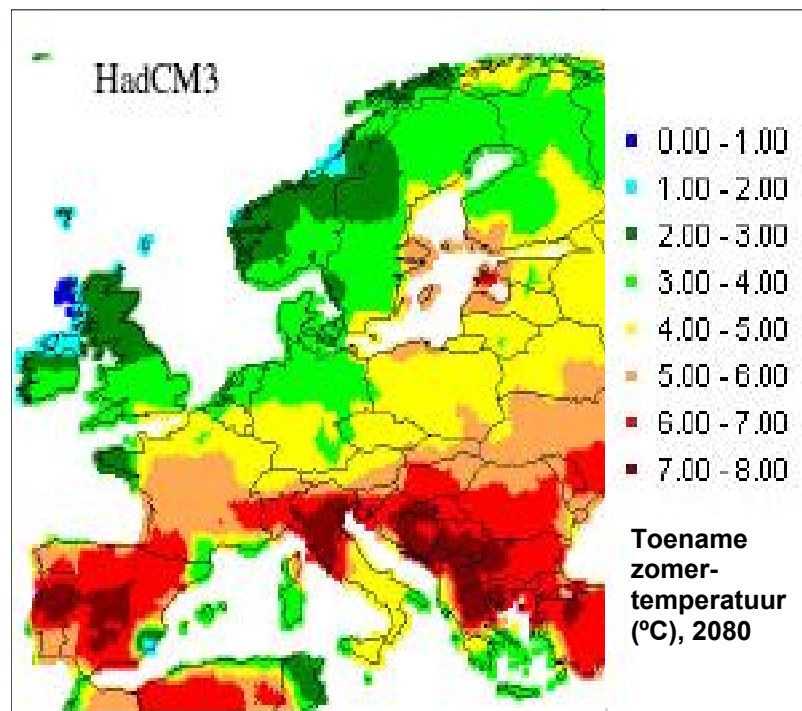


Risicoanalyse van de gevolgen van klimaatverandering voor de drinkwatersector

Waterkwaliteit, waterkwantiteit,
ecologie, productie en distributie



BTO 2007.032

17 Juli 2007

Risicoanalyse van de gevolgen van klimaatverandering voor de drinkwatersector

Waterkwaliteit, waterkwantiteit, ecologie,
productie en distributie

© 2007 Kiwa Water
Research
Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag
worden verveelvoudigd,
opgeslagen in een
geautomatiseerd
gegevensbestand, of
openbaar gemaakt, in enige
vorm of op enige wijze,
hetzij elektronisch,
mechanisch, door
fotokopieën, opnamen, of
enig andere manier, zonder
voorafgaande schriftelijke
toestemming van de
uitgever.

Kiwa Water Research

Groningenhaven 7

Postbus 1072

3430 BB Nieuwegein

Tel. 030 606 95 11

Fax 030 606 11 65

www.kiwawaterresearch.eu

Colofon

Titel

Risicoanalyse van de gevolgen van
klimaatverandering voor de drinkwatersector

Projectnummer

11.1583.300

Projectmanager

A.B. Ramaker

Kwaliteitsborger(s)

H. van Oene

Auteur(s)

G. Zwolsman	<i>projectleider</i>
G. Cirkel	<i>hoofdstuk 2, 3, 4</i>
A. Doomen	<i>redactie en hoofdstuk 1, 2, 5</i>
M. Jalink	<i>hoofdstuk 4</i>
G. van den Berg	<i>hoofdstuk 6</i>
C. Maas	<i>hoofdstuk 6</i>
J. Vreeburg	<i>hoofdstuk 7</i>
G. Ijpelaar	<i>hoofdstuk 7</i>
G. Mesman	<i>hoofdstuk 7</i>

Dit rapport is verspreid onder BTO-participanten en is openbaar

Voorwoord

Voorliggend rapport is het resultaat van een inventariserend onderzoek naar de mogelijke gevolgen die klimaatverandering kan hebben voor de verschillende facetten van drinkwaterproductie. Het is een inventariserende studie en daardoor beslaat dit rapport een groot aantal verschillende onderwerpen: van verandering van de watervraag tot gevolgen voor de distributie. De hoofdstukken zijn onderverdeeld naar onderdeel in de waterketen: de watervraag (hoofdstuk 3), de bronnen grondwater (hoofdstuk 4) en oppervlaktewater (hoofdstuk 5), het specifieke probleem rond verzilting van grond- en oppervlaktewater (hoofdstuk 6) en drinkwaterproductie en -distributie (hoofdstuk 7). De verschillende hoofdstukken zijn ook afzonderlijk goed leesbaar.

Inhoud

	Voorwoord	1
	Inhoud	3
1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding van dit onderzoek	7
1.2	Klimaatverandering	8
2	Klimaatscenario's	9
2.1	Mondiale klimaatverandering	9
2.1.1	Temperatuur	9
2.1.2	Neerslag	10
2.1.3	Zeespiegelstijging	10
2.2	Het Nederlandse klimaat	10
2.3	KNMI Klimaatscenario's	11
3	Prognose inschatting watervraag	13
3.1	Inleiding	13
3.2	Statistische analyse van het drinkwaterverbruik	14
3.2.1	Landelijk voorzieningsgebied Budel	14
3.2.2	Stedelijk voorzieningsgebied Tilburg	17
3.3	Modellering van het drinkwaterverbruik	20
3.4	Klimaatscenario's voor het waterverbruik	22
3.4.1	Landelijk voorzieningsgebied Budel	22
3.4.2	Stedelijk voorzieningsgebied Tilburg	23
3.5	Effecten op de productiecapaciteit	25
4	Grondwaterdynamiek, grondwaterkwaliteit en ecologie	29
4.1	Grondwaterdynamiek in een landelijk gebied met een zandondergrond	29
4.2	Effect van de door klimaatverandering toenemende onttrekking	34
4.3	Invloed van klimaat op grondwaterkwaliteit	35
4.3.1	Dynamiek van de grondwaterspiegel	36
4.3.2	Effect van droge jaren op de grondwaterkwaliteit	36
4.3.3	Discussie	39
4.4	Invloed van klimaatverandering op terrestrische ecosystemen	40
4.4.1	Globale indicatie ecologische effecten	40
4.4.2	Ecologische effecten in breder perspectief	41
5	Waterkwaliteit oppervlaktewater	43
5.1	Inleiding: het verband tussen klimaat en oppervlaktewaterkwaliteit	43

5.2	De Rijn en de Maas	44
5.3	Gevolgen van lage afvoeren	45
5.3.1	Rijn	46
5.3.2	Maas	51
5.4	Invloed van verhoogde temperatuur	52
5.5	Hoge afvoeren	53
6	Risico-analyse verzilting	55
6.1	Versterkte intrusie van zeewater in het oppervlaktewater	55
6.1.1	Inleiding	55
6.1.2	Zoutindringing in 2003	56
6.1.3	Toekomstige ontwikkeling	60
6.1.4	Effect klimaatverandering op functies	61
6.1.5	Noodzakelijke maatregelen	63
6.2	Verandering zoet-zout grensvlak in de duinen	63
6.3	Verbrakking van het grondwater	65
7	Risico-analyse productie en distributie	67
7.1	Verhoogde temperatuur; Risico-analyse zuiveringstechniek	67
7.1.1	Aanleiding	67
7.1.2	Filtratieprocessen	68
7.1.3	Chemische processen	70
7.1.4	Membraanfiltratie	73
7.1.5	Evaluatie	73
7.2	Microbiële gevolgen van temperatuurstijging in leidingen	74
7.2.1	Inleiding	74
7.2.2	Temperatuur in het leidingnet	74
7.2.3	Voorspelbaarheid van temperatuurveranderingen	76
7.3	Stabiliteit van het leidingnet bij zettingen door droogte	76
8	Conclusies	79
8.1	Drinkwaterverbruik	79
8.2	Grondwaterdynamiek	79
8.3	Grondwaterkwaliteit	79
8.4	Ecologie	80
8.5	Oppervlaktewaterkwaliteit	80
8.6	Verzilting	81
8.7	Productie en distributie	82
9	Aanbevelingen voor fase 2 van het klimaatonderzoek	83
9.1	Drinkwaterverbruik	83
9.2	Hydrochemie en ecohydrologie	83
9.3	Oppervlaktewaterkwaliteit	83
9.4	Verzilting	84

9.5	Productie en distributie	85
Literatuur	87	
I	Verandering van neerslag, verdamping en temperatuur over het jaar	91

1 Inleiding

1.1 Aanleiding van dit onderzoek

De droge zomer van 2003 heeft geleid tot het besef dat klimaatverandering risico's met zich meebrengt, ook voor de drinkwatersector. Alhoewel de drinkwaterproductie zeker niet in de gevarezone kwam, werden in 2003 wel diverse problemen geconstateerd:

- Verslechtering van de kwaliteit van het oppervlaktewater door verlaging van de rivierafvoer, resulterend in onder meer tijdelijke sluiting van de inname bij Heel;
- Toename van zoutconcentraties bij oeverfiltraatwinningen in West-Nederland ten gevolge van verzilting;
- Stijging van de temperatuur van oppervlaktewater bij inname punten tot aan en vlak boven circa 25 °C waardoor microbiologische risico's groter worden;
- Overstijging van de vergunningscapaciteit van grondwaterstations door stijgende vraag en regionale problemen met de productiecapaciteit.

Verslechtering van de kwaliteit van het oppervlaktewater is overigens niet alleen het geval bij laagwatersituaties. Ook tijdens hoogwater staat de waterkwaliteit onder druk, bijvoorbeeld door overstorten van de riolering, het bezwijken van installaties en opslagfaciliteiten tijdens overstromingen, en het optreden van slibgolven die tot een tijdelijke innamestop kunnen leiden.

Het doel van dit project is het bundelen van kennis rond de invloed van het klimaat op drinkwaterproductie, het in beeld brengen van de mogelijke risico's van klimaatverandering (van bron tot tap) en het signaleren van kennishiaten. De nog uit te voeren tweede fase van dit project zal meer ingaan op de geconstateerde kennishiaten en adaptieve maatregelen voor het beheersen van deze risico's.

Deze risico-analyse begint met een beschrijving van geobserveerde en voorspelde mondiale en regionale veranderingen van het klimaat (paragraaf 2.1 en 2.2). Vervolgens worden de klimaatscenario's besproken die in Nederland gebruikt worden bij scenario-studies (paragraaf 2.3).

Vervolgens gaat hoofdstuk 3 in op de analyse-resultaten van de mogelijke verandering van de drinkwatervraag bij stijgende temperaturen in twee verschillende voorzieningsgebieden. Hoofdstuk 4 gaat in op de mogelijke gevolgen van klimaatverandering voor grondwaterkwaliteit en -kwantiteit en terrestrische ecologie. Hoofdstuk 5 belicht de mogelijke ontwikkeling van de oppervlaktewaterkwaliteit en hoofdstuk 6 gaat in meer detail in op verziltingsproblemen die op kunnen treden in grond- en oppervlaktewater.

De mogelijke gevolgen voor productie en distributie van drinkwater worden gegeven in hoofdstuk 7. In hoofdstuk 8 zijn alle conclusies samengevat en hoofdstuk 9 geeft een overzicht van gesignaleerde kennishiaten.

1.2 Klimaatverandering

Het klimaat is aan het veranderen. Uit diverse onderzoeken komt naar voren dat de temperatuur de afgelopen eeuw is gestegen. In Nederland vallen 6 van de 10 warmste jaren sinds 1901 in de afgelopen 10 jaar. 2006 wordt door het KNMI het jaar van de records genoemd. 2003 staat bekend als een extreem droog jaar. 2003 was het was het warmste jaar in tenminste drie eeuwen en dat is des te opmerkelijker aangezien de eerste drie maanden van dat jaar vrij koud waren. De jaargemiddelde temperatuur kwam met 11,2 °C voor het eerst boven de 11. Naast warm was 2006 ook zeer zonnig. De totale hoeveelheid neerslag was normaal in 2006, maar augustus was de natste augustusmaand in 100 jaar. Verder werd op 1 november bij Delfzijl de hoogste waterstand ooit gemeten. Daarna overtrof de winter van 2006/2007 alle warmterecords. De oorzaak van de warme winter lag in de wind die vrijwel uitsluitend uit de zuidwesthoek kwam en de bewolking die de afkoeling in de nacht verminderde. Tot slot was ook april 2007 een maand met extreme warmte, droogte en zon.

Het IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) concludeert in haar vierde rapport [IPCC, 2007] dat de mens een grote invloed heeft gehad op de temperatuurstijging en dat de mens het klimaat de komende decennia zal blijven beïnvloeden. Daardoor zullen waargenomen veranderingen zoals hogere temperaturen en veranderingen in neerslagintensiteit verder doorzetten.

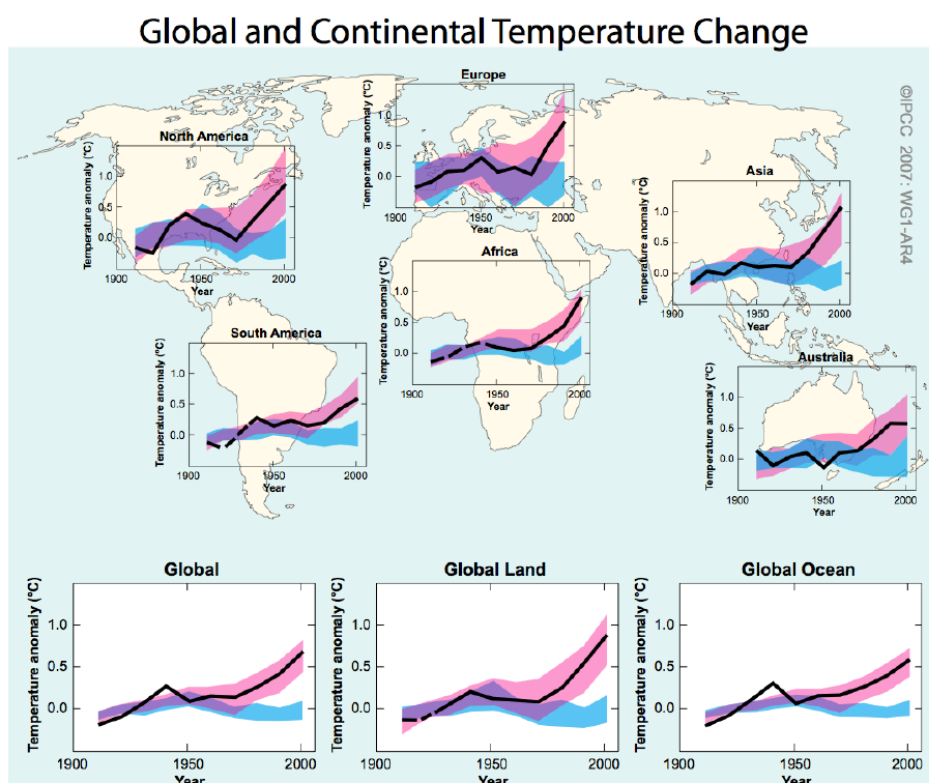
Het KNMI heeft eind 2006 nieuwe klimaatscenario's opgesteld met gebruikmaking van de nieuwste inzichten en klimaatmodellen. De vorige klimaatscenario's zijn in 2000 gepubliceerd. Deze 2000-scenario's zijn in de analyses in dit rapport gebruikt.

2 Klimaatscenario's

2.1 Mondiale klimaatverandering

2.1.1 Temperatuur

Het IPCC [IPCC, 2007] formuleert dat de wereldgemiddelde temperatuur in de afgelopen 100 jaar tussen de 0,56 en 0,92 °C is gestegen. De temperatuurstijging is niet gelijk verdeeld over de wereld. Grote landmassa's en de poolgebieden zijn sneller opgewarmd en de tropen en oceanen minder snel. De gemeten en gemodelleerde temperatuur op de verschillende continenten in de afgelopen 100 jaar zijn gegeven in figuur 1. De opwarming is sinds 1970 ongeveer 0,2 °C per 10 jaar. De wereldwijd warmste 12 jaren sinds 1850 liggen in de afgelopen 13 jaar.



Figuur 1. De gemodelleerde en gemeten temperatuursverandering op de continenten en mondiaal. De zwarte lijn geeft de 10 jaar-gemiddelden van de metingen. De roze band geeft de range van modelresultaten inclusief antropogene invloed en de blauwe band is de range van modelresultaten zonder antropogene invloed (IPCC, 2007).

Tot het eind van de 21^e eeuw wordt een verdere wereldwijde temperatuurstijging verwacht die waarschijnlijk tussen 1,1 en 6,4 °C zal liggen (t.o.v. 1990). De verwachting van het IPCC dat temperaturen blijven stijgen is gebaseerd op de continue toename van broeikasgassen in de atmosfeer en het ontbreken van klimaatwetgeving. De grootste onzekerheden liggen in de te verwachten ontwikkeling van concentraties stofdeeltjes en wolken.

2.1.2 Neerslag

De ontwikkeling van de neerslag in de wereld is veel moeilijker te voorspellen dan de ontwikkeling van de temperatuur. Sinds 1951 is de neerslag significant toegenomen in delen van het noordelijk halfrond. In delen van het zuidelijk halfrond is de regen duidelijk afgenomen, terwijl de zomerneerslag in zuidelijk Zuid-Amerika en Noordwest-Australië duidelijk is toegenomen.

Klimaatmodellen voorspellen een verdere toename van de neerslag in Noord-Europa, Noord-Azië en noordelijk Noord-Amerika en een verdere afname van de neerslag in Noord-Afrika in de periode 2010-2099.

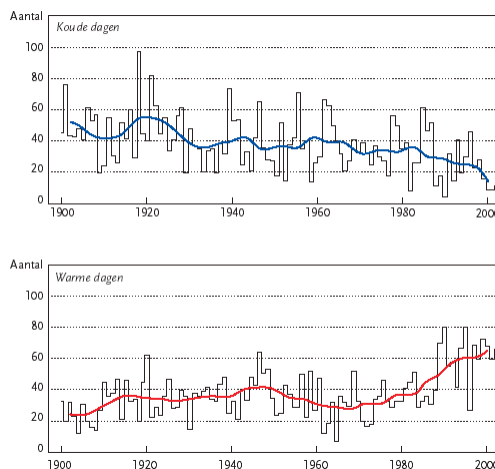
2.1.3 Zeespiegelstijging

In de 20^e eeuw is de zeespiegel wereldwijd gestegen met ongeveer 17 cm. In 1993-2003 ging de stijging bijna twee keer zo snel als daarvoor. Volgens het IPCC zal de zeespiegel wereldwijd in de 21^e eeuw nog 18 tot 59 cm stijgen ten opzichte van 1990. Dit is het gevolg van het uitzetten van zeewater, smelten van gletsjers en kleine ijskappen en het slinken van de grote ijskappen op Groenland en Antarctica. Als de versnelde afkalving van de grote ijskappen doorzet, kan de zeespiegel in de 21^e eeuw nog 10 tot 20 cm extra stijgen, bovenop de eerder genoemde 18 tot 59 cm. De temperatuur van de oceanen reageert erg traag op veranderingen in de atmosfeer, daarom zal het zeeniveau in 2300 30 tot 80 cm hoger zijn dan in de 20^e eeuw, alleen door de uitzetting van het zeewater.

2.2 Het Nederlandse klimaat

Op langere tijdschaal (>10 jaar) loopt de Nederlandse temperatuur grotendeels parallel met de wereldgemiddelde temperatuur. In Nederland wordt de variatie van de temperatuur van jaar tot jaar vooral bepaald door de heersende windrichting. Over de periode 1900-2000 is het aantal koude dagen geleidelijk gedaald. Het aantal warme dagen laat vooral vanaf 1975 een sterke stijging zien (zie figuur 2).

Volgens het KNMI is er in Nederland sinds 1901 sprake van een toename van de gemiddelde neerslag over land. Deze toename wordt vooral veroorzaakt door neerslagtoename in het winterhalfjaar. In het zomerhalfjaar is de gemiddelde neerslag niet of nauwelijks veranderd [Bruin, 2002]. Het neerslagbeeld in



Figuur 2 Verloop van het aantal warme en koude dagen per jaar in De Bilt over de periode 1901-2000. Per kalenderdag in een jaar is bepaald of de betreffende dag kouder of warmer was dan de 10 % hoogste of laagst gemeten temperaturen op die betreffende dag in de jaren 1901-1990. Het aantal malen in een jaar dat een dag kouder was dan de 10% laagste temperatuurmetingen op die dag is weergegeven in de bovenste figuur en het aantal malen dat een de temperatuur hoger was dan de 10% hoogste temperatuurmetingen is weergegeven in de onderste figuur.

Nederland loopt daarmee in de pas met de noordelijke helft van Europa. De toename van de neerslag gaat niet gepaard met een toename van het aantal neerslagdagen (een dag met met 0,3 mm neerslag of meer) [Bruin, 2002].

2.3 KNMI Klimaatscenario's

De risico-analyses in dit rapport zijn grotendeels gebaseerd op de 2003-klimaatscenario's. Het nationale waterbeleid voor de 21^e eeuw (WB21) is mede gebaseerd op de oude klimaatscenario's van het KNMI.

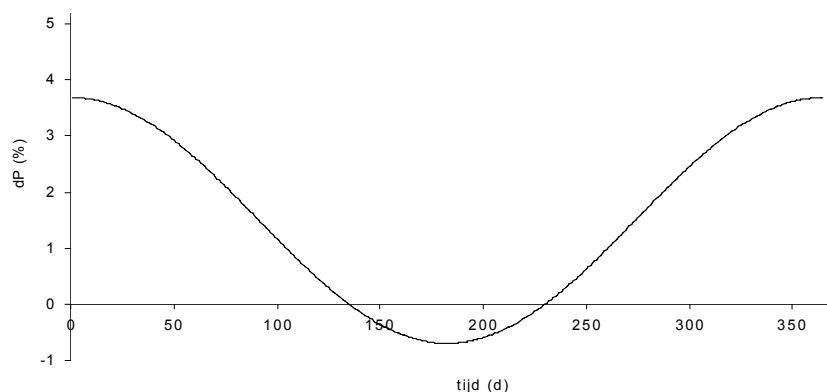
De 2003-scenario's zijn opgesteld voor het jaar 2050 en het jaar 2100: met een lage schatting, een centrale schatting en een hoge schatting voor de stijging van de temperatuur. In tabel 1 staan de kengetallen van de klimaatscenario's weergegeven.

Tabel 1. KNMI 2003-Klimaatscenario's voor Nederland in 2050 op basis van het derde IPCC rapport [IPCC, 2001].

	Huidig	2050 Lage schatting	2050 centrale schatting	2050 hoge schatting
Temperatuur		+ 0.5 °C	+ 1 °C	+ 2 tot +3 °C
Jaarlijkse neerslag	700 à 900 mm	+ 1.5 %	+ 3 %	+ 6 %
Zomerneerslag	350 à 475 mm	+ 0.5 %	+ 1 %	+ 2 %
Winterneerslag	350 à 425 mm	+ 3 %	+ 6 %	+ 12 %
Zomerverdamping	540 à 600 mm	+ 2 %	+ 4 %	+ 8 %
Winterverdamping	ca. 100 mm	+ 2 %	+ 4 %	+ 8 %

Uit de tabel komt naar voren dat tot 2050 de temperatuur, vergeleken met het klimaat in 1990, met maximaal 2 tot 3 °C stijgt en de jaarlijkse winterneerslag met maximaal 12% stijgt. De zomerneerslag vertoont een beperkte stijging tot +2% bij de hoge schatting. De referentieverdamping kan in de hoge schatting stijgen met + 8%. Het klimaat in Noordwest-Europa wordt sterk beïnvloed door de warme golfstroom. De golfstroom heeft een matigend effect op de temperatuur. Zeer lage temperaturen die op andere plaatsen op dezelfde breedtegraden optreden, komen in Noordwest-Europa vrijwel niet voor.

De in de tabellen gepresenteerde veranderingen van de neerslag zijn steeds gemiddelden over het zomer- en winterhalfjaar. In werkelijkheid zal de verandering van de neerslag variëren over de seizoenen. Voor de analyses in dit rapport is in navolging van Haasnoot *et al.* [1999] en Witte [2001] een sinusvormige verdeling aangenomen voor de verandering van de neerslag over het jaar. Een voorbeeld van een dergelijke verdeling is in figuur 3 weergegeven.



Figuur 3 Verdeling van de neerslagverandering dP over het jaar voor de lage schatting op basis van de aanname van een sinusvormige verdeling van de verandering van de neerslag over het jaar.

In de scenario's 'laag', 'centraal' en 'hoog' zijn temperatuur en neerslag aan elkaar gekoppeld. Een stijging van de temperatuur zal bij de gehanteerde koppeling altijd leiden tot een toename van de neerslag. Op deze manier ontstaan relatief natte scenario's. In het kader van de nationale Droogtestudie is door het KNMI een nieuw droog scenario opgesteld. Ook dit scenario is bij een aantal van de in dit rapport beschreven analyses gebruikt. Het nieuwe droge klimaatscenario is gebaseerd op simulaties met (regionale) klimaatmodellen. Veel van die modellen 'voorspellen' dat er de komende 50-100 jaar een sterke uitdroging in de zomer plaats zal vinden die gepaard gaat met een relatief sterke toename van de temperatuur, als gevolg van terugkoppelingseffecten [Van den Hurk *et al.*, 2004]. De veranderingen in temperatuur, neerslag en potentiële verdamping per seizoen in het droge KNMI klimaatscenario zijn weergegeven in Tabel 2. De temperatuur en de verdamping variëren over de loop van het jaar. In bijlage I zijn de veranderingen over het jaar weergegeven.

Tabel 2 Eigenschappen van het droge scenario zoals ontwikkeld voor de Droogtestudie. Veranderingen in 2050 t.o.v. 1990.

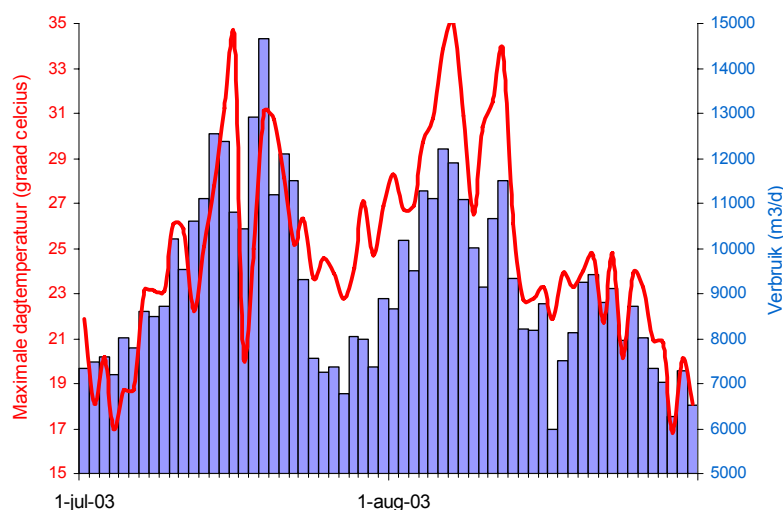
	Verandering Temperatuur	Verandering neerslag	Verandering potentiële verdamping
Jaargemiddeld	+ 2.3 °C	-4 %	+18 %
Zomerhalfjaar	+ 3.1 °C	- 20%	+ 24 %
Winterhalfjaar	+ 2.0 °C	+13 %	+ 8 %

In de winter toont het droge klimaatscenario grote overeenkomst met het +2 tot +3°C KNMI klimaatscenario (Tabel 1). Vooral in de zomer en het najaar wijkt het droge scenario daar sterk van af. De toename van de temperatuur is in de zomer groter. De zomerneerslag neemt af met ongeveer 20% en als gevolg van temperatuurstijging in combinatie met een afname van de relatieve vochtigheid is ook de toename van de potentiële verdamping in de zomer aanzienlijk groter (24% in plaats van ongeveer 8%).

3 Prognose inschatting watervraag

3.1 Inleiding

Het drinkwaterverbruik wordt zeker in de zomermaanden duidelijk beïnvloed door meteorologische omstandigheden. Een illustratie hiervan is weergegeven in Figuur 4. Over het effect van klimaatverandering op het drinkwaterverbruik is echter nog weinig bekend. Resultaten van bestaande onderzoeken wijzen op een toename van het jaarlijks huishoudelijk drinkwatergebruik van circa 2-4% in West-Europa en Noord-Amerika door klimaatverandering [Cohen, 1987]. Het effect van klimaatverandering blijkt echter ten opzichte van andere factoren (demografische en socio-economisch) beperkt. Murdock *et al.* [1991] concluderen dat klimatologische en andere fysische parameters ten opzichte van demografische en socio-economische variabelen een relatief kleine invloed hebben op het drinkwaterverbruik per hoofd van de bevolking. Resultaten van een empirische analyse [Herington, 1996] laten zien dat in de periode 1991-2021 het jaarlijks huishoudelijke waterverbruik in Engeland en Wales met 20% zal toenemen, zonder klimaatverandering. Een stijging van de temperatuur door klimaatverandering met 1,1 graden Celsius geeft volgens deze analyse een stijging met ongeveer 5% (toegeschreven aan douchen en gebruik in de tuin). De gevolgen van klimaatverandering voor de piekvraag naar water zijn volgens dit onderzoek groter: de watervraag in 'piekweken' kan stijgen met 40% ten opzichte van het referentiejaar 1991.



Figuur 4 Tussen de maximale dagtemperatuur en het drinkwaterverbruik bestaat een duidelijk verband. Met rood is de maximale dagtemperatuur weergegeven, met blauw is het dagverbruik in het voorzieningsgebied van pompstation Budel weergegeven voor de zomer van 2003.

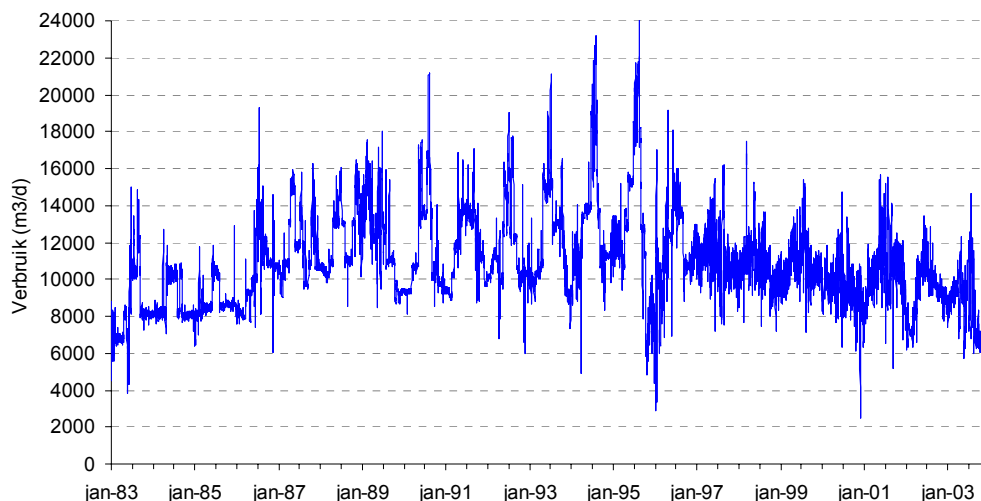
Om het effect van een veranderend klimaat op het drinkwaterverbruik te kunnen bepalen moeten statistische relaties worden gelegd tussen meteorologische omstandigheden en het drinkwaterverbruik. Als deze relaties bekend zijn, kan met behulp van tijdreeksmodellen een prognose worden gemaakt van de verandering van het drinkwatergebruik als gevolg van een veranderend klimaat. In dit hoofdstuk worden de resultaten gepresenteerd van een tweetal analyses. Het gaat hierbij om het effect van klimaatverandering op het waterverbruik in (1) een landelijk afzetgebied (Budel en omgeving) en (2) een stedelijk afzetgebied (Tilburg). De eerste analyse is uitgevoerd in het kader van een in het voorjaar van 2005 uitgevoerde studie geïnitieerd door Brabant Water en Hydron Midden Nederland [Cirkel *et al*, 2005]. De tweede analyse is uitgevoerd als een aanvulling op dit eerdere onderzoek.

