

---

# Klimaatverandering en de afvoer van Rijn en Maas

Marcel de Wit<sup>1</sup>, Hendrik Buiteveld<sup>2</sup>, Willem van Deursen<sup>3</sup>,  
Fransizka Keller<sup>4</sup>, Janette Bessembinder<sup>5</sup>

---

*De waterbeheerders in Nederland bereiden zich sinds het einde van de jaren negentig serieus voor op de gevolgen van klimaatverandering. Tot op heden gebeurde dit op basis van klimaatscenario's die in het kader van Waterbeheer 21ste eeuw (WB21) zijn gepresenteerd. De nieuwe KNMI06-scenario's geven de laatste inzichten in de gevolgen van klimaatverandering voor Nederland. In deze verkenning bekijken we of de in WB21 gehanteerde uitgangspunten voor Rijn en Maas nog actueel zijn. Hiertoe vergelijken we simulaties van het afvoerregerime van Rijn en Maas met de oude en de nieuwe klimaatscenario's.*

## **Klimaatscenario's voor het waterbeheer**

In het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW) zijn afspraken gemaakt tussen rijk, provincies, waterschappen en gemeenten om het watersysteem in 2015 op orde te hebben en te houden bij de verwachte klimaatverandering, zeespiegelstijging, bodemdaling en verstedelijking. Daarbij is er een groot bewustzijn dat door klimaatverandering in de toekomst vaker situaties met wateroverlast en watertekorten te verwachten zijn. Ook wordt beseft dat het klimaatbestendig maken van Nederland zich verder uitstrekt dan alleen de watersector. Dit heeft bijvoorbeeld geleid tot het nationale programma 'Adaptatie, Ruimte en Klimaatverandering' (ARK), dat in 2006 is gestart (VROM, 2006). Tot nu vormden de WB21 klimaatscenario's het uitgangspunt voor het toekomstige waterbeheer. Hierin wordt een laag, midden en hoog scenario onderscheiden. De bijbehorende karakteristieken voor verandering van onder meer temperatuur, neerslag, verdamping, en zeespiegelstijging zijn weergegeven in tabel 1. Bij uitwerking in het waterbeheer is vaak om praktische redenen het middenscenario gehanteerd.

Gebaseerd op de nieuwste inzichten van het wereldwijde klimaatonderzoek heeft het KNMI in 2006 nieuwe scenario's gepresenteerd (KNMI06 scenario's). Deze scenario's laten zien dat een temperatuurstijging van 1 graad (scenario G=gematigd) niet meer het midden maar juist een onderkant van de bandbreedte van temperatuurstijging vertegenwoordigt. De W staat voor warm.

---

1 Rijkswaterstaat Waterdienst, Deltares

2 Rijkswaterstaat Waterdienst

3 Carthago Consultancy, Rotterdam

4 KNMI

5 KNMI

Bij de +scenario's (G+, W+) wordt uitgegaan van een verandering in de luchtstroming. In deze +scenario's worden de zomers fors droger vergeleken met de huidige situatie en ook met de WB21 scenario's. De bijbehorende karakteristieken voor verandering van onder meer neerslag, verdamping, en zeespiegelstijging voor alle vier de KNMI06 scenario's zijn weergegeven in tabel 2. Meer details over de KNMI06 scenario's zijn terug te lezen op de website van het KNMI en in KNMI (2006).

## **Verandering van het afvoerregime van Rijn en Maas**

De in tabel 1 en 2 vermelde veranderingen zijn door het KNMI omgezet in gemiddelde veranderingen per decade. De decadegemiddelde verandering in temperatuur, neerslag en verdamping zijn rechtstreeks toegepast op gemeten temperatuur-, neerslag- en verdampingreeksen. Deze veranderde reeksen zijn vervolgens doorgerekend met een hydrologisch model voor het Rijn- en Maasstroomgebied. Figuren 1 en 2 geven het huidige en veranderde afvoerregime van de Rijn en de Maas op basis van gemeten en veranderde temperatuur-, neerslag- en verdampingreeksen. Het laag, midden en hoog scenario refereert aan WB21 voor 2050 en de G, G+, W, W+ refereren aan de KNMI06 scenario's voor 2050.

Zowel uit de WB21 scenario's als de KNMI06 scenario's volgt dat de winterafvoer van Rijn en Maas toeneemt. Voor de Rijn komt de verwachte toename van de winterafvoer voor scenario G en W ongeveer overeen met het WB21 midden en hoog scenario. Het W+ scenario geeft een nog iets grotere toename van de winterafvoer. Voor de Maas komt de verwachte toename van de winterafvoer voor de KNMI06 scenario's ongeveer overeen met het WB21 laag en midden scenario. De toename van de winterafvoer volgens de KNMI06 scenario's is voor de Maas lager dan de toename in het WB21 hoog scenario. In de zomer geven G+ en W+ een sterke afname van de afvoer. Die afname is aanzienlijk groter dan in de WB21-scenario's.

