

Simuleren van extreme piekafvoeren op de Rijn voor verschillende klimaatscenario's

- Aline te Linde
- Jeroen Aerts
- Alexander Bakker
- Jaap Kwadijk

Instituut voor Milieuvraagstukken (IVM), VU, Deltares
Instituut voor Milieuvraagstukken (IVM), VU
KNMI
Deltares

Inleiding

De dijken langs de Nederlandse bovenrivieren zijn ontworpen om een afvoer te kunnen keren die een overschrijdingskans heeft van 1/1250 per jaar. Deze afvoer wordt de maatgevende afvoer genoemd. Onder de huidige omstandigheden is deze geschat op 16.000 m³/s bij Lobith (Randvoorwaardenboek, 2006). Het bepalen van de grootte van een afvoer met een dergelijke kleine kans van voorkomen is echter onzeker. Omdat we maar een relatief korte meetreeks van afvoeren, ongeveer 100 jaar, tot onze beschikking hebben is de onzekerheid in de schatting groot.

Met een veranderend klimaat is de verwachting dat wereldwijd de kans op extreme hoge afvoeren toeneemt (Milly e.a., 2005, IPCC, 2007). Het overstromingsrisico neemt daarnaast toe door de groei van de bevolking en economische activiteit. Omdat deze groei zich vooral afspeelt in gebieden waar er gevaar voor overstromingen bestaat, zoals delta's, wordt de toename van het risico verder versterkt.

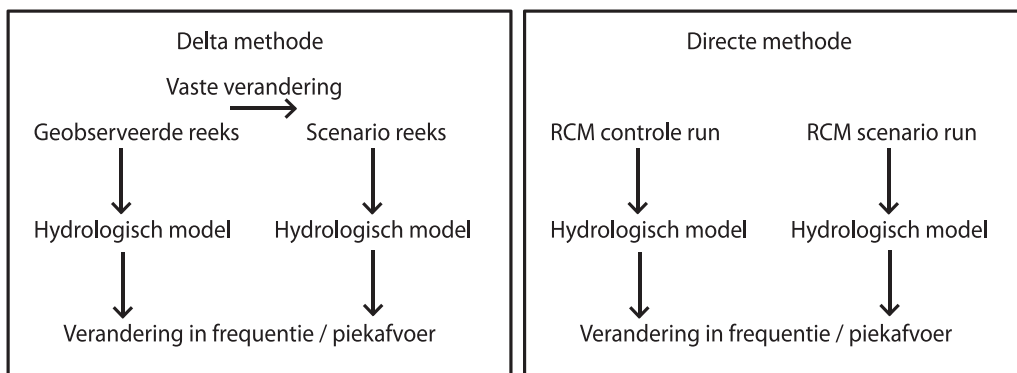
In dit artikel zijn meerder methoden beschreven om een schatting te maken van de kans op extreme hoge afvoeren rond het jaar 2050 in het stroomgebied van de Rijn. Hierbij geven we inzicht in de verschillen in de schattingen die ontstaan door op verschillende manieren de klimaatscenario's te gebruiken.

Klimaatverandering en modellen

Voor de Rijn zijn in de loop van de tijd diverse studies uitgevoerd naar mogelijke veranderingen in de afvoer als gevolg van klimaatverandering (onder meer Kwadijk en Rotmans, 1995 en Van Deursen, 2006). De studies concentreerden zich vooral op gemiddelde veranderingen in maandelijks en 10-daagse perioden. Veranderingen in extreme afvoeren zijn echter ook belangrijk omdat die afvoeren maatgevend zijn voor het dimensioneren van waterkeringen. Schattingen voor de maatgevende omstandigheden werden uitgevoerd door een vertaling van de gemiddelde veranderingen naar veranderingen in extremen (bijvoorbeeld Te Linde, 2007 en De Wit e.a., 2008). Ook voor de Rijn is de verwachting dat extreme piekafvoeren hoger worden. Dit door een toename in neerslag in de winter, gecombineerd met een vergroting van de sneeuwsmeelt in de Alpen (Kwadijk, 1993 en Middelkoop en Kwadijk, 2001). Zonder verdere maatregelen zal dit leiden tot een verhoogde overstromingskans (Hooijer e.a., 2004 en Pinter e.a., 2006).

Om toekomstige extreme afvoeren te schatten worden klimaatscenario's voor veranderingen in neerslag, temperatuur en verdamping gebruikt als invoer voor hydrologische modellen. Globale circulatie (klimaat)modellen (GCM's) simuleren zowel de huidige als de toekomstige klimaatomstandigheden. Op grond van de uitkomsten van deze modellen worden klimaatscenario's opgesteld. Het probleem van de globale klimaatmodellen is dat ze een te lage resolutie hebben om hun uitkomsten te kunnen gebruiken voor hydrologische studies in het Rijnstroomgebied. Met een regionaal klimaatmodel (RCM) kunnen de uitkomsten van GCM's geschaald worden naar een hogere resolutie voor regionale klimaatscenario's. Ondanks de hogere resolutie blijkt dat door RCM's gesimuleerde reeksen voor temperatuur, neerslag en verdamping systematisch afwijken van het waargenomen klimaat (Wood e.a., 2004). Deze afwijking wordt ook wel bias genoemd. Indien de uitkomsten gebruikt worden voor hydrologische simulaties werken deze afwijkingen door in de hydrologische modellen en dus in de simulaties van zowel de huidige als verwachte afvoeren.

