

# Bayesiaanse identificatie van gebiedsneerslag en modelparameters

- **Ton Botterhuis** HKVLijn in water (ton.botterhuis@hkv.nl)
- **Ge van den Eertweg** waterschap Rivierenland (G.vanden.Eertwegh@wsrl.nl)
- **Joost Heijkers** Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (heijkers.wjm@hdsr.nl)

---

De Nederlandse waterbeheerders gebruiken steeds meer modelberekeningen voor de onderbouwing van beleid en planvorming. Het is daarbij van groot belang dat de mate van detail en nauwkeurigheid aansluit bij de vraagstelling. De uitkomsten van modellen zijn onderhevig aan diverse bronnen van onzekerheid. Drie van de belangrijkste, neerslag onzekerheid, meet onzekerheid en parameter onzekerheid zullen in dit artikel worden behandeld. De centrale vraag luidt: Hoe planten de genoemde bronnen van onzekerheid zich voort tijdens een kalibratie en hoe vertaalt de a posteriori onzekerheid zich door in modeluitkomsten? Dit is een relevant vraagstuk onder andere in het licht van de uitwerking van maatregelenpakketten, omdat het wellicht beperkingen oplegt aan de mate waarin maatregelen daadwerkelijk effectief zijn. Belangrijk om te weten is dat ons onderzoek is uitgevoerd in een zogenaamd numeriek laboratorium. Dat wil zeggen dat we meetreeksen hebben gesimuleerd met een bestaand model (een SIMGRO4 model van het Langbroekerwetering-gebied (Hermans et. al., 2004)). Vervolgens is het model verstoord qua parameterwaarden en hebben we middels Bayesiaanse kalibratie met het BATEA algoritme (Kavetski et. al., 2002) getracht om de uitgangssituatie zo goed mogelijk te reconstrueren. De resterende onzekerheid in de waarde van de gebiedsneerslag, parameters en modeluitkomsten is doorvertaald in een onzekerheid omtrent het effect van de maatregelen vasthouden en afvoeren.

---

## **Doelstelling**

Het doel van het onderzoek is het beantwoorden van de volgende onderzoeksvragen:

- In welke mate is de onzekerheid in neerslaggegevens van invloed op de waarde van de a posteriori modelparameters?

- In welke mate leidt een onnauwkeurigheid in (gekalibreerde) modelparameters (als gevolg van de onzekerheid in neerslaggegevens) door in modeluitkomsten voor de huidige situatie?
- In welke mate leidt een onnauwkeurigheid in (gekalibreerde) modelparameters, als gevolg van de onzekerheid in neerslaggegevens, door in modeluitkomsten voor toekomstige situaties (scenario's).

## Kalibratie methode

De essentie van het onderzoek bestaat uit een analyse van de onzekerheden in de beschikbare kalibratiegegevens en de invloed van deze onzekerheden op het resultaat van modelsimulaties. Dit kan als volgt worden uitgelegd. De relatie tussen neerslag (P) en waterstand (h) bestaat bijvoorbeeld uit de volgende vergelijking:

$$h(t+1) = h(t) + a1 \cdot P(t) + a2$$

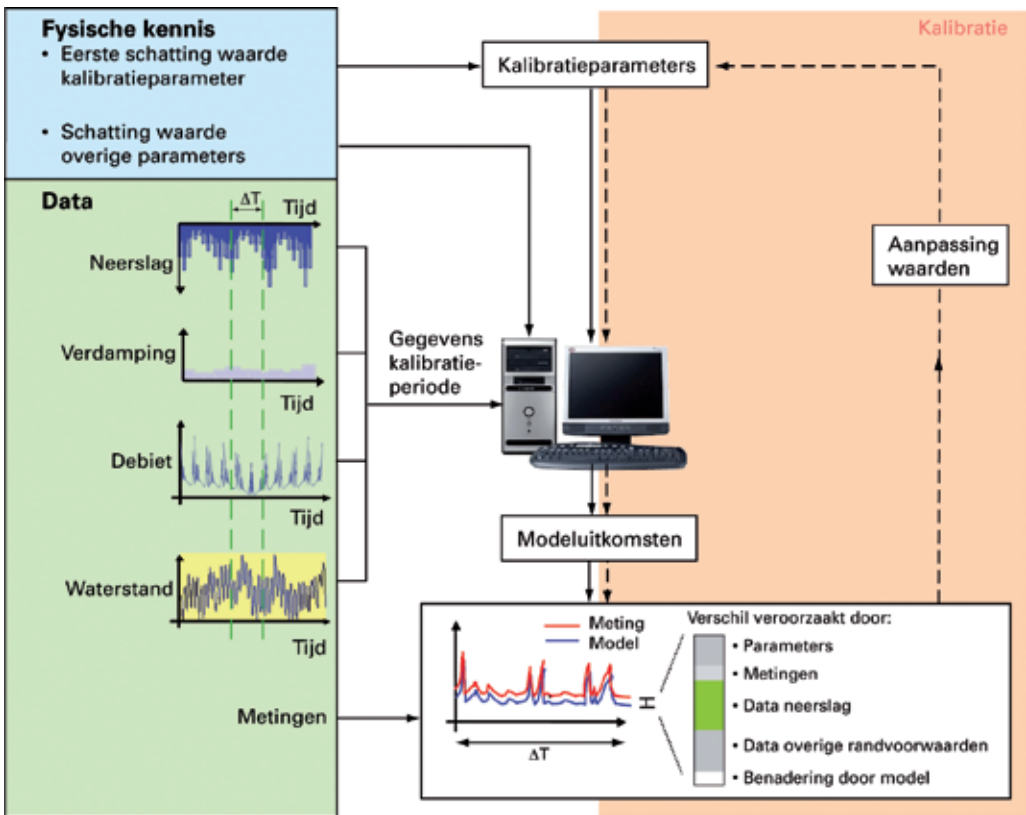
Stel dat zowel de waterstand als de neerslag op meerdere tijdstippen is gemeten, beide metingen geen onnauwkeurigheden bevatten en de hierboven opgeschreven modelvergelijking exact overeenkomt met de werkelijke relatie tussen neerslag en waterstand. Een dergelijk model berekent in dat geval 100% nauwkeurig de waterstand  $h(t+1)$ . In een dergelijk, hypothetisch model volgen uit een analyse van meetwaarden de exacte waarden van parameters  $a1$  en  $a2$ .