Deze resultaten zijn allereerst te verklaren door (verschillen in) de toename van de winterneerslag en de afname van de zomerneerslag. Daarnaast reflecteert figuur 1 dat hogere temperaturen er toe leiden dat in de Alpen minder buffering van neerslag in de vorm van sneeuw plaatsvindt. Dat heeft tot gevolg dat de Rijnafvoer in winter en vroege voorjaar toeneemt en in zomer en vroege najaar afneemt. Ook de ondergrond fungeert als buffer tussen neerslag en afvoer en dat verklaart waarom ook voor de Maas de veranderingen in het afvoerregime (figuur 2) niet helemaal in de pas lopen met de verandering in het maandelijks neerslagpatroon (tabel 1 en 2). Zo geeft het W+ scenario een hogere winterneerslag dan het WB21 hoog scenario. In de zomer geeft het W+ scenario echter veel minder neerslag dan het WB21 scenario. In het W+ scenario is een groter deel van de winterneerslag nodig om de in de zomer uitgedroogde ondergrond aan te vullen. Dat verklaart waarom de toename van de winterafvoer in het W+ scenario lager uitpakt dan in het WB21 hoog scenario.

## **Wat berekenen anderen?**

Er zijn de afgelopen jaren een aantal studies gewijd aan het simuleren van de gevolgen van klimaatveranderingen voor het afvoerregime van rivieren in Noordwest Europa. Bij deze studies gebruikt men de oorspronkelijke uitkomsten van klimaatmodellen en niet de hieruit afgeleide overzichtsscenario's van WB21 (tabel 1) en KNMI06 (tabel 2).

**Tabel 1:** Samenvatting van de verandering van variabelen in de WB21 scenario's (bron: www.knmi.nl)

<b>Scenario 2050</b>	<b>laag</b>	<b>midden</b>	<b>hoog</b>
Stijging gemiddelde jaartemperatuur (°C)	+0,5	+1	+2
Gemiddelde jaarlijkse neerslag (%)	+1,5	+3	+6
Neerslag in zomerhalfjaar (%)	+0,5	+1	+2
Neerslag in winterhalfjaar (%)	+3	+6	+12
10-daagse neerslagsom (%)	+5	+10	+20
Dagelijkse neerslagsom met een huidige herhalingstijd van eens in de 100 jaar (jaar)	90	78	62
Jaarlijkse evaporatie (%)	+2	+4	+8
Relatieve zeespiegelstijging (cm)	+10	+25	+45
Intensiteit van stormen (%)	-5 tot +5	-5 tot +5	-5 tot +5

<b>Scenario 2100</b>	<b>laag</b>	<b>midden</b>	<b>hoog</b>
Stijging gemiddelde jaartemperatuur (°C)	+1	+2	+4-6
Gemiddelde jaarlijkse neerslag (%)	+3	+6	+12
Neerslag in zomerhalfjaar (%)	+1	+2	+4
Neerslag in winterhalfjaar (%)	+6	+12	+25
10-daagse neerslagsom (%)	+10	+20	+40
Dagelijkse neerslagsom met een huidige herhalingstijd van eens in de 100 jaar (jaar)	78	62	40
Jaarlijkse evaporatie (%)	+4	+8	+16
Relatieve zeespiegelstijging (cm)	+20	+60	+110
Intensiteit van stormen (%)	-5 tot +5	-5 tot +5	-5 tot +5

Gellens & Roulin (1998) simuleren voor zes verschillende klimaatscenario's de gevolgen voor het afvoerregime van acht verschillende stroomgebieden in België. Deze simulaties wijzen over het algemeen op een toename van de overstromingsfrequentie in de winter, vooral in de stroomgebieden waar een groot deel van het water oppervlakkig afstroomt (de Ardennen). In een gemeenschappelijke Belgische studie simuleren Smitz e.a. (2002) voor drie klimaatscenario's de gevolgen voor het afvoerregime van de Ourthe en Jeker. Zij concluderen dat klimaatverandering een significante invloed kan hebben op het afvoerregime van Belgische rivieren. De verschillen tussen de klimaatscenario's zijn echter groot en variëren van een toename tot een afname van de gemiddelde winterafvoer. Booij (2005) modelleert het neerslag/afvoer proces in het Maasstroomgebied met en zonder klimaatverandering en voorziet een toename van de kans op extreem hoge afvoeren in de Maas. De verandering van het afvoerregime van de Rijn is de afgelopen jaren onder andere beschreven in Kwadijk (1993), Grabs e.a. (1997), Middelkoop e.a. (2001), Shabalova e.a. (2003), Kleinn e.a. (2005) en Lenderink e.a. (2007). Het algemene beeld uit al deze studies is een toename van de Rijnafvoer in de winter en een afname van de Rijnafvoer in de zomer. De mate waarin hangt sterk af van de klimaatscenario's (of modellen) die worden gebruikt. Vergelijkbare resultaten als hierboven beschreven voor Rijn- en Maasstroomgebied worden gerapporteerd voor Duitsland (Müller-Wohlfeil e.a., 2000; Menzel e.a., 2002), Saone en Seine (Tanguy, 2005) en Groot-Brittannië (Sef-ton & Boorman, 1996; Pilling & Jones, 1999).

