

HYDROLOGISCHE MODELONZEKERHEID KALIBRATIE



RAPPORT

2010
15

NEERSLAGONZEKERHEID

KALIBRATIE VAN GEBIEDSNEERSLAG EN MODELPARAMETERS

STOWA

2010

15

ISBN 978.90.5773.469.4



COLOFON

Amersfoort, 2010

UITGAVE STOWA, Amersfoort

AUTEUR
Ton Botterhuis

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 2010-15
ISBN 978.90.5773.469.4

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

INHOUD

	TEN GELEIDE	
	STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
	1.1 STOWA project neerslagonzekerheid	1
	1.2 Methode	1
2	SIMGRO MODEL	5
	2.1 Inleiding	5
	2.2 Beschrijving van het programma SIMGRO	5
	2.3 Beschrijving van het model Langbroekerwetering	8
3	KALIBRATIE PROBLEEM	13
	3.1 Inleiding	13
	3.2 Kalibratiemethode BATEA	13
	3.3 Uitwerking kalibratieparameters	15
	3.4 Uitwerking neerslag randvoorwaarde	16
	3.5 Uitwerking overige randvoorwaarden	18
	3.6 Uitwerking beschikbare meetgegevens	18

4	KALIBRATIE RESULTAAT	20
4.1	Inleiding	20
4.2	Ruimtelijk ongecorrleerde fout in neerslag	20
4.3	Ruimtelijk gecorrleerde fout in neerslag	24
5	EFFECT MAATREGELEN	27
5.1	Inleiding	27
5.2	Methodiek	27
5.3	Effect van maatregel vasthouden	29
5.4	Effect van maatregel afvoeren	31
6	CONCLUSIES	33
6.1	Resultaat kalibratie	33
6.2	Effect maatregelen	34
7	GEBRUIKTE LITERATUUR	35
	BIJLAGEN	
A	Resultaat parameters voor ruimtelijk ongecorrleerde fout	37
B	Resultaat neerslag voor ruimtelijk ongecorrleerde fout	41
C	Resultaat modeluitkomsten voor ruimtelijk ongecorrleerde fout	45
D	Resultaat parameters voor ruimtelijk gecorrleerde fout	53
E	Resultaat modeluitkomsten voor ruimtelijk gecorrleerde fout	57
F	Effect van maatregel vasthouden	65
G	Effect van maatregel afvoeren	77

1

INLEIDING

1.1 STOWA PROJECT NEERSLAGONZEKERHEID

Kalibreren van een model is onderdeel van het project 'Neerslagonzekerheid, Invloed van onzekere neerslaginformatie op (uitvoer van) hydrologische berekeningen'. Doel van dit onderdeel is om de onzekerheid in modeluitkomsten te bepalen die veroorzaakt zijn door onzekerheid in de gebiedsneerslag, de modelparameters en de modelvergelijking. Alsmede deze onzekerheid te beschrijven met een histogram.

1.2 METHODE

De kern van de beantwoording van het onderzoeksdoel ligt bij een analyse van de onzekerheden in de beschikbare gegevens en de invloed van deze onzekerheid op het resultaat van modelsimulaties. De invloed van onzekere gegevens op modelsimulaties 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 vergelijking (zoals hierboven opgeschreven) exact overeenkomt met de werkelijke relatie tussen neerslag en waterstand. Een dergelijk model berekent 100% nauwkeurig de volgende waterstand. In een dergelijke, hypothetische modeltoepassing volgen uit een analyse van meetwaarden de *exacte* waarden van parameters *a1* en *a2*.

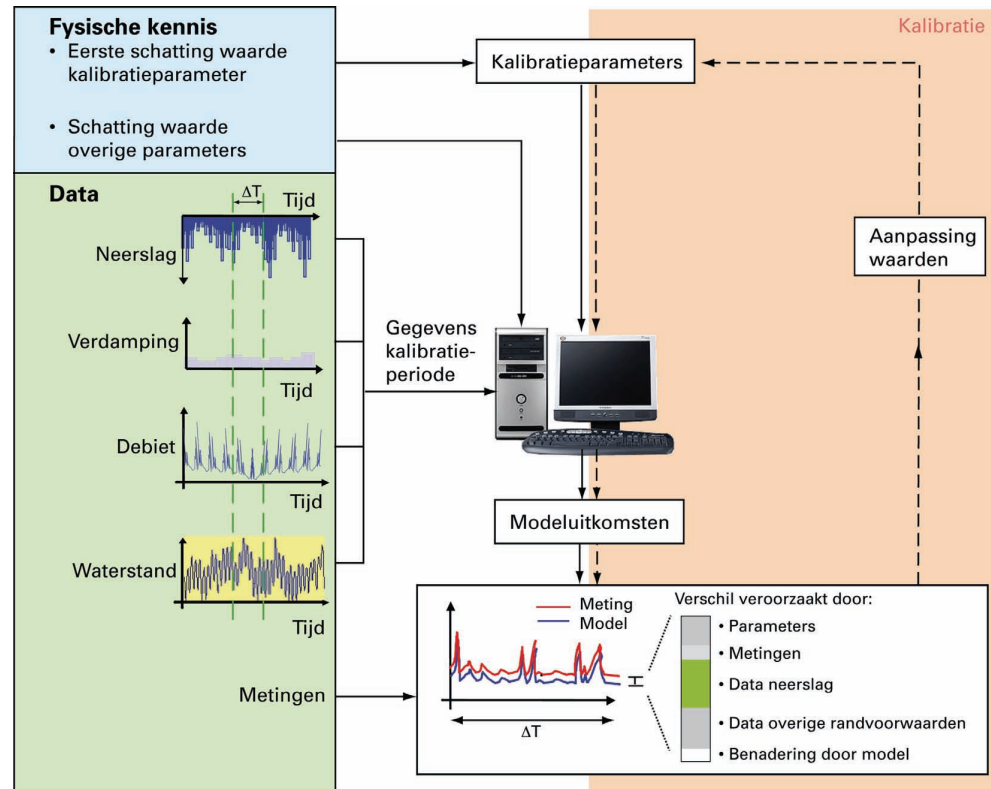
Indien de gegeven vergelijking door vereenvoudigingen niet exact overeenkomt met de werkelijke relatie, wordt het lastiger om de waarden van de parameters te bepalen. Correct waargenomen neerslag- en waterstandswaarden leveren in combinatie met juiste parameterwaarden immers nooit de komende waterstand op, omdat de vereenvoudigingen in het model een afwijking in de berekende waterstand veroorzaakt. Tijdens het kalibreren worden de waarden van *a1* en *a2* zodanig gekozen dat de fout in de berekende waterstand zo gering mogelijk is voor waargenomen neerslag- en waterstandswaarden. In Figuur 1-1 is het kalibreren van een hydrologisch model schematisch weergegeven. De waarde van de parameters wordt aangepast om het gevolg van de fout in de modelvergelijking te verkleinen. Mocht de waarde van de parameters fysische interpreteerbaar zijn, dan neemt de interpreteerbaarheid van de parameters af als gevolg van de fout in de modelvergelijking.

Een onnauwkeurigheid in de neerslaghoeveelheid beïnvloedt op een zelfde wijze de waarde van parameters. Door deze onnauwkeurigheid past de opgelegde neerslag niet meer exact bij de waargenomen waterstand. Tijdens het kalibreren worden de waarden van de parameters verder aangepast om ook deze afwijking te corrigeren. Indien ook de metingen van de

waterstanden onnauwkeurigheden bevatten, zullen de parameters verder van de werkelijke waarde worden ingesteld. Tijdens het simuleren van extreme situaties of langjarig hydrologisch gedrag worden de aangepaste parameterwaarden niet meer gecorrigeerd, omdat de werkelijke waarde van de parameters onbekend is.

FIGUUR 1-1

KALIBRATIE WAARBIJ DE OORZAAK VAN HET VERSCHIL TUSSEN METING EN MODEL IS UITGESPLITST IN ONZEKERHEID OMTRENT DE BENADERING VAN HET MODEL, DE WAARDE VAN PARAMETERS, METINGEN, NEERSLAG EN OVERIGE RANDVOORWAARDEN



In de huidige praktijk wordt geen onderscheid gemaakt tussen de diverse oorzaken van het verschil tussen gesimuleerde en gemeten waarden, anders dan dat de expert (subjectief) een inschatting maakt of er onlogische neerslag- en meetinformatie wordt gebruikt of dat er onlogische parameterwaarden tijdens het kalibreren worden gevonden. Beperkte afwijkingen in de kalibratiedata 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 metingen (Figuur 1-1). Het is dan legitiem om de modelafwijking 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 gemodelleerde relatie niet mogen beïnvloeden.

In onze beantwoording van de onderzoeksvraag wordt een Bayesiaanse methode gebruikt om de invloed inzichtelijk te maken van de onzekerheid in de neerslaginformatie op modelberekeningen. Deze BATEA methode (Kavetski, 2002) veronderstelt (voorafgaand aan de kalibratie) dat er diverse neerslaghoeveelheden en parameterwaarden zijn die in gelijke mate zowel de werkelijke neerslaghoeveelheid als de parameterwaarde beschrijven. Daarnaast wordt ook een meet- en modelfout voor mogelijk gehouden. De beschikbare (grond)water- en afvoermetingen worden gebruikt om de initieel ingeschatte waarschijnlijkheid van neerslag,

parameters, model- en meetfout te corrigeren, zodat de waarschijnlijkheid van de metingen is gemaximaliseerd. Resultaat van deze methode is een waarschijnlijkheidsverdeling van de modeluitkomsten gebaseerd op een gekalibreerde waarschijnlijkheid van neerslag, parameterwaarden, model- en meetfout.

MODELKEUZE

We gaan voor het onderzoek uit van een bestaand *SIMGRO* model van een deel van het beheersgebied van Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (HDSR). Het model van de Langbroekerwetering wordt om de volgende redenen gebruikt:

- Inhoudelijk:
 - Het betreft een fysisch gebaseerd ruimtelijk gedistribueerd model dat zowel de onverzadigde zone, het grondwater als het oppervlaktewater beschrijft. Met het model kunnen zowel oppervlakte- als grondwaterstanden ruimtelijk verdeeld worden berekend.
 - In het beheersgebied van HDSR komt zowel stedelijk, pleistoceen als holoceen gebied voor, waardoor op basis van het onderzoek niet alleen uitspraken kunnen worden gedaan over het belang van meenemen van onzekerheid in neerslaggegevens voor het beheersgebied van HDSR, maar ook voor andere gebieden in Nederland.
 - Het model is uitvoerig gekalibreerd en van deze kalibratie is een duidelijke rapportage beschikbaar (Hermans et. al., 2004)
- Praktisch:
 - We beschikken over software waarmee wij volledig geautomatiseerd *SIMGRO* modellen kunnen ijken. We kunnen daarmee volledig tegemoet komen aan de eis om eenduidig (gestandaardiseerd) en reproduceerbaar de modellen te ijken. Bovendien besparen we door de geautomatiseerde ijkingsprocedure tijd voor het ijkingsproces, waardoor we ons volledig kunnen concentreren op de inhoudelijke uitwerking van de vraagstelling.

LEESWIJZER

Basisgegevens

Voor de bepaling van de onzekerheid in de gebiedsneerslag, de modelparameters en de modelvergelijking zijn de volgende basisgegevens beschikbaar:

- het simulatieprogramma *SIMGRO* versie 4.1.3;
- het *SIMGRO* model van de Langbroekerwetering en
- het kalibratierapport 'Duurzaam waterbeheer Langbroekerwetering, Fase 1: Modelbouw, calibratie en bepaling van het Actueel Grond- en Oppervlaktewaterregime, Alterra-rapport 914' (Hermans et. al., 2004).

Een beschrijving van deze basisgegevens staat in hoofdstuk 2.

Kalibratie probleem

Voor de bepaling van de onzekerheid in de gebiedsneerslag, de modelparameters en de modelvergelijking is het kalibratie probleem onderverdeeld in:

- de kalibratie methode;
- de *a priori* informatie van de kalibratie parameters;
- de *a priori* informatie van de randvoorwaarden en
- de *a priori* informatie van de meetgegevens.

Een beschrijving van dit kalibratieprobleem staat in hoofdstuk 3.

Kalibratie resultaat

Het kalibratie resultaat bestaat uit een beschrijving van de onzekerheid in

- de modelparameters,
- de gebiedsneerslag en
- de modeluitkomsten.

Een beschrijving van dit kalibratie resultaat staat in hoofdstuk 4. Er is onderscheid gemaakt tussen een kalibratie waarbij de onzekerheid in de neerslag ruimtelijk ongecorrleerd en een kalibratie waarbij de onzekerheid in de neerslag ruimtelijk gecorrleerd is verondersteld.

Effect van maatregelen

Om de invloed van onzekerheid in de gebiedsneerslag, de modelparameters en de modelvergelijking op toekomstige situaties inzichtelijk gemaakt, zijn twee scenario's met maatregelen doorgerekend. Gekozen is om een scenario Vasthouden en een scenario Afvoeren door te rekenen. Het effect van maatregelen bestaat uit een beschrijving van de onzekerheid in de modeluitkomsten. Deze beschrijving staat in hoofdstuk 5.

Het rapport sluit af met conclusies en aanbevelingen.

2

SIMGRO MODEL

2.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk worden de beschikbare basisgegevens beschreven. Voor de bepaling van de onzekerheid in de gebiedsneerslag, de modelparameters en de modelvergelijking zijn de volgende gegevens beschikbaar:

- het simulatieprogramma *SIMGRO* versie 4.1.3;
- het *SIMGRO* model van de Langbroekerwetering en
- het kalibratierapport 'Duurzaam waterbeheer Langbroekerwetering, Fase 1: Modelbouw, kalibratie en bepaling van het Actueel Grond- en Oppervlaktewaterregime, Alterra-rapport 914' (Hermans et. al., 2004).

In paragraaf 2.2 staat een korte beschrijving van het simulatieprogramma *SIMGRO*. In de derde en laatste paragraaf van dit hoofdstuk wordt het model van de Langbroekerwetering besproken.

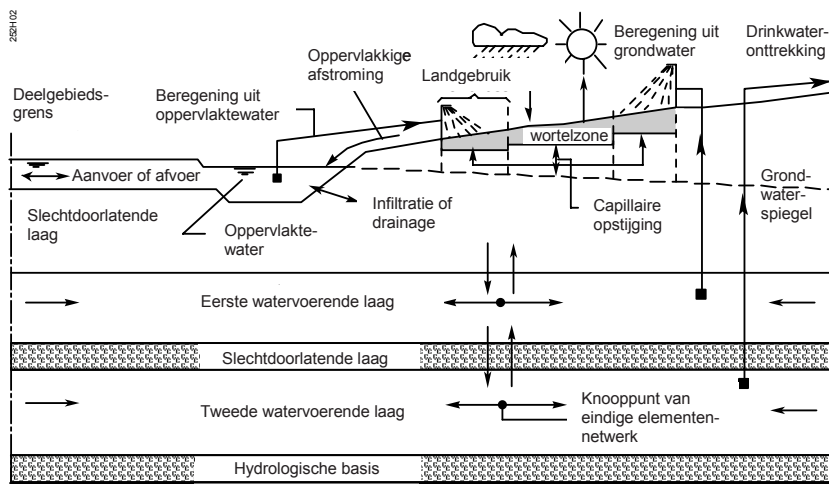
2.2 BESCHRIJVING VAN HET PROGRAMMA *SIMGRO*

Deze beschrijving van het programma is overgenomen uit HKV en Alterra (2006).

ALGEMEEN

Om de effecten van waterhuishoudkundige ingrepen in een gebied te kunnen kwantificeren is het regionale model *SIMGRO* ontwikkeld. *SIMGRO* beschrijft de stroming in de verzadigde zone, de onverzadigde zone en het oppervlaktewater (Walsum et al., 2004). Figuur 2-1 geeft een schematisch beeld van het model. Het niet-stationaire karakter van het model, waarin de interactie tussen de hydrologische processen in grond- en oppervlaktewater van belang is, maakt het mogelijk de variaties binnen het hydrologische systeem door veranderende randvoorwaarden, zoals de weersomstandigheden, te beschrijven.

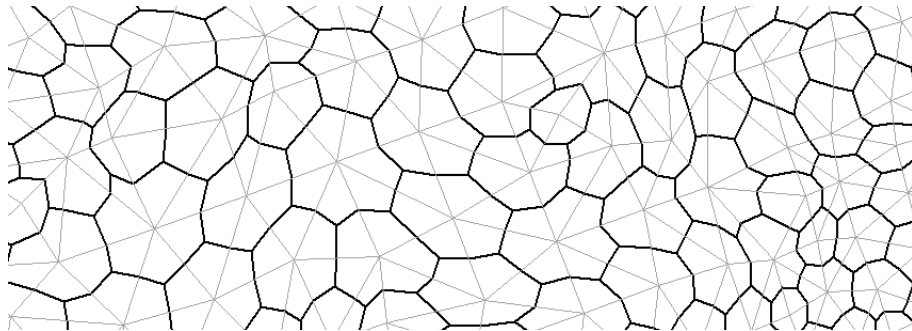
FIGUUR 2-1

SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE HYDROLOGISCHE PROCESSEN EN SYSTEMEN IN *SIMGRO*.

GRONDWATER

Voor het beschrijven van de grondwaterbeweging in de verzadigde zone wordt een schematisatie toegepast in watervoerende en weerstandbiedende lagen (zie Figuur 2-1). Het driehoeksnetwerk uit Figuur 2-2 is de meetkundige basis van de numerieke berekening van de grondwaterstroming. De numerieke berekening wordt uitgevoerd met de methode van eindige elementen. Deze methode beschrijft de stijghoogte en/of flux in ieder knooppunt (hoekpunt van een driehoek) met behulp van lineaire interpolatiefuncties. In een watervoerende laag treedt horizontale stroming op en in een weerstandbiedende laag alleen verticale stroming. Op deze wijze wordt de verzadigde grondwaterstroming quasi-driedimensionaal beschreven. Om tot een oplossing te komen wordt langs de rand van het model een stijghoogte of een flux opgelegd.

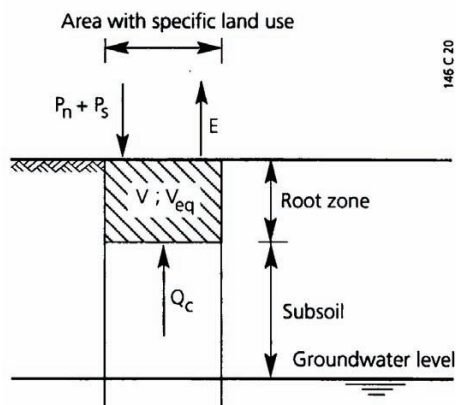
FIGUUR 2-2 BEREKENING VERZADIGDE GRONDWATERSTROMING OP BASIS VAN HET EINDIGE ELEMENTENNETWERK VAN DRIEHOEKEN (DUNNE LIJNEN) EN BEREKENING ONVERZADIGDE GRONDWATERSTROMING OP BASIS VAN INVLOEDSOPPERVLAKKEN VAN KNOOPPUNTEN (HONINGRAATSTRUCTUUR MET DIKKE LIJNEN)



BODEMWATER

Aan de hand van het driehoeksnetwerk voor de grondwaterstroming kan bij ieder knooppunt een zogenoemd invloedsoppervlak worden geconstrueerd (zie Figuur 2-2). De berekening van de onverzadigde grondwaterstroming vindt plaats per invloedsoppervlak. Het in detail modelleren van het bodemwater als onderdeel van een regionaal model zou een buitensporige rekeninspanning vereisen. Om de belangrijkste bodemwaterprocessen in beeld te brengen heeft SIMGRO een module met een reservoirmodel voor de wortelzone en een vochtprofiel voor de ondergrond. Hierbij is de ondergrond gedefinieerd als het profiel tussen wortelzone en freatisch vlak volgens Figuur 2-3. De module maakt gebruik van tabellen die met het numerieke bodemwatermodel CAPSEV zijn verkregen (Wesseling, 1991).

FIGUUR 2-3 SCHEMATISATIE VAN DE ONVERZADIGDE ZONE IN SIMGRO (MET P_n = NETTO NEERSLAG, P_s = BEREGENING, E = EVAPOTRANSPIRATIE, V = VOCHTGEHALTE, V_{eq} = VOCHTGEHALTE BIJ EEN EVENWICHTSPROFIEL EN Q_c = OPWAARTSE FLUX)



De beschouwde wortelzone heeft een vochtbergend vermogen dat wordt bepaald door de dikte en de vocht karakteristiek van het bodemmateriaal. Toevoegingen aan of onttrekkingen uit dit systeem zijn neerslag, beregening, evapotranspiratie, capillaire flux en percolatie. Als er minder vocht dan behorende bij het evenwichtsprofiel in de wortelzone aanwezig is, kan er een capillaire flux optreden. De capillaire flux is afhankelijk van de bodemfysische eenheid, de grondwaterstandsdiepte, het vochtgehalte en de dikte van de wortelzone. De maximale vochtinhoud van de wortelzone is afhankelijk van dezelfde factoren. Percolatie treedt op als de maximale vochtinhoud wordt overschreden. Met de percolatie of capillaire flux uit de onverzadigde zone rekent het model in de bovenste laag van het verzadigde deel een verandering van de grondwaterstand uit, die afhankelijk is van de freatische bergingscoëfficiënt. Het vochttransport in de onverzadigde zone wordt op een pseudo-stationaire wijze benaderd, dat wil zeggen volgens een opeenvolging van stationaire situaties.

Invoer voor de module van de onverzadigde zone is aan de bovenkant neerslag en potentiële verdamping. De potentiële verdamping van gras wordt met behulp van de Makkink-formule berekend (gras referentieverdamping). Voor andere gewassen wordt deze referentieverdamping vermenigvuldigd met gewasfactoren om de potentiële verdamping te bepalen [Hooghart en Feddes, 1987]. De actuele verdamping (evapotranspiratie) hangt af van de vochtvoorraad in de wortelzone. Buiten het groeiseizoen van een gewas rekent het model met een bodemverdamping. De vochttoestand van het bovenste laagje grond bepaalt deze verdamping. Deze vochttoestand hangt af van de voorafgaande droge periode.

Voor bos is onderscheid gemaakt in naald- en loofhout. Voor beiden wordt de potentiële verdamping berekend volgens de procedures opgesteld door de Ad Hoc Groep Verdamping (Ad hoc groep Verdamping, 1984). Hierbij wordt voor bossen rekening gehouden met de interceptie van neerslag op de bladeren en naalden. Dit wordt modelmatig geschematiseerd als een reservoir waarvan de grootte verschilt in zomer en winter. Dit interceptiewater verdampt weer en is zodoende onderdeel van de potentiële verdamping voor bossen.

OPPERVLAKTEWATER

In SIMGRO worden de invloedsoppervlakken van de knooppunten gegroepeerd tot afwateringseenheden. Binnen een afwateringseenheid wordt onderscheid gemaakt in vijf categorieën van waterlopen:

- 1 primaire waterlopen (kanalen, rivieren),
- 2 secundaire waterlopen (beken, sloten in beheer bij het waterschap),
- 3 tertiaire waterlopen (sloten en greppels),
- 4 drains en
- 5 maaiveldgreppels.

Een waterloop uit bovenstaande categorieën is actief als de grondwaterstand en/of de waterstand hoger is dan de bodem. De grondwaterstand wordt bekeken op het niveau van het invloedsoppervlak. De waterstand op het niveau van de afwateringseenheid. Afhankelijk van de omstandigheden is er sprake van drainage of infiltratie. De drainage wordt berekend met de formule van Ernst (Ernst, 1978).

De waterbalans van een afwateringseenheid wordt gesimuleerd met één reservoir voor het geheel van grotere en kleinere waterlopen. De afwatering wordt gesimuleerd met een netwerk van reservoirs. De netwerkstructuur definieert de wijze waarop de reservoirs een cascade vormen. Voor ieder reservoir wordt een relatie afgeleid tussen berging en waterstand, de

zogenaamde bergingsrelatie, en tussen afvoer en waterstand, de afvoerrelatie. In het model wordt per reservoir aangegeven of er terugstuwing kan plaatsvinden in bovenstroomse richting. Terugstuwing betekent dat het model water blokkeert en eventueel water in tegengestelde richting verplaatst als aangegeven door de netwerkstructuur. Dit gebeurt als de benedenstroomse waterstand hoger dreigt te worden dan de bovenstroomse waterstand.

UITWISSELING TUSSEN MODULES

De waterstanden in het oppervlaktewater reageren meestal snel op een veranderende drainage. De berging ervan is immers gering in vergelijking met het grondwatersysteem. Een kleine tijdstap is dan ook gewenst. Voor de onverzadigde zone en de verzadigde zone rekent SIMGRO over het algemeen met tijdstappen van 6 uur tot 12 uur. Het oppervlaktewatersysteem in het model wordt met tijdstappen van 10 minuten tot 1 uur doorgerekend. De interactie tussen het grondwater en het oppervlaktewater wordt voor deze kleinere tijdstap berekend. De grondwaterstand blijft in die periode constant, maar de waterstand varieert en de berekende drainage of infiltratie wordt gesommeerd. Bij de volgende tijdstap voor het grondwater wordt deze gesommeerde drainageflux gebruikt om een nieuwe grondwaterstand te berekenen.

2.3 BESCHRIJVING VAN HET MODEL LANGBROEKERWETERING

Deze beschrijving is een samenvatting van hoofdstuk 2 en 4 uit Hermans et. al.(2004).

LOCATIE

Het Langbroekerwetering-gebied ligt in de provincie Utrecht. Dit gebied heeft een oppervlakte van 6.800 ha (rood omlijnd in Figuur 2-4). De Langbroekerwetering doorkruist het gebied van oost naar west. Het gebied vormt de overgang tussen de droge zandgronden van de Utrechtse heuvelrug en de oeverwallen en natte komkleigronden langs de Kromme Rijn.

FIGUUR 2-4 LOCATIE GEBIED LANGBROEKERWETERING



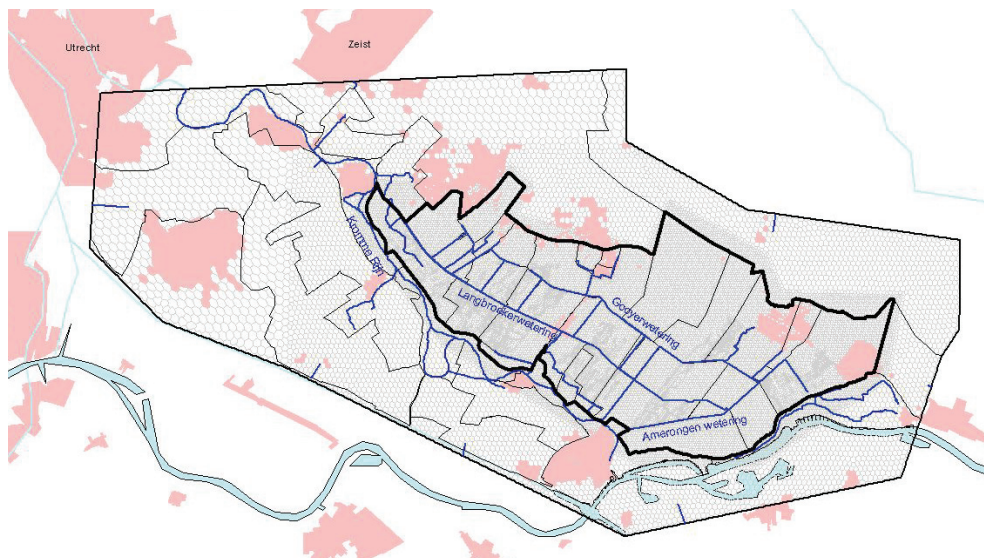
MODELGRENZEN EN NETWERK

Figuur 2-5 geeft een overzicht van het modelgebied (dunne zwarte lijn) met daarin het interessegebied Langbroekerwetering (dikke zwarte lijn). Het modelgebied is ongeveer 25.000 ha groot en zo gekozen dat effecten van foutieve randvoorwaarden op het interessegebied te verwaarlozen zijn. Aan de noordoostkant van de heuvelrug ligt de modelgrens in het Binnenveld. In het zuidwesten ligt de modelgrens op het Amsterdam Rijnkanaal. In het zuidoosten ligt de modelgrens ten zuiden van de Nederrijn. In het noordwesten ligt de modelgrens op voldoende afstand van het interessegebied. Hierbij is rekening gehouden met een stromingsrichting van het grondwater van noordoost naar zuidwest.

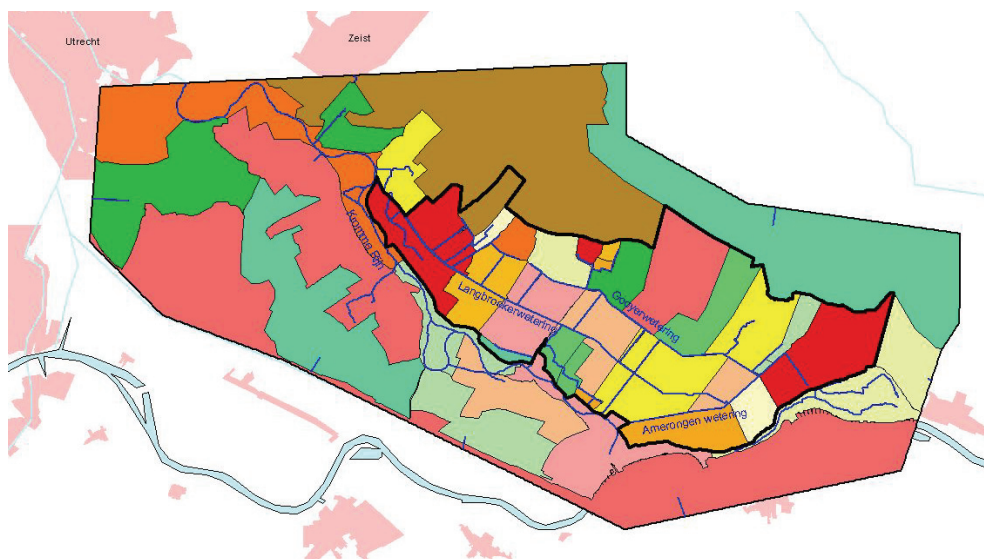
Bij het aanmaken van het SIMGRO netwerk is ervoor gezorgd dat de invloedsgebieden zo goed mogelijk de grenzen van de peilgebieden volgen. Het aantal knooppunten bedraagt 29162 met een onderlinge afstand variërend van 250 op de modelrand tot 50 m in het interessegebied (zie Figuur 2-5).

FIGUUR 2-5

SCHEMATISERING MODELGEBIED LANGBROEKERWETERING



(A) INVLOEDSGEBIEDEN IN HET SIMGRO MODEL



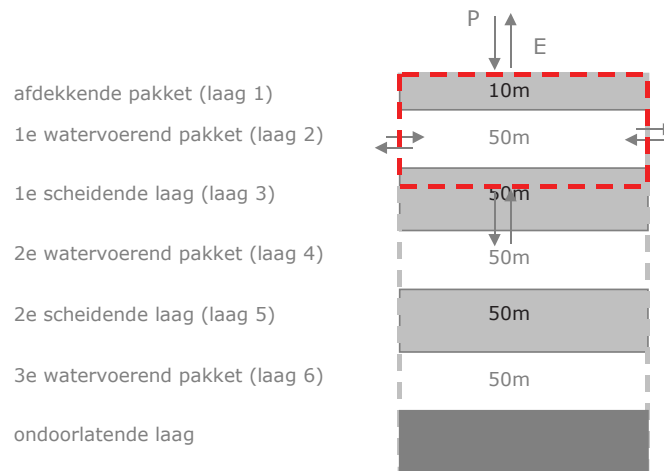
(B) AFWATERINGSEENHEDEN IN HET SIMGRO MODEL

GRONDWATER

De Utrechtse Heuvelrug en het overgangsgedebied naar de Kromme Rijn zijn geologisch gevormd tijdens de laatste en voorlaatste ijstijd, toen het landijs ons land deels bedekte. In de Saalien-ijstijd werd door het landijs grof materiaal opgestuwd, waardoor de Utrechtse Heuvelrug ontstond. Direct ten zuiden van de stuwwal ontstonden zogenaamde puinwaaiers, gelegen aan de noordzijde van het Kromme Rijngebied, tegen de flanken van de Utrechtse Heuvelrug. Later zijn de hellingen van de Utrechtse Heuvelrug ondergestoven met dekzand, soms tot hoge of lage landduinen. Tussen deze landduinen door, hebben zich uit afstromend oppervlaktewater en kwelwater in de loop van de tijd verschillende droge beekdalen ontwikkeld. De meeste van deze beekdalen lopen in zuidwestelijke richting. In de laagste en natste delen heeft zich plaatselijk veen gevormd, dat later bedekt is door rivierklei-afzetting van de Kromme Rijn.

De maaiveldhoogte varieert van bijna 70 m+NAP op de Utrechtse Heuvelrug tot net iets boven NAP in het zuidwestelijke deel van het Langbroekerwetering-gebied. De maaiveldgegevens in het model zijn uit het Actueel Hoogtebestand Nederland gehaald. Het geleverde AHN-bestand is met het instrument Alterraqua verbeterd. De maaiveldhoogte in het interesse gebied varieert van 66 m+NAP op de heuvelrug tot 1,5 m+NAP in het zuidwestelijke deel. De geohydrologie is geschematiseerd tot drie watervoerende pakketten, twee scheidende lagen en een deklaag. Voor de huidige studie is deze schematisatie vereenvoudigd tot 1 watervoerende laag en een deklaag (zie Figuur 2-6).

FIGUUR 2-6 SCHEMATISERING ONDERGROND LANGBROEKERWETERING



De kalibratie van geohydrologische parameters is met kwantitatieve criteria op een systematische en reproduceerbare wijze uitgevoerd (zie Hermans et. al., 2004).

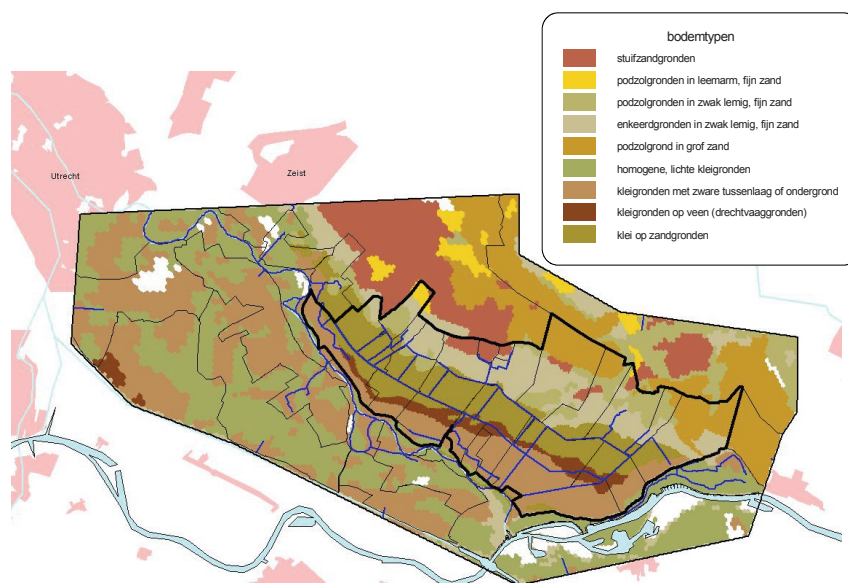
BODEMWATER

Het gebied kent een grote variatie in bodemtypen: van zandgronden op de heuvelrug tot zavel- en kleigronden richting Kromme Rijn. De bodemkenmerken zijn gebaseerd op de bodemkaart 1:50.000 (De Vries en Denneboom, 1992). De eenheden op de bodemkaart zijn vertaald naar een 45-tal bodemfysische profielen, ook wel PAWN-eenheden genoemd. Daarbij is gebruik gemaakt van de bouwstenen van de Staringreeks (Wösten et al, 2001). In SIMGRO wordt de dominante bodemfysische eenheid per invloedsgedebied gebruikt als basis voor de

berekeningen. Figuur 2-7 geeft een overzicht van de bodemfysische eenheden. Voor een verbeterde berekening van het hangwaterprofiel en de evapotranspiratie op de Utrechtse heuvelrug is de percolatie in simgro aangepast door parameter waarden te veranderen.

