

Kennisprogramma Zeespiegelstijging

Nadere analyse effecten zeespiegelstijging regio IJsselmeer - Markermeer

Colofon

Deze publicatie maakt deel uit van de systeemverkenningen 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.

- Opsteller: *Arcadis / Hydrologic*
- Auteurs: Jos van der Baan, Sanne van der Heijden, Ruben Boelens, Ludo Diender en Michiel van Reen
- Geschreven in opdracht van Rijkswaterstaat WVL voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging
- juli, 2025.

Nadere analyse effecten zeespiegelstijging

Regio IJsselmeer & Markermeer

Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening
Hoofdwatersysteem

2 juli 2025

1	Inleiding	2
1.1	Aanleiding	2
1.2	Doel.....	2
1.3	Het studiegebied	2
1.4	Leeswijzer	3
2	Modelaanpassingen en kalibratie	5
2.1	Modelaanpassingen	5
2.1.1	Algemene aanpassingen	5
2.1.2	Sluiscomplexen Afsluitdijk.....	8
2.1.3	Sluiscomplex Schellingwoude	22
2.1.4	Numerieke koppeling waterbalans en chloridebalans.....	23
2.2	Kalibratie.....	24
2.2.1	Modelinvoer kalibratieberekening	24
2.2.2	Meetgegevens kalibratie	29
2.2.3	Methodiek kalibratie	30
2.2.4	Resultaten kalibratie.....	31
2.3	Discussie en conclusie kalibratie	34
3	Scenario-analyse.....	37
3.1	Keuze scenario's	37
3.2	Methode scenario-analyse.....	37
3.3	Indicatoren	48
3.4	Resultaten	49
3.4.1	Dynamiek scenario's.....	49
3.4.2	Statistische analyse o.b.v indicatoren	52
3.5	Discussie en conclusie	58
4	Maatregelenanalyse	63
4.1	Maatregelen en methodiek	63
4.2	Resultaten	65
4.2.1	Bronmaatregelen Afsluitdijk	65
4.2.2	Omgaan met hogere grenswaarden.....	71
4.2.3	Vergroten waterbuffer IJsselmeer – inzet ARK-route.....	73
4.2.4	Vergroten waterbuffer IJsselmeer – reductie watervraag met 35%....	77
4.2.5	Vergroten waterbuffer IJsselmeer – peilopzet	79
4.2.6	Zoutgehalte Rijnafvoer	82
4.3	Discussie en conclusie	83
4.3.1	Discussie	83
4.3.2	Algemene conclusie.....	85
5	Synthese, Conclusie & Aanbevelingen	87
5.1	Kernboodschappen	87
5.2	In breder perspectief	88
5.3	Reikwijdte en onzekerheden	89
5.4	Aanbevelingen.....	90
	Referenties	92
	Appendix A. Toegepaste zoutfluxrelaties Afsluitdijk	93

Appendix B.	Afgeleide afvoer IJssel Keteldiep	98
Appendix C.	Afgeleide lateralen per regio	100
Appendix D.	Afgeleide lateralen tijdseries.....	101
Appendix E.	Representatieve dwarsdoorsnedes bakjes.	103



1

Inleiding

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS) ontwikkelt kennis om Nederland voor te bereiden op zeespiegelstijging tot 5 m. De Systeemverkenningen (voormalig spoor II) binnen het KP ZSS focust zich op de houdbaarheid en oprekbaarheid van de voorkeurstrategieën voor de thema's Zandige Kust, Waterveiligheid en Zoetwater (verziltingsproblematiek). Deze studie is onderdeel van 'Systeemverkenningen- Zoetwater'. Voor vier strategische zoetwaterbuffers verbonden aan de Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatersysteem (KZH) is de houdbaarheid en oprekbaarheid onderzocht door middel van een modelstudie (fase 1). Het IJsselmeer en Markermeer was één van de beschouwde zoetwaterbuffers. Naar aanleiding van die studie ontstonden nieuwe vragen, waardoor nieuwe inzichten en verdieping wenselijk bleken. In deze studie (fase 2) wordt door middel van een aanvullende modelstudie antwoord gegeven op de aanvullende vragen.

1.2 Doel

Het doel van deze studie is het vergroten van inzicht in de mate van houdbaarheid van de voorkeurstrategie van het IJsselmeergebied onder zeespiegelstijging (0 tot 5 meter) en in de wijze waarop die houdbaarheid eventueel is te vergroten. Dit is gedaan door middel van een modelschematisatie. In deze studie wordt gekeken naar waterbeschikbaarheid uit het IJsselmeer in termen van zowel chlorideconcentratie in het meer als beschikbaar watervolume (meerpeil).

De volgende inzichten zullen in deze studie worden vergroot:

- De effecten van ZSS op de **seizoensdynamiek** van waterbeschikbaarheid en verzilting van het IJsselmeersysteem zoals het nu beheerd en benut wordt.
- De **effectiviteit van maatregelen**¹ om de gevolgen van ZSS op te vangen

1.3 Het studiegebied

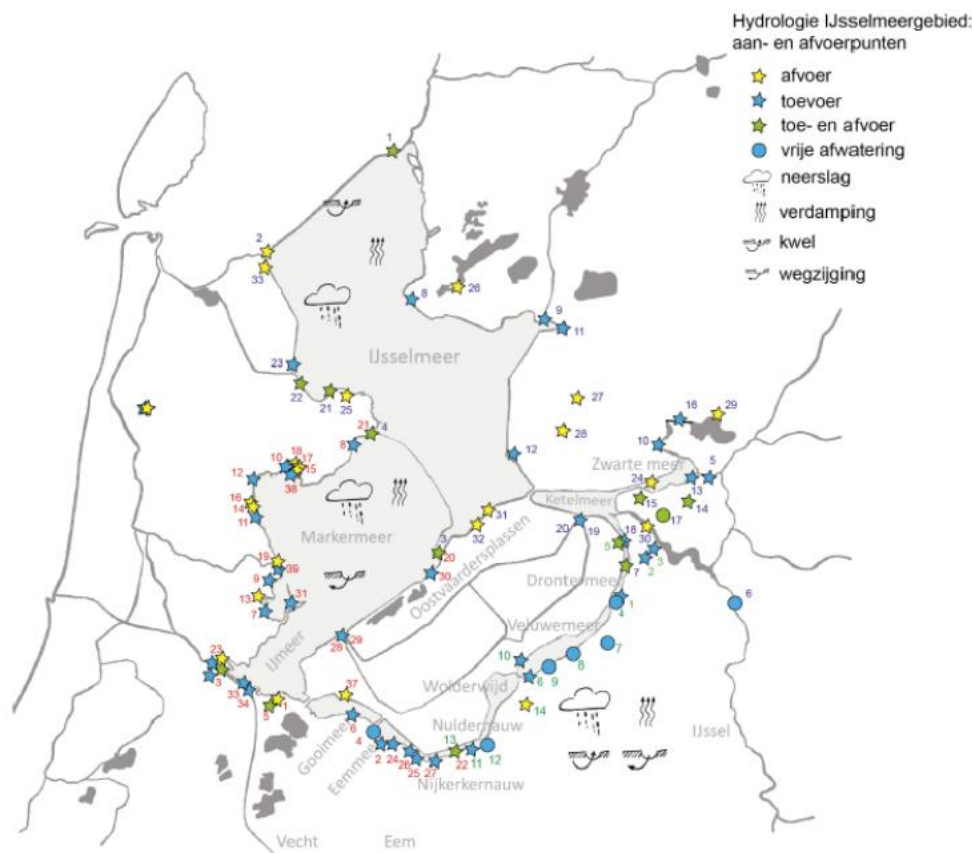
Het IJsselmeergebied ligt in west/centraal Nederland waar het onderdeel uitmaakt van de provincies Friesland, Overijssel, Flevoland, Utrecht en Noord-Holland. Het in deze studie beschouwde gebied bestaat uit het IJsselmeer, het Markermeer, enkele van de randmeren (Ketelmeer, Eemmeer, Gooimeer en Vossemeer²), en het Zwarte Meer (Figuur 1-1). 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 en regionaal peilbeheer, heeft het IJsselmeer een drinkwaterfunctie voor de provincie Noord-Holland. Ook omvatten de twee meren belangrijke scheepvaartroutes.

Het Markermeer staat in verbinding met het Noordzeekanaal via de Oranjesluizen en via gemaal Zeeburg met de Amstelboezem en indirect het Amsterdam-Rijnkanaal. Via de Houtribsluis en de Krabbersgatsluis staat het Markermeer in verbinding met het IJsselmeer. De rivier de IJssel is de belangrijkste aanvoerroute 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 Stevinssluis (Den Oever) en de Lorentzsluis (Kornwerderzand) beheersen het waterpeil van het IJsselmeer door het wateroverschot naar

¹ De technische uitwerking, hoe de reductie in zoutvracht te behalen is of kan worden behaald, wordt parallel aan deze studie door Deltares uitgevoerd en valt buiten deze studie.

² Het Veluwemeer en Wolderwijd zitten hier dus niet in

de Waddenzee te spuien. Ook faciliteren deze spui- en sluiscomplexen via de aanwezige schutsluizen de scheepvaart en de vismigratie.



Figuur 1-1 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 nummering 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.

1.4 Leeswijzer

In de voorliggende rapportage van fase 2 wordt voortgeborduurd op het in fase 1 ontwikkelde bakjesmodel.

Hoofdstuk 2 bevat de benodigde modelaanpassingen en de kalibratie van het gebruikte model. Tenslotte bevat dit hoofdstuk ook de modelonzekerheden.

Hoofdstuk 3 bevat de gevoeligheidsanalyse op seizoensdynamiek waarin verschillende klimaatscenario's zijn doorgerekend met het bakjesmodel. Hierin is het IJsselmeer beheerd zoals dat nu ook wordt gedaan. Het effect op de seizoensdynamiek staat centraal.

Hoofdstuk 4 beschrijft de maatregelenanalyse. Verschillende maatregelen kunnen genomen worden om de gevolgen van ZSS op te vangen. Het effect van deze maatregelen op de houdbaarheid van de voorkeusstrategie van het IJsselmeergebied wordt in dit hoofdstuk beschreven.

Hoofdstuk 5 bevat de synthese. Hierin worden de uitkomsten breder getrokken. Wat is de essentie van de uitkomsten? Wat zijn de kernboodschappen uit de nieuwe inzichten? Wat is de reikwijdte en wat zijn de onzekerheden? Deze beleidsmatige vragen vormen in het eerste deel van dit hoofdstuk de basis. Het hoofdstuk wordt afgesloten met de conclusies en aanbevelingen. De focus van deze conclusies en aanbevelingen is juist het inhoudelijke en technische aspect van deze studie.



2

Modelaanpassingen en kalibratie

2 Modelaanpassingen en kalibratie

2.1 Modelaanpassingen

Het bakjesmodel van het IJsselmeergebied uit fase 1 van het KP ZSS, spoor II zoetwater (Arcadis/Hydrologic, 2023), is binnen deze studie doorontwikkeld zodat het model toepasbaar is voor deze studie. Het model in fase 1 was niet geschikt om het effect van de seizoensdynamiek te simuleren. Daarnaast waren verscheidene aanpassingen nodig om het effect van de maatregelen te schematiseren. Onderstaand zijn de modelaanpassingen toegelicht.

2.1.1 Algemene aanpassingen

Bakjesverdeling IJsselmeer

Het ontwikkelde bakjesmodel in fase 1 bestond uit 14 bakjes, verdeeld over het IJsselmeer, het Markermeer en de randmeren. In fase 2 is deze bakjesverdeling aangepast, om te kunnen omgaan met het tijdsafhankelijke aspect en de veranderde schematisatie van de Oranjesluizen en de sluiscomplexen in de Afsluitdijk.

De Oranjesluizen zijn als expliciete post in het bakjesmodel gemodelleerd (zie 2.1.3). Om de dynamiek die deze post met zich meebrengt beter te modelleren in het Markermeer, is het Markermeer opgesplitst in drie afzonderlijke bakjes. Een chloridevracht vanuit de Oranjesluizen kan door deze afzonderlijke bakjes niet binnen één tijdstap op het IJsselmeer terecht komen. De drie afzonderlijke bakjes maken het mogelijk om een chloridegradiënt binnen het Markermeer te modelleren.

Daarnaast zijn de sluiscomplexen op de Afsluitdijk aangepast (zie 2.1.2). In fase 1 werden de fluxen over de Afsluitdijk als netto flux meegenomen en direct op een breed bakje grenzend aan (vanuit het IJsselmeer gezien) de Afsluitdijk gemodelleerd. Om de werking van de erosiekuilen nabij de spuisluisen beter te kunnen modelleren en om meer onderscheid tussen de schutsluisen en de spuicomplexen te kunnen maken, zijn er in fase 2 submodellen in de vorm van twee kleine bakjes toegevoegd, vlak voor de verschillende sluiscomplexen bij de Afsluitdijk aan de IJsselmeerzijde. Deze kleinere bakjes stellen het model in staat om de zoutfluxen als gevolg van het schut- en spuiproces specifiek te schematiseren. Hierdoor is het eenvoudiger om in een later stadium effecten van zoutbeperkende maatregelen te bepalen. De detailberekeningen ten behoeve van deze twee kleine bakjes worden buiten de tijdsintegraties met het bakjesmodel geplaatst. Er vindt een uitwisseling van water en chloride plaats tussen deze bakjes en het bakjesmodel volgens de stappen beschreven in 2.1.2.

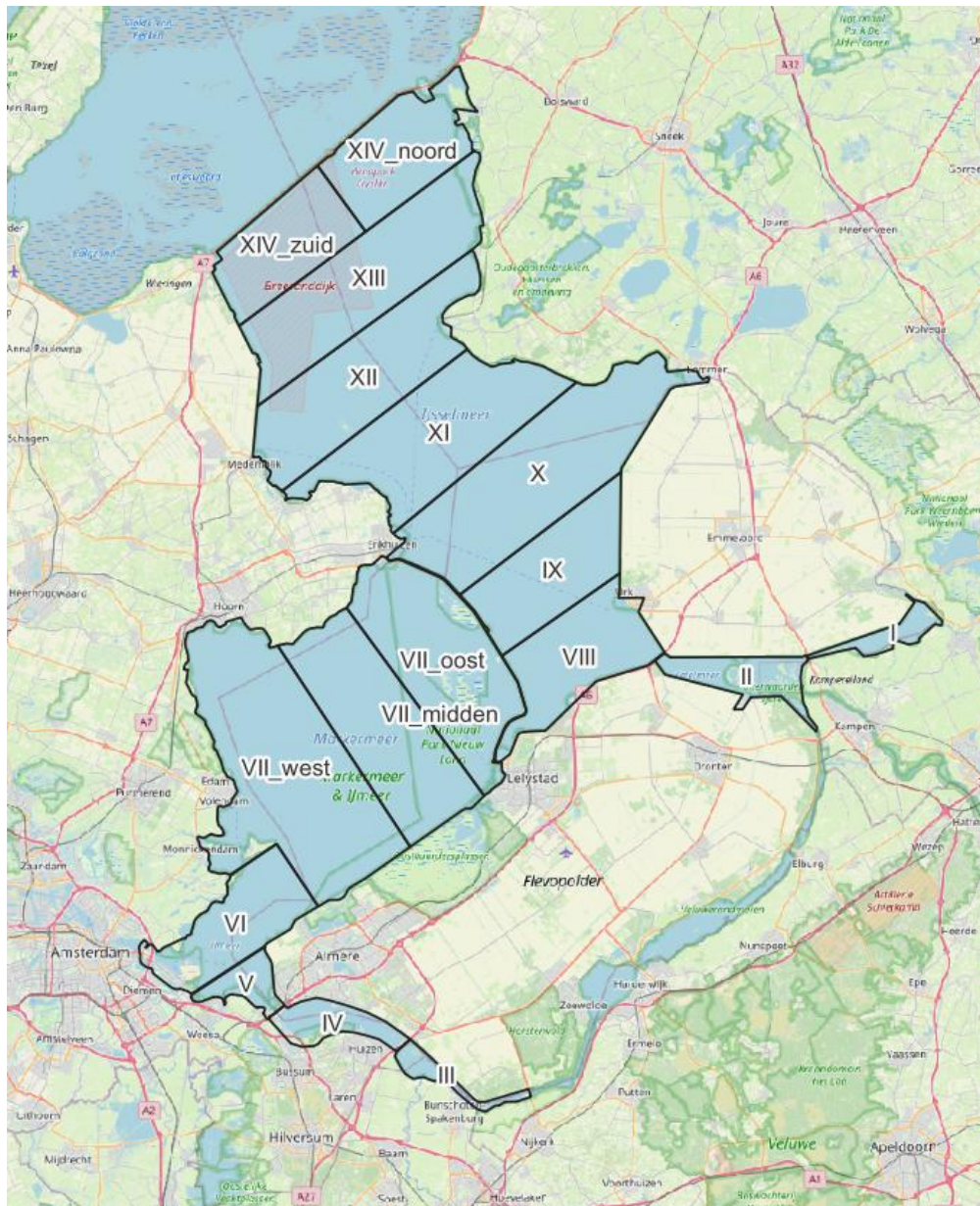
Tenslotte is het grotere hoofdbakje tegen de Afsluitdijk aan opgesplitst in twee bakjes. Hiermee wordt voorkomen dat zout dat via Den Oever het bakjesmodel in komt, direct de volgende tijdstap via Kornwerderzand gespuid kan worden. Er vindt geen uitwisseling van watervolumes plaats tussen deze twee bakjes, waardoor er alleen dispersief chloridetransport plaats vindt.

Bij de Oranjesluizen is een kleiner bakje toegevoegd. Deze is wel inbegrepen in de tijdsintegraties met het bakjesmodel, al wordt het volume in het bakje constant gehouden. Hierdoor heeft het bakje geen aandeel in de waterbalans, maar wordt het wel meegenomen in de chlorideberekeningen.

Bovengenoemde opsplitsingen in meerdere bakjes, levert een nieuwe modelschematisatie op zoals afgebeeld in Figuur 2-1. De kleinere bakjes bij de Afsluitdijk en de Oranjesluizen zijn niet meegenomen in de waterbalans en daarom niet getoond in deze figuur.

Extra invoerpost ARK-route

Een van de mogelijke maatregelen die meegenomen wordt in de door te rekenen maatregelpakketten betreft de inzet van de Amsterdam-Rijnkanaal (ARK-) route. Deze route kan worden ingezet om in tijden van droogte extra zoet water, via een nieuw te realiseren kunstwerk, in te laten op het Markermeer. Om deze maatregel te kunnen doorrekenen, is een extra invoerpost aan het model toegevoegd, ter hoogte van de mogelijke aanvoerlocatie van de ARK-route (bakje V). Deze invoerpost is alleen van belang tijdens het doorrekenen van specifieke maatregelen en speelt verder geen rol van betekenis in de kalibratie of de scenarioanalyse.



Figuur 2-1 Bakjesverdeling op het IJsselmeer en het Markermeer. De sluiscomplexen bij de Afsluitdijk worden behandeld in een aparte modelschil.

Tijdstap model en uitvoer

Het in fase 1 ontwikkelde model rekende met tijdstappen van één dag. De bakjes waren van dusdanige grootte dat de tijdstap weinig tot geen effect had op de resultaten. In het aangepaste model zijn er kleinere bakjes aanwezig, maar deze maken geen onderdeel uit van de waterbalansberekeningen. De overige bakjes zijn nog groot genoeg om de tijdstap van het model op één dag te houden (o.b.v. testsommen). Ook de uitvoer van het model is

op basis van dagelijkse tijdstappen. De effecten van getij en schutbewegingen rondom de sluiscomplexen bij de Afsluitdijk zijn hier alleen in gemiddelde zin terug te vinden.

Kwel

In fase 1 is gebleken dat het effect van directe zoute kwel via de bodem van het IJsselmeergebied klein is op de uiteindelijke modeluitkomsten, ook bij ZSS (zie ook Deltares 2022). De directe kwel is daarom niet meegenomen in het model voor de voorliggende studie. De indirecte kwel via het grondwater in de regio heeft wel impact op de water en chloridebalans. Als gevolg van zoute kwel in de regio neemt de watervraag voor doorspoeling in deze gebieden toe. Ook de zoutvracht vanuit de regio op het IJsselmeer neemt toe. Beiden worden verdisconteerd in de lateralen (watervraag en zoutvracht) van het bakjesmodel.

Sturing model en reduceren watervraag (verdringingsreeks)

Het in fase 1 ontwikkelde model bevatte slechts één sturingsregel: als het peil onder de -0.4 m NAP dreigde te zakken, werd er gekort op de regionale watervraag. Hierbij werd een vast streefpeil op het IJsselmeer gehanteerd. Voor het tijdsafhankelijke model is deze enkele sturingsregel niet voldoende.

Tabel 2-1 Gehanteerde streefpeilen in het tijdsafhankelijke model

Periode	Gehanteerd peil
1 okt - 15 maart	-0.40 m NAP
16 maart - 15 april	-0.10 m NAP
16 april - 30 september	-0.20 m NAP

In het model wordt een variabel peil gehanteerd, zoals weergegeven in Tabel 2-1. Hierbij is onderscheid gemaakt in winterpeil, een voorjaarsopzet en een zomerpeil.

In het model zijn twee aparte sturingsregels opgelegd;

1. Bij een (mogelijke) waterstand onder de -0,3 m NAP (-0.4 m NAP in de winter³) wordt er gekort op de regionale watervraag
2. Het minimale spuidebiet bedraagt 70 m³/s, tenzij de waterstand onder de -0,3 m NAP dreigt te raken, dan bedraagt het minimale spuidebiet 40 m³/s. Dit betreft een dagelijkse spuibeweging, en niet het eens per 5 dagen ledigen van de erosiekuilen zoals dat in de praktijk gehanteerd wordt.

Het reduceren van de regionale watervraag volgens de verdringingsreeks is niet haalbaar in het model. De watervraag per categorie is niet beschikbaar per regio voor toekomstige zichtjaren en er kan daardoor niet per categorie worden gekort op de watervraag. In plaats daarvan wordt er gekort op alle gecombineerde watervragen vanuit de verschillende regio's. Het korten gebeurt op basis van het volume aan water dat benodigd is om het IJsselmeerpeil op -0.3 m NAP te houden. Dit volume wordt ingehouden op de regionale watervraag, waarbij de verschillende watervragen vanuit de regio met eenzelfde percentage worden gekort.

Als het streefpeil uit Tabel 2-1 niet gehaald wordt, wordt het minimale spuivolume gespuid (40 m³/s). Het betreft hier een dagelijkse spuibeweging. Het ledigen van de erosiekuilen eens per 5 dagen, zoals dat in de praktijk vaak gebeurt, is in het model niet opgelegd. De forcering richting het IJsselmeer, met name de watervraag vanuit de regio, is opgelegd op decadebasis (10 dagen). Vanwege deze periode is ervoor gekozen om elke dag een bepaald spuivolume af te voeren in plaats van dit volume op te sparen. Dit heeft een (klein) verhogend effect op de chlorideconcentraties in het systeem, omdat er in theorie minder efficiënt gespuid wordt.

In gevallen waarbij er voldoende water is, wordt de gehele waterschijf boven het streefpeil in één dag gespuid, ongeacht of de afvoercapaciteit beschikbaar is vanwege eventuele (getij- en meteo-gedreven) beperkingen in verval tussen IJsselmeer en Waddenzee. Deze

³ Deze waarde is om modeltechnische redenen toegevoegd om het model eenvoudig te kunnen laten rekenen. In de modelsimulaties komt dit niet/nauwelijks voor.

beperkingen worden in deze studie niet meegenomen. Bij de Oranjesluizen wordt via de situatieschuif een continu debiet gespuid van 5 m³/s (zie paragraaf 2.1.3)

Er is gekozen om de sturing niet afhankelijk te maken van de chloridewaarden in het IJsselmeer. De gehanteerde sturingswaarden zoals bovenstaand beschreven zijn in lijn met de sturing in het LHM (Landelijk Hydrologisch Model) en sluiten aan bij het Deltaprogramma Zoetwater. Enkel het volledig spuien van de waterschijf boven streefpeil wijkt hiervan af. In deze studie is er geen maximaal spuibolume gehanteerd.

Wind

Het model bevat, gelijkend aan het model in de vorige fase, geen windcomponent. Door het ontbreken van goede informatie over toekomstige windpatronen, de relatief korte tijdschaal waarop de windprocessen zich afspelen en de langere tijdschaal waarop het bakjesmodel rekent, is wind niet meegenomen. Het effect van wind op de menging van chloride in het meer, is verdisconteerd in de dispersiecoëfficiënt waarop gekalibreerd wordt. Daarnaast leidt het negeren van wind tot enige overschatting van het bergend vermogen van de erosiekuilen bij de Afsluitdijk. Het windeffect op deze erosiekuilen wordt verder besproken in 2.1.2.

Het gemiddelde effect van wind is meegenomen in het model door middel van de dispersiecoëfficiënt. Dit betekent dat het model en de uitkomsten ook voor langere periodes moeten worden beschouwd. Een eventuele toekomstige verandering in windklimaat als gevolg van bijv. klimaatverandering is niet meegenomen in deze studie.

2.1.2 Sluiscomplexen Afsluitdijk

De Afsluitdijk bevat twee sluiscomplexen (schut- en spuisluizen): het sluiscomplex bij Den Oever (westen) en het sluiscomplex bij Kornwerderzand (oosten). Voor het bepalen van de zoutfluxen in- en uit de sluis- en spuicomplexen bij de Afsluitdijk zijn er vele componenten die een rol spelen. Om de netto zoutfluxen in het model zo goed mogelijk op te nemen, zijn eerst de losse componenten beschouwd. In Figuur 2-2 zijn deze componenten gevisualiseerd en onderstaand zijn deze kort beschreven. In de subparagrafen is elke component uitgewerkt. Tot slot is de getalsmatige doorwerking opgenomen in Appendix A.

- *Zoutlekken (lekdebiet met zoutconcentratie) door deuren van de spuisluizen (nr. 1 en 4 in Figuur 2-2)*
Via de spuisluizen komt zout water op het IJsselmeer door lekkages bij de afdichtingen van de deuren binnen. Het lekdebiet varieert met de waterstand op de Waddenzee (afhankelijk van getij en windeffecten en uiteindelijk ZSS). Bij aanlandige stormen is de zoutlek bijvoorbeeld hoger. 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. Tenslotte kan de zoutlek toenemen bij onderhoud of foutief sluiten van de spuisluisdeuren.
Op dit moment worden twee spui groepen en twee pomp groepen toegevoegd aan het spuicomplex Den Oever. Zo kan er meer water worden afgevoerd, maar neemt de potentiële zoutlek ook toe. In deze studie is gemakshalve verondersteld dat de zoutlek door een spuisluisdeur gelijk is aan de zoutlek door een pompsysteem. In de praktijk zullen deze zoutlekken naar alle waarschijnlijkheid verschillen.
Daarnaast is nog sprake van visvriendelijk spuibehaar waarbij een bepaalde zoutflux optreedt. Het betreft hier echter zogenaamde beheerste factor. Dit aspect is verder toegelicht in paragraaf 2.1.2.1.
- *Spuidebieten of pompdebieten met een bepaalde zoutconcentratie (nr. 2, 5 en 9 in Figuur 2-2)*
Het spuidebiet is een relatief bekende component. De chlorideconcentratie die bij dat spuidebiet hoort is een stuk lastiger te voorspellen. Dit is afhankelijk van de zoutconcentratie direct aan de binnenzijde en in de nabijgelegen erosiekuilen.