3.2 Statistische analyse van het drinkwaterverbruik

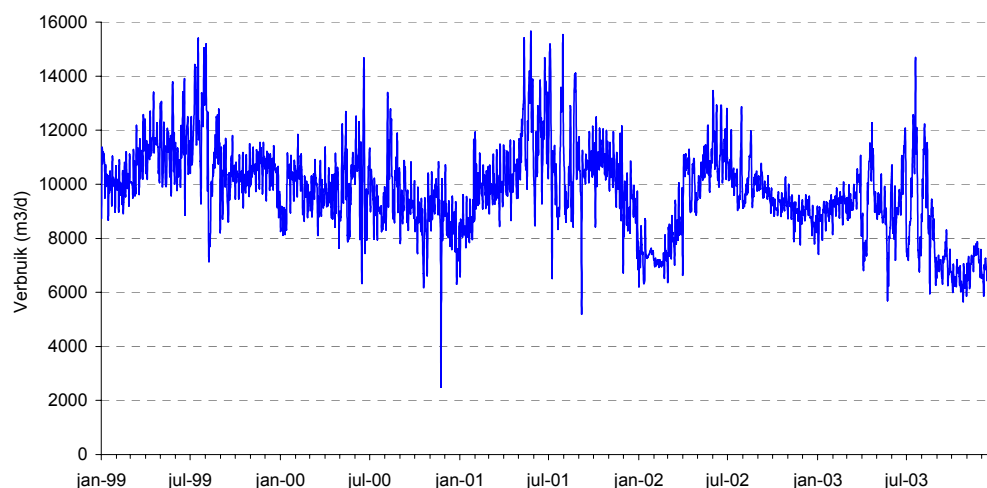
3.2.1 Landelijk voorzieningsgebied Budel

Pompstation Budel is gelegen in het uiterste zuidoosten van de provincie Noord-Brabant. De vergunningscapaciteit is recent teruggebracht van 5,5 naar 3,5 miljoen m³/jr. Het voorzieningsgebied van het pompstation is landelijk met een aantal kleine kernen (ondermeer Budel, Gastel en Soerendonk).

Door Brabant Water is een tijdreeks beschikbaar gesteld van het dagverbruik in het voorzieningsgebied Budel over de periode 1983 t/m 2003. In Figuur 5 is de reeks weergegeven. In de reeks is een duidelijke trendbreuk te ontdekken. Tot ongeveer 1996 is er een geleidelijke toename van het verbruik waar te nemen, terwijl het daarna geleidelijk afneemt. Vanaf 1997 blijkt er verder een ander verbruikspatroon op te treden, waarbij de fluctuaties korter op elkaar zitten en een geringere amplitude vertonen. Met het oog op deze patroonbreuk, is besloten niet de gehele tijdreeks te analyseren, maar alleen het deel vanaf 1999 (zie Figuur 6). Dit deel van de reeks voldoet tevens aan de huidige vergunningscapaciteit van 3,5 miljoen m³/jaar.

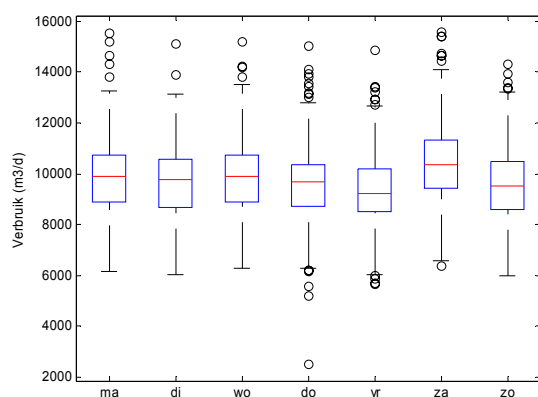


Figuur 5 Verloop van het dagverbruik voorzieningsgebied Budel van 1983 t/m 2003.



Figuur 6 Verloop van het dagverbruik voor voorzieningsgebied Budel van 1999 t/m 2003. (geanalyseerde periode).

In het verloop van het dagverbruik zijn duidelijk seizoensschommelingen zichtbaar. In de zomer is het verbruik hoog en in de winter laag. Ook het verbruik over de week kent vaak een bepaald patroon. In het voorzieningsgebied van pompstation Budel is dit weekpatroon echter vrij vlak. In figuur 7 is met boxplots het verloop van het waterverbruik over de week weergegeven. Boxplots worden gebruikt om de statistische kenmerken van een reeks visueel weer te geven. Uit de figuur blijkt dat op zaterdag het meeste water wordt gebruikt. Op vrijdag wordt het minste water gebruikt.



Figuur 7 Boxplots waterverbruik over de week in voorzieningsgebied Budel gebaseerd op de periode 1999-2003. Weergegeven zijn: mediaan (rode lijn), de kwartielen (blauwe box), de extremen (1,5 keer kwartielafstand) en met de rondjes de uitbijters.

Het verbruik van drinkwater wordt door een groot aantal factoren bepaald. Het gaat hierbij om zowel fysische factoren zoals droogte of hoge temperaturen als sociaal-economische factoren zoals feestdagen en de in het voorzieningsgebied aanwezige landgebruiksfuncties.

In de analyse van Budel zijn de volgende variabelen als mogelijke invloedfactoren op het dagverbruik bij de analyse betrokken:

1. Bijzondere dagen, zoals doordeweekse feestdagen (met als mogelijkheden Nieuwjaarsdag, Koninginnedag, Goede vrijdag, 2^e Paasdag, Hemelvaartsdag, 2^e Pinksterdag, 1^e en 2^e Kerstdag);
2. Maximum dagtemperatuur (gemeten te De Bilt);
3. Makkink-verdamping (gemeten te Eindhoven);
4. Potentieel neerslagoverschot (berekend als het verschil van de neerslag gemeten te Weert en de Makkink-verdamping gemeten te Eindhoven);
5. Aantal zonuren (gemeten te De Bilt).

In de analyse wordt zoveel mogelijk regionale meteorologische data gebruikt, van een aantal parameters was deze data echter niet beschikbaar en is data van meteorostation De Bilt gebruikt.

Daar het aannemelijk is dat er niet-lineaire relaties bestaan tussen het dagverbruik en bepaalde meteorologische variabelen, zijn allereerst de spreidingsdiagrammen van het verbruik versus de verschillende meteorologische variabelen visueel beoordeeld. Uit deze beoordeling blijkt dat het dagverbruik een lineaire relatie vertoont met de verdamping en een niet-lineaire relatie met de overige drie meteorologische variabelen. Over de niet-lineaire relaties kan het volgende worden opgemerkt:

- Bij een maximum dagtemperatuur van minder dan 17 graden Celsius is er geen relatie met het verbruik waar te nemen. Boven deze drempelwaarde lijkt er een positief lineair verband op te treden tussen de maximum dagtemperatuur en het verbruik;

- Bij een potentieel neerslagoverschot groter dan 0 mm/dag is er geen relatie met het verbruik waar te nemen. Onder deze drempelwaarde lijkt er een negatief lineair verband op te treden tussen het potentieel neerslagoverschot en het verbruik;
- Bij minder dan 6 zonuren per dag is er geen relatie met het verbruik waar te nemen. Boven deze drempelwaarde lijkt er een positief lineair verband op te treden tussen het aantal zonuren en het verbruik.

Om relaties te leggen tussen de verschillende variabelen en het dagverbruik is gebruik gemaakt van een tijdreeksmodel. Aangezien een tijdreeksmodel lineaire relaties beschrijft, is besloten de drie laatstgenoemde meteorologische variabelen in aangepaste vorm bij de tijdreeksmodellering te betrekken:

- De maximum dagtemperatuur (T_{max}) is eerst getransformeerd tot $T_{max,17}$ volgens $T_{max,17} = T_{max} - 17$ en vervolgens zijn alle negatieve waarden op 0 gezet;
- Het potentieel neerslagoverschot (PNO) is getransformeerd tot PNO_0 door alle positieve waarden op 0 te zetten;
- Tenslotte is het aantal zonuren (Z) getransformeerd tot Z_6 volgens $Z_6 = Z - 6$ en vervolgens zijn alle negatieve waarden op 0 gezet.

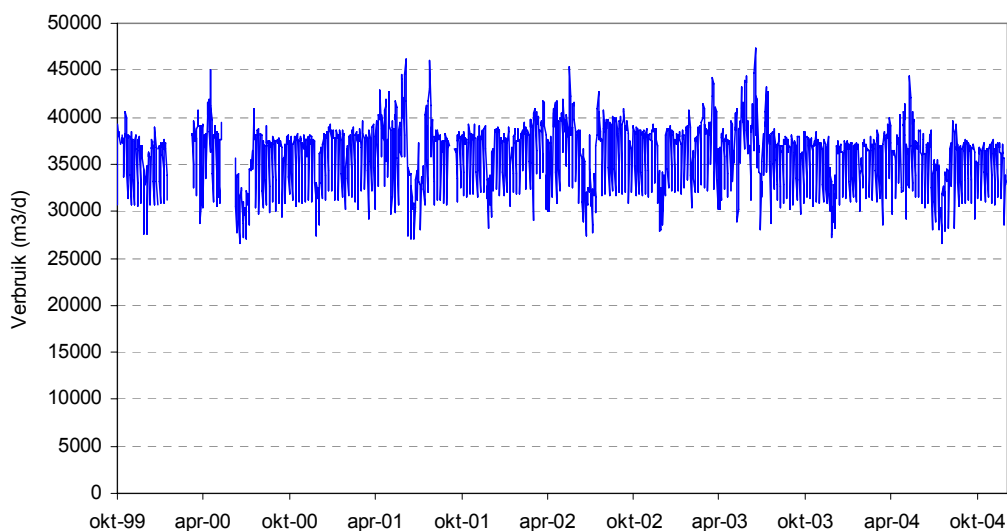
De verschillende meteorologische variabelen zijn overigens zeer sterk aan elkaar gecorreleerd, zoals blijkt uit Tabel 3. Dit betekent dat de variabelen een grote overlap in informatie hebben.

Tabel 3 Correlatiematrix van de dagwaarden van het verbruik (Q), de bijzondere dagen (bijzdag), de getransformeerde maximum dagtemperatuur ($T_{max,17}$), de Makkink-verdamping (V), het getransformeerde potentieel neerslagoverschot (PNO_0) en het getransformeerde aantal zonuren (Z_6), zoals berekend over de periode 1999 t/m 2003.

	Q	Bijzdag	Tmax,17	V	PNO0	Z6
Q	1.00					
Bijzdag	-0.05	1.00				
Tmax,17	0.40	-0.03	1.00			
V	0.48	0.01	0.75	1.00		
PNO0	-0.48	-0.02	-0.71	-0.86	1.00	
Z6	0.38	0.02	0.50	0.67	-0.67	1.00

3.2.2 Stedelijk voorzieningsgebied Tilburg

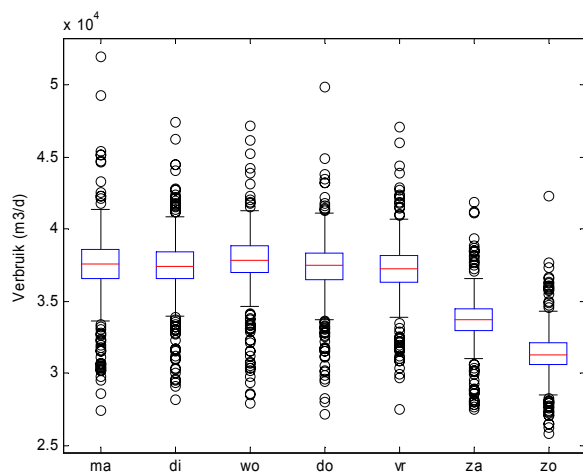
Pompstation Tilburg is gelegen ten westen van de stad Tilburg en voorziet de gehele stad van drinkwater. Pompstation Tilburg beschikt over een vergunning voor 18 mln. m³/jaar, gemiddeld wordt ongeveer 13 mln. m³/jaar onttrokken. Pompstation Tilburg heeft een sterk verstedelijkt afzetgebied. Door de Tilburgse Waterleiding Maatschappij (tegenwoordig Brabant Water) is een tijdreeks van het dagverbruik (m³/dag) ter beschikking gesteld over de periode 1999 t/m 2004. In figuur 8 is de verbruiksreeks weergegeven.



Figuur 8 Verloop van het dagverbruik voor voorzieningsgebied Tilburg van 1999 t/m 2004.

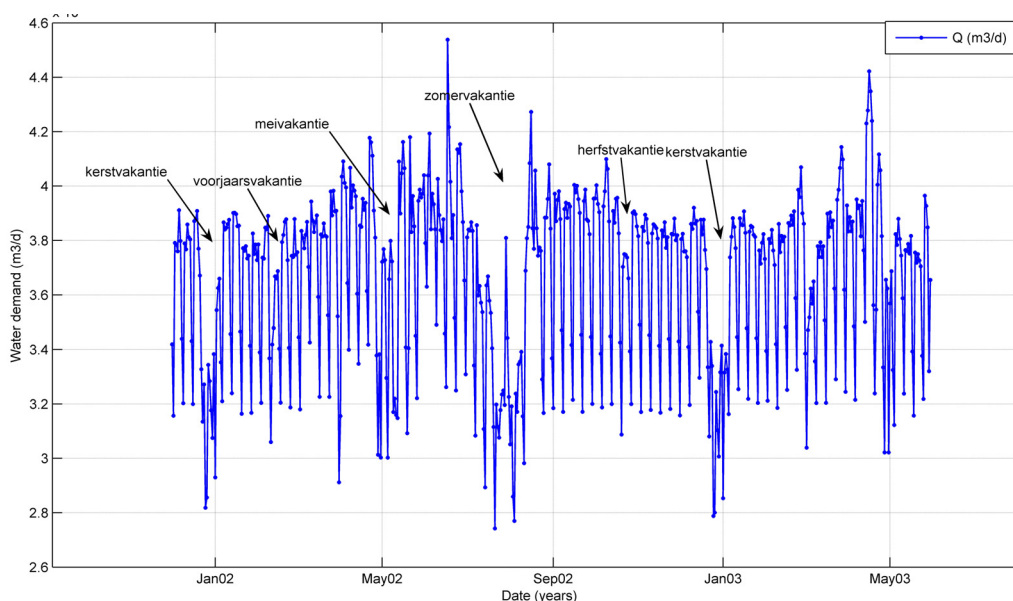
De tijdreeks heeft een zeer regelmatig patroon. In de reeks is een lichte stijging van het waterverbruik waarneembaar aan het begin van de zomer gevolgd door een scherpe daling in de maanden juli en augustus. Deze dalingen zijn ook waarneembaar in januari, oktober en mei.

In het drinkwaterverbruik over de week is tevens een duidelijk patroon te onderscheiden. In figuur 9 is met behulp van boxplots het verloop van het waterverbruik over de week weergegeven. De rode lijn geeft de mediaan van de waarnemingen weer. Met de bolletjes zijn uitbijters weergegeven.



Figuur 9 Boxplot's waterverbruik over de week in voorzieningsgebied Tilburg. Weergegeven zijn: mediaan (rode lijn), de kwartielen (blauwe box), de extremen (1,5 keer kwartielafstand) en met de rondjes de uitbijters.

Het waterverbruik blijkt op doordeweekse dagen vrijwel constant. Op zaterdag en zondag is het waterverbruik significant lager, waarbij op zondag het minste water wordt verbruikt. Kennelijk wordt het waterverbruik in Tilburg sterk beïnvloed door het patroon van werken en vrije tijd. Als naar afzonderlijke jaren wordt gekeken zijn een aantal scherpe dalingen in het waterverbruik opvallend te noemen. In figuur 10 zijn deze dalingen in het jaar 2002 weergegeven.



Figuur 10 Sterke invloed van vakantieperioden op het waterverbruik

In de analyse van Tilburg zijn dezelfde typen variabelen als mogelijke invloedsfactoren op het dagverbruik bij de analyse betrokken als bij de analyse van Budel. Op de meteorologische variabelen zijn tevens dezelfde transformaties toegepast. Omdat de verbruiksreeks echter een duidelijk weekpatroon kent en tevens sterk wordt beïnvloed door vakantieperioden, zijn ook het weekpatroon en de vakantieperioden als extra mogelijke verklarende variabelen in de analyse meegenomen. In totaal zijn de volgende mogelijke verklarende variabelen in de analyse betrokken:

1. Bijzondere dagen, zoals doordeweekse feestdagen (*met als mogelijkheden* Nieuwjaarsdag, Koninginnedag, Goede vrijdag, 2^e Paasdag, Hemelvaartsdag, 2^e Pinksterdag, 1^e en 2^e Kerstdag).
2. Getransformeerde maximum dagtemperatuur ($T_{\max,17}$) (gemeten te De Bilt);
3. Makkink-verdamping (gemeten te Eindhoven);
4. Potentieel neerslagtekort PNO_0 (op basis van de neerslag gemeten te Gilze Rijen en de Makkink-verdamping gemeten te Eindhoven);
5. Getransformeerd aantal zonuren (Z_6) (gemeten te De Bilt).
6. Vakantieperioden
7. Weekpatroon

Uit de correlatiematrix komt naar voren dat het weekpatroon en de vakantieperioden het sterkst met de verbruiksreeks zijn gecorreleerd. Op de derde plaats komt het neerslagtekort. De verschillende variabelen zijn overigens deels aan elkaar gecorreleerd, zoals blijkt uit Tabel 4. Dit betekent dat de variabelen een grote overlap in informatie hebben.

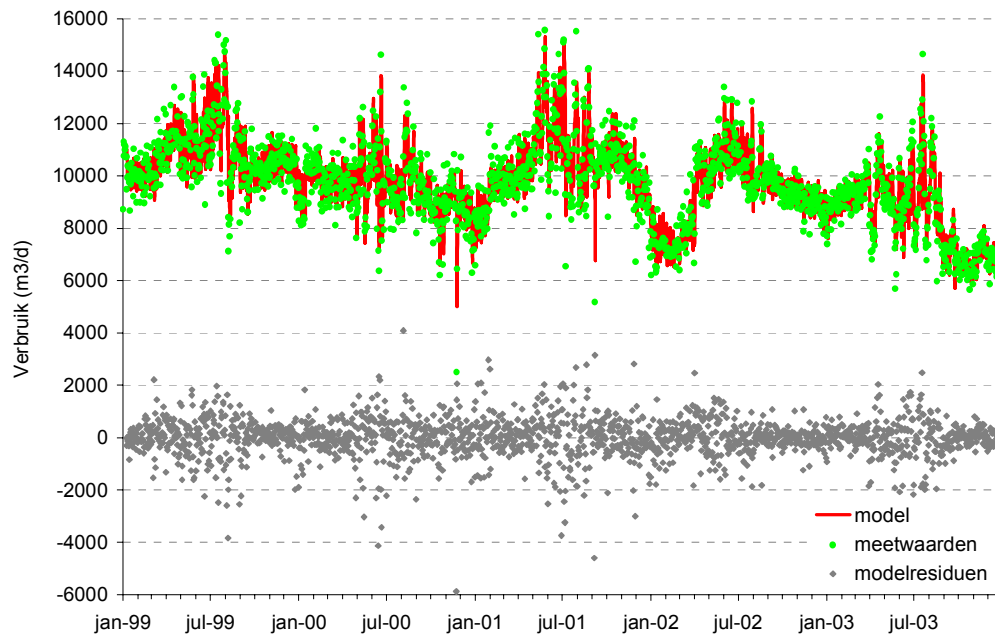
Tabel 4 Correlatiematrix van de dagwaarden van het verbruik (Q), de bijzondere dagen (bijzdag), de getransformeerde maximum dagtemperatuur (T_{max17}), de Makkink-verdamping (V), het potentieel neerslagtekort (PNO_0), het getransformeerde aantal zonuren (Z_6), zoals berekend over de periode 1999 t/m 2003, de vakantiedagen (Vak) en het weekpatroon (Wkp).

	Q	V	Tmax17	PNOo	Z6	Vak	Wkp
Q	1.00						
V	0.23	1.00					
Tmax17	0.07	0.40	1.00				
PNOo	-0.28	-0.87	-0.28	1.00			
Z6	0.02	0.12	0.57	-0.10	1.00		
Vak	-0.43	0.11	-0.02	-0.07	0.01	1.00	
Wkp	0.69	0.01	0.00	-0.01	-0.02	-0.43	1.00

3.3 Modellering van het drinkwaterverbruik

Om de relatie tussen klimaat en waterverbruik te leggen zijn voor de verbruiksreeksen van Budel en Tilburg tijdreeksmodellen ontwikkeld. Voor het opstellen van de tijdreeksmodellen is gebruik gemaakt van de verklarende variabelen zoals weergegeven in Tabel 3 en Tabel 4. Voor een uitgebreidere beschrijving van de modellering wordt verwezen naar Cirkel *et al* [2005].

Uit de tijdreeksmodellen komt voor voorzieningsgebied Budel de getransformeerde maximum dagtemperatuur ($T_{max,17}$) als beste meteorologische variabele voor het modelleren van het verbruik naar voren. Bij voorzieningsgebied Tilburg komt het potentiële neerslagtekort (PNO_0) als beste meteorologische variabele naar voren.



Figuur 11 Gemeten vs met maximum dagtemperatuur gemodelleerd verloop van het dagverbruik in voorzieningsgebied Budel over de periode 1999-2003

- Resultaten modellering dagverbruik voorzieningsgebied Budel (zie ook figuur 11): Uit de modellering blijkt dat het waterverbruik in het voorzieningsgebied Budel per graad Celsius overschrijding van 17 °C, stijgt met 1,8%. De schatting is afgeleid uit het berekende effect van 172 m³/dag per graad Celsius boven de 17 graden. Dit berekende effect gedeeld door het gemiddelde verbruik van 9705 m³/dag geeft 1,8%. De standaardfout van het berekende effect is 10,2 m³/dag per graad Celsius boven de 17 graden. Het 95%-betrouwbaarheidsinterval van het geschatte berekende effect is dan: [1,57% ; 1,99%].
- Resultaten modellering dagverbruik voorzieningsgebied Tilburg: Uit de modellering blijkt dat het waterverbruik in het voorzieningsgebied Tilburg per mm neerslagtekort, stijgt met 2,4%. De schatting is afgeleid uit het berekende effect van 881 m³/dag per mm neerslagtekort. Dit berekende effect gedeeld door het gemiddelde verbruik van 36470 m³/dag geeft 2,4%. De standaardfout van het berekende effect is 44 m³/dag per mm neerslagtekort. Het 95%-betrouwbaarheidsinterval van het berekende effect is dan: [2,11% ; 2,72%].

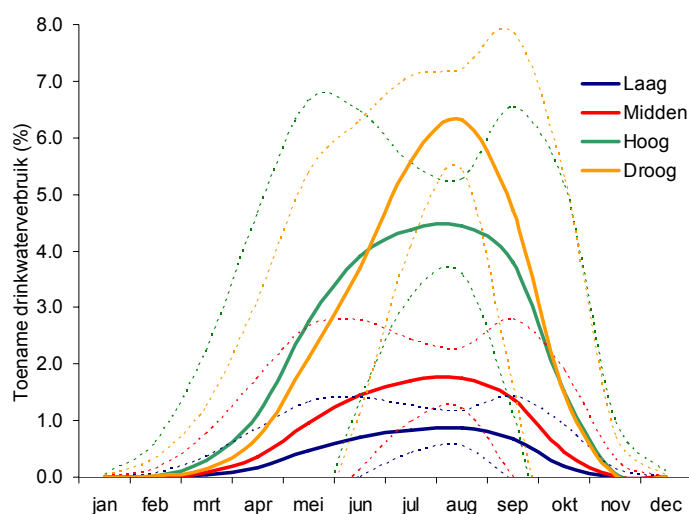
Beide tijdreeksmodellen hebben moeite met het modelleren van extreem hoge dagverbruiken. Dit kan leiden tot een onderschatting van het effect van meteorologische variabelen op de dagverbruiken. Hierin is zeker een verbeterlag noodzakelijk. In de volgende paragraaf wordt het effect van klimaatverandering (temperatuurstijging / toename van het neerslagtekort) op het drinkwaterverbruik in een aantal scenario's verder uitgewerkt.

3.4 Klimaatscenario's voor het waterverbruik

Op basis van de verschillende 2003-KNMI scenario's (laag, midden, hoog en droog scenario) en de afgeleide relatie tussen temperatuur en drinkwaterverbruik (voorzieningsgebied Budel) en neerslagoverschot en drinkwaterverbruik (voorzieningsgebied Tilburg) kunnen scenario's voor het drinkwaterverbruik opgesteld worden. Voor het opstellen van de verbruiksscenario's voor het landelijke voorzieningsgebied Budel is een reeks van de temperatuur te De Bilt met een lengte van 60 jaar (referentiereeks) en de vier hiervan afgeleide klimaatveranderde reeksen gebruikt. Door een lange reeks (> 50 jaar) te nemen worden temperatuurschommelingen op decadebasis goed in de analyse meegenomen [mondelinge mededeling Albert Klein Tank, KNMI]. Voor het opstellen van de verbruiksscenario's voor het stedelijke voorzieningsgebied Tilburg is gebruik gemaakt van een neerslagreeks van Gilze-Rijen en een verdampingsreeks van Eindhoven en hiervan afgeleide klimaatveranderde reeksen. De lengte van de betreffende reeksen bedraagt dertig jaar.

3.4.1 Landelijk voorzieningsgebied Budel

Op basis van de rekenregel (1,8% toename van het verbruik per graad overschrijding van 17 graden) zijn de temperatuurreeksen omgezet naar reeksen met per dag de procentuele stijging van het verbruik. Hiertoe is per scenario bepaald op welke dagen en met hoeveel graden de 17 graden wordt overschreden. Tevens is gekeken op welke dagen in de huidige situatie de 17 graden wordt overschreden en met hoeveel graden. Als op een bepaalde dag in de huidige situatie de temperatuur niet boven 17 graden uitkomt maar in de scenario's wel, is voor de toename het temperatuurverschil ten opzichte van 17 graden genomen. Als in de huidige situatie de temperatuur op een zekere dag wel boven de 17 graden uitkomt, is het temperatuurverschil ten opzichte van de temperatuur in de huidige situatie genomen.



Figuur 12 Toename van het drinkwaterverbruik in voorzieningsgebied Budel voor vier klimaatscenario's Laag, Midden, Hoog en Droog). Met de gestippelde lijnen zijn de 95% betrouwbaarheidsintervallen weergegeven

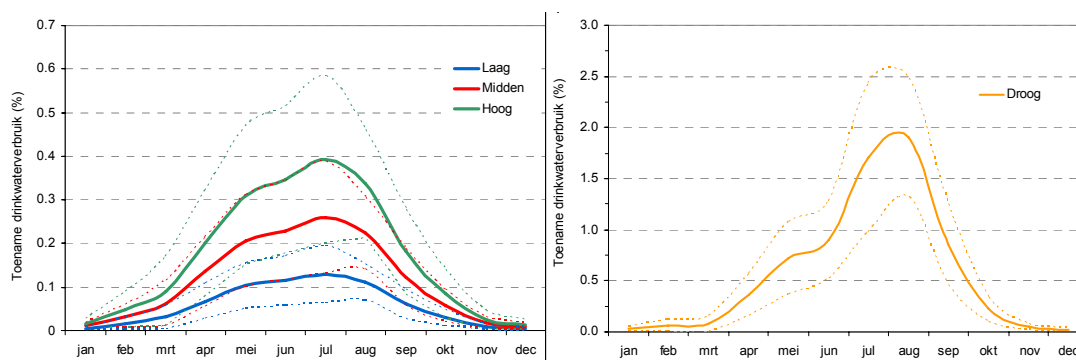
In figuur 12 zijn de gemiddelde toename van het verbruik over het jaar en de 95% betrouwbaarheidsintervallen voor vier KNMI scenario's (laag, midden, hoog en droog) weergegeven. Duidelijk is te zien dat de toename in de zomer het grootst zal zijn; in de winter treedt geen stijging op. In het voorjaar en het najaar is de stijging van het verbruik veel minder zeker, door sterke schommelingen in de temperatuur tussen de afzonderlijke jaren.

Het voor de Droogtestudie [Van den Hurk *et al.*, 2004] ontwikkelde 'Droge' scenario (oranje lijn in figuur 12) geeft een wat afwijkend beeld. In dit scenario is de toename van de temperatuur niet constant aangehouden over het jaar, maar is de toename sterker in de zomer en de herfst. Het verloop van de verbruikstoename is hierdoor wat schever naar links.

De gemiddelde toename van het waterverbruik in de zomer varieert van ongeveer 0,9% in het lage scenario tot 4,4% in het hoge scenario. Bij het droge scenario neemt het waterverbruik in de zomer toe tot gemiddeld 6,3%.

3.4.2 Stedelijk voorzieningsgebied Tilburg

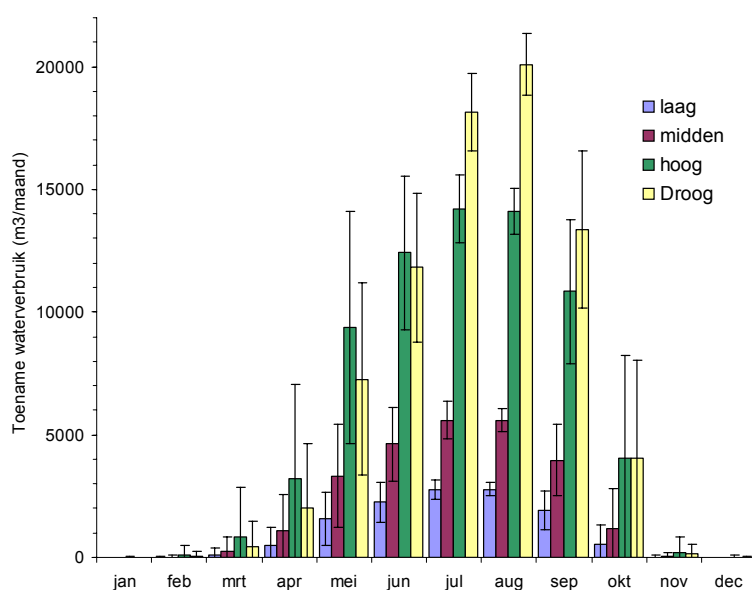
Op basis van de rekenregel (2,4% toename van het verbruik per mm neerslagtekort) is voor voorzieningsgebied Tilburg per scenario een langjarige reeks (30 jaar) opgesteld met per dag de procentuele stijging van het verbruik. In figuur 13 is de gemiddelde toename van het verbruik over het jaar en de 95% betrouwbaarheidsintervallen voor vier KNMI scenario's (laag, midden, hoog en droog) weergegeven. Het droge scenario heeft een duidelijk ander effect dan de scenario's laag, midden en hoog en is daarom apart weergegeven. De grote afwijking tussen de standaard KNMI scenario's en het droge scenario wordt veroorzaakt doordat in het droge scenario de temperatuur toeneemt met 2,3 °C (vergelijkbaar met het hoge scenario) terwijl de verdamping jaargemiddeld toeneemt met 18% en de zomerneerslag afneemt met 20%. In het hoge scenario neemt de jaargemiddelde verdamping toe met 8% en neemt de zomerneerslag iets toe.