FIGUUR 2-7

SCHEMATISERING BODEM LANGBROEKERWETERING



Gegevens over het bodemgebruik zijn ontleend aan het LGN4 bestand van Alterra (raster met resolutie 25 m). In het bestand worden de belangrijkste landbouwgewassen, een aantal natuurklassen en stedelijke klassen onderscheiden. In SIMGRO wordt het dominante grondgebruik per invloedsgedebied gebruikt als basis voor de berekeningen. Het landgebruik bestaat voor ongeveer de helft van het areaal uit grasland (51%). Een behoorlijk deel van het oppervlak is natuur (26%). Daarnaast bestaat het landgebruik uit bebouwing (13%), akkerbouw (8%), en boomgaarden (2%).

OPPERVLAKTEWATER

Binnen het interessegebied is de afwatering gedetailleerd gemodelleerd; buiten het interessegebied zijn grovere afwateringseenheden onderscheiden. Type A-watervgangen, stuwen, duikers, gemalen en leggergegevens van HDSR zijn gebruikt bij het opzetten van het netwerk van open water reservoirs. Voor het afleiden van de afvoerrelaties voor deze reservoirs zijn hydraulische berekeningen uitgevoerd met een voor deze studie opgezet SOBEKCF model.

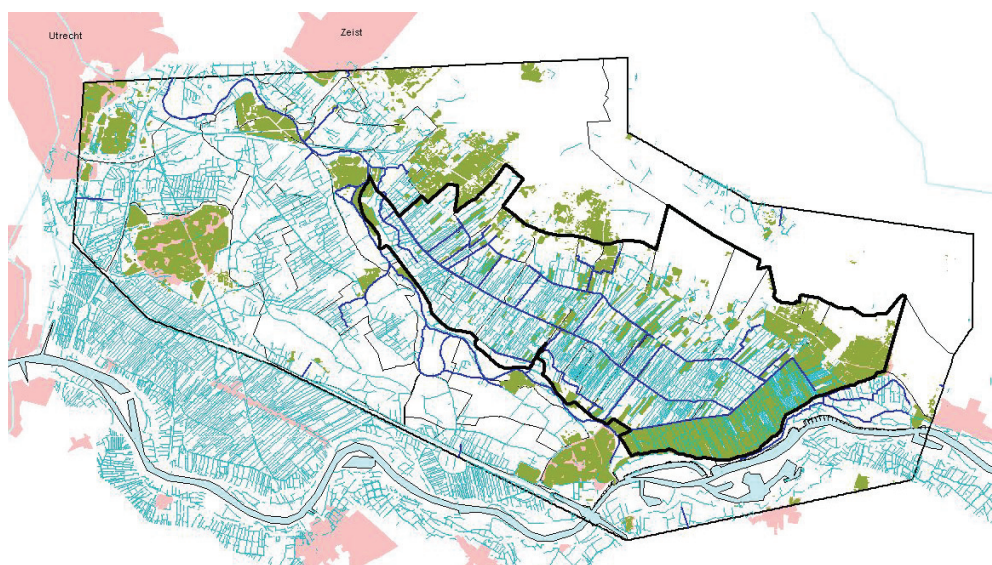
In het SIMGRO model wordt onderscheid gemaakt tussen vijf categorieën ontwateringsmiddelen (Figuur 2-8):

1. Primaire waterlopen: De Rijn is als randvoorwaarde met een stijghoogte in het model gebracht.
2. Secundaire waterlopen: Dit zijn de hoofwaterlopen in beheer bij HDSR. Ligging en dimensie zijn overgenomen uit de gegevens van HDSR. In het model is een in- en uittreeweerstand van 1 dag opgenomen. Volgens Hermans et. al.(2004) gaf verdere analyse van het modelgedrag geen aanleiding deze waarde aan te passen.
3. Tertiaire waterlopen: Dit zijn de sloten die niet in beheer zijn bij HDSR. De ligging is ontleend aan het Top10-Vector bestand van de Topografische Dienst. Voor elk type sloot of greppel per hydrotype en per grondwatertrap kan een schatting van de afmetingen worden gemaakt (Massop en te Beest, 2001). In het model is een in- en uittreeweerstand van 1 dag opgenomen. Volgens Hermans et. al.(2004) gaf verdere analyse van het modelgedrag geen aanleiding deze waarde aan te passen.

4. Greppels en buisdrainage: Door HDSR zijn bolvormige percelen aangegeven waar op regelmatige afstand zeer smalle ondiepe greppels voorkomen. In het model is een drainage- en infiltratieweerstand van 150 dagen (Hermans et. al., 2004) opgenomen. Er is verondersteld dat het stedelijk gebied goed is ontwaterd met behulp van buisdrainage (drainage- en infiltratieweerstand van 100 dagen, Hermans et al, 2004). De invloed van de weerstanden van greppels en buisdrainage op het modelgedrag is niet onderzocht.
5. Maaiveld: Naast de greppels die expliciet voorkomen in het Top10-Vectorbestand van de topografische dienst en de bolvormige percelen met greppels wordt verondersteld dat er in het gehele gebied nog lokale laagtes aanwezig zijn die als greppel kunnen fungeren. Voor deze laagtes is uitgegaan van een diepte van 20 cm, en een drainage- en infiltratieweerstand van 20 dagen (bij volledige inundatie reductie tot 0,5 dagen, Hermans et. al., 2004). De invloed van deze parameter is ook niet verder onderzocht.

FIGUUR 2-8

SCHEMATISERING ONTWATERING LANGBROEKERWETERING (DONKERBLAUW: SECUNDAIRE WATERLOPEN, LICHTBLAUW: TERTIAIRE WATERLOPEN EN GROEN: GREPPELS + BUISDRAINAGE)



NAUWKEURIGHEID

Vergelijking van berekende en gemeten grondwaterstanden en oppervlaktewaterafvoer geven reden tot vertrouwen in de prestaties van het model. Uiteindelijk is bereikt dat de standaardafwijking van de gesimuleerde stijghoogten ten opzichte van de gemeten waarden is teruggebracht tot gemiddeld 22 cm. Het gemiddelde verschil tussen de gesimuleerde stijghoogten en de gemetenwaarden in de deklaag is teruggebracht tot 5 cm. Het verschil in gemiddelde afvoer bij meetlocatie 025 (zie Figuur 3-5) over de kalibratieperiode is $-0,15 \text{ m}^3/\text{s}$ (21 procent). De standaard afwijking van de gesimuleerde afvoer ten opzichte van de gemeten waarden is teruggebracht tot ongeveer $1 \text{ m}^3/\text{s}$.

3

KALIBRATIE PROBLEEM

3.1 INLEIDING

In dit hoofdstuk wordt het kalibratieprobleem beschreven. Voor de bepaling van de onzekerheid in de gebiedsneerslag, de modelparameters en de modelvergelijking is het kalibratieprobleem onderverdeeld in:

- de kalibratiemethode;
- de *a priori* informatie van de kalibratie parameters;
- de *a priori* informatie van de randvoorwaarden en
- de *a priori* informatie van de meetgegevens.

In paragraaf 3.2 staat een korte beschrijving van de kalibratie methode BATEA. In de derde paragraaf van dit hoofdstuk wordt de *a priori* informatie van de kalibratie parameter uitgewerkt. Uitwerking van de *a priori* informatie van de randvoorwaarden en dan met name de neerslag staat in paragraaf 3.4. De laatste paragraaf van dit hoofdstuk behandelt de *a priori* informatie van de meetgegevens (grondwater en afvoeren).

3.2 KALIBRATIEMETHODE BATEA

Een Bayesiaanse methode wordt gebruikt om de invloed inzichtelijk te maken van de onzekerheid in de neerslaginformatie op modelberekeningen. Deze BATEA methode (Kavetski, 2002) veronderstelt dat er diverse neerslaghoeveelheden, parameterwaarden, grondwaterstanden en/of afvoeren zijn die in gelijke mate de werkelijke neerslaghoeveelheid, parameter-waarde, grondwaterstand als afvoer beschrijven. De methode gebruikt een wiskundige kansverdeling om de waarschijnlijkheid van de afvoeren en grondwaterstanden uit te drukken. De waarschijnlijkheid van een grondwaterstand is een functie van het verschil tussen gemeten en gesimuleerde waarde. Des te kleiner het verschil tussen meting en simulatie, des te waarschijnlijker is de meting. Anders gesteld de methode veronderstelt dat er een meetfout bestaat en dat deze beschreven kan worden met een kansverdeling. Uitgangspunt is dat de werkelijke grondwaterstand wordt gevonden door het verschil tussen gemeten en gesimuleerde waarde te verkleinen door de neerslaghoeveelheid en de parameterwaarden binnen grenzen aan te passen.

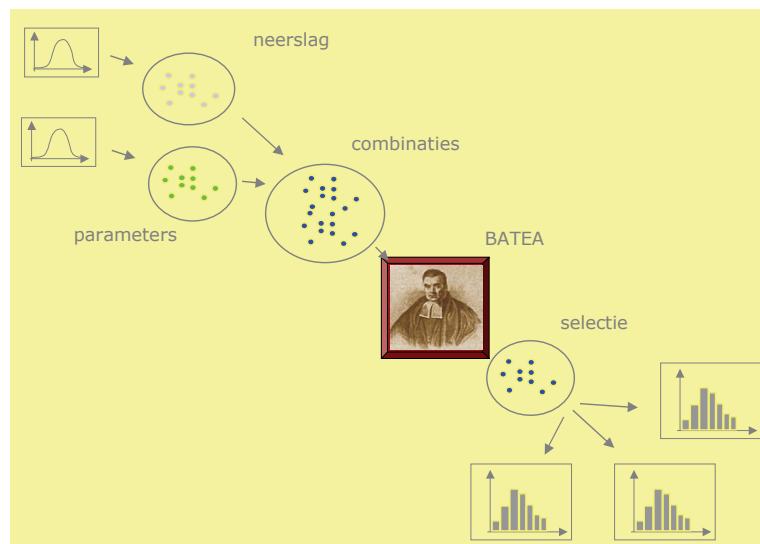
In Figuur 3-1 is het principe van de BATEA methode weergegeven. Op basis van een wiskundige optimalisatie (nl. Downhill Simplex van Nelder and Mead, Press ea 1992) wordt een schatting gemaakt van de meest waarschijnlijke combinatie van gebiedsneerslag en modelparameters. Naast deze schatting levert de eenvoudige optimalisatie een schatting van de correlatie tussen verschillende combinaties van gebiedsneerslag en modelparameters. 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 eenvoudige optimalisatie, wordt de getrokken combinatie aan de verzameling toegevoegd. Als de fit een grote verslechtering is, dan 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. 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 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.

FIGUUR 3-1

VEREENVOUDIGE WEERGAVE VAN DE WERKING VAN HET KALIBRATIE-ALGORITME



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 parameter waarden wordt ook uitgedrukt met een kansverdeling. Het product van deze *a priori* waarschijnlijkheid en de *likelihoodfunctie* 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.

Het resultaat van de BATEA methode is een verzameling van doorgerekende combinaties van neerslaghoeveelheden en parameterwaarden. Het aantal maal dat een combinatie voorkomt in de verzameling bepaalt de waarschijnlijkheid van deze combinatie na kalibratie (*a poste-*

riori). Per combinatie is de neerslaghoeveelheid, de parameterwaarde en het verschil tussen meting en simulatie bekend. Door eenvoudig te turfen kunnen histogrammen worden opgesteld van de neerslag, de parameters en de model- en meetfout (Figuur 3-1). Met deze histogrammen kunnen nu de onderzoeksvragen worden beantwoord:

1. De mate waarin de onzekerheid in neerslaggegevens van invloed is op de waarde van de modelparameters kan worden bepaald door voor elke parameter een histogram te maken van de waarden in de verzameling. Dit histogram geeft de (*a posteriori*) spreiding in de waarde van de parameters als gevolg van (*a posteriori*) neerslagonzekerheid weer.
2. De mate waarin de onzekerheid in neerslaggegevens van invloed is op modeluitkomsten voor de huidige situatie kan worden bepaald door voor elk gewenste variabele (bijv. grondwaterstand) een histogram van de modelberekeningen uit de geselecteerde verzameling te maken. Dit histogram geeft de spreiding in de waarde van de variabele als gevolg van (*a posteriori*) neerslag- en parameteronzekerheid weer.
3. 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 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.

Naast het algoritme en het SIMGRO model van de Langbroekerwetering zijn *a priori* waarschijnlijkheidsverdelingen van de kalibratieparameters en de gebiedsneerslag nodig. Deze *a priori* verdelingen worden in de volgende paragrafen uitgewerkt. Aan het eind van dit hoofdstuk worden de beschikbare metingen besproken.

3.3 UITWERKING KALIBRATIEPARAMETERS

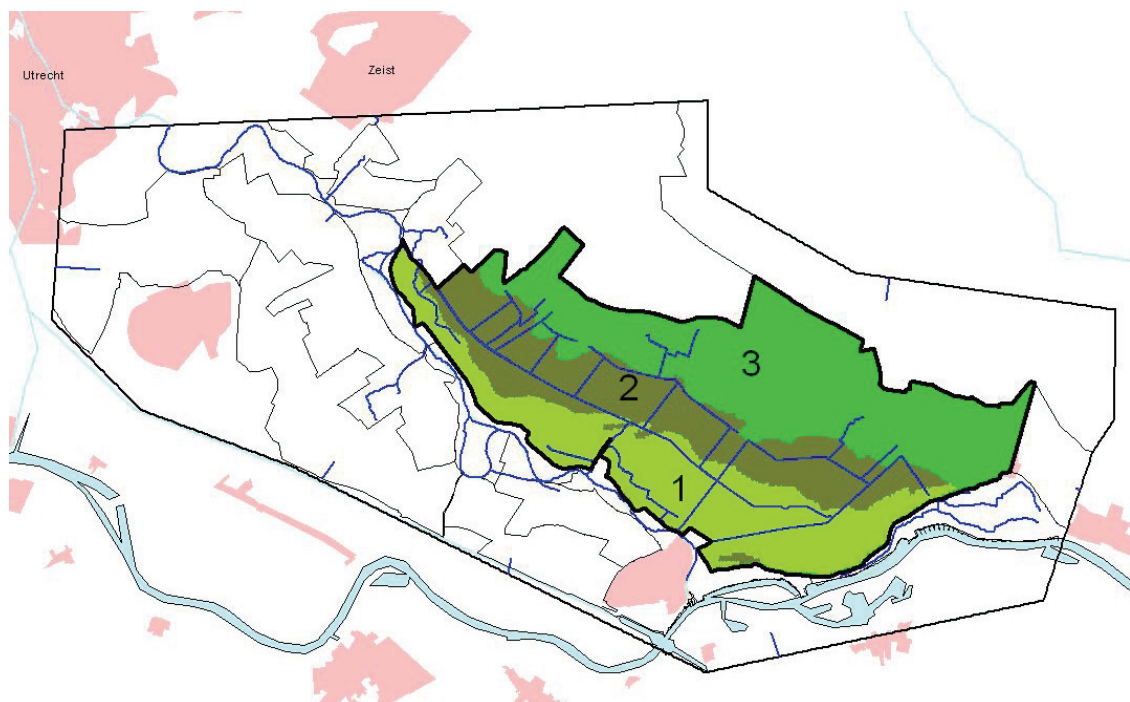
Bij het kalibreren van het SIMGRO model van Langbroekerwetering wordt onderscheid gemaakt tussen parameters van het oppervlaktewater, parameters van de ondergrond en parameters van de toplaag. De parameters van het oppervlaktewater en de ondergrond worden tijdens kalibreren niet aangepast. Bij het kalibreren worden de c-waarde van laag1, de infiltratie-capaciteit op het maaiveld en de drainage- en infiltratieweerstand van greppels en buisdrainage aangepast. In de voorgaande kalibratie van het model zijn de eigenschappen van deze parameters per invloedsoppervlak vastgesteld op basis van literatuur of gekalibreerd (Hermans et. al., 2004). Door grenzen te stellen aan de waarden overeenkomstig met de fysische kenmerken van het stroomgebied, kan eenvoudig worden voorkomen dat het model oneigenlijk (namelijk met fysisch niet reële parameterwaarden) wordt gekalibreerd. Er is gekozen voor factoren waarmee kalibratieparameters worden vermenigvuldigd tussen 50 en 150 procent. In de kalibratie worden *a priori* de parameters uniform verdeeld verondersteld binnen 50% en 150% van de huidige waarde.

Tabel 3-1 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). Uit de bodemkaart (Figuur 2-7) blijkt dat de bodemsoort zand in ongeveer 44 procent van het stroomgebied van Langbroekerwetering aanwezig is. De bodemsoorten klei en klei op veen zijn in ongeveer gelijke mate aanwezig. In Figuur 3-2 is deze zonering van het studiegebied weergegeven.

TABEL 3-1 KALIBRATIE PARAMETERS

modeleigenschap	bodemssoort		
	Zone1	Zone2	Zone3
c-waarde van laag 1	P01	P02	P03
infiltratiecapaciteit op het maaiveld	P04	P06	P06
drainage- en infiltratieweerstand van greppels en buisdrainage	P07	P08	P09

FIGUUR 3-2 INDELING VAN HET GEBIED LANGBROEKERWETERING IN KALIBRATIE ZONES (BINNEN DE ZONE WORDT DE VERANDERING VAN KALIBRATIE PARAMETER HOMOGEEN VERONDERSTELD)



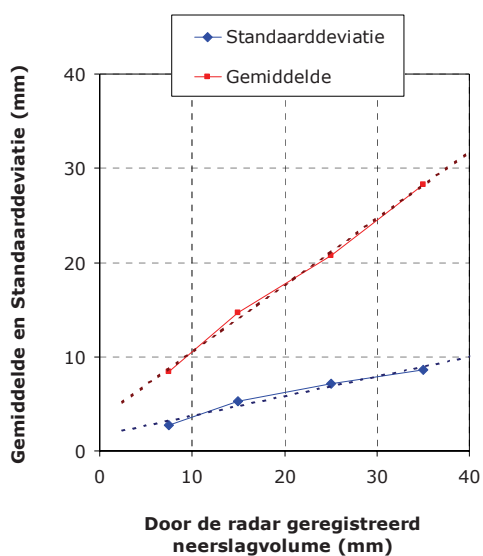
3.4 UITWERKING NEERSLAG RANDVOORWAARDE

Bij het kalibreren van het SIMGRO model van Langbroekerwetering wordt onderscheid gemaakt tussen de neerslag en de overige randvoorwaarden. De gebiedsneerslag die aan het model wordt opgelegd wordt in de BATEA methode iedere simulatie uit de *proposal density* getrokken. Om een redelijke fout in de neerslag in te schatten die geschikt is voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van recente resultaten van Holleman (2006). De data uit de betreffende literatuur is daartoe omgewerkt tot een kansverdeling op een neerslagklasse zoals gemeten op een grondstation, gegeven een *in de radar geregistreeerde* klasse. Een normale verdeling blijkt voor alle klassen goed te voldoen (HKV, 2007). De relaties tussen het door de radar geregistreeerde neerslagvolume enerzijds en het gemiddelde en de standaarddeviatie van de normale verdelingen anderzijds zijn weergegeven in Figuur 3-3. In de figuur zijn tevens de geschatte lineaire relaties afgebeeld. Voor de *a priori* verdeling van de neerslag 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. Opgemerkt wordt dat de betrouwbaarheid van de relatie voor de uiterste klassen door gebrek aan data beperkt is. Vooralsnog kan binnen dit onderzoek gebruik worden gemaakt van extrapolatie van de lineaire relaties.

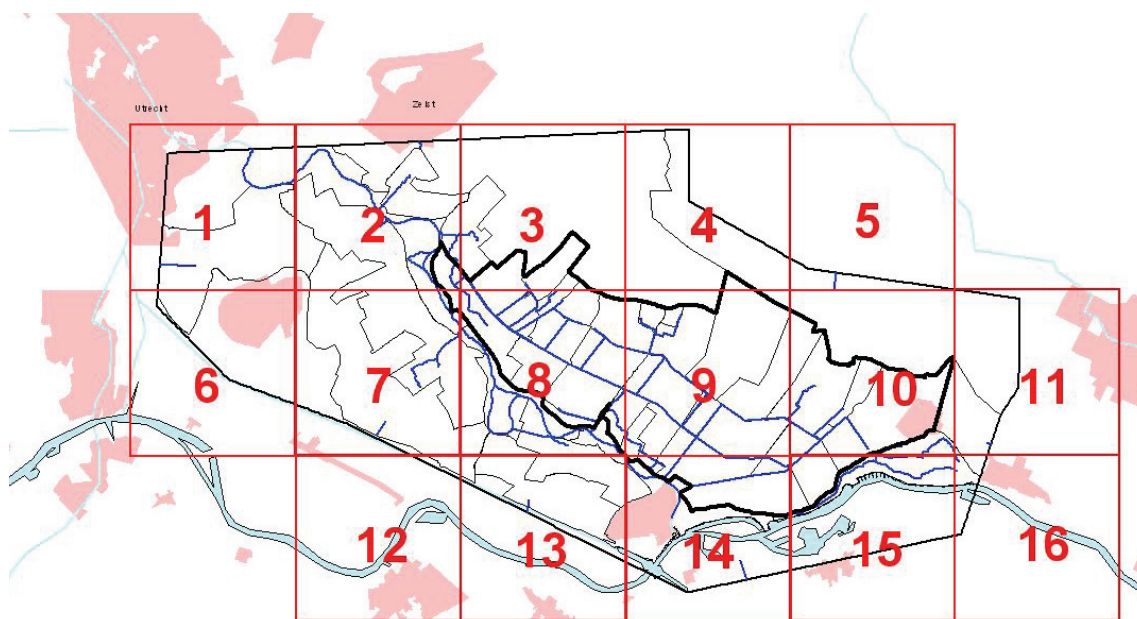
De radarbeelden zijn momenteel opgeschaald naar een resolutie van 5x5 km. Dit betekent dat per cel van 5x5 km per tijdstip een neerslaghoeveelheid is bepaald. Dit rooster van 16 cellen is weergegeven in Figuur 3-4. De analyse in HKV (2007) geeft geen inzicht in de ruimtelijke correlatie van de fout in 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 is verondersteld. Hierbij wordt voor elke cel per tijdstip een fout in de neerslag bepaald door een trekking uit de normale 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 voor het gehele modelgebied een afwijking (onzekerheid) bepaald door een trekking uit de normale verdelingen.

FIGUUR 3-3 STANDAARDDEVIATIE EN GEMIDDELDE VAN DE KANSVERDELING VAN DE NEERSLAG ALS FUNCTIE VAN DE GEREГИSTREERDE NEERSLAG (DE GESTIPPTELDE LIJN IS DE GESCHATTE LINEAIRE RELATIE)



FIGUUR 3-4 RESOLUTIE VAN DE GEBRUIKTE NEERSLAGRANDVOORWAARDE: PER CEL VAN 5X5 KM EN PER TIJDSTIP IS EEN NEERSLAGHOEVEELHEID BEPAALD.



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

3.5 UITWERKING OVERIGE RANDVOORWAARDEN

De overige randvoorwaarden worden tijdens kalibreren niet aangepast. Aan het model opgelegde overige randvoorwaarden zijn de verdamping, beregening, grondwaterrand en grondwateronttrekkingen. Dagwaarden van neerslag, temperatuur, relatieve vochtigheid en straling van meteostation De Bilt en dagwaarden van neerslag van meteostations Doorn, Wijk bij Duurstede en Amerongen zijn gebruikt om voor het gehele modelgebied de potentiële verdamping van gras en bos te berekenen (Hermans et. al., 2004). Gegevens van HDSR zijn gebruikt om per perceel af te leiden hoeveel water wordt gebruikt voor de beregening. Dit water wordt onttrokken aan het eerste watervoerend pakket en het oppervlaktewater. De grondwaterrand bestaat uit stijghoogten die bepaald zijn met behulp van een oud SIMGRO model van een groter gebied (Wendt, 1998). De grondwateronttrekkingen zijn ontleend aan het provinciale grondwaterregister van de Provincie Utrecht. In model zijn waarden opgenomen voor de periode 1989-2000. In Hermans et. al.(2004) is per jaar aangegeven welke hoeveelheden (7-9 milj m³ per jaar) aan het model worden onttrokken.

3.6 UITWERKING BESCHIKBARE MEETGEGEVENS

In deze studie worden *fictieve* metingen van afvoeren en grondwaterstanden gebruikt om het model te kalibreren. Deze *fictieve* meetgegevens worden met het uitgangsmodel berekend. De modeluitkomsten op verschillende locaties en tijdstippen worden enigszins gewijzigd door er een willekeurige hoeveelheid bij op of af te tellen. Met andere woorden: toevoegen van ruis aan de uitgelezen modeluitkomsten. In principe kan met het model op oneindig veel locaties metingen worden gegenereerd. Echter om de datadichtheid van de kalibratie in deze studie gelijk te houden aan de dichtheid in gangbare modelkalibraties, wordt het SIMGRO model afgeregeld op basis van dagafvoeren op negen locaties en tweewekelijks waargenomen grondwaterstanden op 15 locaties.

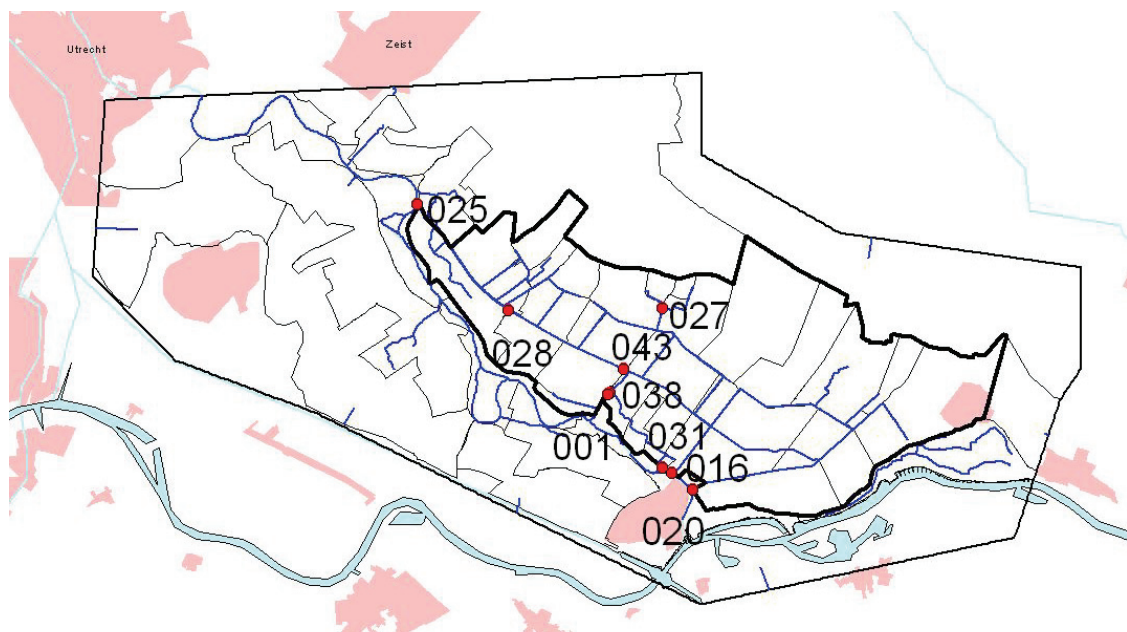
In totaal bevat het stroomgebied metingen bij negen stuwen (Figuur 3-5a). Bij de stuwen zijn de klepstand, de benedenstroomse waterstand en de bovenstroomse waterstand gemeten in gemiddelde dagwaarden. De daggemiddelde afvoeren zijn door HDSR berekend uit deze gemeten waarden (Hermans et. al. 2004). In paragraaf 2.3.6 bleek dat het huidige model de afvoer simuleert met een gemiddelde afwijking van 0,15 m³/s en een gemiddelde spreiding van de afwijking van ongeveer 1 m³/s. De toe te voegen ruis wordt getrokken uit een lognormale verdeling met verwachtingswaarde gelijk aan de gemiddelde afwijking en een variantie gelijk aan de gemiddelde spreiding.

In totaal bevat het stroomgebied metingen bij meer dan 15 grondwaterstations (Figuur 3-5b). Vaak is echter niet voor alle stations een betrouwbare reeks beschikbaar. Uit ervaring blijkt dat een dichtheid van 15 stations verspreid in het gebied redelijk is. In paragraaf 2.3.6 bleek dat het huidige model de grondwaterstand simuleert met een gemiddelde afwijking van 5 cm en een gemiddelde spreiding van de afwijking van ongeveer 22 cm. De toe te voegen ruis

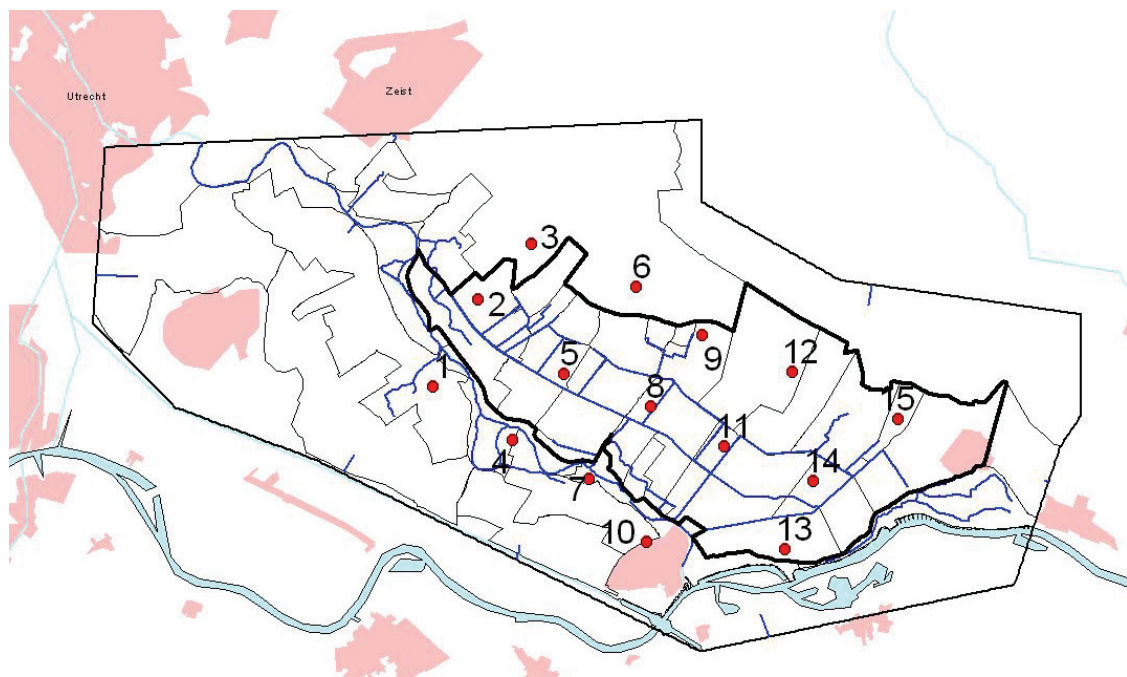
wordt getrokken uit een normale verdeling met verwachtingswaarde gelijk aan de gemiddelde afwijking en een variantie gelijk aan de gemiddelde spreiding.

Met de a priori waarschijnlijkheid van de neerslag (voorgaande paragraaf) is een neerslagreeks gegenereerd door per tijdstip en locatie een waarde uit de normale verdelingen te trekken. Vervolgens is met deze gebiedsneerslag het model doorgerekend. Aan de modeluitkomsten van deze berekening is vervolgens ruis toegevoegd. Per tijdstip en locatie is een waarde uit de voorgestelde verdelingen getrokken en aan de berekende waarde toegevoegd.

FIGUUR 3-5 LOCATIES VAN AFVOER- EN GRONDWATERSTANDMETINGEN



(A) LOCATIES AFVOERMETINGEN



(B) LOCATIES GRONDWATERSTANDMETINGEN

4

KALIBRATIE RESULTAAT

4.1 INLEIDING

Het resultaat van de kalibratie is een verzameling van doorgerekende combinaties van neerslaghoeveelheden 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 eenvoudig te turfен kunnen histogrammen worden opgesteld van de neerslag, de parameters en de model- en meetfout. In dit hoofdstuk zijn de histogrammen van de parameters, de neerslag, de grondwaterstanden en de afvoeren opgenomen. De histogrammen van paragrafen 4.2, 4.3 en 4.4 geven de resterende spreiding in de waarde van de parameter, neerslag of modeluitkomst als gevolg van parameter-, neerslag-, meet- en modelonzekerheid weer. Figuren in deze paragrafen zijn het resultaat van de kalibratie waarbij de onzekerheid in de neerslag ruimtelijk ongecorrleerd is verondersteld. De histogrammen van paragrafen 4.5, 4.6 en 4.7 geven de resterende spreiding weer na de kalibratie waarbij de onzekerheid in de neerslag ruimtelijk gecorrleerd is verondersteld.

4.2 RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE FOUT IN NEERSLAG

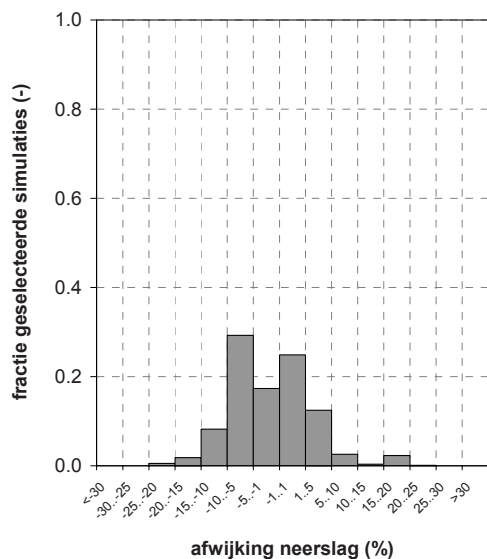
RESTERENDE ONZEKERHEID NEERSLAG

In Figuur 4-1 is het gemiddelde van de resultaten van de kalibratie van de neerslag-fout weergegeven. De resterende onzekerheid in de neerslaggegevens na kalibratie kan worden bepaald door voor elke neerslaglocatie (Figuur 3-4) een histogram te maken van de waarden in de verzameling die gevonden is na de Bayesiaanse analyse. Dit histogram geeft de *a posteriori* (na kalibratie) spreiding in de waarde van de neerslag weer. Het gemiddelde resultaat van de 16 neerslaglocaties is in de figuur weergegeven. In HKV (2007) is de in de literatuur bekende fout in de neerslagmetingen omgewerkt tot een kansverdeling op een neerslagklasse (zie ook paragraaf 3.4). De analyse in HKV (2007) geeft geen inzicht in de ruimtelijke correlatie van de fout in de neerslag, daarom zijn twee *a priori* neerslagonzekerheden uitgewerkt: een waarbij de fout ruimtelijk ongecorrleerd en een waarbij de fout ruimtelijk gecorrleerd wordt verondersteld.