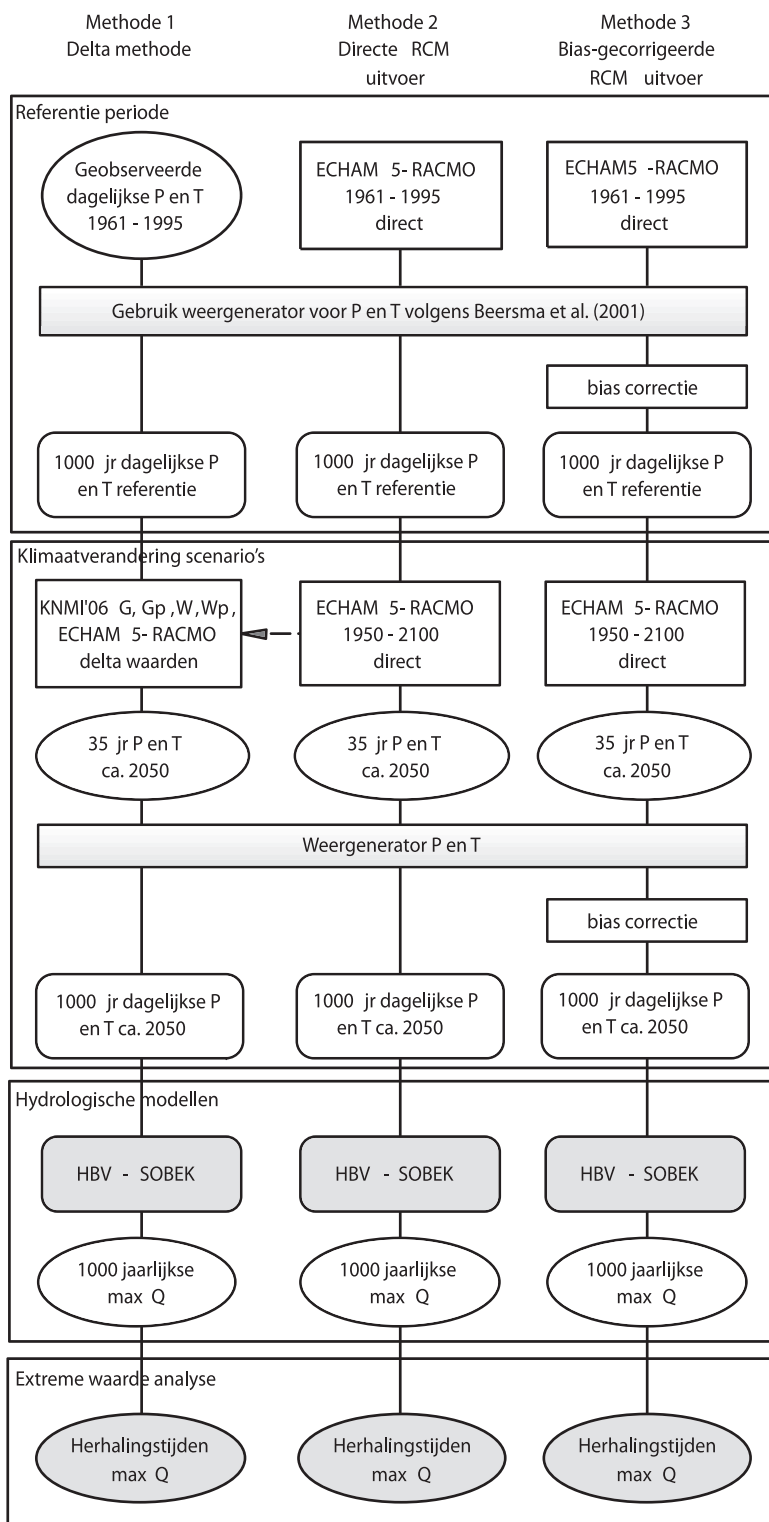
Om desondanks de uitkomsten van klimaatmodellen te gebruiken in hydrologische studies zijn er twee gangbare methoden. Dit zijn de deltamethode en de directe methode (Figuur 1). Bij de deltamethode wordt een historische reeks van weergegevens geschaald met de gemiddelde veranderingen van klimaatparameters zoals bepaald door het RCM, bijvoorbeeld maandelijks neerslag en temperatuur (Lenderink e.a., 2007). Bij de directe methode worden de RCM uitkomsten direct in het hydrologische model ingevoerd. Vanwege de bias worden de gesimuleerde temperatuur-, neerslag- en verdampingscijfers gecorrigeerd op basis van de cijfers uit een referentieperiode (Kay e.a., 2006).



FIGUUR 1: SCHEMATISCHE WEERGAVE VAN DE DELTA- EN DIRECTE METHODE

In de deltamethode is de aanname dat de huidige variatie in het klimaat niet verandert in de toekomst. De directe methode is in dat opzicht beter omdat deze het 'echte' weer volgens de klimaatmodellen gebruikt. Eventuele veranderingen in de variatie in klimaatparameters wordt in dat geval wel meegenomen. Een nadeel van de directe methode is echter dat de benodigde correcties om de gesimuleerde klimaatparameters in overeenstemming te brengen met de geobserveerde waarde erg groot kunnen zijn.

Om te onderzoeken wat de verschillen zijn in schattingen van de extreme afvoeren die ontstaan door toepassing van de verschillende methoden gebruiken we de uitvoer van een regionaal klimaatmodel en een weergenerator om lange tijdreeksen te genereren voor neerslag en temperatuur in 2050. Deze reeksen dienen vervolgens als invoer voor hydrologische en hydrodynamische modellen. We vergelijken daarbij drie modelsequenties, met als verschil de transformatiemethode van verschillende RCM uitvoerdata: de deltamethode, de directe methode en de gecorrigeerd directe output.



FIGUUR 2: AANPAK TRANSFORMATIEMETHODEN NAAR EXTREME WAARDENANALYSE

Transformatie klimaatscenario's naar afvoeren

De gebruikte aanpak is weergegeven in figuur 2 en vergelijkt drie methoden. Alle methoden gebruiken dezelfde weergenerator om relatief korte tijdreeksen van meteorologische gegevens (ongeveer 35 jaar) te verlengen tot synthetische reeksen van 1000 jaar dagwaarden (Leander en Buishand, 2007). Bakker en Van den Hurk (2009) laten zien dat de statistische eigenschappen van de verlengde tijdreeksen overeenkomen met die van de historische reeksen.

- Methode 1 gebruikt historische data (1961-1995) die getransformeerd worden tot een klimaatscenario met behulp van de deltamethode. De gebruikte veranderingen, de delta's, zijn gebaseerd op het KNMI 2006 W+ scenario (Van den Hurk e.a., 2006).
- Methode 2 gebruikt de directe uitvoer van een RCM simulatie (ECHAM5-RACMO: 1950-2100, hierna RACMO genoemd).
- Methode 3 gebruikt dezelfde RCM uitvoer, maar past een biascorrectie toe.

