

Zout, zouter, zoutst

*Statistiek van de externe verzilting
in Midden-West Nederland*

*Jules J. Beersma, T. Adri Buishand,
Sacha de Goederen en Pieter Jacobs*

KNMI-publicatie; 199-III

De Bilt, 2005

Postbus 201
3730 AE De Bilt
Wilhelminalaan 10
De Bilt

<http://www.knmi.nl>
Tel. 030-220 69 11
Fax 030-221 04 07

Auteurs: J.J. Beersma
T.A. Buishand
S. de Goederen
P. Jacobs



Zout, zouter, zoutst

Statistiek van de externe verzilting in Midden-West Nederland

Jules J. Beersma (KNMI)

T. Adri Buishand (KNMI)

Sacha de Goederen (RIZA)

Pieter Jacobs (RIZA)

November 2005



RIZA



KNMI-publicatie; 199-III

Dit onderzoek is uitgevoerd binnen de samenwerkingsovereenkomst tussen het KNMI en het RIZA (Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling, Postbus 17, 8200 AA Lelystad), contractnummers RI-2726A en RI-4339.

Inhoudsopgave

Samenvatting	4
1. Inleiding	5
1.1 Kader	5
1.2 Noodzaak voor verziltingsjaren in plaats van droogtejaren	5
1.3 Doel	6
1.4 Leeswijzer	6
2. Gebruikte data	7
2.1 Beschikbaarheid chloridemetingen	7
2.2 Keuze zoutmeetstation	7
2.3 Afvoer- en waterstandsmetingen	8
2.4 Chloridemetingen	8
3. Karakteristieke verziltingsjaren	10
4. Relatie tussen verzilting, opwaaiing en afvoer	12
5. Regressieanalyse van de chlorideconcentratie	15
5.1 Inleiding	15
5.2 Afleiding regressievergelijkingen	15
5.3 Validatie van de regressiemodellen	17
5.4 Conclusie	20
6. Herhalingstijden voor de verziltingsjaren	21
7. Het effect van klimaatverandering op de verzilting en de herhalingstijden	23
7.1 Inleiding	23
7.2 Het Controlist klimaatscenario	23
7.3 Het effect van klimaatverandering op de chlorideconcentraties	24
7.3.1 Berekeningen met het hydrodynamische model	24
7.3.2 Regressiemodellen voor de situatie met 25 cm zeespiegelstijging	26
7.3.3 Herhalingstijden van de verziltingsjaren onder het Controlist scenario	26
7.3.4 Afzonderlijke effecten van veranderde Rijnafvoer en zeespiegelstijging op de verzilting	28
8. Conclusies en aanbevelingen	30
Literatuur	31
Appendix A	32
Details van de regressiemodellen voor Cl_{max} bij een 25 cm hogere zeespiegelstand	
Appendix B	34
Gumbel parameters	
Appendix C	35
Herhalingstijden voor alle historische jaren	

Samenvatting

Het Rijn-Maas mondingsgebied is één van de locaties in Nederland waar zoutindringing vanuit zee plaatsvindt (externe verzilting). De mate van zoutindringing hangt sterk af van de waterstand op zee en de grootte van de rivierafvoer. Door sterke variatie in de tijd van deze grootheden lopen de nadelige effecten van externe verzilting voor de landbouw en de drinkwatervoorziening van jaar tot jaar sterk uiteen. In het kader van de Zoetwaterverkenning Midden-West Nederland is een vijftal verziltingsjaren geselecteerd. Het doel van het in dit rapport beschreven onderzoek is de kans van voorkomen van deze verziltingsjaren te bepalen zowel voor het thans heersende klimaat als voor een toekomstige situatie. Deze kans is uitgedrukt in termen van een herhalingsjaren.

Het basis materiaal voor de statistische analyse bestond uit 10-minuutwaarden van de chlorideconcentraties van het meetpunt Lekhaven (Rotterdam) voor de periode 1998 – 2003, de dagwaarden van de afvoer van de Rijn bij Lobith vanaf 1901, en de gemeten en astronomische hoogwaterstanden bij Hoek van Holland vanaf 1901. Om voor elk jaar in de periode 1901 – 2003 een maat voor de verzilting te bepalen werd een regressieanalyse uitgevoerd van de maximale chlorideconcentratie in een getij op de bijbehorende rivierafvoer Q en de opwaaiing ΔH (hier genomen als het verschil tussen het gemeten en astronomische hoogwater). Een 3-parameter regressiemodel, met twee van Q en ΔH afhankelijke predictoren en een constante term, werd uitvoerig vergeleken met een 4-parameter regressiemodel. Door een extra kwadratische term in Q gaf dit laatste model een iets betere beschrijving van de gemeten concentraties voor de periode 1998 – 2003. Op basis van de geschatte chlorideconcentraties uit het 4-parameter model werden de volgende herhalingsjaren verkregen.

Verziltingsjaar	Karakteristiek	Herhalingsjaren (jaren)	
		Huidig (2005)	Toekomst (2050)
1976/1990	extreem zout	32.1	17.6
2003	zout	11.1	6.95
1996	gemiddeld zout	3.33	2.51
1994	brak	1.64	1.43
2002	matig brak	1.19	1.12

Bij het extreem zoute jaar 1976/1990 is de Rijnafvoer voor het uitzonderlijk droge jaar 1976 gecombineerd met de waterstanden van 1990, een jaar waarin relatief veel stormen voorkwamen. Om de herhalingsjaren af te leiden is een Gumbel verdeling gefit op de jaargemiddelden van de berekende chlorideconcentraties. Voor de berekening van de herhalingsjaren in de toekomstige situatie is uitgegaan van het zogenaamde Controlist scenario. Dit scenario veronderstelt een temperatuuroptocht van 1 °C in 2050 en een zeespiegelstijging van 25 cm. Behalve deze zeespiegelstijging leidt de verandering van de Rijnafvoer (afname in de zomer) tot een toename van de externe verzilting. Beide factoren dragen ongeveer in gelijke mate bij aan de gegeven afname van de herhalingsjaren. Met een eventuele verandering van de opwaaiing als gevolg van een ander windklimaat is geen rekening gehouden. Het inschatten van de chlorideconcentraties met het 3-parameter regressiemodel leidt tot vrijwel dezelfde herhalingsjaren.

1. Inleiding

In de Nederlandse overgangswateren (de gebieden waar zoet en zout water elkaar ontmoeten) komt zoutindringing vanuit zee op natuurlijke wijze op slechts enkele plaatsen voor. Eén van deze locaties is het Rijn-Maas mondingsgebied (Nieuwe Waterweg, Nieuwe en Oude Maas). Onder invloed van de wisselende omstandigheden als getij en rivierafvoer dringt zout water hier tweemaal daags de rivieren op. De mate waarin dit optreedt is van belang voor een aantal gebruikers van zoet water; zij zijn immers gebaat bij zo zoet mogelijk water in het hoofdsysteem (rijkswater). Als het oppervlaktewater ter hoogte van de innamepunten van drinkwaterbedrijven en waterschappen te zout wordt, dan zullen deze gebruikers zo mogelijk de inname van het water ten behoeve van drinkwaterproductie, of peilbeheersing en doorspoeling van de binnendijkse watersystemen staken. Hierdoor kunnen productiebeperkingen (drinkwater) of droogte- dan wel zoutschade ontstaan (waterschappen). In tegenstelling tot de directe droogteschade in de landbouw als gevolg van een neerslagtekort, kan dus ook op deze indirecte manier schade ontstaan. Overigens wordt het proces van zoutindringing ook wel aangeduid met de term externe verzilting, om het onderscheid met interne verzilting (brakke kwel) aan te geven.

1.1 *Kader*

Het samenhangen van externe verzilting en het optreden van droogteschade binnendijks is één van de aandachtspunten in de Zoetwaterverkenning Midden-West Nederland. Dit is een studie, uitgevoerd in opdracht van een consortium van rijks- en regionale waterbeheerders in genoemde regio (waterschappen, provincies en Rijkswaterstaat), gericht op het in beeld brengen van de aard, ernst en omvang van droogte- en zoutschade in Midden-West Nederland (fase 1) en het inschatten van de effecten van maatregelen die deze schades kunnen beperken (fase 2). Binnen de tweede fase loopt ook een parallelle achtergrondstudie naar aanvoerfrequenties. Hierin wordt onderzocht in welke mate regionale waterbeheerders kunnen verwachten dat zij geen water uit het hoofdsysteem kunnen innemen omdat de waterkwaliteit te slecht is (met name de chlorideconcentratie te hoog), en/of de waterstand in de rivier te laag is zodat inlaten onder vrij verval niet meer mogelijk is.

De afhankelijkheid van droogte- en zoutschade ten aanzien van de optredende randvoorwaarden (rivierafvoer en waterstand op zee) die de externe verzilting bepalen is nog niet eerder onderzocht. In het lopende onderzoek ten behoeve van de Zoetwaterverkenning Midden-West Nederland speelt dan ook de vraag wat in de huidige en toekomstige situatie de mate van externe verzilting zal zijn. Deze externe verzilting treedt op wanneer de afvoer van Rijn en Maas laag is, eventueel in combinatie met een verhoogde waterstand op zee als gevolg van sterke (noordwesten) wind.

1.2 *Noodzaak voor verziltingsjaren in plaats van droogtejaren*

In de Droogtestudie Nederland (www.droogtestudie.nl) is voor het schatten van herhalingstijden van droogte- en zoutschades, gebruik gemaakt van karakteristieke droogtejaren. Op basis van het optreden van het maximale neerslagtekort in een jaar, en het cumulatieve 'tekort' aan rivierafvoer zijn jaren naar droogte geclassificeerd. Uit de reeks 1906 – 2000 is een aantal jaren geselecteerd, die de range van nat,

gemiddeld tot extreem droog bestrijken (zie Beersma en Buishand, 2002; Beersma et al., 2004). In de Zoetwaterverkenning Midden-West Nederland zijn deze jaren ook gebruikt om de aard, ernst en omvang van de problemen weer te geven. Echter, zoals hiervoor geschetst is de karakterisering van droogtejaren op basis van tekorten aan afvoer en neerslag niet van toepassing op de externe verzilting, omdat deze voornamelijk wordt bepaald door het (al dan niet gelijktijdig) optreden van lage afvoer en verhoging van de waterstand op zee. Om karakteristieke verziltingsjaren en hun herhalingstijden af te leiden is dan ook nieuwe statistiek nodig van deze grootheden.

Een tweede onderscheidend aspect hierbij is de gelijktijdigheid van lage afvoer en waterstandverhoging op zee. Een lage afvoer alleen hoeft nog niet tot een extreme mate van externe verzilting te leiden, evenmin als een forse verhoging van de zeewaterstand als gevolg van een sterke (noordwestelijke) wind. Het is juist het gelijktijdig optreden van de verschijnselen die zorgen voor een maximum in de externe verzilting. Als voorbeeld: bij een afvoer van de Rijn bij Lobith van 2200 m³/s treedt ter hoogte van de Willemsbrug in het centrum van Rotterdam nog geen zoutindringing vanuit zee op als de getijomstandigheden op zee gemiddeld zijn (geen opwaaiing). Daalt de afvoer naar 1000 m³/s, óf treedt er een waterstandverhoging op zee op die groter is dan 1 meter (werkelijke waterstand – astronomisch getij), dan zal op deze locatie de invloed van zeewater wél merkbaar zijn. In de bepaling van de statistiek van externe verzilting dient dus aandacht besteed te worden aan de samenhang van sturende grootheden in de tijd.

1.3 Doel

Het in dit rapport beschreven onderzoek is erop gericht om de herhalingstijd van verziltingsjaren te bepalen op basis van historische gegevens van afvoer en zeewaterstand. Hiertoe dient zoals hiervoor geschetst een nieuwe methodiek ontwikkeld te worden, omdat vanwege de specifieke aard van het probleem geen gebruik gemaakt kan worden van de methodiek waarmee de herhalingstijden voor de droogtejaren zijn afgeleid. Daarnaast moet een inschatting gemaakt worden hoe deze herhalingstijden veranderen als gevolg van de effecten van klimaatveranderingen in de toekomst (richtjaar 2050).

1.4 Leeswijzer

In dit rapport worden de gevolgde uitgangspunten en werkwijze beschreven. In hoofdstuk 2 komen de gebruikte data aan de orde: op basis van meetgegevens van rivierafvoer, waterstand op zee en chloridegehalte wordt een beeld geschetst van de mate van zoutindringing als functie van de heersende omstandigheden. Hoofdstuk 3 gaat in op de keuze van de gebruikte karakteristieke verziltingsjaren. De afhankelijkheid tussen chlorideconcentratie, rivierafvoer en waterstand op zee wordt verder beschreven en onderbouwd in hoofdstuk 4, waarna in hoofdstuk 5 een aantal regressievergelijkingen voor deze afhankelijkheid wordt afgeleid. In hoofdstuk 6 wordt beschreven op welke manier de herhalingstijden van de verziltingsjaren worden bepaald voor de huidige situatie. In hoofdstuk 7 volgt dan een inschatting van de manier waarop deze herhalingstijden in de toekomst zullen veranderen als gevolg van een veranderend klimaat. In hoofdstuk 8 tenslotte worden de conclusies en aanbevelingen van dit onderzoek gepresenteerd. Met name hoofdstuk 5 en §7.3.2 zijn

nogal technisch van aard. De lezer die slechts geïnteresseerd is in de resultaten van het onderzoek (namelijk de bepaling van de herhalingstijden) kan deze onderdelen overslaan.

2. Gebruikte data

2.1 Beschikbaarheid chloridemetingen

Om de herhalingstijd van verziltingsjaren te bepalen, zou het het gemakkelijkst zijn om uit te gaan van een lange reeks van metingen van de chlorideconcentratie op een bepaalde locatie. Voor elk jaar uit de lange reeks is dan een in de tijd geïntegreerde concentratie te bepalen (het zogenaamde verziltingsoppervlak als karakteristiek getal voor dat jaar), die als basis dient voor het bepalen van de herhalingstijd. De lengte van de meetreeks dient dan ruim langer te zijn dan de maximale herhalingstijd die bepaald moet worden. Voor een statistisch onderbouwde inschatting van het verziltingsniveau dat eens per 10 jaar overschreden wordt is een meetreeks nodig die een veelvoud van die 10 jaar beslaat.