Indien het model door vereenvoudigingen niet exact overeenkomt met de werkelijke relatie, wordt het lastiger om de waarden van de parameters te bepalen. Correct waargenomen neerslag en waterstanden leveren in combinatie met het model immers nooit de juiste waterstand op, omdat de vereenvoudigingen een afwijking in de uitkomst veroorzaken. Tijdens het kalibreren worden de waarden van  $a1$  en  $a2$  zodanig gekozen dat de fout in de berekende waterstand zo gering mogelijk is.

Onnauwkeurigheden in de neerslagmetingen beïnvloeden op een zelfde wijze de waarde van de parameters. De opgelegde neerslag past door meetfouten niet meer exact bij de waargenomen waterstand. De waarden van de parameters worden nu aangepast om deze afwijking te compenseren. Als ook de metingen van de waterstanden fouten bevatten, wordt ook hiervoor gecompenseerd.

De huidige praktijk maakt geen onderscheid tussen de diverse oorzaken van het verschil tussen gesimuleerde en gemeten waarden, anders dan dat de expert (subjectief) een inschatting maakt of er onlogische metingen voor de neerslag, de waterstanden of de afvoeren worden gebruikt, of dat er onlogische parameterwaarden tijdens het kalibreren worden gevonden. Beperkte afwijkingen in de (kalibratie-)data zullen in de huidige praktijk het resultaat van modelberekeningen beïnvloeden. Idealiter zou je bij het kalibreren een duidelijk onderscheid willen maken tussen de afwijking die wordt veroorzaakt door het model, de neerslag of de overige metingen (figuur 1). Het is dan legitiem om de modelvereenvoudigingen door de parameters te laten corrigeren, immers het model en de aangepaste parameters geven dan de best mogelijke inschatting van de werkelijke neerslag-afvoerrelatie. Onnauwkeurigheid in de metingen of de neerslag behorende bij de kalibratieperiode zouden de parameterwaarden niet mogen beïnvloeden.

In onze beantwoording van de onderzoeksvragen is het Bayesian Total Error Analysis algoritme van Kavetski e.a. (2002) gebruikt. Dit algoritme veronderstelt, voorafgaand aan de kalibratie, dat er diverse combinaties van neerslag, parameters en metingen mogelijk zijn. Tijdens het kalibreren selecteert het algoritme de meest waarschijnlijke combinaties. De methode is bij uitstek geschikt om a priori onzekerheden mee te nemen in een onzekerheidsanalyse, ook als deze onzekerheden via bijvoorbeeld een subjectieve analyse zijn bepaald. In dit artikel wordt niet verder ingegaan op de theorie van het algoritme, hiervoor wordt verwezen naar het artikel van Kavetski e.a. (2002).



■ Figuur 1: Kalibratie waarbij de oorzaak van het verschil tussen meting en model is uitgesplitst in onzekerheid ten gevolge van het modelconcept, de waarde van parameters, metingen, neerslag en overige randvoorwaarden.

## Kalibratie probleem

Tijdens het Bayesiaans kalibreren wordt de vooraf gemaakte inschatting van mogelijke combinaties van neerslag en parameters verkleind door gebruik te maken van grondwaterstand- en afvoermetingen. In deze paragraaf beschrijven we de door ons gebruikte a priori inschatting van onzekerheid in de parameters, de gebiedsneerslag en de grondwaterstand- en afvoermetingen.

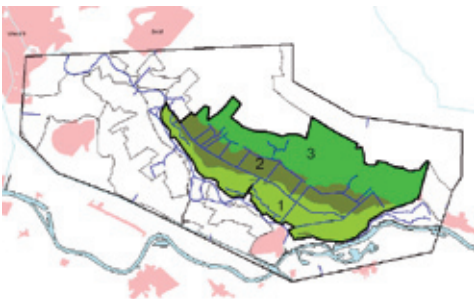
## Uitwerking kalibratieparameters

Bij het kalibreren worden de c-waarde van laag1, de infiltratie-capaciteit aan het maaiveld en de drainage- en infiltratieweerstand van greppels en buisdrainage aangepast. Dit wil zeggen dat de overige parameterwaarden worden bekend en zeker verondersteld. Bij de bouw van het model (Hermans e.a., 2004) zijn de waarden van deze parameters gekalibreerd of gekozen op basis van literatuur. In onze analyse zijn a priori de kalibratie-parameters uniform verdeeld verondersteld binnen 50% en 150% van de huidige waarde. Door grenzen te stellen aan de waarden overeenkomstig met de fysieke kenmerken van het stroomgebied, kan eenvoudig worden voorkomen dat het model oneigenlijk (namelijk met fysisch niet reële waarden) wordt gekalibreerd.

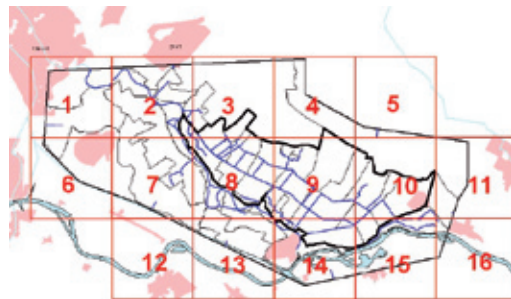
**Tabel 1** geeft een overzicht van de kalibratieparameters die worden toegepast. Verondersteld is dat de kalibratieparameters per bodemsoort dezelfde verandering hebben ten opzichte van het uitgangsmodel. Hierbij zijn de volgende bodemsoorten onderscheiden: klei (PAWN-eenheden 15-18), klei op veen (PAWN-eenheid 19) en zand (PAWN-eenheden 7-14). In **figuur 2a** is deze zonering van het studiegebied weergegeven.

