvoudigde manier. Deze vereenvoudigingen komen tot uiting in:

- De modelcode. Het model beschrijft het hydrologische gedrag met behulp van vereenvoudigde wiskundige formules die i) gebaseerd zijn op de fysica of ii) een meer conceptueel karakter hebben. Daarnaast wordt de drie-dimensionale werkelijkheid soms teruggebracht tot twee- of één dimensionale informatie.
- De modelschematisatie, waarin ruimtelijk gedistribueerde gegevens, die vaak niet precies bekend zijn (denk bijvoorbeeld aan de eigenschappen van de bodem, maar ook drainagekenmerken, het landgebruik en de hoogteligging), worden geaggregeerd naar grotere oppervlakteenheden.
- De randvoorwaarden waarmee de het model wordt gevoed. Dit zijn bijvoorbeeld de neerslag, verdamping en de grondwaterflux. Deze randvoorwaarden zijn vaak niet precies bekend en bevatten daardoor een zekere nauwkeurigheidsmarge.
- De metingen waarop het model wordt gekalibreerd. Ook deze kennen een nauwkeurigheidsmarge (denk bijvoorbeeld aan de waterstand-afvoerrelatie van een verdrinken stuw).
- De gekalibreerde modelparameters. Deze zijn onzeker als gevolg van alle voorgenoemde onzekerheden.
- De statistiek van de randvoorwaarden. Een voorbeeld hiervan is een ontwerpbui met een herhalingsstijd van 100 jaar, die niet direct kan worden afgeleid uit de gemeten hoeveelheden neerslag en daarom moet worden geschat.

Door deze vereenvoudigingen en schattingen zijn de modeluitkomsten onzeker. Voor de beleidsontwikkeling, planvorming en uitvoering is het belangrijk om te weten hoe groot de onzekerheid is en in welke mate de onzekerheden doorwerken in, als voorbeeld, de Wateropgave en de effectiviteit van maatregelen. Zie ter illustratie onderstaande kader over de invloed van onzekerheden op de besluitvorming over, in dit geval, de noodoverloopgebieden langs de grote rivieren.

OVER HET BELANG VAN ONZEKERHEDEN, CASUS NOODOVERLOOPGEBIEDEN GROTE RIVIEREN

Op vraag van de regering heeft de commissie Noodoverloopgebieden (commissie Luteijn) in 2002 geconcludeerd dat de aanwijzing van noodoverloopgebieden langs de grote rivieren nuttig is voor de bescherming tegen overstromingen [35]. Parallel daaraan hebben Rijkswaterstaat en HKV *lijn in water*, aanvullend op de door de commissie gevolgde deterministische werkwijze, een probabilistische onzekerheidsanalyse naar de effectiviteit van noodoverloopgebieden uitgevoerd [36]. Een voorbeeld van een onzekerheidsbron is de verdeling van de afvoer over de splitsingspunten in de Rijn. Als deze anders verloopt dan voorzien kan de effectiviteit van noodoverloop sterk afnemen doordat bijvoorbeeld benedenstrooms onvoorzien het water over de dijken gaat en de hoogwater-

golf het bovenstrooms gelegen noodoverloopgebied al is gepasseerd. Door alle bronnen van onzekerheden mee te nemen in de analyse, onstond een somberder beeld van de (kosten)effectiviteit van noodoverloopgebieden. Dat heeft er mede toe geleid dat de voor de noodoverloopgebieden langs de Rijn gereserveerde middelen naar het budget voor Ruimte voor de Rivier zijn gegaan.

2

DOELSTELLING

Het doel van het onderzoek ‘*Hydrologische modelonzekerheid; De invloed van onzekere neerslag op hydrologische modeluitkomsten*’ is het beantwoorden van de volgende onderzoeksvragen:

- *Invloed op modelparameters*: In welke mate is de onzekerheid in neerslaggegevens van invloed op de omvang van onzekerheid van gekalibreerde modelparameters?
- *Invloed op huidige situatie*: In welke mate leidt een mogelijke onnauwkeurigheid in (gekalibreerde) modelparameters, als gevolg van de onzekerheid in neerslaggegevens, door in modeluitkomsten voor de huidige situatie?
- *Invloed op scenario's*: In welke mate leidt een mogelijke onnauwkeurigheid in (gekalibreerde) modelparameters, als gevolg van de onzekerheid in neerslaggegevens, door in modeluitkomsten voor toekomstige situaties (scenario's).

In de volgende paragrafen wordt beschreven hoe het onderzoek is afgebakend en inhoudelijk is opgezet, wat de resultaten zijn, welke inzichten die resultaten bieden en welke onderzoeksactiviteiten verder nog ontplooid zouden moeten worden om een volledig beeld te verkrijgen van de invloed van onzekerheden die van invloed kunnen zijn op de besluitvorming over de inrichting van watersystemen.

3

AFBAKENING

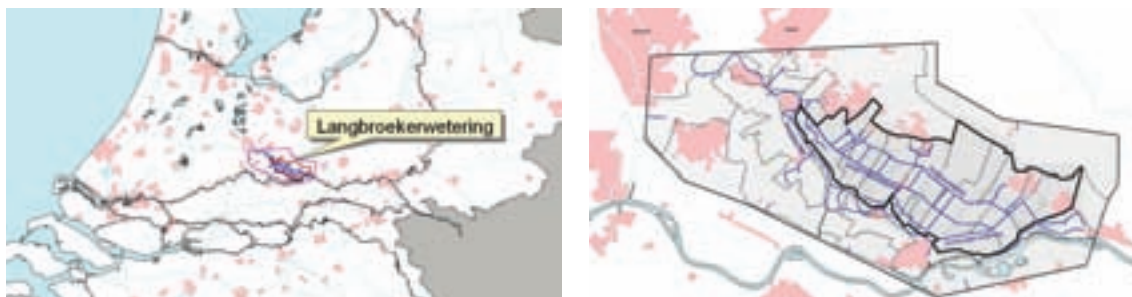
Het onderzoek beperkt zich als eerste stap tot drie bronnen van onzekerheden:

- De fout in de gebiedsneerslag;
- De fout in de gemeten afvoeren en grondwaterstanden waarop het model wordt gekalibreerd. Gemeten waterstanden zijn buiten beschouwing gelaten omdat deze sterk gecorreleerd zijn aan de afvoeren.
- De fout in de gekalibreerde modelparameters.

