
Faalkansanalyse Langbroekerwetering

Een toepassing van de stochastenmethode

A.A. Veldhuizen en P.E.V. van Walsum

In hydrologeland is de afgelopen tijd veel te doen geweest over de methode om faalkansen van watersystemen te bepalen. Er zijn op dit gebied twee 'scholen' die beide gebruik maken van statistieken. De ene school propageert het maken van een statistische analyse van alleen de uitkomsten van modellen of metingen met behulp van de statistieken van extremen (Gumbel, 1958). De andere school beweert dat de verschillende drijvende krachten achter een faalmechanisme (bijvoorbeeld neerslag) in termen van kansen kunnen worden aangegeven en als invoer kunnen dienen voor modelberekeningen: de stochastenmethode (De Graaff en Versteeg, 2000). In opdracht van de Unie van Waterschappen wordt hierover een vergelijkend warenonderzoek uitgevoerd. Dit artikel gaat hier niet op in, maar is een voorbeeld van de toepassing van de tweede methode.

De methode is toegepast op het Langbroekerweteringgebied, dat wordt ingesloten door de Kromme Rijn aan de westkant, de rivier de Lek aan de zuidkant en de Utrechtse Heuvelrug aan de noordoostkant. Daarbij is gebruik gemaakt van het bestaande gekalibreerde SIMGRO-model van het gebied (Hermans e.a., 2004; Van Walsum e.a., 2004). De mechanismen die in dit gebied kunnen leiden tot het falen van het systeem zijn: de neerslaghoeveelheid, de neerslagintensiteit, de beschikbare berging in bodem en oppervlaktewater en de rivierwaterstand in de Lek. Van elk van deze mechanismen is een kansverdeling opgesteld. Alle mogelijke combinaties (in totaal bijna 1000 per scenario) zijn doorgerekend met het SIMGRO-model. De modeluitkomsten zijn vervolgens gebruikt om een faalkanskaart te construeren. Deze kaart is getoetst aan de werknormen van de Unie van Waterschappen voor het huidige klimaat, het middenscenario 2050 en het maximumscenario 2050 (KNMI, 2003).

Inleiding

Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden (HDSR) voert voor het gehele beheersgebied normeringstudies uit. Hierbij wordt getoetst of het systeem voldoet aan de normen voor wateroverlast zoals gesteld door de Unie van Waterschappen. De toetsing wordt uitgevoerd door de berekende kans op 'falen' van het systeem te vergelijken met de gestelde norm. Het falen van het systeem wordt hier gedefinieerd als het optreden van inundatie door een ontoereikende afwatering.

Door Hermans e.a. (2004) is voor het Langbroekerweteringgebied (zie figuur 1) een model gebouwd op basis van de SIMGRO-code (Van Walsum e.a., 2004). Het bijzondere van

A.A. Veldhuizen en P.E.V. van Walsum zijn werkzaam bij Alterra, Wageningen.

dit model is dat het de relatie tussen water op het maaiveld, bodemwater, grondwater en oppervlaktewater op een fysisch gebaseerde manier beschrijft. Hierdoor is het model geschikt voor het doorrekenen van inrichtingsvarianten bij het onderbouwen van bijvoorbeeld de GGOR en het daarbij tevens bepalen van de faalkansen. Daartoe is het model gebruikt in combinatie met de methode van de 'stochasten' (De Graaff en Versteeg, 2000). Dit is gedaan voor de huidige situatie en twee klimaatscenario's van het KNMI voor 2050 (KNMI, 2003): het zogenaamde middenscenario met een temperatuurstijging van 1 °C, en het maximumscenario met een stijging van 2 °C. Aangezien in dit onderzoek gebruik wordt gemaakt van een fysisch gebaseerd integraal model is het ons inziens verantwoord berekeningen uit te voeren die buiten het bereik van de huidige situatie liggen, zoals klimaatveranderingen.

Werkwijze

De gevolgde werkwijze voor de faalkansanalyse omvat een aantal stappen. Voor verschillende aspecten van het systeemfunctioneren zijn voor zomer en winter 4 stochasten gedefinieerd die betrekking hebben op een 9-daagse 'gebeurtenis':

- neerslagsom;
- neerslagverdeling;
- beginconditie (grondwater, bodemwater, oppervlaktewater);
- rivierwaterstand (niet of wel hoogwater in de Lek).

Aan alle mogelijke realisaties van de stochasten worden kansen toegekend; daarbij wordt aangenomen dat de stochasten onderling onafhankelijk zijn. Vervolgens worden alle mogelijke *combinaties* van realisaties – de mogelijke gebeurtenissen – doorgerekend met het model, en worden de uitkomsten gerangschikt naar oplopende grond- en oppervlaktewaterstand. Iedere combinatie heeft een bepaalde kans, en die wordt gebruikt voor het construeren van de cumulatieve kansverdeling die hoort bij de gerangschikte uitkomsten. Deze kansverdeling wordt aan een nadere analyse onderworpen, om uiteindelijk te komen tot een faalkanskaart, waarin wordt aangegeven wat de herhalingstijd is van inundaties. In het navolgende worden allereerst de stochasten uitgewerkt, gevolgd door analyse van de resultaten.

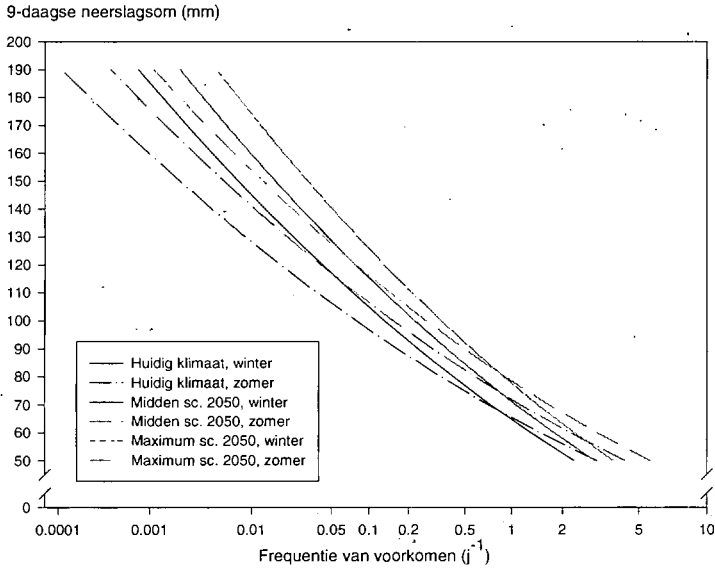


Figuur 1: Studiegebied Langbroekerwetering (Hermans e.a., 2004).

