

Deltares-Rapport**2008-U-R0629/A****Effecten van klimaatverandering op de
Waterkwaliteit in de Rijn en Maas**

Dit rapport is mede tot stand gekomen door Delft Cluster Waterkwaliteit en Calamiteiten.

Datum	juni 2008
Auteur(s)	Michelle van Vliet (Deltares) Gertjan Zwolsman (KIWA Water Research) Jan Joziasse (Deltares)
Opdrachtgever	DC Waterkwaliteit en Calamiteiten
Projectnummer	092.79299
Aantal pagina's	30
Goedgekeurd door	Bennie Minnema

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Deltares.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan Deltares, dan wel de betreffende terzake tussen partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het Deltares-rapport aan directe belanghebbenden is toegestaan.

2008 Deltares

Inhoudsopgave

	Lijst van tabellen en figuren	3
1	Inleiding	5
2	Methode vaststellen grenswaarden in afvoer en watertemperatuur in de Rijn en de Maas	7
2.1	Grenswaarden in afvoer en watertemperatuur	7
2.2	KNMI'06 scenario's, toekomstige afvoer en overschrijding waterkwaliteitsnormen	8
3	Resultaten grenswaarden in afvoer en watertemperatuur in de Rijn en de Maas. 13	
3.1	Resultaten kritieke afvoer en onderschrijding	13
3.2	Resultaten kritieke temperatuur en overschrijding	20
4	Discussie en aanbevelingen.....	26
4.1	Afvoer Rijn en Maas.....	26
4.2	Watertemperatuur Rijn en Maas	27
	Conclusies	28
	Literatuur	30

Lijst van tabellen en figuren

Tabellen

Tabel 1	Kritieke afvoer van de Rijn (Lobith) en tijdsduur van overschrijding van de kritieke afvoer voor de periode 2000-2005 en voor 2050 volgens de KNMI'06 scenario's.....	15
Tabel 2	Kritieke afvoer van de Maas (Eijsden en Keizersveer) en tijdsduur van overschrijding van kritieke afvoer voor de periode 2000-2005.....	17
Tabel 3	Kritieke afvoer van de Maas (Eijsden) en tijdsduur van overschrijding van de kritieke afvoer voor de periode 2000-2005 en voor 2050 volgens de KNMI'06 scenario's.....	19
Tabel 4	Kritieke daggemiddelde luchttemperatuur, waarbij overschrijding van de norm voor watertemperatuur 25 °C plaatsvindt en tijdsduur van overschrijding van kritieke daggemiddelde luchttemperatuur voor de periode 2000-2005.....	23
Tabel 5	Kritieke watertemperatuur, waarbij overschrijding van norm voor zuurstof plaatsvindt en tijdsduur van overschrijding van kritieke daggemiddelde luchttemperatuur voor de periode 2000-2005	24

Figuren

Figuur 1	Overzicht van de effecten van van hittegolven, droogten en hoogwaters op de waterkwaliteit in de Rijn en de Maas op basis van studies van Zwolsman, Van Vliet en Van Bokhoven.....	6
Figuur 1.1	Locatie van monitoringsstations Lobith (Rijn) en Eijsden en Keizersveer (Maas) en overzicht van geselecteerde waterkwaliteitsparameters en waarden van BKMO-, MTR-, RIWA-Rijn en RIWA-Maas norm. ^^ = jaargemiddelde; (z) = zomerperiode (april-september).	8
Figuur 2	Overzicht van de vier KNMI'06 scenario's voor Nederland (Van der Hurk, 2006).	9
Figuur 3	Verandering in afvoerregime Rijn (Lobith) eind 20 ^e eeuw versus 2050 voor KNMI'06 scenario's en WB21 scenario's (De Wit et al, 2007).	10
Figuur 4	Verandering in afvoerregime Maas (Borgharen) eind 20 ^e eeuw versus 2050 voor KNMI'06 scenario's en WB21 scenario's (De Wit et al, 2007).	11
Figuur 5	C-Q relaties voor chloride en sulfaat voor de Rijn (Lobith) voor de periode 2000-2005.....	14
Figuur 6	Relatieve tijdsduur overschrijding van de kritieke afvoer (in %) en absolute maximale afvoeroverschrijding (in m ³ /s) per decade voor de Rijn voor het W+ scenario.....	16
Figuur 7	C-Q relaties voor fluoride en ammonium voor de Maas (Eijsden en Keizersveer) voor de periode 2000-2005	17
Figuur 8	Relatieve tijdsduur overschrijding van de kritieke afvoer (in %) en absolute maximale afvoeroverschrijding (in m ³ /s) per decade voor de Maas voor het W+ scenario.....	19
Figuur 9	Relatie tussen water temperatuur bij Eijsden en daggemiddelde luchttemperatuur bij Maastricht en tussen water temperatuur en afvoer bij Eijsden voor de periode 2002-2004 (Van Vliet & Zwolsman, 2008).....	20

Figuur 10	Watertemperatuur-luchttemperatuur relaties voor de Rijn (Lobith-Twente) en voor de Maas (Eijsden-Maastricht en Keizersveer-De Bilt) voor de periode 2000-2005.....	21
Figuur 11	Watertemperatuur-luchttemperatuur relaties voor de Rijn (Lobith-Twente) voor verschillende afvoerclassen voor de periode 2000-2005	22
Figuur 12	Watertemperatuur-luchttemperatuur relaties voor de Maas (Eijsden-Maastricht) voor verschillende afvoerclassen voor de periode 2000-2005	22
Figuur 13	Concentratie-watertemperatuur relaties voor zuurstof in de Rijn (Lobith) en in de Maas (Eijsden en Keizersveer) voor de periode 2000-2005	24
Figuur 14	Dag-nachtcyclus van de watertemperatuur, zuurstofconcentratie en pH in de Maas (Eijsden) tijdens een deel van de hittegolf in 2006 (Zwolsman & Van Vliet, 2006).....	25

1 Inleiding

De waterkwaliteit van rivieren is het meest kritisch tijdens hydrologische extremen en onder hoge watertemperaturen. Uit verkennende studies naar effecten van klimaatverandering op de waterkwaliteit in de Rijn (Zwolsman & Van Bokhoven, 2007) en Maas (Van Vliet & Zwolsman, 2007) is gebleken dat er in het algemeen een verslechtering van de chemische waterkwaliteit wordt waargenomen tijdens perioden van extreem lage en hoge rivierafvoeren en tijdens hittegolven (Zwolsman & Van Vliet, 2007). Met het oog op de toekomst kan uit de resultaten van bovengenoemde studies geconcludeerd worden dat een mogelijke toename in frequentie en intensiteit van droogten, hoogwaters en hittegolven ten gevolge van klimaatverandering kan leiden tot het frequenter optreden van een waterkwaliteitsverslechtering in de Rijn en de Maas. Hierdoor kunnen risico's ontstaan voor de realisatie van de ecologische doelstellingen en gebruiksfuncties van het water (bijv. drinkwaterproductie en recreatie). Een samenvatting van de resultaten van voorgaande studies naar de effecten van hittegolven, droogten en hoogwaters op de waterkwaliteit in de Rijn en de Maas van Zwolsman, Van Vliet en Van Bokhoven is weergegeven in figuur 1.

Het doel van deze studie is het vaststellen van grenswaarden in afvoer en watertemperatuur waarbij kritieke waterkwaliteitscondities (normoverschrijding) optreden. Hoewel tijdens hoogwatersituaties ook verslechtering in waterkwaliteit is waargenomen voor stoffen die zich sterk aan zwevend stof hechten (Van Bokhoven, 2007; Van Vliet & Zwolsman, 2007), ligt de nadruk in deze studie op het bepalen van grenswaarden voor waterkwaliteit van opgeloste stoffen tijdens droogtecondities (lage afvoeren).

Hierbij zijn de volgende kennisvragen gedefinieerd:

- Bij welke afvoer en watertemperatuur kunnen kritieke situaties (d.w.z. normoverschrijding) ontstaan voor de waterkwaliteit in de Rijn (Lobith) en Maas (Eijsden en Keizersveer)?
- Hoe frequent werden deze kritieke afvoeren en temperaturen bereikt in de periode 2000-2005 en hoe frequent zullen deze naar verwachting optreden, uitgaande van de afvoerprojecties voor de Rijn en de Maas voor de KNMI'06 scenario's voor 2050.

Om deze vragen te beantwoorden zijn methoden toegepast om grenswaarden vast te stellen in afvoer en watertemperatuur waarbij normoverschrijdingen voor de waterkwaliteit in de Rijn en de Maas optreden (hoofdstuk 2). Op basis van deze grenswaarden in afvoer en watertemperatuur is vastgesteld hoe frequent er sprake was van een overschrijding van de kritieke afvoer en overschrijding van de kritieke watertemperatuur voor de huidige situatie (in de periode 2000-2005). Daarnaast is voor de afvoer ook berekend hoe vaak deze overschrijding zal plaatsvinden voor de toekomstige situatie (2050) onder een veranderend klimaat. Daarbij is gebruik gemaakt van getransformeerde afvoerreeksen voor de Rijn en de Maas voor de vier KNMI'06 scenario's. De resultaten voor de bepaling van grenswaarden in afvoer en watertemperatuur zullen achtereenvolgens besproken worden (hoofdstuk 3). Daarna zullen de resultaten voor de Rijn en de Maas met elkaar worden vergeleken en worden er aanbevelingen gedaan (hoofdstuk 4). Tenslotte zullen de belangrijkste resultaten uit deze studie kort worden samengevat (hoofdstuk 5).

<p>Hittegolf:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stijging watertemperatuur en sterkere gevoeligheid riviersysteem voor opwarming <ul style="list-style-type: none"> → Mogelijke overschrijding norm 25°C voor drinkwaterproductie en ecologie → Mogelijke beperkingen koelwaterlozingen • Algemene afname zuurstofconcentraties • Verhoogde risico's algenbloei <ul style="list-style-type: none"> → Stijging zuurstofconcentraties en pH overdag; sterke daling 's nachts (door respiratie)
<p>Droogte (extreem laagwater):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verminderde verdunning van puntlozingen <ul style="list-style-type: none"> → Sterke toename in concentratie hoofdelementen en nutriënten • Afname zwevend stof concentraties <ul style="list-style-type: none"> → Afname van totaal concentraties aan zwevend stof gebonden verontreinigingen • Verminderde aanvoer vanuit diffuse bronnen via ondiep grondwater en oppervlakte afstroming <ul style="list-style-type: none"> → Afname in totaal concentraties zware metalen en nitraat
<p>Hoogwater:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Toename zwevend stof concentraties <ul style="list-style-type: none"> → Toename van totaal concentraties aan zwevend stof gebonden verontreinigingen • Verhoogde aanvoer vanuit diffuse bronnen via ondiep grondwater en oppervlakte afstroming <ul style="list-style-type: none"> → Stijging in totaal concentraties zware metalen en nitraat • Toename in verdunning van puntlozingen <ul style="list-style-type: none"> → Sterke afname in concentratie van hoofdelementen en nutriënten

Figuur 1 Overzicht van de effecten van van hittegolven, droogten en hoogwaters op de waterkwaliteit in de Rijn en de Maas op basis van studies van Zwolsman, Van Vliet en Van Bokhoven.