Als vereenvoudiging wordt verondersteld dat de fouten in de gebiedsneerslag en metingen geen autocorrelatie vertonen.

Als casus wordt gebruik gemaakt van een Simgro model van de Langbroekerwetering, een stroomgebied in het beheersgebied van Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden (HHSR). In dit gebied komt zowel stedelijk, pleistoceen als holoceen gebied voor, waardoor de onderzoeksresultaten ook inzichten kunnen geven voor andere gebieden in Nederland.

AFBEELDING 1 HET STROOMGEBIED VAN DE LANGBROEKERWETERING



Simgro is een fysisch gebaseerd, ruimtelijk gedistribueerd modeltype, dat zowel de onverzadigde zone, het grondwater als het oppervlaktewater beschrijft, alsmede de interactie daarvan.

4

AANPAK OP HOOFDLIJNEN

Het doel van het onderzoek is de effecten van onzekerheden op modeluitkomsten te bepalen voor zowel de huidige situatie als een situatie met de maatregelen vasthouden en afvoeren. Hieruit moet ondermeer blijken in welke mate onzekerheden doorwerken in de effecten van maatregelen. In het onderzoek zijn hiertoe de volgende stappen doorlopen:

1. Deterministische kalibratie van het hydrologische model.
2. Vooraf schatten van de onzekerheden in de gebiedsneerslag, de kalibratieparameters en de combinatie van meet- en modelfouten.
3. Kalibreren van het hydrologische model met medeneming van de genoemde onzekerheidsbronnen, gericht op het minimaliseren van die onzekerheden.
4. Vaststellen van de resterende (geminaliseerde) onzekerheid in de gebiedsneerslag en gekalibreerde modelparameters.
5. Vaststellen van de onzekerheid in de berekende afvoeren en grondwaterstanden als gevolg van de onzekerheden als resultaat van stap 3.
6. Vaststellen van de invloed van de genoemde onzekerheidsbronnen op de effecten van maatregelen.

5

NADERE UITWERKING VAN DE GEVOLGDE WERKWIJZE

Stap 1: Deterministische kalibratie van het hydrologische model.

Als eerste stap in het onderzoek is een deterministische kalibratie van het hydrologische model uitgevoerd. Met deterministisch wordt bedoeld dat nog geen onzekerheden in beschouwing zijn genomen. Deze kalibratie is volledig geautomatiseerd uitgevoerd met behulp van een Simplex algoritme van Nelder en Mead [24]. In dit algoritme wordt op iteratieve wijze, op basis van vele modelruns, het beste kalibratieresultaat verkregen. Initieel worden willekeurig een n aantal alternatieve kalibratieparameter sets gegenereerd. Iedere iteratieslag in het optimalisatie proces worden de alternatieve sets geëvalueerd. Vervolgens wordt de slechtste set aangepast in de richting van de beste set. De kwalificatie van slechtste en beste is gebaseerd op het verschil tussen meting en berekende waarde. Het optimalisatie proces is zo opgezet dat de gekalibreerde modelparameters binnen een opgegeven bandbreedte in overeenstemming met de fysica moeten blijven. Om lokale optima te omzeilen is er voor gekozen om de optimalisatie een aantal maal uit te voeren. Er is gekalibreerd op een tijdreeks van 7 jaar van waargenomen grondwaterstanden en afvoeren met als kalibratieparameters de weerstand (c-waarde) van de deklaag, de infiltratiecapaciteit op het maaiveld en de drainage- en infiltratieweerstand van greppels en buisdrainage. De voordelen van deze automatische kalibratie ten opzichte van een conventionele, handmatige kalibratie zijn dat een optimaal, objectief en reproduceerbaar resultaat wordt verkregen tegen een geringere inspanning dan wanneer handmatig gekalibreerd zou worden, met uitsluiting van fysisch niet reële waarden van gekalibreerde modelparameters.

Het resultaat van deze stap bestaat uit de verwachtingswaarde van de gekalibreerde modelparameters van het model en statistische eigenschappen van verschillen tussen metingen en modelresultaten.

Stap 2: Schatting van onzekerheden

Als tweede stap is een vooraf (a-priori) schatting gemaakt van onzekerheden in gekalibreerde modelparameters, meetfouten en gebiedsneerslag. Deze a-priori schatting wordt in stap 3 gebruikt om het kalibratiealgoritme de kans te geven om binnen vooraf ingeschatte grenzen de onzekerheden in de gebiedsneerslag, metingen en gekalibreerde modelparameters te minimaliseren (deze na de kalibratie bepaalde, geminimaliseerde, onzekerheden worden de posteriori onzekerheden genoemd).

Het resultaat van deze stap is dus met name van technisch belang, maar de schatting van de fout in de gebiedsneerslag [10] is ook voor andere doeleinden toepasbaar en wordt om die reden hier kort beschreven.

Voor de gebiedsneerslag is uitgegaan van een schatting voor roostercellen van $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$. Voor deze roostercellen wordt de verwachtingswaarde en de fout van de neerslag geschat op basis van waarnemingen van grondstations en neerslagradar. Gebruik is gemaakt van de gecorrigeerde 3-uurssommen van het KNMI op basis van het samengestelde radarbeeld van De Bilt en Den Helder en de KNMI dagstations in het gebied.

De locaties van de grondstations zijn weergegeven in Afbeelding 2. 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 inspatten en uitspatten van regendruppels [4, 20].

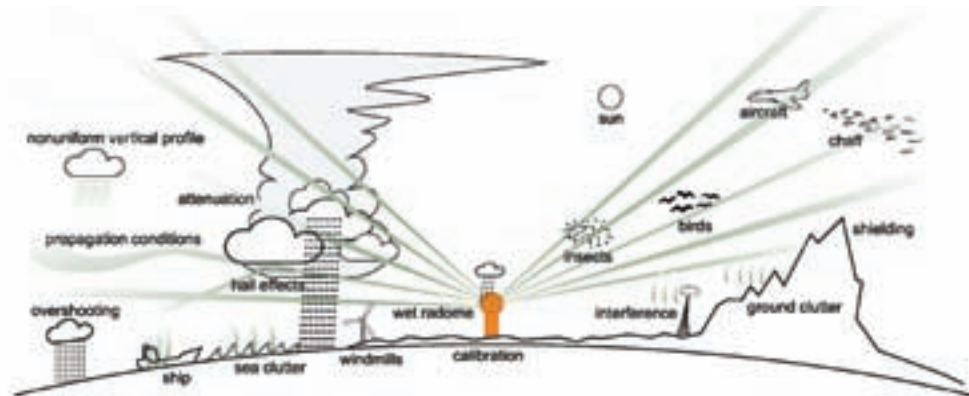
AFBEELDING 2 NEERSLAGSTATIONS (LINKS: AUTOMATISCHE STATIONS, RECHTS: HANDMATIGE STATIONS) [14]