De stochasten

Neerslagsom

Als mogelijke meteorologische realisaties voor een 9-daagse periode zijn opeenvolgende neerslagtotalen gebruikt van 50–190 mm, met stappen van 10 mm. Deze zijn vastgelegd als een gemiddeld aantal keren per jaar dat de realisatie een bepaalde waarde aanneemt. Dat kan variëren van jaarlijks gemiddeld 5,6 keer voor 45–55 (50) mm in de zomer in het maximum klimaatscenario 2050, tot 1 keer per 12.500 jaar voor bijvoorbeeld 185–195 (190) mm neerslag in de winter in het huidige klimaat. De frequentieverdeling is in principe gebiedsafhankelijk en is door Versteeg en Kolen (2003) afgeleid voor HDSR. Aangenomen is dat realisaties met minder dan 45 mm in 9 dagen niet tot wateroverlastproblemen leiden. Ook is aangenomen dat realisaties van meer dan 195 mm in 9 dagen zo zeldzaam zijn dat het niet zinvol is deze door te rekenen. In figuur 2 zijn de neerslagrealisaties met hun kansen weergegeven.



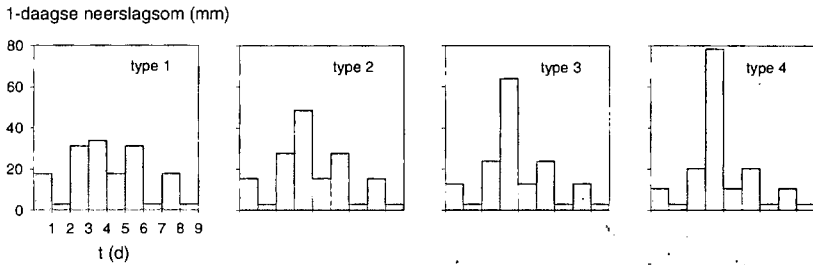
Figuur 2: Frequentie van voorkomen van 9-daagse neerslagsommen voor HDSR voor het huidige klimaat en 2 klimaatscenario's, in zomer en winter (Versteeg en Kolen, 2003).

Neerslagverdeling

Per neerslagsom zijn er vier typen mogelijke verdelingen gemaakt (Versteeg en Kolen, 2003). Voor bijvoorbeeld 160 mm zien de verdelingen er uit als gegeven in figuur 3. Voor de overige neerslagsommen zijn de verdelingen vergelijkbaar. De kans per type is vastgelegd in tabel 1. Bij het gebruik van de neerslagrealisaties in het model moest er een aanname worden gedaan met betrekking tot de verdeling van de neerslaghoeveelheden *binnen* een dag. Bij de stochastische berekeningen is aangenomen dat gezien de extreme hoeveelheden de gemiddelde regenduur in de zomer 6 uur en in de winter 12 uur is. Uiteraard zijn deze waarden niet anders te rechtvaardigen dan met 'expert judgement'.

Tabel 1: Kans (%) van voorkomen van een neerslagtype.

Type	Kans van voorkomen (%)	Omschrijving
1	10	Uniform
2	60	Gemiddeld laag
3	20	Gemiddeld hoog
4	10	Extreem



Figuur 3: Type neerslagverdelingen voor een 9-daagse neerslagsom van 160 mm (Versteeg en Kolen, 2003).

Beginconditie

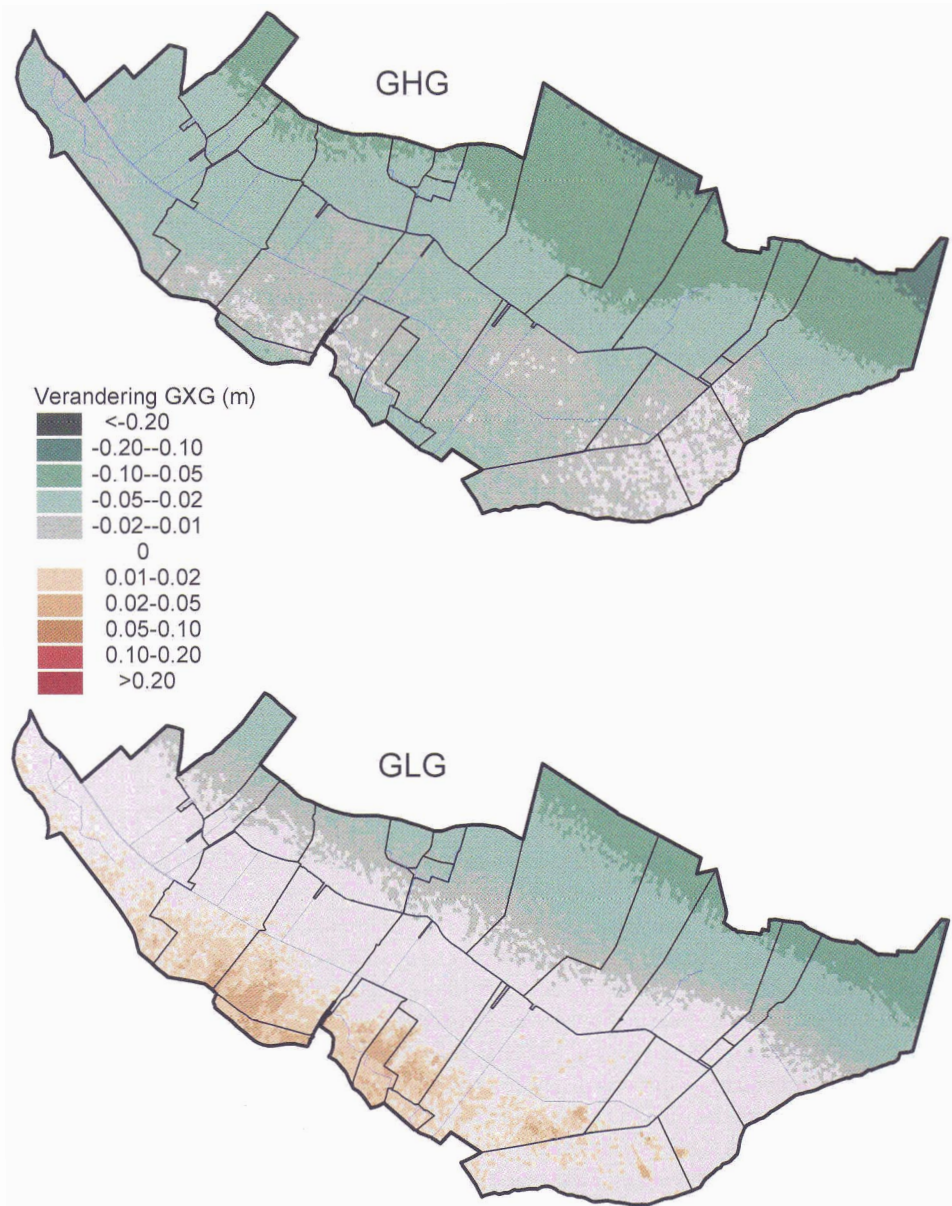
Door Cirkel e.a. (2003) is geïllustreerd dat de stochastenmethode zeer gevoelig is voor begincondities. In deze stap is daarom met de beschikbare meteorologische reeksen (De Bilt) een kansverdeling bepaald van de toestand die men op een willekeurig moment in zomer/winter in het gebied kan aantreffen. In tabel 2 is (als aanvullende informatie ten behoeve van de interpretatie van kaartbeelden) een overzicht gegeven van de 30-jarige klimaatgemiddelden van neerslag en verdamping voor zomer en winter.