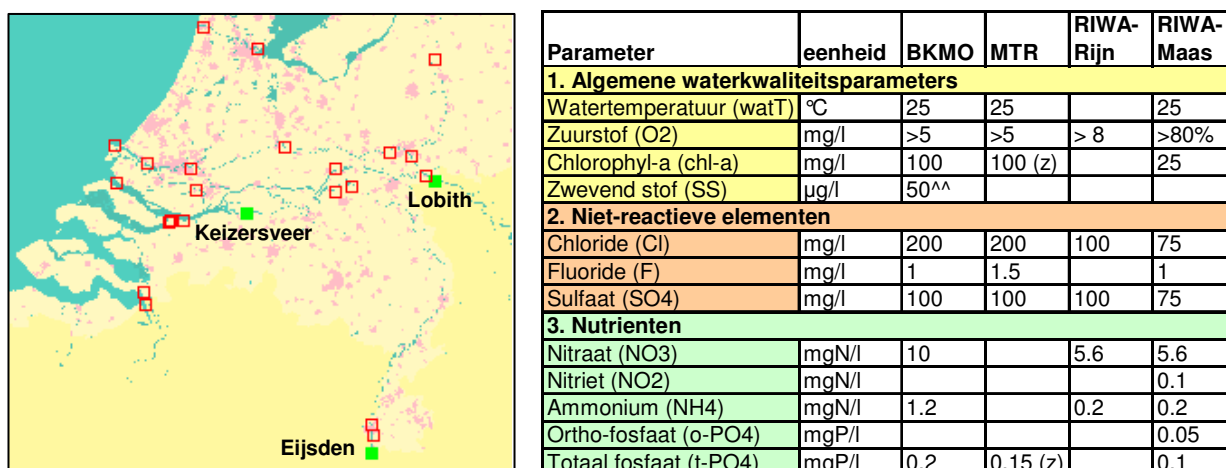
2 Methode vaststellen grenswaarden in afvoer en watertemperatuur in de Rijn en de Maas

2.1 Grenswaarden in afvoer en watertemperatuur

Voor het bepalen van de kritieke afvoer en watertemperatuur waarbij waterkwaliteitsnormen worden overschreden, zijn meetreeksen voor afvoer, watertemperatuur en waterkwaliteit voor de Rijn en de Maas voor de periode 2000-2005 geanalyseerd. De studie heeft zich gericht op de monitoringsstations Eijsden en Keizersveer (voor de Maas) en Lobith (voor de Rijn) (figuur 1). Het grootste deel van de dataset is verkregen van de monitoringsbestanden Waterbase (www.waterbase.nl) en Aqualarm (www.aqualarm.nl) van het RIZA.

Om meer inzicht te verkrijgen in de invloed van veranderingen in afvoer en watertemperatuur op de waterkwaliteit van de Rijn en de Maas zijn voor de waterkwaliteitsparameters, gegeven in figuur 1, empirische relaties afgeleid tussen concentratie en afvoer (C-Q). Bovendien zijn ook relaties tussen concentratie en watertemperatuur (C-watT) vastgesteld voor de parameters die afhankelijk zijn van watertemperatuur. De C-Q en C-watT relaties zijn afgeleid voor de recente periode 2000-2005, omdat deze periode een grote variabiliteit in afvoer en watertemperatuur omvat (gemiddelde afvoercondities, droogte van 2003, hoogwater van 2003, normale temperatuurcondities en hittegolven). Voor de significante relaties met $R^2 > 0.4$ is de afvoer (of watertemperatuur) berekend waarbij er een overschrijding van de norm voor de betreffende waterkwaliteitsparameter plaatsvindt. Op deze manier zijn 'grenswaarden' voor afvoer en watertemperatuur bepaald waarbij een normoverschrijding van de waterkwaliteit optreedt (bij de huidige belasting van de rivieren door lozingen). Voor deze analyses is uitgegaan van de normen van het BKMO (Besluit Kwaliteitsdoelstellingen en Metingen Oppervlaktewater) en het MTR (Maximaal Toelaatbaar Risico). Voor de parameters waarvoor geen officiële normen zijn gegeven in BKMO of MTR, is er gebruik gemaakt van de (niet-wettelijke) gewenste waterkwaliteitsnormen volgens RIWA-Rijn en RIWA-Maas. De normen van de verschillende waterkwaliteitsparameters zijn weergegeven in figuur 1. De normen voor MTR, RIWA-Rijn en RIWA-Maas zijn 90 percentielen. Dit betekent dat ze gedurende maximaal 10 % van de tijd overschreden mogen worden op een bepaald meetpunt. Bij toepassing van de BKMO-normen is maximaal 50 % overschrijding van de normwaarde geoorloofd voor 1 op de 12 metingen. Voor het berekenen van de kritieke afvoer en waterkwaliteit is in deze studie echter alleen de normwaarde in beschouwing genomen.

Aan de hand van de kritieke afvoer en watertemperatuur en de meetreeksen van afvoer en watertemperatuur (op dagbasis) is vervolgens vastgesteld hoe lang (hoeveel % van de tijd) over de gehele periode van 2000-2005 er sprake was een overschrijding van de kritieke afvoer en overschrijding van de watertemperatuur.



Figuur 1.1 Locatie van monitoringsstations Lobith (Rijn) en Eijsden en Keizersveer (Maas) en overzicht van geselecteerde waterkwaliteitsparameters en waarden van BKMO-, MTR-, RIWA-Rijn en RIWA-Maas norm. ^^ = jaargemiddelde; (z) = zomerperiode (april-september).

2.2 KNMI'06 scenario's, toekomstige afvoer en overschrijding waterkwaliteitsnormen

Om de effecten van klimaatverandering op de tijdsduur van overschrijding van waterkwaliteitsnormen vast te stellen, is er gebruik gemaakt van afvoerprojecties voor de Rijn en de Maas voor de KNMI'06 klimaatscenario's. Hieronder volgt kort een uitleg over de KNMI'06 scenario's, de berekende afvoeren voor de Rijn en de Maas en de methode die is toegepast om de tijdsduur van onderschrijding van de kritieke afvoer (en overschrijding van waterkwaliteitsnorm) in de toekomst te bepalen voor deze klimaatscenario's.

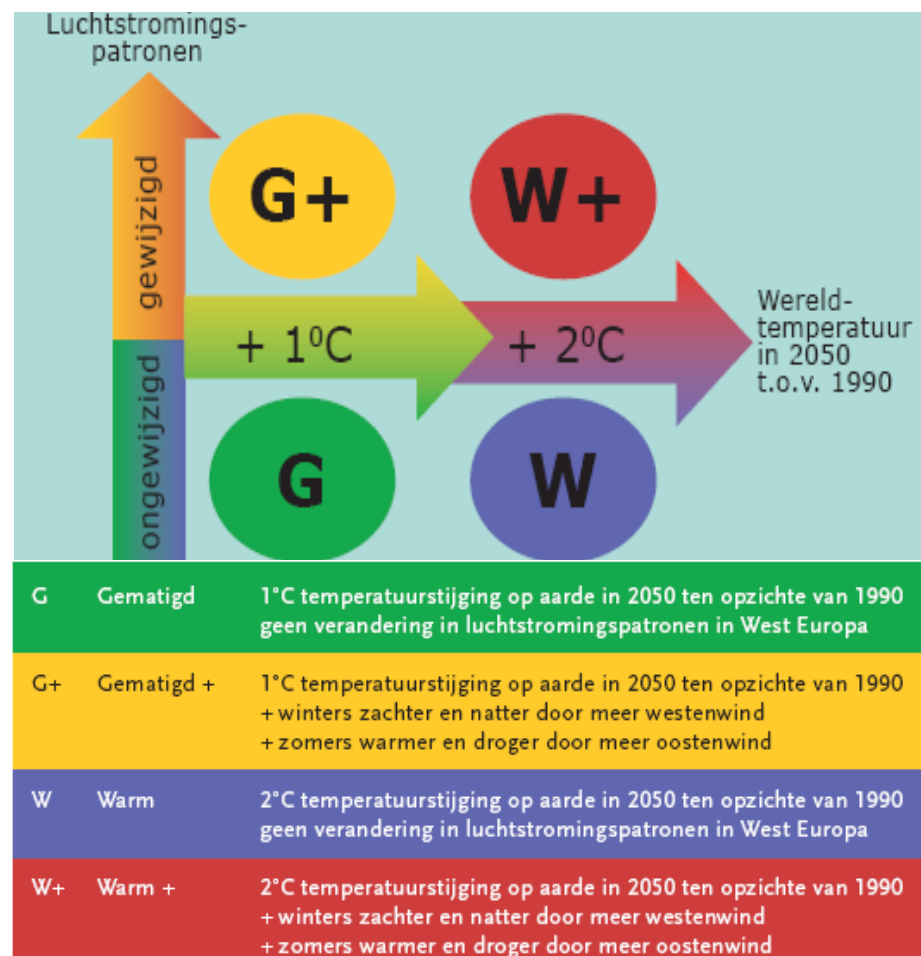
2.2.1 KNMI'06 scenario's

Het KNMI heeft in 2006 vier nieuwe klimaatscenario's gepresenteerd voor Nederland (KNMI'06 scenario's). De scenario's geven een beeld van de veranderingen in temperatuur, neerslag, potentiële verdamping en wind voor 2050 en de zeespiegelstijging voor 2050 en 2100. De KNMI'06 scenario's zijn gebaseerd op een klimatologische periode van 30 jaar, wat betekent dat de scenario's voor 2050 representatief zijn voor het klimaat in de periode rond dat jaar (tussen 2035 en 2065). Als referentie is het basisjaar 1990 gebruikt dat beschreven is aan de hand van gegevens van 1976 tot en met 2005. De KNMI'06 scenario's vervangen de WB21 scenario's die in 2000 zijn opgesteld in het kader van de Commissie Waterbeheer 21^e eeuw (Kors et al, 2000; Können, 2001).

Het KNMI is voor de indeling van de klimaatscenario's uitgegaan van twee aspecten waarvan verwacht wordt dat ze het meest bepalend zullen zijn voor de klimaatverandering in Nederland. Deze zijn:

- 1) de mondiale temperatuurstijging, waarbij wordt uitgegaan van +1 of +2 °C in 2050 t.o.v. 1990, en
- 2) sterke of minder sterke veranderingen in stromingspatronen (circulatie). Onder een sterke verandering in circulatie zal er tijdens de winter meer westenwind zijn, wat resulteert in warmere en vochtigere condities; tijdens de zomer zal er juist meer dominantie van oostenwind zijn, waardoor er dan meer droge en warme situaties voorkomen.

De indeling van de KNMI'06 scenario's, gebaseerd op deze twee aspecten, heeft geresulteerd in vier scenario's die volgens het KNMI allemaal even waarschijnlijk zijn: G, G+, W en W+. De 'gematigde' scenario's (G en G+) zijn gebaseerd op een mondiale temperatuurstijging van +1°C en voor de 'warme' scenario's (W en W+) is deze stijging +2°C. De "+" scenario's (G+ en W+) gaan uit van een verandering in atmosferische circulatie, terwijl er bij G en W wordt aangenomen dat er weinig verandering hierin zal optreden. Een overzicht van de vier KNMI'06 scenario's is gegeven in figuur 2.