**Tabel 2:** Samenvatting van de verandering van variabelen in de KNMI06 scenario's (bron: www.knmi.nl)

<b>Scenario 2050</b>		<b>G</b>	<b>G+</b>	<b>W</b>	<b>W+</b>
Wereldwijde temperatuurstijging		+1°C	+1°C	+2°C	+2°C
Verandering in luchtstromingspatronen in West Europa		nee	ja	nee	ja
Winter	gemiddelde temperatuur	+0,9°C	+1,1°C	+1,8°C	+2,3°C
	koudste winterdag per jaar	+1,0°C	+1,5°C	+2,1°C	+2,9°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+4%	+7%	+7%	+14%
	aantal natte dagen ( $\geq 0,1$ mm)	0%	+1%	0%	+2%
	10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+4%	+6%	+8%	+12%
	hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar	0%	+2%	-1%	+4%
Zomer	gemiddelde temperatuur	+0,9°C	+1,4°C	+1,7°C	+2,8°C
	warmste zomerdag per jaar	+1,0°C	+1,9°C	+2,1°C	+3,8°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+3%	-10%	+6%	-19%
	aantal natte dagen	-2%	-10%	-3%	-19%
	dagsom van de neerslag die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+13%	+5%	+27%	+10%
	potentiële verdamping	+3%	+8%	+7%	+15%
Zeespiegel	absolute stijging	15-25 cm	15-25 cm	20-35 cm	20-35 cm

<b>Scenario 2100</b>		<b>G</b>	<b>G+</b>	<b>W</b>	<b>W+</b>
Wereldwijde temperatuurstijging in 2100		+2°C	+2°C	+4°C	+4°C
Verandering in luchtstromingspatronen in West Europa		nee	ja	nee	ja
Winter	gemiddelde temperatuur	+1,8°C	+2,3°C	+3,6°C	+4,6°C
	koudste winterdag per jaar	+2,1°C	+2,9°C	+4,2°C	+5,8°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+7%	+14%	+14%	+28%
	aantal natte dagen ( $\geq 0,1$ mm)	0%	+2%	0%	+4%
	10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+8%	+12%	+16%	+24%
	hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar	-1%	+4%	-2%	+8%
Zomer	gemiddelde temperatuur	+1,7°C	+2,8°C	+3,4°C	+5,6°C
	warmste zomerdag per jaar	+2,1°C	+3,8°C	+4,2°C	+7,6°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+6%	-19%	+12%	-38%
	aantal natte dagen	-3%	-19%	-6%	-38%
	dagsom van de neerslag die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+27%	+10%	+54%	+20%
	potentiële verdamping	+7%	+15%	+14%	+30%
Zeespiegel	absolute stijging	35-60 cm	35-60 cm	40-85 cm	40-85 cm

In een aantal van de hierboven vermelde studies is de zogenaamde ‘delta methode’ toegepast. De verandering tussen huidig en toekomstig klimaat wordt rechtstreeks toegepast op gemeten reeksen van neerslag, temperatuur en verdamping. Nadeel van deze methode is dat veranderingen in de variabiliteit van bijvoorbeeld de neerslag niet worden meegenomen. Voordeel is dat het een robuuste methode is die niet hoeft te corrigeren voor afwijkingen tussen het gemeten huidige klimaat en het gemodelleerde

huidige klimaat. Alternatief is de zogenaamde 'directe methode'. Hierbij bereken je zowel voor het huidige als het toekomstige klimaat de afvoeren op basis van de oorspronkelijke resultaten van een klimaatmodel. Lenderink e.a. (2007) laat zien dat het nogal uitmaakt welk van de twee methoden je kiest, vooral wanneer je in extreme afvoeren geïnteresseerd bent. Zo berekenen zij dat een Rijnafvoer met een terugkeertijd van eens in de 100 jaar volgens de directe methode met 10% zal toenemen en volgens de delta methode met 40%. Een recente (Leander & Buishand, 2007) en lopende (Leander e.a., in voorbereiding) studie illustreren echter een belangrijke beperking bij het gebruik van de directe methode. De klimaatmodellen hebben moeite om de variabiliteit van de winterneerslag in het huidige klimaat goed te reproduceren. Dit geeft te denken over het vermogen van deze modellen om de veranderingen in de variabiliteit van de winterneerslag in een toekomstig klimaat goed te kunnen simuleren.