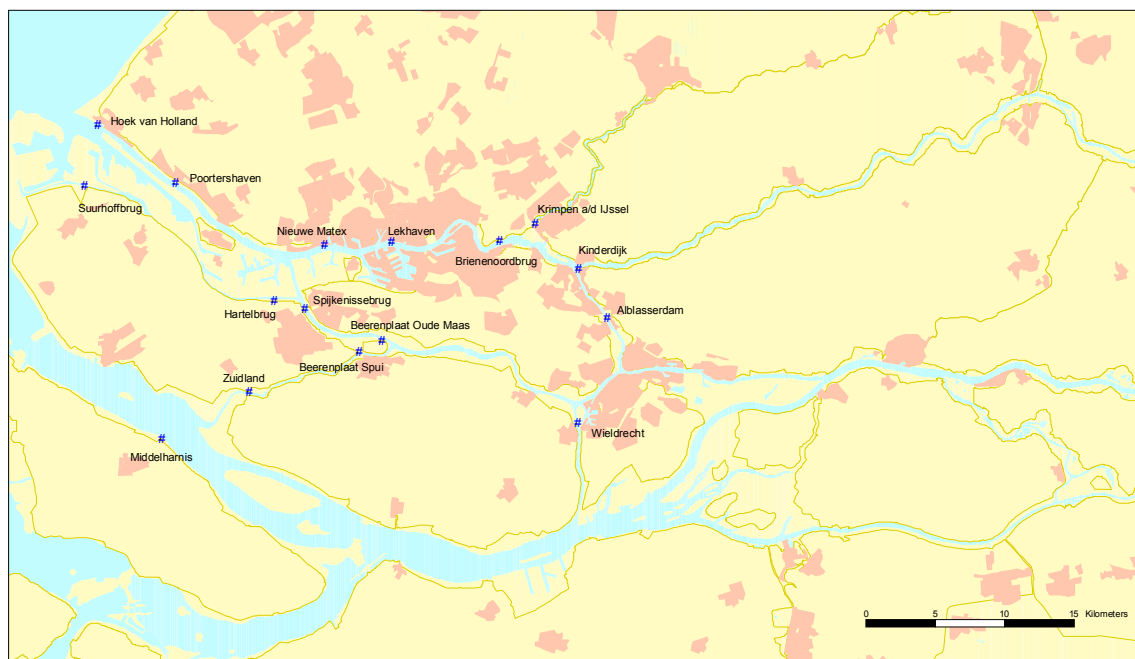
Dergelijke meetreeksen voor chloride bestaan niet voor locaties in de Rijn-Maas monding. Daarom is een alternatieve aanpak ontwikkeld, die uitgaat van beschikbare meetreeksen voor chloride voor een korte ijkperiode (1998 – 2003). De mate van zoutindringing voor elk getij in deze periode wordt gekoppeld aan de twee belangrijkste grootheden die de externe verzilting bepalen: de rivierafvoer en de waterstand op zee (en wel de opwaaiing ten opzichte van de astronomische hoogwaterstand in elk getij). Indien een relatie gelegd kan worden tussen de sturende randvoorwaarden en de opgetreden chlorideconcentratie dan kan, bij beschikbaarheid van lange meetreeksen voor de randvoorwaarden een inschatting gemaakt worden van de externe verzilting over een veel langere periode dan 1998 – 2003.

Rivierafvoeren bij Lobith zijn op dagbasis beschikbaar vanaf 1901. Daarnaast zijn zowel gemeten als astronomische getij-extremen beschikbaar voor diezelfde periode. Op basis hiervan kan dus een inschatting gemaakt worden van de externe verzilting in de periode 1901 – 2003. Hierbij dient opgemerkt te worden dat andere zaken van invloed kunnen zijn op de externe verzilting, zoals grote infrastructurele aanpassingen. Door gebruik te maken van de relatie tussen chlorideconcentratie enerzijds, en afvoer en opwaaiing op zee anderzijds, gebaseerd op metingen uit de periode 1998 – 2003, wordt expliciet aangenomen dat de verziltings situatie voor de jaren uit de historische reeks 1901 – 2003 uitgaat van dezelfde omstandigheden als in de korte recente ijkperiode. Een inschatting van de verzilting voor pakweg het jaar 1949 is met deze methode dus geen benadering van de exacte situatie zoals die in 1949 is opgetreden, het is daarentegen een projectie van de invloed van de werkelijk opgetreden randvoorwaarden in 1949 naar de actuele verziltings situatie.

2.2 Keuze zoutmeetstation

Verspreid over het gebied is een aantal zoutmeetstations aanwezig. De ligging is weergegeven in Figuur 1. De westelijk gelegen stations zijn bijna continu verzilt, terwijl bij de oostelijk gelegen stations verzilting zelden optreedt. Meetstations in het middengebied, zoals Lekhaven en Spijkenissebrug zijn voor dit onderzoek het meest

interessant. Deze liggen namelijk in het gebied waar externe verzilting onder gemiddelde omstandigheden tijdens de vloed in elk getijde plaatsvindt, maar die tijdens eb ook weer zoet worden. Dit maakt dat kleine verschillen in externe verzilting op deze stations altijd direct merkbaar zijn. Gekozen is voor het meetstation Lekhaven. De chlorideconcentratie op meetstation Lekhaven wordt gemeten op drie dieptes. Er is gebruik gemaakt van de metingen van de diepste sensor gelegen op NAP -7.00 m. Deze is het meest gevoelig voor verzilting.



Figuur 1. Zoutmeetstations.

2.3 Afvoer- en waterstandsmetingen

In §2.1 werd al aangegeven dat van 1901 tot en met 2003 gegevens beschikbaar zijn van zowel de gemeten afvoer bij Lobith als de gemeten en de astronomische hoogwaterstand bij Hoek van Holland. Voor elk getij in deze periode is de opwaaiing ΔH bepaald als het verschil tussen het gemeten hoogwater en het berekende astronomisch hoogwater bij Hoek van Holland. Beide hoogwaters vallen in de tijd niet altijd samen. Bij elk getij is tevens de Bovenrijnafvoer Q bepaald door lineaire interpolatie van de afvoer voor het tijdstip 48 uur vóór ieder (gemeten) hoogwater bij Hoek van Holland. Met deze periode van 48 uur wordt de looptijd van de rivierafvoer van Lobith tot het mondingsgebied van de Rijn en Maas in rekening gebracht.

2.4 Chloridemetingen

De chloridemetingen van meetstation Lekhaven voor de periode 1998 – 2003 hebben de vorm van een tijdreeks met voor iedere 10 minuten een waarde. Uit deze tijdreeks zijn getijmaxima en verziltingsoppervlakken bepaald (voor definitie en uitleg hiervan zie hieronder).

Voor het bepalen van de getijmaximale chlorideconcentratie Cl_{max} dient de tijdreeks 1998 – 2003 eerst te worden opgesplitst in getijperioden. De hoogste chlorideconcentratie treedt in het algemeen op aan het einde van de vloed. Daarom zijn de getijden gedefinieerd als de periode tussen twee opeenvolgende laagwaters. Lekhaven is geen waterstandsmeetstation. De laagwatertijdstippen zijn bepaald door het gemiddelde laagwatertijdstip te nemen van de waterstandsmeetstations Vlaardingen en Rotterdam. Uitgaande van deze laagwatertijdstippen is voor iedere getijperiode de maximale chlorideconcentratie Cl_{max} uitgefilterd.

Het verziltingsoppervlak is gedefinieerd als de integraal in de tijd van het verschil tussen de gemeten chlorideconcentratie en de achtergrondconcentratie. Als achtergrondconcentratie is de chlorideconcentratie bij Lobith genomen. Ook hier is 48 uur terug in de tijd gekeken, om de looptijd van de rivierafvoer van Lobith tot Lekhaven in rekening te brengen. Daarmee is het verziltingsoppervlak een grootheid die een maat is voor de zoutindringing vanuit zee in een bepaalde periode (meestal een jaar). De eenheid van verziltingsoppervlak is $g/l \cdot dag$. Als een jaar lang de chlorideconcentratie 1 g/l boven de achtergrondconcentratie ligt dan is het verziltingsoppervlak 365 $g/l \cdot dag$. Alle verziltingsoppervlakken zijn omgerekend naar jaren van exact 365 dagen. Naast de correctie van de kleine afwijking die ontstaat door de extra dag in schrikkeljaren, is deze omrekening vooral van belang omdat de tijdreeks van de chlorideconcentratie ontbrekende waarden vertoont. Tabel 1 geeft een indruk van de vullingsgraad per jaar.

Behalve per jaar zijn er ook verziltingsoppervlakken per maand berekend. De verziltingsoppervlakken per maand zijn ook weer herleid naar een periode van 365 dagen.

Tabel 1. Percentage van de tijdstippen waarop chlorideconcentratie metingen beschikbaar zijn, per jaar.

Jaar	Vullingsgraad (%)
1998	99.6
1999	99.1
2000	98.3
2001	98.4
2002	98.8
2003	99.0

3. Karakteristieke verziltingsjaren

Voor het in beeld brengen van de beschikbaarheid van zoet water in de Rijn-Maas monding nu en in de toekomst wordt gebruik gemaakt van karakteristieke verziltingsjaren. In dit hoofdstuk wordt aangegeven op welke manier de verziltingsjaren geselecteerd zijn. Omdat die selectie in de tijd voor liep op de afleiding van de herhalingstijden is het mogelijk dat de uiteindelijke keuze van de verziltingsjaren niet geheel overeenkomt met een goede verdeling over de range van herhalingstijden (bijvoorbeeld, is het geselecteerde gemiddeld zoute jaar een jaar waarin de externe verzilting het niveau bereikt dat eens per twee jaar voorkomt?). Voor onderhavig onderzoek is dit niet als bezwaar ervaren.

Voor de selectie van de karakteristieke jaren is gekeken naar een periode waarin voldoende meetgegevens voorhanden waren om op basis van het afvoerdeficit van de Rijn en de waterstanden op zee een eerste classificatie te kunnen maken. Bovendien is gezocht vanaf 1970, om de effecten van het inwerking treden van de deltawerken (met name de Haringvlietsluizen) mee te nemen.

Na selectie van de jaren op basis van het afvoerdeficit van de Rijn en de opwaaiing aan de kust, is voor deze jaren het verziltingsoppervlak bepaald. Hiermee kan de classificatie van de geselecteerde jaren op een grove manier gecontroleerd worden. Omdat in de jaren vóór 1990 de vullingsgraad van chloridemetingen te laag was om een betrouwbare schatting het verziltingsoppervlak te kunnen geven, is besloten om het zoekgebied voor de verziltingsjaren te beperken tot de periode 1990 – 2003. In plaats van het in het vorige hoofdstuk genoemde meetstation Lekhaven is uitgegaan van het (zoetere) meetstation bij de Van Brienoordbrug waarvoor vanaf 1990 chloridemetingen beschikbaar waren.

Voor de jaren in de periode 1990 – 2003 is in Tabel 2 het afvoerdeficit van de Rijn en de invloed van opwaaiing aan de kust gegeven, uitgedrukt in de opwaaiingsom. Elke m^3/s die de Rijnafvoer gedurende een bepaalde periode lager is dan de grenswaarde van $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ draagt bij aan het afvoerdeficit. Omdat het optreden van lage afvoeren ook buiten het zomerseizoen van invloed is op de externe verzilting, is het afvoerdeficit hier bepaald op basis van de het gehele jaar (en niet beperkt tot het zomerhalfjaar, zoals in Beersma en Buishand, 2002). Op vergelijkbare wijze is de opwaaiingsom als maat voor het aantal stormen aan de kust gedefinieerd: elke centimeter dat het hoogwater van een getij boven de grenswaarde van NAP +1.50 m uitkomt, draagt bij aan deze grootheid. Het verziltingsoppervlak in Tabel 2 tenslotte is gebaseerd op de chlorideconcentraties (op 10 minuten basis) bij de Van Brienoordbrug op een diepte van 6.5 m onder NAP.

Tabel 2. Afvoerdeficit, opwaaiingsom en verziltingsoppervlak voor de jaren 1990 – 2000.

Jaar	Afvoerdeficit (10 ⁹ m ³)	Opwaaiingsom (cm)	Verziltingsoppervlak (g/l*dag)
1990	8.84	2532	27
1991	11.42	1095	48
1992	6.95	914	23
1993	6.87	1795	24
1994	3.71	1152	28
1995	3.91	2052	41
1996	8.56	901	59
1997	7.41	528	17
1998	5.68	2019	19
1999	2.45	1775	15
2000	0.38	1286	6
2001	1.28	1311	6
2002	0.67	1270	7
2003	11.85	1276	99
1976	17.12	962	geen metingen

Op basis van de kolommen afvoerdeficit en opwaaiingsom is een keuze gemaakt van een vijftal jaren oplopend in de mate van externe verzilting. In deze reeks is ook het jaar 1976 beschouwd. Van dit jaar is bekend dat door het grote afvoerdeficit de externe verzilting groot was. Hoewel van dit jaar door een gebrek aan metingen bij de Van Brienoordbrug geen verziltingsoppervlak bepaald kan worden, is er voor gekozen om 1976 als basis voor een extreem jaar te nemen (zoals 1976 ook in de Droogtestudie Nederland als extreem droog werd aangemerkt). Als ‘worst case’ benadering is vervolgens de afvoerreeks van 1976 gecombineerd met de waterstandsreeks van 1990, omdat in dat jaar relatief veel stormen zijn voorgekomen (in de periode 1990 – 2003). Dit synthetische jaar 1976/1990 wordt beschouwd als extreem zout. De keuze en classificatie van de vijf verziltingsjaren is weergegeven in Tabel 3.

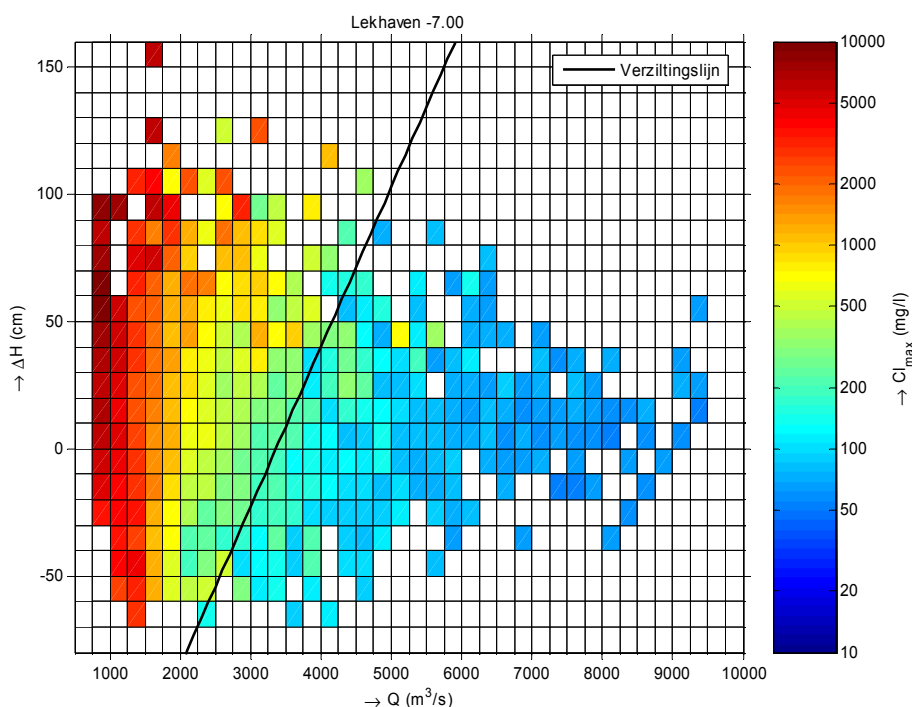
Tabel 3. Karakteristieke verziltingsjaren.

