

Klimaatinvloeden op de kwaliteit van het Rijnwater

Startdocument Klimaatproject RIWA

RIWA



F.A. de Bruijn (TU Delft)
dr. ir. A. van Mazijk (TU Delft)

Oktober 2003

Vereniging van Rivierwaterbedrijven

Water spreekt tot de verbeelding van velen. Beleidsmakers praten over water, stellen richtlijnen op en definiëren het waterbeleid voor Nederland. In Europees verband zijn afspraken gemaakt over een beoogde onvoorwaardelijke goede waterkwaliteit van het oppervlaktewater, zodat drinkwaterbereiding met natuurlijke processen kan plaatsvinden, nu en in de toekomst.

Inzicht in de ontwikkelingen van de waterkwaliteit in de toekomst is noodzakelijk om op tijd effectieve maatregelen te kunnen treffen om problemen te voorkomen. Voor drinkwaterbedrijven is het van belang te weten welke kwaliteitsparameters kritisch zijn en welke op korte en langere termijn minder aandacht vereisen.

Dit rapport is het resultaat van een onderzoek waarin de invloeden van het klimaat op de kwaliteit van het Rijnwater globaal in kaart zijn gebracht. Het onderzoek is de aanzet tot het klimaatproject van de RIWA (Vereniging van Rivierwaterbedrijven), waarin in een groter kader zal worden gekeken naar klimaatinvloeden op de drinkwaterproductie.

Als gevolg van klimaatveranderingen zal in het stroomgebied van de Rijn een verandering in het neerslagregime optreden. In de winter zal meer neerslag vallen en in de zomer minder, waardoor de afvoer van de Rijn 's winters hoger wordt, en 's zomers lager. De gevolgen voor Nederland zijn onder andere een verhoogd overstromingsrisico in de winter en een watertekort in de zomer. Dat watertekort houdt in dat bij gelijkblijvende lozingen van verontreinigingen de concentraties hoger worden. Voor de drinkwatervoorziening is het de vraag of concentraties boven maximaal toegestane waarden komen, waardoor de waterinname moet worden gestaakt.

In dit onderzoek is enerzijds naar de belasting en afvoerafhankelijkheid van verschillende stoffen gekeken en anderzijds naar de afvoerontwikkelingen op basis van de huidige klimaatscenario's. Aan de hand van de resultaten van het onderzoek is geconcludeerd dat in 2050 de chlorideconcentratie gedurende maximaal 20 dagen per jaar te hoog zal zijn voor de drinkwaterbereiding (chloride concentratie is meer dan 200 mg/liter). Echter de kans dat dit een aaneengesloten periode van 20 dagen is, bedraagt slechts één keer in de 30 jaar. De loodconcentratie daarentegen zal gedurende bijna de helft van het jaar te hoog zijn, indien wordt uitgegaan van de door de Internationale Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke im Rheineinzugsgebiet (IAWR) gehanteerde streefwaarde van 5 mg/liter. Wordt daarentegen de norm van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat voor de bereiding van drinkwater van 30 mg/liter gehanteerd, dan wordt de kans dat deze waarde wordt overschreden echter zeer onwaarschijnlijk.

Eén en ander betekent, dat op korte termijn geen ingrijpende maatregelen ter waarborging van de drinkwatervoorziening vereist zijn. Om echter in de toekomst zeker te kunnen zijn van een constante en veilige drinkwatervoorziening, en daarbij een eenvoudige en natuurlijke zuivering, is het derhalve voor drinkwaterbedrijven belangrijk alert te zijn en te blijven op de afvoerontwikkelingen en de verschillende verontreinigingen. Daarvoor zijn voor alle afvoerafhankelijke kwaliteitsparameters goede metingen onontbeerlijk, want zonder goede meetreeksen is het voorspellen van kwaliteitsontwikkelingen vrijwel onmogelijk. Daarnaast is het belangrijk voor elke kwaliteitsparameter die zijn grenswaarde benadert vast te stellen wat de belangrijkste bronnen zijn, zodat bij de bron maatregelen genomen kunnen worden. Alleen dan is een natuurlijke en eenvoudige zuivering mogelijk, die goedkoop en duurzaam is.

Inhoud

Ten Geleide	3
1 Inleiding	7
2 Project	9
2.1 Probleembeschrijving	9
2.2 Doelstelling	9
3 Vooronderzoek	11
3.1 Klimaatontwikkelingen	11
3.1.1 <i>Nederlandse klimaatscenario's voor de komende 100 jaar</i>	11
3.1.2 <i>Klimaatverwachtingen voor het Rijnstroomgebied</i>	12
3.1.3 <i>Gevolgen en risico's</i>	13
3.2 Vergelijkbaar onderzoek	13
3.2.1 <i>Classificering van gelijksoortige studies</i>	14
3.2.2 <i>Samenvattingen en conclusies van andere studies</i>	14
3.3 Beschikbare meetgegevens	15
4 Waterkwaliteitsparameters Rijn	17
4.1 Zoutbelasting Rijn	17
4.1.1 <i>Kenmerken chloridevracht Lobith</i>	17
4.1.2 <i>Modelopbouw chloridevracht en -concentratie</i>	19
4.1.3 <i>Model calibratie zonder invloed kalimijnen</i>	19
4.1.4 <i>Model calibratie met invloed kalimijnen</i>	20
4.1.5 <i>Resultaten model met betrekking tot lage afvoeren</i>	22
4.1.6 <i>Geldigheid en bruikbaarheid van het model</i>	22
4.1.7 <i>Zoutbelasting van het Nederlandse deel van de Rijn</i>	22
4.2 Andere kwaliteitsparameters	23
4.2.1 <i>Lood</i>	23
4.2.2 <i>Isoproturon</i>	23
5 De Nederrijn: waterkwantiteit en -kwaliteit	25
5.1 Stuwprogramma S285 - Nederrijn	25
5.1.1 <i>Opbouw</i>	25
5.1.2 <i>Consequenties voor de afvoerverdeling van de Rijntakken</i>	26
5.1.3 <i>Consequenties voor de Nederrijn</i>	27
5.2 Chlorideconcentratieontwikkeling	28
5.2.1 <i>Bovenstrooms van het Lekkanaal</i>	28
5.2.2 <i>Benedenstrooms van het Lekkanaal</i>	28
5.3 Minimale waterkwaliteitseisen	29

6 Afvoerontwikkelingen	31
6.1 Klimaat- en afvoerscenario's	31
6.2 RhineFlow	32
6.3 Afvoerverwachtingen Lobith	32
6.3.1 <i>Simulatiereeksen</i>	32
6.3.2 <i>Analyse</i>	33
7 Waterkwaliteitsprognose	37
7.1 Lekkanaal	37
7.1.1 <i>Relatie Lobith-Lekkanaal</i>	37
7.1.2 <i>Waterkwaliteitsprognose Lekkanaal</i>	37
7.2 IJsselmeer	38
7.2.1 <i>Chloridebalansmodel IJsselmeer</i>	38
7.2.2 <i>Uitkomsten</i>	39
7.2.3 <i>Waterkwaliteitsprognose Andijk</i>	40
8 Conclusies en aanbevelingen	41
8.1 Conclusies met betrekking tot de waterkwaliteit	41
8.2 Aanbevelingen ten bate van het vervolg van het onderzoek	41
8.2.1 <i>Tweede verkenning</i>	41
8.2.2 <i>Klimaatstudie</i>	42
8.2.3 <i>Schematisch overzicht</i>	42
Referenties	43
Colofon	44

Inleiding

Nederland is als dichtbevolkte delta van de Rijn en de Maas een kwetsbaar gebied. De bedreigingen komen van meerdere kanten: van de Noordzee, die tijdens stormen het land kan overspoelen en van de bovenstroomse gebieden van de Rijn en de Maas, waar extreme afvoeren overstromingen kunnen inluiden. Tegen deze bedreigingen zijn veel maatregelen genomen, die een betrekkelijke veiligheid garanderen.

Het water is niet slechts een gevaar. Het is ook een peiler onder de economie: de Nederlandse waterwegen zijn de drukste ter wereld. Daarnaast is het oppervlaktewater van vitaal belang voor de drink- en industrie-watervoorziening. Vooral voor de drinkwatervoorziening is een constante garantie van de waterkwaliteit zeer belangrijk. Om de kwaliteit continu te bewaken is een uitgebreid meetnet opgezet dat kwaliteits- en kwantiteitsparameters meet en opslaat. De Vereniging van Rivierwaterbedrijven, de RIWA, verzamelt deze gegevens en bekijkt of de waterkwaliteit niet te wensen overlaat.

De afgelopen decennia is de waterkwaliteit van de Rijn en de Maas drastisch verbeterd. De afspraken van het Rijnverdrag, waarin onder anderen regels over onttrekkingen en lozingen door de verschillende Rijnstaten staan vermeld, hebben hun vruchten afgeworpen. Het is echter belangrijk om naar de toekomst te blijven kijken, vooral met het oog op versnelde klimaatveranderingen door de uitstoot van broeikasgassen.

De klimaatveranderingen houden een algehele temperatuurstijging op aarde in. De gevolgen daarvan zijn, naast een zeespiegelstijging, veranderingen in het neerslagpatroon van Europa. De verwachting voor het bovenstroomse gedeelte van het Rijnstroomgebied is, dat 's winters meer, en 's zomers minder neerslag zal vallen. De invloeden daarvan op de rivieren zijn groot. In de winter moet veel meer water afgevoerd worden en in de zomer veel minder, in vergelijking met de huidige situatie. Nederland zal daardoor te maken krijgen met verhoogde piekafvoeren van de Rijn in de winter en langere laagwaterperiodes in de zomer.

De Lek benedenstrooms van de stuw Hagestein



De consequentie van de verhoogde piekafvoeren is evident: er zal meer overstromingsrisico zijn, met alle gevolgen van dien. De daling van de bodem in Nederland zal de risico's nog meer doen toenemen. De consequenties van laagwaterafvoeren, daarentegen, zijn minder duidelijk. De waterkwaliteit zou bij een gelijkblijvende belasting van verschillende verontreinigingen als gevolg van een langdurige lage waterafvoer kunnen verslechteren.

Aangezien er op het gebied van de gevolgen van lage rivierafvoeren nog maar weinig onderzoek is gedaan, en het eigenlijk onduidelijk is of er problemen zullen optreden, heeft de RIWA het onderhavige 'klimaatproject' opgezet, waarin de consequenties van de klimaatveranderingen in de 21^e eeuw voor de rivieren en waterleidingbedrijven worden onderzocht.

Dit project betreft een vooronderzoek naar de directe noodzaak van een uitgebreider onderzoek naar de gevolgen van de klimaatsveranderingen op de waterkwaliteit van het oppervlaktewater in het Nederlandse Rijnstroomgebied. Derhalve beperkt het onderzoek zich tot de ontwikkelingen van de chloridebelasting en een tweetal andere kwaliteitsparameters in groter verband en lokaal op de Nederrijn. Deze kwaliteitsverwachtingen worden vervolgens getoetst aan verwachte afvoeren van de Rijn, zodat een voorspelling kan worden gedaan of er een probleem op zal treden in de toekomst voor het wateraanbod bij het Waterwinstation ir. Cornelis Biemond (WCB) aan het Lekkanaal in Nieuwegein en het Waterwinstation Prinses Juliana (WPI) en Pompstation Andijk (PSA), aan het IJsselmeer te Andijk. Hoewel de resultaten van het vooronderzoek een indicatief karakter hebben, zijn ze voldoende informatief om een uitspraak te kunnen doen, of nader onderzoek al dan niet nodig is.

* Een tijdreeks is een reeks chronologisch gerangschikte waarden van een bepaalde grootte.

De RIWA, de Vereniging van Rivierwaterbedrijven, is een vereniging van waterleidingbedrijven die hun water onttrekken aan het oppervlaktewater. De doelstelling van de RIWA is het controleren van de kwaliteit van het oppervlaktewater zodat de drinkwatervoorziening gewaarborgd blijft. Met het oog op de klimaatontwikkelingen en het vermoeden dat daardoor de waterkwaliteit in gevaar zou kunnen komen is het onderhavige project ontstaan, als voorloper op een eventuele studie van de exacte gevolgen van de klimaatveranderingen. De bedoeling is dat het vermoeden bevestigd of ontkracht wordt, zodat een verder onderzoek gestart of uitgesteld kan worden.

2.1 Probleembeschrijving

Het klimaat verandert. In de afgelopen eeuwen is de temperatuur op aarde hoger geworden. Gedurende de 20^e eeuw is de uitstoot van broeikasgassen drastisch toegenomen, wat de opwarming van de aarde versnelt. Door de opwarming zullen er veranderingen optreden in het neerslagpatroon van het Rijnstroomgebied. De verwachting is dat de Rijn, een smeltwaterrivier, meer zal gaan lijken op een regenrivier, met hoge afvoeren 's winters en lage afvoeren 's zomers. Met lage afvoeren in de zomer en de huidige onttrekkingsvergunningen zou de afvoer te laag kunnen worden, waardoor de beschikbaarheid van rivierwater voor de drinkwatervoorziening problematisch kan worden.

Bij gelijkblijvende belastingen van verontreinigingen is het gevolg van een lagere afvoer dat de waterkwaliteit omlaag gaat, omdat concentraties van opgeloste stoffen te hoog worden. Bij lagere afvoer en gelijkblijvende vrachten wordt de concentratie van opgeloste stoffen immers hoger. Voor drinkwaterbedrijven, zoals de Gemeente Waterleidingen Amsterdam (GWA) en de Provinciale Waterleidingen Noord-Holland (PWN), die hun water onttrekken aan de Rijn, zou dat eveneens een probleem kunnen worden.

2.2 Doelstelling

Het doel van dit project is het inventariseren van de klimaatscenario's voor Nederland en het Rijnstroomgebied en de gevolgen daarvan voor de waterbeschikbaarheid en -kwaliteit. De chlorideconcentratie is daarbij de belangrijkste parameter, maar ook lood en isoproturon worden in ogenschouw genomen.



3.1 Klimaatontwikkelingen

De gemeten mondiale temperatuurstijging is aanleiding tot grootschalig onderzoek op klimaatgebied. Mede door de uitstoot van broeikasgassen is de temperatuur op de aarde gedurende de tweede helft van de 20^e eeuw versneld gestegen, vergeleken met de klimatologische veranderingen gedurende meerdere eeuwen. Om te kunnen vaststellen wat de gevolgen zijn van de temperatuurstijging, is het noodzakelijk die voor de komende 100 jaar te kwantificeren. Op dat gebied zijn diverse modellen ontwikkeld, met verschillende temperatuurprognoses. Met die temperatuurprognoses zijn klimaatscenario's voor specifieke regio's gemaakt, die voorspellingen bieden voor onder anderen temperatuur en neerslag. In dit hoofdstuk wordt een aantal klimaatscenario's beschreven die relevant zijn voor Nederland en het gehele Rijnstroomgebied. Vervolgens worden de gevolgen van de klimaatveranderingen voor Nederland kwalitatief beschreven.