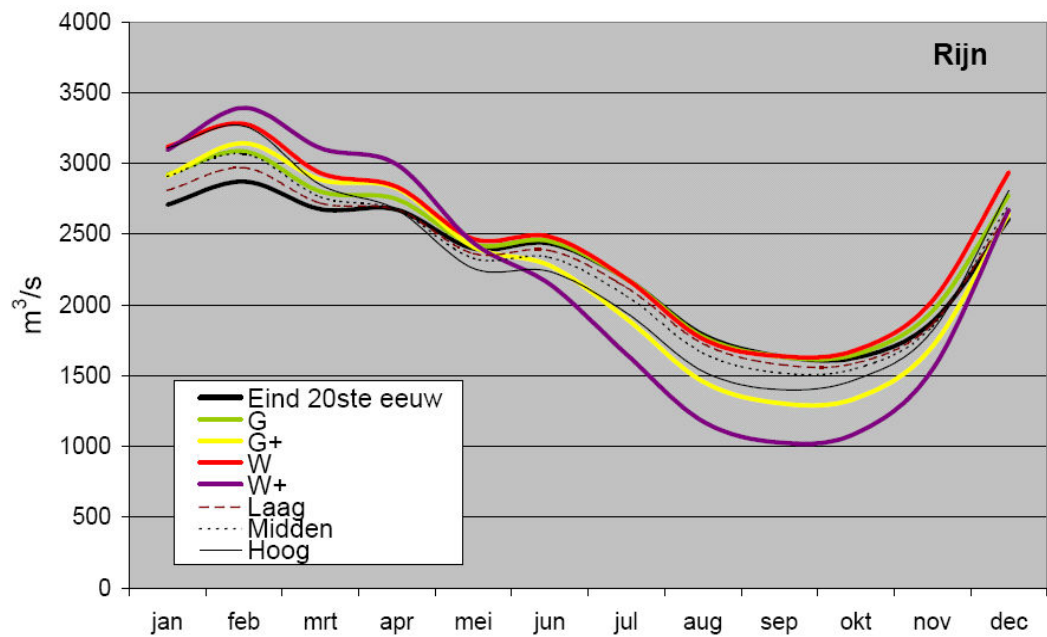


Figuur 2 Overzicht van de vier KNMI'06 scenario's voor Nederland (Van der Hurk, 2006).

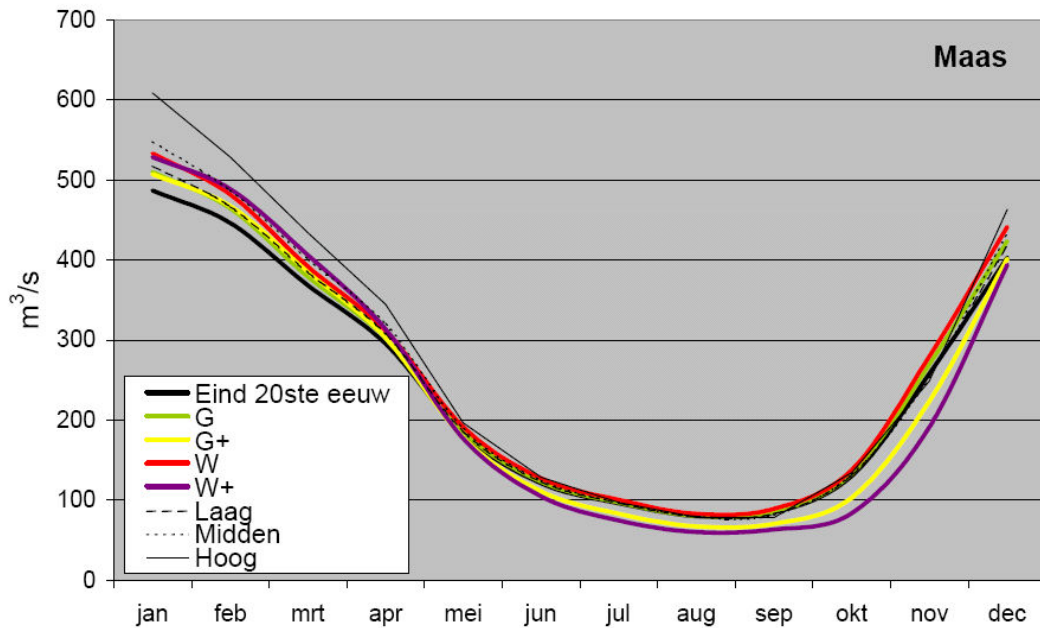
2.2.2 Projecties gemiddelde afvoer Rijn en Maas voor KNMI'06 scenario's

Door De Wit et al. (2007) zijn voor de KNMI'06 scenario's toekomstige afvoeren van de Rijn (bij Lobith) en de Maas (bij Borgharen) berekend voor de periode rond 2050. Deze afvoeren zijn verkregen met behulp een hydrologisch model voor het Rijn- en voor het Maasstroomgebied dat op decadebasis is doorgerekend. Als invoer in deze hydrologische modellen gaan reeksen van decadegemiddelde verandering in temperatuur, neerslag en verdamping.

De resultaten van de gemiddelde afvoer door het jaar heen voor de KNMI'06 scenario's (G, G+, W, W+), eerder gebruikte WB21 scenario's (laag, midden, hoog) en de huidige situatie zijn voor de Rijn en de Maas weergegeven in respectievelijk figuur 3 en figuur 4 (De Wit et al, 2007). Hieruit blijkt dat voor zowel de Rijn als voor de Maas voor alle scenario's een toename van de afvoer tijdens de winter wordt gesimuleerd. Voor de zomerperiode is de verandering van de afvoer minder eenduidig voor de verschillende KNMI'06 scenario's. Voor het G en W scenario wordt een lichte toename van de zomerafvoer geprojecteerd, als gevolg van een toename van de zomergemiddelde neerslag. Echter, voor het G+ en W+ scenario wordt een duidelijke afname van de zomerafvoer gesimuleerd door een sterke toename van de verdamping in combinatie met een afname van de gemiddelde zomerneerslag. Deze afname van de zomerafvoer is het sterkst voor het W+ scenario.



Figuur 3 Verandering in afvoerregime Rijn (Lobith) eind 20^e eeuw versus 2050 voor KNMI'06 scenario's en WB21 scenario's (De Wit et al, 2007).



Figuur 4 Verandering in afvoerregime Maas (Borgharen) eind 20^e eeuw versus 2050 voor KNMI'06 scenario's en WB21 scenario's (De Wit et al, 2007).

2.2.3 *Projecties tijdsduur overschrijding waterkwaliteitsnormen voor KNMI'06 scenario's*
 Om voor de toekomst een indicatie te kunnen geven van de relatieve tijdsduur van overschrijding van de kritieke afvoeren (waarbij waterkwaliteitsnormen worden overschreden), zijn getransformeerde afvoerreksen op decadebasis gemaakt voor 2050, gebaseerd op de KNMI'06 scenario's. Deze getransformeerde afvoerreksen zijn verkregen door decadegemiddelde afvoerreksen voor de Rijn (Lobith) en de Maas (Eijsden) voor 1950-2005 te vermenigvuldigen met de geprojecteerde veranderingen in afvoer (op decade basis) voor 2050 ten opzichte van de huidige situatie (berekend door De Wit et al. (2007)). Op die manier zijn getransformeerde decadegemiddelde afvoerreksen verkregen voor een periode van 55 jaar voor de situatie rond 2050 voor de vier KNMI'06 scenario's. Hierbij is aangenomen dat de veranderingen in afvoer van de Maas bij Eijsden hetzelfde zijn als de berekende veranderingen bij Borgharen (6 km benedenstrooms van Eijsden).

Met behulp van deze getransformeerde reksen voor Lobith en Eijsden is voor de waterkwaliteitsparameters (die een significante relatie met afvoer tonen) berekend gedurende hoeveel % van de tijd er rond 2050 sprake zal zijn van een overschrijding van de kritieke afvoer en daarmee overschrijding van de waterkwaliteitsnorm voor de situatie rond 2050 zal plaatsvinden voor de vier KNMI'06 scenario's. Hierbij is aangenomen dat de antropogene belasting van het systeem in de toekomst vergelijkbaar blijft met de huidige situatie (2000-2005).

Bij het toepassen van getransformeerde afvoeren is het van belang om in het achterhoofd te houden dat de gecreëerde transformatiereksen *gemiddelde* afvoeren op decadebasis zijn. Echter, de grootste verslechtering van waterkwaliteit is juist te verwachten tijdens extreme afvoeren (voor de beschouwde stoffen in deze studie betreft dit extreme laagwaters). Een mogelijke toename in de intensiteit, frequentie en duur van droogtesituaties in het Rijn- en Maasstroomgebied als gevolg van klimaatverandering

wordt in deze methode niet meegenomen. Daarom moet benadrukt worden dat de resultaten voor 2050 gebaseerd zijn op transformaties van gemiddelde afvoeren. Indien het optreden van extreem lage afvoeren ook in de analyse wordt meegenomen kunnen de berekende veranderingen groter zijn.

3 Resultaten grenswaarden in afvoer en watertemperatuur in de Rijn en de Maas

3.1 Resultaten kritieke afvoer en onderschrijding

3.1.1 *Processen*

Voor de onderzochte waterkwaliteitsparameters zijn significante relaties gevonden tussen concentratie en afvoer in de Rijn en de Maas voor zwevend stof, chloride en sulfaat. Daarnaast zijn in de Maas ook significante C-Q relaties afgeleid voor fluoride (Eijden en Keizersveer) en voor ammonium en nitriet (Eijsden).