Karakteristiek	Verziltingsjaar	Verziltingsoppervlak (g/l*dag)
Extreem zout	1976/1990	geen metingen
Zout	2003	99
Gemiddeld zout	1996	59
Brak	1994	28
Matig brak	2002	7

4. Relatie tussen verzilting, opwaaiing en afvoer

Voor de jaren 1998 – 2003 kan het verziltingsoppervlak uit meetgegevens worden bepaald. Voor de overige jaren van de periode 1901 – 2003 is dit niet mogelijk. Volgens de in §2.1 beschreven aanpak wordt een relatie gelegd tussen de opwaaiing aan de kust, de Bovenrijnafvoer en de getijmaximale chlorideconcentratie Cl_{max} . De jaargemiddelde getijmaximale chlorideconcentraties (in het vervolg aangeduid met $Cl_{max,jaar}$) kunnen dan als alternatieve maat voor de externe verzilting in een jaar worden gebruikt.

De getijmaxima van de chlorideconcentraties Cl_{max} bij Lekhaven voor de periode 1998 – 2003 zijn geclassificeerd naar de Bovenrijnafvoer Q en de opwaaiing ΔH . Per klasse zijn de chlorideconcentraties gemiddeld. In Figuur 2 zijn de gemiddelde chlorideconcentraties per klasse van afvoer en opwaaiing weergegeven.

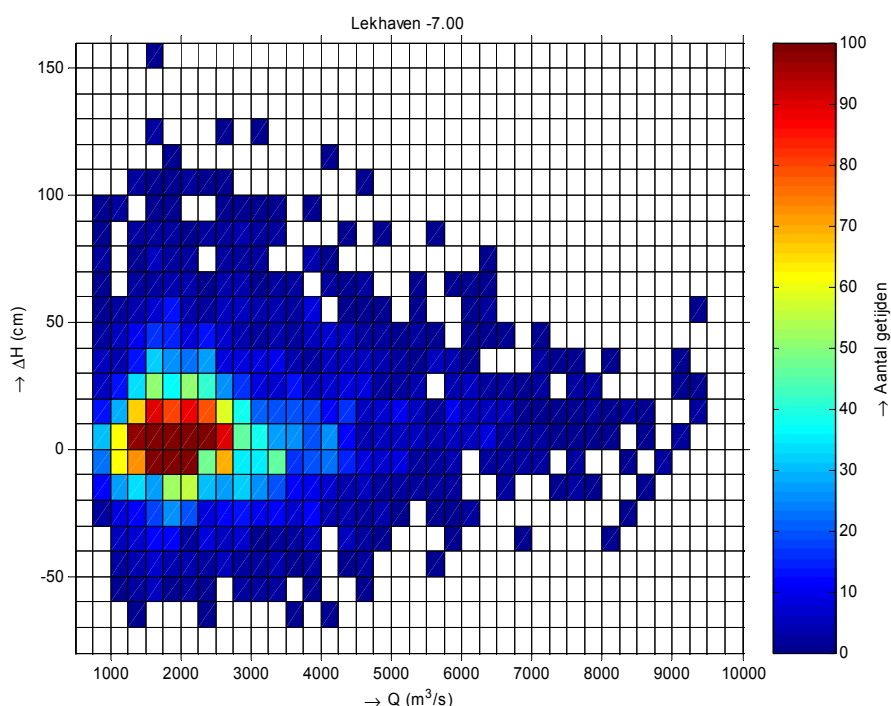


Figuur 2. De gemiddelde getijmaximale chlorideconcentratie bij Lekhaven (-7.00 m NAP) per klasse van Bovenrijnafvoer Q en opwaaiing ΔH voor de periode 1998 – 2003.

Indien de Bovenrijnafvoer voldoende hoog is dan blijft het meetstation Lekhaven tijdens het hele getij zoet. Bij lagere afvoer treedt enige externe verzilting op tijdens de vloed. Deze verzilting wordt ernstiger naarmate de afvoer lager is. De grens tussen het zoete gebied en het gebied waar externe verzilting optreedt verschuift door opwaaiing naar hogere afvoeren. Op het oog is in bovenstaande figuur een 'verziltingslijn' geschetst die ongeveer de grens tussen het zoete en verzilte gebied weergeeft. De verziltingslijn ligt bij een Cl_{max} van ongeveer 200 mg/l.

Het valt verder op dat Figuur 2 nogal wat ‘ruis’ bevat. De oorzaak hiervoor moet gezocht worden in het feit dat de Bovenrijnafvoer en de opwaaiing niet de enige variabelen zijn die de verzilting bepalen. Andere factoren die de verzilting kunnen beïnvloeden zijn:

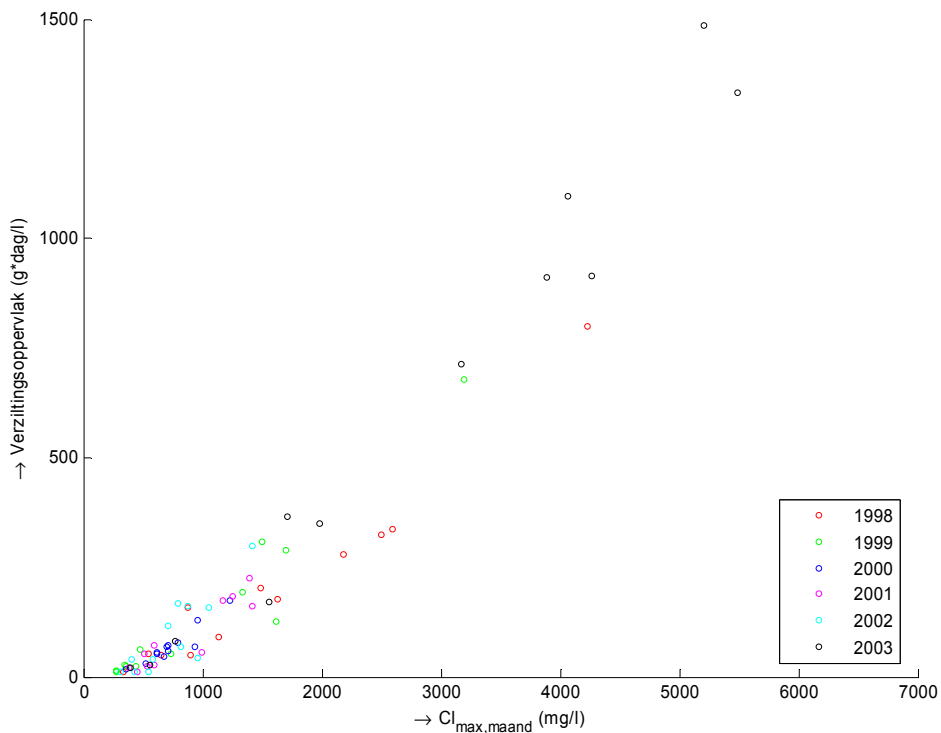
- de uitgangssituatie van het getij, bepaald door de waterbeweging in de voorgaande getijden,
- verschillen in afvoerverdeling door afwijkingen in het spuiprogramma van de Haringvlietsluizen,
- de mate van gelaagdheid in de waterkolom. Dit is de drijvende kracht bij de indringing van de zogenaamde zouttong in het gebied. De mate waarin deze gelaagdheid door menging wordt verminderd wisselt bijvoorbeeld door verschillen in stroming (doodtij-springtij, wind).



Figuur 3. Aantal getijden per klasse van Bovenrijnafvoer Q en opwaaiing ΔH voor de periode 1998 – 2003.

In Figuur 3 is het aantal getijden in de periode 1998 – 2003 per klasse weergegeven. Met name de klassen rond gemiddelde omstandigheden (geen opwaaiing, Rijnafvoer $2000 \text{ m}^3/\text{s}$) zijn goed gevuld.

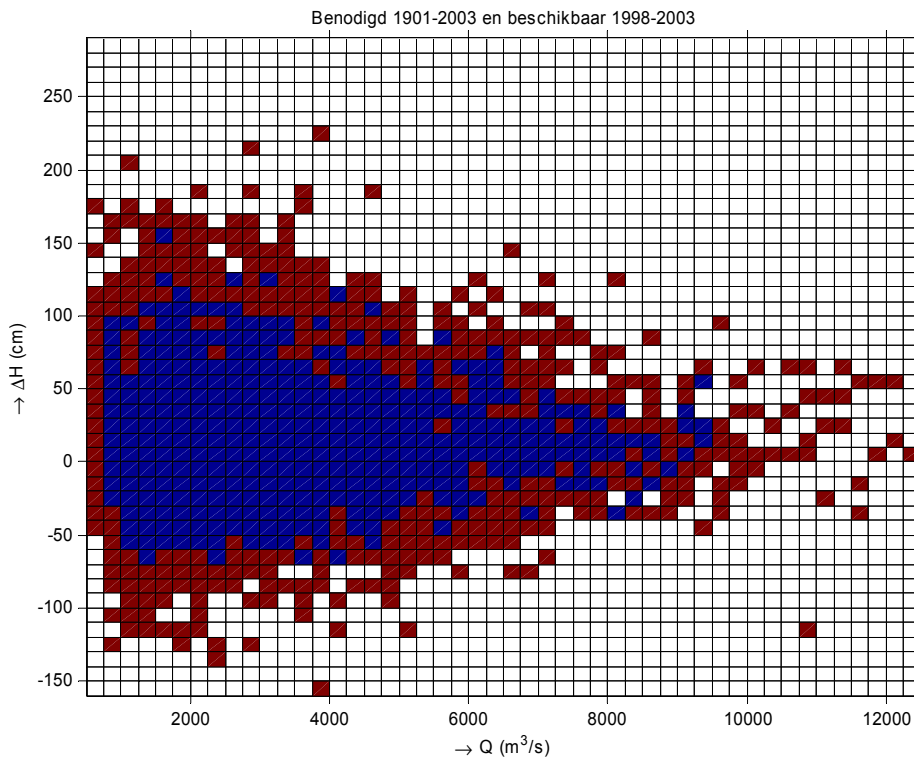
Om te bepalen of het gemiddelde van Cl_{\max} een goed beeld geeft van de werkelijke verzilting (in termen van het verziltingsoppervlak) is voor de jaren 1998 – 2003 de relatie tussen deze twee grootheden bepaald. Om de relatie goed te kunnen beoordelen zijn echter niet de getallen per jaar maar per maand vergeleken. De dataset wordt hierdoor groter en benadrukt perioden met extreme situaties. In Figuur 4 is de relatie weergegeven.



Figuur 4. Relatie tussen het verziltingsoppervlak per maand en de maandgemiddelde Cl_{max} bepaald uit de geclassificeerde getijmaximale chlorideconcentraties zoals weergegeven in Figuur 2 (locatie Lekhaven).

De correlatiecoëfficiënt tussen het verziltingsoppervlak per maand en $Cl_{max, maand}$ is 0.97. De correlatie wordt voldoende groot geacht om de (jaar)gemiddelden van Cl_{max} als alternatief voor het verziltingsoppervlak te gebruiken.

Voor het bepalen van $Cl_{max, jaar}$ voor de periode 1901 – 2003 dient voor elk getij uit deze periode de chlorideconcentratie volgens de classificatie in Figuur 2 bepaald te worden. Hierbij treedt het probleem op dat voor deze langere periode veel meer klassen van afvoer en opwaaiing nodig zijn, dan in de periode 1998 – 2003 zijn opgetreden. In Figuur 5 zijn de beschikbare klassen weergegeven in blauw en de ontbrekende klassen in roodbruin. Om toch over Cl_{max} voor de ontbrekende klassen te kunnen beschikken is de relatie tussen Q , ΔH en getijmaximale chlorideconcentratie, Cl_{max} , gemodelleerd met behulp van regressie. De regressieanalyse van de chlorideconcentratie vormt het onderwerp van het volgende hoofdstuk.



Figuur 5. Benodigde klassen van Bovenrijnafvoer Q en opwaaiing ΔH voor alle getijden in de periode 1901 – 2003. Blauw: beschikbare klassen; roodbruin: ontbrekende klassen.

5. Regressieanalyse van de chlorideconcentratie

5.1 Inleiding

Een regressiemodel is een wiskundig verband voor de relatie tussen een variabele (de afhankelijke variabele of predictand) en één of meer andere variabelen (de verklarende variabelen of predictoren). In ons geval is Cl_{\max} de afhankelijke variabele en zijn de predictoren uit Q en ΔH afgeleid. Het model wordt gefit (of gecalibreerd) op de gemeten Cl_{\max} waarden. Het gebruik van het model om de Cl_{\max} waarden voor ontbrekende klassen te schatten komt neer op een extrapolatie van het gecalibreerde verband. Dit brengt met zich mee dat enige zorg besteed dient te worden aan de vorm waarin de predictoren worden opgenomen in het model. Mede hierdoor is dit hoofdstuk wat minder elementair dan de voorgaande hoofdstukken.

5.2 Afleiding regressievergelijkingen

Voor Lekhaven (-7.00 m NAP) zijn verschillende regressievergelijkingen afgeleid voor het verband tussen de gemiddelde getijmaximale chlorideconcentratie Cl_{\max} (mg/l), de (voor de looptijd gecorrigeerde) Bovenrijnafvoer Q (m^3/s) en de opwaaiing ΔH (cm). Het bleek daarbij gewenst de vergelijking te fitten op de logaritmen van Cl_{\max} in plaats van op Cl_{\max} zelf. Behalve Q en ΔH werden in eerste instantie de daarvan afgeleide kwadratische termen $Q\Delta H$, Q^2 en $(\Delta H)^2$ als mogelijke predictoren beschouwd. Daarbij bleken ΔH en $(\Delta H)^2$ niet significant, zodat (behalve een

constante) de predictoren Q , $Q\Delta H$ en Q^2 overblijven. Dit levert de volgende regressievergelijking op:

$$\ln Cl_{\max} = a + bQ + cQ\Delta H + dQ^2 + \varepsilon \quad (1)$$

waarbij ε een random ruisterterm is met verwachting (gemiddelde) nul, $E(\varepsilon) = 0$. Het model bevat 4 onbekende regressiecoëfficiënten a , b , c en d , en zal daardoor in het vervolg als het ‘4p’ model worden aangeduid.

Om een zo goed mogelijke fit te krijgen in situaties waar verzilting optreedt is de regressieanalyse alleen uitgevoerd voor het gebied links van de ‘verziltingslijn’ in Figuur 2. Deze lijn wordt gegeven door de vergelijking:

$$\Delta H = -211.1 + 0.0628Q \quad (2)$$

Voor elke klasse van afvoer en opwaaiing is het gemiddelde van $\ln Cl_{\max}$ bepaald op basis van de chloridemetingen in de periode 1998 – 2003. Voor Q en ΔH is steeds het klassemidden aangehouden. De regressiecoëfficiënten zijn vervolgens bepaald met de kleinste kwadraten methode waarbij gewogen werd met het aantal getijden per klasse zoals weergegeven in Figuur 3.