3.1.1 Nederlandse klimaatscenario's voor de komende 100 jaar

Basis voor de klimaatscenario's is het onderzoek van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Uit de mondiale scenario's van het IPCC is het niet mogelijk conclusies te trekken voor een gebied van beperkte grootte zoals het Rijnstroomgebied. Op basis van de aanname dat het Nederlandse klimaat een zeeklimaat blijft (dat de luchtcirculatie boven West-Europa ongewijzigd blijft), heeft het KNMI met de mondiale scenario's van het IPCC voor Nederland specifieke klimaatscenario's vastgesteld.

De drie scenario's die gebruikt worden zijn een benedenschatting, een centrale schatting en een boven-schatting. In Tabel 3-1 worden de belangrijkste klimatologische veranderingen aangegeven ten opzichte van het basisjaar 1990, waarbij de temperatuurverhogingen voor 2100 gelden. Voor oorzaken en details wordt verwezen naar het rapport van Verbeek (2003) van het KNMI. Hieronder wordt een samenvatting gegeven van de belangrijkste klimaatveranderingen voor Nederland.

Neerslag

Met een toename van de temperatuur neemt de hoeveelheid neerslag toe. Vooral de winterneerslag zal sterk toenemen (tot 24 procent in het warmste scenario in 2100). De zomerneerslag zal eveneens toenemen (in tegenstelling tot de zomerneerslag in het bovenstroomse gebied, zie paragraaf 3.1.2), maar zal geconcentreerd zijn in hevige buien.

Waterstandsstijging

In alle scenario's zal de zeespiegel stijgen. In Tabel 3-1 is de stijging van de laagwaterstand van de zeespiegel aangegeven, omdat vooral een verhoging daarvan indicatief is voor de vermindering van de mogelijkheid tot spuien van het IJsselmeer. De aangegeven stijging is relatief, dat wil zeggen ten opzichte van de dalende bodem.

Tabel 3-1 Klimaatveranderingen Nederland ten opzichte van 1990 (bron: WIN, 2000)

Simulatie	benedenschatting ($\Delta T = +1^{\circ}\text{C}$ in 2100)			centrale schatting ($\Delta T = +2^{\circ}\text{C}$ in 2100)			bovenschatting ($\Delta T = +4^{\circ}\text{C}$ in 2100)		
	2025	2050	2100	2025	2050	2100	2025	2050	2100
toename jaarneerslag (%)	0.75	1.5	3.0	1.5	3.0	6.0	3.0	6.0	12.0
toename zomerneerslag (%)	0.25	0.5	1.0	0.5	1.0	2.0	1.0	2.0	4.0
toename winterneerslag (%)	1.5	3.0	6.0	3.0	6.0	12.0	6.0	12.0	24.0
toename verdamping (%)	1.0	2.0	4.0	2.0	4.0	8.0	4.0	8.0	16.0
relatieve stijging laagwaterstand (m)	0.04	0.07	0.15	0.12	0.22	0.55	0.22	0.42	1.05

3.1.2 Klimaatverwachtingen voor het Rijnstroomgebied

De grootte van de afvoer van de Rijn is voornamelijk afhankelijk van het klimaat van het Rijnstroomgebied, en niet van het klimaat van Nederland in het bijzonder. Om een voorspelling te kunnen doen van de afvoer in de toekomst is dus een klimaatprognose nodig van het gehele Rijnstroomgebied. Grabs (1997) noemt drie verschillende klimaatscenario's die geldig zijn voor het Rijnstroomgebied, te weten de ukhi-, xccc- en uktr-scenarios, die opgesteld zijn door de Climate Research Unit, University of East Anglia.

Temperatuur

Voor het gehele Rijnstroomgebied gelden ongeveer de temperatuurstijgingen zoals die voor Nederland gelden volgens het onderzoek van het KNMI.

Neerslag

De temperatuurstijging heeft een grote invloed op het neerslagregime. In de door Grabs (1997) onderzochte gebieden in het bovenstroomse gebied van de Rijn zal de winterneerslag zeer sterk stijgen, terwijl de zomerneerslag sterk zal dalen. De vergroting van de neerslaghoeveelheid in de zomer van Nederland is dus een uitzondering op de algehele verlaging in het gehele Rijnstroomgebied. In Tabel 3-2 en Tabel 3-3 staan de neerslagtoenames bij de verschillende klimaatscenario's voor het bovenstroomgebied (Zwitserland) en het middenstroomgebied (midden Duitsland)

Tabel 3-2 Neerslagveranderingen bovenstroomgebied Rijn ten opzichte van 1990 (bron: Grabs, 1997)

	ukhi2050	xxxx2050	uktr2050
toename jaarneerslag (%)	2.0	3.5	3.0
toename zomerneerslag (%)	-5.3	-4.1	-9.4
toename winterneerslag (%)	9.2	11.0	15.4

Tabel 3-3 Neerslagveranderingen middenstroomgebied Rijn ten opzichte van 1990 (bron: Grabs, 1997)

	ukhi2050	xxxx2050	uktr2023	uktr2060
toename jaarneerslag (%)	2.1	3.4	0.8	3.9
toename zomerneerslag (%)	-5.2	-4.2	-7.2	-8.5
toename winterneerslag (%)	9.3	10.9	8.7	16.3

3.1.3 Gevolgen en risico's

De klimaatveranderingen hebben grote invloed op Nederland. De algehele temperatuurstijging heeft een zeespiegelstijging tot gevolg, en een verandering in het neerslagpatroon. Samen met het feit dat de bodem in Nederland daalt, levert dat de volgende risicovolle situaties op:

- zeespiegelstijging en gelijktijdige bodemdaling maken de zeeweringen kwetsbaarder;
- verhoogde neerslag in de wintermaanden geeft hogere rivierafvoeren, met kans op overstromingen;
- kortstondige hevige buien in de zomer geven tijdelijke wateroverlast;
- door de temperatuurstijgingen smelten de gletsjers in de Alpen. Een deel van het water zal door de Rijn worden afgevoerd, wat een verhoging van de afvoer oplevert. De gletsjers zijn echter al zeker sinds de helft van de 19e eeuw aan het smelten. De effecten daarvan zijn nu dus al verdisconteerd in de rivierafvoeren;
- door de stijging van de zeespiegel wordt het verval van de rivieren kleiner, wat de afvoer bemoeilijkt, met kans op overstromingen;
- het laag houden van het IJsselmeerpeil wordt bemoeilijkt doordat er minder gespuid kan worden op de Waddenzee met een verhoogde laagwaterstand;
- door de verhoogde zeespiegel wordt de zoutwaterkwel onder de zeeweringen groter, wat de kwaliteit van het zoete grondwater, en soms zelfs het oppervlaktewater aantast, waardoor de agrarische sector en de drinkwatervoorziening gevaar lopen.

Daarnaast ontstaat wellicht een ander probleem, dat in Nederland niet echt logisch lijkt: een watertekort. Door verminderde neerslag in het bovenstroomse gebied zullen er lagere zomerafvoeren optreden, waarvan de gevolgen zich op twee manieren kunnen manifesteren. Het totaal van wateronttrekkingen, die vastgelegd zijn in vergunningen, kan groter worden dan de afvoer. Ten tweede zouden door de lagere zomerafvoer, zonder aanpassing van de lozingsvergunningen in het stroomgebied van de Rijn (en dus gelijkblijvende vracht), de concentraties van opgeloste stoffen te groot kunnen worden. Zowel het watertekort als de kwaliteitsverslechtering kunnen de drinkwatervoorziening in gevaar brengen, met name voor de drinkwaterleidingbedrijven die hun water onttrekken aan het oppervlaktewater van het Rijnstroomgebied (bijvoorbeeld GWA en PWN).

3.2 Vergelijkbaar onderzoek

Verscheidene instanties doen onderzoek of hebben onderzoek gedaan naar de effecten van klimatologische veranderingen op de hydrologische kenmerken van de Rijn. In Nederland zijn dat onder anderen WL | Delft Hydraulics, het Netherlands Centre for River Studies (NCR), het departement Fysische Geografie van de Universiteit Utrecht, het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), het Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA) en het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI). In internationaal verband is er onder anderen de Commissie voor de Hydrologie van het Rijngebied (CHR). Verder zijn er nationale en internationale onderzoeksprogramma's, waaronder het Nationaal Onderzoek Programma Mondiale Luchtverontreiniging en Klimaatverandering (NOP) en het Interreg Rhine-Meuse Activities Programme (IRMA).

3.2.1 Classificering van gelijksoortige studies

Naar de invloeden van veranderingen in de afvoercharacteristieken van rivieren als gevolg van klimaatveranderingen zijn veel publicaties voorhanden. Een vergelijking met de onderzoeken is noodzakelijk om tot een goed resultaat te komen. De onderzoeken onderscheiden zich in een aantal soorten:

- puur onderzoek naar de effecten van een klimaatverandering op de afvoer, waarbij vooral wordt gekeken naar de neerslag en de precieze veranderingen in de bijbehorende karakteristieken;
- onderzoek naar de gevolgen van afvoerhoging met betrekking tot het waterbeheer;
- onderzoek naar de effecten van te hoge afvoeren, en de risico's die daaraan zijn verbonden met betrekking tot overstromingen.

Naast onderzoek in het Rijnstroomgebied is ook gekeken naar onderzoek naar het Maasstroomgebied en andere gebieden, als vergelijking in methodiek.

3.2.2 Samenvattingen en conclusies van andere studies

Van onderstaande rapporten is getracht de voor het onderzoeksproject de belangrijkste bevindingen te extraheren, eventueel met vermelding van de gehanteerde onderzoeksmethode.

Grabs, W. (ed.), (1997): Impact of Climate Change on Hydrological Regimes and Water Resources Management in the Rhine Basin

Met het RhineFlow model en een aantal klimaatscenario's zijn voor het hele Rijnstroomgebied en een aantal kleinere stroomgebieden in het bijzonder de gevolgen van de klimaatveranderingen in kaart gebracht. De belangrijkste conclusies zijn:

- de gebruikte klimaatmodellen zijn eigenlijk niet geschikt voor een precieze lokale klimaatvoorspelling, maar voor de hydrologische gevolgen voldoen ze wel;
- klimaatveranderingen zullen optreden, en de invloeden op de Rijn zijn groot;
- de Rijn zal veranderen van een smeltwater/regenrivier in een regenrivier, met hoge winterafvoeren en lage zomerafvoeren;
- de lage afvoeren in de zomer zouden problemen kunnen geven wat betreft waterkwantiteit, en wellicht ook wat betreft waterkwaliteit.

Jacobs et al. (2000): Climatological changes in storm surges and river discharges: the impact on flood protection and salt intrusion in the Rhine-Meuse delta

Klimaatveranderingen brengen teweeg dat de winterafvoeren stijgen en de zomerafvoeren dalen. De lage zomerafvoeren zijn, samen met de verhoogde zeespiegel, de oorzaak van een verdere verzilting van de Rijndelta. Voor de verschillende klimaatscenario's is de zoutindringing in kaart gebracht. Het invloedsgebied reikt niet tot Hagestein. Meer onderzoek op het gebied van klimaatverandering en de afvoeranderingen is noodzakelijk, om verder te kunnen onderzoeken of de zoutindringing niet veel verder kan komen door een grenstoestand van storm op zee en een minimale afvoer.

Tol et al. (1999): Adapting to climate change: A case study on riverine flood risks in The Netherlands

Klimaatveranderingen kunnen de risico's van overstromingen vergroten. De "General Circulation Models" voorspellen verhoogde neerslag voor Europa, met als gevolg hogere afvoeren. Tegen de risico's worden verschillende oplossingen aangedragen.

WL I Delft Hydraulics (1998): De Rijn op termijn

Verhogingen van de afvoer van de Rijn zijn een probleem omdat er in het huidige systeem niet genoeg ruimte voor is, met als gevolg overstromingen. Verder kunnen te lage afvoeren problemen geven voor de scheepvaart als de waterstand te laag wordt. Algemeen wordt een totaaloplossing voor het Nederlandse

deel van het stroomgebied gegeven, waarbij duurzaamheid één van de hoofdpunten is. De rivier moet ingericht worden als een veerkrachtig systeem dat verhogingen en verlagingen van de afvoer moet aan kunnen.

3.3 Beschikbare meetgegevens

Voorspellingen over toekomstige afvoeren worden opgesteld aan de hand van beschikbare klimaat-scenario's en gegevens van afvoeren uit het verleden. In Nederland en Duitsland worden zeer veel metingen verricht door verschillende instanties. In Nederland verricht Rijkswaterstaat veel metingen op meerdere locaties. Een deel van deze metingen kan opgevraagd worden via de websites WaterBase en WaterStat. Verder worden metingen van de lidbedrijven van de RIWA door de RIWA bijeengebracht in een centrale database.

Met betrekking tot dit project, waarin een prognose van de afvoer in de toekomst het doel is, is het van groot belang dat er betrouwbare gegevens zijn van de afvoeren. Verder is het interessant nog een beeld te krijgen van de afvoerontwikkeling gedurende de 20e eeuw. Uit de verschillende databases zijn zoveel mogelijk afvoergegevens van twee stations verzameld: Lobith en Hagestein. De keuze voor deze twee stations wordt bepaald door het belang ervan. Lobith is een representatief meetstation voor de afvoer die via de Rijn Nederland binnenkomt. Dijken in het Nederlandse Rijnstroomgebied worden ontworpen aan de hand van ontwerpafvoeren bij Lobith. Hagestein is belangrijk voor het WCB. De beschikbare gegevens staan in Tabel 3-4.

Tabel 3-4 Beschikbare afvoergegevens

locatie	van	tot	per	bron
Lobith	1901	1971	jaar	WaterStat
	01/01/1972	31/12/2002	dag	RIWA
Hagestein	01/01/1985	31/12/1989	dag	RIWA
	01/01/1990	30/09/2000	10 minuten	WaterBase
	01/10/2000	31/12/2002	dag	WaterBase

Naast de afvoer, zijn ook gegevens nodig over de waterkwaliteit. In eerste instantie wordt gekeken naar de chlorideconcentratie, die met de afvoeren omgerekend kan worden naar een chloridevracht. Aan de hand van de vracht en de voorspelde afvoer kan een voorspelling worden gedaan over de concentraties in de toekomst en dus over de waterkwaliteit.

Tabel 3-5 Beschikbare chlorideconcentratiegegevens

locatie	van	tot	per	bron
Lobith	01/01/1972	31/12/2002	dag	RIWA
Hagestein	01/01/1990	30/09/2000	10 minuten	WaterBase
	01/10/2000	31/12/2002	dag	WaterBase



Waterkwaliteits

Waterkwaliteitsparameters Rijn

4

De Rijn is de belangrijkste toevoer van water voor Nederland. Met name voor de drinkwatervoorziening is de kwaliteit van het water belangrijk. De belangrijkste parameter in dit onderzoek is de chlorideconcentratie. Daarnaast worden in dit hoofdstuk lood en het bestrijdingsmiddel isoproturon genoemd als voorbeelden van andere parameters.