In deze paragraaf worden resultaten getoond van de kalibratie waarbij de fout in de neerslag ruimtelijk ongecorrleerd is verondersteld. Uit de figuur blijkt dat de resterende spreiding in de neerslaghoeveelheid groot is. Na het kalibreren blijkt dat de waarde van de neerslag varieert tussen +/-20% van de gemeten waarde (met de meest waarschijnlijke waarde rond -5%). Dit is een duidelijke afname van de *a priori* onzekerheid. Voorafgaand aan de kalibratie is verondersteld dat bij een waargenomen neerslag van 10 mm de werkelijke neerslag kan variëren tussen 0 en 25 mm. A priori zijn dus afwijkingen verondersteld van -100% tot +150%. Uit het kalibratieresultaat blijkt dat de set gemeten afvoeren en grondwaterstanden in combinatie met het model, er voor zorgt dat de juiste neerslag wordt gevonden. Foutieve neerslagwaarde worden als het ware uit de *a priori* set van mogelijke waarden gefilterd.

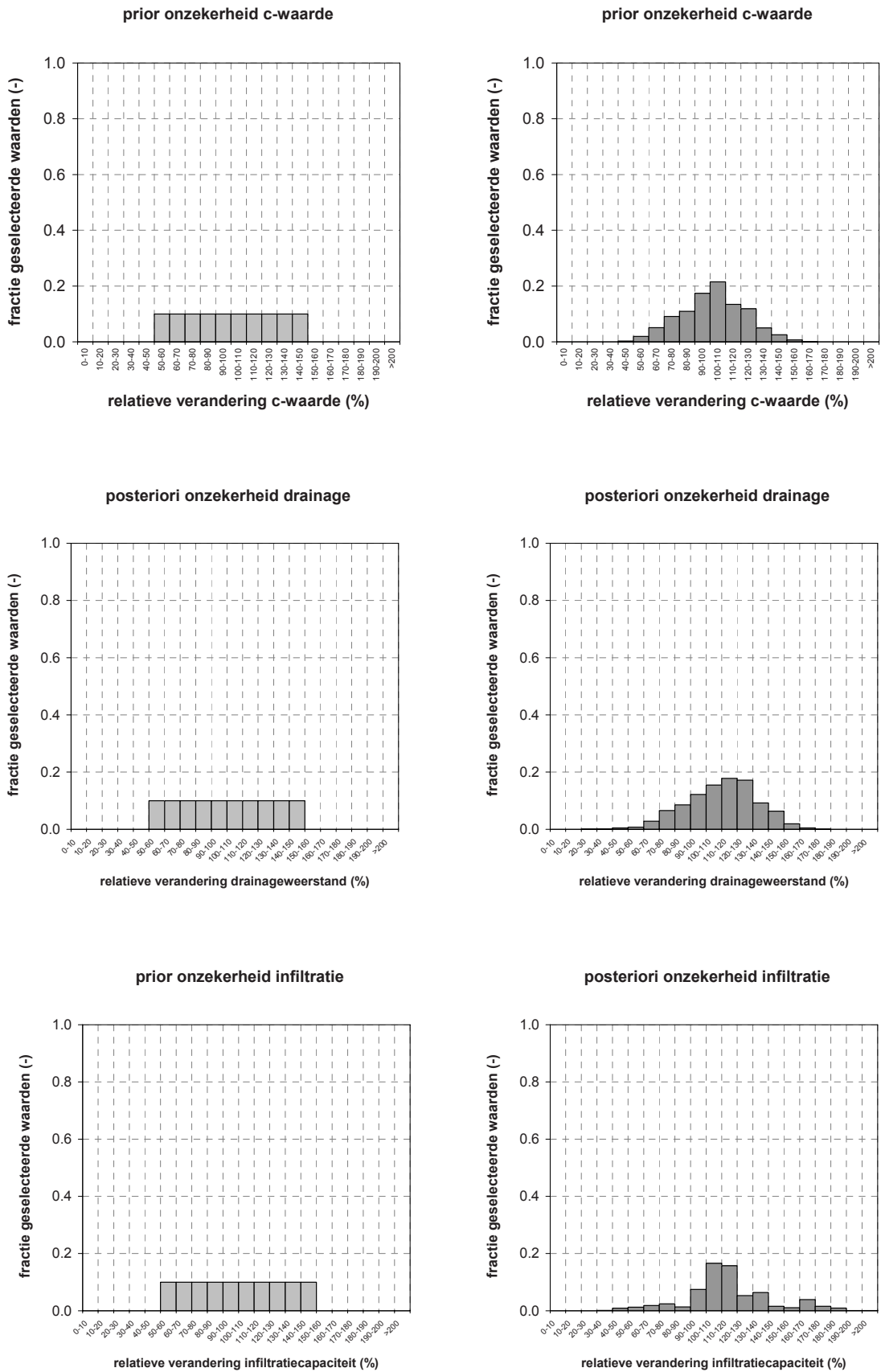
FIGUUR 4-1

KALIBRATIE RESULTAAT (GEMIDDELTE) VAN DE NEERSLAG (BIJ RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)

posteriori onzekerheid neerslag**RESTERENDE ONZEKERHEID KALIBRATIEPARAMETERS**

De mate waarin de onzekerheid in neerslaggegevens van invloed is op de waarde van de modelparameters kan 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 4-2 zijn de gemiddelden van de resultaten van de kalibratie van de parameters weergegeven. Deze histogrammen geven de *a priori* en *a posteriori* spreiding in de waarde van de parameters weer. In de figuur worden resultaten getoond van de kalibratie waarbij de fout in de neerslag ruimtelijk ongecorrleerd is verondersteld. Uit de figuur is op te maken dat de onzekerheid duidelijk afneemt door de kalibratie. Voorafgaand aan de kalibratie is geen duidelijke voorkeur gegeven voor de waarde van een kalibratieparameter. Verondersteld is dat een waarde 50 procent kleiner dan de uitgangswaarde net zo waarschijnlijk is dan 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.

FIGUUR 4-2 KALIBRATIE RESULTAAT (GEMIDDELDE) VAN DE C-WAARDE, DE DRAINAGEWEERSTAND EN DE INFILTRATIECAPACITEIT (BIJ RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)

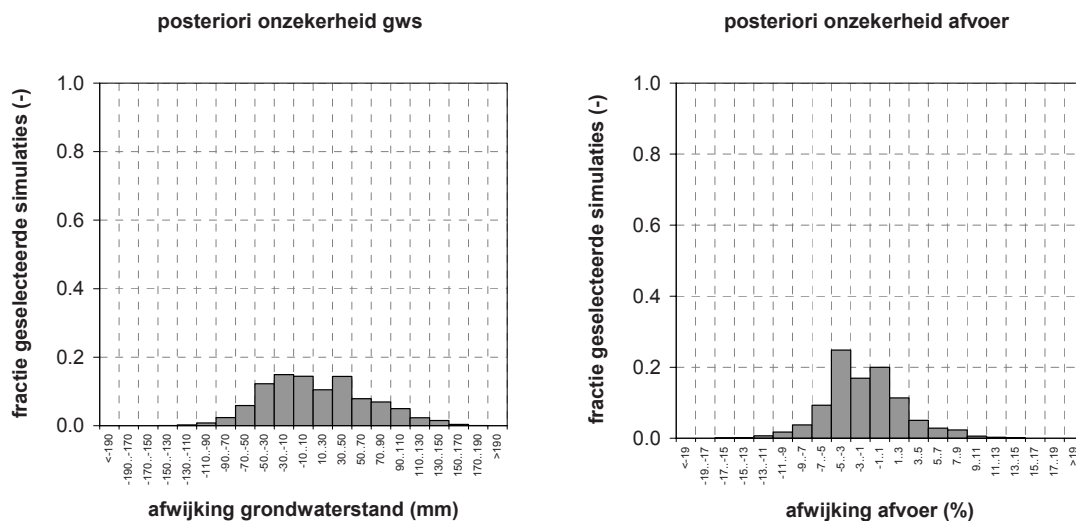


RESTERENDE ONZEKERHEID MODELUITKOMSTEN

De mate waarin de onzekerheid in neerslaggegevens van invloed is op modeluitkomsten voor de huidige situatie kan worden bepaald door voor elk gewenste variabele (bijv. grondwaterstand) een histogram van de modelberekeningen uit de geselecteerde verzameling te maken. Dit histogram geeft de spreiding in de waarde van de variabele als gevolg van (*a posteriori*) neerslag- en parameteronzekerheid weer. In Figuur 4-3 is het gemiddelde van de resultaten van de kalibratie van de grondwaterstanden en afvoeren weergegeven. Tijdens de kalibratie is de onzekerheid in de neerslag ruimtelijk ongecorrleerd verondersteld.

Uit de figuur blijkt dat de resterende spreiding in de grondwaterstand groot is, maar dat het algoritme wel in staat is om een voorkeur te laten blijken 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. Uit de figuur blijkt ook dat de resterende spreiding in de afvoer groot is maar eenduidiger. Na het kalibreren blijkt dat de waarde van de afvoer varieert tussen +/- 10% van de gemeten waarde (met de meest waarschijnlijke waarde rond -3%). Als gevolg van de onzekere neerslag en de ruis die op de metingen is gezet, is het niet mogelijk om een betere fit van het model op de metingen te krijgen. In paragraaf 4.2 is getoond dat de onzekerheid in de neerslag sterk is afgenomen, echter de resterende mismatch tussen modelvergelijking, neerslagwaarden en meetwaarden zorgt er voor dat na de Bayesiaanse analyse een resterende onzekerheid met betrekking tot de modeluitkomsten en de parameterwaarden (paragraaf 4.3) blijft bestaan. Op basis van de beschikbare data zijn we niet in staat om de modeluitkomsten en de parameterwaarden nauwkeuriger te voorspellen.

FIGUUR 4-3 KALIBRATIE RESULTAAT (GEMIDDELTE) VAN DE GRONDWATERSTANDEN EN AFVOEREN (BIJ RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)

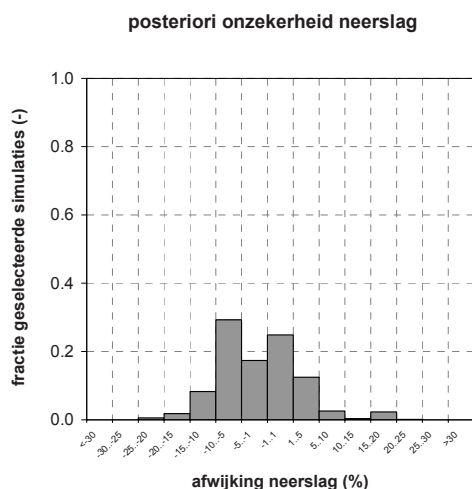


4.3 RUIMTELIJK GECORRELEERDE FOUT IN NEERSLAG

RESTERENDE ONZEKERHEID NEERSLAG

Zoals eerder beschreven is de in de literatuur bekende fout in de neerslagmetingen omgewerkt tot een kansverdeling op een neerslagklasse (zie ook paragraaf 3.4). In deze paragraaf worden resultaten getoond van de kalibratie waarbij de fout in de neerslag ruimtelijk gecorreleerd is verondersteld. In Figuur 4-4 is het gemiddelde van de resultaten van de kalibratie van de neerslagfout weergegeven. Tijdens de kalibratie is de onzekerheid in de neerslag ruimtelijk gecorreleerd verondersteld. Uit 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%).

FIGUUR 4-4 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE NEERSLAG (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)

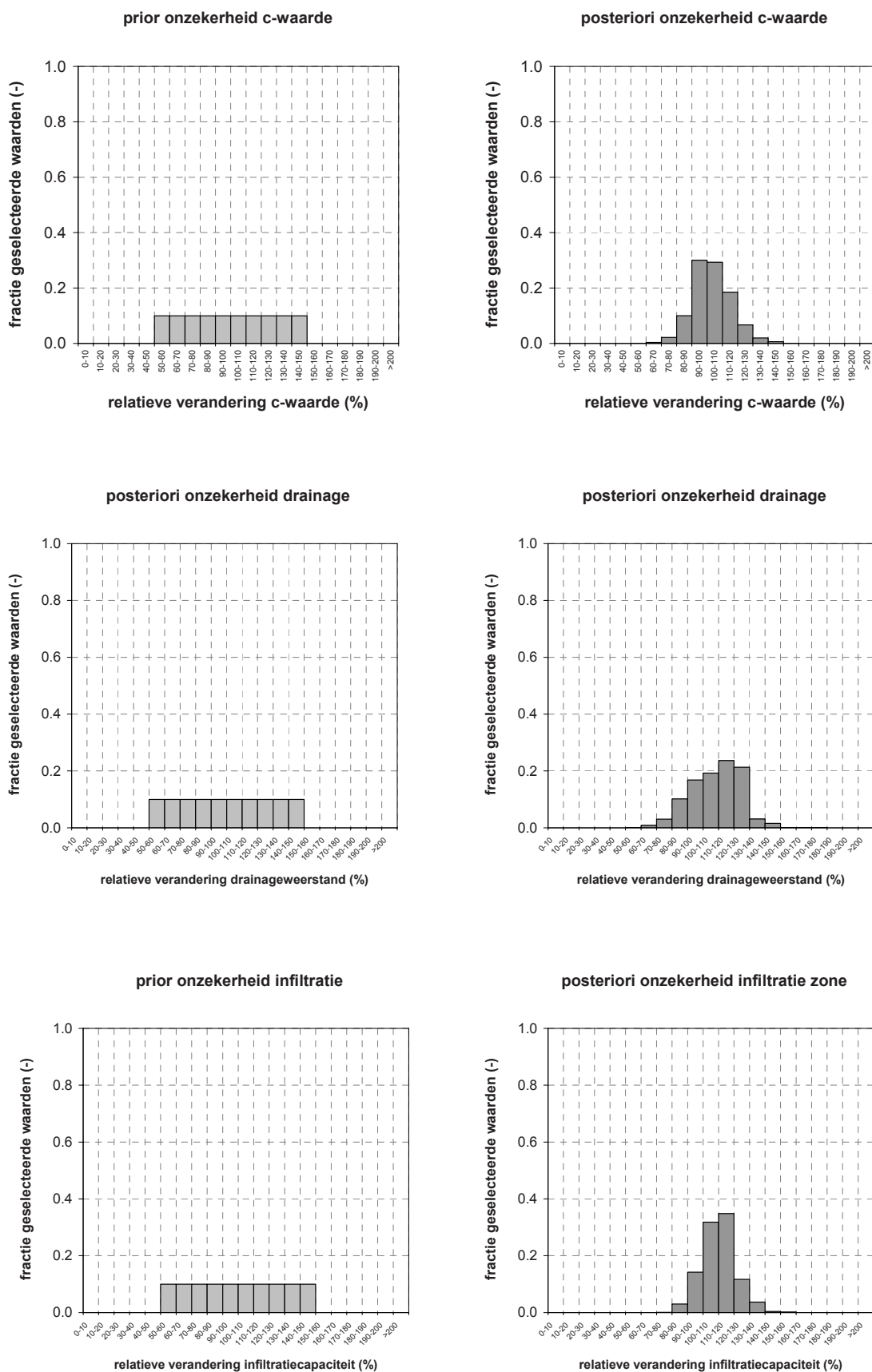


Dit is een kleine verbetering ten opzichte de kalibratie waarbij de fout in de neerslag ruimtelijk ongecorrleerd werd verondersteld. Ondanks de sterke afname in de *a priori* onzekerheid, is het niet mogelijk om de resterende onzekerheid verder te reduceren. Opgemerkt wordt dat de verschil tussen *a 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 (paragraaf 4.2). Door de fout ruimtelijk gecorreleerd te veronderstellen, kan de *a posteriori* onzekerheid verder afnemen naar +/- 15%. Uit dit resultaat blijkt nogmaals dat de set gemeten afvoeren en grondwaterstanden in combinatie met het model, er voor zorgt dat min of meer de juiste neerslag wordt gevonden. Foutieve neerslagwaarde worden als het ware uit de *a priori* set van mogelijke waarden gefilterd. Een sterke afname in de *a priori* onzekerheid van de neerslagmeting, 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 worden bepaald door (zoals eerder gesteld) voor elke parameter een histogram te maken van de waarden in de verzameling die gevonden is na de Bayesiaanse analyse. In Figuur 4-5 zijn de gemiddelden van de parameters voor en na de kalibratie met een ruimtelijk gecorreleerde neerslagfout weergegeven.

FIGUUR 4-5 KALIBRATIE RESULTAAT (GEMIDDELTE) VAN DE C-WAARDE, DE DRAINAGEWEERSTAND EN DE INFILTRATIECAPACITEIT (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)

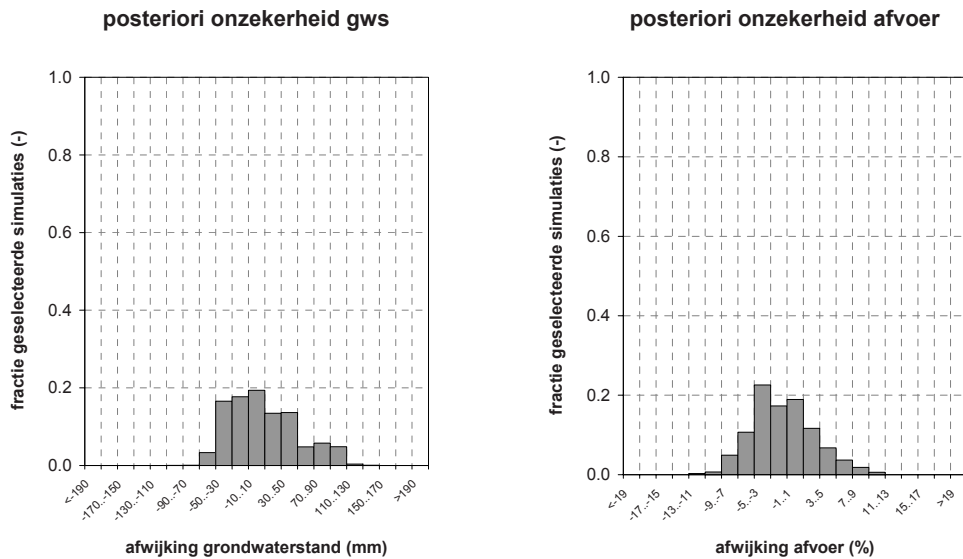


Uit de figuur is op te maken dat de onzekerheid duidelijk afneemt door de kalibratie. Voorafgaand aan de kalibratie is verondersteld dat een waarde 50 procent kleiner dan de uitgangswaarde net zo waarschijnlijk is dan een waarde 150 procent groter. Na kalibratie, blijkt een duidelijke voorkeur voor een 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. De spreiding van de *a posteriori* set is afgenomen ten opzichte van de resultaten uit paragraaf 4.3. Door een geringere spreiding in neerslagwaarden, kunnen we beter de werkelijke waarde van de parameters te 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, neerslagwaarden en meetwaarden zorgt er voor dat de werkelijke parameterwaarden niet nauwkeuriger kan worden geïdentificeerd

RESTERENDE ONZEKERHEID MODELUITKOMSTEN

In Figuur 4-6 is het gemiddelde van de resulterende grondwaterstanden en afvoeren van de kalibratie met een ruimtelijk gecorrleerde 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 gepiekerd.

FIGUUR 4-6 KALIBRATIE RESULTAAT (GEMIDDELDE) VAN DE GRONDWATERSTANDEN EN AFVOEREN (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



Uit de figuur blijkt verder dat de resterende spreiding in de afvoer geringer is dan het resultaat in paragraaf 4.4. Na het kalibreren blijkt dat de waarde van de afvoer varieert tussen $\pm 10\%$ van de gemeten waarde. Ook dit histogram van de afvoer heeft een hogere top dan het histogram uit paragraaf 4.4. Door de geringere spreiding van de *a priori* neerslagonzekerheid is het algoritme beter in staat om de juiste meetwaarden te voorspellen. Omdat de fit tussen model en meting overeenkomt (slechts een geringe verbetering) met de resultaten van paragraaf 4.4 kan worden geconcludeerd dat op basis van de beschikbare data we niet in staat zijn om de modeluitkomsten en de parameterwaarden nauwkeuriger te voorspellen.

5

EFFECT MAATREGELLEN

5.1 INLEIDING

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* neerslagen parameteronzekerheid worden weergegeven. De resterende spreiding is gebaseerd op de resultaten van de kalibratie waarbij de onzekerheid in de neerslag ruimtelijk gecorreleerd is verondersteld.

Paragraaf 5.2 beschrijft kort de methodiek die gebruikt is. In paragraaf 5.3 en 5.4 van dit hoofdstuk worden de resultaten van respectievelijk scenario Vasthouden en Afvoeren toegelicht.

5.2 METHODIEK

TYPE MAATREGELLEN

In het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW, 2003) hebben de waterschappen zich verplicht om hun gebied te toetsen aan zogenaamde ‘werknormen’ en de wateropgave inzichtelijk te maken. Deze normen zijn gebaseerd op een economische afweging (kosten-batenanalyse) en een inschatting van de maatschappelijke aanvaardbaarheid van de kans op wateroverlast. Daar waar de normen worden overschreden is sprake van een knelpunt. Bij het nemen van maatregelen om knelpunten op te lossen wordt meestal de trits Vasthouden, Bergen en Afvoeren gehanteerd.

Vasthouden

Door het water binnen een beheersgebied slim te verdelen kan beter aan de normen worden voldaan. Dit betekent dat de bergingsruimte in peilvakken binnen het gebied wordt benut om peilvakken die niet aan de normen voldoen te ontlasten. Hierdoor ontstaat echter wel de zogenaamde normopvulling, waarbij de deelgebieden met een (te) hoog beschermingsniveau worden benadeeld ten gunste van deelgebieden met een laag beschermingsniveau. Implementatie van deze maatregel in de praktijk kan, afhankelijk van de situatie relatief eenvoudig zijn (beperken afvoercapaciteit van een stuw) of ingewikkeld zijn (automatiseren van meerdere stuwen op basis van neerslagvoorspelling). De hier geïmplementeerde maatregel bestaat uit het beperken van afvoercapaciteit van stuwen waarachter peilvakken liggen met voornamelijk natuur als gebruik.

Bergen

Door het overlastveroorzakende water binnen het gebied te bergen, kan beter aan de normen worden voldaan. Deze bergingsruimte wordt doorgaans gecreëerd door het oppervlak open water te vergroten. De te creëren bergingsruimte in een peilvak is daartoe gelijkgesteld aan de wateropgave voor het betreffende peilvak. Het effect van de maatregel bergen is hier niet verder uitgewerkt.

Afvoeren

Door het water sneller uit het gebied te transporteren, kan beter aan de normen worden voldaan. Dit betekent dat de afvoercapaciteit van watergangen en stuwen wordt vergroot om peilvakken die niet aan de normen voldoen te ontlasten. Ook operationele maatregelen als voormalen of inzetten van noodbemaling zijn mogelijk. Hierbij moet worden opgelet dat versneld afvoeren bij bovenstroomse peilvakken niet leidt tot benedenstroomse overlast. De hier geïmplementeerde maatregel bestaat uit het vergroten van de afvoercapaciteit van de primaire afwateringsweteringen en de stuwen in deze waterlopen.

REKENPLAN

In de onderhavige studie is een Bayesiaanse analyse gebruikt voor het bepalen van de onzekerheid in modeluitkomsten met en zonder maatregelen. Bij deze analyse wordt verondersteld dat de onzekerheid in statistische termen kan worden gekarakteriseerd en wel in de vorm van kansverdelingen (zie paragraaf 4.5, 4.6 en 4.7). Verschillende realisaties worden random uit deze verdelingen getrokken en voor elke serie trekkingen worden de bijbehorende modeluitkomsten berekend. In dit hoofdstuk worden de realisaties van parameter waarden en neerslaghoeveelheden gebruikt die bij de kalibratie zijn geselecteerd. Met andere woorden de histogrammen uit paragraaf 4.5 en 4.6 beschrijven de gebruikte combinaties van parameters en neerslagrandvoorwaarde. De histogrammen van paragraaf 4.7 beschrijven derhalve de onzekerheid in modeluitkomsten zonder maatregelen. Voor de maatregel Vasthouden en de maatregel Afvoeren zijn op basis van de uitgangssituatie twee verschillende modellen gemaakt. Alle beschikbare realisatie van parameter waarden en neerslaghoeveelheden zijn met deze aangepaste modellen doorgerekend. Het rekenplan van deze simulaties bestaat uit de volgende zes stappen:

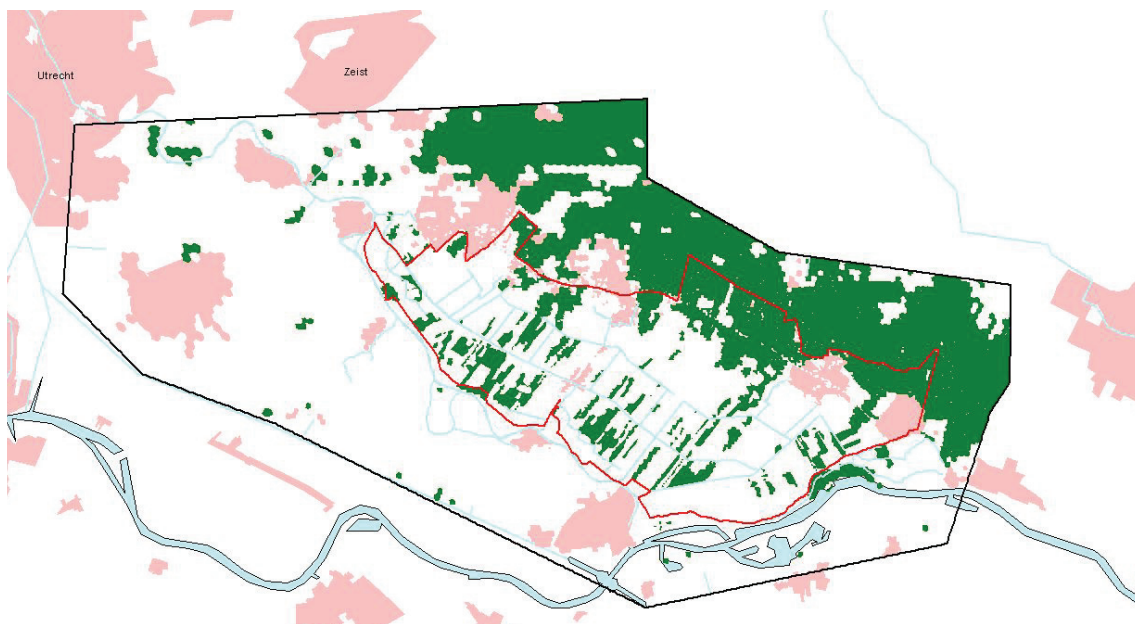
1. Neem voor alle kalibratieparameters (c-waarde, drainageweerstand en infiltratiecapaciteit) en neerslaghoeveelheden een combinatie uit de gekalibreerde verzameling, waarbij rekening wordt gehouden met afhankelijkheden. Dezelfde combinatie wordt tweemaal toegepast: eenmaal voor de maatregel Vasthouden en eenmaal de maatregel Afvoeren (uitgangssituatie is al doorgerekend in de kalibratie).
2. Gebruik voor beide toekomstige situaties de geselecteerde combinatie om met SIMGRO de bijbehorende afvoeren en grondwaterstanden te berekenen. Dit resulteert in twee sets van modeluitkomsten: voor elke situatie één.
3. Bepaal voor elke kalibratie locatie het verschil van de grondwaterstand of afvoer voor de uitgangssituatie en de grondwaterstand of afvoer voor de aangepaste situatie met maatregel. Dit resulteert in één set met verschillen voor alle locaties.
4. Herhaal de eerste tot en met de derde stap voor alle combinatie uit de gekalibreerde verzameling parameterwaarden en neerslaghoeveelheden. Dit komt dus neer op een Monte-Carlo-simulatie met als resultaat trekkingen van grondwater-/afvoerverschillen bij een maatregel.
5. Stel een histogram op van grondwater-/afvoerverschillen voor elke locatie.

De resultaten voor de maatregel Vasthouden staan in de volgende paragraaf, in de daarop volgende paragraaf staan de resultaten voor de maatregel Afvoeren.

5.3 EFFECT VAN MAATREGEL VASTHOUDEN

In de maatregel Vasthouden worden alle natuurgebieden binnen het studie gebied waterhuishoudkundig geïsoleerd. In Figuur 5-1 zijn de locaties van natuur in het studie gebied (rode polygoon) met groene vlakken weergegeven. Op basis van deze figuur zijn de peilvakken vastgesteld waar binnen de natuurgebieden zijn opgenomen. Deze peilvakken 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.

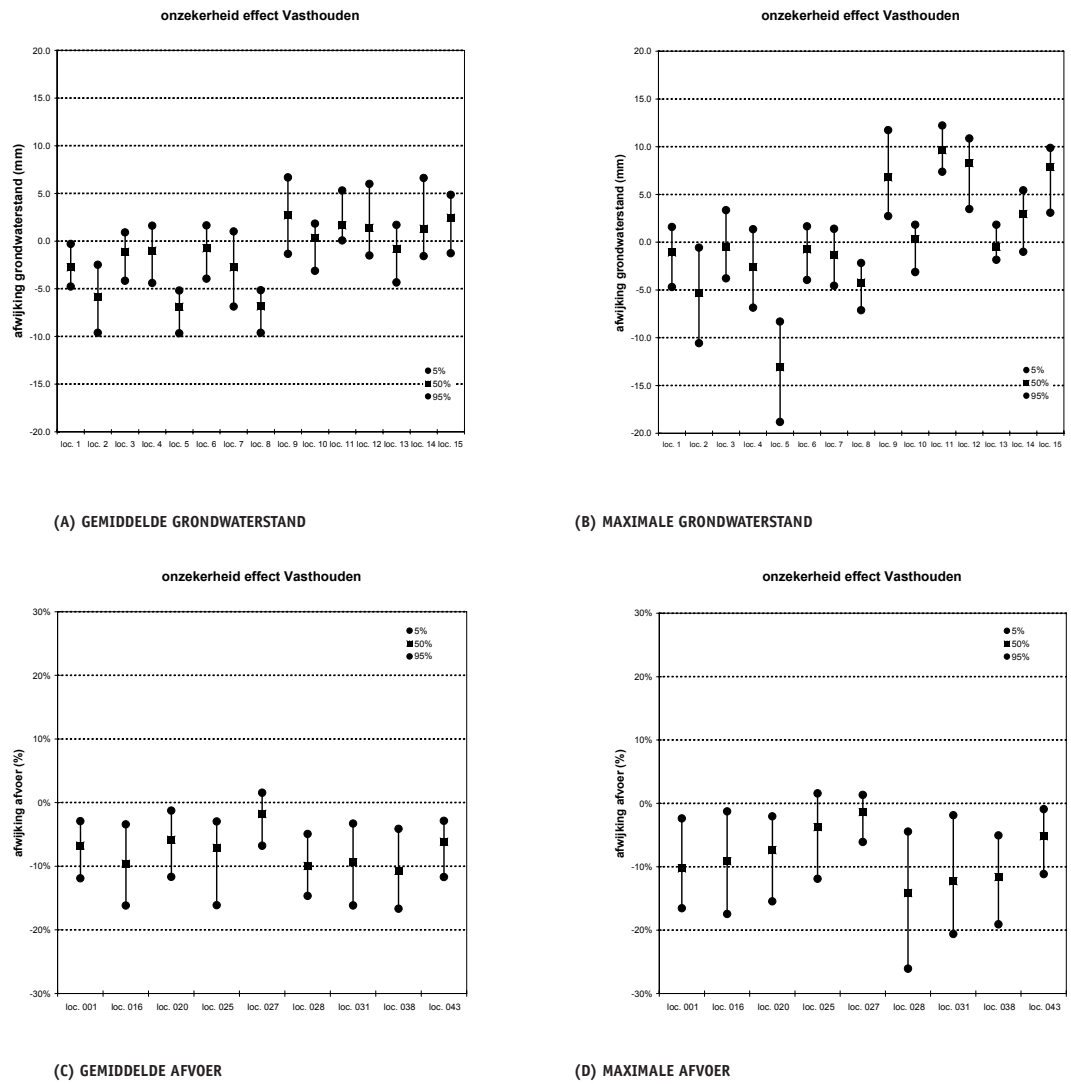
FIGUUR 5-1 LOCATIE NATUURGEBIEDEN (GROENE VLAK) BINNEN HET MODELGEBIED



In Figuur 5-2 is het effect van de maatregel 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 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 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.