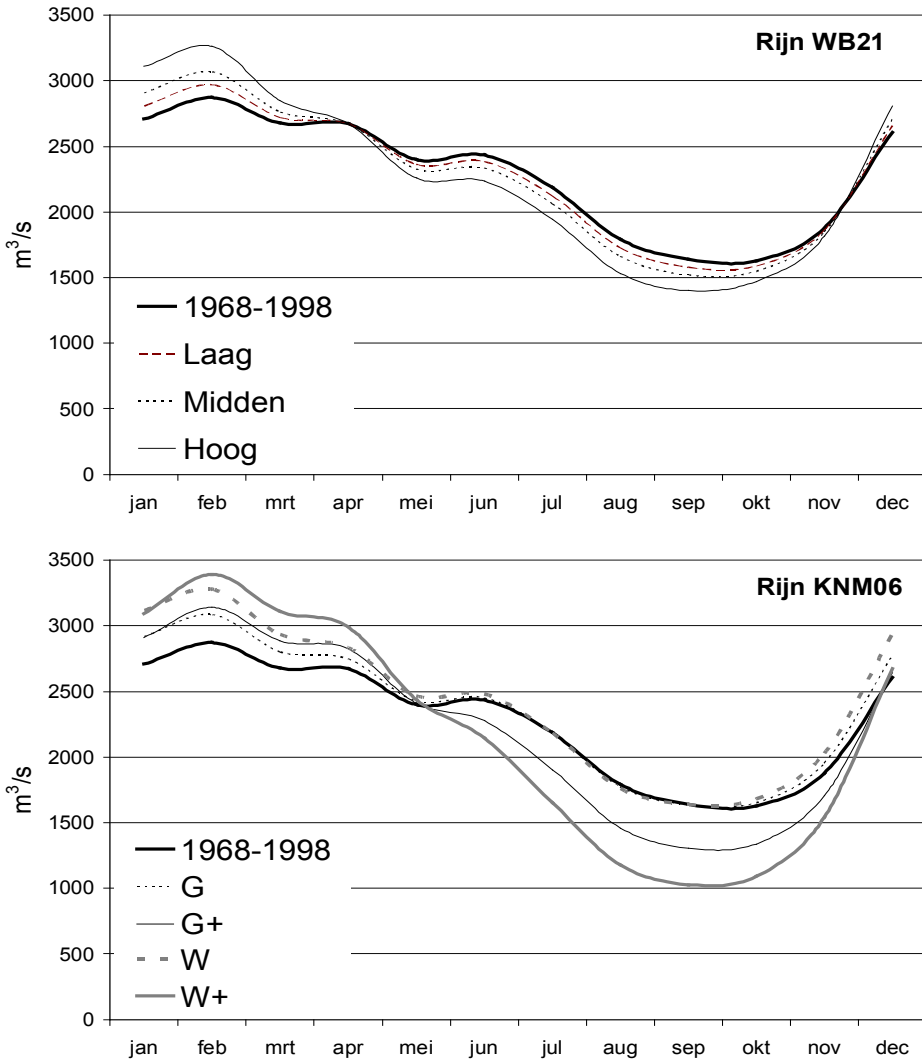
Tijdens droge perioden in de zomer is de bijdrage van sneeuwsmelt in de Alpen aan de afvoer bij Lobith groot. In zomers met een lage afvoer, zoals in 2003, bestaat de afvoer van de Rijn bij Lobith voor meer dan de helft uit (smelt-)water dat uit de Alpen afkomstig is (de Wit, 2004). Het leidt dan ook weinig twijfel dat de toename van de temperatuur in de Alpen tot een toename van de kans op zomerlaagwater in de Rijn leidt. De invloed van een mogelijke klimaatverandering op het voorkomen van extreem lage afvoeren in de Maas is minder eenduidig. Enerzijds zal een afname van de zomerneerslag en een toename van de verdamping tot een afname van de zomerafvoer leiden. Anderzijds leidt een toename van de winterneerslag tot een aanvulling van het grondwater en daarmee tot een verhoging van de basisafvoer (de Wit e.a., 2007). Vraag is wat het verwachte gezamenlijke effect van deze beide veranderingen zal zijn.

Uit bovenstaande studies blijkt ook dat er nog veel onzekerheden zijn, zowel in de klimaatscenario's die worden gebruikt, in de manier waarop de klimaatscenario's worden gebruikt, als in de hydrologische modellen. De onzekerheden gelden vooral voor extreme condities. Vanuit de wetenschap is er geen eenduidig antwoord te geven op de vraag: wat is de maatgevende afvoer van de Rijn en Maas aan het einde van de 21<sup>ste</sup> eeuw? Uit de literatuur blijkt wel een eenduidige richting: toename van de kans op hoge winterafvoeren en, vooral voor de Rijn, een toename van de kans op lage afvoeren in de zomer. Hetzelfde beeld dus als dat is weergegeven in figuur 1 en 2.

## **Verandering maatgevende afvoer**

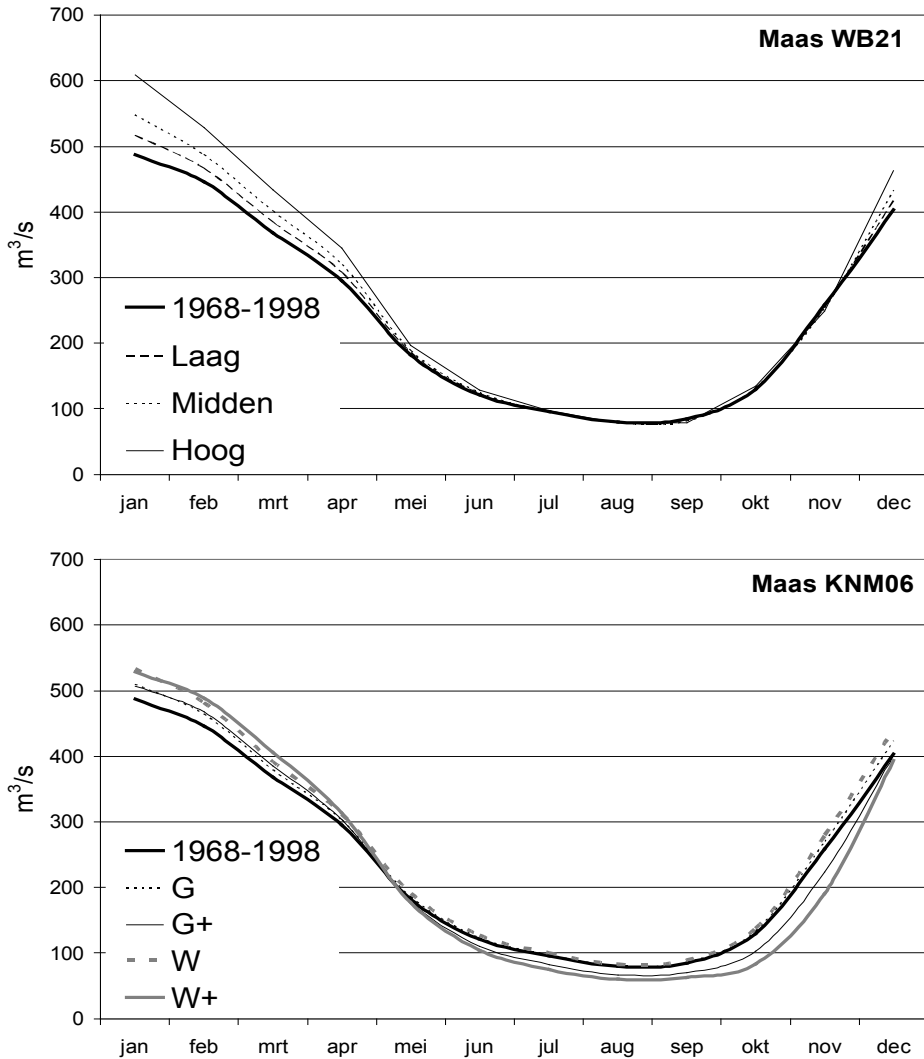
De Hydraulische Randvoorwaarden zijn de waterstanden en golven die de primaire waterkeringen in Nederland nog veilig moeten kunnen keren. Voor de rivieren begint de bepaling van de maatgevende waterstand met een bepaling van de maatgevende afvoer. Dat is een afvoer met een bepaalde kans van optreden (eens in de zoveel jaar). Op basis van de huidige inzichten verwachten we een toename van de maatgevende afvoer van Rijn en Maas. De bepaling van een toekomstige maatgevende afvoer is echter met grote onzekerheden gemoeid. Als waterbeheerder kun je twee dingen doen. Je kunt redeneren dat het allemaal erg onzeker is. We wachten rustig af wat er komen gaat. Je kunt ook redeneren dat de maatregelen om in te spelen op een verandering van de maatgevende afvoer veel tijd en ruimte kosten en dat je bij de inrichting van het riviereengebied beter nu al rekening kunt houden met klimaatverandering. In Nederland doen wij iets wat er tussenin zit.