4.1 Zoutbelasting Rijn

De zoutbelasting wordt gerepresenteerd door de gegevens over chloride (Cl^-) in het oppervlaktewater. Op diverse punten wordt de chlorideconcentratie (in mg/l) gemeten, die vervolgens vermenigvuldigd met de afvoer de chloridevracht (in kg/s) oplevert. Door de samenhang met de afvoer, reageren de chlorideconcentratie en -vracht niet evenredig op een verandering in de afvoer of op een extra zoutbelasting.

4.1.1 Kenmerken chloridevracht Lobith

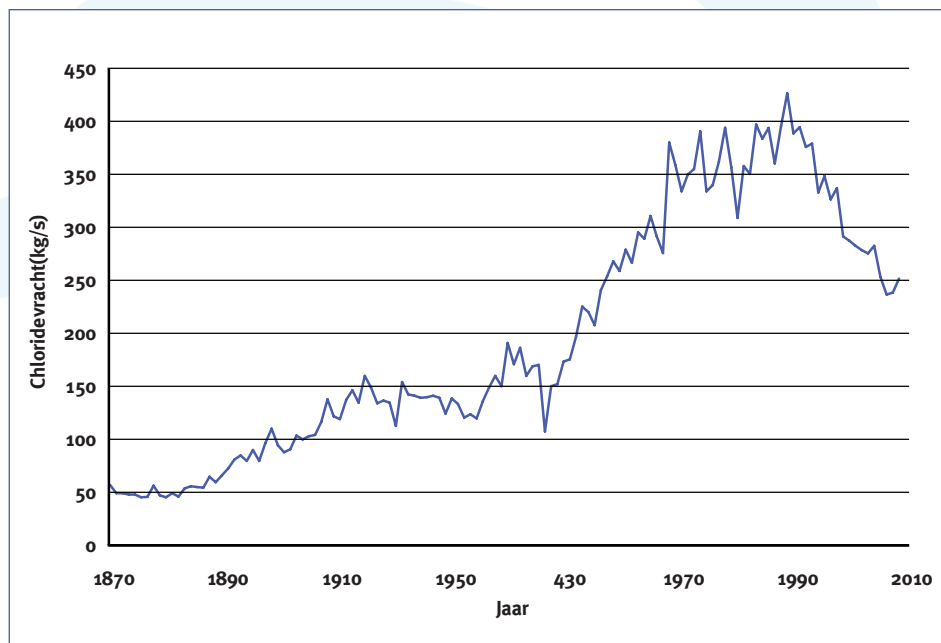
De opbouw van de chloridebelasting bij Lobith is niet gemakkelijk vast te stellen. In deze paragraaf worden zeer globale waarden gegeven, om een basis te bieden voor een model dat de chloridevracht en -concentratie als functie van de afvoer berekent. De waarden in deze paragraaf zijn slechts indicatief en visueel bepaald uit Figuur 4-1. Ze worden in het model verijnd.

Natuurlijke achtergrondbelasting

De basis van de zoutbelasting is de natuurlijke chlorideconcentratie van het Rijnwater. Door de afstroming van neerslag door mineraalhoudend gesteente lost een hoeveelheid zout op in het grondwater dat vervolgens wordt afgevoerd via de Rijn. Sinds het einde van de 19^e eeuw is de natuurlijke zoutbelasting slechts een klein deel van de totale belasting. In Figuur 4-1 is de ontwikkeling van de jaargemiddelde chloridevracht uitgezet van 1875 tot 2000. Vanaf ongeveer 1895 vertoont de tot dan toe constante vracht een drastische stijging, die te wijten is aan de industrialisering van de samenleving. Het is zeer aannemelijk dat de jaargemiddelde waarde van 50 kg/s , die vóór 1895 geldt, een goede schatting is voor de natuurlijke component van de zoutbelasting bij Lobith.

Deze waarde van 50 kg/s levert met het langjarig gemiddelde van de afvoer van $2200 \text{ m}^3/\text{s}$ een waarde van de chlorideconcentratie van 23 mg/l op. Voor de natuurlijke zoutbelasting geldt dat de concentratie constant is bij een variërende afvoer, doordat bij een hogere afvoer meer water over land is afgestroomd, waarin als gevolg hiervan ook meer zout is opgelost.

Figuur 4-1 Jaargemiddelden chloridevracht



Achtergrondbelasting van de geïndustrialiseerde samenleving

Sinds het begin van de 20^e eeuw is de zoutbelasting sterk gestegen, zoals te zien is in Figuur 4-1. De verandering van de samenleving van een agrarische naar een geïndustrialiseerde heeft de achtergrondbelasting veranderd. Door bijvoorbeeld bemesting, lokale industrieën, lozing van afvalwater en de scheepvaart is de achtergrondbelasting verhoogd tot een waarde overeenkomend met een jaargemiddelde chloridevracht van ongeveer 120 kg/s. Het is een aannemelijke schatting dat de gemiddelde chloridevracht deze grootte heeft zonder de invloed van de uitgebreide lozingen van de bruinkool- en kalimijnen. De plaatselijke piek in de vracht in Figuur 4-1 tussen 1940 en 1945 is veroorzaakt door de grootschalige Duitse oorlogsindustrie tijdens de Tweede Wereldoorlog. Vanaf 1950 hebben de eerder genoemde mijnen een groot aandeel in de zoutvracht, wat te zien is in Figuur 4-1.

De extra chloridevracht als gevolg van de veranderingen in de samenleving is op een jaargemiddelde basis dus 70 kg/s. Bij het langjarig gemiddelde van de afvoer levert dit een concentratie op van 32 mg/l. De vraag is of van deze extra achtergrondbelasting de vracht of de concentratie constant is. Een constante vracht levert bij een verhoogde afvoer een verlaging van de concentratie op, terwijl een constante concentratie bij een verhoogde afvoer een verhoging van de vracht oplevert. Waarschijnlijk is de invloed van dit deel van de chloridebelasting niet eenduidig vast te stellen, en zullen noch de vracht, noch de concentratie constant zijn bij veranderingen van de afvoer, omdat de lozingen deels puntlozingen zijn (lokale industrie) en deels diffuus (bemesting). Een grove benadering is dat de ene helft een constante vracht heeft van 35 kg/s en de andere helft een constante concentratie van 16 mg/l.

Grootschalige zoutlozingen door industrie en mijnbouw

Sinds ongeveer 1950 zijn de bruinkoolmijnen bij Keulen en de kalimijnen bij Mulhouse grootschalige zoutlozingen op de Rijn gaan uitvoeren, daarnaast is de zware industrie in het Ruhrgebied zout gaan lozen. In de kalimijnen worden kalimestoffen gewonnen uit een mengsel van zouten, waarvan natriumchloride de grootste fractie is. In eerste instantie werd dit zout eenvoudig geloosd in de Rijn, maar door onder anderen de Nederlandse milieu- en drinkwaterlobby is dit in het Rijnzoutverdrag verboden, waardoor de vervuilsbron van de kalimijnen is weggefallen.

Aangezien de zoutlozingen een puntlozing zijn die volledig onafhankelijk van de afvoer geschiedt, is voor dit deel van de zoutbelasting de chloridevracht constant, en varieert de concentratie met de afvoer. De gemiddelde vracht bedraagt, sinds de staking van de lozingen van de kalimijnen, ongeveer 130 kg/s.

4.1.2 Model opbouw chloridevracht en -concentratie

Om de grootte van de chloridevracht en -concentratie als functie van de afvoer te bepalen, zijn de constante vrachten en concentraties van paragraaf 4.1.1 in een stelsel vergelijkingen gezet die de vracht en concentratie bij een bepaalde afvoer berekenen.

$$L = C_c \cdot Q \cdot 10^{-3} + L_c \quad (4-1)$$

$$C = C_c + \frac{L_c}{Q} \cdot 10^3 \quad (4-2)$$

waarin:

Q = afvoer bij Lobith (m³/s)

L = chloridevracht bij Lobith (kg/s)

C = chlorideconcentratie bij Lobith (mg/l)

C_c = constante chlorideconcentratie (mg/l)

L_c = constante chloridevracht (kg/s)

4.1.3 Model calibratie zonder invloed kalimijnen

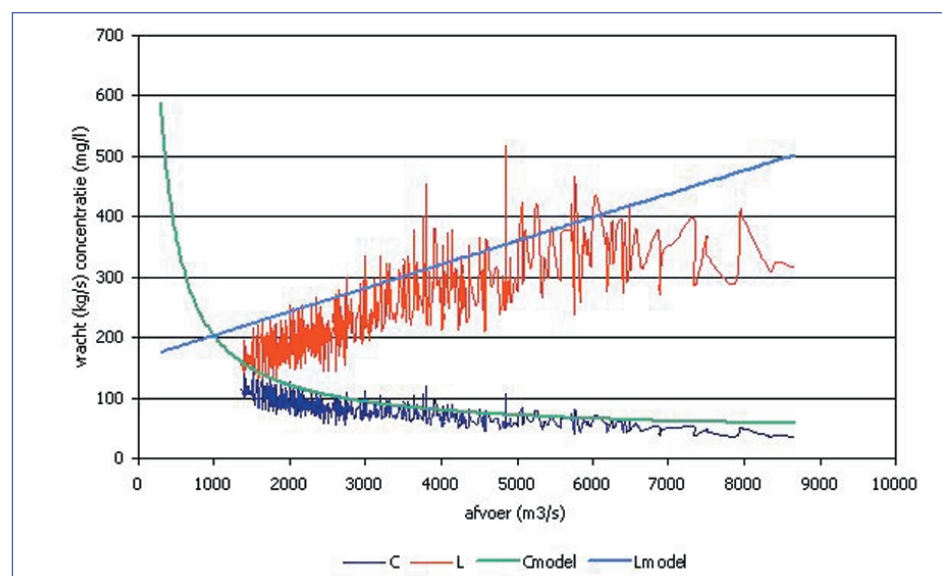
In paragraaf 4.1.1 staan globale waarden voor de constante concentratie en vracht. Het is echter van belang exactere waarden te verkrijgen zodat ook bij andere afvoeren dan het langjarig gemiddelde van 2200 m³/s betrouwbare waarden van de concentratie en de vracht kunnen worden bepaald. Hierbij zijn vooral lage afvoeren van belang voor dit onderzoek.

Aangezien de kalimijnen begin 2001 volledig zijn gestopt met de zoutlozingen, zijn slechts de gegevens van 2001 en 2002 bruikbaar om de grootte van de constanten te bepalen. In Figuur 4-2 zijn de dagwaarden van de chloridevracht en -concentratie van de jaren 2001 en 2002 uitgezet tegen de afvoer. Daarnaast zijn de vergelijkingen 4.1 en 4.2 met de in paragraaf 4.1.1 vermelde constanten erin gezet:

$$C_c = 39 \text{ mg/l}$$

$$L_c = 165 \text{ kg/s}$$

Figuur 4-2 Modellering chloridebelasting met geschatte constanten, meetgegevens 2001-2002

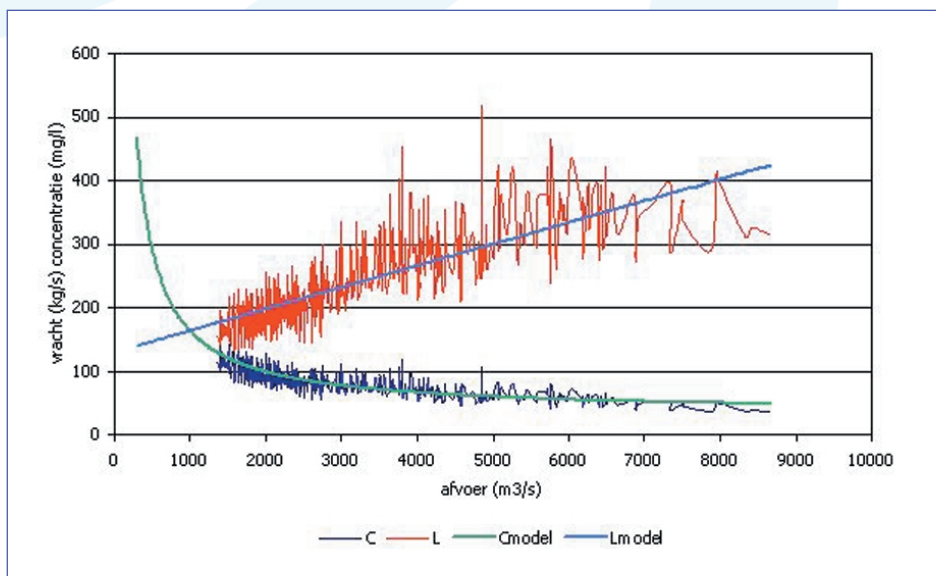


Het model benadert de gemeten waarden nog niet optimaal. De chloridebelasting is te hoog ingeschat. Om de belasting beter in te schatten moeten de constanten worden aangepast. Een voorbeeld dat beter bij de data aansluit is grafisch uitgezet in Figuur 4-3, met volgende constanten:

$$C_c = 34 \text{ mg/l}$$

$$L_c = 130 \text{ kg/s}$$

Figuur 4-3 Modellering chloridebelasting met passende constanten, meetgegevens 2001-2002



4.1.4 Model calibratie met invloed kalimijnen

Door de kalimijnen als aparte constante mee te rekenen, kunnen de andere constanten nogmaals worden geverifieerd. Het model wordt daarom uitgebreid met een vaste chloridevracht van de kalimijnen. De vergelijkingen zien er dan als volgt uit:

$$L = C_c \cdot Q \cdot 10^{-3} + L_c + L_{kali} \quad (4-3)$$

$$C = C_c + \frac{L_c + L_{kali} \cdot 10^3}{Q} \quad (4-4)$$

waarin:

L_{kali} = constante chloridevracht ten gevolge van de kalimijnen (kg/s)

De grootte van L_{kali} is te bepalen door het gemiddelde van de chloridevracht over bijvoorbeeld 1981-1985 te nemen en daar het gemiddelde over 2001-2002 af te trekken. Het resultaat is een globale waarde, die in dit onderzoek voldoet. De waarde van dat verschil is ongeveer 140 kg/s. Een belangrijke aanname bij deze methode is dat ervan uitgegaan is dat de zoutlozingen van de kalimijnen constant in de tijd plaatsvinden.

