

Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II

# Systemanalyses zoetwater regio IJsselmeer - Markermeer

## Colofon

Deze publicatie maakt deel uit van het **Kennisprogramma Zeespiegelstijging**, een initiatief van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en de deltacommissaris. Het programma levert kennis op over de gevolgen van zeespiegelstijging en hoe Nederland daarmee kan omgaan. Deze kennis wordt gebruikt bij de herijking van het Deltaprogramma in 2026.

Meer informatie over het kennisprogramma en een overzicht van alle publicaties staat op [kennisprogrammazeespiegelstijging.nl](https://kennisprogrammazeespiegelstijging.nl).

- Opsteller: *Arcadis / Hydrologic*
- Auteurs: *Ruben Boelens, Maarten Spijker, Sanne van der Heijden en Michiel van Reen*
- Geschreven in opdracht van *Rijkswaterstaat WVL* voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging
- Januari, 2023.

# Systemanalyses zoetwater regio IJsselmeer – Markermeer

19 januari 2023

**Kennisprogramma  
Zeespiegelstijging**



<b>Samenvatting .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Inleiding .....</b>	<b>3</b>
1.1 Aanleiding .....	3
1.2 Doel en kennisvragen .....	3
1.3 Modelleerstrategie .....	4
1.4 Leeswijzer .....	4
1.5 Definities en afkortingen .....	5
<b>2 Het systeem .....</b>	<b>7</b>
2.1 Inleiding .....	7
2.2 De huidige beheerstrategie .....	7
2.3 Overzicht van systeemvariabelen en essentiële systeemkarakteristieken .....	9
2.3.1 Rivieren .....	9
2.3.2 Regionale systeem .....	10
2.3.3 Atmosfeer: neerslag & verdamping .....	14
2.3.4 Grondwater (zoute kwel) .....	15
2.3.5 Schutcomplexen Afsluitdijk .....	16
2.3.6 Spuisluizen Afsluitdijk .....	17
2.3.7 Wind .....	19
<b>3 Methodiek .....</b>	<b>21</b>
3.1 Doel modelexercitie .....	21
3.2 Modelleerstrategie .....	21
3.3 Gebruikte modelinstrumentarium .....	23
3.3.1 IJsselmeergebied bakjesmodel .....	23
3.3.2 Water- en chloridebalans .....	24
3.4 De vrijheidsgraden van de hyperkubus .....	25
3.4.1 Vrijheidsgraden van de hyperkubus .....	25
<b>4 Kalibratie .....</b>	<b>31</b>
4.1 Kalibratieperiode .....	31
4.2 Kalibratiemethodiek .....	31
4.3 Kalibratieparameter .....	32
4.4 Kalibratieslag 1 .....	33
4.5 Kalibratieslag 2 .....	34
4.5.1 Meetcampagne 2018 .....	34
4.5.2 3D model .....	35
4.5.3 Resultaten kalibratieslag 2 .....	36
<b>5 Resultaten .....</b>	<b>42</b>
5.1 Overzicht hyperkubus .....	42
5.1.1 Welke output? .....	42
5.1.2 Resultaten hyperkubus - eerste blik .....	42
5.2 Karakteriseren van handelingsperspectief om de houdbaarheid van de KZH te vergroten .....	48
5.2.1 Verhaallijn: toenemende zoutvracht door ZSS en invloed extra spuien	48

5.2.2 Verhaallijn: verhogen effectiviteit verziltingsbestrijding bij Afsluitdijk als mitigatie voor toenemende zoutvracht door ZSS .....	50
<b>5.3 Algemene synthese hyperkubus .....</b>	<b>51</b>
5.3.1 Synthese waterkwantiteit .....	52
5.3.2 Synthese chlorideconcentratie Andijk .....	54
<b>6 Conclusies en beantwoording kennisvragen .....</b>	<b>57</b>
<b>6.1 Conclusies .....</b>	<b>57</b>
<b>6.2 Beantwoording kennisvragen .....</b>	<b>58</b>
6.2.1 A. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) waterstand, waterbeschikbaarheid en chlorideconcentratie in het IJsselmeergebied ..	58
6.2.2 B. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) watervraag en afvoerbehoefte van de omliggende gebieden .....	60
6.2.3 C. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) debiet en zoutvracht door de kustwerken .....	60
6.2.4 D. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) zoute kwel naar het hoofdwatersysteem .....	61
6.2.5 E. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) randvoorwaarden in het rivierengebied (landelijke waterverdeling, aanvoer IJssel) en de waterstand/het getij op de Waddenzee .....	61
<b>7 Discussie .....</b>	<b>64</b>
<b>7.1 Modelmethodiek en het 1D-bakjesmodel .....</b>	<b>64</b>
<b>7.2 Vervolgstappen en gebruik van eindproducten .....</b>	<b>65</b>
<b>8 Referenties .....</b>	<b>67</b>
<b>Appendix A .....</b>	<b>68</b>



# Samenvatting



# Samenvatting

Het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS) ontwikkelt kennis om Nederland voor te bereiden op zeespiegelstijging tot 5 m. Deze studie is onderdeel van 'Spoor 2 – Zoetwater' waarin de houdbaarheid en oprekbaarheid van vier strategische zoetwaterbuffers wordt onderzocht door middel van een modelstudie gericht op de verziltingsproblematiek. Deze rapportage bevat de studie van één van deze zoetwaterbuffers, het IJsselmeergebied.

Doordat extreme zeespiegelstijging zich zal afspelen over een termijn van honderden jaren kan de impact van zeespiegelstijging op de instandhouding van de zoetwaterbuffer niet los van andere autonome ontwikkelingen worden beschouwd. In de eerste fase van deze studie zijn de vrijheidsgraden bepaald die als gevolg van ZSS en autonome ontwikkelingen het meeste impact hebben op het waterpeil en chlorideconcentratie in het IJsselmeergebied. Dit zijn: chloridevracht over de afsluitdijk, waterflux over de afsluitdijk, rivierafvoer, watervraag vanuit het regionale systeem, zoute kwel, en het neerslagoverschot.

Voor deze studie is een 1D-bakjesmodel opgebouwd dat de waterbalans en de chloridebalans voor het IJsselmeergebied semi-stationair berekent. Met semi-stationaire berekening kan onderzocht worden hoe de zoetwaterbuffer van het IJsselmeer zich gedurende een zomer ontwikkelt, en welke vrijheidsgraden het meest bepalend zijn voor de houdbaarheid van de huidige beheerstrategie. Voor deze studie zijn in totaal 4410 scenario's doorgerekend. Bij alle scenario's is de aanname gedaan dat de dijken en kades aan de randen van het IJsselmeergebied meegroeien met de zeespiegelstijging.

Op basis van de modelberekeningen kan geconcludeerd worden dat de zoutinrusie over de Afsluitdijk met afstand het meest bepalend is voor de chlorideconcentraties in het IJsselmeer. De chloridelast vanaf de Afsluitdijk is sterk afhankelijk van zeespiegelstijging. Bij 1 meter ZSS kan ongeveer een verdubbeling van de chloridevracht worden verwacht, terwijl ook in de huidige situatie al verzilting optreedt waardoor de drinkwaternorm van 150 mg Cl/l bij Andijk niet altijd haalbaar is. De resultaten laten daarnaast ook zien hoe de verzilting toeneemt als droge periodes langer aanhouden. Voor gebruiksdoelen met een chloridenorm van 450 mg/l (bepaalde landbouwgewassen en peilbeheer) kan de zoetwaterbuffer in grote delen van het IJsselmeergebied zelf bij 3 meter ZSS nog gehandhaafd blijven, ervan uitgaande dat er infrastructuur gerealiseerd wordt om water af te kunnen blijven voeren naar de Waddenzee.

Omdat de Afsluitdijk de belangrijkste bron van zout is, zijn er grote regionale verschillen in chloridedynamiek binnen het IJsselmeergebied. De zoutinrusie bij de Afsluitdijk (en dus ZSS) heeft relatief weinig impact op de chloridedynamiek in het Markermeer. Op het Markermeer is de chloridelast vanuit het regionale systeem (voornamelijk uit de Flevopolder) bepalend.

Er kunnen twee hoofdrichtingen worden onderscheiden voor het mitigeren van verzilting van het IJsselmeer als gevolg van zeespiegelstijging. De eerste is meer spuien. Dit biedt in de huidige situatie nog perspectief maar resulteert al snel in waterkwantiteitsknelpunten. De tweede hoofdrichting om verzilting te mitigeren is het minimaliseren van de netto chloridelast via de Afsluitdijk en het vergroten van de afvoer-efficiëntie (zout afvoeren op een manier dat het zo min mogelijk water kost). Voor het beperken van de chloridelast kan gedacht worden aan het minimaliseren van lekkages en het beperken van de impact van scheepvaart. Bij het vergroten van de afvoer-efficiëntie kan gedacht worden aan het selectief onttrekken uit de dieper erosiekuilen door middel van pompen.



# 1

## Inleiding



# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS) ontwikkelt kennis om Nederland voor te bereiden op zeespiegelstijging tot 5 m. Binnen spoor 2 van het KP ZSS worden systeemverkenningen uitgevoerd om de houdbaarheid en oprekbaarheid van de voorkeursstrategieën uit het Deltaprogramma te onderzoeken. Dit gebeurt voor de thema's 1) Zandige Kust, 2) Waterveiligheid en 3) Zoetwater (verziltingsproblematiek). Deze studie is onderdeel van 'Spoor 2 – Zoetwater'. Voor vier strategische zoetwaterbuffers- en zones verbonden aan de Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatersysteem is de houdbaarheid en oprekbaarheid onderzocht door middel van een modelstudie. Daarnaast is ook de waterverdeling van het bovenregionale systeem beschouwd:

1. Volkerak-Zoommeer (VZM)
2. Rijn-Maasmonding (RMM)
3. Amsterdam-Rijnkanaal en het Noordzeekanaal (ARK-NZK)
4. IJsselmeer/ Markermeer (IJM)
5. Het bovenregionaal waterverdelingssysteem (BRWVS)

Het voorliggende rapport beschrijft de modelstudie en de resultaten van het IJsselmeer/Markermeergebied (Spoor 2 -Zoetwater).

## 1.2 Doel en kennisvragen

Het doel van deze rapportage is het vergroten van inzicht in de mate van houdbaarheid van de voorkeursstrategie van het IJsselmeergebied onder extreme zeespiegelstijging (3 tot 5 meter) en in de wijze waarop die houdbaarheid eventueel is te vergroten. Dit is gedaan door middel van een modelstudie. Om de houdbaarheid te duiden wordt er gekeken naar de chlorideconcentratie en waterstand in het IJsselmeergebied. Primair wordt gekeken naar de verziltingsproblematiek gerelateerd aan de fysische grootte chlorideconcentratie. Secundair wordt er ook gekeken naar de waterstand aangezien dit, bijvoorbeeld via de spuiactiviteiten om het IJsselmeer zoet te houden, samenhangt met de chlorideconcentratie.

De volgende kennisvragen zijn de must-have kennisvragen vanuit de vraagspecificatie die aan de voorkant van het KP ZSS, Spoor 2 - Zoetwater, voor het IJsselmeergebied zijn opgesteld en (Deltares, 2021; Rijkswaterstaat, 2021). Onderstreept zijn de kennisvragen waar in deze modelstudie een (kwalitatief of kwantitatief) antwoord op wordt gegeven:

### **A. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) waterstand, waterbeschikbaarheid en chlorideconcentratie in het IJsselmeergebied:**

1. Hoe veranderen waterstanden op het IJsselmeer en het Markermeer als gevolg van zeespiegelstijging (meer-gemiddeld maar ook ter plekke van de innamepunten en kunstwerken)?
  - o Met het antwoord op de deze vraag zijn de volgende sub-vragen te beantwoorden:
    - Hoe lang is niet meestijgen van zomer en winterpeil met zeespiegelstijging houdbaar?
    - Is er een impact van zeespiegelstijging op de (zoetwater)buffercapaciteit in peil van het IJsselmeergebied en de frequentie waarmee die wordt ingezet?
    - Wat is rol/bijdrage zeespiegelstijging op waterbalans bij combinaties van zeespiegelstijging, IJsselafvoer, watervraag en verdamping?
2. Hoe verloopt de chlorideconcentratie in het IJsselmeer en het Markermeer als gevolg van zeespiegelstijging (bij huidig beheer) op locaties van de innamepunten en

andere relevante locaties? (NB: Norm voor chlorideconcentraties in is gekoppeld aan gebruiksfuncties als drinkwater, landbouw en natuur)

**B. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) watervraag en afvoerbehoefte van de omliggende gebieden:**

1. Hoe verandert de watervraag (doorspoelbehoefte) als gevolg van een toename van zoute kwel als gevolg van zeespiegelstijging?
2. Wat betekent ZSS voor de afvoer van zout uit de regio naar het IJsselmeergebied?
3. Hoeveel extra doorspoeldebiet zou nodig zijn om de toename van de zoutlast als gevolg van zeespiegelstijging te beperken?

**C. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) debiet en zoutvracht door de kustwerken:**

1. Hoe verandert de aan-en/of af voercapaciteit van de kunstwerken (zowel vrij verval als bemalen/pompen) als gevolg van zeespiegelstijging?
2. Hoe verandert de externe zoutlast door kunstwerken naar het IJsselmeer en Markermeer (spuien, schutten, vispassages, e.g. Afsluitdijk) als functie van zeespiegelstijging?
  - o Hoe verandert de capaciteit van zout-ontlastende maatregelen nabij Afsluitdijk (hevels, zoetspoelen, selectieve onttrekking, etc.)?
  - o Leidt pompen (nieuw geplaatste pompen) tot een andere dynamiek in de zoutlast?

**D. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) zoute kwel naar het hoofd watersysteem:**

1. Hoe verandert de zoute kwel (e.g. onder de Afsluitdijk door of via diepe putten)?
2. Leidt ZSS en zoute kwel tot een andere afvoer door de beheerders en wat is effect op hoofdwatersysteem?

**E. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) randvoorwaarden in het riviereengebied (landelijke waterverdeling, aanvoer IJssel) en de waterstand/het getij op de Waddenzee:**

1. Hoe verandert de zoetwatervaanvoer naar het IJsselmeergebied als gevolg van klimaatverandering?
2. Wat zijn de mogelijke veranderingen in de landelijke waterverdeling (afvoerverdeling over IJssel, Nederrijn-Lek en Waal)?

## 1.3 Modelleerstrategie

De houdbaarheid en oprekbaarheid van het IJsselmeergebied worden onderzocht door modelmatig de verschillende vrijheidsgraden te exploreren die bepalen hoe zowel waterstand als chlorideconcentratie reageren. De verschillende vrijheidsgraden beschrijven een multidimensionale parameterruimte of hyperkubus waarvan elke vrijheidsgraad één as vormt. De parameterruimte wordt geëxploreerd door vele verschillende combinaties van waarden langs de verschillende vrijheidsgraden door te rekenen.

## 1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bevat de systeemanalyse van het IJsselmeergebied waarin de beheerstrategie en alle systeemvariabelen worden toegelicht.

Hoofdstuk 3 bevat de methodiek waarin de gebruikte modelschematisatie wordt toegelicht en de modelinvoer die gekozen is op basis van de systeemanalyse.

Hoofdstuk 4 beschrijft de kalibratie van het 1D-bakjesmodel aan de hand van de meetcampagne van 2018 en modelresultaten van het 3D-model van het IJsselmeer.

Hoofdstuk 5 beschrijft de resultaten van model en de duiding van deze uitkomsten.

Hoofdstuk 0 bevat de conclusies en geeft antwoord op de kennisvragen

Hoofdstuk 7 bevat de discussie waarin kritisch wordt gekeken naar de modelstudie en nieuwe kennisleemtes en -vragen worden gedefinieerd.

## 1.5 Definities en afkortingen

Definitie/afkorting	Betekenis
<b>KP ZSS</b>	Kennisprogramma Zeespiegelstijging
<b>ZSS</b>	Zeespiegelstijging
<b>VZM</b>	Volkerak-Zoommeer
<b>RMM</b>	Rijn-Maasmonding
<b>ARK-NZK</b>	Amsterdam-Rijnkanaal en het Noordzeekanaal
<b>IJM</b>	IJsselmeer/ Markermeer
<b>BRWVS</b>	Het bovenregionaal waterverdelingssysteem
<b>Assen (van de hyperkubus)</b>	De systeemvariabelen die gekozen zijn om te variëren in de modelstudie. Zie ook primaire en secundaire vrijheidsgraden.
<b>Scenario</b>	Een bepaalde combinatie aan modelinvoer met de bijbehorende modeluitvoer
<b>Lateraal</b>	Debiet en/of onttrekking gelegen op de systeemrand.
<b>Surplus</b>	Zoet water debiet beschikbaar voor het leveren van tegendruk tegen de zouttong.
<b>Primaire vrijheidsgraad</b>	Randvoorwaarde en/of systeempaarparameter welke van groot belang is voor het gedrag en functioneren van het systeem. Deze variabele vormt doorgaans één van de <b>assen</b> van de hyperkubus.
<b>Secundaire vrijheidsgraad</b>	Randvoorwaarde en/of systeempaarparameter welke van minder groot belang is voor het gedrag en functioneren van het systeem. Deze variabele wordt vaak constant gekozen op een representatieve waarde.
<b>ZSF</b>	ZeeSluisFormulering, tool waarmee de zoutvracht door een schutkolk kan worden bepaald aan de hand van een aantal variabelen



# 2

## Het systeem

## 2 Het systeem

### 2.1 Inleiding

Het IJsselmeergebied ligt in west/centraal Nederland waar het onderdeel uitmaakt van de provincies Friesland, Overijssel, Flevoland, Utrecht en Noord-Holland. Het in deze studie beschouwde gebied bestaat uit het IJsselmeer, het Markermeer, enkele van de randmeren (Ketelmeer, Eemmeer, Gooimeer en Vossemeer), en het Zwarte Meer. Het IJsselmeergebied bevat de (strategische) zoetwaterbuffers op het Markermeer en het IJsselmeer. Het IJsselmeer en Markermeer zijn belangrijk voor de zoetwatervoorziening van een groot deel van West-, Noord- en Oost-Nederland. Naast de zoetwaterfunctie voor landbouw en natuur, heeft het IJsselmeer een drinkwaterfunctie voor de provincie Noord-Holland. Ook omvatten de twee meren belangrijke scheepvaartroutes.

Het Markermeer staat in verbinding met het NZK via de Oranjesluizen en via gemaal Zeeburg met de Amstelboezen en indirect het ARK. Via de Houtribsluis en de Krabbersgatsluis staat het Markermeer in verbinding met het IJsselmeer. De rivier de IJssel is de belangrijkste aanvoertroute richting de strategische zoetwaterbuffer IJsselmeer (die vervolgens aangevoerd IJsselwater kan doorvoeren naar het Markermeer). De IJssel mondt via het Ketelmeer uit in het IJsselmeer. Het IJsselmeer wordt door de Afsluitdijk gescheiden van de Waddenzee. De Stevinsluizen (Den Oever) en de Lorentzsluizen (Kornwerderzand) beheersen het waterpeil van het IJsselmeer door het wateroverschot naar de Waddenzee te spuien. Ook faciliteren deze sluiscomplexen via de aanwezige schutsluizen scheepvaart en vismigratie.

### 2.2 De huidige beheerstrategie

De beheerstrategie in het IJsselmeergebied in droge periodes is er hoofdzakelijk op gericht om de buffer op peil te houden en tevens de chlorideconcentratie te beheersen. Het waterpeil en chlorideconcentratie zijn bepalend voor de 'staat' van de zoetwaterbuffer en vormen daarom de 'doelvariabelen' die in deze studie zijn onderzocht.

#### **Waterpeil**

Sinds 14 juni 2018 geldt er een nieuw peilbesluit voor het IJsselmeergebied (RWS, 2018). Hierin is opgenomen dat voor de zomerperiode (april tot en met september) een flexibel peilbeheer geldt voor zowel het IJsselmeer als het Markermeer met een meerpeil tussen -0,10 m NAP en -0,30 m NAP. Dit betekent dat het peil vanaf het voorjaar tot het najaar geleidelijk mag uitzakken.

Het volgende peilverloop wordt beoogd voor het IJsselmeer en het Markermeer (Figuur 1):

- Een vroege voorjaarsopzet van het IJsselmeer in maart, waarbij de peilopzet start op 1 maart en de piek van -0,10 m NAP wordt bereikt op 16 maart.
- Een gemiddeld meerpeil van -0,20 m NAP vanaf half april tot en met half augustus.
- Het uitzakken van het meerpeil tot -0,30 m NAP vanaf half augustus tot begin september.
- Het Markermeer volgt het peilverloop van het IJsselmeer met uitzondering van de vroege voorjaarsopzet.

In het onderste plaatje van Figuur 1 zijn de gemeten meerpeilen in het IJsselmeer weergegeven. Omdat we in deze studie zoeken naar de 'hoekpunten van het systeem' (de staat van het systeem onder de meest extreme situaties die zich in de toekomst kunnen voordoen) is er besloten om qua waterstanden in het IJsselmeergebied uit te gaan van de operationele werkelijkheid. Daarom worden waterstanden tussen de -0.1 m NAP en -0.4 m NAP beschouwd in deze studie.

De IJssel, het Zwarte Water, en de Eem voeren het meeste water aan naar het IJsselmeer, waarbij in droge zomers het vooral de IJssel betreft (en de afvoer van het Zwarte Water en de Eem opdroogt). Via een groot aantal in- en uitlaten kan er in periodes van wateroverschot worden afgevoerd naar de meren en tijdens drogere periodes water worden onttrokken voor

berekening, peilhandhaving en doorspoeling in de omliggende gebieden (regionale systeem). Via de sluizencomplexen in de Afsluitdijk wordt overtollig water afgevoerd. Bij (dreigend) watertekort wordt de afvoer via de Afsluitdijk geminimaliseerd (met consequenties voor de chlorideconcentraties) en worden, indien noodzakelijk, de onttrekkingen vanuit het regionale systeem gekort conform de verdringingsreeks.

### **Chlorideconcentratie**

Wat betreft de na te streven waterkwaliteit binnen de zoetwaterbuffer, is de chlorideconcentratie rond het drinkwater innamepunt bij Andijk het meest kritisch. Het voorkomen van verzilting van Andijk is één van de doelen van het operationele waterbeheer. Dit doel kan uitgesplitst worden naar:

- Voorkomen dat te veel zout, onder andere via de schut- en spuisluizen in de Afsluitdijk, het systeem binnenkomt.
- Voorkomen van ongewenste zoutverspreiding in het IJsselmeersysteem, o.a. door het zoutoverschot af te voeren.

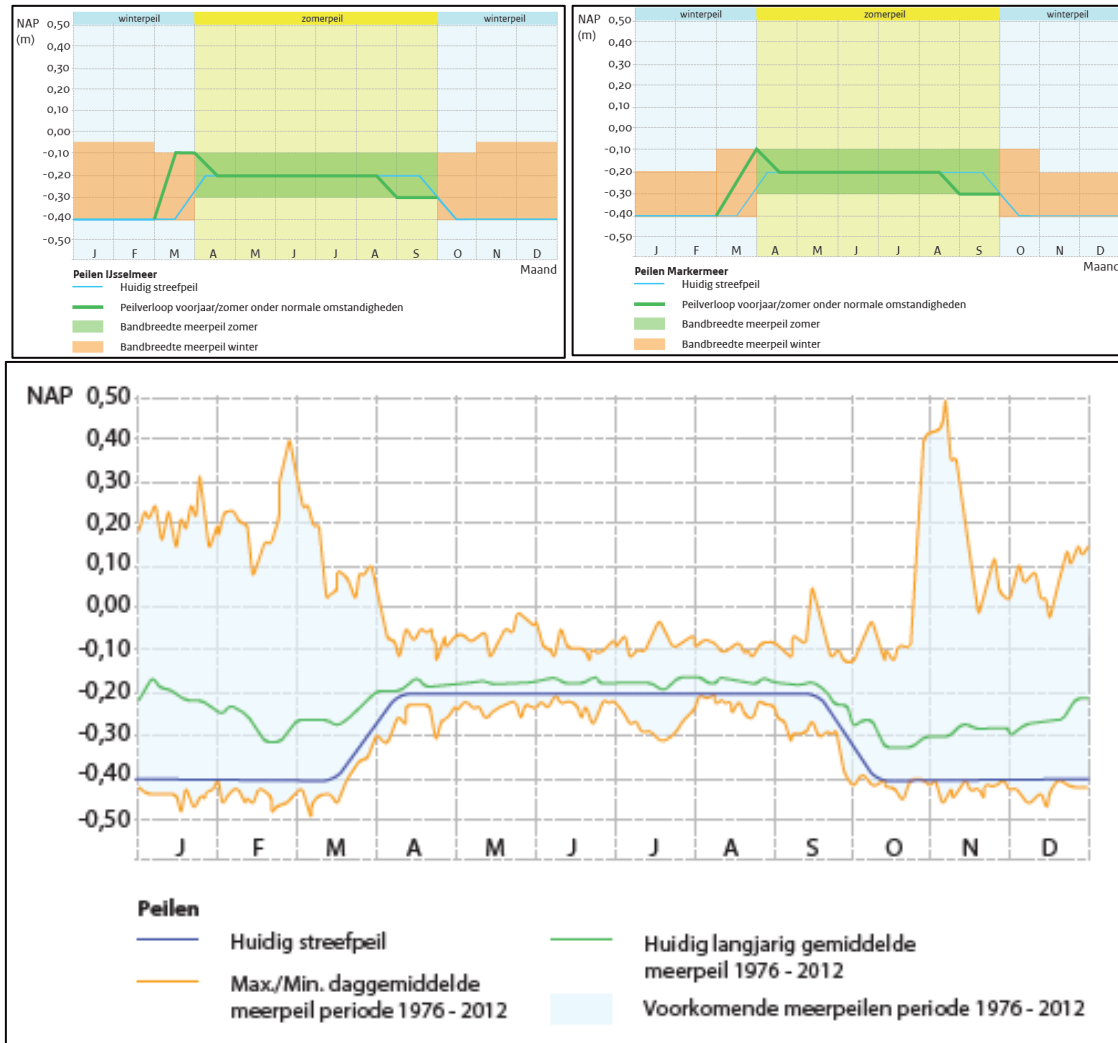
In het Drinkwaterbesluit is een jaargemiddelde norm voor de bedrijfstechnische parameter 'chloride' opgenomen voor de maximaal toelaatbare chlorideconcentratie van het geleverde drinkwater. In de Drinkwaterregeling is de norm voor de kwaliteit van het in te nemen oppervlaktewater t.b.v. drinkwaterproductie eveneens vastgelegd op 150 mg/l. Om te komen tot een operationele waarde is deze vertaald naar een chlorideconcentratie die op dag basis mag oplopen tot 200 mg/l met geen tot beperkte negatieve gezondheidseffecten tot gevolg, mits dit niet langer dan 30 dagen aanhoudt én aan de jaargemiddelde norm voor drinkwater wordt voldaan (Helpdesk Water, 2019). Om de hoge concentraties algen en zwevend stof te verlagen tijdens voorzuivering bij drinkwaterproductie Andijk wordt coagulatie en ionenwisseling gebruikt. Bij dit proces komt momenteel ca. 25 mg/l chloride in het te produceren drinkwater terecht. Bij een innameconcentratie van 125 mg/l of lager haalt drinkwaterbedrijf PWN de drinkwaternorm zoals vermeld in het drinkwaterbesluit.

Naast drinkwateronttrekking bij Andijk wordt er op verschillende locaties langs het IJsselmeer water onttrokken door de waterschappen voor peilhandhaving, doorspoeling, landbouwberekening en natuur. Deze inlaatlocaties hanteren eveneens waterkwaliteitsnormen voor inlaatwater, veelal minder streng dan voor drinkwater (>200 mg/l). Het Markermeer is minder gevoelig voor zoutinvasie vanuit de Waddenzee omdat het via de Markermeerdijk gescheiden is van het IJsselmeer. Wel kan ook op het Markermeer de zoutconcentratie boven de 150 mg/l uitkomen door de combinatie van de afvoer van zout (kwel)water vanuit de Flevopolder met weinig zoetwaterverdunding. Het water uit het Markermeer wordt momenteel niet gebruikt voor drinkwaterproductie vanwege onvoldoende waterkwaliteit: jaarrond te zout en een te hoge concentratie zwevend en organische stof. Er geldt echter wel een strategische reservering voor het Markermeer als drinkwaterfunctie, maar er zijn geen concrete plannen om daadwerkelijk drinkwater te winnen uit het Markermeer. Wel wordt Markermeer water bij Muiden ingelaten op de Vecht en vult deze tijdens droge periodes de Natura2000-Vechtplassen aan; deze gebruiksfunctie stelt relatief hoge eisen aan de waterkwaliteit (ter voorkoming van natuurschade).

### **Zeespiegelstijging en de huidige beheerstrategie**

Als gevolg van zeespiegelstijging zal de beheerstrategie onder druk komen te staan. Een hogere zeespiegel zorgt enerzijds voor een toename van de zoutlast via het schutbedrijf en lekkage, terwijl anderzijds de spuicapaciteit afneemt. De directe zoutlast via kwel neemt toe, net als de watervraag voor doorspoeling vanuit de regionale systemen. Deze zeespiegelstijging gaat gepaard met andere autonome ontwikkelingen zoals klimaatverandering, en economische en demografische groei. Veranderingen in afvoerdebieten en onttrekkingen zullen de zoetwaterbuffer verder onder druk zetten. In deze rapportage wordt de houdbaarheid van het IJsselmeergebied als strategische zoetwaterbuffer, onder druk van bovengenoemde autonome ontwikkelingen onderzocht.

Door het zwak-dynamische karakter van het IJsselmeer reageren het waterpeil en de chlorideconcentratie relatief langzaam op opgelegde *pressures*. In sommige gevallen kan een tijdelijke overschrijding van normen worden opgevangen mits het systeem zich aansluitend kan herstellen. Mede daarom is de tijdscomponent een belangrijke factor bij het evalueren van de doelvariabelen.