■ Tabel 1: Kalibratie parameters

Modeleigenschap	Bodemsoort		
	Zone1	Zone2	Zone3
c-waarde van laag 1	P01	P02	P03
infiltratiecapaciteit aan het maaiveld	P04	P05	P06
drainage- en infiltratieweerstand van greppels en buisdrainage	P07	P08	P09



(a) kalibratieparameter zones



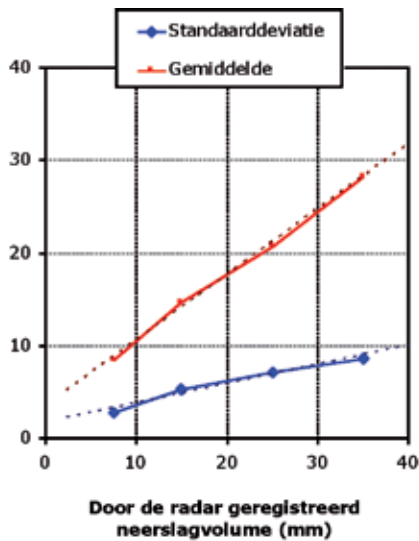
(b) neerslag zones

■ Figuur 2: Indeling van het gebied Langbroekerwetering in (a) kalibratieparameter en (b) neerslag zones.

## Uitwerking gebiedsneerslag

Om een logische fout in de gebiedsneerslag te schatten, is gebruik gemaakt van recente radarresultaten van Holleman (2006). In HKV (2007) zijn deze data omgewerkt tot een kans op een neerslagklasse zoals gemeten op een grondstation, gegeven een in de radar geregistreerde klasse. Een normale kansverdeling blijkt voor alle klassen goed te voldoen.

De relaties tussen het door de radar geregistreerde neerslagvolume enerzijds en het gemiddelde en de standaard-deviatie van de normale verdelingen anderzijds zijn weergegeven in figuur 3. Een trekking uit de a priori verdeling van de neerslag wordt verkregen door een trekking uit de verdeling van de fout in de neerslag op te tellen bij het radarbeeld. Opgemerkt wordt dat de hier gebruikte verdelingen het verschil tussen radar- en grondmetingen beschrijven en niet de werkelijke fout en dat de betrouwbaarheid van de relatie voor de uiterste klassen door gebrek aan data beperkt is. Aanvullend onderzoek zal gedaan moeten worden om een betere beschrijving van de a priori neerslag onzekerheid.



■ Figuur 3: Standaarddeviatie en gemiddelde van de neerslag als functie van de geregistreerde neerslag (de gestippelde lijn is de geschatte lineaire relatie)

In onze studie zijn de radarbeelden opgeschaald naar een resolutie van 5x5 km (figuur 2b). Voor elke cel in dit rooster is per tijdstip een neerslaghoeveelheid berekend. De analyse in HKV (2007) geeft geen inzicht in de ruimtelijke correlatie van de fout in de neerslag, daarom zijn twee a priori neerslag onzekerheden uitgewerkt:

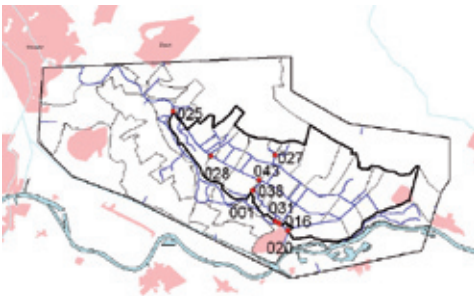
1. In de eerste set a priori onzekerheden is de fout in de neerslag ruimtelijk ongecorrleerd verondersteld. Hierbij wordt voor elke cel per tijdstip een fout in de neerslag bepaald door een trekking uit de verdelingen. Zodoende krijgt elke cel een eigen afwijking (onzekerheid).
2. In de tweede set a priori onzekerheden is een ruimtelijk gecorrleerde onnauwkeurigheid in de neerslag gebruikt. Hiervoor wordt per tijdstip voor het gehele modelgebied één fout bepaald door een trekking uit de verdelingen. Vervolgens wordt deze fout bij elke cel opgeteld.

Door zowel de neerslagonzekerheid gebaseerd op een ruimtelijk ongecorrleerde en een ruimtelijk gecorrleerde fout door te rekenen, wordt de invloed van neerslagonzekerheid op modeluitkomsten duidelijker. Het onderzoeksresultaat bestaat dan uit de gevoeligheid van de spreiding in de modeluitkomsten voor verschillende maten van neerslagonzekerheid. Namelijk de onzekerheid gebaseerd op ruimtelijke gecorrleerde en op ongecorrleerde fouten (welke groter is).

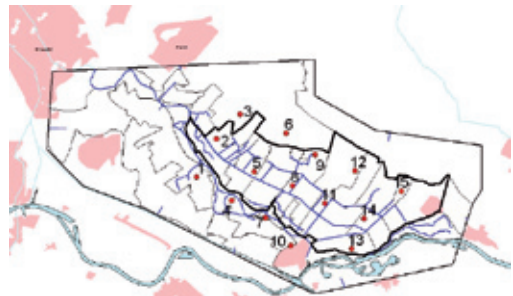
## Uitwerking beschikbare meetgegevens

Zoals in de inleiding is aangegeven is dit onderzoek uitgevoerd in een zogenaamd numeriek laboratorium. Dat wil zeggen dat we met het bestaande model meetreeksen hebben gesimuleerd. Uit de a priori waarschijnlijkheid van de neerslag is per tijdstip en locatie een neerslagwaarde getrokken (zie voorgaande paragraaf). Vervolgens is met deze gebiedsneerslag het model doorgerekend. Daarna zijn de modeluitkomsten enigszins verstoord door er ruis aan toe te voegen. Om de datadichtheid realistisch te houden, is de Bayesiaanse analyse uitgevoerd met dagafvoeren op negen locaties van stuwen (figuur 4a) en tweewekelijks waargenomen grondwaterstanden op 15 locaties (figuur 4b).

Uit de studie van Hermans e.a. (2004) bleek dat het model de afvoer simuleert met een gemiddelde afwijking van 0,15 m<sup>3</sup>/s en een standaard van ongeveer 1 m<sup>3</sup>/s. De ruis op de synthetische afvoerreeks is daarom getrokken uit een lognormale verdeling met deze parameters. Het model berekent de grondwaterstand met een gemiddelde afwijking van 5 cm en een standaard deviatie ongeveer 22 cm. De toegevoegde ruis is getrokken uit een normale verdeling met deze eigenschappen.