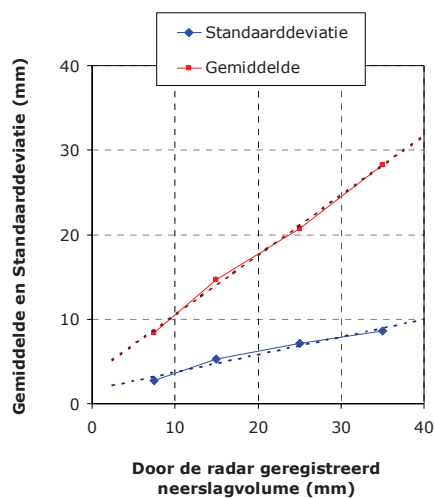
Het bereik van de neerslagradars van De Bilt en Den Helder, waarvan de reflectiviteit wordt omgerekend naar een neerslaghoeveelheid, is weergegeven in het linkerdeel van Afbeelding 2 (Noot: voor de grensstreek kunnen ook de neerslagradarstations in Duitsland en België van belang zijn). Radarbeelden zoals geleverd aan de waterschappen hebben een resolutie van $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$ en vanaf 1 januari 2008 $1 \times 1 \text{ km}^2$. Een overzicht van de fouten in de radargegevens is opgenomen in [14], overgenomen uit [21]. Het gaat om zowel fouten die ontstaan door de onnauwkeurigheid in de apparatuur en de opstelling als om fouten die ontstaan door verstoringen van buitenaf, zoals fouten bij de vertaling van het radarbeeld naar neerslaghoeveelheden. Een deel van de fouten is weergegeven in Afbeelding 3. De belangrijkste fouten in de neerslaghoeveelheden op basis van de radarbeelden zijn de hoogte boven het aardoppervlak van de radarwaarnemingen (overshooting in Afbeelding 3), verzwakking van het radarbeeld door neerslag (attenuation) en de variatie van het druppelgroottespectrum.

Op basis van literatuurgegevens [14] is een relatie gelegd tussen radarwaarnemingen en de verwachtingswaarde en fout (variantie) van de gebiedsneerslag, zie Afbeelding 4. Het blijkt dat de gevonden relaties met een lineaire fit goed worden benaderd.

AFBEELDING 3 OVERZICHT VAN DE BELANGRIJKSTE FOUTENBRONNEN IN DE RADARBEELDEN [14]



AFBEELDING 4 STANDAARDDEVIATIE EN GEMIDDELDE VAN DE KANSVERDELING VAN DE NEERSLAG ALS FUNCTIE VAN DE GEREГИSTREERDE NEERSLAG (DE GESTIPPelde LIJN IS DE GESCHATTE LINEAIRE RELATIE)



De fout in de gebiedsneerslag wordt log-normaal verdeeld verondersteld. Onbekend daarbij is of deze fout een ruimtelijke correlatie vertoont. Een nieuw onderzoek (HKV [LIJN IN WATER](#) in opdracht van de waterschappen Rivierenland en Vallei en Eem en Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden) zal begin 2009 informatie opleveren over de ruimtelijke correlatie van de fout. In deze samenvatting wordt volstaan met een beschrijving van de resultaten uitgaande van ruimtelijke correlatie van de fout in de gebiedsneerslag.

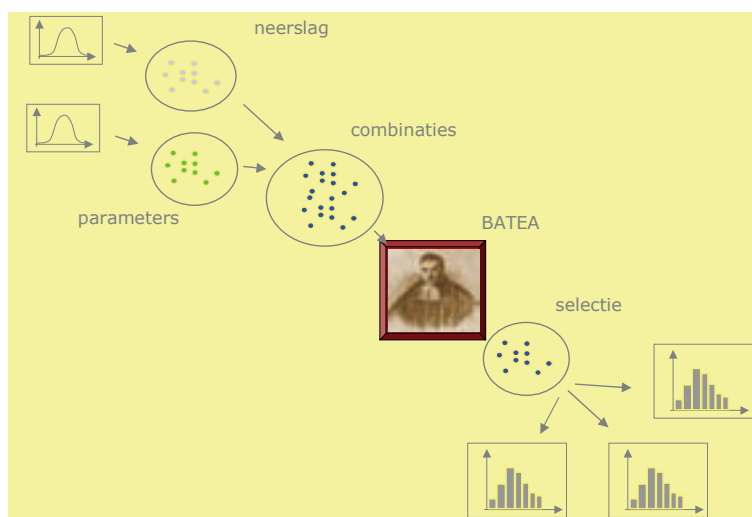
Volledigheidshalve zij nog vermeld dat voor de onzekerheid in de gekalibreerde modelparameters is uitgegaan van uniform verdeelde waarden tussen de (in stap 1 op basis van een deterministische kalibratie gevonden) verwachtingswaarde, plus en min 50%. De totale onzekerheidsmarge bedraagt dus 100%. De onzekerheid in de combinatie van meet- en modelfouten is gemakshalve kunstmatig gegenereerd door witte ruis toe te voegen aan de metingen. De eigenschappen van de witte ruis zijn gebaseerd op de verschillen tussen de metingen en de modelresultaten zoals gevonden in stap 1.

Stap 3: Kalibreren van het hydrologische model met medeneming van de genoemde onzekerheidsbronnen, gericht op het minimaliseren van die onzekerheden

In de derde stap worden op basis van een probabilistische kalibratie de verschillende onzekerheidsbronnen, die in stap 2 nog a-priori waren ingeschat, geminimaliseerd. Het resultaat is dus een verwachtingswaarde van de gebiedsneerslag, de gekalibreerde modelparameters en de combinatie van meet- en modelfouten met een geminimaliseerde onzekerheidsmarge (oftewel restonzekerheid).