Alle reeksen worden met de weersgenerator omgezet tot tijdreeksen van 1000 jaar. Dit resulteert in drie tijdreeksen van 1000 jaar dagwaarden voor neerslag en temperatuur, zowel voor de referentieperiode (1961-1995) als voor de periode rond 2050. De drie methoden zijn uitvoerig beschreven in Te Linde e.a. (2009) en Bakker en Van den Hurk (2009). We zijn hier alleen geïnteresseerd in hoge afvoeren die optreden in de winter, in het vroege voorjaar, of de late herfst, wanneer de verdamping laag is. Daarom wordt als verdamping een vaste 10 daagse referentieverdamping gebruikt, die via de gemiddelde verwachte temperatuurstijging wordt getransformeerd tot een scenarioverdamping.

KNMI'06 scenario's

In 2006 heeft het KNMI vier nieuwe klimaatscenario's gepresenteerd voor Nederland. De KNMI'06 scenario's zijn gebaseerd op een ensemble van GCM en RCM simulaties, gerealiseerd in het PRUDENCE project (Christensen, 2007). Vijf GCM's en 10 RCM's zijn geanalyseerd voor twee perioden van 30 jaar: 1960-1990 (de referentieperiode) en 2070-2100. De veranderingen in 2050 zijn gebaseerd op lineaire interpolatie tussen deze perioden. Hiermee zijn vier scenario's opgesteld: G, G+, W en W+. De G scenario's gaan uit van 1°C mondiale temperatuurstijging in 2050 en de W scenario's van 2°C. Bij de plusscenario's G+ en W+ wordt uitgegaan van een verandering in het luchtstromingspatroon. In de plusscenario's worden de zomers veel droger dan in de huidige situatie en de winters veel natter. De delta's zijn beschikbaar per decade, maar zijn per seizoen weergegeven in tabel 1. In de bepaling van de extreme afvoeren is van de scenario's alleen het meest extreme KNMI'06 scenario, W+, gebruikt.

TABEL 1: DELTA'S VAN KLIMAATSCENARIO'S VOOR HET JAAR 2050, GEBASEERD OP DECADE WAARDEN EN WEERGEGEVEN PER SEIZOEN, VERGELEKEN MET GEOBSERVEERDE NEERSLAG EN TEMPERATUUR. RACMO VERWIJST NAAR DE RCM SIMULATIE ECHAM5-RACMO EN G, G+, W EN W+ ZIJN DE VIER KNMI'06 SCENARIO'S. ALLE WAARDEN ZIJN GEMIDDELDEN VOOR HET STROOMGEBIED VAN DE RIJN BOVENSTROOMS VAN LOBITH.

Temperatuur (°C)	DJF	MAM	JJA	SON	Jaar
Geobserveerd 1961-1995	0,18	7,38	15,92	8,4	7,97
dT G (°C)	0,89	0,88	0,86	0,87	0,87
dT G+ (°C)	1,15	1,27	1,40	1,28	1,27
dT W (°C)	1,78	1,75	1,71	1,74	1,75
dT W+ (°C)	2,30	2,54	2,80	2,56	2,55
dT RACMO (°C)	1,52	1,36	1,66	1,50	1,51
Neerslag (mm/dag)	DJF	MAM	JJA	SON	Jaar
Geobserveerd 1961-1995	2,60	2,61	3,21	2,59	2,73
dP G (%)	3,62	3,02	2,77	2,94	3,09
dP G+ (%)	7,09	3,05	-9,54	-3,00	-0,60
dP W (%)	7,24	6,05	5,54	5,89	6,18
dP W+ (%)	14,18	6,11	-19,07	-6,00	-1,20
dP RACMO (%)	5,38	-0,42	-4,72	1,58	0,45

ECHAM5-RACMO

De RACMO simulaties die hier worden gebruikt, zijn aangestuurd door GCM ECHAM5 member 3, voor het SRES-A1B emissie scenario. De RACMO uitvoer bestaat uit dagelijkse waarden met een ruimtelijke resolutie van 25 x 25 km. De resultaten tonen een verandering in de frequentie van natte en droge dagen, en een andere variantie en ruimtelijke variatie van neerslag- en temperatuurkarakteristieken. RACMO blijkt goed in staat het huidige klimaat te simuleren in het stroomgebied van de Rijn (Van den Hurk e.a., 2005; Bakker en Van den Hurk, 2009). Ter vergelijking met de KNMI'06 scenario's zijn voor de RACMO uitkomsten ook stroomgebiedsgemiddelde deltawaarden berekend en in tabel 1 opgenomen.

Hydrologische modellen

Voor het simuleren van neerslag-afvoer processen is HBV gebruikt (Bergström, 1976; Lindström e.a., 1997). Het HBV model voor de Rijn is ontwikkeld vanaf 1999 (Eberle e.a., 2005), waarbij het stroomgebied is verdeeld in 134 deelstroomgebieden. Het model rekent op dagbasis en is sinds 1999 een aantal keer opnieuw gecalibreerd (Te Linde e.a., 2008).

Bij erg hoge afvoeren is de routing in het model onvoldoende in staat om de voortplanting van afvoergolven door de Rijn juist weer te geven. In die gevallen is hydraulische routing noodzakelijk. Voor de hoofddriver is daarom het 1D hydrodynamische model SOBEK (Delft Hydraulics, 2005) toegepast. Met SOBEK kan ook het effect van maatregelen zoals dijkverhoging en het inzetten van retentiegebieden worden gesimuleerd. Ook kan het effect op de waterstanden van overstromingen over de dijken berekend worden. In deze studie is daar echter geen rekening mee gehouden. De aanname is gedaan dat er geen overstromingen plaatsvinden (ofwel de rivier heeft oneindig hoge dijken). Hydrodynamische berekeningen kosten veel rekentijd, daarom zijn niet alle reeksen van 1000 jaar doorgerekend. Hier zijn daarom eerst de jaarmaxima bepaald met de routing in HBV: per tijdreeks dus 1000 maxima. Vervolgens is voor alle jaarmaxima een venster van 30 dagen hydrodynamisch doorgerekend op uurbasis, waarbij de door HBV gesimuleerde afvoeren als bovenstroomse randen zijn opgelegd.