Tabel 2: Overzicht van klimaatgemiddelden van de gebruikte weerreeksen (De Bilt, 1971–1999), voor het huidig klimaat en twee klimaatscenario's (KNMI, 2003). De potentiële verdamping (ET_{pot}) heeft betrekking op grasland.

Waterbalansterm (mm/d)	Huidig klimaat	Middenscenario 2050	Maximumscenario 2050
N_{zomer}	2,05	2,07	2,09
$ET_{pot,zomer}$	2,43	2,54	2,64
N_{winter}	2,25	2,39	2,55
$ET_{pot,winter}$	0,51	0,52	0,55

De dertigjarige reeks is eerst gebruikt voor het draaien van het SIMGRO-model (Grontmij, 2002; Wendt, 1998), dat een groot deel van de provincie Utrecht beslaat. Daaruit zijn randvoorwaarden gehaald voor het Langbroekerweteringmodel. Dat is gedaan voor de drie scenario's (huidige situatie + 2X klimaat), en daaruit zijn onder meer GHG- en GLG-kaarten berekend. In figuur 4 is het ruimtelijke beeld gegeven van de verandering van de GHG en de GLG. Gezien de verwachte toename van de neerslag tijdens het winterhalfjaar in toekomstige klimaatscenario's zal de GHG naar verwachting ondieper worden. Onder de Utrechtse Heuvelrug is het effect het grootst, omdat de grondwaterstandstijging aldaar niet wordt geremd door een actieve ontwatering. Het ruimtelijke beeld van de voorspelde verandering van de GLG vraagt om een nadere uitleg. Er is een verloop tussen de stijging onder de Utrechtse Heuvelrug naar een daling langs de zuidrand van het gebied. De daling langs de zuidrand wordt veroorzaakt door het dominante effect van de toename van de verdamping: via de capillaire opstijging wordt extra hard getrokken aan het grondwater, met een daling tot gevolg. Op de Utrechtse Heuvelrug heeft de toename van de potentiële

verdamping een beperkt effect op de actuele verdamping, want het betreft daar zogenaamde hangwaterprofielen en daarvoor geldt: 'op is op'. Verder is het zo dat de extra winterneerslag onder de Utrechtse Heuvelrug lang in het geheugen van het systeem blijft zitten vanwege het ontbreken van ontwatering. Dit effect is gedurende de hele zomer nog aanwezig, en heeft daardoor een stijging van de GLG tot gevolg. Het effect straalt uit in het lagere deel van het gebied, om ergens halverwege uit te doven. Vervolgens is er



Figuur 4: Verandering (+ = dieper) van de GHG en GLG als gevolg van het middenscenario voor 2050.

richting de zuidrand een omslag van stijging naar daling. De verandering van het middenscenario naar het maximumscenario voor 2050 ziet er vergelijkbaar uit.

Om te komen tot een kansverdeling van begincondities is eerst per tijdstap een *gebiedsgemiddelde* grondwaterstand bepaald. Door te sorteren is vervolgens de kansverdeling afgeleid. Het resultaat is uitgezet voor de huidige situatie en de twee klimaatscenario's in figuur 5, voor zomer en winter. Te zien is dat de klimaatscenario's een kleine verschuiving van de kansverdelingen tot gevolg hebben.

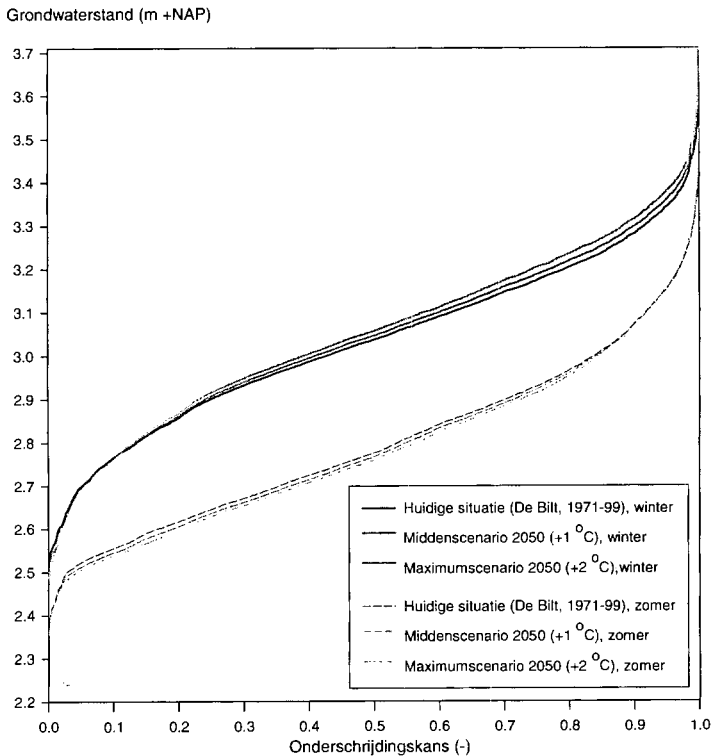
Hieruit moet niet de voorbarige conclusie worden getrokken dat de stochast begin-grondwaterstand niet klimaatgevoelig zou zijn. In de grafiek wordt namelijk een ruimtelijk gemiddelde gepresenteerd. Verder is duidelijk te zien dat als gevolg van klimaatverandering de verdelingen verder uit elkaar worden getrokken: de fluctuatie van zomer naar winter wordt groter. Deze analyse hebben we beperkt tot het aandachtsgebied van de studie, en daarbij is tevens geselecteerd op een GHG < 0,80 m -mv, omdat anders traag reagerende diepe grondwaterstanden te zeer het beeld gaan bepalen. Voor de hoogwateroverlastberekening is dat ongewenst.