Om dit resultaat te verkrijgen is gebruik gemaakt van een Bayesiaans (genoemd naar dominee Bayes als grondlegger van de bayesiaanse statistiek) kalibratiealgoritme, te weten het BATEA algoritme zoals beschreven door Kavetski [17]. In deze methode wordt verondersteld dat er diverse neerslaghoeveelheden, modelparameterwaarden, grondwaterstanden en/of afvoeren zijn die in gelijke mate de werkelijke neerslaghoeveelheid, modelparameterwaarden, grondwaterstand en afvoer beschrijven. In Afbeelding 5 is het principe van de BATEA methode weergegeven, met daarop volgend een toelichting.

AFBEELDING 5 VEREENVOUDIGDE WEERGAVE VAN DE WERKING VAN HET BATEA KALIBRATIEALGORITME



- Op basis van het resultaat van de deterministische kalibratie in stap 1 wordt de correlatie tussen verschillende combinaties van gebiedsneerslag en modelparameters verkregen. De correlatie en de meest waarschijnlijke waarden geven de eigenschappen van een multi-variate normale verdeling. Deze verdeling beschrijft bij benadering de waarschijnlijkheid van de set mogelijke combinaties. De verdeling wordt de proposal density genoemd.
- Op basis van willekeurige trekkingen uit de proposal density wordt door de Bayesiaanse analyse een verzameling van waarschijnlijke combinaties opgesteld.
- Een willekeurige trekking uit de proposal density is het startpunt van de analyse. De combinatie van gebiedsneerslag en modelparameters uit deze trekking wordt met SIMGRO doorgerekend. Door een vergelijking van gesimuleerde grondwaterstanden en afvoeren met metingen kan de fit van de getrokken combinatie worden vastgesteld. Als deze fit een verbetering of geringe verslechtering is van de fit gevonden met de deterministische kalibratie van stap 1, wordt de getrokken combinatie aan de verzameling toegevoegd. Als de fit een grote verslechtering is wordt de combinatie verworpen. Indien de combinatie is geselecteerd, wordt de verwachtingswaarde van de proposal density vervangen door de combinatie. Bij verwerping van de trekking wordt de density niet aangepast.

(In de Bayesiaanse methode wordt de waarschijnlijkheid van de metingen gebruikt om de fit van een combinatie te berekenen. Dit is een normale kansverdeling (likelihoodfunctie) van het verschil tussen gesimuleerde en gemeten waarden. Zoals gesteld wordt voorafgaand aan de kalibratie (a-priori) bepaald binnen welke grenzen de neerslaghoeveelheid en de parameterwaarden mogen worden aangepast. Sterker, de a-priori waarschijnlijkheid van de neerslaghoeveelheid en de gekalibreerde modelparameterwaarden wordt ook uitgedrukt met een kansverdeling. Het product van deze a-priori waarschijnlijkheid en de likelihood functie is gelijk aan de fit van de doorgerekende combinatie. Dit product bepaalt dus of de combinatie wordt geselecteerd. Het is gelijk aan de waarschijnlijkheid van de metingen, gegeven de waarschijnlijkheid van neerslag, parameters, model- en meetfout.)

- Vervolgens wordt een nieuwe combinatie uit de proposal density getrokken en met SIMGRO doorgerekend. Ook nu wordt de fit van deze nieuwe combinatie getoetst en eventueel wordt de verzameling en de density aangepast.
- Deze trekkingen worden (duizenden malen) herhaald totdat de eigenschappen van de verzameling niet meer veranderen. Het is mogelijk dat een combinatie van neerslag en modelparameters meerdere keren in de verzameling voorkomt. Immers, willekeurig wordt een trekking verricht uit de proposal density. Een combinatie met een goede fit zal vaker tot de verzameling worden toegelaten dan combinaties met een mindere fit. Na een groot aantal trekkingen verandert het percentage van verschillende combinaties in de verzameling niet meer. Dan kan de analyse worden beëindigd.
- Het resultaat van de BATEA methode is een verzameling van doorgerekende combinaties van neerslaghoeveelheden en gekalibreerde modelparameterwaarden. Het aantal maal dat een combinatie voorkomt in de verzameling bepaalt de waarschijnlijkheid van deze combinatie na kalibratie (posteriori). Per combinatie is de neerslaghoeveelheid, de gekalibreerde modelparameterwaarde en het verschil tussen meting en simulatie bekend. Door eenvoudig te turven kunnen histogrammen worden opgesteld van de neerslag, de parameters en de model- en meetfout (zie Afbeelding 5).

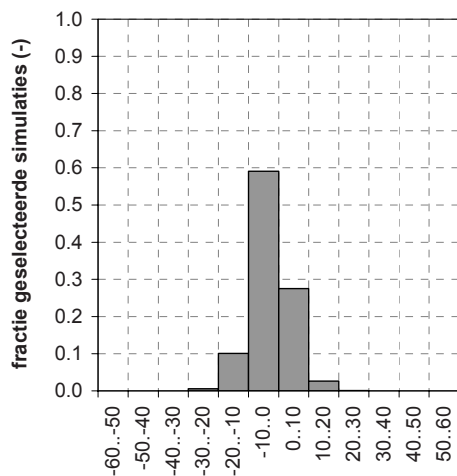
Stap 4: Vaststellen van de resterende (geminaliseerde) onzekerheid in de gebiedsneerslag en gekalibreerde modelparameterwaarden.

In onderstaande afbeeldingen wordt in histogrammen de resterende onzekerheid in de gebiedsneerslag en gekalibreerde modelparameters weergegeven als resultaat van stap 3. Uit de afbeeldingen blijkt kort samengevat dat het terecht is de gebiedsneerslag en de gekalibreerde modelparameters als onzeker te veronderstellen.