Figuur 1. Beoogde zomer en winter(meer)peilen in het IJsselmeer (linksboven) en het Markermeer (rechtsboven) en werkelijk optredende meerpeilen in het IJsselmeer (beneden) (RWS, 2018).

## 2.3 Overzicht van systeemvariabelen en essentiële systeemkarakteristieken

De (belangrijkste) systeemvariabelen binnen het IJsselmeergebied zijn: debieten en chloridevracht vanuit rivieren, debieten en chloridevracht van en naar het regionale systeem, binnenkomende debieten en chloridevracht via de schut- en spuiccomplexen van de Afsluitdijk, afgevoerde debieten en chloridevracht via de schut en spuiccomplexen van de Afsluitdijk, neerslag en verdamping, wind, en de chloridevracht via kwelfluxen. Onderstaand worden deze systeemvariabelen toegelicht, en wordt aan de hand van literatuur een indicatie van de relatieve impact op de water- en chloridebalans gegeven.

### 2.3.1 Rivieren

#### Debiet

De rivieren de IJssel, het Zwarte Water (Overijsselse Vecht) en de Eem monden uit in het IJsselmeergebied. Het debiet van de IJssel is (hoofdzakelijk) gecorreleerd aan de Rijnafvoer bij Lobith en de verdeling van dit binnenkomende water over het hoofdwatersysteem. Met name stuw Driel is een stuurknop die bepalend is voor het debiet van de IJssel. Bij debieten lager dan 1700 m<sup>3</sup>/s is stuw Driel volledig gesloten en stuwt deze -behoudens het minimaal benodigde debiet op de Nederrijn-Lek- zoveel mogelijk water via de IJssel naar het IJsselmeer.

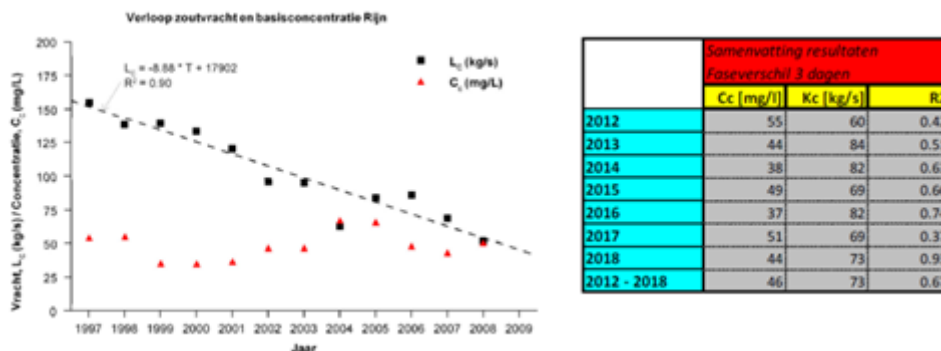
Het debiet van het Zwarte Water en de Eem zijn (hoofdzakelijk) gecorreleerd aan de neerslag en verdamping binnen het stroomgebied. Gedurende droge zomers is de IJssel met ruim 70% van de totale aanvoer verreweg de grootste wateraanvoer post. Het gemiddelde jaardebiet van de IJssel ligt rond de 400 m<sup>3</sup>/s (Vergoessen, 2019; Friocourt, 2020). Het minimale jaarlijkse afvoerdebiet in de periode 1976-2010 was gemiddeld 215 m<sup>3</sup>/s met een minimum van 130 m<sup>3</sup>/s (Bak, 2015). De minimale debieten bij Lobith vonden plaats in de jaren 2018 en 2022 en waren respectievelijk 730 m<sup>3</sup>/s (eind oktober) en 680 m<sup>3</sup>/s (medio augustus). Het jaargemiddelde debiet van het Zwarte Water is ongeveer 50 m<sup>3</sup>/s (Vergoessen, 2019; Friocourt, 2020). De jaarlijkse minimale afvoer is gemiddeld 2.5 m<sup>3</sup>/s, maar in de meeste jaren is de minimale afvoer 0 m<sup>3</sup>/s (Bak, 2015).

**Zoutvracht**

De jaargemiddelde zoutvracht van de IJssel en Zwarte Water is respectievelijk ongeveer 30 kg/s en 3 kg/s (Vergoessen, 2019; Friocourt, 2020). Omdat het debiet van de IJssel correleert met het debiet bij Lobith, en het debiet bij Lobith gerelateerd kan worden aan de chloridevracht bij Lobith, is het mogelijk om de chloridevracht van de IJssel te relateren aan het debiet van de IJssel. In het algemeen valt de actuele chloride concentratie C(t) bij Lobith te beschrijven als een combinatie van een basisconcentratie CC (in mg/L) en een basisvracht LC (in kg/s) als functie van dit debiet Q(t) (Bonte M. , 2009):

$$C(t) = CC + 1000*LC/Q(t)$$

Uitgaande van een LC = 73 kg/s, CC = 46 mg/L, en Q\_lobith = 6\*Q\_IJssel kan aan de hand van Q\_IJssel de chloridevracht berekend worden. Een IJsselaflow van 400 m<sup>3</sup>/s correspondeert dan met een chloridevracht van 30.5 kg/s. In literatuur staat ook een gemiddelde chloridevracht van ongeveer 30 kg/s gerapporteerd (Vergoessen, 2019; Friocourt, 2020)<sup>1</sup>.



Figuur 2. Langjarige analyse van de zoutvracht en basisconcentratie van de Rijn bij Lobith (Bron: Bonte (2009) en van der Kaaij, Huismans, & Mens, (2019); overgenomen uit Friocourt (2020)).

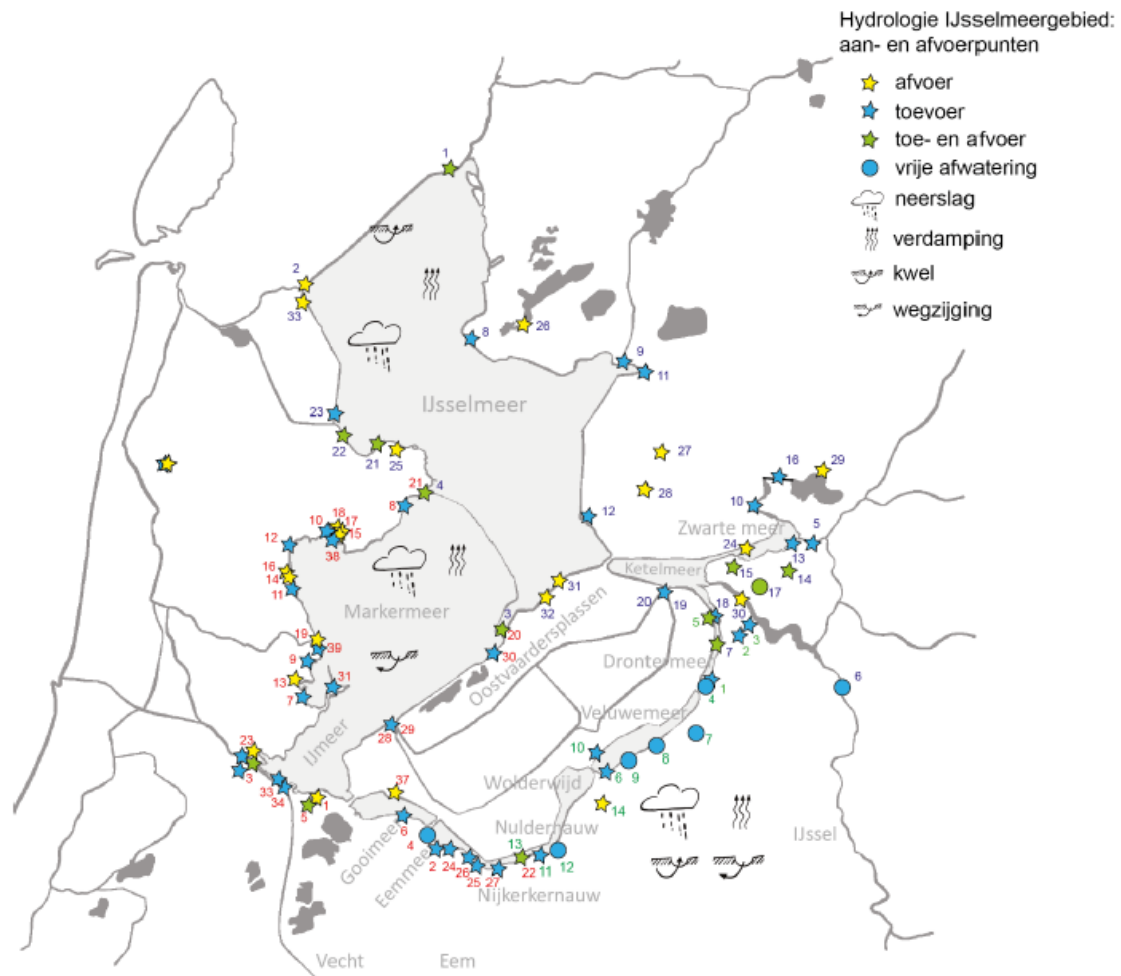
Voor het Zwarte Water wordt in literatuur een jaargemiddelde chloridevracht van ongeveer 3 kg/s gerapporteerd (Vergoessen, 2019; Friocourt, 2020). Deze chloridevracht neemt in de zomerperiode uiteraard af als het debiet 0 m<sup>3</sup>/s nadert.

**2.3.2 Regionale systeem**

Middels verschillende inlaten, uitlaten en gemalen vindt er uitwisseling van water plaats tussen het IJsselmeer en de omliggende regionale watersystemen. In Figuur 3 zijn deze locaties weergegeven.

<sup>1</sup> KWR heeft in 2021 een actualisatie van het regressiemodel voor chlorideconcentraties uitgevoerd (KWR, 2021). Omdat dit regressiemodel binnen deze studie gebruikt wordt om de juiste bandbreedte aan chloridevrachten vanuit de IJssel te krijgen geeft dit (simpelere) oorspronkelijke regressiemodel een voldoende goede inschatting van de chloridevracht.





*Figuur 3. Overgenomen uit van Riel et al. (2021): In- en uitstroompunten van de meren van het IJsselmeergebied. Sterren geven gereguleerde toe- en afvoer weer, cirkels staan symbool voor vrije afwatering. De locaties met blauwe numering zijn onderdeel van de waterbalans van het IJsselmeer, de rood genummerde locaties zijn onderdeel van de waterbalans van het Markermeer-IJmeer en de groen genummerde locaties zijn onderdeel van de waterbalans van de Randmeren.*

Hydrologic (2021) heeft op basis van langjarige berekeningen met het Landelijk Hydrologisch Model (LHM) de watervraag voor de verschillende waterschappen rond het IJsselmeergebied in kaart gebracht. Het LHM rekent het grond- en oppervlaktewatersysteem gekoppeld door en schematiseert het watergebruik in vijf categorieën:

- Peilhandhaving
- Beregening
- Doorspoeling
- Industrie
- Drinkwater

Voor elk van deze categorieën wordt per tijdstap de gebruiksvraag berekend (op basis van een waterbalansberekening) en in hoeverre aan deze watervraag kan worden voldaan, uit de netto neerslag of door middel van aanvoer van water uit het hoofdwatersysteem. In droge periodes is een groot deel van de watervraag van de omliggende waterschappen afkomstig uit het IJsselmeer, het Markermeer, of uit de randmeren. Op basis van een 100-jarige reeks aan resultaten van het LHM is de 99-percentiel decadegemiddelde watervraag gerapporteerd (HydroLogic, 2021). De 99-percentiel watervraag is weergegeven in Tabel 1.



Tabel 1. 99-percentiel zomergemiddelde watervraag ( $m^3/s$ ) van verschillende waterschappen in het IJsselmeergebied op basis van langjarige LHM berekeningen (HydroLogic, 2021). De methodiek achter de uitsplitsing naar verschillende watervragen wordt toegelicht in HydroLogic (2021).

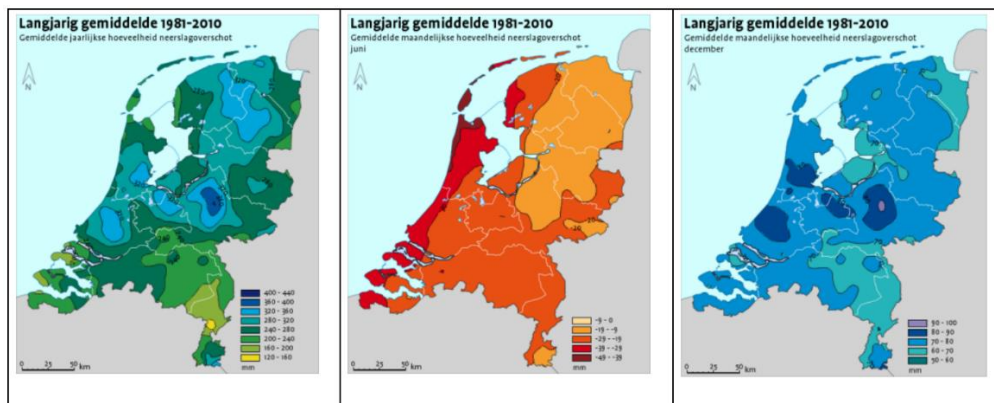
		Fryslân	HHNK	Hunze & Aa's	IJsselmeer	Noorderzijlves	Vallei en Veluwe	Vechtstromer	AGV	WDOD	Zuiderzeelanc	Totaal
1.1a	Peilhandhaving van het hoofdsysteem, voor zover dat nodig is voor het garanderen van de veiligheid en het voorkomen van onomkeerbare schade (buffer rijkswateren)				129.3							129.3
1.1b	Peilhandhaving van het hoofdsysteem, voor zover dat nodig is voor het garanderen van de veiligheid en het voorkomen van onomkeerbare schade (boezems regionale wateren)	10.0	2.0	1.0		2.6	-	0.1	0.2	0.3	-	16.2
1.2	Peilhandhaving van alle veengebieden, zowel landelijk als stedelijk gebied, ter voorkoming van klink en zetting van de bodem en schade aan bebouwing en infrastructuur als gevolg van aantasting van de fundering	4.0	6.1	4.7	-	0.6	1.0	1.3	0.8	4.7	0.1	23.4
1.3	Peilhandhaving van alle kwetsbare natte natuur	0.3	0.0	0.2	-	0.0	0.1	0.1	6.5	0.0	0.0	7.3
2.1	Onttrekking en eventuele doorspoeling ten behoeve van de drinkwatervoorziening	-	-	1.0	44.0	-	-	-	3.5	-	-	48.5
2.2	Doorspoeling voor koeling van elektriciteitscentrales	-	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	0.6
3.1	Gebruik van proceswater	-	0.3	1.7	-	-	-	0.1	-	-	-	2.1
3.2	Tijdelijke berekening kapitaalintensieve teelten	2.1	5.0	1.5	-	1.5	-	0.2	-	0.3	3.2	13.8
4.1	Peilhandhaving	10.4	11.8	11.4	-	4.3	0.9	0.8	1.6	8.2	2.6	52.0
4.2	Doorspoelen en onttrekken voor berekening niet-kapitaalintensieve akkerbouw	4.9	11.7	3.6	-	3.6	-	0.4	-	0.6	7.4	32.3
4.3	Onttrekken voor berekening gras/mais	4.2	1.8	0.7	-	0.3	0.0	0.1	0.0	0.9	1.9	9.9
4.4	Doorspoelen	-	-	-	40.0	-	-	-	-	-	-	40.0
4.5	Overige onttrekkingen	5.8	-	-	10.0	-	-	-	-	-	-	15.8
<b>Totaal</b>		<b>41.7</b>	<b>39.4</b>	<b>25.9</b>	<b>223.3</b>	<b>12.9</b>	<b>2.1</b>	<b>3.1</b>	<b>12.7</b>	<b>14.9</b>	<b>15.2</b>	<b>391.3</b>

### 2.3.3 Atmosfeer: neerslag & verdamping

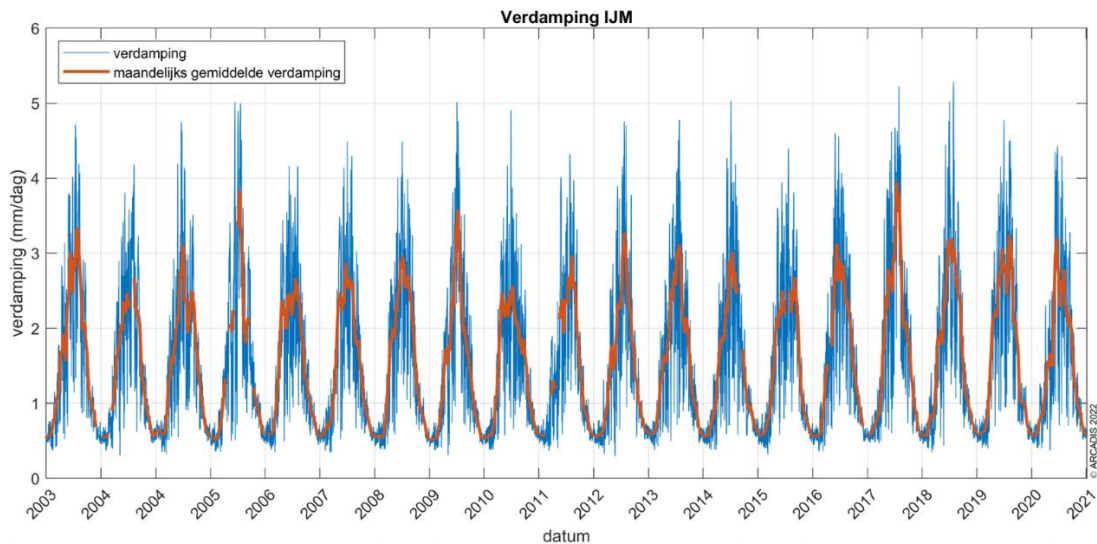
Het IJsselmeergebied heeft in verhouding met andere zoetwaterbuffers in Nederland een groot oppervlak open water ten opzichte van de gemiddelde diepte. Hierdoor vormen neerslag en verdamping van het open water zelf een relatief grote post op de waterbalans. Via neerslag en verdamping vindt geen chloridetransport plaats maar heeft dit wel impact op de chlorideconcentraties als gevolg van indamping of verdunning.

De verdamping op open water kan tijdens warme zomerdagen oplopen tot 7 mm/dag. Een dergelijke grote verdamping vindt echter zelden tot nooit plaats voor langere aaneengesloten periodes van weken of maanden. Het gemiddelde maandelijkse netto neerslagoverschot (neerslag min verdamping) is in de zomermaanden ongeveer -1.0 mm/dag (Figuur 5, Friocourt, 2020). Met oppervlaktes van het IJsselmeer, Markermeer en Gooi- en Eemmer van relatief 1100 km<sup>2</sup>, 700 km<sup>2</sup> en 40 km<sup>2</sup> resulteert dit in een gemiddelde (netto) verdampingsflux flux van ongeveer -21 m<sup>3</sup>/s gedurende een gemiddelde zomermaand.

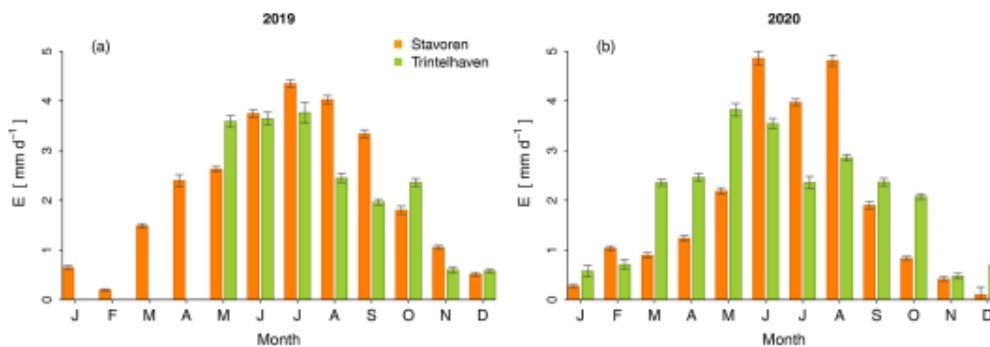
De open water verdamping van meetstation Lelystad (KNMI-meetgegevens) is geanalyseerd om inzicht te verkrijgen in de historische verdamping binnen het IJsselmeergebied (Figuur 6). Hieruit blijkt dat de maandgemiddelde verdamping in de droogste maand ongeveer rond 3 mm/dag betreft. Deze resultaten zijn in lijn met de metingen in Stavoren en Trintelhaven (Figuur 7).



Figuur 5. Kaarten van het langjarig gemiddelde neerslagoverschot (neerslag min verdamping) voor de periode 1981-2010. Links: het jaarlijkse overschot; midden: het gemiddelde overschot in juni; rechts: het gemiddelde overschot in december (bron: KNMI, overgenomen uit Friocourt (2020)).



Figuur 6. Verdamping voor open water berekend met KNMI-gegevens van meetstation Lelystad van 2003 tot 2021.

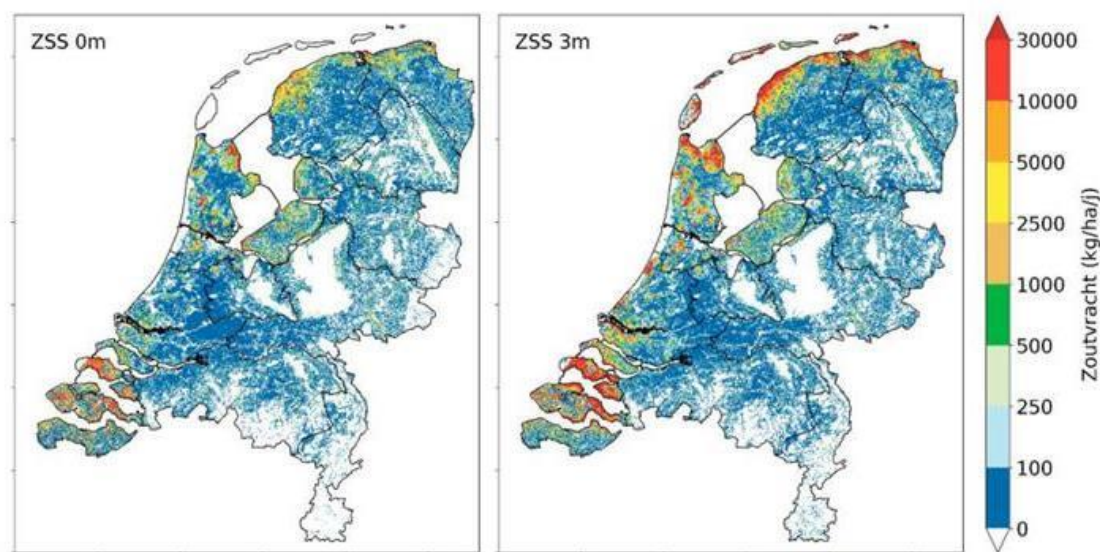


Figuur 7. Maandelijkse open water verdamping in Stavoren en Trintelhaven gebaseerd op half uur data voor de jaren 2019 en 2020 (Jansen et al., 2022).

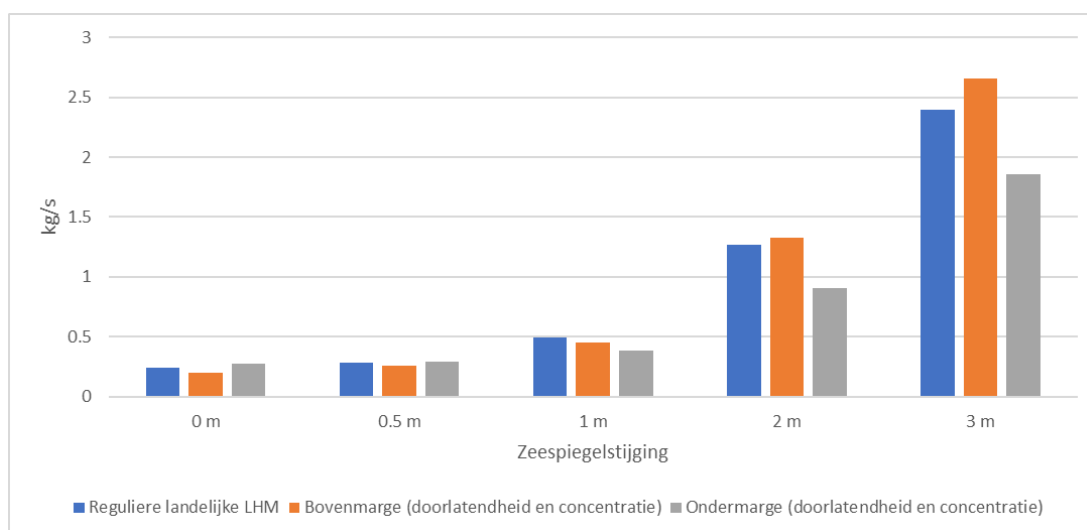
### 2.3.4 Grondwater (zoute kwel)

Zoute kwel komt via het grondwater direct in het systeem terecht. Bij de huidige zeespiegel is de gemiddelde chloridevracht op het IJsselmeer verwaarloosbaar klein: waarden van 0.035 kg/s (Vergroessen, 2019) en 0.47 kg/s (Infographic, RWS) zijn gerapporteerd in literatuur.

De zoutvracht die via kwelwater direct op de zoetwaterbuffers komt, is gecorreleerd aan zeespiegelstijging. Deltares heeft met het LHM Zoet-Zout berekeningen voor verschillende zeespiegelstijgingsscenario's (0, 0.5, 1, 2 en 3 m) uitgevoerd met chloridevrachten in heel Nederland als output (Deltares, 2022) (zie Figuur 8). Voorts is in deze studie een gevoeligheidsanalyse voor de IJsselmeerregio uitgevoerd waarbij de parameters doorlatendheid en randvoorwaardelijke chlorideconcentraties zijn gevarieerd. In en Figuur 9 zijn de resultaten van deze gevoeligheidsanalyse gepresenteerd. Hieruit blijkt dat de chloridelast via directe kwel een verwaarloosbaar aspect is op de zoutbalans van het IJsselmeergebied, nu en bij ZSS.



Figuur 8. Jaartotaal zoutvracht naar oppervlaktewater voor de huidige situatie (links) en zichtwaarde 3m ZSS (rechts), (Deltares, 2022).



Figuur 9. Som van totale zoutvracht via zoute kwel op het IJsselmeer bij verschillende zeespiegels, inclusief onder- en boven marge uit gevoeligheidsanalyse voor doorlatendheid en randvoorwaardelijke chlorideconcentraties.

### 2.3.5 Schutcomplexen Afsluitdijk

De Afsluitdijk is voorzien van 3 schutsluizen: twee in Kornwerderzand en één in Den Oever. De debieten en chloridevracht als gevolg van de schutsluizen zijn afhankelijk van verschillende factoren/parameters. Een lijst met de belangrijkste parameters die in deze rapportage zijn gebruikt voor het berekenen van de chloridevrachten (uitgaande van de huidige situatie qua infrastructuur) is opgenomen in Tabel 2. Een extra factor die invloed heeft op de chloridevracht via de schutsluizen is de werking/effectiviteit van het bellenscherm: mits de bellenschermen goed werken kunnen deze de chloridevracht met 60 à 80% reduceren (Deltares, 2019). Daarnaast geldt wanneer er operationeel wordt gekozen om visvriendelijk te schutten dit een extra jaargemiddelde chloridevracht op van 10 à 20 kg/s oplevert (Infographic RWS, 2021).

Tabel 2. Parameter schutsluizen Afsluitdijk op basis van Literatuur (Deltares, 2019; Friocourt, 2020)

Parameter	Den oever	Kornwederzand groot	Kornwederzand klein
Lengte sluis	148 m	148 m	74 m
Breedte sluis	14 m	14 m	9 m
Diepte kolkbodern	-4,7 m NAP	-4,7 m NAP	-4,7 m NAP
Diepte drempels	-4,4 m NAP	-4,4 m NAP	-4,4 m NAP
Schuttingen per dag (o.b.v. maand met grootste aantal schuttingen uit 2014, 2017 en 2018)	19	23	14
Deur open tijd	22 min	24 min	17 min
Zoutconcentratie IJsselmeer	1 kg/m <sup>3</sup>	1 kg/m <sup>3</sup>	1 kg/m <sup>3</sup>
Chlorideconcentratie Waddenzee	10 kg/m <sup>3</sup>	10 kg/m <sup>3</sup>	10 kg/m <sup>3</sup>
Schip volume (educated guess)	1000 m <sup>3</sup>	1000 m <sup>3</sup>	500 m <sup>3</sup>
Openingstijd deur	1 min	2 min	2 min
Nivelleertijd	4 min	4 min	4 min
Peil IJsselmeer	-0.2 m NAP	-0.2 m NAP	-0.2 m NAP

Friocourt (2020) heeft een actualisatie van de geschatte chloridevrachten van de schutsluizen Den Oever (17 à 21 kg/s), Kornwederzand groot (18 à 31 kg/s) en Kornwederzand klein (8 à 11 kg/s) gerapporteerd. Gebruik van de zeesluisformulering<sup>2</sup> resulteert met de input uit Tabel 2 en een situatie zonder zeespiegelstijging in een gemiddelde zoutvracht van respectievelijk 32 kg/s, 41 kg/s en 6kg/s.

De lekdebieten die in de huidige situatie gemoeid gaan met het schutbedrijf zijn 4.3 à 6.3 m<sup>3</sup>/s (Friocourt, 2020).