Het relatief kleine verschil tussen zomer en winter komt doordat de analyse zich beperkt tot het nattere deel van het studiegebied. In dat deel is er veel kwel, en 'hangt' het grondwater als het ware aan de ontwatering.

Vervolgens is de kansverdeling gebruikt om begincondities te bepalen. Concreet zijn aan de hand van de kansverdeling vier tijdstippen gekozen die overeenkomen met de representatieve punten van de kansverdeling die zijn gegeven in tabel 3. De hydrologische situaties op die tijdstippen zijn gebruikt als begincondities van de 9-daagse stochastische berekeningen. Daarbij is de daaraan gekoppelde wortelzonevochtvoorraad en oppervlaktewaterstand als 'volgend' beschouwd. Door deze werkwijze wordt voorkomen dat gedurende de eerste paar dagen een 'hydrologisch wildwest' ontstaat als gevolg van onbalansen in het systeem. Voor deze ruimtelijke hydrologische consistentie wordt overigens wel een prijs betaald: als men kijkt naar de bijbehorende kansverdelingen per punt dan kunnen die afwijken van het gemiddelde beeld.

Tabel 3: Kansverdeling van de begincondities en keuze van representatieve punten erin gebaseerd op de kansverdeling van de gemiddelde grondwaterstand in het aandachtsgebied.

Interval van cumulatieve kansverdeling (%)	Representatief punt in de cumulatieve kansverdeling (%)	Kans van voorkomen (%)
0-40	20	40
40-70	55	30
70-90	80	20
90-100	95	10



Figuur 5: Kansverdeling van de gemiddelde grondwaterstand in het aandachtsgebied (gemiddeld maai- veld van 3,71 m +NAP) gebaseerd op 1-daagse grondwaterstanden voor een rekenperiode van 30 jaar.

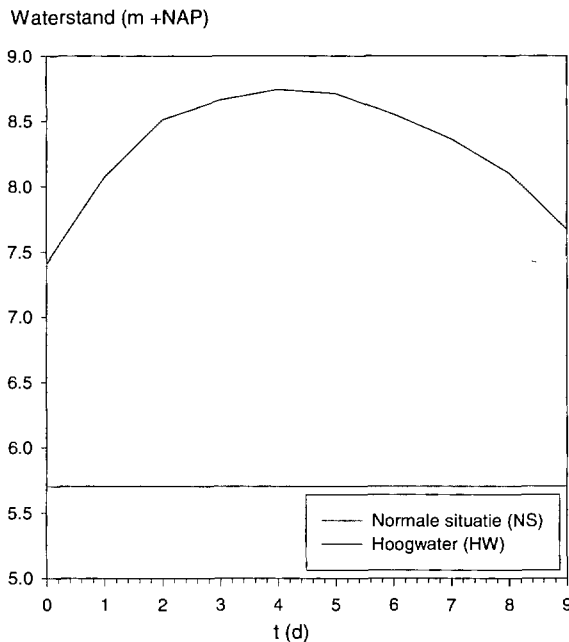
Rivierwaterstanden

De rivier de Lek vormt een belangrijke randvoorwaarde van het systeem aan de zuidzijde van het interessegebied. Onder normale omstandigheden is er (vrijwel) geen stroming in de rivier als gevolg van de stuw bij Amerongen. Het peil in het bovenpand is dan meestal 5,70 m +NAP en in het benedenpand 3,00 m +NAP. Deze situatie kan snel veranderen bij het passeren van een hoogwatergolf. Als criterium voor het wel of niet kenmerken van de situatie als 'hoogwater' is genomen het niveau 7,40 m +NAP (bij het Ingense Veer), zijnde het niveau waarbij men ertoe overgaat om (via het opendraaien van afsluitbare duikers) water in de uiterwaarden te laten stromen. Met dat criterium zijn de waterstanden van de periode 1971–1999 onderzocht. In die periode bleek gedurende 89 uit 12.000 dagen het water boven de 7,40 m +NAP uit te komen. Daarvan waren er 16 dagen in het zomerhalf- jaar. Daaruit is afgeleid dat de kans op hoogwater in de winter (op een willekeurige dag) $73/6000 = 0,012$ bedraagt. Deze rekenwijze heeft geleid tot de kansen die zijn opgenomen in tabel 4, voor de situatie zonder/met hoogwater in zomer/winter. Als een typisch hoog- water is het in figuur 6 gegeven verloop gebruikt, zijnde een situatie die tot een paar deci- meter onder het MHW-niveau (Maximaal Hoogwater) reikt. Voor de klimaatscenario's is aangenomen dat de hoogwatergolf er hetzelfde uitziet, en dat de kans op voorkomen even groot blijft. Er wordt dus van uit gegaan dat in het Rijnstroomgebied het principe van 'niet

afwentelen' (van effecten van klimaatverandering) wordt gerespecteerd. Tevens is aangenomen dat het voorkomen van een hoogwatergolf alleen afhankelijk is van het seizoen.

Tabel 4: De kans (%) van voorkomen van rivierwaterstanden op de Lek op basis van een meetreeks van 1971-1999.

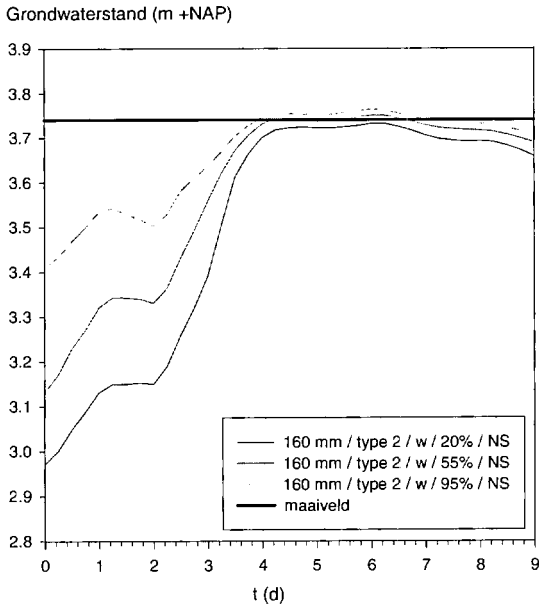
	Zomer	Winter
Normale situatie (NS)	99,73	98,80
Hoogwater (HW)	0,27	1,20