Het zout wat uit de erosiekuilen terug wordt gespuid wordt beschreven door pijl 5, het zout wat vanaf het IJsselmeer wordt afgevoerd richting zee wordt beschreven door pijl 9. Pijl 9 is daarmee representatief voor de achtergrondconcentratie in het spuiwater.

Pompen zijn momenteel nog niet aanwezig bij de sluiscomplexen, maar de eerste twee pompgroepen zijn wel al gereed (nog niet operationeel) bij Den Oever om zo de robuustheid in de toekomst te vergroten. De pompen zijn zo ontworpen dat ze het water onttrekken uit de diepere en dus ook zoutere waterlagen om het vervolgens naar de zeezijde te pompen. Dit betekent dat pompen qua zoutafvoer een stuk efficiënter werken ten opzichte van een vergelijkbaar spuidebiet.

- *Het schutdebiet en de zoutflux bij de schutsluizen (nr. 3 en 6 in Figuur 2-2)*
Een schutsluis maakt het mogelijk om schepen van de Waddenzee naar het IJsselmeer en andersom te brengen. Door het schutten vindt wateruitwisseling plaats tussen de zoute Waddenzee en het zoete IJsselmeer. Het IJsselmeer bevat zomers en winters een streefpeil van respectievelijk -0,2 en -0,4 m NAP; wat lager is dan de waterstand op de Waddenzee getijgemiddeld. Het gemiddelde schutdebiet is daardoor naar het IJsselmeer gericht. Vanwege het verschil in zout over de kolk, vindt ongeacht het waterstandsverschil bij elke schutting een zoutuitwisseling plaats met een netto zoutflux richting het IJsselmeer (de zoete kant) als gevolg. Het verschil in waterstand vergroot dit effect. Bij een hogere zeespiegel worden zowel de netto inwaarts gerichte zoutflux als het schutdebiet groter. De Zeesluisformulering (Deltares, 2025) is toegepast om dit uitwisselingsdebiet en de zoutflux te kwantificeren per conditie.
- *Berging van zout in de erosiekuilen en geulsystemen nabij de spuisluizen en schutsluizen (nr. 7 in Figuur 2-2)*
De relatief diepere erosiekuilen aan de IJsselmeerzijde van de spuisluizen vormen samen met de aanwezige voormalige getijgeulsystemen een 'zoutbuffer'. Het zwaardere zoute water afkomstig van de spuisluizen blijft hier als het ware in hangen. Naarmate de kuilen en geulen voller zitten met zout water, kan dit gebufferde en het nog binnenkomende zoute water zich makkelijker verplaatsen verder het IJsselmeer in. Door spuien worden deze kuilen voor een groot deel (afhankelijk van de kenmerken van de spuigang) weer zoet gespoeld. Voor een deel van het zout afkomstig van de schutsluizen geldt dat dit door stroming langs de bodem ook in het geulstelsel bij de spuisluis terecht komt. Dit is vooral bij Den Oever het geval. Het resterende zout uit de schutsluizen wordt niet geborgen nabij de spuisluizen. Het beweegt zich onder andere via de vaargeulen geleidelijk aan verder van het onttrekkingsgebied van de spuien vandaan.
- *Zouttransport richting het hart van het IJsselmeer (nr. 8 en 9 in Figuur 2-2)*
Zout afkomstig van de spuisluizen dat niet meer 'past' in de berging van de erosiekuilen en de geulsystemen en ook niet afgevoerd kan worden bij het spuien of pompen in de toekomst, kan richting het hart van het IJsselmeer getransporteerd worden (advectief en dispersief). Tevens zal het grootste deel van het zout afkomstig van de schutsluizen zich via de vaargeulen en aangrenzende diepere delen naar de rest van het meer verspreiden. Tijdens het spuien wordt water met een laag chloridegehalte uit de rest van het meer onttrokken⁴ (9) dat, tezamen met relatief zout water uit de erosiekuilen, naar zee wordt afgevoerd. Het verschil tussen alle

⁴ Dit chloridegehalte betreft de achtergrond chloride concentratie 'Ca' (zie Appendix A). Deze concentratie is de momentane chlorideconcentratie in Bakje XIV zuid voor Den Oever en in Bakje XIV noord voor Kornwerderzand, zoals berekend door het bakjesmodel.

inkomende en uitgaande fluxen (combinaties van watervolumes en zoutgehaltes) over de rand (aangegeven met paarse stippellijn) is de totale netto zoutvracht. Deze netto vracht zal per situatie en sluiscomplex verschillend zijn. Dit komt doordat de geulsystemen, erosiekuilen en de spuidebieten verschillen. Deze netto zoutvracht kan dus ook negatief (zeewaarts) zijn. Een negatieve flux over spuien is belangrijk voor het lange-termijn evenwicht: om te voorkomen dat het meer geleidelijk aan zouter wordt, moet het systeem per saldo zowel het zout afkomstig uit zee als het zout uit de IJssel en lateralen naar zee afvoeren. Zonder specifieke maatregelen bij de schutsluizen (zoals in de referentiesituatie), wordt in een jaargemiddelde evenwichtssituatie alle binnenkomende zoutvracht via spuien dus meer dan gecompenseerd. Dit gaat wel met een lagere chlorideconcentratie dan de inkomende vracht, dus zijn hierbij grotere volumes aan water benodigd. Door de seizoenen heen kan de netto zoutflux tijdelijk positief zijn waardoor het meer tijdelijk zouter wordt ('oplaadt').

- Implementatie van toekomstige maatregelen*

Toekomstige maatregelen worden voorzien om de inkomende zoutvracht te reduceren. Bijvoorbeeld door het lek te verkleinen of het zout bij de bron direct weer af te voeren. Het gaat hierbij om maatregelen die zorgen dat de bergingsruimte (7) minder snel vult. Echter, de principewerking van het vullen van de berging met de inkomende (gemitigeerde) zoutfluxen, het legen van de berging door (fors) spuien en later pompen en het oplopende zouttransport richting het IJsselmeer bij een steeds vollere berging, blijft bestaan. Deze beschouwingsmethodiek en implementatie in het bakjesmodel daarvan kan daarom gezien worden als generiek en voldoende (1^e orde) accuraat om ook in te zetten bij de doorrekening van (bron)maatregelen.



Figuur 2-2 De in- en uitfluxen van zout en water bij de sluiscomplexen van de Afsluitdijk. Voorbeeld: Den Oever.

2.1.2.1 Zoutvrachten spuisluisen

De zoutlekken via de spuisluisen (1 en 4 in Figuur 2-2) zijn primair afhankelijk van drie factoren

- De zoutconcentratie op de Waddenzee
- Het aantal spui groepen (het lekoppervlak)
- De waterstand op de Waddenzee (zeespiegelstijging)

Naast zoutlekkage door de deuren en als gevolg van onderhoud is er ook sprake van zoutvracht als gevolg van visvriendelijk spui-beheer waarbij, onder de voorwaarden dat het zoutgehalte van het meer en de beschikbare spui-volumes het toelaten, naast vis ook onvermijdelijk een bepaalde hoeveelheid zout het meer binnentreedt. In het beheer van de afgelopen jaren is de mate van visvriendelijk spuien en bijbehorende zoutvracht afhankelijk geweest van de mate van ongewenste zoutlek door de deuren. Een deel van de zoutlekken door de spuisluizen zijn afhankelijk van de mate waarin de beheerder gerichte maatregelen (afdichtingslabben, enkel of dubbel gesloten deuren) treft. De referentiesituatie is dus sterk afhankelijk van de wisselende staat van beheer door de jaren heen. In deze studie gaan we ervan uit dat de geschatte vrachten het totaal zijn van onbeheerste en beheerste factoren en dus inclusief visvriendelijk spuien. Omdat zowel de toekomstige lek-karakteristieken van de gerenoveerde spuien als de toekomstige modus van visvriendelijk spui-beheer nog ongewis zijn, is de basisaannname in alle berekeningen (nul-alternatief, geen bronmaatregelen) dat de aard van de zoutvrachten ongewijzigd blijft en alleen toeneemt als gevolg van zeespiegelstijging. Een eventuele afname in ongewenste zoutlek door technische verbeteringen wordt dan verdisconteerd met een gelijke toename in vracht als gevolg van visvriendelijk spuien.

In RWS (2020) is onderzoek gedaan naar de zoutlek bij de spuisluizen voor de huidige situatie. Er is onderscheid gemaakt tussen de reguliere zoutlek, de (jaargemiddelde) zoutlek door stormen en de zoutlek door achterstallig onderhoud. Voor elke van deze onderdelen van de totale zoutlek is een range gegeven, deze is samengevat in Tabel 2-2. In deze tabel is ook weergegeven welke waarde is overgenomen en gehanteerd in deze studie. De toegepaste waarde is bepaald door het midden van de range te nemen, plus 10% marge.

Tabel 2-2 Overzicht van de toegepaste chloridelast [kg/s] per onderdeel van de zoutlek door de Afsluitdijk, op basis van (RWS, 2020)

Onderdelen zoutlek	Chloridevracht range [kg/s]		Opmerking	Toegepaste waarde* [kg/s]	Per spui-groep [kg/s]
Regulier zoutlek (Afsluitdijk)	8	13	Aanname deuren dubbeldicht	11.5	2.30
Zoutlek storm (Afsluitdijk)	0	2	-	1.1	0.22
Zoutlek achterstallig onderhoud (per spui-groep)	6	10	Jaargemiddeld één spui-groep met achterstallig onderhoud	8.8	1.76
Totaal	14	25		21.4	4.28

*De toegepaste waarde is het gemiddelde van de range, plus 10% marge

Den Oever heeft momenteel drie spui-groepen (huidig) en bouwt uit naar vijf spui-groepen (toekomst). Kornwerderzand bevat twee spui-groepen. Dit komt neer op een zoutvracht van 8,56 kg Cl/s (15,4 kg zout/s) bij Kornwerderzand en van 12,84 kg Cl/s (23,1 kg zout/s) bij Den Oever bij drie spui-groepen en 21,40 kg Cl/s (38,5 kg zout/s) bij vijf spui-groepen. Deze waarden zijn jaargemiddelden en gelden dus ook voor een jaargemiddeld zoutgehalte aan de Waddenzeezijde (~9 PSU). Binnen het bakjesmodel is de jaarvariatie van dit zoutgehalte ook meegenomen, op maandbasis. Aangenomen wordt dat deze varieert tussen de 3 PSU (winter) en 15 PSU (zomer) (Witteveen+Bos, 2015), figuur 7.1). Daarnaast is het effect van de zeespiegelstijging meegenomen in de zoutvracht door middel van een simpele afvoerrelatie (enkel advectief):

$$Q = A \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{waa} - h_{IJM})}$$

Hierin is A het oppervlak van het lek, μ is een coëfficiënt, g is de gravitatie, h_{wad} is de waterstand op de Waddenzee en h_{IJm} is de waterstand op het IJsselmeer. Hierbij is aangenomen dat de waterstand op het IJsselmeer $-0,2$ m NAP is (zomerpeil) en dat bij 0 m zeespiegelstijging de waterstand 0 m NAP is op de Waddenzee. In Tabel 2-3 en Tabel 2-4 zijn de berekende zoutvrachten op basis van bovenstaande formules en de PSU Waddenzee per maand voor Den Oever en Kornwerderzand zichtbaar. Voor de validatie/kalibratie zijn enkel de vrachten in kolom 3 (0m ZSS, 3 spuigroepen) meegenomen. Binnen het bakjesmodel wordt per tijdstap (per dag) gekeken welk lekverlies daarbij hoort, gegeven de maand. De andere kolommen zijn relevant voor de scenario-analyse zoals in Hoofdstuk 3 gepresenteerd.

Tabel 2-3 De zoutvrachten [kg zout/s] per maand bij Den Oever voor 3 en 5 spuigroepen (SG) en voor verschillende hoeveelheden zeespiegelstijging (ZSS).

Maand	PSU Waddenzee	0m ZSS 3 SG	0m ZSS 5 SG	0.5m ZSS 5 SG	1m ZSS 5 SG	3m ZSS 5 SG	5m ZSS 5 SG
Jan.	3	7.7	12.8	24.0	31.4	51.3	65.4
Feb.	5	12.8	21.4	40.0	52.4	85.5	109.0
Maart	7	17.9	29.9	56.0	73.3	119.7	152.6
April	9	23.1	38.5	72.0	94.2	153.9	196.2
Mei	11	28.2	47.0	88.0	115.2	188.1	239.8
Juni	13	33.3	55.6	104.0	136.1	222.3	283.4
Juli	15	38.4	64.1	120.0	157.1	256.5	327.0
Aug.	13	33.3	55.6	104.0	136.1	222.3	283.4
Sept.	11	28.2	47.0	88.0	115.2	188.1	239.8
Okt.	9	23.1	38.5	72.0	94.2	153.9	196.2
Nov.	7	17.9	29.9	56.0	73.3	119.7	152.6
Dec.	5	12.8	21.4	40.0	52.4	85.5	109.0
Jaargem.	9	23.1	38.5	72.0	94.2	153.9	196.2

Tabel 2-4 De lekverliezen [kg zout/s] per maand bij Kornwerderzand voor 2 spuigroepen (SG) en voor verschillende hoeveelheden zeespiegelstijging (ZSS).

Maand	PSU Waddenzee	0m ZSS 2 SG	0.5m ZSS 2 SG	1m ZSS 2 SG	3m ZSS 2 SG	5m ZSS 2 SG
Jan.	3	5.1	9.6	12.5	20.5	26.1
Feb.	5	8.5	16.0	20.9	34.1	43.5
Maart	7	11.9	22.3	29.3	47.8	60.9
April	9	15.4	28.7	37.6	61.4	78.3
Mei	11	18.8	35.1	46.0	75.1	95.7
Juni	13	22.2	41.5	54.3	88.7	113.1
Juli	15	25.6	47.9	62.7	102.4	130.5
Aug.	13	22.2	41.5	54.3	88.7	113.1
Sept.	11	18.8	35.1	46.0	75.1	95.7
Okt.	9	15.4	28.7	37.6	61.4	78.3
Nov.	7	11.9	22.3	29.3	47.8	60.9

Dec.	5	8.5	16.0	20.9	34.1	43.5
Jaargem.	9	15.4	28.7	37.6	61.4	78.3

2.1.2.2 Schutsluizen

De bruto zoutvracht door de schutsluizen bij Kornwerderzand en Den Oever richting het IJsselmeer (3 en 6 in Figuur 2-2) zijn bepaald aan de hand van de Zeesluisformulering welke elke tijdstap (elke dag) aangeroepen wordt in het bakjesmodel. De volgende gegevens zijn hiervoor gebruikt:

- De PSU per maand aan de Waddenzeezijde (zie Tabel 2-3 en Tabel 2-4)
- De waterstand aan de Waddenzeezijde (astronomisch getij (op 10 minuten basis) van een bepaald jaar). Bij een scenario met zeespiegelstijging wordt de hoeveelheid zeespiegelstijging opgeteld bij het getijdesignaal.
- Het dagelijks aantal schutcycli variërend per maand per schutsluis. Bij Den Oever wordt ook rekening gehouden met het schutten van de hele of halve kolk (zie Tabel 2-5).
- De waterstand op het IJsselmeer per tijdstap (uitkomst bakjesmodel)
- De zoutconcentratie aan de IJsselmeerzijde per tijdstap (uitkomst bakjesmodel)

Met behulp van een koppeling met de Zeesluisformulering wordt, gegeven de bovenstaande informatie, de inputparameters in Tabel 2-5 en het aantal schutcycli in Tabel 2-6 de zoutvracht als gevolg van het schutten bepaald, zie Tabel 2-7 (enkel geldig voor het referentiescenario). Deze is berekend door de daggemiddelde zoutvracht te bepalen gegeven de zoutgradiënt (constant over de dag) en waterstandsverschil (varieert over de dag) over de kolk. Dit is gedaan om de zoutvrachtverschillen als gevolg van het getij daggemiddeld mee te kunnen nemen.

Zoutlekken schutsluizen

De zoutlekken door de deuren van de schutsluizen zijn ook meegenomen. Deze zijn geschat op 1 kg zout/s voor de Stevinsluis bij Den Oever en de grote kolk bij Kornwerderzand en 0,5 kg zout/s voor de kleine kolk bij Kornwerderzand. Aangezien deze zoutlekken zeer klein zijn ten opzichte van de zoutvracht als gevolg van het schutten, is de invloed van de toenemende zeespiegelstijging op deze zoutlekken niet meegenomen.

Tabel 2-5 De inputparameters gebruikt in de Zeesluisformulering voor de Stevinsluis bij Den Oever en de Lorentzsluizen bij Kornwerderzand (KWZ).

Inputparameters ZSF	Den Oever	KWZ groot	KWZ klein
Lengte [m]	148	148	74
Breedte [m]	14	14	9
Diepte kolkbodem [m]	-4.7	-4.7	-4.7
DOT Deur Open Tijd [min.]	22	24	17
Scheepsvolume [m ³]	1000	1000	500
Tijd om de deuren te openen [min.]	1	2	2
Nivelleertijd [min.]	4	4	4

Tabel 2-6 Maandelijks variatie in het aantal schutcycli per dag en per sluiskolk door de Afsluitdijk. Het aantal schutcycli is het gemiddelde tussen 2017/2018 (KWZ/DO) en 2023. Bij Den Oever wordt ook een deel van de kolk geschut bij weinig schepen.

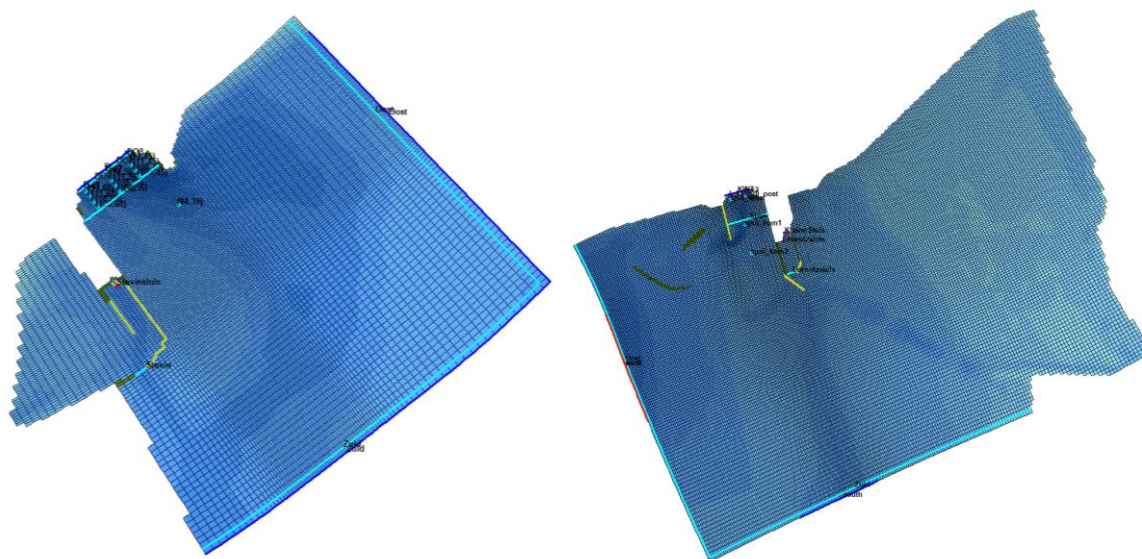
maand	Hele kolk Den Oever	Deelkolk Den Oever	KWZ groot	KWZ klein
Januari	3	0	8	1
Februari	4	0	8	1
Maart	5	0	9	3
April	9	1	13	6
Mei	13	1	16	10
Juni	14	2	17	12
Juli	15	2	17	12
Augustus	15	2	16	12
September	12	2	15	9
Oktober	10	1	14	6
November	6	0	10	3
December	4	0	8	2
Jaargemiddeld	9.2	0.9	12.6	6.4

Tabel 2-7 Maandelijks variatie in zoutlast door het schutten bij Den Oever en Kornwerderzand, zoals berekend met de ZSF voor het referentiescenario.

maand	Bruto zoutlast Den Oever [kg zout/s]	Bruto zoutlast Kornwerderzand [kg zout/s]
Januari	1.50	2.77
Februari	2.22	4.08
Maart	3.50	6.51
April	7.33	11.95
Mei	12.56	18.57
Juni	17.44	24.06
Juli	22.07	29.15
Augustus	18.04	23.82
September	12.09	17.81
Oktober	8.16	12.96
November	4.18	7.18
December	2.28	4.24
Jaargemiddeld	9.28	13.59

2.1.2.3 Zoutconcentratie spui- en pompdebiet en bepalen netto zoutflux richting IJsselmeer

Om te bepalen wat de netto zoutlast richting het IJsselmeer (nr. 8, Figuur 2-2) en de zoutconcentratie van het spuiwater/pompwater is (nr. 5, Figuur 2-2), zijn een aantal principeberekeningen uitgevoerd met twee Delft3D4 'sub-grid-modellen'; één van het gebied rond sluiscomplex Kornwerderzand en één van het gebied rond Den Oever (Figuur 2-3). Deze sub-grid-modellen zijn beide 3D modellen waardoor de zoutdynamiek beter gesimuleerd kan worden en op een kleinere schaal dan in het bakjesmodel. De meest recente bathymetriegegevens uit 2021 zijn daarnaast gebruikt in de modelschematisaties.



Figuur 2-3 De Delft3D4 modellen waarmee de principeberekeningen zijn uitgevoerd. Links: Den Oever. Rechts: Kornwerderzand.

Daarnaast is gebruik gemaakt van metingen en literatuur om tot een systeembegrip te komen. Op basis hiervan is het gedrag van de inkomende en uitgaande zoutfluxen als ook de bergingscomponent gekwantificeerd.

In het kort is hierbij de volgende strategie gehanteerd:

- Bruto inkomende zoutlast bepalen op basis van voorgaande paragrafen (jaargemiddelden voor schut- en spuisluizen);
- Simuleren van de binnenkomende zoutlast en het vulgedrag van de geulen en erosiekuilen;
- De modelresultaten duiden en valideren door een vergelijking met metingen om zo te komen tot een gedragen kwantificering van de inkomende zoutflux;
- Het bepalen van de uitgaande zoutflux op basis van literatuur en metingen;
- Het omzetten van het zoutgedrag in relaties die in te zetten zijn in het bakjesmodel;
- Uitgangspunten spuien versus pompen.

Bruto inkomende zoutlast

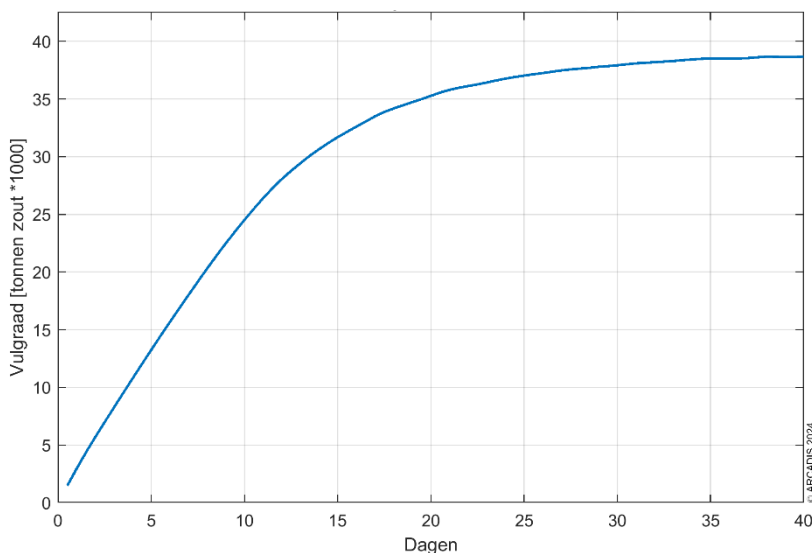
In de beide sub-grid-modellen is een jaargemiddelde zoutlast opgelegd vanuit de schut- en spuisluizen (zie paragraaf 2.1.2.1 en paragraaf 2.1.2.2). In de huidige situatie is dit voor Den Oever 34,5 kg zout/s (circa 23 kg/s bij het spuiwerk en 11,5 kg/s bij de schutsluis) en voor Kornwerderzand is dit 32,4 kg zout/s (circa 15,4 kg/s bij het spuiwerk en 17 kg/s bij de schutsluis).

Simulatie gedrag inkomende zoutlast

Voor het bepalen van het gedrag van de inkomende zoutlast is een modelsom uitgevoerd van 30 dagen waarbij het deelgebied nabij de sluisen initieel zoet is. In de som is een constante inkomende zoutlast opgelegd van 34,5 kg/s en er vindt geen afvoer van water plaats door spuien of schutten (of lekkage). De zoutconcentratie loopt daarom op in het model. Er wordt volledig gefocust op het opladen van het systeem (het vullen van de buffer gevormd door de geulen en erosiekuilen). Hierbij is slechts beperkt gekeken naar de effecten van wind. Wind resulteert in verticale menging en extra horizontaal transport. In feite vormt het een reductie op hoe efficiënt zout opgeslagen kan worden (en blijven) in de buffer. De insteek van deze studie laat geen details toe zoals specifieke windevents, maar het gemiddelde effect van wind is wel meegenomen bij de implementatie van de

principeberekening in het bakjesmodel zodat het gemiddelde gedrag voldoende robuust bevat.