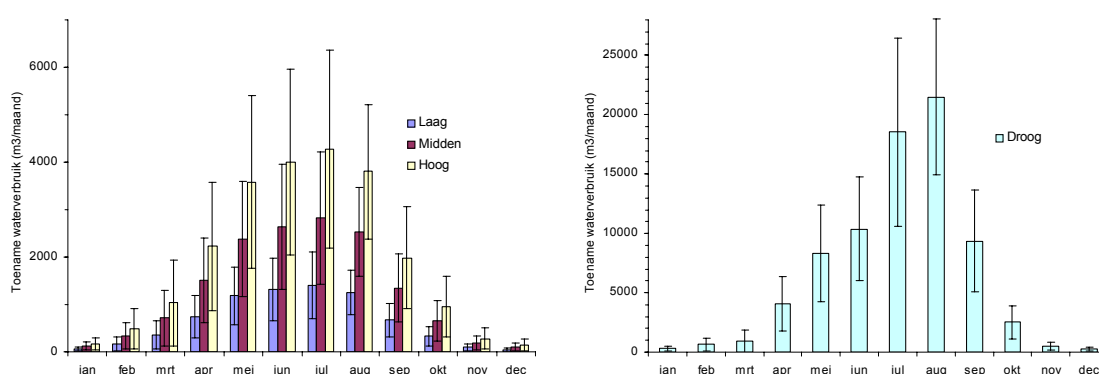
Figuur 13 Toename van het drinkwaterverbruik in voorzieningsgebied Tilburg voor vier klimaatscenario's (Laag, Midden, Hoog en Droog) Met de gestippelde lijnen zijn de 95% betrouwbaarheidsintervallen weergegeven.

Uit figuur 13 blijkt dat bij de drie standaard KNMI scenario's (Laag, Midden, Hoog) het waterverbruik stijgt in de zomer tot respectievelijk 0,13 , 0,26 en 0,39 %. Het waterverbruik neemt bij het droge scenario toe tot 1,91% in de zomer. Het effect van klimaatverandering op het waterverbruik blijkt dus in

de stedelijke omgeving van Tilburg veel beperkter te zijn dan in de landelijke omgeving van Budel. Uiteraard is niet alleen de procentuele verandering van belang, maar ook de toename van het waterverbruik in m³/d. Omdat de verbruiksreeksen vaak kort zijn en tevens door andere factoren beïnvloed zijn, zijn de procentuele veranderingen toegepast op kunstmatig gegenereerde verbruiksreeksen voor Tilburg en Budel met een lengte van 34 jaar (op basis van gegevens over de periode 1970 – 2004). Deze reeksen hebben dezelfde statistische eigenschappen als de verbruiksreeksen van Budel en Tilburg over de periode 1999-2004. In figuur 14 en figuur 15 zijn de gemiddelde toenames van het drinkwaterverbruik (maandsommen) per scenario voor pompstation Budel en pompstation Tilburg weergegeven.



Figuur 14 Gemiddeld verloop van de toename van het drinkwaterverbruik in voorzieningsgebied Budel (maandsommen) voor de vier klimaatscenario's



Figuur 15 Gemiddeld verloop van de toename van het drinkwaterverbruik in voorzieningsgebied Tilburg (maandsommen) voor de vier klimaatscenario's

3.5 Effecten op de productiecapaciteit

Voor de productiecapaciteit zijn niet alleen het gemiddelde verbruik en mogelijke gemiddelde toenames van belang maar ook de extremen. Een veel gebruikte maat voor de extremen is de maximale dagafzet en de piekfactor. De maximale dagafzet is gedefinieerd als de hoogste dagsom in een bepaald jaar. De piekfactor is gedefinieerd als de maximale dagafzet gedeeld door de gemiddelde dagafzet over een bepaald jaar en is een maat voor de variatie in de afzet. Voor het bepalen van de maximale dagafzet en maximale piekfactor voor zowel pompstation Budel als Tilburg is gebruik gemaakt van de gegenereerde 'huidige' verbruiksreeksen en de daarvan afgeleide reeksen voor de klimaatscenario's. Per scenario is bepaald hoe de maximale dagafzet en de maximale piekfactor veranderen als gevolg van de temperatuurstijging. In Tabel 5 is de toename van de maximale dagafzet en de piekfactor voor pompstation Budel weergegeven. Uit de tabel blijkt dat de maximale dagafzet kan stijgen met maximaal 4,3 % bij het hoge klimaatscenario en met maximaal 6 % bij het droge klimaatscenario. De maximale piekfactor stijgt ten opzichte van de huidige situatie met 2,6 % in het hoge scenario en 3,7 % in het droge scenario.

Tabel 5 Maximale dagafzet en maximale piekfactoren per scenario en de relatieve toename van de maximale dagafzet en piekfactor ten opzichte van de huidige situatie als gevolg van klimaatverandering weergegeven voor pompstation Budel

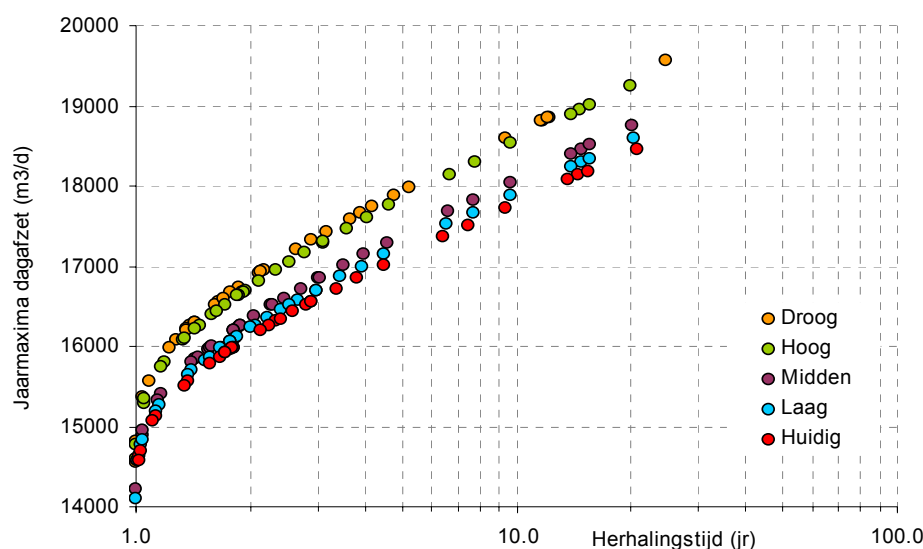
Scenario:	Maximale dagafzet (m ³ /d)	Maximale piekfactor	Toename maximale dagafzet (%)	Toename maximale piekfactor (%)
Huidig	18456	1.90	-	-
Laag	18589	1.91	0.7	0.5
Midden	18755	1.92	1.6	1.1
Hoog	19253	1.95	4.3	2.6
Droog	19559	1.97	6.0	3.7

In Tabel 6 is de toename van de maximale dagafzet en de maximale piekfactor voor pompstation Tilburg weergegeven. Uit de tabel blijkt dat de maximale dagafzet kan stijgen met maximaal 0,53 % bij het hoge klimaatscenario en met maximaal 1,26% bij het droge klimaatscenario. De maximale piekfactor stijgt ten opzichte van de huidige situatie met 0,35 % in het hoge scenario en 0,61 % in het droge scenario. Uit de getallen komt duidelijk de relatieve ongevoeligheid van het waterverbruik in de stad Tilburg voor meteorologische veranderingen naar voren. Dit in tegenstelling tot het landelijke gebied rond Budel waar het waterverbruik veel sterker wordt beïnvloed door het weer.

Tabel 6 Maximale dagafzet en maximale piekfactoren per scenario en de relatieve toename van de maximale dagafzet en piekfactor ten opzichte van de huidige situatie als gevolg van klimaatverandering weergegeven voor pompstation Tilburg

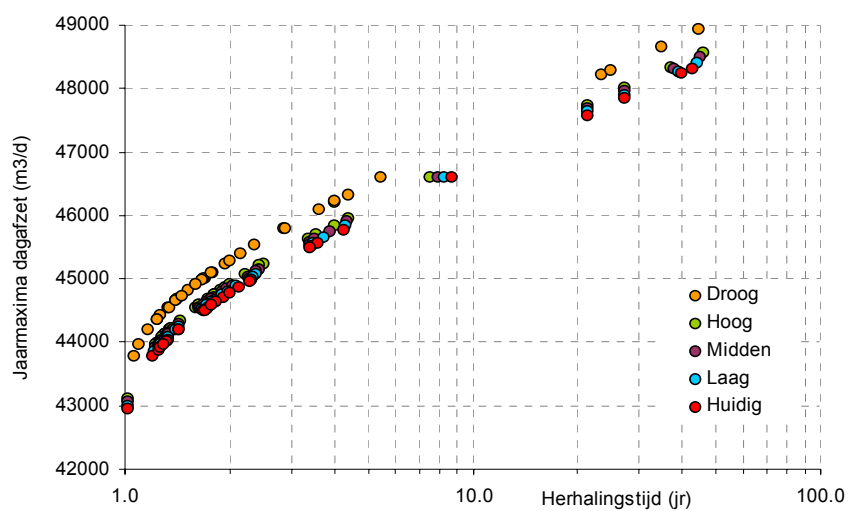
Scenario:	Maximale dagafzet (m ³ /d)	Maximale piekfactor	Toename maximale dagafzet (%)	Toename maximale piekfactor (%)
Huidig	48312	1.35	-	-
Laag	48396	1.35	0.18	0.12
Midden	48481	1.35	0.35	0.23
Hoog	48565	1.35	0.53	0.35
Droog	48922	1.36	1.26	0.61

Van de jaarmaxima van de dagafzet zijn de herhalingstijden bepaald met behulp van de Gumbel-verdeling [Gumbel, 1954]. Deze herhalingstijden en bijbehorende jaarmaxima van de dagafzet zijn in figuur 16 voor pompstation Budel weergegeven. Uit de figuur blijkt dat bij de verschillende klimaatscenario's de kans op dagen met een extreem hoog waterverbruik zal toenemen. De herhalingstijd van een dagverbruik van 18000 m³/d bedraagt in de huidige situatie ongeveer 13,5 jaar, in het hoge scenario is deze herhalingstijd afgenomen naar ongeveer 5,3 jaar.



Figuur 16 Herhalingstijden jaarmaxima dagafzet (m³/d) pompstation Budel

In figuur 17 zijn de herhalingstijden en bijbehorende jaarmaxima voor pompstation Tilburg weergegeven. Uit de figuur blijkt dat bij de verschillende klimaatscenario's de kans op dagen met een 'extreem' hoog waterverbruik licht zal toenemen. De herhalingstijd van een dagverbruik van 46600 m³/d bedraagt in de huidige situatie bijvoorbeeld 8,7 jaar, in het droge scenario is deze herhalingstijd afgenomen naar ongeveer 5,5 jaar.

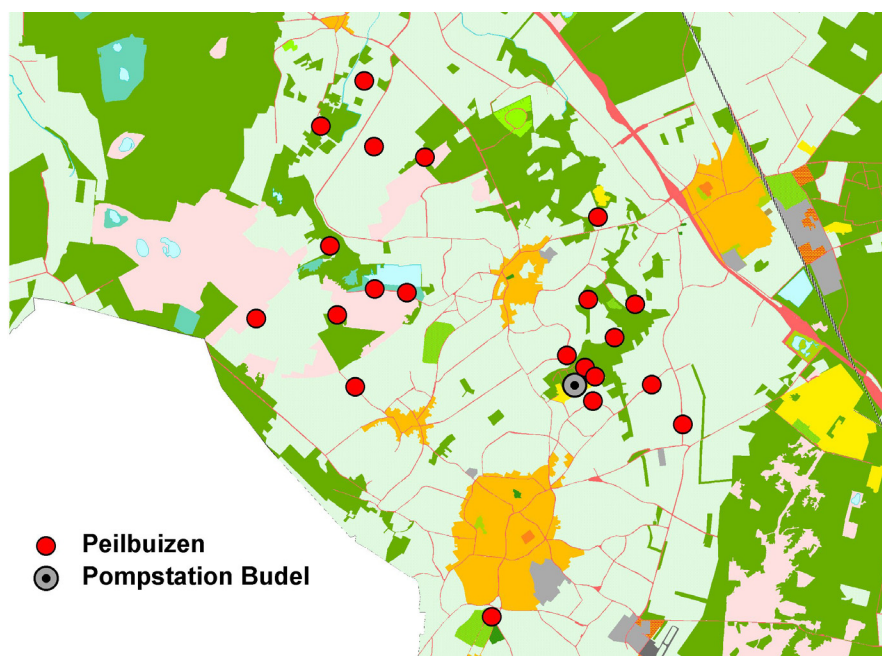


Figuur 17 Herhalingstijden jaarmaxima dagafzet (m³/d) pompstation Tilburg

4 Grondwaterdynamiek, grondwaterkwaliteit en ecologie

4.1 Grondwaterdynamiek in een landelijk gebied met een zandondergrond

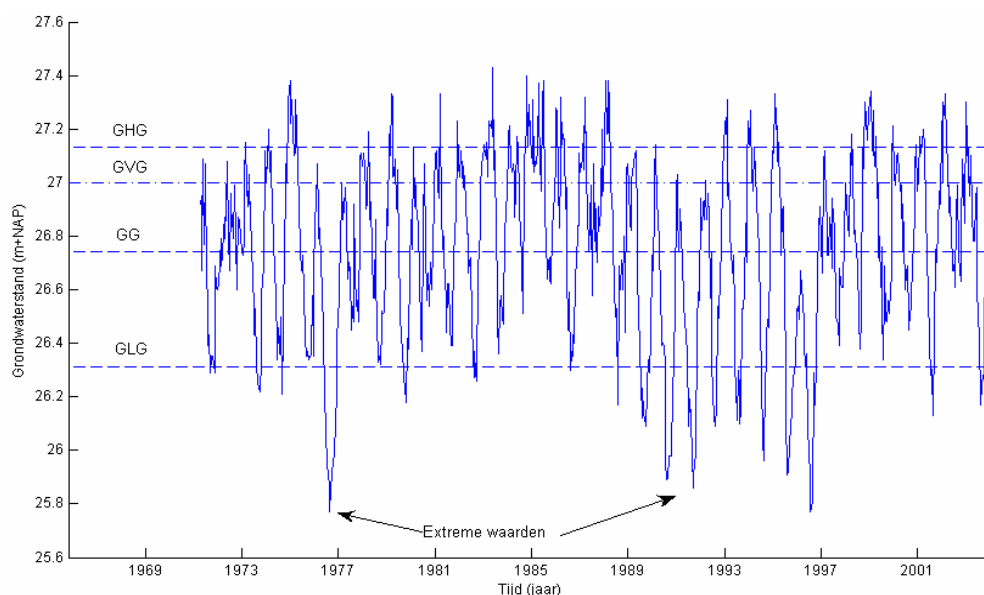
Klimaatverandering beïnvloedt via veranderende neerslag, verdamping en via toename van het waterverbruik(onttrekking) het grondwaterregime. Om een indruk te krijgen van de effecten van klimaatverandering op de grondwaterdynamiek is een studie uitgevoerd naar de effecten rond pompstation Budel. Met behulp van het programma *Menyanthes* is voor 30 meetreeksen uit peilbuizen rond pompstation Budel met zowel lineaire als niet-lineaire tijdreeksmodellen de relatie tussen de grondwaterstand en beïnvloedende factoren zoals neerslag, verdamping en onttrekking gemodelleerd [Cirkel *et al*, 2005]. De invloed van de onttrekking is hierin meegenomen op basis van de uitkomsten van de in hoofdstuk 3 weergegeven modellering van het drinkwaterverbruik van voorzieningsgebied Budel. In figuur 18 is de ligging van pompstation Budel en de betreffende meetreeksen weergegeven. Er is getracht een zo divers mogelijke set meetreeksen te analyseren. Zo zijn er zowel meetreeksen met invloed van onttrekking als meetreeksen zonder invloed van onttrekking en meetreeksen op hoge droge delen en lage natte delen van het gebied gebuikt.



Figuur 18 Ligging geanalyseerde grondwaterstandsmeetreeksen rondom pompstation Budel

Met de opgestelde modellen zijn de klimaatscenario's Laag, Midden, Hoog en Droog doorgerekend. Om de effecten van klimaatverandering op

grondwaterdynamiek te bepalen zijn de per scenario gesimuleerde reeksen vergeleken met de huidige situatie. Om de reeksen te kunnen vergelijken zijn een aantal kengetallen nodig waarmee de dynamiek van een reeks gekarakteriseerd kan worden. Een veel gebruikte systematiek om de dynamiek van het grondwater te karakteriseren is de GXG systematiek. In deze systematiek wordt de dynamiek van het grondwater gekarakteriseerd aan de hand van de GHG (gemiddeld hoogste grondwaterstand), GVG (gemiddelde voorjaars grondwaterstand, GG (Gemiddelde grondwaterstand) en de GLG (Gemiddeld laagste grondwaterstand). In figuur 19 zijn deze waarden voor meetreeks B57E0067_1 weergegeven.

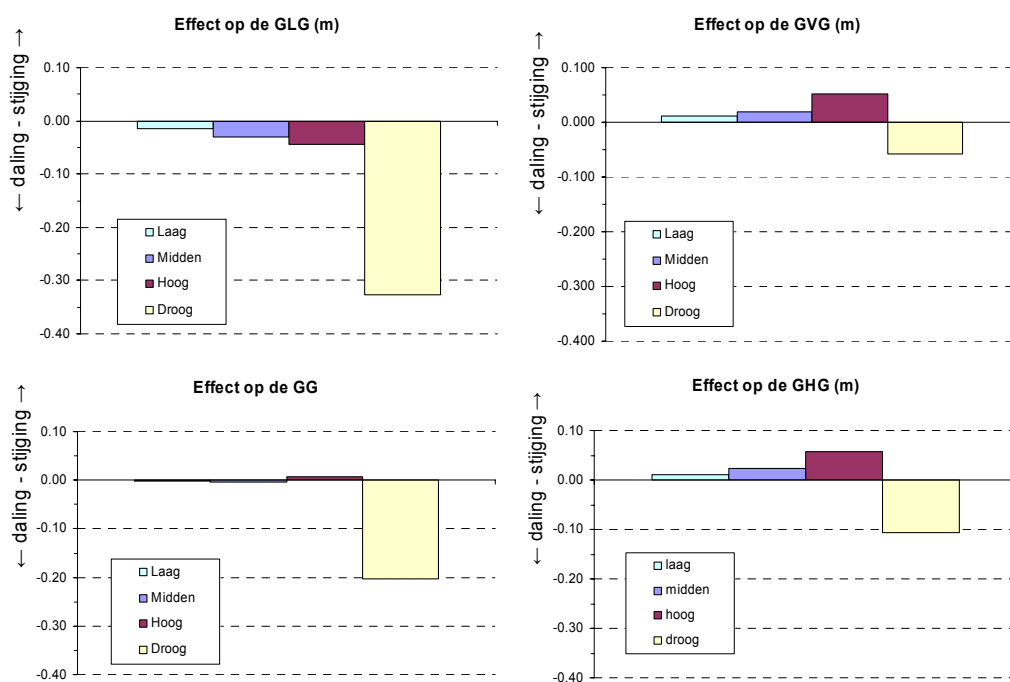


Figuur 19 Verloop van de grondwaterstand (meetreeks B57E0067_1) en de waarden voor GHG, GVG, GG en GLG.

Uit de figuur blijkt dat de GXG-waarden een redelijk goede maat zijn voor het gemiddelde verloop van de grondwaterstand. Extreme waarden (zoals in 1976) worden in deze systematiek echter buiten beschouwing gelaten. Extreem lage standen kunnen echter (bijvoorbeeld door het droogvallen van beken en sloten) wel degelijk invloed hebben op de ecologie en landbouw binnen een gebied. Het is dus belangrijk om ook de kans van voorkomen van extreme waarden in de analyse te betrekken.

Uit de berekeningen blijkt dat bij de scenario's Laag, Midden en Hoog de grondwaterstanden in winter en voorjaar zullen stijgen en in zomer en najaar dalen ten opzichte van de huidige grondwaterstanden. De gemiddelde grondwaterstand blijft bij deze scenario's vrijwel gelijk aan die in de huidige situatie. Het droge scenario heeft een zeer grote invloed op het grondwatersysteem. In het droge scenario vindt in de winter een toename van de neerslag plaats die vergelijkbaar is met die van het hoge scenario. Waar dit in het hoge scenario nog resulteert in stijgingen van de grondwaterstand, kan in het droge scenario de extra neerslag in de winter de sterke zomerdroogte onvoldoende compenseren, waardoor de grondwaterstand

zich op een lager niveau zal instellen. In figuur 20 is het effect van klimaatverandering op de GLG, GVG, GG en GHG weergegeven. Uit de figuur komt duidelijk het verschil tussen de scenario's Hoog, Midden en Laag en het droge scenario naar voren. Gemiddeld over alle 30 geanalyseerde meetreeksen daalt de GLG in het hoge scenario met ongeveer 5 cm. In het droge scenario daalt de GLG gemiddeld met 33 cm. De GVG en de GHG stijgen in de scenario's Laag, Midden en Hoog. In het droge scenario daalt ook de GVG en de GHG met respectievelijk 6 en 11 cm. Bij de scenario's Laag, Midden en Hoog treedt geen verandering op van de gemiddelde grondwaterstand. Bij het droge scenario daalt deze grondwaterstand echter met gemiddeld 20 cm.

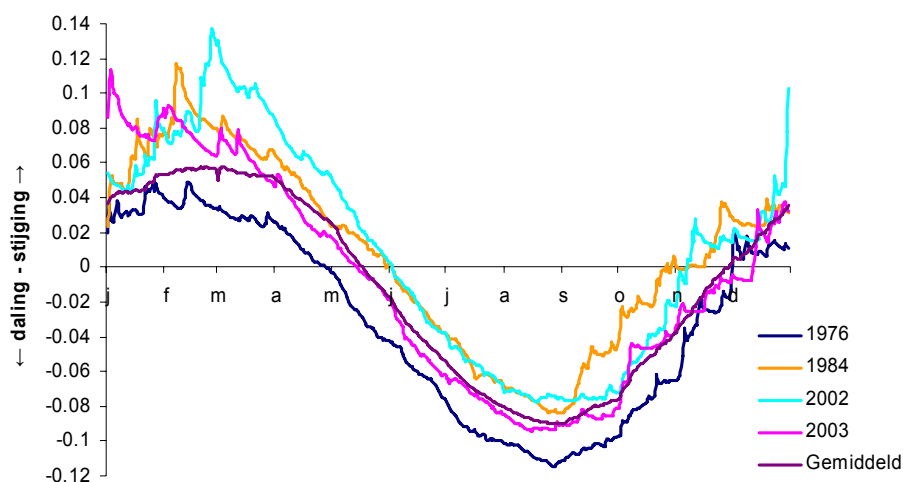


Figuur 20 Effect van klimaatverandering op de GLG, GVG, GG en GHG

Concluderend kan gesteld worden dat bij de scenario's Laag, Midden en Hoog de amplitude van de grondwaterstand toeneemt, maar het gemiddelde niveau blijft gelijk. Bij het droge scenario stelt het gehele grondwaterregime zich in op een lager niveau.

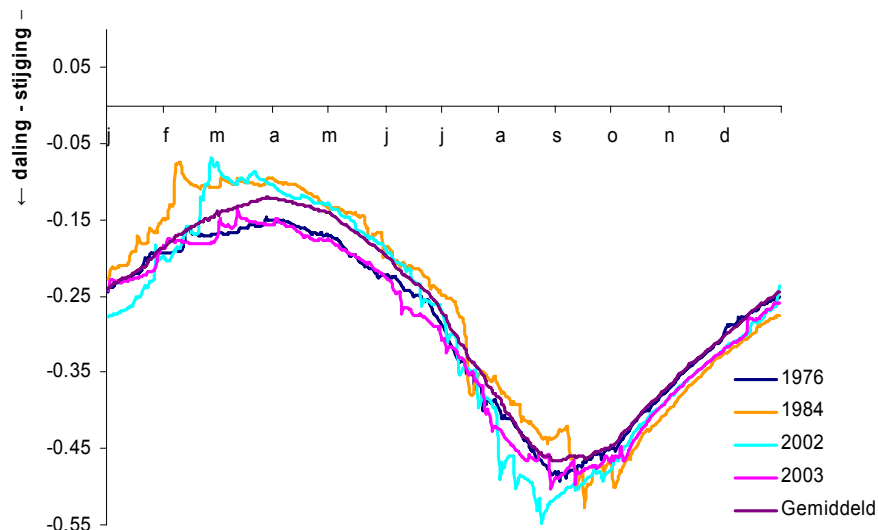
Tot nu toe is alleen gekeken naar gemiddelde waarden. Het is echter ook interessant om het effect van klimaatverandering op het verloop van het grondwaterregime in beeld te brengen. Het grondwaterregime wordt vooral bepaald door het per jaar verschillende verloop van neerslag en verdamping. Uit een analyse van de afgelopen 35 jaar komen een viertal duidelijk verschillende extreme jaren naar voren. Het gaat hierbij om de jaren 1984, 2002, 1976 en 2003. De jaren 1984 en 2002 zijn extreem nat, 1976 is extreem droog en 2003 kenmerkte zich vooral door de extreem hoge verdamping en hoge temperatuur. Op de meteorologische gegevens van deze jaren zijn de

klimaatscenario's toegepast en doorgerekend. In figuur 21 is de verandering van het grondwaterregime ten opzichte van het huidige regime als gevolg van klimaatverandering (scenario Hoog) voor deze afzonderlijke jaren weergegeven. In de figuur is tevens de gemiddelde verandering weergegeven (op basis van 30 jaar meteorologische data).



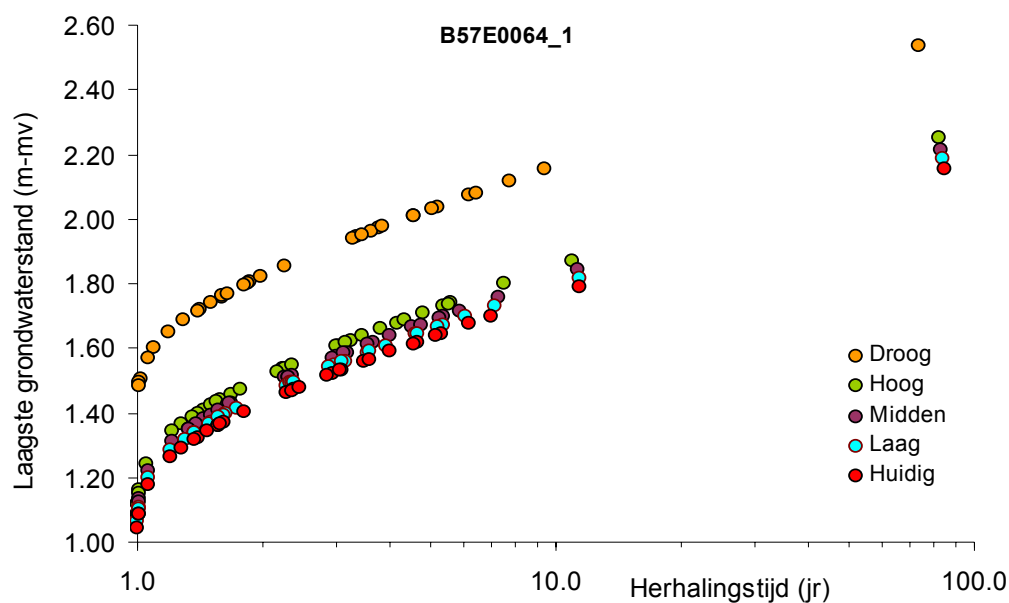
Figuur 21 Verandering van het grondwaterregime (m) voor meetreeks B57E0064_1 als gevolg van klimaatverandering (scenario Hoog).

In natte jaren kan de grondwaterstand bij het hoge scenario stijgen tot 14 cm in de winterperiode. In droge jaren zullen de stijgingen in de winterperiode beperkter zijn. In de zomer treden dalingen op tot zo'n 11 cm. Het droge klimaatscenario geeft een veel extremer beeld, de grondwaterstand zal zich op een structureel lager niveau instellen (zie figuur 22). De meest extreme grondwaterstands daling ten opzichte van het huidige grondwaterregime treedt op in augustus en september. Stijgingen van de grondwaterstand ten opzichte van de huidige situatie komen in het droge scenario ook op afzonderlijke dagen vrijwel niet voor. Als ze al optreden (in de winter) zijn de stijgingen kleiner dan 5 cm.



Figuur 22 Verandering van het grondwaterregime (m) voor meetreeks B57E0064_1 als gevolg van klimaatverandering (scenario Drog).

Extreem lage grondwaterstanden zullen volgens alle scenario's in de toekomst vaker voor gaan komen. Om inzicht te krijgen in de ontwikkeling van extreem lage grondwaterstanden zijn per scenario de jaarminima per grondwaterstandsreeks bepaald. Met behulp van de Gumbelverdeling zijn vervolgens de bijbehorende herhalingstijden berekend. In figuur 23 zijn voor meetreeks B57E0064_1 de herhalingstijden en bijbehorende laagste grondwaterstanden weergegeven. In de figuur is goed te zien dat alle scenario's een toename van het optreden (kleinere herhalingstijd) van extreem lage grondwaterstanden tot gevolg hebben.



Figuur 23 Jaarminima en bijbehorende herhalingstijden voor meetreeks B57E0064_1 voor de huidige situatie en het lage, midden, hoge en droge scenario

De gemiddelde dieptes van de verschillende grondwaterstandsreeksen verschillen. Om de herhalingstijden tussen de reeksen onderling te kunnen vergelijken, moet dus een relatieve diepte van de grondwaterstand ten opzichte van de gemiddelde grondwaterstand worden gebruikt. Als relatieve waarde is gekozen voor de gemiddelde grondwaterstand van een bepaalde meetreeks minus 2,58 maal de standaarddeviatie (ondergrens 99% betrouwbaarheids-interval).

De herhalingstijd van deze extreem lage grondwaterstanden neemt in het hoge scenario gemiddeld met 3 à 4 jaar af ten opzichte van de huidige situatie. In het droge scenario neemt de herhalingstijd af met gemiddeld 8 tot 12 jaar. Dit betekent het volgende: als een extreem lage grondwaterstand in de huidige situatie gemiddeld elke 15 jaar optreedt, zal deze extreme gebeurtenis in het hoge scenario elke 11 jaar optreden en in het droge scenario gemiddeld elke 3 tot 7 jaar optreden.