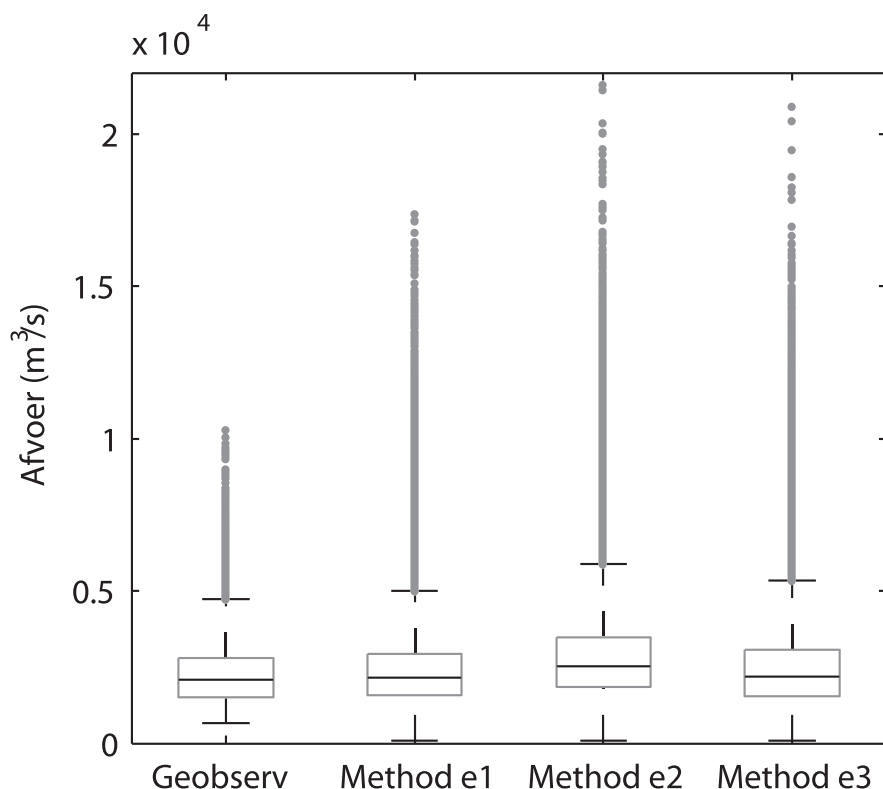
Bepaling van de maatgevende afvoer met extreme waarden analyse

De maatgevende afvoer bij Lobith is bepaald met een extreme waarden analyse afgeleid uit de gesimuleerde jaarmaxima. In deze studie hebben we de Generalized Extreme Value (GEV) verdeling gebruikt en door de 1000 jaarmaxima van elke reeks gefit. De GEV verdeling is vergelijkbaar met de Gumbel verdeling maar uitgebreid met een extra parameter.

Gesimuleerde afvoeren en overstromingskansen

Effect van biascorrectie

Het effect van klimaatverandering is geanalyseerd voor zowel de gemiddelde maandaafvoer als jaarlijkse maximale piekafvoeren. Allereerst zijn (figuur 3) de statistische karakteristieken van de geobserveerde dagelijkse afvoeren vergeleken met de gesimuleerde afvoer voor de huidige condities. Hierbij is het HBV model gedraaid met de verschillende meteorologische datasets zoals die zijn gegenereerd met de drie verschillend methoden. Omdat gewerkt wordt met synthetische reeksen kunnen alleen de statistische kenmerken van de data worden vergeleken. De box-whisker plots laten zien dat de dagelijkse waarden 'scheef' zijn (skewed), met uitschieters van extreme afvoeren. Methode 1, 2 en 3 hebben meer en hogere uitschieters dan de geobserveerde data omdat ze 1000 jaar dagwaarden weergeven, terwijl de geobserveerde afvoeren enkel de periode 1961-1995 weergeven.