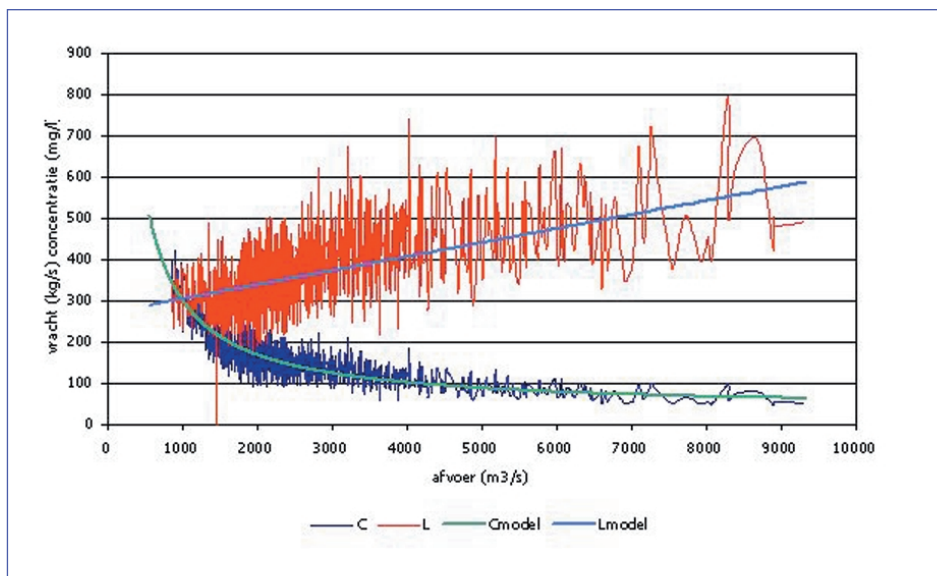
Voor de constanten geldt dan:

$$C_c = 11 \text{ mg/l}$$

$$L_c = 130 \text{ kg/s}$$

$$L_{kali} = 140 \text{ kg/s}$$

Figuur 4-4 Modellering chloridebelasting met inbegrip van de kalimijnen, meetgegevens 1981-1985

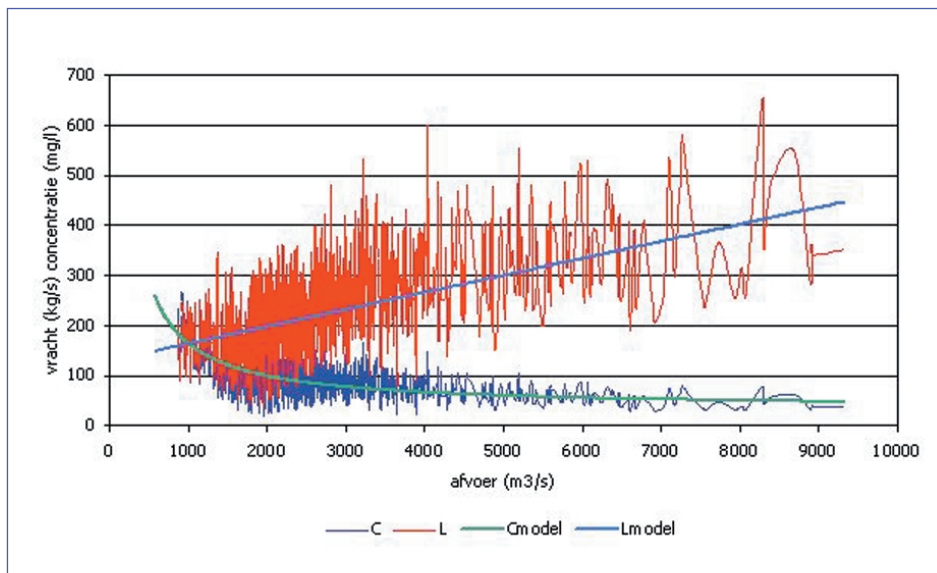


In dit geval passen de in paragraaf 4.1.3 gevonden constanten ook, vooral voor de lage afvoeren.

Een tweede manier om de meetgegevens van 1981-1985 te gebruiken, waarbij een schatting kan worden gedaan van de toekomstige Q - C en Q - L relaties, is een gegevensreeks te gebruiken waarbij van de vracht de kalimijnenvracht is afgetrokken en van de concentratie de kalimijnconcentratie gedeeld door de dagafvoer.

In Figuur 4-5 staan de aangepaste meetreeks van 1981-1985 en het model uitgezet.

Figuur 4-5 Modellering chloridebelasting na aftrek invloed kalimijnen, meetgegevens 1981-1985



4.1.5 Resultaten model met betrekking tot lage afvoeren

Voor dit onderzoek is vooral de chlorideconcentratie bij lage afvoeren interessant. De jaren 2001 en 2002 hadden echter geen extreem lage afvoeren, zoals te zien is in Figuur 4-3. De jaren 1981-1985 hadden wel lagere afvoeren, maar zoals blijkt uit Figuur 4-5 gelden de modelvergelijkingen ook bij lagere afvoeren. Daarnaast kan men met de modelvergelijkingen extrapoleren. In Tabel 4-1 staan voor een aantal lage afvoeren de bijbehorende chlorideconcentraties volgens de Vergelijkingen 4-1 en 4-2.

Tabel 4-1 Gemodelleerde chlorideconcentraties bij lage afvoeren

Q (m³/s)	C (mg/l)
500	294
600	251
700	220
800	197
900	178
1000	164

Bij Lobith wordt de grenswaarde van de concentratie van 200 mg/l bereikt bij een afvoer van 783 m³/s. In hoofdstuk 6 wordt de waarschijnlijkheid van deze afvoer behandeld.

4.1.6 Geldigheid en bruikbaarheid van het model

Het gebruikte model is zeer eenvoudig van opzet en daardoor heel inzichtelijk. Het geeft globaal weer hoe de chlorideconcentratie afhangt van de afvoer. Verder wordt duidelijk hoe het verschil tussen constante concentratie en constante vracht van invloed is op de concentratie en vracht bij verschillende afvoeren.

Een belangrijke beperking van het model is dat geen rekening wordt gehouden met verschillende relaties bij stijgende of dalende afvoeren (hysteresis). Daarnaast worden tijdsvariaties in de chloridebelasting, en seizoensinvloeden niet in rekening gebracht.

Het zou mogelijk zijn uit de grote hoeveelheid beschikbare gegevens met een statistische analyse de benodigde relaties af te leiden. Het probleem daarbij is echter dat de inzichtelijkheid van het model verloren gaat: er ontstaat dan een blackboxmodel, waarin de causaliteit van de relaties tussen de variabelen minder duidelijk is.

Een verfijning van het gebruikte model is de invoering van een foutenmarge, die uit de meetgegevens wordt afgeleid. Bij lage afvoeren geldt ongeveer (zie Figuur 4-2, Figuur 4-3, Figuur 4-4 en Figuur 4-5) dat de fout van de vracht ongeveer tussen de 50 en 100 kg/s ligt, en de fout van de concentratie tussen de 15 en 30 mg/l. De consequentie van die foutenmarges is dat de afvoer waarbij een chlorideconcentratie bij Lobith van 200 mg/l optreedt binnen een marge ligt van ongeveer 690 en 900 m³/s.

4.1.7 Zoutbelasting van het Nederlandse deel van de Rijn

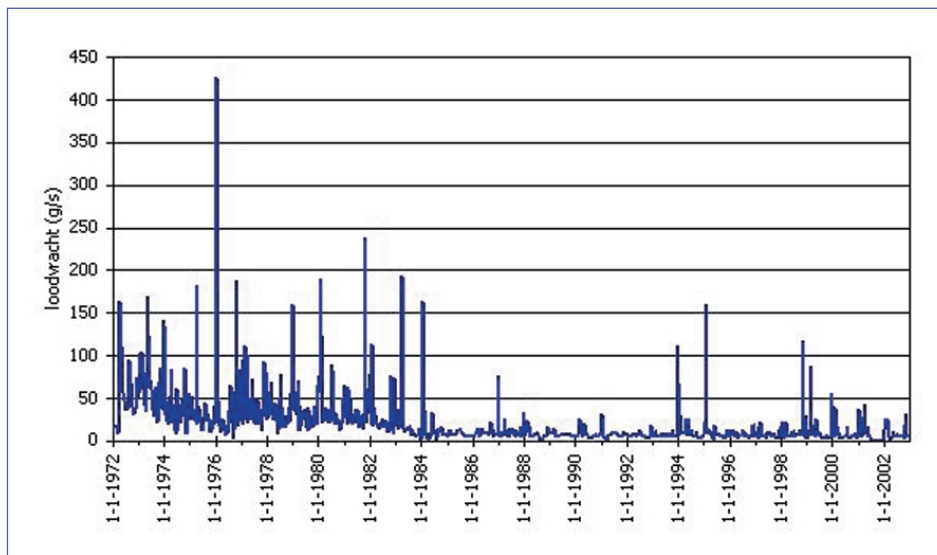
In het Nederlandse deel van de Rijn (waarmee in het kader van dit onderzoek de Bovenrijn, het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn worden bedoeld) vinden geen significante zoutlozingen plaats. Over het algemeen is de chlorideconcentratie overal gelijk aan de concentratie bij Lobith, met een vertraging, afhankelijk van de looptijd. Een uitzondering is de Nederrijn, die door het stuwprogramma een afwijkende chlorideconcentratie kan hebben (zie paragraaf 5.1).

4.2 Andere kwaliteitsparameters

4.2.1 Lood

Lood is een afvalproduct van de zware industrie en is gevaarlijk voor de volksgezondheid en schadelijk voor de natuur. Er zijn processen om het lood te verwijderen uit het water, maar daardoor wordt het slib, dat als afvalproduct van de drinkwaterbereiding overblijft, zeer sterk vervuild. De norm voor de loodconcentratie van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2001) voor de bereiding van drinkwater is 30 mg/l. De IAWR (Internationale Arbeitsgemeinschaft der Wasserwerke im Rheineinzugsgebiet) hanteert echter een streefwaarde van 5 mg/l (IAWR, 2003), met het oog op het bovenstaande.

Figuur 4-6 Loodvracht Lobith



Zoals te zien is in Figuur 4-6 is de vracht van lood in de Rijn sinds de jaren zeventig zeer sterk afgenomen. Momenteel bedraagt de gemiddelde vracht ongeveer 10 g/s. Bij de conservatieve aanname dat dat zo blijft in de 21^e eeuw, wordt de streefwaarde van de concentratie van 5 mg/l bij een afvoer van 2000 m³/s overschreden. Een afvoer van 2000 m³/s is een normale, vaak voorkomende afvoer. Zeker in de toekomst, als er vaker extreem lage afvoeren zullen zijn (zie hoofdstuk 6), zal de concentratie dus heel vaak boven de streefwaarde liggen. De norm van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat wordt overschreden bij een afvoer van 330 m³/s, waarvan het zeer onwaarschijnlijk is dat die werkelijk optreedt.

4.2.2 Isoproturon

Isoproturon is een herbicide die in de landbouw steeds vaker wordt gebruikt in de onkruidbestrijding. In de jaren 2001 en 2002 is de waterinlaat van het WCB in het Lekkanaal meerdere malen gestaakt vanwege een te hoge concentratie isoproturon (Breukel et al., 2002).

Isoproturon wordt voornamelijk in de maanden maart, april, mei, oktober en november toegepast, wat in die perioden pieken in de concentraties oplevert. Gedurende de rest van het jaar is de concentratie zeer laag (RIWA, 2003). De concentratie wordt hoger bij extra neerslag, door afspoeling van het land naar de rivier, maar omdat daardoor de afvoer groter wordt, wordt de verhoging van de concentratie gecompenseerd. In Nederland heeft de hoeveelheid neerslag weinig invloed op de grootte van de afvoer, maar wel op de hoeveelheid isoproturon die afstroomt naar de rivier. In periodes van lage afvoer bij Lobith en veel

neerslag, gedurende welke isoproturon wordt toegepast, kan de concentratie problematisch hoog worden bij het Lekkanaal.

De concentratie van isoproturon hangt echter niet sterk samen met de afvoer, des te meer met de plaatselijke neerslag en het gebruik van de stof in de landbouw. Binnen het kader van dit project, waarin de consequenties van een verlaagde zomerafvoer worden bestudeerd, is de isoproturonconcentratie dus geen alarmerende parameter.

Het is echter wel belangrijk de ontwikkeling van de isoproturonbelasting te onderzoeken. In Europees verband worden richtlijnen voor het gebruik van bestrijdingsmiddelen ontwikkeld, mede met het oog op de waterkwaliteit (IKSR, 2001).

5

De Nederrijn: waterkwantiteit en -kwaliteit

5.1 Stuwprogramma S285- Nederrijn

5.1.1 Opbouw

Het stuwbeheer van de Nederrijn is gebaseerd op het stuwprogramma S285 van Rijkswaterstaat. Basis voor het stuwbeheer is het op peil houden van de afvoer van de IJssel, zodat het IJsselmeer voldoende zoet water krijgt aangevoerd om verzilting tegen te gaan. De stuw die de afvoerverdeling beïnvloedt, is de stuw bij Driel. De twee andere stuwen, Amerongen en Hagestein, hebben als functie de vaardiepte van de stuwpanden Driel-Amerongen en Amerongen-Hagestein te waarborgen.

In theorie zit het stuwprogramma als volgt in elkaar: totdat de IJsselaflow 285 m³/s bedraagt, is de stuw bij Driel gesloten, zodat de gehele afvoer van het Pannerdensch Kanaal via de IJssel naar het IJsselmeer stroomt (op 30 m³/s na, die de scheepvaart minimaal nodig heeft op de Nederrijn). Vanaf 285 m³/s op de IJssel wordt de stuw bij Driel gedeeltelijk geopend, zodat een deel van het water via de Nederrijn kan afstromen. Hoe hoger de afvoer, hoe verder de stuw bij Driel geopend wordt, waarbij de afvoer van de IJssel boven de 285 m³/s blijft. Op een gegeven moment is de stuw geheel open en kan het water vrij afgevoerd worden door de Nederrijn.

In de praktijk wordt het openen en sluiten van de stuwen niet gebaseerd op afvoermetingen, maar op waterstanden. De stuwmeesters gebruiken tabellen met gewenste waterstanden bij de stuwen bij verschillende waterstanden bij Lobith. Tabel 5-1 is het in 2003 gangbare stuwschema van de stuw bij Amerongen.

Tabel 5-1 Stuwschema Amerongen (bron: Rijkswaterstaat, 2003)

Waterstanden (cm + NAP)		
Lobith	Amerongen-boven	
900	600	(stuwpeil pand Driel-Amerongen)
965	590	
1010	580	
1035	570	
1050	560	
1065	550	
1100	525	
1110	500	
1125	450	
1140	400	(open rivier)

Bij een bepaalde waterstand bij Lobith zal de stuwmeester de bijbehorende waarde van de waterstand bovenstrooms van de stuw Amerongen trachten te bewerkstelligen, door het verder openen of sluiten van de stuw. Vanaf waterstand 1140 cm bij Lobith worden de stuwen van Amerongen en Hagestein beide geheel geopend.