(a) locaties afvoermetingen



(b) locaties grondwaterstandmetingen

■ Figuur 4: Locaties van afvoer- en grondwaterstandmetingen in het gebied Langbroekerwetering.

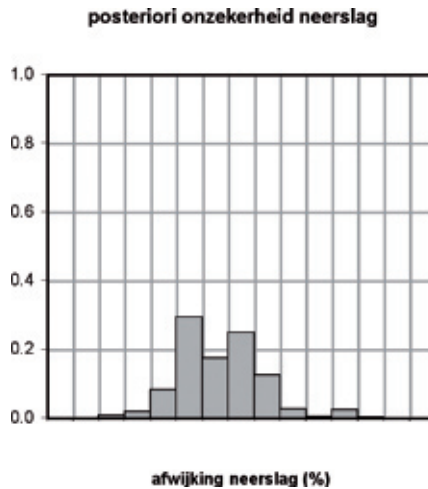
## Kalibratie resultaat

Het resultaat van de kalibratie is een verzameling ongeveer 10.000 combinaties van neerslag- en parameterwaarden. Het aantal maal dat een combinatie voorkomt in de verzameling bepaalt de waarschijnlijkheid van deze combinatie. Per combinatie is de neerslaghoeveelheid, de parameterwaarde en het verschil tussen meting en simulatie bekend. Door de resultaten te turven kunnen histogrammen worden opgesteld van de neerslag, de parameters en de model- en

meetfout. In deze paragraaf zijn de histogrammen van de resterende spreiding in de parameters, de neerslag, de grondwaterstanden en de afvoeren opgenomen.

## Resterende onzekerheid neerslag

Zoals beschreven in de voorgaande paragraaf is de fout in de neerslagwaarneming omgewerkt tot een kansverdeling op een klasse. In figuur 5 worden de resultaten getoond van de kalibratie waarbij de fout in de neerslag ruimtelijk gecorreleerd is verondersteld. Uit de figuur blijkt dat de resterende spreiding in de neerslag na het kalibreren varieert tussen +/- 15% van de gemeten waarde (met de meest waarschijnlijke waarde rond 0%). Dit is in beperkte mate geringer dan het resultaat van de kalibratie waarbij de fout in de neerslag ruimtelijk ongecorrleerd werd verondersteld.



■ Figuur 5: Kalibratie resultaat van de neerslag (bij ruimtelijk gecorreleerde neerslagfout).

Ondanks de sterke afname ten opzichte van de a priori onzekerheid, is het niet mogelijk om de resterende onzekerheid verder te reduceren. Opgemerkt wordt dat het verschil tussen a priori en a posteriori onzekerheid bij een ruimtelijk ongecorrleerde fout in de neerslagmeting al aanzienlijk was. Van -100% tot +150% a priori onzekerheid in de waarde naar +/-20% a posteriori onzekerheid. Door de fout ruimtelijk gecorreleerd te veronderstellen, kan de a posteriori onzekerheid verder afnemen van -40% tot +70% naar +/- 15%. Uit dit resultaat blijkt dat de set gemeten afvoeren en grondwaterstanden in combinatie met het model, er voor zorgt dat min of meer de juiste neerslag is gevonden. Foutieve neerslagwaarden worden als het ware uit de a priori set van mogelijke waarden gefilterd. Een sterke afname in de neerslagonzekerheid zorgt ervoor dat het kalibratieprobleem in geringe mate beter identificeerbaar is. Hoogst waarschijnlijk zorgt de ruis die op de metingen is gezet, voor de resterende onzekerheid over de werkelijke neerslag. De hierdoor veroorzaakte mismatch tussen modelvergelijking, neerslagwaarden en meetwaarden zorgt er voor dat de werkelijke neerslagwaarde niet nauwkeuriger kan worden geïdentificeerd.



## Resterende onzekerheid kalibratieparameters

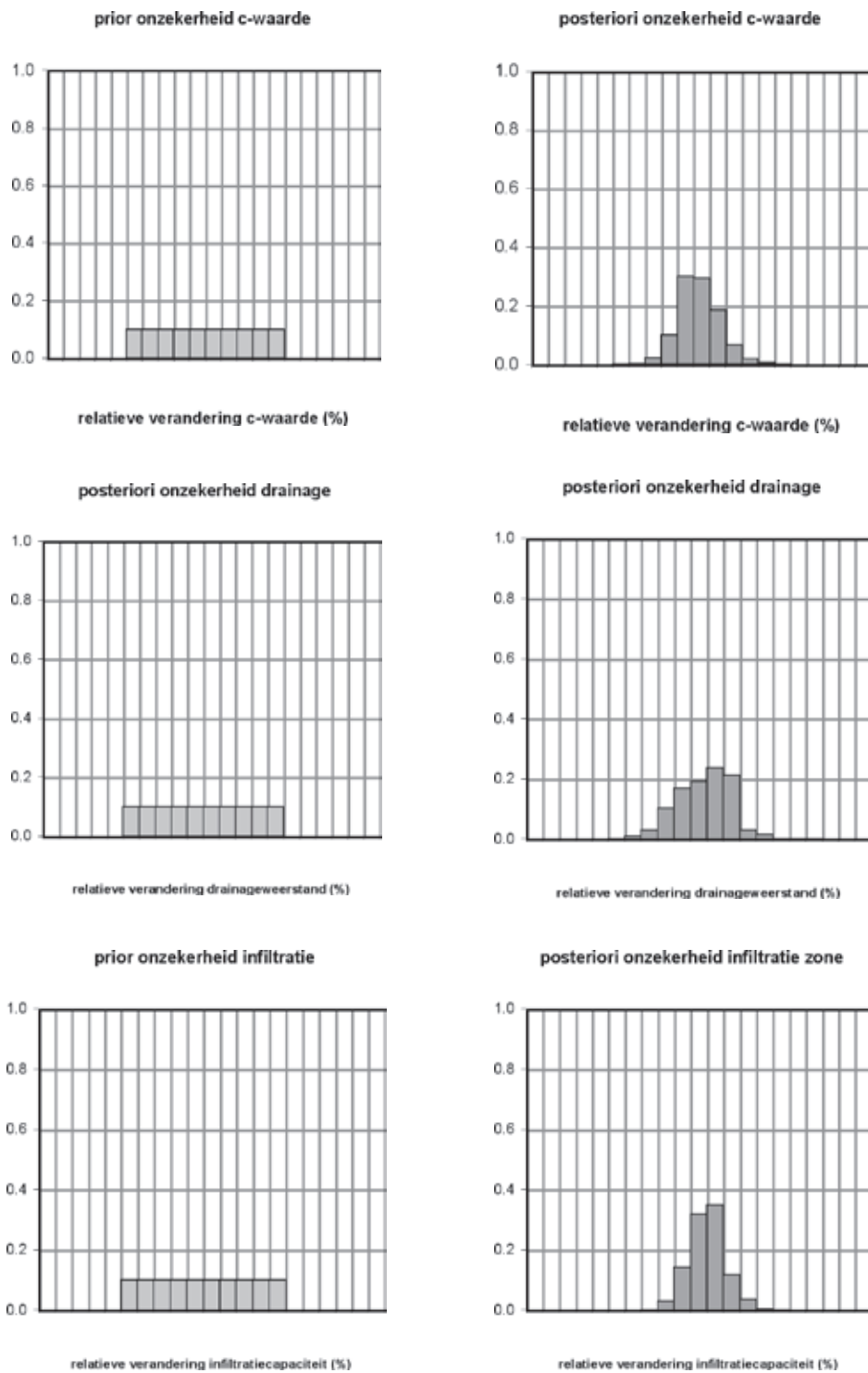
De mate waarin de onzekerheid in neerslaggegevens van invloed is op de waarde van de modelparameters kan, zoals eerder gesteld, worden bepaald door voor elke parameter een histogram te maken van de waarden in de verzameling die gevonden is na de Bayesiaanse analyse. In **figuur 6** zijn de gemiddelden van de parameters voor en na de kalibratie met een ruimtelijk gecorreleerde neerslagfout weergegeven.