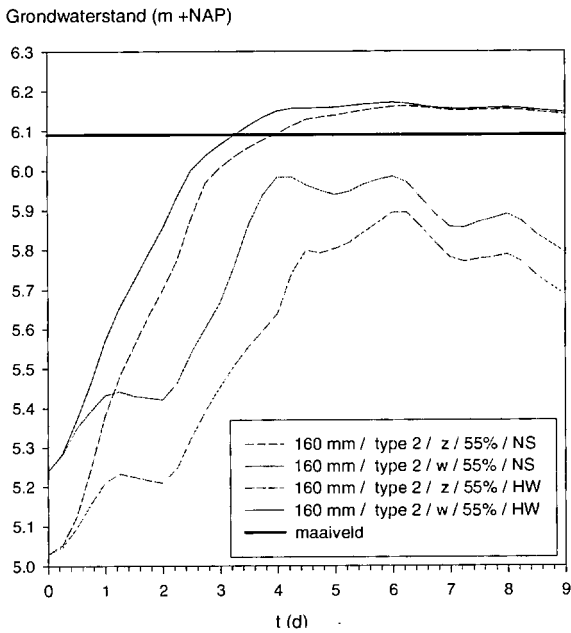
Figuur 6: Aangenomen verloop van de rivierwaterstand in de normale situatie en tijdens een hoogwatergolf.

Faalkansberekening

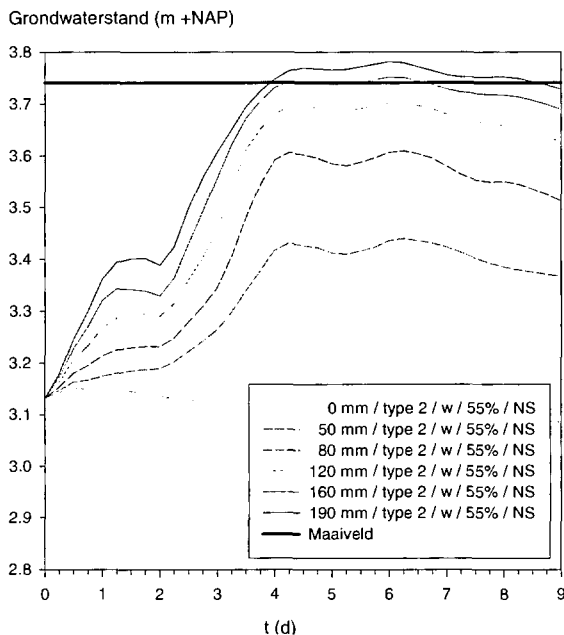
Ten behoeve van de faalkansberekening zijn per klimaatscenario alle mogelijke combinaties van realisaties doorgerekend; in totaal gaat het per scenario om 4 (begincondities) × 15 (neerslagsommen) × 4 (typen neerslagverdelingen) × 2 (riviersituaties) × 2 (seizoenen) = 960 combinaties. Een aantal van de uitgevoerde berekeningen wordt ter illustratie getoond (geplot voor een geselecteerde modelknoop). In figuur 7 betreft dat de invloed van de beginconditie, in figuur 8 de invloed van winter/zomer en niet/wel hoogwater in de rivier, in figuur 9 de invloed van de totale neerslaghoeveelheid, en in figuur 10 de invloed van de neerslagverdeling.



Figuur 7: Voorbeeld van drie gebeurtenissen met verschillende begincondities. Het gaat hierbij om gebeurtenissen met een neerslagtotaal van 160 mm in 9 dagen, type verdeling 2, winterperiode (w), 20/55/95% onderschrijdingskans begingrondwaterstand, en de normale situatie (NS) in de rivier.



Figuur 8: Voorbeeld van gebeurtenissen winter/zomer (w/z) en niet/wel (NS/HW) hoogwater in de rivier.



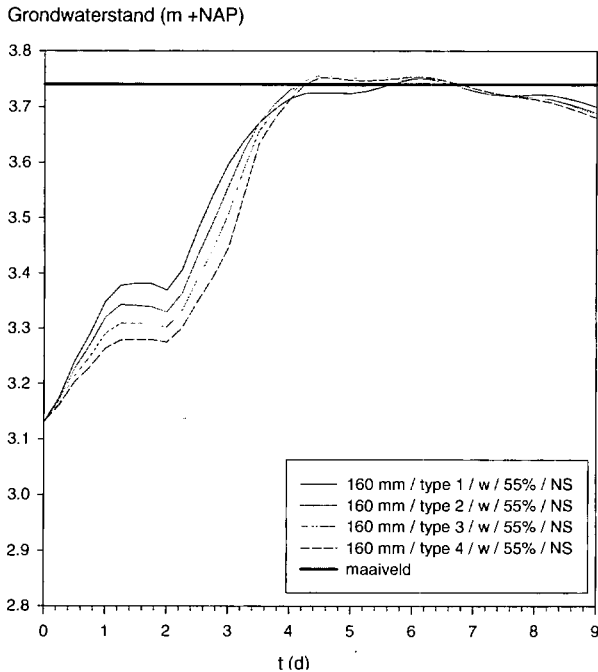
Figuur 9: Voorbeeld van gebeurtenissen met oplopende totale hoeveelheid neerslag.

Bij de verwerking van de uitkomsten zijn de volgende stappen gemaakt:

- per berekening en per knooppunt van het model is de maximaal optredende grond- en oppervlaktewaterstand bepaald;
- via het AHN-bestand is dat omgezet naar waarden per pixel van 25×25 m, waarbij een trapvormig verloop van grondwaterstanden is aangenomen tussen de invloedsoppervlakken van de knooppunten;
- per pixel wordt aan de hand van de kansverdeling de inundatie bepaald behorend bij herhalings tijden van respectievelijk 10, 25, 50, 100 en 250 jaar;
- dat wordt eveneens gedaan voor de optredende peilen in het oppervlaktewatersysteem.