**Figuur 1:** Verandering in het afvoerregime van Rijn (Lobith). Eind 20<sup>ste</sup> eeuw versus 2050. Gebaseerd op een simulatie met Rhineflow van Deursen, 2006). Dezelfde exercitie is ook uitgevoerd met een ander hydrologisch model: HBV. Dit levert vergelijkbare uitkomsten op (zie te Linde, 2007).



Er zijn de afgelopen jaren verkennende studies uitgevoerd waarbij is gekeken naar de maatregelen die nodig zijn als de verwachte toename van de maatgevende afvoer ook echt plaats vindt. De bevindingen van deze studies zijn gebruikt om de maatregelen die sowieso ('zonder' klimaatverandering) genomen moeten worden te toetsen op hun robuustheid voor een mogelijke toekomst met klimaatverandering. Maatregelen die ook in een toekomst met klimaatverandering effectief zijn verdienen de voorkeur boven maatregelen die dat niet zijn. Hieronder staat uiteengezet hoe de, in deze verkennende

**Figuur 2:** Verandering in het afvoerregime van Maas (Borgharen). Eind 20ste eeuw versus 2050. Gebaseerd op een simulatie met Meuseflow (van Deursen, 2006). Dezelfde exercitie is ook uitgevoerd met een ander hydrologisch model: HBV. Dit levert vergelijkbare uitkomsten op (zie te Linde, 2007).



studies gebruikte, scenario's voor toekomstige maatgevende afvoeren van Rijn en Maas bepaald zijn.

De totnogtoe gebruikte scenario's voor de verandering van de maatgevende afvoer voor de Rijn zijn gebaseerd op een studie van Middelkoop e.a. (2000). Hiervoor zijn de resultaten van het zogeheten UKHI-experiment van het Engelse Hadley Centre gebruikt. Dit experiment is uitgevoerd met de 'centrale schatting' IPCC emissiescenario IS92a zonder

het effect van aërosolen, geprojecteerd op het jaar 2100. De stijging van de gemiddelde jaartemperatuur in het Rijngebied is volgens dit UKHI scenario ongeveer 4°C. Scenario's in overeenstemming met een gemiddelde temperatuurstijging van +1°C en +2°C in het Rijngebied zijn verkregen door lineaire interpolatie van de verandering tussen nu en de veranderingen volgens het UKHI scenario in 2100. Voor de Rijn is voor de scenario's de verandering van de afvoer bepaald met het model RHINEFLOW (Kwadijk, 1993; Deursen, 1999a; Deursen, 1999b; Deursen, 2003). Met behulp van een zogenaamde statistische downscaling is vervolgens de decadegemiddelde uitvoer van RHINEFLOW naar dagwaarden geconverteerd en is de maatgevende afvoer voor de klimaatscenario's geschat (Middelkoop, 2000). Uit deze berekeningen volgde dat de toename van de maatgevende afvoer ongeveer 5% per graad temperatuurstijging bedroeg. Eerder is in een studie van de CHR (Grabs e.a., 1997) per 1 graad temperatuurstijging een toename van extreme afvoeren tussen de 5 en 8% gekoppeld en aan een toename van 2 graden een toename van 10%. Uiteindelijk is voor WB21 voor de Rijn een toename van de maatgevende afvoer van 5% per graad temperatuurstijging gehanteerd (Kors e.a. 1999).