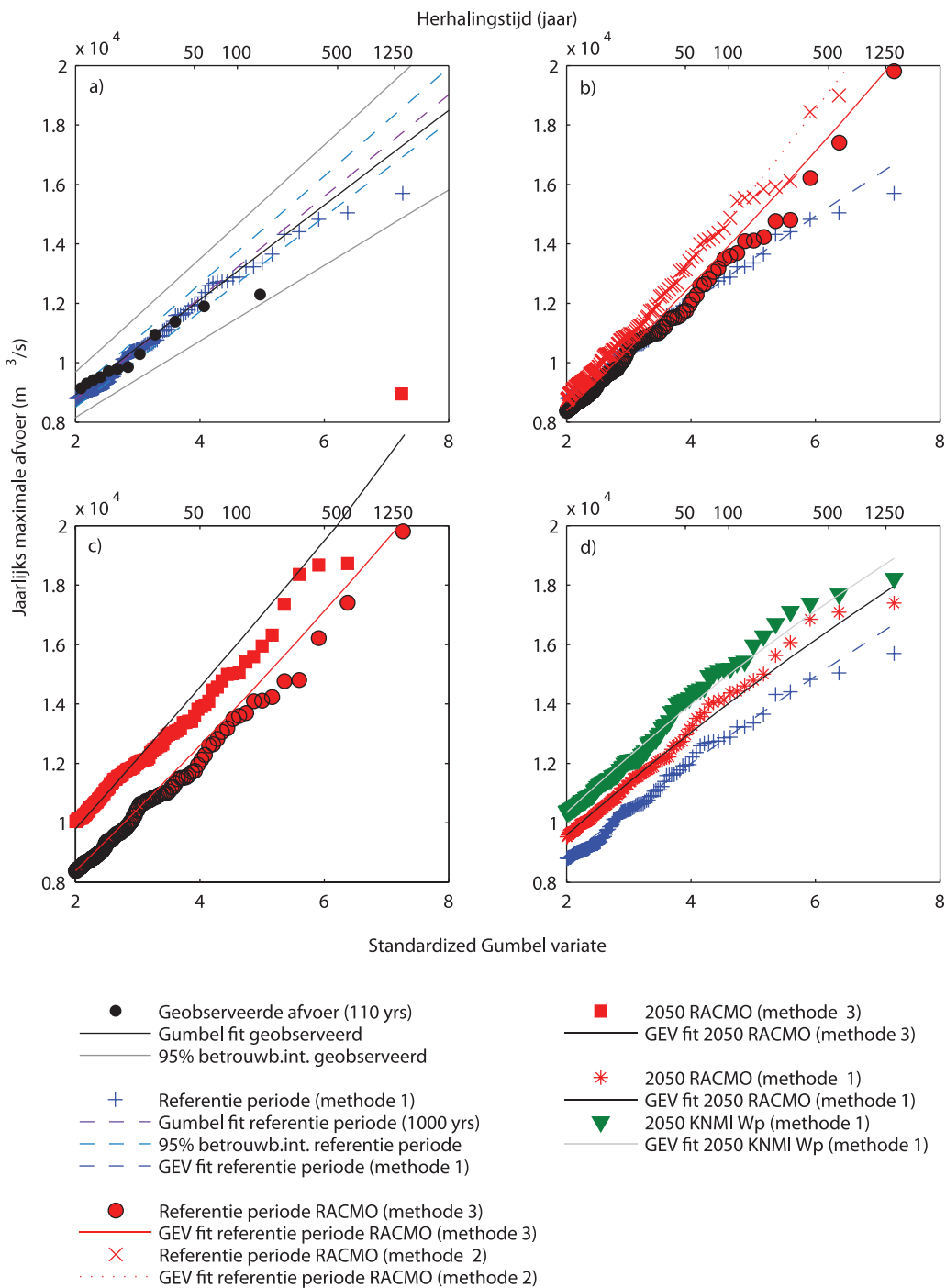


FIGUUR 3: BOX-WHISKER PLOTS VAN DAGELIJKSE WAARDEN VAN GEOBSERVEERDE EN GESIMULEERDE AFVOEREN VOOR DE REFERENTIEPERIODE (1961-1995) BIJ LOBITH. WEERGEGEVEN ZIJN DE GEOBSERVEERDE AFVOEREN OVER 35 JAAR EN DRIE 1000-JARIGE REEKSEN VAN GESIMULEERDE AFVOEREN GEBASEERD OP VERSCHILLENDE METEOROLOGISCHE REEKSEN AFKOMSTIG UIT DE NEERSLAGGENERATOR: METHODE 1, GEOBSERVEERDE NEERSLAG EN TEMPERATUUR; METHODE 2, DIRECTE RACMO UITVOER EN METHODE 3, BIASGECORRIGEEERDE RACMO UITVOER.

De boxplot van de met methode 1 gesimuleerde afvoeren komt goed overeen met de geobserveerde waarden. Dit betekent dat het hydrologische model in combinatie met de weergenerator goed in staat is om de huidige afvoer te simuleren. Als de RACMO uitvoer direct gebruikt wordt als input voor HBV (methode 2), dus zonder correcties, dan wordt de mediane afvoer overschat met 470 m³/s ofwel 23%. Het verschil tussen de 0,25 tot 0,75 kwantielen is groter dan bij methode 1 en 3. Tevens lijken de piekafvoeren van de directe RACMO uitvoer extremer dan van de overige datasets.

Gebruik van de gecorrigeerde RACMO uitvoer (methode 3) resulteert in een mediane afvoer van 2177 m³/s, ofwel een overschatting van slechts 5%. De 0,25 en 0,75 kwantielen hebben vergelijkbare lichte overschattingen. Ook de extreme afvoeren van methode 3 lijken beter overeen te komen met methode 1. Volgens de beschrijvende statistieken, zoals de kwantielen, resulteert de biascorrectie van de RACMO data dus in betere afvoersimulaties dan in een modelsequentie zonder biascorrectie.

In figuur 4a zijn geobserveerde (110 jaar) en gesimuleerde (1000 jaar, volgens methode 1) jaarlijkse maximale afvoeren weergegeven in extreme waarde plots. Door beide datasets is een Gumbel verdeling gefit. Daarnaast zijn de 95% betrouwbaarheidsintervallen berekend en geplot. Het betrouwbaarheidsinterval kan worden geïnterpreteerd als de statistische onzekerheid van een extreme waarde verdeling. De betrouwbaarheid van de extreme waarde verdeling neemt toe door de grotere dataset. Het 95% betrouwbaarheidsinterval is daardoor verlaagd van ongeveer +/- 13% tot +/- 3%.



FIGUUR 4: EXTREME WAARDEN PLOTS EN GEV-VERDELINGEN VAN JAARLIJKS MAXIMALE PIEKAFVOEREN BIJ LOBITH, VOOR DE REFERENTIE PERIODE (1961-1995) EN HET JAAR 2050. WEERGEGEVEN ZIJN (A) 100 JAAR GEOSERVEERDE DATA EN 1000 JAAR GESIMULEERDE AFVOEREN VOOR DE REFERENTIE PERIODE, MET DAARIN FITS VAN DE GUMBEL VERDELING EN 95% BETROUWBAARHEIDSINTERVALLEN; (B) REFERENTIE PERIODE EN RACMO (METHODE 2 EN 3) VOOR DE REFERENTIE PERIODE; (C) REFERENTIE PERIODE EN RACMO (METHODE 3) VOOR 2050; (D) REFERENTIE PERIODE, RACMO (METHODE 1) EN W+ (METHODE 1) VOOR 2050.

Figuur 4a laat ook zien dat de Gumbel verdeling de frequentie van de hoogste afvoeren uit de

synthetische reeksen voor de huidige condities niet goed beschrijft. In figuur 4b zijn daarom dezelfde waarden (methode 1) geplot waardoor een GEV verdeling is gefit, die de extreme waarden beter benadert. Figuur 4b geeft ook de resultaten van methode 2 en 3. De ongecorrigeerde directe RACMO output (methode 2) resulteert in een overschatting van de jaarmaxima tussen 8 en 25% voor afvoeren met een herhalingsjijd tussen de 50 en 1250 jaar. Dit betekent een overschatting van de maatgevende afvoer bij Lobith met 4000 m3/s. Na de biascorrectie (methode 3) komen de modeluitkomsten voor de referentie periode veel beter overeen met methode 1. Boven 12.000 m3/s divergeren beide data sets en de afvoeren resulterend uit methode 3 zijn hoger. Dit verschil loopt op tot 3500 m3/s bij een herhalingsjijd van 1250 jaar (zie tabel 2).