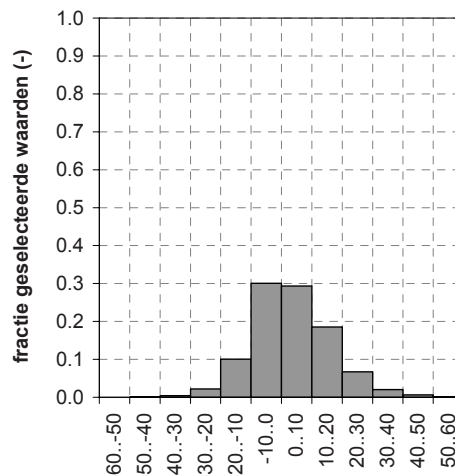
De resterende spreiding in de neerslag na het kalibreren varieert tussen +/- 15% van de gemeten waarde, waarbij de meest waarschijnlijke waarde gelijk is aan de gemeten waarde. De posteriori berekende spreiding is dus belangrijk minder dan de a-priori geschatte spreiding zoals weergegeven in Afbeelding 4. Het kalibratiealgoritme vindt verder een duidelijke voorkeur voor waarden van de kalibratieparameters, wat blijkt uit het gepiekte verloop van de histogrammen. Desalniettemin resteert een spreiding van -30% tot +50% rondom de verwachtingswaarden. De verwachtingswaarden van de gekalibreerde modelparameters op basis van de Bayesiaanse kalibratie veranderen daarbij niet veel ten opzichte van de oorspronkelijk gevonden verwachtingswaarden op basis van de deterministische kalibratie. Kort samengevat blijkt het toegepaste BATEA algoritme goed in staat te zijn om i) de onzekerheden te minimaliseren en ii) de omvang van de restonzekerheid te bepalen.

AFBEELDING 6

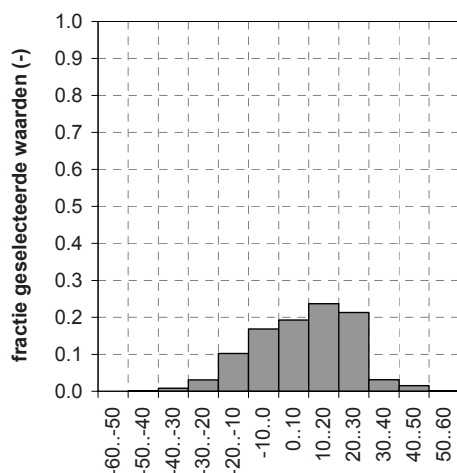
RESULTERENDE ONZEKERHEDEN IN GEBIEDSNEERSLAG, GEKALIBREERDE MODELPARAMETERS EN MODELFOUTEN, MET OP DE X-AS EEN KLASSEINDELING VAN DE GEVONDEN SPREIDING RONDOM DE VERWACHTINGSWAARDE EN OP DE Y-AS DE FRACTIE VAN HET TOTALE AANTAL REALISATIES DAT BINNEN DIE KLASSEN VALT, WAARBIJ DE SOM VAN DE FRACTIES GELIJK IS AAN 1



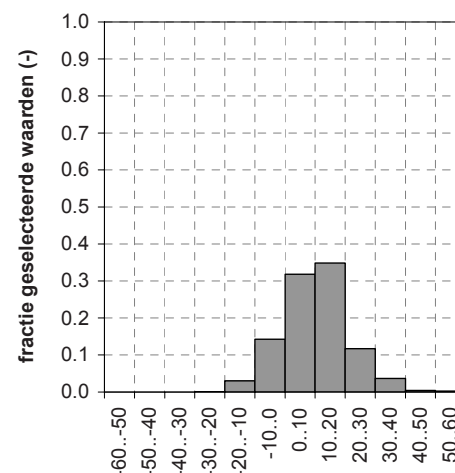
Afwijking tov verwachtingswaarde neerslag (%)



afwijking tov verwachtingswaarde c-waarde (%)



afwijking tov verwachtingswaarde drainageweerstand (%)

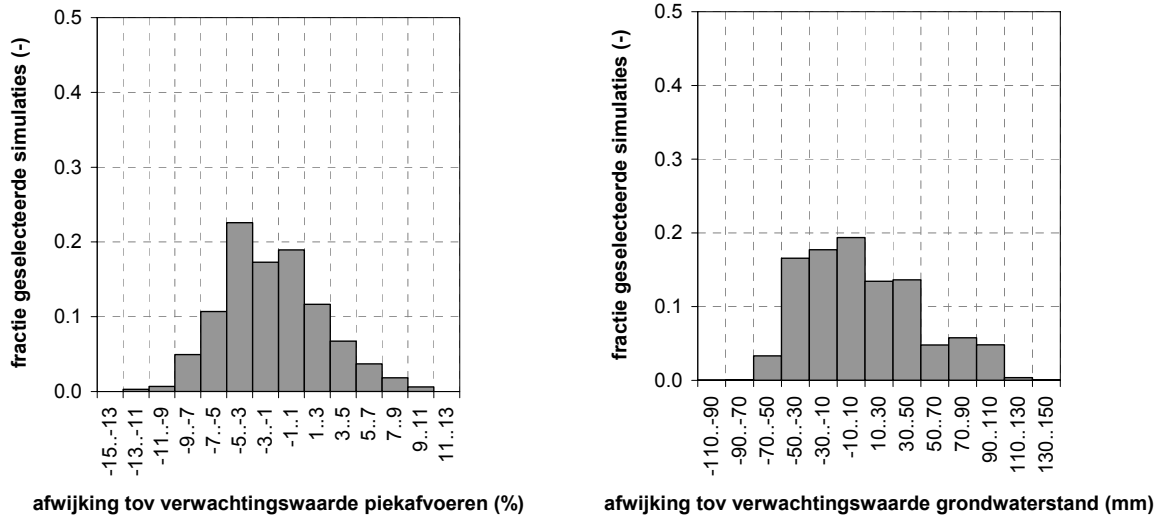


afwijking tov verwachtingswaarde infiltratiecapaciteit (%)

Stap 5: Vaststellen van de restonzekerheid in de berekende afvoeren en grondwaterstanden

In Afbeelding 7 is de resulterende restonzekerheid in de berekende afvoeren en grondwaterstanden weergegeven als het gemiddelde effect voor alle beschouwde locaties. Hieruit blijkt dat de resterende onzekerheidsmarge in de modeluitkomsten als gevolg van onzekere metingen, gebiedsneerslag en gekalibreerde modelparameters beperkt zijn, namelijk +/- 10% in de afvoer en -5 tot +15 cm in de grondwaterstanden. Dit is conform de verwachting, aangezien tweederde van de grondwatermeetpunten is gelegen in gebieden waar de bodemopbouw overheersend uit klei bestaat. Daarbij wordt opgemerkt dat als alle onzekerheidsbronnen zouden zijn meegenomen, inclusief de werkelijke meetfouten, de gevonden onzekerheidsmarges anders (waarschijnlijk groter) zullen zijn.