Uit de figuur is op te maken dat de onzekerheid duidelijk afneemt. Voorafgaand aan de kalibratie is verondersteld dat een waarde 50 procent kleiner dan de uitgangswaarde net zo waarschijnlijk is als een waarde 150 procent groter. Na kalibratie blijkt een duidelijke voorkeur voor een waarde binnen deze bandbreedte voor zowel de *c*-waarde, de drainageweerstand als de infiltratiecapaciteit. Ten opzichte van de kalibratie met een ruimtelijk ongecorrleerde fout in de neerslag, is het algoritme nu in staat om een duidelijkere voorkeur uit te spreken voor een waarde binnen deze bandbreedte. Door een geringere spreiding in neerslagwaarden, kunnen we beter de werkelijke waarde van de parameters vinden. Ook hier kan geconcludeerd worden dat de resterende onzekerheid over de werkelijke waarde van de parameters hoogst waarschijnlijk veroorzaakt wordt door de ruis die op de metingen is gezet. De hierdoor veroorzaakte mismatch tussen modelvergelijking, neerslagmetingen en overige metingen zorgt er voor dat de werkelijke parameterwaarde niet nauwkeuriger kan worden geïdentificeerd.

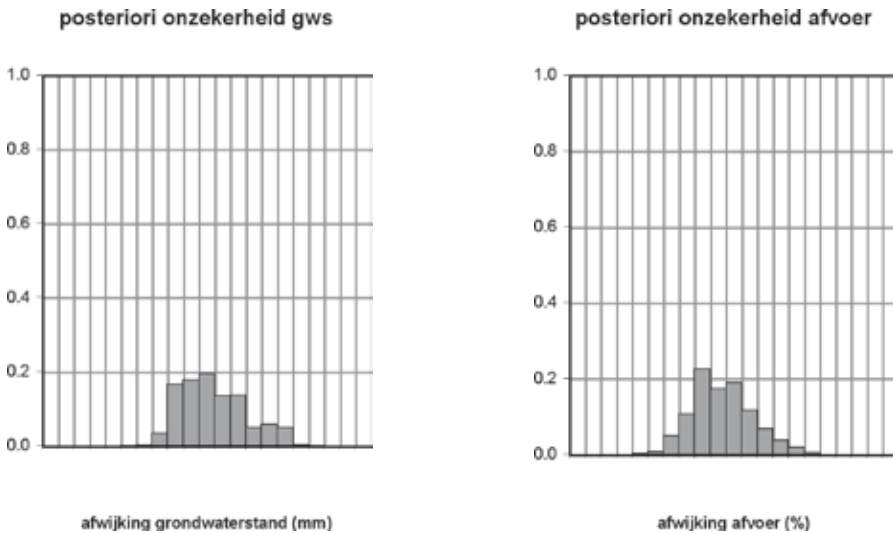
## Resterende onzekerheid modeluitkomsten

In **figuur 7** is het gemiddelde van de resulterende grondwaterstanden en afvoeren van de kalibratie met een ruimtelijk gecorreleerde neerslagfout weergegeven. Uit figuur blijkt dat de resterende spreiding in de grondwaterstand groot is, maar dat het algoritme een eenduidig histogram op levert. Na het kalibreren blijkt dat de waarde van de grondwaterstand varieert tussen  $-7$  cm en  $+13$  cm ten opzichte van de gemeten waarde. Dit is geringer dan de spreiding die gevonden wordt na kalibratie met ruimtelijk ongecorrleerde onzekerheid in de neerslag. Daarnaast is het histogram ook gepieker.

Uit de figuur blijkt verder dat na het kalibreren de waarde van de afvoer varieert tussen  $\pm 10\%$  van de gemeten waarde. Ook voor de afvoer geldt dat door een geringere spreiding van de a priori neerslagonzekerheid, het algoritme beter in staat is om de juiste meetwaarden te voorspellen. Omdat de fit tussen model en meting overeenkomt, er is slechts sprake van een geringe verbetering, met de resultaten van de kalibratie met ruimtelijk ongecorrleerde onzekerheid in de neerslag, kan worden geconcludeerd dat op basis van de beschikbare data we niet in staat zijn om de modeluitkomsten en de parameterwaarden nauwkeuriger te voorspellen.