4.2 Effect van de door klimaatverandering toenemende onttrekking

In het voorafgaande is het totale effect van klimaatverandering op de grondwaterdynamiek in het gebied rond Budel gepresenteerd. Belangrijk is tevens het afzonderlijke effect van extra onttrekking als gevolg van door klimaatverandering toenemende drinkwatervraag. Om een beeld te krijgen van deze invloed is gebruik gemaakt van de voor Budel berekende effecten van klimaatverandering op de drinkwatervraag.

De toenemende drinkwatervraag leidt in de omgeving van Budel tot een daling (afhankelijk van de ligging van de peilbuis in het effectgebied van de winning) van 0 tot 5,6 cm in het hoge scenario en van 0 tot 6,3 cm in het droge scenario. Voor het hoge scenario betekent dit dat de maximale daling door klimaatverandering in het hart van de winning voor ongeveer de helft wordt veroorzaakt door de toegenomen drinkwateronttrekking. Bij het droge scenario is het klimaateffect via extra onttrekking slechts 15% van de maximale daling in het hart van de winning.

Het effect van de door klimaatverandering toegenomen drinkwatervraag (en daardoor toegenomen onttrekking) op de grondwaterstand is een zeer lokaal fenomeen en neemt snel af met de afstand tot het pompstation. Op ongeveer 1 km van het pompstation (peilbuis B57E0144_1) is het aandeel van de extra onttrekking al gedaald naar ongeveer 18% in het hoge scenario en 3% in het droge scenario. Op 2,5 km van het pompstation is de invloed van de extra onttrekking op de maximale daling niet meer significant meetbaar.

4.3 Invloed van klimaat op grondwaterkwaliteit

Het klimaat beïnvloedt op verschillende manieren de kwaliteit van het grondwater. Voorbeelden hiervan zijn het effect van temperatuur op de snelheid van bodemreacties, de invloed van neerslag en verdamping op de concentraties van stoffen in grondwater en het effect van neerslag en verdamping op aëratie van de ondergrond. In deze paragraaf ligt de nadruk op de invloed van droge perioden op de chemische kwaliteit van het ondiepe grondwater.

Droge jaren beïnvloeden de chemische samenstelling van het ondiepe grondwater langs twee wegen:

1. Geringe grondwateraanvulling
Bedraagt de grondwateraanvulling in normale jaren 300 mm/jaar, in droge jaren is deze aanvulling aanzienlijk minder, bijvoorbeeld 100 mm/jaar. Bij gelijke aanvoer van stoffen aan maaiveld, zoals bij vermisting of atmosferische depositie, zal de concentratie van deze stoffen in dit geval dus drie maal hoger zijn. Deze hoge concentraties zijn in het droge jaar boven in de bodem aanwezig, en zullen pas na één of enkele jaren naar het grondwater zijn uitgespoeld. Met andere woorden, hoge concentraties ten gevolge van droge jaren zullen zich pas een of enkele jaren na dat droge jaar in het bovenste grondwater manifesteren.
2. Diep wegzakken van de grondwaterspiegel
Ten gevolge van het diep wegzakken van de grondwaterspiegel komen diepere gedeelten van de bodem met atmosferisch zuurstof in contact. Indien dit gedeelte van de bodem pyriet bevat zullen zeer hoge concentraties sulfaat worden gevormd. Bovendien zullen bij aanwezigheid van kalk tevens zeer hoge hardheden voorkomen door de neutralisatie van het gevormde zuur. Deze processen spelen zich vlak boven de grondwaterspiegel af. Daardoor zal het effect van dit diep wegzakken zich pas in het bovenste grondwater manifesteren nadat de grondwaterspiegel weer enigszins is gestegen.

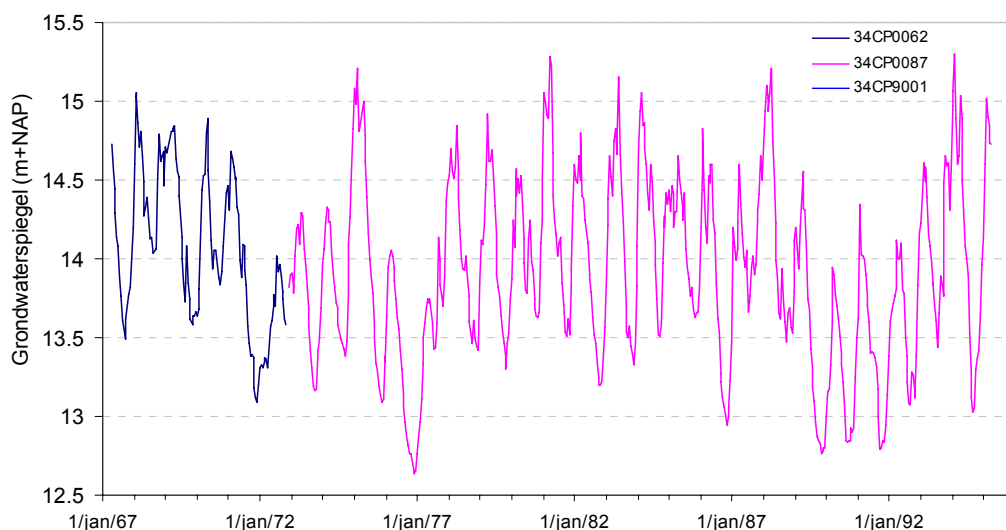
Beide effecten zullen aan de hand van resultaten van onderzoek rond het puttenveld 't Klooster (Vitens Gelderland) in de Achterhoek worden toegelicht.

Rond het puttenveld 't Klooster is gedurende de jaren 1989, 1991 en 1993 en de periode 2000-2003 onderzoek uitgevoerd om het effect van de provinciale regelgeving op gebied van vermisting te toetsen. Daartoe is op 25 percelen binnen en op 25 percelen buiten het grondwaterbeschermingsgebied de chemische samenstelling van het ondiepe grondwater bepaald.

De chemische samenstelling van het bovenste grondwater werd bepaald door in het najaar op ieder geselecteerd perceel 8 boorgaten tot circa 50 cm onder de grondwaterspiegel te zetten en te voorzien van een tijdelijk putfilter. Vervolgens werd het monster genomen. Deze monsters werden op het laboratorium gefiltreerd en tenslotte, met gelijke deelvolumina, tot één monster per perceel samengevoegd dat werd geanalyseerd.

4.3.1 Dynamiek van de grondwaterspiegel

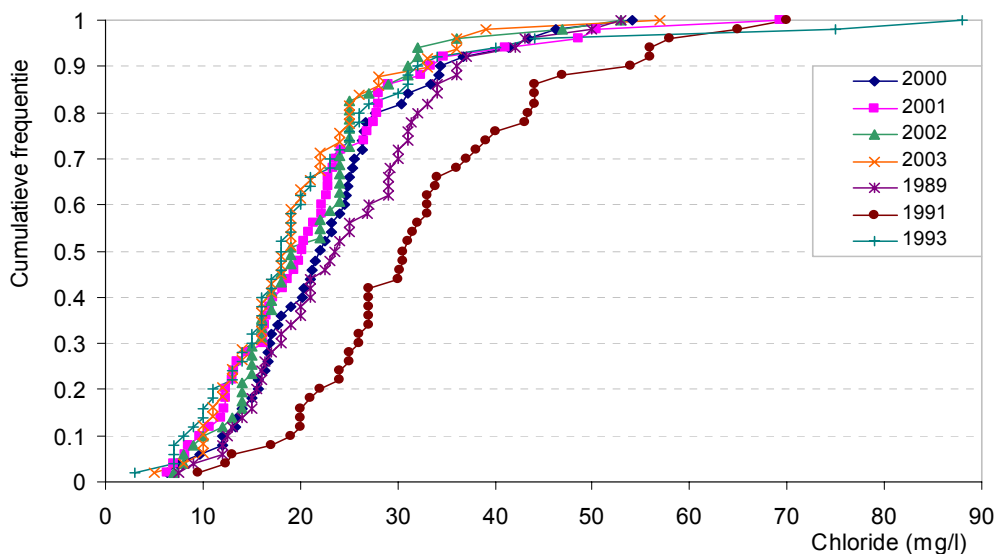
Onderstaande afbeelding toont het verloop van de grondwaterspiegel op de nabij pompstation 't Klooster gelegen Varsselse Enk, zoals bepaald uit 2 waarnemingsputten. De frequentie van de waarnemingen bedraagt twee keer per maand. Uit het verloop van de grondwaterspiegel in figuur 24 kunnen de droge zomers gemakkelijk worden herkend, namelijk 1976, 1989, 1990 en 1991.



Figuur 24 Verloop van de grondwaterspiegel op de Varsselse Enk gedurende de periode 1967 – 1996.

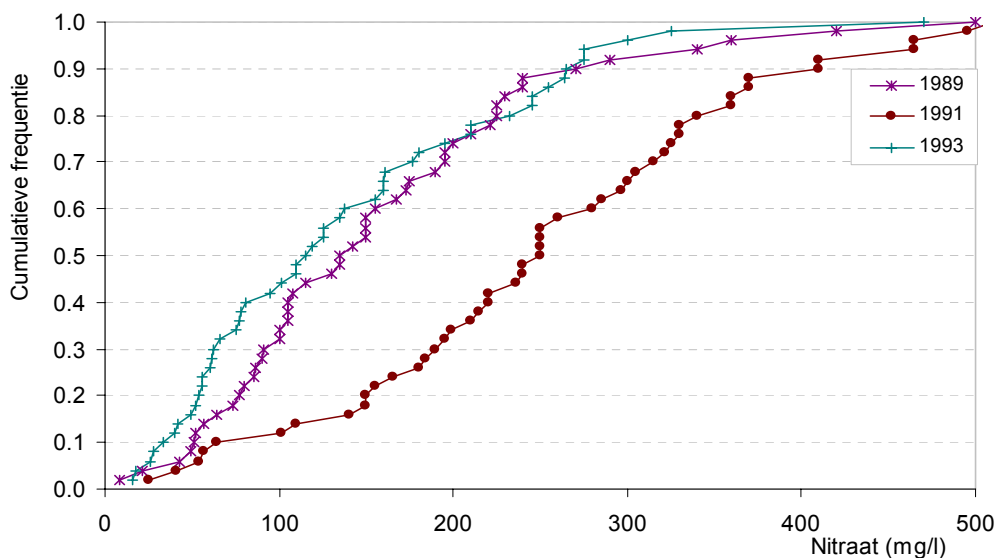
4.3.2 Effect van droge jaren op de grondwaterkwaliteit

Figuur 25 toont de cumulatieve concentratie verdeling van chloride in het ondiepe grondwater rond puttenveld 't Klooster in de jaren 1989, 1991, 1993 en gedurende de periode 2000 t/m 2003. Uit figuur 26 blijkt dat de concentratie van chloride in het bovenste grondwater in 1991 ten gevolge van de voorafgaande droge jaren 1989 en 1990 duidelijk hoger is dan in de overige jaren. De jaren 1989 en 1993 omvatten de concentraties van chloride van de overige jaren, waarbij de concentraties in 1989 iets hoger zijn. De mediaan van de concentratie bedraagt in 1989 en 1993 respectievelijk 23,5 en 18 mg/l.



Figuur 25 Cumulatieve concentratieverdeling van chloride in het bovenste grondwater rond het puttenveld 't Klooster in de aangegeven jaren. Uit de afbeelding blijkt dat in 1991 in de helft van de onderzochte percelen de concentratie van chloride kleiner was dan 30,6 mg/l, en in 10% van de percelen kleiner dan 19 mg/l

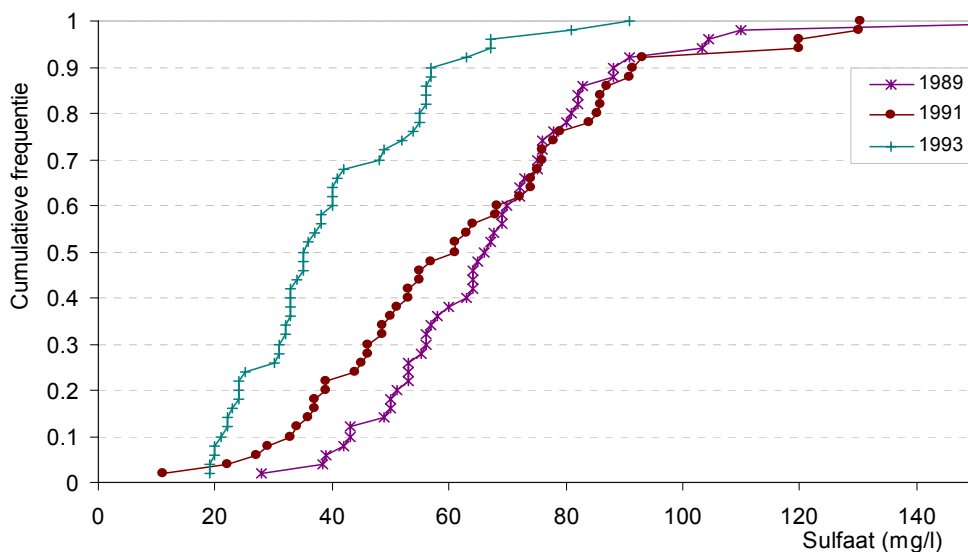
Figuur 26 toont de cumulatieve concentratieverdeling van de concentratie van nitraat in 1989, 1991 en 1993. De concentratie van nitraat in 1991 is ook hier duidelijk hoger dan in 1989 en 1993. De mediaan van de concentratie bedraagt in de opeenvolgende jaren respectievelijk 135, 250 en 115 mg/l.



Figuur 26 Cumulatieve frequentieverdeling van de concentratie van nitraat. In 1991 was de mediaan van de concentratie 250 mg/l, in de helft van de waarnemingen was de concentratie lager en in de andere helft hoger.

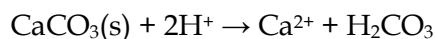
Figuur 27 toont de cumulatieve frequentie verdeling van de concentratie van sulfaat in het bovenste grondwater. Vergelijking van figuur 27 met figuur 25

en figuur 26 laat zien dat de cumulatieve concentratieverdeling van sulfaat in het bovenste grondwater volledig afwijkt van die van chloride en van nitraat.



Figuur 27 Cumulatieve frequentieverdeling van de concentratie van sulfaat in het bovenste grondwater rond het puttenveld 't Klooster in de jaren 1989, 1991 en 1993.

Nitraat en sulfaat worden als zuur aan de bodem toegevoegd. Dit zuur wordt geneutraliseerd door van nature in de bodem aanwezige kalk. Variërende concentraties nitraat en sulfaat zullen dus resulteren in variërende hardheden. De neutralisatie van het sterke zuur door het oplossen van kalk kan worden weergegeven als:

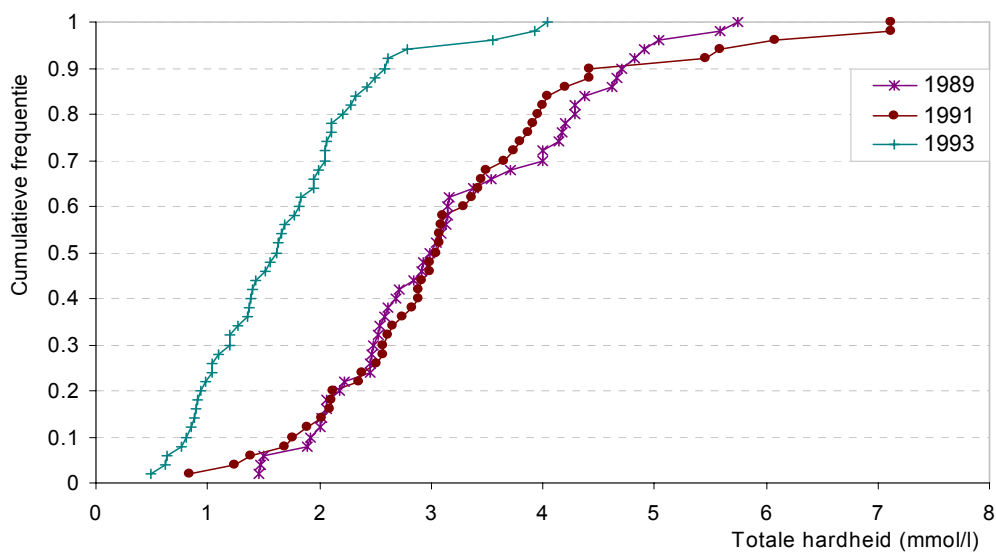


Het lot van het hierbij gevormde vrij koolzuur is onzeker: het kan ontwijken naar de atmosfeer, door wortelademhaling en mineralisatie van organisch materiaal kan de concentratie nog toenemen, en het kan reageren met kalk:



Met andere woorden door neutralisatie van de sterke zuren salpeterzuur en zwavelzuur en het zwakke zuur vrij koolzuur door kalk zal de hardheid toenemen. Echter omdat de reactie nog niet volledig hoeft te zijn voltooid, in het bijzonder de neutralisatie van het zwakke zuur vrij koolzuur, kan de gemeten hardheid in het bovenste grondwater nogal variëren.

Figuur 28 toont de cumulatieve frequentieverdeling van de hardheid. Uit de figuur blijkt dat de cumulatieve frequentieverdelingen van de hardheid in 1989 en 1991 nagenoeg samenvallen, en veel hoger zijn dan in 1993.



Figuur 28 Cumulatieve frequentieverdeling van de hardheid in het bovenste grondwater rond het puttenveld 't Klooster in de jaren 1989, 1991 en 1993.

4.3.3 Discussie

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de mediaan van de concentraties in de aangegeven jaren, en de daaruit berekende concentratieverhoudingen.

Tabel 7 Mediaan van de concentraties en de hieruit berekende concentratieverhoudingen

Jaar	Mediaan van de concentratie				Mediaan van de concentratie			Concentratieverhouding		
	Cl mg/l	NO ₃ mg/l	SO ₄ mg/l	TH mmol/l	Cl mmol/l	NO ₃ mmol/l	SO ₄ mmol/l	NO ₃ /Cl mol/mol	SO ₄ /Cl mol/mol	TH/Cl mol/mol
1989	23,5	135	66	2,98	0,66	2,18	0,69	3,30	1,05	4,52
1991	30,6	250	61	3,04	0,86	4,03	0,64	4,69	0,74	3,53
1993	18,0	115	35	1,61	0,51	1,85	0,36	3,63	0,71	3,16

Ervan uitgaande dat de samenstelling van de aangevoerde mest over de beschouwde jaren niet veel varieerde, en dat chloride als een inerte parameter mag worden beschouwd, blijkt uit bovenstaande tabel dat nitraat en sulfaat zich ten opzichte van chloride verschillend gedragen.

De concentratie van nitraat loopt parallel met die van chloride. De hoge concentratie van nitraat in 1991 wordt dus veroorzaakt door indikking.

De concentratie van sulfaat ten opzichte van chloride bereikt een maximum in 1989 en loopt voor op dat van nitraat. Blijkbaar is hier een ander mechanisme actief, namelijk oxidatie van pyriet door atmosferische zuurstof juist boven de diep weggezakte grondwaterspiegel.

4.4 Invloed van klimaatverandering op terrestrische ecosystemen

In deze paragraaf worden de ecologische effecten (ondermeer gebruikmakend van de bevindingen van de studie bij Budel) globaal in beeld gebracht. Vervolgens is gebruik gemaakt van de opgedane inzichten om het huidige natuurbeleid en klimaatverandering met elkaar te confronteren.

4.4.1 Globale indicatie ecologische effecten

De volgende beschrijving is gebaseerd op de berekende veranderingen van de GHG, GVG en GLG zoals die in figuur 20 weergegeven zijn. De scenario's Laag, Midden en Hoog leiden in toenemende mate tot hogere GHG en GVG maar allemaal tot ca. 5 cm of minder. De GLG neemt juist af bij deze scenario's. Voor vegetatietypen van droge standplaatsen zullen deze veranderingen geen merkbare invloed hebben. Voor natte standplaatsen treden kleine verschuivingen op. De oppervlakte waar de GHG aan of boven maaiveld staat (madelanden, vennen) zal wat groter worden, maar dat is sterk begrensd door het reliëf (venoevers, beekdalranden). Als op meer plaatsen water boven maaiveld gaat afstromen en zich in laagten verzamelt ontstaat natuurlijk wel een toename van inundatie-invloed.

Een hogere GVG zal – wanneer deze rond maaiveld ligt - moerasplanten (o.a. zeggen, riet e.d.) bevoordelen ten opzichte van soorten van drogere standplaatsen (grassen). Dit is het gevolg van een wat hogere waterverzadiging en meer zuurstofgebrek in de bodem. Het effect van een hogere GVG op de duur van het groeiseizoen kan wel eens teniet worden gedaan door de hogere bodemtemperatuur.

Ook het effect op de GLG is betrekkelijk gering; in het algemeen zal het leiden tot geringe verschuivingen in de soortensamenstelling of in de ligging van grenzen tussen vegetatietypen. In gebieden met een zwakke invloed van basenrijke kwel in de Gelderse Vallei bleek wel een vrij scherpe overgang te liggen van hoge naar lage basenverzadiging in het GLG-traject tussen ca. 70 en 90 cm-mv [Kemmers en Jansen, 1980]. Dit hangt samen met capillaire nalevering van basenrijk water en het opladen van het adsorptiecomplex in de periode dat er geen neerslag is. In dit soort gevallen kunnen geringe veranderingen in GLG vrij veel invloed hebben op de pH-buffering.

Scenario Droog is voor natte standplaatsen dramatisch, zowel met als zonder winning. De forse afname van GLG zal op basenrijke standplaatsen leiden tot meer berging van regenwater in de erop volgende natte periode, met verzuring als gevolg. Op veenbodems zal de mineralisatie sterk toenemen, veel (goed ontwikkelde) plantengemeenschappen zijn op veengronden beperkt tot GLG-waarden van minder dan ca. 40 cm-mv (zie Aggenbach *et al.*, 1998). De lagere GVG en GHG zullen leiden tot flinke verschuivingen in soortensamenstelling en /of in de ruimtelijke ligging van grenzen tussen vegetatietypen. Grondwaterstandsfluctuaties nemen sterk toe, waardoor aëratie van diepere bodemlagen kan optreden. In gebieden waar ondiep in het profiel pyriet is afgezet, o.a. in (lokale) kwelgebieden [zie Van Beek *et al.*,

2001], kan oxidatie van pyriet leiden tot sterke verzuring. De hogere temperatuur zal in het hoge en droge scenario leiden tot een verhoogde mineralisatiesnelheid en leiden tot een snellere turnover van nutriënten, dus eutrofiëring.

4.4.2 *Ecologische effecten in breder perspectief*

Klimaatverandering zal van invloed zijn op de mogelijkheden de Nederlandse natuur in stand te houden en verder te ontwikkelen. In het droge scenario zullen de gevolgen van klimaatverandering waarschijnlijk groot zijn. Te verwachten valt dat habitats zullen verschuiven, dat nieuwe habitats zullen ontstaan en wellicht dat bestaande habitats zullen verdwijnen. Het is de vraag hoe de aanwezige plant- en diersoorten op deze veranderingen zullen reageren. “Vreemde” warme soorten komen reeds ons land binnen en andere “koude” soorten staan gereed voor vertek (Levende natuur, 2003: themanummer klimaatverandering).

Hoe sluiten al deze veranderingen aan op onze natuurinspanningen? Het Nederlandse natuurbeleid is voor een belangrijk deel opgehangen aan natuurdoelen. De Ecologische Hoofdstructuur (EHS) is en wordt ingevuld met natuurdoeltypen en doelsoorten [Bal *et al.*, 2001]. Programma Beheer werkt met plusspakketten en meetsoorten. De Kaderrichtlijn water (KRW) moet leiden tot een goede ecologische toestand of een goed ecologisch potentieel die omschreven is in termen van fytoplankton, vegetatie, macrofauna en vissen. De habitatrichtlijn (HRL) werkt met habitattypen omschreven in termen van plantengemeenschappen [Schaminée *et al.*, 1995, 1996, 1998 en Stortelder *et al.*, 1999] en habitatrichtlijnsoorten als doel. Er zijn dus tal van ecologische doelen die we proberen te realiseren door het treffen van tal van (beheers)maatregelen. Wat de KRW en de HRL betreft zullen we zelfs afgerekend worden op het halen van de doelen.

Als we alle inspanningen om natuurdoelen te realiseren confronteren met de optredende klimaatverandering, dan komen tal van vragen op:

- Zijn de natuurdoelen in de toekomst nog wel bruikbaar? Ze zijn immers deels gebaseerd op historische referenties en bij het toekennen van de doelen is zeker geen rekening gehouden met klimaatverandering.
- Zullen sommige beschermde soorten verdwijnen door klimaatverandering? Moeten we dan nog wel geld en energie steken in de bescherming van deze soorten?
- Kan er bij het treffen van maatregelen om natuurdoelen te realiseren, rekening worden gehouden met klimaatverandering (zie onderstaand kader)? Onze effectvoorspellingsmodellen houden nog geen rekening met klimaatverandering. De bestaande ecologische relaties zijn wellicht niet meer bruikbaar.

Kader Waterwinning, natuurdoelen en klimaatverandering

In het kader van de Habitatrichtlijn zijn aan enkele beeksystemen kwetsbare natuurdoelen toegekend die een permanent stromende beek nodighebben. Om dat te realiseren zullen allerlei maatregelen getroffen moeten, zoals in enkele gevallen reductie of sluiting van nabijgelegen (drink)waterwinningen. Als deze maatregelen uitgevoerd worden, lijkt de kans zeer groot dat de gewenste doelen ook gerealiseerd kunnen worden. Klimaatverandering kan echter leiden tot een daling van de zomergrondwaterstand en een toename van extreem droge perioden in de zomer. De beek zal dan in de zomerperiode mogelijk droogvallen. Het risico is dus aanwezig dat na het treffen van maatregelen natuurdoelen toch niet gehaald worden, terwijl er wel hoge kosten zijn gemaakt.

5 Waterkwaliteit oppervlaktewater

5.1 Inleiding: het verband tussen klimaat en oppervlaktewaterkwaliteit

Er is relatief weinig onderzoek gedaan naar de invloed van het klimaat op de oppervlaktewaterkwaliteit. Veel meer onderzoek is gedaan naar waterkwantiteit en dan met name het aspect veiligheid in relatie tot hoge afvoeren. Dit betekent niet dat de waterkwaliteitseffecten niet significant zijn, maar wel dat ze nog niet volledig onderkend worden. Dit hoofdstuk gaat in op de vraag hoe en in welke mate klimaatverandering invloed kan hebben op de afvoer door de Rijn en de Maas (droogte en hoogwater) en de kwaliteit van het oppervlaktewater.

De doorwerking van klimaat naar oppervlaktewaterkwaliteit ligt vooral op het vlak van verminderde verdunning van stoffen bij lage afvoeren, veranderde intensiteit van chemische processen bij een temperatuursverandering en een veranderde aanvoer van stoffen als gevolg van een veranderde neerslagverdeling over het jaar.

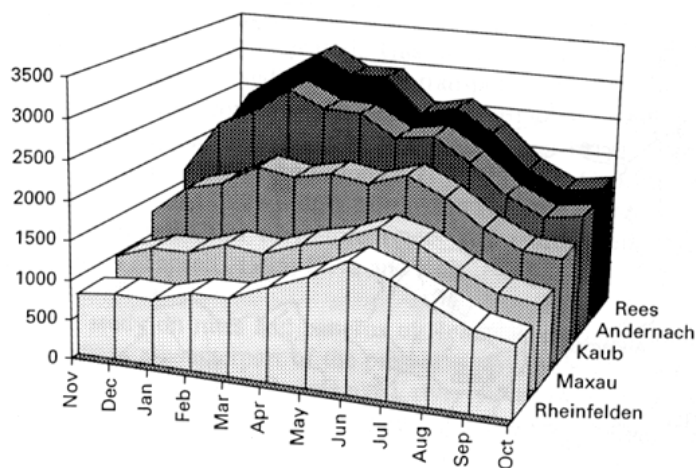
Wat betreft de gevolgen van klimaatverandering voor de afvoer van westeuropese rivieren wordt algemeen aangenomen dat hoogwaters en langdurige periodes van laagwater in de toekomst vaker zullen voorkomen en intenser zullen zijn [Middelkoop *et al.*, 2001]. Deze aanname, die overigens wetenschappelijk goed onderbouwd is door Middelkoop *et al.* [2001], wordt ondersteund door het grote aantal extreme hydrologische situaties in Europa in de afgelopen jaren. Voorbeelden hiervan zijn de extreem droge en hete zomer van 2003 en de overstromingen in Midden-Europa in 2002. Daarnaast werkt een temperatuursverandering van de atmosfeer direct door naar de oppervlaktewatertemperatuur.

In dit hoofdstuk worden de belangrijkste conclusies samengevat uit het onderzoek dat is uitgevoerd naar de invloed van klimaatverandering op de oppervlaktewaterkwaliteit. De belangrijkste bronnen voor dit hoofdstuk zijn geweest:

- J.J.G. Zwolsman en A. Doomen, 2005. Waterkwaliteit van de Rijn en de Maas bij (extreem) lage afvoeren. Kiwa-rapport KWR 05.061, in opdracht van de DPW-bedrijven.
- B. de Jong, 2006. Effects of global warming on floods and droughts and related water quality of rivers. Kiwa rapport BTO 2006.029 (s).
- A. van Bokhoven, 2006. The impact of climate change on the water quality of the Rhine River. Kiwa rapport BTO 2006.056 (s).
- J.J.G. Zwolsman en A. van Bokhoven, subm. Impact of summer droughts on water quality of the Rhine River - a preview of climate change?
- M. van Vliet en J.J.G. Zwolsman, 2006. Effects of Droughts and Floods on the Water Quality and Drinking Water Function of the river Meuse: a Preview of Climate Change? Proceedings NCR-dagen 2006.

5.2 De Rijn en de Maas

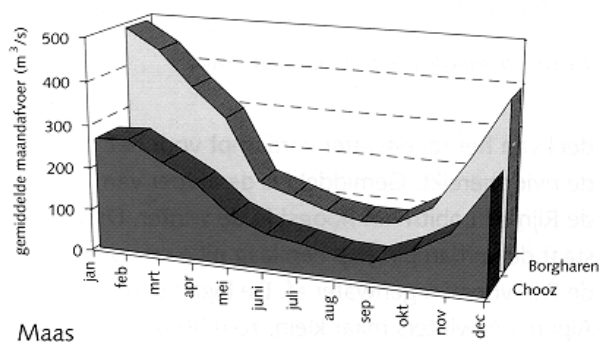
De Rijn is met 1320 km de langste rivier van West Europa. Het oppervlak van het stroomgebied is ongeveer 185.000 km² en ligt in 9 landen. Specifiek aan de Rijn is dat het een gemengde regen- en smeltwater rivier is. De belangrijkste zijrivieren zijn de Aare, de Neckar, de Main en de Mosel. Met name de Aare voert veel smeltwater aan vanuit het Alpiene gebied. De bijdrage van het alpiene gebied aan de afvoer van de Rijn varieert van 70% in de zomer tot 30% in de winter. Daarmee heeft het alpiene gebied een belangrijke invloed op het jaarrond verloop van de afvoer (zie figuur 29): Bij Rees, bij de Duits-Nederlandse grens, is de afvoer in de winter het hoogst, maar als gevolg van het smeltwater komt de afvoer in normale jaren ook in de zomer niet onder de 1200 m³/s.



Figuur 29 Typisch jaarrond verloop van de afvoer op verschillende locaties langs de Rijn.