### 2.3.6 Spuisluizen Afsluitdijk

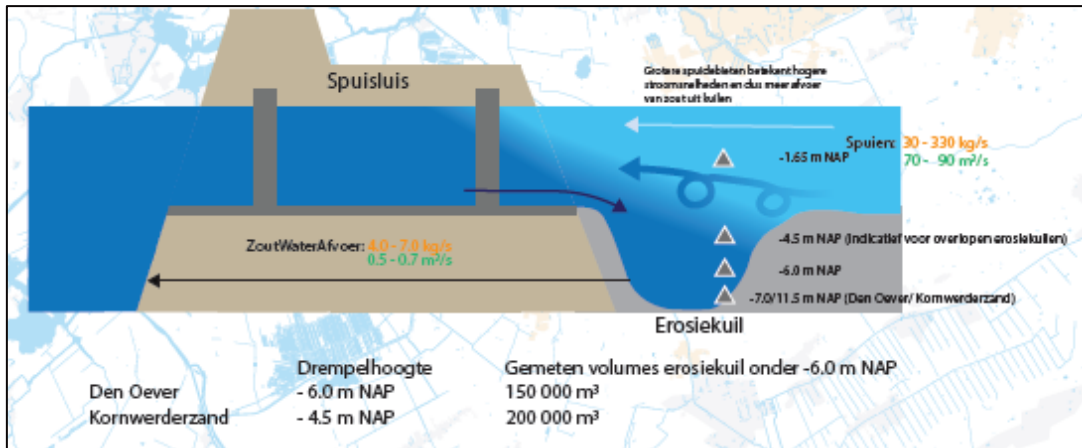
Een groot deel van het jaar voeren de spuisluizen in de Afsluitdijk water af van het IJsselmeer naar de Waddenzee voor peilhandhaving t.b.v. veiligheid. Daarmee wordt *en passant* ook zoutverspreiding vanaf de Afsluitdijk naar de rest van het IJsselmeer tegengegaan (met het spuien mee wordt zout afgevoerd). In de zomerperiode is de spuistrategie erop gericht de kwaliteit en kwantiteit van de zoetwatervoorziening te borgen. Dit gaat enerzijds om de waterkwantiteit: tijdige peilopzet om periodes van watertekort langer te kunnen overbruggen. Anderzijds gaat het om verziltingsbestrijding: spuistrategie gericht op het voorkomen van verspreiding van het zoute water uit de vaargeulen en erosiekuilen naar de rest van het meer.

Via de spuisluizen komt zout water op het IJsselmeer door lekkages bij de afdichtingen van de deuren. Het lekdebiet varieert met de waterstand op de Waddenzee (afhankelijk van getij en windeffecten). De zoutvracht varieert met het lekdebiet en de chlorideconcentratie aan de Waddenzeezijde. Die concentratie is afhankelijk van windeffecten en stromingspatronen op de Waddenzee, en de concentratie is hoger naarmate er langer niet is gespuid.

Achter de spuisluizen liggen diepe erosiekuilen die als 'zoutvang' dienst doen voor het (zwaardere) zoute water dat via de spuisluizen op het meer komt. Wanneer het zoute water over de rand van de erosiekuilen heen komt kan het zich via zwaartekrachtstroming of grootschalige windgedreven stromingen vrij verspreiden over het IJsselmeer. Door middel van spuien kan water met verhoogde chlorideconcentraties naar de Waddenzee worden afgevoerd. Tijdens droge periodes is het wenselijk om met zo min mogelijk water zo veel mogelijk chloride te spuien op de Waddenzee. De efficiëntie van het spuien (de

<sup>2</sup> De Zeesluisformulering is een Python en Excel tool die de zoutvracht door sluisen kan berekenen. Door Deltares zijn bepaalde aanpassingen gedaan om dit adequaat te kunnen berekenen voor de Krammersluizen. Deze staan in (Deltares, 2019) verder toegelicht.

chlorideconcentratie van het gespuid water) is van verschillende factoren afhankelijk, waaronder: chlorideconcentraties op het IJsselmeer, spuidebieten en -stroomsnelheden (bepalend voor de mate waarin de stroming vat krijgt op het diepere water vanuit de erosiekuilen), infrastructuur (spuikokers en eventuele pompen) en de bediening daarvan (frequentie en eventueel visvriendelijk spuien), etc. Door deze afhankelijkheid van verschillende factoren is het lastig om de efficiëntie van het spuien (voor huidige en toekomstige scenario's) te bepalen. In deze studie is een poging gedaan om de binnenkomende chloridevracht via de schut- en spuicomplexen van de Afsluitdijk, gegeven een set van aannames voor bovengenoemde factoren, te berekenen (zie methodiek voor het berekenen van de netto chloridevracht in paragraaf 3.4.1).

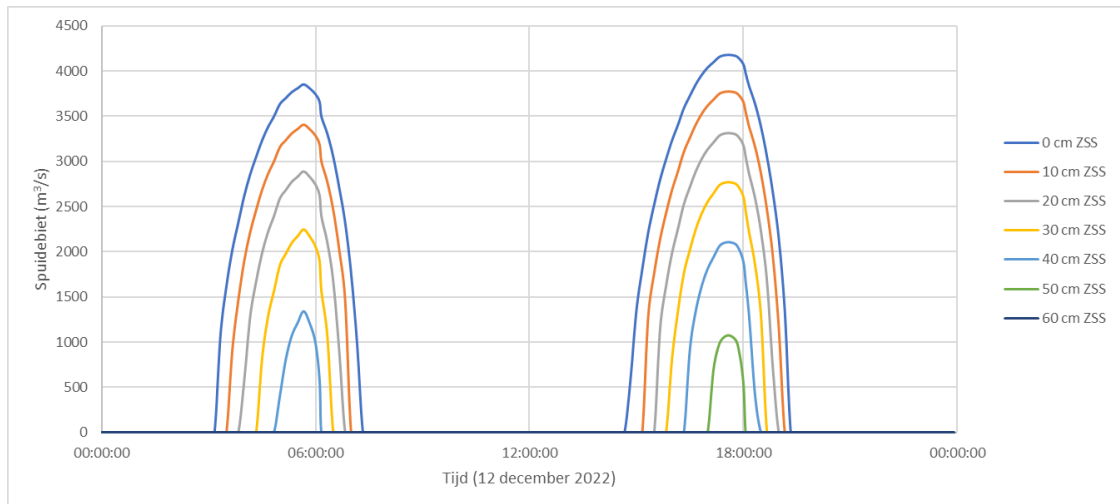


Figuur 10. Schematische weergave van erosiekuilen voor de spuisluisen van de Afsluitdijk.

Riocard (2020) rapporteert lekdebieten tussen de 0.8 en 2.5 m³/s, uitgaande van huidige zeespiegelstand en geen achterstallig onderhoud aan de spuikokers. Bij een chlorideconcentratie op de Waddenzee van 10.000 mg/L komt dit neer op een chloridevracht van 8 à 25 kg/s. Wanneer er gekozen wordt om visvriendelijk spuibeheer toe te passen levert dit een extra jaargemiddelde zoutvracht op van 25 à 75 kg/s (Infographic RWS, 2021).

De spuicapaciteit (onder vrij verval) van het de sluiscomplexen in de Afsluitdijk neemt af bij toenemende zeespiegelstijging doordat het verhang naar de Waddenzee afneemt. Om een indicatie te krijgen van de maximale spuicapaciteit als een functie van zeespiegelstijging is aan de hand van een analytische formule (Vlag, 1999) het maximale spuidebiet berekend voor een willekeurige dag in december (12-december-2022). Vervolgens is gekeken hoe deze maximale spuicapaciteit zich ontwikkelt bij zeespiegelstijging. Er is uitgegaan van een afvoercoëfficiënt onvolkomen overlaat van 1.0 en een constant meerpeil van -0.1 m NAP. Het daggemiddelde afvoerdebiet is in de huidige situatie ongeveer 1100 m³/s, dit neemt af tot ongeveer 40 m³/s bij 50 cm zeespiegelstijging. Bij 60 cm zeespiegelstijging zou spuien onder vrij verval niet meer mogelijk zijn. Deze analyse geeft slechts een hele grove indicatie van de ontwikkeling van het maximale spuidebiet, maar laat wel duidelijk zien dat er al op korte termijn (al voor 0.5 m ZSS) maatregelen nodig zijn om de afvoer capaciteit te vergroten. Het plaatsen van pompen of het verhogen van het winterpeil zijn mogelijke maatregelen.





*Figuur 11. Indicatie van de ontwikkeling van de maximale spuicapaciteit als een functie van zeespiegelstijging. Voor deze analyse zijn de waterstanden op de Waddenzee van 12-12-2022 gebruikt als voorbeeld.*

### 2.3.7 Wind

Wind speelt in zowel het IJsselmeer als het Markermeer een bepalende rol bij de verticale menging van het water. Met uitzondering van de diepere delen (vaargeul en erosiekuilen) zijn beide systemen over het algemeen goed gemengd in de verticale richting. Ook speelt de wind een belangrijke rol bij de horizontale stromingspatronen binnen de systemen. Doordat wind een zeer variabele parameter is die over korte tijdschaal in oriëntatie en kracht kan verschillen, is het moeilijk om de exacte impact van wind in prognostische modellen te vatten/mee te nemen.



# 3

## Methodiek

## 3 Methodiek

### 3.1 Doel modeloefening

Het doel van deze modelstudie is het verschaffen van inzicht in de mate van houdbaarheid van de huidige beheerstrategie van het IJsselmeergebied onder verschillende scenario's van zeespiegelstijging (0, 0.5, 1, 2, 3 en 5 meter) en in de wijze waarop die houdbaarheid eventueel is te vergroten. Doordat zeespiegelstijging zich zal afspelen over een termijn van honderden jaren zullen autonome ontwikkelingen die zich in deze periode voordoen ook moeten worden meegenomen in de modeloefening. Enkele voorbeelden hiervan zijn klimaatverandering, demografische en sociaal-economische ontwikkelingen. Net als zeespiegelstijging hebben deze autonome ontwikkelingen impact op verschillende systeemvariabelen die de 'staat' van de zoetwaterbuffer van het IJsselmeergebied bepalen. De overkoepelende hoofdvraag is daarom: 'hoe ontwikkelt de 'staat' van de zoetwaterbuffer van het IJsselmeergebied zich (uitgedrukt in de doelvariabelen waterpeil en chlorideconcentratie) bij zeespiegelstijging, rekening houdend met andere randvoorwaarden en interne ontwikkelingen die zich in de toekomst kunnen voordoen?'

### 3.2 Modelstrategie

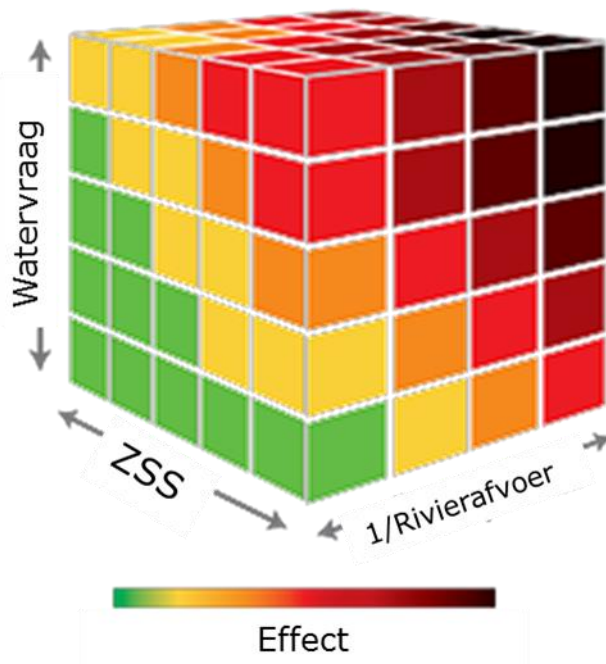
De voorgestelde aanpak in deze modelstudie wordt 'exploratief' genoemd. De werking van de (strategische) zoetwaterbuffers is afhankelijk van de trend en coincidenties in drie dominante klimaatvariabelen: lage afvoer van de grote rivieren; neerslag en verdamping (zoetwateraanbod); en zeespiegel. Met de huidige stand van de wetenschap is het niet mogelijk om deze drie termen in consistente klimaatscenario's te vatten op een tijdschaal van meerdere eeuwen (de verwachte tijdschaal waarop de zeespiegel 5m toeneemt). Daarbij komt dat de trend in watervraag en rivierafvoer niet alleen afhankelijk is van klimaatverandering, maar ook van socio-economische, technologische ontwikkelingen en (internationaal) waterbeheer. Die ontwikkelingen zijn op de tijdschaal waarover in het KP ZSS gesproken wordt niet redelijkerwijs te voorspellen.

Om deze beperkingen het hoofd te bieden, is gekozen voor gevoeligheidsanalyses waarin deze factoren onafhankelijk van elkaar gevarieerd worden om de kwetsbaarheid onder verschillende combinaties van omstandigheden in beeld te brengen ('wat-als aanpak'). Er is ervoor gekozen de effecten van zeespiegelstijging door te rekenen voor bepaalde vaste zichtwaarden van de zeespiegel boven het huidige niveau (tussen 0m en +5 m) en niet om het tijdspad daar naartoe expliciet te modelleren, wat gedaan wordt bij klimaatscenario's. Zodra in de nabije toekomst informatie (KNMI, Deltascenario's, andere bronnen) beschikbaar komt over wanneer in de tijd bepaalde omstandigheden zich met een bepaalde waarschijnlijkheid voordoen, gegeven bepaalde emissie of socio-economische scenario's, kunnen de wat-als inzichten bij de diverse zichtwaarden in de tijd geplaatst worden. Kortom, er wordt getracht om alle mogelijke scenario's door te rekenen zodat, wanneer er meer informatie over het toekomstbeeld beschikbaar is, het antwoord tussen de scenario's zit.

In Figuur 12 wordt geschetst hoe de 'wat-als' vragen in de vorm van een gevoeligheidsanalyse eruit kunnen zien voor variatie van de 3 hoofdfactoren zeespiegel, watervraag aan de zoetwaterbuffer en wateraanbod via de rivieren. Een zoekruimte van hogere dimensie (een zogenaamde hyperkubus) is voorstelbaar waarbij ook de gevoeligheid voor systeemparameters (bijv. representatief voor inzet van kunstwerken of maatregelen) of bepaalde uitsplitsing in randcondities mogelijk is.

In de systeembeschrijving (Hoofdstuk 2) zijn de systeemvariabelen uiteengezet die de toestand van het te onderzoeken systeem beïnvloeden. De toestand wordt beschreven door middel van doelvariabelen (waterstanden, chlorideconcentraties). De primaire systeemvariabelen (oftewel primaire vrijheidsgraden) zijn een selectie of eventueel combinatie van de belangrijkste systeemvariabelen, omdat ze samen de toestand van het systeem bepalen. Het bereik van de primaire systeemvariabelen wordt dusdanig gekozen dat

mogelijke autonome ontwikkelingen (los van hoe waarschijnlijk ze zijn) ook erin worden meegenomen.



Figuur 12. Schets van de voorgestelde gevoeligheidsanalyse in matrixstructuur waarin de hoofdassen de te onderzoeken factoren (als randvoorwaarden, systeemp parameters) weergeven en de kleuren de waterstaatkundige effecten en in termen van nader te definiëren indicatoren.

In de modeloefening worden de primaire variabelen als een constante flux (semi-stationair) aan het model opgelegd, niet als variabele tijdsreeksen. In werkelijkheid vormen temporele verschillen die zich voordoen (denk aan fluctuaties in rivierafvoeren en meteorologische omstandigheden) natuurlijk wel een belangrijke randvoorwaarde voor de houdbaarheid van de zoetwaterbuffers: de zoetwaterbuffers dienen om een event van een bepaalde duur te kunnen weerstaan. Het gebruik van tijdsreeksen maakt de analyse en interpretatie van modelresultaten veel complexer. Dit heeft meerdere oorzaken:

- de herkomst van zout in een complexe tijdsreeks is vaak niet meer te achterhalen;
- het gebruik van tijdsreeksen op basis van bestaande data is niet echt realistisch omdat er op grotere tijdschalen en in de toekomst gekeken wordt;
- het verzinnen van geschikte tijdsreeksen met verschillende achtereenvolgende typen events maakt de modelleeraanpak veelal complexer en zwaarder.

Al met al wordt de extrapolatie van resultaten uit complexe reeksen tot robuuste inzichten en uitspraken zeer lastig tot onmogelijk gemaakt.

In deze modeloefening worden de modellen daarom semi-stationair doorgerekend. Hierbij wordt de verandering van de doelvariabelen door de ruimte en tijd geëvalueerd. Op deze manier kan onderzocht worden voor hoe de waterstanden en chlorideconcentraties zich ontwikkelen gegeven een constante set aan primaire variabelen, maar ook hoe snel deze ontwikkeling gaat. Daardoor levert deze werkwijze nog wel inzichten over de orde van grootte van de eventduur die de buffer wel of niet kan weerstaan. Hier moet wel worden opgemerkt dat de uitgangssituatie (initiële chlorideconcentratie) bij deze semi-stationaire gevoeligheidsanalyse een bepalende factor is.

### 3.3 Gebruikte modelinstrumentarium

Bij aanvang van dit project was er geen geschikt model beschikbaar voor de beoogde analyse: een snel rekenend model dat de waterbalans en het chloridetransport binnen het IJsselmeergebied op hoofdlijn adequaat simuleert. Daarom is besloten een nieuw 1D-bakjesmodel op te bouwen. Dit bakjesmodel bouwt voort op de gerapporteerde inzichten die zijn opgedaan bij een eerdere bakjesmodelbenadering (Bonte M. , 2009) en het framework van het VZM-bakjesmodel (Deltares, 2020).

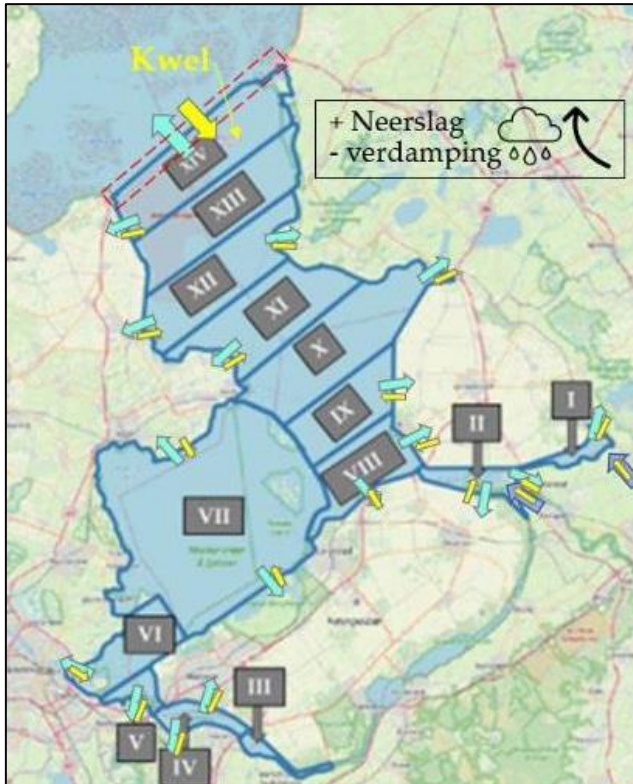
Bij de eerdere bakjesmodelbenadering van het IJsselmeer (IJ), Markermeer (MM), en Gooien Eemmeer (GE) (Bonte M. , 2009) zijn het MM en GE opgenomen als instantaan mixende bakjes. Het IJsselmeer is geschematiseerd als 22 bakjes, strekkend in de ZO-NW richting, met onderling een dispersieterm voor mengen van water tussen twee opeenvolgend bakjes. Het model is geijkt op de gemeten chlorideconcentraties voor de meetpunten bij Andijk en het zwaartepunt van het Markermeer. Als kalibratieparameters zijn de panfactor (gebruikt om de actuele verdamping uit de referentieverdamping te berekenen), het aantal bakjes binnen het IJsselmeer en de dispersiecoëfficiënt genomen. De beste fit werd gevonden met een pan factor van 1.175, 22 bakjes, en een dispersiecoëfficiënt van 2.6 km<sup>2</sup>/d.

Het VZM-bakjesmodel is gebruikt in de studie van Deltares (2020) voor een klimaatrobustheidsstudie. Dit model is in de studie van Deltares (2020) voor zowel de hydrologie als de saliniteit gevalideerd. Het model is opgebouwd uit een combinatie van python (waarin de waterbalans wordt uitgerekend) en DELWAQ (voor de zoutbalans). De waterbalans en zoutbalans worden sequentieel doorgerekend (geen terugkoppeling van zoutbalans op naar waterbalans).

#### 3.3.1 IJsselmeergebied bakjesmodel

Het IJsselmeergebied-model is geschematiseerd in Figuur 13 en bestaat uit 14 bakjes. De keuze voor de grootte en locatie van de bakjes is vormgegeven met in achtname van de volgende eisen:

- De resultaten moeten inzichten verschaffen in de (mogelijke) ruimtelijke spreiding van chloride. Vanuit de resultaten moeten enkele prominente outputlocaties geëvalueerd kunnen worden, zoals drinkwaterwinning innamepunt tbv drinkwaterproductie Andijk en belangrijke inlaatlocaties naar de regionale systemen.
- De discretisatie van het model (in combinatie met de parametrisatie van de dispersieterm) zijn bepalend voor de verspreiding van zout in het model. Het aantal bakjes is bepalend voor de numerieke dispersie die plaatsvindt in het model. Bij een afnemend aantal bakjes neemt de numerieke dispersie toe.



Figuur 13. Omzetting van VZM-bakjesmodel naar het IJsselmeergebied-bakjesmodel: Verdeling van de bakjes en in- en uitgaande posten.

De pijlen in Figuur 13 geven de ingaande en uitgaande posten (debieten/chloridevrachten) weer in het model:

- **Paarse pijlen:** ingaande waterdebieten van de IJssel en het Zwarte Water met bijbehorende chlorideconcentratie.
- **Lichtgroene pijlen:** uitgaande debieten die betrekking hebben op de netto waterflux over de Afsluitdijk, Oranjesluis en de (netto) watervraag vanuit de het regionale systeem.
- **Gele pijlen:** chloridevracht die betrekking hebben op de netto chlorideflux over de Afsluitdijk en de (netto) chloridevracht vanuit het regionale systeem.
- **[+/-]:** neerslag op en verdamping van het open water.

Het Markermeer en IJsselmeer staan in continue verbinding via de Krabbersgatsluizen en de Houtribsluizen. De waterstanden in het Markermeer en IJsselmeer volgen elkaar en de chloride verplaatst zich tussen beide meren door advectief transport (en in beperkte mate door diffuus transport omdat het doorstromend oppervlak zeer klein is).

### 3.3.2 Water- en chloridebalans

In het model worden de volgende stappen doorlopen om de water- en chloridebalans op te lossen:

1. Met een Python script wordt achtereenvolgens per tijdsstap:
  - a. De waterstandverandering over het gehele IJsselmeergebied berekend. In het model zijn twee sluitposten opgenomen:
    - i. omdat deze studie zich focust op de zoetwaterbeschikbaarheid tijdens droge periodes, en niet op wateroverlast ten tijde van wateroverschotten, is een initiële waterstand van -0.1 m NAP opgelegd aan het model. Dit is tevens de maximale waterstand die kan optreden. Wanneer deze waarde dreigt te worden overschreden wordt het betreffende surplus gespuid (extra ten opzichte van de opgelegde netto waterflux over de Afsluitdijk).
    - ii. voor de minimale waterstand in het model is -0.4 m NAP aangehouden, waarbij rekening wordt gehouden met de operationele

werkelijkheid. Wanneer waterstanden uitzakken, zullen er in de praktijk maatregelen worden genomen om de waterstand niet verder te doen uitzakken. Op basis van de verdringingsreeks zal de watervraag vanuit de regionale systemen worden beperkt. Deze beperking gaat in de praktijk geleidelijk, maar in het model wordt deze binair toegepast, precies wat nodig is om niet onder de -0.4 m NAP te zakken. De overige uitgaande waterposten, netto verdamping en het spuidebiet, zullen constant blijven. Als de beperking van de regionale watervraag niet voldoende is, zal de waterstand in het model alsnog onder de -0.4 m NAP uitzakken. Dit is het geval wanneer het geheel aan verdamping plus afvoer bij de Afsluitdijk groter is dan de IJsselaanvoer.

- b. De (kwantitatieve) wateruitwisseling tussen de 14 bakjes van het model berekend.
2. Met de waterkwaliteitssoftware DELWAQ wordt voor iedere tijdstap de chlorideconcentratie in de 14 bakjes van het model berekend. De input die hiervoor wordt gebruikt is op basis van:
    - a. de berekende wateruitwisseling tussen de bakjes (uit stap 2b);
    - b. de opgelegde chloridevrachten.

## 3.4 De vrijheidsgraden van de hyperkubus

Op basis van literatuuronderzoek is bepaald welke systeemvariabelen in deze modelstudie als onderdeel van de gevoeligheidsanalyse zijn meegenomen. Daarnaast is bepaald welke constante post wordt meegenomen en welke in het geheel niet wordt meegenomen in het model als in- of uitvoer. Tot slot is bepaald welke van de gekozen vrijheidsgraden als correlerende variabelen worden meegenomen, welke onafhankelijk, en wat de bandbreedte is die voor een vrijheidsgraad wordt gehanteerd.

### 3.4.1 Vrijheidsgraden van de hyperkubus

Een overzicht van de systeemvariabelen is opgenomen in Tabel 3:

- debiet rivierafvoer (gekoppeld aan chloridelast rivierafvoer)
- chloridelast rivierafvoer (gekoppeld aan debiet rivierafvoer)
- watervraag regionale systeem (gekoppeld aan netto verdampingoverschot)
- chloridelast regionale systeem
- netto verdampingoverschot (gekoppeld aan watervraag regionale systeem)
- directe zoute kwel
- netto debiet over de Afsluitdijk
- netto chloridevracht over de Afsluitdijk

Omdat deze studie zich focust op droge situaties met watertekorten en oplopende chlorideconcentraties, is gekozen om combinaties van vrijheidsgraden door te rekenen die representatief zijn voor (droge) zomersituaties. Hierdoor wordt geen kwantitatief antwoord gegeven op de volgende sub-vraag onder kennisvraag A1: *'Hoe lang is het niet meestijgen van zomer en winterpeil met zeespiegelstijging houdbaar?'*.

Om het aantal berekeningen binnen de hyperkubus te beperken, zijn sterk gecorreleerde vrijheidsgraden gekoppeld doorgerekend. Zo is het bijvoorbeeld zeer waarschijnlijk dat een fors verdampingoverschot gepaard gaat met een hoge watervraag vanuit het regionale systeem.

De zoutvrachten en debieten over de Afsluitdijk (via de spui- en schutsluizen) zijn afhankelijk van een groot aantal factoren. Er is besloten om niet al deze factoren (inclusief mogelijke toekomstige ontwikkelingen) te verwerken in het bakjesmodel, maar in plaats daarvan enkel de netto zoutvracht en het netto debiet als vrijheidsgraden op te nemen in het model. In het tekstkader 'Randvoorwaarden Afsluitdijk' wordt deze methodiek nader beargumenteerd en toegelicht.

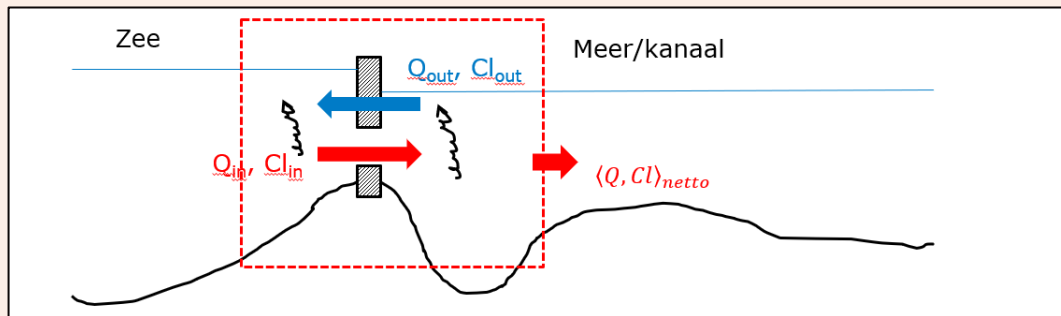
Tabel 3. Vrijheidsgraden die samen de hyperkubus vormen, inclusief bijbehorende bandbreedtes die representatief zijn voor droge periodes (de mogelijke toekomstige ontwikkeling is opgenomen in deze bandbreedtes).

Vrijheidsgraden	Bandbreedte (m3/s of kg/s)										Kalibratiewaardes (op basis van 1 juli - 25 aug 2018)
<b>Rivierafvoer</b>											
Debiet IJssel	100	120	150	200	250	300	400				180
Debiet Zwarte Water	0	2	5	10	20	40	50				0
Chloridevracht IJssel	16.8	17.7	19.1	21.4	23.7	26.0	30.6				20
Chloridevracht Zwarte Water	0.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0				0
<b>Regionale systeem debiet</b>											
Watervraag Fryslân	-52	-42	-36	-21	-10						-30
Watervraag Hollands Noorderkwartier	-49	-39	-34	-20	-10						-28
Watervraag Hunze & Aa's	-32	-26	-23	-13	-6						-19
Watervraag Noorderzijlvest	-16	-13	-11	-6	-3						-9
Watervraag Vallei en Veluwe	-3	-2	-2	-1	-1						-1
Watervraag Vechtstromen	-4	-3	-3	-2	-1						-2
Watervraag Waternet	-16	-13	-11	-6	-3						-9
Watervraag Drents Overijsselse Delta	-19	-15	-13	-7	-4						-11
Watervraag Zuiderzeeland	-19	-15	-13	-8	-4						-11
<b>Regionale systeem chloridevracht</b>											
Chloridevracht Fryslân	0	3									3
Chloridevracht Hollands Noorderkwartier	0	3									3
Chloridevracht Hunze & Aa's	0	0									0
Chloridevracht Noorderzijlvest	0	0									0
Chloridevracht Vallei en Veluwe	0	0									0
Chloridevracht Vechtstromen	0	0									0
Chloridevracht Waternet	0	0									0
Chloridevracht WDOD	0	0									0
Chloridevracht Zuiderzeeland	0	10									10
<b>Netto neerslag &amp; verdamping</b>											
Watervraag IJsselmeer	-64	-51	-38	-25	-13						-51
Watervraag Markermeer	-41	-32	-24	-16	-8						-32
Watervraag Gooi- en Eemmeer	-2	-2	-1	-1	0						-2
<b>Zoute Kwel</b>											
Chloridevracht IJsselmeer	0.2	3									0.2
<b>Netto debiet over Afsluitdijk</b>											
Q_netto	0	-10	-20	-40	-60	-80	-100				0
<b>Netto chloridevracht over de Afsluitdijk</b>											
Cl_netto	300	240	185	155	120	100	70	40	20		107



### Randvoorwaarden Afsluitdijk

De zoutindringing vanuit de Waddenzee naar het IJsselmeer is afhankelijk van een groot aantal factoren. Deze zoutindringing kan benaderd worden als een wisselwerking tussen bruto inkomend en uitgaande debieten ( $Q$ ) en chloridevrachten ( $Cl$ ) zoals gevisualiseerd in onderstaand figuur. In het figuur is tevens aangegeven van welke factoren  $Q$  en  $Cl$  (onder andere) afhankelijk zijn.