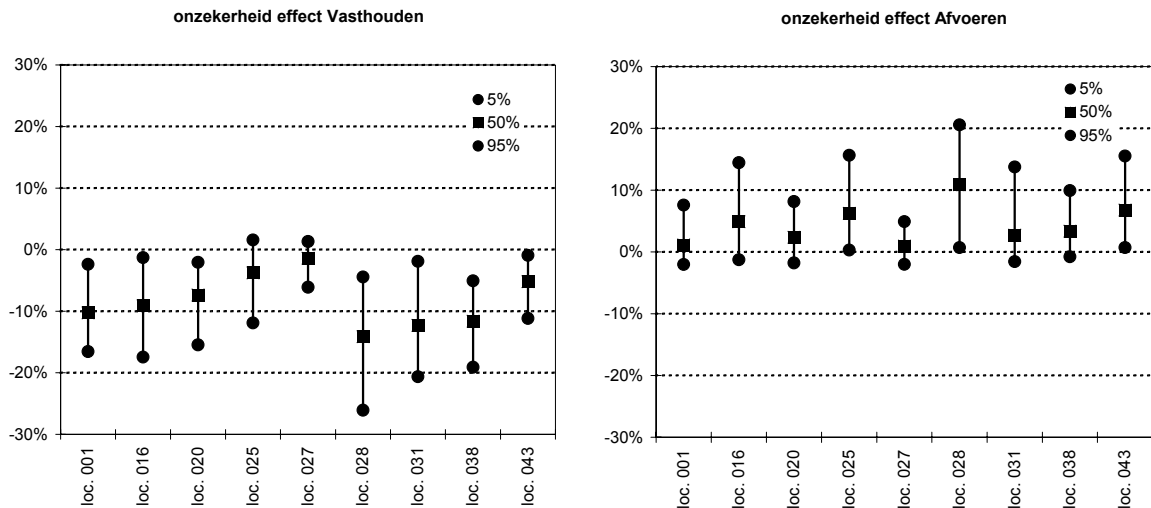
AFBEELDING 7 RESULTERENDE ONZEKERHEDEN IN BEREKENDE AFVOEREN EN GRONDWATERSTANDEN, GEMIDDELD OVER ALLE LOCATIES, MET OP DE X-AS EEN KLASSEINDELING VAN DE GEVONDEN SPREIDING RONDOM DE VERWACHTINGSWAARDE EN OP DE Y-AS DE FRACTIE VAN HET TOTALE AANTAL REALISATIES DAT BINNEN DIE KLASSEN VALT, WAARBIJ DE SOM VAN DE FRACTIES GELIJK IS AAN 1



Stap 6: Vaststellen van de invloed van de genoemde onzekerheidsbronnen op de effecten van maatregelen

In Afbeelding 8 wordt voor een aantal locaties de invloed van de beschouwde onzekerheidsbronnen op de berekende maximale afvoeren na het treffen van maatregelen getoond. De beschouwde maatregelen betreffen vasthouden in de haarvaten in natuurgebieden (dit is ongeveer de helft van het stroomgebied) door middel van stuwtdjes en het vergroten van de afvoer door verbreding van primaire waterlopen inclusief de aanwezige kunstwerken.

AFBEELDING 8 BEREKENDE ONZEKERHEID IN EFFECTEN VAN MAATREGELEN (MET OP DE Y-AS DE BEREKENDE SPREIDING IN HET EFFECT VAN DE MAATREGEL)



Uit de afbeelding blijkt dat als gevolg van vasthouden de maximale afvoeren afhankelijk van de locatie met ca. 5 tot 15% afnemen. Dit betreft de verwachtingswaarde van het effect van de maatregel. Als gevolg van onzekerheden kan het effect van de maatregel variëren van zelfs een geringe toename tot een aanzienlijke afname (meer dan 25%). Ook voor de maatregel afvoeren is de onzekerheidsmarge aanzienlijk.

Wat met name ook van belang is, is of de verwachtingswaarde van het effect van de maatregel verandert door onzekerheden mee te nemen in de analyse. Dit is onderzocht door de verwachtingswaarde van het effect van de maatregel met medeneming van onzekerheden (dit is het resultaat van stap 6) te vergelijken met het effect van de maatregel wanneer onzekerheden niet in beschouwing worden genomen (hiervoor is het deterministisch gekalibreerde model van stap 1 gebruikt). Het blijkt dan dat voor de maatregel vasthouden een verwachtingswaarde van het effect op de afvoer, gemiddeld over alle locaties, wordt berekend van -12% wanneer geen onzekerheden in beschouwing worden genomen, ten opzichte van -8% wanneer met de batea methode wel onzekerheden in beschouwing worden genomen. Voor de maatregel afvoeren zijn deze percentages respectievelijk +8% en +4% (zie ook onderstaande tabel). Hieruit blijkt dat door onzekerheden mee te nemen in de analyse, het effect van maatregelen belangrijk minder gunstig is dan op basis van een deterministische analyse wordt verwacht. Dit is in lijn met de bevindingen voor de noodoverloopgebieden langs de grote rivieren zoals eerder beschreven.

TABEL 1

VERSCHIL IN BEREKENDE EFFECTEN VAN MAATREGELLEN WANNEER WEL REKENING WORDT GEHOUDEN MET ONZEKERHEDEN

Maatregel	Effect op maximale afvoer		Verschil
	Zonder onzekerheden	Met onzekerheden	
Vasthouden	-12%	-8%	33%
Afvoeren	+8%	+4%	50%

6

RELEVANTE CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN VOOR BESTUURDERS EN HYDROLOGEN

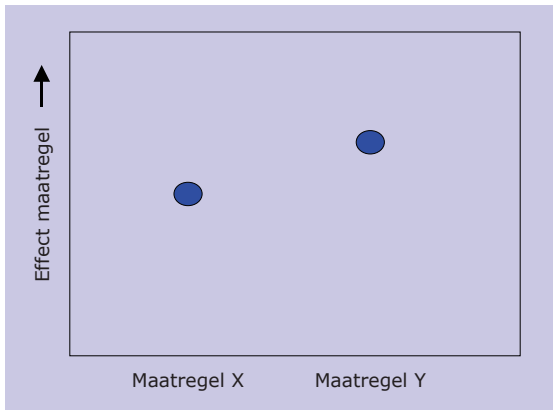
De in het Nederlandse waterbeheer gebruikelijke werkwijze om effecten van maatregelen met hydrologische modellen te bepalen leidt in de onderzochte casus tot een overschatting van de effectiviteit van maatregelen met 33 tot 50%. De oorzaak hiervan is dat in de gebruikelijke werkwijze onzekerheden in modelresultaten niet worden doorvertaald naar de effectiviteit van maatregelen. Mede gezien de uiteenlopende gebiedseigenschappen van de onderzochte casus, mag worden verondersteld dat de hoofdlijn van deze conclusie voor andere gebieden in Nederland ook van toepassing is.