■ Figuur 6: Kalibratie resultaat (gemiddelde) van de c-waarde, de drainageweerstand en de infiltratiecapaciteit (bij ruimtelijk gecorreleerde neerslagfout).

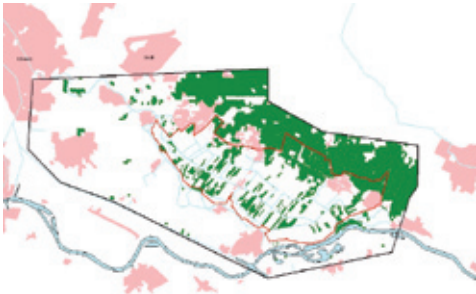


■ Figuur 7: Kalibratie resultaat (gemiddelde) van de grondwaterstanden en afvoeren (bij ruimtelijk gecorreleerde neerslagfout).

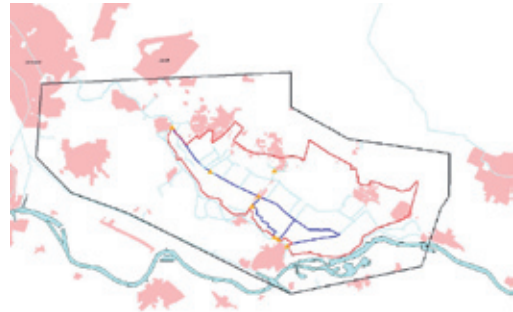
## Berekening effect maatregelen

In het Nationaal Bestuursakkoord Water hebben de waterschappen zich verplicht om hun gebied te toetsen aan zogenaamde werknormen. Daar waar de normen worden overschreden moeten maatregelen worden genomen. Om de invloed van neerslagonzekerheid op het effect van maatregelen inzichtelijk te maken hebben we twee scenario's onderzocht:

- In het scenario Vasthouden worden alle natuurgebieden binnen het studie gebied waterhuishoudkundig geïsoleerd. In figuur 8 zijn de locaties van natuur in het studie gebied (rode polygoon) met groene vlakken weergegeven. Op basis van deze figuur zijn de peilgebieden vastgesteld waar binnen de natuurgebieden zijn opgenomen. Deze peilgebieden zijn voorzien van een afwateringstuw en een inlaat. Door het toekennen van een hoger peil aan de stuw, zal water in het gecreëerde peilvak worden vastgehouden.
- In het scenario Afvoeren worden de primaire afwateringsweteringen binnen het studiegebied verbreed. In figuur 9 zijn enkele van de primaire afwateringsweteringen in het studie gebied (rode polygoon) met donkerblauwe lijn weergegeven. Het talud (flauwer) en de bodembreedte van deze afwateringsweteringen zijn aangepast. Overeenkomstig met de aanpassing van de watergangen zijn ook de stuwen in deze afwateringsweteringen verbreed. Hierdoor wordt het overtollige water in situaties met waterbezwaar sneller afgevoerd.



■ **Figuur 8:** Locatie natuurgebieden (groene vlak) binnen het modelgebied.



■ **Figuur 9:** Locatie primaire afwateringsweteringen (donkerblauwe lijnen) en stuwen (oranje driehoeken) binnen het modelgebied.

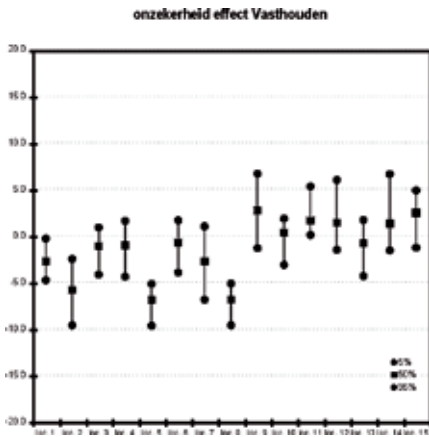
De mate waarin de onzekerheid in neerslaggegevens van invloed is op modeluitkomsten voor een toekomstige situatie kan worden bepaald door deze situatie met elke combinatie van neerslaghoeveelheid en parameterwaarden uit de geselecteerde verzameling door te rekenen. Door van elke gewenste variabele een histogram van de uitkomsten van deze berekeningen te maken, kan de spreiding in de waarde van de variabele als gevolg van a posteriori neerslag- en parameteronzekerheid worden weergegeven. De resterende spreiding is gebaseerd op de resultaten van de kalibratie waarbij de onzekerheid in de neerslag ruimtelijk gecorreleerd is verondersteld.

## Effect van scenario Vasthouden

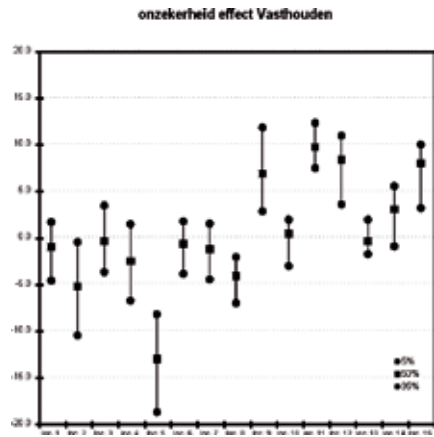
In **figuur 10** is het effect van het scenario Vasthouden weergegeven. In de figuur is het effect van de maatregel op de gemiddelde grondwaterstand en afvoer te zien, daarnaast wordt het effect op de maximale grondwaterstand en afvoer gepresenteerd. Te zien is dat de onzekerheid omtrent het effect van de maatregel groter is bij de maximale dan bij de gemiddelde waarden.

Afhankelijk van de locatie varieert de onzekerheid over het effect van de maatregel bij de gemiddelde grondwaterstand van 5 tot 15 mm. Deze bandbreedte is gelijk aan of twee keer groter dan het gemiddelde effect van de maatregel. Met andere woorden het is mogelijk dat de maatregel effect heeft, echter dit effect kan zeer gering zijn (ondergrens) of een verandering van 10 tot 20 mm van de gemiddelde grondwaterstand. Bij de maximale waterstanden is een bandbreedte 10 tot 20 mm berekend. De maximale grondwaterstanden veranderen gemiddeld 5 tot 10 mm. Dus, ook bij de maximale grondwaterstanden is de bandbreedte van de onzekerheid gelijk aan of groter dan het effect van de maatregel.