Uit (1) volgt voor de chlorideconcentratie:

$$Cl_{\max} = \exp(a + bQ + cQ\Delta H + dQ^2 + \varepsilon) \quad (3)$$

Hoewel $E(\varepsilon) = 0$, is $E[\exp(\varepsilon)] \neq 1$ waardoor de verwachting van Cl_{\max} verschilt van $\exp(a + bQ + cQ\Delta H + dQ^2)$:

$$E(Cl_{\max}) \neq \exp(a + bQ + cQ\Delta H + dQ^2) \quad (4)$$

Om voor deze zogenaamde ‘retransformation bias’ te corrigeren is de regressiecoëfficiënt a zodanig aangepast dat

$$E(Cl_{\max}) = \exp(a^* + bQ + cQ\Delta H + dQ^2) \quad (5)$$

De coëfficiënt a^* in (4) is zodanig gekozen dat voor de combinaties van Q en ΔH links van de verziltingslijn de gemiddelde getijmaximale concentratie gelijk is aan het gemiddelde uit de regressievergelijking (vergelijk Kilsby *et al.*, 1998).

Tabel 4 geeft de regressiecoëfficiënten en hun standard errors. Naast het ‘4p’ model worden in deze tabel nog twee andere regressiemodellen beschouwd: Model 3p en Model 4p110.

In Model 3p is de regressiecoëfficiënt d gelijk aan nul gesteld en in Model 4p110 is voor de afvoer een drempel Q_d ($= 2600 \text{ m}^3/\text{s}$) toegepast waarboven de afvoer in de termen bQ en $cQ\Delta H$ constant wordt verondersteld (en in de dQ^2 term dus niet). De regressievergelijking voor Model 4p110 ziet er dan als volgt uit:

$$\begin{aligned} E(Cl_{\max}) &= \exp(a^* + bQ + cQ\Delta H + dQ^2) & Q \leq Q_d \\ E(Cl_{\max}) &= \exp(a^* + bQ_d + cQ_d\Delta H + dQ^2) & Q > Q_d \end{aligned} \quad (6)$$

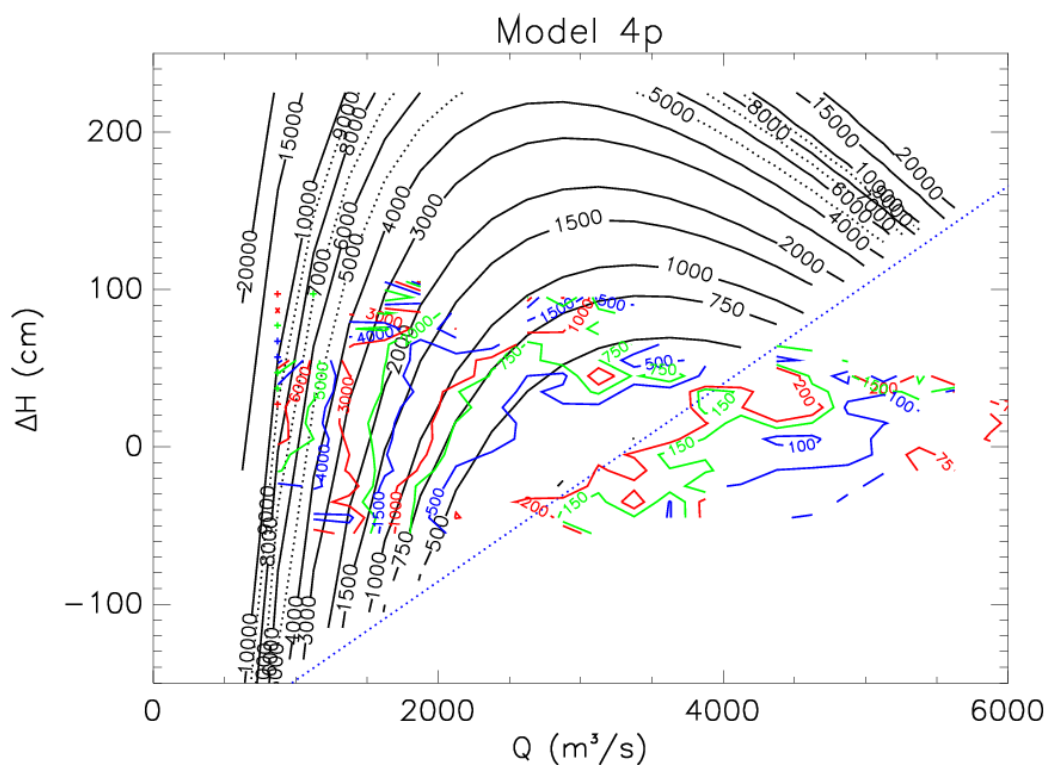
Tabel 4. Regressiecoëfficiënten voor de drie regressiemodellen, met tussen haakjes de bijbehorende standard errors.

Regressie-coëfficiënt	Model 4p	Model 3p	Model 4p110
a^*	11.53	9.88	10.25
a	11.42 (0.13)	9.68 (0.07)	10.10 (0.09)
b	$-3.25 \cdot 10^{-3}$ ($0.13 \cdot 10^{-3}$)	$-1.50 \cdot 10^{-3}$ ($0.04 \cdot 10^{-3}$)	$-1.67 \cdot 10^{-3}$ ($0.07 \cdot 10^{-3}$)
c	$4.33 \cdot 10^{-6}$ ($0.30 \cdot 10^{-6}$)	$5.65 \cdot 10^{-6}$ ($0.42 \cdot 10^{-6}$)	$4.54 \cdot 10^{-6}$ ($0.35 \cdot 10^{-6}$)
d	$4.10 \cdot 10^{-7}$ ($0.29 \cdot 10^{-7}$)	—	$-0.36 \cdot 10^{-7}$ ($0.12 \cdot 10^{-7}$)

Voor alle drie de regressievergelijkingen leveren de predictoren (de constante, Q, QAH en Q²) een significante bijdrage¹.

5.3 Validatie van de regressiemodellen

In Figuur 6 zijn contourplots van de chlorideconcentraties als functie van de afvoer en de opwaaiing voor elk van de 3 regressiemodellen gegeven. De gekleurde contouren corresponderen steeds met de waarden van Cl_{max} uit Figuur 2.

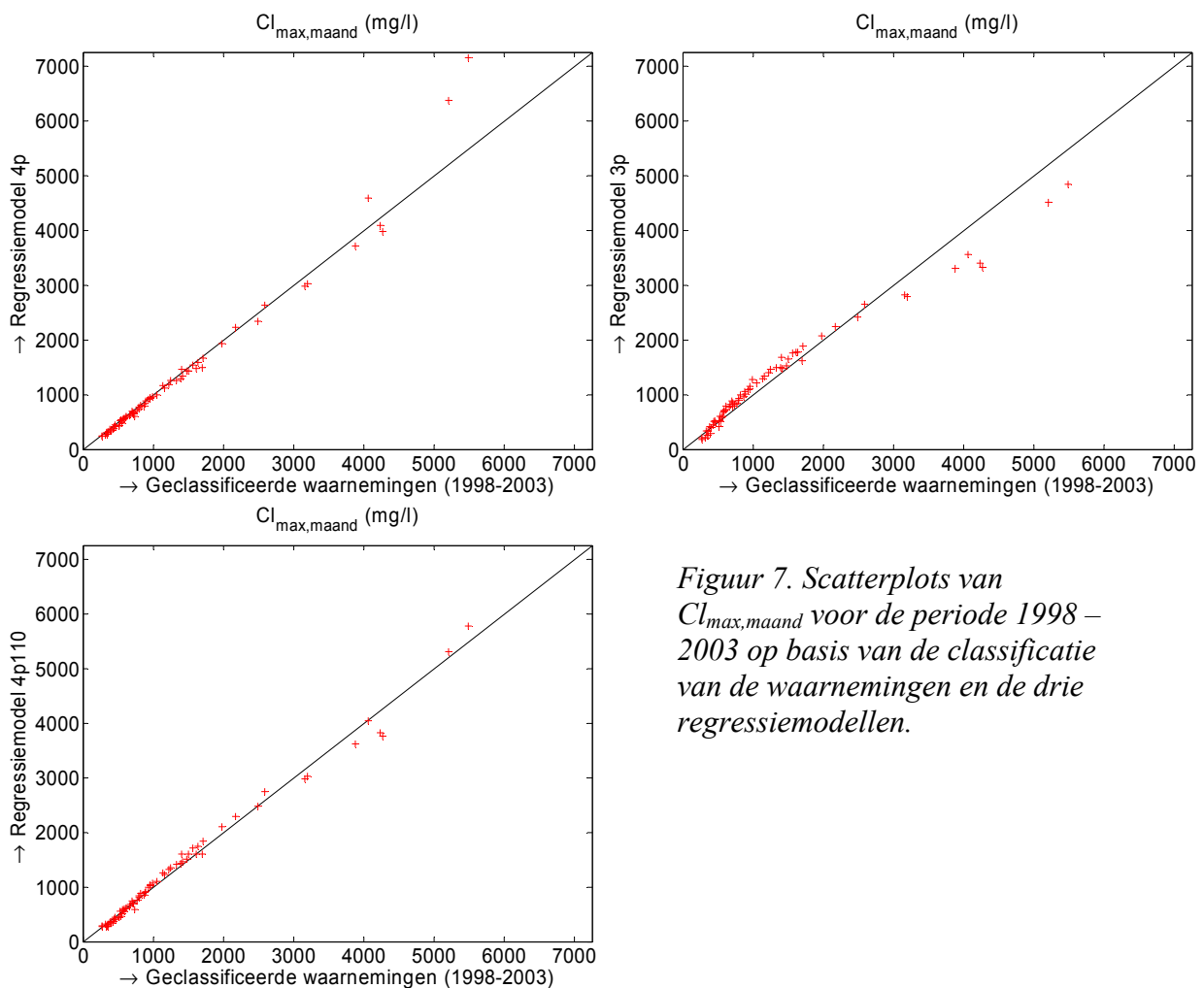


Figuur 6. Contourplots van Cl_{max} (mg/l) voor de drie regressiemodellen.

¹ Voor het al dan niet significant zijn is een onbetrouwbaarheidsdrempel van 5% aangehouden. Een predictor levert dan een significante bijdrage aan de regressievergelijking wanneer (de absolute waarde van) de regressiecoëfficiënt meer dan twee maal zo groot is als zijn standaard error (in dat geval ligt de waarde nul niet in het interval dat begrensd wordt door de regressiecoëfficiënt plus en min twee maal de standaard error).

afvoer te verwachten. Daarnaast kan in dit model Cl_{max} (veel) groter worden dan chlorideconcentratie van zeewater (~ 17000 mg/l). Dit gedrag wordt vooral door de positieve waarde van de regressiecoëfficiënt d voor de kwadratische term in de afvoer dQ^2 veroorzaakt. Model 3p, zonder die kwadratische term in de afvoer, kent dit onnatuurlijke gedrag niet maar hier is de gradiënt in Cl_{max} bij lage afvoeren te klein en zijn de contouren in dit gebied niet 'steil' genoeg. Model 4p110, ten slotte, geeft bij lage afvoeren een voldoende grote gradiënt in Cl_{max} en daarnaast neemt, zoals verondersteld, Cl_{max} in alle gevallen af bij toename van de afvoer.

De classificatie van Cl_{max} naar Bovenrijnafvoer en opwaaiing (Figuur 2) is de referentie waarmee de gemodelleerde waarden van Cl_{max} zo goed mogelijk dienen te corresponderen. Dit geldt ook voor grootheden die uit de waarden van Cl_{max} zijn afgeleid, zoals maand- en jaargemiddelde concentraties van de getijden links van de verziltingslijn (conform de afleiding van de regressievergelijkingen worden de getijden rechts van de verziltingslijn dus buiten beschouwing gelaten). Voor de periode 1998 – 2003 kunnen de waarden van $Cl_{max,maand}$ op basis van de regressiemodellen vergeleken worden met de waarden van $Cl_{max,maand}$ op basis van de classificatie van Cl_{max} in Figuur 2. In Figuur 7 wordt deze vergelijking gemaakt aan de hand van scatterplots van $Cl_{max,maand}$.



Figuur 7. Scatterplots van $Cl_{max,maand}$ voor de periode 1998 – 2003 op basis van de classificatie van de waarnemingen en de drie regressiemodellen.

In Model 3p worden de waarden van $Cl_{\max, \text{maand}}$ tussen de 3000 en 6000 mg/l onderschat. Model 4p doet het wat dat betreft beter maar overschat de twee hoogste waarden van $Cl_{\max, \text{maand}}$. Gemiddeld over het hele bereik reproduceert Model 4p110 $Cl_{\max, \text{maand}}$ in de periode 1998 – 2003 het best.

Tenslotte wordt nog de gemiddelde absolute fout (MAE) in Cl_{\max} beschouwd. Deze bedraagt voor Model 4p 14.4 % van de gemiddelde Cl_{\max} van 1468 mg/l, voor Model 3p 18.8 % en voor Model 4p110 13.6 %. De fout in Model 3p is mede relatief groot omdat in dit model een statistisch significante term ontbreekt. In Tabel 5 zijn de relatieve MAE's ook gegeven voor de klassen waarin meer dan 100 getijden voorkomen, voor de klassen waarin tussen de 6 en de 10 getijden voorkomen en voor de klassen waarin maximaal 5 getijden voorkomen. In een aantal zeer dun bevolkte klassen (met maar één getij of een paar getijden) kan voor alle regressiemodellen de MAE tot boven de 200 % oplopen. Gemiddeld over alle klassen en over de klassen met maximaal 5 getijden geeft Model 4p110 de kleinste MAE; bij klassen met tussen de 6 en 10 getijden en klassen met meer dan 100 getijden heeft Model 4p een iets kleinere MAE dan Model 4p110.

Tabel 5. Gemiddelde absolute fout (MAE) als percentage van Cl_{\max} voor verschillende typen klassen van Bovenrijnafvoer en opwaaiing.

Typen klassen	Cl_{\max} (mg/l)	MAE		
		Model 4p	Model 3p	Model 4p110
Alle klassen	1467.8	14.4	18.8	13.6
Klassen met meer dan 100 getijden	1051.1	8.1	10.9	8.9
Klassen met tussen de 6 en 10 getijden	1244.1	13.6	24.7	16.1
Klassen met maximaal 5 getijden	2172.5	34.0	28.9	27.2

5.4 Conclusie

In termen van de verschillende MAE's presteert Model 4p110 beter dan Model 3p, en gemiddeld over alle klassen en de klassen met maximaal 5 getijden ook beter dan Model 4p. Op basis van de contourplots van Cl_{\max} bestaat er een voorkeur voor Model 4p110 vooral in het gebied met lage afvoeren waar de sterke gradiënt in Cl_{\max} onderschat wordt door Model 3p en overschat wordt door Model 4p. Door het geringe aantal waarnemingen in dit gebied is de onzekerheid hier echter groot. De onzekerheid in de gradiënt is vooral van belang voor het bepalen van de gevolgen van klimaatverandering op de verzilting (zie hoofdstuk 7). De sterkte van deze gradiënt bepaalt namelijk in belangrijke mate de gevoeligheid van de verzilting voor (systematische) veranderingen in de afvoer.