De C-Q relaties voor chloride, fluoride en sulfaat tonen een duidelijke stijging van de concentraties onder lage afvoercondities. Dit is te verklaren doordat deze stoffen weinig reactief zijn in oppervlaktewater (conservatieve stoffen). Hierdoor wordt de concentratie voornamelijk bepaald door veranderingen in de afvoer (mate van verdunning) en de chemische belasting door puntbronnen. De relatie tussen conservatieve stoffen en afvoer kan beschreven worden aan de hand van de vergelijking van Van der Weijden & Middelburg (1989):

$$C = a / Q + b$$

C = concentratie van niet-reactieve stof in oppervlaktewater (mg/l)

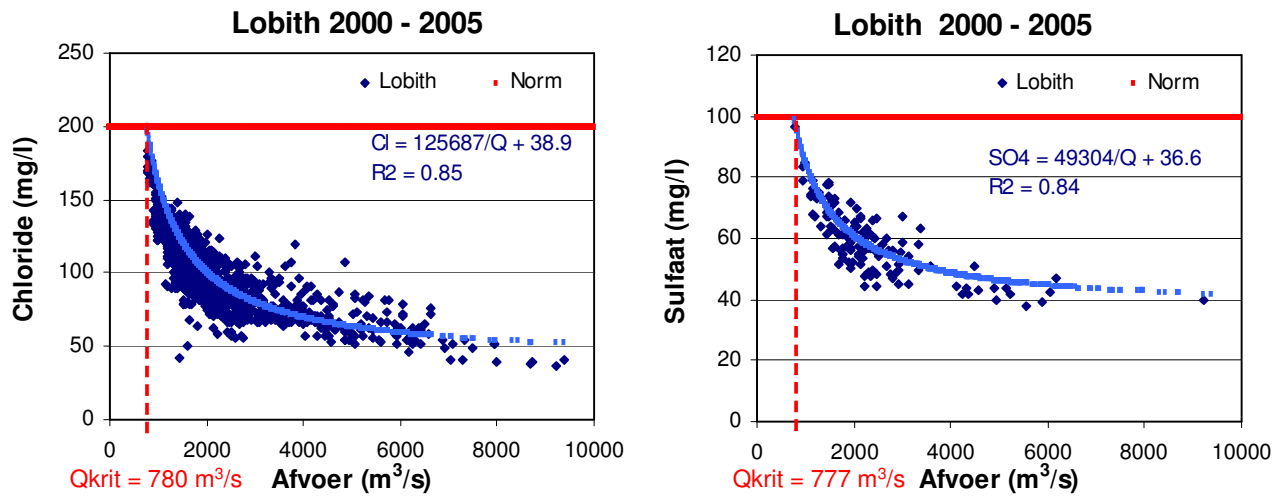
Q = afvoer (m^3/s)

a = input vanuit puntbronnen (g/s)

b = achtergrond concentratie (mg/l)

3.1.2 *Rijn*

De C-Q relaties voor chloride en sulfaat voor de Rijn (Lobith) voor de periode 2000-2005 zijn weergegeven in figuur 5. Hierin is een duidelijke stijging van de concentraties onder lagere afvoercondities te zien als gevolg van verminderde verdunning van de chemische belasting. Op basis van deze relaties en de norm van 200 mg/l voor chloride en 100 mg/l voor sulfaat kan worden afgeleid dat in beide gevallen de grenswaarde in afvoer (Q_{krit}) bij Lobith waarbij een normoverschrijding voor deze stoffen optreedt ongeveer $780 m^3/s$ is. Tijdens de periode 2000-2005 is deze lage afvoer net niet onderschreden (tabel 1). Wel zijn er tijdens de droge zomer- en najaarsperiode van 2003 afvoeren lager dan $800 m^3/s$ gemeten (minimum $784 m^3/s$).



Figuur 5 C-Q relaties voor chloride en sulfaat voor de Rijn (Lobith) voor de periode 2000-2005

Aan de hand van de getransformeerde afvoerreksen op decadebasis voor Lobith (zie paragraaf 2.2.3) en de berekende kritieke afvoer voor chloride (780 m³/s) en sulfaat (777 m³/s), is bepaald hoe frequent (relatieve tijdsduur (%)) de kritieke afvoer in 2050 onderschreden zal worden. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 1.

Uitgaande van het G en W scenario, is een langdurige onderschrijding van de kritieke afvoer niet waarschijnlijk in de toekomst. De procentuele tijdsduur van onderschrijding zal ten opzichte van 1950-2005 zelfs iets afnemen, doordat de zomerafvoer licht toeneemt. Echter, voor het G+ en met name voor het W+scenario is wel een duidelijke toename in tijdsduur van onderschrijding van de kritieke afvoer te verwachten. Dit is te verklaren doordat voor het G+ en W+ scenario een duidelijke afname van de zomerafvoer van de Rijn wordt geprojecteerd, in tegenstelling tot het G en W scenario (figuur 3). De afname van de zomerafvoer is het sterkst voor het W+ scenario en daardoor is de relatieve tijdsduur van de onderschrijding van de kritieke afvoer en van de overschrijding van de norm voor chloride en sulfaat het hoogst voor dit scenario (ruim 6% in 2050 voor beide stoffen).

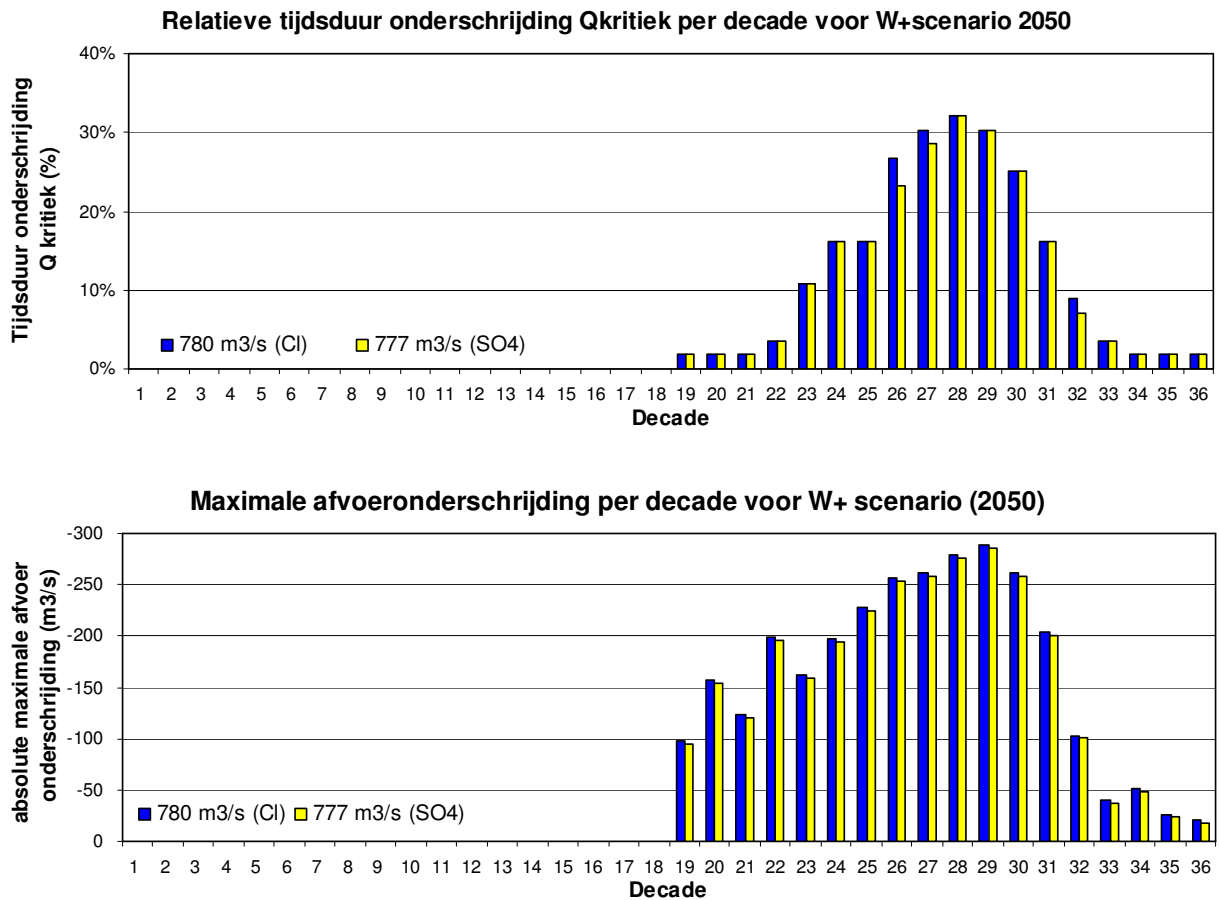
De percentages gegeven in tabel 1 zijn berekend over de hele periode die gebruikt is voor de transformatie van de afvoerreksen. Om meer inzicht te verkrijgen in de onderschrijding van de kritieke afvoer door het jaar heen, is in figuur 6 voor het W+scenario de relatieve tijdsduur van de onderschrijding (in %) en maximale onderschrijding van kritieke afvoer (in m³/s) per decade weergegeven. Hieruit blijkt dat onderschrijdingen vrijwel alleen plaatsvinden in de periode juli-december. Ook is te zien dat de relatieve tijdsduur van de onderschrijding maximaal is voor de periode rond september-oktober (ongeveer 30%; dit betekent dat er bijna éénmaal in de drie jaar sprake zal zijn van een onderschrijding van de gemiddelde afvoer voor de betreffende decaden). Voor deze perioden zijn maximale onderschrijdingen van de kritieke afvoer te verwachten van ongeveer 250 m³/s. Onder zulke extreem lage afvoeren zijn voor chloride en sulfaat (en wellicht ook voor vele andere stoffen die zich in oplossing bevinden) forse normoverschrijdingen te verwachten. Door extrapolatie van de concentratie-afvoer relaties voor chloride en sulfaat bij Lobith (figuur 5) kan een indicatie worden gegeven van de concentratie bij een afvoer van 530 (780-250) m³/s.

Dit is ongeveer 280 mg/l (1,4 x norm) voor chloride en 130 mg/l (1,3 x norm) voor sulfaat.

Tabel 1 Kritieke afvoer van de Rijn (Lobith) en tijdsduur van overschrijding van de kritieke afvoer voor de periode 2000-2005 en voor 2050 volgens de KNMI'06 scenario's

Lobith

parameter	Qkrit (m ³ /s)	tijd (%) Q < Qkrit					
		dagbasis	decade basis				
		2000-2005	1950-2005	G2050	G+2050	W2050	W+2050
Cl > 200 mg/l	780	0,0%	0,35%	0,2%	2,3%	0,10%	6,4%
SO ₄ > 100 mg/l	777	0,0%	0,30%	0,2%	2,2%	0,10%	6,2%



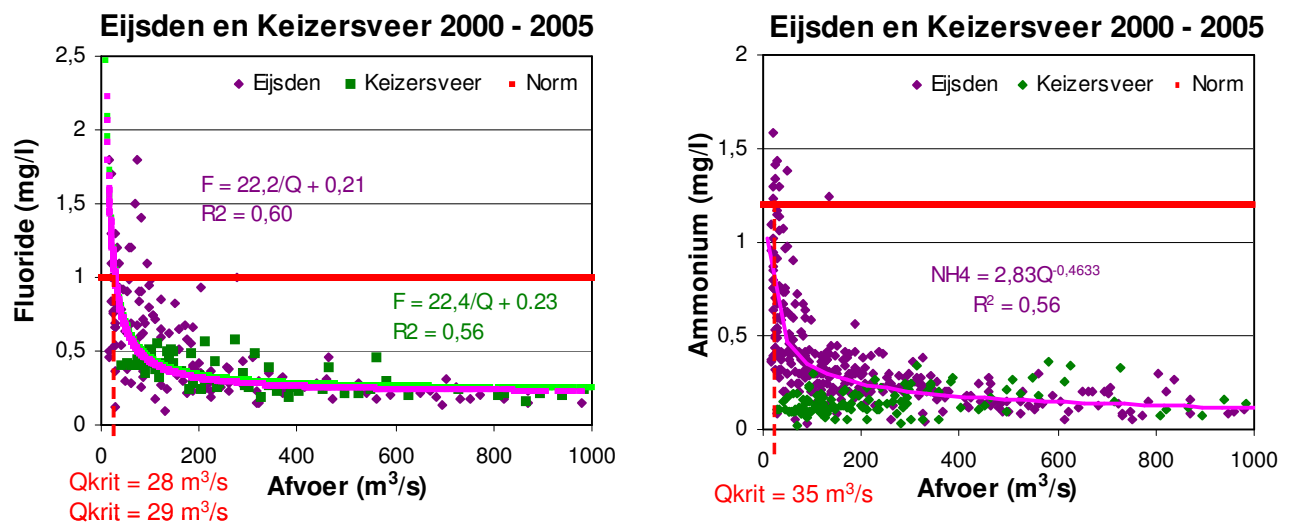
Figuur 6 Relatieve tijdsduur onderschrijding van de kritieke afvoer (in %) en absolute maximale afvoeronderschrijding (in m³/s) per decade voor de Rijn voor het W+ scenario.