TABEL 2: AFVOER IN M3/S BIJ LOBITH VOOR VERSCHILLENDE HERHALINGSTIJDEN (T). WEERGEGEVEN IS DE REFERENTIE PERIODE (1961-1995) EN DE SITUATIE ROND 2050. DE GETALLEN ZIJN GEBASEERD OP DE STATISTISCHE GEV FITS DIE ZIJN WEERGEGEVEN IN FIGUUR 4.

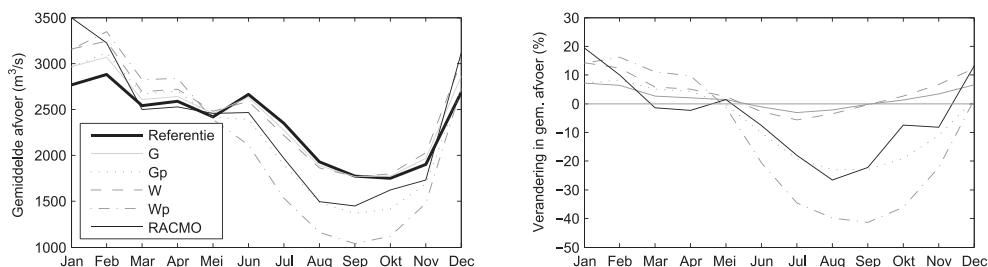
		T (jaar)					
	Scenario	10	50	100	200	500	1250
Referentie periode	Geobserveerd (methode 1)	9.234	11.802	12.821	13.801	15.038	16.216
Referentie periode	RACMO (methode 3)	8.896	12.392	13.933	15.508	17.647	19.856
2050	W+ (methode 1)	10.824	13.809	14.970	16.070	17.442	18.726
2050	RACMO (methode 3)	10.041	14.350	16.050	17.763	20.052	22.372
2050	RACMO (methode 1)	10.056	12.844	13.935	14.972	16.271	17.492
2050	'Relatieve' RACMO (meth.3)	10.796	13.666	14.769	15.807	17.088	18.271

Effect van klimaatverandering op gemiddelde afvoer

Het effect van verschillende klimaatscenario's is weergegeven voor Lobith in tabel 3 (seizoenaal) en figuur 5 (maandelijks). De KNMI'06 klimaatscenario's resulteren in 7% (G) tot 13% (W) hogere winterafvoeren in 2050 ten opzichte van de referentieperiode. De verwachte vermindering in zomerafvoer varieert tussen -2% (G) en -33% (W+). De gecorrigeerde RACMO output (methode 3) lijkt het meest op G+, behalve voor de maanden januari en februari. In de wintermaanden laat RACMO (methode 3) 14% meer afvoer zien in 2050, en dat is hoger dan alle vier de KNMI'06 scenario's.

TABEL 3: SEIZOENALE VERANDERING IN DE AFVOER BIJ LOBITH, VOLGENS DE KNMI'06 SCENARIO'S EN BIAS-GE CorrIGEERDE DIRECTE RACMO UITVOER, VOOR 2050.

Afvoer (m3/s)	DJF	MAM	JJA	SON	Jaar
Referentie periode (1961 - 1995)	2778	2518	2314	1809	2355
dQ G (methode 1) (%)	6,71	2,03	-2,16	1,47	2,01
dQ G+ (methode 1) (%)	5,58	3,00	-17,40	-17,63	-6,61
dQ W (methode 1) (%)	13,04	4,47	-3,94	3,02	4,15
dQ W+ (methode 1) (%)	10,56	6,50	-31,68	-33,25	-11,97
dQ RACMO (methode 3) (%)	14,20	-0,75	-17,36	-12,63	-4,14



FIGUUR 5: MAANDELIJKS GEMIDDELTE VERANDERING IN DE AFVOER BIJ LOBITH, VOLGENS DE KNMI'06 SCENARIO'S EN DE BIAS-GECORRIGERDE RACMO UITVOER VOOR 2050. DE ABSOLUTE GETALLEN STAAN LINKS, EN DE RELATIEVE WAARDEN RECHTS.

Effect van klimaatverandering op extreme afvoeren en herhalingstijden

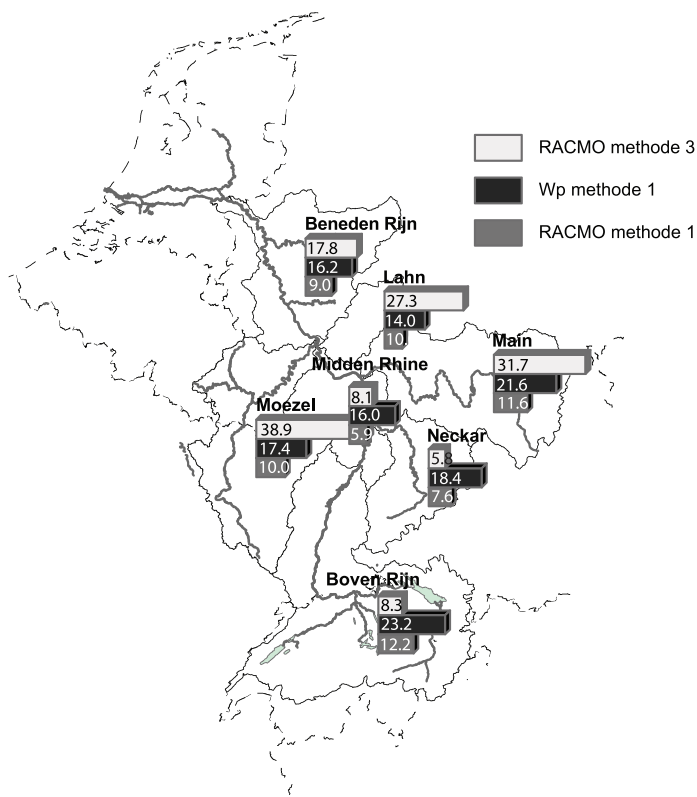
In deze paragraaf is directe RACMO uitvoer zonder biascorrectie (methode 2) buiten beschouwing gelaten omdat deze voor de huidige omstandigheden niet goed in staat bleek de gemeten afvoer te reproduceren. Figuur 4c toont de resultaten van RACMO (methode 3) voor de referentieperiode en 2050. Voor de vergelijking met afvoeren volgens het KNMI W+ scenario (methode 1) is er ook een RACMO afvoerscenario met de deltamethode (RACMO methode 1) gemaakt (tabel 1 en figuur 4d). Bij een herhalingstijd van 1250 jaar stijgt de maatgevende afvoer volgens het W+ scenario (methode 1) van 16.216 m³/s naar 17.492 m³/s, en RACMO (methode 1) naar 18.729 m³/s. Als figuur 4c en 4d worden vergeleken, wordt duidelijk dat RACMO (methode 3) het meest extreme scenario oplevert, met een maatgevende afvoer van 22.372 m³/s (tabel 2). Echter, voor de referentieperiode overschat RACMO met methode 3 de afvoeren met een herhalingstijd groter dan 100 jaar. De toekomstige schattingen zijn vermoedelijk dan ook aan de hoge kant.