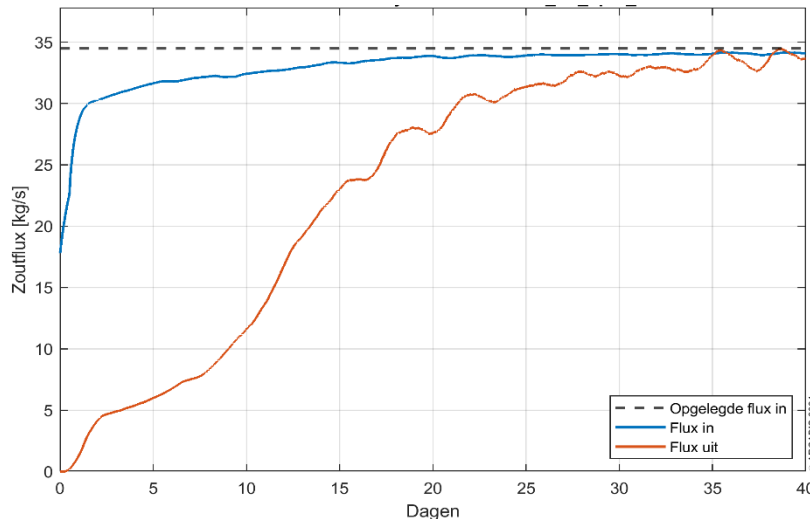
Figuur 2-4 toont de oplopende vulgraad⁵ in de tijd in de voormalig getijgeul, vaargeul en de erosiekuil direct aan de binnenzijde van Den Oever ten gevolge van de constante zoutlast van 34,5 kg/s. De vulgraad loopt de eerste 7 dagen lineair op en vult daarna met een afnemend tempo tot maximaal circa 38.000 ton zout.



Figuur 2-4 Vulgraad (berging van zout) binnen de geulen en erosiekuil bij Den Oever (binnenzijde) in de tijd.

De afnemende toename van de vulgraad in de tijd, ondanks de constant opgelegde inkomende zoutlast en afwezigheid van afvoer door spuien en schutten (en lekkages), betekent dat er een flux optreedt over de rand van het beschouwde bufferdomein (Figuur 2-3) richting het IJsselmeer. Dit is ook wat de gesimuleerde zoutfluxen laten zien, zie Figuur 2-5. De inkomende flux (blauwe lijn in grafiek) convergeert richting de opgelegde bruto zoutflux van 34,5 kg/s. De vertraging hierin komt doordat de flux wordt berekend op enige afstand van de bronnen om zowel advectief als dispersief transport (op de route tussen bron en de rand van het bufferdomein) correct mee te kunnen nemen. De zoutflux richting het IJsselmeer (oranje lijn in grafiek) loopt ook op in de tijd, maar met een vertraging. De vertraging is de berging in de geulen en de erosiekuil (de vulgraad zoals getoond in Figuur 2-4). Na een week is de flux richting het IJsselmeer circa 7,5 kg/s; ongeveer 20% van de inkomende zoutflux. Na twee weken is dit opgelopen tot 22,5 kg/s (65%) en na ongeveer drie weken passeert het zelfs de 90%.

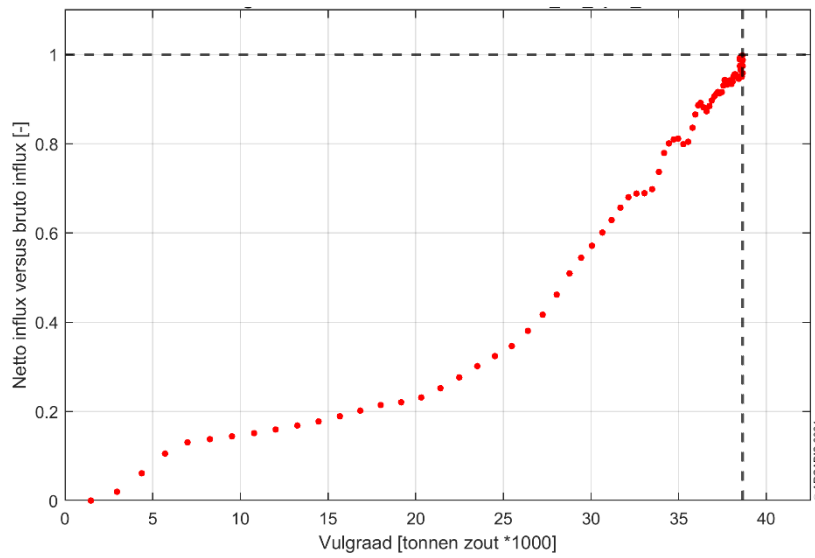
⁵ De vulgraad is berekend over de totale diepte (bodem tot wateroppervlak). De vulgraad zal echter nooit het wateroppervlak bereiken, ver daarvoor zal zout gaan 'lekkende' richting ondiepere delen in het systeem en via bodemtransport richting het IJsselmeer transporteren. De afvlakking van de grafiek in Figuur 2-4 laat dit proces zien. Hoe meer afvlakking hoe meer 'lekkage' uit de bergende lichamen. Wanneer de grafiek horizontaal is, lekt de volledige inkomende zoutflux richting de ondiepere delen in het IJsselmeer.



Figuur 2-5 Inkomende bruto zoutflux (blauw) en uitgaande zoutflux (oranje) richting het IJsselmeer in de tijd voor Den Oever.

Wanneer de vulgraad (Figuur 2-4) wordt uitgezet tegen de ratio van de inkomende bruto zoutflux en de zoutflux die 'doorschiet' richting het IJsselmeer op dat moment in de tijd (Figuur 2-5), kan een relatie tussen de twee weergegeven worden (Figuur 2-6). Het tijdselement en de precieze inkomende zoutlast vallen uit de relatie, het resultaat betreft enkel de relatie tussen de momentane vulgraad en welk aandeel van een zekere bruto inkomende zoutlast doorschiet richting het IJsselmeer, met andere woorden; de netto zoutlast⁶. Een dergelijke relatie is daarmee losgekoppeld van de component 'tijd' en leent zich daarom heel goed om op te nemen in het bakjesmodel. NB: deze relatie is enkel geldig voor de huidige bathymetrie en geometrie en verhouding tussen zoutlast uit spuisluizen en schutsluizen. Voor toekomstige veranderingen in bathymetrie zal de relatie opnieuw afgeleid moeten worden. Voor de (beleidsneutrale) berekeningen in deze studie wordt van ongewijzigde geometrische condities uitgegaan.

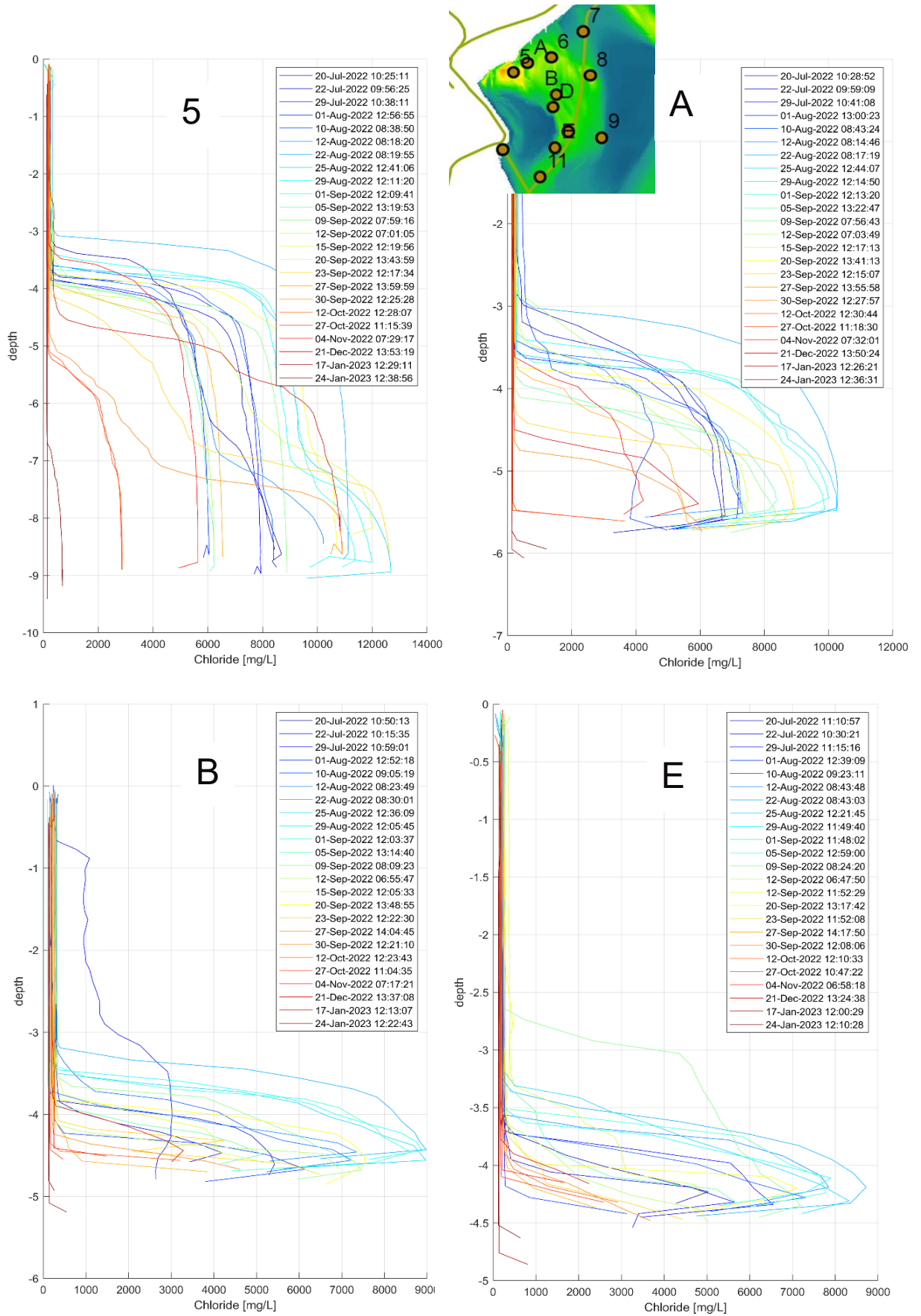
⁶ In wezen is de correcte betiteling van wat hier bepaald wordt (pijl 8 in *Figuur 2-2*) niet 'netto', maar de '1e orde bijdrage vanuit zeezijde aan de netto flux'. Tegelijkertijd bepaalt het bakjesmodel de feedback terug richting zeezijde tijdens het spuien middels de lokale achtergrondconcentratie (C_a), pijl 9 in *Figuur 2-2*. De daadwerkelijke netto inkomende flux is daarmee pijl 8 minus pijl 9. Deze resultante netto flux is voor de referentie over een geheel jaar circa 0. Wel is sprake van een variatie van de netto flux, zo is deze positief in de (droge) zomermaanden (het IJsselmeer 'laadt op'), en negatief tijdens de nattere maanden (het IJsselmeer wordt 'schoongespoeld').



Figuur 2-6 Relatie tussen de vulgraad en de ratio tussen netto en bruto zoutflux in voor Den Oever.

Duiding van de modelresultaten aan de hand van ervaringen en metingen

Figuur 2-7 toont 24 gemeten chlorideprofielen in de tijd (periode juli 2022 – januari 2023) voor 4 locaties aan de binnenzijde van Den Oever. Zie inzetkaart voor de locaties.



Figuur 2-7 Gemeten chlorideprofielen bij den Den Oever [bron: Deltares, uit de voorlopige dataset voor de validatie van het 3D IJsselmeermodel, ontvangen op 21 maart 2024].

Van de profielen die een gevulde erosiekuil of geul laten zien, bedraagt de maximale vulhoogte -4 m NAP tot -3,5 m NAP met een enkele uitschieter tot -3,2 m NAP. De stratificatie is sterk en onder dit niveau is de dieptegemiddelde chlorideconcentratie 80 tot 90% van de maximale concentratie binnen het profiel.

De in de principeberekening gehanteerde PSU van de zoute influx is 15 PSU. Als de erosiekuil en aangrenzende geulen gevuld zitten tot -4 m NAP is er 20 000 ton zout opgeslagen, bij een vulling tot -3,5 en -3,2 m NAP is dit 34 000 en 39 000 ton zout, respectievelijk. Daarnaast is er een gangbare aanname dat de erosiekuil bij Den Oever (maar ook bij Kornwerderzand) vult in circa 7 dagen. Bij een aanhoudende influx zonder spuien, zou daarna overloop plaats gaan vinden (RWS, 2020). 34,5 kg/s zoute influx een week lang geeft circa 20 000 ton zout tot een vulling tot -4 m NAP. Bij een hogere vulgraad gaat er meer zout overlopen en via advectief en dispersief transport richting het IJsselmeer. Figuur 2-4 laat dit ook zien, tot een vulgraad van 20 000 ton zout is de overloop beperkt⁷, daarna schiet een steeds groter aandeel van de inkomende flux door het IJsselmeer in, tot aan een vulgraad van 38 000 ton zout, waarbij vrijwel de volledige inkomende flux doorschiet.

Bovengenoemde kentallen zijn de basis voor het chloridegedrag bij Den Oever en Kornwerderzand die in zekere zin volgen uit zowel metingen, literatuur en modellering. Daarmee is dit een gedragen basis voor de relatie voor de inkomende zoutflux in het bakjesmodel. Deze relaties tussen de inkomende flux bij Den Oever en Kornwerderzand, de vulgraad van de buffer (erosiekuilen) en wat doorschiet richting het IJsselmeer, zijn opgenomen in Bijlage A. Nota bene: de vulgraad van de erosiekuilen is daarmee ook een parameter in het bakjesmodel.

Uitgaande (zeewaartse) zoutflux op basis van literatuur en metingen

Er is significante (turbulente) energie nodig om de met zout gevulde erosiekuilen en aangrenzende geulen te ontzilten. Dat houdt in dat er fors gespuid moet worden om deze minimale energie te generen. Op basis van metingen is vastgesteld dat ten minste een spuipekbied van 1500 m³/s en een spuivolume van 12,5 miljoen m³ benodigd is om de diepere delen bij de spuisluisen te ontzilten (Van Veen, 2021). Dit geldt zowel voor de diepere delen bij Den Oever als ook bij Kornwerderzand. Indien een dergelijk spuivolume niet haalbaar is in verband met watertekort, is het advies om ten minste 7,5 miljoen m³ te spuien. Dit is fors minder effectief, maar wel afdoende om de bovenlaag te ontzilten en zo zoute overloop richting het IJsselmeer te beperken.

Deze kentallen zijn gehanteerd voor de uitgaande zoutflux die geïmplementeerd is in het bakjesmodel. Zie ook Bijlage A voor een volledig overzicht van alle kentallen die toegepast zijn in het bakjesmodel. De belangrijkste punten zijn hieronder opgenomen:

- Voor de uitgaande zoutflux tijdens spuien geldt dat de flux per getij wordt berekend op basis van twee componenten. De eerste component is de momentane achtergrondwaarde van de chlorideconcentratie in het lokale bakje (XIV_{zuid} voor Den Oever en XIV_{noord} voor Kornwerderzand) maal het spuivolume. De tweede component bestaat uit een factor maal de momentane vulgraad van de erosiekuil. De factor varieert op basis van het spuivolume. Hierbij is uitgegaan van een spoeling van 90% van de vulgraad bij het behalen van het beoogde spuivolume 12,5 miljoen m³ en 30% van het minder optimale spuivolume van 7,5 miljoen m³ waarbij enkel de bovenlaag van de erosiekuil zoetgespoeld wordt. De 'kop' en de 'staart' van deze relatie bij relatief lage en hoge spuiolumes, is enigszins afgevlakt om numerieke stabiliteit te bevorderen.

⁷ Het ruimtelijk gedrag van het inkomende zout in het model laat zien dat er een flux richting het IJsselmeer bij een vulgraad lager dan 20 000 ton zout vanuit de sluiskolk waargenomen kan worden. Circa 50% van de hier binnenkomende zoutflux gaat richting de erosiekuil, de rest volgt de vaargeul en gaat zo direct richting het IJsselmeer. Bij Kornwerderzand gaat zelfs vrijwel 100% van de hier binnenkomende zout door de sluisen direct richting het IJsselmeer.

- Voor de uitgaande zoutflux tijdens pompen geldt dat de flux per getij wordt bepaald als functie van de vulgraad. Onder een gestelde grenswaarde voor de vulgraad (deze verschilt per locatie) zuigen de pompen geen zout water uit de erosiekuil en bestaat de zoutflux uit de momentane achtergrondwaarde van de chlorideconcentratie in het lokale bakje (XIV_{zuid} voor Den Oever en XIV_{noord} voor Kornwerderzand) maal het pompvolume. Boven de gehanteerde grenswaarde voor de vulgraad zuigen de pompen zout water uit de erosiekuil en wordt 10 PSU opgeteld bij de momentane achtergrondconcentratie. 10 PSU wordt als representatief gezien voor de zoutwaarde van water in een gevulde erosiekuil. Het meenemen van de achtergrondconcentratie in het verpompte water, onafhankelijk van de vulgraad, is toegepast om de numerieke stabiliteit te bevorderen. De gehanteerde grenswaarden zijn 5000 en 10 000 ton zout voor Den Oever en Kornwerderzand, respectievelijk, uitgaande van een (inschatting van de) toekomstige bodemligging. Dit komt overeen met een vulgraad tot -6 m NAP, de aangenomen innamehoogte van de pompen.

Relaties zoutgedrag door Afsluitdijk in het bakjesmodel

De gevonden kentallen voor zowel de inkomende zoutvracht als de uitgaande zoutvracht, zijn versimpeld tot relaties welke toepasbaar zijn in het bakjesmodel. Deze kentallen en relaties zijn opgenomen in Appendix A. De relaties zijn enigszins verschillend voor de huidige bodem (nulvariant), toekomstige bodem en toekomstige bodem, inclusief pompen. Hierbij moet worden opgemerkt dat:

- De relaties voor het nul-alternatief zijn gebaseerd op de kentallen uit de metingen, literatuur en principeberekeningen zoals beschreven in dit hoofdstuk.
- Er is onderscheid gemaakt tussen de bijdrage van de zoutlast door de schutsluizen en de zoutlast door de spuisluizen. Bij Den Oever volgt een deel van de zoutlast door de schutsluizen namelijk de bodem richting de erosiekuil voor de spuisluizen, bij Kornwerderzand is dit niet het geval. De relatie is daarmee verschillend voor KWZ vergeleken met DO.
- De relaties voor de toekomstige bodem zijn aangepast op basis van de verwachte toename van het bergend volume onder de -4 m NAP. Zowel bij Den Oever (groei erosiekuil door nieuwe spui groepen) en Kornwerderzand (ontgraving ten behoeve van Vismigratierivier) is rekening gehouden met een toename in bergend volume. Bij den Oever is uitgegaan van een toename van 20%, bij Kornwerderzand is een toename van een bergingscapaciteit van 5000 ton zout gehanteerd.
- De uitflux zout is bij spuien significant anders dan bij het afvoeren van datzelfde water met pompen. Bij spuien is een minimale turbulente energie nodig om te ontzilten, bij pompen kan water onttrokken worden uit diepere waterlagen om zo het zout efficiënter af te voeren. Op basis van de ontwerp tekening voor de Nieuwe Spuimiddelen Den Oever is aangenomen dat de pompen het water zullen onttrekken rond -6 m NAP. De relatie is vervolgens zodanig opgezet dat vanaf een vulgraad van -6 m NAP of hoger, de pompen zout water afvoeren. Bij een lagere vulgraad onttrekken ze slechts de momentane achtergrondwaarde (deze waarde volgt uit het bakjesmodel). Het gebruik van de momentane achtergrondwaarde is te zien als conservatief, omdat in werkelijkheid de lokale concentratie waarschijnlijk nog wel hoger zal zijn dan de meer grootschalige achtergrondconcentratie. De uitgangspunten voor wat betreft de verdeling van de afvoer (spuien versus pompen) is hieronder toegelicht.

Uitgangspunten pompen en spuien

In deze studie is aangenomen dat bij 0 m zeespiegelstijging het volledige uitgaande volume wordt gespuid. Bij 0,5 m zeespiegelstijging wordt 50% gepompt en 50% gespuid en bij meer dan 0,5 m zeespiegelstijging wordt het volledige volume gepompt (Nota Bene: ook na overgang op pompen wordt een zoutlek verondersteld). Hierbij is aangenomen dat zowel bij Kornwerderzand als bij Den Oever pompen aanwezig zijn. Tenslotte is aangenomen dat 55% van het uitgaande volume bij Den Oever het IJsselmeer verlaat en 45% bij Kornwerderzand (huidige verdeling). Omdat nog geen onderzoek is gedaan naar de verandering van deze verdeling als gevolg van zeespiegelstijging en de aanbouw van de nieuwe spuumiddelen en pompen bij Den Oever, is deze verdeling aangehouden voor alle simulaties. Dit vergt wel

pompen die ook een laag debiet kunnen afvoeren (orde 20 m³/s), zo kan ook bij een lage (zoet)waterbeschikbaarheid zout water afgevoerd worden uit de erosiekuil.

2.1.3 Sluiscomplex Schellingwoude

Sluiscomplex Schellingwoude (Oranjesluizen) is de verbinding tussen het Buiten-IJ (Markermeerzijde) en het Binnen-IJ (zijde Noordzeekanaal). Het complex bestaat uit een vistrap, vier schutsluizen en een spuisluis (suatieschuif). Daarnaast zijn de sluisen voorzien van drie vispassages om vismigratie mogelijk te maken (Figuur 2-8).

Sluiscomplex Schellingwoude was in fase 1 nog niet aanwezig in het bakjesmodel. Daarom is deze als randvoorwaarde toegevoegd aan het model. Om dit mogelijk te maken is een klein bakje toegevoegd in het model.

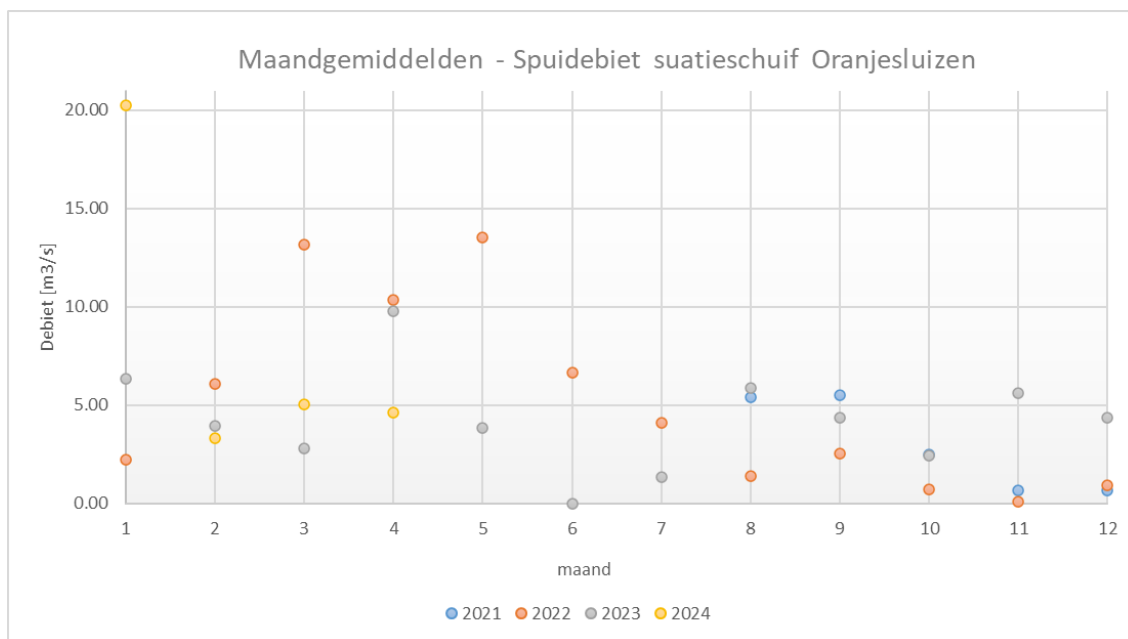


Figuur 2-8 Sluizencomplex Schellingwoude (rijkswaterstaat.nl)

Bij de Oranjesluizen (OS) wordt in het droogteseizoen bij oplopende chloridegehalte op het Noordzeekanaal water van het Markermeer naar het Noordzeekanaal doorgelaten, mits er voldoende water in het Markermeer beschikbaar is. Dit om zoutindringing naar het Markermeer tegen te gaan en eventueel door het Noordzeekanaal zoeter te spoelen en verzilting richting het Amsterdam-Rijnkanaal (mede) te voorkomen. Tevens wordt bij hoog water in het IJsselmeergebied, water richting het Noordzeekanaal doorgelaten als extra afvoeroute. Wegens de complexiteit zijn deze twee functies van de Oranjesluizen niet zodanig meegenomen in het bakjesmodel, er is gekozen voor een pragmatische oplossing (zie hieronder). Het effect op de zoutvracht op het Markermeer vanuit het Noordzeekanaal is wel meegenomen.

Binnen deze studie is geprobeerd om het sluiscomplex mee te nemen door middel van de Zeesluisformulering in combinatie met het opleggen van spuidebieten. Dit resulteerde echter in foutieve resultaten; de chlorideconcentratie in het Markermeer bleef maar oplopen. Dit kwam doordat het OS bakje een enkele zoutwaarde heeft welke doorgaans de zoutwaarde direct bij de kolk onderschat. De Zeesluisformulering berekent daarmee een te hoge zoutflux. Tegelijkertijd zorgde de zoutwaarde in het OS bakje voor een te groot zouttransport richting het aangrenzende bakje. Dit is geprobeerd op te lossen door de dispersielengte aan te passen, maar ook dit resulteerde niet in het gewenste resultaat. Een meer gehanteerde detailaanpak zoals bij de sluiscomplexen Den Oever en Kornwerderzand was met oog op de verhouding tussen benodigde technische diepgang ten opzichte van aard en omvang van de

zoutpost ook niet gerechtvaardigd⁸. Om die reden is gekozen voor een pragmatische, conservatieve, aanpak. Een constant spuidebiet (richting het Noordzeekanaal) is opgelegd ($5 \text{ m}^3/\text{s}$) in combinatie met een constante chloridevracht (richting het Markermeer) van 8 kg/s . De $5 \text{ m}^3/\text{s}$ is gebaseerd op metingen zoals getoond in Figuur 2-9. Deze afvoer is constant gehouden omdat geen duidelijke seizoenvariatie zichtbaar is in de metingen. De chloridevracht van 8 kg/s is een kalibratiewaarde. De vaste waarde voor zowel de afvoer als de zoutvracht zijn zodanig gekozen dat deze jaargemiddeld de beste modelresultaten geven. Het gevolg van deze aanname is dat seizoensgebonden verzilting van het binnen-IJ/het NZK niet wordt meegenomen in deze studie. Ook eventuele trends in zoutvracht/afvoer door klimaatverandering of andere maten van zeespiegelstijging zijn niet beschouwd in deze studie. Door deze zoutvracht van 8 kg/s komen de zoutconcentraties op het Markermeer het beste overeen met de metingen (zie paragraaf 2.2).



Figuur 2-9 De maandgemiddelde spuidebieten bij de Oranjesluizen.