Ongeveer de helft van het Rijnstroomgebied is in gebruik voor landbouw en er komen zes belangrijke industriële regio's langs de Rijn voor met onder andere chemische, metaalverwerkende, petrochemische en voedselverwerkende industrie.

Het stroomgebied van de Maas heeft een oppervlak van ongeveer 36.000 km². De Maas is een regenrivier. In het stroomgebied zijn geen grote watervoorraden in de vorm van sneeuw of gletsjers aanwezig. Seizoensfluctuaties zijn duidelijk merkbaar met hoge afvoeren in de winter en lage afvoeren in de zomer (zie figuur 30). Afvoerfluctuaties zijn groot door de deels slecht doorlatende ondergrond van de Ardennen waardoor neerslag snel oppervlakkig afstroomt. Bovendien is, door het kleine oppervlak van het stroomgebied, de kans groot dat er in het hele stroomgebied tegelijkertijd veel neerslag valt [Middelkoop, 1998].



Figuur 30 Typisch jaarrond verloop van de afvoer op twee locaties langs de Maas.

De frequentie van voorkomen van extreem lage en extreem hoge afvoeren kan veranderen wanneer het klimaat verandert. Voor de Maas wordt een toename van de afvoer in de winter en de lente verwacht en een afname van de afvoer in de zomer en de herfst. Bovendien voorspellen verschillende studies een toename van de frequentie en de intensiteit van periodes van droogte en extreem hoge afvoeren.

Voor de Rijn wordt dezelfde trend verwacht: ook een toename van droge en natte periodes en ook een hogere winterafvoer en een lagere zomerafvoer als gevolg van klimaatverandering. Deze verandering van de afvoer van de Rijn is het gevolg van een toename van de invloed van sneeuws melt en regenval op het debiet in de winter. Daarnaast neemt in de zomer de invloed van sneeuws melt af en van evapotranspiratie toe.

5.3 Gevolgen van lage afvoeren

Gevolgen van droogte op de oppervlaktewaterkwaliteit zijn onderzocht aan de hand van tijdreeksen van de droge jaren 1976 en 2003 op verschillende locaties langs de Rijn en de Maas [Zwolsman en Doomen, 2005; Van Bokhoven, 2006; Van Vliet, 2006]. In dit rapport ligt de nadruk op het droge jaar 2003 en de locaties Eijsden en Lobith. In het najaar van 2005 is overigens nog een extreem droge periode geweest. Meetgegevens van deze periode zijn nog niet geanalyseerd.

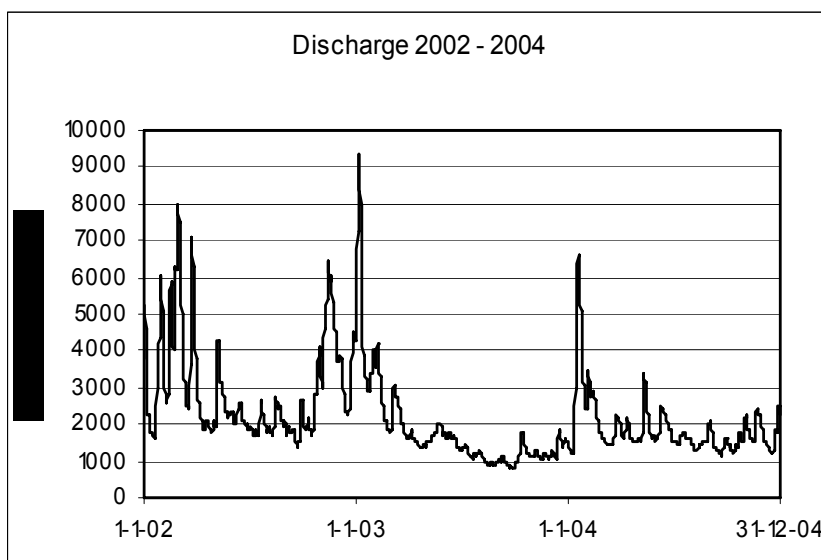
De gevolgen van de droge periode in 2003 zijn onderzocht door de tijdreeksen van verschillende stoffen van 2003 te vergelijken met de jaren 2002 en 2004. Door twee jaren te nemen die zo dicht bij het droge jaar liggen, kan aangenomen worden dat invloed op de waterkwaliteit van andere veranderingen in het stroomgebied (zoals veranderingen in landgebruik en emissiereductie) verwaarloosbaar is.

De gevolgen van de lage afvoer voor de waterkwaliteit in de Rijn en de Maas zijn samengevat in Tabel 8.

Tabel 8. Effecten van de droogte van 2003 op verschillende parameters ten opzichte van de omliggende jaren, in Rijn en Maas. (+ is toename, 0 is geen verschil, - is afname van concentraties).

Parameter	Rijn	Maas	Opmerking
Temperatuur	+	+	
Zouten	+	+	Tgv gebrek aan verdunning
Ammonium	+	+	Tgv gebrek aan verdunning
Nitriet	0	+	
Nitraat	0	-	Daling door verminderde aanvoer door gebrek aan neerslag, denitrificatie, opname door algen
Fosfaat	0	+	Tgv gebrek aan verdunning
Zuurstof		+	Overdag; algenbloei
Zware metalen	+	+/-	Minder verdunning/sedimentatie (Maas)

5.3.1 Rijn



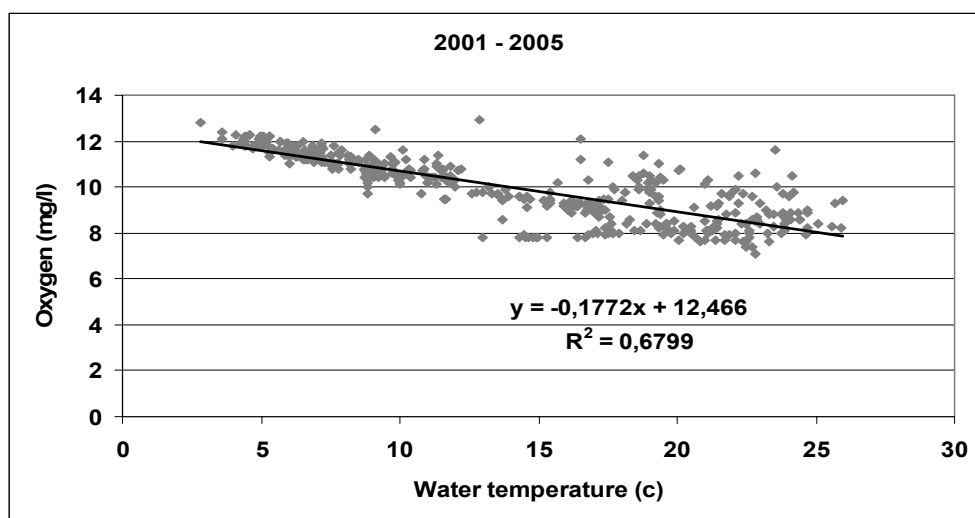
Figuur 31 Afvoer van de Rijn bij Lobith in 2003 en de referentie jaren 2002 en 2004.

De afvoerreeks laat zien dat in 2003 de afvoer gedurende een aantal weken (48 dagen) lager was dan 1000 m³/s en zelfs 5 dagen lager dan 800 m³/s. Deze droge periode viel overigens niet precies in de zomer, maar duurde tot ver in de herfst (oktober-november).

Uit de analyse van meetreeksen blijkt dat de droogte van 2003 negatieve gevolgen had voor de watertemperatuur, het trofieniveau, macro-ionen en zware metalen. De gevolgen voor ammonium waren beperkt in de Rijn en voor nitraat, nitriet en fosfaat was in de Rijn geen trend waarneembaar. Vergelijking met de droogteperiode van 1976 laat zien dat de negatieve gevolgen van droogte in 1976 veel groter waren dan in 2003. Dit geeft aan dat het gevolg van droogte groter is wanneer de waterkwaliteit onder normale omstandigheden slechter is.

Het zuurstofgehalte in de Rijn is in 2003 hoger dan in de referentie jaren. Met een maximumgehalte van 9,7 mg/l opgelost zuurstof was sprake van oververzadiging. Waarschijnlijk zijn de hoge zuurstofgehalten het gevolg van een toegenomen primaire productie, zoals het gehalte aan chlorophyll-a laat zien (zie verderop in deze paragraaf).

Het zuurstofgehalte uitgezet tegen de watertemperatuur laat een negatieve lineaire relatie zien (figuur 32). De grote afwijkingen boven de trendlijn bij een hoge watertemperatuur kunnen waarschijnlijk toegeschreven worden aan de primaire productie. Bij de hoogste watertemperaturen is de gemiddelde concentratie opgelost zuurstof nog steeds ongeveer 8 mg/l, wat nog ver boven het ecologisch minimum van 5 mg/l is. Hieruit is te concluderen dat het onwaarschijnlijk is dat lage zuurstofgehalten een probleem gaan worden in de Rijn.



Figuur 32 Scatterplot van zuurstof tegen watertemperatuur van de periode 2001-2005, te Lobith.

In het algemeen is het gehalte aan chlorophyll-a, wat een maat is voor de algenconcentratie, laag in de herfst en de winter en hoog in de lente en de zomer. Over de afgelopen decennia is het chlorophyll-gehalte sterk afgenomen als gevolg van een afname van de nutriëntenvrucht. Tijdens een droge periode is het chlorophyll-gehalte in de zomermaanden juni, juli en augustus duidelijk hoger dan onder gemiddelde condities (tabel 9). De hoge watertemperatuur en de langere verblijftijd bevorderen algenbloei tijdens droogte.

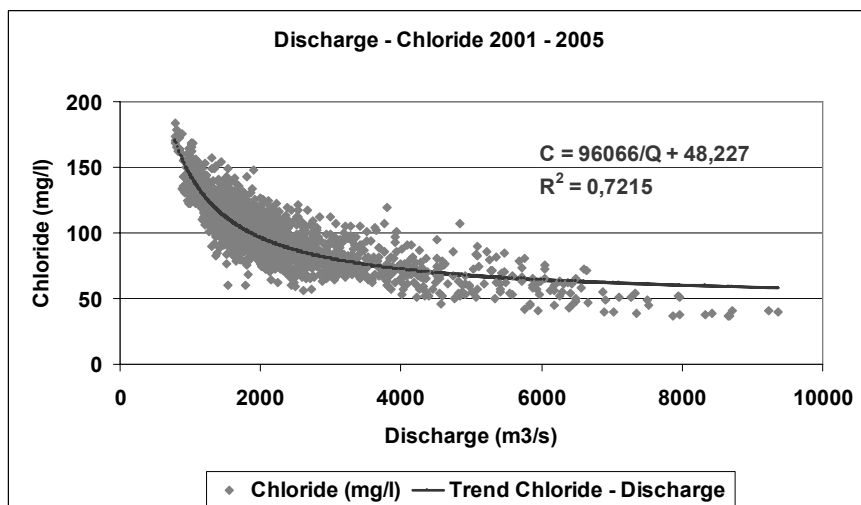
Tabel 9 Minimale, maximale en gemiddelde waarden van het gehalte chlorophyll-a ($\mu\text{g/l}$) in de maanden juni, juli en augustus van het droge jaar 2003 en de twee referentie jaren (Lobith).

Zomer	n	Chl-a min	Chl-a max	Chl-a avg
2002	6	2	30	15
2003	6	3	40	26
2004	6	5	18	11

De ionen chloride, bromide, fluoride, sulfaat en natrium zijn niet-reactief in water. Daardoor zijn de gehalten afhankelijk van de antropogene aanvoer van de stoffen, de achtergrondconcentratie en de afvoer volgens de vergelijking:

$$C = \frac{a}{Q} + b$$

Hierin is C de concentratie (mg/l), Q de afvoer (m^3/s), a de antropogene aanvoer (g/s) en b de achtergrondconcentratie (mg/l). Figuur 33 geeft een voorbeeld van de relatie tussen afvoer en de concentratie van een niet-reactieve stof (chloride in dit geval). Tijdens lage afvoeren komen hoge gehalten voor als gevolg van de beperkte verdunning van de min of meer constante antropogene aanvoer.



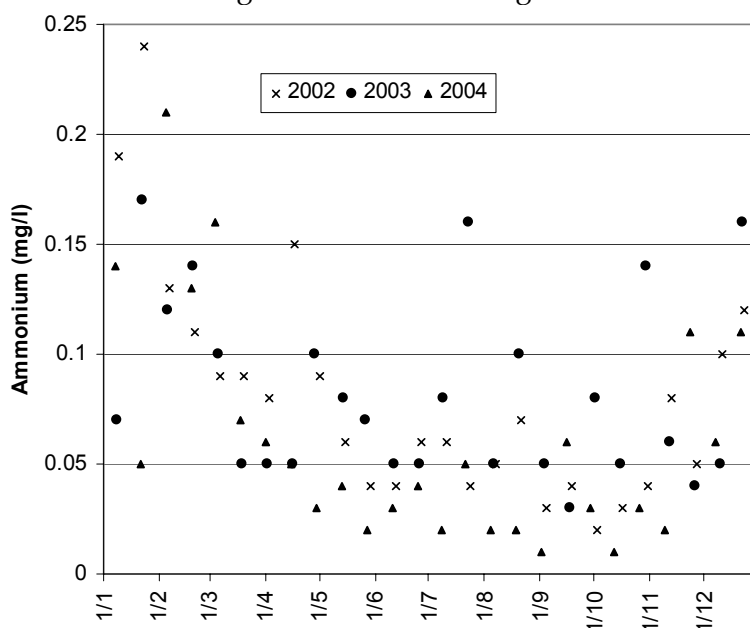
Figuur 33 Verband tussen chloridegehalte en afvoer bij Lobith over de periode 2001-2005.

Vanaf het midden van de jaren '70 is de antropogene aanvoer van chloride en natrium met ongeveer 50% verminderd, met name als gevolg van de lagere aanvoer vanuit de kaliummijnen in de Elzas. Daardoor wordt de drinkwaternorm van 150 mg/l tegenwoordig nauwelijks meer overschreden in de Rijn. Ook de sulfaat- en fluoride-aanvoer is afgenomen sinds de jaren '70, maar deze stoffen vormden ook in de jaren '70 geen probleem voor de drinkwaterproductie uit Rijnwater.

Figuur 33 laat echter zien dat klimaatverandering deze positieve trend kan veranderen. In de droogteperiode van 2003 werd een maximumgehalte chloride van 184 mg/l gemeten. Daarmee overschreed het de drinkwaternorm van 150 mg/l en benaderde het de grens voor inname van water voor drinkwaterbereiding van 200 mg/l. Met de toekomstige klimaatscenario's kunnen de zomerafvoeren nog lager worden dan in 2003, volgens Shabalova en Van Deursen [2003] zelfs tot 30% lager aan het einde van de 21^e eeuw. Onder deze omstandigheden zal het chloridegehalte de grens van 200 mg/l overschrijden bij de huidige belasting.

De verhoging van het bromidegehalte tijdens lage afvoeren kan voor problemen zorgen bij drinkwaterproductie. Wanneer ozon wordt gebruikt voor desinfectie van drinkwater kan namelijk uit bromide het potentieel carcinogene bromaat gevormd worden. Bromide bereikt vrij hoge gehalten bij de laagste afvoeren (tot 300 µg/l in de periode 2003-2005). Daardoor hoeven slechts enkele procenten van de bromidevracht omgezet te worden in bromaat om de WLB-norm voor bromaat te overschrijden. In geval van ozonisatie geldt de WLB-norm van 5 µg/l als 90-percentiel, bij andere zuiveringstypen geldt 0,5 µg/l.

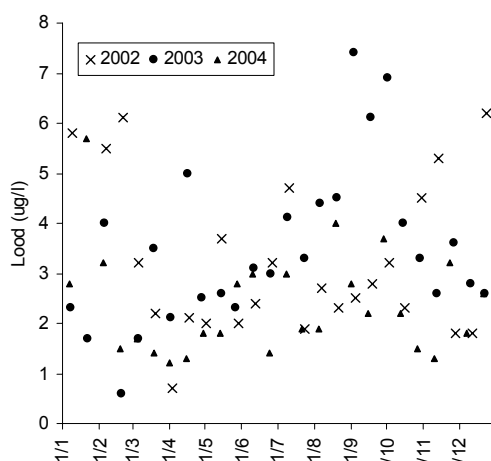
Van de nutriënten heeft ammonium hogere gehalten tijdens droge zomers (zie figuur 34). Deze hogere gehalten zijn het gevolg van de beperkte verdunning van afvalwaterlozingen, die een constante aanvoer van ammonium geven. In verhouding tot de seizoensdynamiek in de ammoniumgehalten is het verschil tussen de droge jaren en de referentiejaren echter beperkt. Deze seizoensdynamiek hangt samen met de temperatuur als gevolg van het positieve verband tussen temperatuur en nitrificatiesnelheid. Bij hogere temperaturen vindt meer nitrificatie plaats waardoor de ammoniumgehalten lager zijn. Netto zullen de te verwachten hogere watertemperatuur en lagere afvoer niet tot een significante verandering van het ammoniumgehalte leiden.



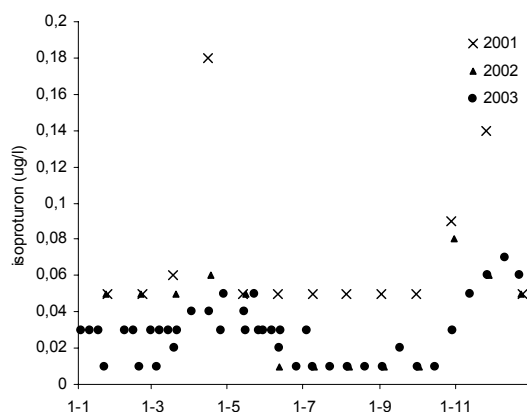
Figuur 34 Concentratie Ammonium bij Lobith in 2002, 2003 en 2004.

Nitraat, nitriet en fosfaat laten geen duidelijk verband zien met droogte. Het is aannemelijk dat een toename van het nutriëntengehalte gecompenseerd wordt door een toename van de primaire productie. Daarnaast zal het nitraatgehalte dalen als de denitrificatie in de rivierbedding toeneemt bij hogere temperaturen.

Over het algemeen neemt het zware metalengehalte toe tijdens droogte als gevolg van de verminderde verdunning. In 2003 is dit effect zichtbaar, maar klein vanwege de tegenwoordig beperkte aanvoer van zware metalen (figuur 35). In de jaren '70 was de zware metalenvracht veel groter waardoor voor deze periode de gevolgen van droogte wel duidelijker zichtbaar zijn. De kleine stijging van het metalengehalte vormt geen probleem voor de drinkwaterproductie omdat de gehalten ruim onder de normen blijven. Voor lood is de BKMO-norm 30 tot 50 µg/l, afhankelijk van het type zuivering. Bovendien kunnen de meeste zware metalen (met uitzondering van nikkel) bij eenvoudige zuivering efficiënt verwijderd worden.



Figuur 35 Loodconcentratie (µg/l) bij Lobith in 2003 en twee referentie jaren.



Figuur 36 Concentratie isoproturon (µg/l) bij Lobith in 2003 en twee referentie jaren.

De invloed van het klimaat op bestrijdingsmiddelen is niet aantoonbaar. De gehalten worden met name door de dynamiek in het gebruik bepaald

(seizoensgebonden toepassing), en pas in tweede instantie door variatie in de afvoer. Voor isoproturon heeft RIWA-Rijn een norm opgesteld van 0,1 µg/l

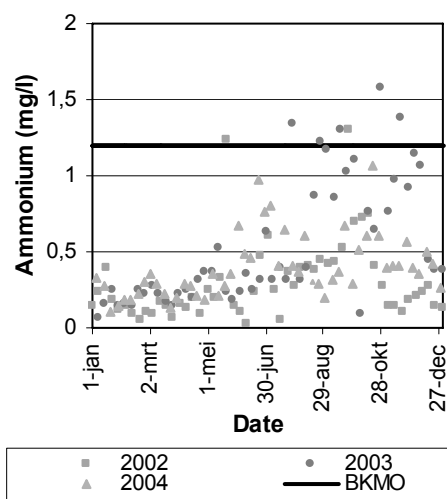
5.3.2 Maas

Anders dan in de Rijn, nam het nitraatgehalte in de Maas bij Eijsden duidelijk af tijdens de droge periode en de ammonium- en nitrietgehaltes namen significant toe (figuur 37). In de Maas stegen (zoals in de Rijn) ook de gehalten aan conservatieve stoffen (fluoride, bromide, chloride, sulfaat en natrium), zie figuur 38. Met name de BKMO-norm voor fluoride van 1 mg/l en daarnaast ook de norm voor ammonium van 1,2 mg/l werden in 2003 overschreden bij Eijsden.

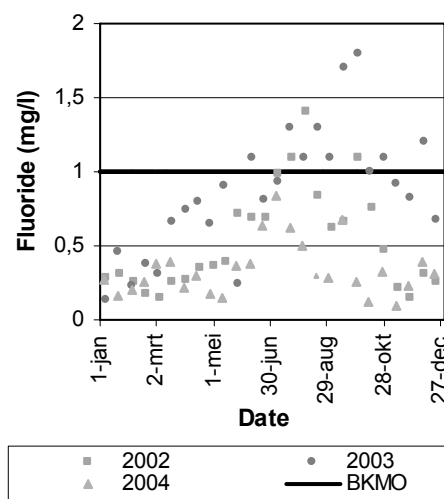
De stijging van de conservatieve stoffen en ammonium zijn grotendeels het gevolg van de verminderde verdunning van deze stoffen bij lage afvoeren. Van de seizoensdynamiek in het ammoniumgehalte, zoals in de Rijn was waargenomen, lijkt in de Maas geen sprake (zie figuur 37).

De daling van het nitraatgehalte is waarschijnlijk het gevolg van een lagere aanvoer van nitraat door gebrek aan neerslag en uit- en afspoeling van de bodem. Mogelijk spelen ook verhoogde denitrificatie en de opname van nitraat door algen een rol. In de Rijn was in het nitraatgehalte geen trend zichtbaar, waarschijnlijk als gevolg van verminderde verdunning in combinatie met een toenemende primaire productie en denitrificatie.

De overdag gemeten zuurstofgehalten waren hoger in de droge periode van 2003. De pieken in het zuurstofgehalte vallen samen met algenbloei.



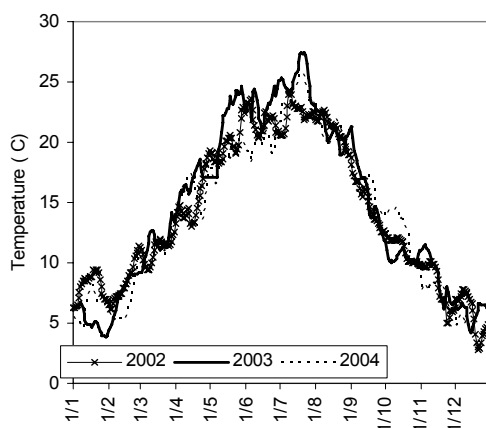
Figuur 37 Toename van ammonium bij Eijsden tijdens de droogte van 2003.



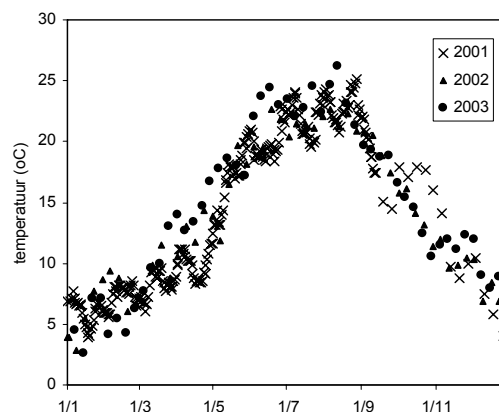
Figuur 38 Toename van fluoride bij Eijsden in 2003 en ruime overschrijding van de BKMO-norm.

5.4 Invloed van verhoogde temperatuur

Het seizoenspatroon van de watertemperatuur in de Rijn en de Maas is zeer duidelijk (figuur 39 en figuur 40). Tijdens de zomer van 2003 is de watertemperatuur in de Rijn en de Maas aanzienlijk hoger dan in de referentie jaren. In 2003 was de maximale temperatuur in de Rijn bij Lobith 27,5 °C, ruim boven de ecologische grens en BKMO-norm van 25 °C. Bij Eijsden werd de norm van 25 °C eenmaal overschreden in 2003 met een meetwaarde van 26,2 °C.

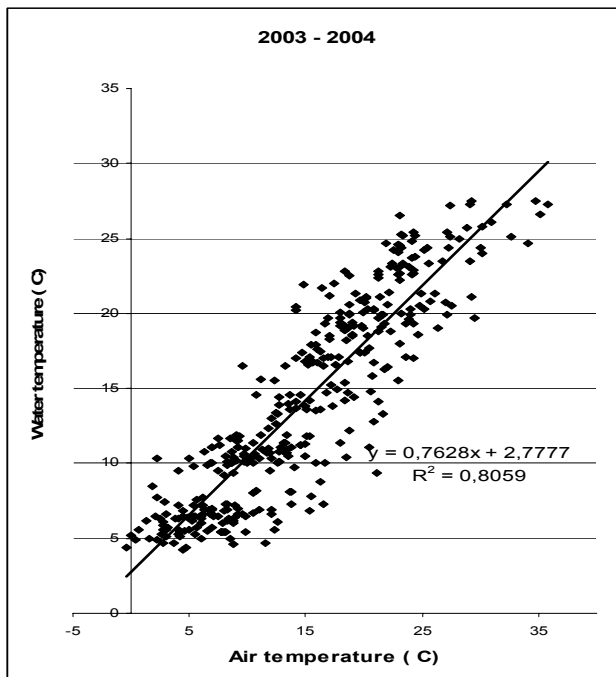


Figuur 39 Watertemperatuur van de Rijn bij Lobith in 2002-2004.



Figuur 40 Watertemperatuur van de Maas bij Eijsden in 2001-2003.

Er is een duidelijk positief verband tussen atmosferische temperatuur en watertemperatuur (zie figuur 41). Bij de verschillende klimaatscenario's van het KNMI, die alle vier een stijging van de atmosferische temperatuur voorspellen, is daarom te verwachten dat de maximale temperatuur in de rivieren zal stijgen. Hierdoor zal de norm van 25 °C vaker overschreden worden.



Figuur 41 Het verband tussen de maximale luchttemperatuur en de watertemperatuur om 12:00u bij Lobith van juli 2003 t/m juni 2004.

Bij een hogere watertemperatuur zal over het algemeen de biologische activiteit in oppervlaktewater toenemen. Algenbloei kan toenemen (zie tabel 9).

Bij een toename van de algengroei zullen gehalten aan nitraat, nitriet en ammonium afnemen. Daarnaast zal door een hogere temperatuur van het ingenomen water de microbiologische activiteit in het distributienetwerk toenemen (o.a. legionella).

Naast deze biologische gevolgen, zal een temperatuurstijging ook gevolgen hebben voor de chemische processen in het oppervlaktewater.

5.5 Hoge afvoeren

Voor zowel de Rijn als de Maas worden hogere winter- en herfstafvoeren verwacht. Daarnaast zullen ook vaker zware regenbuien voor gaan komen en zal de invloed van 'first-flush events' op de waterkwaliteit groter worden.

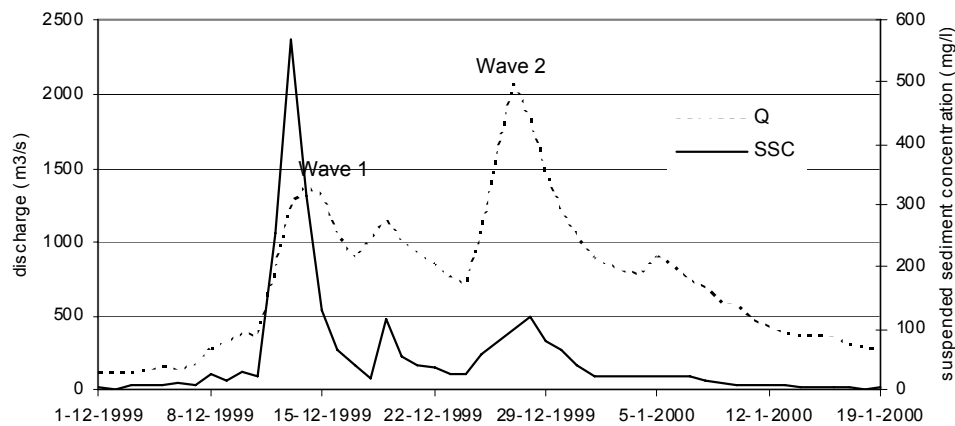
In het algemeen zijn door de verhoogde maximale afvoer de volgende trends te verwachten:

- Een toename van de hoogste zwevend stofgehaltenes en daarmee
- Een toename van gehalten aan sediment gebonden zware metalen. Het totale gehalte aan zware metalen heeft ook een duidelijk positief verband met de afvoer en zwevend stofgehalte op de schaal van een afvoergolf. Over langere periodes is het verband tussen totale metalen en zwevend stof minder sterk vanwege de opgeloste fractie. De

gehalten opgeloste metalen zijn negatief gecorreleerd aan debiet (en daarmee aan zwevend stof) vanwege het verdunningseffect.

- Een toename van de hoogste gehalten aan sediment gebonden PAK's.
- Een toename van de hoogste gehalten aan sediment gebonden totaal fosfaat.
- Een afname van de gehalten aan conservatieve stoffen.

Bij 'first flush events', de eerste afvoergolf na een (lange) periode van droogte) kan de aanvoer van stoffen vanuit de bodem en van verharde en onverharde oppervlaktes tijdelijk sterk toenemen. De stoffen kunnen tijdens droogte accumuleren op en in de bodem en op verharde oppervlaktes en spoelen bij de eerstvolgende bui in hoge concentraties af. Afstroming naar het oppervlaktewater leidt direct tot hogere gehalten. Ook kunnen rwzi's de grote aanvoer van water tijdens deze hevige buien vaak niet aan wat resulteert in een piekbelasting van verschillende stoffen, onder andere door overstorten.



Figuur 42 Het debiet (Q) en zwevend stofgehalte (SSC) bij een first flush event (wave 1) en een daaropvolgende afvoergolf (wave 2), in de Maas bij Eijsden.

De verhoogde aanvoer geldt voor zwevend stof (zie figuur 42), nitraat, nitriet en ammonium. Of een toegenomen aanvoer van nitraat, nitriet en ammonium ook resulteert in hogere gehalten in het oppervlaktewater is afhankelijk van de watertemperatuur en de primaire productie. Daarnaast is ook de aanvoer van PAK's, pesticiden, herbiciden, overige organische microverontreinigingen en zware metalen verhoogd tijdens first flush events.

6 Risico-analyse verzilting

6.1 Versterkte intrusie van zeewater in het oppervlaktewater

6.1.1 Inleiding

Verzilting van het oppervlaktewater in West Nederland door verhoogde waterstanden op zee kan belangrijke consequenties hebben voor de drinkwatervoorziening in West Nederland. Deze analyse beperkt zich tot de Rijn-Maas monding. De Rijn-Maas monding wordt hier gedefinieerd als het gebied dat door zoutindringing vanuit zee wordt beïnvloed.