3.1.3 Maas

Voor de Maas zijn de C-Q relaties voor fluoride en ammonium bij Eijsden en Keizersveer voor 2000-2005, weergegeven in figuur 7. De relatie voor fluoride is bepaald aan de hand de vergelijking van Van der Weijden & Middelburg (1989). Doordat ammonium, in tegenstelling tot fluoride, geen conservatieve stof is, is de C-Q relatie vastgesteld op basis van de beste fit. Voor Eijsden zijn er sterke stijgingen van de concentratie onder lagere afvoeren waargenomen als gevolg van verminderde verdunning van de input van puntbronnen (RWZI's en industriële lozingen). Dit resulteerde in een overschrijding van de BKMO-norm van 1 mg/l voor fluoride en 1.2 mg/l voor ammonium. De kritieke afvoer bij Eijsden waarbij deze normoverschrijding optreedt, is 28 m³/s voor fluoride en 35 m³/s voor ammonium (tabel 2). De kritieke afvoeren waarbij een overschrijding van de BKMO- en MTR-norm van chloride (200 mg/l) en sulfaat (100 mg/l) optreedt, zijn respectievelijk 10 m³/s en 24 m³/s. De relatieve tijdsduur waarin de kritieke afvoer overschreden werd over de periode 2000-2005 was 12 % voor ammonium, 8 % voor fluoride en 6 % voor sulfaat (tabel 2). Aangezien voor nitriet geen BKMO- en MTR-normen gegeven zijn, is er voor het berekenen van de kritieke afvoer uitgegaan van de RIWA-Maas norm van 0.1 mgN/l. De afvoer bij Eijsden waarbij een normoverschrijding optreedt, is daarmee vastgesteld

op 98 m³/s en de tijdsduur van overschrijding van deze kritieke afvoer was meer dan 36 % over de periode 2000-2005.

Bij Keizersveer zijn, in tegenstelling tot Eijsden, voor fluoride minder sterke concentratiestijgingen en voor ammonium en nitriet zelfs helemaal geen stijgingen waargenomen onder lagere afvoeren (zie figuur 7). Dit is te verklaren door afbraak van ammonium en nitriet door nitrificatie langs het traject van Eijsden naar Keizersveer. De concentratie-afvoer relaties voor ammonium en nitriet waren hierdoor niet significant. Voor chloride, fluoride en sulfaat zijn bij Keizersveer wel significante relaties gevonden en de kritieke afvoeren waarbij normoverschrijding optreedt zijn respectievelijk 18 m³/s, 29 m³/s en 37 m³/s met een relatieve tijdsduur van overschrijding van 1,0%, 1,9% en 2,7 % over de periode 2000-2005 (tabel 2). Doordat er geen concentratiemetingen zijn verricht tijdens extreem lage afvoeren, zijn deze kritieke afvoeren bepaald op basis van extrapolatie (in plaats van interpolatie zoals bij Eijsden). De onzekerheden bij het vaststellen van de kritieke afvoer en de relatieve tijdsduur van overschrijding zijn daarom bij Keizersveer groter dan bij Eijsden.



Figuur 7 C-Q relaties voor fluoride en ammonium voor de Maas (Eijsden en Keizersveer) voor de periode 2000-2005

Tabel 2 Kritieke afvoer van de Maas (Eijsden en Keizersveer) en tijdsduur van overschrijding van kritieke afvoer voor de periode 2000-2005

parameter	Qkrit (m ³ /s)		tijd (%) Q < Qkrit (2000-2005)	
	Eijsden	Keizersveer	Eijsden	Keizersveer
Cl > 200 mg/l	10	18	0,1%	1,0%
F > 1 mg/l	28	29	8,2%	1,9%
SO ₄ > 100 mg/l	24	37	5,9%	2,7%
NH ₄ > 1.2 mg/l	35	-	12%	-
NO ₂ > 0.1 mg/l	98	-	36%	-

Aan de hand van de getransformeerde afvoerreksen op decadebasis en de berekende kritieke afvoer bij Eijsden voor chloride (10 m³/s), fluoride (28 m³/s), sulfaat (24 m³/s), ammonium (35 m³/s) en nitriet (98 m³/s) is de relatieve tijdsduur (%) van overschrijding

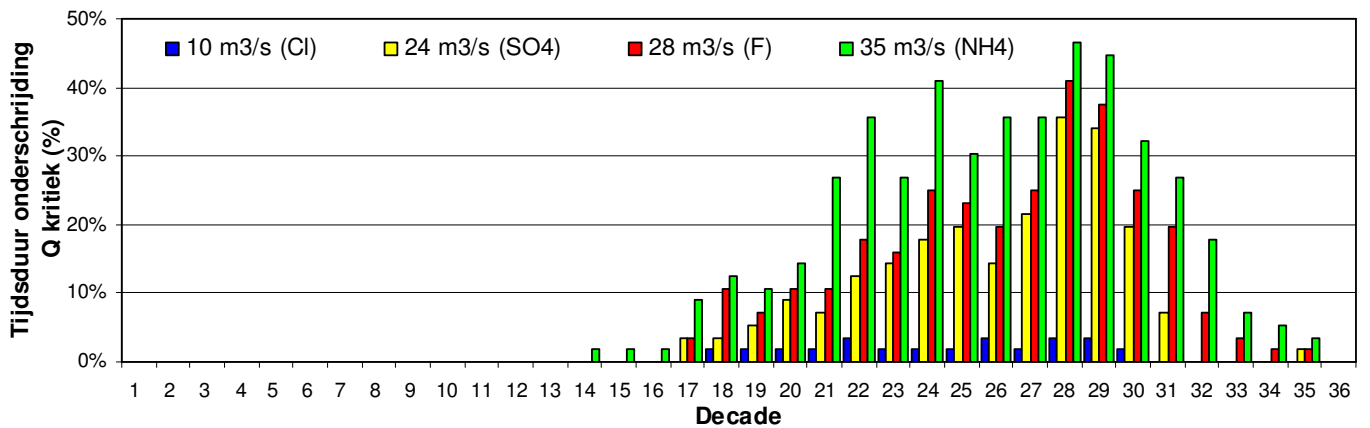
van de kritieke afvoeren voor 2050 berekend, uitgaande van de KNMI'06 scenario's. Hierbij is aangenomen dat de veranderingen in afvoer bij Eijsden overeenkomen met de afvoerveranderingen die berekend zijn door De Wit et al. (2007) bij Borgharen (6 km benedenstrooms van Eijsden). De resultaten (tabel 3) laten zien dat voor alle scenario's een overschrijding van de kritieke afvoeren wordt verwacht. Opvallend is dat voor het G en W scenario de relatieve tijdsduur van overschrijding voor 2050 lager zal zijn dan bij Eijsden is waargenomen op dagbasis voor de periode 2000-2005 en op decade basis voor de hele periode 1950-2005. Dit komt doordat de zomerafvoer van de Maas voor deze scenario's licht zal toenemen ten opzichte van de huidige situatie. Dit blijkt ook uit figuur 4, waarin de berekende afvoer voor 2050 voor de KNMI'06 scenario's en de WB21 scenario's vergeleken worden met de afvoer rond het eind van de 20^e eeuw. Uitgaande van het G+ en W+ scenario is er echter sprake van een lichte toename van de tijdsduur van overschrijding ten opzichte van de periode 1950-2005, doordat er voor deze twee scenario's een afname van de zomerafvoer van de Maas wordt geprojecteerd. De afname van de zomerafvoer van de Maas is (evenals voor de Rijn) het sterkst voor het W+ scenario. Hierdoor is de relatieve tijdsduur van overschrijding van de kritieke afvoer en overschrijding van de waterkwaliteitsnormen het hoogst voor dit scenario (tabel 3).

Naast de percentages over de hele periode gegeven in tabel 3, zijn de relatieve tijdsduur van overschrijding (in %) en maximale overschrijding van de kritieke afvoer (in m^3/s) door het jaar heen per decade voor het W+scenario weergegeven in figuur 8. Hieruit blijkt dat overschrijdingen vrijwel alleen plaatsvinden in de periode juni-december. Net als voor de Rijn kan geconcludeerd worden dat de relatieve tijdsduur van overschrijding voor de periode rond september-oktober maximaal is (varierend van > 50% voor ammonium tot < 5% voor chloride; dit correspondeert met een herhalingsstijd van < 2 jaar, respectievelijk > 20 jaar voor overschrijding van de kritieke afvoer). De maximale overschrijdingen van de kritieke afvoer voor deze perioden bedraagt < 10 m^3/s voor chloride tot >50 m^3/s voor ammonium. Met name voor ammonium kunnen dus forse normoverschrijdingen verwacht worden als de gemiddelde zomerafvoeren van de Maas gaan afnemen. Aan de andere kant mag worden verwacht dat de belasting van de Maas met ammonium sterk zal afnemen in de komende jaren vanwege inspanningen op het gebied van communale waterzuivering in Wallonië.

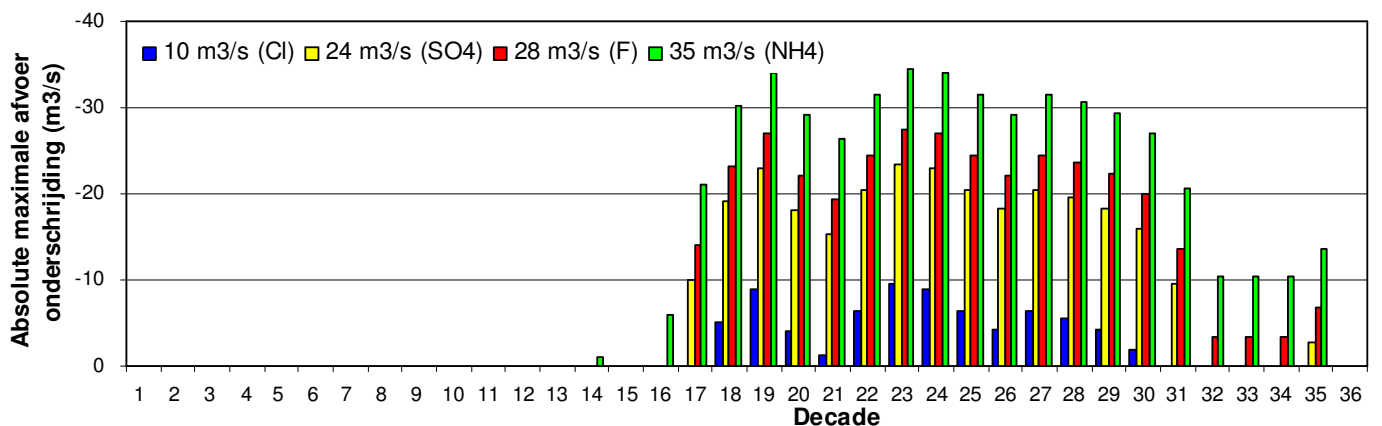
Tabel 3 Kritieke afvoer van de Maas (Eijsden) en tijdsduur van overschrijding van de kritieke afvoer voor de periode 2000-2005 en voor 2050 volgens de KNMI'06 scenario's