2.1.4 Numerieke koppeling waterbalans en chloridebalans

De numerieke koppeling tussen de waterbalans en de chloridebalans is aangepast ten opzichte van fase 1. In fase 1 zijn de waterbalans en de chloridebalans beide geheel serieel doorgerekend, omdat er geen directe terugkoppelingen tussen de balansen aanwezig waren. Met de toevoeging van de sluiscomplexen bij de Afsluitdijk is deze directe terugkoppeling wel aanwezig. De vulgraad van de chloridekuil bij beide sluiscomplexen is zowel afhankelijk van de chlorideconcentraties berekend door Delwaq als de spuivolumes berekend met het bakjesmodel. De numerieke koppeling is daarom aangepast naar een seriële koppeling op dagbasis. Een schematische weergave van de numerieke koppeling is weergegeven in Figuur 2-10. In dit figuur staat ZSF voor de Afsluitdijkmodule zoals beschreven in 2.1.2. De invoerbestanden bestaan hier uit vooraf opgestelde tijdreeksen voor de verschillende invoerparameters van het bakjesmodel en Delwaq. Dit betreft de

⁸ Indien een nauwkeuriger benadering voor de zoutvracht tgv 'Schellingwoude' bij toekomstige toepassingen van het bakjesmodel voor het Markermeer gewenst is, wordt aanbevolen om bijvoorbeeld het ZoutTransportModel van Deltares waarin de zeesluisformulering wordt gecombineerd met meerdere lokale sub-bakjes rond de sluis in te zetten om deze termen te bepalen.

resulterende debieten met de debieten zoals deze in het LHM-model (v4.3)⁹ berekend zijn, leverde het inzicht op dat de debieten bij de IJsselkop (waar de IRM-afvoerverdeling op van toepassing is) en de debieten bij het Keteldiep aanzienlijk kunnen verschillen, als gevolg van regionale afvoer en onttrekkingen. In overeenstemming met opdrachtgever Rijkswaterstaat is besloten om de berekende LHM-debieten bij de monding van de IJssel op het Keteldiep te gebruiken als invoer. De afvoer vanuit het Zwarte Water is opgenomen in de laterale debieten van- en naar de regio (zie Laterale watervraag/watertoevoer onderstaand).

Laterale watervraag/watertoevoer: Vanuit de opdrachtgever zijn verschillende waterbalansen beschikbaar gesteld voor het IJsselmeergebied, verkregen via Deltares vanuit de water- en zoutbalansen voor Midden-Nederland. Bij het in detail analyseren van deze reeksen bleek de tijdspanne niet volledig genoeg voor het gebruik in de kalibratie en ontbraken er posten om de laterale aan- en toevoer vanuit de regio volledig te kwantificeren. Er is daarom in overleg met opdrachtgever Rijkswaterstaat besloten om de laterale watervraag/watertoevoer te baseren op de 100-jarige LHM reeks die in het kader van de Basisprognoses 2018 (BP'18) zijn opgeleverd. Dit is de meest recente langjarige reeks waar Rijkswaterstaat voldoende vertrouwen in heeft om de laterale debieten op te baseren.

De laterale watertoevoer en watervraag in het LHM is opgebouwd uit twee verschillende componenten.

1. De debieten op het DM netwerk in het LHM. Hierbij zijn de relevante fluxen vanuit de regio naar het IJsselmeer en Markermeer gebruikt. Deze fluxen zijn het resultaat van de neerslag-afvoer relaties in het regionale systeem.
2. Directe onttrekkingen en lozingen vanuit de regio. Deze zijn beschikbaar voor het IJsselmeer, Markermeer en het Eemmeer. Deze onttrekkingen/lozingen vinden direct plaats op de meren in het model, en zijn dus nog niet opgenomen als fluxen richting/van de meren vanuit/naar de regio onder bovenstaand punt 1.

De directe onttrekkingen worden in de LHM uitvoer niet uitgesplitst per regio. Om deze onttrekkingen en lozingen te kunnen toewijzen aan de juiste regio, is daarom de volgende aanname op basis van expert-judgement gedaan in de verdeling van de fluxen tussen verschillende waterschappen:

IJsselmeer: 50%/25%/25% voor Zuiderzeeland, Hollands Noorderkwartier en Friesland
Markermeer: 60%/30%/10% voor Zuiderzeeland, Hollands Noorderkwartier en Waternet
Eemmeer: 100% Vallei en Veluwe

Deze verdeling is een grove schets, maar voor de uitkomsten van het bakjesmodel heeft de specifieke verdeling een klein effect. Het toewijzen van een debiet aan een andere regio heeft alleen impact op de lozing op een bepaalde plek en de bijbehorende (relatief kleine) veranderingen in debieten tussen de bakjes.

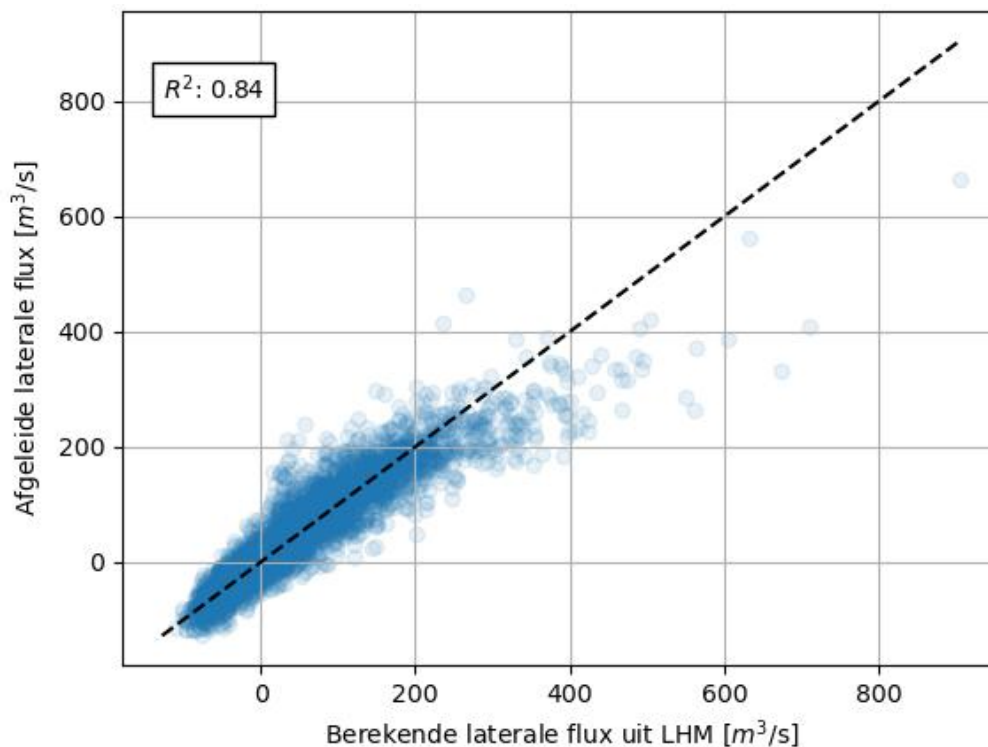
De 100-jarige LHM reeks beslaat een periode van 1912-2012 en valt daarmee buiten de kalibratieperiode. Omdat er een tijdsafhankelijke meteorologische invoer wordt opgelegd aan het model in de kalibratiefase, is het van belang dat de laterale watervraag/watertoevoer wordt afgestemd op deze meteorologische invoer. Hiervoor is een relatie opgesteld tussen de laterale watervraag/-toevoer uit het LHM en de meteorologische omstandigheden voor de 100-jarige BP'18 reeks. Deze relatie is vervolgens gebruikt om de meteorologische invoer voor de kalibratieperiode om te zetten naar geschikte en congruente laterale fluxen.

In overleg met de opdrachtgever is besloten om hiervoor een eenvoudige relatie op te zetten. Er is gekozen voor een meervoudige lineaire regressie, waarbij verschillende combinaties van variabelen zijn meegenomen. Het regressiemodel met de beste score bevat

⁹ Het gebruik van LHM v4.3 (in plaats van de later genoemde BP'18 reeks) is later in het proces pas aan het licht gekomen. Vanwege procesmatige afwegingen is ervoor gekozen toch verder te gaan met deze modelmatige afvoeren. In hoofdstuk 3 wordt, wat betreft de implicaties van deze afweging verder op in gegaan.

variabelen voor het neerslagoverschot in de huidige decade en vorige decades tot een maand terug, de wortel van het neerslagoverschot voor deze decades en voor de seizoensdynamiek per maand. Het neerslagoverschot in het huidige decade en de seizoensdynamiek per maand variabele dragen het meest bij aan de beste fit.

De gehanteerde variabelen en resulterende coëfficiënten zijn uitgewerkt in Appendix C. De gehanteerde variabelen zijn gelijk voor alle regio's, maar de bijbehorende coëfficiënten verschillen. Figuur 2-11 toont de relatie tussen de som van de laterale fluxen uit de BP'18 100-jarige reeks en de op basis van de regressie afgeleide som van alle laterale watervragen/-toevoeren. Het neerslagoverschot en de maandcoëfficiënten zijn in staat een groot deel van de optredende variatie in de laterale fluxen te verklaren, al worden de lozingen (positieve debieten) gemiddeld met circa enkele tientallen m³/s overschat en de onttrekkingen (negatieve debieten) ook in omvang overschat, zij het met maximaal enkele tientallen m³/s.

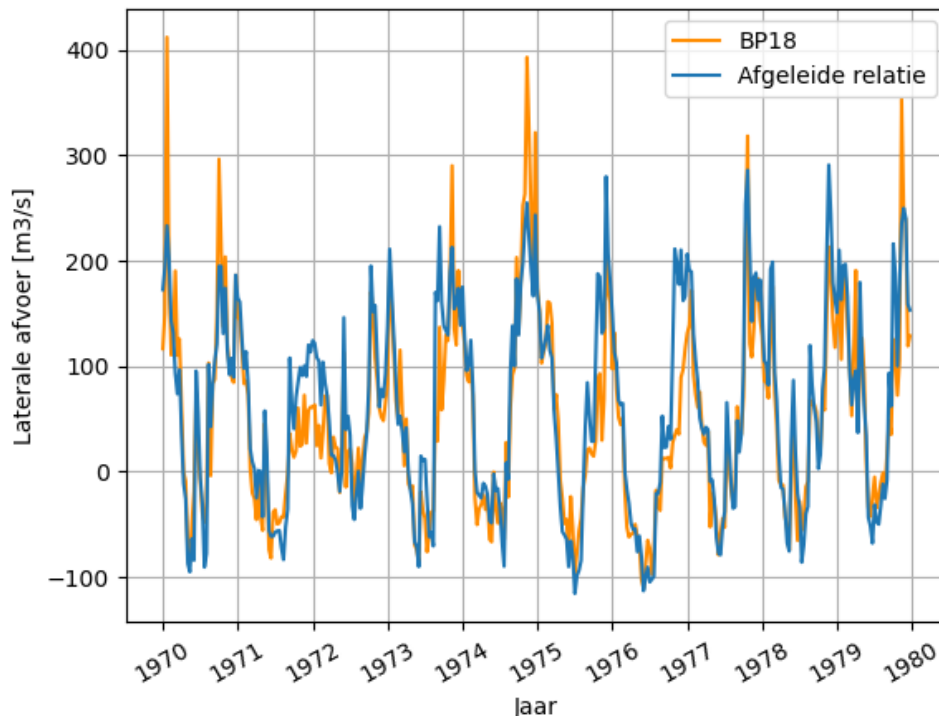


Figuur 2-11 Vergelijking tussen de berekende laterale fluxen uit de regio met het LHM en de afgeleide lateralen op basis van meervoudige lineaire regressie. In dit figuur wordt de totale som van alle laterale fluxen uit alle regio's beschouwd. (Negatief is onttrekking)

Figuur 2-12 toont de vergelijking tussen de totale laterale flux richting het IJsselmeer zoals berekend door het LHM en met de afgeleide relatie zoals hierboven beschreven, voor 10 jaar van de 100-jarige reeks. De relatie is opgesteld op basis van de volledige 100-jarige reeks. De figuren tonen slechts 10 jaar ter indicatie van de patronen en om de figuren overzichtelijk te houden.

Hierin is duidelijk te zien dat het algemene patroon van de afvoer goed wordt meegenomen in de afgeleide laterale afvoeren. Met name de negatieve afvoeren (onttrekkingen) worden relatief goed meegenomen, zowel qua timing als qua grootte. De pieken in afvoer worden onderschat ten opzichte van het LHM. De piekafvoeren zijn niet puur te relateren aan de seizoenstrend en het neerslagoverschot van de afgelopen maand. De onderschatte pieken vormen voor het doel van deze studie geen bezwaar. De pieken vallen veelal in het winterhalfjaar, wanneer er voldoende water is voor peilhandhaving en er weinig problemen

opspeken door hoge chlorideconcentraties. Een lager piekdebiet betekent een lichte overschatting van de chloridewaarden in de winterperiode, al zal het effect hier miniem zijn. Figuur 2-11 en Figuur 2-12 zijn, uitgesplitst per waterschap, beschikbaar in Appendix D.



Figuur 2-12 De met het LHM berekende totale regionale laterale fluxen en de afgeleide fluxen voor 10 jaar van de 100-jarige reeks.

Chloridevracht laterale watertoevoer: de chloridevracht via de laterale watertoevoer is, vergelijkbaar met de waterbalans flux, verkregen via Deltares vanuit de water- en zoutbalansen voor Midden-Nederland. Deze informatie is vergeleken met de chloridevrachten die zijn opgenomen op de 'Infographic Verzilting IJsselmeer en Markermeer¹⁰'. Op basis van deze twee bronnen zijn de volgende chloridevrachten bepaald en (als een constante vracht) aan het model opgelegd voor de kalibratie (zie Tabel 2-8)

Tabel 2-8 Chloridevrachten per waterschap

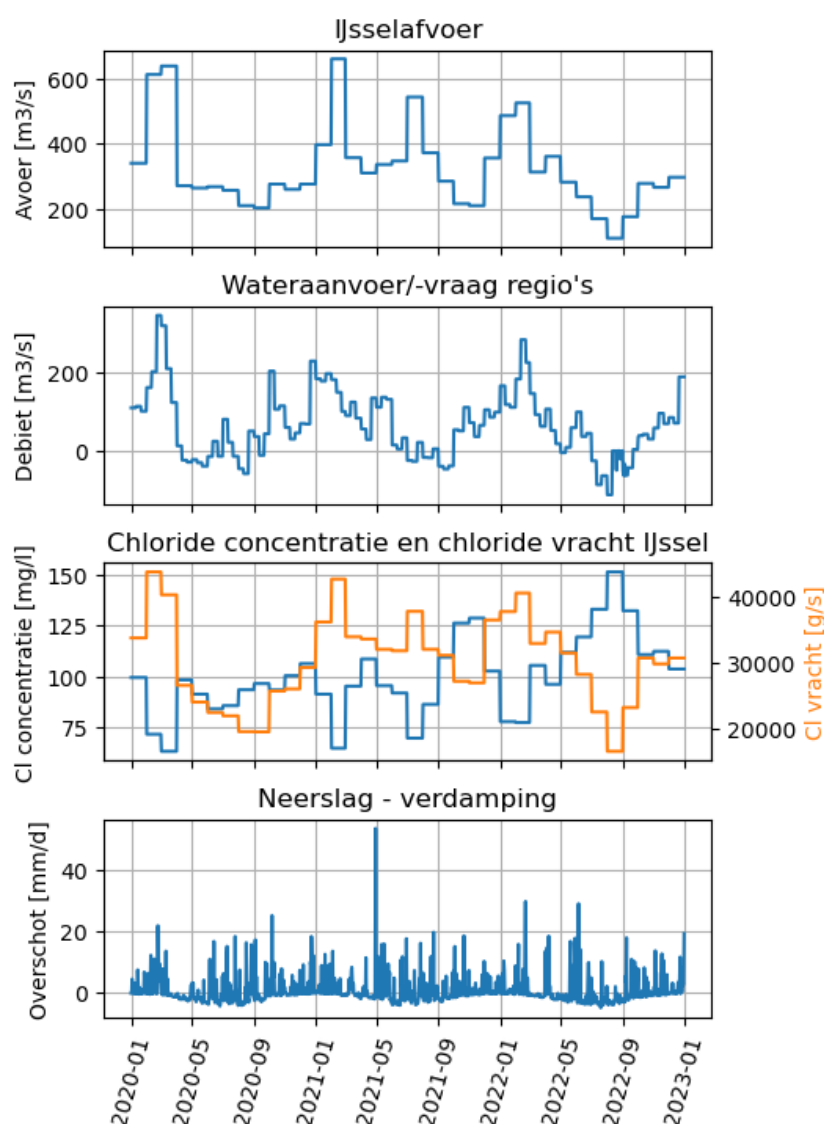
Waterschap / Hoogheemraadschap	Chloridevracht
Friesland & Noorderkwartier	1.5 kg/s
Zuiderzeeland	10 kg/s
Oostelijke Waterschappen (via Ketelmeer)	3 kg/s
Vallei en Veluwe & Zuiderzeeland (via Gooi- en Eemmeer)	1 kg/s

Chlorideconcentratie IJssel: de chlorideconcentratie van de IJssel is bepaald op basis van de Q-c relatie van KWR (KWR, 2021). Van de relatie is enkel de maandafhankelijkheid als vrijheidsgraden meegenomen. De vrijheidsgraden op dag niveau verbeterden de fit wel marginaal, maar zijn voor de toekomst niet per se robuuster (onzeker of dit detailniveau richting de toekomst ook constant blijft). Door enkel de maandafhankelijke vrijheidsgraden mee te nemen, is de relatie gedetailleerd genoeg voor de toepassing, en kan voor de kalibratie en scenario analyses exact dezelfde relatie gebruikt worden.

¹⁰ Geraadpleegd via: https://iplo.nl/publish/pages/192772/p1231-factsheet-verzilting-ijm-20210913_1.pdf

Als uitgangssituatie voor de kalibratie wordt uitgegaan van een zoet IJsselmeer en Markermeer dat begint op streefpeil, met een chlorideconcentratie van 160 mg/l. De debieten over de Afsluitdijk zijn als resultante van het peilbeheer als sluitpost aan het model opgelegd. De chloridefluxen over de Afsluitdijk worden berekend volgens de parametrisatie zoals beschreven in 2.1.2.

Figuur 2-13 geeft een overzicht van de opgelegde fluxen aan het model gedurende de kalibratieperiode. Het onderste paneel geeft hierbij de netto hoeveelheid neerslag die het IJsselmeer bereikt, rekening houdend met verdamping. In dit figuur is duidelijk te zien dat de resolutie van de verschillende invoertermen varieert van dagelijkse waarden (meteorologische invoer), decadewaarden (wateraanvoer/-vraag regio's) en maandelijks (IJsselafoer).



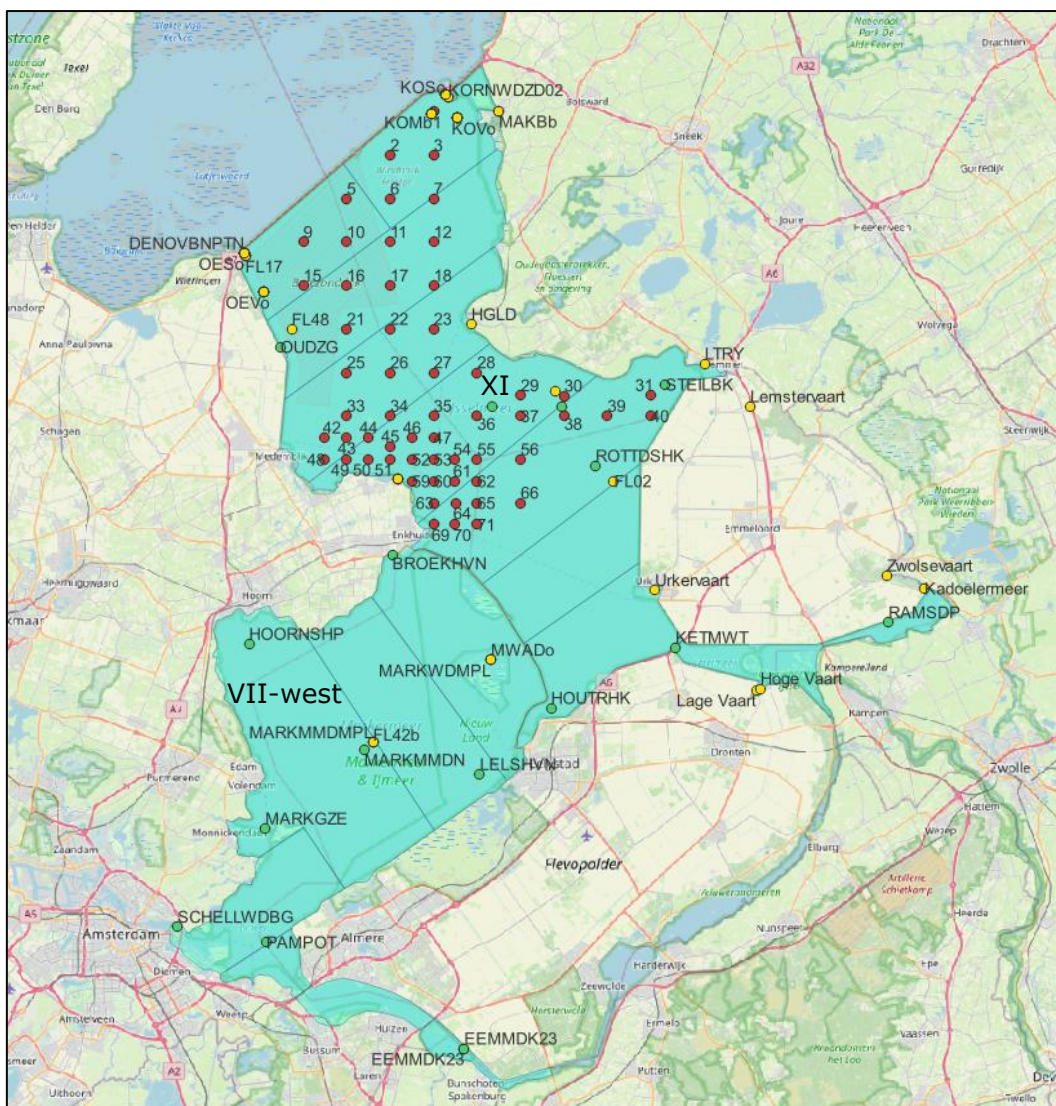
Figuur 2-13 Overzicht van de opgelegde water en chloridefluxen voor de kalibratieperiode. De chloridevracht vanuit de regio's is constant en daarom niet opgenomen in deze figuur

2.2.2 Meetgegevens kalibratie

De volgende chloridemetingen zijn gebruikt om het model te kalibreren:

- Chloridemetingen 2022 verkregen van Deltares
 - Tijdsreeksen van stationsmetingen (gele punten in Figuur 2-14)
 - Profielmetingen waarvan enkel de dieptegemiddelde waarde is gebruikt (rode punten in Figuur 2-14)
 - Profielmetingen waarvan de stratificatie in de tijd is gebruikt ter ondersteuning van de principeberekeningen (zie ook paragraaf 2.1.2), gele punten bij de spui- en sluiscomplexen in Figuur 2-14
- Chloridemetingen van 2020, 2021 en 2022 van Waterinfo.rws.nl (groene punten in Figuur 2-14)

De berekende chloridewaarden in elk bakje zijn vergeleken met de chloridewaarden op de meetpunten binnen dat bakje. Zie paragraaf 2.2.4 voor de resultaten van de kalibratie.



Figuur 2-14 De chloridemetingen welke zijn gebruikt om het bakjesmodel te kalibreren voor de jaren 2020, 2021 en 2022. (Bakjes VII-west en XI aangegeven t.b.v. Fig. 2-15, 2-16.)

2.2.3 Methodiek kalibratie

De kalibratie van het tijdsafhankelijke bakjesmodel vindt plaats over de periode van 3 jaar (2020 - 2022). In deze kalibratie is het van belang om het zoetspoelen van het systeem tijdens de winterperiode goed te modelleren. Met een kalibratieperiode van 3 jaar is er een signaal wat over alle seizoenen beschikbaar is, inclusief een droge periode in de zomer van 2022.

De output van het bakjesmodel betreft een bakjesgemiddelde chlorideconcentratie, gemiddeld per dag. De kalibratie-puntmetingen zijn op een specifieke locatie en diepte ingewonnen, en de tijdreeksen zijn onvolledig. Het verschil in ruimtelijke en temporele variatie tussen de meetgegevens en de uitvoer van het bakjesmodel is van belang om mee te nemen in de kalibratiemethodiek. Hiervoor zijn de meetgegevens geaggregeerd naar gemiddelden binnen een bakje (op diepte) en zijn deze geaggregeerd naar dagwaarden. In het geval dat er meerdere metingen binnen een bakje plaatsvinden (bijvoorbeeld aan zowel de Noord-Hollandse als de Friese kust), geven deze metingen de mate van spreiding binnen een bakje aan. Deze spreiding, veroorzaakt door windeffecten, voorkeursstromingspatronen binnen het IJsselmeer en dichtheidsverschillen tussen zoet en zout water, geeft een bandbreedte waarbinnen de resultaten van het bakjesmodel worden geëvalueerd. De mechanismen die de spreiding veroorzaken zitten slechts ten dele verdisconteerd in het bakjesmodel. Om de spreiding in het bakjesmodel te kwantificeren wordt gekeken naar naastgelegen bakjes. Deze methode is in fase 1 van het KPZSS ook gebruikt om de onzekerheid in de resultaten weer te geven. De verschillende metingen/meetlocaties zijn afzonderlijk weergegeven in de figuren en laten daarmee de beschikbare spreiding zien. Omdat er een langere periode wordt bekeken (3 jaar) en de tijdseries niet volledig zijn, is het niet op alle momenten mogelijk om de spreiding goed in kaart te brengen.

De vergelijking tussen de modeluitvoer en de meetgegevens kan plaatsvinden op dagbasis. Echter, gegeven de onzekerheden en simplificaties in het bakjesmodel, levert deze tijdschaal geen waardevolle informatie waarop de kalibratie kan plaatsvinden (door onzekerheid in parametrisatie en ontbreken van processen op kleine schaal). Daarom wordt er binnen de kalibratie gekeken naar langere termijnen dan dagwaarden.

We onderscheiden binnen de kalibratiemethodiek twee verschillende aandachtspunten:

1. **Kalibratie tussen de seizoenen**

Allereerst ligt de focus op de dynamiek tussen de verschillende seizoenen. Het op- en ontladen van het systeem staat hierbij centraal. Variatie op kleinere tijdschalen dan een maand wordt hier niet beschouwd. Om juist te kunnen kalibreren wordt er gekeken naar de vaste meetlocaties op het IJsselmeer en Markermeer. Deze metingen zijn op minder locaties beschikbaar dan de tijdelijke metingen tijdens de zomer van 2022. De vaste meetlocaties zijn veelal aan de randen van het IJsselmeer gesitueerd.