Wat hiervan de gevolgen kunnen zijn wordt geïllustreerd in onderstaande afbeelding. Hierin is weergegeven dat de effectiviteit van een maatregel minder blijkt te zijn als gevolg van onzekerheden. De mate waarin de effectiviteit vermindert is afhankelijk van het type maatregel. Zo is in de illustratieve afbeelding volgens de gebruikelijke werkwijze (zonder onzekerheden) maatregel Y effectiever, terwijl na een probabilistische onzekerheidsanalyse maatregel X effectiever blijkt te zijn. In het voorbeeld is de onzekerheid in de effectiviteit van maatregel Y echter kleiner. Om die reden zou, afhankelijk van de bestuurlijke afweging, maatregel Y nog steeds het meest attractief kunnen zijn, ook omdat in dit voorbeeld de verwachte effectiviteit van maatregelen X en Y dicht bij elkaar liggen.

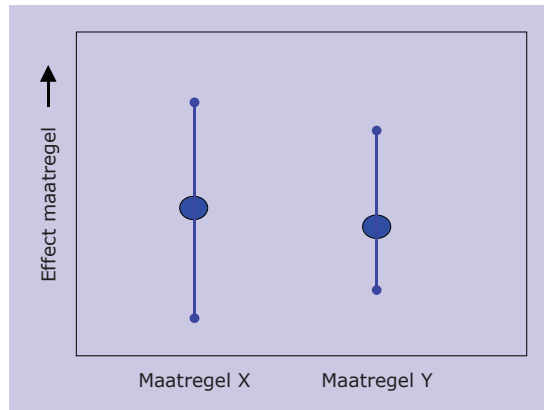
Samengevat is dit de boodschap voor hydrologen en bestuurders in het regionale waterbeheer:

- De effectiviteit van inrichtingsmaatregelen in het regionale waterbeheer kan worden overschat als onzekerheden in hydrologische modelresultaten niet worden meegenomen in de analyse.
- De kwaliteit van de besluitvorming kan verbeteren als de effectiviteit van maatregelen inclusief de onzekerheid dienaangaande wordt bepaald.
- Er is gereedschap ontwikkeld waarmee het voor hydrologen van waterbeheerders mogelijk wordt om onzekerheden in hydrologische modelresultaten door te vertalen naar een betere schatting van de effectiviteit van maatregelen, inclusief de betrouwbaarheidsbanden daar omheen. Dit gereedschap is via de STOWA voor een ieder vrijelijk beschikbaar.

VERWACHTE EFFECTIVITEIT VAN MAATREGELEN OP BASIS VAN DE GEBRUIKELIJKE WERKWIJZE, WAARIN ONZEKERHEDEN NIET WORDEN DOORVERTAALD



VERWACHTE EFFECTIVITEIT VAN MAATREGELEN OP BASIS VAN EEN PROBABILISTISCHE ONZEKERHEIDSANALYSE, INCLUSIEF BETROUWBAARHEIDSBANDEN



7

TECHNISCH-WETENSCHAPPELIJKE CONCLUSIES

- Het toegepaste kalibratiealgoritme (BATEA) is goed in staat diverse onzekerheidsbronnen te minimaliseren, de restonzekerheid in modeluitkomsten te bepalen en daarmee de onzekerheid in effecten van maatregelen te bepalen.
- De geminimaliseerde onzekerheden (bandbreedte als percentage van de verwachtingswaarde) zijn in de onderzochte casus als volgt:
 - Gebiedsneerslag: (-15% ; +15%).
 - Gekalibreerde modelparameters: (-30% ; +50%).
- De restonzekerheden in de modelresultaten (bandbreedte) zijn afgerond en gemiddeld over diverse locaties als volgt:
 - Piekafvoer: (-10% ; 10%)
 - Grondwaterstanden: (-5cm; +15cm).
- Hierbij gelden de volgende opmerkingen:
 - De onzekerheden zijn berekend voor een gebied waarvan de bodemsamenstelling uit overheersend klei bestaat. In meer zandige gebieden zullen de onzekerheidsbanden naar verwachting groter zijn.
 - Niet alle onzekerheden zijn in beschouwing genomen, wanneer dit wel wordt gedaan, of voor bijvoorbeeld de neerslag wordt uitgegaan van alleen de waarnemingen van grondstations, zullen de berekende onzekerheden naar verwachting groter zijn.
- De berekende verwachtingswaarde van effecten van maatregelen zijn aanzienlijk minder ten opzichte van een werkwijze waarin geen rekening wordt gehouden met onzekerheden:

Maatregel	Effect op maximale afvoer		
	Zonder onzekerheden	Met onzekerheden	Vershil
Vasthouden	-12%	-8%	33%
Afvoeren	+8%	+4%	50%

- Het onderzoek toont daarmee aan dat het voor een correcte effectbepaling van maatregelen noodzakelijk is de invloed van onzekerheden in beschouwing te nemen.

8

TECHNISCH-WETENSCHAPPELIJKE AANBEVELINGEN

- Als vereenvoudiging is verondersteld dat de fouten in de gebiedsneerslag en metingen geen autocorrelatie vertonen. Aanbevolen wordt de geldigheid van de deze vereenvoudiging te toetsen.
- In het onderzoek zijn onzekerheden in de neerslag, de metingen en de waarden van de gekalibreerde modelparameters in beschouwing genomen. Aanbevolen wordt te onderzoeken wat de antwoorden op de onderzoeksvragen zijn wanneer ook de andere onzekerheidsbronnen in beschouwing worden genomen. Denk bijvoorbeeld aan de verdamping.
- De vraag die na het uitgevoerde onderzoek resteert is in welke mate bijvoorbeeld de omvang van de Wateropgave en het effect van maatregelen om deze opgave, of het GGOR, te realiseren wordt beïnvloed door alle mogelijke onzekerheden. Deze vraag kan worden beantwoord door alle modeleigenschappen als onzeker te beschouwen en de invloed van deze onzekerheden met de in dit onderzoek ontwikkelde methode te bepalen. Om de rekenintensiteit te beperken is het daarbij raadzaam om eerst op basis van een eenvoudige exercitie de onzekerheidsbronnen te identificeren die het grootste aandeel hebben in de onzekerheid in modeluitkomsten. Voor de Wateropgave kan dit bijvoorbeeld ook het landgebruik of de hoogteligging, of de combinatie daarvan zijn. Vervolgens kan van de belangrijkste onzekerheidsbronnen de invloed op het effect van maatregelen met de ontwikkelde methode worden bepaald.