WL (1994) berekent dat een toename van de winterneerslag in het Maasstroomgebied met 10% tot een toename van 13% van de maatgevende afvoer van de Maas leidt. Parmet & Burgdorffer (1995) berekenen een toename van 17% in de piekafvoeren voor de Maas voor een scenario waarbij de winterneerslag met 20% toeneemt. Op basis van deze studies is er voor gekozen een eenvoudige vuistregel te hanteren: de procentuele toename van het jaarlijkse maximum van de 10-daagse winter neerslagsom in het Maasstroomgebied leidt tot een zelfde toename van het door de Maas af te voeren volume tijdens maatgevend hoogwater. De in WB21 gehanteerde (afgeronde) scenario's voor maatgevende afvoeren van Rijn en Maas zijn weergegeven in tabel 3.

**Tabel 3:** Schatting van maatgevende afvoer ( $Q_{1250}$ ) Rijn (Lobith) en Maas (Borgharen) op basis van WB21 scenario. (Kors, 1999)

	<b>Scenario</b>	<b>Rijn (Lobith) m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Maas (Borgharen) m<sup>3</sup>/s</b>
2001		16000	3800
2050	WB21 Laag	16400	4000
	WB21 Midden	16800	4200
	WB21 Hoog	17600	4550
2100	WB21 Laag	16800	4200
	WB21 Midden	17600	4550
	WB21 Hoog	19200	5300

### **Verandering maatgevende afvoer veranderen?**

Er is een hele serie aannames nodig om de vertaalslag te maken van het KNMI06 scenario naar toekomstige maatgevende afvoeren op de Rijn en Maas. Idealiter zou je met de ruwe data uit de klimaatmodellen, die ten grondslag liggen aan de KNMI06 scenario's, hydrologische simulaties uitvoeren voor het huidige en toekomstige klimaat. Dat is in feite gedaan in de eerder vermelde studies van bijvoorbeeld Lenderink e.a. (2007),



Kleinn e.a. (2005) en Leander en Buishand (2007). Deze studies geven nieuwe inzichten maar leveren geen pasklare schattingen van de toekomstige maatgevende afvoer van Rijn en Maas. Zij illustreren vooral onzekerheden die gemoeid zijn met de aannames die gemaakt moeten worden bij een dergelijke exercitie.

Ten opzichte van de simulatie gebaseerd op WB21 hoog geven de simulaties gebaseerd op KNMI06 scenario's gemiddeld genomen iets lagere winterafvoeren voor de Maas (figuur 2). Bovendien is de toename van de maximale 10-daagse neerslag som in de winter voor de KNMI06 scenario's gemiddeld genomen wat lager dan voor de WB21-scenario's. Dit zou aanleiding kunnen zijn om de schatting van de toekomstige maatgevende afvoer van de Maas naar beneden bij te stellen. Recente waarnemingen wijzen echter in een andere richting. Als basis voor de bepaling van de Hydraulische Randvoorwaarden 2006 berekende Diermanse (2004b) dat de huidige maatgevende afvoer van de Maas bij Borg-haren juist naar boven moet worden bijgesteld. De uitbreiding van de meetreeks met het hoogwater van 2002 en 2003 leidde tot deze bijstelling. De gemeten afvoerreeks voor Rijn en Maas omvat maar honderd jaar en dat is te kort om een nauwkeurige schatting te maken van de afvoer die eens in de 1250 jaar voor komt. Diermanse (2004a & 2004b) laat zien dat het 95% betrouwbaarheidsinterval bij de bepaling van de maatgevende afvoer ( $Q_{1250}$ ) voor zowel de Rijn als de Maas groot is. Met name voor de Maas zie je dat het de afgelopen 25 jaar aanzienlijk vaker hoogwater is geweest dan in de periode 1911-1980 (Tu e.a., 2005). De huidige maatgevende afvoer is gebaseerd op de reeks van 1911 tot het heden. Zou je alleen de laatste 25 jaar van de meetreeks gebruiken dan zou je op een veel hogere maatgevende afvoer uitkomen. Cruciaal hierbij is de afweging: beschouwen we de toegenomen frequentie van het hoogwater op de Maas over de afgelopen 30 jaar als natuurlijke variatie of als een zichtbaar gevolg van klimaatverandering. Vooralsnog gaan we uit van het eerste.

Ten opzichte van de simulaties gebaseerd op WB21 geven de simulaties gebaseerd op W en W+ scenario KNMI06 iets hogere winterafvoeren voor de Rijn (figuur 1). Ook deze waarneming heeft maar een beperkte betekenis. Voor de Rijn bij Lobith is in de Niederrhein studie (Lammersen, 2004) vastgesteld dat het fysisch maximum op dit moment 15.500 m<sup>3</sup>/s bedraagt. Door bovenstrooms van Nederland noodmaatregelen te treffen zou maximaal 16.000 m<sup>3</sup>/s ons land kunnen bereiken. Dat is minder dan de waarden in tabel 3. Het ligt echter voor de hand dat ook de Duitse waterbeheerder zal anticiperen op de klimaatverandering. Er bestaat een reële kans dat de afvoercapaciteit van de Rijn bovenstrooms van Nederland daardoor zal toenemen hetzij door rivierversruiming hetzij door dijkverhoging. Dergelijke maatregelen zijn in de toekomst niet uit te sluiten aangezien het schadepotentiaal in Duitsland erg groot is. Duidelijk is dat de onzekerheden hieromtrent groot zijn. Voor de lange termijn hanteert het kabinet het zogeheten voorzorgsprincipe. Het gaat het er vooralsnog van uit dat een afvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith (maatgevende afvoeren 2100 volgens WB21 middenscenario) tot de mogelijkheden behoort. Daarom is bij de PKB Ruimte voor de Rivier ([www.ruimte-voorderivier.nl](http://www.ruimte-voorderivier.nl)) voor de langetermijnvisie uit voorzorg uitgegaan van een maatgevende afvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s in 2100. De maatregelen voor 2015 moeten passen in deze visie (geen spijt maatregelen).