- $Q_{in} = f(\text{ZSS, peil, lekkages, infrastructuur, bediening infrastructuur, maatregelen, etc.})$
- $Cl_{in} = f(\text{ZSS, peil, lekkages, infrastructuur, bediening infrastructuur, } \int_{-\infty}^t Q_{out} \cdot S_{out} dt, \text{ zoutlekbeperkende maatregelen, etc.})$
- $Q_{out} = f(\text{ZSS, peil, infrastructuur, zoutlekbeperkende maatregelen, etc.})$
- $Cl_{out} = f(\text{ZSS, peil, infrastructuur, bediening infrastructuur, maatregelen, } \int_{-\infty}^t Q_{in} \cdot S_{in} dt, \int_{-\infty}^t Q_{out} \cdot S_{out} dt, \text{ zoutlekbeperkende maatregelen, bodemligging, etc.})$

De debieten over de Afsluitdijk kunnen voor de huidige situatie (bij benadering) worden berekend, aangezien deze voornamelijk afhankelijk zijn van het verval. Omdat deze ook sterk afhankelijk zijn van infrastructuur, onderhoud en bediening omvatten de in de toekomst te verwachten debieten een grote onzekerheid. De inkomende en uitgaande chlorideconcentraties, en dus de netto chloridelast ( $Cl_{netto}$ ), zijn ook in de huidige situatie al zeer moeilijk te bepalen. Dit komt doordat deze sterk afhankelijk zijn van infrastructuur en bediening maar ook van de geschiedenis van eerdere handelingen (via de concentratie aan de zeezijde en de vulgraad van de erosiekuilen/vaargeulen aan de IJsselmeerzijde).

Er kunnen wellicht voor de huidige situatie empirische rekenregels worden afgeleid om de inkomende en uitkomende chlorideconcentraties te bepalen, maar deze zijn naar de toekomst niet te extrapoleren. Voorts verandert de toekomstige situatie significant door de realisatie van pompen op de Afsluitdijk; hierdoor verandert de  $Q/S$  relatie compleet.

In deze studie is daarom besloten om te focussen op de netto debieten en chloridevrachten ( $Q_{netto}$  en  $Cl_{netto}$ ) die het systeem binnenkomen. Deze fluxen worden als randvoorwaarde aan het model opgelegd om in kaart te brengen hoe het systeem daarop respondeert. Hiermee kan voor verschillende scenario's worden bepaald welke netto chloridelast toelaatbaar is om de zoetwaterbuffer in stand te houden.

De toegepaste bandbreedte van  $Cl_{netto}$  is in deze studie gekoppeld aan zeespiegelstijging. Met de zeeluisformulering en analytische formules voor het spuilekdebiet is berekend wat (in de huidige situatie en onder enkele aannames) de chloridevracht is die bij verschillende zeespiegelstanden het IJsselmeer op komt ( $Cl_{in}$ ). Door een ruime range van  $Q_{netto}$  toe te passen (0 tot 100 m<sup>3</sup>/s) kan een benodigde efficiëntie van zoutlekbeperkende/-afvoerende maatregelen bepaald worden (opdat de zoetwaterbuffer in stand blijft). Op het moment dat in het vervolg de vraag voor ligt of een mogelijke verziltingsbeperkende maatregel voldoende effectief is, hoeven er geen nieuwe berekeningen te worden uitgevoerd maar enkel het effect van de maatregel op  $Q_{netto}$  en  $Cl_{netto}$ .

### 3.4.1.1 Rivierafvoer: Debiet en chloridevracht

De debieten en chloridevrachten van de rivieren zijn in de modeloefening gekoppeld doorgerekend.

De gekozen bandbreedte van de afvoerdebieten van de IJssel en het Zwarte Water zijn representatief voor scenario' van extreme droogte (100 en 0 m<sup>3</sup>/s) tot jaargemiddeld (400 en 50 m<sup>3</sup>/s). De Eem is niet als een rivierafvoer maar als onderdeel van het regionale systeem opgenomen in het bakjesmodel.

Op basis van een regressievergelijking is de chloridevracht van de IJssel gekoppeld aan de rivierafvoer van de IJssel (Bonte, 2009 ; van der Kaaij, Huismans, & Mens, 2019). Voor de chloridevracht van het Zwarte Water is een vaste waarde van 3 kg/s gehanteerd, tenzij de afvoer 0 m<sup>3</sup>/s (dan is de chloridevracht vanzelfsprekend ook 0 kg/s).

### 3.4.1.2 Netto Regionale watervraag & netto neerslag en verdamping

De netto watervraag vanuit het regionale systeem is sterk afhankelijk van de (cumulatieve) meteorologische omstandigheden. Dit is de reden dat de netto watervraag vanuit de regio is gekoppeld aan de netto neerslag en verdamping (openwater).

Op basis van de uitgevoerde analyses is gebleken dat een maandgemiddelde verdamping van 5 mm/d als zeer extreem kan worden beschouwd (paragraaf 2.3.3). Daarom is een bandbreedte van 5 tot 1 mm/d gehanteerd voor de netto neerslag en verdamping.

De bepaling van de watervraag voor het regionale systeem is gedaan op basis van HydroLogic (2021). Hierbij is de 99-percentiel decadegemiddelde watervraag in de zomer voor peilhandhaving, beregening en doorspoeling in de verschillende waterschappen (geëvalueerd over een 100-jarige reeks aan resultaten van het (LHM)) als basis voor deze bandbreedte genomen. Om mogelijke effecten van klimaatverandering in de toekomst mee te nemen is als uiterste van de toegepaste bandbreedte een watervraag van 125%<sup>3</sup> van deze 99-percentiel gehanteerd. Verdere varianten -die in de hyperkubus zijn meegenomen- zijn 75%, 50%, en 25% van de 99-percentiel watervraag.

### 3.4.1.3 Chloridevracht regionale systeem en chloridevracht via directe kwel

De zoutvracht vanuit het regionale systeem wordt in grote mate bepaald door de zoute kwel die optreedt in de regionale systemen. Het is belangrijk op te merken dat een beperkte correlatie is tussen de maandgemiddelde waterflux en de maandgemiddelde chloridevracht tussen het regionale systeem en de meren. Over een langere droge periode is het waarschijnlijk dat de netto waterflux negatief is (watervraag) terwijl er wel een netto positieve chloridevracht is als gevolg van hoge concentraties afvoerwater. In het model zijn de chloridevrachten vanuit het regionale systeem naar het IJsselmeer per waterschap bepaald, en vervolgens evenredig verdeeld over de aangrenzende bakjes van ieder individueel waterschap. Er wordt geen expliciet onderscheid gemaakt tussen individuele gemalen. De lokale impact van gemalen, zoals bijvoorbeeld de impact vanemaal Lely op de chlorideconcentraties bij Andijk is niet meegenomen in deze analyse.

Regionale zoute kwel resulteert in een grotere watervraag voor doorspoeling. Afhankelijk van de afvoer van het regionale systeem komt deze watervraag ook weer tot afvoer naar dezelfde zoetwaterbuffer en is er netto geen impact op de waterbalans, enkel op de zoutbalans (het afgevoerde water heeft zout uit het regionale systeem meegenomen). Dit geldt bijvoorbeeld voor het waterschap Zuiderzeeland (WSZZL). Bij de waterschappen HHNK en WSF wordt een groot deel van het onttrokken water voor doorspoeling via andere routes

<sup>3</sup> De ontwikkeling van de toekomstige watervraag (op de tijdschaal waar binnen deze studie naar wordt gekeken) is zeer onzeker. Herinrichting van het watersysteem (water en bodem sturend), beperking van veenoxidatie, extremere neerslagtekorten en veranderende doorspoelbehoeftes zijn enkele voorbeelden van deze ontwikkeling. Een watervraag van 125% t.o.v. de huidige van deze 99-percentiel watervraag is daarmee een *educated guess* die is ingegeven door huidige inzichten m.b.t. de ontwikkeling van watervraag.

(in zee) geloosd, waardoor er wel een impact is op de waterbalans, maar in mindere mate op de zoutbalans van de zoetwaterbuffers. De bandbreedtes die zijn gehanteerd voor de chloridevracht vanuit het regionale systeem lopen van 0 kg/s (voor alle waterschappen) tot 3, 3, en 10 kg/s voor de respectievelijke waterschappen HHNK, WSF en WSZZL.

De zoutvracht vanuit het regionale systeem en via directe kwel is gecorreleerd met zeespiegelstijging. De bandbreedte voor deze vrijheidsgraden is ontleend aan de door Deltares uitgevoerde LHM Zoet-Zout berekeningen voor verschillende zeespiegelstijging (0, 0.5, 1, 2 en 3 m). Hieruit volgt een bandbreedte van 0.2 kg/s (0 meter zeespiegelstijging) tot 3 kg/s (3 meter zeespiegelstijging).

#### 3.4.1.4 $Q_{\text{netto}}$

Voor het bepalen van de bandbreedte van  $Q_{\text{netto}}$  is in eerste instantie een grove analyse gedaan van de verwachte inkomende debieten ( $Q_{\text{in}}$ ) via de Afsluitdijk als gevolg van zeespiegelstijging. Hiervoor zijn de zeesluisformulering (Deltares, 2019) en de analytische formule voor benadering van de spuilekdebieten uit Uittenbogaard & Bijlsma (2012) gehanteerd. Dit resulteert in de debieten zoals opgenomen in Tabel 4. Voor deze analyse is uitgegaan van een systeem waarin  $Q_{\text{in}}$  groter is dan  $Q_{\text{uit}}$  (onhoudbaar). Als onderkant van de bandbreedte voor  $Q_{\text{netto}}$  is daarom gekozen voor 0 m<sup>3</sup>/s. Dit is de situatie waar (vanwege stijgende zeespiegelstijging of uitzakkende waterstanden in het IJsselmeer) bijna geen water kan worden gespuid. Voor het maximale (logische) spuidebiet (al dan niet met pompen in de toekomst) in de zomer is een waarde van ruim 100 m<sup>3</sup>/s aangenomen ( $Q_{\text{netto}} = -100$  m<sup>3</sup>/s). Tijdens de winter doen zich bij huidige zeespiegel grotere spuidebieten voor, terwijl er tijdens de zomer zelden meer dan 100 m<sup>3</sup>/s voor een langere periode zal worden gespuid. Het zwaartepunt rond de  $Q_{\text{uit}}$  van 40 m<sup>3</sup>/s is gekozen omdat dat in de huidige situatie als benodigd debiet wordt geacht om verdergaande verzilting van het IJsselmeer te voorkomen.

#### 3.4.1.5 $Cl_{\text{netto}}$

Voor het bepalen van de bandbreedte van  $Cl_{\text{netto}}$  is gekeken naar de verwachte toekomstige  $Cl_{\text{in}}$  onder het huidige regime (infrastructuur, bedrijf, scheepvaart, etc.) met zeespiegelstijging als grootste toekomstige ontwikkeling (zie Tabel 4). Omdat de toekomstige chloridevracht uitermate onzeker is (zie afhankelijkheden tekstbox 'randvoorwaarden Afsluitdijk'), is besloten om een zeer ruime bandbreedte voor  $Cl_{\text{netto}}$  toe te passen van 300, 240, 185, 155, 120, 100, 70, 40 en 20 kg/s. Hierbij zijn de waarden van 240 tot 70 kg/s representatief voor de zeespiegelstanden van +5 tot 0 m NAP met de huidige infrastructuur van de Afsluitdijk wanneer er niet gespuid wordt ( $Cl_{\text{netto}} = Cl_{\text{in}}$ ). Hogere zoutvrachten zijn representatief voor een intensievere scheepvaart, terwijl bij lagere zoutvracht wordt uitgegaan van minder scheepvaart en/of een infrastructuur met zeer goed werkende zoutlekbepurende maatregelen.

Tabel 4. Schatting van  $Cl_{\text{in}}$  en  $Q_{\text{in}}$  op basis van zeesluisformulering en analytische formule Uittenbogaard & Bijlsma (2012). (Aannames: veel scheepvaart<sup>4</sup>, zomerperiode, huidige infrastructuur, goed onderhoud dus geen kiertjes onder deuren, contractiecoëfficiënt  $Cd = 1$  (worst case), excl. visvriendelijk spuibedrijf, enkeldichte spuisluisdeuren, constante chlorideconcentratie Waddenzee = 10 mg/l)

ZSS (m)	5	3	2	1	0.5	0
$Cl_{\text{in}}$ (kg/s)	240	187	157	122	101	71
$Q_{\text{in}}$ (m <sup>3</sup> /s)	24	19	16	12	10	7

<sup>4</sup> Bij dit 'veel scheepvaart' scenario is uitgegaan van de hoogste maandgemiddelde aantal schuttingen uit 2014, 2017 en 2018. Dit betreft voor de schutsluizen Den-Oever, Kornwederzand groot en Kornwederzand klein respectievelijk 19, 23 en 14 schuttingen per dag (Deltares, 2019).



# 4

## Kalibratie

## 4 Kalibratie

De kalibratie van het 1D-bakjesmodel heeft tot doel om de geschiktheid van het ontwikkelde model voor voorliggend vraagstuk te beproeven. Het model wordt geschikt geacht als het de bepalende processen correct beschrijft en in staat is om de werkelijkheid adequaat te representeren. Daarnaast geeft de kalibratie inzicht in de onzekerheden en het toepassingsbereik van het 1D-model.

### 4.1 Kalibratieperiode

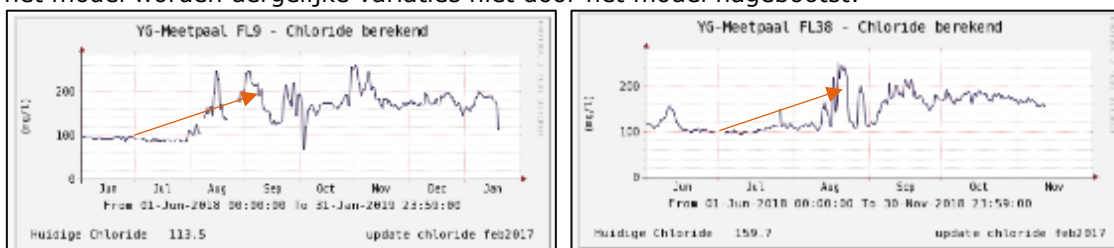
Het model is gekalibreerd op de zomer van 2018, een van de weinige periodes waarin (enige mate van) verzilting van het IJsselmeer heeft plaatsgevonden. Deze periode is gekozen om de volgende redenen:

- Dit is een extreem droge periode met lage rivierafvoeren en een groot neerslagtekort. Bekend is dat deze droogte gepaard ging met verzilting (> 150 mg/l) van verschillende locaties in het IJsselmeer.
- In deze periode zijn de zoutconcentraties op het IJsselmeer relatief goed bemeten. Naast de vaste meetlocaties zijn er varende metingen uitgevoerd waarmee meer informatie is verzameld over de optredende verzilting.
- Meetgegevens voor andere periodes zijn schaars en, voor zover er in andere periodes verzilting heeft plaatsgevonden, is dit op een veel kleinere schaal gebeurt dan de zomer van 2018.

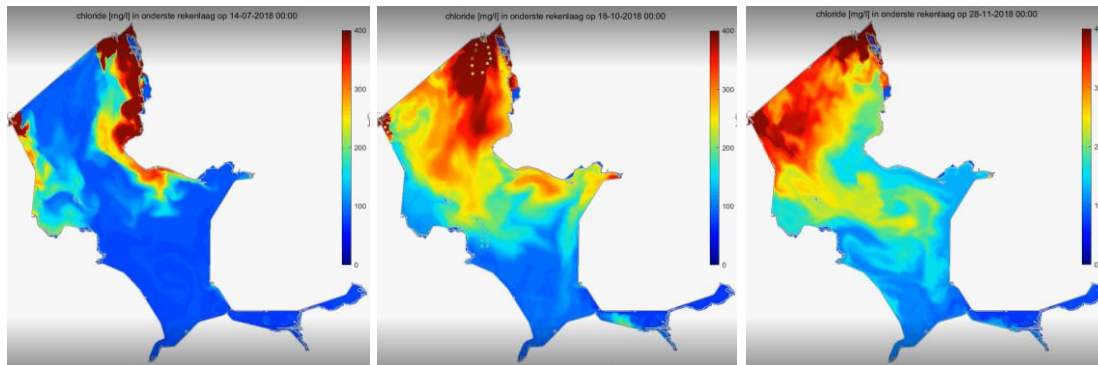
### 4.2 Kalibratiemethodiek

De kalibratiemethodiek is toegesneden op het toepassingsbereik van het bakjesmodel. Hiervoor is kennis over de zoutverspreidingsprocessen in het IJsselmeergebied van belang. In Figuur 14 zijn de gemeten chlorideconcentraties bij Andijk en Vrouwezand weergegeven, met duidelijk waarneembare pieken in de chlorideconcentratie. Daarnaast is in Figuur 15 de 3D-gesimuleerde zoutverspreiding op het IJsselmeer getoond op drie verschillende momenten gedurende de zomer van 2018. De resultaten laten zien dat het zout zich in pluimen over het IJsselmeer verspreidt (wat op meetlocaties pieken in chloridetijdreeksen veroorzaakt).

Verschiede processen spelen een rol bij het optreden van de pieken (en pluimen) van water met een verhoogde chlorideconcentratie. Het stromingspatroon in het IJsselmeer is bijzonder complex en wordt bepaald door een combinatie van i) zwaartekracht-gedreven stroming van zout water in de vaargeulen en erosiekuilen nabij de Afsluitdijk, en ii) windgedreven stroming. Aangezien dit processen zijn die (bewust) geen onderdeel zijn van het model worden dergelijke variaties niet door het model nagebootst.



Figuur 14. Gemeten Chlorideconcentraties (op basis van EGV) bij de meetpalen Vrouwezand (links) en Andijk (rechts), inclusief de trend van de chlorideconcentratie bij Andijk aangegeven door de rode pijl.



Figuur 15. 3D-modelering van zoutverspreiding op het IJsselmeer in 2018: drie momentopnames op 14-07-2018, 18-10-2018 en 28-11-2018 (Genseberger, 2020).

Voor de kalibratie van het model voor deze studie is van belang dat de globale verspreiding van zout in het IJsselmeer onder constante/stationaire omstandigheden adequaat wordt nagebootst. Met als extra onderstaande toelichting over de scope van deze studie:

- **Onderdeel van het doel van deze studie:** in kaart brengen van de te verwachten zoutverspreiding op het IJsselmeer voor een groot aantal scenario's die zich tussen nu en ca. 2300 zouden kunnen voordoen. Met medeneming van de belangrijkste oorzaken van zoutverspreiding en hoe deze verschillen tussen de scenario's kunnen verklaren.
  - Met als aanvullende wens om aan de hand van de globale zoutverspreiding (enige) uitspraken te kunnen doen over de te verwachten zoutconcentratie op een specifieke locatie (bijvoorbeeld Andijk).
- **Geen onderdeel van het doel van deze studie:** chloridefluctuaties berekenen bij Andijk en belangrijke inlaatlocaties voor een specifiek scenario dat zich in 2200 kan voordoen.

In het verlengde van bovenstaande redenering is ervoor gekozen om de stationaire input te gebruiken voor de kalibratie van het bakjesmodel. Hiertoe zijn alle inputvariabelen van het model gedurende de zomer van 2018 (periode van juli & augustus) geanalyseerd en gemiddeld (zie Tabel 3). Er zijn in totaal twee kalibratieslagen uitgevoerd:

- **Kalibratieslag 1:** in eerste instantie is gepoogd om het model te kalibreren op de trend van de chlorideconcentratie bij Andijk (zie Figuur 14). De dispersiecoëfficiënt is gebruikt als kalibratieparameter. Deze eerste kalibratiepoging heeft geleid tot relevante inzichten die meegenomen zijn in een tweede kalibratieslag.
- **Kalibratieslag 2:** voor deze tweede kalibratieslag zijn de metingen uit de meetcampagne van de tweede helft van 2018 (tussen 24 augustus en 20 december) en de resultaten van het 3D D-HYDRO model (doorgerekend van juni t/m december 2018) gebruikt. Deze gedetailleerde kalibratie is in als losstaand onderzoek uitgevoerd en staat in detail beschreven in Diender (2022).

## 4.3 Kalibratieparameter

Binnen het 1D-bakjesmodel vindt chloridetransport plaats via advectioneel transport en via dispersie. Advectioneel chloridetransport is enkel de chloridevracht via de netto waterflux tussen twee opeenvolgende bakjes en vindt hierdoor alleen plaats in dezelfde richting als de stroming.

In werkelijkheid vindt er ook transport van chloride plaats via lokale (temporele) stromingspatronen als gevolg van wind en andere afvoercondities. Het mengingsproces als gevolg van lokale stromingspatronen kan gesimuleerd worden door het toepassen van een grotere dispersiecoëfficiënt (DC), zoals beschreven in Bonte M. (2009). Hierbij wordt opgemerkt dat enkel het versnelde (gemiddelde) mengingspatroon hiermee wordt gesimuleerd, niet de piekconcentraties op een specifieke locatie. Naar verwachting kan de gemiddelde concentratie in een bakje zo beter worden benaderd. Deze gemiddelde

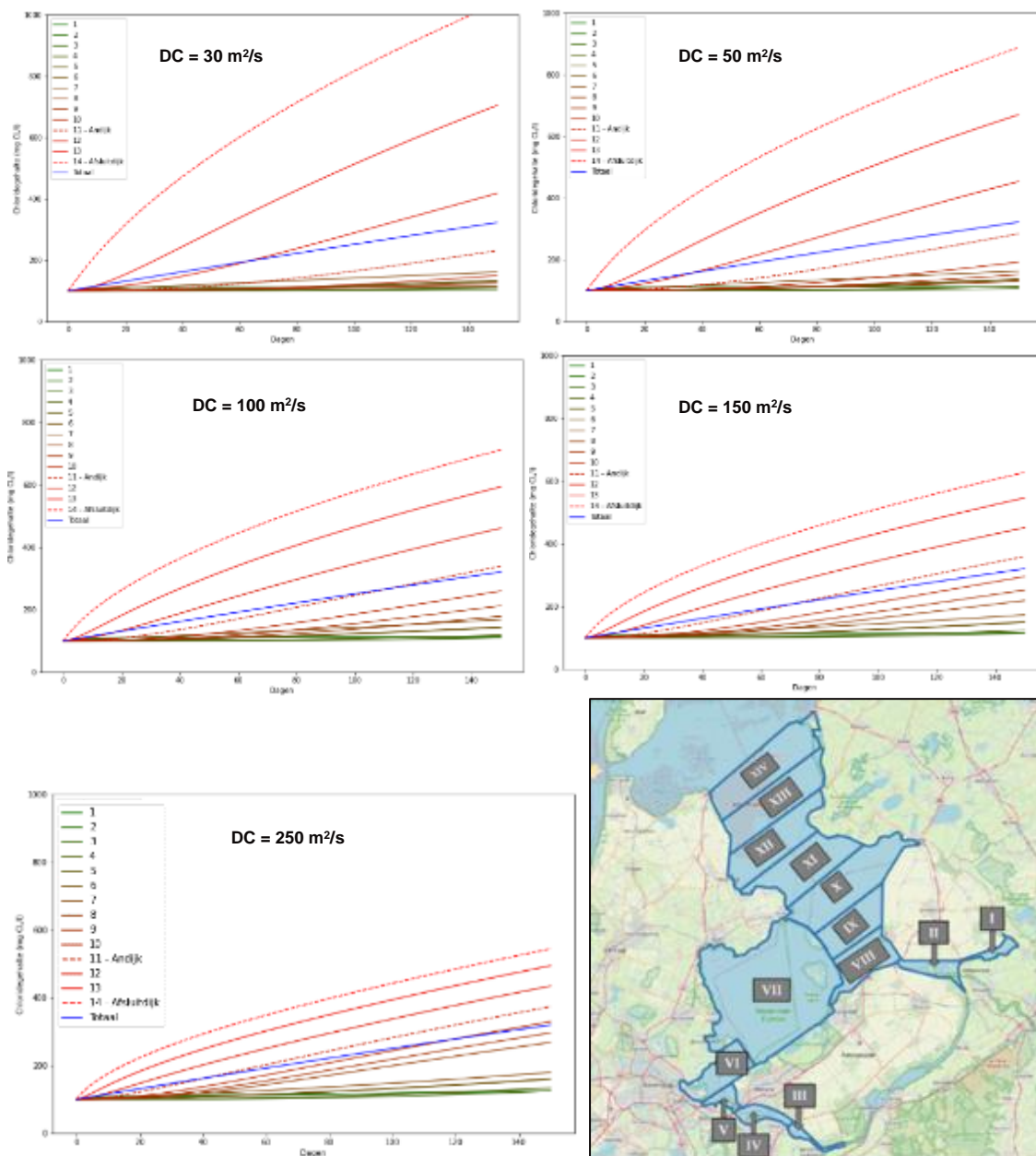
concentraties kunnen echter nog steeds substantieel afwijken van de werkelijke chlorideconcentratie op een puntlocatie op een bepaald moment.

## 4.4 Kalibratieslag 1

De trend van de chlorideconcentratie bij meetpunt Andijk laat een stijging zien van 100 mg/l tot ongeveer 200 mg/l tijdens de maanden juli en augustus. Voor de kalibratie is deze periode doorgerekend met een dispersiecoëfficiënt (DC) die varieert van 30 m<sup>2</sup>/s tot 250 m<sup>2</sup>/s (Figuur 16). De resultaten laten zien dat de gesimuleerde chlorideconcentraties in de verschillende bakjes zeer gevoelig zijn voor de DC. Bij een DC van 30 m<sup>2</sup>/s vindt er weinig uitwisseling van zout plaats tussen de verschillende bakjes. Een DC van 30 m<sup>2</sup>/s is een gangbare waarde voor chloridetransport in laag dynamische systemen zoals het IJsselmeer en eveneens toegepast in Bonte M. (2009). In laag dynamische systemen met lage afvoeren vindt menging vooral plaats via diffusie en is de dispersie component klein.

Aangezien de chloridevracht over de Afsluitdijk veruit de grootste chloridelast vertegenwoordigt stijgt de concentratie in bakje XIV binnen twee maanden tot ongeveer 600 mg/l, terwijl de concentratie in het bakje Andijk (bakje XI waarin Andijk is gelegen) stijgt tot iets boven de 120 mg/l. Bij een hogere DC verspreidt het chloride dat in bakje XIV binnenkomt zich sneller over de andere bakjes, resulterend in een concentratie van ongeveer 200 mg/l in bakje Andijk. De berekeningsresultaten bij deze hogere DC, waarin de windeffecten impliciet zijn meegenomen, komen daarmee beter overeen met de waargenomen chloridetreng bij Andijk.

Om iets over de mogelijke pieken in chlorideconcentratie te kunnen zeggen, kan worden gekeken naar de chlorideconcentraties in aangrenzende bakjes. De veronderstelling hierbij is dat het water uit een naastgelegen bakje (of mogelijk 2 à 3 bakjes ernaast), via wind gedreven stromingspatronen, in het beschouwde bakje terecht kunnen zijn gekomen. Voor het kalibratiescenario met een DC van 150 m<sup>2</sup>/s zou dit betekenen dat de gemiddelde concentratie (trend) in bakje Andijk na twee maanden 200 mg/l betreft en dat de pieken variëren tussen de 150 en 250 mg/l. Dit komt redelijk goed overeen met de puntmeting bij Andijk (Figuur 14). Om deze redeneerlijn verder te onderzoeken, is in kalibratieslag 2 gekeken naar metingen uit de meetcampagne van de tweede helft van 2018 (tussen 24 Augustus en 20 december) en de resultaten van het 3D D-HYDRO model.



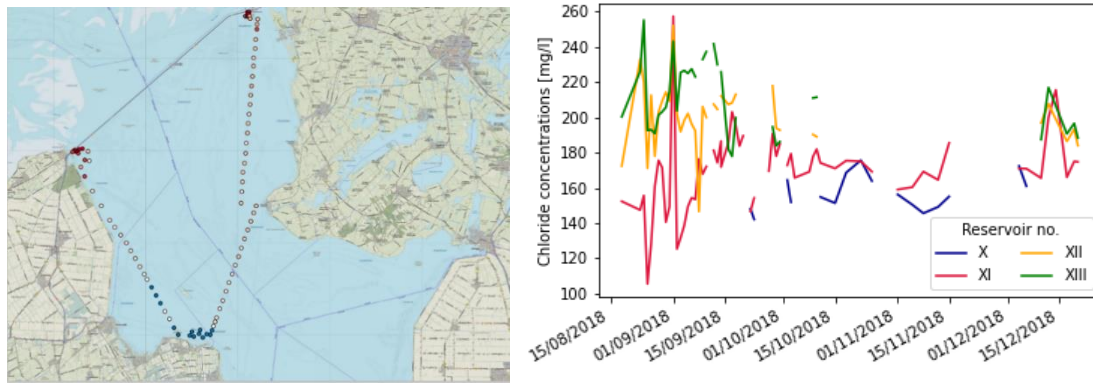
Figuur 16. Evolutie van chlorideconcentratie in alle bakjes van het bakjesmodel bij verschillende dispersie coëfficiënten.