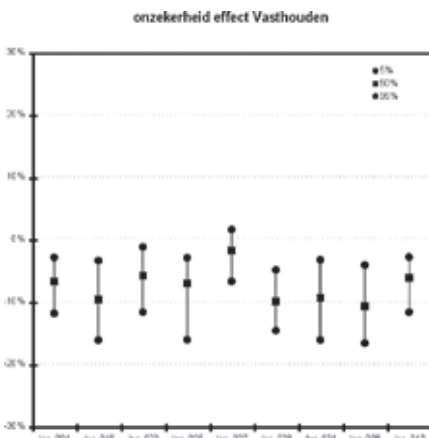
De gemiddelde afvoer neemt met 5 tot 10 procent af. De bandbreedte van deze afname is gelijk aan 2 tot 15 procent, waardoor het effect van de maatregel gelijk is aan een zeer geringe wijziging (-2%) of een aanzienlijke wijziging (-15%) van de gemiddelde afvoer. De maximale afvoeren nemen met 5 tot 15 procent af. Als gevolg van de onzekerheid kan het effect van de maatregel op de maximale afvoeren variëren van een geringe afname of een aanzienlijke afname (meer dan 25%).



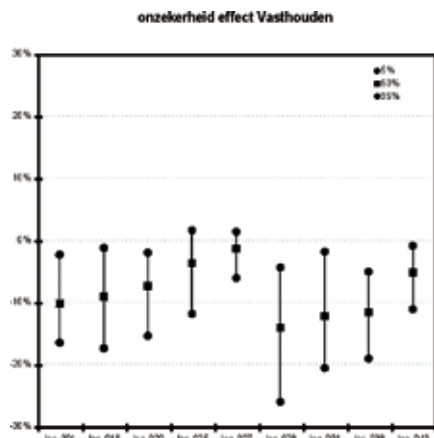
(a) gemiddelde grondwaterstand



(b) maximale grondwaterstand



(c) gemiddelde afvoer



(d) maximale afvoer

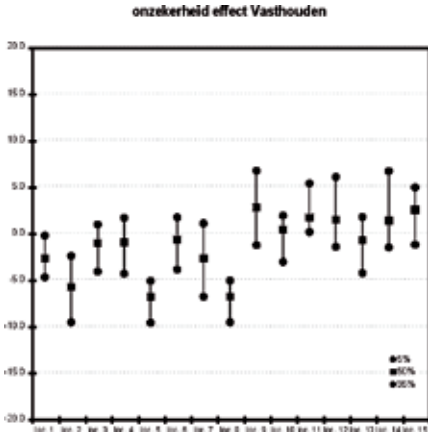
■ Figuur 10: Effect scenario Vasthouden op de gemiddelde en maximale grondwaterstanden en afvoeren bij ruimtelijk gecorreleerde neerslagfout.

### Effect van scenario Afvoeren

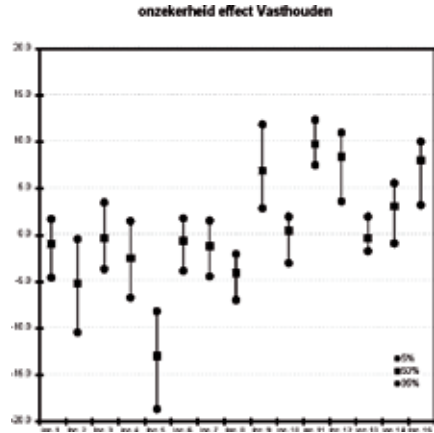
In **figuur 11** is het effect van het scenario Afvoeren weergegeven. Vergelijkbaar met het effect van het scenario Vasthouden is te zien dat de onzekerheid omtrent het effect van de maatregel groter is bij de maximale dan bij de gemiddelde waarden. Afhankelijk van de locatie varieert de onzekerheid over het effect van de maatregel bij de gemiddelde grondwaterstand van 5 tot 15 mm. Ook bij deze maatregel is de bandbreedte van het effect gelijk aan of twee keer het gemiddelde effect van de maatregel. Met andere woorden het is mogelijk dat de maatregel effect heeft, echter dit effect kan zeer gering zijn (ondergrens) of een verandering van 10 mm in de gemiddelde situatie. Bij de maximale grondwaterstanden is deze bandbreedte 10 tot 20 mm. De maximale

grondwaterstanden veranderen gemiddeld 5 tot 10 mm. Ook bij de maximale grondwaterstanden is de bandbreedte van de onzekerheid vergelijkbaar met het effect van de maatregel.

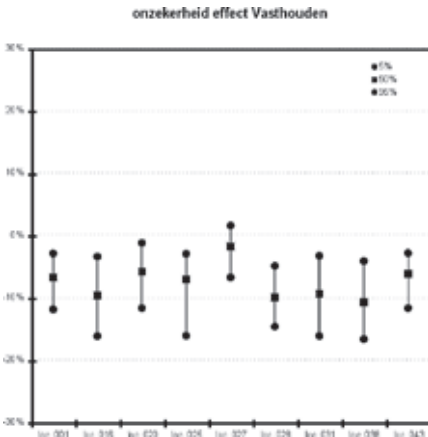
De gemiddelde afvoer neemt nauwelijks toe. De bandbreedte van deze toename is gelijk aan minus 2 tot 8 procent, waardoor het effect van de maatregel gelijk is aan een zeer geringe wijziging (-2%) of een aanzienlijke wijziging (8%) van de gemiddelde afvoer. De maximale afvoeren nemen met 2 tot 10 procent toe. Als gevolg van de onzekerheid kan het effect van de maatregel op de maximale afvoeren variëren van een weer geringe afname tot een aanzienlijke toename (meer dan 20%).