Bij de interpretatie van uitkomsten is het niet zo dat situaties met grondwater-tot-in-het-maaiveld persé het gevolg zijn van het falen van het afwateringssysteem: die inundatie kan ook het gevolg zijn van een slechte ontwatering (te hoge drainageweerstand). In figuur 11 bijvoorbeeld is het ruimtelijke beeld gegeven van de inundatie met grondwater boven maaiveld voor een herhalings tijd van 100 jaar. In het model wordt de maaiveldsdrainage gesimuleerd met behulp van 'greppels' die 0,20 m diep zijn. Consistent daarmee wordt hier aangenomen dat een situatie met inundatie alleen wordt veroorzaakt door het falen van de afwatering als tegelijkertijd het oppervlaktewaterpeil hoger komt dan 0,20 m –mv. Deze eis wordt als een 'filter' over de inundatiekaart van figuur 11 gelegd, leidend tot de opgeschoonde kaart in figuur 12. Vervolgens worden in figuren 13 en 14 de (opgeschoonde) faalkaarten gegeven voor de huidige situatie en het maximumscenario. In tabel 5 zijn de resultaten samengevat. Daaruit blijkt dat het areaal waar met een herhalings tijd tot 10 jaar het oppervlaktewatersysteem faalt verdubbelt in het middenscenario en wederom verdubbelt in het maximumscenario. Bij de interpretatie van de tabel moet men overigens niet uit het ongeveer gelijk blijven van het areaal in de klasse 100–250 j de conclusie trekken

dat het model geen verandering van extreme situaties voorspelt. Het tegendeel is het geval. Het areaal in de die klasse betreft namelijk per scenario andere gronden, vanwege het doorschuiven naar kortere herhalingsstijden.



Figuur 10: Voorbeeld van gebeurtenissen met verschillende typen neerslagverdeling.

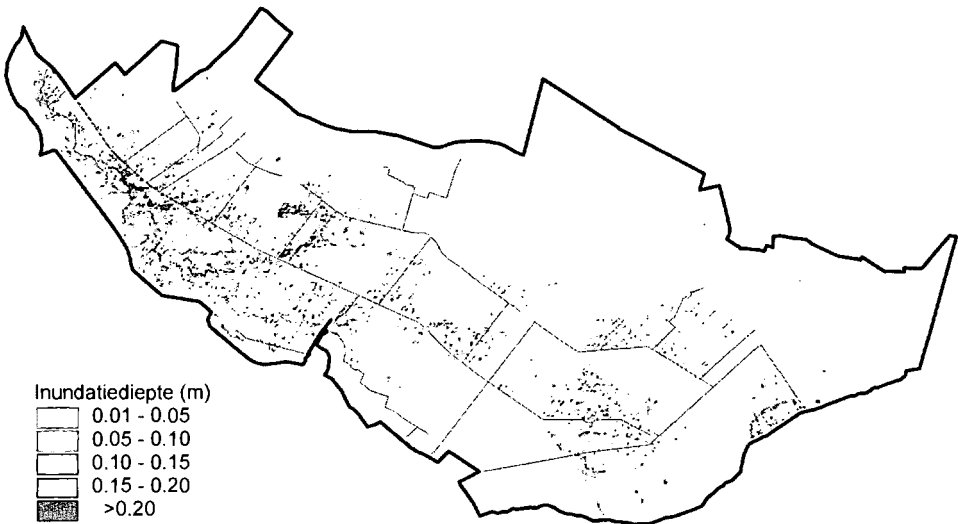
Tenslotte is er per klimaatscenario een toetsing uitgevoerd aan de hand van de NBW-normen (figuur 15 en 16). Daarbij is uitgegaan van een minimale inundatie-herhalingsstijd van > 10 jaar voor grasland om te 'voldoen'. Dus bij een herhalingsstijd ≤ 10 j faalt het systeem. Voor bouwland is als norm 25 jaar aangehouden, voor intensieve teelten 50 jaar, en voor stedelijk gebied 100 jaar. Overigens is het falen van het systeem in de laagste 5% van een peilvak reeds door het hoogheemraadschap ingecalculeerd. Dit deel van het gebied zou dus eigenlijk uit de figuren 15 en 16 weggefilterd moeten worden.

Tabel 5: Geïnundeerd oppervlak (ha) als gevolg van het falen van het afwateringssysteem (op een totaal gebiedsareaal van 6776 ha).

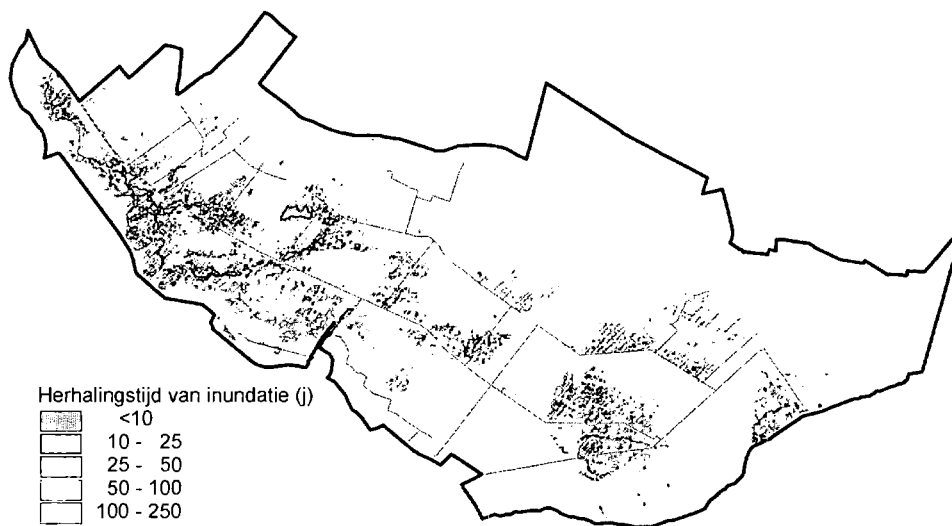
Herhalingsstijd (j)	Huidig klimaat	Middenscenario 2050	Maximumscenario 2050
0-10	98,3	190,6	397,0
10-25	129,3	228,4	329,8
25-50	172,6	240,7	262,2
50-100	225,3	255,1	254,4
100-250	316,1	304,6	315,3
> 250	5834,4	5556,7	5217,4



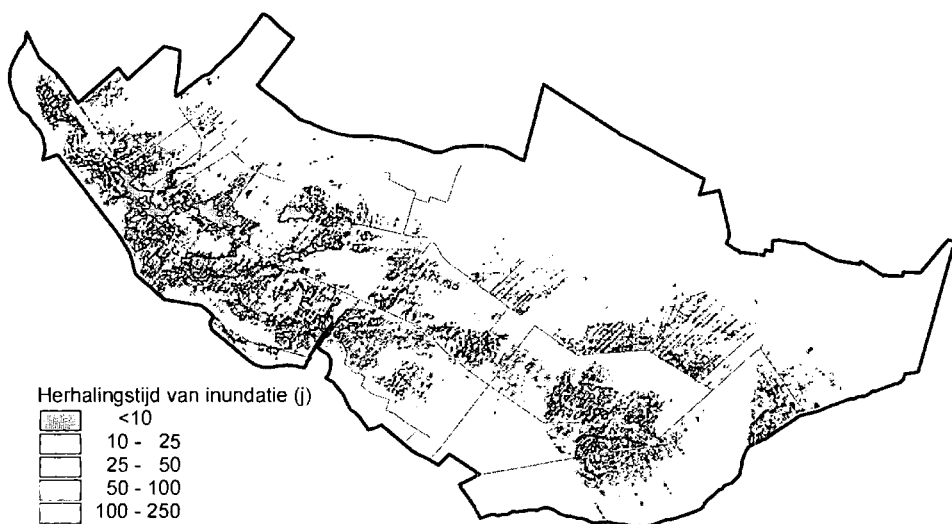
Figuur 11: Inundatiediepte met een herhalingsjijd van 100 jaar.