Vanwege het onnatuurlijke gedrag van Model 4p bij hoge afvoeren en de sterke overschatting van de twee hoogste waarden van $Cl_{\max, \text{maand}}$ in de referentie periode (Figuur 7) wordt dit model niet verder beschouwd bij het bepalen van de

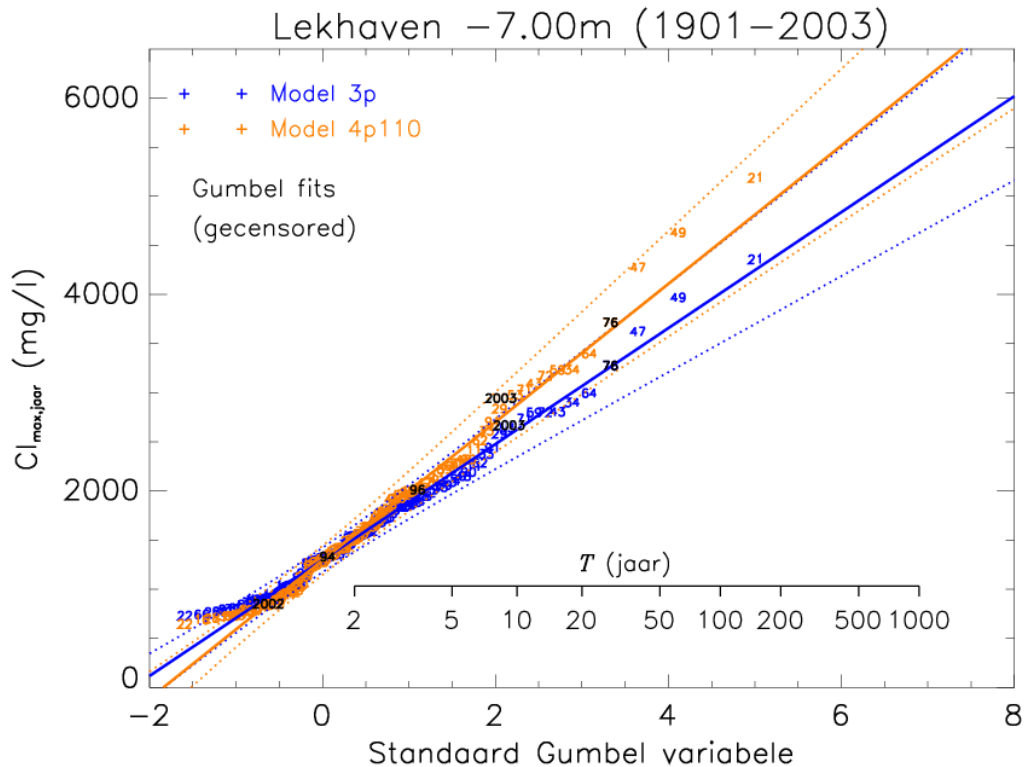
herhalingstijden van de historische verziltingsjaren. Ook op basis van de scatterplots van $Cl_{\max, \text{maand}}$ voor de jaren 1998 – 2003 bestaat er een voorkeur voor Model 4p110 boven Model 3p. In het laatste model worden de waarden van $Cl_{\max, \text{maand}}$ tussen 1000 en 2000 mg/l systematisch overschat en de waarden van $Cl_{\max, \text{maand}}$ boven de 3000 mg/l systematisch onderschat.

6. Herhalingstijden voor de verziltingsjaren

In het vorige hoofdstuk zijn twee regressiemodellen, Model 3p en Model 4p110, afgeleid die kunnen worden gebruikt om voor alle getijden boven de verziltingslijn in de periode 1901 – 2003 een Cl_{\max} te bepalen. Hieruit worden jaargemiddelde chlorideconcentraties, $Cl_{\max, \text{jaar}}$, bepaald waaraan een extreme waarden (kans)verdeling wordt gefit. De gefitte verdeling wordt gebruikt om voor alle historische jaren, en in het bijzonder voor de geselecteerde verziltingsjaren, de herhalingstijd behorend bij de mate van verzilting voor de locatie Lekhaven in die jaren te bepalen.

In Figuur 8 zijn de geordende waarden van $Cl_{\max, \text{jaar}}$ voor de historische jaren op basis van beide regressiemodellen samen met gefitte Gumbel verdelingen in een waarschijnlijkheidsplot weergegeven. In deze waarschijnlijkheidsplot wijken met name de lage waarden van $Cl_{\max, \text{jaar}}$ af van de rechte lijn behorende bij de Gumbel verdeling. Daarom zijn bij het fitten van de Gumbel verdelingen de 15 jaren met de laagste $Cl_{\max, \text{jaar}}$ gecensoreerd. Dit houdt in dat er wel rekening gehouden wordt met het feit dat in die jaren $Cl_{\max, \text{jaar}}$ lager was dan die in de andere jaren maar er wordt geen rekening gehouden met de grootte van $Cl_{\max, \text{jaar}}$ in die jaren. De geschatte parameters van de Gumbel verdeling worden gegeven in Appendix B. De onzekerheid in de (beide) Gumbel parameters is voor elk van de gefitte Gumbel verdelingen gebruikt om een 95 % betrouwbaarheidsinterval te bepalen (zie de gestippelde lijnen in Figuur 8). Merk op dat de onzekerheid in de herhalingstijden groot wordt bij grote herhalingstijden; voor de grootste herhalingstijden is de onzekerheid in de herhalingstijd zelfs van dezelfde orde als de herhalingstijd zelf.

Naast de Gumbel verdeling is ook naar de Gegeneraliseerde extreme waarden (GEV) verdeling gekeken. De GEV verdeling heeft ten opzichte van de Gumbel verdeling een extra parameter die de vorm van de verdeling beïnvloedt. Omdat zowel voor de concentraties uit Model 3p als die uit Model 4p110 de gefitte GEV verdeling vrijwel identiek is aan de Gumbel verdeling wordt voor het bepalen van de herhalingstijden van de verziltingsjaren van de gefitte Gumbel verdelingen uitgegaan.



Figuur 8. Geordende waarden van $Cl_{max,jaar}$ voor de historische jaren op basis van beide regressiemodellen en de gefitte Gumbel verdelingen. De gestippelde lijnen geven voor elk van de Gumbel verdelingen een 95 % betrouwbaarheidsinterval. De getallen corresponderen met de historische jaartallen minus 1900 (m.u.v. 2002 en 2003).

Tabel 6 geeft de herhalings tijden voor de verschillende verziltingsjaren op basis van Gumbel verdelingen gefit aan de jaargemiddelde concentraties, $Cl_{max, jaar}$, uit de regressiemodellen 3p en 4p110, inclusief een 95 % betrouwbaarheidsinterval gebaseerd op de onzekerheid in de Gumbel parameters.

Tabel 6. Gemiddelde herhalings tijd T (in jaren) tussen overschrijdingen van $Cl_{max,jaar}$ in het gegeven verziltingsjaar op basis van Gumbel verdelingen gefit aan de jaargemiddelde concentraties uit zowel Model 3p als Model 4p110. Het 95 % betrouwbaarheidsinterval is alleen gebaseerd op de onzekerheid in de Gumbel parameters.

Verziltingsjaar	Model 3p		Model 4p110	
	T	95 % interval	T	95 % interval
1976/1990	30.5	17.5 – 66.7	32.1	18.3 – 71.3
2003	10.9	7.32 – 19.0	11.1	7.42 – 19.5
1996	3.27	2.65 – 4.36	3.33	2.69 – 4.46
1994	1.64	1.45 – 1.87	1.64	1.46 – 1.89
2002	1.20	1.11 – 1.30	1.19	1.10 – 1.29
1976	29.4	17.0 – 63.9	32.1	18.3 – 71.3

Hoewel voor Model 4p110 de waarden van $Cl_{\max, \text{jaar}}$ hoger zijn, vooral voor de meer extreme jaren, leidt dit model tot vrijwel dezelfde herhalingstijden voor de geselecteerde verziltingsjaren als Model 3p. Voor het meest extreme jaar in de reeks, 1921 (zie Figuur 8), geven de beide modellen wel een enigszins verschillende herhalingstijd; 182 jaar voor Model 3p en 256 jaar voor Model 4p110.

Het artificiële verziltingsjaar '1976/1990' dat is opgebouwd uit de afvoeren van 1976 en de opwaaiingen van 1990, leidt tot vrijwel dezelfde jaargemiddelde chlorideconcentratie als 1976 en kent dus ook vrijwel dezelfde herhalingstijd als 1976. Ondanks dat er in 1990 meer stormen voorkwamen dan in 1976 (en de opwaaiing dus ook vaker groot was) is bij nadere analyse gebleken dat deze stormen niet simultaan optraden met (relatief) lage afvoeren zodat het effect op de jaargemiddelde chlorideconcentratie vrijwel nihil is.

Tot slot wordt opgemerkt dat de gegeven Gumbel fits betrekking hebben op geschatte waarden van $Cl_{\max, \text{jaar}}$ op basis van een regressiemodel en niet op de werkelijke waarden van $Cl_{\max, \text{jaar}}$. De laatste hebben een iets grotere variantie vanwege de random ruisterm ε in vergelijking (3), wat de helling van de Gumbel plot beïnvloedt. De verdeling van de werkelijke waarden van $Cl_{\max, \text{jaar}}$ is echter niet bruikbaar omdat $Cl_{\max, \text{jaar}}$ voor de meeste geselecteerde verziltingsjaren niet bekend is.

7. Het effect van klimaatverandering op de verzilting en de herhalingstijden

7.1 Inleiding

Ten behoeve van de Droogtestudie Nederland is gekeken hoe het neerslagtekort in Nederland als gevolg van klimaatverandering door het versterkte broeikaseffect kan veranderen en wat voor gevolgen dit heeft voor de herhalingstijden van de karakteristieke schadejaren (Beersma *et al.*, 2004). In die studie werden zowel de standaard KNMI klimaatscenario's voor 2050 (Können, 2001) gebruikt als een voor de Droogtestudie Nederland ontwikkeld droog klimaatscenario (Beersma *et al.*, 2004). De veranderingen in de herhalingstijden van de schadejaren (op basis van het maximale neerslagtekort in Nederland) zijn echter alleen voor het +1 °C scenario in 2050 (Controlist) bepaald. In deze studie beperken we ons daarom ook tot dit klimaatscenario.

7.2 Het Controlist klimaatscenario

In dit hoofdstuk worden de veranderingen in de jaargemiddelde verzilting onder het +1 °C (Controlist) scenario in 2050 beschouwd. Hiervoor zijn drie zaken van belang. Ten eerste, de (systematische) verandering in de afvoer van de Rijn in 2050 (ten gevolge van veranderingen in de neerslag en de potentiële verdamping in het Rijnstroomgebied). Ten tweede, de invloed van de zeespiegelstijging (ZSS) in 2050. En, ten derde, de verandering in de opwaaiing ofwel de verandering in de wind in 2050.

Wegens gebrek aan een duidelijk signaal van het versterkte broeikas effect in de wind en stormen in klimaatmodellen wordt er voor alle KNMI klimaatscenario's voor de verandering in de windsnelheid een marge van $\pm 5\%$ gegeven (ongeveer de natuurlijke variatie van de gemiddelde windsnelheid in periodes van ~ 10 jaar), die gebruikt kan worden voor gevoeligheidsstudies. Vanwege de onduidelijkheid over de verandering in de wind, zowel de richting als de grootte, is er in deze studie van uit gegaan dat de opwaaiing niet verandert. Voor de overige relevante variabelen, temperatuur, neerslag, potentiële verdamping en zeespiegelniveau geeft Tabel 7 de veranderingen onder het $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Controlist) scenario in 2050 per jaar en per seizoen. Deze tabel laat zien dat de temperatuur- en zeespiegelstijging constant zijn over het jaar maar dat de veranderingen in neerslag en potentiële verdamping seizoensafhankelijk zijn. De veranderingen in deze beide variabelen per decade worden gegeven in Appendix B in Beersma *et al.* (2004).

Tabel 7. $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Controlist) klimaatscenario voor 2050.

	Temperatuur	Neerslag	Potentiële verdamping	Zeespiegelstijging (ZSS)
Jaar	$+1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+3\%$	$+3.9\%$	25 cm
Zomer (JJA)	$+1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+1.4\%$	$+3.3\%$	25 cm
Winter (DJF)	$+1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$+6\%$	$+5.6\%$	25 cm

De veranderingen in de afvoer van de Rijn onder het $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Controlist) scenario in 2050 zijn in het kader van de Droogtestudie Nederland berekend met het Rhineflow model (Beersma *et al.*, 2004; Hoofdstuk 9 en Appendix D). In de winter neemt de Rijnafvoer onder het $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Controlist) scenario maximaal met ongeveer 8% toe en in de zomer maximaal met ongeveer 8% af. De toename van de Rijnafvoer in de winter is een gevolg van de toename van de neerslag (waarvan bovendien minder in de vorm van sneeuw valt) en de afname van de afvoer in de zomer is een gevolg van minder smeltwater en een toename van de potentiële verdamping.

Het effect van de zeespiegelstijging op Cl_{\max} wordt aan de hand van berekeningen met een hydrodynamisch model bepaald. Een beschrijving van het hydrodynamische model en de resultaten van de berekeningen worden gegeven in de volgende paragraaf.

7.3 Het effect van klimaatverandering op de chlorideconcentraties

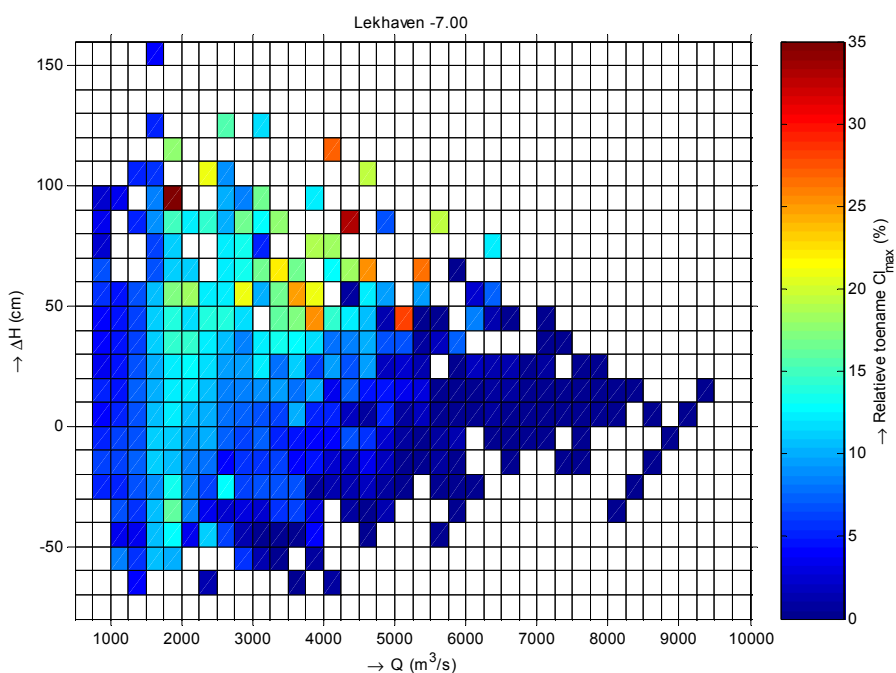
De gemiddelde getijmaximale chlorideconcentratie, Cl_{\max} , per klasse van afvoer en opwaaiing (Figuur 2) voor de huidige situatie is gebaseerd op metingen. Echter voor een toekomstige situatie met 25 cm zeespiegelstijging kan geen gebruik meer worden gemaakt van metingen. Om het effect van 25 cm zeespiegelstijging voor elke klasse van opwaaiing en afvoer op Cl_{\max} te bepalen is gebruik gemaakt van een hydrodynamisch model voor het Rijn-Maas mondingsgebied.