Om de consequenties van verzilting voor de drinkwaterproductie te kunnen kwantificeren is kennis nodig van de waterbeweging in het gebied. De waterbeweging in de Rijn-Maas monding wordt vooral bepaald door de volgende factoren [Steenkamp, 2002]:

- de binnendringing van het getij vanuit zee;
- de aanvoer van water door de rivieren;
- de wind en
- het bedieningsprogramma van de Haringvlietsluizen (afhankelijk van de rivierafvoer).

De verhoging van de chlorideconcentratie in het benedenrivierengebied door zoutindringing vanuit zee (in het vervolg zoutindringing of externe verzilting genoemd) is in de tijd zeer variabel. Er zijn verschillende factoren die invloed hebben op de mate van zoutindringing. Een aantal van deze factoren zijn aan elkaar gerelateerd en een aantal factoren beïnvloeden elkaar. Dit maakt het zoutindringingssysteem complex.

De voor zoutindringing bepalende factoren zijn:

- de verhouding tussen zeestand en debiet van Rijn en Maas;
- de gelaagdheid in het zoutgehalte van de waterkolom: zoet water op zout water;
- de weerstand van de geulen;
- specifieke stromingssituaties en stroming bij splitsingen en mondingen;
- zijdelingse wateronttrekkingen en -lozingen;
- het bedieningsprogramma van de Haringvlietsluizen.

Belangrijk is dat de effecten van klimaatwijziging niet kunnen worden beschouwd zonder een kwantitatieve inschatting van de effecten van civiel-technische ingrepen en (overige) autonome ontwikkelingen. Onder autonome ontwikkelingen vallen de ontwikkelingen in de bodemhoogte van de verschillende geulen, de ontwikkeling van de waterhoogte en getijslag. Deze autonome ontwikkelingen zijn het gevolg van natuurlijke processen zoals erosie, sedimentatie en zeespiegelstijging. Daarnaast wordt onderhoudsbaggerwerk als autonome ontwikkeling gezien.

In 2003 zijn extreem ver landinwaarts hoge zoutgehaltes gemeten als gevolg van zoutindringing vanuit zee. In dit hoofdstuk wordt eerst een analyse gegeven van de zoutindringing in 2003 (inclusief een vergelijking met 1976). Daarna worden de effecten van toekomstige ontwikkelingen, inclusief klimaatverandering, in perspectief geplaatst en worden de effecten van klimaatverandering op de drinkwaterfunctie beschreven. Tenslotte worden maatregelen en oplossingsrichtingen gepresenteerd.

6.1.2 Zoutindringing in 2003

Analyse gegevens

De extreme zoutindringing in 2003 [Rijkswaterstaat, 2004] wordt vaak vergeleken met de situatie in het droge jaar 1976. In 1976 trad ook instroming van zout water op, maar opvallend is dat, ondanks dat een deel van de randvoorwaarden in 2003 gunstiger was, de zoutindringing in 2003 hoger was dan in 1976. De randvoorwaarden waren als volgt:

- Over het algemeen was de afvoer van Rijn en Maas in juli t/m oktober 1976 lager dan in 2003. Alleen in de maanden augustus en september was de gemiddelde afvoer in 1976 hoger.
- De gemiddelde concentratie in het bovenstroomse rivierwater was in juli t/m oktober 1976 twee keer zo hoog als in 2003 (262 mg/l in 1976 en 131 mg/l in 2003).
- De verhouding tussen hoogste waterstand op zee en laagste waterstand van de rivier (de HL-parameter) was in 1976 lager dan in 2003 (zie Tabel 10). Het gemiddelde was in juli t/m oktober 2003 hoger, evenals het maximum als gevolg van harde wind en storm in 2003. Het getijverloop is dus voor het waterbeheer in 2003 ongunstiger geweest dan in 1976.

Tabel 10 De waarden van de HL-parameter in de periode juli t/m oktober van 1976 en 2003.

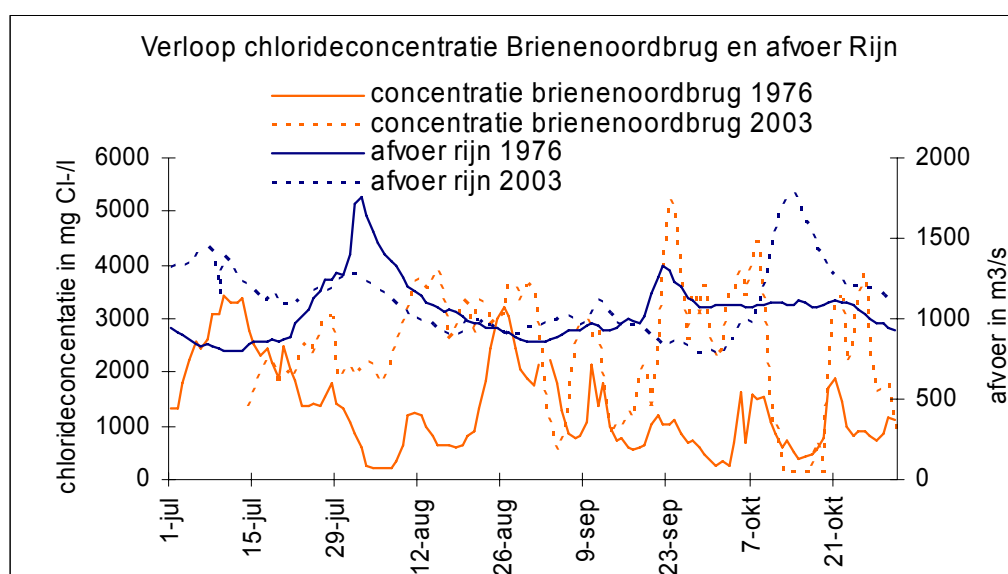
HL-parameter (cm)	1976	2003
Gemiddeld	89	98
Maximum	144	155
Aantal malen HL>140	1	5

Uit metingen is gebleken dat de chlorideconcentratie in de Rijn-Maas monding in juli t/m oktober 2003 hoger was dan in 1976 (zie Tabel 11). Bij de Van Brienenoordbrug waren de maximale concentratie en het gemiddelde in 2003 duidelijk hoger dan in 1976. Het minimum was lager in 2003 door de afname van de zoutaanvoer vanuit bovenstroomse richting. Op de Hollandsche IJssel, bij Krimpen a/d IJssel, zijn de verschillen in het chloridegehalte kleiner, maar zowel het maximum als het gemiddelde waren in 2003 hoger dan in 1976. Het minimum was in 2003 iets lager.

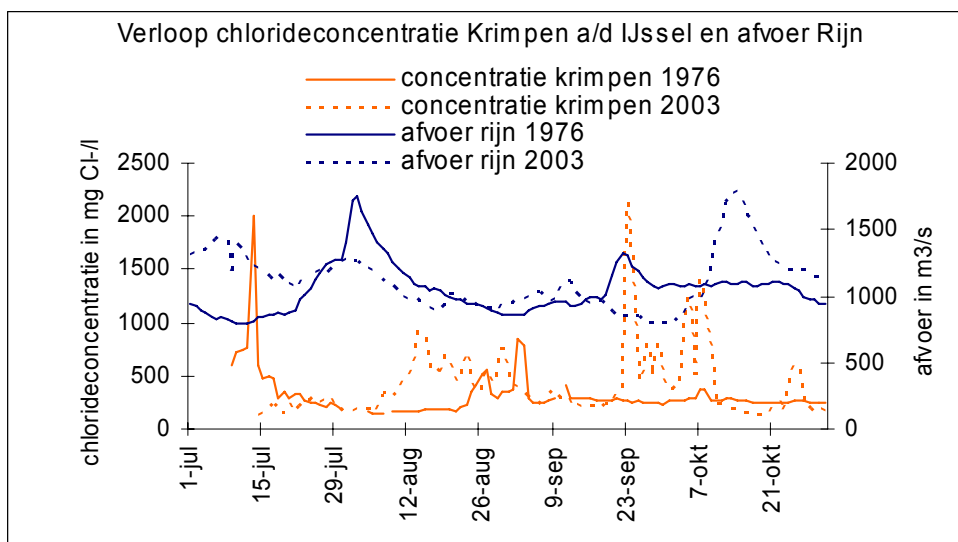
Tabel 11 Vergelijking tussen de chloride concentraties (in mg/l) bij de Van Brienenoordbrug en Krimpen a/d IJssel in 1976 en 2003

	Van Brienenoordbrug		Krimpen a/d IJssel	
	1976	2003	1976	2003
Maximum Cl	3410	5219	2000	2127
Gemiddelde Cl	1332	2401	312	397
Minimum Cl	200	123	145	126

Figuur 43 en figuur 44 geven de tijdreeksen van het debiet bij Lobith en de chlorideconcentraties bij de Van Brienenoordbrug en Krimpen a/d IJssel van juli tot en met oktober van de jaren 1976 en 2003. Wat opvalt is dat het debiet bij Lobith in augustus en september 2003 over het algemeen wat lager was dan in 1976. De Rijnaafvoer bij Lobith komt van half juli tot oktober 2003 niet boven 1200 m³/s. In de Maas (Lith) kwam de afvoer niet boven 100 m³/s. In 1976 was de lengte van de aaneengesloten periode van lage afvoer iets korter. Door deze langdurige lage afvoer is het systeem (in 1976 en 2003) erg gevoelig voor extreme zoutindringing. Bij afvoeren lager dan 1200 m³/s bestaat het gevaar dat de monding van de Hollandsche IJssel verzilt.



Figuur 43 Chloride concentratie in 1976 en 2003 bij de Van Brienenoordbrug, afvoer bij Lobith [Rijkswaterstaat, 2004].



Figuur 44 Chloride concentratie in 1976 en 2003 bij Krimpen a/d IJssel, afvoer bij Lobith [Rijkswaterstaat, 2004].

Naast deze lage afvoeren vond er in 2003 een verhoging van de waterstanden op zee plaats door sterke wind op 11 september en in de periode 7 t/m 11 oktober. De verhoging was 0,40 tot 0,90 m. Door de combinatie van windopzet met lage afvoer kwam de HL-parameter regelmatig ruim boven de 100 cm en 5 maal boven 140 cm met een maximum van 155 cm op 9 oktober. In 1976 was het maximum 144 cm (op 10 september) en dat was de enige keer dat de waarde boven 140 kwam (zie tabel 12). In het algemeen geeft een HL vanaf 100 cm een merkbare verhoging van de verzilting.

Bij de Van Brienenoordbrug was de chloride concentratie over bijna de hele periode in 2003 duidelijk hoger dan in 1976. Dit wordt ook aangegeven door de hoge maximale en gemiddelde waarde van juli t/m oktober 2003 in Tabel 12. Het maximum van 5219 mg/l trad op op 23 september bij een HL-waarde van 138 cm en een debiet van 840 m³/s. In 1976 trad het maximum van 3410 mg/l op op 10 juli. De HL-waarde was toen 95 cm en het debiet 750 m³/s.

Bij Krimpen a/d IJssel, aan de monding van de Hollandsche IJssel, kwam de maximum chloride concentratie in 2003 twee maal ver boven 1000 mg/l: 2125 mg/l, net als bij de Van Brienenoordbrug op 23 september en 1400 mg/l bij een HL-waarde van 144 cm op 7 oktober. Het debiet was bij deze twee maxima 840 en 970 m³/s. Deze maxima traden overigens op bij laagwater. In 1976 trad het maximum van 2000 mg/l op op 13 juli. De HL-waarde was toen 120 cm en het debiet bereikte toen het minimum van 795 m³/s.

Tabel 12 Chloride concentratie, debiet en HL-waarde bij het optreden van de chloride maxima in 1976 en 2003 bij de Van Brienenoordbrug en Krimpen aan de IJssel.

Van Brienenoordbrug	Datum	Chloride-maximum (mg/l)	Debiet (m ³ /s)	HL (cm)
1976	10 juli	3410	750	95
2003	23 sept	5219	840	138

Krimpen a/d IJssel	Datum	Chloride-maximum (mg/l)	Debiet (m ³ /s)	HL (cm)
1976	13 juli	2000	795	120
Sept-2003	23 sept	2125	840	138
Okt-2003	7 okt	1400	970	144

Bij het optreden van de maxima bij de Van Brienenoordbrug en bij Krimpen a/d IJssel was dus de HL-waarde in 2003 duidelijk hoger dan in 1976. Het debiet was bij het optreden van de maxima in 1976 juist iets lager dan in 2003.

Mogelijke oorzaken voor de hogere concentraties in 2003

Door Rijkswaterstaat [2004] worden als mogelijke oorzaken voor de verhoogde concentratie in 2003 genoemd:

- verschillen in meetapparatuur,
- de hogere HL-parameter in 2003,
- veranderingen in het Noordelijk Deltabekken,
- de opening van de Beerdam in 1997 en
- veranderd innamebeleid bij Gouda.

Naast bovengenoemde oorzaken kunnen ook andere factoren een rol hebben gespeeld bij de hoge zoutindringing in 2003, namelijk:

- LH-parameter. Hiervoor dient nagegaan te worden of de LH-parameter in 2003 lager was dan in 1976. Dit kan duiden op een beperktere terugstroom van zout water bij eb in 2003.
- Het is de vraag of de gelaagdheid van het zoete water op het zoute water in 2003 anders was dan in 1976. Een sterkere gelaagdheid kan leiden tot een grotere zoutindringing. Bovendien zou het kunnen voorkomen dat bij eb een beperkte terugstroom van zout water onderin de waterkolom plaatsvindt door de lagere stroomsnelheden aan de bodem. Als dit onderste water ook nog eens veel zouter is door gelaagdheid, kan dit na verloop van tijd tot verzilting in bovenstroomse richting leiden.
- Het waterstandsverloop in de getijperiodes voorafgaand aan de maximale zoutindringing. Dit sluit aan bij de eerste twee punten. Bepaalde omstandigheden in het waterstandsverloop (welke omstandigheden is niet duidelijk) kunnen bij opeenvolgende getijdeslagen verzilting in de hand werken.
- De afgenomen weerstand van de geulen door de daling van de bodem van de Nieuwe Waterweg, de Beneden Merwede en de Boven Merwede,

door verruiming van de Dordtsche Kil en door verdieping van de vaargeulen van de toegang van Europoort naar zee.

- Variatie in de lokale stromingssituaties waardoor in 1976 de zoutindringing minder op de monding van de Hollandsche IJssel was gericht dan in 2003. De stromingssituatie was in 1976 waarschijnlijk anders dan in 2003. In 2003 trad bijvoorbeeld achterwaartse verzilting op waarbij het zoute water via de Nieuwe Waterweg, de Oude Maas en het Spui het Haringvliet op gaat. In 1976 was dat waarschijnlijk, gezien de lagere HL-waarde, niet het geval. Of en hoe dat invloed heeft gehad op de verzilting van de Hollandsche IJssel is niet bekend.

Synthese

Bij vergelijking van de droge jaren 2003 en 1976 blijkt dat de maximale concentraties bij Krimpen a/d IJssel en de Van Brienenoordbrug in 2003 hoger waren dan in 1976. Dit verschil is met de randvoorwaarden (HL parameter, rivierafvoer en bovenstroomse chloride concentraties) niet volledig te verklaren. Het is wel aannemelijk dat in ieder geval de HL-parameter aan de verhoging in 2003 heeft bijgedragen; deze was in 2003 hoger dan in 1976 door de windopzet op zee. Daarnaast hebben mogelijk ook andere factoren, zoals de mate van terugstroom bij eb, gelaagdheid en lokale stromingssituaties, een rol gespeeld.

6.1.3 Toekomstige ontwikkeling

De verwachting is dat toekomstige ontwikkelingen en ingrepen in het gebied resulteren in veranderingen in de mate van (externe) verzilting. Het gecombineerde effect van deze ontwikkelingen en ingrepen bepaalt uiteindelijk de toekomstige zoutindringing in de Rijn-Maas monding en de gevolgen hiervan voor gebruiksfuncties van het watersysteem (richtjaar 2050).

De belangrijkste ontwikkelingen en ingrepen in de Rijn-Maas monding zijn:

- Klimaatverandering
- Implementatie De Kier
- Zoetwatervoorziening Volkerak-Zoommeer
- Zoetwaterbehoefte regionale watersystemen
- Aanleg Tweede Maasvlakte
- Ontwikkeling stadregio Rotterdam

Jacobs *et al.* [2000] beschrijven de effecten van klimaatverandering op zoutindringing in de Rijn-Maas monding aan de hand van frequenties van voorkomen. Daarnaast zijn in het kader van de Zoetwaterverkenning Midden-West Nederland [Jacobs *et al.*, 2004] aan de hand van karakteristieke jaren scenarioberekeningen uitgevoerd voor de Rijn-Maas monding. Beide studies concluderen dat de effecten van klimaatverandering (verhoogde zeespiegelstijging en verlaagde bovenstroomse afvoer) het grootst zullen zijn langs de Noordrand en in het middendeel van de Rijn-Maas monding. Extra zoutindringing vindt waarschijnlijk ook plaats in het zuidelijke deel van de Rijn-Maas monding (Haringvliet) door frequenter optreden van achterwaartse verzilting (via de Oude Maas). Op locaties dichtbij zee draagt

externe verzilting van het watersysteem door zeespiegelstijging sterker bij aan de toename van de verzilting van het oppervlaktewatersysteem dan verzilting door lagere bovenstroomse afvoeren. Verhoogde zoutindringing uit zee heeft waarschijnlijk geen invloed op de locaties in het oostelijke deel van het gebied (Lek, Amer, Beneden-Merwede, Nieuwe Merwede). In de uitgevoerde studies zijn extreem lage afvoeren echter niet meegenomen.

Uit de resultaten van de modelberekeningen volgt dat de frequentie van stormen op zee zeer belangrijk is voor de mate van zoutindringing [Struijk & Jacobs, 2005a]. Als voorbeeld bespreken we de locatie Ridderkerk. Uitgaande van een jaargemiddelde chlorideconcentratie in de Rijn van 113 mg/l wordt voor het karakteristieke jaar 2003 met alleen astronomisch getij een jaargemiddelde chlorideconcentratie bij Ridderkerk berekend van 144 mg/l. Wanneer wel het optreden van stormen wordt meegenomen in de berekeningen, neemt de jaargemiddelde chloride concentratie bij Ridderkerk toe tot 178 mg/l. De toename in chlorideconcentratie verdubbelt dus op deze locatie (van 31 mg/l Cl met alleen astronomisch getij naar 65 mg/l Cl, wanneer ook rekening wordt gehouden met de opgetreden stormen in 2003).

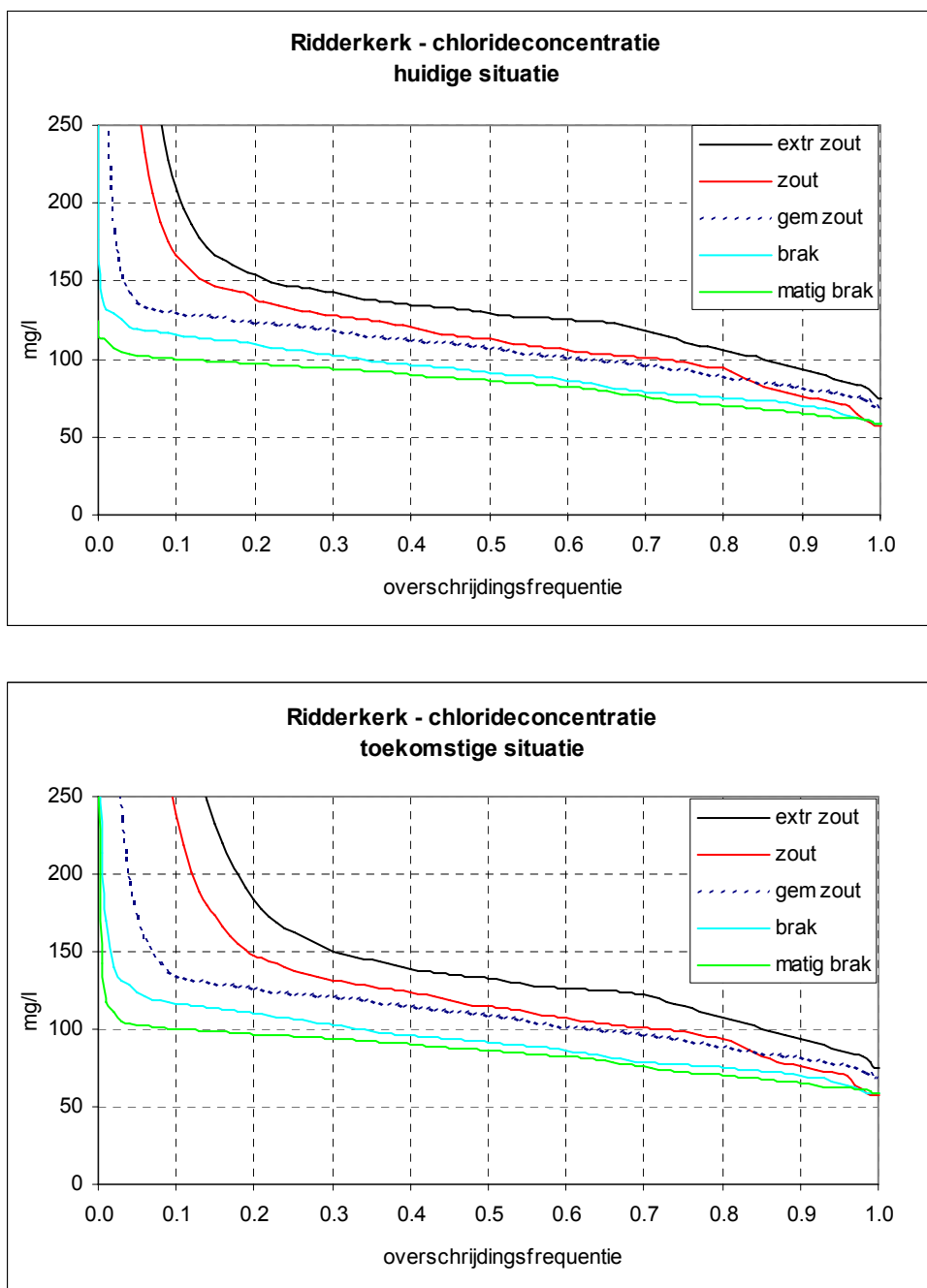
In een toekomstige situatie zullen stormen mogelijk frequenter samenvallen met lagere afvoeren. Dit kan leiden tot verhoogde zoutindringing. Dit is een belangrijk aandachtspunt voor vervolgonderzoek. De aandacht zou zich hierbij moeten richten op de gevoeligheid van zoutindringing voor kleine variaties in de duur en intensiteit van stormen, evenals op de periode in het jaar waarin deze voorkomen (en het samenvallen van stormen met lage afvoeren).

6.1.4 *Effect klimaatverandering op functies*

Grakist *et al.* [2003] beschrijven het effect van zoutindringing op de functionaliteit van de oevergrondwaterwinning Ridderkerk. Zij concluderen dat chlorideconcentraties in het opgepompte ruwwater (bestaat voor de helft uit ondiep grondwater, grotendeels infiltrerend rivierwater uit de Nieuwe Maas, en voor de helft uit dieper onttrokken grondwater) in de toekomst zullen stijgen ten gevolge van de verwachte zeespiegelstijging en de afname van de rivierafvoer.

Jacobs [2005] kwantificeert de effecten van klimaatwijziging op de chloride concentraties in de Nieuwe Maas (ter hoogte van Ridderkerk). Hij geeft aan dat de jaargemiddelde chlorideconcentratie ter hoogte van Ridderkerk met ruim 50 mg/l kan toenemen tijdens een zout jaar door externe verzilting, gebaseerd op berekeningen met het centrale klimaatscenario. Uitgaande van het hoge klimaatscenario neemt de jaargemiddelde chloride concentratie zelfs toe met bijna 80 mg/l tijdens een zout jaar [Struijk & Jacobs, 2005a]. De functionaliteit van de winning kan bij een toename van 50-80 mg/l chloride in gevaar komen.

Figuur 45 geeft de overschrijdingsfrequentie van chloride concentraties weer bij de locatie Ridderkerk voor verschillende karakteristieke zoutjaren voor de huidige en toekomstige situatie, uitgaande van het klimaatscenario Midden.



Figuur 45 Overschrijdingsfrequenties chloride concentraties bij Ridderkerk voor de huidige en toekomstige situatie, bij het klimaatscenario Midden (gebaseerd op verschillende karakteristieke verziltingsjaren; uit Struijk & Jacobs, 2005b).

6.1.5 Noodzakelijke maatregelen

Zonder aanvullende maatregelen zal de Rijn-Maas monding in de toekomst door autonome ontwikkelingen, klimaatverandering, en ingrepen in het watersysteem verder verzilten. Hierdoor kan de functionaliteit van de innamepunten voor de drinkwatervoorziening in gevaar komen. Autonome ontwikkeling is overigens waarschijnlijk de belangrijkste factor voor de toekomstige zoutindringing in de Rijn-Maas monding en het behoud van de functionaliteit van innamepunten. Elders in het gebied zijn de effecten beperkter en komt de zoetwaterbeschikbaarheid niet in gevaar. De geplande ingrepen beïnvloeden ook de zoutindringing, maar individuele ingrepen zullen waarschijnlijk de functies van het gebied niet in gevaar brengen. Het gecombineerde effect van autonome ontwikkelingen en (meerdere) ingrepen wordt dan ook vooral bepaald door de effecten van klimaatwijziging; dit zal leiden tot een vermindering van de zoetwater-beschikbaarheid.

Ter beperking van verzilting kunnen diverse mitigerende maatregelen worden getroffen in het hoofdwatersysteem. Kamsteeg & Van der Slikke (2005) geven aan dat oplossingen om de externe verzilting te beperken kunnen worden onderverdeeld in:

1. Maatregelen gericht op het terugdringen van zeewater door het afvoeren van een grotere hoeveelheid zoet water; en
2. Maatregelen gericht op het verhogen van de weerstand tegen het binnendringende zeewater.

Door klimaatwijziging zal de hoeveelheid rivierwater, die beschikbaar is voor afvoer in de zomer, alleen maar verminderen. Oplossing 1 lijkt dus niet haalbaar.

Waterbedrijven die water onttrekken in de Rijn-Maas monding hebben in de huidige situatie al te maken met verzilting van de bronnen door zoute kwel en verhoogde chloride concentraties in het oppervlaktewater tijdens lage afvoer. Op de locatie Ridderkerk wordt inmiddels op beperkte schaal membraanfiltratie (met omgekeerde osmose) toegepast om chlorideconcentraties in het drinkwater op een acceptabel niveau te houden. Dit brengt wel hoge bedrijfskosten met zich mee.

In de toekomst zal de externe verzilting waarschijnlijk toenemen. Door uitbreiding van de zuivering kan gereageerd worden op de verhoogde zoutlast. Een duurdere, maar technisch aantrekkelijke, optie is diepinfiltratie. Een extra aandachtspunt bij diepinfiltratie is het lozen van de brine. Het verplaatsen van winninglocaties is vanwege vergunningseisen vaak niet aantrekkelijk. Een kostenafweging tussen verplaatsen van de winning en toepassen van aanvullende zuivering wordt dan ook niet gemaakt.

6.2 Verandering zoet-zout grensvlak in de duinen

Bij bestudering van veranderingen van het zoet-zout grensvlak in het duingebied door klimaatverandering moeten vooral de volgende drie aspecten in beschouwing worden genomen:

1. De invloed van zeespiegelrijzing op de grondwaterstand in de duinen;
2. De invloed van zeespiegelrijzing op de vorm en de omvang van de zoetwatervoorraad;
3. De invloed van de zeespiegelrijzing op de overstromingskans.

De eerste twee aspecten laten zich goed kwantificeren met behulp van bestaande rekenmethoden. Alle duinwaterbedrijven beschikken over grondwatermodellen. Ze zijn momenteel niet allemaal even geschikt om de verplaatsing van de zoetwaterbel te berekenen, maar er zijn programma's die dat wel kunnen.

Ad 1. Invloed op de grondwaterstand

Als het uitgangspunt is dat de polderpeilen grenzend aan de duinen in de toekomst niet veranderen, kan aangenomen worden dat een rijzing van de zeespiegel tot een verhoging van de grondwaterstand leidt. Deze verhoging zal aan de kust maximaal zijn, en aan de binnenduinrand minimaal. Het verloop vanaf de kust naar het binnenland is ruwweg lineair. Het hele systeem van infiltratie en terugwinning hangt bij wijze van spreken aan de grondwaterspiegel. Daarbij hangt het niveau in de infiltratiepanden mede af van de wincapaciteit. De infiltratie- en winningswerken bevinden zich niet precies midden in de duinen; ze liggen dicht bij zee. Bij gelijkblijvende bedrijfsvoering zal het peil in de infiltratiepanden stijgen met ongeveer 60% van de zeespiegelstijging. In die gevallen waarin het peil van de infiltratiepanden maatgevend is voor de infiltratiecapaciteit, kan de capaciteit van de winplaats door zeespiegelstijging teruglopen.

Ad 2: Invloed op de zoete grondwatervoorraad

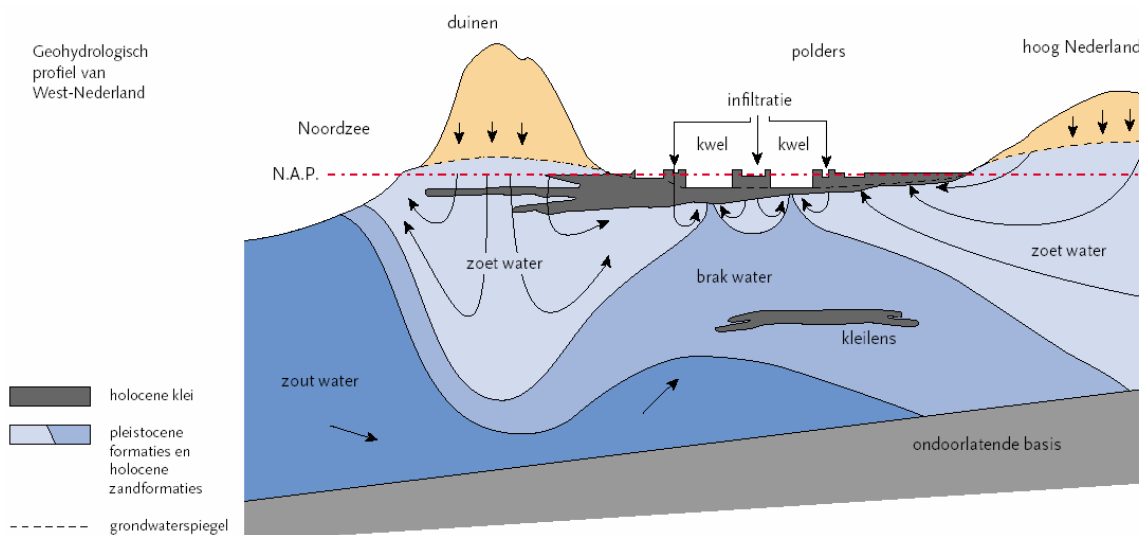
De invloed van zeespiegelstijging was onderwerp van een promotiestudie van Oude Essink (Oude Essink, 1996). De gevolgen voor de zoete grondwatervoorraad worden in zijn proefschrift uitvoerig besproken. Onder invloed van zeespiegelstijging zal de zoetwaterbel die zich onder de duinen bevindt landinwaarts opschuiven. Deze beweging is overigens al heel lang aan de gang onder invloed van de 17e eeuwse en jongere droogmakerijen. Door zeespiegelrijzing wordt de landinwaartse beweging versterkt. De oorsprong van de zoete bel ligt echter in de duinen en deels in het gebied dat aan de duinen grenst. Dit gebied ligt vast, zodat de bel vooral scheef getrokken wordt. In het duingebied kan hij dunner worden, wat een grotere kans op verzilting van bronnen oplevert.