FIGUUR 5-2

EFFECT MAATREGEL VASTHOUDEN OP DE GRONDWATERSTANDEN EN AFVOEREN - 50% EN 75% PERCENTIEL - BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT

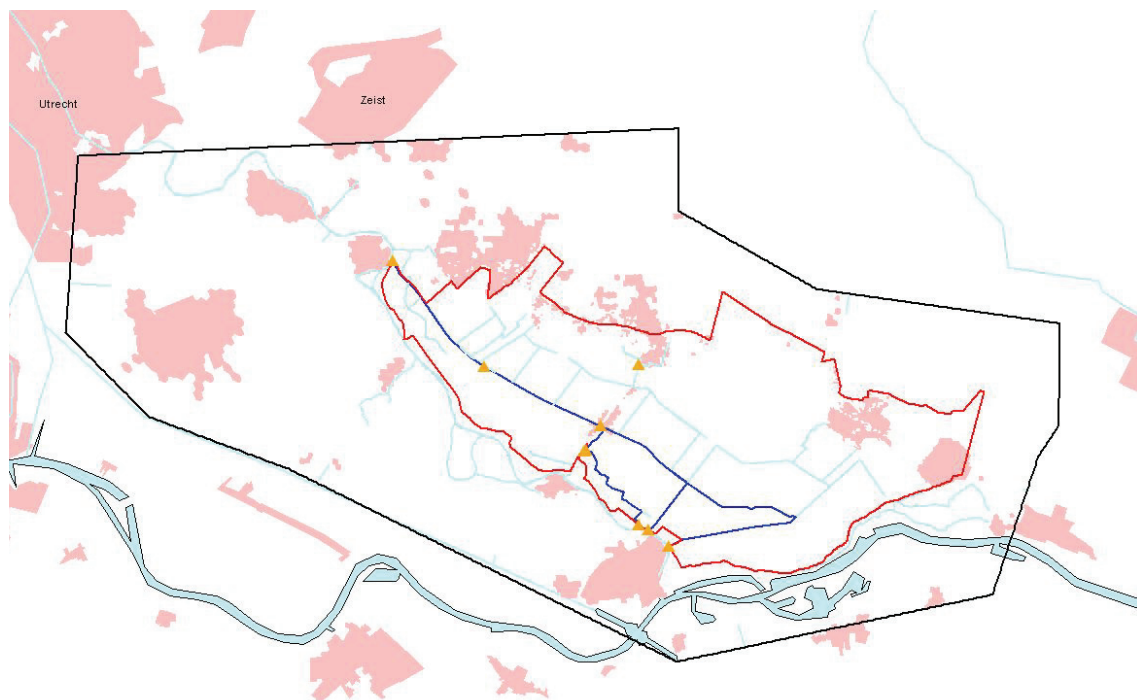


De gemiddelde afvoer neemt met 5 tot 10 procent af. De bandbreedte van deze afname is gelijk aan 2 tot 15 procent, waardoor het effect van de maatregel gelijk is aan een zeer geringe wijziging (-2%) of een aanzienlijke wijziging (-15%) van de gemiddelde afvoer. De maximale afvoeren nemen met 5 tot 15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

5.4 EFFECT VAN MAATREGEL AFVOEREN

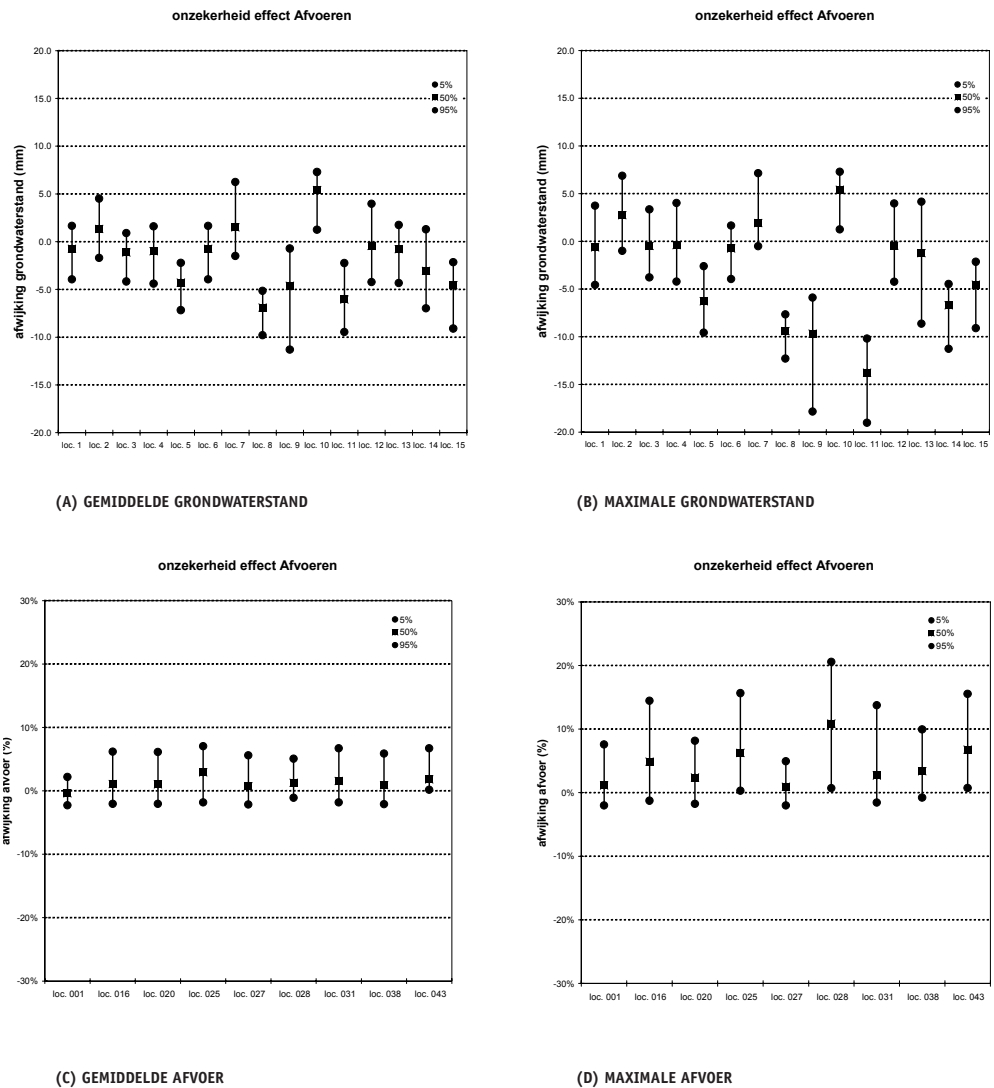
In de maatregel Afvoeren worden de primaire afwateringsweteringen binnen het studiegebied verbreed. In Figuur 5-3 zijn enkele van de primaire afwateringsweteringen in het studiegebied (rode polygoon) met donkerblauwe lijn weergegeven. Het talud (flauwer) en de bodembreedte van deze afwateringsweteringen 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 5-3 LOCATIE PRIMAIRE AFWATERINGSWETERINGEN (DONKERBLAUWE LIJNEN) EN STUWEN (ORANGE DRIEHOEKEN) BINNEN HET MODELGEBIED



In Figuur 5-2 is het effect van de maatregel Afvoeren 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. 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.

FIGUUR 5-4 EFFECT MAATREGEL AFVOEREN OP DE GRONDWATERSTANDEN EN AFVOEREN - 50% EN 75% PERCENTIEL - BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT



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%).

6

CONCLUSIES

6.1 RESULTAAT KALIBRATIE

De onzekerheid in de neerslag beïnvloedde 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.
- 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% 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, 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.
- De resterende onzekerheid over de werkelijke waarde van de parameters en van de neerslaghoeveelheid wordt hoogst waarschijnlijk veroorzaakt wordt door de ruis die op de metingen is gezet. De hierdoor veroorzaakte mismatch tussen modelvergelijking, neerslagwaarden en meetwaarden zorgt er voor dat de werkelijke parameterwaarden niet nauwkeuriger kan worden geïdentificeerd.

6.2 EFFECT MAATREGELEN

In de maatregel Vasthouden worden alle natuurgebieden binnen het studie gebied waterhuishoudkundig geïsoleerd. Deze peilvakken 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.

- De onzekerheid over het effect van deze maatregel is groter bij de maximale dan bij 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.

In de maatregel Afvoeren worden de primaire afwateringsweteringen binnen het studiegebied verbreed. 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.

- Ook bij deze maatregel is de onzekerheid over het effect van de maatregel groter bij de maximale dan bij de gemiddelde waarden en is de bandbreedte van het effect gelijk aan of twee keer het gemiddelde effect van de maatregel.

Op basis van de analyse kan worden geconcludeerd dat door de onzekerheid in neerslag, parameters en metingen het niet mogelijk is duidelijk het effect van de maatregel te bepalen, dit effect kan zeer gering zijn (ondergrens) of een aanzienlijke verandering van de maximale afvoer dan wel grondwaterstand.

7

GEBRUIKTE LITERATUUR

Ad hoc groep Verdamping, *Herziening van de berekening van gewasverdamping in het hydrologische model GELGAM*. Begeleidingsgroep GELGAM, Provincie Gelderland, Dienst Waterbeheer, Arnhem, 1984.

Chab, E.H. en J. van Noortwijk (2002), *Bayesiaanse statistiek voor de analyse van extreme waarden*. RIZA-rapport 2002.006, Directoraat Generaal Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), Lelystad.

Ernst L.F. *Drainage of undulating sandy soils with high groundwater tables*. Journal of hydrology 39 (3/4): blz. 1-50, 1978.

Feddes R.A., *Crop factors in relation to Makkink reference crop-evapotranspiration*. Commissie hydrologisch onderzoek TNO, Den Haag, 1987.

Hermans, A.G.M., P.E.V. van Walsum, J. Runhaar en P.J.T. van Bakel, *Duurzaam waterbeheer, Fase 1: Modelbouw, calibratie en bepaling van het Actueel Grond- en Oppervlaktewaterregime*. Alterra rapport 914, Wageningen, 2004.

HKV [LIJN IN WATER](#) en Alterra, *Watersysteemanalyse Centrale Vallei*, In opdracht van Waterschap Vallei & Eem, Lelystad, 2006.

HKV [LIJN IN WATER](#), *Neerslagonzekeerheid, Literatuuronderzoek naar de fout in de neerslag*, In opdracht van STOWA, Lelystad, 2007.

HKV [LIJN IN WATER](#), *Neerslagonzekeerheid, Beschrijving kalibratie algoritme*, In opdracht van STOWA, Lelystad, 2008.

Holleman I. (2006). *Bias adjustment of radar-based 3-hour precipitation accumulations*. Technical Report, KNMI TR-290, 2006.

Hooghart J.C., *Verdampingscijfers: Van Penman naar Makkink*, Waterschapsbelangen, 72e jaargang nr. 8: blz. 232-235.

Kavetski, D., S. W. Franks and G. Kuczera (2002) *Confronting input uncertainty in environmental modeling*. 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.

Minnema B., *Modelleeromgeving Veluwe*. TNO-NITG, Rapport 02-073-B, Utrecht, 2002.

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, 2003.

Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling en B.P. Fannery (1992), *Numerical recipes in Fortran 77*, 2nd ed., University Press, Cambridge.

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.

Wendt T., *Cwater Rijk Utrecht, Effecten van toekomstscenario's op het grondwater in Utrecht*, Grontmij, Houten, 1998.

Wesseling J.G., *CAPSEV; steady state moisture flow theory; program description; user manual*. Staring Centre, Wageningen, 1991.

Wösten J.H.M., *Waterretentie- en doorlatendheidskarakteristieken van boven- en ondergronden in Nederland: De Staringreeks*, Alterra, Wageningen, 2001.

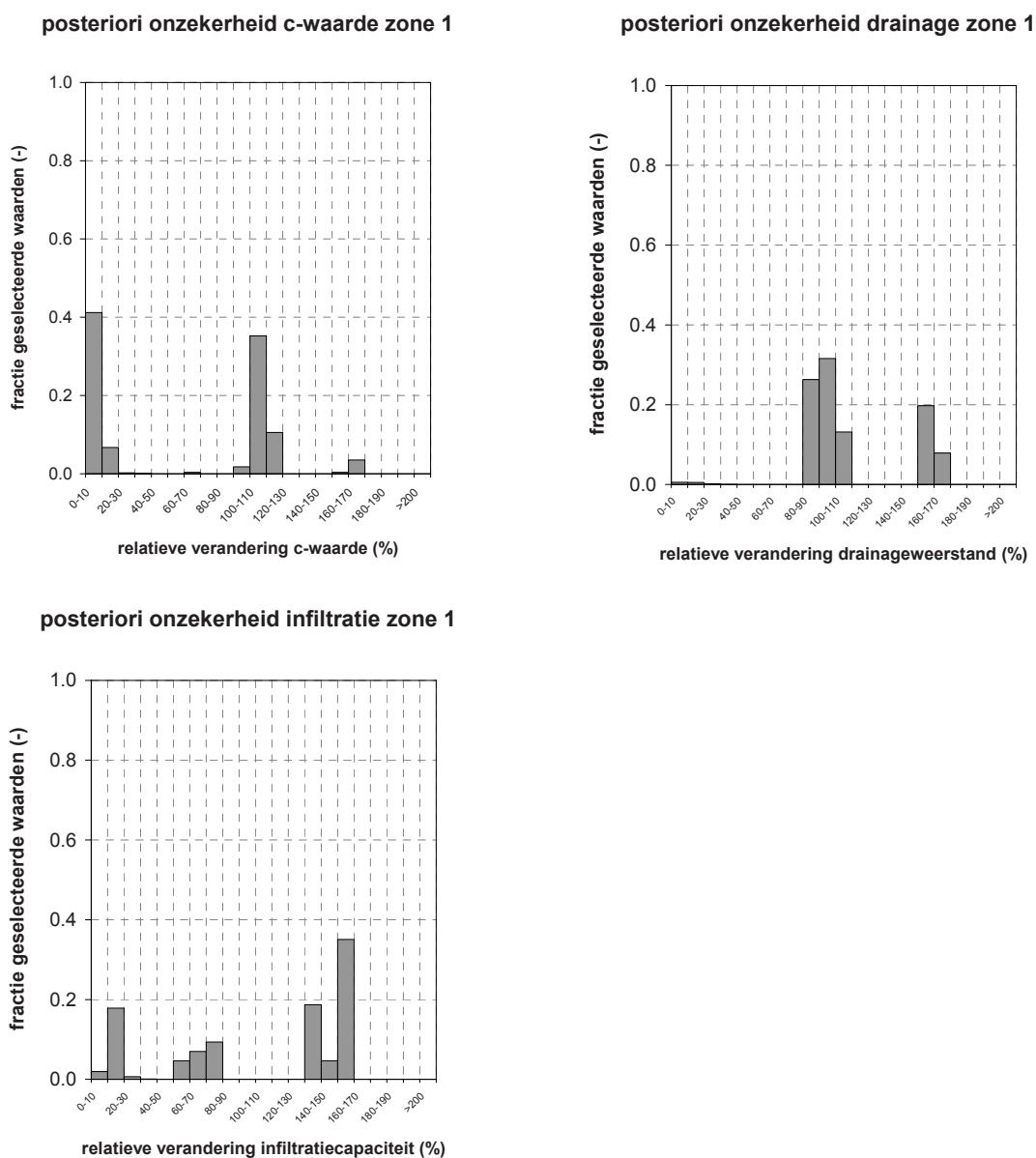
BIJLAGE A

RESULTAAT PARAMETERS VOOR RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE FOUT

RESULTAAT ZONE 1

In Figuur 9-1 zijn de resultaten van de kalibratie van parameters c-waarde, drainageweerstand en infiltratiecapaciteit in zone 1 weergegeven. Uit de figuren blijkt dat de resterende spreiding in de kalibratieparameters groot is. Na het kalibreren is de waarde in het uitgangsmodel waarschijnlijk, echter ook 1,6 keer zo groot is een waarschijnlijke waarde.

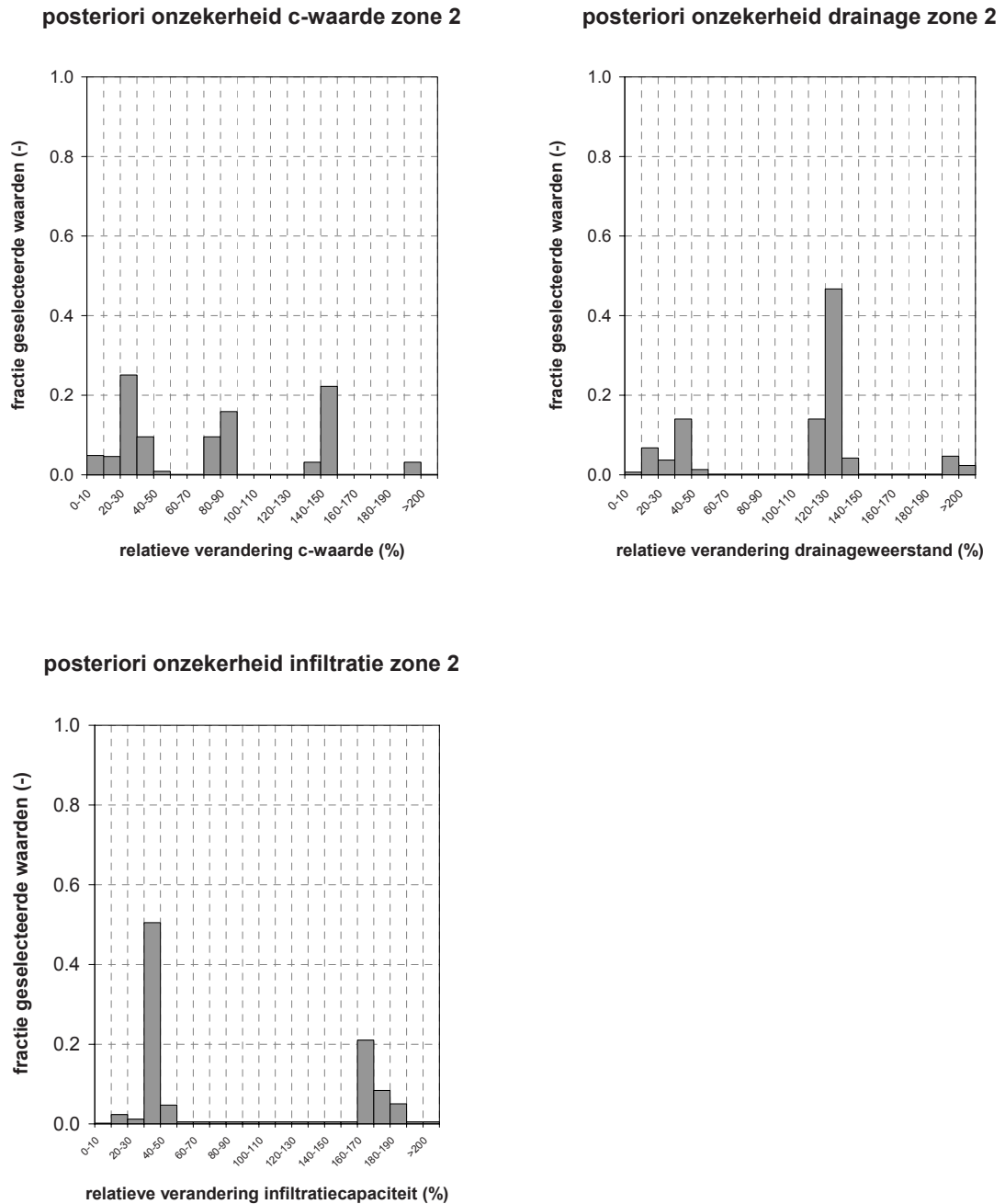
FIGUUR 9-1 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE PARAMETERS VAN ZONE 1 (BIJ RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



RESULTAAT ZONE 2

In Figuur 9-2 zijn de resultaten van de kalibratie van parameters c-waarde, drainageweerstand en infiltratiecapaciteit in zone 2 weergegeven. Ook bij deze zone blijft de spreiding van de waarschijnlijke waarden groot na de kalibratie met ruimtelijk ongecorreleerde onzekerheid in de neerslag.

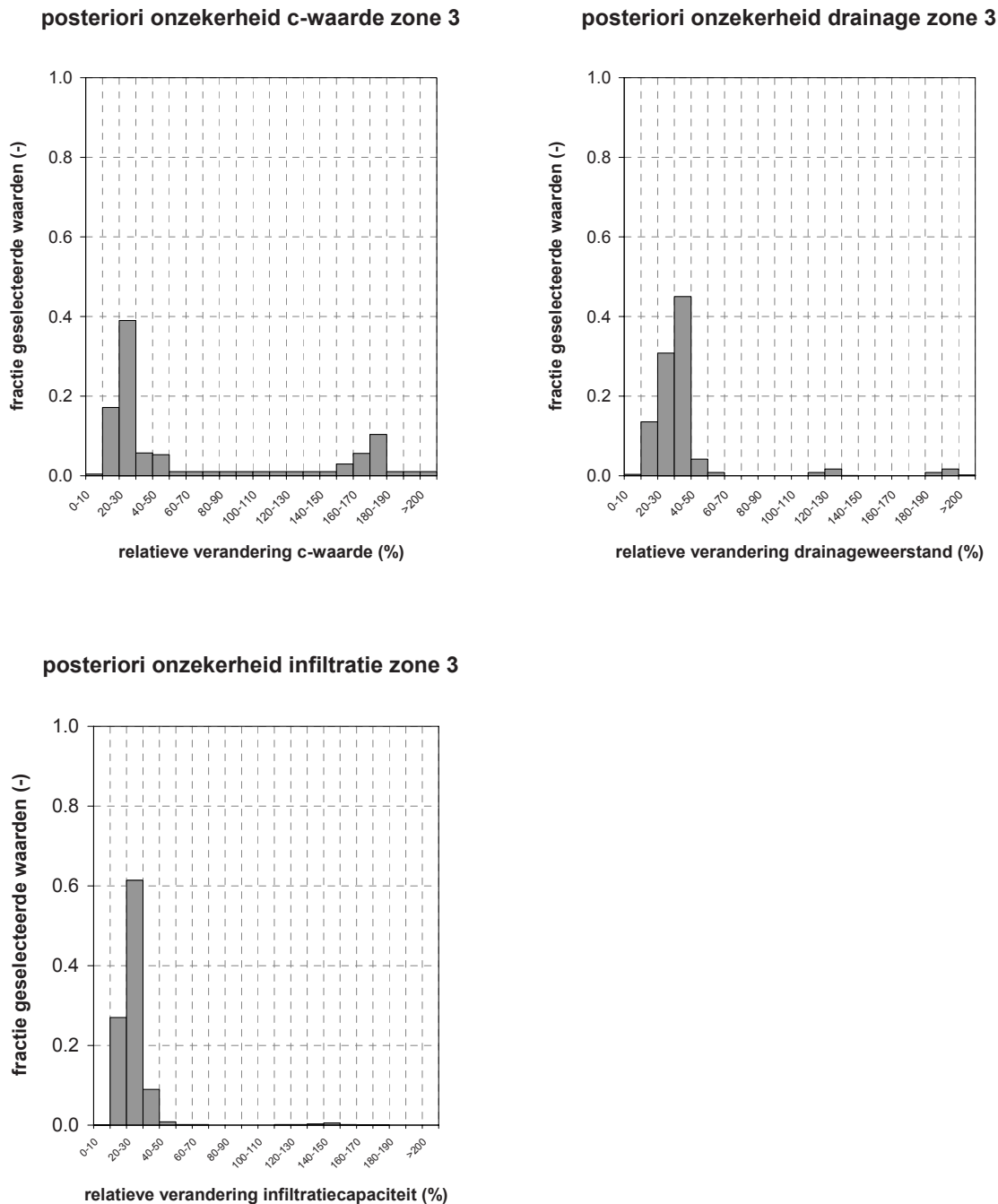
FIGUUR 9-2 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE PARAMETERS VAN ZONE 2 (BIJ RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



RESULTAAT ZONE 3

In Figuur 9-3 zijn de resultaten van de kalibratie van parameters c-waarde, drainageweerstand en infiltratiecapaciteit in zone 3 weergegeven. Het resultaat is overeenkomstig met het resultaat van zone 1 en 2. De resterende spreiding is erg groot.

FIGUUR 9-3 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE PARAMETERS VAN ZONE 3 (BIJ RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



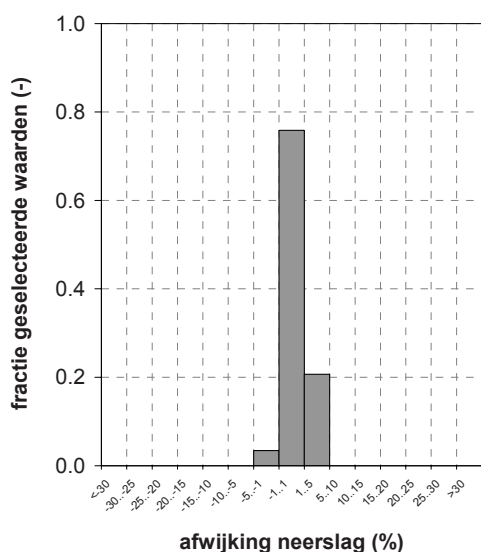
BIJLAGE B

RESULTAAT NEERSLAG VOOR RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE FOUT

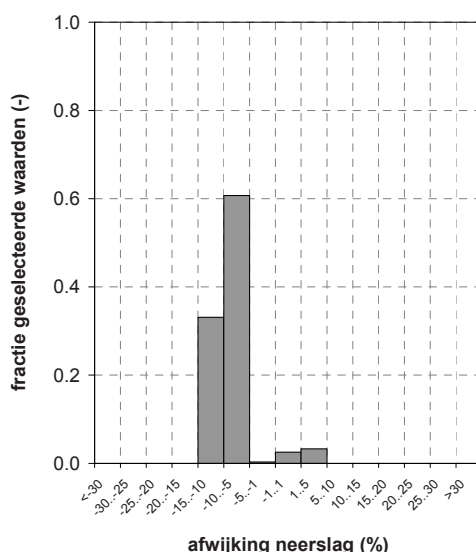
In Figuur 10-1, Figuur 10-2, Figuur 10-3 en Figuur 10-4 zijn de resultaten van de kalibratie van de neerslagfout weergegeven.

FIGUUR 10-1 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE NEERSLAG VAN RADARCELLEN 1, 2, 3 EN 4 (BIJ RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)

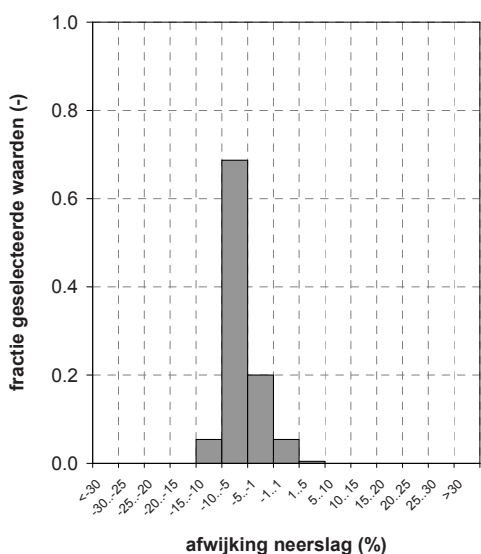
posteriori onzekerheid neerslag loc. 1



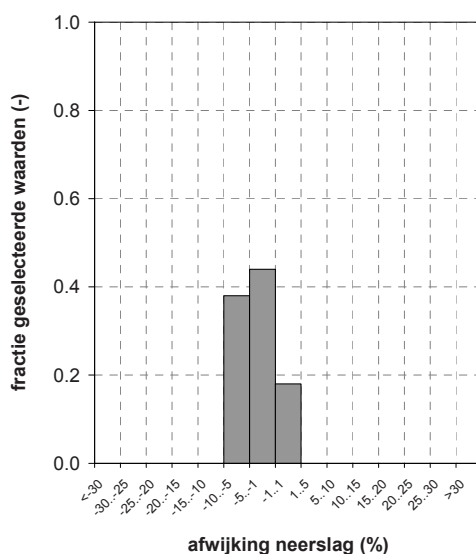
posteriori onzekerheid neerslag loc. 2



posteriori onzekerheid neerslag loc. 3

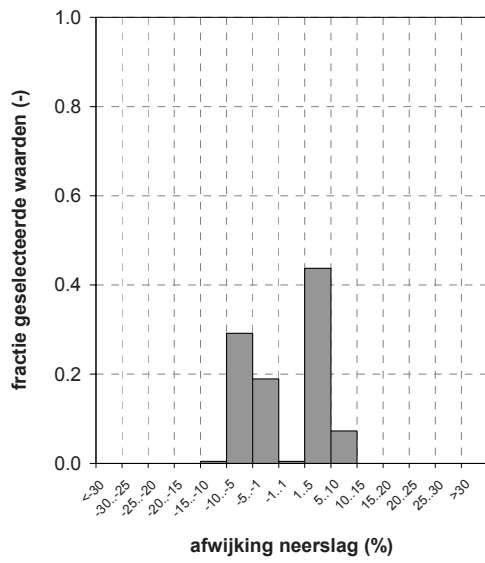


posteriori onzekerheid neerslag loc. 4

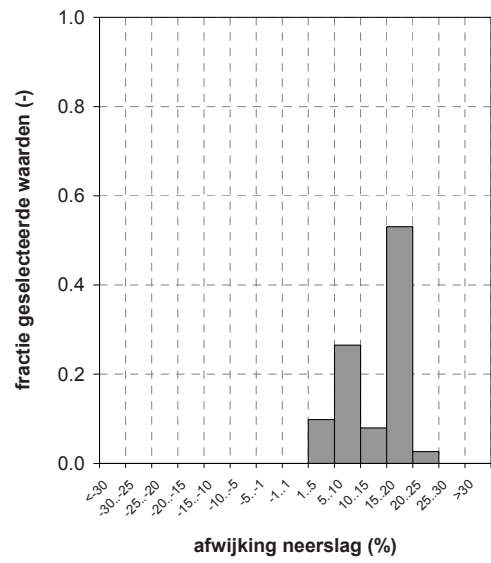


FIGUUR 10-2 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE NEERSLAG VAN RADARCELLEN 5, 6, 7 EN 8 (BIJ RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)

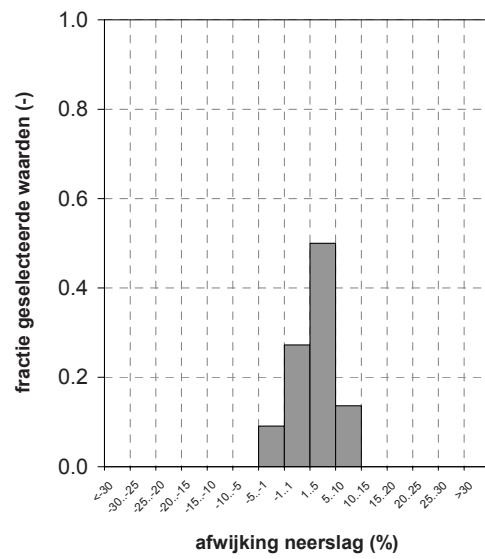
posteriori onzekerheid neerslag loc. 5



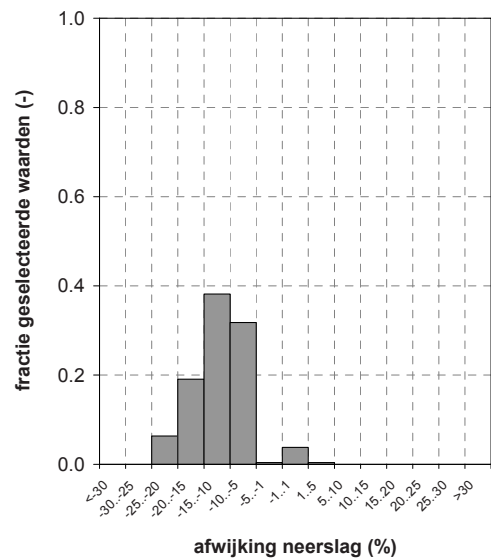
posteriori onzekerheid neerslag loc. 6



posteriori onzekerheid neerslag loc. 7

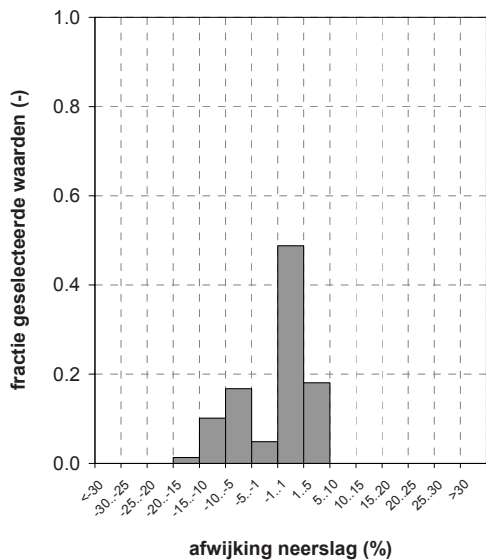


posteriori onzekerheid neerslag loc. 8

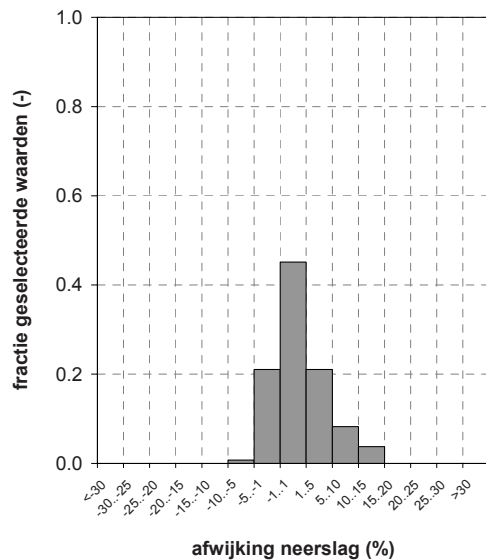


FIGUUR 10-3 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE NEERSLAG VAN RADARCELLEN 9, 10, 11 EN 12 (BIJ RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)

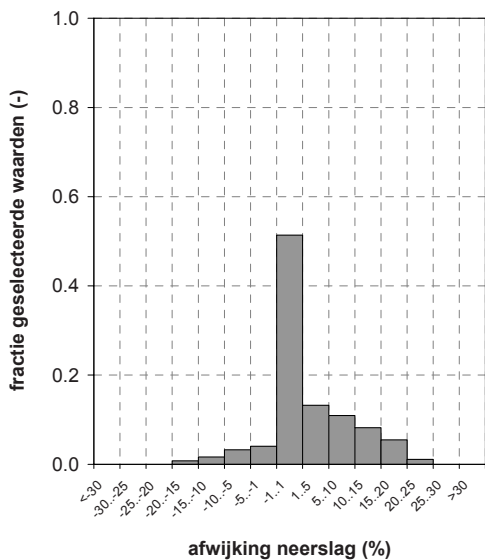
posteriori onzekerheid neerslag loc. 9



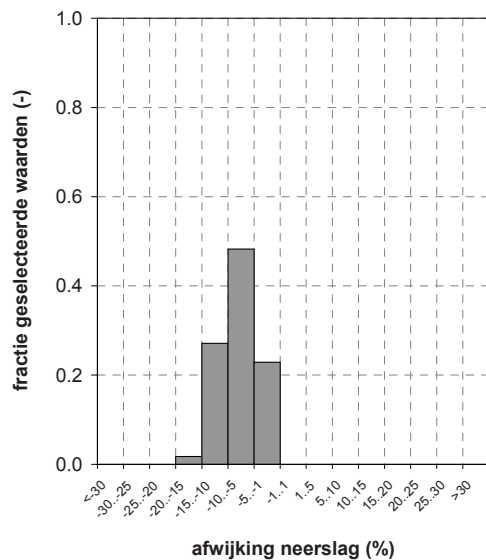
posteriori onzekerheid neerslag loc. 10



posteriori onzekerheid neerslag loc. 11

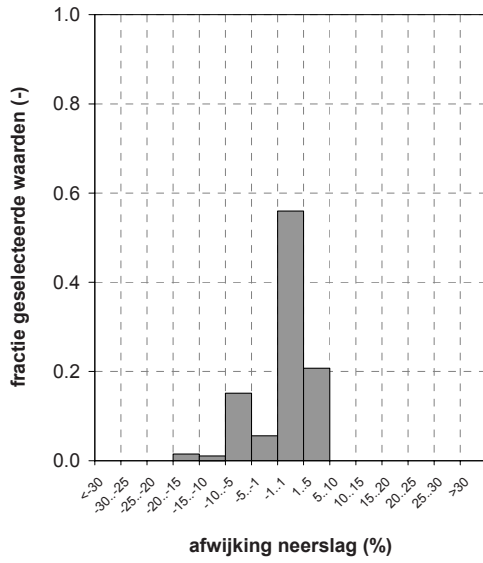


posteriori onzekerheid neerslag loc. 12

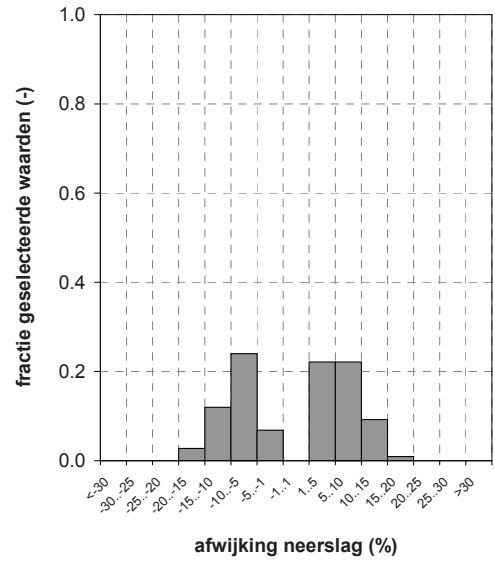


FIGUUR 10-4 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE NEERSLAG VAN RADARCELLEN 13, 14, 15 EN 16 (BIJ RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)