## 4.5 Kalibratieslag 2

### 4.5.1 Meetcampagne 2018

Gedurende de meetcampagne tijdens de tweede helft van 2018 (tussen 24 augustus en 20 december) zijn meerdere chloridemetingen gedaan in het IJsselmeer, op verschillende locaties en op verschillende dieptes. Gedurende deze periode hebben er in totaal 70 meetdagen plaatsgevonden. Figuur 17 geeft een beeld van de uitgevoerde meetcampagne. De metingen van half augustus tot half september laten een duidelijke gradiënt in chlorideconcentratie zien. Deze gradiënt neemt af richting het einde van het jaar naarmate er meer menging optreedt terwijl er tegelijkertijd ook meer gespuid kan worden door toenemende IJsselafvoeren en afnemende watervraag. De periode van half augustus tot half september is daarom het meest geschikt (en gebruikt) voor de kalibratie van het 1D-bakjesmodel.





Figuur 17. Locatie van chloridemeting op 24 augustus 2018 (rechts). De linker grafiek laat voor de vier meest bemeten bakjes een tijdserie zien van de dag- en dieptegemiddelde chlorideconcentratie.

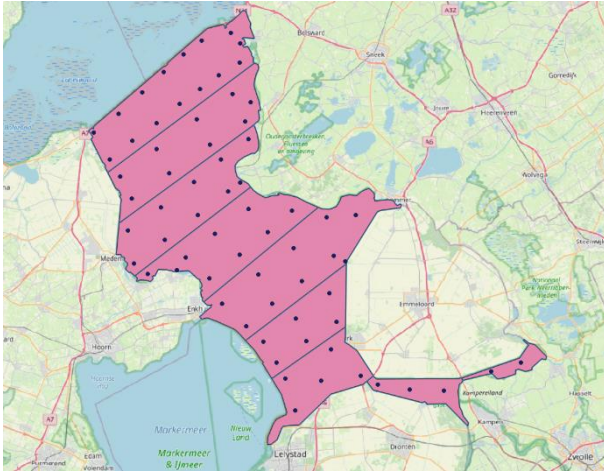
Er zitten grote verschillen in het aantal metingen dat in de verschillende bakjes heeft plaatsgevonden. Bakje XIV is het bakje waar de meeste metingen zijn gedaan. De meeste van de metingen in bakje XIV zijn genomen nabij de sluiscomplexen, in de diepere erosiekuilen en vaargeulen, waardoor de bemeten locaties niet representatief zijn voor het gehele bakje. Daarom is bakje XIV buiten beschouwing gelaten in deze kalibratieanalyse. Het is belangrijk om op te merken dat de verschillende meetlocaties ook in de andere bakjes niet random over het bakje verspreid liggen. Het gemiddelde van de metingen binnen een bakje kan daarom afwijken van de werkelijke gemiddelde concentratie in dat bakje. Ook zijn alle metingen over een periode van ruim een maand geaggregeerd, om zodoende zo veel mogelijk metingen te kunnen gebruiken binnen de analyse.

Tabel 5. Aantal chloridemetingen per bakje in de periode aug - dec 2018

Bakje	# obs.
VIII - Urk	22
IX - Rotterdamsche Hoek	38
X - Lemmer	583
XI - Andijk	1319
XII - Stavoren	676
XIII - Wieringerwerf	551
XIV - Afsluitdijk	1777

### 4.5.2 3D model

Het 3D D-Hydro model van het IJsselmeer is ontwikkeld door Deltares (Genseberger, Fujisaki, & Eijsberg-Bak; 2020). Als onderdeel van dit project is het 3D model opnieuw doorgerekend, met dezelfde tijdsafhankelijke input en randvoorwaarden als het oorspronkelijke model van de tweede helft van 2018 (1 juni tot 31 december). Het IJsselmeer is in het model geschematiseerd door 300.000 elementen met 5 sigma-lagen. De output van het 3D model is weggeschreven voor verschillende puntlocaties, verspreid over de verschillende bakjes (Figuur 18). Door de modelresultaten over dezelfde periode van augustus en september te beschouwen is de gemiddelde chlorideconcentratie in een bakje bepaald op een manier die gelijk is aan de duiding van de meetcampagne.



*Figuur 18. 'Points of interest' (POIs) in het IJsselmeer voor het 3D D-HYDRO model. De POIs binnen een bakje hebben allemaal een gelijke afstand van elkaar, waardoor er niet in elke bakje evenveel POIs, zitten een eenduidige vergelijking mogelijk wordt gemaakt.*

### 4.5.3 Resultaten kalibratieslag 2

De twee databronnen die worden gebruikt voor de tweede kalibratieslag (3D modelresultaten en meetcampagne 2018) zijn van een wezenlijk andere aard dan de resultaten van het 1D-bakjesmodel. Omdat er wordt gekalibreerd op de globale verspreiding van zout in het IJsselmeer gedurende een periode, en niet op een chloridetijdreeks op een specifieke locatie, is een goede vergelijking van de verschillende databronnen toch mogelijk.

De kalibratieresultaten aan de hand van de meetcampagne uit 2018 zijn gegeven in Figuur 19. Het figuur toont de gemeten chlorideconcentraties voor in de periode tussen 18 augustus en 30 september. De rode doorgetrokken lijn is de gemiddelde chlorideconcentratie in deze periode voor de verschillende bakjes van het IJsselmeer (bakjes VIII t/m XIII). Naast de gemiddelde concentratie is ook per bakje de 10-percentiel en 90-percentiel bandbreedte weergegeven, alsmede een bandbreedte van de maximale en minimale gemeten chlorideconcentratie per bakje. De resulterende rode 'pluim' die oploopt van bakje VIII tot bakje XIII geeft inzicht in de globale verspreiding van chloride over het IJsselmeer, maar ook over de variatie in concentraties die optreedt binnen een specifiek bakje (oplopend in de richting van de Afsluitdijk).

De resultaten van de 1D kalibratiesommen zijn zodanig nabewerkt dat vergelijking met de 'pluim' van de meetcampagne 2018 mogelijk is. Het is echter niet eenvoudig voor de 1D kalibratiesommen aan te geven hoe de uitgangssituatie zich precies verhoudt tot de werkelijkheid in 2018: begon verzilting in juni, juli of pas in augustus echt op gang te komen? Aangezien de metingen in de periode van 18 augustus tot 30 september zijn geaggregeerd, zijn de kalibratieresultaten van het 1D model ook voor verschillende tijdsintervallen gepresenteerd. Omdat de input van de 1D kalibratiesommen representatief is voor de periode juli en augustus 2018 zijn intervallen van 30, 60 en 90 dagen gepresenteerd.

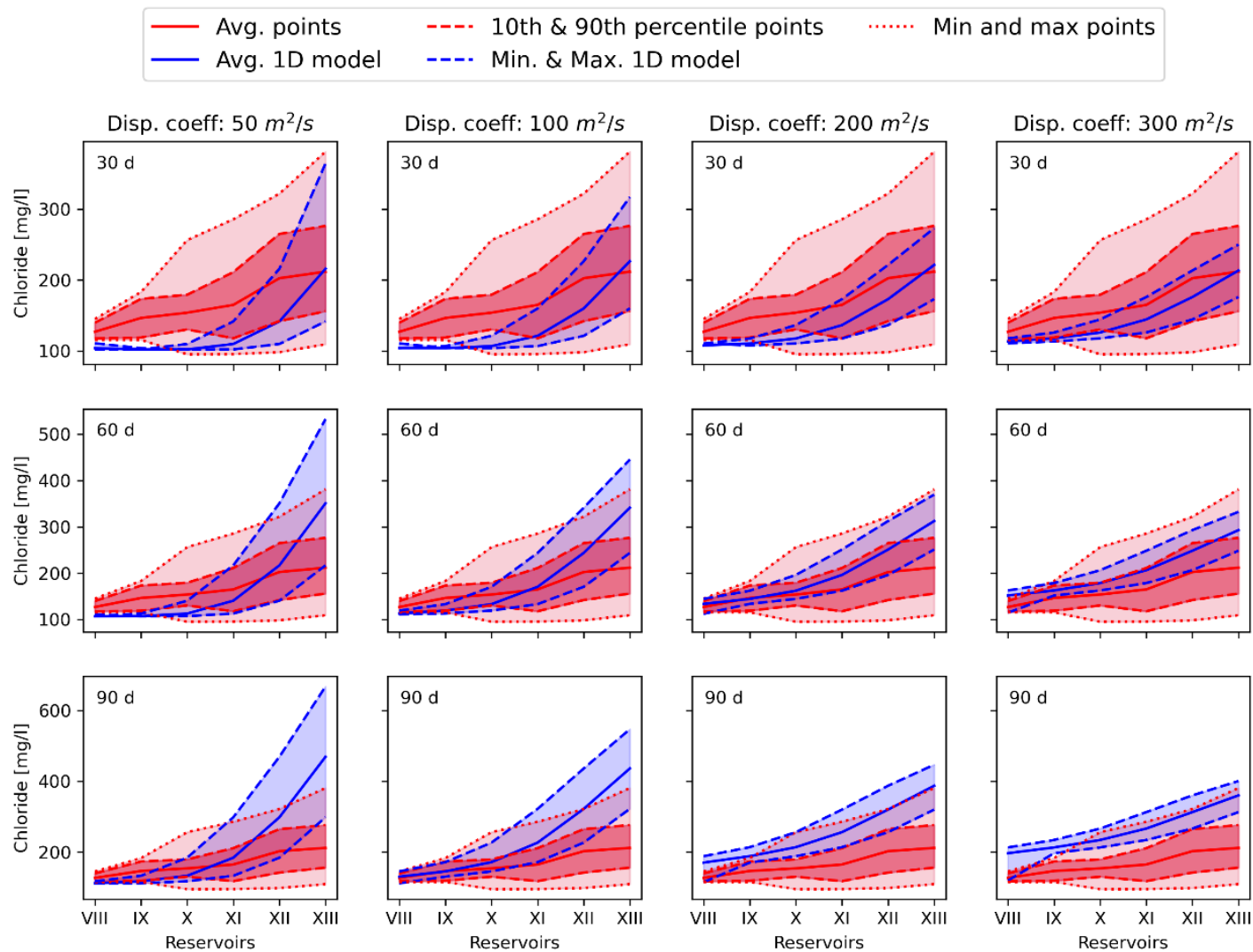
De resultaten van de 1D kalibratiesommen zijn weergegeven als de blauwe 'pluimen' in Figuur 19, waarbij verschillende dispersiecoëfficiënten (DC) zijn gehanteerd. De doorgetrokken lijn is de gesimuleerde chlorideconcentratie per bakje na x dagen en bij een specifiek DC. De blauwe 'pluim' is een weergave van de bandbreedte in chlorideconcentraties in het beneden- en bovenstrooms gelegen bakje, zoals beschreven in paragraaf 4.4.

Qua tijdsinterval lijkt een periode van ongeveer 45 dagen de meest geschikte vergelijkingsperiode van de 1D resultaten met de meetcampagne van 2018. Na 30 dagen ligt de blauwe lijn (gemiddeld genomen) nog onder de rode lijn, waaruit volgt dat er minder zout

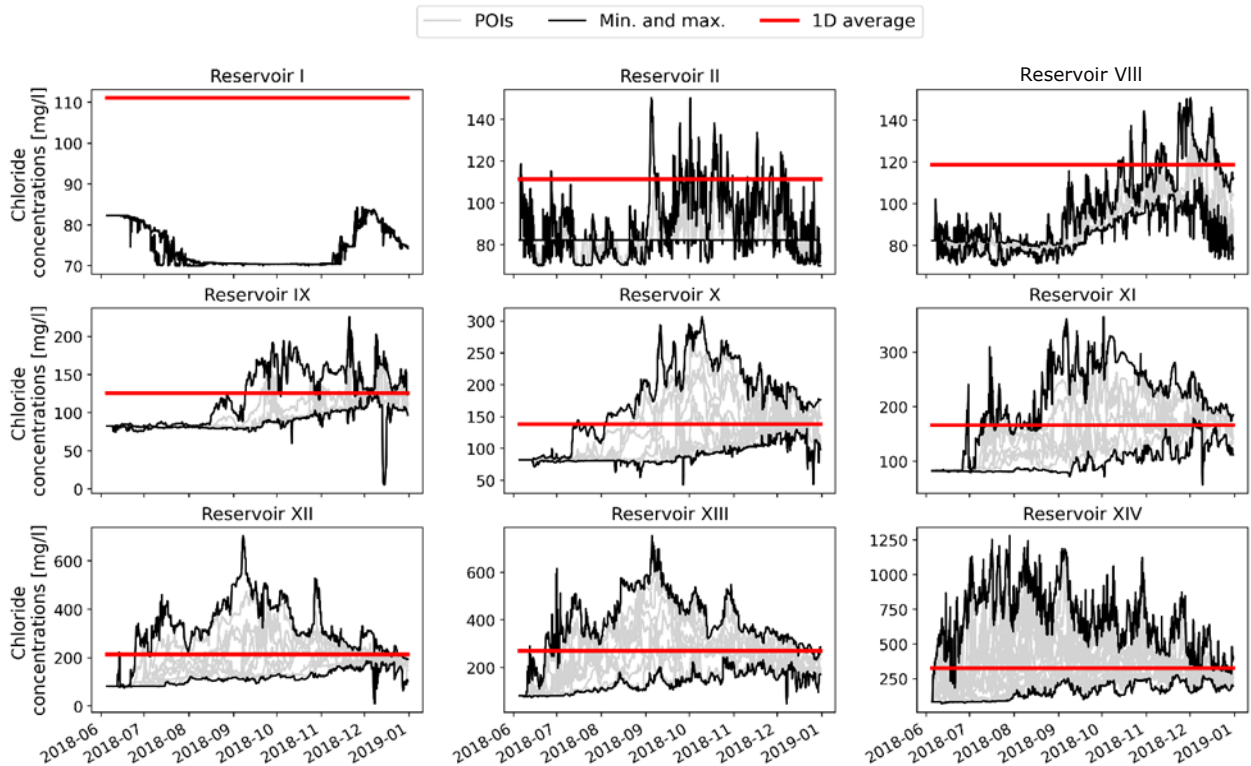
in het systeem zit. Na 60 dagen ligt de blauwe lijn juist iets boven de rode lijn. Voor deze kalibratieslag worden daarom primair de resultaten van 30 en 60 dagen beschouwd.

De resultaten van deze kalibratieanalyse zijn in lijn met de resultaten uit kalibratieslag 1 in paragraaf 4.4. De meetcampagne van het najaar 2018 suggereert dat de verspreiding van zout water in het IJsselmeer veel sneller plaatsvond dan dat de 1D modelresultaten met een gangbare DC van 50 m<sup>2</sup>/s laten zien. De resultaten met een hoge DC van 200 m<sup>2</sup>/s zijn beter in lijn met de meetcampagne. Dit bevestigt de hypothese dat de effecten van lokale (temporele) stromingspatronen in 2018 als gevolg van wind en andere afvoercondities, in het 1D-bakjesmodel kunnen worden verdisconteerd door de toepassing van een grotere DC. Hierbij moet worden opgemerkt dat deze mate van verdiscontering specifiek is voor de windcondities van 2018. Rustigere windcondities (zoals bijvoorbeeld het geval was tijdens de droogte van het jaar 2022) kunnen leiden tot lagere DC waardes. Echter, ook in 2022 leek de chlorideverhoging bij Andijk op te treden op het moment dat de weer- en windcondities omsloegen. Deze uitspraak is op basis van eerste indrukken en zal nog in meer detail onderzocht moeten worden aangezien 2022 in verschillende opzichten verschilt van 2018.

In Figuur 20 zijn de resultaten van het 3D model vergeleken met die van het 1D model (na 45 dagen met een DC van 200 m<sup>2</sup>/s). Voor de bakjes van het IJsselmeer, en dan met name de bakjes nabij de Afsluitdijk, is de grote variatie in gesimuleerde chlorideconcentraties op een bepaald moment duidelijk waarneembaar (verschil in de grijze lijnen). De met het 1D model berekende chlorideconcentraties na 45 dagen komen goed overeen met de bandbreedte aan gesimuleerde concentraties met het 3D model. Dit is met name het geval voor de bakjes nabij de Afsluitdijk (bakjes X t/m XIV). In de lager-genummerde bakjes (zuidoosten van het IJsselmeer) zijn grote verschillen waarneembaar. Deze verschillen worden voornamelijk veroorzaakt door de gekozen initiële condities in het 1D model (100 mg/l), die hoger zijn dan de concentraties die het 3D model in juli en juni berekent.



Figuur 19. Gemiddelde chlorideconcentratie na 30, 60 en 90 dagen in het 1D-model (blauwe pluimen) vergeleken met de chlorideconcentraties uit de meetcampagne 2018 (rode pluimen) voor de periode augustus en september. De vier verschillende geteste dispersiecoëfficiënten worden in horizontale richting gevisualiseerd.



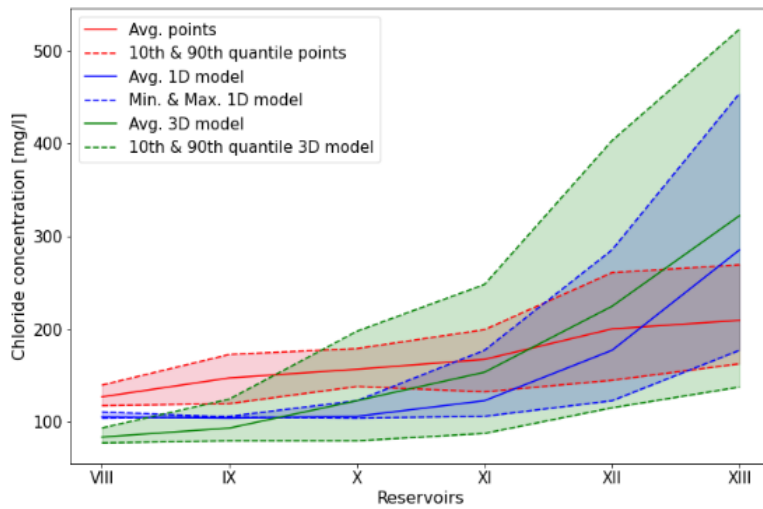
Figuur 20. Vergelijking tussen de output van het 3D model en het 1D model na 45 dagen (met een DC van 200 m<sup>2</sup>/s). De lichtgrijze POI's zijn de individuele tijdreeksen op de puntlocaties zoals gedefinieerd in Figuur 18. De zwarte lijnen geven op elk moment de spreiding van deze individuele chloridereeksen in elk reservoir aan. De rode lijn is de berekende concentratie met het 1D kalibratiemodel met een DC van 200 m<sup>2</sup>/s.

De resultaten van de 3D vs. 1D vergelijking zijn toegevoegd aan de visualisatie van de 1D vs meetcampagne vergelijking uit Figuur 19 (zie Figuur 21). Dit is gedaan voor twee 1D kalibratiemodel parameterisaties (blauwe pluim):

- na 45 dagen met een DC van 50 m<sup>2</sup>/s;
- na 45 dagen met een DC van 200 m<sup>2</sup>/s.

In Figuur 21 is te zien dat het resultaat van het 3D model een veel grotere (bakjesgemiddelde) chloride gradiënt over het IJsselmeer vertoont dan de meetcampagne uit 2018. Daarnaast is de berekende variatie in chlorideconcentratie binnen een bakje aanzienlijk groter. Wat de werkelijke situatie van 2018 is geweest, is moeilijk te zeggen, aangezien op zowel de meetcampagne als het 3D model kanttekeningen te plaatsen zijn. De meetcampagne is een analyse op slechts enkele locaties en specifieke momenten, het is niet mogelijk om een meetcampagne op te zetten die in zowel ruimte (ruimte dekkend) als tijd (consistent) compleet is. Sommige locaties zijn aanzienlijk minder bemeten dan andere. Aan de andere kant ligt er eveneens een grote onzekerheid in de aannames die ten grondslag liggen aan het 3D model (Genseberger, Fujisaki, & Eijsberg-Bak; 2020).

De resultaten van het opgebouwde 1D model met een DC van 200 m<sup>2</sup>/s liggen ergens in het midden van de resultaten van het 3D model en de meetcampagne. Hierdoor kan geconcludeerd worden dat het opgebouwde 1D-bakjesmodel naar behoren in staat is om (semi-stationaire en bakjesgemiddelde) berekeningen te doen; in lijn met de tot op heden best beschikbare modelinstrumenten, maar met een rekentijd van orde grootte seconden in plaats van dagen. Daarnaast is aangetoond dat met de 'aangrenzende bakje' theorie een realistisch beeld kan worden gegeven van de mogelijke pieken in chlorideconcentratie.



*Figuur 21. Gemiddelde chlorideconcentratie na 45 dagen in het 1D-model (blauwe pluimen) vergeleken met de chlorideconcentraties uit de meetcampagne 2018 (rode pluim), en de resultaten van de 3D modelering (groene pluim), voor de periode augustus en september. Voor het 1D model zijn twee DC waarden gebruikt: 50 m<sup>2</sup>/s (boven) en 200m<sup>2</sup>/s (rechts).*



# 5

## Resultaten

## 5 Resultaten

### 5.1 Overzicht hyperkubus

#### 5.1.1 Welke output?

In totaal bestaat de hyperkubus uit 4410 scenario's met verschillende combinaties van vrijheidsgraden die allen zijn doorgerekend met het ontwikkelde 1D-bakjesmodel. Op basis van de kalibratieresultaten (Hoofdstuk 4) is ervoor gekozen om het model door te rekenen met een DC van 200 m<sup>2</sup>/s, representatief voor een scenario met een grote impact van wind gedreven stroming (tegen de chloridegradiënt in). Daarmee is deze analyse een conservatieve doch realistische benadering, aangezien deze overeenkomt met de situatie (en systeemrespons) van de zomer van 2018.

Er wordt gekeken naar de verziltingsproblematiek gerelateerd aan de chlorideconcentratie van het water en de waterstand, aangezien beide parameters bepalend zijn voor de zoetwaterbeschikbaarheid. Wat betreft de waterstand ligt de focus op (zoet)waterbeschikbaarheid tijdens droge periodes, en niet het spectrum wateroverlast/waterveiligheid. Met betrekking tot de waterstand zijn de volgende outputparameters weggeschreven:

- waterstand (als functie van tijd);
- duur waarin het minimum peil wordt bereikt;
- percentage van de watervraag uit de regio dat niet bediend kan worden vanwege het gehanteerde minimum peil.

Het is een uitdaging *an sich* om de resultaten van >4000 simulaties te visualiseren. Door de resultaten in enkele figuren samen te vatten wordt weliswaar een goed overzicht van de volledige bandbreedte aan mogelijke uitkomsten gegeven, maar gaat een deel van de specifieke details van bepalende scenario's verloren. Dit hoofdstuk is daarom zodanig opgebouwd dat zowel het 'grote plaatje' als de 'belangrijke scenario specifieke details' helder worden gepresenteerd. In paragraaf 5.1.2 wordt eerst op hoofdlijn ingegaan op de uitkomsten van de volledige hyperkubus. Vervolgens zijn in paragraaf 5.2 twee indicatieve verhaallijnen uitgewerkt aan de hand van individuele scenario's over de omgang met verzilting als gevolg van een stijgende zeespiegel. In paragraaf 5.3 volgt een synthese van de uitkomsten van de gehele analyse

#### 5.1.2 Resultaten hyperkubus - eerste blik

Voor de stapsgewijze interpretatie van de resultaten van de hyperkubus worden in deze paragraaf de uitkomsten van alle berekeningen gepresenteerd als functie van één van de vrijheidsgraden. De (combinaties van) vrijheidsgraden zijn:

- debiet & chloridevracht rivieren;
- watervraag regionale systemen & netto verdampingoverschot;
- chloridelast regionale systemen & directe zoute kwel;
- netto debiet over de Afsluitdijk;
- netto chloridevracht over de Afsluitdijk.

##### 5.1.2.1 Minimale waterstanden

Figuur 22 en Figuur 23 tonen de minimale waterstanden van alle 4410 modelscenario's uitgezet tegen drie (combinaties van) vrijheidsgraden. De toegepaste modelmethodiek binnen het 1D-bakjesmodel zorgt ervoor dat de waterstand in alle bakjes gelijk is. Dit type figuur laat zien hoe gevoelig de outputparameter is voor verschillende vrijheidsgraden. Hieronder worden de figuren met als voorbeeld de rivierafvoer als vrijheidsgraad toegelicht.



Wanneer de IJsselafvoer  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  is, zakt de waterstand bij het overgrote deel van de scenario's (binnen 150 dagen<sup>5</sup>) uit tot het minimum peil van  $-0.4 \text{ m}$  NAP (523 van de 630 scenario's waarbij de IJsselafvoer  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  is). Bij een groot deel van deze scenario's daalt de waterstand vervolgens nog beneden dit minimum omdat ook er meer water verdampt en nodig is voor verziltingsbestrijding bij de Afsluitdijk dan wordt aangevoerd via de IJssel (379 van de 630 scenario's). In 144 van de doorgerekende scenario's zorgt beperking van de watervraag ervoor dat de waterstand niet onder het minimum peil zakt (zie Figuur 22). In Figuur 23-A is vervolgens te zien dat in de meest extreme scenario's het minimum peil al na 20 dagen wordt bereikt. In een groot deel van de scenario's wordt het minimum peil binnen 60 dagen bereikt (415 van de 523).

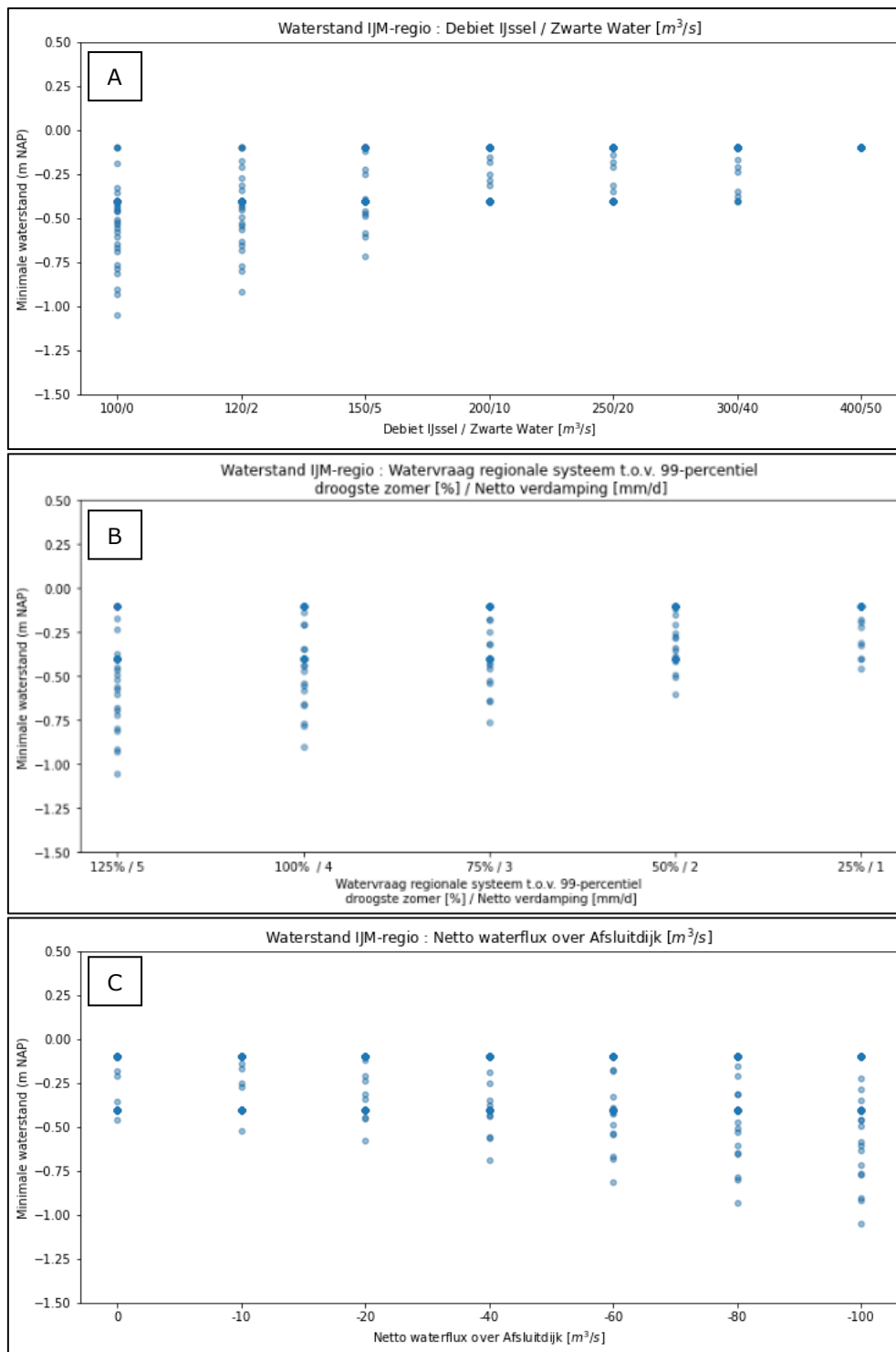
Wanneer de IJsselafvoer  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  is (en de afvoer van het Zwarte Water  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ ) treedt er in geen van alle doorgerekende scenario's uitzakkende waterstanden op. Dit is de reden dat in Figuur 23 geen punten bij dit scenario zichtbaar zijn, terwijl bij een IJsselafvoer van  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  er slechts 3 scenario's zijn waar de waterstand tot het minimum peil daalt. De verschillende stappen tussen het meest negatieve en positieve scenario laten de knelpunten in de zoetwatervoorziening zijn.

Samenvattend: bij een IJsselafvoer van minstens  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  kan het minimum peil in het IJsselmeergebied altijd gehandhaafd worden door in de droge jaren de watervraag vanuit de regio te beperken (zie Figuur 22). Bij een lagere IJsselafvoer, is het zelfs met een volledige beperking van de watervraag niet altijd mogelijk om het waterpeil op het minimum van  $-0,4 \text{ m}$  NAP te handhaven; deze ondergrens wordt dan meestal binnen 20 à 60 dagen bereikt. Zelfs bij een IJsselafvoer van  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  bestaan er combinaties van omstandigheden waarbij het waterpeil boven NAP  $-0,4 \text{ m}$  kan worden gehouden, mits de watervraag significant wordt gereduceerd.