Eijsden		tijd (%) Q < Qkrit					
parameter	Qkrit (m3/s)	dagbasis		decade basis			
				G2050	G+2050	W2050	W+2050
		2000-2005	1950-2005				
Cl > 200 mg/l	10	0,1%	0,5%	0,5%	0,7%	0,5%	0,8%
F > 1 mg/l	28	8,0%	4,0%	3,9%	6,3%	3,8%	8,5%
SO4 > 100 mg/l	24	6,0%	3,0%	3,0%	4,3%	2,8%	6,3%
NH4 > 1.2 mg/l	35	12%	6,7%	6,4%	11%	6,2%	13%
NO2 > 0.1 mg/l	98	36%	33%	32%	36%	31%	38%

Relatieve tijdsduur overschrijding Qkritiek per decade voor W+scenario 2050



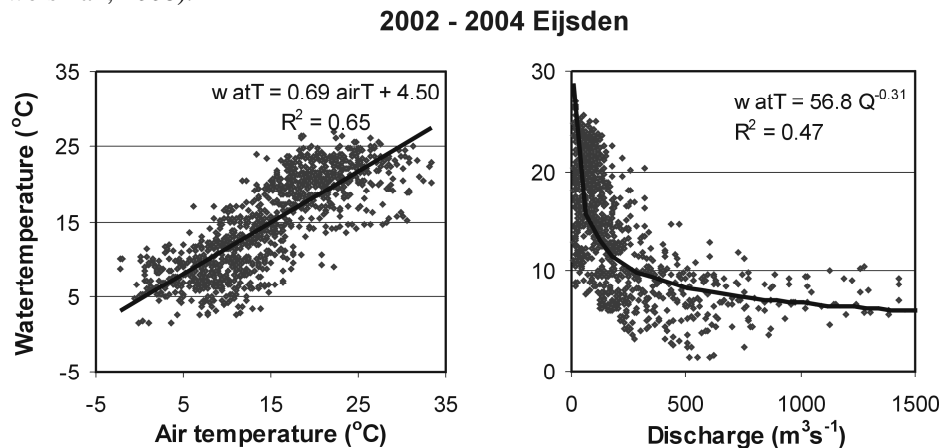
Maximale afvoeroverschrijding per decade voor W+ scenario (2050)



Figuur 8 Relatieve tijdsduur overschrijding van de kritieke afvoer (in %) en absolute maximale afvoeroverschrijding (in m³/s) per decade voor de Maas voor het W+ scenario.

3.2 Resultaten kritieke temperatuur en overschrijding

De watertemperatuur in de Rijn en de Maas is voornamelijk afhankelijk van koelwaterlozingen en de luchttemperatuur. Daarnaast speelt afvoer ook een indirecte rol, doordat de gevoeligheid van het watersysteem voor hogere luchttemperaturen toeneemt bij lagere afvoer. Voor de watertemperatuur van de Maas (Eijsden) is een duidelijke relatie met de luchttemperatuur en de afvoer gevonden (figuur 9; Van Vliet & Zwolsman, 2008).

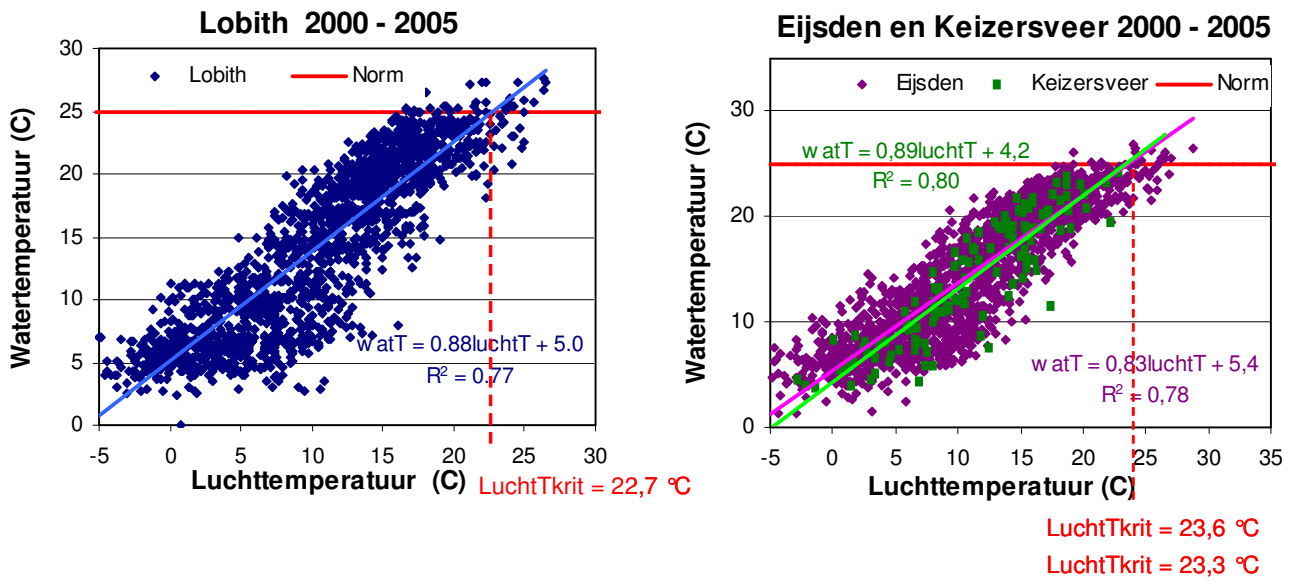


Figuur 9 Relatie tussen water temperatuur bij Eijsden en daggemiddelde luchttemperatuur bij Maastricht en tussen water temperatuur en afvoer bij Eijsden voor de periode 2002-2004 (Van Vliet & Zwolsman, 2008)

3.2.1 Kritieke luchttemperatuur

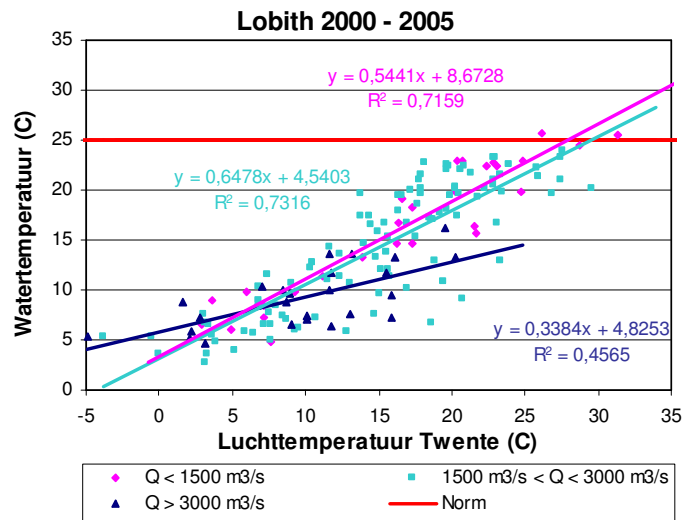
Bij het opstellen van regressievergelijkingen tussen luchttemperatuur en watertemperatuur is binnen deze studie het indirecte effect van de afvoer op de watertemperatuur buiten beschouwing gelaten. Uit de relaties die zijn afgeleid tussen de watertemperatuur bij Lobith, Eijsden en Keizersveer en de luchttemperatuur (gemeten bij de meteorologische stations Twente, Maastricht en De Bilt) blijkt dat de watertemperatuur een sterke relatie vertoont met de luchttemperatuur.

De daggemiddelde luchttemperatuur waarbij een overschrijding van de norm voor de watertemperatuur van 25 °C wordt waargenomen, is 22,7 °C bij Twente (Lobith), 23,6 °C bij Maastricht (Eijsden) en 23,3 °C bij de Bilt (Keizersveer) over de periode 2000-2005. De relatieve tijdsduur van overschrijding van deze kritieke daggemiddelde temperaturen is respectievelijk 1,5 %, 1,6 % en 1,0 % (tabel 4).

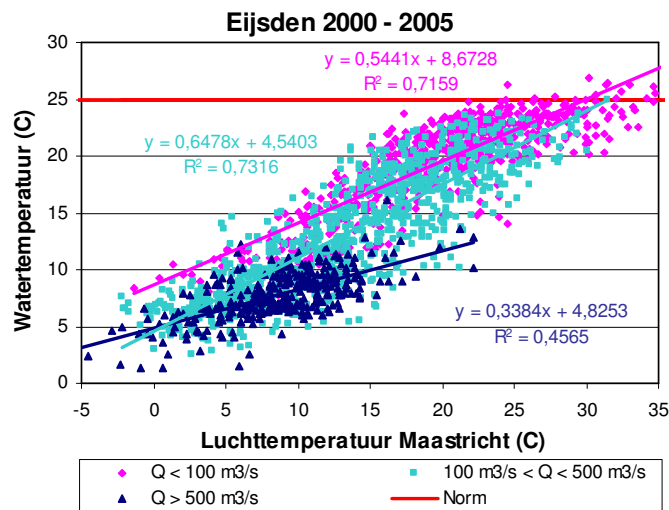


Figuur 10 Watertemperatuur-luchttemperatuur relaties voor de Rijn (Lobith-Twente) en voor de Maas (Eijsden-Maastricht en Keizersveer-De Bilt) voor de periode 2000-2005

Om ook het effect van veranderingen in de afvoer op de watertemperatuur in beschouwing te nemen, zijn voor drie verschillende afvoerclassen de luchtT- watT relaties berekend voor Lobith en voor Eijsden (figuur 11 en figuur 12). Uit de relaties blijkt duidelijk dat de kritieke luchttemperaturen waarbij de norm voor watertemperatuur wordt overschreden lager is voor de lagere afvoerklasse (<100 m³/s voor Maas; <1500 m³/s voor Rijn) dan voor de hogere afvoerklasse (>500 m³/s voor Maas; >3000 m³/s voor Rijn). Hieruit kan geconcludeerd worden dat het risico voor overschrijding van de 25°C-norm hoger wordt onder lagere afvoercondities. Ook is te zien dat de helling van de luchtT- watT relaties het steilst is voor de lage afvoerklasse, wat duidt op een hogere gevoeligheid van het watersysteem voor opwarming onder lagere afvoeren (in lijn met de verwachting).