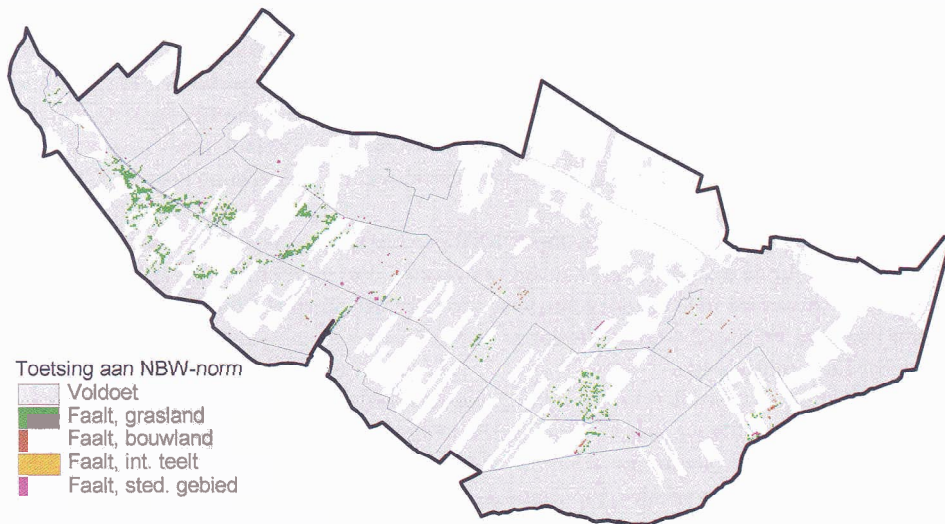
Figuur 12: Inundatiediepte met een herhalingsjijd van 100 jaar, na toepassing van het filter 'in combinatie met oppervlaktewaterpeil ondieper dan 0,20 m -mv'.



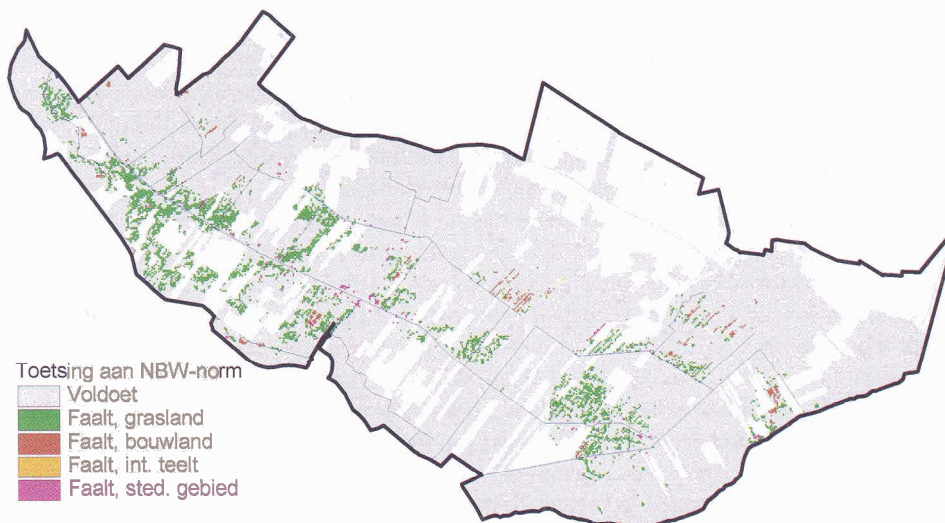
Figuur 13: Faalkanskaart voor de huidige situatie.



Figuur 14: Faalkanskaart voor het maximumscenario voor 2050.



Figuur 15: Toetsing van faalkansen aan de NBW-normen, vóór het huidige klimaat.



Figuur 16: Toetsing van faalkansen voor het maximumscenario voor 2050.

Conclusies

Dit artikel is een uitwerking van de zogenaamde stochastenmethode. Met deze methode is een faalkansanalyse uitgevoerd voor het Langbroekerweteringgebied. Bij deze toepassing zijn de stochasten neerslag, neerslagverdeling, begingrondwaterstand, seizoen, rivierwaterstand meegenomen; behalve de huidige situatie zijn twee mogelijke klimaatscenario's doorgerekend.

De kracht van de stochastenmethode is naar ons idee de eenvoud ervan: verschillende faalmechanismen kunnen al dan niet afhankelijk van elkaar worden verwerkt tot model-

invoer. De verschillende mogelijke combinaties worden simpelweg doorgerekend en achteraf wordt er een kansverdeling gemaakt van de resultaten. Dit resulteert in een faalkanskaart, die input is voor de toetsing van de normering. Vooral bij een lange inundatieherhalingsstijd levert de stochastenmethode een aanzienlijke kostenbesparing op ten opzichte van de tijdrekenmethode. (De lengte van de rekenperiode moet in die methode meerdere keren zo lang zijn als de herhalingsstijd waar een faalkans voor berekend moet worden.)

Hoewel het aantal modelruns (bijna 1000 per klimaatscenario) u als lezer wellicht doet huiveren, is in de praktijk de rekentijd te overzien: het gaat om runs van slechts 9 dagen; bij elkaar duurt de hele rekencyclus voor het Langbroekerweteringmodel circa 2 dagen op een Pentium P4 met 2,4 GHz. Verder is de aansturing en verwerking inmiddels grotendeels geautomatiseerd.

Het aanpassen van de kansverdeling van een reeds doorgerekende stochast leidt in principe niet tot nieuwe berekeningen. Als bijvoorbeeld duidelijk is dat de frequentie van hoogwater in het toekomstige klimaat verandert, dan hoeft alleen de kansverdeling ervan te worden aangepast: via de (geautomatiseerde) postprocessing van de bestaande modeloutput worden nieuwe uitkomsten gegenereerd. Het is ook mogelijk om nieuwe faalmechanismen toe te voegen, die een rol gaan spelen in de toekomst. Uiteraard moet er dan wel extra worden gerekend.