2. **Kalibratie binnen een seizoen**

Vervolgens ligt de focus op de dynamiek binnen een seizoen (zomerperiode). Hiervoor zijn de gedetailleerdere mobiele metingen geschikt die tijdens de zomer van 2022 zijn ingewonnen. Er wordt hierbij niet naar dagelijkse tijdschalen gekeken, maar naar vijfdaagse tijdschalen. Op deze manier zijn trends binnen een seizoen zichtbaar, zonder dat er schijnnaauwkeurigheid optreedt bij te kleine tijdschalen.

Kalibratieparameters

De simplificaties van het bakjesmodel zorgen ervoor dat er weinig kalibratieparameters voorhanden zijn. Vergelijkbaar met fase 1 van het KPZSS focust de kalibratie zich vooral op de dispersiecoëfficiënt, welke de mate aangeeft waarmee het zout zich over het systeem verspreidt. Daarnaast wordt de koppeling met de Oranjesluizen gebruikt als kalibratieparameter, met name voor de chloridegehalten op het Markermeer. In overleg met de opdrachtgever is besloten om de constante zoutflux door de Oranjesluizen te gebruiken als kalibratieparameter, alsmede de dispersielengte van het bakje Oranjesluizen.

2.2.4 Resultaten kalibratie

Door de spreiding van de chloridemetingen zijn niet alle bakjes even goed bemeten. In onderstaande kalibratieresultaten zijn de resultaten van het per deelgebied (Markermeer of IJsselmeer) best bemeten bakje weergegeven. Voor het Markermeer betreft dit bakje VII_west en voor het IJsselmeer is dit bakje XI. In andere bakjes is de tijdreeks niet compleet genoeg, of is de ruimtelijke spreiding van de chloridemetingen zodanig dat er geen representatief beeld van het gehele bakje te geven is.

Kalibratieparameters

In Tabel 2-9 zijn de definitieve kalibratieparameters weergegeven.

Tabel 2-9 Kalibratieparameters en gekalibreerde waarden

Kalibratieparameter	Waarde
Dispersiecoëfficiënt	200 m ² /s
Chlorideflux Oranjesluizen	8 kg/s
Dispersielengte Oranjesluizen	150 m
Dispersief oppervlak Oranjesluizen	20 m ²

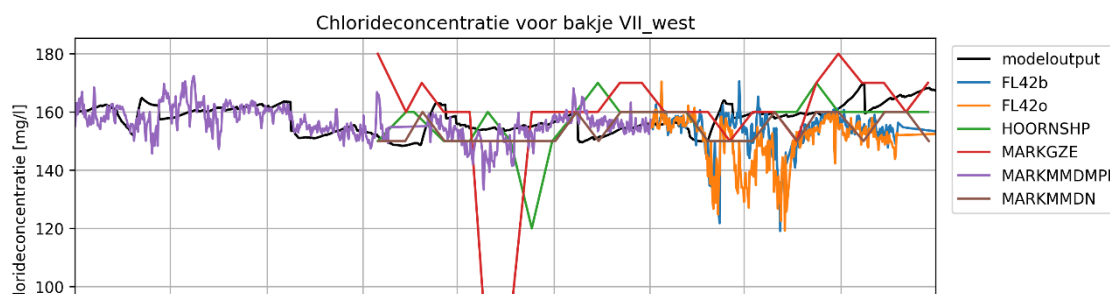
De algehele dispersiecoëfficiënt van het bakjesmodel is gelijk gehouden aan de gekalibreerde dispersiecoëfficiënt uit fase 1 van het KP ZSS. Deze waarde van 200 m²/s levert ook in deze fase de beste resultaten op.

De waarden voor de dispersielengte en het dispersief oppervlak voor het bakje van de Oranjesluizen zijn niet gebaseerd op de fysische eigenschappen van het bakje. Het model bleek tijdens de kalibratie niet geschikt om de interactie en de chlorideconcentraties in het bakje van de Oranjesluizen goed te modelleren. Daarom is besloten om de parameters rondom het bakje van de Oranjesluizen te gebruiken als kalibratieparameters. De relatie met de fysische betekenis van de dispersielengte en het dispersief oppervlak bij de Oranjesluizen is hierdoor losgelaten, maar de resulterende chlorideconcentraties op het Markermeer worden er beter door gemodelleerd met het bakjesmodel.

Markermeer

Tussen de seizoenen

De chloridegehalten op het Markermeer (bakje VII_west) zijn weergegeven in (zwarte lijn). De gemeten chlorideconcentraties zijn relatief stabiel over de 3-jarige periode. Het model vertoont een grotere variatie tussen de seizoenen, ingegeven door een sterkere seizoensvariatie in de aan- en afvoer richting het systeem. Het grove signaal in de metingen, relatief stabiel met een lagere chlorideconcentratie rond de zomer van 2022, is vergelijkbaar met de berekeningen in het model. Het model vertoont op het Markermeer geen temporele trends. De gemeten afname van chloride rond de zomer van 2022 is niet terug te zien in de modeluitvoer. Deze afname is ook maar door één enkel meetpunt (op verschillende diepten)



Figuur 2-15 De chlorideconcentratie op het Markermeer (bakje VII-west) gedurende de kalibratieperiode. De zwarte lijn geeft de modeloutput weer. De gekleurde lijnen zijn verschillende meetseries en meetcampagnes op het Markermeer.

gemeten. De overige metingen vertonen deze afname minder sterk. Ten opzichte van het geheel der metingen wijkt het model in deze periode iets af, maar de afwijking is gering.

Binnen een seizoen

Door de constante zoutflux bij de Oranjesluizen in het model, zijn de pieken in de metingen niet zichtbaar in het model. Het systeem reageert in het model trager, maar de constante zoutflux door de Oranjesluizen levert betere resultaten op voor de kalibratie op het Markermeer. Door de traagheid van het model, is de variatie binnen een seizoen lastig te duiden. Deze traagheid wordt mede ingegeven door de invoer op decadebasis vanuit het LHM.

IJsselmeer

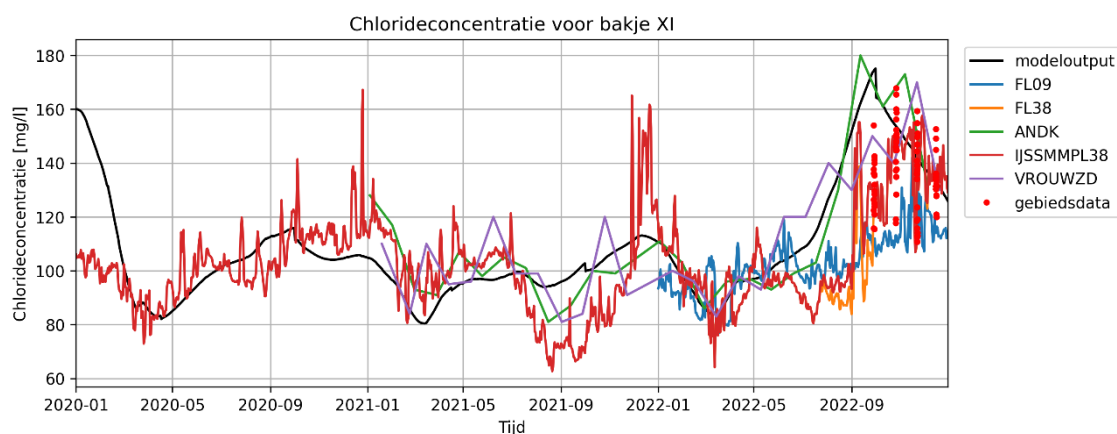
Tussen de seizoenen

De chlorideconcentraties voor bakje XI (het bakje waar het drinkwaterinnamepunt Andijk ligt), zijn weergegeven in Figuur 2-16. De seizoenstrend, met het ontladen van het systeem in de winter, zijn goed terug te zien in het model. De hogere initiële chlorideconcentratie van 160 mg/l (opgelegd vanwege de kalibratie in het Markermeer) is binnen 3-4 maanden het systeem uit. De sterke afname in chlorideconcentratie in het begin van de kalibratieperiode toont dat het model in staat is om, bij de juiste randvoorwaarden, te ontladen.

Gedurende de gehele kalibratieperiode volgt het model de gemeten chloridewaarden goed. Er is geen duidelijke trend te zien waarbij het systeem in opeenvolgende jaren te veel of te weinig oplaadt.

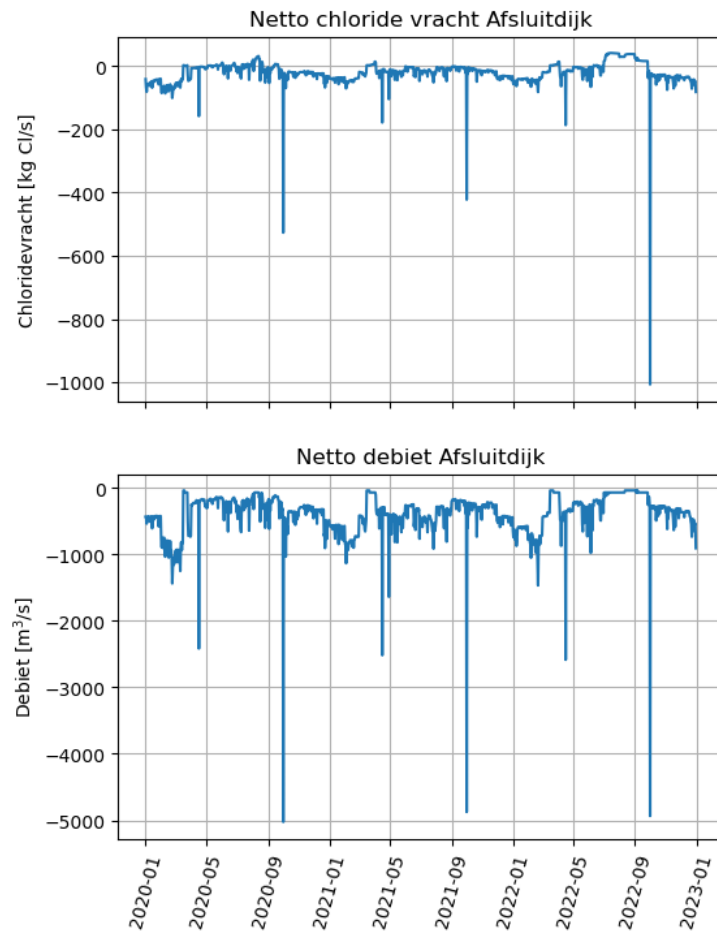
Binnen een seizoen

In het najaar en de winter van 2021 is een overschatting te zien, al is deze in het voorjaar van 2022 weer tenietgedaan. De hoogte van de chloridepiek in de droge zomer van 2022 wordt door het model ook goed gesimuleerd. De aanloop naar de chloridepiek in de zomer van 2022 is langer dan in de metingen. De gemeten chloridegehalten vertonen op korte tijdschalen grotere variaties. Hierbij spelen chlorideverdelingsprocessen als wind en voorkeursstroming een rol, die niet in het model zijn opgenomen. Voor alle seizoenen geldt dat de timing van het opladen en ontladen van het systeem door de seizoenen heen goed in het model zit.



Figuur 2-16 De chlorideconcentratie in IJsselmeerbakje XI voor de kalibratieperiode. De zwarte lijn geeft de modeluitvoer weer. De gekleurde lijnen zijn verschillende meetcampagnes op het IJsselmeer. Het drinkwaterinnamepunt bij Andijk bevindt zich in bakje XI.

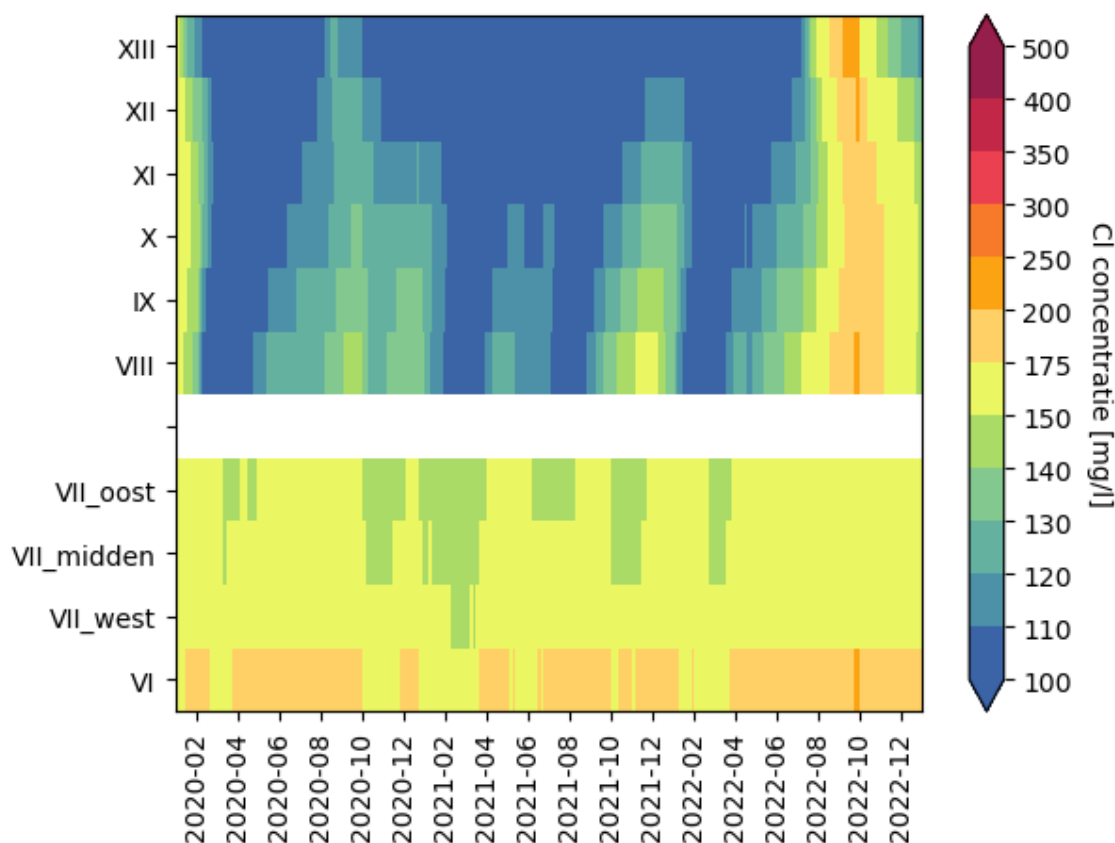
Figuur 2-17 toont de chloride vrachten en debieten over de Afsluitdijk gedurende de kalibratieperiode. Dit figuur toont duidelijk dat de chloridepiek zichtbaar rond september 2022, het gevolg is van een langere periode waarin er minimaal gespuid wordt, en de netto chloridevracht over de Afsluitdijk positief is richting het IJsselmeer.



Figuur 2-17 Netto chloridevrachten (boven) en debieten (onder) over de Afsluitdijk gedurende de kalibratieperiode. De sluizencomplexen Den Oever en Kornwederzand zijn samengenomen. Negatieve waarden zijn richting de Waddenzee gericht, positief naar het IJsselmeer.

Gehele systeem

Bovenstaand staan de twee bakjes beschreven met de beste dekking wat betreft de metingen. De dynamiek binnen de rest van het systeem is echter ook interessant. Figuur 2-18 toont het verloop van de chlorideconcentratie over de verschillende bakjes. De bovenste helft van het figuur toont hierbij het IJsselmeer van zuid naar noord (bakje VIII naar XIII), de onderste helft het Markermeer van west naar oost (bakje VI naar VII_oost). VII oost staat in verbinding met X en VIII via de Houtribdijk. De figuur toont de dagelijkse chlorideconcentraties. Het verloop in tijd en ruimte laat zien welke richting het zout optrekt en hoe snel het verdunt. In najaar 2020 is te zien hoe zout (grotendeels) via bakje VIII uit het Markermeer het IJsselmeer optrekt, waarbij de concentratie noordwaarts geleidelijk afneemt door verdunning. In najaar 2021 is wederom een piek te zien. Deze wordt vooral bepaald door de chloride-concentratie van de IJssel. 2022 toont dat de chloridepiek die reeds zichtbaar was in Figuur 2-16 in september 2022 zowel vanuit de Afsluitdijk als vanuit het zuiden (IJssel) het IJsselmeer op beweegt. De chloridepluim vanuit de Afsluitdijk beperkt zich tot net ten noorden van bakje XI, waar de chlorideconcentratie onder de 200 mg/l blijft.



Figuur 2-18 Chloridewaarden in het IJsselmeer en Markermeer gedurende de kalibratieperiode

2.3 Discussie en conclusie kalibratie

De gemodelleerde chlorideconcentraties komen goed overeen met de gemeten chlorideconcentraties in het systeem beschouwd gemiddeld over het kalenderjaar. Ook het geleidelijke verloop van de seizoensvariatie wordt goed weergegeven. Het op- en ontladen van het systeem komt duidelijk uit de modelresultaten naar voren. Het model toont geen specifieke meerjarige temporele trends die ervoor kunnen zorgen dat het doorrekenen van langere periodes bemoeilijkt wordt.

Het is van belang om te benadrukken dat enkele van de korte termijn (weken en korter) uitschieters in chlorideconcentraties die op puntlocaties zijn gemeten niet door het model berekend worden. Dit heeft twee belangrijke redenen. Ten eerste moet het detailniveau van de modelinvoer (ruimtelijk en temporeel) in ogenschouw worden genomen. Voor enkele invoerparameters betreft het maand of decadegemiddelde invoer, wat beperkte variabiliteit van de modelresultaten t.o.v. metingen verklaart. Ten tweede berekent het model bakjesgemiddelde concentraties (in het horizontale en verticale vlak), die per definitie dus een vlakkere dynamiek laten zien dan gemeten puntlocaties. Ten aanzien van de duiding van chlorideconcentraties die met het model worden berekend, en bijvoorbeeld verwerkt worden naar overschrijdingsstatistiek, is het daarom van belang om deze aandachtspunten in ogenschouw te nemen. Ten opzichte van puntmetingen zal de berekende overschrijdingsstatistiek lager uitvallen.

Op basis van de voorliggende kalibratieresultaten kan worden geconcludeerd dat de gehanteerde methode om de sluiscomplexen bij de Afsluitdijk te modelleren tot realistische seizoenale chloridewaarden in het IJsselmeer leidt. Daarnaast kan de kalibratieberekening worden gebruikt om de verspreiding van het zout als gevolg van advectione of diffusieve processen te controleren. Gezien de overeenkomsten tussen de metingen en de modeluitvoer voor Andijk kan worden geconcludeerd dat het effect van de chlorideverspreidende processen, op de tijdschaal van maanden en langer, goed wordt verdisconteerd in het model.

Op basis van de kalibratieresultaten wordt het model geschikt geacht om de indicatoren die voor dit onderzoek van interesse zijn te onderzoeken. Hierbij gaat het om indicatoren die inzicht verschaffen in de dynamiek van chlorideconcentraties en de waterbalanstermen op seizoenschaal (meer dan een maand). Met name langdurige chlorideoverschrijdingen vormen in de praktijk een probleem, deze kunnen met het voorliggende model goed worden onderzocht. Hierbij is het belangrijk om te vermelden dat wanneer het model op een kortere tijdschaal geen overschrijdingen berekent, dit niet betekend dat deze er in de grillige werkelijkheid op specifieke locaties ook niet zullen zijn. Het beeld dat het model geeft is immers altijd een ruimtelijk en temporeel gemiddelde.



3

Scenario-analyse

3 Scenario-analyse

In fase 1 van het KP ZSS zijn semi-stationaire berekeningen uitgevoerd voor het IJsselmeergebied. Deze analyse leverde bruikbare informatie op over de belangrijkste processen die de waterbeschikbaarheid beïnvloeden, maar gaf geen informatie over de sterke seizoens-dynamiek van het IJsselmeergebied of over de kans op en duur van bepaalde verziltingsevents. Met het beschikbaar komen van nieuwe KNMI-23 klimaatscenario's voor verdamping en neerslag en de bijbehorende afvoerscenario's van de Rijn kunnen verschillende toekomstscenario's tijdsafhankelijk worden doorgerekend. Daarmee kan worden onderzocht onder welke toekomstige (klimaat)scenario's in combinatie met zichtwaarden voor de ZSS de houdbaarheid van het IJsselmeergebied als bron voor zoetwater behouden blijft, en wanneer/waar knelpunten ontstaan. Bij het doorrekenen van toekomstige (klimaat)scenario's wordt uitgegaan van het 'nul-alternatief', waarmee wordt bedoeld dat de tijdsafhankelijke respons van IJsselmeersysteem (waterbeschikbaarheid en verzilting) wordt onderzocht als de huidige wijze van beheer wordt doorgezet (zonder extra maatregelen).

De hoofdvraag luidt: Hoe ziet (in het nul-alternatief) de tijdsafhankelijke respons van het IJsselmeersysteem eruit onder druk van ZSS in combinatie met door het klimaat veranderde neerslag, verdamping en rivierafvoer?

3.1 Keuze scenario's

In totaal wordt voor 7 scenario's het nul-alternatief doorgerekend (gebaseerd op KNMI'23 klimaatscenario's). Per klimaatscenario (meteo en rivierafvoeren) zijn 8 reeksen van 30 jaar beschikbaar met dagwaarden¹¹. Deze zijn te combineren tot 240-jarige reeksen. Iedere reeks aan meteo- en rivierafvoeren voor een specifiek klimaatscenario en zichtjaar wordt gekoppeld aan een bepaalde mate van zeespiegelstijging. Dit resulteert in de volgende set van doorgerekende scenario's:

- 0 m ZSS met referentie data
- 0.5 m ZSS met 2050Hd data
- 1 m ZSS met 2100Ln en 2100Hd data
- 3 m ZSS met 2100Ln en 2150Hd data
- 5 m ZSS met 2100Ln en 2150Hd data

3.2 Methode scenario-analyse

De door te rekenen scenario's vragen ieder een eigen set aan randvoorwaarden. De uitgangspunten voor deze scenario's zijn de KNMI'23 Klimaatscenario's, waarbinnen synthetische tijdreeksen zijn gecreëerd voor neerslag, verdamping en rivierafvoeren. Omdat het synthetische reeksen betreft, is het van belang dat alle randvoorwaarden per scenario gebaseerd zijn op deze synthetische reeksen. Dit levert de noodzakelijke congruentie in de timing van de verschillende randvoorwaarden op. Voor een aantal van deze randvoorwaarden, zijn de gegevens direct beschikbaar. Bij andere randvoorwaarden zijn er nog extra stappen benodigd om tot de juiste gegevens te komen voor de scenarioanalyses. Onderstaand staat per randvoorwaarde beschreven hoe de modelinput voor de scenarioanalyses is verkregen, inclusief bijbehorende bron van informatie.

Als de randvoorwaarde betrekking heeft op de waterbalans van het model, wordt de paragraaf afgesloten met een figuur waarin de spreiding van de randvoorwaarde tussen de verschillende scenario's wordt getoond. Deze figuren tonen het verloop van de

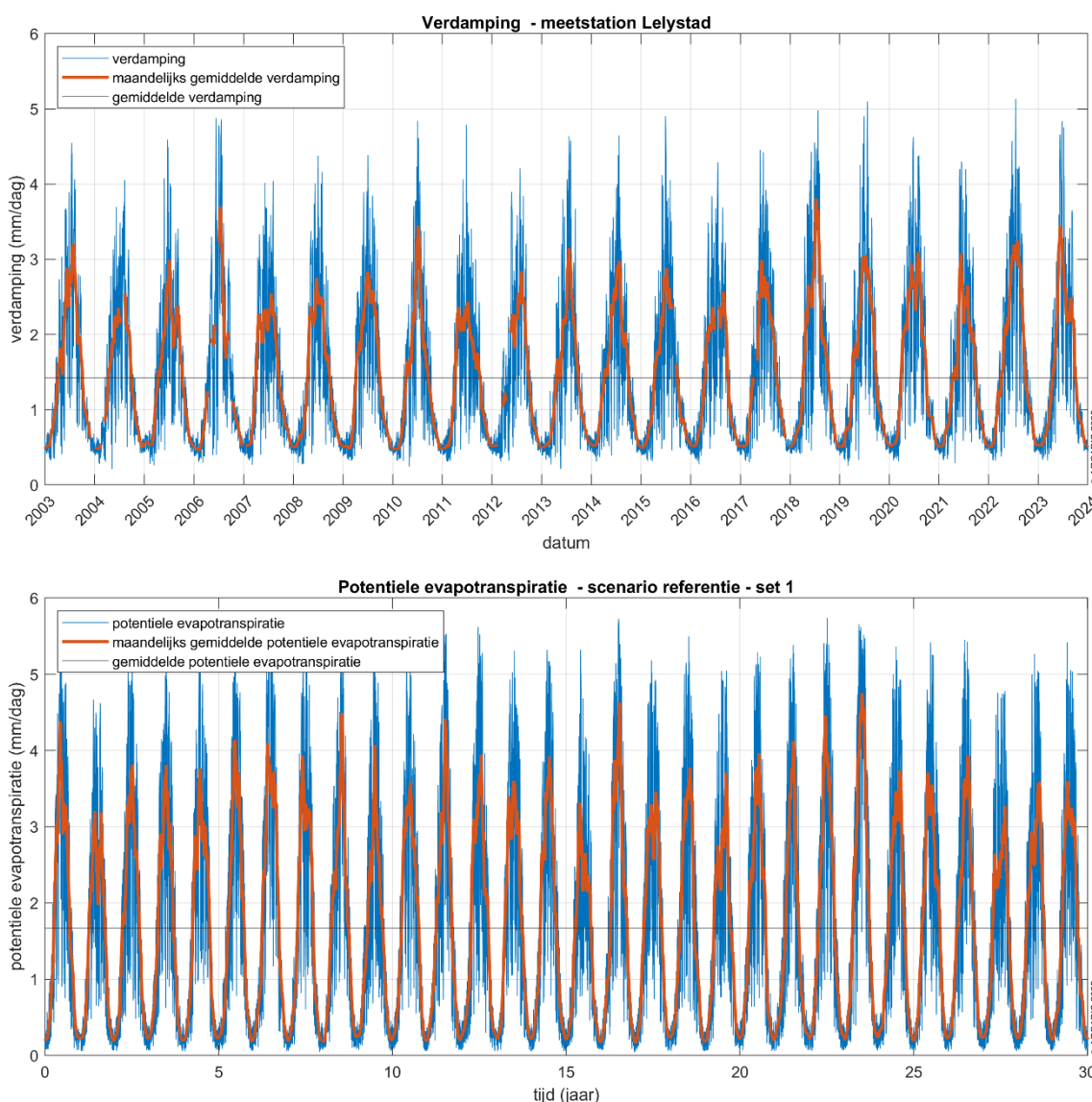
¹¹ Voor KNMI'23 scenario's zijn, naast samenvattende statistiek, synthetische neerslag- en verdampingsreeksen van in totaal 240 jaar gecreëerd. Deze reeksen zijn representatief voor het bijbehorende klimaat.

waterbalanstermen t.o.v. de herhalingstijd en geven hiermee een beeld over hoe de extremen voor elke afzonderlijke term veranderen in de toekomstige scenario's.