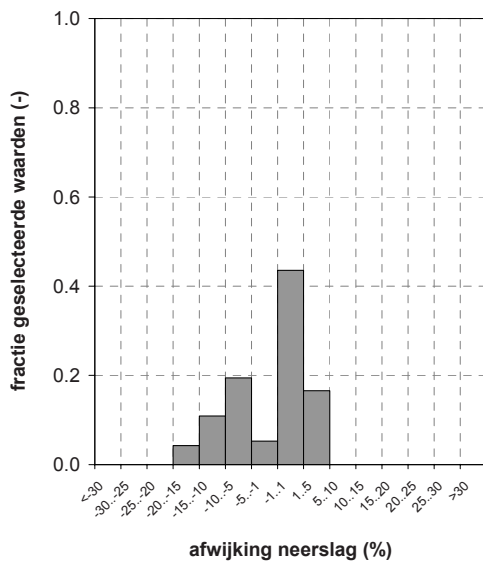
posteriori onzekerheid neerslag loc. 13



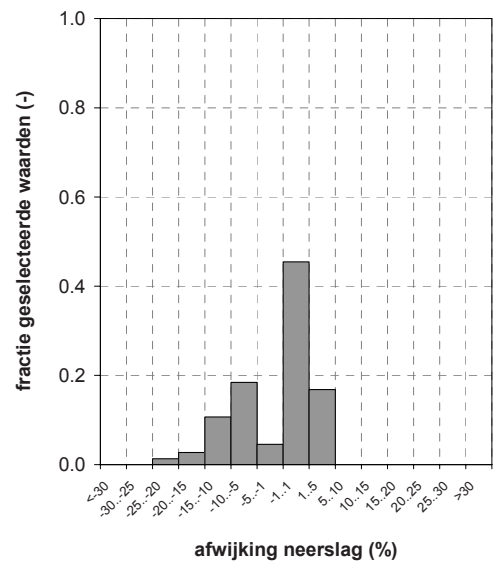
posteriori onzekerheid neerslag loc. 14



posteriori onzekerheid neerslag loc. 15



posteriori onzekerheid neerslag loc. 16



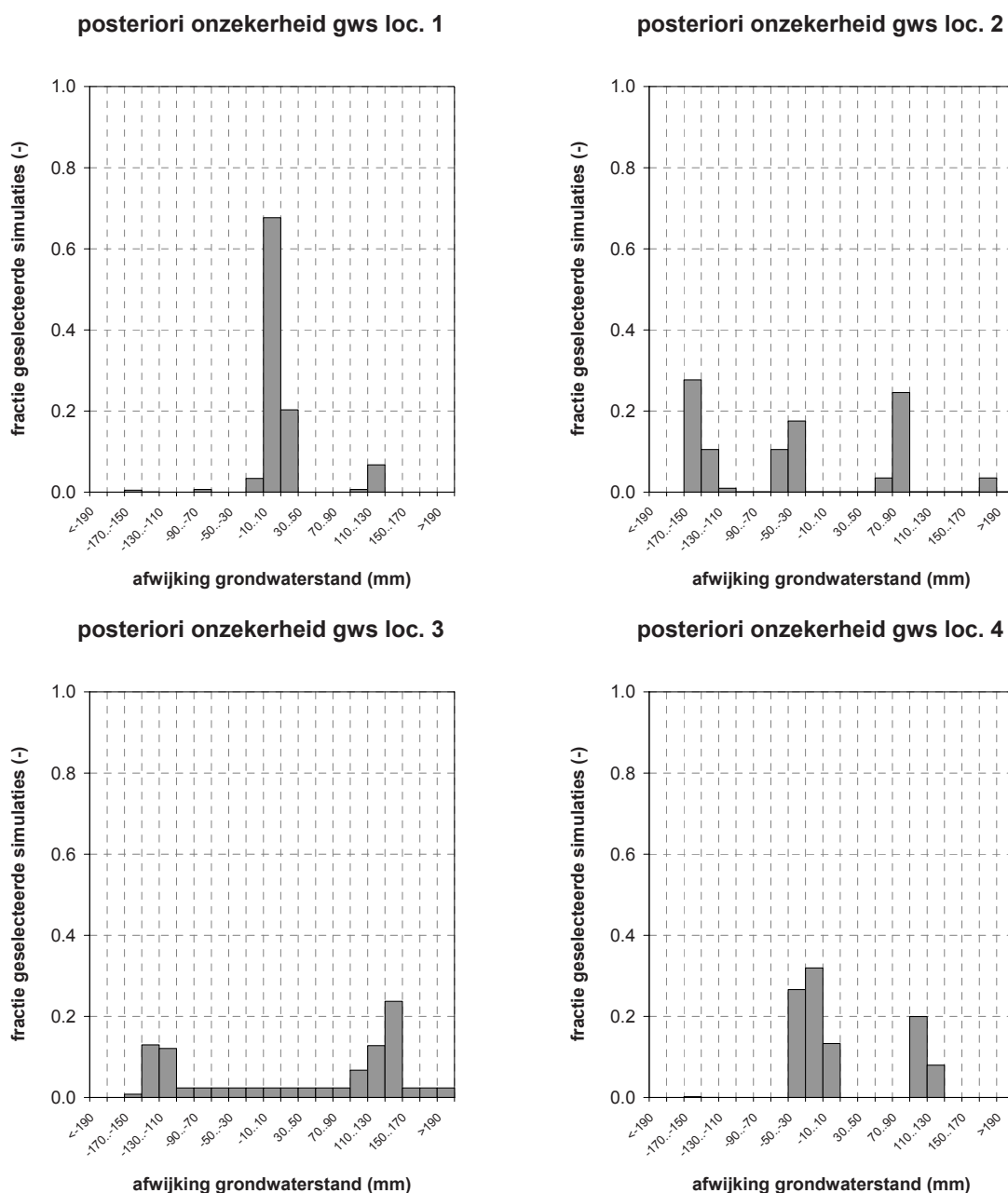
BIJLAGE C

RESULTAAT MODELUITKOMSTEN VOOR RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE FOUT

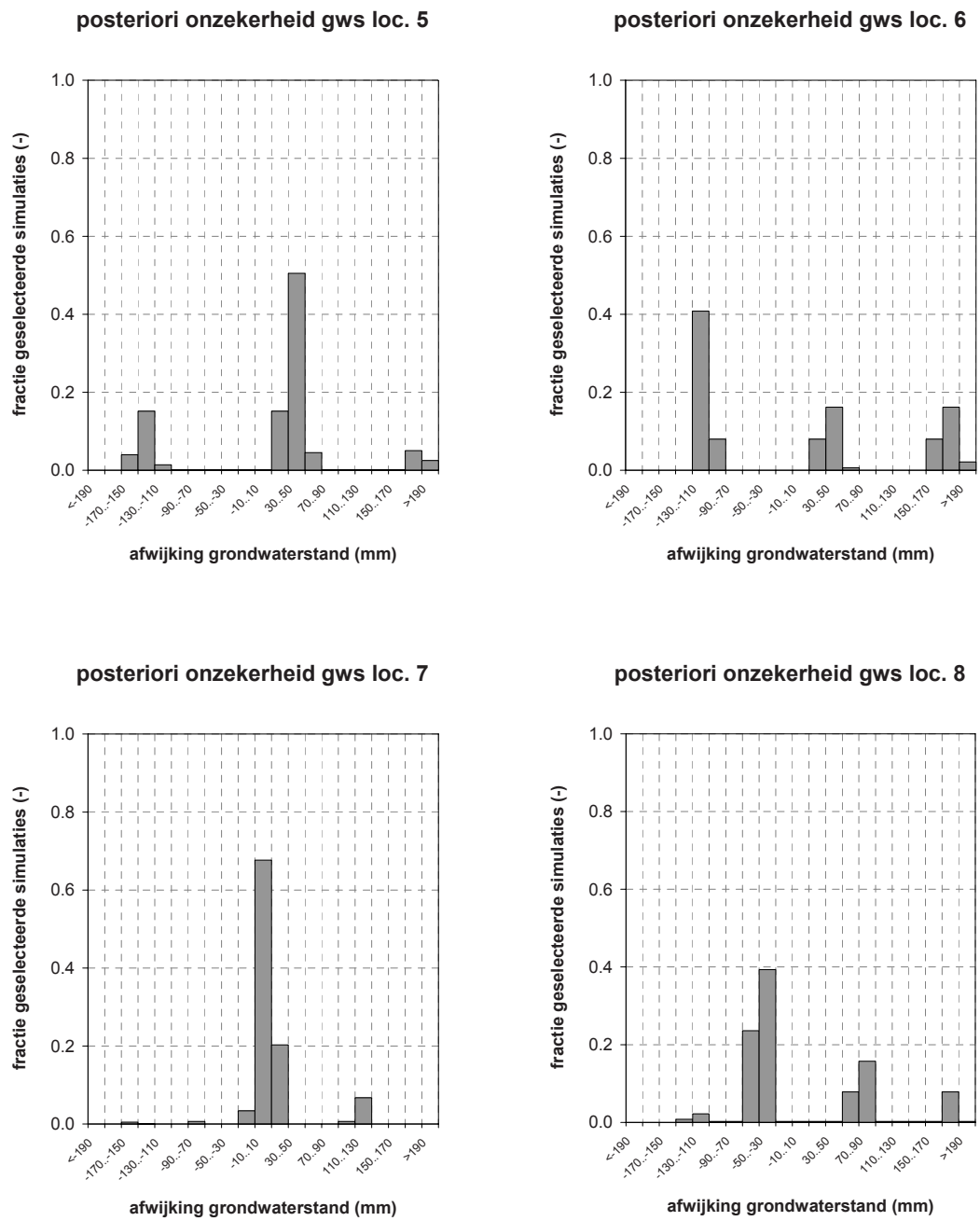
RESULTAAT GRONDWATERSTANDEN

In Figuur 11-1, Figuur 11-2, Figuur 11-3 en Figuur 11-4 zijn de resultaten van de kalibratie van de grondwaterstanden per locatie weergegeven.

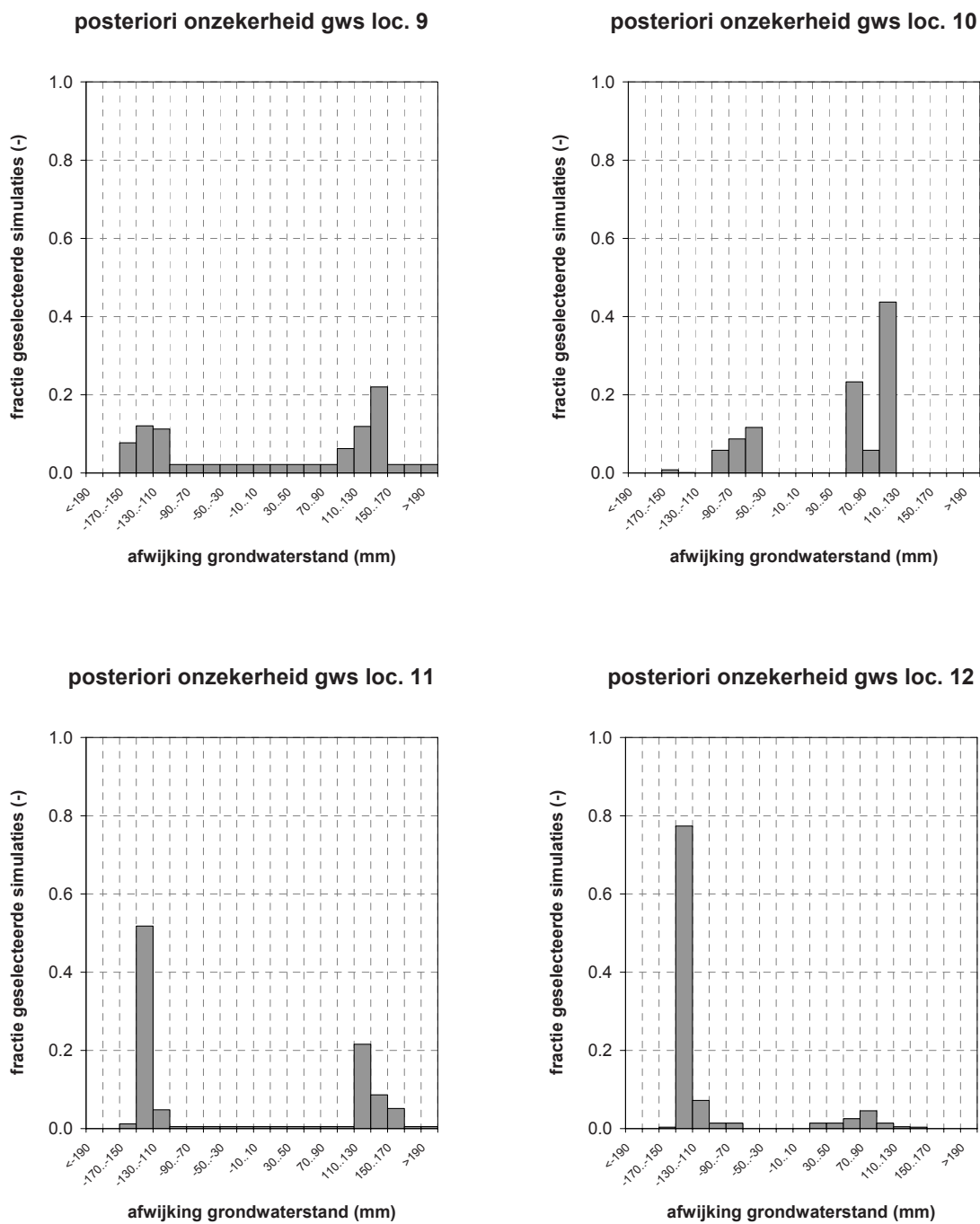
FIGUUR 11-1 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE GRONDWATERSTANDEN VAN LOCATIES 1, 2, 3 EN 4 (BIJ RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



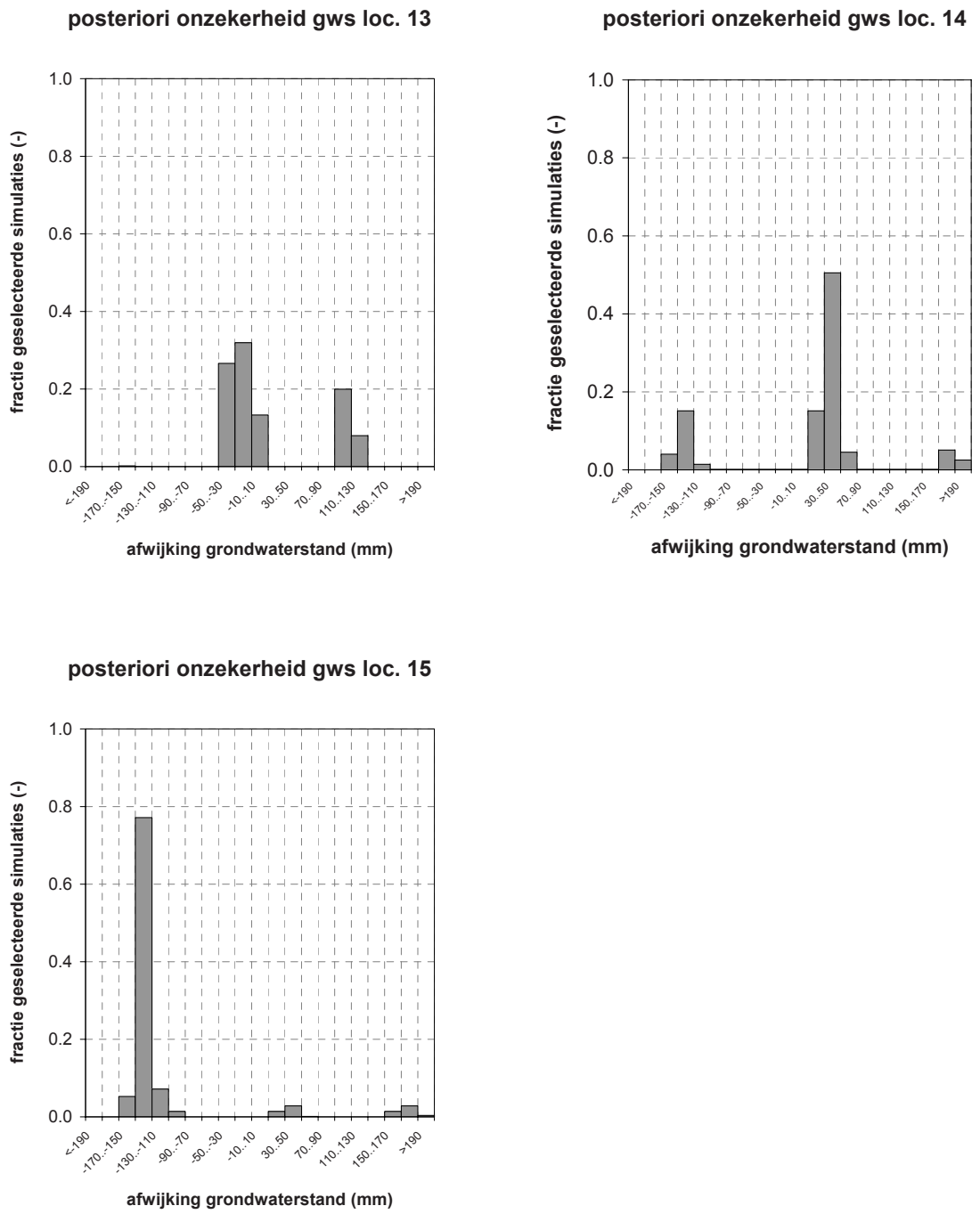
FIGUUR 11-2 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE GRONDWATERSTANDEN VAN LOCATIES 5, 6, 7 EN 8 (BIJ RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



FIGUUR 11-3 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE GRONDWATERSTANDEN VAN LOCATIES 9, 10, 11 EN 12 (BIJ RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



FIGUUR 11-4 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE GRONDWATERSTANDEN VAN LOCATIES 13, 14 EN 15 (BIJ RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)

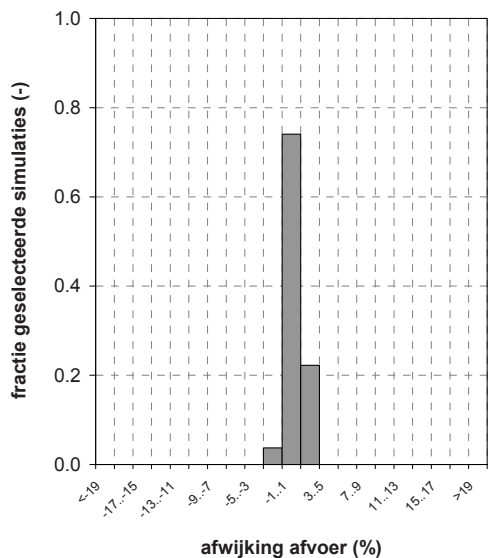


RESULTAAT OPPERVLAKTEWATER AFVOEREN

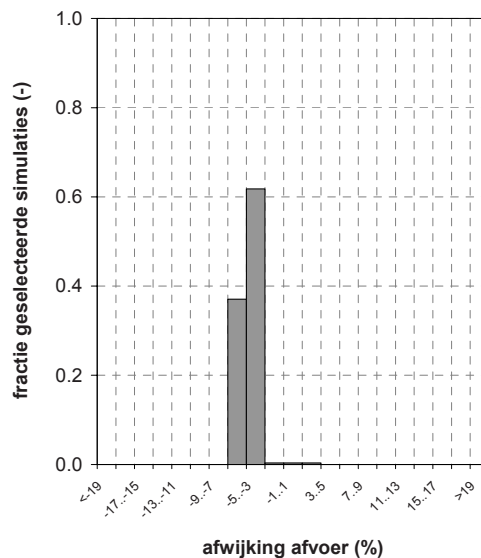
In Figuur 11-5, Figuur 11-6 en Figuur 11-7 zijn de resultaten van de kalibratie van de oppervlaktewaterafvoer per locatie weergegeven.

FIGUUR 11-5 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE OPPERVLAKTEWATER AFVOER VAN LOCATIES 001, 016, 020 EN 025 (BIJ RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)

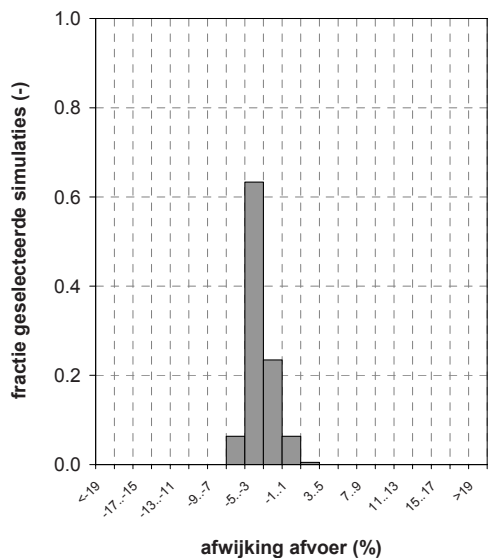
posteriori onzekerheid afvoer loc. 001



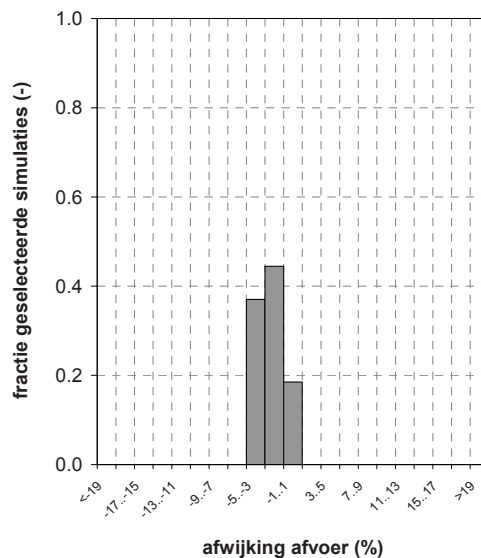
posteriori onzekerheid afvoer loc. 016



posteriori onzekerheid afvoer loc. 020

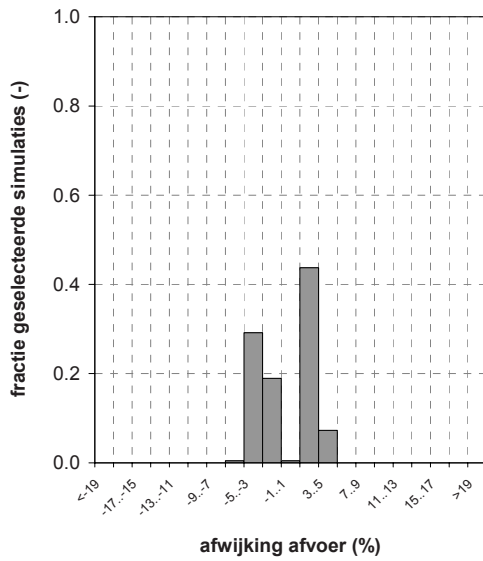


posteriori onzekerheid afvoer loc. 025

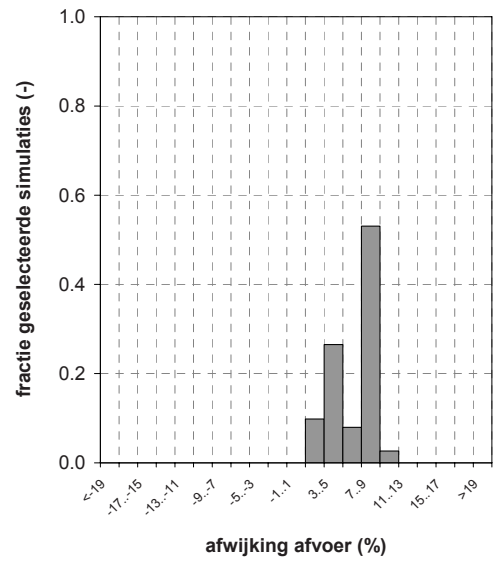


FIGUUR 11-6 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE OPPERVLAKTWATER AFVOER VAN LOCATIES 027, 028, 031 EN 038 (BIJ RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)

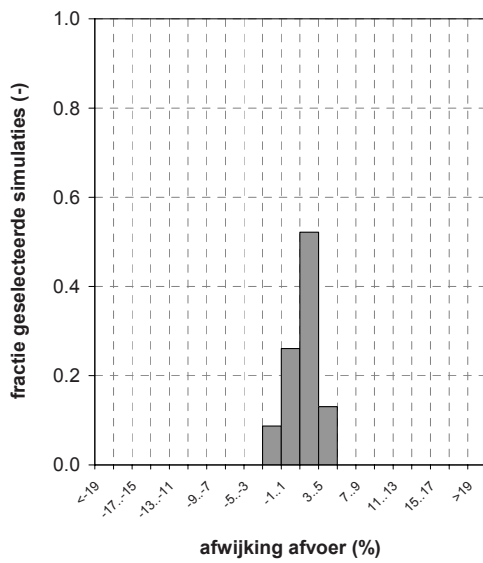
posteriori onzekerheid afvoer loc. 027



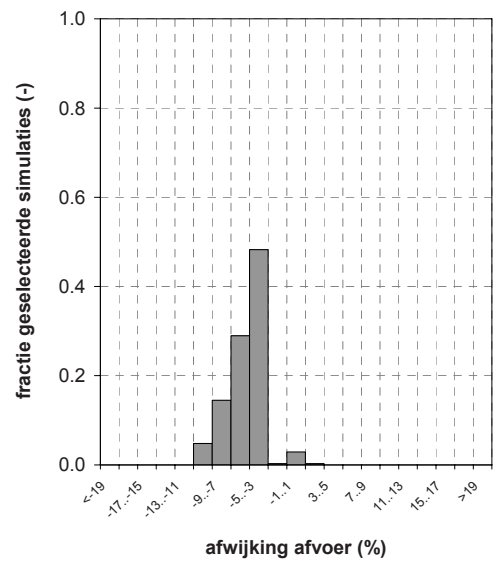
posteriori onzekerheid afvoer loc. 028



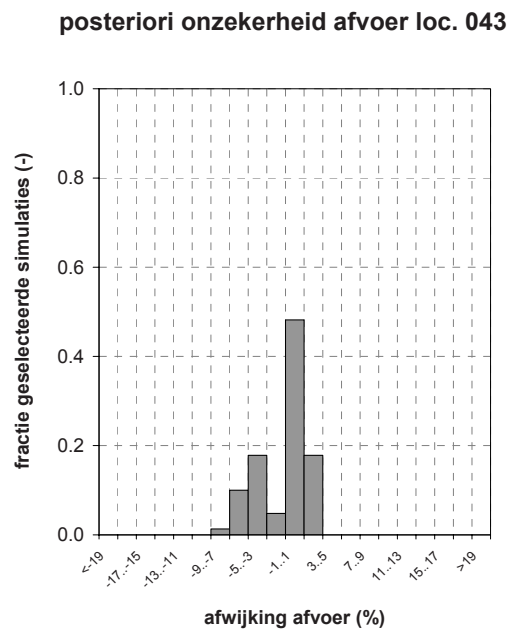
posteriori onzekerheid afvoer loc. 031



posteriori onzekerheid afvoer loc. 038



FIGUUR 11-7 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE OPPERVLAKTWATER AFVOER VAN LOCATIES 043 (BIJ RUIMTELIJK ONGECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



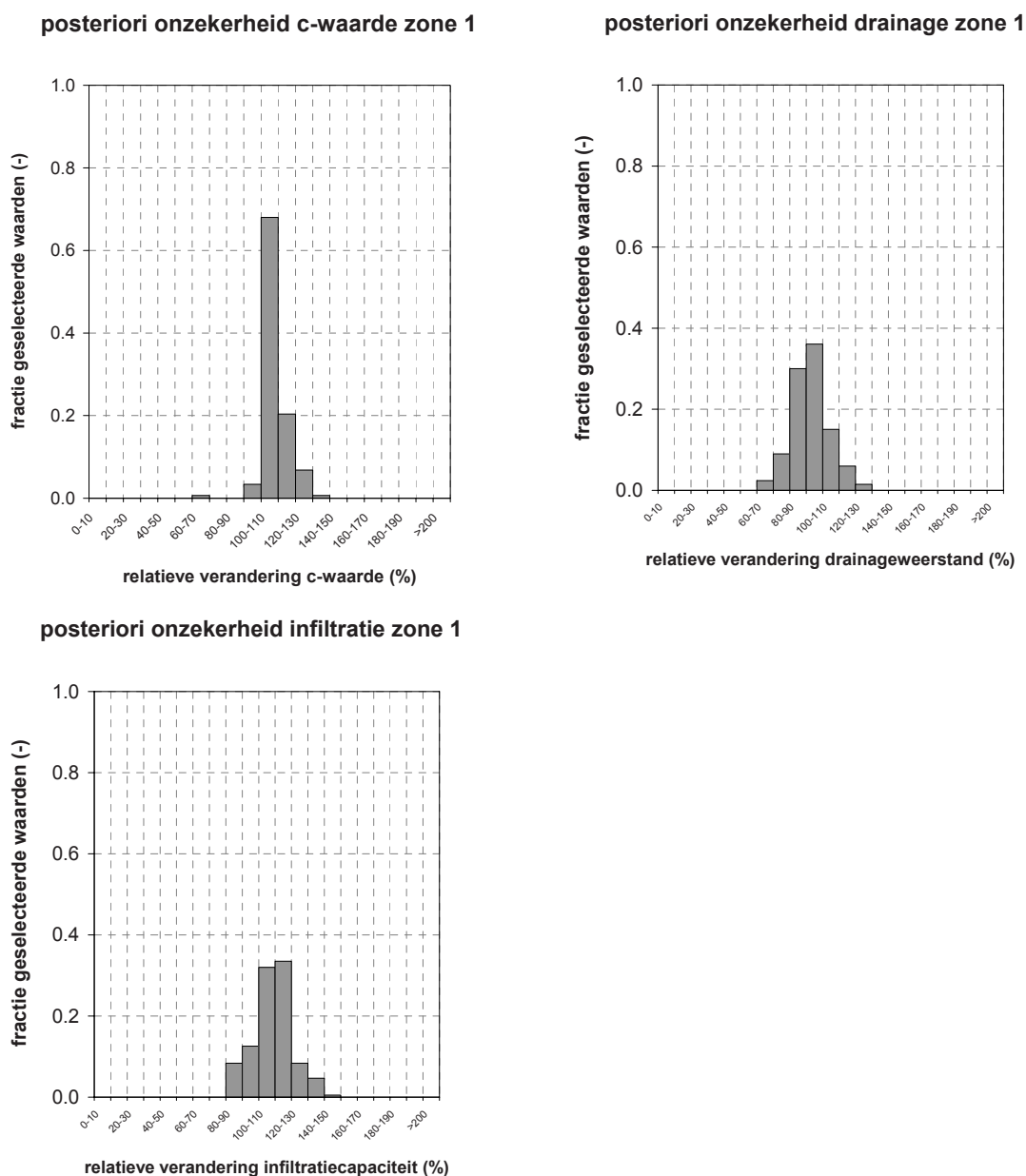
BIJLAGE D

RESULTAAT PARAMETERS VOOR RUIMTELIJK GECORRELEERDE FOUT

RESULTAAT ZONE 1

In Figuur 12-1 zijn de resultaten van de kalibratie van parameters c-waarde, drainageweerstand en infiltratiecapaciteit in zone 1 weergegeven. Uit de figuren blijkt dat de resterende spreiding in de kalibratieparameters kleiner is dan bij het resultaat in paragraaf 4.2. Na het kalibreren blijkt dat de waarde in het uitgangsmodel het meest waarschijnlijk is, de spreiding is gelijk aan +/- 40%.

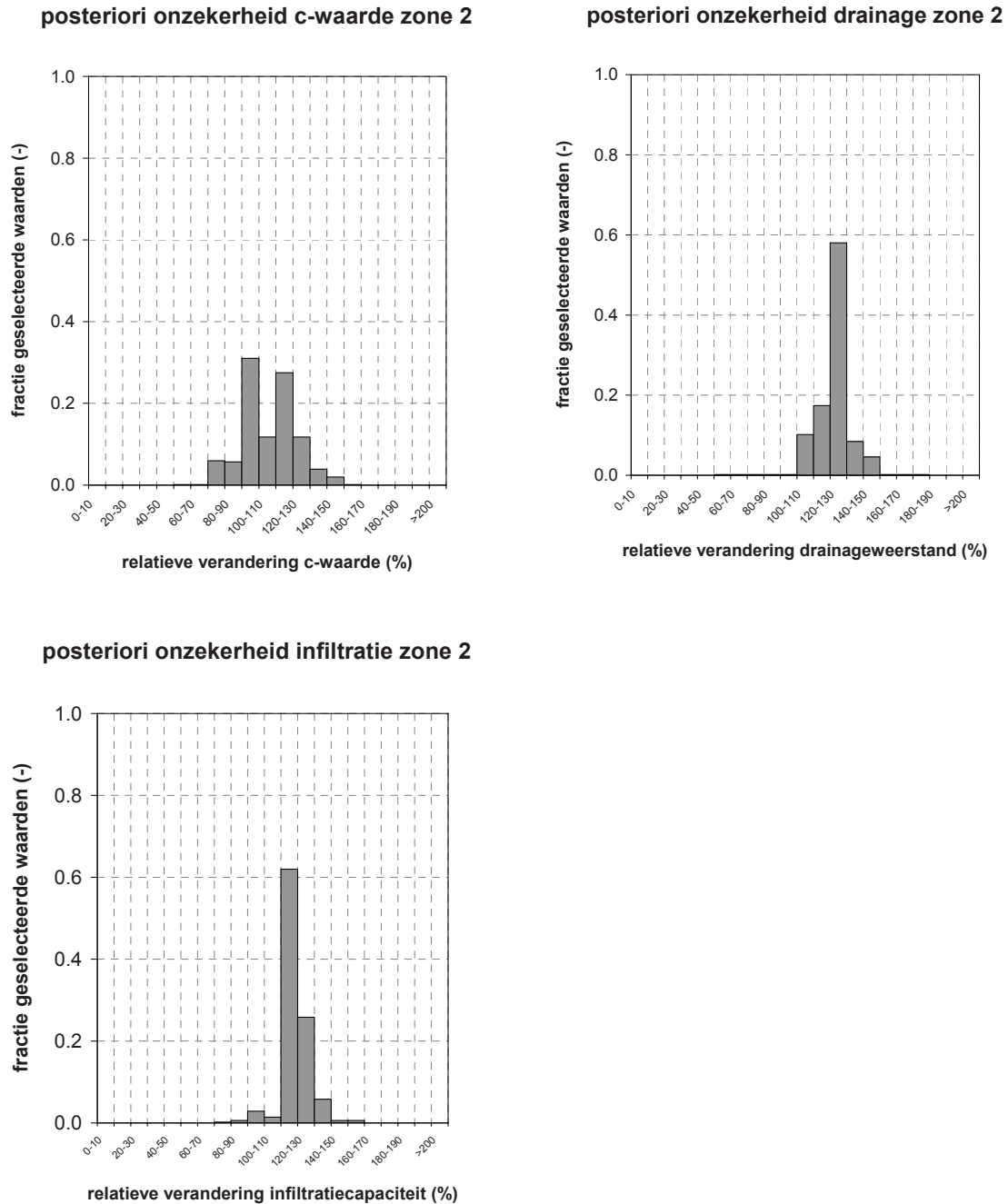
FIGUUR 12-1 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE PARAMETERS VAN ZONE 1 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



RESULTAAT ZONE 2

In Figuur 12-2 zijn de resultaten van de kalibratie van parameters c-waarde, drainageweerstand en infiltratiecapaciteit in zone 2 weergegeven. Ook voor zone 2 blijkt dat de resterende spreiding in de kalibratieparameters kleiner is dan bij het resultaat in paragraaf 4.2. Na het kalibreren blijkt dat de waarde 20% groter dan in het uitgangsmodel het meest waarschijnlijk is, de spreiding is gelijk aan -40 en + 30%.