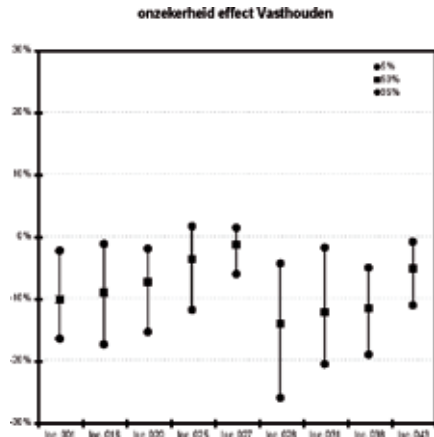
(a) gemiddelde grondwaterstand



(b) maximale grondwaterstand



(c) gemiddelde afvoer



(d) maximale afvoer

■ Figuur 11: Effect scenario Afvoeren op de gemiddelde en maximale grondwaterstanden en afvoeren bij ruimtelijk gecorreleerde neerslagfout.

## Conclusies

De onzekerheid in de neerslag beïnvloedt de waarde van de kalibratieparameters en daarmee het gedrag van het simulatiemodel.

- Na het kalibreren blijkt dat de waarde van de neerslag varieert tussen +/-15-20% van de gemeten waarde (met de meest waarschijnlijke waarde rond -3/5%). Dit is een duidelijke afname van de a priori onzekerheid. De set gemeten afvoeren en grondwaterstanden in combinatie met het model, zorgt er voor dat de juiste neerslag wordt gevonden.
- Na het kalibreren blijkt dat de waarde van de neerslag varieert tussen een waarde 15 tot 20% kleiner en groter dan van de gemeten waarde, met de meest waarschijnlijke waarde rond 3 tot 5% kleiner dan de gemeten waarde. Dit is een duidelijke afname van de a priori onzekerheid met een factor 10. De set gemeten afvoeren en grondwaterstanden in combinatie met het model, zorgt er voor dat min of meer de juiste neerslag wordt gevonden.
- De onzekerheid omtrent de waarde van de parameters neemt duidelijk af door de kalibratie. Voorafgaand aan de kalibratie is geen duidelijke voorkeur gegeven voor de waarde van een parameter. Na kalibratie blijkt een duidelijke voorkeur voor een waarde binnen een bandbreedte van 50-150% van de uitgangswaarde voor zowel de c-waarde, de drainageweerstand als de infiltratiecapaciteit.
- Afname van a priori onzekerheid in de neerslag, leidt tot een duidelijkere voorkeur van het algoritme voor een waarde binnen de opgegeven bandbreedte. Door een geringere onzekerheid in neerslagwaarden, kunnen we beter de werkelijke waarde van de parameters te vinden.
- De resterende onzekerheid in de berekende modeluitkomsten is groot, maar het algoritme is in staat om een voorkeur aan te geven voor waarden rond de gemeten grondwaterstand. Na het kalibreren blijkt dat de waarde van de grondwaterstand varieert tussen -9 cm en + 15 cm ten opzichte van de gemeten waarde. De resterende onzekerheid in de berekende de afvoer varieert tussen +10 en -10 procent van de gemeten waarde (met de meest waarschijnlijke waarde rond -3%).
- Afname van a priori onzekerheid in de neerslag, leidt tot een afname in de resterende onzekerheid in berekende grondwaterstanden en afvoeren. Na het kalibreren blijkt het 90% betrouwbaarheid interval af neemt, ook is de top van de histogrammen van de modeluitkomsten hoger.
- Omdat de fit tussen model en meting tussen een kalibratie op basis van een ruimtelijk ongecorrleerde neerslagfout overeenkomt met een kalibratie op basis van een ruimtelijk gecorrleerde neerslagfout, kan worden geconcludeerd dat op basis van de beschikbare meetdata we niet in staat zijn om de modeluitkomsten en de parameterwaarden nauwkeuriger te voorspellen. Met andere woorden, als we de a priori onzekerheid verminderen, maar de posteriori onzekerheid neemt niet af, dan is het probleem niet beter identificeerbaar.

- De resterende onzekerheid over de werkelijke waarde van de parameters en van de neerslaghoeveelheid wordt hoogst waarschijnlijk veroorzaakt door de ruis die op de metingen is gezet. De hierdoor veroorzaakte mismatch tussen modelvergelijking, neerslagmetingen en overige metingen zorgt er voor dat de werkelijke parameterwaarden niet nauwkeuriger kan worden geïdentificeerd.
- De onzekerheid over het effect van zowel het scenario Vasthouden als Afvoeren neemt toe naarmate de berekende waarde meer af wijkt van de gemiddelde waarden. De onzekerheid over het effect van de maatregel is gelijk aan of twee keer het gemiddelde effect van de maatregel. Ook bij de maximale waarden is de bandbreedte van de onzekerheid vergelijkbaar met het effect van de maatregel.
- Op basis van de analyse kan worden geconcludeerd dat door de onzekerheid in parameters, neerslagmetingen en overige metingen, het niet mogelijk is duidelijk het effect van de maatregel te bepalen. Dit effect kan zeer gering zijn of een aanzienlijke verandering betekenen van de maximale afvoer dan wel grondwaterstand.

## Beschikbaarheid resultaten en algoritme

De studie is uitgevoerd in opdracht van de STOWA. De rapportages van de studie, het softwareprogramma waarmee de analyses zijn uitgevoerd, en de broncode van dit programma zijn verkrijgbaar via de STOWA. Overwogen wordt om de kennis van het algoritme verder te verspreiden middels een cursus. Belangstellenden hiervoor kunnen zich melden bij Joost Heijkers ([heijkers.wjm@hdsr.nl](mailto:heijkers.wjm@hdsr.nl))

## Referenties

- Hermans, A.G.M., P.E.V. van Walsum, J. Runhaar en P.J.T. van Bakel (2004)** Duurzaam waterbeheer, Fase 1: Modelbouw, calibratie en bepaling van het Actueel Grond- en Oppervlaktewaterregime. Alterra rapport 914, Wageningen.
- HKV LIJN IN WATER (2007)** Neerslagonzekerheid, Literatuuronderzoek naar de fout in de neerslag, In opdracht van STOWA, Lelystad, 2007.
- Holleman I. (2006)** Bias adjustment of radar-based 3-hour precipitation accumulations. Technical Report, KNMI TR-290.
- 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.