7.3.1 Berekeningen met het hydrodynamische model

De modelberekeningen zijn uitgevoerd met het ééndimensionale hydrodynamische model Sobek en de gebiedschematisatie Sobek-NDB1_1_0. Het Sobek-NDB model

omvat het getijbeïnvloede deel van de Rijn-Maas monding. De rivierranden van het model liggen bij de stuw bij Hagestein op de Lek, Tiel op de Waal en de stuw bij Lith op de Maas. Aan de zeezijde loopt het model tot iets buiten de Haringvlietsluizen en tot het punt waar de Nieuwe Waterweg in zee stroomt. De hier gebruikte versie 1_1_0 is een voor zoutindringing via de Nieuwe Waterweg door Kraaijeveld (2003) afgeregelde variant op de versie NDB1_0_0. De laatste wordt door Van der Linden en Van Zetten (2001) beschreven.

Als gevolg van het ontbreken van de modelberekeningen voor het jaar 1998 zijn deze gebaseerd op de 5-jarige periode 1999 – 2003 in plaats van op de 6-jarige periode 1998 – 2003 waarvoor de chloridemetingen beschikbaar zijn. Om het effect van mogelijke systematische modelfouten te reduceren zijn twee berekeningen gemaakt: een referentieberekening zonder zeespiegelstijging en een berekening waarin de waterstandsrandvoorwaarden op de zeeranden uniform met 25 cm zijn verhoogd. Per getij is voor Lekhaven het relatieve verschil bepaald in maximale chlorideconcentratie. Deze verschillen zijn per klasse van afvoer Q en opwaaiing ΔH gemiddeld² en weergegeven in Figuur 9. De Cl_{max} per klasse van afvoer en opwaaiing in de situatie met 25 cm zeespiegelstijging is vervolgens bepaald door per klasse de waargenomen Cl_{max} in de periode 1998 – 2003 te vermenigvuldigen met de gemodelleerde relatieve toename in Cl_{max} .



Figuur 9. Relatieve verandering van de per klasse gemiddelde maximale chlorideconcentratie als gevolg van 25 cm zeespiegelstijging.

² Een alternatief is eerst de chlorideconcentraties per klasse te middelen, zowel voor de referentieberekening als de berekening met verhoogde waterstanden op zee, en vervolgens per klasse de relatieve verandering van de gemiddelden te bepalen. Gemiddeld over alle getijden geeft dit alternatief een iets grotere (~0.2 %) toename in de chlorideconcentratie.

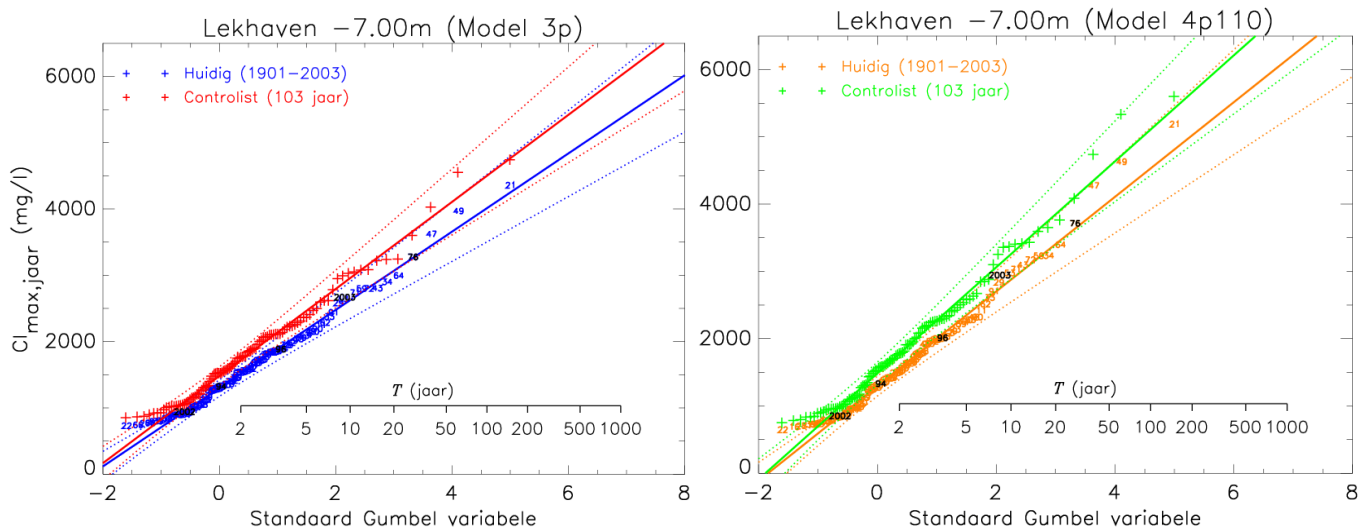
7.3.2 Regressiemodellen voor de situatie met 25 cm zeespiegelstijging

Zoals al eerder opgemerkt worden voor de bepaling van de herhalingsstijden onder het +1 °C (Controlist) scenario alleen de Modellen 3p en 4p110 gebruikt. Analoog aan hoofdstuk 5 worden daarom voor deze beide modellen nieuwe regressievergelijkingen afgeleid om het effect van een systematische zeespiegelstijging van 25 cm op $Cl_{\max, \text{jaar}}$ ook buiten de meetperiode (1998 – 2003) te kunnen bepalen. De regressiecoëfficiënten voor deze beide modellen voor de situatie met 25 cm zeespiegelstijging worden gegeven in Appendix A evenals de bijbehorende MAE's en de countourplots van Cl_{\max} . Net als bij de regressiemodellen voor de situatie zonder zeespiegelstijging leveren alle predictoren in de beide regressievergelijkingen een significante bijdrage. De MAE's voor deze regressievergelijkingen zijn ook vergelijkbaar met die voor de regressiemodellen zonder zeespiegelverhoging. Gemiddeld over alle getijden in de periode 1998 – 2003 neemt Cl_{\max} als gevolg van de zeespiegelstijging met ongeveer 8 % toe.

7.3.3 Herhalingsstijden van de verziltingsjaren onder het Controlist scenario

Alle ingrediënten zijn nu voorhanden om het (gecombineerde) effect van de veranderde Rijnafvoer en de zeespiegelstijging onder het +1 °C (Controlist) scenario op de verzilting te bepalen. Hiertoe worden eerst de jaargemiddelde concentraties, $Cl_{\max, \text{jaar}}$, voor alle 103 jaren in de periode 1901 – 2003 berekend zoals deze zouden zijn opgetreden onder aanname van het +1 °C (Controlist) scenario. Hiervoor worden de oorspronkelijke reeks opwaaiingen en een volgens het +1°C scenario getransformeerde reeks van Rijnafvoeren (1901 – 2003) gebruikt in combinatie met de regressievergelijkingen voor Cl_{\max} voor de situatie met 25 cm zeespiegelstijging. De transformatie van de historische reeks van Rijnafvoeren geschiedt op basis van de transformatiecoëfficiënten gegeven in Appendix D in Beersma *et al.* (2004). Onder het Controlist scenario neemt $Cl_{\max, \text{jaar}}$ gemiddeld over alle 103 jaren met 13.4 % toe bij gebruik van Model 3p en met 13.9 % bij gebruik van Model 4p110.

De herhalingsstijden voor de verziltingsjaren onder het +1 °C (Controlist) scenario zijn op dezelfde wijze afgeleid als die voor de huidige situatie zonder klimaatverandering (zie hoofdstuk 6). Aan de, op basis van Model 3p of 4p110 verkregen, 103-jarige reeksen van $Cl_{\max, \text{jaar}}$ zijn weer Gumbel verdelingen gefit waarbij steeds de 15 jaren met de laagste $Cl_{\max, \text{jaar}}$ werden gecensored (zie Figuur 10). De uit deze Gumbel verdelingen afgeleide herhalingsstijden voor het huidige niveau van verzilting in de verziltingsjaren zijn weergegeven in Tabel 8. Daarnaast zijn in Appendix C de herhalingsstijden en 95 % betrouwbaarheidsintervallen voor alle 103 historische jaren gegeven voor zowel de huidige situatie als onder het Controlist scenario op basis van de resultaten van Model 4p110.



Figuur 10. Geordende waarden van $Cl_{max,jaar}$ voor het huidige klimaat en onder het Controlist scenario op basis van Model 3p (links) en Model 4p110 (rechts). De doorgetrokken lijnen zijn de bijbehorende gefitte Gumbel verdelingen en de gestippelde lijnen geven voor elke Gumbel verdeling een 95 % betrouwbaarheidsinterval. De getallen corresponderen met de historische jaartallen minus 1900 (m.u.v 2002 en 2003).

Tabel 8. Gemiddelde herhalingsstijd T (in jaren) tussen overschrijdingen van $Cl_{max,jaar}$ in het gegeven verziltingsjaar onder het +1 °C (Controlist) scenario in 2050 op basis van Gumbel verdelingen gefit aan de jaargemiddelde concentraties uit zowel Model 3p als Model 4p110. Het 95 % betrouwbaarheidsinterval is alleen gebaseerd op de onzekerheid in de Gumbel parameters. De getallen tussen haakjes zijn de gemiddelde herhalingsstijden voor de huidige situatie (zie Tabel 6).

Verziltingsjaar	Model 3p		Model 4p110	
	T	95 % interval	T	95 % interval
1976/1990	16.6 (30.5)	10.5 – 31.7	17.6 (32.1)	11.0 – 34.3
2003	6.70 (10.9)	4.86 – 10.5	6.95 (11.1)	5.02 – 11.0
1996	2.42 (3.27)	2.05 – 3.02	2.51 (3.33)	2.11 – 3.16
1994	1.40 (1.64)	1.27 – 1.57	1.43 (1.64)	1.29 – 1.61
2002	1.12 (1.20)	1.06 – 1.20	1.12 (1.19)	1.06 – 1.20

Voor alle verziltingsjaren neemt de herhalingsstijd af (en de overschrijdingskans dus toe). Behalve voor het ‘extreem zoute jaar’ 1976/1990 liggen de schattingen voor de huidige situatie (de getallen tussen haakjes) net op of buiten het 95 % betrouwbaarheidsinterval van de schattingen onder het Controlist scenario. Uit Tabel 8 kan eenvoudig worden afgeleid dat onder het Controlist scenario de overschrijdingskans ($1/T$) voor een extreem zout jaar met ongeveer 80 % toeneemt, de overschrijdingskans voor een zout jaar met ongeveer 60 %, voor een gemiddeld zout jaar met ongeveer 35 %, voor een brak jaar met ongeveer 15 % en tenslotte de overschrijdingskans voor een matig brak jaar met ongeveer 6 % toeneemt.

7.3.4 Afzonderlijke effecten van veranderde Rijnafvoer en zeespiegelstijging op de verzilting

Naast het gecombineerde effect van de veranderde Rijnafvoer en de zeespiegelstijging onder het +1 °C (Controlist) scenario zijn ook de afzonderlijke effecten op de mate van verzilting beschouwd. Hiertoe werden eerst weer de jaargemiddelde concentraties, $Cl_{\max, \text{jaar}}$, voor alle jaren in de periode 1901 – 2003 berekend onder aanname van alleen de 25 cm zeespiegelstijging dan wel alleen de verandering in de Rijnafvoer behorende bij het +1 °C scenario. Indien alleen de Rijnafvoer systematisch verandert zijn hiervoor de oorspronkelijke historische reeks opwaaiingen en de volgens het +1 °C scenario getransformeerde historische reeks van Rijnafvoeren gebruikt in combinatie met de regressievergelijkingen voor Cl_{\max} uit hoofdstuk 5 voor de situatie *zonder* zeespiegelstijging. In het geval van alleen 25 cm zeespiegelstijging zijn hiervoor de oorspronkelijke historische reeksen van opwaaiingen en Rijnafvoeren in combinatie met de regressievergelijkingen voor Cl_{\max} voor de situatie met 25 cm zeespiegelstijging (uit Appendix A) gebruikt.

In de Tabellen 9 en 10 worden respectievelijk voor Model 3p en Model 4p110 bij vaste herhalings tijden de huidige $Cl_{\max, \text{jaar}}$ en de procentuele toename van $Cl_{\max, \text{jaar}}$ gegeven voor zowel de situatie waarin de Rijnafvoer (volgens het +1 °C scenario) verandert en tegelijkertijd de zeespiegel met 25 cm stijgt als de situatie waarin alleen de Rijnafvoer verandert en de situatie met alleen 25 cm zeespiegelstijging. De laatste regel in beide tabellen geeft het gemiddelde van $Cl_{\max, \text{jaar}}$ over alle 103 jaren en de relatieve veranderingen daarin.

De toename in het gemiddelde van $Cl_{\max, \text{jaar}}$ onder het +1 °C (Controlist) scenario bedraagt, zoals in de vorige paragraaf al opgemerkt, 13.4 % voor Model 3p en 13.9 % voor Model 4p110. De toename als gevolg van enkel de verandering van de Rijnafvoer is 5.0 % voor Model 3p en 5.8 % voor Model 4p110, en de toename als gevolg van enkel de zeespiegelstijging is respectievelijk 8.0 en 7.7 % voor de

*Tabel 9. Huidige $Cl_{\max, \text{jaar}}$ en procentuele toename van $Cl_{\max, \text{jaar}}$ bij vaste herhalings tijden T voor 3 situaties (ΔQ en ZSS; alleen ΔQ ; alleen ZSS) onder het +1 °C scenario op basis van Gumbel verdelingen gefit aan de jaargemiddelde concentraties uit **Model 3p**.*

T (jaren)	$Cl_{\max, \text{jaar}}$ (mg/l) Huidig	$\Delta Cl_{\max, \text{jaar}}$ (%)		
		ΔQ en ZSS	ΔQ	ZSS
2	1514	13.7	5.2	8.1
5	2183	12.9	4.7	7.9
10	2626	12.7	4.5	7.8
20	3050	12.5	4.4	7.8
50	3600	12.3	4.3	7.8
100	4013	12.2	4.2	7.7
Gemiddeld (1901 – 2003)	1657	13.4	5.0	8.0

verandering van de Rijnafvoer is dus bijna één procent groter voor Model 4p110. De grotere gevoeligheid voor veranderingen in de Rijnafvoer voor Model 4p110 is echter Modellen 3p en 4p110. De relatieve toename ten gevolge van de zeespiegelstijging is dus voor beide modellen ongeveer gelijk. En, de relatieve toename ten gevolge van de consistent met de in §5.4 genoemde grotere gradiënt in Cl_{max} bij lage afvoeren in Model 4p110. De gemiddelde toename in $Cl_{max,jaar}$ is voor beide modellen onder het +1 °C (Controlist) scenario iets groter (0.4 %) dan de som van de toenames als gevolg van enkel de Rijnafvoer verandering en de zeespiegelstijging. Een vergelijkbaar verschil is er ook voor de toenames bij vaste herhalingstijden. Tabellen 9 en 10 laten verder zien dat in alle gevallen de relatieve toename van $Cl_{max,jaar}$ iets kleiner wordt naarmate de herhalingstijd (en dus $Cl_{max,jaar}$) toeneemt (zie ook Appendix B).