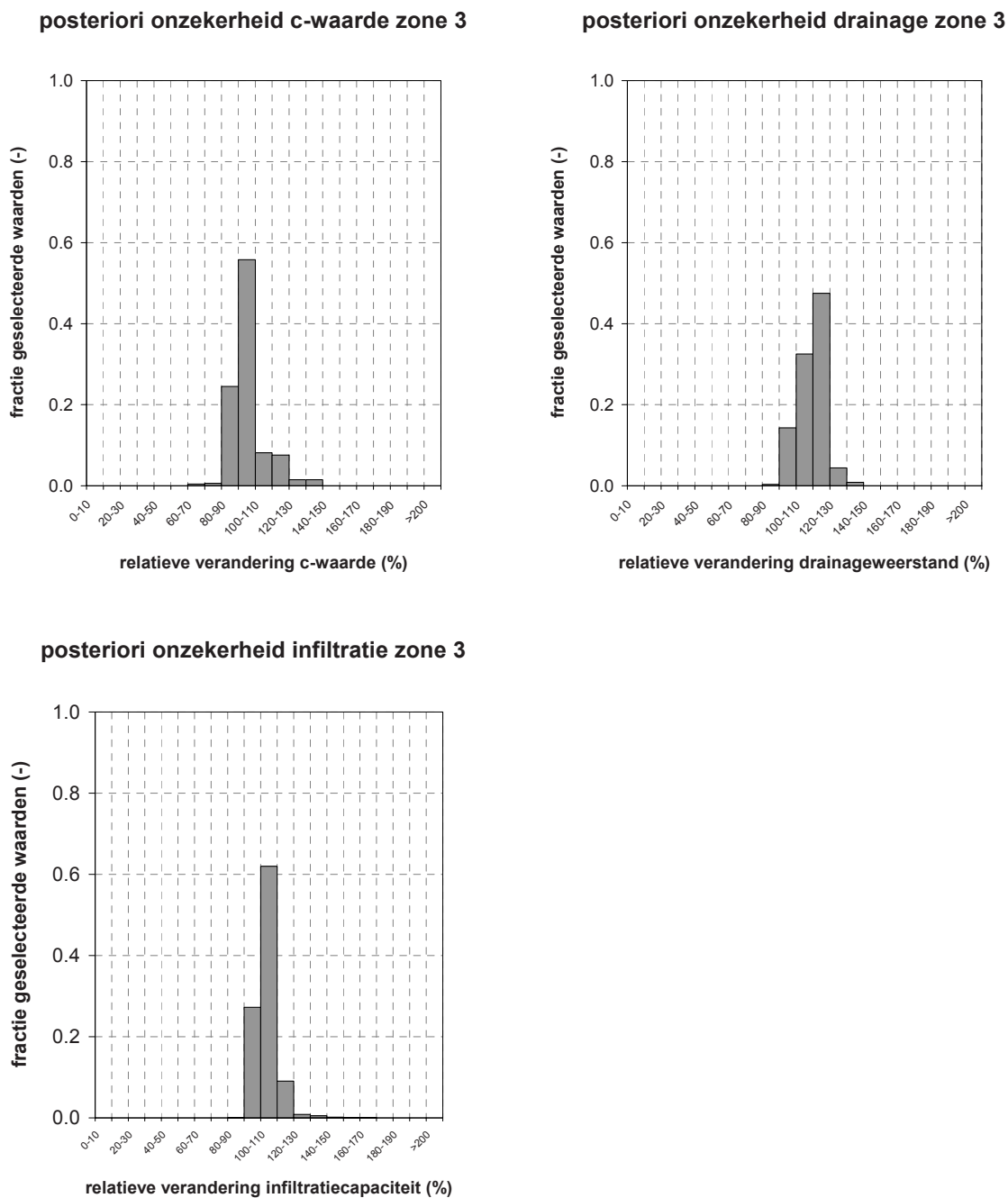
FIGUUR 12-2 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE PARAMETERS VAN ZONE 2 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



RESULTAAT ZONE 3

In Figuur 12-3 zijn de resultaten van de kalibratie van parameters c-waarde, drainageweerstand en infiltratiecapaciteit in zone 3 weergegeven. De resterende spreiding in zone 3 is ook kleiner dan bij het resultaat in paragraaf 4.2. Na het kalibreren blijkt dat de waarde in het uitgangsmodel het meest waarschijnlijk is, de spreiding is gelijk aan +/-40%.

FIGUUR 12-3 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE PARAMETERS VAN ZONE 3 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



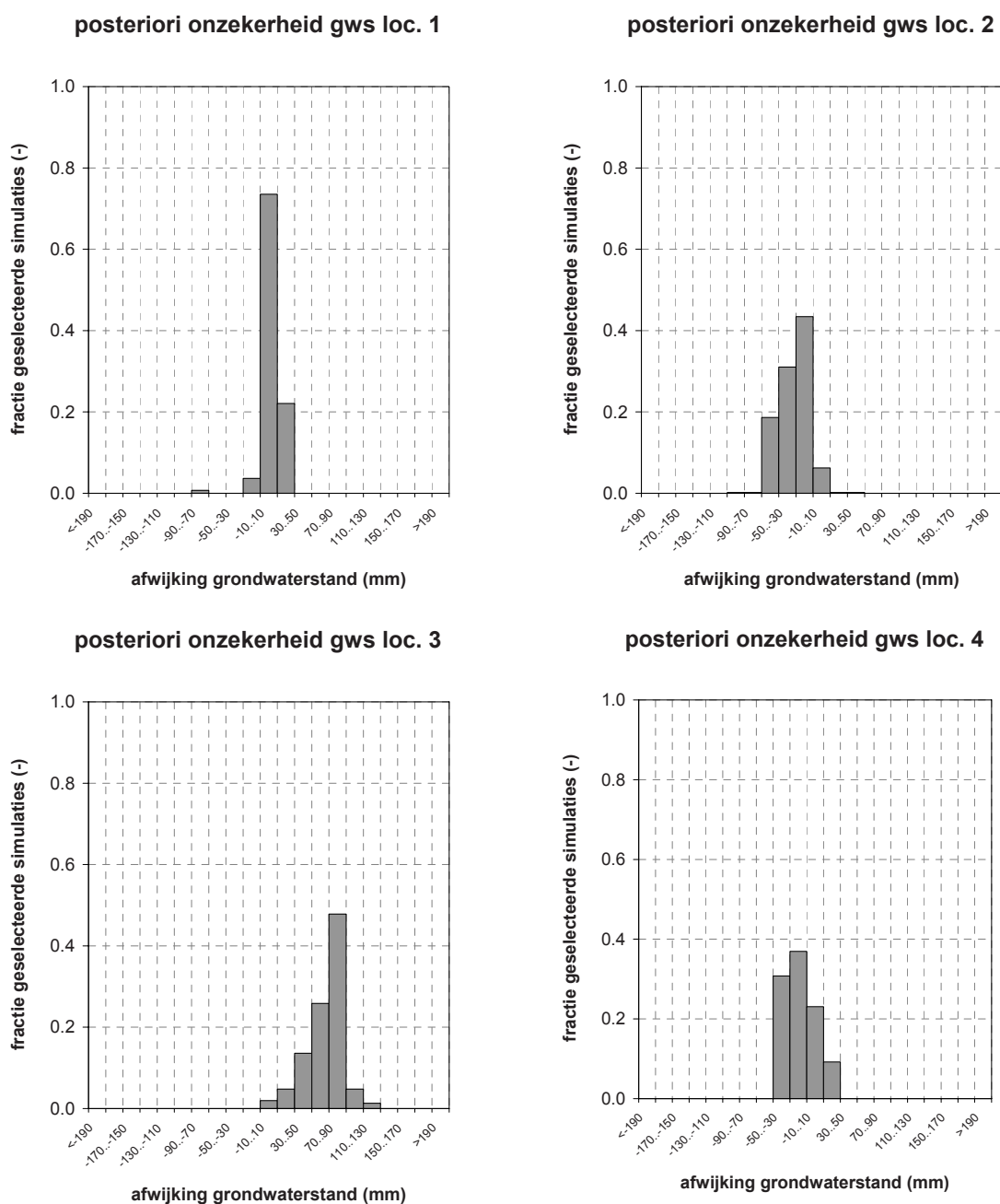
BIJLAGE E

RESULTAAT MODELUITKOMSTEN VOOR RUIMTELIJK GECORRELEERDE FOUT

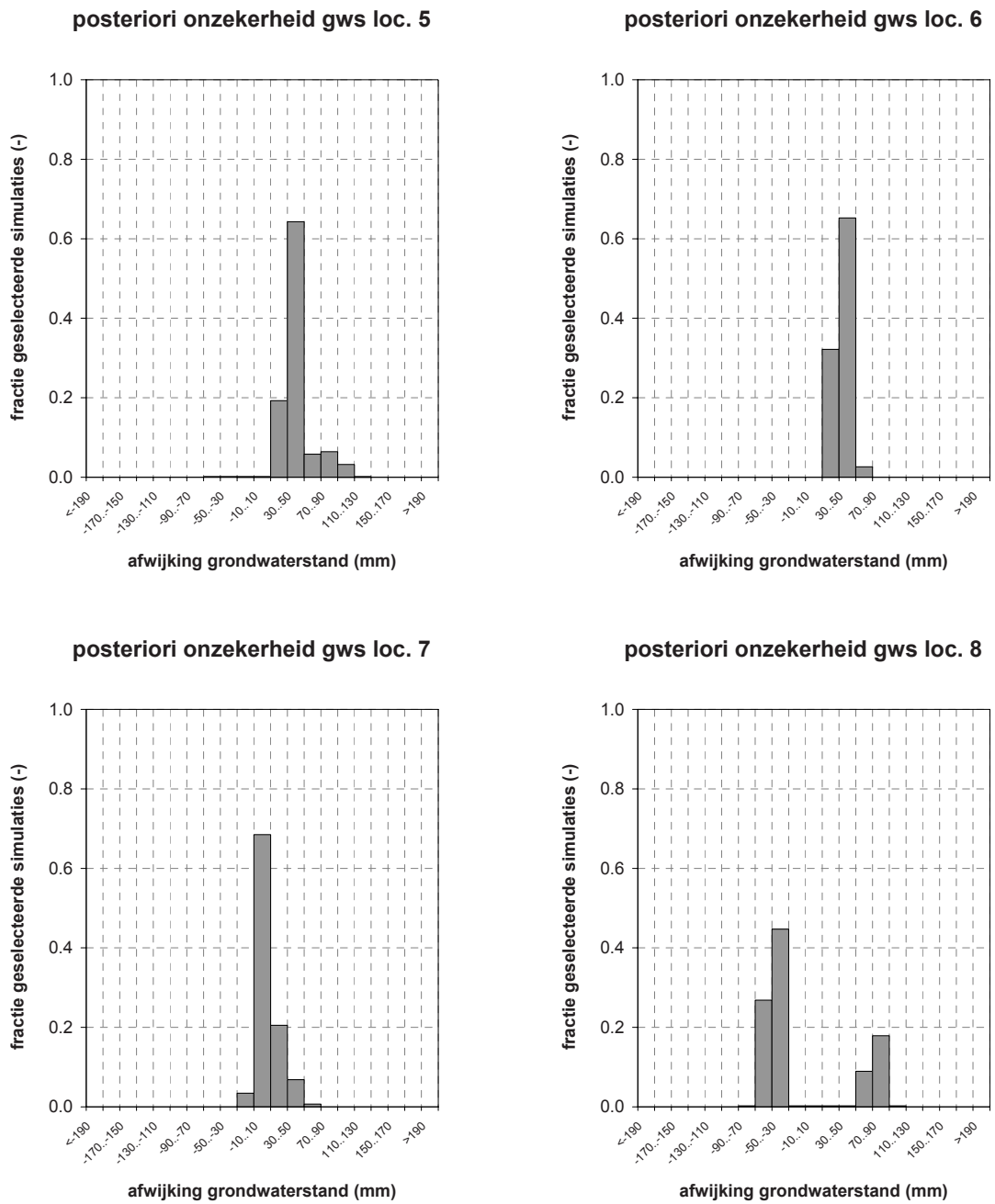
RESULTAAT GRONDWATERSTANDEN

In Figuur 13-1, Figuur 13-2, Figuur 13-3 en Figuur 13-4 zijn de resultaten van de kalibratie van de grondwaterstanden per locatie weergegeven.

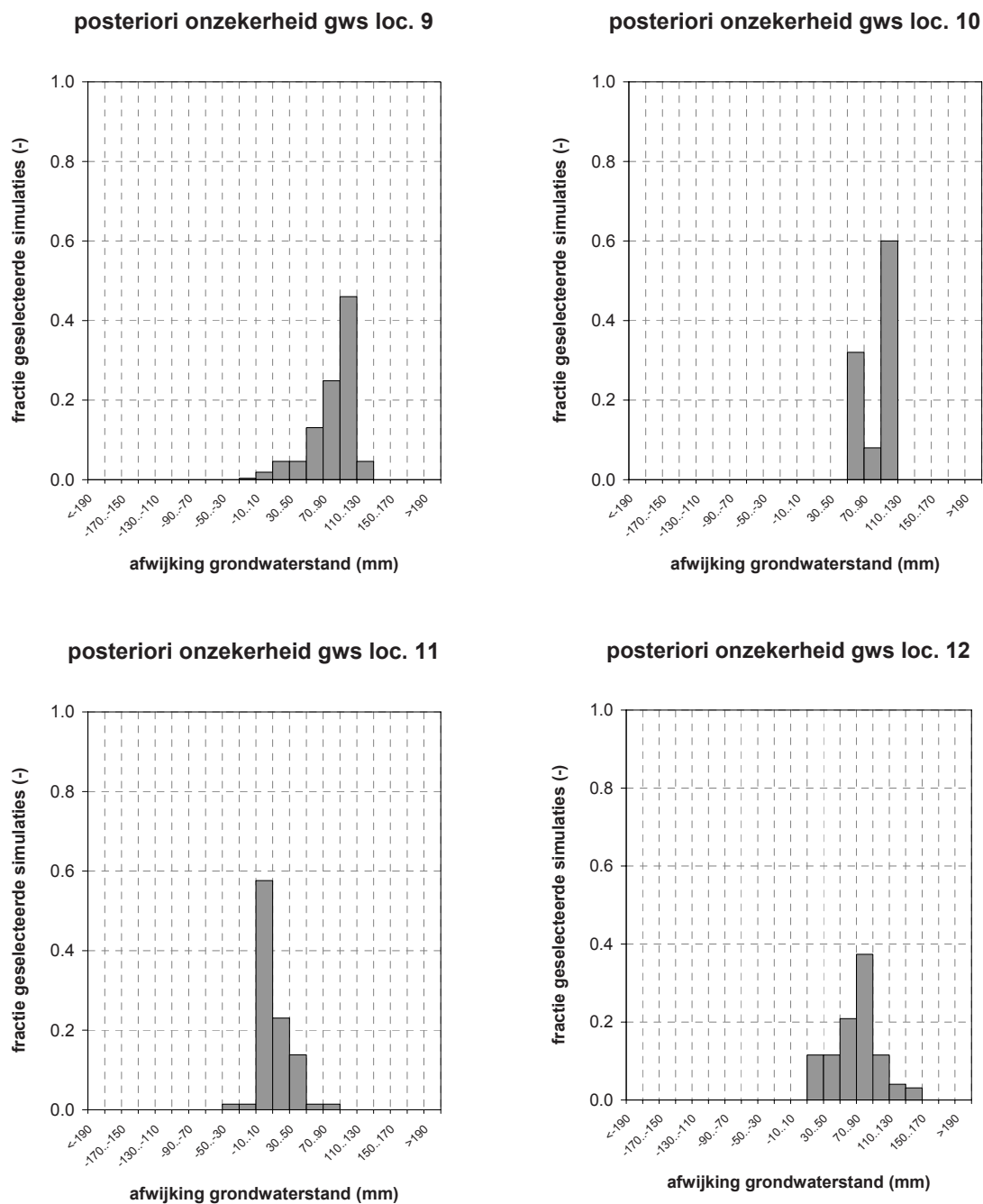
FIGUUR 13-1 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE GRONDWATERSTANDEN VAN LOCATIES 1, 2, 3 EN 4 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



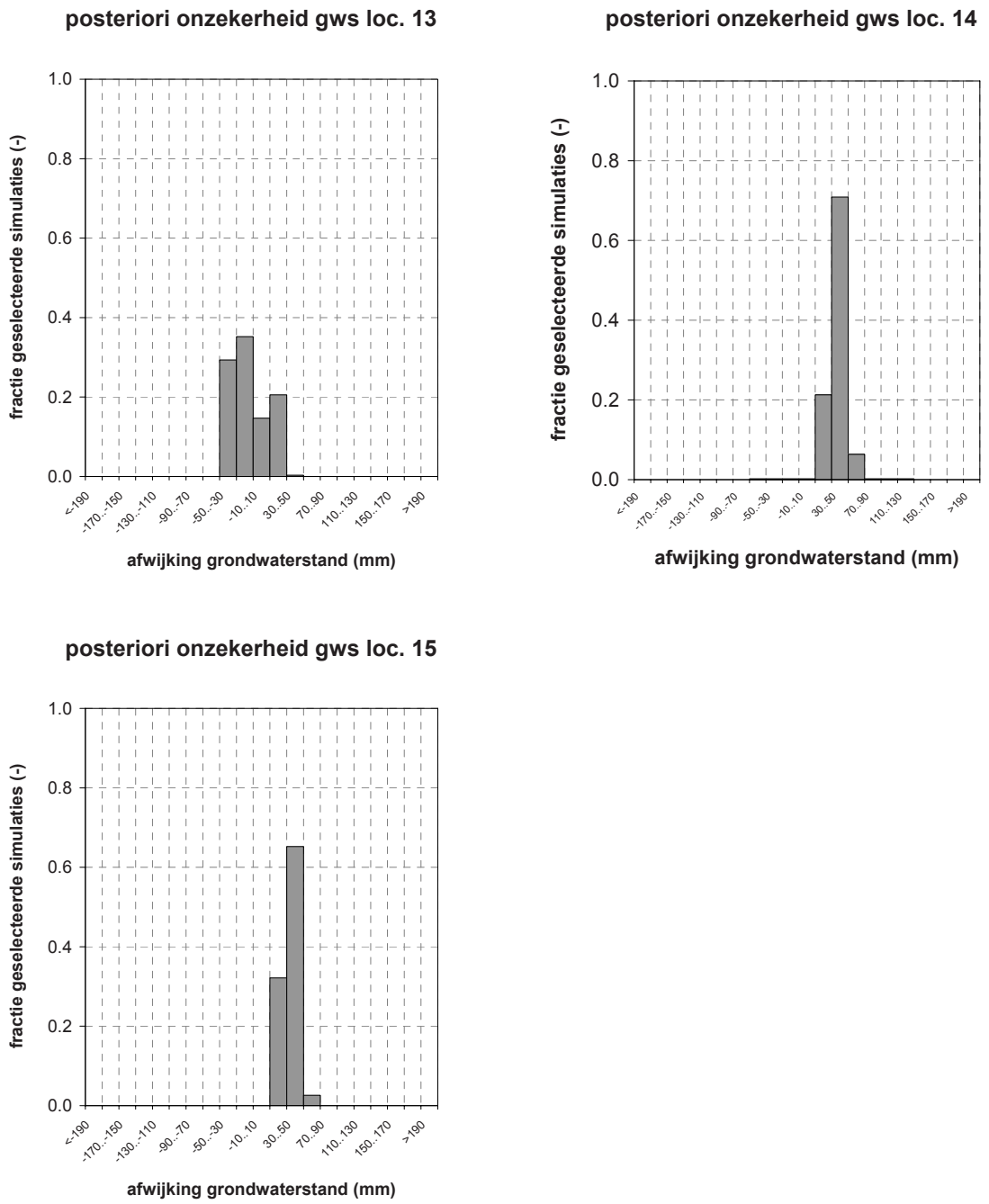
FIGUUR 13-2 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE GRONDWATERSTANDEN VAN LOCATIES 5, 6, 7 EN 8 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



FIGUUR 13-3 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE GRONDWATERSTANDEN VAN LOCATIES 9, 10, 11 EN 12 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



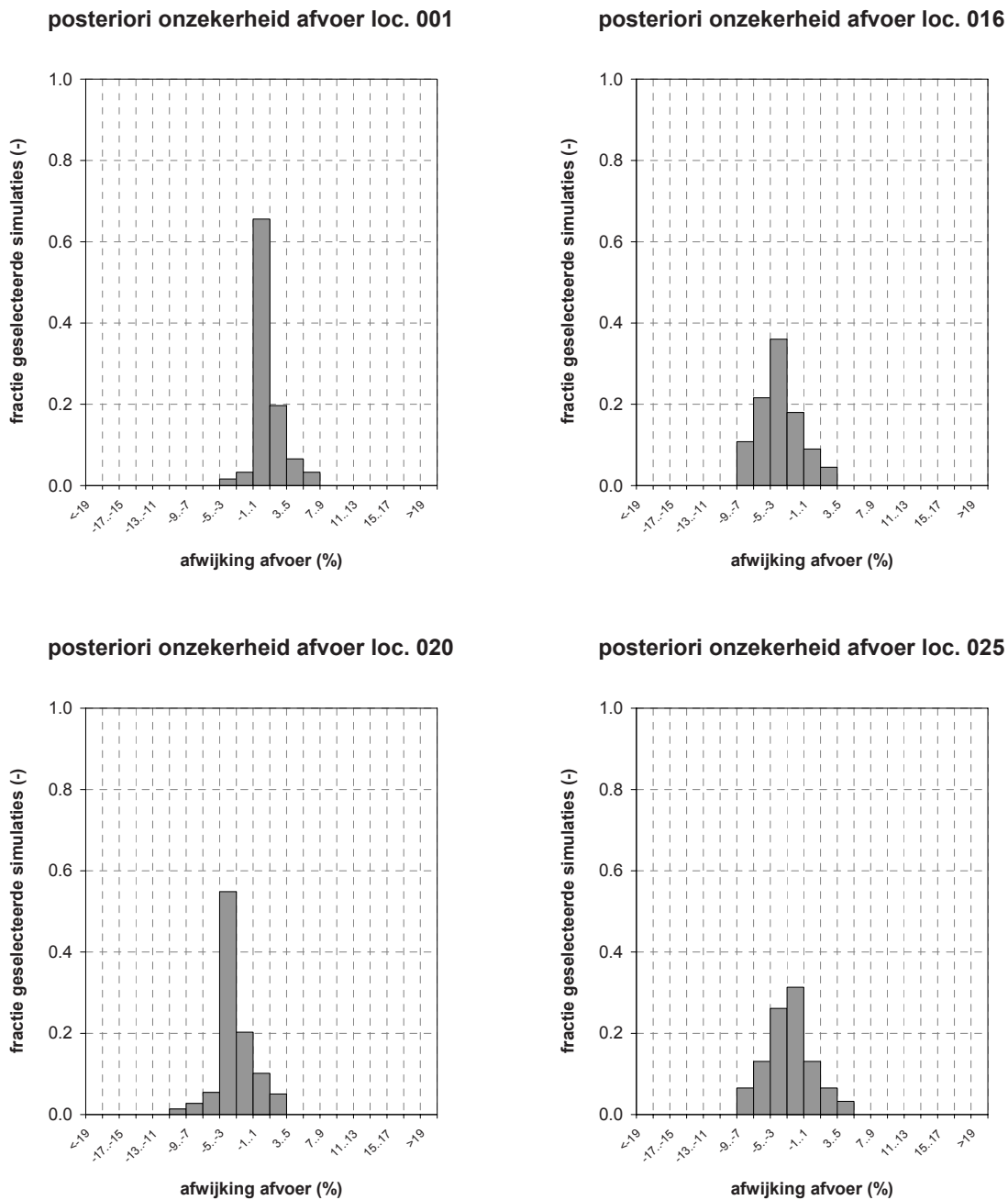
FIGUUR 13-4 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE GRONDWATERSTANDEN VAN LOCATIES 13, 14 EN 15 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



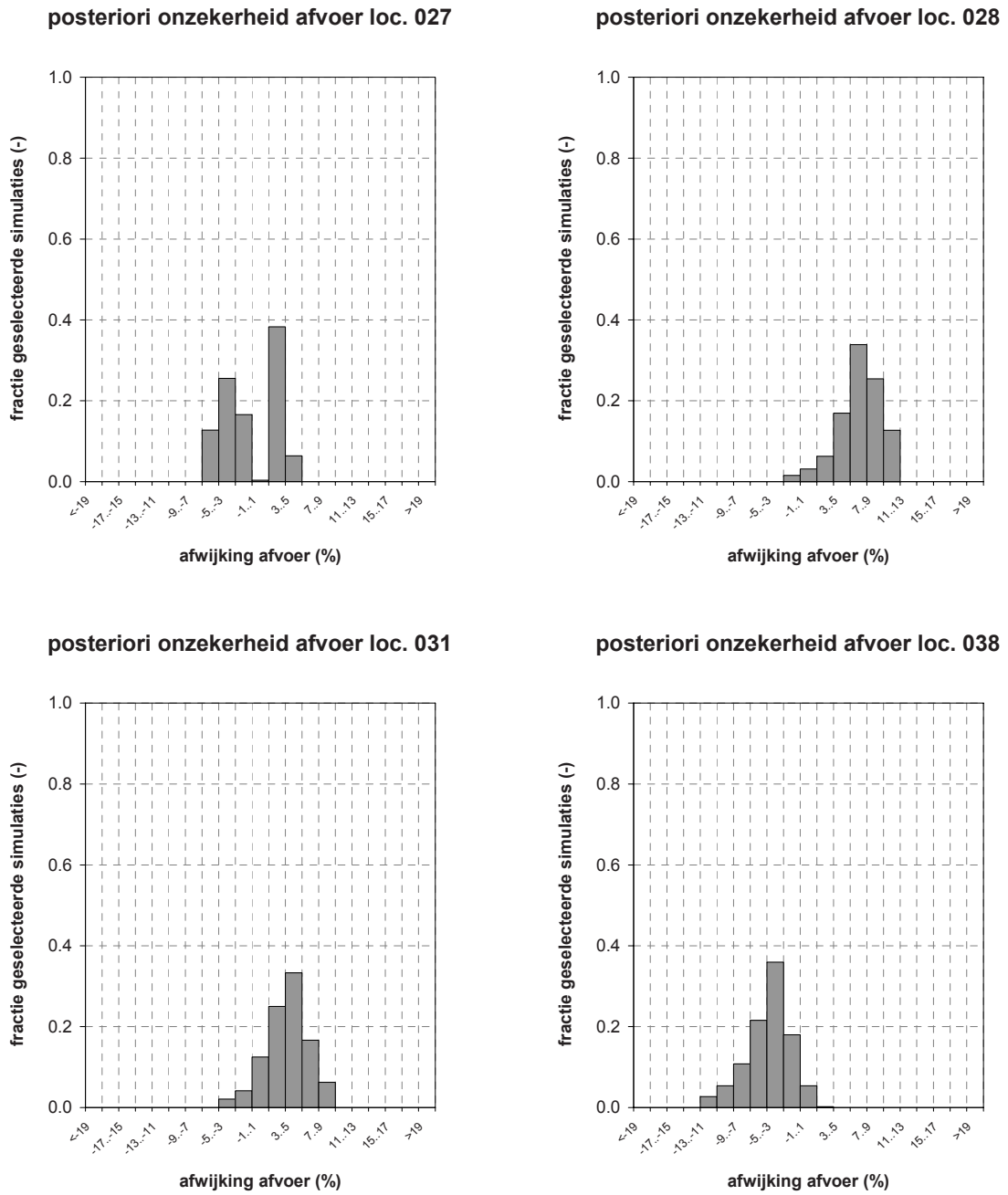
RESULTAAT OPPERVLAKTEWATER AFVOEREN

In Figuur 13-5, Figuur 13-6 en Figuur 13-7 zijn de resultaten van de kalibratie van de oppervlaktewaterafvoer per locatie weergegeven.

FIGUUR 13-5 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE OPPERVLAKTEWATER AFVOER VAN LOCATIES 001, 016, 020 EN 025 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)

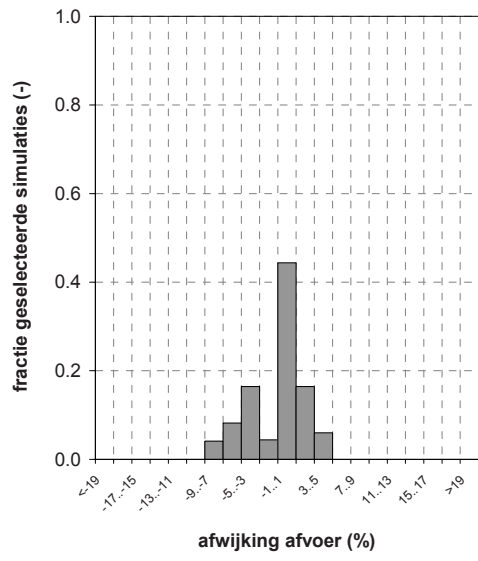


FIGUUR 13-6 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE OPPERVLAKTWATER AFVOER VAN LOCATIES 027, 028, 031 EN 038 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



FIGUUR 13-7 KALIBRATIE RESULTAAT VAN DE OPPERVLAKTWATER AFVOER VAN LOCATIES 043
(BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)

posteriori onzekerheid afvoer loc. 043



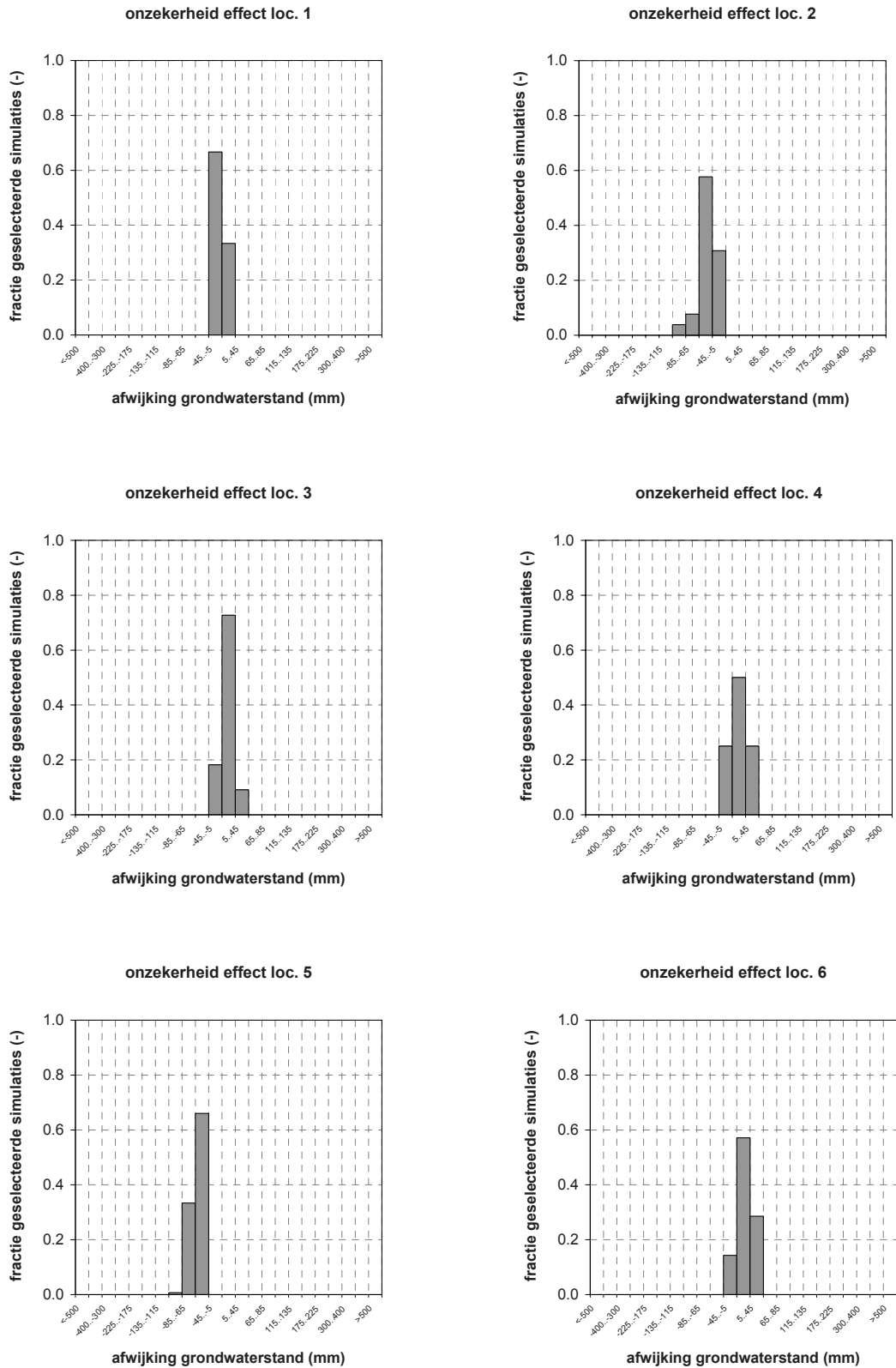
BIJLAGE F

EFFECT VAN MAATREGEL VASTHOUDEN

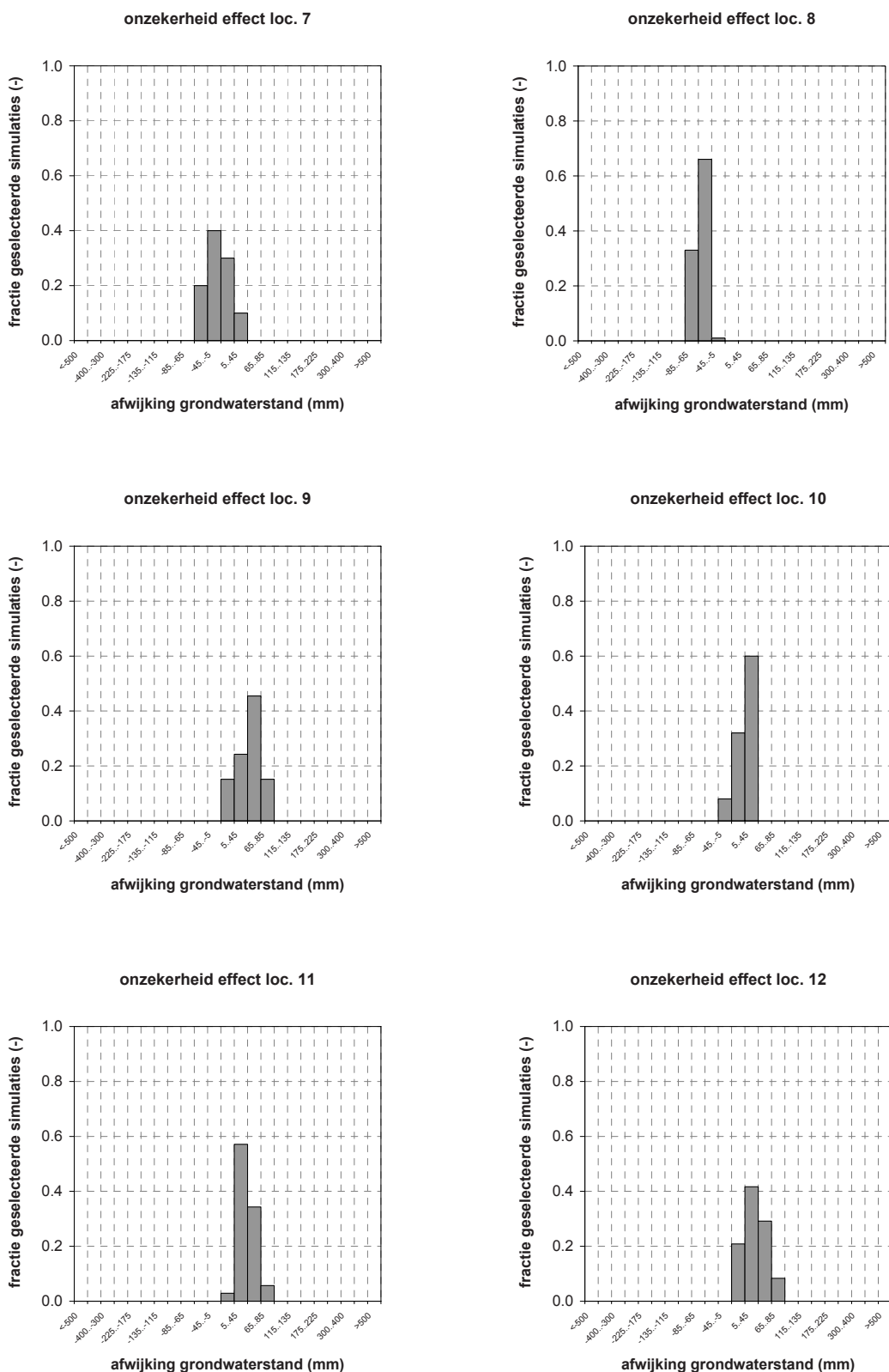
EFFECT OP GEMIDDELDE GRONDWATERSTANDEN

Het verschil tussen het 50 procent percentiel van de grondwaterstanden van de uitgangssituatie en de situatie met maatregel Vasthouden is uitgedrukt in een histogram. In Figuur 14-1, Figuur 14-2 en Figuur 14-3 zijn deze resultaten van de maatregel van de grondwaterstanden per locatie weergegeven.