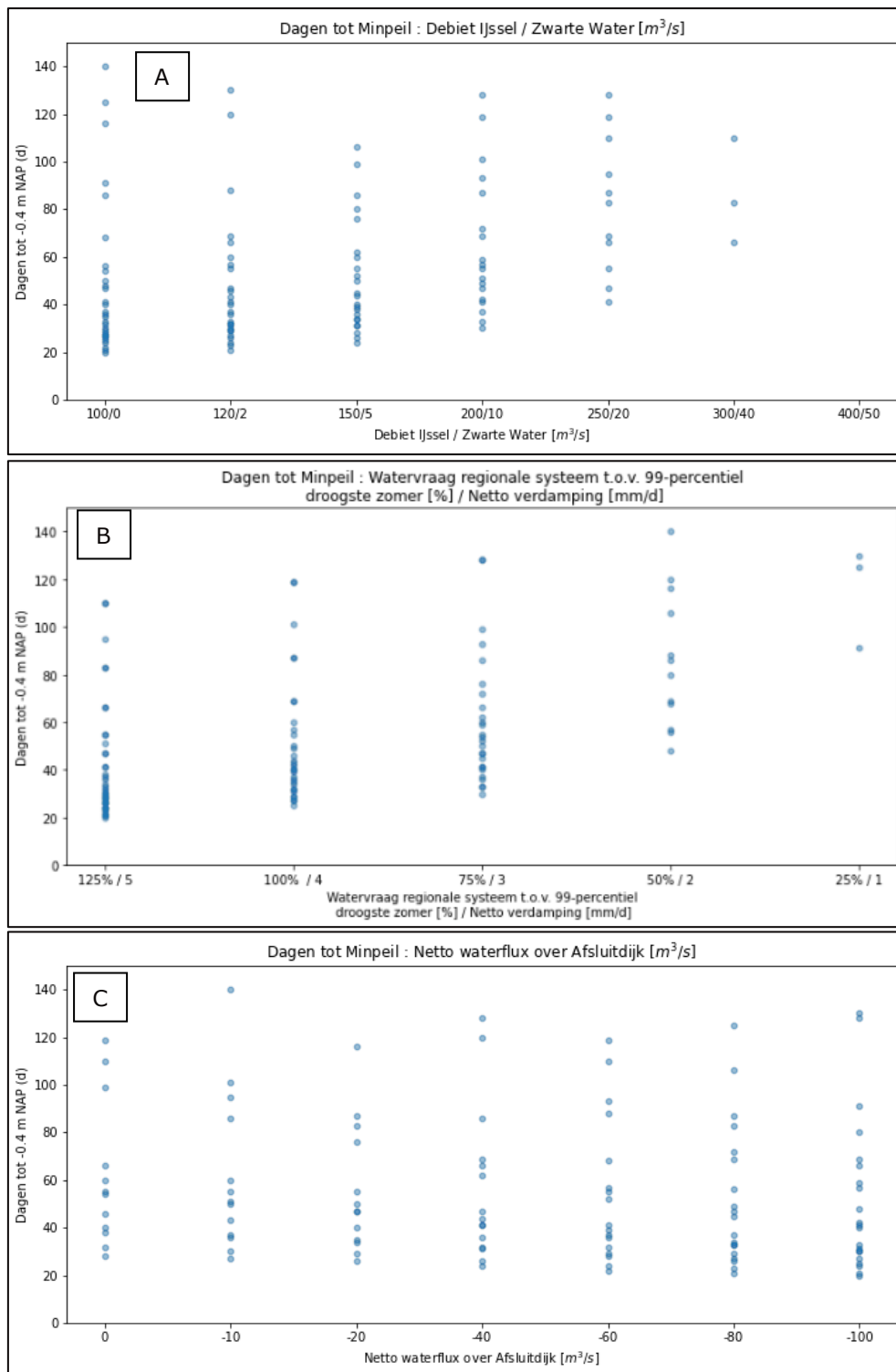
Door de toegepaste methodiek heeft ZSS in de gepresenteerde resultaten alleen directe invloed op de chloridevracht, en indirect invloed op de waterstand via het doorspoeldebiet (onderdeel van  $Q_{\text{netto}}$ ). Als gevolg van ZSS wordt  $Q_{\text{netto}}$  vergroot om zoutindringing tegen te gaan waardoor de peilondergrens ook bij hogere IJsselafvoeren en watervragen wordt bereikt.

---

<sup>5</sup> In dit voorbeeld worden de resultaten na 150 dagen gepresenteerd (de totale doorgerekende periode). Een debiet van  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  voor 150 dagen is uiteraard niet realistisch. Doordat het model semi-stationair is doorgerekend, kan de output ook worden geëvalueerd voor een korter aantal dagen. Daarom wordt in de figuren van paragraaf 5.3 de tijdscomponent ook meegenomen (de outputvariabele is afhankelijk van de tijd die bepaalde condities van vrijheidsgraden aanhouden).



Figuur 22. Minimale waterstanden van alle 4410 modelscenario's uitgezet tegen drie (combinaties van) vrijheidsgraden.

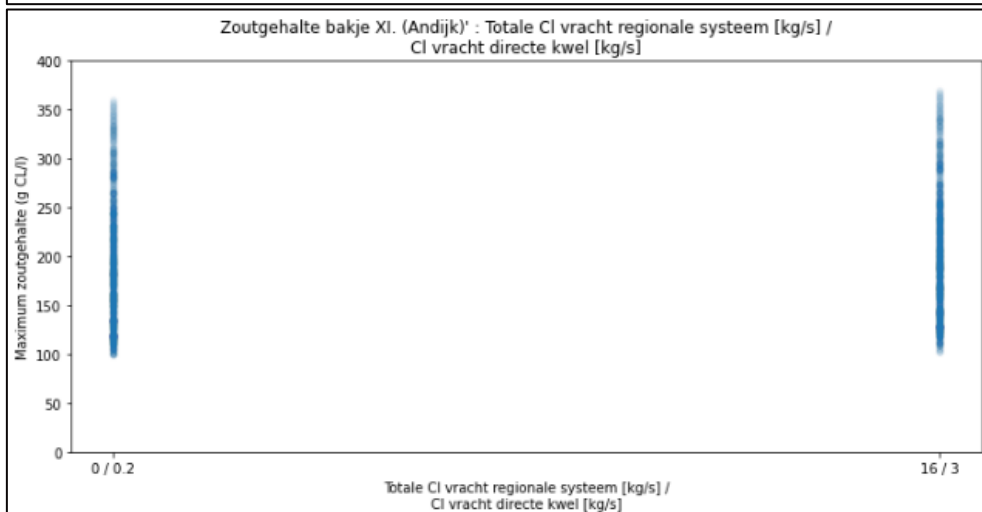
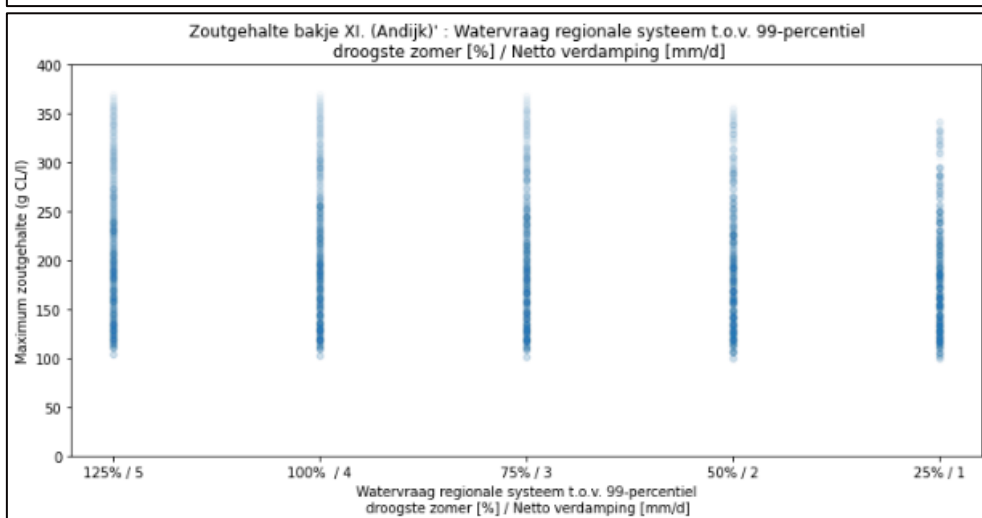
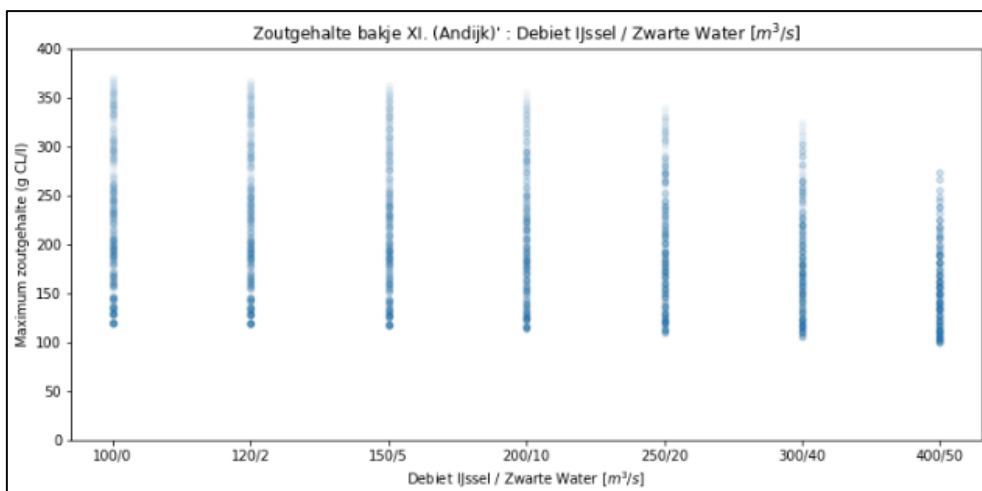


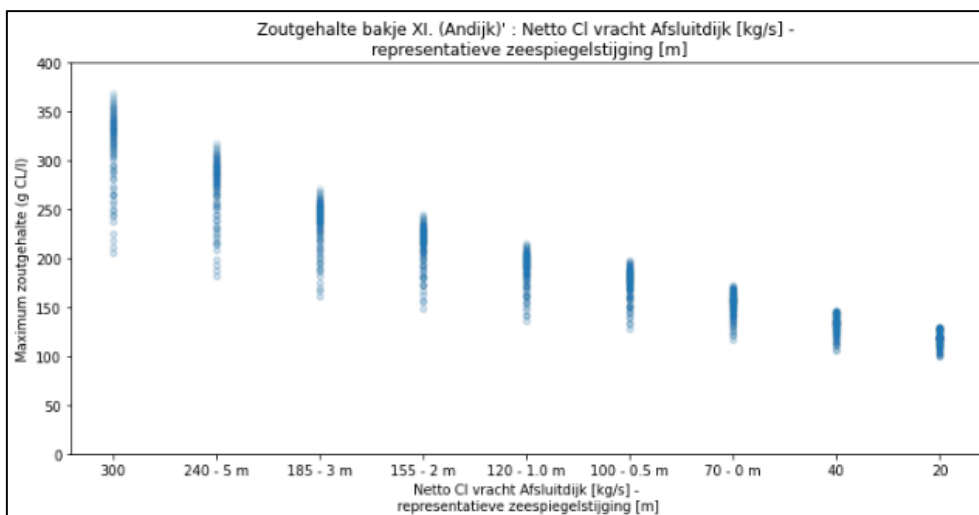
Figuur 23. Dagen tot minimum peil (-0.4 m NAP) van alle 4410 modelscenario's uitgezet tegen drie (combinaties van) vrijheidsgraden.

### 5.1.2.2 Chlorideconcentratie Andijk na 2 maanden

Paragraaf 5.1.2.1 toont het overzicht van de resultaten met waterstanden als outputparameter. In Figuur 24 is ditzelfde overzicht gegeven voor de chlorideconcentratie in het bakje Andijk (bakje XI) na 2 maanden. De resultaten laten duidelijk zien dat de chlorideconcentratie in bakje Andijk in zeer grote mate afhankelijk is van de chloridevracht over de Afsluitdijk. Wat verder op valt, is de minimale impact van de chloridevracht uit het

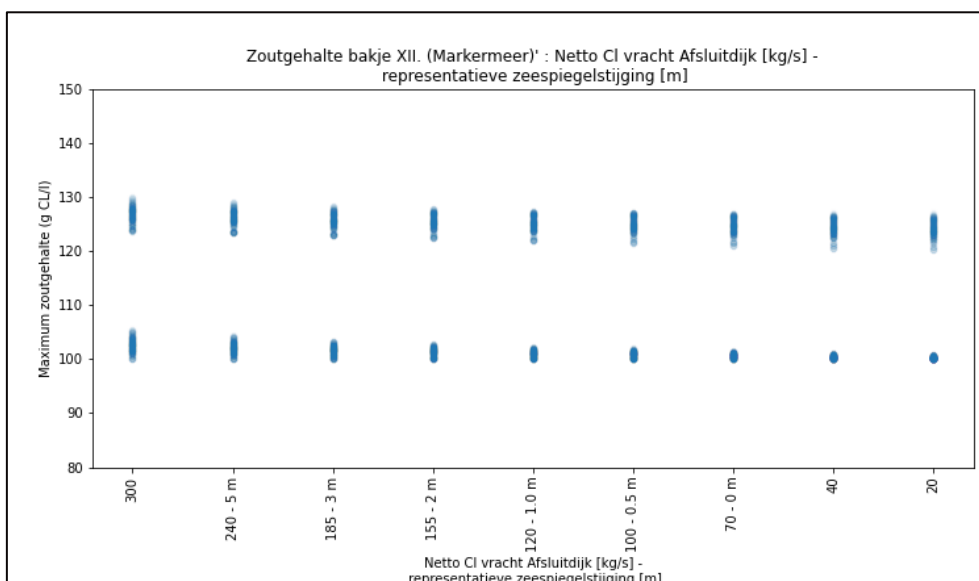
regionale systeem en via zoute kwel. Deze impact is nog kleiner dan de impact van de chloridelast via rivierafvoeren en de concentratie als gevolg van verdamping. Hierbij moet wederom opgemerkt worden dat het 1D-bakjesmodel enkel een indicatie geeft van de gemiddelde concentraties in bakjes en de gemiddelde verspreiding van chloride door de regio. In de praktijk kan het zo zijn dat een uitlaat vanuit bijvoorbeeld de Wieringermeerpolder (als de reguliere bemaling naar de Waddenzee buiten bedrijf is) wel degelijk een chloridepiek bij meetpunt Andijk veroorzaakt. Zoals aangegeven in 3.4.1.3 wordt de lokale impact van individuele gemalen niet meegenomen in het model. Hierdoor is het mogelijk dat de impact van de chloridevracht van gemaal Lely op de concentratie bij Andijk in het model wordt onderschat.

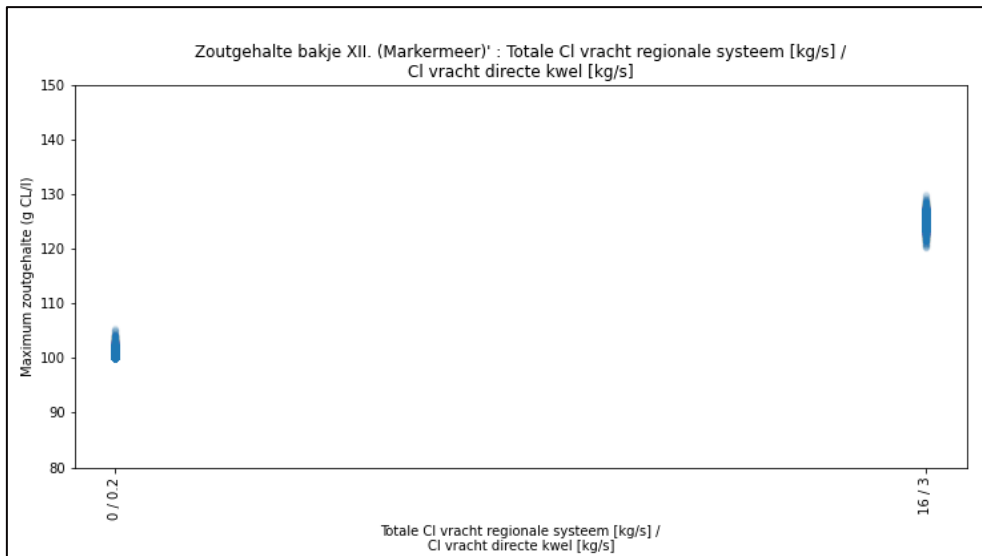




Figuur 24. Chlorideconcentratie in bakje Andijk na twee maanden voor alle 4410 modelscenario's uitgezet tegen vier (combinaties van) vrijheidsgraden.

In tegenstelling tot het IJsselmeer zijn de chlorideconcentraties in het Markermeer in zeer beperkte mate afhankelijk van de chloridelast bij de Afsluitdijk (Figuur 25), het zoutfront moet immers eerst ter hoogte van de Krabbersgatsluizen terecht komen voordat het impact heeft op het Markermeer. Hieruit volgt dat de chlorideconcentratie in het Markermeer nauwelijks (direct) wordt beïnvloed door een stijgende zeespiegel. Figuur 25 toont voor het Markermeer dat de afvoer vanuit het regionale systeem vanuit de onderzochte vrijheidsgraden het meest bepalend is voor de chlorideconcentratie. Omdat de focus van deze studie ligt op de impact van zeespiegelstijging, is de dynamiek die verzilting op het Markermeer veroorzaakt in minder detail beschouwd. Zo zijn er slechts twee vrijheidsgraden gebruikt voor de regionale chloridelast (0 kg/s en 16 kg/s). Ook is voor iedere berekening een initiële chlorideconcentratie van 100 mg/l gebruikt omdat het IJsselmeer in de zomers meer verzilt, maar meestal ook goed kan ontladen tot deze initiële concentratie als gevolg van de doorspoeling van IJssel- en Markermeer met IJsselwater in de winter. Voorts heeft de verziltingsproblematiek op het Markermeer -in tegenstelling tot het IJsselmeer- een minder sterke seizoen dynamiek. Een zorgvuldige analyse naar de verziltingsdynamiek van het Markermeer vraagt daarom een methodiek met minder focus op zeespiegelstijging en meer aandacht en detail voor de laterals van en naar het Markermeer (vooral de afvoer van de Eem, het bemalingsregime in zuidelijk Flevoland en Noord-Holland, en de interactie met het Noordzeekanaal).





Figuur 25. Chlorideconcentratie in het Markermeer (bakje VII) na twee maanden voor alle 4410 modelscenario's uitgezet tegen twee (combinaties van) vrijheidsgraden.

Samenvattend: De chlorideconcentratie van het IJsselmeer wordt voornamelijk bepaald door de inkomende zoutvracht over de Afsluitdijk. De chlorideconcentratie van het Markermeer wordt daarentegen nauwelijks beïnvloed door de zoutvracht over de Afsluitdijk, en is voornamelijk afhankelijk van het bemalingsregime in zuidelijk Flevoland.

## 5.2 Karakteriseren van handelingsperspectief om de houdbaarheid van de KZH te vergroten

In deze paragraaf worden enkele berekeningen met het 1D-bakjesmodel in hoger detail geanalyseerd om het gedrag van het IJsselmeergebied onder de onderzochte combinaties van vrijheidsgraden verder te verklaren. Hiertoe zijn twee verhaallijnen uitgewerkt waarmee wordt geïllustreerd hoe de uitgevoerde modeloefening inzichten biedt in de houdbaarheid en oprekbaarheid van het IJsselmeergebied op het gebied van zoetwatervoorziening.

### 5.2.1 Verhaallijn: toenemende zoutvracht door ZSS en invloed extra spuien

Doordat het 1D-bakjesmodel het geïntegreerde effect van de verschillende processen simuleert, kan het worden gebruikt om de gevolgen van varianten te analyseren bij een toenemende zeespiegelstijging. In dit voorbeeld heeft ZSS een extra zoutlast op het IJsselmeer tot gevolg, dat mogelijk is te mitigeren door extra te spuien. Vervolgens ligt de vraag voor: wat heeft extra spuien voor consequenties voor de waterstanden op het IJsselmeer? En op de ontwikkeling van de chlorideconcentraties? En in hoeverre kan het als robuuste maatregel dienen om de houdbaarheid van het zoetwatervoorziening van uit het IJsselmeer te versterken?

Om deze vragen te beantwoorden, zijn de resultaten van drie modelscenario's weergegeven in Figuur 26:

**Scenario 800 (zeer droge zomer en 0.2 m ZSS):** dit is het uitgangsscenario dat als representatief mag worden beschouwd voor een zeer droge zomer onder omstandigheden die veel lijken op de huidige droge zomers:

- een lage IJsselafvoer ( $120 \text{ m}^3/\text{s}$ );
- hoge watervraag vanuit het regionale systeem (99 percentiel);
- hoge verdamping ( $4 \text{ mm/dag}$ );
- ZSS van  $0.2 \text{ m}$  waardoor de chloridevracht door schutten en lekkage via de sluiscomplexen van de Afsluitdijk ongeveer  $77 \text{ kg/s}$  bedraagt (lekkagedebiet is ongeveer  $7 \text{ m}^3/\text{s}$ , zie Tabel 4).

Dit scenario lijkt globaal gezien op de maanden juli en augustus van 2018. Er is er een groot watertekort en er wordt gemiddeld weinig gespuid:  $17 \text{ m}^3/\text{s}$ , waardoor de netto waterflux over de Afsluitdijk  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  betreft. Voor dit scenario nemen we aan dat het gespuide water een chlorideconcentratie heeft van  $400 \text{ mg/l}$ . De netto chloridevracht over de Afsluitdijk komt daarmee uit op  $70 \text{ kg/s}$ .

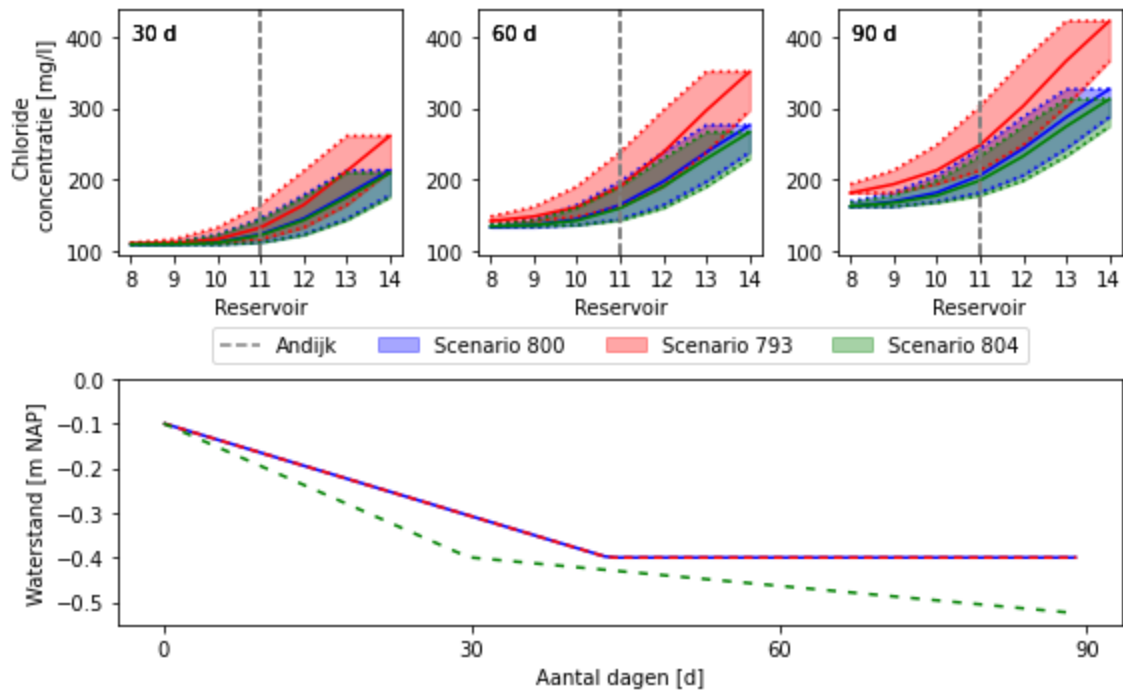
De resultaten van dit scenario zijn in blauw weergegeven in Figuur 26. Als de situatie 60 dagen aanhoudt, kan er bij Andijk een gemiddelde chlorideconcentratie van ruim  $150 \text{ mg/l}$  worden verwacht, met uitschieters tot ongeveer  $200 \text{ mg/l}$ . De waterstand op het IJsselmeer is uitgezakt tot  $-0.4 \text{ m}$  NAP, maar door de regionale onttrekkingen te beperken, kan dit minimumpeil gehandhaafd blijven (in werkelijkheid wordt er uiteraard al eerder gekort op de watervraag).

**Scenario 793 (zeer droge zomer, ZSS 0.7m):** dit is exact hetzelfde scenario als het uitgangsscenario, maar dan met een zeespiegelstijging van  $0.7$  meter. Hierdoor neemt de chloridevracht door schutten en lekkage via de sluiscomplexen van de Afsluitdijk toe tot  $110 \text{ kg/s}$  (lekkagedebiet is  $11 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Er wordt in dit scenario  $21 \text{ m}^3/\text{s}$  gespuid, waardoor de netto waterflux over de Afsluitdijk  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  betreft. De netto chloridevracht over de Afsluitdijk komt daarmee uit op ongeveer  $100 \text{ kg/s}$ .

Het gevolg van dit hogere zeespiegelscenario is dat er bij Andijk na 60 dagen een gemiddelde chlorideconcentratie van  $200 \text{ mg/l}$  mag worden verwacht, met uitschieters tot  $250 \text{ mg/l}$  (rode resultaten in Figuur 26).

**Scenario 804 (zeer droge zomer, ZSS 0.7m, ca 4x meer spuien):** de chlorideconcentraties bij Andijk komen in scenario 793 na 60 dagen ver boven de norm van  $150 \text{ mg/l}$ . Om deze hoge chlorideconcentraties te mitigeren, zijn verschillende maatregelen denkbaar. Een hiervan is het vergroten van het spuidebiet. In scenario 804 geldt als uitgangspunt een vergelijkbare verziltingsbestrijdingsefficiëntie ( $400 \text{ mg/l}$ ) in combinatie met een verviervoudiging van het spuidebiet. Door  $91 \text{ m}^3/\text{s}$  te spuien in plaats van  $21 \text{ m}^3/\text{s}$  wordt er via het spuien ongeveer  $30 \text{ kg/s}$  chloride extra afgevoerd. De netto chloridevracht over de Afsluitdijk komt daarmee uit op  $70 \text{ kg/s}$ .

De groene resultaten in Figuur 26 laten zien dat deze maatregel resulteert in een afname van de zoutverspreiding op het IJsselmeer. Echter, om dit spuibeheer mogelijk te maken wordt  $30 \text{ cm}$  aan zoetwaterbuffer van de IJsselmeergebied binnen een maand uitgeput. Zelfs als de volledige watervraag vanuit de regio na deze maand wordt gekort, is er onvoldoende water om te voorkomen dat de waterstand verder uitzakt.



Figuur 26. Scenario met toenemende zeespiegelstijging, toenemende chloridelast, maar volledige compensatie hiervan door toenemend spuidebiet terwijl de efficiëntie van de verziltingsbestrijding bij de Afsluitdijk gelijk blijft.

Deze 'verhaallijn' laat zien dat het mitigeren van de effecten van ZSS op de kwaliteit van het water door meer te spuien gevolgen heeft voor de beschikbare zoetwaterbuffer in het IJsselmeergebied. Het is dan ook de vraag in hoeverre deze maatregel als wenselijk kan worden beschouwd: In extreem droge scenario's is dit spuidebiet niet voor handen, en werkt de maatregel met de hier toegepaste verziltingsbestrijdingsefficiëntie averechts voor de waterbeschikbaarheid.

### 5.2.2 Verhaallijn: verhogen effectiviteit verziltingsbestrijding bij Afsluitdijk als mitigatie voor toenemende zoutvracht door ZSS

In deze 'verhaallijn' wordt het 1D-bakjesmodel ingezet ter illustratie van de impact van 2 m ZSS op de chlorideconcentraties op het IJsselmeer. Vervolgens is geanalyseerd wat er gebeurt als deze extra chloridelast wordt gecompenseerd door een maatregel te treffen waarmee de inkomende zoutlast bij de Afsluitdijk efficiënter wordt afgevoerd. Wat zijn dan de consequenties voor de waterstanden op het IJsselmeer? En voor de chlorideconcentraties?

Om deze vragen te beantwoorden, zijn de resultaten van drie modelscenario's gegeven in Figuur 27:

**Scenario 5000 (zeer droge zomer en 0 m ZSS):** dit is het uitgangsscenario dat representatief is voor een zeer droge zomer met lage IJsselafvoer ( $120 \text{ m}^3/\text{s}$ ), hoge watervraag vanuit het regionale systeem (99-percentiel), en hoge verdamping ( $4 \text{ mm}/\text{dag}$ ). Voorts wordt uitgegaan van 0 m ZSS, een spuidebiet van  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  met een gemiddelde chlorideconcentratie van  $600 \text{ mg}/\text{l}$ . De netto chloridevracht over de Afsluitdijk komt daarmee uit op ongeveer  $46 \text{ kg}/\text{s}$ .

De resultaten van dit scenario zijn in blauw weergegeven in Figuur 27. Als de 60 dagen aanhoudt, kan er bij Andijk een gemiddelde chlorideconcentratie van bijna  $150 \text{ mg}/\text{l}$  worden verwacht. Een buffer van 30 cm wordt binnen iets minder dan 40 dagen verbruikt.