9

GEBRUIKTE LITERATUUR

- [1] Ad hoc groep Verdamping, Herziening van de berekening van gewasverdamping in het hydrologische model GELGAM. Begeleidingsgroep GELGAM, Provincie Gelderland, Dienst Waterbeheer, Arnhem, 1984.
- [2] Bastiaansen, W.G.M, E.J.M. Noordman en G. Hiemstra (2003). Remote sensing Ondersteund Waterbeheer. Stowa, februari 2003.
- [3] Buishand, T.A. (1977). De variantie van de gebiedsneerslag als functie van puntneerslagen en hun onderlinge samenhang. Uitgeverij Veenman, 1977.
- [4] Buishand, T.A. en C.A. Velds (1980). Klimaat van Nederland 1, Neerslag en Verdamping. KNMI, april 1980.
- [5] Ernst L.F. Drainage of undulating sandy soils with high groundwater tables. Journal of hydrology 39 (3/4): blz. 1-50, 1978.
- [6] Feddes R.A., Crop factors in relation to Makkink reference crop-evapotranspiration. Commissie hydrologisch onderzoek TNO, Den Haag, 1987.
- [7] Heijkers J., I. Holleman en P. Schaper (2006). Neerslagradar verdringt neerslagmeters. H₂O nr. 5 2005.
- [8] Hermans, A.G.M., P.E.V. van Walsum, J. Runhaar en P.J.T. van Bakel, Duurzaam waterbeheer, Fase 1: Modelbouw, kalibratie en bepaling van het Actueel Grond- en Oppervlaktewaterregime. Alterra rapport 914, Wageningen, 2004.
- [9] HKV [LIJN IN WATER](#) en Alterra, Watersysteemanalyse Centrale Vallei, In opdracht van Waterschap Vallei & Eem, Lelystad, 2006.
- [10] HKV [LIJN IN WATER](#), Neerslagonzekerheid, Literatuuronderzoek naar de fout in de neerslag, In opdracht van STOWA, Lelystad, 2007.
- [11] HKV [LIJN IN WATER](#), Neerslagonzekerheid, Beschrijving kalibratie algoritme, In opdracht van STOWA, Lelystad, 2008.
- [12] Holleman I. (2003). Neerslaganalyse uit radar- en stationswaarnemingen. Internal Report, KNMI IR-2003-06, 2003.
- [13] Holleman I. (2004). Weerradar en de neerslag van augustus 2004. Meteorologica, december 2004.
- [14] Holleman I. (2006). Bias adjustment of radar-based 3-hour precipitation accumulations. Technical Report, KNMI TR-290, 2006.
- [15] Holleman I. (2007). Bias adjustment and long-term verification of radar-based precipitation estimates. Meteorological Applications (Royal Meteorological Society), 2007.
- [16] Hooghart J.C., Verdampingscijfers: Van Penman naar Makkink, Waterschapsbelangen, 72e jaargang nr. 8: blz. 232-235.

- [17] Kavetski, D., S. W. Franks and G. Kuczera (2002) Confronting input uncertainty in environmental modelling. in Duan, Q., Gupta, H. V., Sorooshian, S., Rousseau, A. N. and R. Turcotte (editors), Calibration of Watershed Models, AGU Water Science and Applications, Series Volume 6, pp. 49-68.
- [18] Klein-Tank, A (2000). Intranet presentation of precipitation data from stations and radar. Memorandum. WM 00-06, KNMI, 2000.
- [19] KNMI (2001). Handboek Waarnemingen; 6. Neerslag; versie maart 2001.
- [20] 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.
- [21] 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
- [22] Minnema B., Modelleeromgeving Veluwe. TNO-NITG, Rapport 02-073-B, Utrecht, 2002.
- [23] Nationaal Bestuursakkoord Water, Overeen gekomen door het Rijk, de provincies, het Samenwerkingsverband Interprovinciaal Overleg (IPO), de Vereniging van Nederlandse Gemeenten en de Unie van Waterschappen, 2008.
- [24] Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling en B.P. Fannery (1992), Numerical recipes in Fortran 77, 2nd ed., University Press, Cambridge.
- [25] Schuurmans J.M. and M.F.P. Bierkens (2007). Belang van betere neerslaginformatie voor hydrologen. H2O nr 12, 2007.
- [26] Schuurmans J.M. and 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.
- [27] Smits I., J. Wijngaard J., M. Kok en R. Versteeg (2004). Statistiek van extreme neerslag in Nederland. STOWA-rapport nr. 26, 2004.
- [28] 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.
- [29] Tsintikidis D. et al (2002). Precipitation uncertainty and raingauge network design within Folsom Lake watershed. Journal of hydrologic engineering, maart/april 2002.
- [30] 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.
- [31] Walsum P.E.V. van, Veldhuizen A.A., Bakel P.J.T. van, Bolt F.J.E. van der, Dik P.E., Groenendijk P., Querner E.P., Smit M.F.R., simgro; Theory and model implementation. Alterra rapport 913, Wageningen, 2004.
- [32] Wendt T., Cwater Rijk Utrecht, Effecten van toekomstscenario's op het grondwater in Utrecht, Grontmij, Houten, 1998.
- [33] Wesseling J.G., CAPSEV; steady state moisture flow theory; program description; user manual. Staring Centre, Wageningen, 1991.
- [34] Wösten J.H.M., Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: De Staringreeks, Alterra, Wageningen, 2001.

- [35] Commissie Noodoverloopgebieden. Gecontroleerd overstroom. Advies van de Commissie Noodoverloopgebieden. 28 mei 2002.
- [36] Stijnen, J.W., M. Kok en M.T. Duits. Onzekerheidsanalyse Hoogwaterbescherming Rijntakken. Onzekerheidsbronnen en gevolgen van maatregelen. HKV lijn in water in opdracht van Rijkswaterstaat RIZA. 2002.