Het voorkomen van een bepaalde realisatie van een stochast is gebaseerd op statistiek van de stochast zelf. Dit biedt ook de mogelijkheid om de kans op realisaties in te schatten buiten het bereik van de waarnemingen waar de statistiek op berust. Door aan te nemen dat het verantwoord is om op basis van gemeten waarden een kansverdeling te maken van de stochast en deze te extrapoleren, wordt de methode van de stochasten ook bruikbaar om voorspellingen te doen voor zeer extreme gebeurtenissen.

Het belang van de verschillende stochasten is niet even groot. Uit figuur 10 blijkt dat de neerslagverdeling over de dagen (niet te verwarren met die *binnen* de dagen) geen sterk bepalende factor is voor het bepalen van de faalkansen. Het opsplitsen in twee seizoenen (zomer en winter) is evenwel cruciaal. Onze studie toont duidelijk aan dat de neerslagsom het sturende mechanisme is en dat de begingrondwaterstand en de waterstand van de Lek eveneens van belang zijn. Ook is de afhankelijkheid van de kans van voorkomen van een neerslaggebeurtenis van het klimaat zeer bepalend voor de faalkans. Uit figuur 4 blijkt dat de verschillen in begincondities als gevolg van het klimaat relatief in dit gebied niet te verwaarlozen zijn. Als tevens zou zijn gekeken naar bijvoorbeeld de afvoeren bij het uitstroompunt van het gebied (wat niet tot het werkpakket hoorde), dan zou deze stochast wellicht meer in beeld zijn gekomen. Door de invloed van de extra grondwateraanvulling op de opbolling van het regionale grondwaterniveau neemt het areaal met een actieve ontwatering toe; dit leidt tot een niet-lineaire respons van de piekafvoer op het gemiddelde neerslagoverschot.

Aanbevelingen

Het is van groot belang om hydrologisch consistente begincondities te formuleren. In de gepresenteerde methode wordt aan een beginconditie een kans toegedicht die gelijk is voor alle rekeneenheden van het model. Een verbetering van de methode is volgens ons mogelijk door de toekenning van kansen per rekeneenheid te bepalen.

In dit onderzoek is aangenomen dat voor het bepalen van de beginconditie van het grondwater het rekenkundige kansgemiddelde de beste schatter is van het representatieve punt binnen het kansinterval. Door de scheefheid van de verdeling is wellicht een gewogen gemiddelde een beter alternatief.

Voor het huidige onderzoek is de grondwaterstand als maatgevend genomen voor de begintoestand. Een alternatief is het gebruiken van de totale beschikbare berging van water in het systeem, inclusief onverzadigde zone en oppervlaktewater. Daarbij zal echter nog steeds als beginconditie (voor de 9-daagse berekeningen) een ruimtelijke consistente hydrologische toestand moeten worden gebruikt.

Het is zeer wenselijk dat de neerslagstochast wordt verfijnd. Hierbij kan worden gedacht aan het gebruiken van modellen van het KNMI of aan technieken om de neerslag in ruimte en tijd te verdelen.

Een aspect dat ook om nadere aandacht vraagt is de onderlinge afhankelijkheid van de stochasten. In dit onderzoek is bijvoorbeeld aangenomen dat de rivierwaterstand zich onafhankelijk gedraagt van de neerslag en dat de beginconditie van het grondwater onafhankelijk is van de rivierwaterstand. Dit is hoogst waarschijnlijk onjuist. De stochastenmethode laat wel degelijk toe dat stochasten van elkaar afhankelijk zijn. Het ontbrak ons aan de kennis hier rekening mee te houden.

In deze studie is op eenvoudige wijze een schifting gemaakt tussen inundaties als gevolg van een slechte ontwatering, en inundaties die van buiten af komen via het oppervlaktewater: alleen als tegelijkertijd met de inundatie het oppervlaktewaterpeil tot minimaal 0,20 m –mv reikt wordt de inundatie aangemerkt als zijnde veroorzaakt door een ontoereikende afwatering. Het is niet direct duidelijk wat het beste (door de waterwereld geaccepteerde) alternatief hier voor is. Te denken valt aan het maken van extra berekeningen met een afwatering die exact volgens de geldende afwateringsnormen is gedimensioneerd. Het deel van het gebied dat dan nog steeds geïnundeerd raakt wordt dan als 'legitiem' aangemerkt, en alleen het overblijvende inundatieareaal zou dan als knelpunt worden aangemerkt.

Literatuur

- Cirkel, D.G., E.P. Querner, P.J.J.F. Torfs en H.A.J. van Lanen (2003)** Effecten van verdrogingbestrijdende maatregelen en klimaatverandering op extreem hoge afvoeren, Een modelstudie met SIMGRO voor het Stortelersbeekgebied; rapport 844, Alterra, Wageningen.
- Graaff, B. de en R. Versteeg (2000)** Wateroverlast zo goed als zeker; in: *H₂O*, nr 21, pag 28–30.
- Grontmij (2002)** Wateropgave deelstroomgebiedsvisie Amstelland: Onderbouwing van de knelpunten en de wateropgave voor Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden; Grontmij, Houten.
- Gumbel, E.J. (1958)** Statistics of Extremes; Columbia University Press, New York.
- Hermans, A.G.M., P.E.V. van Walsum, J. Runhaar en P.J.T. van Bakel (2004)** Duurzaam waterbeheer Langbroekerwetering, Fase 1: Modelbouw, calibratie en bepaling van het Actueel Grond- en Oppervlaktewaterregime; rapport 914, Alterra, Wageningen.
- KNMI (2003)** De toestand van het klimaat in Nederland 2003; KNMI, De Bilt.
- Versteeg, R en B. Kolen (2003)** Neerslag; Notitie in opdracht van HDSR, 6 september

2003; HKV, Lelystad.

Walsum, P.E.V. van, A.A. Veldhuizen, P.J.T. van Bakel, F.J.E. van der Bolt, P.E.

Dik, P. Groenendijk, E.P. Querner en M.F.R. Smit (2004) SIMGRO 5.0; Theory and model implementation; Report 913.1, Alterra, Wageningen.

Wendt, T. (1998) Water Rijk Utrecht: effecten van toekomstscenario's op het grondwater in Utrecht; Grontmij, Houten.