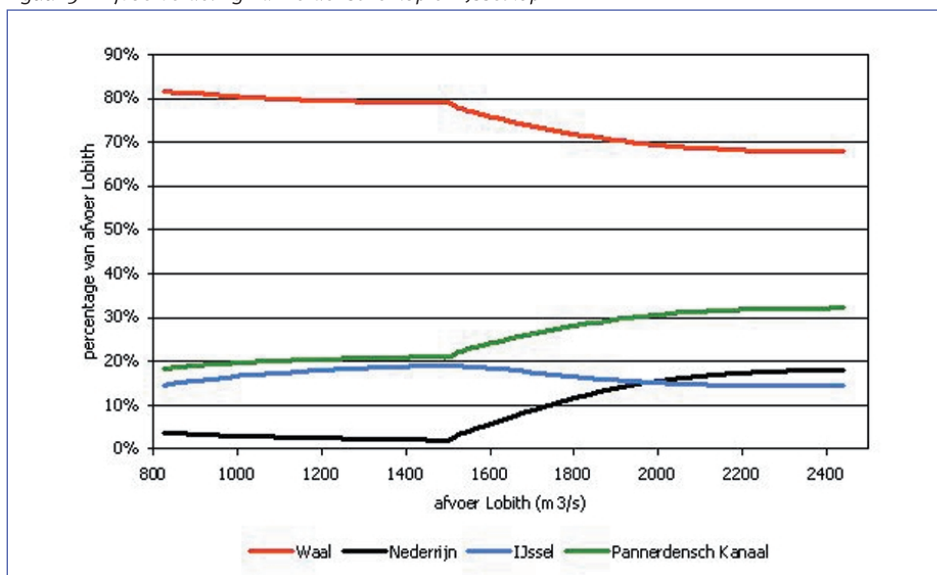
5.1.2 Consequenties voor de afvoerverdeling van de Rijntakken

Bij lage afvoeren en dus lage waterstanden is de stuw bij Driel dicht, waardoor er slechts een afvoer van 30 m³/s door de Nederrijn stroomt. De afvoer wordt dus grotendeels verdeeld over de IJssel en de Waal. In Figuur 5-2 is zijn de afvoeren van de Nederrijn, IJssel en Waal weergegeven als percentage van de afvoer bij Lobith. Deze percentages zijn berekend naar informatie van waterstands-afvoerrelaties van Rijkswaterstaat (2003).

Figuur 5-1 De stuw bij Amerongen (bron: beeldarchief Ministerie van Verkeer en Waterstaat)



Figuur 5-2 Afvoerverdeling Pannerdensch Kop en IJsselskop



Het is duidelijk te zien aan het afvoerpercentage van de Nederrijn dat tot een afvoer van 1500 m³/s bij Lobith de stuw bij Driel dicht is. Bij een afvoer van 1500 m³/s is het afvoerpercentage van de IJssel 19%, wat een afvoer van 285 m³/s oplevert. Op dat moment worden de stuwen dus opengezet, wat de knik in de grafiek veroorzaakt. De curve van Pannerdensch Kop is de som van de curven van de IJssel en de Nederrijn.

5.1.3 Consequenties voor de Nederrijn

Bij lage afvoeren bij Lobith is de beoogde afvoer van de Nederrijn 30 m³/s, de minimale afvoer ten behoeve van de scheepvaart. Langs de Nederrijn is een aantal onttrekkingspunten, waarvan de maximale onttrekkingen in Tabel 5-2 en Tabel 5-3 zijn weergegeven. Deze onttrekkingen hebben een totale waarde die hoger ligt dan 30 m³/s. Het kan dus voorkomen dat het water bij Hagestein stilstaat, of dat de afvoer zelfs negatief is. Dit blijkt ook uit meetgegevens van de afvoer bij Hagestein.

Tabel 5-2 Overzicht aanvoeren en onttrekkingen vanuit de stuwpanden Driel-Amerongen en Amerongen-Hagestein

Rivier (km) oever	Instantie	Q_{max} (m ³ /s)	Toelichting	Bron
Nederrijn 897.190 r	Parengo	1,0	feitelijk maximum 2,1 m ³ /s waarvan ca. 50% retour	1
Nederrijn 901.900 l	Waterschap van de Linge	4,5	pompemaal Kuijk	1
Nederrijn 913.500 l	Polderdistrict Betuwe	1,4	2 pompen Bonte Morgen	1
Nederrijn 926.250 r	Hoogheemraadschap Stichtse Rijnlanden	12,0	inlaatsluis Kromme Rijn	1
Nederrijn 929.000 l	Rijkswaterstaat Directie Utrecht	8,35	wateraanvoer via Marijkesluizen t.b.v. waterakkoord Betuwepand	2
Nederrijn 929.000 r	Hoogheemraadschap Rijnlanden	2,8	2 inlaatsluizen in voorhaven Stichtse Irenesluizen	1
Nederrijn 929.000 r	Rijkswaterstaat Directie Utrecht	15,0	wateraanvoer via Irenesluizen tbv waterakkoord AR-Kanaal/NZ-Kanaal	3
Lek 936.000 r Lek 941.000 r	Hydron	0,5	pompputten Buitenwaard en Steenwaard	3
Totaal stuwpanden Driel-Amerongen en Amerongen-Hagestein		45,55		

Tabel 5-3 Overzicht aanvoeren en onttrekkingen benedenstrooms van stuw Hagestein

Rivier (km) oever	Instantie	Q_{max} (m ³ /s)	Toelichting	Bron
Lek 950.000 r	Rijkswaterstaat Directie Utrecht	9,0	wateraanvoer via Beatrixluizen t.b.v. waterakkoord Amsterdam- Rijnkanaal/Noordzeekanaal	3
Lek ? ?	Rijkswaterstaat Directie Zuid-Holland	10,0	wateraanvoer t.b.v. waterakkoord Hollandsche IJssel/Lek	4
Totaal Lek benedenstrooms van Hagestein		19,0		

Bronnen:

- 1 Rijkswaterstaat Dienstkring Rijn en Lek, advies Murk (29 juni 1998)
- 2 Rijkswaterstaat Directie Utrecht, concept waterakkoord Betuwepand Amsterdam-Rijnkanaal
- 3 Rijkswaterstaat Directie Utrecht (verslag overleg Directies Oost-Nederland en Utrecht, 14 mei 1998)
- 4 Rijkswaterstaat Directie Zuid-Holland, concept waterakkoord Hollandsche IJssel/Lek

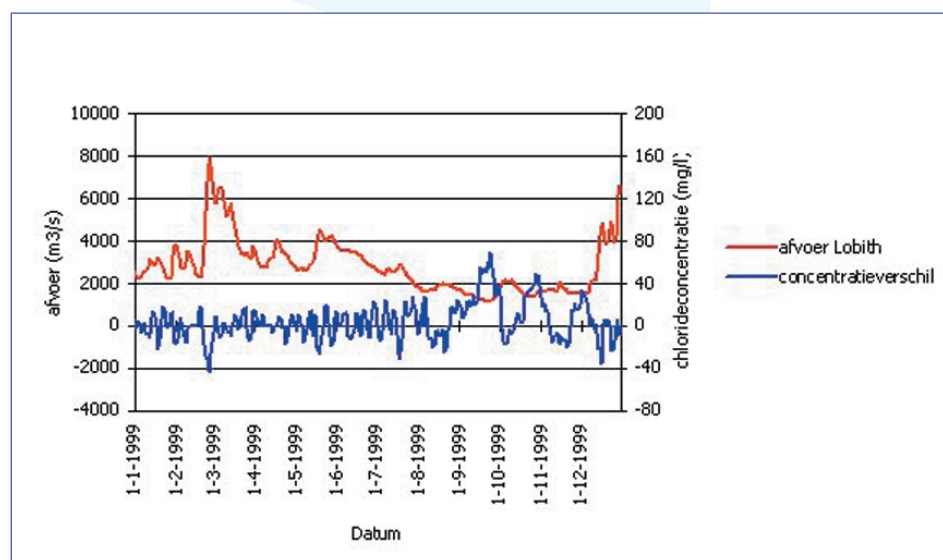
5.2 Chlorideconcentratieontwikkeling

5.2.1 Bovenstrooms van het Lekkanaal

Tijdens periodes van lage afvoer bij Lobith is de doorstroming van de Nederrijn gering ten gevolge van het stuwprogramma, wat impliceert dat het Rijnwater met hoge chlorideconcentratie (constante vracht, lage afvoer) dat Nederland binnenstroomt bij Lobith, de Nederrijn vrijwel niet zal belasten. Dit is als volgt te verklaren: gedurende periodes van hogere afvoeren, waarbij de stuwen openstaan (en de afvoer van de Nederrijn dus hoger is dan 30 m³/s) zijn de stuwpanden gevuld met water met dezelfde chlorideconcentratie als bij Lobith. Als de afvoer bij Lobith daalt, worden de stuwen gesloten, wat de doorstroming van de Nederrijn tegengaat. De stuwpanden van de Nederrijn zijn nog gevuld met water met een lagere chlorideconcentratie, terwijl het water met een hogere concentratie de Waal en de IJssel instroomt. Tijdens periodes van lage afvoeren, is de chlorideconcentratie in de Nederrijn (en in het Lekkanaal) dus lager dan bij Lobith.

Daarnaast heeft, bij een langzaam stromende Nederrijn, de afstroming van water vanaf de Utrechtse Heuvelrug een verdunnende werking. In Figuur 5-3 zijn in één diagram de afvoer bij Lobith en het verschil tussen de chlorideconcentraties bij Lobith en in het Lekkanaal aangegeven voor het jaar 1999. Het is duidelijk te zien dat bij hogere afvoeren de concentraties ongeveer gelijk zijn, en dat bij lagere afvoeren de fluctuaties in het verschil tussen de concentraties Lobith/Lekkanaal veel groter zijn, waarbij de concentratie bij Lobith over het algemeen hoger is dan de concentratie in het Lekkanaal.

Figuur 5-3 Afvoer Lobith en chlorideconcentratieverschil Lobith ten opzichte van Lekkanaal

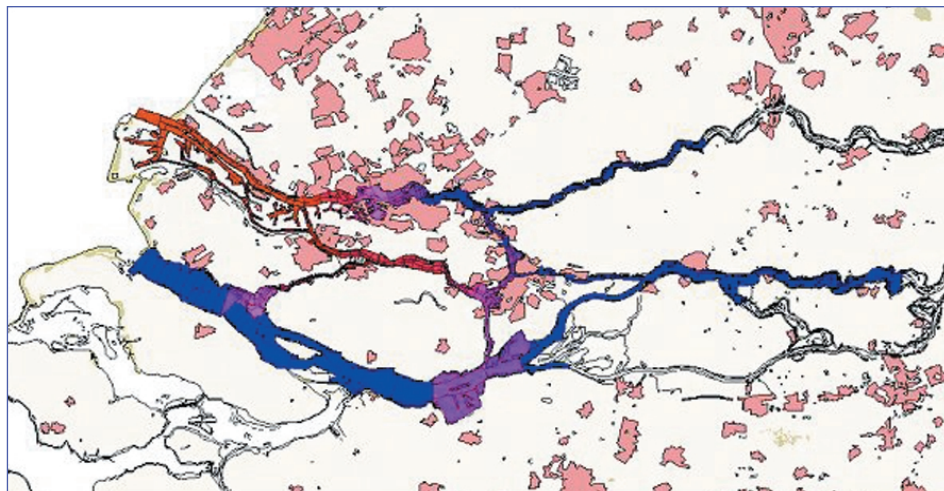


5.2.2 Benedenstrooms van het Lekkanaal

Mondiale klimatologische ontwikkelingen hebben een significante zeespiegelstijging tot gevolg. Voor Nederland betekent dit dat het moeilijker wordt zoet water af te voeren (het natuurlijk verval wordt kleiner) en het zoute water buiten te houden.

Momenteel geldt dat de zouttong die vanaf de Nieuwe Waterweg, via de Nieuwe Maas de Lek op komt, in extreme situaties (lage afvoer, hoge zeespiegel) niet verder reikt dan ergens tussen Schoonhoven en Nieuwegein. Jacobs et al. (2000) tonen aan dat er bij lagere afvoeren in de zomer, gecombineerd met een hogere zeespiegel, geen significant grotere zoutindringing in de Lek optreedt. In het Lekkanaal hangt de chlorideconcentratie dus slechts af van de bovenstroomse toestand.

Figuur 5-4 Zoutindringing Rijnmond (bron: Jacobs et al., 2000)



5.3 Minimale waterkwaliteitseisen

Met betrekking tot de waterinname door drinkwaterbedrijven zijn door het Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2001) normen opgesteld wat betreft de kwaliteit van het oppervlaktewater. Voor chloride geldt een maximale waarde van de concentratie van 200 mg/l. Bij een chlorideconcentratie van 175 mg/l van het ingenomen water uit het Lekkanaal worden de drinkwaterproductiebedrijven gewaarschuwd. Bij een waarde van 200 mg/l wordt de inname van rivierwater gestaakt.

In dit onderzoek wordt bekeken wat de verwachtingen zijn voor de chlorideconcentratieontwikkelingen in het Lekkanaal. Als de uitkomst zodanig is dat de waarde van 200 mg/l vaak en langdurig overschreden gaat worden in de toekomst, dan is uitgebreider onderzoek noodzakelijk.

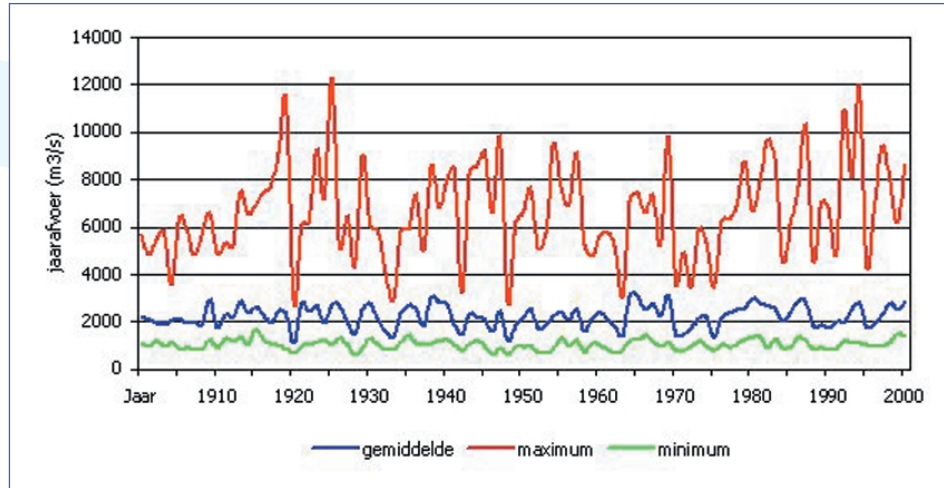
De IAWR stelt in het Rhein Memorandum 2003 een grenswaarde voor de chlorideconcentratie van 100 mg/l. Deze waarde moet worden gezien als de hoogste toe te laten waarde in de toekomst (IAWR, 2003). In dit onderzoek wordt de waarde van 200 mg/l gehanteerd, die gebruikt wordt door de drinkwaterbedrijven en is vastgesteld door het Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2001).

De grenswaarde voor de concentratie van lood is 5 mg/l. Bij hogere waarden wordt de waterinname weliswaar niet gestaakt, maar deze situatie is wel kostbaar en tegendraads aan de doelstellingen van het Rijnverdrag en de IAWR. In dit project wordt daarom eveneens uitgegaan van deze grenswaarde.