Ad 3: Kans op overstroming

In de huidige situatie zijn overstromingsgevoelige winplaatsen een uitzondering. Deze winplaatsen lopen straks natuurlijk meer risico. De kans op overstroming kan toenemen door kustafslag. Kustafslag is nu al een probleem en zal alleen maar intensiever worden.

6.3 Verbraking van het grondwater

Het brakke grondwater in Nederland heeft een mariene oorsprong. Onder invloed van droogmakerijen en inpoldering is dit grondwater in beweging gekomen (zie figuur 46). Dit proces van interne verzilting is nog lang niet uitgewerkt.



Figuur 46 Kwelstromen naar droogmakerijen in Laag Nederland [RIZA, 2000]

Door kwel en uitstroming van brak grondwater verzilt op veel locaties in westelijk Nederland het regionale oppervlaktewater. Daarnaast veroorzaken bodemdaling en zeespiegelstijging een toename in de zoutbelasting van het regionale grond- en oppervlaktewatersysteem. Lokaal, bijvoorbeeld in de kuststrook is zeespiegelstijging waarschijnlijk de belangrijkste oorzaak van verzilting.

Mogelijke maatregelen die kunnen leiden tot een duurzame grondwaterbescherming vanuit het drinkwaterwinbelang, zijn:

- Nemen van waterhuishoudkundige maatregelen die gunstig zijn voor de zoetwatervoorraad (op peil houden van de zoetwatervoorraad);
- Verbouwen van zoutbestendige gewassen in de landbouw;
- Weren van andere grondwaterbehoevende activiteiten in verziltingsgevoelige gebieden;
- Tegengaan van zoutbelasting vanaf maaiveld.

Daarnaast zou de drinkwatersector een aantal acties kunnen ondernemen ter bescherming van de grondwaterwinningen tegen zoutintrusie (o.a. in het kader van de uitwerking en implementatie van de Kaderrichtlijn Water), zoals:

- Het opstellen van een definiëring van grondwater-lichamen (veranderingen van het zoet/zout grensvlak zijn deels natuurlijke processen);
- Meepraten over de definitie van de drempelwaarde voor chloride en over het opstellen van monitoringsprogramma's (waar, hoe meten, hoe gegevens interpreteren);
- Erop toezien dat bij de bepaling van de toestand van een grondwater-lichaam onderscheid wordt gemaakt tussen antropogene en natuurlijke invloeden op zoutintrusie;
- Enige upconing onder pompputten zou toelaatbaar moeten zijn;
- Ontwikkelen van zuiveringsconcepten en wintechnieken, passend bij de KRW;
- Bekijken hoe de sector om wil gaan met het principe 'de vervuiler betaalt', in geval van antropogene veranderingen in een grondwaterlichaam;
- Brak grondwater reserveren als strategische grondwaterreserve voor de voor de toekomstige drinkwatervoorziening.

7 Risico-analyse productie en distributie

7.1 Verhoogde temperatuur; Risico-analyse zuiveringstechniek

7.1.1 Aanleiding

Klimaatwijziging zal resulteren in een verhoging van de temperatuur van de bronnen voor de drinkwatervoorziening. Hoe groot de effecten van een toename van de watertemperatuur zijn op de bronnen en zuiveringsprocessen en of hiervoor actie moet worden ondernomen, is nog niet duidelijk. In dit hoofdstuk wordt een globale risico-analyse gegeven van hoe en in welke mate verhoging van de watertemperatuur effect heeft op de prestatie van zuiveringsprocessen en tot welke risico's dit zou kunnen leiden. Ondanks dat oppervlaktewater gevoeliger is voor opwarming dan grondwater wordt hier in deze studie geen onderscheid naar gemaakt.

Naast mogelijke veranderingen in de waterkwaliteit in de bronnen, zoals verlaagde adsorptie aan gronddeeltjes en hogere oplosbaarheid van stoffen kan een toename in de watertemperatuur leiden tot effecten op de prestaties van zuiveringsprocessen. De temperatuur beïnvloedt diverse parameters die bijdragen aan de prestatie van zuiveringstechnieken. Voorbeelden hiervan zijn:

- verminderde adsorptie van opgeloste stoffen door een vast adsorbens zoals bij actieve-koolfiltratie;
- toename in de snelheid waarmee stoffen door chemische processen worden omgezet (bijvoorbeeld tijdens oxidatieprocessen);
- toename in de snelheid waarmee micro-organismen worden geïnactiveerd;
- toename in (micro)biologische nagroei(potentie) van het water.

Kleine verschillen in temperatuur kunnen aanleiding geven tot veranderingen in de waarde van bepaalde parameters, maar dit hoeft niet te betekenen dat dit invloed heeft op de prestatie van het zuiveringsproces.

Naar verwachting hebben de waarde van de temperatuur en temperatuurwisselingen vooral invloed op biologische processen. Aangezien de meeste waterzuiveringen in Nederland in meer of mindere mate op biologische processen zijn gebaseerd, is dit een punt van aandacht. Maar ook de prestatie van chemische en fysische processen kan worden beïnvloed door de waarde van de temperatuur. De vragen die beantwoord moeten worden, zijn:

- in welke mate wordt de prestatie van zuiveringsprocessen beïnvloed?
- leidt dit tot risico's en zo ja, zijn deze acceptabel of niet?
- wat zijn mogelijke oplossingen?

7.1.2 Filtratatieprocessen

Algemeen

De filtraatfactor F is omgekeerd evenredig met de viscositeit van het water:

$$F = \Delta P / (\alpha \eta c) \quad (1)$$

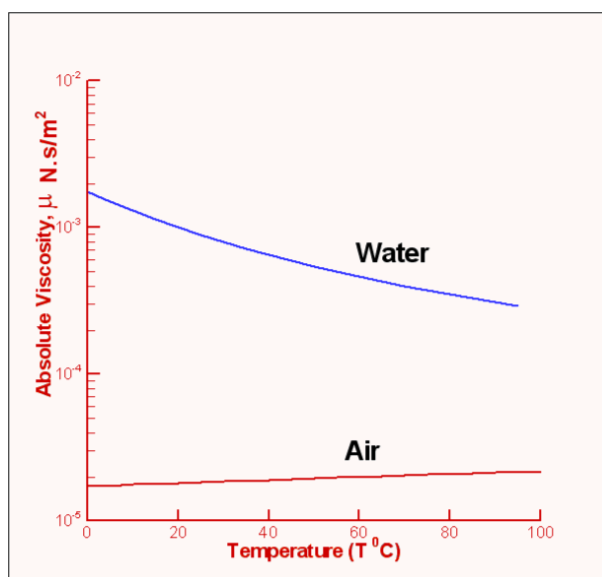
ΔP = aangelegde drukval (N/m^2)

α = maat voor de porositeit

η = viscositeit van het filtraat (Pa.s)

c = drogestofconcentratie van suspensie (kg d.s./kg totaal)

Hieruit volgt dat hoe hoger de filtratiefactor F des te sneller verloopt het filtratieproces [Herwijn, 2000]. Echter, de viscositeit van water neemt af bij oplopende temperatuur (zie figuur 47). Dit betekent dat een hogere watertemperatuur voor een hogere filtraatfactor zorgt. Dit hoeft niet direct te resulteren in beter presterende filtratieprocessen, aangezien tegelijkertijd ook andere factoren een rol kunnen spelen. Voorbeelden hiervan zijn de verminderde opname van zuurstof door water bij hogere temperaturen en de mogelijke toename in de vorming van biomassa in filters (zie verder).



Figuur 47 Relatie tussen de viscositeit van water als functie van de temperatuur.

Coagulatie

In de praktijk blijken variaties in de temperatuur invloed te hebben op de effectiviteit van het coagulatieproces. Vooral bij de adsorptieve coagulatie en flocculatie – processen gebaseerd op de dosering van vlokhelpmiddelen – beïnvloedt de temperatuur de botsingsfrequentie en mate van verkleving van deeltjes. De deeltjes moeten met elkaar in botsing komen om vervolgens met elkaar te kunnen verkleven (flocculatie). Bij adsorptieve coagulatie kan een

toename in temperatuur voor een lagere adsorptie zorgen. Coagulatie is gebaseerd op twee mechanismen:

- perikinetische vlokvorming;
- orthokinetische vlokvorming.

Bij een toename in temperatuur neemt de Brownse beweging van deeltjes toe. Deze natuurlijke beweging van deeltjes bepaalt de perikinetische vlokvorming. Dit resulteert in een hogere botsingsfrequentie en dus een grotere kans op verkleving. Bij coagulatieprocessen in oppervlaktewater speelt de temperatuur een grote rol. In de wintermaanden kan de watertemperatuur zijn gezakt tot enkele graden boven het vriespunt waardoor de perikinetische vlokvorming als gevolg van een verminderde Brownse beweging afneemt. Om dit te compenseren, kunnen snelheidgradiënten door middel van roerwerken in het water worden aangebracht om de botsingsfrequentie te bevorderen. De snelheid van orthokinetische vlokvorming is doorgaans hoger dan de snelheid van perikinetische vlokvorming. Echter, in de praktijk wordt bij lage watertemperatuur de dosering van vlokhulpmiddelen vaak verhoogd om een voldoende hoge botsingsfrequentie te realiseren.

Ondanks een mogelijk verminderde adsorptie van deeltjes tijdens de adsorptieve coagulatie zal een (lichte) temperatuurstijging naar verwachting positief bijdragen aan de prestatie van coagulatieprocessen.

Snelfiltratie

Bij toename van de temperatuur wordt minder zuurstof door het water opgenomen. Dit kan gevolgen hebben voor de processen die gebaseerd zijn op het verbruik van zuurstof zoals de omzetting van methaan, nitrificatie, ontijzering en ontmanganing.

Actieve-koolfiltratie

Dit type proces wordt in Nederland veelvuldig toegepast onder meer voor de verwijdering van ongewenste stoffen in zowel grond- als oppervlaktewater. Het proces is gebaseerd op de affiniteit (adsorptiekracht) van geactiveerde kool voor met name apolaire opgeloste verbindingen. Adsorptie en desorptie van verbindingen zijn in evenwicht en de ligging van dat evenwicht wordt bepaald door de temperatuur. In het algemeen geldt dat hoe hoger de temperatuur hoe lager het nettorendement van adsorptie. Bij lagere temperatuur zijn organische stoffen in een meer 'adsorbeerbare' vorm. Dit heeft te maken met het feit dat de vrijkomende adsorptie-energie lager is waardoor adsorptie energetisch minder gunstig is. Bij toepassing van adsorptieprocessen op natuurlijk water vindt naast adsorptie van de ongewenste stoffen (doelverbindingen) ook adsorptie van achtergrondstoffen (organische stof, NOM) plaats. Aangezien dit de adsorptieve verwijdering van de doelverbindingen nadelig beïnvloedt, is dit neveneffect ongewenst. Een lagere viscositeit van het water kan ook een rol spelen bij de prestatie van actieve-koolfiltratie.

Echter, bij hogere temperatuur zal naast de adsorptie van de doelverbindingen ook de adsorptie van NOM verminderen. Dit kan ertoe leiden dat de prestatie van het zuiveringsproces per saldo onveranderd blijft. In hoeverre de afname van de gewenste adsorptie (doelverbindingen) wordt gecompenseerd door een afname in de ongewenste adsorptie (NOM) is moeilijk op voorhand te stellen. Een eventueel netto effect op de prestatie van de actieve-koolfilters voor de verwijdering van doelverbindingen zal worden bepaald door:

- de toename in de temperatuur;
- de concentraties van de doelverbindingen en NOM.

Biologische (filtratie)processen

Bij toename van de temperatuur neemt de biologische activiteit toe. Dit kan leiden tot een toename in biomassa in snelfilters en langzame zandfilters. Bij onveranderde bedrijfsvoering kan dit resulteren in (1) verstopping van de filters waardoor voorkeursstroming ontstaat en (2) anaërobie als gevolg van de verhoogde biologische activiteit én verlaagde oplosbaarheid van zuurstof in water.

In het algemeen kan worden gesteld dat biologische processen sneller verlopen bij verhoging van de watertemperatuur. Echter, om anaërobie en verstopping te voorkomen, is het van groot belang dat het spoelprogramma is afgestemd op het verloop van de filtratieprocessen. Aanpassingen kunnen zijn gericht op:

- een hogere spoelfrequentie;
- een zwaardere spoeling.

Hieruit kan worden opgemaakt dat een afname van de temperatuur kritisch kan zijn voor het functioneren van biologische processen. In de praktijk zijn er ervaringen met een onvoldoende nitrificatie bij lage watertemperatuur. In dat geval worden voedingsstoffen, bijvoorbeeld fosfaten, gedoseerd om het proces op het vereiste niveau te laten verlopen.

7.1.3 *Chemische processen*

Chemische desinfectie

Volgens de wet van Chick-Watson wordt de inactivatie van micro-organismen als volgt omschreven:

$$N_t/N_0 = e^{-kt} \quad (2)$$

waarin:

N_t : aantal niet geïnactiveerde micro-organismen na contacttijd t ;

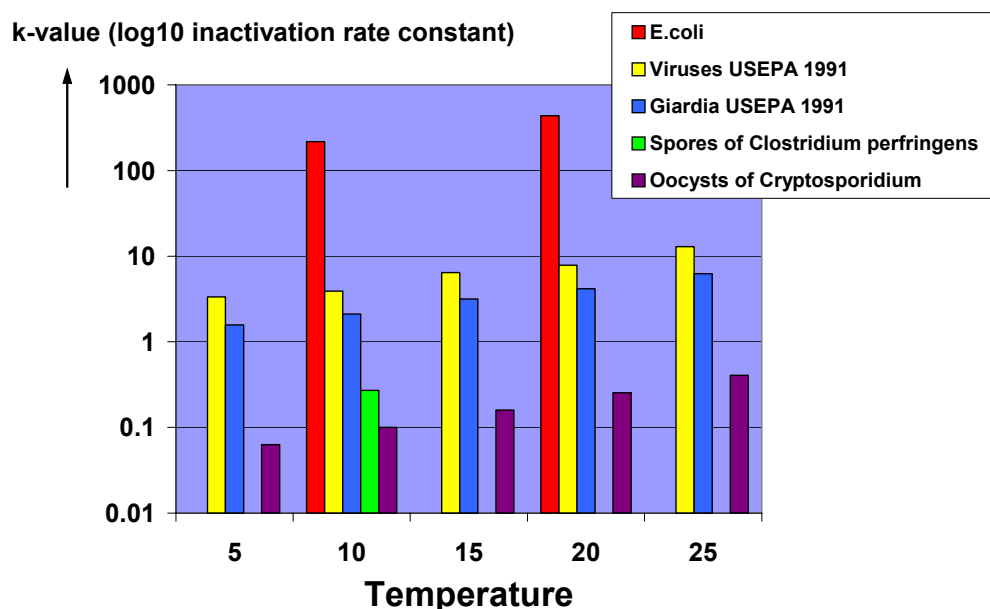
N_0 : initieel aantal niet-geïnactiveerde micro-organismen;

k : snelheidsconstante.

De waarde voor de snelheidsconstante k is afhankelijk van de temperatuur volgens de vergelijking van Arrhenius:

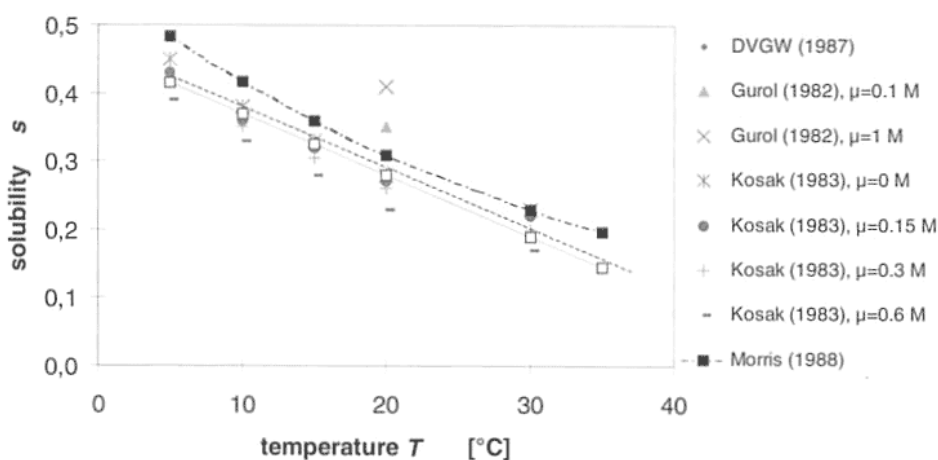
$$k = A * e^{(-E/RT)} \quad (3)$$

Hierin is E de activeringsenergie, R de gasconstante en T de absolute temperatuur. Uit deze vergelijking blijkt dat k toeneemt bij verhoging van de temperatuur. Het blijkt dat de waarde van k bij een temperatuur van circa 20 °C verdubbelt bij een verhoging van de temperatuur van 10 graden. Figuur 48 toont de waarde van de snelheidsconstante k als functie van de temperatuur bij ozondesinfectie van water met verschillende relevante micro-organismen.



Figuur 48 Relatie tussen de snelheidsconstante k (log10) en de temperatuur voor diverse micro-organismen [USEPA, Von Huben, 1991].

In het algemeen is de snelheidsconstante bij hogere temperatuur hoger en dus de kinetiek van desinfectie sneller. Zowel de toename als het temperatuurbereik waarin dit plaatsvindt, bepalen in hoeverre het een meetbaar effect betreft.



Figuur 49 Oplosbaarheid van ozon in water als functie van de temperatuur [bron: Lenntech, www.lenntech.com].

Bij desinfectie door ozon kan bij een hogere temperatuur een positief effect van de temperatuur op de desinfectiekinetiek teniet worden gedaan door een verminderde opname van ozongas in het water (zie figuur 49). Dit kan betekenen dat netto een kleiner positief of zelfs geen effect temperatuur wordt gemeten. Hier dient rekening mee te worden gehouden.

Fysische desinfectie

Het effect van de temperatuur op UV-desinfectie is relatief laag. Uit een studie naar de inactivatie van onder meer E.coli met 254 nm UV-licht bleek de inactivatie vrijwel gelijk te zijn bij 5, 20 en 35 °C [Severin *et al.*, 1983].

Omzetting van stoffen

Onderzoek is uitgevoerd naar de relatie van omzetting van het herbicide atrazin door radicalen geproduceerd tijdens het UV/H₂O₂ oxidatieproces als functie van de temperatuur in het bereik 5 – 25 °C (Seibold *et al.*). De omzetting van atrazin verloopt volgens een pseudo 1^e orde kinetiek volgens:

$$\ln [\text{atrazin}]_0 = \ln [\text{atrazin}]_t + k_1 t + k_2 t \quad (4)$$

Hierin is:

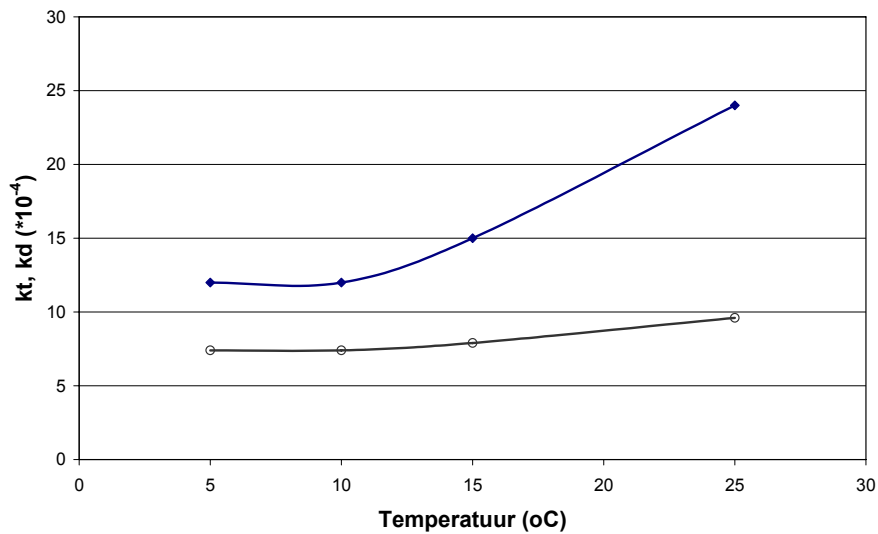
[atrazin]₀ en [atrazin]_t : concentraties aan atrazin op tijdstip t = 0 en t = t;

k₁: snelheidsconstante van de reactie tussen atrazin en het hydroxylradicaal;

k₂: snelheidsconstante van de fotolytische omzetting van atrazin;

t: de tijd.

Figuur 50 toont de relatie tussen de reactiesnelheidsconstanten voor omzetting van atrazin en de temperatuur. Hieruit volgt dat chemische omzetting van atrazin door hydroxylradicalen bij hogere temperatuur sneller verloopt.



Figuur 50 Kinetiek van omzetting van atrazin als functie van de temperatuur: kt (k1t; dichte bolletjes) is de totale snelheidsconstante van de degradatie van atrazin, kd (k2t; open bolletjes) is de directe snelheidsconstante bepaald uit fotolyse-experimenten.

7.1.4 Membraanfiltratie

Bij dit type processen worden deeltjes (vaste stoffen, micro-organismen, opgeloste stoffen) fysiek van de waterfase afgescheiden. Dit gebeurt onder druk waarbij aan te leggen druk hoger wordt naarmate de openingen in het membraan kleiner worden.

Voor de afscheiding van kleine opgeloste verbindingen zoals bestrijdingsmiddelen zijn zeer fijne membranen nodig. Om het water, maar niet de doelstoffen door deze omgekeerde osmose (RO) membranen te persen, zijn hoge drukken nodig. Dit kost veel energie waardoor de kosten hoog zijn. Toename van de temperatuur zorgt voor een lagere viscositeit (stroperigheid) van het water waardoor het water met minder energie door de membranen kan worden geperst. Bij hogere watertemperaturen neemt de aan te leggen druk per graad met 3 – 4% af.

7.1.5 Evaluatie

Van diverse zuiveringsprocessen is al bekend of de temperatuur van het water een effect op het proces heeft. Echter, deze kennis is vaak fundamenteel van aard en niet of beperkt gekwantificeerd voor praktijksituaties.

In veel gevallen heeft een verhoging van de watertemperatuur een versnelling van het proces als gevolg. De benodigde energie om verbindingen te verbreken kan gemakkelijker worden opgebracht en de snelheid van reacties (omzetting van stoffen, inactivatie van micro-organismen) neemt toe. Dit geldt ook voor chemisch-fysische en biologische filtratieprocessen zoals voor bijvoorbeeld de ontijzering en nitrificatie. Maar het feit dat deze processen sneller verlopen bij hogere watertemperaturen kan ook een keerzijde hebben. Bij filtratieprocessen (snelfiltratie, langzame zandfiltratie)

kan (een significante) verhoging van de temperatuur leiden tot een afname in de zuurstofconcentratie en een toename in de vorming van biomassa. Dit kan resulteren in een anaërobie met negatieve effecten op de prestatie van de chemisch-fysische (ontijzering) en biologische (nitrificatie) processen en tot verstopping van en voorkeur-stroming in de filters. Dit kan worden opgevangen door het monitoring-programma uit te breiden met (dis)continue zuurstofmetingen en door het spoelprogramma aan te passen (intensiteit, frequentie). Fysieke zuiverings-processen zoals UV-desinfectie worden beperkt beïnvloed door de temperatuur. Membraanfiltratietechnieken kunnen goedkoper worden door verlaging van de viscositeit van warm(er) water.

Verandering van de ruwwatersamenstelling en in de prestatie van zuiveringsprocessen kunnen effect hebben op de uiteindelijke drinkwaterkwaliteit. Dit kan tevens consequenties hebben voor het behoud van de waterkwaliteit in distributiesystemen. Ook dit is een punt van aandacht.

7.2 Microbiële gevolgen van temperatuurstijging in leidingen

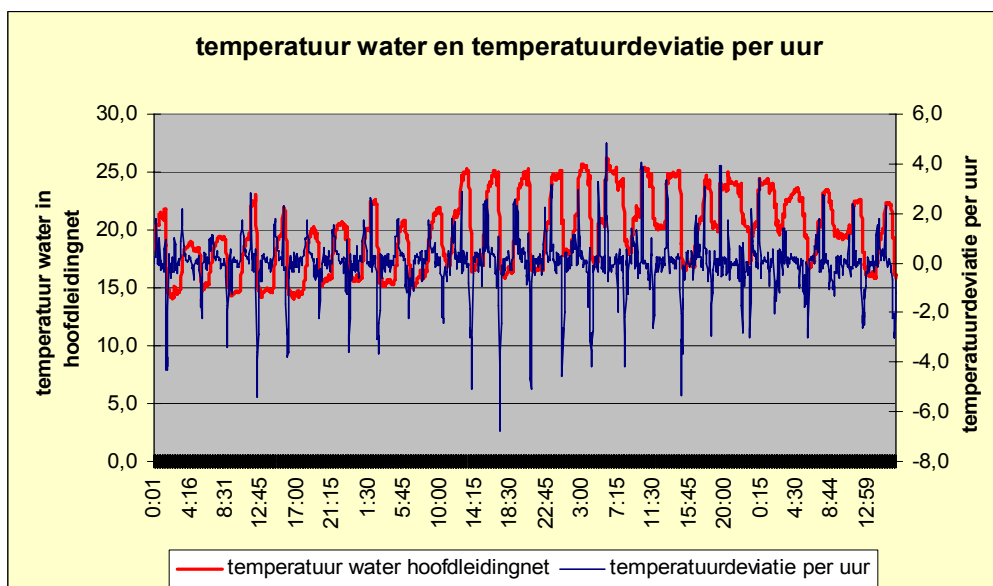
7.2.1 Inleiding

De temperatuur van het water is een belangrijke parameter die vele processen in het leidingnet beïnvloedt. Bij veel berekeningen wordt uitgegaan van een temperatuur van 10°C, maar dat is lang niet altijd terecht. Een hogere of lagere temperatuur heeft een invloed op de viscositeit van het water en heeft daarmee een invloed op de stromingsweerstand. Belangrijker is echter de invloed op de biologische en chemische processen in het water. Vooral de groei van *Legionella* neemt belangrijk toe bij temperaturen boven de 25 graden.

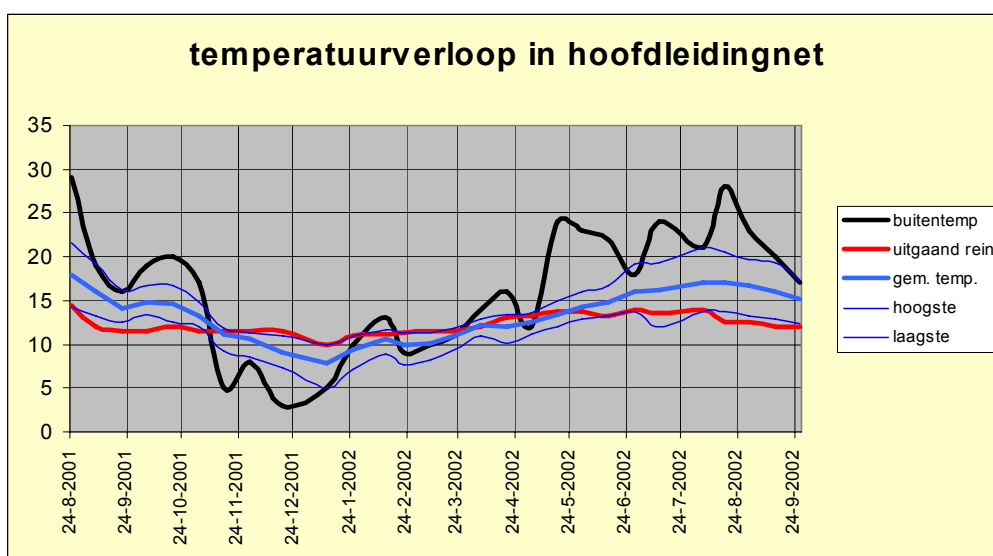
Daarnaast zijn lage temperaturen in een leidingnet ook een aandachtspunt in verband met vorstgevaar. Om het vorstgevaar uit te sluiten worden waterleidingen relatief diep in de grond gelegd met minimaal een meter grond boven de leiding. Deze diepteligging heeft een effect op de kosten van aanleg en reparatie en maakt bovendien dat andere kabels en leidingen vaak bovenop de waterleiding liggen die reparaties extra gecompliceerd kunnen maken.

7.2.2 Temperatuur in het leidingnet

Recent onderzoek door de voormalige TWM (nu Brabant Water) laat zien dat de temperatuur in het leidingnet hoog kan oplopen. Figuur 51 laat zien dat de temperatuur sterk kan fluctueren (4 tot 6 graden per uur) en dat de absolute temperatuur kan oplopen tot 25 °C.



Figuur 51 Temperatuursvariatie in het hoofdleidingnet van TWM.



Figuur 52 Temperatuurverloop in het hoofdleidingnet van TWM (relatie met buitentemperatuur)

Deze waarneming is representatief voor vele waarnemingen in het leidingnet. In het periodiek onderzoek naar de waterkwaliteit in het leidingnet worden regelmatig temperatuur overschrijdingen gerapporteerd van boven de 25 °C. De temperatuur volgt in zeker mate de atmosferische temperatuur zoals uit figuur 52 blijkt. De reactietijd van de temperatuur van het drinkwater is zelfs snel te noemen (binnen enkele uren).

7.2.3 *Voorspelbaarheid van temperatuurveranderingen*

Om de temperatuur van het leidingwater te beïnvloeden moet de atmosferische temperatuur doordringen tot aan het water in de leiding. Zoals gezegd heeft de waterleiding minimaal 1 meter gronddekking. De mate van doordringing is daardoor afhankelijk van de hoeveelheid zonnestraling, de aard van de bodembedekking (asfalt, stenen, groenvoorziening) de grondsoort, de grondwaterstand en de verblijftijd van water in het leidingnet.

Het mechanisme van opwarming van het leidingnet is goed te modelleren als de omgevings-parameters en de verblijftijden in het net bekend zijn. Een combinatie van een warmtedynamica model en een leidingnetberekening is waarschijnlijk voldoende om dit goed te modelleren.

7.3 **Stabiliteit van het leidingnet bij zettingen door droogte**

Een leiding bezwijkt onder invloed van te hoge belastingen waarbij de toelaatbare spanning op leidingen wordt overschreden. De belasting van een leiding bestaat uit een aantal verschillende componenten. Van deze componenten vormt de belasting vanuit zettingen van de grond onder normale omstandigheden een beperkt aandeel. Zetting kan echter ruimtelijk variëren als gevolg van de ruimtelijke variatie van bodemsoort en bodembedekking. De belasting op een leiding voortkomende uit deze zettingsverschillen kunnen wel groot zijn.

De waterleidingbedrijven geven aan dat er in droge zomers een verhoogde storingsfrequentie wordt waargenomen. Dit fenomeen wordt toegeschreven aan het krimpen van sommige gronden bij uitdroging en het mogelijk zwellen van uitgedroogde reversibele gronden bij regen na droogte. Zettingsverschillen kunnen inderdaad een grote belasting geven. Het krimpen en zwellen van grond onder invloed van vocht kan plaatselijk sterk variëren waardoor relatief grote verschillen in verplaatsingen van leidingen ontstaan.