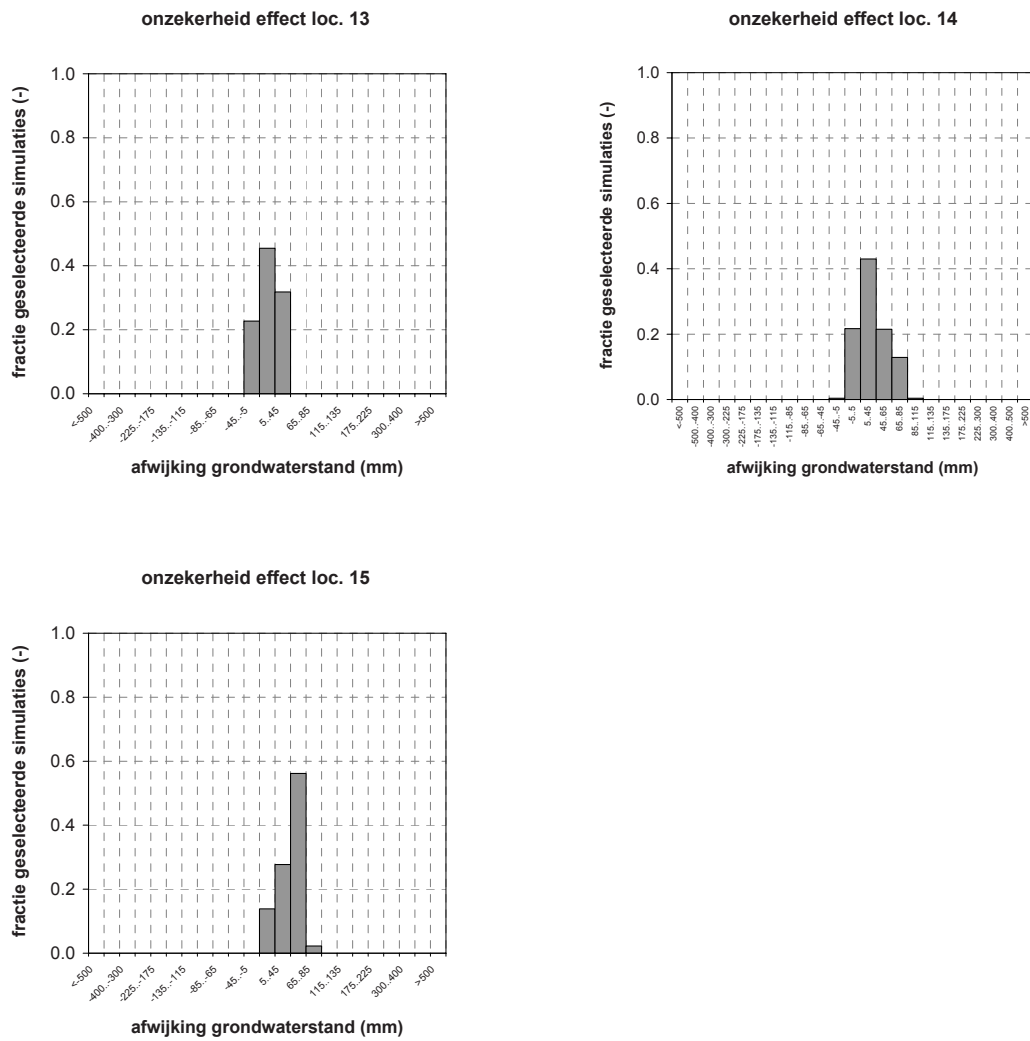
FIGUUR 14-1: EFFECT MAATREGEL VASTHOUDEN OP DE GRONDWATERSTANDEN (50% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 1, 2, 3, 4, 5 EN 6 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



FIGUUR 14-2 EFFECT MAATREGEL VASTHOUDEN OP DE GRONDWATERSTANDEN (50% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 7, 8, 9, 10, 11 EN 12 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



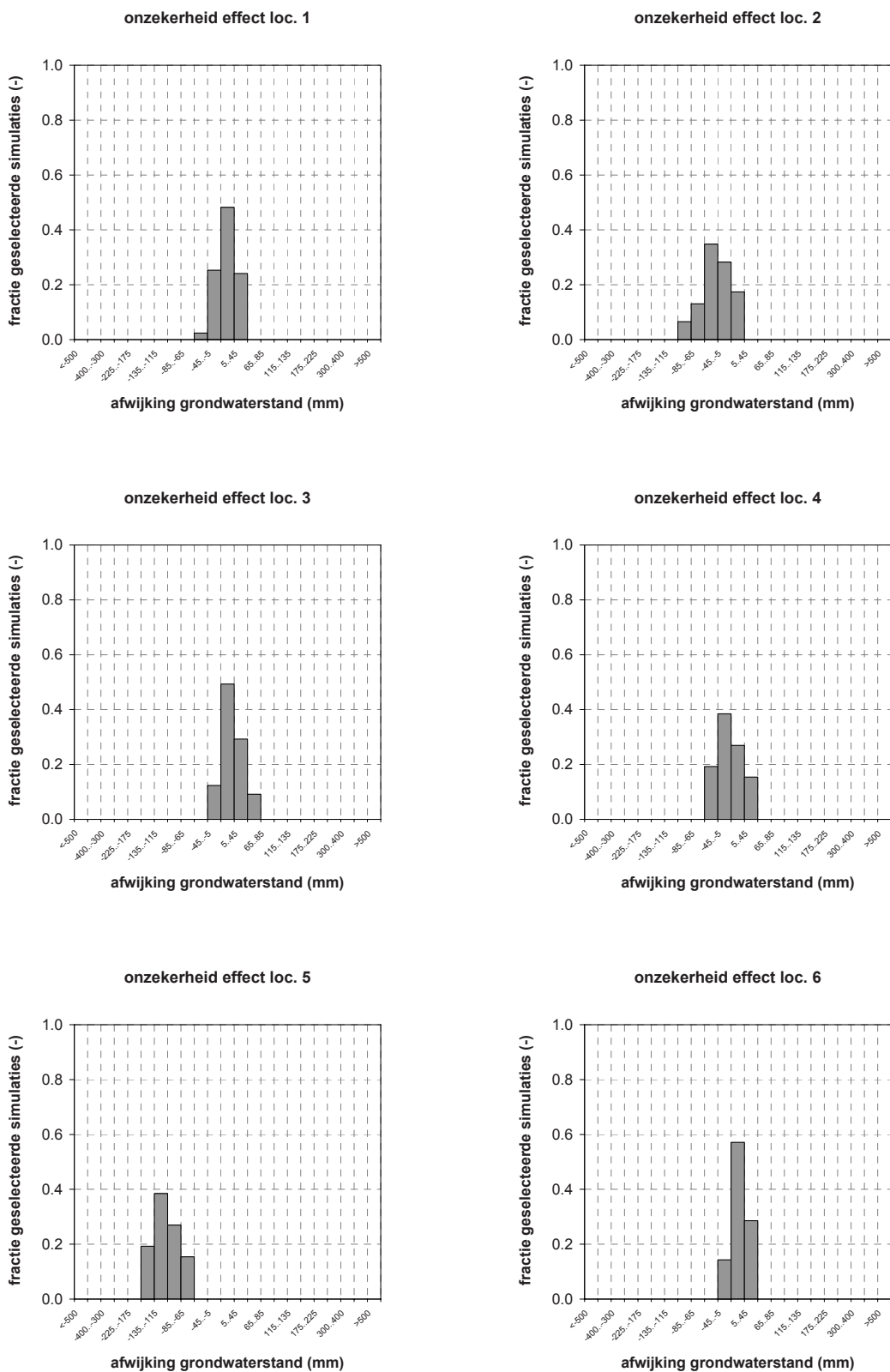
FIGUUR 14-3 EFFECT MAATREGEL VASTHOUDEN OP DE GRONDWATERSTANDEN (50% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 13, 14 EN 15 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



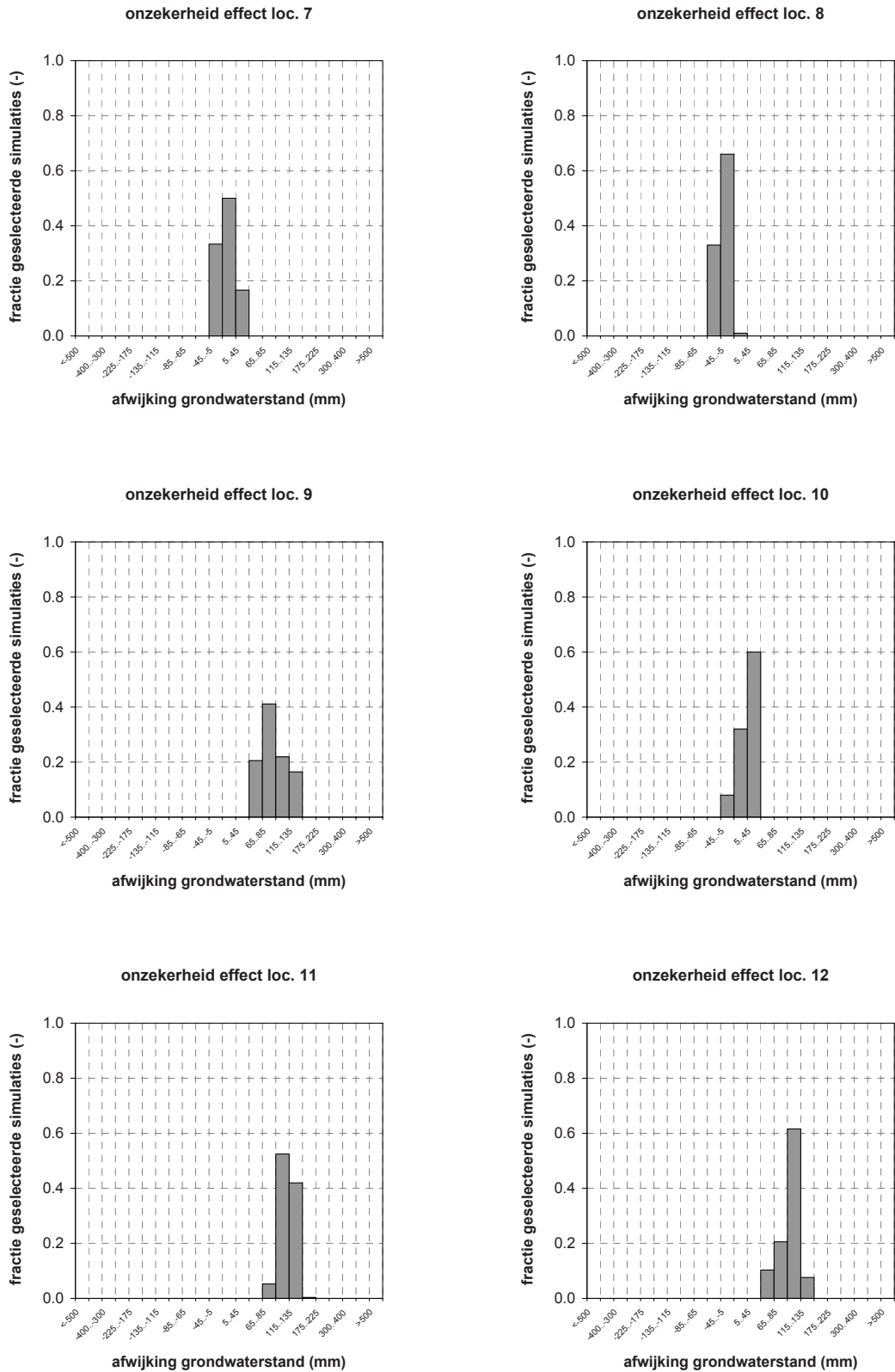
EFFECT OP MAXIMALE GRONDWATERSTANDEN

Het verschil tussen het 75 procent percentiel van de grondwaterstanden van de uitgangssituatie en de situatie met maatregel Vasthouden is uitgedrukt in een histogram. In Figuur 14-4, Figuur 14-5 en Figuur 14-6 zijn deze resultaten van de maatregel van de grondwaterstanden per locatie weergegeven.

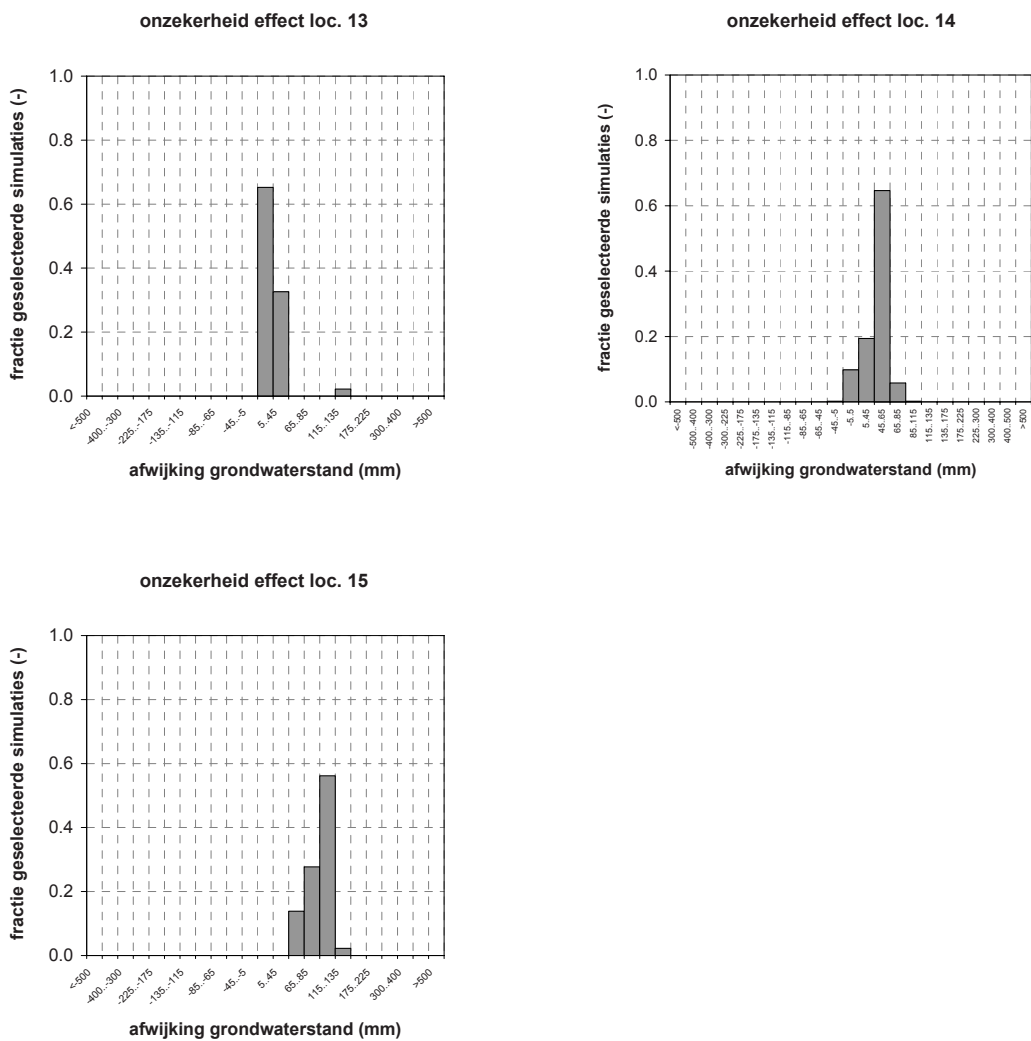
FIGUUR 14-4 EFFECT MAATREGEL VASTHOUDEN OP DE GRONDWATERSTANDEN (75% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 1, 2, 3, 4, 5 EN 6 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



FIGUUR 14-5 EFFECT MAATREGEL VASTHOUDEN OP DE GRONDWATERSTANDEN (75% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 7, 8, 9, 10, 11 EN 12 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



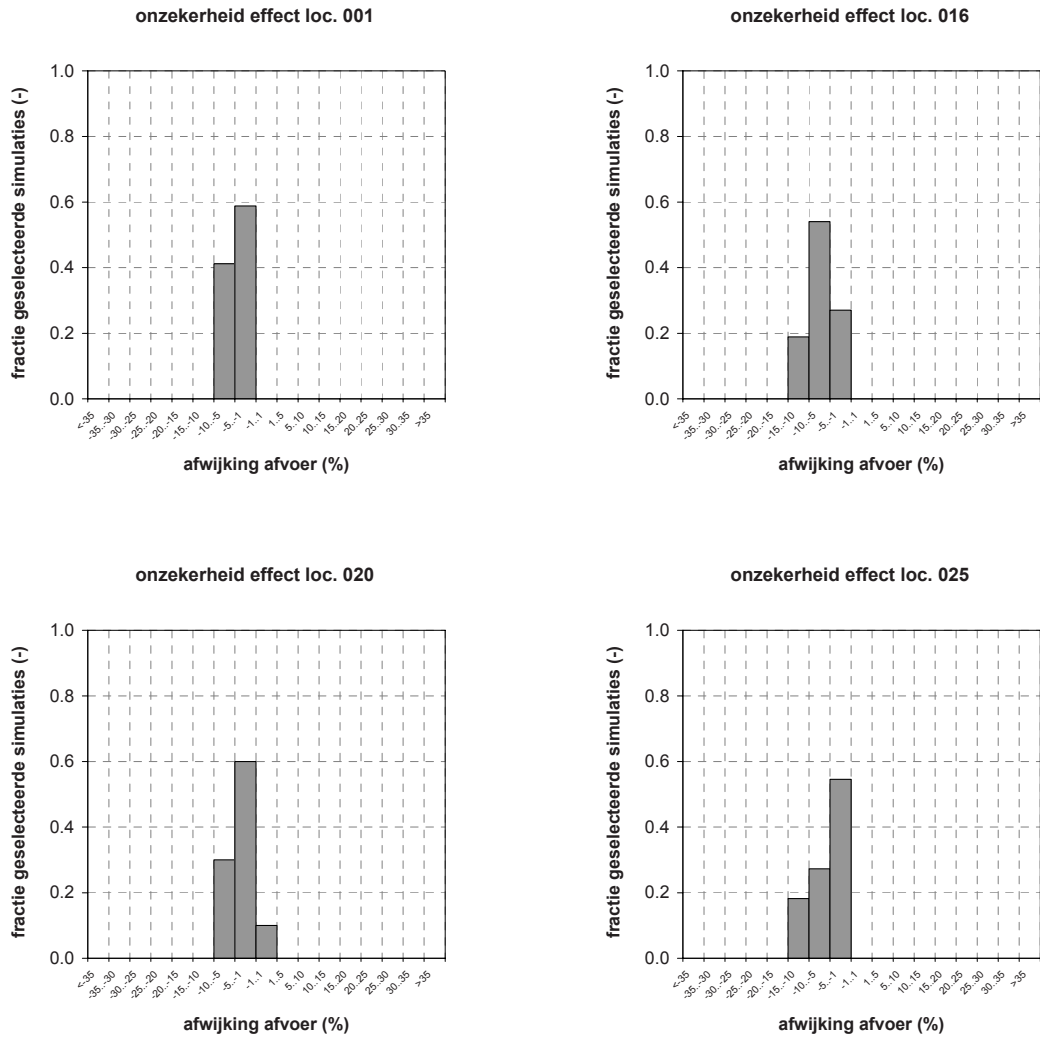
FIGUUR 14-6 EFFECT MAATREGEL VASTHOUDEN OP DE GRONDWATERSTANDEN (75% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 13, 14 EN 15 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



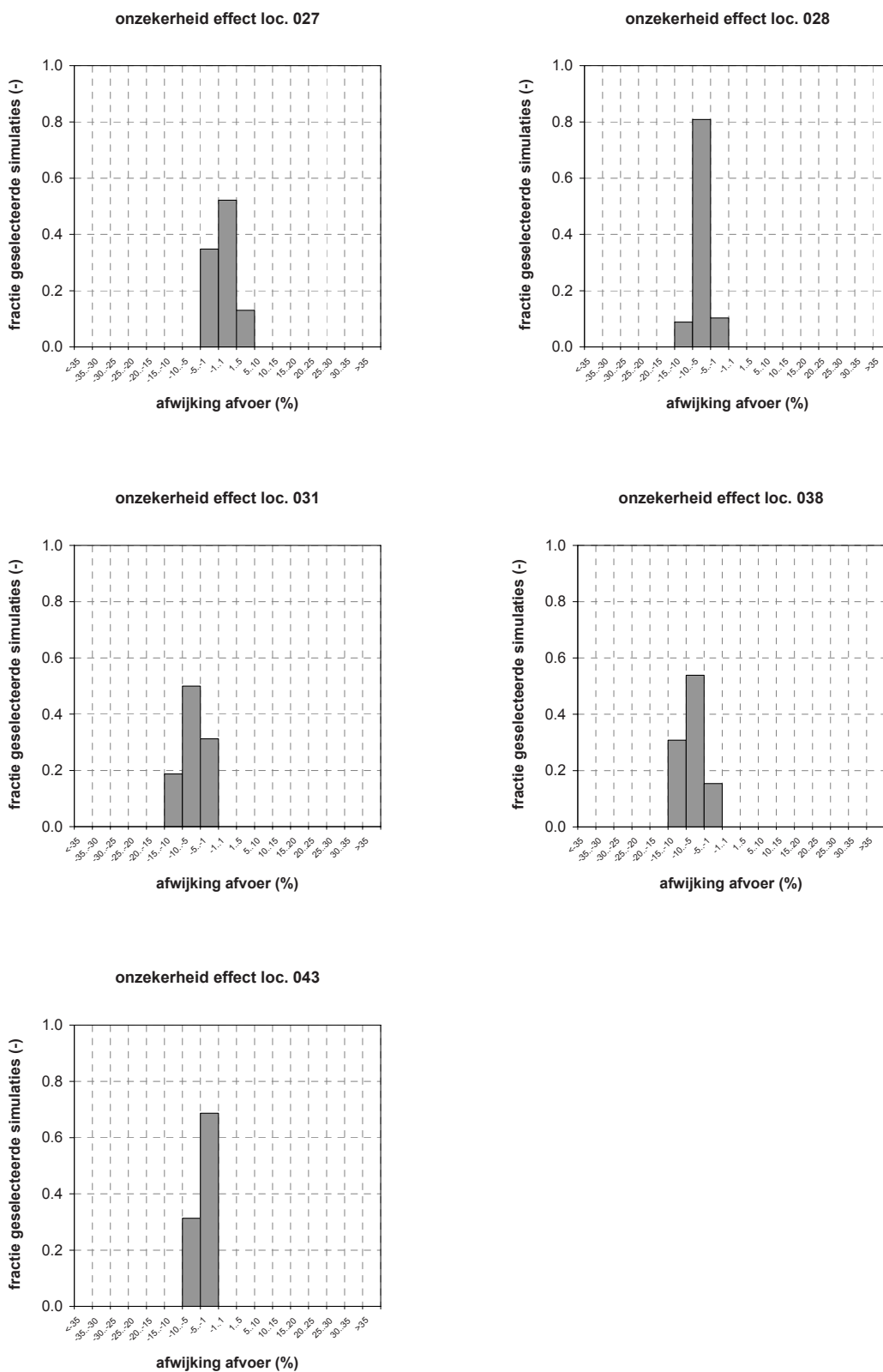
EFFECT OP GEMIDDELDE AFVOEREN

Het verschil tussen het 50 procent percentiel van de oppervlaktewaterafvoeren van de uitgangssituatie en de situatie met maatregel Vasthouden is uitgedrukt in een histogram. In Figuur 14-7 en Figuur 14-8 zijn deze resultaten van de maatregel van de oppervlaktewaterafvoeren per locatie weergegeven.

FIGUUR 14-7 EFFECT MAATREGEL VASTHOUDEN OP DE OPPERVLAKTEWATER AFVOER (50% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 001, 016, 020 EN 025 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



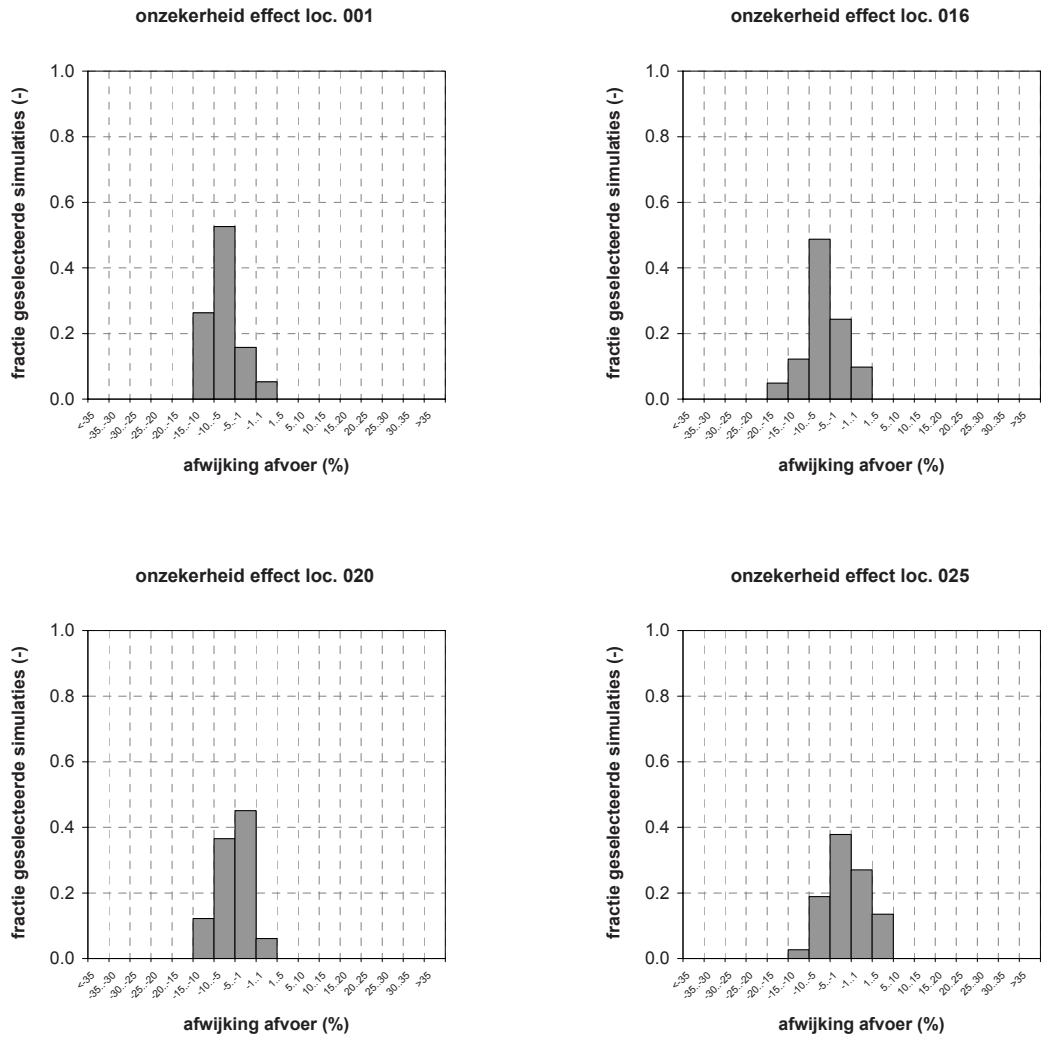
FIGUUR 14-8 EFFECT MAATREGEL VASTHOUDEN OP DE OPPERVLAKTEWATER AFVOER (50% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 027, 028, 031, 038 EN 043 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



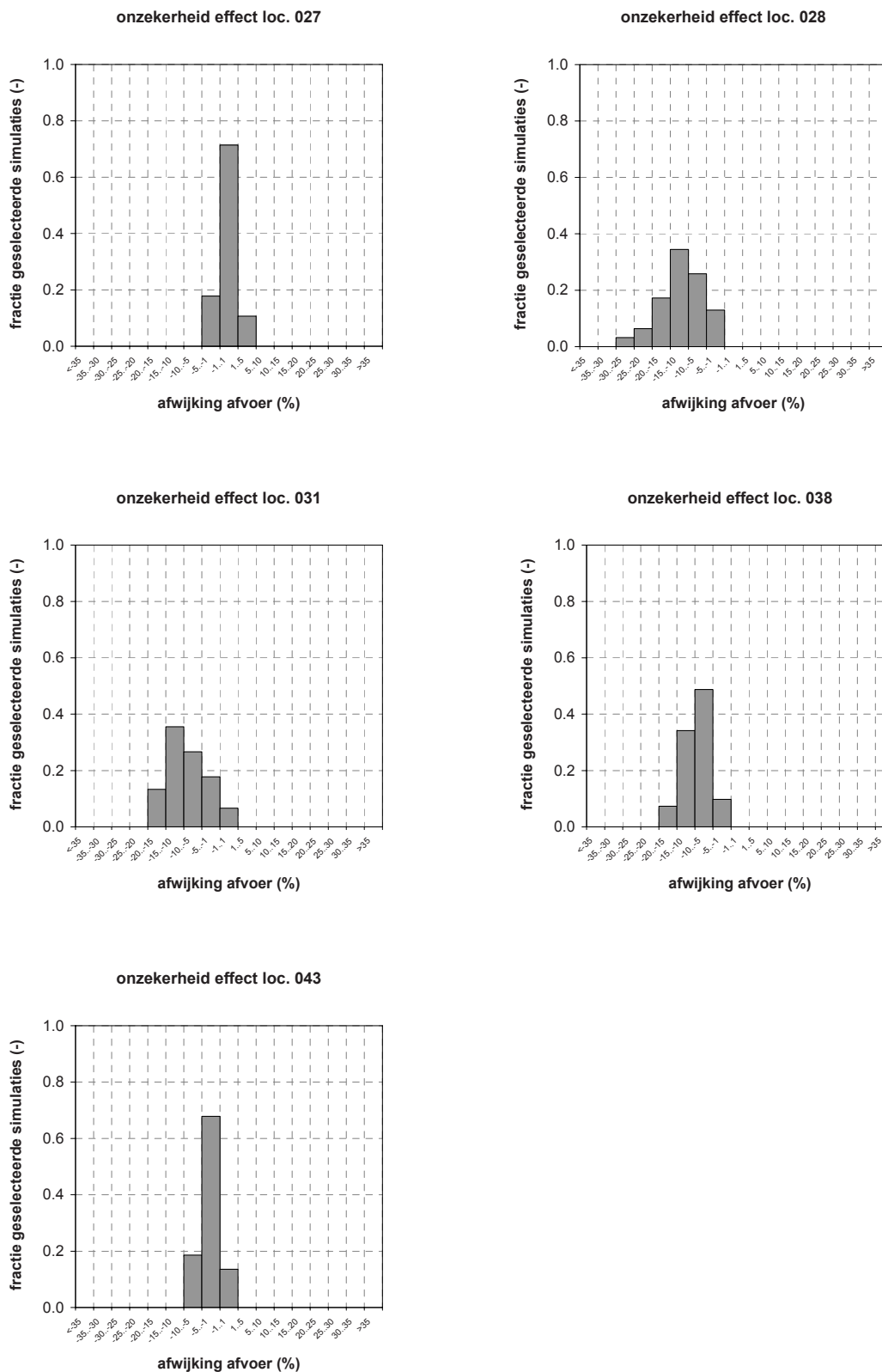
EFFECT OP MAXIMALE AFVOEREN

Het verschil tussen het 75 percentiel van de oppervlaktewaterafvoeren van de uitgangssituatie en de situatie met maatregel Vasthouden is uitgedrukt in een histogram. In Figuur 14-9 en Figuur 14-10 zijn deze resultaten van de maatregel van de oppervlaktewaterafvoeren per locatie weergegeven.