Meteorologie

Voor de neerslag zijn synthetische tijdreeksen vanuit de KNMI'23 scenario's beschikbaar met een tijdsresolutie van 1 dag en ruimtelijke resolutie van ca. 12 km x 12 km. Deze tijdreeksen zijn beschikbaar per zichtjaar en per klimaatscenario, waarmee ze aansluiten op de beschouwde scenario's in deze studie. Voor verdamping is gebruik gemaakt van de synthetische reeks potentiële evapotranspiratie vanuit de KNMI'23 scenario's. Om de potentiële evapotranspiratie om te zetten naar openwater verdamping is een factor gebruikt.

Om deze factor te bepalen is gekeken naar het verschil tussen de gemiddelde openwater verdamping tussen 2004 en 2024, berekend met de Bruin-Keijmanmethode (FutureWater, 2006), en de gemiddelde potentiële evapotranspiratie van het referentiescenario uit de KNMI'23 scenario's (zie Figuur 3-1).

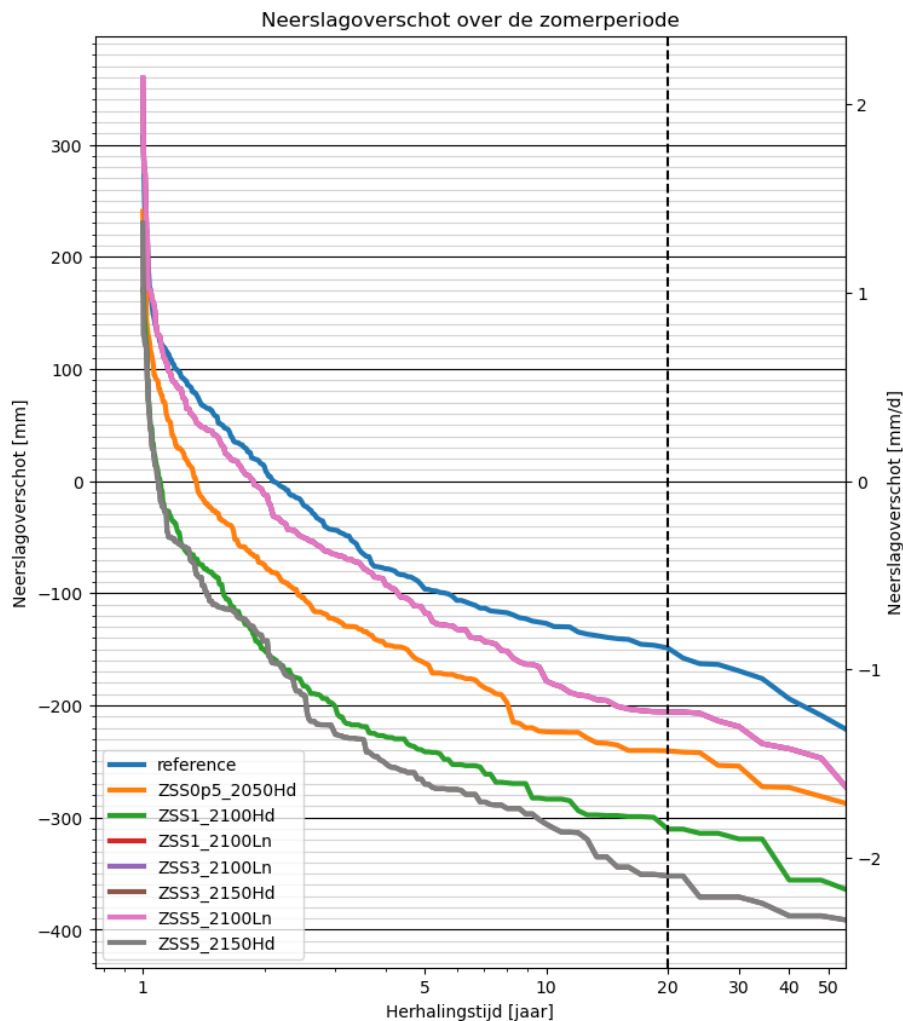


Figuur 3-1 Boven: Openwater verdamping die is berekend met de Bruin-Keijmanmethode d.m.v. de gegevens van het KNMI-meetstation Lelystad. Onder: Potentiële evapotranspiratie van het KNMI'23 referentiescenario (set 1).

De Bruin-Keijmanmethode is tevens gebruikt om de verdamping te berekenen voor de kalibratie en validatie van het model (paragraaf 2.2.1). De gemiddelde openwater verdamping tussen 2004 en 2024 is 1,4 mm/dag. De gemiddelde potentiële evapotranspiratie van het referentie scenario is 1,63 mm/dag. De factor die is gebruikt is dan ook 0.86 om van potentiële evapotranspiratie naar openwater verdamping te gaan ($0,86 \times 1,63 = 1,4$ mm/dag). Deze factor is vervolgens op alle reeksen van de evapotranspiratie toegepast om te komen tot de openwater verdamping voor alle scenario's.

Figuur 3-2 toont het neerslagoverschot voor het meer over de zomerperiode/groeiseizoen (16 april - 30 september) voor de verschillende scenario's. Het betreft hier een neerslagoverschot op basis van openwater verdamping (volgens de hierboven beschreven methode) voor het IJsselmeergebied, aan het einde van het groeiseizoen (30 september).

Deze uitgangspunten dienen in ogenschouw te worden genomen wanneer de getallen 1-op-1 met andere gerapporteerde neerslagoverschotten worden vergeleken.



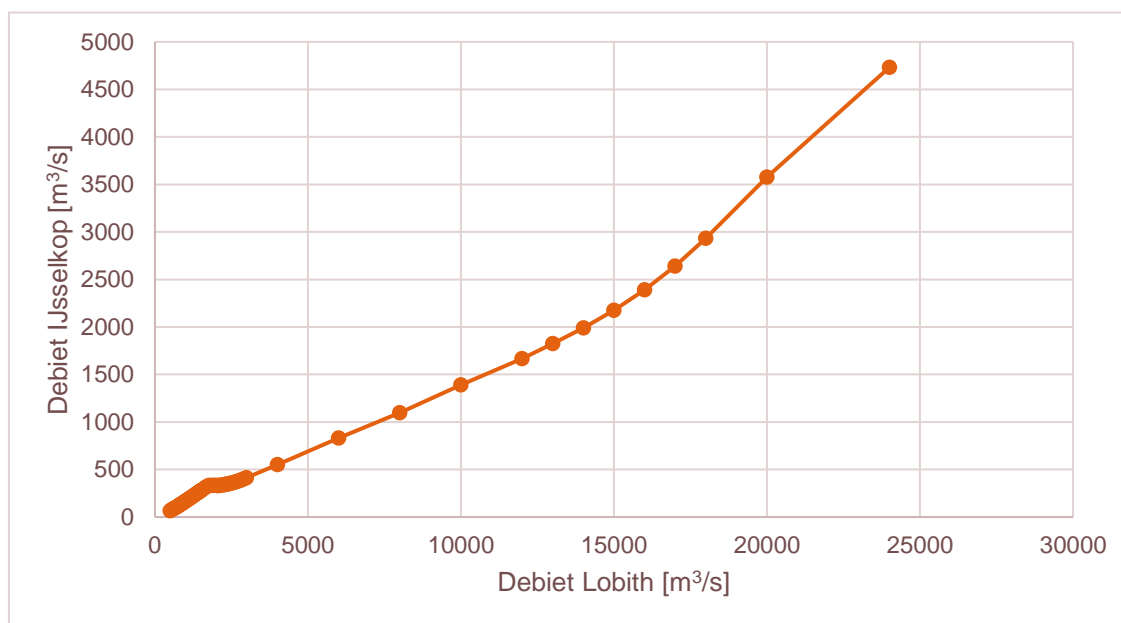
Figuur 3-2 Neerslagoverschot voor het IJsselmeer-Markermeer (d.w.z. neerslag minus openwater verdamping) gedurende de zomermaanden voor de verschillende scenario's. Het betreft het totale neerslagoverschot aan het einde van het groeiseizoen (negatief = tekort). Het neerslagoverschot is onafhankelijk van zeespiegelstijging; deze scenario's overlappen daarom in de figuur met vergelijkbare klimaatscenario's.

Afvoer IJssel

De afvoer van de IJssel is afgeleid uit de beschikbare afvoerscenario's van de Rijn bij Lobith. Deze afvoerscenario's zijn, in lijn met de meteorologische randvoorwaarden, beschikbaar per zichtjaar en per klimaatscenario.

De Rijn-IJssel verdeling is zoveel mogelijk beleidsneutraal genomen, waar wordt uitgegaan van het huidige beheer. In overleg met de opdrachtgever is besloten om de afvoerdeling uit het Landelijk Hydrologisch Model versie 4.3 (LHM 4.3) over te nemen, conform Programma Integraal Riviermanagement (IRM2018) bodemligging. Bij deze verdeling is rekening gehouden met het huidige beheer van stuw Driel, waarmee in lage afvoersituaties relatief meer debiet richting de IJssel gestuurd wordt.

De in Figuur 3-3 gepresenteerde afvoerverdeling van de IJssel afvoer bij de IJsselkop ten opzichte van de afvoer bij Lobith is gebruikt om de synthetische afvoerreeksen voor de Rijn om te zetten naar een IJsselaflower voor de scenario analyses.



Figuur 3-3 Afvoerverdeling IJssel bij een gegeven Rijn debiet (Lobith). De afvoerverdeling is conform de in het LHM gehanteerde IRM2018 bodem verdeelsleutel.

De hieruit volgende afvoer is de afvoer op de IJssel bij de IJsselkop. Voordat de IJssel het zoete water richting het IJsselmeer afvoert, zijn er nog verschillende afvoer- en aanvoerfluxen die van invloed zijn op het uiteindelijke debiet dat richting het IJsselmeer stroomt. Deze lozingen en aanvoerfluxen (met name richting de Twentekanalen bij Eefde) zijn variabel in de tijd en dienen, conform alle andere randvoorwaarden, congruent met de synthetische reeksen te zijn.

Om de overige posten van invloed op de IJsselaflower te bepalen, is gebruik gemaakt van de recent door Deltares met het LHM 4.3 doorgerekenende 50-jarige reeks. In deze modelberekening is, conform huidig beheer, 50 jaar aan gemeten meteorologische data doorgerekend, waaruit onder andere informatie volgt over de watervraag vanuit de Twentekanalen en lozingen op de IJssel die van invloed zijn op de IJsselaflower richting het IJsselmeer.

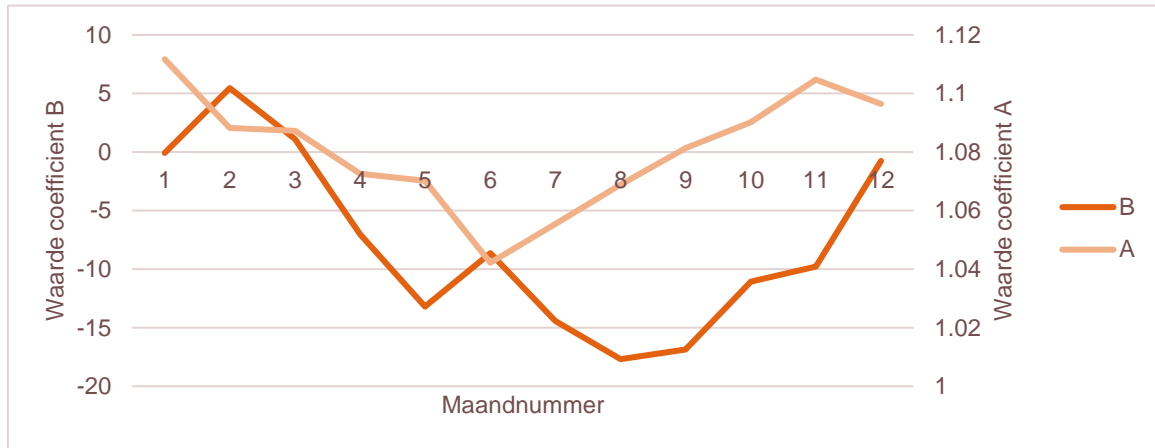
Het gebruik van het LHM 4.3, in plaats van de eerder gehanteerde BP'18 reeks, is achteraf geconstateerd. Vanwege de wens om verdere vertraging te voorkomen in het proces van afronding van deze studie is ervoor gekozen om toch deze reeks te hanteren, mede omdat de verschillen gering zijn en op de uiteindelijke resultaten op de studie niet significant. De verschillen met de afgeleide afvoeren op basis van BP'18 zijn namelijk gering. In de wintermaanden vallen de BP'18 afvoeren bij het Keteldiep gemiddeld 1-2% lager uit, in de zomermaanden is dit verschil 0-1%. Deze relatief kleine verschillen in afvoer hebben naar verwachting een nog geringer effect op de totale waterbalans van het IJsselmeersysteem en daarmee op de uiteindelijke resultaten in deze studie.

Op basis van deze 50-jarige LHM 4.3 reeks is een relatie opgesteld tussen het debiet bij de IJsselkop en het debiet bij het Keteldiep. In deze relatie zijn impliciet alle tussenliggende lozingen en onttrekkingen meegenomen. De relatie toont een seizoenstrend, omdat er in de zomermaanden meer wordt ingelaten richting de Twentekanalen dan in de wintermaanden. Daarom is er een lineaire relatie opgesteld per maand. Deze relatie maakt het mogelijk om

de afvoeren bij de IJsselkop om te zetten naar afvoeren bij het Keteldiep, die in het bakjesmodel gebruikt kunnen worden met de volgende lineaire vergelijking:

$$Q_{Keteldiep} = A * Q_{IJsselkop} + B$$

De factoren A en B tonen een seizoensdynamiek, zoals hierboven beschreven. De seizoensdynamiek van de factoren is weergegeven in Figuur 3-4.

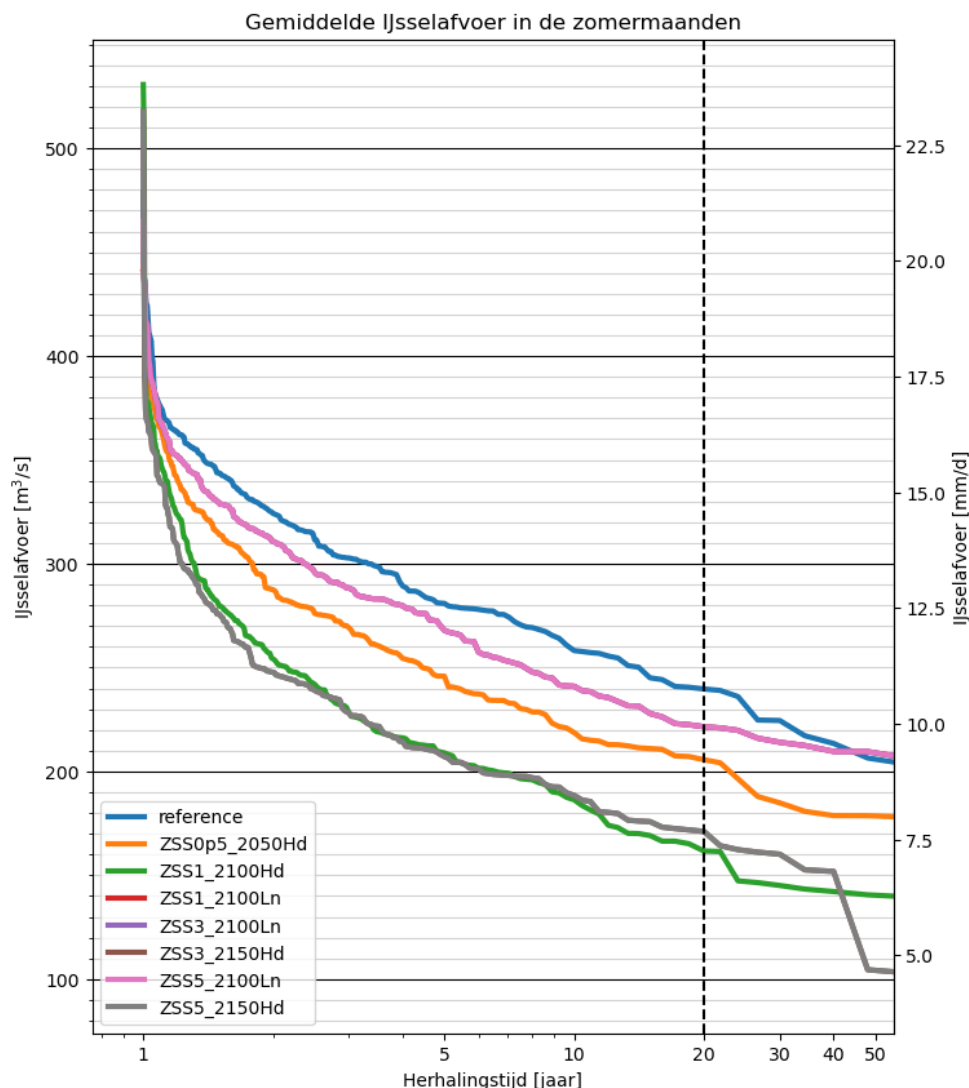


Figuur 3-4 Waarden van de coëfficiënten uit de lineaire vergelijking om de afvoer bij het Keteldiep te relateren aan de afvoer bij de IJsselkop.

De afzonderlijke lineaire relaties per maand en de bijbehorende coëfficiënten zijn opgenomen in Appendix B.

De totale afvoer van de IJssel richting het IJsselmeer is het resultaat van de twee stappen zoals hierboven beschreven; de afvoer bij de IJsselkop wordt eerst bepaald op basis van de synthetische Rijnafvoerscenario's en vervolgens omgezet naar een debiet bij het Keteldiep op basis van de LHM 4.3 50-jarige reeks.

In Figuur 3-5 is de gemiddelde IJsselafvoer gedurende het groeiseizoen per scenario weergegeven. Het verschil tussen de droge en natte klimaatscenario's is duidelijk zichtbaar in de gemiddelde IJsselafvoer.



Figuur 3-5 Gemiddelde IJsselafvoer gedurende het groeiseizoen (16 april - 30 september) voor verschillende scenario's. De linker y-as geeft de afvoer in m³/s, de rechter y-as in mm/d (t.o.v. het oppervlak van het open water in het IJsselmeergebied). De IJsselafvoer is onafhankelijk van zeespiegelstijging; deze scenario's overlappen in de figuur met de vergelijkbare klimaatscenario's.

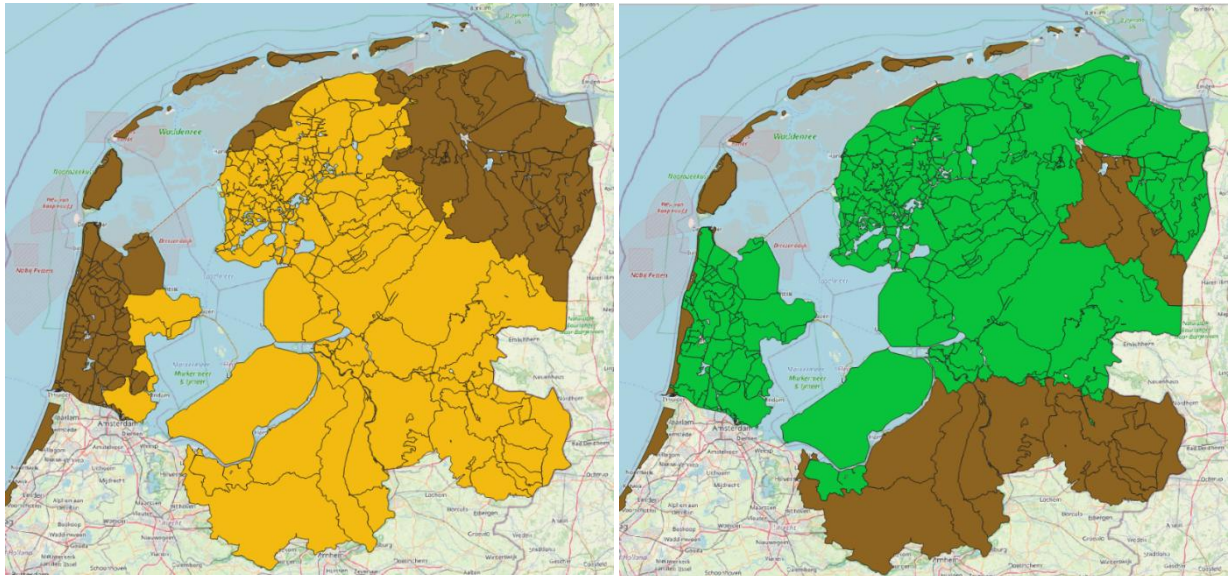
Laterale watervraag/-toevoer uit en naar de regio

De laterale waterafvoer/watervraag uit en naar de omliggende regionale gebieden voor elk van de scenario-analyses is afgeleid op basis van de 100-jarige LHM reeks vanuit BP'18. Hiervoor is dezelfde methode gehanteerd als eerder voor de kalibratieberekeningen. De relaties zoals deze bij het afleiden van de laterale debieten voor de kalibratieperiode zijn gevonden, zijn toegepast op de meteorologische invoer voor de scenario-berekeningen. Voor de toekomstige reeksen is hierbij uitgegaan van huidig beheer.

Om een compleet beeld te krijgen van de toekomstige watervraag/watertoevoer vanuit de regio, is het echter ook van belang om de doorspoelingsvraag in de regio als gevolg van grondwaterverziltting en/of oppervlaktewaterverziltting door zeespiegelstijging mee te nemen.

De wateraanvoerflux voor doorspoeling is in grote mate afhankelijk van de zeespiegelstijging. Wateraanvoer fluxen voor doorspoeling, gegeven een bepaalde mate van

zeespiegelstijging, worden ontleend uit door Deltares opgestelde methodiek die ook voor het Nationaal Water Model (NWM) binnen Deltaprogramma Zoetwater is toegepast (Deltares, 2024). In deze methodiek wordt uitgegaan van het werk van Deltares (2022) uit fase 1 van het KP ZSS, waarin een inschatting is gemaakt van de extra doorspoelvraag door zeespiegelstijging. Net als bij het afleiden van de laterale watervraag/-toevoer geldt de aanname dat wordt uitgegaan van huidig beheer. Er is in de scenario-analyse niet expliciet rekening gehouden met een ander waterbeheer als gevolg van extreme zeespiegelstijging.



Figuur 3-6 Links: regio's die afwateren richting het IJsselmeer (geel). Rechts: gebieden met een watervraag vanuit het IJsselmeer (groen). De verdeling volgt uit het Synthesedocument IJsselmeergebied (RWS, 2014)

Uit het onderzoek van Deltares (2022) volgt een doorspoeldebiet per deelregio in het LHM. Figuur 3-6 toont de gebieden in Noord-Nederland die afwateren op het IJsselmeer (geel) en de gebieden met een watervraag vanuit het IJsselmeer (groen). De extra doorspoelvraag is meegenomen voor de gebieden die wel onttrekken uit, maar niet afwateren op het IJsselmeer, zoals grote delen van Noord-Holland. Deze fluxen zijn netto onttrekkingen aan het IJsselmeersysteem. Voor gebieden die niet onttrekken aan, maar wel afwateren op het IJsselmeer geldt dat er geen extra doorspoelvraag is als gevolg van zeespiegelstijging (bijv. Gelderse Vallei en Twente).

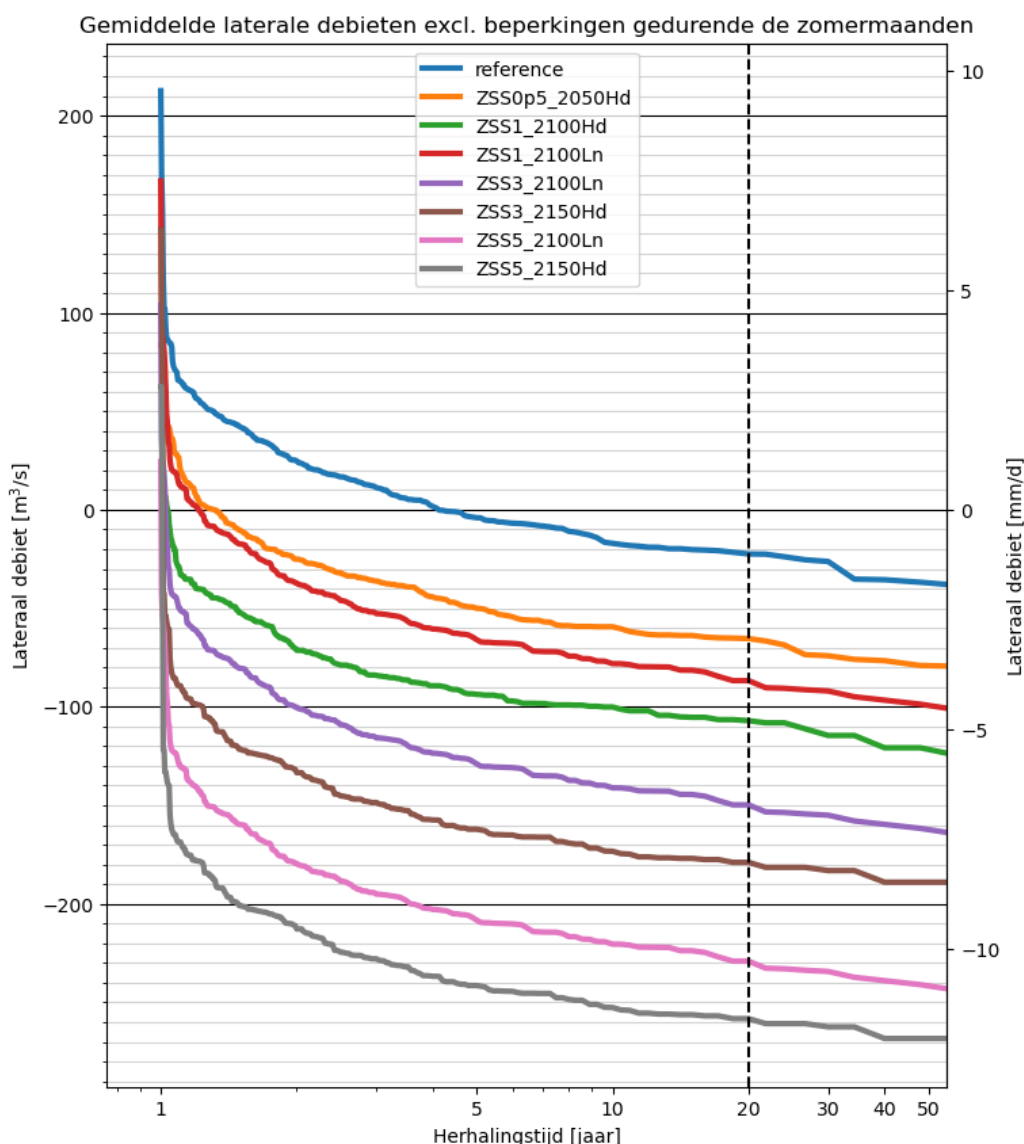
De extra doorspoelvraag door ZSS is opgeteld bij de laterale watervraag/-toevoer per regio voor de maanden april tot en met september. In deze studie is de aanname gedaan dat het extra water voor doorspoeling alleen in de zomermaanden van belang is. Buiten de zomermaanden wordt aangenomen dat er voldoende afvoer door neerslag is voor doorspoeling en peilbeheer.