Afvoerontwikkelingen

Door temperatuurstijgingen en veranderingen in het neerslagregime zal de Rijnafvoer veranderen. Bij de klimaatscenario's van paragraaf 3.1 gelden verschillende afvoerscenario's. In dit hoofdstuk worden afvoerscenario's gegeven voor de afvoer bij Lobith. In Figuur 6-1 staan ter illustratie de jaarafvoeren van Lobith van de twintigste eeuw.

Figuur 6-1 Jaarafvoer Lobith

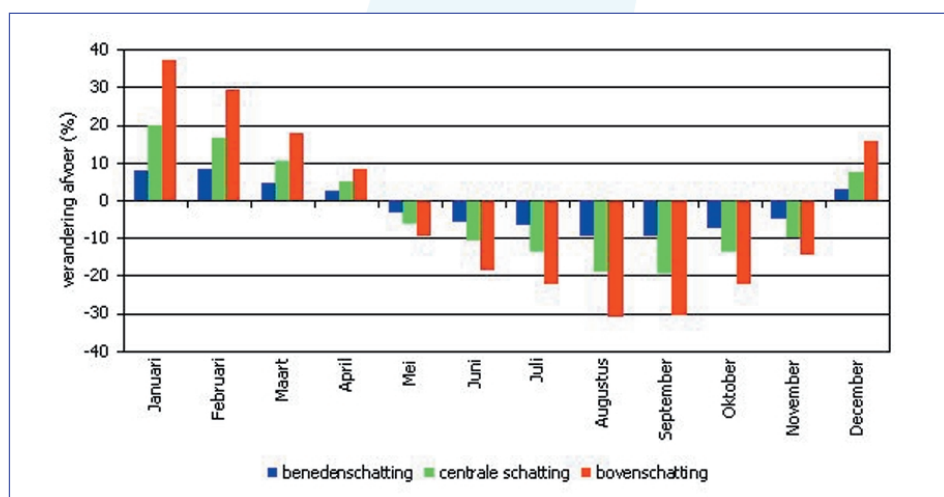


6.1 Klimaat- en afvoerscenario's

Als gevolg van de verhoogde neerslag in de winter en verlaagde neerslag in de zomer kunnen voor de verschillende klimaatscenario's afvoerscenario's worden afgeleid met behulp van een waterbalansmodel zoals RhineFlow.

In Figuur 6-2 staan als voorbeeld de procentuele veranderingen van de gemiddelde maandaafvoer voor de Rijn in 2050, gerekend ten opzichte van 1990, bij de drie klimaatscenario's van het KNMI.

Figuur 6-2 Verandering gemiddelde maandaafvoer Rijn 2050 (bron: WIN, 2000)



6.2 RhineFlow

Het RhineFlow model is een waterbalansmodel voor het Rijnstroomgebied. Het werd ontwikkeld door het departement van Fysische Geografie van de Universiteit Utrecht. Het is bedoeld om de verwachte afvoer van de Rijn te bepalen bij mogelijke klimaatontwikkelingen.

Het model is geïmplementeerd in een geografisch informatiesysteem (GIS), waarin het Rijnstroomgebied is opgedeeld in een rooster met cellen van $3 \times 3 \text{ km}^2$. Per cel worden neerslag, verdamping, opslag, instroom en uitstroom bijgehouden, afhankelijk van de fysische gegevens van de cel, het landgebruik, klimaatmodellen en de aangrenzende cellen. Op deze manier wordt het hele stroomgebied doorgerekend, wat resulteert in een verwachte afvoer bij Lobith.

De uitvoer is een toekomstige projectie van een meting, waardoor de uitvoerreeksen dus simulatiereeksen zijn, waaruit bepaalde statistische gegevens kunnen worden gehaald.

Het RhineFlow 2 model, waarvan hier simulatiereeksen worden gebruikt, berekent de afvoer op een tiendaagse basis.

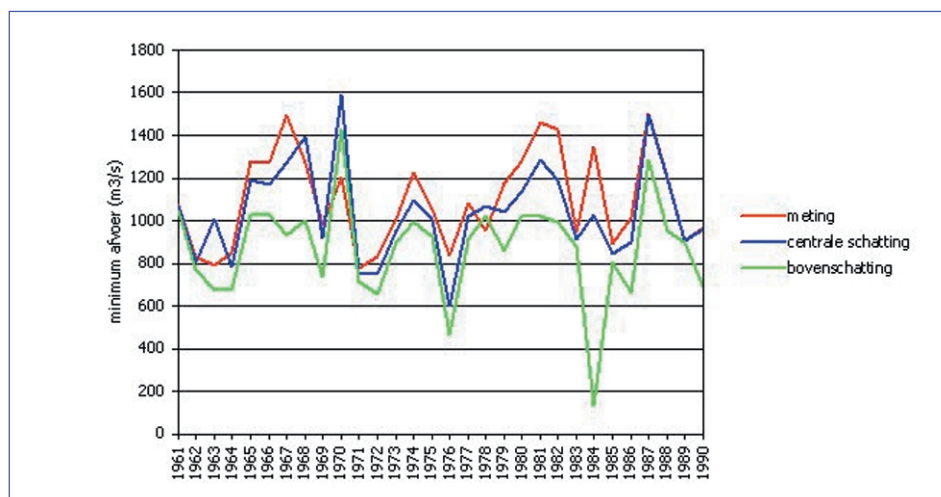
6.3 Afvoerwachtingen Lobith

6.3.1 Simulatiereeksen

Met behulp van het RhineFlow 2 model zijn van de tiendaagse gemiddelden van 1961 tot en met 1990 projecties gemaakt voor 2050. De gebruikte klimaatmodellen gelden voor het Rijnstroomgebied (en lijken dus op de scenario's uit paragraaf 3.1.2). Aangezien deze modellen dezelfde temperatuurverhoging inhouden als de modellen van het KNMI, worden hier de centrale schatting en de bovenschatting als naamgeving en referentie gebruikt.

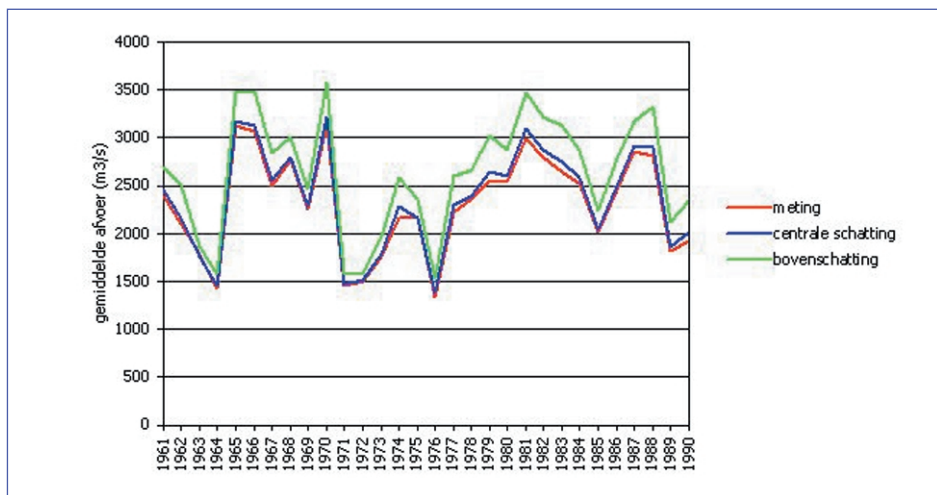
Om de simulatiereeksen enigszins te visualiseren zijn in de Figuur 6-3, Figuur 6-4 en Figuur 6-5 respectievelijk de minima, gemiddelden en maxima uitgezet, waarbij gelet moet worden op het feit dat de minima en maxima gelden voor een periode van tien dagen, en dus niet het absolute minimum of maximum van dat jaar voorstellen, zoals wel het geval is in Figuur 6-1.

Figuur 6-3 Minima van de tiendaagse gemiddelde afvoer per jaar

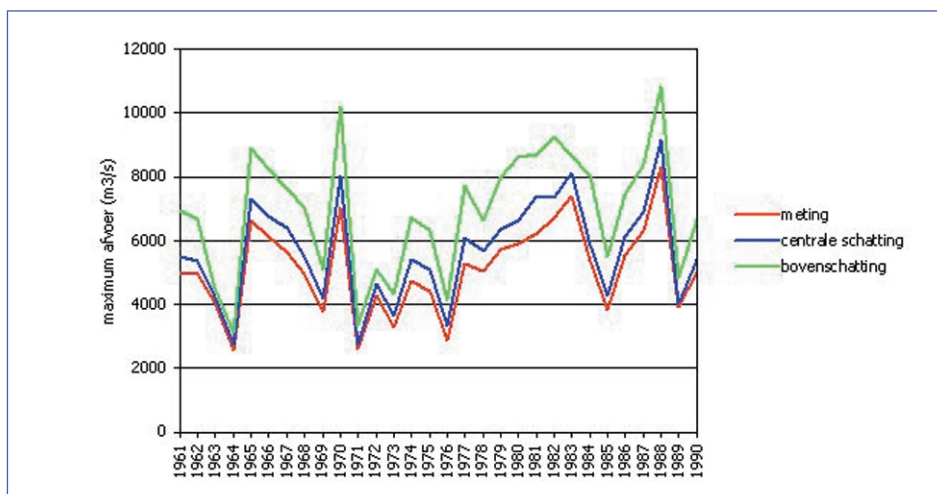


Uit Figuur 6-3 blijkt dat de minimale afvoeren lager worden, vooral bij de bovenschatting van het KNMI, wat ook de verwachting was, gezien de verminderde neerslag in de zomer.

Figuur 6-4 Gemiddelde afvoer per jaar



Figuur 6-5 Maxima van de tiendaagse gemiddelde afvoer per jaar



De gemiddelde en maximum afvoeren worden hoger bij de twee klimaatscenario's, zoals blijkt uit Figuur 6-4 en Figuur 6-5.

6.3.2 Analyse

In paragraaf 4.1.5 en 4.1.6 zijn de waarden van de afvoer bij Lobith bepaald waarbij de chloride-concentratie bij Hagestein boven de 200 mg/l komt (zie Tabel 6-1).

Tabel 6-1 Grenswaarden van de afvoer bij Lobith

afvoerwaarde	m ³ /s
benedengrens	690
gemodelleerd	783
bovengrens	900

Uit de simulatiereeksen kan nu worden bepaald hoe vaak de grenswaarden worden overschreden, en hoe lang dat gebeurt. Een belangrijke aantekening is dat de simulatiereeksen gebaseerd zijn op tiendaagse meetwaarden, over een periode van dertig jaar. Die periode is betrekkelijk lang, zodat onregelmatigheden en extremen minder van invloed zijn op de analyse van de simulatiereeksen, maar te kort om de hoogstwaarschijnlijke frequentie en tijdsduur van lage afvoerperiodes vast te stellen.

Frequentie van lage afvoerperiodes

Van de simulatiereeksen is per afvoerwaarde het aantal decaden bepaald gedurende welke de afvoer onder de afvoerwaarde ligt. Vermenigvuldigd met de tien dagen van een decade en gedeeld door 30 jaar, levert dat de overschrijdingsfrequentie van de betreffende afvoerwaarde op. In Tabel 6-2 staan de overschrijdingsfrequenties gegeven, met daarnaast de overschrijdingsfrequentie van de afvoerwaarde van 2000 m³/s, waarbij de concentratie van lood de streefwaarde overschrijdt.

Tabel 6-2 Overschrijdingsfrequenties afvoerwaarden

afvoerwaarde	m ³ /s	overschrijdingsfrequentie (dagen/jaar)	
		centrale schatting	bovenschatting
benedengrens	690	0.33	3
gemodelleerd	783	2.67	9
bovengrens	900	10.67	19.33
loodgrens	2000	173	168.67

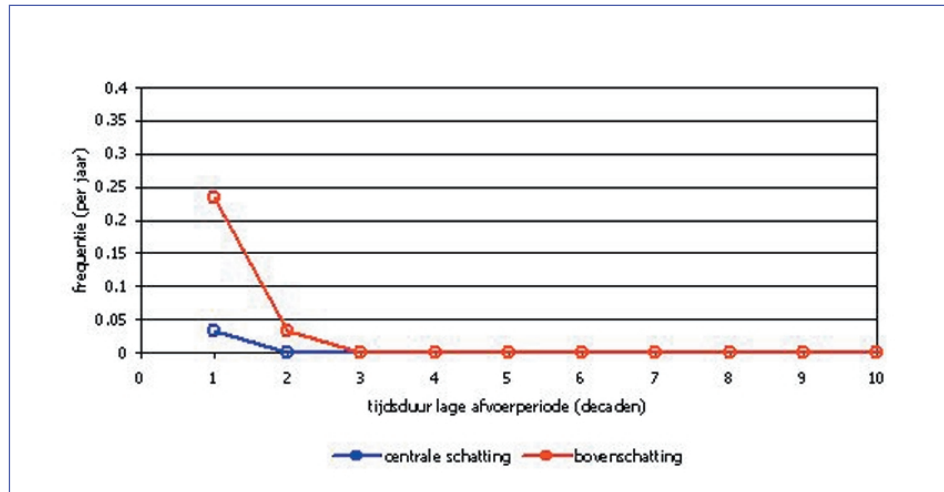
Tijdsduur van lage afvoerperiodes

De perioden van lage afvoer zijn niet aaneengesloten. Uit de simulatiereeksen zijn optredensfrequenties afgeleid van lage afvoerperiodes met een bepaalde tijdsduur. Hierbij is de opmerking van het begin van deze paragraaf over de invloed van het feit dat gewerkt wordt met geprojecteerde meetgegevens, van belang. De frequenties van de perioden met een bepaalde lengte zijn dus slechts indicatief.

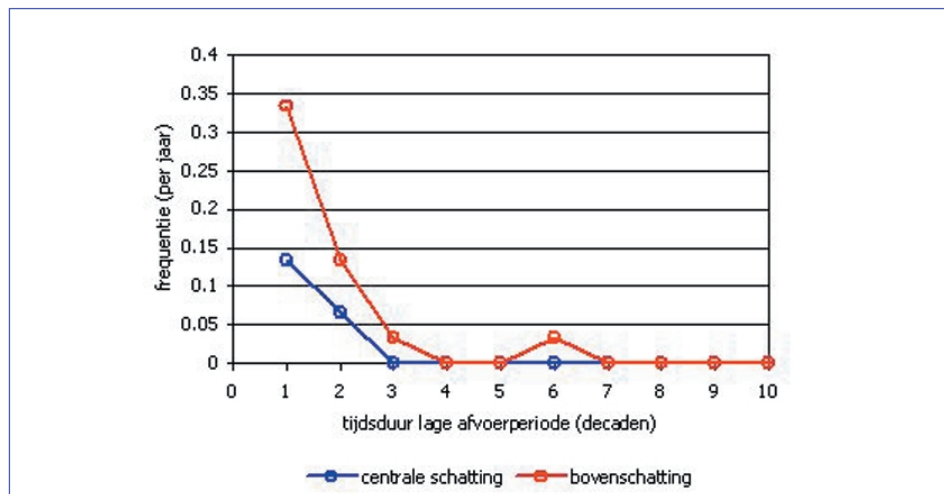
In Figuur 6-6, Figuur 6-7 en Figuur 6-8 zijn de zogenaamde optredensfrequenties uitgezet tegen de tijdsduur van een lage afvoerperiode. Deze diagrammen geven een indicatie van deze optredensfrequenties van lage afvoerperiodes met een tijdsduur van een bepaald aantal decaden. Perioden korter dan tien dagen kunnen niet onderscheiden worden, omdat de simulatiereeksen uit tiendaagse gemiddelden bestaan.