We kunnen hieruit concluderen dat onder het +1 °C scenario de relatieve bijdragen van de verandering in de Rijnafvoer en de zeespiegelstijging aan de toename van de verzilting van de zelfde orde van grootte zijn en bij benadering opgeteld kunnen worden. We hebben hier echter alleen naar de jaargemiddelde chlorideconcentraties, $Cl_{max,jaar}$, gekeken. Voor het zomerhalfjaar zou het beeld wel eens anders kunnen zijn omdat: a) er in de zomer gemiddeld minder stormen zijn en het effect van de zeespiegelstijging relatief groot is bij hoge opwaaiing (zie Figuur 9 en verder Appendix A) waardoor de relatieve bijdrage van de zeespiegelstijging in de zomer kleiner wordt, en b) onder het +1 °C (Controlist) scenario de veranderingen in de Rijnafvoer in de zomer en de winter elkaar voor een belangrijk deel compenseren (waardoor de verandering van de jaargemiddelde afvoer slechts –1 % bedraagt). Het is echter niet zo dat de effecten van de toename van de afvoer in de winter en de afname in de zomer op de verzilting elkaar (volledig) compenseren. In het +1 °C (Controlist) scenario is het netto effect op de jaargemiddelde verzilting nog steeds 5 – 6 % (afhankelijk van welk regressiemodel gebruikt wordt). Voor de zomer is het effect van de verandering in de rivierafvoer op de chlorideconcentratie waarschijnlijk groter omdat er dan alleen nog maar sprake is van een afname in de afvoer.

Tabel 10. Huidige $Cl_{max,jaar}$ en procentuele toename van $Cl_{max,jaar}$ bij vaste herhalingstijden T voor 3 situaties (ΔQ en ZSS; alleen ΔQ ; alleen ZSS) onder het +1 °C scenario op basis van Gumbel verdelingen gefit aan de jaargemiddelde concentraties uit Model 4p110.

T (jaren)	$Cl_{max, jaar}$ (mg/l) Huidig	$\Delta Cl_{max, jaar}$ (%)		
		ΔQ en ZSS	ΔQ	ZSS
2	1552	14.3	6.0	7.8
5	2350	13.5	5.7	7.5
10	2878	13.2	5.5	7.4
20	3384	13.0	5.4	7.3
50	4040	12.9	5.4	7.2
100	4531	12.8	5.3	7.2
Gemiddeld (1901 – 2003)	1730	13.9	5.8	7.7

8. Conclusies en aanbevelingen

In deze studie zijn de herhalingstijden bepaald van historische verziltingsjaren op basis van historische metingen van de chlorideconcentratie, de rivierafvoer en de waterstand op zee. Ook is gekeken naar de veranderingen van deze herhalingstijden als gevolg van klimaatverandering rond 2050. Daarbij is uitgegaan van het +1 °C (Controlist) scenario.

Ondanks de korte 6-jarige reeks van chloridemetingen in Lekhaven bleek het mogelijk met behulp van regressiemodellen een 103-jarige ‘proxy’ reeks van de jaargemiddelde chlorideconcentraties, $Cl_{\max, \text{jaar}}$, voor de periode 1901 – 2003 te construeren. Twee realistische regressiemodellen, aangeduid als Model 3p en Model 4p110, werden uitvoerig vergeleken. Voor elk van de vijf (binnen de Zoetwaterverkenning Midden-West Nederland) geselecteerde verziltingsjaren werd de herhalingstijd van $Cl_{\max, \text{jaar}}$ bepaald door een extreme waarden verdeling te fitten aan de proxy reeks. Ondanks de kleine verschillen tussen de herhalingstijden van de vijf verziltingsjaren op basis van de beide regressiemodellen bestaat er een lichte voorkeur voor Model 4p110 omdat dit model in verschillende opzichten ‘iets dichter bij de chloridemetingen’ in de periode 1998 – 2003 ligt.

Het effect van klimaatverandering op de verzilting kon worden bepaald door de regressiecoëfficiënten van de Modellen 3p en 4p110 aan te passen op basis van berekeningen met een hydrodynamisch model dat het effect van de zeespiegelstijging op de chlorideconcentratie in rekening brengt en door gebruik te maken van een getransformeerde historische afvoerreeks van de Rijn gebaseerd op veranderingen in de Rijnafvoer onder het +1 °C (Controlist) scenario. Met inachtneming van de voorkeur voor Model 4p110 komt een ‘extreem zout jaar’ onder het +1 °C (Controlist) scenario bijna twee maal zo vaak voor als nu, een ‘zout jaar’ ongeveer 1.6 maal zo vaak en een ‘gemiddeld zout jaar’ 1.3 maal zo vaak. Een ‘brak jaar’ en een ‘matig brak jaar’ komen respectievelijk 15 % en 6 % vaker voor.

De relatieve bijdragen van de verandering van de Rijnafvoer en de zeespiegelstijging aan de totale verzilting zijn van dezelfde orde van grootte en kunnen bij benadering opgeteld worden. Onder het +1 °C (Controlist) scenario bedraagt voor Model 4p110 de toename van de verzilting (in termen van $Cl_{\max, \text{jaar}}$) gemiddeld 13.9 % en is de bijdrage van de veranderde Rijnafvoer 5.8 % en de bijdrage als gevolg van de zeespiegelstijging 7.7 %.

Alle berekeningen zijn gebaseerd op metingen van de chlorideconcentraties van het zoutmeetstation Lekhaven op een diepte van 7.00 m onder NAP. Dit betekent dat de gepresenteerde (jaar)gemiddelde chlorideconcentraties in principe representatief zijn voor Lekhaven en (directe) omgeving. Het moge duidelijk zijn dat de gemiddelde concentraties hoger zijn in (het veel zoutere) Hoek van Holland en lager in (het veel zoetere) Kinderdijk. De verwachting is echter dat de herhalingstijden (veel) minder sterk van de locatie afhangen dan de gemiddelde concentraties, omdat de meteorologische omstandigheden en rivierafvoeren steeds vergelijkbaar zijn.

Interessant, maar niet onderzocht, is in hoeverre de resultaten voor het aan de Nieuwe Maas gelegen Lekhaven verschillen met die voor een andere (vergelijkbaar zoute)

locatie langs de Oude Maas (bijvoorbeeld Spijkenissebrug). Evenmin is onderzocht in hoeverre de hier gepresenteerde verziltingsstatistiek afwijkt indien in plaats van de verzilting per jaar bijvoorbeeld de verzilting per zomerhalfjaar beschouwd zou worden.

Tenslotte is er bij toepassing van het +1 °C (Controlist) klimaatscenario verondersteld dat er geen systematische verandering in de opwaaiing (de wind) plaats vindt. Het is echter wel degelijk mogelijk om, op een vergelijkbare wijze als bij de Rijnafvoer, met een getransformeerde reeks van opwaaiingen de verandering in de opwaaiing in rekening te brengen. Hiervoor zou bijvoorbeeld de in de KNMI klimaatscenario's gespecificeerde range van $\pm 5\%$ in de windsnelheid gebruikt kunnen worden.

Literatuur

Beersma, J.J. en T.A. Buishand, 2002. Droog, droger droogst; bijdrage van het KNMI aan de eerste fase van de Droogtestudie Nederland. KNMI-publicatie; 199-I, KNMI, De Bilt.

Beersma, J.J., T.A. Buishand en H. Buiteveld, 2004. Droog, droger droogst; KNMI/RIZA bijdrage aan de tweede fase van de Droogtestudie Nederland. KNMI-publicatie; 199-II, KNMI, De Bilt.

Kilsby, C.G., P.S.P. Cowpertwait, P.E. O'Connell and P.D. Jones, 1998. Predicting rainfall statistics in England and Wales using atmospheric circulation variables. *Int. J. Climatol.*, **18**, 523 – 539.

Können, G.P., 2001. Climate scenarios IRMA and perspectives. In: M.B.A van Asselt, H. Middelkoop, S.A. van 't Klooster, W.P.A. van Deursen, M. Haasnoot, J.C.J. Kwadijk, H. Buiteveld, G.P. Können, J. Rotmans, N. van Gemert and P. Valkering, Development of flood management strategies for the Rhine and Meuse basins in the context of integrated river management, pp. 183-189. Report of the IRMA-SPONGE project 3/NL/1/164 / 99 15 183 01, NCR-publication 16-2001, WL|Delft Hydraulics, Delft.

Kraaijeveld, M., 2003. Een SOBEK-model van het Noordelijk Deltabekken: kalibratie en verificatie zoutbeweging Noordrand. RIZA werkdocument; 2003.047X. RIZA, Dordrecht.

Linden, M. van der, en J.W. van Zetten, 2001. Een SOBEK-model van het Noordelijk Deltabekken: bouw, kalibratie en verificatie. RIZA rapport; 2002.002. RIZA, Dordrecht.

Montfort, M.A.J. van, 1981. Comparison of Distributions. Technical Note 81-01, Department of Mathematics, Agricultural University, Wageningen.

Appendix A Details van de regressiemodellen voor Cl_{max} bij een 25 cm hogere zeespiegelstand

De Tabellen A1 en A2 geven de regressiecoëfficiënten en de gemiddelde absolute fouten (MAE's) van de regressiemodellen 3p en 4p110 voor Cl_{max} in de situatie met 25 cm zeespiegelstijging. Evenals voor het huidige klimaat zijn de regressiemodellen gefit op het gemiddelde van $\ln Cl_{max}$ voor de verschillende klassen van afvoer en opwaaiing. Dit gemiddelde is verkregen door bij het gemiddelde van $\ln Cl_{max}$ voor het huidige klimaat de logaritme van de gemiddelde verhouding van Cl_{max} in de modelberekeningen met en zonder zeespiegelstijging voor de bewuste klasse op te tellen. De aangepaste regressiecoëfficiënten en de bijbehorende MAE's kunnen worden vergeleken met respectievelijk Tabel 4 (pag. 17) en Tabel 5 (pag. 20).

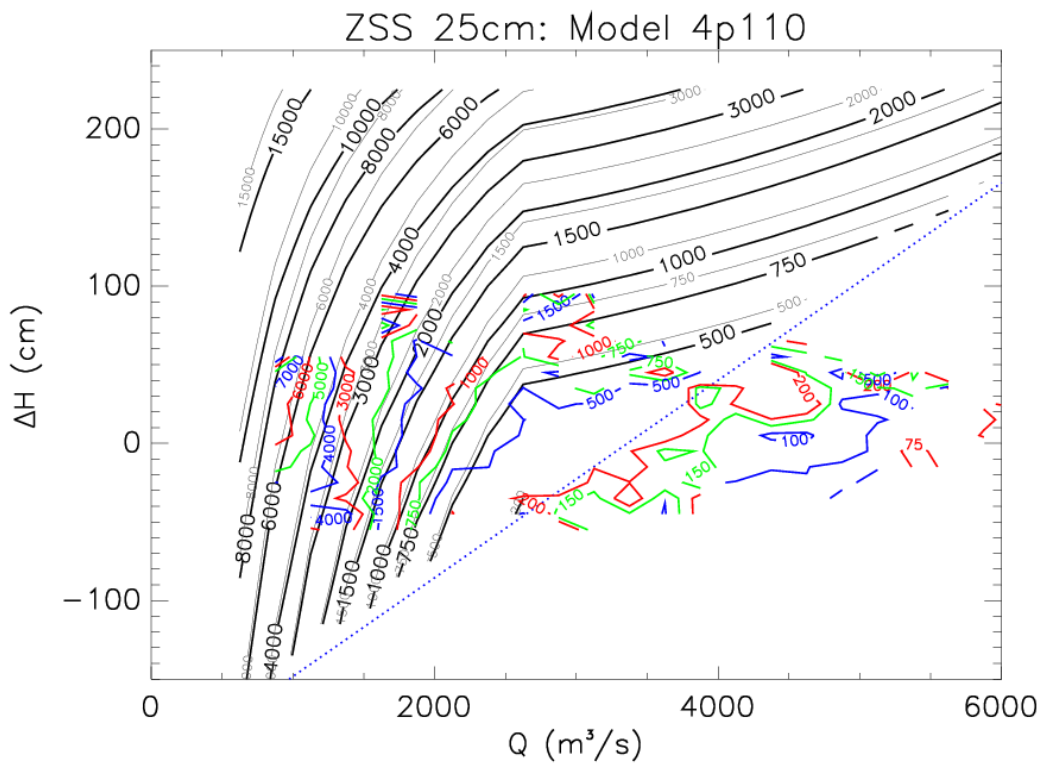
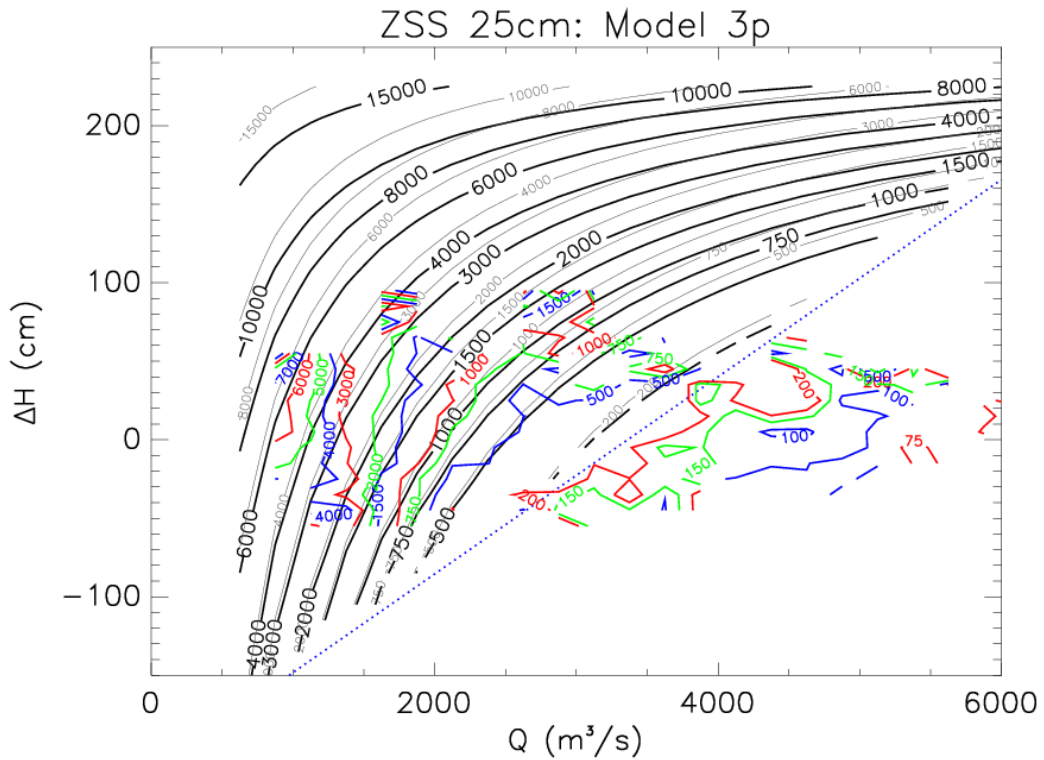
Tabel A1. Regressiecoëfficiënten voor de Modellen 3p en 4p110 voor de situatie met een 25 cm hogere zeespiegelstand, met tussen haakjes de bijbehorende standard errors.