De gevolgen van extreem hoge afvoeren op de Maas staan ook op de agenda bij de Internationale Maas Commissie. Op basis van de huidige inzichten is er geen reden om aan te nemen dat de Maas bovenstrooms van Borgharen een beperkte afvoercapaciteit heeft (de Wit, 2003). Weliswaar zal er bij een extreem hoogwater op de Maas veel overlast ontstaan in Frankrijk en België, maar het water zal uiteindelijk toch afstromen. Bovendien is het een logische veronderstelling dat bepaalde kwetsbare gebieden, zoals de mijnverzakkingsgebieden, met noodmaatregelen of structurele maatregelen te allen tijde beschermd zullen worden. Op basis van het WB21 midden scenario voor het einde van deze eeuw is bij de Integrale Verkenning Maas (VenW, 2003) uitgegaan van een maatgevende afvoer van 4.600 m<sup>3</sup>/s aan het einde van de 21<sup>ste</sup> eeuw.

De bandbreedte bij de schatting van de maatgevende rivierafvoer in een verre toekomst is groot. Daarmee vergeleken is het verschil dat ontstaat door uit te gaan van oude klimaatscenario's (WB21) dan wel de nieuwste klimaatscenario's (KNMI06) klein. Er is dan ook geen reden om de op WB21 gebaseerde verkennende rivierstudies opnieuw te gaan doen. De uitgangspunten blijven hetzelfde. In het onlangs verschenen rapport 'Ontwerpbelastingen voor het rivierengebied' zijn scenario's aanbevolen voor de maatgevende afvoeren van Rijn en Maas voor 2050 en 2100. De in dit rapport aanbevolen getallen staan in tabel 4 en komen ongeveer overeen met de afgeronde getallen in tabel 3 WB21 midden.

**Tabel 4:** Aanbevolen maatgevende afvoer (1/1250 jaar) Rijn (Lobith) en Maas (Borgharen) in het technisch rapport ontwerpbelastingen voor het rivierengebied (VenW, 2007).

	Rijn (Lobith) m <sup>3</sup> /s	Maas (Borgharen) m <sup>3</sup> /s
2050	17000	4200
2100	18000	4600

## Conclusie

Het onderzoek dat de afgelopen jaren is uitgevoerd naar de invloed van klimaatverandering op het afvoerregime van Rijn en Maas laat een eenduidig beeld zien: toename van de winterafvoer en, vooral voor de Rijn, een sterke afname van de zomerafvoer. De nieuwe KNMI scenario's illustreren dat een verandering van de luchtstroming (G+ en W+ scenario's) tot aanzienlijk lagere zomerafvoeren leiden. De bandbreedte bij de schatting van de maatgevende rivierafvoer in een verre toekomst is groot. Daarmee vergeleken is het verschil dat ontstaat door uit te gaan van oude klimaatscenario's (WB21) dan wel de nieuwste scenario's (KNMI06) klein. Op basis van het WB21 midden scenario voor het einde van deze eeuw is voor de PKB Ruimte voor de Rivier een toekomstige maatgevende afvoer van 18.000 m<sup>3</sup>/s aangenomen en bij de Integrale Verkenning Maas een toekomstig maatgevende afvoer van 4.600 m<sup>3</sup>/s. De analyse beschreven in dit artikel laat zien dat deze aannames ook op basis van de nieuwe KNMI06 scenario's robuust zijn.