De diagrammen geven aan hoe vaak een periode van één of meer decaden voorkomt per jaar. In Figuur 6-6 geeft de tweede waarde van de bovenschatting dus aan dat 0,033 keer per jaar (één keer per 30 jaar) de afvoer gedurende 20 dagen onder 690 m³/s blijft.

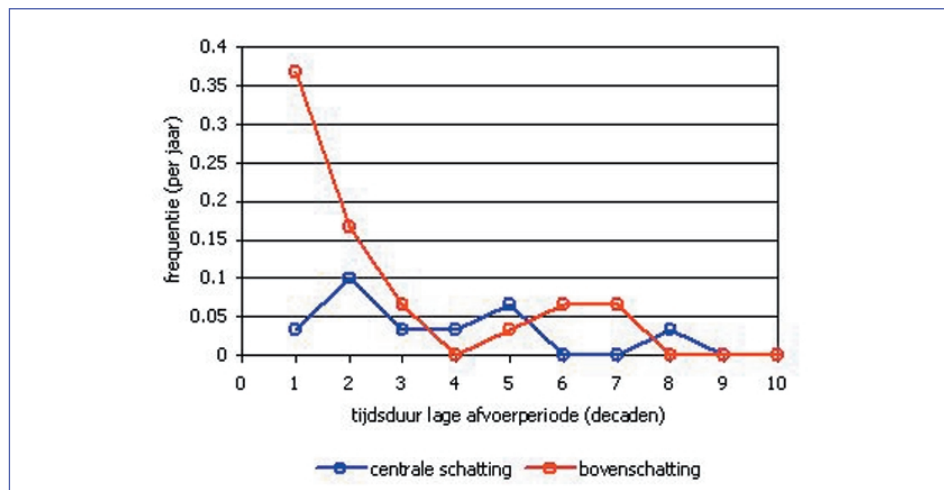
Figuur 6-6 Optredensfrequenties van lage afvoerperioden bij een grenswaarde van de afvoer van $690 \text{ m}^3/\text{s}$



Figuur 6-7 Optredensfrequenties van lage afvoerperioden bij een grenswaarde van de afvoer van $783 \text{ m}^3/\text{s}$

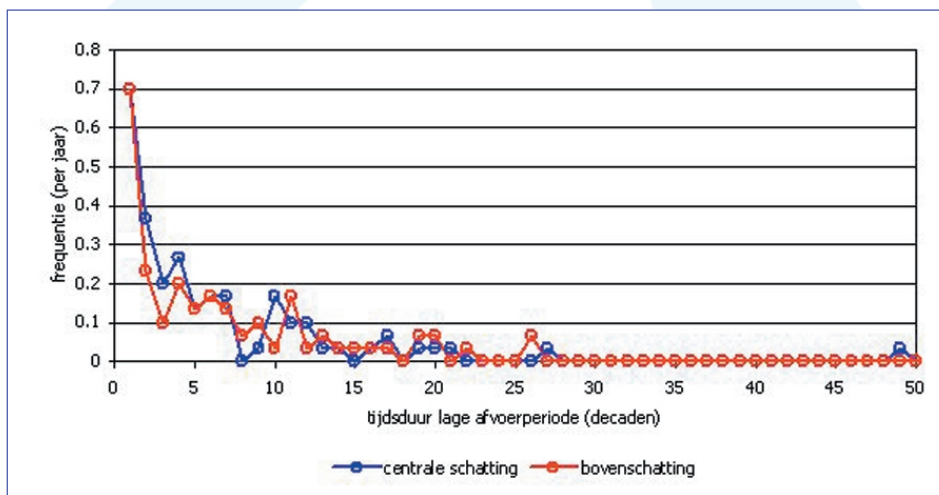


Figuur 6-8 Optredensfrequenties van lage afvoerperioden bij een grenswaarde van de afvoer van $900 \text{ m}^3/\text{s}$



Opvallend is dat de grenswaarden van de afvoer van 783 en 900 m³/s ook gedurende langere perioden (zes tot acht weken) onderschreden wordt, weliswaar met een frequentie van een maal in meer dan tien jaar. Bij alle drie de grenswaarden is het duidelijk dat een periode van één decade het vaakst zal voorkomen, terwijl langere perioden zeldzamer zullen zijn.

Figuur 6-9 Optredensfrequenties van lage afvoerperioden bij een grenswaarde van de afvoer van 2000 m³/s



Voor de grenswaarde die voor lood geldt, is in Figuur 6-9 een soortgelijk diagram gepresenteerd. Het moge duidelijk zijn dat een afvoer van 2000 m³/s zeer vaak voorkomt, en over langere perioden. Let op dat de waarde bij 49 decaden aangeeft dat één maal per 30 jaar de afvoer gedurende 490 dagen onder de 2000 m³/s blijft.

Waterkwaliteits

Waterkwaliteitsprognose

Met de gegevens over de verwachte afvoeren in 2050, en daarmee de overschrijdingsfrequenties van de grenswaarden van de afvoer waarbij de chlorideconcentratie bij Lobith boven de 200 mg/l komt, kunnen voorspellingen worden gedaan over de chlorideconcentraties bij het WCB in Nieuwegein en het WPJ en PSA in Andijk. Voor de achtergrond bij de prognoses van het Lekkanaal (Nieuwegein) wordt terugverwezen naar hoofdstuk 5. Voor de globale indicatieve prognoses van het IJsselmeer (Andijk) wordt een zeer sterk vereenvoudigd model van de chloridebalans van het IJsselmeer gebruikt, dat slechts een indruk geeft van de tijdschaal van de invloed van een verhoogde chlorideconcentratie bij Lobith op de waterkwaliteit bij Andijk.

7.1 Lekkanaal

7.1.1 Relatie Lobith-Lekkanaal

Door de invloed van het stuwprogramma, de afstroom van de Utrechtse Heuvelrug en de onttrekkingen aan de Nederrijn is de chlorideconcentratie in het Lekkanaal bij lage afvoeren iets lager dan bij Lobith. Echter, vanwege de onregelmatigheid in het optreden en de complicatie bij het voorspellen van dit verschijnsel, wordt hier aangenomen dat de concentraties gelijk zijn, wat eveneens soms het geval is (zie Figuur 5-3).

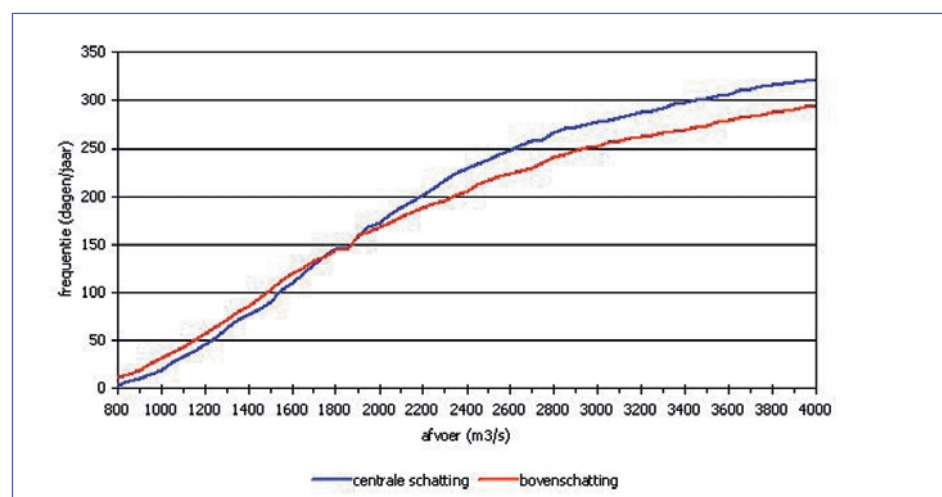
7.1.2 Waterkwaliteitsprognose Lekkanaal

Chloride

In 2050 zal de chlorideconcentratie in het Lekkanaal in het ongunstigste geval (bovengrens afvoer en bovenschatting klimaat) 19,33 dagen per jaar te hoog zijn voor drinkwaterinname. In het gemiddelde geval (gemodelleerde afvoer, centrale schatting klimaat) 2,67 dagen per jaar, bij de aanname dat de chloridebelasting gelijk blijft.

De streefwaarde van 100 mg/l zal worden bereikt bij een afvoer van ongeveer 1950 m³/s, die iets minder dan de helft van het jaar zal voorkomen.

Figuur 7-1 Overschrijdingsfrequentie afvoer Lobith in 2050



De overschrijdingsfrequenties van de afvoer bij Lobith staan in Figuur 7-1 voor de centrale schatting en bovenschatting uitgezet.

Lood

In 2050 zal de loodconcentratie de streefwaarde van de IAWR van 5 mg/l gedurende ongeveer 170 dagen per jaar overschrijden. De waterkwaliteit is, wat betreft lood, dus te slecht om met natuurlijke processen te zuiveren.

Isoproturon

Voor isoproturon wordt hier geen prognose gegeven, omdat de concentratie niet duidelijk samenhangt met de afvoer, maar vooral afhangt van andere factoren (zie paragraaf 4.2.2).

7.2 IJsselmeer

Het IJsselmeer wordt op verschillende wijzen belast met zout. De belangrijkste bronnen zijn de IJssel en de kwel onder de Afsluitdijk. In dit onderzoek is globaal gekeken naar de invloed van een verhoogde chlorideconcentratie in het IJsselwater op de chlorideconcentratie van het IJsselmeer. Daarvoor is een zeer eenvoudig model opgezet, dat slechts ordes van grootte van concentratieverhogingen aangeeft, en daarnaast globale reactietijden van het IJsselmeer.

Het volume van het IJsselmeer werkt als buffer tegen het instantaan optreden van een verhoogde chlorideconcentratie. Daarnaast mengt het IJsselwater niet instantaan door het hele IJsselmeer.

7.2.1 Chloridebalansmodel IJsselmeer

Opbouw en werkwijze

Het model gaat uit van een vast volume van het IJsselmeer. De verandering van de chlorideconcentratie is afhankelijk van de inkomende hoeveelheid chloride en de uitgaande hoeveelheid chloride (die afhangt van de concentratie in het IJsselmeer zelf).

$$V \frac{dC}{dt} = aQ(C_{inkomend} - C) \quad (7-1)$$

waarin:

V	= volume IJsselmeer	(m ³)
C	= chlorideconcentratie in het IJsselmeer	(mg/l)
t	= tijd	(dagen)
a	= afvoer door de IJssel als percentage van de afvoer bij Lobith	(-)
Q	= afvoer bij Lobith	(m ³ /dag)
$C_{inkomend}$	= chlorideconcentratie van het instromende water	(mg/l)

Deze differentiaalvergelijking is numeriek opgelost, waarbij elke $C(t)$ is berekend volgens:

$$C(t+\Delta t) = C(t) + \frac{aQ}{V} (C_{inkomend}(t) - C(t)) \Delta t \quad (7-2)$$

met een tijdstap $\Delta t = 1$ dag. $C_{inkomend}$ heeft een waarde die een bepaald aantal dagen constant is, en dan exponentieel toe- of afneemt tot een vaste waarde.

$$C_{inkomend}(t) = \begin{cases} C_{inkomend}(0) & t < T \\ C_{inkomend}(0)e^{-m(t-T)} + C_{eind}(1 - e^{-m(t-T)}) & t \geq T \end{cases} \quad (7-3)$$

waarin:

m	= factor die de mate van exponentiële verandering bepaalt	(-)
T	= periode van constante $C_{inkomend}$	(dagen)
C_{eind}	= eindwaarde van $C_{inkomend}$	(mg/l)

Belangrijke aannamen en vereenvoudigingen

- Het IJsselwater mengt instantaan in het IJsselmeer, dus de chlorideconcentratie van IJsselmeer is overal gelijk.
- Alle andere zoutbronnen (bijvoorbeeld kwel) worden verwaarloosd.
- Het waterpeil van het IJsselmeer is constant.
- De inkomende afvoer is even groot als de uitgaande afvoer, dus het volume is constant.
- Het volume van het IJsselmeer wordt geschat op 5,2 miljard m³ (bron: Rijkswaterstaat).
- Het deel van de afvoer bij Lobith dat via de IJssel afstroomt bedraagt 19%.

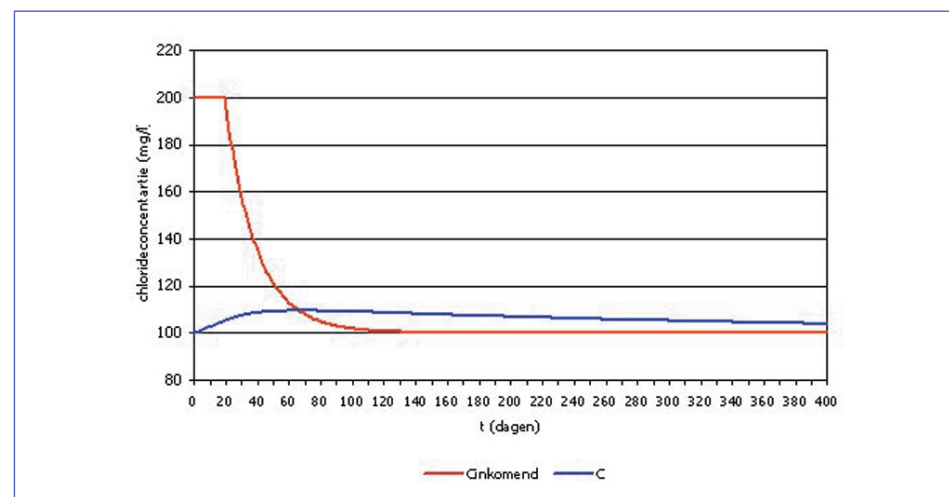
7.2.2 Uitkomsten

De beoogde resultaten van het model zijn inzicht in de invloed van een verhoogde chlorideconcentratie in de IJssel op de chlorideconcentratie in het IJsselmeer.

Als beginvoorwaarden voor een eerste simulatie wordt ervan uitgegaan dat de concentratie in het IJsselmeer 100 mg/l is, de afvoer bij Lobith 900 m³/s en de concentratie in de IJssel 200 mg/l gedurende 19 dagen, waarna zij exponentieel afneemt tot 100 mg/l, in ongeveer 100 dagen. In Figuur 7-2 staan de concentratieontwikkelingen van het IJsselmeer en de IJssel uitgezet tegen de tijd.