Regressie-coëfficiënt	Model 3p		Model 4p110	
a^*	9.95		10.29	
a	9.76	(0.07)	10.15	(0.09)
b	$-1.49 \cdot 10^{-3}$	$(0.04 \cdot 10^{-3})$	$-1.64 \cdot 10^{-3}$	$(0.07 \cdot 10^{-3})$
c	$5.94 \cdot 10^{-6}$	$(0.42 \cdot 10^{-6})$	$4.85 \cdot 10^{-6}$	$(0.36 \cdot 10^{-6})$
d	—	—	$-0.40 \cdot 10^{-7}$	$(0.12 \cdot 10^{-7})$

Tabel A2. Gemiddelde absolute fout (MAE) als percentage van Cl_{max} voor de situatie met een 25 cm hogere zeespiegelstand voor verschillende typen klassen van Bovenrijnafvoer en opwaaiing.

Typen klassen	Cl_{max} (mg/l)	MAE (%)	
		Model 3p	Model 4p110
Alle klassen	1588.5	17.2	13.3
Klassen met meer dan 100 getijden	1167.2	8.3	8.4
Klassen met tussen de 6 en 10 getijden	1347.0	25.1	16.7
Klassen met maximaal 5 getijden	2387.6	27.8	27.8

Contourplots voor Cl_{max} bij 25 cm zeespiegelstijging worden voor de Modellen 3p en 4p110 gepresenteerd in Figuur A1. Merk op dat in beide modellen de contouren van Cl_{max} zonder zeespiegelstijging (licht grijs) en die met zeespiegelstijging (zwart) bij hoge opwaaiing verder uit elkaar gaan lopen wat er op duidt dat het effect van zeespiegelstijging op Cl_{max} volgens de regressiemodellen relatief groter is bij hoge opwaaiing (zie ook Figuur 9, pag. 25).



Figuur A1. Contourplots voor Cl_{max} (mg/l) voor de situatie met 25 cm zeespiegelstijging voor de Modellen 3p en 4p110. De dunne grijze contouren corresponderen met Cl_{max} voor de situatie zonder zeespiegelstijging. De gekleurde contouren corresponderen met de gemeten Cl_{max} per klasse van afvoer en opwaaiing vermeerderd met de gemodelleerde toename in Cl_{max} ten gevolge van 25 cm zeespiegelstijging.

Appendix B Gumbel parameters

De Gumbel verdeling wordt gedefinieerd door zijn cumulatieve kansverdeling als:

$$\Pr(X \leq x) = \exp[-e^{-(x-\mu)/\sigma}] \quad (\text{B1})$$

waarbij μ en σ twee parameters zijn die uit de data geschat moeten worden. In deze studie is dat gedaan met de methode van de grootste aannemelijkheid ('maximum likelihood'), waarbij de 15 kleinste waarnemingen gecensoreerd zijn. Hierbij is gebruik gemaakt van de programmatuur uit Van Montfort (1981). Bij gegeven μ en σ volgt de herhalingstijd T uit:

$$T = \frac{1}{\Pr(X > x)} = \frac{1}{1 - \exp[-e^{-(x-\mu)/\sigma}]} \quad (\text{B2})$$

In onderstaande tabel wordt naast μ en σ ook het quotiënt van deze twee parameters gegeven. Merk op dat in het toekomstige klimaat μ en σ beide toenemen, terwijl σ/μ slechts een kleine verandering vertoont. De kleine afname in σ/μ verklaart dat de relatieve toename van $Cl_{\max, \text{jaar}}$ in Tabel 9 en Tabel 10 niet hetzelfde is voor de verschillende herhalingstijden.

Tabel B1. Gumbel parameters voor de verdeling van $Cl_{\max, \text{jaar}}$ voor het huidige klimaat en voor 3 situaties (ΔQ en ZSS; alleen ΔQ ; alleen ZSS) onder het +1 °C scenario op basis van de Modellen 3p en 4p110.

Klimaat	Model 3p			Model 4p110		
	μ	σ	σ/μ	μ	σ	σ/μ
Huidig	1297.2	590.3	0.455	1294.3	703.7	0.544
ΔQ en ZSS (+1 °C)	1480.0	656.8	0.444	1484.7	788.0	0.531
ΔQ (+1 °C)	1368.6	611.2	0.447	1374.8	738.5	0.537
ZSS (+1 °C)	1402.8	634.8	0.452	1398.2	751.9	0.538

Appendix C Herhalingstijden voor alle historische jaren

Tabel C1 geeft voor zowel het huidige klimaat als onder het +1 °C (Controlist) scenario voor alle 103 historische jaren de herhalingstijden inclusief de 95 % betrouwbaarheidsintervallen. De herhalingstijden en hun betrouwbaarheidsintervallen zijn gebaseerd op een Gumbel verdeling die gefit is aan de jaargemiddelde concentraties, $Cl_{\max, \text{jaar}}$, uit Model 4p110. De 15 jaren met de laagste jaargemiddelde chlorideconcentraties die bij het fitten van de Gumbel verdelingen gecensoreerd zijn rood gekleurd. Voor deze jaren kan de gefitte Gumbel verdeling niet worden gebruikt om de herhalingstijd exact te schatten. De herhalingstijden voor deze jaren zijn groter echter dan 1 jaar en kleiner dan die voor het ‘minst zoute’ niet gecensoreerde jaar; respectievelijk 1.18 jaar en 1.12 jaar voor het huidige klimaat en het +1 °C (Controlist) scenario.

Tabel C1. Gemiddelde herhalingstijd T (in jaren) voor alle historische jaren in de periode 1901 – 2003 voor het huidige klimaat en onder het +1 °C (Controlist) klimaatscenario in 2050 op basis van Gumbel verdelingen gefit aan de jaargemiddelde chlorideconcentraties uit Model 4p110.

Jaar	Huidig (2005)		+1 °C (2050)	
	T	95 % interval	T	95 % interval
1901	1.62	1.44 – 1.86	1.41	1.28 – 1.58
1902	1.82	1.59 – 2.13	1.54	1.38 – 1.76
1903	1.91	1.66 – 2.26	1.60	1.43 – 1.84
1904	4.43	3.42 – 6.32	3.18	2.59 – 4.21
1905	1.47	1.33 – 1.66	1.32	1.20 – 1.46
1906	3.30	2.67 – 4.41	2.50	2.10 – 3.13
1907	4.29	3.34 – 6.09	3.10	2.53 – 4.08
1908	3.66	2.92 – 5.01	2.72	2.26 – 3.48
1909	3.77	2.99 – 5.19	2.78	2.31 – 3.57
1910	1.21	1.12 – 1.31	1.14	1.07 – 1.22
1911	5.50	4.11 – 8.25	3.82	3.02 – 5.27
1912	1.26	1.16 – 1.39	1.17	1.10 – 1.27
1913	1.51	1.35 – 1.71	1.34	1.22 – 1.49
1914	1 – 1.18	–	1 – 1.12	–
1915	1.66	1.47 – 1.92	1.44	1.30 – 1.62
1916	1 – 1.18	–	1 – 1.12	–
1917	1.26	1.16 – 1.38	1.17	1.09 – 1.27
1918	2.33	1.98 – 2.88	1.88	1.64 – 2.22
1919	2.22	1.90 – 2.72	1.81	1.59 – 2.12
1920	3.02	2.47 – 3.95	2.32	1.97 – 2.86
1921	256	107 – 891	112	52.8 – 323
1922	1 – 1.18	–	1 – 1.12	–
1923	1.53	1.37 – 1.75	1.36	1.23 – 1.51
1924	1.25	1.15 – 1.37	1.17	1.09 – 1.26
1925	1.90	1.66 – 2.25	1.60	1.42 – 1.83

Jaar	Huidig (2005)		+1 °C (2050)	
	<i>T</i>	95 % interval	<i>T</i>	95 % interval
1926	1.39	1.26 – 1.56	1.26	1.16 – 1.39
1927	1 – 1.18	–	1 – 1.12	–
1928	2.67	2.22 – 3.39	2.09	1.80 – 2.53
1929	9.57	6.57 – 16.3	6.13	4.51 – 9.43
1930	1.57	1.40 – 1.79	1.38	1.25 – 1.54
1931	1.18	1.10 – 1.28	1.12	1.06 – 1.20
1932	2.19	1.88 – 2.67	1.79	1.57 – 2.09
1933	7.08	5.09 – 11.3	4.74	3.63 – 6.87
1934	16.5	10.4 – 31.6	9.82	6.72 – 16.8
1935	1.76	1.55 – 2.06	1.51	1.35 – 1.71
1936	1 – 1.18	–	1 – 1.12	–
1937	2.16	1.86 – 2.63	1.77	1.56 – 2.07
1938	3.42	2.75 – 4.60	2.57	2.15 – 3.24
1939	1 – 1.18	–	1 – 1.12	–
1940	1 – 1.18	–	1 – 1.12	–
1941	1 – 1.18	–	1 – 1.12	–
1942	3.64	2.90 – 4.98	2.71	2.25 – 3.45
1943	13.6	8.83 – 25.1	8.32	5.84 – 13.7
1944	2.20	1.88 – 2.69	1.79	1.58 – 2.10
1945	1.96	1.71 – 2.34	1.64	1.46 – 1.89
1946	2.97	2.44 – 3.88	2.29	1.95 – 2.82
1947	70.3	35.6 – 185	35.3	19.9 – 79.9
1948	4.86	3.70 – 7.09	3.44	2.77 – 4.64
1949	116	54.6 – 342	55.3	29.0 – 138
1950	4.62	3.55 – 6.66	3.30	2.67 – 4.40
1951	1.71	1.51 – 1.99	1.48	1.33 – 1.67
1952	3.14	2.56 – 4.14	2.39	2.02 – 2.97
1953	11.5	7.69 – 20.5	7.21	5.17 – 11.5
1954	3.13	2.55 – 4.14	2.39	2.02 – 2.97
1955	2.60	2.17 – 3.28	2.05	1.77 – 2.47
1956	1 – 1.18	–	1 – 1.12	–
1957	1.96	1.71 – 2.34	1.64	1.46 – 1.89
1958	1.28	1.17 – 1.41	1.19	1.10 – 1.29
1959	16.4	10.3 – 31.4	9.77	6.69 – 16.7
1960	1.61	1.43 – 1.84	1.41	1.27 – 1.58
1961	1.57	1.40 – 1.79	1.38	1.25 – 1.54
1962	6.24	4.58 – 9.64	4.25	3.31 – 6.01
1963	4.64	3.56 – 6.70	3.31	2.67 – 4.42
1964	20.6	12.5 – 41.6	12.0	7.93 – 21.3
1965	1.31	1.20 – 1.45	1.20	1.12 – 1.31
1966	1 – 1.18	–	1 – 1.12	–
1967	1.21	1.12 – 1.32	1.14	1.07 – 1.23
1968	1 – 1.18	–	1 – 1.12	–
1969	1.93	1.68 – 2.29	1.62	1.44 – 1.86
1970	1.18	1.10 – 1.29	1.12	1.06 – 1.20

Jaar	Huidig (2005)		+1 °C (2050)	
	<i>T</i>	95 % interval	<i>T</i>	95 % interval
1971	12.5	8.22 – 22.6	7.72	5.48 – 12.5
1972	15.1	9.66 – 28.5	9.12	6.31 – 15.3
1973	3.87	3.06 – 5.37	2.85	2.35 – 3.68
1974	2.09	1.80 – 2.52	1.72	1.52 – 2.00
1975	1.57	1.40 – 1.79	1.38	1.25 – 1.54
1976	32.1	18.3 – 71.3	17.6	11.0 – 34.3
1977	1.74	1.53 – 2.03	1.49	1.34 – 1.69
1978	1.77	1.56 – 2.07	1.52	1.36 – 1.72
1979	1.78	1.56 – 2.08	1.52	1.36 – 1.73
1980	1.33	1.21 – 1.47	1.22	1.13 – 1.33
1981	1 – 1.18	–	1 – 1.12	–
1982	1 – 1.18	–	1 – 1.12	–
1983	3.23	2.62 – 4.29	2.45	2.07 – 3.06
1984	1.25	1.15 – 1.37	1.17	1.09 – 1.26
1985	2.56	2.15 – 3.23	2.03	1.75 – 2.43
1986	2.04	1.76 – 2.45	1.69	1.49 – 1.96
1987	1 – 1.18	–	1 – 1.12	–
1988	1.52	1.37 – 1.73	1.35	1.23 – 1.50
1989	4.30	3.34 – 6.10	3.10	2.53 – 4.09
1990	4.86	3.71 – 7.10	3.44	2.77 – 4.64
1991	8.01	5.65 – 13.1	5.26	3.97 – 7.82
1992	3.30	2.67 – 4.40	2.49	2.10 – 3.12
1993	2.51	2.11 – 3.16	2.00	1.73 – 2.39
1994	1.64	1.46 – 1.89	1.43	1.29 – 1.61
1995	1.68	1.49 – 1.95	1.45	1.31 – 1.64
1996	3.33	2.69 – 4.46	2.51	2.11 – 3.16
1997	2.99	2.46 – 3.91	2.30	1.96 – 2.84
1998	2.42	2.05 – 3.02	1.94	1.69 – 2.31
1999	1.40	1.27 – 1.57	1.27	1.17 – 1.40
2000	1 – 1.18	–	1 – 1.12	–
2001	1.24	1.14 – 1.36	1.16	1.08 – 1.25
2002	1.19	1.10 – 1.29	1.12	1.06 – 1.20
2003	11.1	7.42 – 19.5	6.95	5.02 – 11.0