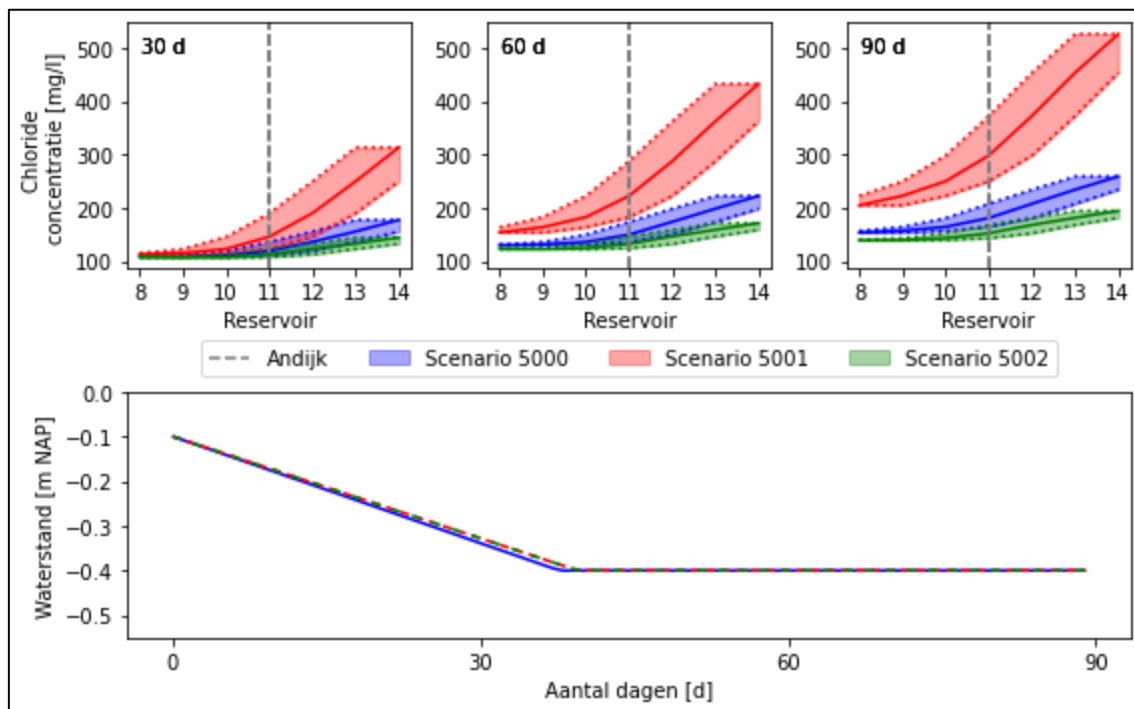


**Scenario 5001 (zeer droge zomer en 2 m ZSS):** dit is exact hetzelfde scenario als het uitgangscenario, maar dan met een zeespiegelstijging van 2 meter waardoor de zoutlast door schutten en lekkage via de sluiscomplexen van de Afsluitdijk toeneemt tot 155 kg/s. Er wordt in dit scenario 40 m<sup>3</sup>/s afgevoerd met dezelfde efficiëntie als het voorgaande scenario, waardoor de netto chloridevracht over de Afsluitdijk uitkomt op ongeveer 131 kg/s.

Dit resulteert bij Andijk na 60 dagen in een gemiddelde chlorideconcentratie van 230 mg/l met uitschieters tot 300 mg/l (rode resultaten in Figuur 27).

**Scenario 5002 (zeer droge zomer, 2 m ZSS en selectief onttrekken met pompen):** Om deze hoge chlorideconcentraties te mitigeren, is het wenselijk de zoutlast efficiënter af te voeren; bijvoorbeeld door selectief te onttrekken via de pompen op de Afsluitdijk. Hiermee kan het zoutere water vanuit de diepere erosiekuilen/vaargeulen worden afgevoerd en de chlorideconcentratie van het af te voeren water worden verhoogd (in dit voorbeeld nemen is een chlorideconcentratie van 3000 mg/l gehanteerd). Net als bij de voorgaande twee scenario's wordt er 40 m<sup>3</sup>/s vanuit het IJsselmeer naar de Waddenzee afgevoerd. De netto chloridevracht over de Afsluitdijk komt daarmee uit op 35 kg/s.

De groene resultaten in Figuur 27 laten zien dat deze maatregel resulteert in een afname van de zoutverspreiding op het IJsselmeer, de verspreiding is zelfs lager dan het uitgangscenario bij 0 m ZSS. Deze 'verhaallijn' laat zien dat het mitigeren van de effecten van ZSS door selectieve onttrekking (efficiënt chloride afvoeren) in potentie een zeer geschikte oplossing is.



Figuur 27. Scenario met toenemende zeespiegelstijging waarbij de chloridelast toeneemt en vervolgens wordt gecompenseerd door het plaatsen van pompen waarmee water efficiënter (in hogere concentratie) gespuid kan worden.

### 5.3 Algemene synthese hyperkubus

In Figuur 28 en Figuur 29 worden de resultaten van de met het 1D-bakjesmodel doorgerekende hyperkubus gepresenteerd. Figuur 28 focust op de resultaten die betrekking hebben op de waterbalans. Figuur 29 focust op de resultaten die betrekking hebben op de chlorideconcentraties in het bakje Andijk. Het is belangrijk om te beseffen dat de gekozen bandbreedtes van de vrijheidsgraden bepalend zijn voor percentages die in Figuur 28 en Figuur 29 worden getoond. Deze analyses zeggen dan ook niks over de kans dat een bepaald

scenario voorkomt. Binnen de 4410 doorgerekende scenario's zit ook een aantal combinaties van vrijheidsgraden die relatief onwaarschijnlijk zijn, bijvoorbeeld een zeer groot spuidebiet bij hele lage rivierafvoeren. Echter, de hyperkubus is opgesteld na een uitgebreide analyse (Hoofdstuk 2 en 3) waardoor de bandbreedte aan vrijheidsgraden het gehele speelveld van potentiële scenario's in droge periodes vertegenwoordigt (rekening houdend met *pressures* als klimaatverandering en zeespiegelstijging). De figuren zijn daarom zeer geschikt om de (relatieve) gevoeligheid van vrijheidsgraden en zelfs knikpunten met betrekking tot zoetwaterbeschikbaarheid te identificeren.

### 5.3.1 Synthese waterkwantiteit

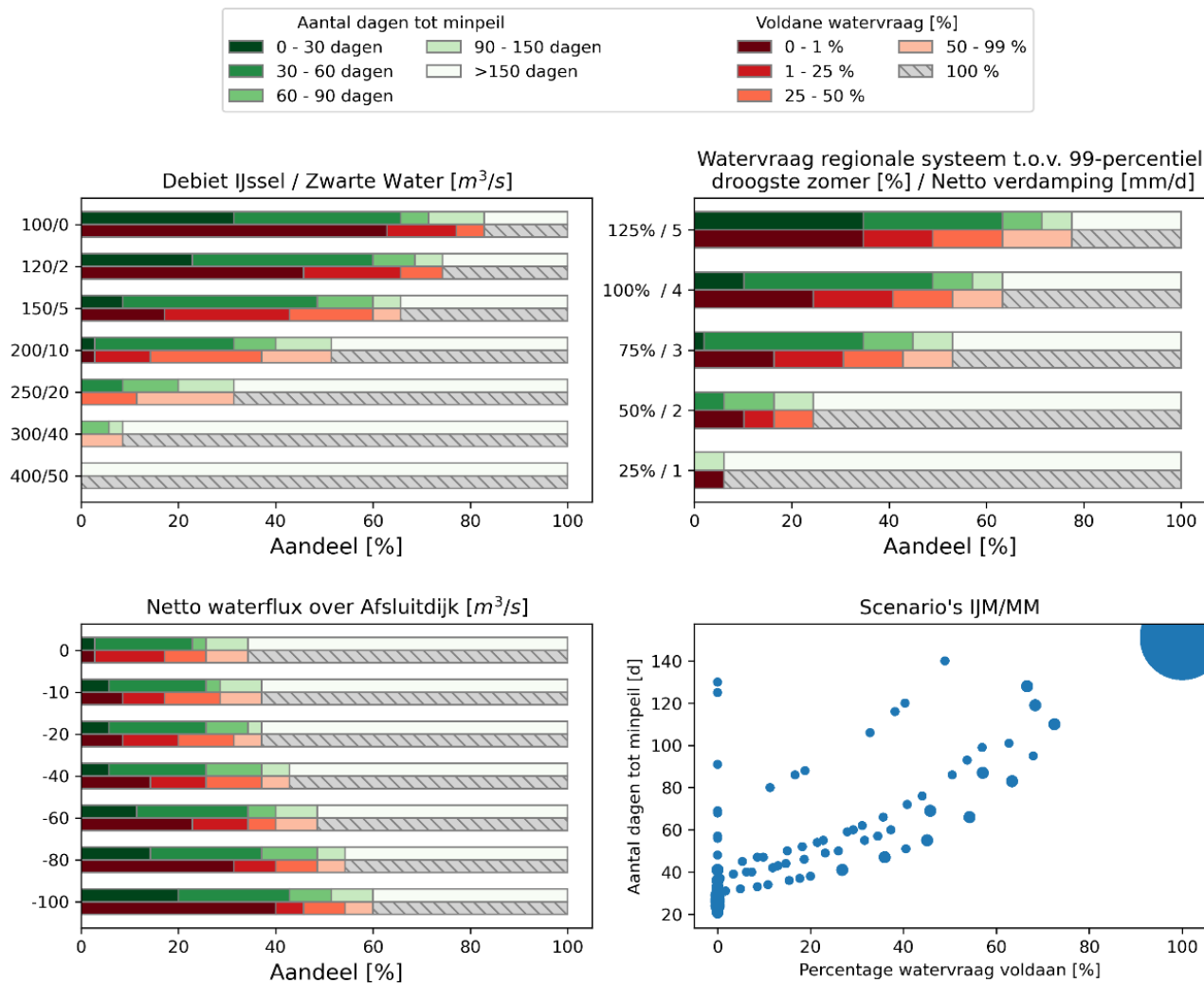
Wanneer alle vrijheidsgraden worden beschouwd binnen het spectrum van de toegepaste bandbreedtes, dan kan de gevoeligheid van iedere vrijheidsgraad bepaald worden (let op: dit is dus een gevoeligheid waar de factor 'kans' niet in is meegenomen). De variatie in de balkjes van Figuur 28 en Figuur 29 zijn een maat voor deze gevoeligheid. Voor de waterstand is deze analyse simpel: hoe groter de bandbreedte, hoe groter de gevoeligheid. Er kan geconcludeerd worden dat de rivierafvoeren de meest bepalende factor is om de zoetwaterbuffer van de IJsselmeerregio gedurende de zomer in stand te houden. Dit komt doordat voor deze vrijheidsgraad de grootste bandbreedte is aangenomen: van 100 m<sup>3</sup>/s tot 400 m<sup>3</sup>/s. De gekoppelde regionale watervraag en netto verdamping zijn bijna net zo, maar net iets minder bepalend. De bandbreedte voor de combinatie van deze vrijheidsgraden is namelijk -63 m<sup>3</sup>/s tot -316 m<sup>3</sup>/s.

Figuur 28 laat naast deze simpele gevoeligheidsanalyse ook zien hoe het systeem reageert gegeven één constante vrijheidsgraad. Bijvoorbeeld: wanneer de watervraag vanuit de regio over 150 dagen gemiddeld 75% van de huidige 99-percentiel droogste zomer betreft (147 m<sup>3</sup>/s), en de gemiddelde netto verdamping uit open water 3 mm is, dan wordt in iets meer dan 50% van alle scenario's een waterbuffer van 30 cm (-0.1 tot -0.4 m NAP) gebruikt. In slechts 3% van de scenario's gebeurt dit binnen 30 dagen, in 35% van de scenario's gebeurt dit binnen 60 dagen. Wanneer de watervraag vanuit de regio slechts 50% van de 99-percentiel waarde bedraagt, is de impact op waterstanden aanzienlijk kleiner. In die gevallen kan met een buffer van 30 cm voor alle berekeningen 30 dagen worden overbrugd. Dit kan zelfs als alle andere vrijheidsgraden zeer ongunstig uitvallen.

Eenzelfde knikpunt kan worden waargenomen wanneer de IJsseldebieten rond de 200 m<sup>3</sup>/s of lager komen. Het aantal scenario's waarin de waterstand binnen 60 dagen uitzakt tot het minimum peil neemt dan snel toe.

Om de echte gevoeligheid voor een vrijheidsgraad in kaart te brengen is het noodzakelijk om de kans en variabiliteit mee te nemen. Als de variabiliteit binnen de toegepaste bandbreedte van regionale watervraag groter is (lees: de kans op extremen is groter) dan de variabiliteit van bijvoorbeeld rivierafvoer, dan zal in veel droge zomers juist neerslag en verdamping bepalend zijn voor waterstanden in de buffer. In deze studie is deze kans nadrukkelijk niet meegenomen, daarom kan over de statistische gevoeligheid van vrijheidsgraden geen uitspraak worden gedaan.

Omdat het Markermeer en IJsselmeer in het model in continue verbinding met elkaar staan via de Krabbersgatsluizen en de Houtribsluizen zijn de waterstand resultaten op het Markermeer exact gelijk aan de resultaten van Figuur 28.



Figuur 28. Resultaten van de doorgerekende hyperkubus met betrekking tot de waterbalans in de IJsselmeerregio. Voor drie (combinaties van) vrijheidsgraden wordt getoond welk aandeel (%) van de 4410 scenario's helemaal uitzakt tot het minimum peil van -0.4 m NAP en in hoeveel dagen dat gebeurt (zie bovenste balk met groentinten). In de onderste balk met oranje tinten wordt getoond met hoe veel procent de watervraag vervolgens moet worden gekort als het minimum peil bereikt is. Al het minimumpeil niet wordt bereikt is de voldane watervraag vanzelfsprekend 100%. In het figuur recht onder worden alle scenario's geplott als functie van de twee assen: 'Percentage watervraag voldaan na bereiken van minimum peil' en 'Aantal dagen tot minimum peil'.

### 5.3.2 Synthese chlorideconcentratie Andijk

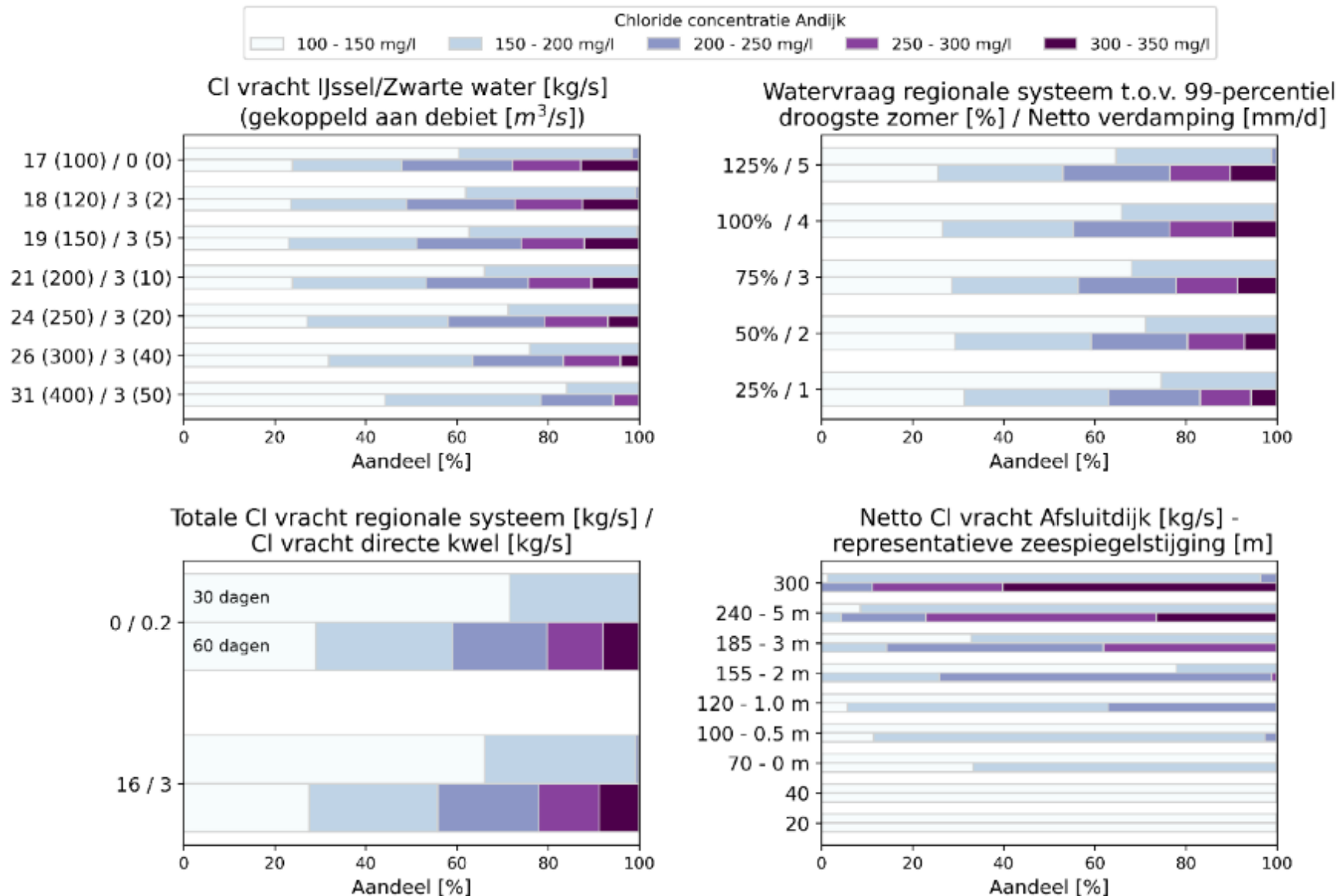
Uit de modellering blijkt dat de netto chloridevracht over de Afsluitdijk (welke direct gerelateerd is aan de mate van ZSS) veruit de meest bepalende factor is voor de gemiddelde chlorideconcentraties in het IJsselmeer (Figuur 29 illustreert dit aan de hand van bakje Andijk). Bij netto chloridevrachten tot 40 kg/s zijn er geen scenario's waarin de gemiddelde concentratie binnen 60 dagen boven de 150 mg/l uit komt. Bij een netto chloridevracht van 70 kg/s (wat gegeven de aannames voor spui- en schutlekkage equivalent is voor een scenario met 0m ZSS waarbij niet wordt gespuid) komt de chloridevracht in 65% van de scenario's na 60 dagen boven de 150 mg/l.

Voor een droogteperiode van 30 dagen met een netto chloridevracht van 120 kg/s (equivalent voor 1 m ZSS waarbij niet wordt afgevoerd/gespuid) zijn er geen scenario's waar de gemiddelde concentratie bij Andijk tot boven de 150 mg/l uitkomt. Na 60 dagen wordt 150 mg/l bij Andijk in bijna alle scenario's overschreden. Dit gegeven illustreert het belang van de duur van een droogteperiode. Een duidelijke conclusie is dat de toenemende zoutvracht die met ZSS gepaard gaat tot een structurele verzilting van het IJsselmeer kan leiden.

De chloridevracht van de IJssel is gekoppeld aan de debieten, een groter debiet betekent een grotere totale chloridevracht, maar door een gelijke basisvracht heeft dit water wel een lagere concentratie. Als het debiet en de totale chloridevracht toenemen neemt de concentratie van het water dus af. Daarnaast resulteert een grotere IJsselaflow in meer advectief transport in de richting van de Afsluitdijk waardoor de intrusie van zout wordt tegengegaan.

Uit de berekeningen blijkt dat zoute kwel en resulterende chloridevracht vanuit het regionale systeem slechts zeer beperkt van invloed zijn op de chlorideconcentraties in het IJsselmeer. Ditzelfde geldt voor de concentratieveranderingen als gevolg van neerslag en verdamping. Voor het Markermeer dan is de chloridevracht vanuit het regionale systeem juist bepalend voor de chlorideconcentraties. De omzetting van het bemalingsregime in zuidelijk Flevoland op korte termijn een stijging van het chloridegehalte van 80 mg/l (tot boven 200 mg/l) in het Markermeer veroorzaken en waardoor het water uit het Markermeer ongeschikt is als grondstof voor drinkwater (Bonte & Zwolsman, 2010). Vanwege de gekozen initiële concentratie van 100 mg/l (te laag voor het Markermeer) en de beperkte focus op de impact van het regionale systeem (slechts twee vrijheidsgraden toegepast) komt de concentratie in het Markermeer in geen van de berekeningen na twee maanden boven de 150 mg/l (Appendix A). Na 150 dagen zijn er wel scenario's waar de chlorideconcentratie boven de 200 mg/l uit komt.

Bij beoordeling van de resultaten is er gefocust op de chloridenormen die gelden voor drinkwaterwinning. Voor gebruiksdoelen met een norm van 450 mg/l (landbouw en peilbeheer) kan de zoetwaterbuffer in het IJsselmeergebied veel langer gehandhaafd blijven. In dat geval kan ook bij 3 meter zeespiegelstijging een periode van 2 maanden zonder doorspoeling overbrugd worden voor inlaten die ter hoogte van Andijk liggen. Voor inlaten die dicht bij de Afsluitdijk liggen is de houdbaarheid uiteraard lager. Dit betekent dat mitigatie via het gebruiksdoel drinkwater (verplaatsen inname, klimaatbuffer, ontzilting, etc.) zeer kansrijk is.



Figuur 29. Resultaten van de doorgerekende hyperkubus voor chlorideconcentraties in het bakje Andijk. Voor vier (combinaties van) vrijheidsgraden wordt getoond welk aandeel (%) van de 4410 scenario's een bepaalde gemiddelde chlorideconcentratie in het bakje Andijk berekend. Hiervoor zijn twee meetmomenten gekozen: na 30 dagen (bovenste balk) en na 60 dagen (onderste balk). Voor deze resultaten is het 1D-bakjesmodel doorgerekend met een dispersiecoëfficiënt van 200 m<sup>2</sup>/s, wat representatief is voor een scenario met veel (westen) wind.



# 6

## Conclusies en beantwoording kennisvragen

## 6 Conclusies en beantwoording kennisvragen

In dit hoofdstuk worden in eerste instantie de belangrijkste algemene conclusies van deze studie gegeven (paragraaf 6.1). Vervolgens volgt een beantwoording van alle kennisvragen in paragraaf 6.2, gebruik makend van individuele scenarioanalyses of door referentie naar elementen die eerder in deze rapportage staan vermeld.

### 6.1 Conclusies

Doordat extreme zeespiegelstijging zich zal afspelen over een termijn van honderden jaren kan de impact van zeespiegelstijging op de instandhouding van de zoetwaterbuffer van het IJsselmeergebied niet los van andere autonome ontwikkelingen worden beschouwd. In de eerste fase van deze studie zijn de vrijheidsgraden bepaald die als gevolg van ZSS en autonome ontwikkelingen het meeste impact hebben op het waterpeil en chlorideconcentratie in het IJsselmeergebied. Dit zijn: chloridevracht over de afsluitdijk, waterflux over de afsluitdijk, rivierafvoer, watervraag vanuit het regionale systeem, zoute kwel, en het neerslagoverschot.

Uit de modelberekeningen blijkt dat de rivierafvoer bepalend is voor het in stand houden van het waterpeil in de zoetwaterbuffer van het gehele IJsselmeergebied gedurende de zomer. Op de tweede plaats komt de combinatie van regionale watervraag en netto verdamping. Om goed in kaart te brengen wat de meest bepalende vrijheidsgraden zijn, is het noodzakelijk om de kans en variabiliteit mee te nemen. Vrijheidsgraden die binnen de in deze studie toegepaste bandbreedtes een grote variatie hebben (grote kans op extremen) zijn in de praktijk meer bepalend dan vrijheidsgraden met kleinere jaarlijkse variabiliteit. De semi-stationaire berekeningen die in deze studie zijn uitgevoerd laten zien dat de naast de intensiteit, ook de duur van een 'droge' periode bepalend voor de impact.

Op basis van de modelberekeningen kan geconcludeerd worden dat de zoutintrusie over de Afsluitdijk met afstand het meest bepalend is voor de chlorideconcentraties in het IJsselmeer. Bij de huidige zeespiegelstand is er in enkele jaren al sprake van verzilting waardoor de drinkwaternorm van 150 mg/l bij Andijk niet altijd haalbaar is. De chloridelast vanaf de Afsluitdijk is sterk afhankelijk van ZSS: bij 1 meter ZSS kan ongeveer een verdubbeling van de chloridevracht worden verwacht (bij gelijk blijvende aannames voor infrastructuur, schut- en spuilsbediening, etc.). Bij 90% van alle uitgevoerde berekeningen met 0.5 meter ZSS is een droge periode van 60 dagen voldoende om de chlorideconcentratie bij Andijk te doen oplopen tot boven 150 mg/l (voor een scenario waar niet wordt gespuid). Voor gebruiksdoelen met een chloridenorm van 450 mg/l (landbouw en peilbeheer) kan de zoetwaterbuffer in grote delen van het IJsselmeergebied zelf bij 3 meter ZSS nog gehandhaafd blijven, ervan uitgaande dat er infrastructuur gerealiseerd wordt om water af te kunnen blijven voeren naar de Waddenzee.

De impact van directe zoute kwel op het open water van het IJsselmeergebied is minimaal. De impact van indirecte zoute kwel (zoute kwel in het regionale systeem dat afstroomt naar het IJsselmeergebied) op de chlorideconcentratie van de meren is eveneens verwaarloosbaar klein ten opzichte van  $Cl_{\text{netto}}$  maar wel ongeveer een factor 5 groter dan die van directe zoute kwel. Let wel op dat indirecte zoute kwel tot een significante toename leidt van de watervraag ten behoeve van doorspoeling in de regio's.

Omdat de Afsluitdijk de belangrijkste bron van zout is, zijn er grote regionale verschillen in chloridedynamiek binnen het IJsselmeergebied. De zoutintrusie bij de Afsluitdijk (en dus ZSS) heeft relatief bijna geen impact op de chloridedynamiek in het Markermeer. Op het Markermeer is de chloridelast vanuit het regionale systeem (voornamelijk uit de Flevopolder) bepalend.

Omdat het 1D-bakjesmodel niet kan worden gebruikt om de impact van een 'point source' chloridelast (zoals gemalen die zout uit het regionale systeem afvoeren) op een nabijgelegen functie (bijvoorbeeld inlaat of drinkwateronttrekkinginname t.b.v. drinkwaterproductie) te bepalen.

## 6.2 Beantwoording kennisvragen

### 6.2.1 A. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) waterstand, waterbeschikbaarheid en chlorideconcentratie in het IJsselmeergebied

**A1 Hoe veranderen waterstanden op het IJsselmeer en het Markermeer als gevolg van zeespiegelstijging (meer-gemiddeld maar ook ter plekke van de innamepunten en kunstwerken)?**

- *Hoe lang is niet meestijgen van zomer en winterpeil met zeespiegelstijging houdbaar?*
- *Is er een impact van zeespiegelstijging op de buffercapaciteit in peil van het IJsselmeergebied en de frequentie waarmee die wordt ingezet?*
- *Wat is rol/bijdrage zeespiegelstijging op waterbalans bij combinaties van zeespiegelstijging, IJsselafoer, watervraag en verdamping?*

#### Antwoord

In deze studie is bewust gekozen om de impact van zeespiegelstijging met betrekking tot stijgende waterstanden niet kwantitatief maar kwalitatief te benaderen. De studie focust zich nadrukkelijk op periodes van zoetwaterschaarste en de impact daarvan op de eisen die vanuit de regio aan het systeem gesteld worden met betrekking tot waterbeschikbaarheid en waterkwaliteit (chloride).

Het al dan niet meestijgen van zomer- en winterpeil met zeespiegelstijging is afhankelijk van meerdere facetten:

1. In de eerste plaats zijn de spui mogelijkheden ten tijde van wateroverschotten van belang: kan tijdens de kleiner wordende spuiensters altijd genoeg gespuid worden om waterstanden op peil te houden? In paragraaf 2.3.6 is middels een grove analyse aangetoond dat het huidige winterpeil bij een ZSS van 0.5 meter als onhoudbaar is. Hierbij is uitgegaan van de huidige (spui)infrastructuur en het huidige getijderegime. De impact van pompen is hierbij buiten beschouwing gelaten.
2. Voor het al dan niet meestijgen van het zomerpeil is het met name van belang of er bij lage waterstanden nog voldoende (volume en efficiëntie) gespuid kan worden om verzilting van het IJsselmeer te voorkomen? Deze vraag is niet direct beschouwd in deze modeloefening.
3. Ook is de ontwikkeling van de waterbalans (klimaatverandering) een mogelijk bepalende factor: is de buffer groot genoeg om aan de watervraag te voldoen? Vormt de omvang van de buffer mogelijk eerder een knelpunt dan bovengenoemde facetten? De relatieve ontwikkeling in de tijd van enerzijds klimaatverandering in Nederland (meer specifiek de impact op watervraag, verdamping en rivierafvoeren) en anderzijds zeespiegelstijging, zijn hierbij bepalend. Zeespiegelstijging heeft, als gevolg een toenemende chloridelast bij de Afsluitdijk en daardoor een grotere spuibehoeft, een negatieve impact op de waterbalans in droge periodes.

Beantwoording van de vraag 'hoelang is niet meestijgen van peilen houdbaar?' is daarmee een integrale vraag die op basis van deze verkennende studie niet gekwantificeerd kan worden. Deze modeloefening biedt echter wel handvaten:

- Het opzetten van het Winterpeil (of eigenlijk het voorjaarspeil) leidt tot het langer kunnen benutten van de buffer (mits het zomerpeilondergrens niet mee stijgt): '1 cm peilverhoging over het totale oppervlakte van de meren komt overeen met ruim 18 M m<sup>3</sup>'.



- Maar peilverhoging heeft maar weinig effect op chlorideconcentratie doordat het verdunningseffect is zeer klein is: '1 cm peilverhoging gedeeld levert een verdunning op van ongeveer 0.2%'.

ZSS leidt tot extra zoutvracht die (met de bestaande infrastructuur) moet worden gecompenseerd door extra spuien. Dit zet druk op het voldoen aan de watervraag en/of het handhaven van de peilondergrens. Afnemende IJsselafvoer in de zomer, toenemende watervraag en toenemende verdamping vergroten de druk op het handhaven van de peilondergrens. De vraag wanneer de grens precies wordt bereikt volgt uit de combinatie al deze *pressures* en kan daarom niet zo eenzijdig beantwoord worden.