Om te corrigeren voor deze overschatting is de relatieve verandering berekend uit de verschillen tussen de resultaten voor het scenario en het referentie experiment. De uitkomsten hiervan zijn weergegeven in tabel 2. Dit resulteert in een maatgevende afvoer van 18.271 m³/s bij Lobith, dus een waarde tussen W+ (methode 1) en RACMO (methode 1) in.

De plots in figuur 4 kunnen ook gebruikt worden om de verwachte verandering in de kans op een specifieke gebeurtenis te schatten. Volgens 'relatieve' RACMO (methode 3) komt een afvoer die nu een herhalingstijd van 1250 jaar heeft, in 2050 eens in de 460 jaar voor. Dat komt overeen met een 2,7 keer zo hoge kans. De RACMO (methode 1) voorspelt een herhalingstijd van 510 jaar (factor 2,5 hoger) en W+ (methode 1) geeft 265 jaar (factor 4,7 hoger).

Resultaten voor deelstroomgebieden

Figuur 6 toont de relatieve verandering van de piekafvoer met een herhalingstijd van 200 jaar ten gevolge van klimaatverandering voor alle deelstroomgebieden. De verhoging van de piekafvoer varieert tussen 2 en 30 %. RACMO (methode 3) laat veel meer ruimtelijke variatie zien dan W+ (methode 1). Dit is een direct gevolg van de gevolgde aanpak voor het transformeren van meteorologische klimaatscenario's naar afvoeren. De delta methode (methode 1) is niet ruimtelijk gedifferentieerd, terwijl de directe RACMO output (methode 3) is gedifferentieerd voor een grid met een resolutie van 25 x 25 km. De Main, Moezel en Lahn deelstroomgebieden laten de grootste verschillen zien. RACMO (methode 3) voorspelt daar een verhoging van bijna 40% voor de afvoer met een herhalingstijd van 200 jaar, terwijl W+ (methode 1) een verhoging van 17% berekent. In de Main en de Lahn variëren de verschillen tussen de W+ en RACMO klimaatscenario's tussen respectievelijk 22 - 32 %, en 14 - 27 %. Hier laat RACMO dus de grootste verandering zien, terwijl voor het gehele stroomgebied W+ de grootste verandering in de piekafvoer voorspelt. Daarentegen suggereert RACMO (methode 3) voor het bovenstroomse gedeelte van het stroomgebied relatief weinig verandering, vergeleken met het W+ (methode 1) scenario.



FIGUUR 6: GEMIDDELDE VERANDERING IN WINTERAFVOER VOOR DE RACMO (METHODE 3) EN W+ (METHODE 1) SCENARIO'S.

Conclusie

De manier waarop scenario's voor veranderingen in toekomstige extreme afvoeren als gevolg van klimaatverandering worden gemaakt bepaalt sterk de uitkomst. Op basis van verschillende 1000 jarige simulaties is de verwachting dat de huidige maatgevende afvoer van 16.000 m³/s bij Lobith met een herhalingsjijd van 1250 jaar toeneemt tot een afvoer tussen 17.500 en 18.700 m³/s in 2050, afhankelijk van de transformatiemethode en het toegepaste klimaatscenario. Dit komt overeen met resultaten uit eerdere studies naar het effect van klimaatverandering op het afvoergedrag in de Rijn, zie voor een overzicht Beersma e.a. (2008). Een verschil met eerdere studies is dat de statistische onzekerheid van de maatgevende afvoer door het gebruik van de lange tijdreeksen aanzienlijk is verlaagd.

Het creëren van een klimaatscenario voor de afvoer met behulp van de deltamethode is transparanter dan het gebruik van de bias-gecorrigeerde directe RACMO output. Het is daarom een robuuste en veel gebruikte methode die het gebruik van de uitvoer van klimaatmodellen mogelijk maakt, ook als deze modellen het klimaat in de referentieperiode niet optimaal simuleren (Graham e.a., 2007). We prefereren echter het gebruik van RCM uitvoer na biascorrectie, omdat dit meer inzicht geeft in de ruimtelijke variatie van het klimaatsignaal. Ook geeft RCM-uitvoer informatie over de verwachte verandering in de statistische verdeling van de temperatuur en neerslag reeksen, en het voorspelt verschuivingen in de frequentie van natte dagen. De extra informatie heeft direct effect op de gesimuleerde afvoeren en is daardoor relevant voor waterbeheer in het stroomgebied van de Rijn.

Een belangrijke vraag is nog of extreem hoge afvoeren van bijna 19.000 m³/s ons land wel kunnen bereiken (De Wit e.a., 2008) doordat in Duitsland al overstromingen zullen plaatsvinden bij een lagere afvoer dan onze maatgevende afvoer. Het fysische maximum dat ons land zou kunnen bereiken is geschat door Silva (2003) op 16.000 tot 17.000 m³/s. Het ligt echter in de verwachting dat Duitsland zal reageren op klimaatverandering, door bijvoorbeeld rivierverruimende maatregelen of dijkverhoging. Daarom wordt in het huidige Nederlandse beleid het effect van bovenstroomse overstromingen niet meegenomen bij het bepalen van de maatgevende afvoer. Het effect van bovenstroomse overstromingen en van diverse hoogwaterbeheersmaatregelen wordt beschreven in Te Linde e.a. (in prep.).