De extra doorspoelvraag bij verschillende mate van zeespiegelstijging is weergegeven in Tabel 3-1. Dit is voor alle gebieden welke water onttrekken uit het IJsselmeergebieden, dus ook voor de gebieden die ook lozen weer lozen op IJsselmeer (zie beschouwing in de alinea's hierboven). De waarden voor 5 m zeespiegelstijging zijn hierbij lineair geëxtrapoleerd, omdat de studie van Deltares de doorspoelfluxen tot 3 m zeespiegelstijging beschouwt.

Tabel 3-1 Extra doorspoelvraag vanuit het IJsselmeer per waterschap als gevolg van zeespiegelstijging (Deltares 2022). Bij 0 m ZSS is de berekende doorspoeling in totaal 12,4 m³/s.

Waterschap	Mate van zeespiegelstijging			
	0.5 m	1 m	3 m	5 m
Fryslân	10.48	19.01	34.02	56.9
Hollands Noorderkwartier	8.66	14.27	25.07	41.74
Hunze & Aa's	0.19	0.52	6.53	10.82
Noorderzijlvest	7.76	20.92	52.13	87.63
Vallei & Veluwe	0	0	0	0
Vechtstromen	0	0	0	0
Amstel, Gooi en Vecht	0	0	0	0
Drents Overijsselse Delta	0	0	0	0
Zuiderzeeland	0	0	0	0

Alle fluxen zijn door de opgestelde relaties met neerslag en verdamping congruent aan de synthetische invoerreeksen die als basis dienen voor de scenario analyse. Figuur 3-7 toont de gemiddelde laterale debieten, waarbij negatieve debieten een watervraag aan het hoofdwatersysteem IJsselmeer-Markermeer representeren, voor de verschillende scenario's. Het betreft hier de debieten zoals deze in beginsel worden opgelegd aan het model. Het beperken van de watervraag bij het uitzakken van het meerpeil is niet meegenomen in deze figuur. De tijdens de runs daadwerkelijk toegepaste onttrekkingen aan het HWS zullen situationeel lager zijn wanneer de ingestelde peil-ondergrens wordt bereikt. Voor de scenario analyses worden dezelfde sturingsregels gebruikt als in de kalibratie (zie 2.1.1). Door de afhankelijkheid van de doorspoelingsdebieten en zeespiegelstijging, is het effect van zeespiegelstijging duidelijk terug te zien in deze figuur (in tegenstelling tot bijv. Figuur 3-5).



Figuur 3-7 Gemiddelde laterale debieten gedurende het groeiseizoen voor de verschillende scenario's. Negatieve debieten corresponderen met de maximaal toegepaste onttrekkingen uit HWS als peilbeheer dit toelaat.

Chloridegehalte laterale watervraag/-toevoer

Het chloridegehalte van de laterale waterafvoer is niet direct beschikbaar vanuit de synthetische reeksen of de 100-jarige BP'18 reeks. Daarom is gebruik gemaakt van constante chloridelading per zichtwaarde van zeespiegelstijging. Net als voor het bepalen van de extra doorspoelvraag wordt gebruik gemaakt van het onderzoek van Deltares (2022)¹² om, gegeven een bepaalde mate van zeespiegelstijging, de chloridevracht via kwel te berekenen (in het regionale systeem).

De extra chloridelast vanuit het regionale systeem is niet voor alle regio's van belang voor

¹² De chloridevracht via kwel in het regionale systeem is afgeleid per regio o.b.v. een analyse van de onderliggende data voor de rapportage van Deltares, en is specifiek gekaderd voor het voorliggende project.

het IJsselmeer. De chloridelast vanuit de regio is meegenomen voor alle regio's die afwateren op het IJsselmeer (gele gebieden in Figuur 3-6). Op basis van deze verdeling is, per waterschap, per zichtwaarde van zeespiegelstijging, een vaste chloridelast opgeteld bij de bestaande chloridelasten. Deze chloridelast is, in tegenstelling tot de doorspoelvraag, wel jaarrond opgelegd.

De extra chloridelasten per waterschap als gevolg van zeespiegelstijging zijn weergegeven in Tabel 3-2. Deze chloridelasten zijn opgeteld bij de chloridelasten afgeleid voor het 0 m zeespiegelstijging (referentie) scenario (zie 2.2.1).

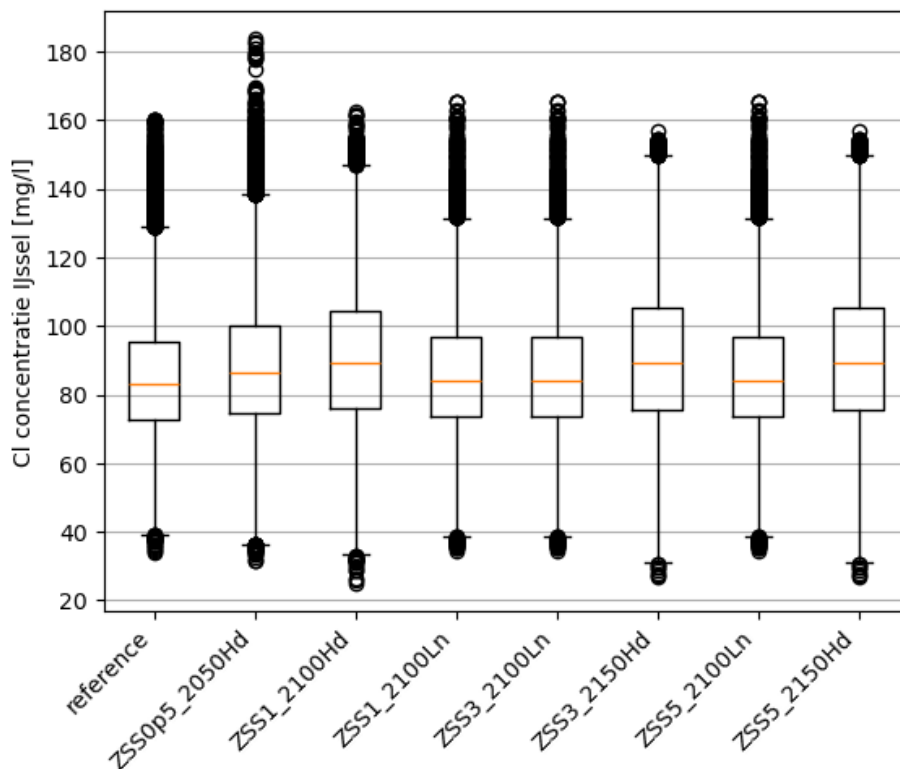
Tabel 3-2 Extra chloridelast op het IJsselmeer per regio als gevolg van zeespiegelstijging

Waterschap	Mate van zeespiegelstijging			
	0.5 m	1 m	3 m	5 m
Fryslân	0.69	1.66	10.93	20.19
Hollands Noorderkwartier	0.05	0.05	0.16	0.26
Hunze & Aa's	0	0	0	0
Noorderzijlvest	0	0	0	0
Vallei & Veluwe	0	0	0	0
Vechtstromen	0	0	0	0
Amstel, Gooi en Vecht	0	0	0	0
Drents Overijsselse Delta	0	0	0	0
Zuiderzeeland	0.55	1.24	1.67	2.10

Chloridegehalten IJssel

Voor de chlorideconcentratie van de IJssel wordt gebruik gemaakt van de nieuwste Q-c relatie voor de Rijn die is opgesteld door KWR (KWR, 2021) Hiermee kan voor toekomstige afvoeren de achtergrondconcentratie in de Rijn worden berekend. Bij toepassing wordt rekening gehouden met afspraken uit het Rijnzoutverdrag dat stelt dat de chlorideconcentratie bij Lobith niet hoger mag worden dan 200 mg/L. In de reeksen voor de verschillende scenario's komt deze overschrijding echter niet voor.

Er wordt aangenomen dat er tussen Lobith en het Keteldiep geen significante bronnen/onttrekkingen van chloride aanwezig zijn, waarmee de chlorideconcentratie op de IJssel zou worden beïnvloed. De achtergrondconcentratie van de Rijn wordt daarmee ook aangenomen als achtergrondconcentratie van de IJssel. *Figuur 3-8* toont de spreiding van de chlorideconcentratie op de IJssel voor de verschillende scenario's. Deze chlorideconcentraties staan niet gelijk aan de chloridelasten richting het IJsselmeer (de last hangt af van de afvoer), maar betreffen wel de concentratie waarover (internationaal) afspraken zijn gemaakt en zij bepalen hoe effectief het IJsselwater überhaupt het meer nog kan zoetspoelen onder de 150 mg/L Immers: bij afvoeren Q_{Lobith} onder ca 450 m³/s ($Q_{IJssel} \approx 50$ m³/s bij huidige verdeling) passeert de concentratie van het rivierwater 150 mg/L. Het IJsselwater zal het IJsselmeer dan sowieso niet zoeter dan de gewenste 150 mg/L kunnen krijgen. De IJssel zal dan netto bijdragen aan verzilting, bovenop het zeezout, het zout uit de lateralen en het effect van openwater verdamping. *Figuur 3-8* laat zien dat deze extreem lage afvoeren in de staart van de verdelingen voorkomen.



Figuur 3-8 Chloride concentratie van de IJssel voor de verschillende scenario's. De figuur is gebaseerd op 240 jaar aan dagwaarden per klimaatscenario. De mate van zeespiegelstijging heeft geen effect op de chloride concentraties van de IJssel. De box geeft het 25^e tot 75^e percentiel aan. De uitbijters vallen buiten 1,5 x de interpercentielrange.

Spui- en schutcomplexen Afsluitdijk

Voor de spui- en schutcomplexen bij de Afsluitdijk is dezelfde methode gehanteerd zoals beschreven in paragraaf 2.1.2.

3.3 Indicatoren

Indicatoren spelen een essentiële rol als kwantitatieve en visuele representatie van de werking van het systeem. Het is van belang dat deze indicatoren, in termen van aantal en complexiteit, adequaat rekening houden met de mogelijkheden, maar ook met de onzekerheden in het model, om schijnbare nauwkeurigheid te voorkomen. Bovendien is het noodzakelijk dat deze indicatoren een helder inzicht bieden in de werking van het systeem onder verschillende omstandigheden, inclusief variaties in (rand)forceringen en droogteperioden, en dat ze gekoppeld kunnen worden aan een bredere regionale context.

Deze indicatoren zijn onderverdeeld in drie hoofdcategorieën: **chloride**, **waterpeil** en **watergebruik/watertekort**. De tijdsafhankelijke aard van deze indicatoren biedt de mogelijkheid voor analyse van de duur van over- of onderschrijdingen. Bijvoorbeeld de chloridewaarde, die zowel systeemgemiddeld als locatie-specifiek kan zijn, kan geabstraheerd worden tot een jaargemiddelde of seizoenswaarde. De waterpeilindicator geeft inzicht in de mogelijkheden voor meerpeilbeheer en de impact van peil over- en onderschrijdingen op peilgevoelige functies. De watergebruik/watertekort indicator biedt inzicht in de (on)balans tussen beschikbaar zoetwater en vraag. Een watertekort resulteert in korting op de regionale vraag en/of interen op de zoetwaterbuffer, wat op zijn beurt weer

invloed heeft op het waterpeil. Het is belangrijk op te merken dat de waterpeil, watergebruik en watertekort in hoge mate met elkaar gecorreleerd zijn.

Naast bovengenoemde primaire indicatoren, is het ook van belang de forceringen op het bakjesmodel als zogenaamde secundaire indicatoren te beschouwen en beschikbaar te maken uit de modellering. De forceringen zijn in de nieuwe versie van het bakjesmodel grotendeels tijdsvariabel en de zoutfluxen volgen zelfs een voorgeschreven functie op basis van andere modelparameters. Het is belangrijk om zicht te houden op deze forceringen om ook het gedrag van de primaire indicatoren beter te kunnen duiden.

3.4 Resultaten

De resultaten voor het nul-alternatief worden geanalyseerd aan de hand van de indicatoren chloride, waterpeil en watergebruik/watertekort. Daartoe zijn de volgende aspecten uit de modelresultaten afgeleid:

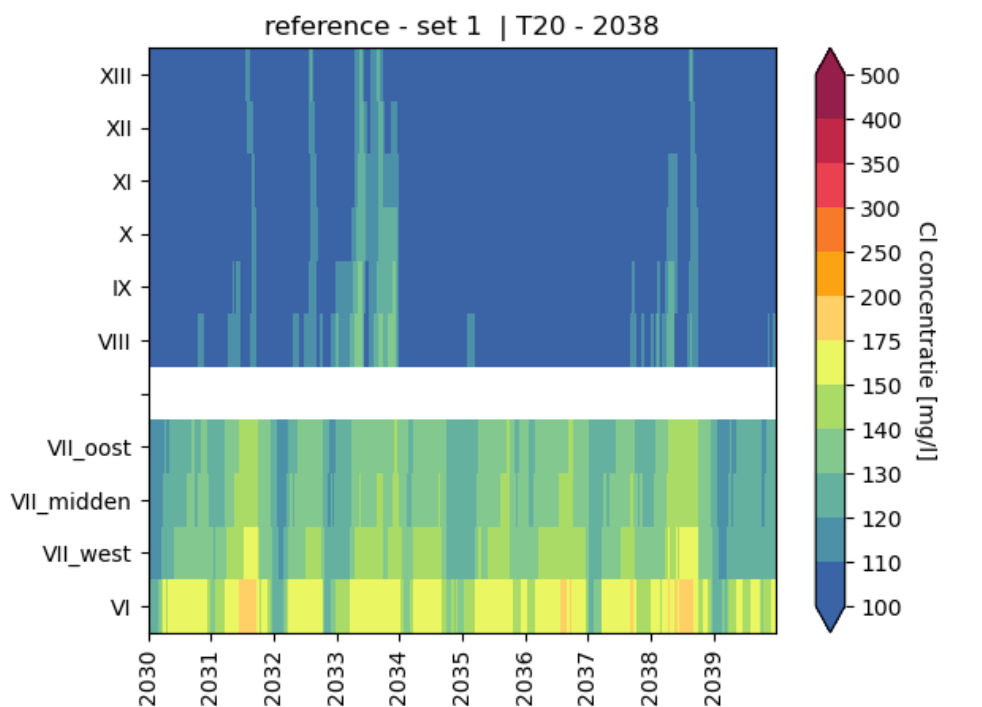
- Het aantal dagen per zomerhalfjaar (16 april - 30 september) dat de chlorideconcentratie boven de 150 mg/l ligt, gespecificeerd voor bakje XI (waar Andijk zich in bevindt);
- De jaargemiddelde chlorideconcentraties bij bakje XI en het Markermeer, met oog op de drinkwatergrens;
- De gemiddelde chlorideconcentraties bij bakje XI en het Markermeer over het groeiseizoen, met oog op overige zoetwaterfuncties (merk op: bakje XI representeert ook in grote mate het gemiddelde van alle IJsselmeerbakjes);
- Het aantal dagen per zomerhalfjaar dat er maar 40 m³/s gespuid kan worden in verband met bereiken ondergrens peilbeheer (NAP -0,30 m);
- Het percentage van de totale watervraag tijdens het zomerhalfjaar waarin niet voorzien kan worden, i.v.m. bereiken ondergrens peilbeheer en in werking treden verdringingsreeks.

De indicatoren zoals hierboven beschreven geven een statistische samenvatting van de scenario's. Deze statistische samenvatting geeft echter niet direct inzicht in de typische dynamiek in het IJsselmeer-Markermeer systeem. Daarom zal eerst op deze typische dynamiek worden ingezoomd, alvorens de indicatoren te beschrijven.

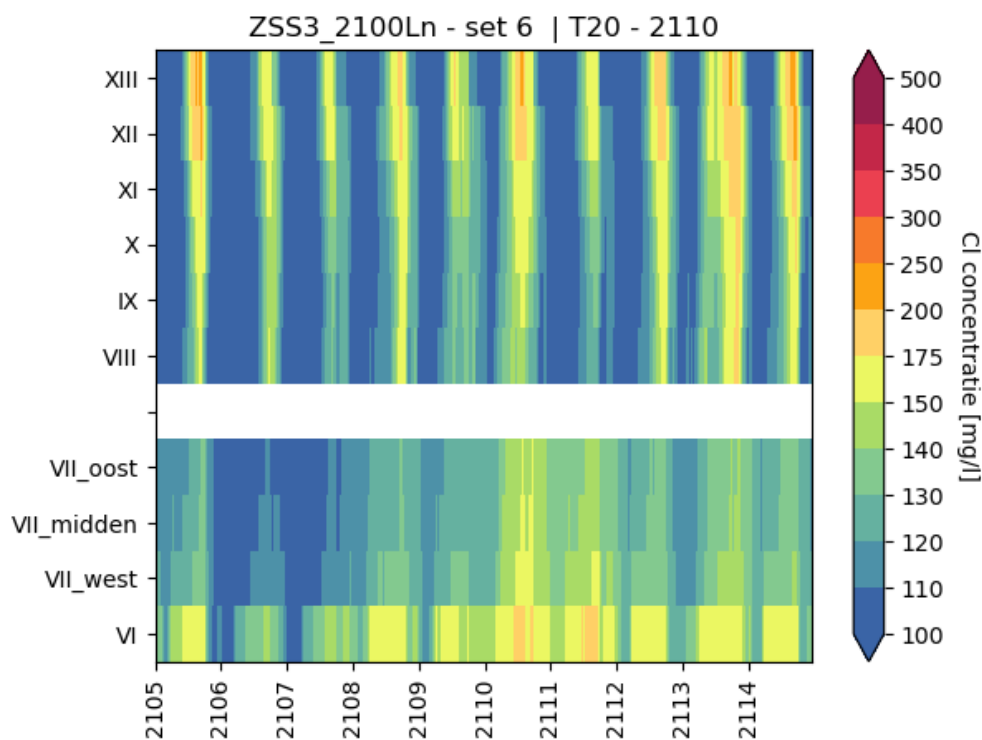
3.4.1 Dynamiek scenario's

Om de typische dynamiek van het systeem in kaart te brengen onder de verschillende scenario's, is voor 3 verschillende scenario's (referentie, ZSS 3m 2100Ln en ZSS 5m 2150Hd) het chloride verloop in tijd en ruimte weergegeven in *Figuur 3-9*, *Figuur 3-10* en *Figuur 3-11*. In de bijschriften van de figuren staat het T20 jaar vermeld. Het is mogelijk dat er in dezelfde 10-jaar periode, een extremer jaar optreedt. De tijdseries per zichtjaar beslaan een periode van 15 jaar voor tot 15 jaar na het betreffende zichtjaar. Bijvoorbeeld; zichtjaar 2100 bevat een tijdsperiode van 2085 tot 2115.

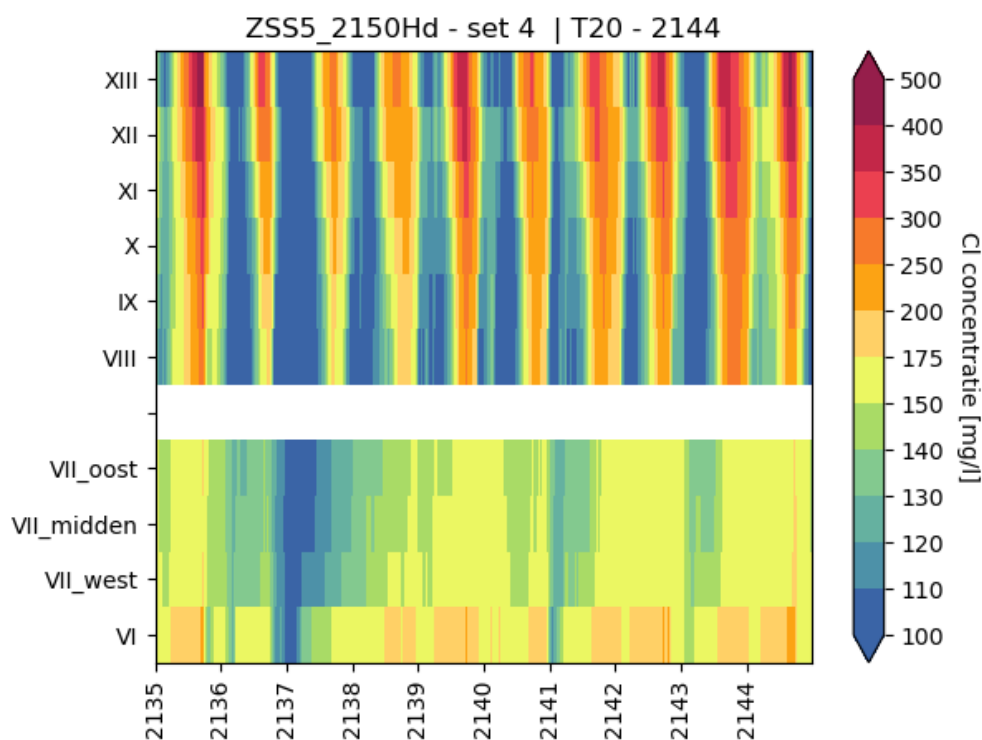
De figuren van de overige scenario's zijn beschikbaar in Appendix E.



Figuur 3-9 Chloride concentratie (dagwaarden) over een representatief decennium voor het referentie scenario (huidig klimaat en 0m ZSS). De groeiseizoengemiddelde chloridewaarde in bakje XI met een herhalingsijd van 20 jaar bedraagt 108,8 mg/l en vindt plaats in het jaar 2038 van set 1 van de ensembles.



Figuur 3-10 Chloride concentratie (dagwaarden) over een representatief decennium voor scenario ZSS 3m en klimaatscenario 2100Ln. De groeiseizoengemiddelde chloridewaarde in bakje XI met een herhalingsijd van 20 jaar bedraagt 152,7 mg/l en vindt plaats in het jaar 2110 van set 6 van de ensembles.



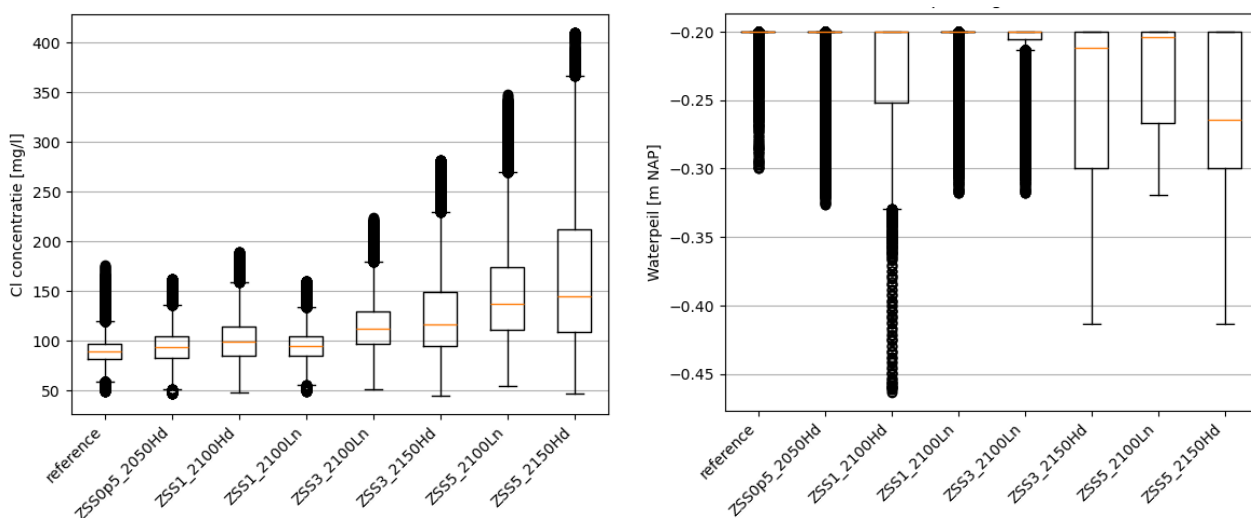
Figuur 3-11 Chloride concentratie (dagwaarden) over een representatief decennium voor scenario ZSS 5m en klimaatscenario 2150Hd. De groeiseizoengemiddelde chloridewaarde in bakje XI met een herhalingstijd van 20 jaar bedraagt 222,1 mg/l en vindt plaats in het jaar 2144 van set 4 van de ensembles.

Voor deze figuren geldt dat het decennium is weergegeven met het T20 jaar op basis van de groeiseizoengemiddelde chloridewaarde (16 april - 30 september) in bakje XI. De titel boven de figuren geeft aan uit welke ensembleset van 30 jaar dit T20 jaar is gehaald (per klimaatscenario zijn 8 ensemblesets van 30 jaar beschikbaar). De figuren tonen de chloridewaarden (dagwaarden) voor het IJsselmeer van zuid naar noord (bakje VIII tot XIII, bovenste paneel), en het Markermeer van west naar oost (bakje VI tot VII_oost, onderste paneel). De figuren laten duidelijk zien dat in het referentie scenario, verzilting op het IJsselmeer vooral van zuid naar noord lijkt gedreven (t.g.v. chloride in IJsselwater en Markermeer). Dit duidt erop dat er in het referentiescenario voldoende debiet beschikbaar blijft om te voorkomen dat chloride zich vanaf de Afsluitdijk het meer op beweegt voor het weergegeven decennium. Bij hogere mate van zeespiegelstijging wordt de verzilting op het IJsselmeer rondom een indicatieve T20 situatie wel vanuit de Afsluitdijk gedreven, door de hoge zoutlasten die er door de schut- en spuiccomplexen het IJsselmeer op komen.

De figuren laten daarnaast zien dat het IJsselmeer bijna volledig kan ontladen in de winter, voor alle scenario's met 3 m ZSS. Voor hogere mate van zeespiegelstijging is dit niet meer gegarandeerd; de winter van 2028-2029 bij 5m ZSS in Figuur 3-11 is hier bijvoorbeeld een uitzondering op. In dit jaar blijft de concentratie ook in de wintermaanden relatief hoog.