**A2 Hoe verloopt de chlorideconcentratie in het IJsselmeer en het Markermeer als gevolg van zeespiegelstijging op locaties van de innamepunten en andere relevante locaties?** (NB: Norm voor chlorideconcentraties in gekoppeld aan gebruiksfuncties als drinkwater, landbouw en natuur)

### Antwoord

Figuur 29 laat voor een groot aantal scenario's de ontwikkeling van de chlorideconcentratie als gevolg van toegenomen chloridelast door zeespiegelstijging in bakje Andijk zien. Ondanks alle aannames die aan deze modeloefening ten grondslag liggen, kan geconcludeerd worden dat (zie Figuur 29):

- Bij 0 m zeespiegelstijging bedraagt de chloridelast van de Waddenzee naar het IJsselmeer via de schut- en spuicomplexen ongeveer 70 kg/s (zie Tabel 4 voor aannames). Deze chloridevracht loopt op tot 240 kg/s bij 5 m zeespiegelstijging. Als voor een specifiek scenario bekend is hoeveel chloride er gespuid wordt dan kan de netto chloridevracht berekend worden. Als de netto chloridevracht 70 kg/s is (bijvoorbeeld bij 0 m ZSS en wanneer er niet gespuid wordt) betekent dit dat de chlorideconcentratie in de omgeving van Andijk na 30 dagen voor alle berekeningen onder de 150 mg/l blijft. Pieken als gevolg van windgedreven stromingspatronen zijn hierbij niet meegenomen en kunnen er alsnog voor zorgen dat de concentratie tijdelijk groter hoger is dan 150 mg/l. Voor dit scenario ligt de chlorideconcentratie na 60 dagen voor 65% van de berekeningen tussen 150 mg/l en 200 mg/l (let op: deze percentages zeggen niks over de kans).
- Bij 1 m zeespiegelstijging nemen de bovengenoemde percentages toe: een , meer grotere chloridevracht zorgt voor snellere verspreiding:
  - 0% van de berekeningen resulteert in 150+ mg/l na 30 dagen.
  - 90% van de berekeningen resulteert in 150+ mg/l na 60 dagen.
  - 36% van de berekeningen resulteert in 200+ mg/l na 60 dagen.
- De resultaten voor 2 m zeespiegelstijging:
  - 22% van de berekeningen resulteert in 150+ mg/l na 30 dagen.
  - 100% van de berekeningen resulteert in 150+ mg/l na 60 dagen.
  - 75% van de berekeningen resulteert in 200+ mg/l na 60 dagen.
  - 2% van de berekeningen resulteert in 250+ mg/l na 60 dagen.
- De resultaten voor 3 m zeespiegelstijging:
  - 66% van de berekeningen resulteert in 150+ mg/l na 30 dagen.
  - 0% van de berekeningen resulteert in 200+ mg/l na 30 dagen.
  - 100% van de berekeningen resulteert in 150+ mg/l na 60 dagen.
  - 84% van de berekeningen resulteert in 200+ mg/l na 60 dagen.
  - 39% van de berekeningen resulteert in 250+ mg/l na 60 dagen.

Of dit ook leidt tot overschrijdingen van de jaargemiddelde chloridenorm in het drinkwater is afhankelijk van de chlorideconcentraties gedurende de rest van het jaar (niet beschouwd in deze studie) en de eventuele toevoeging of verwijdering van chloride in het zuiveringsproces. In de huidige opzet van de drinkwaterproductie bij Andijk kan worden verwacht dat bij concentraties >200 mg/l chloride er sowieso normoverschrijdingen zullen ontstaan. Bij concentraties >150 mg/l is dit afhankelijk van de chlorideconcentraties van het IJsselmeerwater in de rest van het jaar.

Het verloop van chlorideconcentratie op het Markermeer is meer geleidelijk dan op het IJsselmeer, met minder grote variaties. De belangrijkste bron van chloride is de vracht vanuit de regionale systemen, deze vrachten zijn (ook in de toekomst) aanzienlijk kleiner dan de chloridevrachten over de afsluitdijk.

## 6.2.2 B. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) watervraag en afvoerbehoefte van de omliggende gebieden

***B1 Hoe verandert de watervraag (doorspoelbehoefte) als gevolg van een toename van zoute kwel als gevolg van zeespiegelstijging?***

### **Antwoord**

Het antwoord op deze vraag is gegeven in (Deltares, 2022).

***B2 Wat betekent ZSS voor afvoer van zout uit de regio naar het IJsselmeergebied?***

### **Antwoord**

Deze vraag wordt niet beantwoord aan de hand van de modelberekening die zijn uitgevoerd in deze studie. Deze studie heeft wel aangetoond wat de impact is van de afvoer van zout naar het IJsselmeer klein op de chlorideconcentraties van het IJsselmeer (hiervoor is een aanname gedaan van de zoutlast). De impact van afvoer van zout op het IJsselmeer is verwaarloosbaar klein ten opzichte van de impact van zoutinvasie via de Afsluitdijk. De impact van afvoer van zout op het Markermeer is volgens de modelresultaten relatief groot. Deze conclusie heeft betrekking op de bakjesgemiddelde chlorideconcentraties, deze conclusie gaan voorbij aan de specifieke effecten (pieken in chlorideconcentratie) die wel significant kunnen zijn op het moment dat er water vanuit een verzilte polder worden geloosd in de omgeving van een innamepunt van zoetwater (voorbeeld gemaal Lely).

***B3 Hoeveel extra doorspoeldebiet zou nodig zijn om de toename van de zoutlast als gevolg van zeespiegelstijging te beperken?***

### **Antwoord**

De verhaallijnen uit paragraaf 5.2 geven antwoord op deze vraag. Hieruit blijkt dat mitigatie van de toenemende zoutlast als gevolg van zeespiegelstijging door het doorspoeldebiet bij de afsluitdijk te vergroten in de huidige situatie nog perspectief biedt, maar reeds bij een halve meter zeespiegelstijging leidt tot waterbeschikbaarheidsknelpunten. Voor het mitigeren van verzilting van het IJsselmeer is het noodzakelijk om de netto chloridelast te beperken zonder dat hier grote hoeveelheden extra water voor nodig zijn. Er kan gedacht worden aan het beperken van de chloridelast bij de Afsluitdijk door aanpassingen aan scheepvaartbelasting en lekkages, of aan het efficiënt afvoeren van zout via selectief onttrekken (bijvoorbeeld pompen uit diepere erosiekuilen).

## 6.2.3 C. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) debiet en zoutvracht door de kustwerken

***C1 Hoe verandert de aan-en/of afvoercapaciteit van de nationale kunstwerken (zowel vrij verval als bemalen/pompen) als gevolg van zeespiegelstijging?***

### **Antwoord**

In paragraaf 2.3.6 is bepaald dat de afvoercapaciteit bij de afsluitdijk als gevolg van zeespiegelstijging met snel afneemt, al ruim voor het bereiken van 0.5 meter ZSS is spuien onder vrij verval al onvoldoende om wateroverlast in de winter en het voorjaar te voorkomen. Hierbij moet de kanttekening opgenomen worden dat de daadwerkelijke

spuicapaciteit in grote mate afhankelijk is van infrastructuur, bediening en peilbeheer. Het plaatsen van pompen of het verhogen van het winterpeil van het IJsselmeer zijn mogelijke maatregelen.

De aanvoer (lekkage en schutverlies) vanaf de Waddenzee naar het IJsselmeer als functie van zeespiegelstijging is opgenomen in Tabel 4. Hierbij zijn gangbare aannames gedaan voor de staat en bediening van de sluiscomplexen in de Afsluitdijk. Deze analyse is uitgevoerd aan de hand van de zeeluisformulering (Deltares, 2019) en een analytische spui lek formule (Uittenbogaard & Bijlsma, 2012).

***C2 Hoe verandert de externe zoutlast door kunstwerken naar het IJsselmeer en Markermeer (spuien, schutten, vispassages, e.g. Afsluitdijk) als functie van zeespiegelstijging?***

**Antwoord**

De externe zoutlast via de kunstwerken van de Afsluitdijk is afhankelijk van een groot aantal factoren (zie tekst box 'randvoorwaarden Afsluitdijk' in 3.4.1). Zeespiegelstijging is een van deze factoren, maar in deze studie is gebleken dat het niet mogelijk is om de ontwikkeling van zoutlast eenzijdig te duiden als functie van zeespiegelstijging, aangezien andere factoren zich parallel aan ZSS, en zelfs onder invloed van ZSS, mee ontwikkelen.

Onder kennisvraag C2 is de ontwikkeling van de aan- en afvoer over de afsluitdijk als gevolg van ZSS beschouwd. De chloridelast van de afsluitdijk naar het IJsselmeer kan benaderd worden door een gemiddelde concentratie van het binnenkomende waddenzeewater aan te nemen, zoals gepresenteerd in Tabel 4. Er is meer onderzoek nodig om de concentratie van het afgevoerde water onder verschillende afvoercondities te bepalen, en zo een goed beeld te krijgen van de spui efficiëntie.

Het plaatsen van pompen die water onttrekken uit de diepere zoutvangen kan een mogelijkheid zijn om efficiënter chloride af te voeren. Aangezien pompen noodzakelijk zullen zijn om in de winter te kunnen blijven afvoeren zijn er goede koppelkansen denkbaar.

## **6.2.4 D. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) zoute kwel naar het hoofdwatersysteem**

***D1 Hoe verandert de zoute kwel (e.g. onder de Afsluitdijk door of via diepe putten)?***

**Antwoord**

Het antwoord op deze vraag is gegeven in (Deltares, 2022). In paragraaf 2.3.4 worden deze resultaten beschouwd.

***D2 Leidt ZSS en zoute kwel tot een andere afvoer door de beheerders en wat is effect op hoofdwatersysteem?***

**Antwoord**

Het antwoord op deze vraag is gegeven in (Deltares, 2022).

## **6.2.5 E. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) randvoorwaarden in het rivierengebied (landelijke waterverdeling, aanvoer IJssel) en de waterstand/het getij op de Waddenzee**

**E1 Hoe verandert de zoetwatervaanvoer naar het IJsselmeergebied als gevolg van klimaatverandering?****Antwoord**

De belangrijkste wateraanvoercomponent naar het IJsselmeergebied is de aanvoer via de IJssel. De IJsselaanvoer is een functie van de Rijnafvoer bij Lobith (deze relatie is in beperkte mate stuurbaar via stuw Driel). Klimaatverandering heeft een grote impact op de Rijnafvoer. Er is nog geen wetenschappelijke zekerheid over de impact van klimaatverandering op de toekomstige Rijnafvoer door het jaar heen, maar op basis van meest recente nationale en internationale studies en klimaatscenario's kunnen de volgende uitspraken worden gedaan:

- De Rijnafvoer zal in de winter toenemen. Dit komt vooral door de extra neerslag en de stijgende temperatuur (hogere temperaturen houden minder water vast in de vorm van sneeuw). Hierdoor zal de Rijn in de toekomst meer een regenrivier worden. Als we de klimaatscenario's vertalen naar afvoerniveaus, zal de hoeveelheid water die over de Rijn richting Nederland wordt getransporteerd in 2100 variëren van 17.000 m<sup>3</sup>/s tot 22.000 m<sup>3</sup>/s of meer (Deltaprogramma.nl).
- De gemiddelde zomerafvoer zal afnemen met 30-40% (Buishand, Lenderink, & Sabalova, 2004). Ook de extremen qua rivierafvoer worden groter. De Rijnafvoer tijdens een T100 droogte (droogte die zich eens in de 100 jaar voordoet) is 14% lager bij een klimaat met 2 °C opwarming dan bij het huidige klimaat (van der Wiel, Wanders, Selten, & Bierkens, 2019).

In deze modelexercitie zijn lage IJsselaanvoeren tot een minimum van 100 m<sup>3</sup>/s toegepast. Dergelijke lage rivierafvoeren treden als gevolg van klimaatverandering vaker op, wat de kwetsbaarheid van het IJsselmeergebied vergroot zowel ten aanzien van waterkwantiteit als van waterkwaliteit.



**7**

**Discussie**

## 7 Discussie

De analyses die in deze studie zijn uitgevoerd zijn technisch van aard en zijn uitgevoerd binnen een specifieke methodisch kader. Het is daarom cruciaal om resultaten ten alle tijden te interpreteren binnen de kaders die door de toegepaste methodiek zijn gesteld. Daarnaast zijn er verschillende aannames gedaan bij het opstellen van onder andere modelinstrumentarium, modelinput en nabewerking van modeloutput. In deze discussie zullen we op de belangrijkste aandachtspunten en vervolgstappen die volgen uit dit onderzoek ingaan.

### 7.1 Modelmethodiek en het 1D-bakjesmodel

In deze studie is de hyperkubus semi stationair doorgerekend. Alle inputvariabelen zijn stationair aan het model opgelegd (alsof er gerekend wordt met gemiddeldes over een langere periode). De impact van temporele fluctuaties zijn in deze studie daarom niet meegenomen. Het gerealiseerde model is echter wel zo ontwikkeld dat het mogelijk is om tijdreeksen door te rekenen, vervolgonderzoek zou moeten uitwijzen hoe goed het model in staat is om ook temporele fluctuaties te simuleren.

Een 1D-bakjesmodel is een gesimplificeerde representatie van de werkelijkheid, met name met betrekking tot de complexe processen die in werkelijkheid een rol spelen bij chloridetransport in het IJsselmeergebied. Het gebruik van dit model komt daarom met enkele belangrijke aannames:

Allereerst moet er benadrukt worden dat het bakjesmodel bedoeld is voor het doen van een eerste verkenning, voor het in detail uitwerken en onderzoeken van specifieke scenario's zal een meer gedetailleerde modelaanpak nodig zijn.

Het effect van wind gedreven stromingspatronen is in het model verdisconteerd in de (constante) dispersiecoëfficiënt (DC). Door wind te verdisconteren in de DC wordt er eigenlijk aangenomen dat de wind waait in dezelfde richting als de chlorideconcentratie gradiënt (van hoge naar lage concentratie). Dit is een belangrijke 'worst case' aanname. Daarnaast is wind is in de praktijk zeer variabel in kracht en oriëntatie, kortdurende events kunnen daarbij veel impact hebben. Voor het doorrekenen van een realistische tijdreeks eigenlijk ook DC als windafhankelijke variabele zou moeten meenemen. Met enkele aanpassing aan de modellentrein is dit te realiseren. Het blijft echter hoe de gehanteerde aanpak windeffecten meeneemt als representatieve menging en transport van chloride en hoe dit zich doorvertaalt naar het netto effect / gemiddelde chlorideconcentraties? Deze vragen zullen in vervolgonderzoek opgepakt kunnen worden.

Met een 1-D bakjesmodel is het niet mogelijk om de lokale variaties in chlorideconcentraties exact te modeleren. In deze studie is aangetoond dat mogelijke variatie wel benaderd kan worden met de 'aangrenzende bakjes' theorie. Om figuren leesbaar te houden is deze onzekerheidsmarge niet meegenomen in Figuur 28 en Figuur 29. De lezer van deze figuren moet zich ervan bewust zijn.

De sturing van het IJsselmeersysteem is zeer rudimentair in 1D-bakjes opgenomen. In werkelijkheid vindt er geavanceerde sturing plaats om optredende knelpunten te mitigeren.

Elke berekening gaat uit van een beginsituatie waarin een peil van -0.1 m NAP is gerealiseerd, waarna de waterstand kan uitzakken tot -0.4 m NAP alvorens de watervraag wordt beperkt. Deze opzet wordt in het voorjaar echter niet altijd gehaald. Ook is de grens van -0.4 m NAP (aannahme voor operationele werkelijkheid) arbitrair en zal er in de praktijk eerder worden gekort op de watervraag. Daarom is het van belang om bij het interpreteren van de resultaten het relatieve effect op de zoetwaterbuffer te beschouwen in plaats van de absolute resultaten, bijvoorbeeld: 'Bij berekening x wordt 20 cm buffer in 60 dagen gebruikt' in plaats van 'bij berekening x zakt de waterstand in 60 dagen uit van -0.1 tot -0.3 m NAP'.

Elke berekening gaat uit van een initiële chlorideconcentratie van 100 mg/l in het gehele systeem. In werkelijkheid is de initiële concentratie variabel in de ruimte en het moment dat je als  $t = 0$  beschouwd. Het kan zijn dat de buffer gedurende een winterperiode niet volledig 'zoet' kan worden gespoeld. Ook kan het zijn dat de belasting van het IJsselmeergebied systeem gedurende een zomer in vlagen gebeurt. Ook hierbij is het van belang om de resultaten van individuele modelberekeningen relatief te beschouwen, dit is mogelijk door de semi stationaire modelmethodiek. Als je weet dat een systeem in werkelijkheid hogere concentratie had op moment  $t=0$  dan kan er naar een iets langere periode van de modelresultaten gekeken worden: bijv. de resultaten tussen dag 15 en dag 45 voor een periode van 30 dagen waarbij de initiële concentratie (gemiddeld) hoger lag dan 100 mg/l. Op deze manier kan dus ook gekeken worden naar de impact van meerdere jaren van aaneengesloten droogte waarbij de ontlading van het systeem in de winter niet volledig is en de gewenste peilopzet niet gerealiseerd kan worden.

In deze studie is gefocust op de resultaten in het IJsselmeer, en is er minder aandacht besteed aan het Markermeer. Dit is bewust gedaan omdat al snel bleek dat zeespiegelstijging slechts een beperkte impact heeft op het Markermeer. Daarbij is deze impact bijna volledig indirect: zeespiegelstijging heeft via veranderingen in het IJsselmeer, ARK-NZK of andere verdeling/sturing van het Hoofwatersysteem impact op het Markermeer. De directe impact van bijvoorbeeld toenemende regionale zoutvrachten of zoute kwel is minimaal. Overige autonome ontwikkelingen (voornamelijk klimaatverandering en de beoogde adaptatie) heeft wel grote impact op bijvoorbeeld de watervraag vanuit de regio en daarmee op het Markermeer.

## 7.2 Vervolgstappen en gebruik van eindproducten

In deze studie is met het doorrekenen van de hyperkubus de staat van de zoetwaterbuffer van het IJsselmeergebied berekend voor de volledige bandbreedte aan zomers die zich in de toekomst (tijdhorizon van 3 à 5 m zeespiegelstijging) zouden kunnen voordoen (binnen de huidige beheerstrategie). In deze rapportage is een poging gedaan om de resultaten van deze analyse te vatten in enkele figuren. Omdat ruim 4000 berekeningen zijn uitgevoerd is het niet mogelijk om in detail in te gaan op de impact van individuele berekeningen. Naast deze rapportage is het opgebouwde modelinstrumentarium, met daarbij de output en nabewerkingsmethodiek van de berekeningen, daarom een hele belangrijke output component die bij afronding van deze studie wordt opgeleverd. Het opgebouwde instrumentarium is in staat om (zeer snel) verschillende 'wat als' analyses door te rekenen, zoals de 'indicatieve verhaallijnen' uit paragraaf 5.2.

De methodiek die ten grondslag ligt aan deze studie gaat uit van het volgende idee: 'We berekenen de volledige bandbreedte aan mogelijke toekomstige scenario's, omdat we nu nog niet weten wat er precies in de toekomst gaat gebeuren. Grote onzekerheden (met betrekking tot de toekomst maar ook met betrekking tot systeemwerking) worden slechts indirect in de modelmethodiek meegenomen zodat modelmatige 'deadlocks' worden vermeden.' Zodra er nieuwe inzichten ontstaan over toekomstige ontwikkelingen of de systeemwerking kan de impact hiervan op de juiste plek in de hyperkubus geplaatst worden. Voor het doen van specifieke 'wat als' analyses kunnen heel snel (orde grootte 5 sec per berekening) nieuwe berekeningen worden gedaan om een eerste inzicht te krijgen in de impact van maatregelen.



# 8

## Referenties

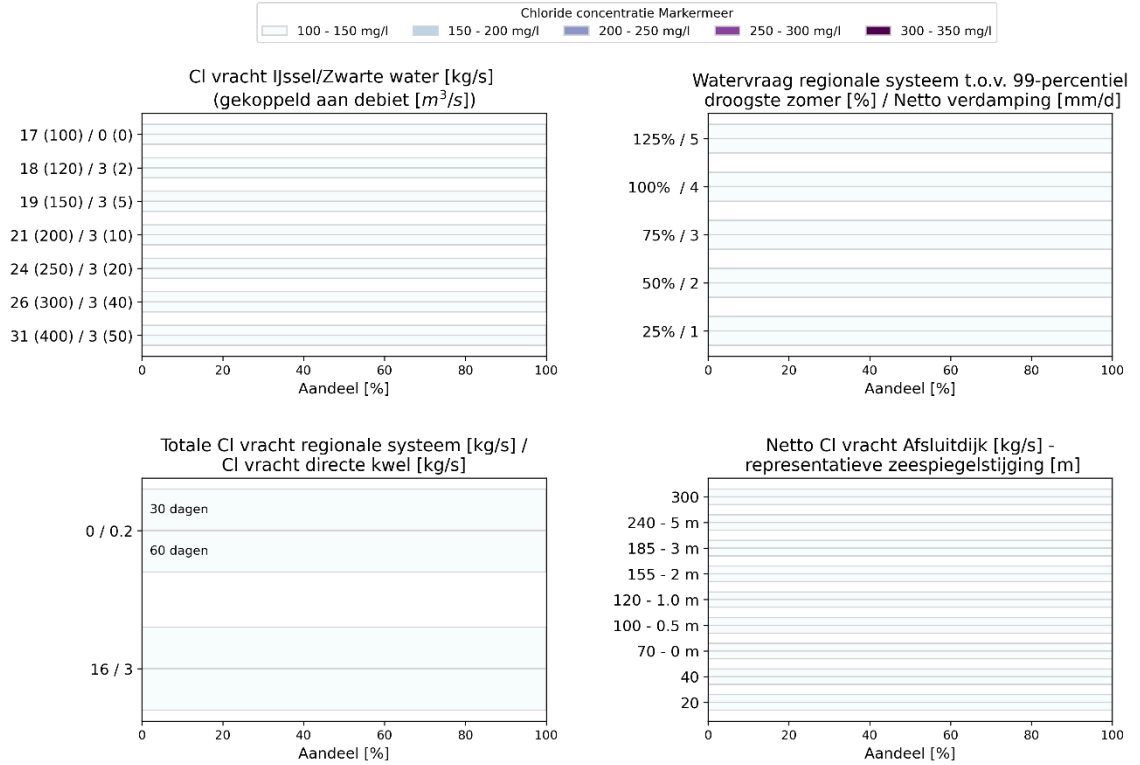


## 8 Referenties

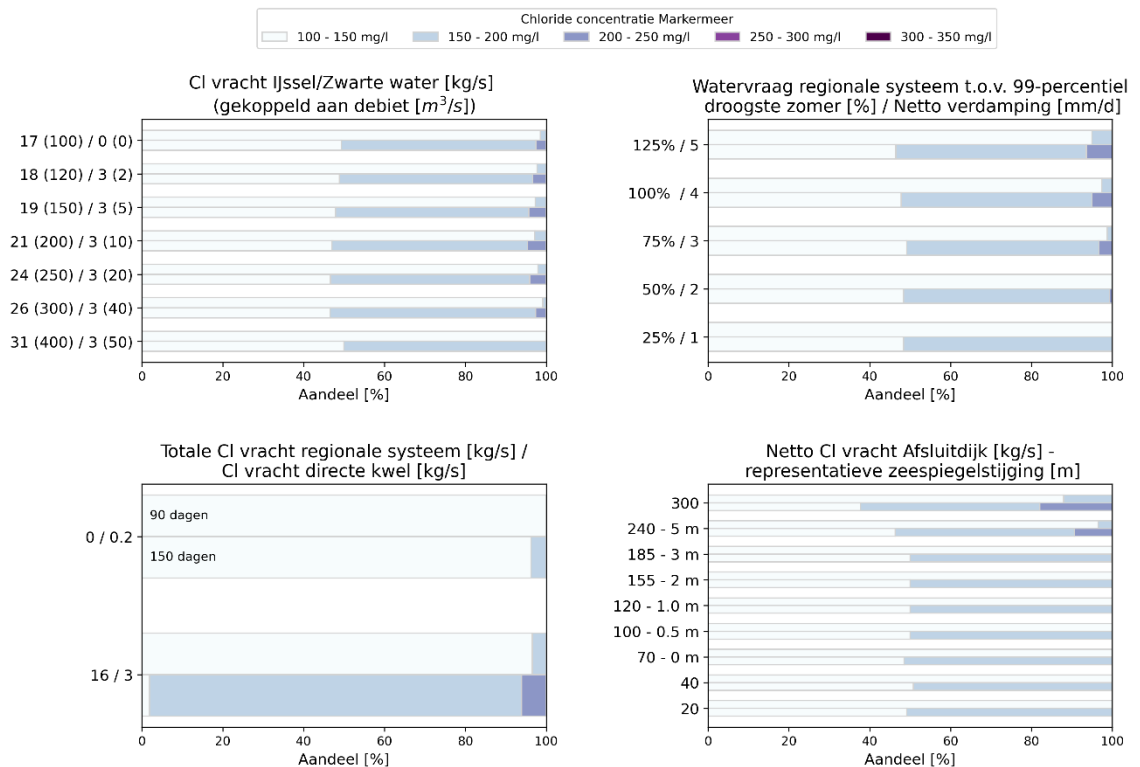
- Bonte, M. (2009). *Drinkwaterfunctie Markermeer en verzilting IJsselmeergebied*. KWR.
- Bonte, M., & Zwolsman, J. (2010, August). Climate change induced salinisation of artificial lakes in the Netherlands and consequences for drinking water production. *Water Research*, 44(15), 4411-4424.
- Buishand, T., Lenderink, G., & Sabalova, M. (2004). *Estimation of future discharges of the river Rhine in the SWURVE project*. De Bilt, Netherlands; KNMI: Technical report, Royal Netherlands Meteorological Institute.
- Deltares. (2019). *"Zoutindringing schut- en spuisluisen, Opzet en verkenning Zeeluisformulering, Kennisprogramma Natte Kunstwerken 2018*.
- Deltares. (2019). *Verkenning noodmaatregelen verzilting IJsselmeer - schutoperatie en bellenschermen*.
- Deltares. (2021). *Vraagarticulatie en aanzet modelinstrumentarium Spoor 2* *Systeemverkenningen Zoetwater*.
- Deltares. (2022). *Grondwaterverzilting en watervraag bij een stijgende zeespiegel*.
- Friocourt, Y. (2020). *Nieuwe inzichten naar aanleiding van de verzilting van het IJsselmeer in 2018 en actualisatie van de posten van de water- en zoutbalans van het meer*. Rijkswaterstaat WVL, afd Modellen en Applicaties.
- Genseberger, M., Fujisaki, A., & Eijsberg-Bak, C. (2020). *D-HYDRO deelmodel IJsselmeer modelbouw, eerste modelresultaten waterstanden in 2DH en zoutverspreiding in 3D*. Deltares.
- Helpdesk Water. (2019). *Handleiding Normering Chloride Drinkwater*.
- HydroLogic. (2021). *Actualisatie Waterverdeling IJsselmeergebied - Kwantificering en toelichting watervraagtabellen*.
- Jansen, F., Uijlenhoet, R., Jacobs, C., & Teuling, A. (2022). Evaporation from a large lowland reservoir - observed dynamics and drivers during a warm summer. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(11), 2875-2898.
- KWR. (2021). *Actualisatie regressiemodel voor chlorideconcentraties bij Lobith en Eijsden*.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2014). *Deltaprogramma 2014*. Retrieved from <https://archieff.rijksbegroting.nl/binaries/pdfs/deltaprogramma2014.pdf>
- Rijkswaterstaat. (2021). *Memo bij het rapport Vraagarticulatie en Aanzet Modellerings KP ZSS Spoor II, Zoetwater*.
- RWS. (2018). *Pijlbesluit IJsselmeergebied*.
- van der Kaaij, T., Huismans, Y., & Mens, M. (2019). *Achtergrondconcentratie*. Deltares.
- van der Wiel, K., Wanders, N., Selten, F., & Bierkens, M. (2019). Added Value of Large Ensemble Simulations for Assessing Extreme River Discharge in a 2°C Warmer World. *Geophysical Research Letters*, 46(4), 2093-2102.  
doi:<https://doi.org/10.1029/2019GL081967>
- van Riel, M., Verdonschot, R., & Verdonschot, P. (2021). *Systeemanalyse van het IJsselmeergebied: verkenning van de water- en stoffenstromen in het IJsselmeergebied voor de toepassing in een systeemanalyse*. Zoetwaterecosystemen, Wageningen Environmental Research.
- Vlag, D. (1999). *Berekening Spuihoeveelheden Afsluidijk uit metingen*.
- Weiler, O., & Burgers, R. (2018). *Zoutindringing door schutsluizen. Overzicht projecten en aanzet formulering t.b.v. netwerkmodellen*. Kennisprogramma Natte Kunstwerken. Opgehaald van <https://www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl/upload/documents/tinymce/KpNK-2017-SKW-01c001-v1-Zoutindringing-door-schutsluizen-overzicht-projecten-en-aanzet-formulering-tbv-netwerkmodellen.pdf>

## Appendix A

### Appendix A. Chlorideconcentratie in het Markermeer Markermeer (bakje VII) na 30 en 60 dagen



### Markermeer (bakje VII) na 90 en 150 dagen



# Over Arcadis

Arcadis is de leidende wereldwijd opererende ontwerp en consultancyorganisatie op het gebied van de natuurlijke en gebouwde omgeving. Wij helpen onze klanten en de maatschappij met doeltreffende, duurzame en digitale oplossingen. Wij zijn met 36.000 mensen actief die in ruim zeventig landen meer dan €4,2 miljard aan omzet genereren. Wij helpen UN Habitat met onze mensen, die kennis en expertise leveren om de moeilijke leefomstandigheden te verbeteren in gebieden die lijden onder de gevolgen van klimaatverandering.

[www.arcadis.com](http://www.arcadis.com)

# Contactpersoon



Michiel van Reen  
Projectleider Water