Het is duidelijk te zien dat de concentratie in het IJsselmeer toeneemt, zolang de concentratie van het inkomende water 200 mg/l is. Daarna neemt de concentratie in het IJsselmeer weer af tot 100 mg/l (de eindwaarde van de concentratie in de IJssel). De concentratie in het IJsselmeer bereikt de 200 mg/l niet.

Figuur 7-2 IJsselmeemodel voorbeeld 1



$$V = 1.5 \cdot 10^9 \text{ m}^3$$

$$a = 19\%$$

$$Q = 900 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C(0) = 100 \text{ mg/l}$$

$$C_{inkomend}(0) = 200 \text{ mg/l}$$

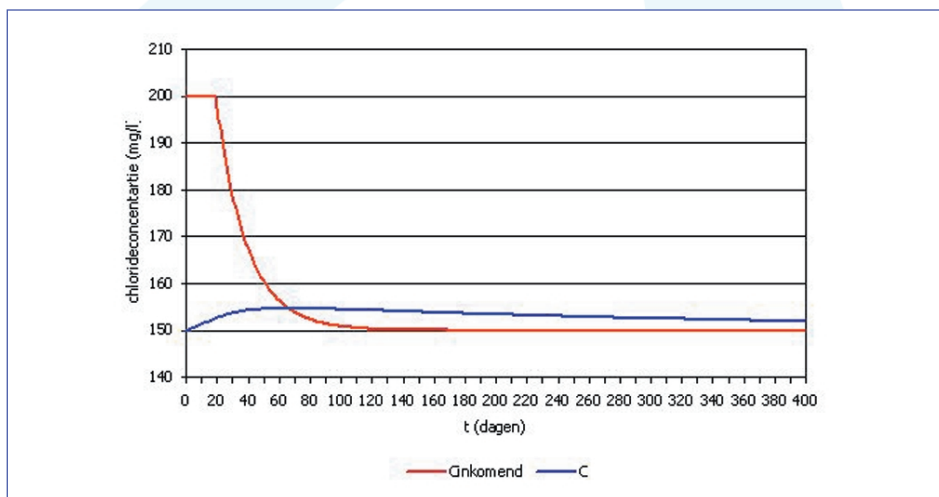
$$C_{eind} = 100 \text{ mg/l}$$

$$m = 0.05$$

$$T = 19 \text{ dagen}$$

In het geval de concentratie in de IJssel afneemt tot 150 mg/l in plaats van tot 100 mg/l, terwijl de beginconcentratie in het IJsselmeer ook 150 mg/l is, dan bereikt de chloride concentratie in het IJsselmeer eveneens de 200 mg/l niet (Figuur 7-3).

Figuur 7-3 IJsselmeermodeel voorbeeld 2



Parameters gelijk aan vorige voorbeeld, behalve:

$C(0) = 150 \text{ mg/l}$

$C_{\text{eind}} = 150 \text{ mg/l}$

7.2.3 Waterkwaliteitsprognose Andijk

Uit de resultaten van het IJsselmeermodeel kan geconcludeerd worden dat door klimaatinvloeden de chlorideconcentratie van het IJsselmeer niet boven de 200 mg/l zal komen. De resultaten zijn echter slechts indicatief, en het model is een zeer grote vereenvoudiging van de werkelijkheid.

Conclusies en aanbevelingen

8

8.1 Conclusies met betrekking tot de waterkwaliteit

Wateraanbod

Het wateraanbod bij Hagestein wordt beïnvloed door twee factoren: de afvoer bij Lobith en daarmee samenhangend de stand van de stuwen in de Nederrijn (die afhangen van de waterstanden in de stuwpanden).

In perioden van lage afvoer, waarbij de stuw bij Driel dicht is, kan de stroom bij Hagestein tot stilstand komen, bij volledige gebruikmaking van de afgegeven onttrekkingsvergunningen langs de Nederrijn en Lek, bovenstrooms van Hagestein. Het gevolg is dat water aan het Amsterdam-Rijnkanaal of benedenstrooms wordt onttrokken. Daardoor treedt benedenstrooms en in het Noordzeekanaal verdere zoutindringing op. De gevolgen van de zoutindringing benedenstrooms zijn voor de waterkwaliteit in het Lekkanaal nihil. De gevolgen voor gebieden benedenstrooms aan de Lek en de Nieuwe Maas in Rotterdam zijn echter wel groot (Jacobs et al., 2000), hetgeen het onttrekken van water aan de Lek en ook het Amsterdam-Rijnkanaal tot geen goede oplossing maakt bij te weinig wateraanvoer.

Chlorideconcentratie

In 2050 zal de chlorideconcentratie in het Lekkanaal ten gevolge van klimaatveranderingen, gemiddeld over een periode van 30 jaar gedurende maximaal drie weken per jaar boven de grens van 200 mg/l komen te liggen. In de gemiddelde situatie zal dat slechts drie dagen per jaar gebeuren. De klimaatinvloeden op de waterkwaliteit zijn dus niet alarmerend. Echter, de streefwaarde van 100 mg/l wordt slechts iets meer dan de helft van het jaar gehaald.

De invloed van het klimaat op de chlorideconcentratie in het IJsselmeer levert geen gevaar op voor de waterkwaliteit bij Andijk.

Andere kwaliteitsparameters

De verwachting is dat de loodconcentratie gedurende langere perioden veel te hoog is. Verwijdering van lood uit het water is mogelijk, maar kostbaar en in strijd met de IAWR doelstelling dat water met alleen natuurlijke processen gezuiverd moet worden.

Isoproturon is een verontreiniging waarvan de afvoerafhankelijkheid een ondergeschikte rol speelt in vergelijking met de seizoensafhankelijkheid (gebruikstijden). De invloed van het klimaat op de isoproturonconcentratie is daarom niet maatgevend.

8.2 Aanbevelingen ten bate van het vervolg van het onderzoek

8.2.1 Tweede verkenning

Gezien de niet-alarmerende resultaten van dit onderzoek is het op dit moment niet nodig uitgebreid onderzoek naar de klimaatinvloeden op de waterkwaliteit te doen. Klimaatmodellen veranderen echter, evenals de chloridebelastingsverwachtingen. Daarom is het van belang dat dit onderzoek over vijf of tien jaar nogmaals wordt uitgevoerd, om nieuwe klimaatmodellen, eventuele nieuwe afvoermodellen en veranderde chloridebelastingen in rekening te brengen.

8.2.2 Klimaatstudie

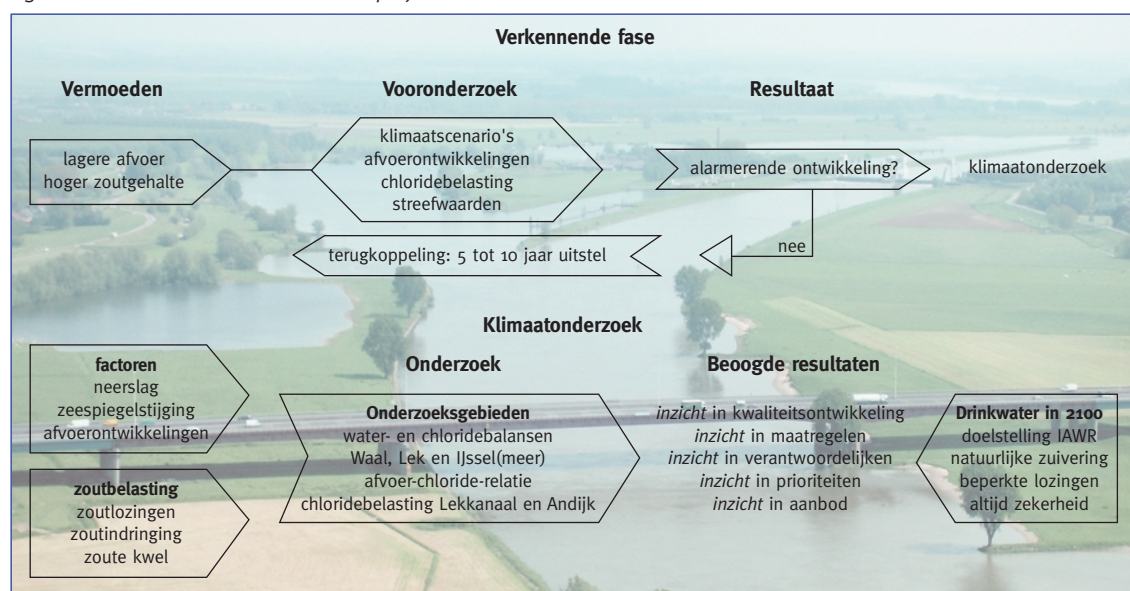
Afhankelijk van de resultaten van het tweede verkennende onderzoek en de waarde die aan de streefwaarde van de IAWR wordt gehecht, zou een uitgebreider klimaatonderzoek uitgevoerd kunnen worden. Dat onderzoek moet meer kwantitatieve nauwkeurigheid inhouden, waarbij de volgende aandachtspunten gelden:

- van het Nederlandse deel van het Rijnstroomgebied moeten toekomstige water- en chloridebalansen worden opgesteld;
- het wateraanbod bij Hagestein moet worden onderzocht, en daarbij de invloeden van onttrekking benedenstrooms van water bij een afvoer van 0 m³/s bij Hagestein;
- de zoutbelasting van het bovenstroomse deel van de Rijn moet exact in kaart worden gebracht;
- de relatie tussen de afvoer en de chlorideconcentratie en -vracht moet worden gemodelleerd;
- de invloed van het stuwprogramma van de Nederrijn moet worden gekwantificeerd;
- er moet gebruik gemaakt worden van modellen die de chloridebelasting van het IJsselmeer bepalen, waarbij onder anderen de zeespiegelstijging en bijbehorende zoute kwel moeten worden meegenomen;
- alle afvoerafhankelijke kwaliteitsparameters moeten worden geïdentificeerd;
- van de ontwikkelingen van alle kwaliteitsparameters moeten prognoses worden gemaakt;
- van de kwaliteitsparameters moeten streefwaarden met meetwaarden en prognoses vergeleken worden;
- per kwaliteitsparameter moet worden vastgesteld hoe vaak de normwaarde wordt overschreden, zodat drinkwaterbedrijven per parameter een bepaalde staat van alertheid kunnen betrachten;
- alle betrokkenen, drinkwaterbedrijven, onderzoeksinstituten, beleidsmakers, waterbeheerders en veruilers moeten worden geïdentificeerd.

8.2.3 Schematisch overzicht

In Figuur 8-1 zijn de verschillende fasen van de klimaatstudie schematisch weergegeven. Van het vooronderzoek is in dit rapport verslag gedaan.

Figuur 8-1 Schematisch overzicht Klimaatproject RIWA



Referenties

Breukel, R.M.A., Faassen, R., Berbee, R.P.M., Baars, P.J., Schrap, S.M., Dokkum, R. van (2002).

Isoproturon en chloortoluron in de Rijn, RIZA rapport 2002.029, juli 2002, RIZA, Lelystad, ISBN 9036995455x

Grabs, W. (ed.) (1997). Impact of Climate Change on Hydrological Regimes and Water Resources Management in the Rhine Basin, CHR/KHR, Lelystad, December 1997, CHR-Report no. I-16, ISBN 90-70980-26-6

IAWR (2003). IAWR-RHEIN-MEMORANDUM 2003, IAWR, postbus 402,3430 AK Nieuwegein, 2003, ISBN : 90-70671-30-1

ICBR (2001). Rijnministersconferentie - Rijn 2020, Programma voor de duurzame ontwikkeling van de Rijn, Straatsburg, 29 januari 2001, Internationale Commissie ter bescherming van de Rijn (ICBR), Koblenz <http://www.iksr.org/irc/Rijn%202020%20nl.doc>

Jacobs, P., Blom, G., Linden, M. van der. (2000). Climatological changes in storm surges and river discharges: the impact on flood protection and salt intrusion in the Rhine-Meuse delta, RIZA - Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment, Dept. WST, Van Leeuwenhoekweg 20, 3316 AV Dordrecht, The Netherlands, p.jacobs@riza.rws.minvenw.nl, <http://www.knmi.nl/~beersma/riza/> in kader van ECLAT-2 Blue Workshop (EW-3) KNMI, Climate scenarios for water-related and coastal impact, May 10-12, 2000, The Netherlands

Middelkoop, H. (2003). Uitvoer RhineFlow (persoonlijke communicatie)

Ministerie van Verkeer en Waterstaat (2001). Leidraad Monitoring - Eindrapport, Commissie Integraal Waterbeheer, maart 2001, <http://www.leidraadmonitoring.nl>

Numerieke tabellen v/d ICBR: <http://had.bafg.de/iksr-zt>

Rijkswaterstaat Directie IJsselmeergebied: <http://www.rdiij.nl>

Rijkswaterstaat Directie Oost Nederland (2003). Stuwprogramma - afvoerverdeling Nederland (persoonlijke communicatie)

RIWA (2003). RIWA-Rijn Jaarverslag 2001-2002, Sectie Rijn, Vereniging van Rivierwaterbedrijven, mei 2003, Secretariaat RIWA-Rijn, Postbus 402, 3440 AK Nieuwegein, ISBN - 90-6683-103-0

Tol, R.S.J., Grijp, N. van der, Olsthoorn, X., Werff, P. van der (1999). Adapting to climate change: A case study on riverine flood risks in The Netherlands, IVM - Institute for Environmental Studies, Vrije Universiteit, De Boelelaan 1115, 1081 HV Amsterdam, SIRCH working paper 5, Report number D-99/10, oktober 1999

Verbeek, K. (2003). De toestand van het klimaat in Nederland 2003, KNMI, De Bilt, www.knmi.nl

WaterBase: <http://www.waterbase.nl>

WaterStat: <http://www.waterstat.nl>

WIN (2000). Waterhuishouding in het Natte Hart, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directies IJsselmeergebied, Noord-Holland, Utrecht en RIZA, Postbus 600, 8200 AP Lelystad, november 2000, ISBN: 90-369-12636

WL | Delft Hydraulics (1998). De Rijn op termijn, WL Delft, Postbus 177, 2600 MH Delft, <http://www.wldelft.nl/rijn/index.html>

Colofon

Auteurs:

F.A. de Bruijn
dr. ir. A. van Mazijk



Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele Techniek
en Geowetenschappen
Sectie Hydrologie
Postbus 5048
2600 GA Delft
T: +31 (0)15 - 278 54 77
e-mail: a.vanMazijk@Citg.tudelft.nl

Opdrachtgever: Vereniging van Rivierwaterbedrijven (RIWA)

Concept en opmaak: Meyson Communicatie, Amsterdam

Druk: ATP Digitale Media, Zwanenburg

ISBN: 90-6683-105-7

Oktober 2003

The background of the page features a large, abstract graphic. On the left, there are light blue, wavy, horizontal bands. On the right, there are darker blue, wavy, vertical bands. In the center, there is a large, dark blue, wavy shape that resembles a stylized 'S' or a river. The RIWA logo is positioned in the top left corner.

RIWA

Postbus 402

3430 AK Nieuwegein

T (030) 600 90 30

F (030) 600 90 39

e-mail: riwa@riwa.org

web: www.riwa.org