FIGUUR 14-9 EFFECT MAATREGEL VASTHOUDEN OP DE OPPERVLAKTEWATER AFVOER (75% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 001, 016, 020 EN 025 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



FIGUUR 14-10 EFFECT MAATREGEL VASTHOUDEN OP DE OPPERVLAKTEWATER AFVOER (75% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 027, 028, 031, 038 EN 043 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



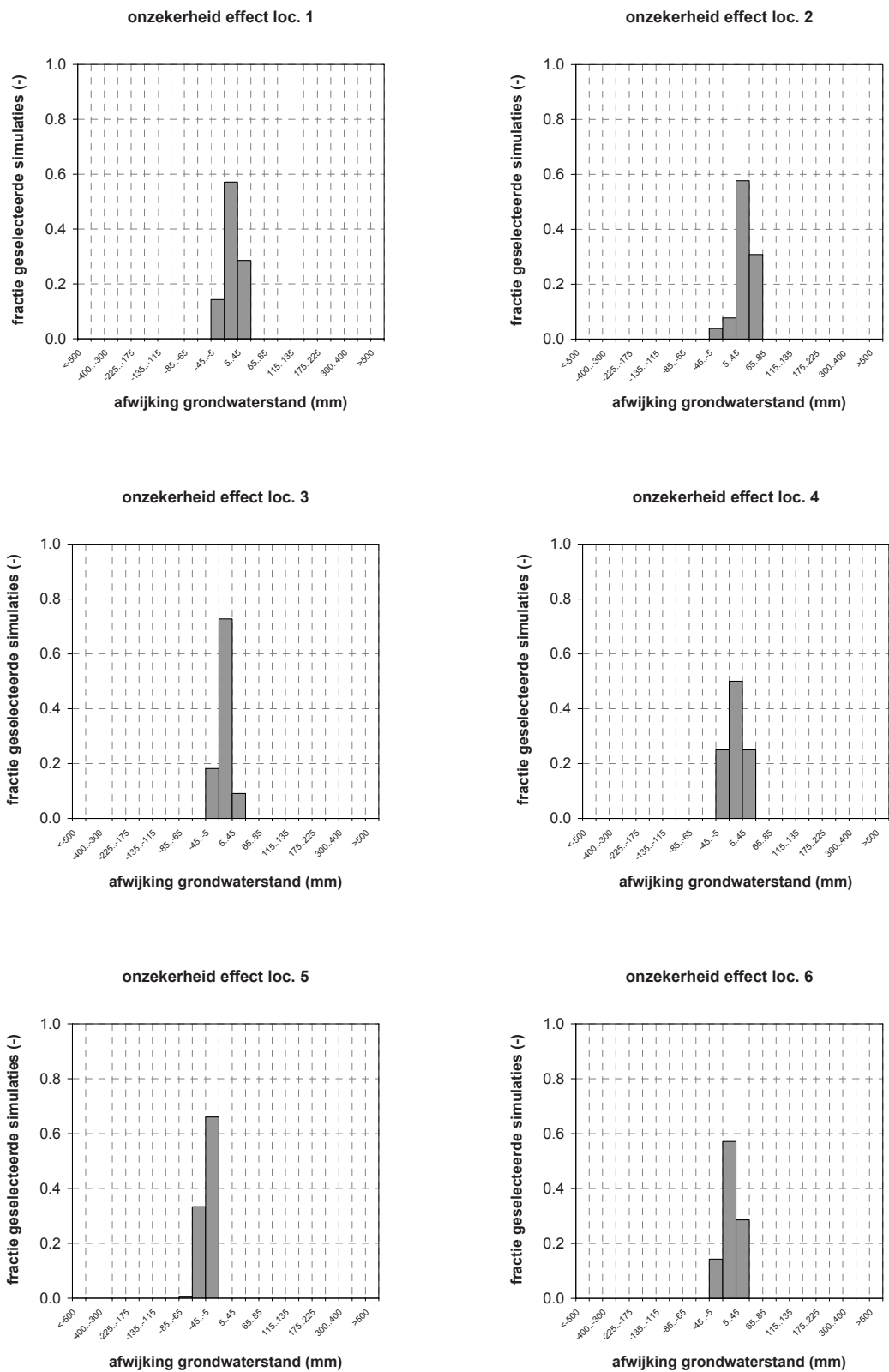
BIJLAGE G

EFFECT VAN MAATREGEL AFVOEREN

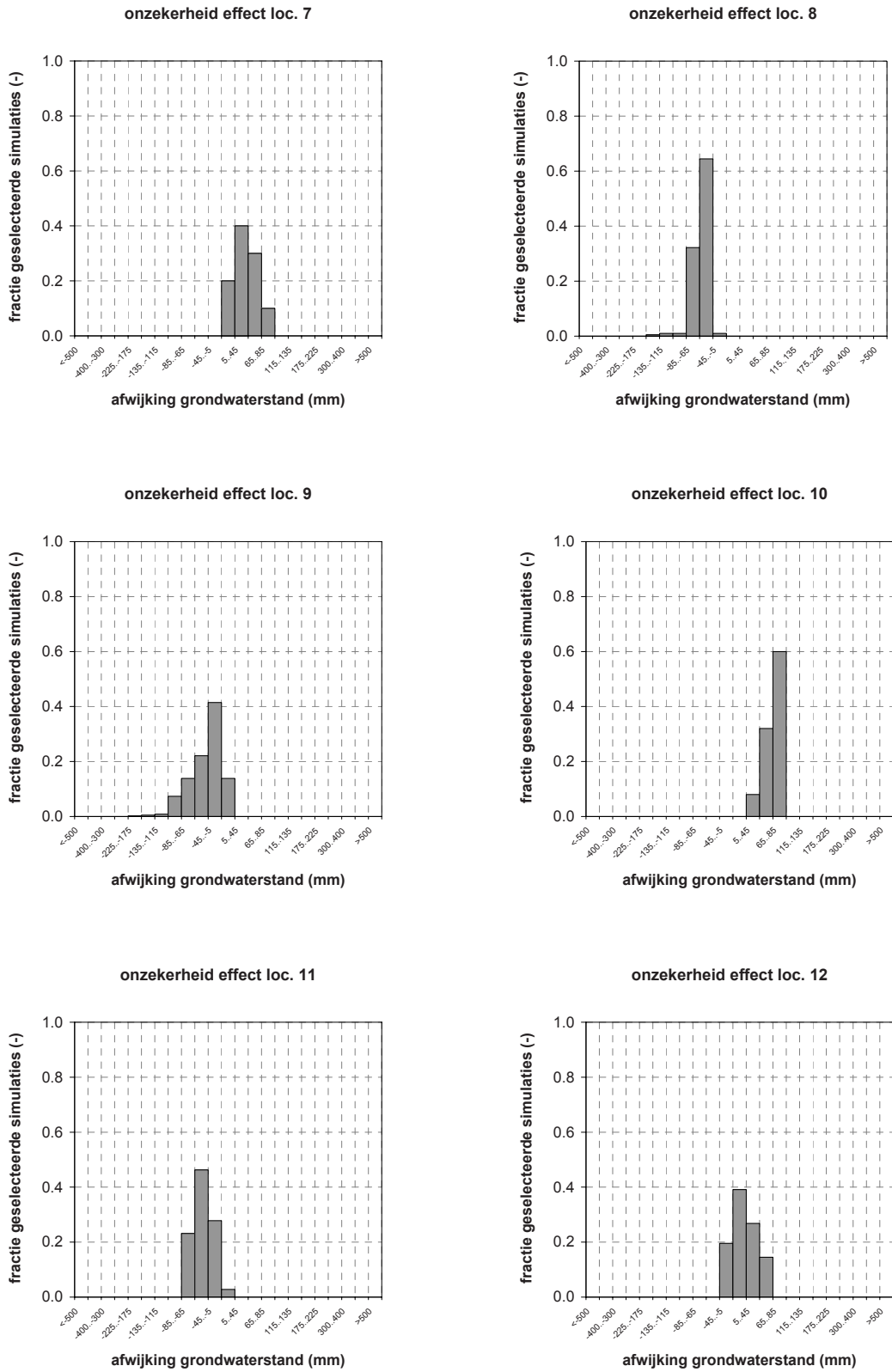
EFFECT OP GEMIDDELTE GRONDWATERSTANDEN

Het verschil tussen het 50 procent percentiel van de grondwaterstanden van de uitgangssituatie en de situatie met maatregel Vasthouden is uitgedrukt in een histogram. In Figuur 15-1, Figuur 15-2 en Figuur 15-3 zijn deze resultaten van de maatregel van de grondwaterstanden per locatie weergegeven.

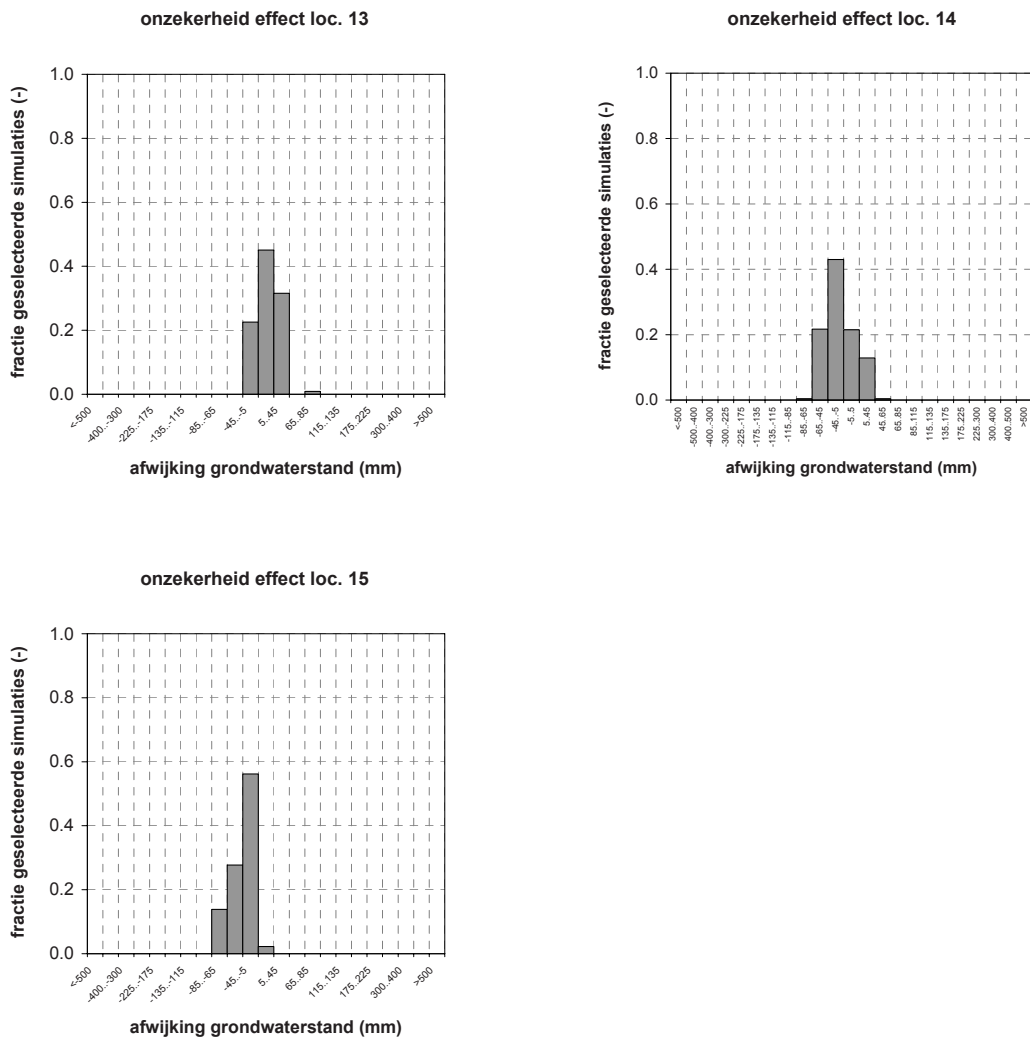
FIGUUR 15-1 EFFECT MAATREGEL AFVOEREN OP DE GRONDWATERSTANDEN (50% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 1, 2, 3, 4, 5 EN 6 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



FIGUUR 15-2 EFFECT MAATREGEL AFVOEREN OP DE GRONDWATERSTANDEN (50% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 7, 8, 9, 10, 11 EN 12 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



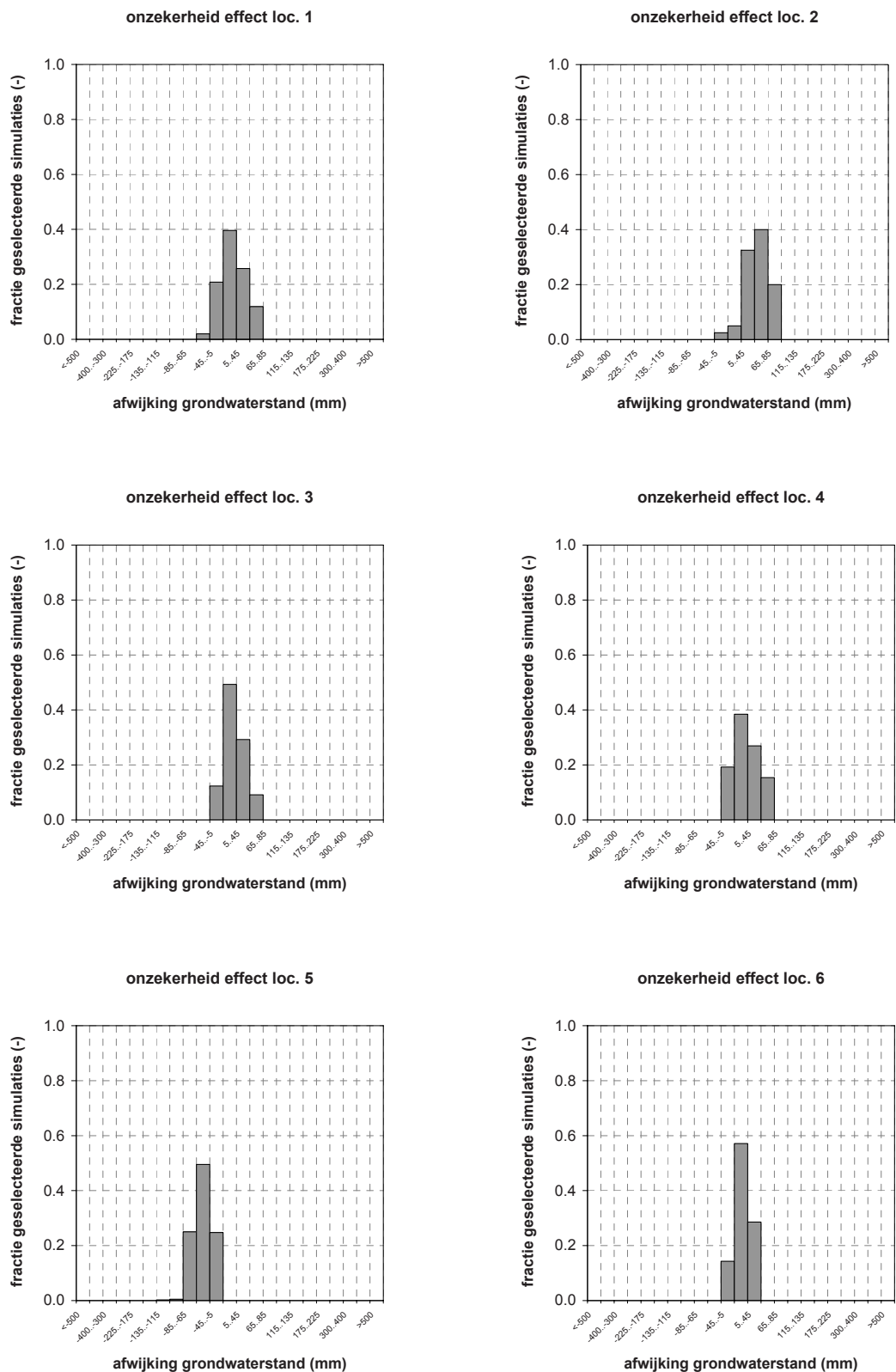
FIGUUR 15-3 EFFECT MAATREGEL AFVOEREN OP DE GRONDWATERSTANDEN (50% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 13, 14 EN 15 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



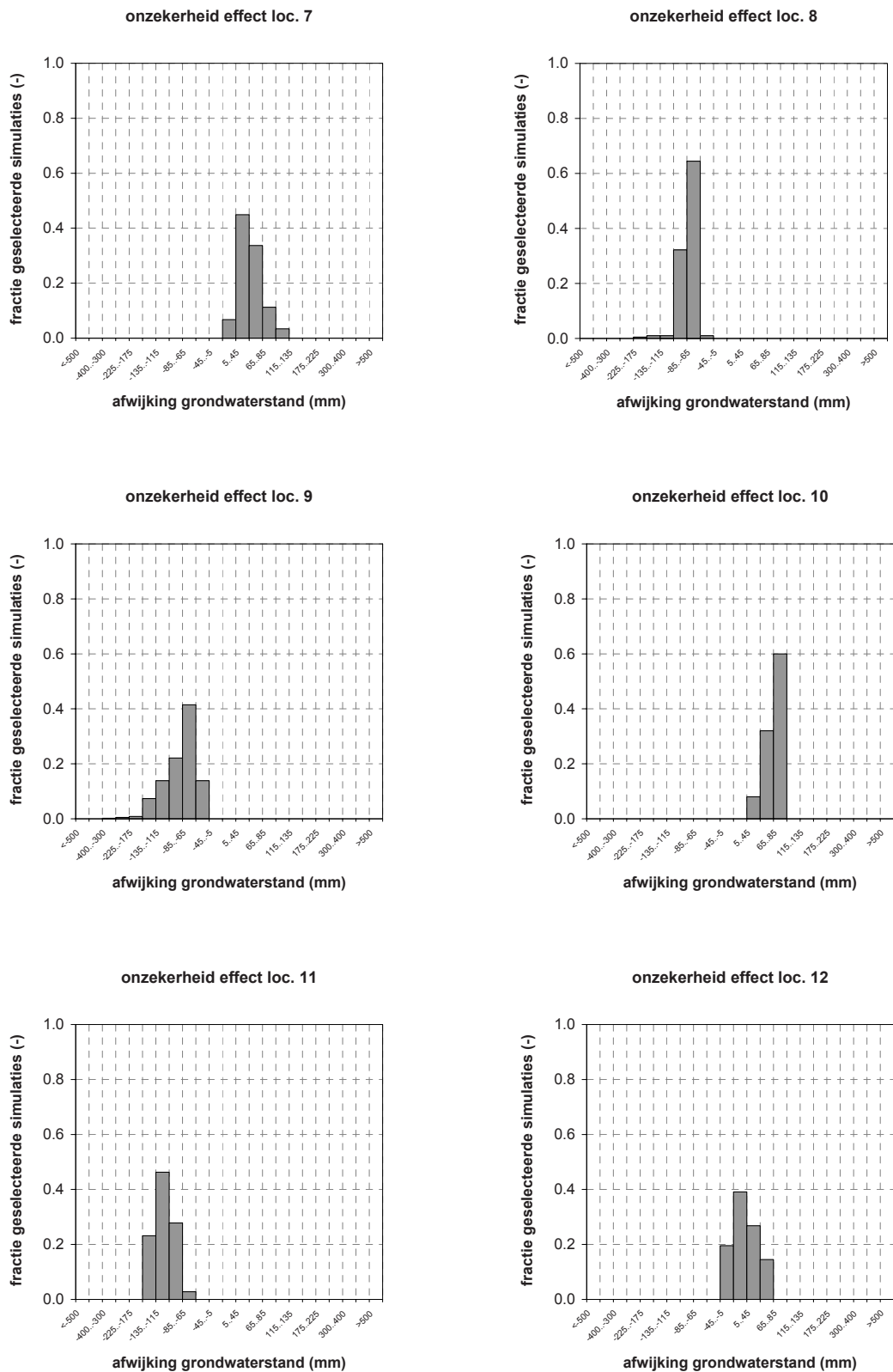
EFFECT OP MAXIMALE GRONDWATERSTANDEN

Het verschil tussen het 75 procent percentiel van de grondwaterstanden van de uitgangssituatie en de situatie met maatregel Vasthouden is uitgedrukt in een histogram. In Figuur 15-4, Figuur 15-5 en Figuur 15-6 zijn deze resultaten van de maatregel van de grondwaterstanden per locatie weergegeven.

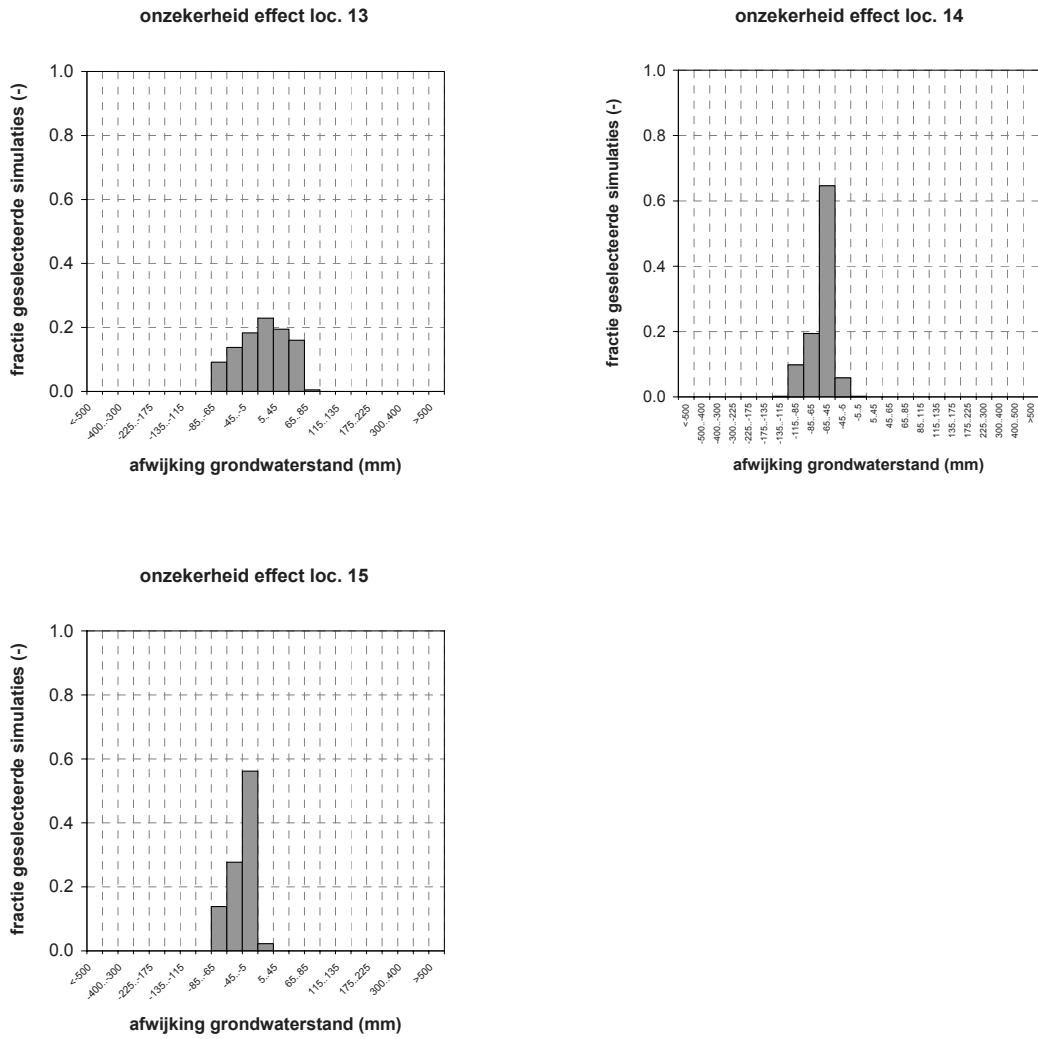
FIGUUR 15-4 EFFECT MAATREGEL AFVOEREN OP DE GRONDWATERSTANDEN (75% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 1, 2, 3, 4, 5 EN 6 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



FIGUUR 15-5 EFFECT MAATREGEL AFVOEREN OP DE GRONDWATERSTANDEN (75% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 7, 8, 9, 10, 11 EN 12 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



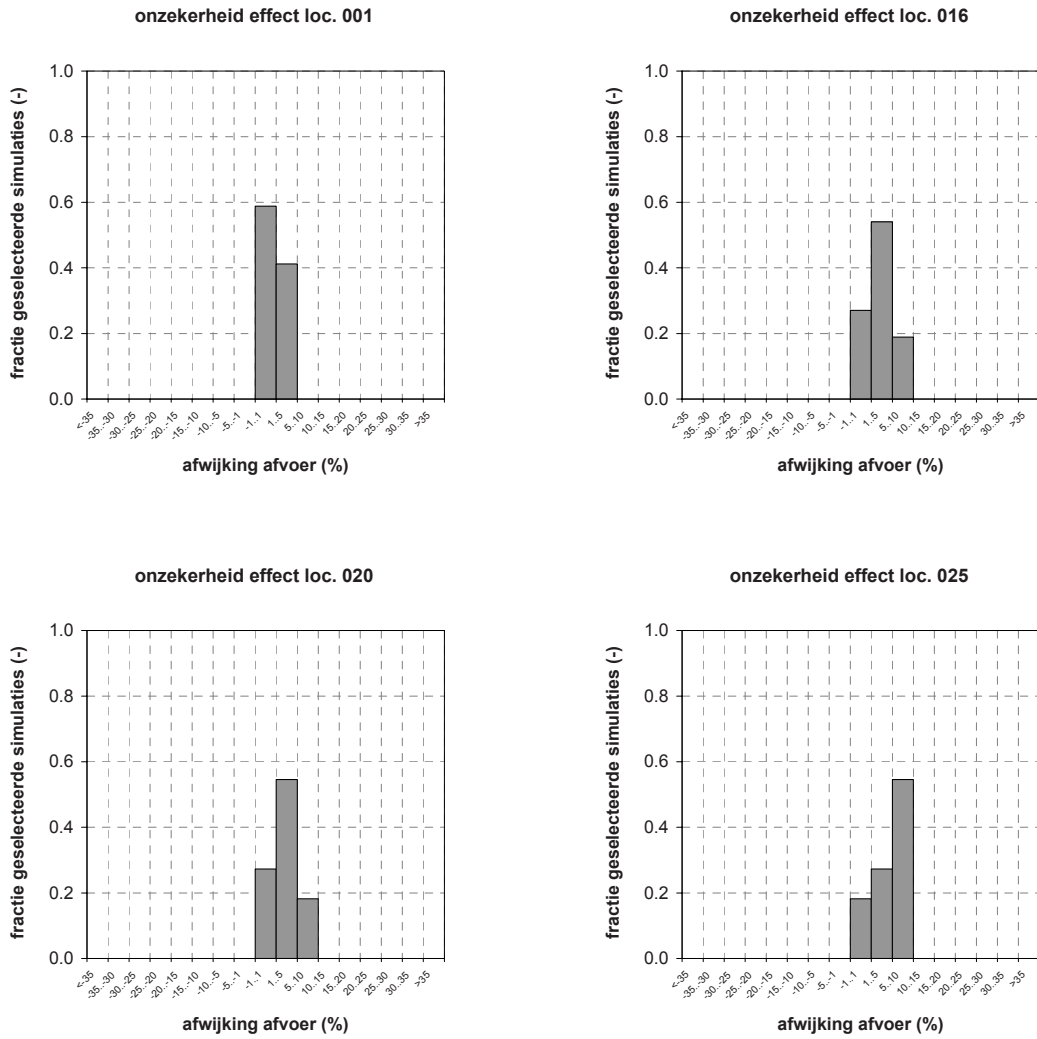
FIGUUR 15-6 EFFECT MAATREGEL AFVOEREN OP DE GRONDWATERSTANDEN (75% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 13, 14 EN 15 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



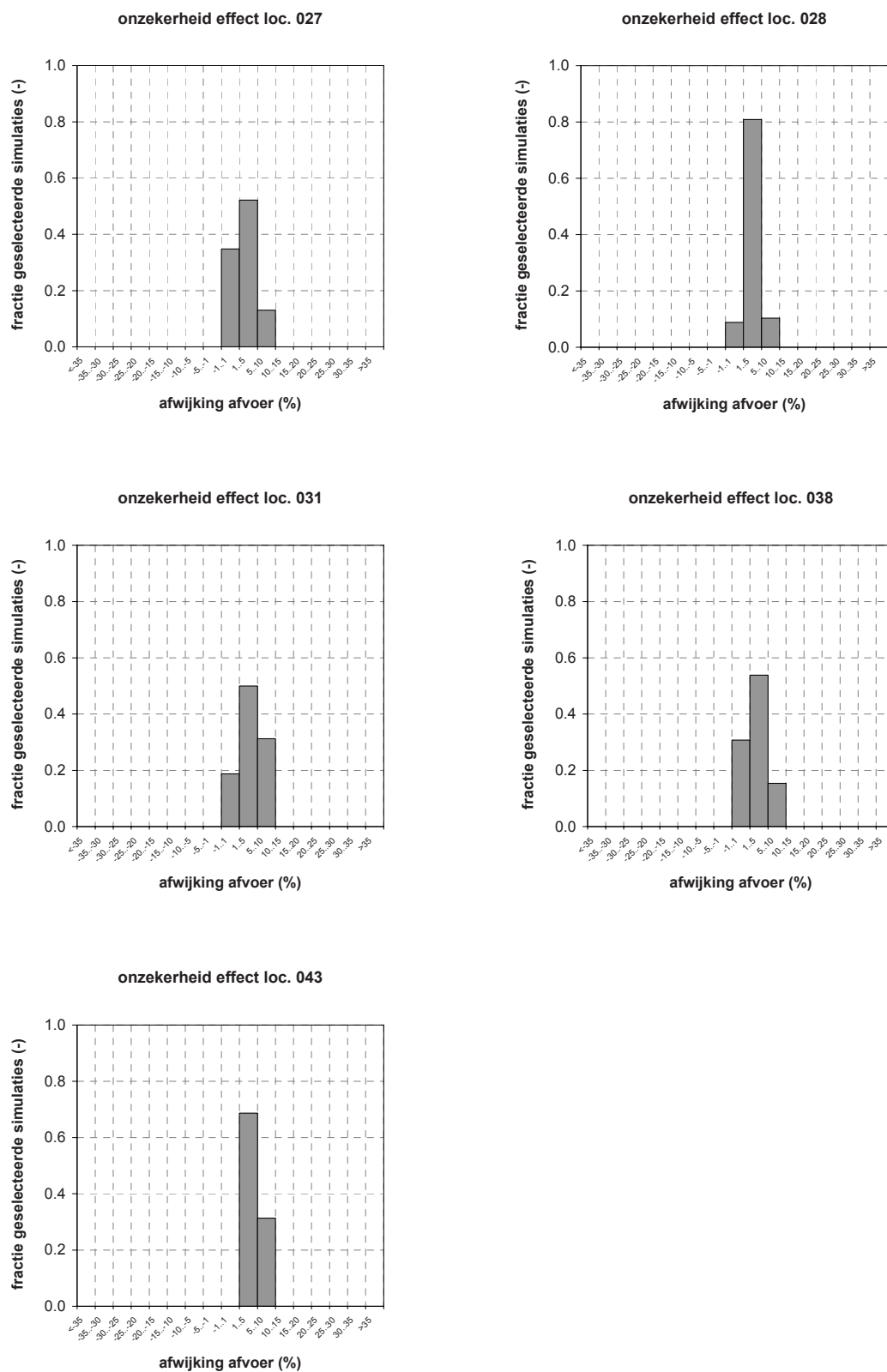
EFFECT OP GEMIDDELDE AFVOEREN

Het verschil tussen het 50 procent percentiel van de oppervlaktewaterafvoeren van de uitgangssituatie en de situatie met maatregel Vasthouden is uitgedrukt in een histogram. In Figuur 15-7 en Figuur 15-8 zijn deze resultaten van de maatregel van de oppervlaktewaterafvoeren per locatie weergegeven.

FIGUUR 15-7 EFFECT MAATREGEL AFVOEREN OP DE OPPERVLAKTewater AFVOER (50% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 001, 016, 020 EN 025 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



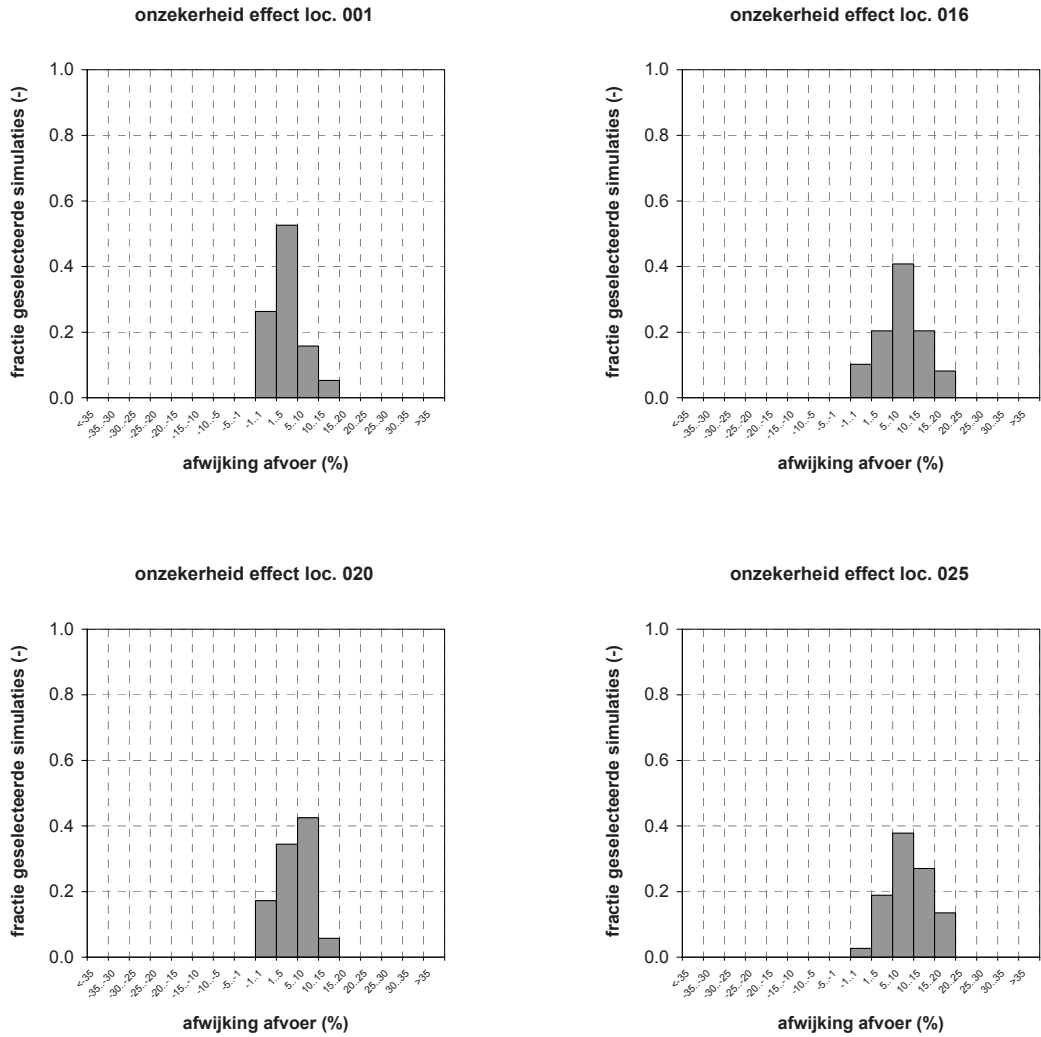
FIGUUR 15-8 EFFECT MAATREGEL AFVOEREN OP DE OPPERVLAKTEWATER AFVOER (50% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 027, 028, 031, 038 EN 043 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



EFFECT OP MAXIMALE AFVOEREN

Het verschil tussen het 75 procent percentiel van de oppervlaktewaterafvoeren van de uitgangssituatie en de situatie met maatregel Vasthouden is uitgedrukt in een histogram. In Figuur 15-9 en Figuur 15-10 zijn deze resultaten van de maatregel van de oppervlaktewaterafvoeren per locatie weergegeven.

FIGUUR 15-9 EFFECT MAATREGEL AFVOEREN OP DE OPPERVLAKTEWATER AFVOER (75% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 001, 016, 020 EN 025 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)



FIGUUR 15-10 EFFECT MAATREGEL AFVOEREN OP DE OPPERVLAKTEWATER AFVOER (75% PERCENTIEL) VAN LOCATIES 027, 028, 031, 038 EN 043 (BIJ RUIMTELIJK GECORRELEERDE NEERSLAGFOUT)