De toelaatbare verplaatsingen van leidingen ten gevolge van een gelijkmatig verdeelde belasting kunnen voor een ingeklemde PVC buis van 3 meter lengte bepaald worden (zie Tabel 13). Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de maximum spanning in het materiaal niet boven 12,5 MPa mag komen.

Tabel 13 Toelaatbare verplaatsingen waarbij geen risico voor leidingbreuk optreedt.

Diameter PVC buis	Toelaatbare verplaatsing over 3 meter (m)
110	0,15
160	0,10
200	0,08
250	0,06
315	0,05
400	0,04
500	0,03
630	0,02

Voor andere materialen zijn de toelaatbare verplaatsingen afwijkend omdat de toelaatbare spanningen, de elasticiteit en de wanddikten afwijken van PVC. In het algemeen kunnen PE-leidingen grotere verplaatsingen hebben en kan bij gietijzer al bij kleinere verplaatsingen breuk optreden.

In hoeverre deze verplaatsingen daadwerkelijk kunnen optreden en onder welke omstandigheden is niet bekend.

8 Conclusies

8.1 Drinkwaterverbruik

Uit de analyse van het drinkwaterverbruik komt naar voren dat er een duidelijke invloed van het klimaat op het waterverbruik is. De mate van invloed is echter sterk afhankelijk van de aard van het voorzieningsgebied. Uit de analyse blijkt het landelijke voorzieningsgebied van pompstation Budel veel sterker door klimaatsinvloeden te worden beïnvloed dan het sterk verstedelijkte invloedsgebied van pompstation Tilburg. De landelijke winning Budel is hierdoor veel kwetsbaarder voor klimaatverandering dan de stedelijke winning Tilburg.

Het veranderen van de watervraag als gevolg van klimaatverandering heeft direct invloed op allerlei beleidsbeslissingen op de middellange en lange termijn. In beslissingen over waterverdeling, reallocatie van productiemiddelen, renovatie / nieuwbouw van productiemiddelen en het inleveren van vergunningsruimte moet dan ook de invloed van klimaatverandering op het waterverbruik in het betreffende voorzieningsgebied worden meegenomen.

8.2 Grondwaterdynamiek

Afhankelijk van het scenario zal klimaatverandering matig grote tot zeer grote gevolgen hebben voor de grondwaterdynamiek. Als gevolg van klimaatverandering zullen extreem hoge en extreem lage grondwaterstanden in de toekomst vaker gaan optreden.

De draagkracht van het grondwatersysteem voor grondwaterwinning komt vooral bij scenario Droog en in mindere mate bij scenario Hoog in gevaar (zeer sterke grondwaterstands dalingen in de zomerperiode). Bovendien zal in extreem droge perioden ook de landbouw een extra beslag leggen op het beschikbare grondwater. Veiligstellen van het beschikbare grondwater rond grondwaterwinningen wordt hiermee een belangrijk thema.

De invloed van klimaatverandering op de grondwaterstand blijkt per locatie te kunnen verschillen. Om een duidelijk beeld te verkrijgen van de invloed van klimaatverandering op de grondwaterdynamiek in Nederland zullen verschillende representatieve typen van ondergrond en hydrologische systemen onderzocht moeten worden.

8.3 Grondwaterkwaliteit

Een mogelijke ontwikkeling door klimaatverandering is het vaker voorkomen van uitgesproken warme en droge periodes in de zomer. Droogte en warmte beïnvloeden de chemische samenstelling van het bovenste grondwater langs twee wegen, namelijk indikking en additionele bodemchemische processen. Door indikking nemen de concentraties evenredig toe. Door het sterk wegzakken van de grondwaterstanden in de zomerperiode kunnen sulfiden die zich normaliter onder de grondwaterspiegel bevinden, boven de

grondwaterspiegel raken en door atmosferische zuurstof tot sulfaat worden geoxideerd. Als in deze situatie de waterwinning wordt gecontinueerd, dan trekken hoge sulfaatgehalten ook dieper de bodem in en dit kan leiden tot zeer hoge sulfaatgehalten in het onttrokken water.

De toevoer van nitraat en sulfaat gaat gepaard met de toevoer van zuur. Dit zuur wordt door de van nature aanwezige kalk geneutraliseerd. Dit resulteert in een versnelde ontkalking van de bodem en in hoge hardheden van het grondwater.

8.4 Ecologie

Klimaatverandering kan door veranderingen in de grondwaterdynamiek en grondwaterkwaliteit een forse invloed hebben op de vochtvoorziening van natuurlijke vegetaties.

Op dit moment wordt een breed scala aan ecologische doelen vastgesteld. Deze doelen zijn gebaseerd op de huidige hydrologische situatie. Het kan dus zo zijn dat door de (autonome) verandering van het klimaat, gestelde doelen niet haalbaar blijken te zijn. Waterleidingbedrijven zijn belangrijke spelers bij realisatie van de ecologische doelen van o.a. EHS, VHR, GGOR en KRW. Als de gestelde doelen niet gerealiseerd worden, staan ook de (eeuwigdurende) vergunningen voor drinkwaterwinning op de tocht. De maatregelen die de waterleidingsector moet treffen om deze doelen te helpen realiseren kunnen alleen goed bepaald worden als ook de effecten van klimaatverandering mee worden gewogen.

8.5 Oppervlaktewaterkwaliteit

Klimaatverandering zal met name doorwerken naar de oppervlaktewaterkwaliteit door verminderde verdunning bij lage afvoeren, een veranderde intensiteit van chemische processen bij temperatuurverhoging en door een veranderde aanvoer van stoffen naar het oppervlaktewater. Doordat deze drie processen in verschillende mate spelen in verschillende watersystemen, variëren de gevolgen van lage afvoeren per rivier.

Het gevolg van lage afvoeren lijkt groter wanneer de waterkwaliteit onder normale omstandigheden slechter is. Zo leidde de droge zomer van 2003 tot een duidelijk stijging van zouten, ammonium en nitriet in de Maas, terwijl in de Rijn een verandering niet waarneembaar was. Het zware metalengehalte nam in de Rijn in geringe mate toe. Dit vormt geen probleem voor de drinkwaterproductie omdat zware metalen efficiënt verwijderd kunnen worden.

Het nitraatgehalte nam af in de Maas tijdens de droogte van 2003, waarschijnlijk als gevolg van een verminderde aanvoer via uit- en afspoeling van de bodem. Mogelijk spelen ook een verhoogde denitrificatie en de opname van nitraat door algen een rol. Door de combinatie van verhoogde primaire productie, denitrificatie en verminderde verdunning was er in de Rijn geen trend zichtbaar in het nitraatgehalte.

De watertemperatuur bereikte in 2003 waarden van boven 25 °C, zowel in de Rijn als in de Maas, wat aanzienlijk hoger is dan in de referentie jaren. Deze verhoogde watertemperatuur is gunstig voor de ontwikkeling algenbloeien. De verhoogde algengroei kan leiden tot een afname van nutriëntengehaltes. Daarnaast kan een hoge watertemperatuur leiden tot een verhoogde microbiologische activiteit in het distributienetwerk.

In de winter en herfst kan de frequentie van extreem hoge afvoeren toenemen. Door de combinatie van lange droge periodes met zware regenbuien kunnen ook first-flush events vaker voorkomen. Dit kan leiden tot hogere gehalten van zwevend stof en van aan sediment gebonden stoffen en tot tijdelijk lagere gehalten zouten. Ook kunnen mogelijk rwzi's de verhoogde wateraanvoer tijdens hevige buien niet aan, wat kan leiden tot een verhoogde piekbelasting van verschillende stoffen en overstorten.

8.6 Verzilting

Als gevolg van klimaatverandering neemt de kans op extreme zoutindringing in het benedenrivierengebied vanuit zee toe. De frequentie van extreme zoutindringing kan toenemen, het zoute water kan verder stroomopwaarts komen en de hoogste chloridegehalten kunnen toenemen tijdens extreme zoutindringing.

In 2003 zijn in het oppervlaktewater extreem ver landinwaarts hoge zoutgehalten gemeten door zoutindringing vanuit zee als gevolg van een combinatie van een groot aantal mogelijke oorzaken. In welke mate oorzaken precies hebben bijgedragen is niet helemaal duidelijk, maar in ieder geval hebben de extreem hoge waterstand op zee en de extreem lage waterstand in de rivieren een belangrijke rol gespeeld. Daarnaast hebben mogelijk ook de beperkte terugstroom tijdens eb, gelaagdheid en lokale stromingssituaties een rol gespeeld. In de toekomst zullen stormen mogelijk frequenter samenvallen met lagere afvoeren, wat kan leiden tot verhoogde zoutindringing.

In de duinen zal zeespiegelstijging tot een verhoging van de grondwaterstand leiden. De verhoging zal aan de kust maximaal zijn en dan ruwweg lineair afnemen naar de binnenduinstrand. Wanneer de infiltratiecapaciteit afhankelijk is van het peil in de infiltratiepanden, kan de capaciteit van de winplaats afnemen. Bij zeespiegelstijging zal de zoetwaterbel onder de duinen landinwaarts opschuiven. In het duingebied kan de zoetwaterbel daardoor dunner worden, wat de kans op verzilting van de bronnen vergroot. Tot slot kan mogelijke kustafslag de winplaatsen in de duinen bedreigen.

Tot slot treedt ook in West-Nederland, landinwaarts van de duinen, verzilting van het grondwater op. Waarschijnlijk één van de belangrijkste oorzaken van verzilting van het grondwater in westelijk Nederland is zeespiegelstijging.

8.7 Productie en distributie

Op basis van deze bureaustudie kan worden geconcludeerd dat de meeste gangbare zuiveringsprocessen vergelijkbaar of beter zullen presteren bij een stijging van de temperatuur. Omdat het niet geheel duidelijk is welke invloed een stijgende watertemperatuur heeft op de ruwwatersamenstelling en welk effect een verandering van de ruwwatersamenstelling heeft op de prestatie van zuiveringsprocessen is er ook geen absolute duidelijkheid over de eventuele risico's. Met de informatie in deze studie kan niet worden gekwantificeerd in welke mate zuiveringsprocessen anders gaan presteren bij een verhoging van de watertemperatuur van bijvoorbeeld 23 °C naar 26 °C.

De temperatuur in het leidingnet reageert snel op een verandering van de atmosferische temperatuur. Omdat temperatuur een relevante parameter is voor de waterkwaliteit, vooral voor de groei van *Legionella*, zal een stijging van de omgevingstemperatuur een negatieve invloed hebben op de waterkwaliteit aan de tap. Beheersmaatregelen zijn mogelijk in de vorm van een verandering van grondbedekking, dieper leggen van leidingen of bekorten van verblijftijden van water in het leidingnet.

Verplaatsingen van leidingen over korte afstanden als gevolg van zettingsverschillen kunnen aanleiding geven tot hoge spanningen in een leiding. Deze kunnen zo hoog oplopen dat buizen kunnen bezwijken. Deze verplaatsingen kunnen het gevolg zijn van inklinking door droogte. Sommige bodemtypen (bijvoorbeeld klei) kunnen na uitdroging weer zwellen onder invloed van vocht. Hierdoor kunnen ook verplaatsingen optreden na vernatting van uitgedroogde bodems.

Welke omstandigheden precies tot verplaatsingen en leidingbreuk leiden, is nog niet bekend. Door het ontwikkelen van deze kennis kunnen de waterleidingbedrijven gericht materiaalkeuzes maken voor specifieke situaties en saneringsbeslissingen nemen op basis van de combinatie van ondergrond en buismateriaal.

9 Aanbevelingen voor fase 2 van het klimaatonderzoek

9.1 Drinkwaterverbruik

Om de invloed van klimaatverandering op het waterverbruik in te kunnen schatten is verbetering van de techniek van het modelleren nodig. De tot op heden beschikbare tijdreeksanalysemethoden hebben moeite met het goed modelleren van extremen in de waterverbruiksreeksen. Deze extremen kunnen echter cruciaal zijn bij de vraag of een productielocatie of distributienet wel voldoende goed is ingericht op mogelijke veranderingen als gevolg van klimaatverandering.

Er is een duidelijk verschil in beïnvloeding door het klimaat tussen de stedelijke winning Tilburg en de landelijke winning Budel. Of dit ook opgaat voor stedelijke en landelijke winningen in de rest van Nederland is echter onduidelijk. Om hier meer duidelijkheid over te verkrijgen zullen ook verbruiksreeksen van andere voorzieningsgebieden onderzocht moeten worden. Op basis hiervan kan worden vastgesteld in hoeverre de Nederlandse waterwinning wat kwantiteit betreft klimaatbestendig is.

9.2 Hydrochemie en ecohydrologie

De bestaande ecohydrologische en hydrogeochemische proceskennis moet onder de loep worden genomen en uitgebreid worden met kennis over de impact van klimaatverandering. Deze proceskennis kan dan gebruikt worden voor winplaatsonderzoeken (ecohydrologische / hydrogeochemische systeemanalyses) en ingebouwd worden in onze effectvoorspellingsmodellen. Belangrijke thema's voor het BTO zijn daarom:

- Effect van toename van temperatuur en aeratie op de (grond)waterkwaliteit (o.a. versnelde oxidatie van organisch materiaal, pyrietoxidatie).
- Effect van veranderende neerslagpatronen op de basenhuishouding in natuurgebieden
- Effecten van toename van CO₂ in de bodem (o.a. versnelde ontkalking van bodems en toename hardheid).
- Ecologische effecten van toename grondwaterdynamiek.
- Ecologische effecten van verzilting.
- Ecologische effecten van grotere fluctuatie waterpeilen en verandering van de waterkwaliteit.
- Ontwikkelen methode voor het klimaatbestendig maken van ecologische doelen.

9.3 Oppervlaktewaterkwaliteit

Rond de ontwikkeling van de oppervlaktewaterkwaliteit bestaan de volgende onderbelichte thema's:

- Is de aanvoer van stoffen vanuit grondwater een relevante component voor de oppervlaktewaterkwaliteit? Dit kan met name spelen in regionale wateren zoals de Drentsche Aa, maar ook in de Maas bij lage afvoeren.
- Welke winputten kunnen overstroomd raken bij (zeer) hoge afvoeren en is er dan een risico van besmetting van het te onttrekken grondwater door toestroom van bovenaf via de onttrekkingsput.
- Hoe werkt een (tijdelijke) achteruitgang van de oppervlaktewaterkwaliteit door naar de waterkwaliteit van oevergrondwaterwinningen? Te denken valt dan aan de gevolgen van verzilting van het benedenrivierengebied bij extreem lage afvoeren en stormopzet op zee en aan emerging substances.

9.4 Verzilting

Een adequate voorspelling van de toekomstige zout-indringing, inclusief bandbreedte, is noodzakelijk om de risico's voor de gebruiksfuncties in te schatten. Het kwantificeren van de effecten van (individuele) ingrepen en autonome ontwikkelingen is noodzakelijk om eventueel compenserende maatregelen te treffen.

De waterbedrijven hebben een nauwkeurige inschatting van de toename van de chlorideconcentratie nodig voor hun bedrijfsvoering (noodzaak voor aanvullende zuivering). Bijvoorbeeld, op de winning Ridderkerk van OASEN ligt de chlorideconcentratie in het ruwe water nu al in een gemiddeld jaar rond de 150 mg/l. Elke toename van de chlorideconcentratie in het oppervlaktewater zal hier op termijn leiden tot noodzakelijke aanpassing van de zuiveringsinspanning. In andere gevallen is het belang van het schatten van de duur van een overschrijding (voor regionaal waterbeheer) belangrijker dan het nauwkeurig voorspellen van de piekwaarde tijdens een overschrijding. De gewenste nauwkeurigheid van het modelinstrumentarium varieert dus per winningslocatie.

De verwachting is dat in de toekomst mogelijk frequentere en heftigere stormen op zee zullen optreden en daardoor stormen op zee en lage afvoeren frequenter zullen samenvallen. Aanbevolen wordt om de effecten hiervan te analyseren met de nieuwe klimaatscenario's.

Om meer inzicht te krijgen in sturende processen wordt aanbevolen bestaande chloride-metgegevens nader te analyseren met fjnschalige trendanalysetechnieken (bijvoorbeeld op maandgemiddelden in plaats van op jaargemiddelden) of specifiek gericht op de effecten van ingrepen. Daarnaast wordt ter overweging meegegeven om alternatieve data-analysetechnieken, zoals neurale netwerken, toe te passen.

Voor de winningen in de duinen is met betrekking tot verzilting het volgende aan te bevelen:

- Inventariseren van gevallen waar het peil van de infiltratiemiddelen maatgevend is voor de infiltratiecapaciteit;
- Kwantificeren van de stijging van de grondwaterspiegel;
- Kwantificeren van de achteruitgang van de winningcapaciteit;
- Genereren van alternatieven om de capaciteit op peil te houden;

- Inventariseren van wingebieden waar de kans op overstroming realistisch wordt.
- Nader modelleren van de beweging van de zoete en zoute grondwater onder invloed van zeespiegelstijging;
- Meer in detail bestuderen van het proces van verzilting van bronnen;
- Ontwikkelen van maatregelen om het effect te compenseren, variërend van herstel van de bel tot alternatieve wintechnieken die minder gevoelig zijn voor verzilting.
- Inventarisatie van overstromingsgevoelige winplaatsen.
- Onderzoek naar de gevolgen van zeespiegelstijging voor kustafslag en in verband daarmee de toename van het overstromingsrisico.
- Onderzoek naar verantwoordelijke instanties in geval van dreigende kustafslag en de manier waarop zij aangesproken moeten worden.

9.5 Productie en distributie

Aanbevolen wordt om de bureaustudie uit te breiden met:

- verzamelen van data van 2 locaties voor de zuivering van oppervlaktewater waarbij de temperatuur uiteenloopt van circa 5 °C (winter) tot 25 °C (zomer 2003) gericht op:
 - biologische processen in snelfilters en langzame zandfilters;
 - desinfectie met ozon en UV;
 - membraanfiltratieprocessen;
 - omzetting van organische microverontreinigingen door middel van oxidatie.

Data worden verzameld over de ruwwatersamenstelling, effectiviteit van desinfectie, omzetting van stoffen, prestatie van biologische processen in relatie tot het gehanteerde spoelprogramma en vorming van bijproducten.

- Trendanalyse.
- In beeld brengen van relevante factoren en ontwikkelen van model om temperaturen in de zuivering en het leidingnet te voorspellen.
- Scenario-studies bij verschillende klimaatontwikkelingen en testen van beheersmaatregelen.

Daarnaast wordt onderzoek aanbevolen naar het vóórkomen van grondsoorten die gevoelig zijn voor zettingen als gevolg van wijzigingen van het vochtgehalte. Dit kan gekoppeld worden aan de storingsregistratie van leidingen die ten gevolge van wijzigingen in het vochtgehalte tot breuk komen. Via bodemkaarten kunnen de probleemgebieden en de mogelijke probleemleidingen in beeld gebracht worden.

Literatuur

Aggenbach, C.J.S., Jalink, M.H., Jansen, A.J.M., Van Boschginga, W., 1998. De gewenste grondwatersituatie voor terrestrische vegetatietypen in pleistoceen Nederland. NOV-rapport 3.2, RIZA/Kiwa.

Bal D., H.M. Beije, M. Fellingier, R. Haveman en A.J.F.M. van Opstal, 2001. Handboek Natuurdoeltypen. LNV.

Beek, C.G.E.M. van, M.H. Jalink & A.F.M. Meuleman, 2001. De verzwaveling van grondwater in zandgronden, Landschap, 2001 18(4) p263-271

Bruin, A.T.H., 2002. Verandering in neerslagkarakteristieken in Nederland gedurende de periode 1901-2001, Klimatologische Dienst KNMI, De Bilt.

Cirkel, D.G., P. Baggelaar, A. Doomen, 2005. Klimaatverandering en drinkwaterproductie, KWR 05.030, Kiwa WR, Nieuwegein

De Jong, B., 2006. Effects of global warming on floods and droughts and related water quality of rivers. A review. Stagerapport Kiwa Water Research, 2006.029 (s).

De Levende natuur, 2003. Themanummer Klimaat. De levende natuur nr. 3, jaargang 104.

Giorgi, F. and co-authors, 2001. Regional Climate information - Evaluation and projections. In: J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson (Eds.), Climate Change 2001: The Scientific Basis, pp. 583-638. Cambridge University Press, Cambridge.

Grakist, G.C., C. van Genuchten en P. Jacobs, 2003. Effect van zeewaterindringing op oevergrondwaterwinning in Ridderkerk. H₂O 37(24): 25-27.

Gumbel, E.J., 1954. Statistical Theory of extreme values and some Practical Applications, U.S. Department of Commerce, National bureau of standards applied mathematics

Haasnoot, M., J.A.P.H. Vermulst, H. Middelkoop, 1999. Impacts of climate change and land subsidence on the water systems in the Netherlands. Terrestrial areas, RIZA rapport 99.049, NRP project 952210, ISBN 902210.

Herrington, P., 1996. Water treatment and supply – All change on the waterfront? WWT november 1996.

Herwijn, A.J.M., 2000. Filtratie. Handboek Water in de industrie, hoofdstuk 2.2, afl. 9, december 2000.

Huben, H. von, 1991. Surface Water Treatment: The New Rules. AwwaRF-rapport, Denver, Colorado, VS.

IPCC, 2001 Third Assessment Report (TAR) of Working Group I; Cambridge University Press; Cambridge.

IPCC, 2007. Climate change 2007: The physical science basis, summary for policy makers. Contribution of working group 1 to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Jacobs, P., G. Blom en T. van der Linden, 2000. Climatological changes in storm surges and river discharges: the impact of flood protection and salt intrusion in the Rhine-Meuse delta. In: (Beersma, J., M. Agnew, D. Viner en M. Hulme, eds. ECLAT-2 workshop report no.3. KNMI, the Netherlands, pp 35-48).

Jacobs, P., T. Kroon en W. Werkman, 2004. Water wat er (niet) is: aard en omvang van de hydrologische aspecten van droogte in Midden-West Nederland. RIZA werkdocument 2004.047.

Jacobs, P., 2005. Zout uit zee: verzilting van de rijskwateren in Midden-West Nederland nu en in de toekomst. Notitie RIZA.

Kamsteeg, A.T. en M.J. van der Slikke, 2005. Toekomstige ontwikkeling hoofdwatersysteem midden-west Nederland; effecten op de zoetwatervoorziening. RWS Werkdocument APS/2005/07.

Kemmers, R.H., Jansen, P.C., 1980: De invloed van chemische factoren in grondwater en bodem op enkele vegetatietypen in het C.R.M.-reservaat "Groot Zandbrink". Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen, Nota 1181-I. 37 pp.

KNMI, 2003. De toestand van het klimaat in Nederland 2003, KNMI, De Bilt

Können, G.P., 2001. CLIMATE SCENARIOS FOR IMPACT STUDIES IN THE NETHERLANDS, Klimatologische Dienst KNMI, De Bilt.

Middelkoop, H. en K. Daamen, 2001. Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. Climatic Change 49: 105-128.

Murdock, S.H., Albrecht, D.E., Hamm, R.R., Backman, K., 1991. Role of sociodemographic characteristics in projections of water use. Journal of water resources planning and management vol 116, no 2.

Oude Essink, G.H.P., 1996. Impact of sea level rise on ground water flow regimes: a sensitivity analysis for the Netherlands. Thesis TU Delft.

Räisänen, J., U. Hansson, A. Ullerstig, R. Döscher, L.P. Graham, C. Jones, H.E.M. Meier, P. Samuelsson and U. Willén, 2004. European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios. Climate Dynamics, 22, 13-31.

Rijkswaterstaat, 2004. Evaluatie droogteperiode 2003. waterbeweging en verzilting. RWS nota AP/2401750/2004/03.

RIZA, 2000. Stedelijk grondwater in een ander daglicht; kansen van een actief grondwaterbeheer. RIZA/IWACO/NVA-werkgroep Stedelijk Grondwater, Lelystad.

Schaminée, J., 1995. Vegetatie van Nederland, deel 2. Opulus press, Upsala/Leiden,

(in Dutch).

Schaminée, J., Stortelder A. & Weeda, E., 1996. Vegetatie van Nederland, deel 3: grasslands, hedges, dry heath lands. - Opulus press, Upsala/Leiden, pp. 356 (in Dutch).

Schaminée, J., Weeda, E. & Westhoff, V., 1998. Vegetatie van Nederland, deel 4: shores, inland pioneer vegetations. - Opulus press, Upsala/Leiden.

Seibold, D.A., Sharpless, C.M., Linden, K.G., Protecting Public Health – UV disinfection of Drinking Water, Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University.

Severin, B.F., Suldan, M.T., Engelbrecht, R.S., 1983. Effects of Temperature on Ultraviolet Light Disinfection, Environ. Sci. Technol., Vol. 17(12), p. 717.

Shabalova, M.V. en W.P.A. van Deursen, 2003. Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model. Climate Research 23 (3): 233-246.

Steenkamp, B.P.C., 2002. Systeembeschrijving Noordelijk Deltabekken. RIZA werkdokument 2002.207x.

Stortelder A.F.H., J.H.J. Schaminee en P.W.F.M. Hommel, 1999. Vegetatie van Nederland, deel 5: ruigten, struwelen, bossen - Opulus press, Upsala/Leiden, (in Dutch).

Struijk, R., en P. Jacobs, 2005a. Zoetwaterbeschikbaarheid voor drinkwater onder invloed van klimaatveranderingen. RIZA werkdokument 2005.038x.

Struijk, R. en P. Jacobs, 2005b. Aanvoerfrequenties ten behoeve van zoetwaterverkenning Midden-West Nederland. RIZA Werkdocument 2005.122x.

Van Bokhoven, A., 2006. The impact of climate change on the water quality of the Rhine River. Stagerapport Kiwa Water Research BTO 2006.056(s).

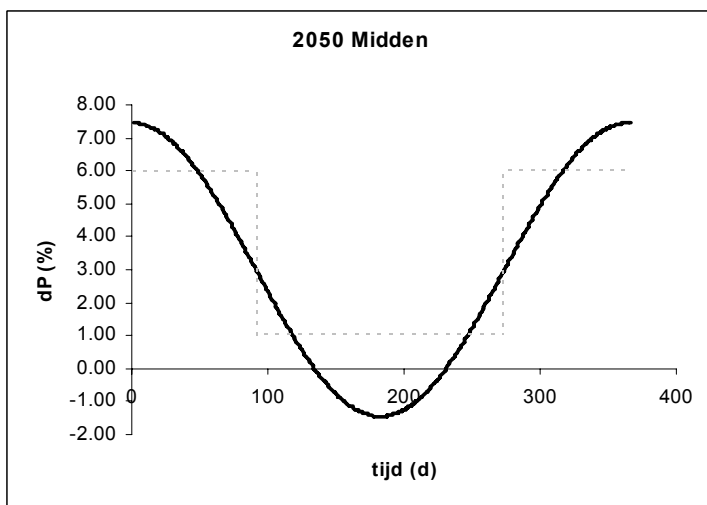
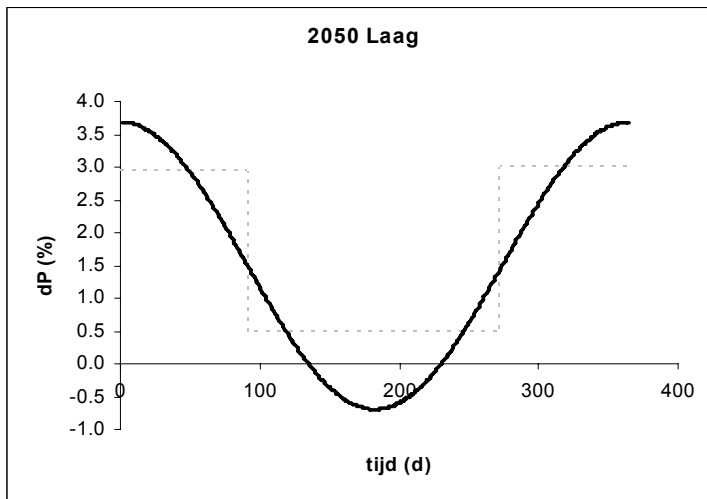
Van Vliet, M., 2006. Effects of Droughts and Floods on the Water Quality and Drinking Water Function of the river Meuse: a Preview of Climate Change? Proceedings NCR-dagen 2006.

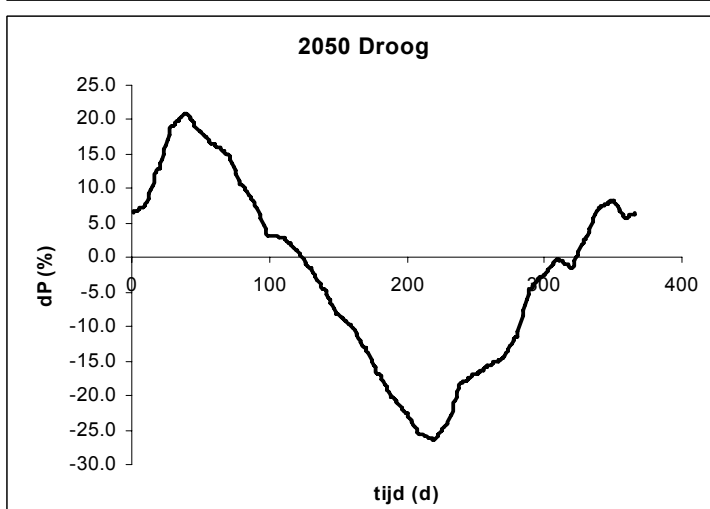
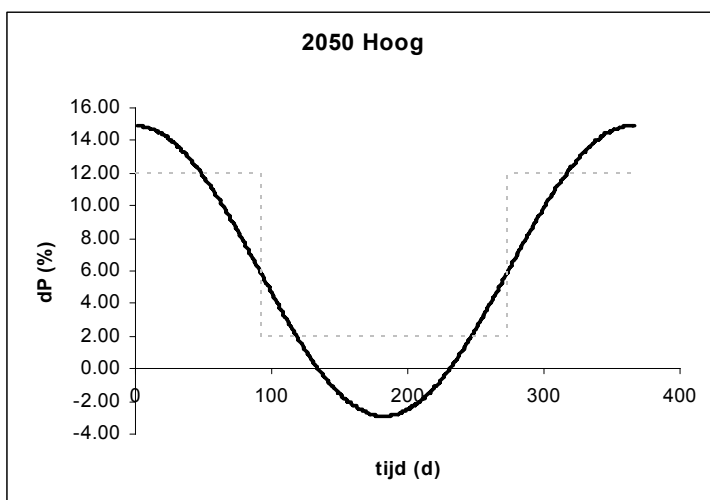
Zwolsman, G. en A. Doomen, 2005. Waterkwaliteit van de Rijn en de Maas bij (extreem) lage afvoeren. Kiwa WR, Nieuwegein. Rapport KWR 05.061.

Zwolsman, G. en A. van Bokhoven, subm. Impact of summer droughts on water quality of the Rhine River - a preview of climate change?

I Verandering van neerslag, verdamping en temperatuur over het jaar

Bij de 4 KNMI-klimaatscenario's.





Verandering van de temperatuur en hoeveelheid verdamping over het jaar (alleen Droog scenario)