Figuur 11 Watertemperatuur-luchttemperatuur relaties voor de Rijn (Lobith-Twente) voor verschillende afvoerclassen voor de periode 2000-2005



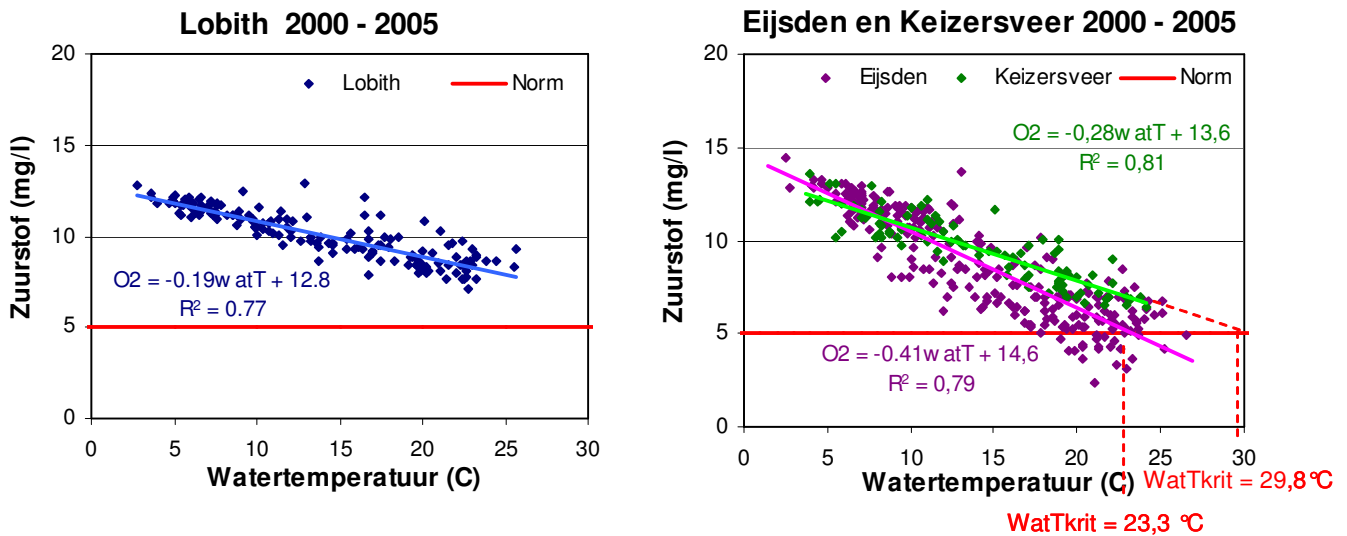
Figuur 12 Watertemperatuur-luchttemperatuur relaties voor de Maas (Eijsden-Maastricht) voor verschillende afvoerclassen voor de periode 2000-2005

Tabel 4 Kritieke daggemiddelde luchttemperatuur, waarbij overschrijding van de norm voor watertemperatuur 25°C plaatsvindt en tijdsduur van overschrijding van kritieke daggemiddelde luchttemperatuur voor de periode 2000-2005

parameter	gemid luchtTkrit (°C)			tijd (%) luchtT > luchtTkrit		
	Twente (Lobith)	Maastricht (Eijsden)	De Bilt (Keizersveer)	Twente (Lobith)	Maastricht (Eijsden)	De Bilt (Keizersveer)
watT > 25°C	22.7	23.6	23.3	1.5%	1.6%	1.0%

3.2.2 Kritieke watertemperatuur

Waterkwaliteitsparameters waarvan de concentratie afhankelijk is van de watertemperatuur zijn zuurstof, chlorophyl-a, en nutriënten (ammonium, nitraat, nitriet en ortho-fosfaat). Hoewel er duidelijke relaties tussen de concentratie van bovengenoemde parameters met watertemperatuur zijn gevonden (met name bij Eijsden), toont alleen zuurstof significante C-watT relaties (met $R^2 > 0.4$) voor alle drie de monitoringsstations (figuur 13). Deze relaties laten een duidelijke lineaire afname van de zuurstof bij hogere watertemperatuur zien, wat duidt op een verslechtering van de waterkwaliteit. Opvallend bij vergelijking van de relaties voor de Rijn (Lobith) en Maas (Eijsden en Keizersveer) is dat de afname van de zuurstofconcentratie bij hogere watertemperatuur duidelijk sterker is in de Maas (met name bij Eijsden) dan in de Rijn (figuur 13). Daarbij zijn voor de Rijn geen overschrijdingen van de 5 mg/l grens waargenomen, terwijl voor de Maas bij Eijsden sprake is van een duidelijke overschrijding tijdens de periode 2000-2005. Dit is te verklaren doordat de Maas, in vergelijking tot de Rijn, veel sterker belast is met organische stoffen (minder verdunning door lagere afvoer). Hierdoor is de afname van de zuurstofconcentratie in de Maas, naast een lagere zuurstofoplosbaarheid, ook het gevolg van een toename in afbraak van organische stoffen bij hogere watertemperaturen. In de Rijn speelt afbraak van organische stoffen een minder dominante rol en daarom is de afname van de zuurstofoplosbaarheid bij hogere watertemperatuur de voornaamste verklaring voor de afname van de zuurstofconcentratie. Bij Keizersveer is een minder sterke afname in zuurstofconcentratie bij hoge watertemperaturen waargenomen dan bij Eijsden, als gevolg van een lagere belasting van het Maaswater met organische stoffen. Deze lagere belasting is te verklaren door de toename van de verdunning (hogere afvoer, o.a. door de bijdrage van zijrivieren) en door afbraak, biotische opname of binding van organische stoffen langs het traject van Eijsden naar Keizersveer (van 250 km).



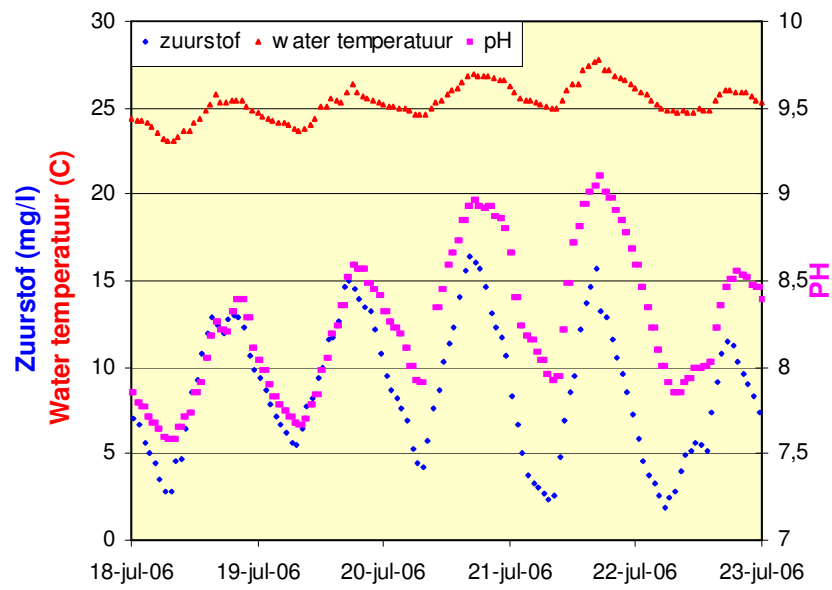
Figuur 13 Concentratie-watertemperatuur relaties voor zuurstof in de Rijn (Lobith) en in de Maas (Eijsden en Keizersveer) voor de periode 2000-2005

Door deze verschillen in belasting met organische stoffen is de berekende kritieke watertemperatuur, waarbij de norm van 5 mg/l zuurstof overschreden wordt, bij Eijsden een stuk lager dan bij Keizersveer (23,3 vs. 29,8 °C; figuur 13). In de Rijn bij Lobith is berekend dat een overschrijding van de zuurstofnorm pas plaatsvindt bij een gemiddelde watertemperatuur van bijna 40°C (die wellicht nooit zal optreden). Wel moet hierbij vermeld worden dat de kritieke watertemperatuurwaarden bij Lobith en Keizersveer bepaald zijn door extrapolatie, wat grotere onzekerheden met zich meebrengt dan interpolatie. Een andere kritische kanttekening is dat de relaties zijn opgesteld op basis van zuurstofmetingen die overdag zijn uitgevoerd, terwijl het risico op overschrijding van zuurstof tijdens perioden met hoge watertemperatuur juist 's nachts het sterkst is door opname van zuurstof door algen (respiratie). Dit is ook gebleken uit analyse van zuurstofconcentraties op halfuur-basis bij Eijsden en Lobith tijdens de hittegolf van 2006 (figuur 14; Zwolsman & Van Vliet, 2007). Daarom is het risico op overschrijding van de zuurstofnorm van 5 mg/l zeer waarschijnlijk hoger dan is vastgesteld aan de hand van de regressievergelijkingen in figuur 13.

De relatieve tijdsduur van overschrijding van de kritieke watertemperatuur bij Eijsden over de periode 2000-2005 is 5% (bij Lobith en Keizersveer is geen overschrijding gevonden) (figuur 13). Ook hierbij moet benadrukt worden dat het percentage van tijdsduur overschrijding, als gevolg van het ontbreken van zuurstofmetingen tijdens de nacht, waarschijnlijk hoger is dan berekend.

Tabel 5 Kritieke watertemperatuur, waarbij overschrijding van norm voor zuurstof plaatsvindt en tijdsduur van overschrijding van kritieke daggemiddelde luchttemperatuur voor de periode 2000-2005

parameter	watTkrit (°C)			tijd (%) watT > watTkrit		
	Lobith	Eijsden	Keizersveer	Lobith	Eijsden	Keizersveer
O2 < 5 mg/l	39,8	23,3	29,8	0,0%	4,7%	0,0%



Figuur 14 Dag-nachtcyclus van de watertemperatuur, zuurstofconcentratie en pH in de Maas (Eijsden) tijdens een deel van de hittegolf in 2006 (Zwolsman & Van Vliet, 2006)

4 Discussie en aanbevelingen

4.1 Afvoer Rijn en Maas

Bij het vergelijken van de concentratie-afvoer relaties en tijdsduur van overschrijding van kritieke afvoer, valt op dat er in de Maas bij Eijsden voor de periode 2000-2005 waterkwaliteitsnormen overschreden werden en overschrijdingen van de kritieke afvoer plaatsvonden, terwijl in de Rijn bij Lobith geen normoverschrijdingen zijn waargenomen voor de onderzochte stoffen (de afvoer bleef hoger dan de kritieke afvoer over de hele periode 2000-2005). Dit verschil is enerzijds te verklaren doordat de Maas sterker belast is met verontreinigingen dan de Rijn. Anderzijds speelt het verschil in afvoerregime van beide rivieren ook een belangrijke rol. Doordat de Maas een regenrivier is, heeft deze een grillige afvoerdynamiek en relatief lage afvoeren tijdens de zomerperiode. Daarentegen wordt de Rijn gevoed door zowel regen- als smeltwater en heeft daardoor relatief hoge afvoeren tijdens de zomerperiode.

Het feit dat de waterkwaliteitsnormen in de Rijn onder lage afvoercondities voor de onderzochte parameters niet overschreden werden tijdens de periode 2000-2005, betekend echter niet dat alleen de Maas aandacht verdient. Als de Rijn zich in de toekomst steeds meer als regenrivier zal gedragen en de zomerafvoer gaat dalen, dan zal er sterk rekening moeten worden gehouden met een overschrijding van de kritieke afvoer en dus overschrijding van de waterkwaliteitsnorm voor chloride. Voor het W+ scenario (dat de sterkste afname in zomerafvoer projecteert) is de berekende tijdsduur van overschrijding van de kritieke afvoer voor chloride en sulfaat in de Rijn bij Lobith zelfs hoger dan in de Maas bij Eijsden.