Er gaat in dit artikel enkel aandacht uit naar het schatten van extreem hoge piekafvoeren en overstromingsrisico's in Nederland, terwijl laag water en verdroging ook aanzienlijke schade kan veroorzaken voor bijvoorbeeld de landbouw- en scheepvaartsector. De verwachte verlaging van zomerafvoeren in de KNMI plusscenario's verdienen daarom meer aandacht in het klimaatonderzoek.

Hoe het klimaat verandert blijft uiteraard onzeker. Om een gevoel te krijgen voor deze onzekerheid is het daarom belangrijk om een groot aantal klimaatscenario's door te rekenen. Dit is het doel van een groot internationaal project RheinBlick (www.chr-khr.org/en/projects/rheinblick2050).

Literatuur

- Bakker, A.M.R., en B.J.J.M van den Hurk (2009) Bias correction and resampling of RACMO output for the hydrological modelling of the Rhine; Technical report 307, KNMI, De Bilt.
- Beersma, J.J., J.C.J. Kwadijk en R. Lammersen (2008) Effects of climate change on the Rhine discharges, a review; KNMI, Deltares, Waterdienst, De Bilt.
- Bergström, S. (1976) Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments; Ph.D. thesis, University of Lund, Lund, Zweden.
- Christensen, J.H., T.R. Carter, M. Rummukainen en G. Amanatidis (2007) Evaluating the performance and utility of climate models: the PRUDENCE project; Climatic Change, 81, doi:10.1007/s10584-006-9211-6.
- Delft Hydraulics (2005) SOBEK-RE 1DFLOW technical reference 2.52.005; RWS-RIZA, Lelystad en WL | Delft Hydraulics, Delft.
- Deursen, W.P.A. van (2006) Rapportage Rhineflow/Meuseflow. Nieuwe KNMI scenario's mei 2006; Carthago Consultancy, Rotterdam.
- Eberle, M., H. Buiteveld, K. Wilke en P. Krahe (2005) Hydrological modelling in the river Rhine basin part III - daily HBV model for the Rhine basin; RWS-RIZA en Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz, Duitsland.
- Graham, L.P., J. Andréasson en B. Carlsson (2007) Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods - a case study on the Lule river basin; Climatic Change, 81 (81), 293-307.
- Hooijer, A., F. Klijn, G.B.M. Pedroli en A.G. Van Os (2004) Towards sustainable food risk management in the Rhine and Meuse basins: synopsis of the findings of IRMA-SPONGE; River Research and Applications, 20, 343-357.
- Van den Hurk, B., e.a. (2005) Soil control on runoff response to climate change in regional climate model simulations; Journal of Climate, 18, 3536-3551.
- Van den Hurk, B., e.a. (2006) KNMI climate change scenarios 2006 for the Netherlands; Scientific Report WR 2006-01, KNMI, De Bilt, 82 pag.
- IPCC (2007) Climate change 2007: The physical science basis. Summary for policymakers; Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 21 pag.
- Kay, A.L., N.S. Reynard en R.G. Jones (2006) RCM rainfall for UK food frequency estimation, I. Method and validation; Journal of Hydrology, 318, 151-162.
- Kwadijk, J.D.J. (1993) The impact of climate change on the discharge of the river Rhine; PhD Thesis, Universiteit van Utrecht, Utrecht.
- Kwadijk, J.C.J. en J. Rotmans (1995) The impact of climate change on the river Rhine, A scenario study; Climatic Change, 30, 397-425.
- Leander, R. en T.A. Buishand (2007) Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows; Journal of Hydrology, 332, 487-496, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.08.006.
- Lenderink, G., A. Van Ulden, B. Van den Hurk en F. Keller (2007) A study on combining global and regional climate model results for generating climate scenarios of temperature and precipitation for the Netherlands; Climatic dynamics, 29, 157-176.
- Te Linde, A.H. (2007) Effect of climate change on the discharge of the rivers Rhine and Meuse. Applying the KNMI 2006 scenarios using the HBV model; Delft Hydraulics, Delft.

- Te Linde, A.H., J.C.J.H. Aerts, R.T.W. Hurkmans en M. Eberle (2008)** Comparing model performance of two rainfall-runoff models in the Rhine basin using different atmospheric forcing data sets; *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 943–957.
- Te Linde, A.H., J.C.J.H. Aerts, A.M.R. Bakker en J.C.J. Kwadijk (2009)** Simulating low probability peak discharges for the Rhine basin using resampled climate modeling data; geaccepteerd voor publicatie in *Water Resources Research*.
- Lindström, G., B. Johansson, M. Persson, M. Gardelin en S. Bergström (1997)** Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model; *Journal of Hydrology*, 201, 272–288.
- Middelkoop, H. en J.C.J. Kwadijk (2001)** Towards integrated assessment of the implications of global change for water management - the Rhine experience; *Physics and Chemistry of the Earth*, 26 (7-8), 553–560, doi:10.1016/S1464-1909(01)00049-1.
- Milly, P.C.D., K.A. Dunne en A.V. Vecchia (2005)** Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate; *Nature*, 438, 347–350.
- Pinter, N., R.R. Van der Ploeg, P. Schweigert en G. Hoefler (2006)** Flood magnification on the river Rhine; *Hydrological Processes*, 20, 147–164.
- Silva, W (2003)** Hoeveel (hoog)water kan ons land binnenkomen via de Rijn bij Lobith, nu en in de toekomst; RWS-RIZA, Lelystad, 43 pag.
- Randvoorwaardenboek (2006)** Hydraulische Randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen voor de derde toetsronde 2006-2011; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Water, Den Haag.
- De Wit, M., H. Buiteveld, W. van Deursen, F. Keller en J. Bessembinder (2008)** Klimaatverandering en de afvoer van Rijn en Maas; *Stromingen* 14 (1), 13–24.
- Wood, A.W., L.R. Leung, V. Sridhar en D.P. Lettenmaier (2004)** Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs; *Climatic Change*, 62 (1-3), 189–216.

Contactgegevens:

Aline te Linde
 Instituut voor Milieuvraagstukken
 De Boelelaan 1087
 1081 HV Amsterdam
 06 137 47 967
 Aline.te.linde@ivm.vu.nl