## Literatuur

- Booij, M.J. (2005)** *Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions; Journal of Hydrology* 303, pag 176-198.
- Deursen W.P.A. van (1999a)** *Impact of climate change on the river Rhine discharge regime. Scenario runs using RHINEFLOW-2; Report of NRP project 952210.*
- Deursen W.P.A. van (1999b)** *RHINEFLOW-2. Development, calibration and application; Report of NRP project 952210.*
- Deursen, W.P.A. van (2003)** *Klimaatveranderingen in de stroomgebieden van Rijn van en Maas: modelstudies met Rhineflow-3 en Meuseflow-2; Carthago Consultancy, Rotterdam.*
- Deursen W.P.A. van (2006)** *Rapportage Rhineflow / Meuseflow. Nieuwe KNMI scenario's mei 2006; Carthago Consultancy, Rotterdam, the Netherlands.*
- Diermanse, F.L.M. (2004a)** *HR2006-herberekening werkklijn Rijn; WL|Delft Hydraulics, Project nr. Q3623. Delft, The Netherlands.*
- Diermanse, F.L.M. (2004b)** *HR2006-herberekening werkklijn Maas; WL|Delft Hydraulics, Project nr. Q3623. Delft, The Netherlands.*
- Gellens, D.en E. Roulin (1998)** *Streamflow Response of Belgian Catchments to IPCC Climate Change Scenarios; Journal of Hydrology* 210, pag 242-258.
- Grabs, W. (Ed.) (1997)** *Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin; CHR report no I-16. Lelystad.*
- Kleinn, J., C. Frei, J. Gurtz, D. Lüthi, P.L. Vidale, C. Schär (2005)** *Hydrological simulations in the Rhine basin driven by a regional climate model; Journal of Geophysical Research* 110, doi:10.1029/2004JD005143, 2005
- KNMI (2006)** *KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands; KNMI Scientific report WR 2006-01. KNMI The Netherlands.*
- Kors, A., F.A.M. Claessen en J.W. Wesseling (1999)** *Scenario's extreme krachten t.b.v. WB21; RIZA en WL|Delft Hydraulics*
- Kwadijk, J. (1993)** *The impact of climate change on the discharge of the River Rhine; PhD thesis Universiteit Utrecht, vakgroep Fysische Geografie. KNAG/NGS publicatie 171.*
- Lammersen, R. (2004)** *Grensoverschrijdende effecten van extreem hoogwater op de Niederrhein; Gezamenlijke uitgave van: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Provincie Gelderland, Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland.*
- Leander, R. en T.A. Buishand (2007)** *Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows; Journal of Hydrology* 332, pag 487- 496
- Leander, R., T.A. Buishand en M.J.M. de Wit (in prep.)** *Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows; Accepted for publication in Journal of Hydrology.*
- Lenderink, G. , T.A. Buishand en W.P.A. van Deursen (2007)** *Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach; Hydrology and Earth System Sciences* 11, pag 1145-1159.
- Linde, A., te (2007)** *Effect of climate change of rivers Rhine and Meuse. Applying the KNMI 2006 scenarios using the HBV model; WL|Delft Hydraulics. Rapportage aan RIZA Project nr. Q4286.*
- Menzel, L., D. Niehoff, G. Bürger en A. Bronstert (2002)** *Climate Change Impacts on River Flooding: A modelling Study of Three Meso-Scale Catchments; Advances Global Climate Research* 10, pag 249-269

- Middelkoop, H., [Ed] (2000)** *The impact of climate change on the river Rhine and the implications for water management in the Netherlands; RIZA, RIZA rapport 2000.010, Arnhem*
- Middelkoop, H., K. Daamen, D. Gellens, W. Grabs, J. Kwadijk, H. Lang, B. Parmet, B. Schädler, J. Schulla en K. Wilke (2001)** *Impact of Climate Change on Hydrological Regimes and Water Resources Management in the Rhine basin; Climate Change 49, pag 105-128.*
- Müller-Wohlfeil, D.-I., G. Bürger en W. Lahmer (2000)** *Response of a river catchment to Climate Change: Application of Expanded Downscaling to Northern Germany; Climatic Change 47, pag 61-89.*
- Parmet, B. en M. Burgdorffer (1995)** *Extreme Discharges of the Meuse in the Netherlands: 1993, 1995 and 2100. Operational Forecasting and Long term expectations; Phys. Chem. Earth 20 5-6, pag 485-489.*
- Pilling, C. en J.A.A. Jones (1999)** *High resolution climate change scenarios: implications for British runoff; Hydrological Processes 13, pag 2877-2895.*
- Sefton, C.E.M. en D.B. Boorman (1996)** *A regional investigation of climate change impacts on UK streamflows; Journal of Hydrology 195, pag 26-44.*
- Shabalova, M.V., W.P.A. van Deursen en T.A. Buishand (2003)** *Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model; Climate Research 23, pag 233-246.*
- Smitz, J.S., S. Dautrebande, J. Feyen, G.R. Démaree, A. Monjoie en A. Dassargues (2002)** *Integrated modelling of the hydrological cycle in relation to global climate change; In: Global Change and Sustainable Development, Scientific Support Plan for a Sustainable Development Policy Final Reports Summaries, Edited by Federal Science Policy Office, Brussels, 181-195.*
- Tanguy, J. (2005)** *Le Changement climatique affectera-t-il nos hydrosystèmes. Le cas des bassins du Rhône et de la Seine; Schapi. Toulouse, France.*
- Tu, M., P.J.M. de Laat, M.J. Hall en M.J.M. de Wit (2005)** *Precipitation variability in the Meuse basin in relation to atmospheric circulation; Water Science and Technology, 51-5, pag 5-14.*
- VenW (2003)** *Integrale Verkenning Maas 2050: Advies en Hoofdrapport. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.*
- VenW (2007)** *Technisch Rapport Ontwerpbelastingen voor het rivierengebied. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.*
- VROM (2006)** *Nationaal Programma Adaptatie Ruimte en Klimaat (ARK). Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer.*
- Wit, M.J.M., de (2004)** *Hoeveel (hoog-)water kan ons land binnen komen via de Maas, nu en in de toekomst?; Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA). Report no. 2004.151x, Arnhem.*
- Wit, M.J.M., de (2004)** *Hoe laag was het laagwater van 2003? H<sub>2</sub>O 3-2004, pag 16-18.*
- Wit, M.J.M., de , B. van den Hurk, P.M.M. Warmerdam, P.J.J.F. Torfs, E. Roulin en W.P.A. van Deursen (2007)** *Impact of climate change on low-flows in the river Meuse; Climatic Change, 82 (3), pag 351-372.*
- WL|delft hydraulics (1994)** *Onderzoek Watersnood Maas. Deelrapport 4: Hydrologische Aspecten; Waterloopkundig Laboratorium, Delft.*