Als zomerafvoeren van de Rijn en de Maas in de toekomst verder gaan dalen (zoals geprojecteerd volgens het G+ en W+ scenario), dan zullen overschrijdingen van waterkwaliteitsnormen frequenter voorkomen dan voor de huidige situatie (2000-2005) is vastgesteld. Dit betekent dat de antropogene belasting verminderd zal moeten worden, om ook tijdens perioden van lagere zomerafvoer aan de chemische en ecologische kwaliteitsdoelstellingen te kunnen voldoen. Het is daarom van groot belang om bij de implementie van de KRW rekening te houden met de mogelijke afname in zomerafvoer voor de Rijn en de Maas als gevolg van klimaatverandering en de daarmee gepaard gaande effecten op de waterkwaliteit.

In de delen van het watersysteem waar RWZI's effluenten onder laag water situaties een substantieel groot aandeel hebben, is het aan te bevelen om extra monitoringscampagnes te laten uitvoeren tijdens extreme laagwaters om RWZI-afkomstige stoffen (o.a. ook medicijnen en hormoonverstorende stoffen) te in op dagelijkse basis te monitoren.

In de delen van het watersysteem waar RWZI effluenten onder laagwater situaties een substantieel groot aandeel leveren aan de totale riverafvoer, zijn extra monitoringscampagnes tijdens extreme laagwaters aan te bevelen. Hierdoor kan beter inzicht worden verkregen in de effecten van RWZI-afkomstige stoffen (o.a. ook medicijnen en hormoonverstorende stoffen) tijdens laagwatersituaties. Met name in de Maas en substroomgebieden daarvan (bijv. Dommel) is een groot aandeel van RWZI effluenten aan de totale afvoer tijdens laagwatersituaties te verwachten.

4.2 Watertemperatuur Rijn en Maas

Zoals gebleken is uit de resultaten voor grenswaarden in watertemperatuur (paragraaf 3.2), zijn er als gevolg van variatie in organische belasting grote verschillen gevonden in de kritieke watertemperatuur voor zuurstof en de overschrijdingstijd tussen de Rijn en de Maas (en tussen de monitoringsstations Eijsden en Keizersveer onderling). Een overschrijding van de kritieke watertemperatuur waarbij een tekort aan zuurstof (< 5mg/l) ontstaat, is alleen bij Eijsden waargenomen over de periode 2000-2005. Echter, door het ontbreken van zuurstofgegevens tijdens de nacht, kan niet worden uitgesloten dat er bij Keizersveer eveneens zuurstoftekorten hebben plaatsgevonden.

Met betrekking tot de norm voor de watertemperatuur van 25°C zijn bij alle drie de monitoringstations overschrijdingen waargenomen. Hoewel de overschrijdingstijd gemiddeld over de gehele periode betrekkelijk laag was (1,0-1,6 %), moeten de effecten van temperatuursverhoging van het rivierwater niet onderschat worden. Uit een analyse van de watertemperatuur en de waterkwaliteit in de Rijn (Lobith) en Maas (Eijsden) op halfuur-basis tijdens de hittegolf van 2006 is gebleken dat de 25 °C-norm bij Lobith bijna de gehele maand juli overschreden werd. Bovendien lag de gemiddelde watertemperatuur bijna een week lang tussen de 27°C en 28°C en werden maximumwaarden van 28,0 °C bereikt. Ook voor de Maas (Eijsden) werden landurige overschrijdingen van de 25 °C norm waargenomen, met een maximumwaarde van 27,9 °C (Zwolsman & Van Vliet, 2007).

Gegeven de verwachte stijging in temperatuur (volgens de KNMI scenario's) en de mogelijke toename van de frequentie van hittegolven, zullen we in de toekomst rekening moeten houden met een stijging van de watertemperatuur in de Rijn en de Maas. Om te voorkomen dat de norm van 25 °C in de toekomst langdurig overschreden zal worden, is het van zeer groot belang dat met bij het verlenen van vergunningen voor het lozen van koelwater rekening wordt gehouden met een temperatuurstijging van het rivierwater ten gevolge van een veranderend klimaat.

Conclusies

Onderstaande conclusies gelden (met uitzondering van die onder de vierde bullet) bij een ongewijzigde antropogene belasting.

- De grenswaarde voor de afvoer (kritieke afvoer) van de Rijn bij Lobith waarbij waterkwaliteitsnormen overschreden worden is $780 \text{ m}^3/\text{s}$ voor chloride en sulfaat. Tijdens de periode 2000-2005 vonden geen overschrijdingen van de kritieke afvoer plaats. Dit is in de toekomst wel te verwachten als de zomerafvoer gaat dalen (G+ en W+ KNMI'06 scenario). De berekende tijdsduur van overschrijding van de kritieke afvoer is ruim 6% voor 2050 (chloride en sulfaat), uitgaande van afvoerprojecties van de Rijn voor het W+ scenario.
- De kritieke afvoeren van de Maas bij Eijsden zijn: $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (chloride), $28 \text{ m}^3/\text{s}$ (fluoride), $24 \text{ m}^3/\text{s}$ (sulfaat), $35 \text{ m}^3/\text{s}$ (ammonium) en $98 \text{ m}^3/\text{s}$ (nitriet). De berekende tijdsduren waarbij een overschrijding van de kritieke afvoer plaatsvindt over de periode 2000-2005 zijn: 0,1% (chloride), 8,0% (fluoride), 6,0% (sulfaat), 12% (ammonium) en 36% (nitriet).
- Voor de Maas bij Keizersveer zijn de berekende kritieke afvoeren: $18 \text{ m}^3/\text{s}$ (chloride), $29 \text{ m}^3/\text{s}$ (fluoride) en $37 \text{ m}^3/\text{s}$ (sulfaat), met tijdsduren van overschrijding van respectievelijk 1,0% 1,9% en 2,7% voor de periode 2000-2005. Uitgaande van de G+ en W+ KNMI'06 scenario's zal de periode van overschrijding van de kritieke afvoer hoger worden. Uitgaande van het W+ scenario, is de berekende tijdsduur van overschrijding van de kritieke afvoer 6-13% (fluoride, sulfaat en ammonium) en 1% (chloride) voor 2050.
- Overschrijding van waterkwaliteitsnormen en overschrijding van de kritieke afvoer voor de waterkwaliteit is voor de huidige situatie een groter aandachtspunt voor de Maas dan voor Rijn. Dit is te verklaren doordat de Maas sterker belast is met verontreinigingen dan de Rijn en doordat de Maas een zeer lage zomerafvoer heeft in vergelijking tot Rijn (regen vs. regen-smeltwater rivier), wat leidt tot een minder sterke verdunning van de chemische belasting. Echter, als de zomerafvoer van de Rijn in de toekomst gaat dalen (meer op een regenrivier gaat lijken), dan zal er - net als voor de Maas - rekening moeten worden gehouden met een overschrijding van de kritieke afvoer en dus overschrijding van de waterkwaliteitsnormen. Dit betekent dat de antropogene belasting verder verminderd zal moeten worden, om ook tijdens perioden van lagere zomerafvoer aan de chemische en ecologische kwaliteitsdoelstellingen (o.a. KRW) te kunnen voldoen.
- De daggemiddelde luchttemperatuur waarbij een overschrijding van de norm voor de watertemperatuur van $25 \text{ }^\circ\text{C}$ optreedt, is $22,7 \text{ }^\circ\text{C}$ bij Twente (Lobith), $23,6 \text{ }^\circ\text{C}$ bij Maastricht (Eijsden) en $23,3 \text{ }^\circ\text{C}$ bij de Bilt (Keizersveer). De relatieve tijdsduur van overschrijding van deze kritieke daggemiddelde temperaturen is respectievelijk 1,5%, 1,6% en 1,0% voor de periode 2000-2005.
- De grenswaarden in watertemperatuur voor de norm van 5 mg/l zuurstof zijn $23,3^\circ\text{C}$ voor Eijsden, $29,8 \text{ }^\circ\text{C}$ voor Keizersveer en bijna 40°C voor Lobith. Deze grote verschillen zijn te verklaren doordat de Maas, in vergelijking tot de Rijn, veel sterker belast is met organische stoffen (minder verdunning door lagere afvoer). Hierdoor is de afname in zuurstof in de Maas, mede het gevolg van een toename in afbraak van organische stoffen onder hogere watertemperaturen, naast een lagere zuurstofoplosbaarheid bij deze temperaturen. De relatieve tijdsduur van overschrijding van de kritieke watertemperatuur bij Eijsden over de periode 2000-

2005 is 5% (bij Lobith en Keizersveer is geen overschijding waargenomen). Hierbij moet benadrukt worden dat het percentage van de tijd waarbij overschijding plaats vindt in werkelijkheid waarschijnlijk hoger is dan berekend, omdat nog geen rekening is gehouden met de verlaging van zuurstofconcentraties ten gevolge van respiratie door algen in de nacht.

Literatuur

De Wit, M., H. Buitenveld en W. van Deursen (2007) Klimaatverandering en de afvoer van de Rijn en de Maas, RIZA memo: WRR/2007-006-juni 2007.

Können, GJ (2001): Climate Scenarios For Impact Studies In The Netherlands; see www.knmi.nl/onderzk/klimscen/scenarios/Scenarios2001_Web.htm

Kors, A.G., F.A.M. Claessen, J.W. Wesseling and G.P. Können (2000). Scenario's externe krachten voor WB21; WLIDelft Hydraulics; Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI); Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RWS, RIZA) (in Dutch).

Van den Hurk, B., Klein Tank, A., Lenderink, G., van Oldenborgh, G., Katsman, C., van den Brink, H., Keller, F., Bessembinder, J., Burgers, G., Komen, G., Hazeleger, W., Drijfhout, S. en van Ulden, A (2006) Klimaat in de 21e eeuw vier scenario's voor Nederland, Brochure KNMI'06 scenario's.

Van der Weijden, C.H. en J.J. Middelburg (1989) Hydrogeochemistry of the river Rhine – long-term and seasonal variability, elemental budgets, base levels and pollution. *Water Research* 23, p. 1247-1266.

Van Bokhoven, A., en G. Zwolsman (2007) Klimaatverandering en waterkwaliteit. *H₂O* nr. 9, pag. 34-37.

Van Vliet, M. en G. Zwolsman (2007) Klimaatverandering en de waterkwaliteit van de Maas *H₂O* nr. 9, pag. 29-33.

Van Vliet, M.T.H. en J.J.G. Zwolsman (2008) Impact of Summer Droughts on the Water Quality of the Meuse River. *Journal of Hydrology* 353, 1– 17, doi:10.1016/j.jhydrol.2008.01.001.

Zwolsman, G. en M. van Vliet (2007) Effect van een hittegolf op de waterkwaliteit van de Rijn en de Maas, *H₂O* nr. 22, p. 41-44.

Zwolsman, J.J.G. en A.J. Van Bokhoven (2007) Impact of summer drought on water quality of the Rhine River – a preview of climate change? *Water Science & Technology* 56, p. 45-55