Daarnaast is te zien dat een relatief extreem jaar o.b.v. chloride in bakje XI, niet direct een relatief extreem jaar op het Markermeer hoeft te betekenen. Het Markermeer toont zich wat betreft zoutdynamiek als relatief losstaand van het IJsselmeersysteem.

In Figuur 3-12 staat de verdeling weergegeven van het chloridegehalte in bakje XI en het meerpeil voor de beschouwde scenario's. Dit figuur toont een duidelijk verschil vanaf 3 m ZSS, waarbij de chlorideconcentraties sterke uitschieters vertonen. In het rechterpaneel van de figuur is te zien dat het meerpeil maar in enkele scenario's onder de -0,40 zakt. De grens vanaf waar het spuidebiet wordt verminderd (-0,3 m NAP) wordt wel in meerdere scenario's gehaald. Naast de verschillen tussen de klimaatscenario's, is in het rechterpaneel ook het effect van zeespiegelstijging (door middel van de grotere doorspoelingsvraag) duidelijk terug te zien. De scenario's die veel uitbijters vertonen (zwarte bolletjes in figuur) tonen dat het uitzakken van het peil slechts enkele keren voorkomt in dat scenario. Bij scenario's zonder uitbijters komt het uitzakken van het meerpeil vaker voor.

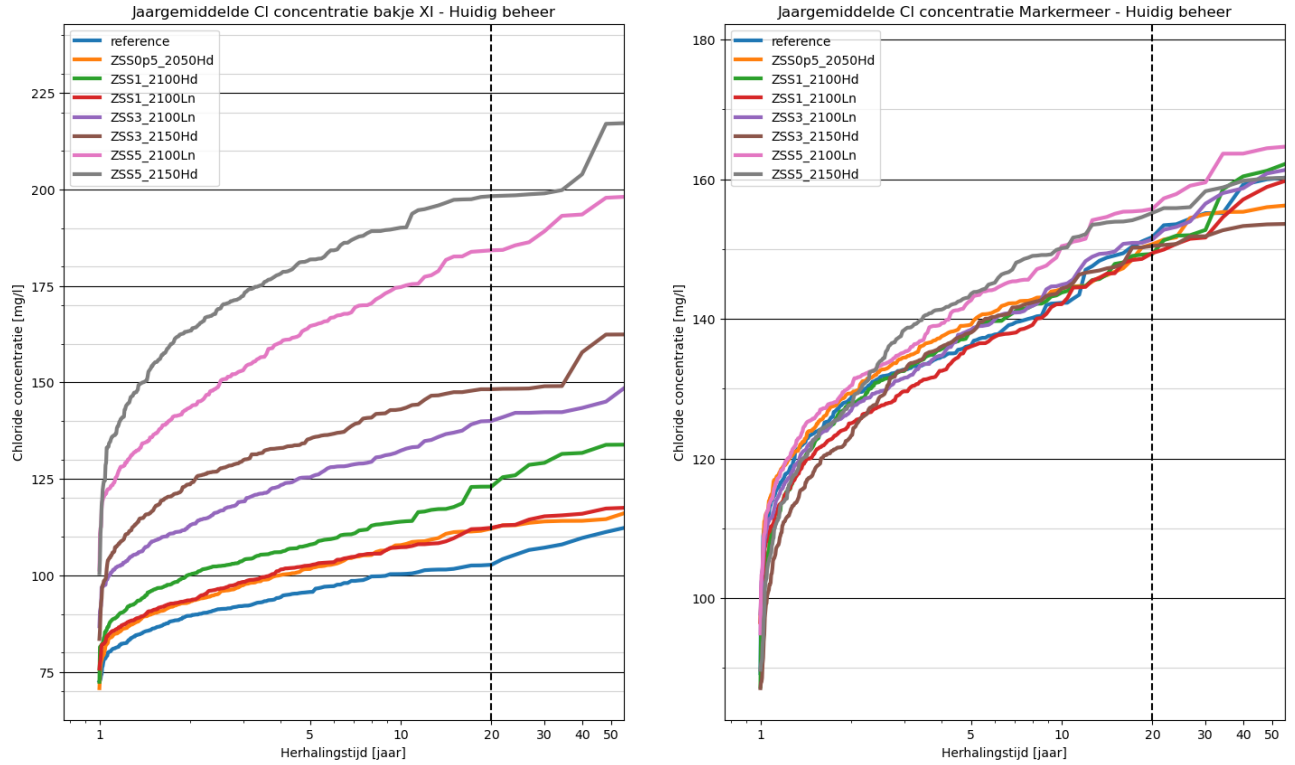


Figuur 3-12 Links: verdeling van chloridewaarden in bakje XI (nabij Andijk) onder verschillende scenario's. Rechts: Verdeling van meerpeil gedurende het groeiseizoen (16 april - 30 september) voor de verschillende scenario's. De box geeft het 25^e en 75^e percentiel aan. De whisker geeft de waarde aan die binnen 1,5 x de interpercentielafstand van het 25^e of 75^e percentiel ligt. Het kan, door de verdeling van de data, voorkomen dat er geen uitbijters worden getoond.

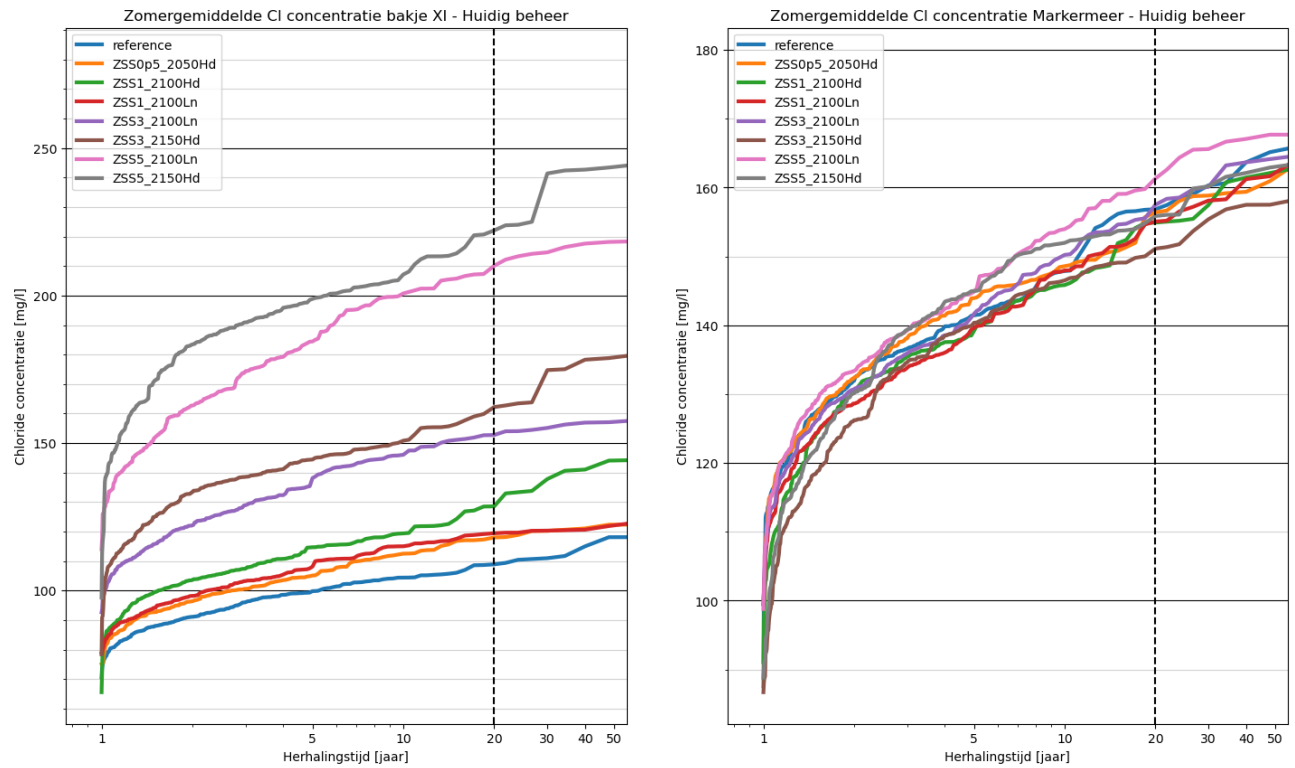
3.4.2 Statistische analyse o.b.v indicatoren

Chloride

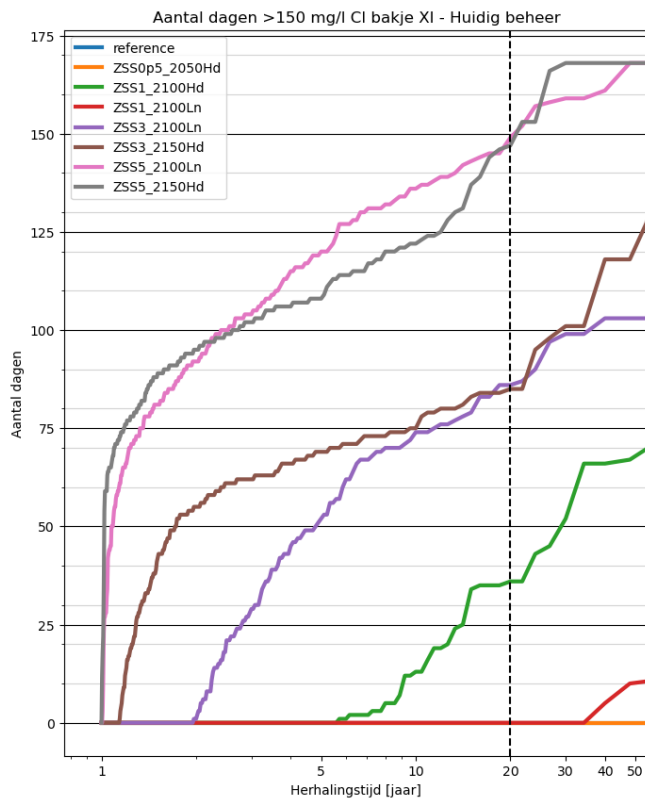
Figuur 3-15 toont het aantal dagen (niet per se aaneengesloten) per zomer dat de chloridegrens van 150 mg/l wordt overschreden in bakje XI. Het referentiescenario overlapt hier volledig met het ZSS 0,5m 2050Hd scenario. De mate van zeespiegelstijging is hierbij meer van invloed dan het zichtjaar en bijbehorende klimaatscenario, met name bij een hogere mate van zeespiegelstijging (3 m en 5 m). Bij 3 meter zeespiegelstijging en klimaatscenario 2150Hd is de chlorideconcentratie bij Andijk eens per 20 jaar (T20) 81 dagen boven de 150 mg/l. Hierbij is op te merken dat ook bij lagere herhalingstijden (T2 en T3) ook al meer dagen per jaar met hoge chloridegehalten optreden. Het verschil tussen de rode, de paarse lijn en de roze lijn (ZSS1_2100Ln, ZSS3_2100Ln, ZSS5_2100Ln) toont de impact van zeespiegelstijging het meest uitgesproken.



Figuur 3-13 Jaargemiddelde chlorideconcentratie [mg/l] voor verschillende herhalingstijden bij bakje XI (nabij Andijk) (links) en in het Markermeer (rechts)



Figuur 3-14 Gemiddelde chlorideconcentratie over het groeiseizoen (zomerhalfjaar) voor verschillende herhalingstijden bij bakje XI (nabij Andijk) (links) en in het Markermeer (rechts)



Figuur 3-15 Aantal dagen waarbij de chlorideconcentratie >150 mg/l is bij Andijk, uitgezet tegen de herhalingstijd. De zwarte stippellijn geeft waarden aan met een herhalingstijd van 20 jaar.

Voor de herhalingstijden van 5, 10 en 20 jaar zijn de resultaten voor bakje XI, zoals getoond in Figuur 3-13 (links) en Figuur 3-15 ook in Tabel 3-3 gezet. Tabel 3-3 laat zien dat bij 2100Ln en 2150Hd er boven 3 m ZSS een punt komt waarbij de jaargemiddelde chlorideconcentratie niet meer onder de 150 mg/l komt in een T20 situatie.

Tabel 3-3 Aantal dagen in de zomer waarbij de chlorideconcentratie >150mg/l is voor bakje XI waarin Andijk gesitueerd ligt. Tussen haakjes is ook de jaargemiddelde chlorideconcentratie gegeven. De resultaten voor jaren met een herhalingsjijd van 5, 10 en 20 jaar zijn weergegeven.

T5	Ref	Ln	Hd		
ZSS		2100	2050	2100	2150
0 m	0d (95mg/l)				
0,5 m			0d (101 mg/l)		
1 m		0d (102 mg/l)		0 d (107 mg/l)	
3 m		52d (125 mg/l)			69d (135 mg/l)
5 m		120d (164 mg/l)			108d (181 mg/l)

T10	Ref	Ln	Hd		
ZSS		2100	2050	2100	2150
0 m	0d (100 mg/l)				
0,5 m			0d (107mg/l)		
1 m		0d (107 mg/l)		13d (113mg/l)	
3 m		74d (132 mg/l)			75d (143 mg/l)
5 m		136d (174 mg/l)			122d (190 mg/l)

T20	Ref	Ln	Hd		
ZSS		2100	2050	2100	2150
0 m	0d (102 mg/l)				
0,5 m			0d (112 mg/l)		
1 m		0d (112 mg/l)		36d (122 mg/l)	
3 m		86d (140 mg/l)			85d (148 mg/l)
5 m		149d (184 mg/l)			147d (198 mg/l)

De resultaten voor de jaargemiddelde chlorideconcentratie op het Markermeer zijn weergegeven in Tabel 3-4.

Tabel 3-4 Jaargemiddelde chlorideconcentratie op het Markermeer. De resultaten voor jaren met een herhalingsjijd van 5, 10 en 20 jaar zijn weergegeven.

T5	Ref	Ln	Hd		
ZSS		2100	2050	2100	2150
0 m	136.2 mg/l				
0,5 m			139.1 mg/l		
1 m		136.0 mg/l		138.4 mg/l	
3 m		138.4 mg/l			138.0 mg/l
5 m		142.6 mg/l			143.6 mg/l

T10	Ref	Ln	Hd		
ZSS		2100	2050	2100	2150
0 m	142.3 mg/l				
0,5 m			144.3 mg/l		
1 m		142.1 mg/l		143.8 mg/l	
3 m		144.9 mg/l			144.3 mg/l
5 m		150.4 mg/l			150.1 mg/l

T20	Ref	Ln	Hd		
ZSS		2100	2050	2100	2150
0 m	151.7 mg/l				
0,5 m			149.3 mg/l		
1 m		149.4 mg/l		149.4 mg/l	
3 m		151.3 mg/l			150.4 mg/l
5 m		155.8 mg/l			155.2 mg/l

De verschillende scenario's hebben een grotere impact op de chlorideconcentraties in het IJsselmeer dan in het Markermeer (zie Figuur 3-13). De jaargemiddelde chlorideconcentratie bij bakje XI komt bij 5 m zeespiegelstijging eens per 2-3 jaar al boven de 150 mg/l. Over het groeiseizoen (16 april - 30 september) gekeken bereikt de chlorideconcentratie bij deze extreme mate van zeespiegelstijging een waarde van 200 mg/l bij een herhalingsjijd korter dan T20.

Gedurende het groeiseizoen komt bij 3 m zeespiegelstijging de chlorideconcentratie gemiddeld al vaker dan T20 boven de 150 mg/l. In het Markermeer zijn de effecten geringer en resulteren de verschillende scenario's in vergelijkbare jaargemiddelde concentraties.

Waterpeil en watergebruik/watervraag

Figuur 3-16 Links: aantal dagen per zomer dat het minimale spuidebiet wordt teruggebracht naar 40 m³/s vanwege peilhandhaving, voor verschillende herhalingsjijden. Rechts: het percentage van de watervraag in de zomer dat kan worden voldaan, voor verschillende herhalingsjijden toont links het aantal dagen per zomer dat het spuidebiet wordt teruggebracht naar 40 m³/s vanwege peilhandhaving. Dit is het geval als het peil onder de -0,3 m NAP dreigt te zakken. In de referentiesituatie gebeurt dit in de complete 240-jarige reeks niet. De invloed van het gekozen klimaatscenario is hier groot; de Hd scenario's korten vaker op het spuidebiet dan de Ln scenario's. De mate van zeespiegelstijging is in mindere mate bepalend voor het korten op het spuidebiet, maar speelt zeker een rol. Door de toenemende watervraag voor doorspoeling om verzilting tegen te gaan in de regio's heeft zeespiegelstijging een directe link met de peilhandhaving in het IJsselmeer. Scenario ZSS5_2100Ln (roze), ZSS3_2100Ln (paars) en ZSS1_2100Ln (rood) gaan uit van hetzelfde klimaatscenario, maar de verschillen zijn significant, gekeken naar het aantal dagen dat het spuidebiet teruggaat naar 40 m³/s. Bij 1 meter zeespiegelstijging is dit 18 dagen het geval (met een herhalingsjijd van 20 jaar), tegenover 36 en 74 dagen voor 3 en 5 meter

zeespiegelstijging, respectievelijk. Daarnaast begint het korten op het spuidebiet bij 1 meter zeespiegelstijging pas bij een herhalingstijd van 8 jaar, tegenover 3 en 1,5 jaar voor 3 en 5 meter zeespiegelstijging, respectievelijk.

De resultaten getoond in Figuur 3-16 zijn, voor herhalingstijden van 5, 10 en 20 jaar, ook weergegeven in Tabel 3-5.

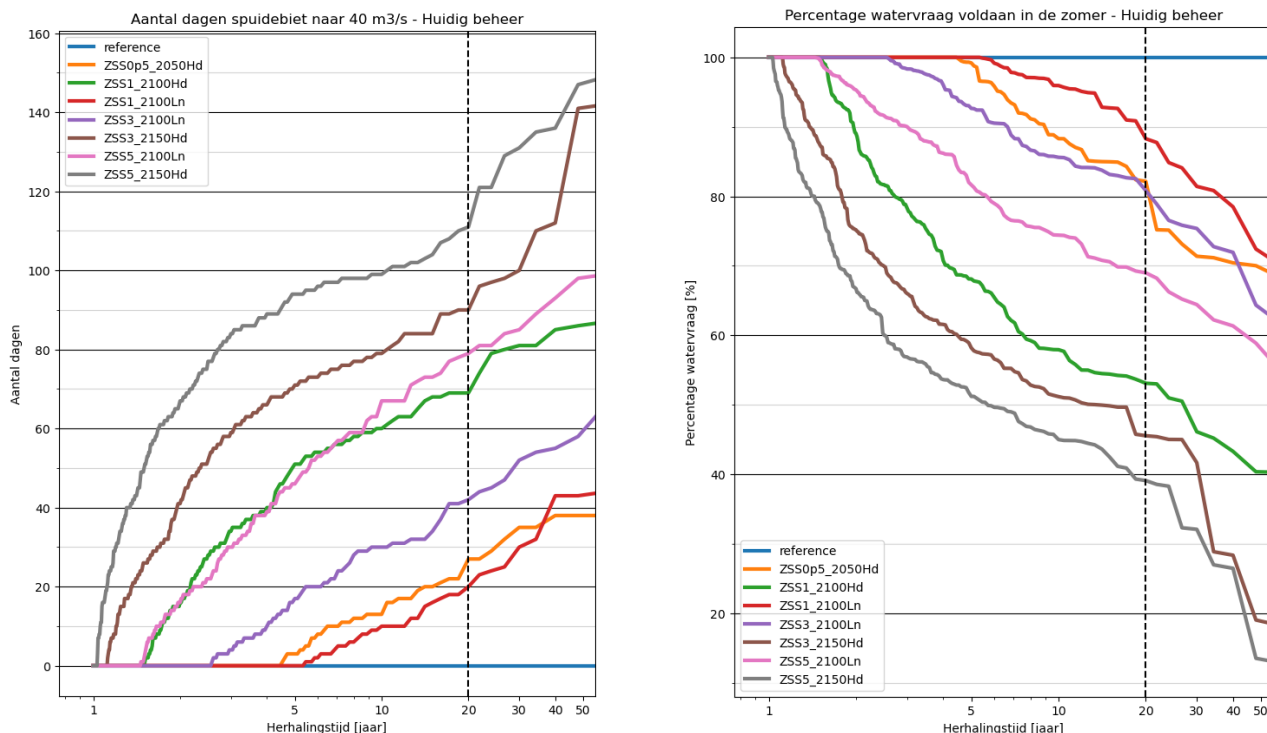
Tabel 3-5 Aantal dagen per zomer dat het spuidebiet wordt geminimaliseerd en de watervraag van de regio's wordt gekort (percentage van de watervraag wat over een zomer kan worden voldaan). De resultaten zijn weergegeven voor jaren met een herhalingstijd van 5, 10 en 20 jaar.

T5		Ref	Ln	Hd		
ZSS			2100	2050	2100	2150
0 m	0d (100%)					
0,5 m				3d (99.2%)		
1 m			0d (100%)		51d (68.1%)	
3 m			17d (92.6%)			71d (58.2%)
5 m			46d (81.6%)			94d (51.2%)

T10		Ref	Ln	Hd		
ZSS			2100	2050	2100	2150
0 m	0d (100%)					
0,5 m				13d (88.3%)		
1 m			10d (95.9%)		60d (57.9%)	
3 m			30d (85.6%)			79d (51.2%)
5 m			67d (74.4%)			99d (45.0%)

T20		Ref	Ln	Hd		
ZSS			2100	2050	2100	2150
0 m	0d (100%)					
0,5 m				27d (82.1%)		
1 m			20d (88.3%)		69d (53.1%)	
3 m			42d (80.8%)			90d (45.5%)
5 m			79d (69.0%)			111d (39.1%)

Figuur 3-16 toont rechts het percentage van de watervraag dat over de gehele zomer kan worden geleverd. Hierbij is geen rekening gehouden met de verschillende categorieën van de verdringingsreeks, maar is gekeken naar het percentage van de totale watervraag dat in de zomer is voldaan. Ook hier is een duidelijk verschil zichtbaar tussen de klimaatscenario's Hd en Ln, waarbij de eerste categorie beduidend lagere leveringspercentages tot gevolg heeft, zelfs met 1 meter zeespiegelstijging (groene lijn). In het referentiescenario kan er in alle gevallen worden voldaan aan de regionale watervraag.



Figuur 3-16 Links: aantal dagen per zomer dat het minimale spuidebiet wordt teruggebracht naar 40 m³/s vanwege peilhandhaving, voor verschillende herhalingstijden. Rechts: het percentage van de watervraag in de zomer dat kan worden voldaan, voor verschillende herhalingstijden

3.5 Discussie en conclusie

Referentiescenario

Het referentiescenario toont nauwelijks dagen waarbij de chlorideconcentraties bij Andijk boven de 150 mg/l uitkomen, terwijl dit op basis van historische gegevens mogelijk wel te verwachten zou zijn. Belangrijk voor de beeldvorming is dat het referentiescenario numeriek is bepaald op basis van RACMO-uitvoer voor scenario Md rond zichtjaar 2050. De referentie is dus geen hindcast van de afgelopen 30 jaar waarin de opvallende jaren zoals 2018 en 2022 direct terug te zien zijn. Daarnaast zijn in de afgelopen 40 jaar maatregelen genomen waardoor de jaargemiddelde chloride concentratie op het IJsselmeer aanzienlijk is afgenomen, met name op het gebied van slimmer zoutgericht spuien. Een deel van deze maatregelen zijn in de sturingsregels van het bakjesmodel opgenomen. In de kalibratie (periode 2022) is te zien dat de chlorideconcentratie wel degelijk tot hogere pieken komt, waarmee kan worden uitgesloten dat de modelschematisatie de oorzaak van de lage concentraties in het referentiescenario is. In de kalibratieperiode echter, zakt het IJsselmeerpeil ook uit tot onder de -0,3 m NAP (september 2022), wat tot korten van de minimale spuivolumes leidt. Het korten op het spuien heeft een direct effect op de chlorideconcentraties in het IJsselmeer, deze lopen op.

In het referentiescenario zijn geen jaren waarin er gekort wordt op de spuivolumes, waardoor de chloridewaardes relatief laag blijven. Ter illustratie: de laagste maandgemiddelde IJsselaflow die binnen de kalibratie voorkomt in het jaar 2022 betreft 110 m³/s, de laagste maandgemiddelde IJsselaflow van alle 240 jaren in het referentiescenario betreft 119 m³/s. Het KNMI'23 referentiescenario is niet per se geoptimaliseerd op lage afvoeren ((Deltares, 2023), (KNMI, 2024)). Dit beperkt dus de representativiteit van de referentie voor deze specifieke toepassing. De vergelijking met historische reeksen, al ligt dit voor de hand, is daarmee niet eenduidig te maken. Naast de uitgangspunten gehanteerd in het referentiescenario, is de sturing in het model ook enigszins anders dan in werkelijkheid. Rekening houdend met dit verschil tussen het referentiescenario

en historische gegevens, fungeert het referentiescenario nog steeds als een goed uitgangsscenario om de verschillende scenario's mee te vergelijken. Hierbij dient de focus vooral te liggen op de relatieve verschillen tussen de scenario's, in plaats van de absolute vergelijking met historische gegevens.

Afleiden laterale fluxen

Voor de verschillende scenario's zijn, geen gemodelleerde of bemeaten laterale fluxen beschikbaar om als invoer te dienen. De regionale laterale watervraag/-toevoer en de afvoer van de IJssel zijn afgeleid op basis van relatief eenvoudige regressies. De resultaten van deze regressies zijn echter zodanig, dat er vertrouwen is in de gekozen afleiding. De hogere afvoerpieken vanuit de regio worden onderschat, maar de algemene tendens en de watervraagpieken zijn wel goed meegenomen in de afleiding. Toepassing van deze regressies betekent dat (in lijn met de beleidsneutrale uitgangspunten van KP ZSS) er geen trendmatige veranderingen door (bijvoorbeeld) ander landgebruik of klimaat-adaptatie in het regionaal watersysteem worden meegenomen. Er is dus niet met volledige zekerheid te zeggen dat de fluxen kloppen voor de toekomstige scenario's, maar de gehanteerde methode en de resultaten geven wel inzicht in de gevoeligheid van het IJsselmeergebied voor zeespiegelstijging en klimatologische rivier-afvoer-varianten.

Bij het analyseren van de resultaten is niet gekeken hoe mogelijke afwijkingen in de invoerfluxen met elkaar correleren en wat het gecombineerde resultaat op de uiteindelijke T20 tekorten is.

Markermeer

Zeespiegelstijging heeft slechts een beperkte invloed op de jaargemiddelde chlorideconcentratie op het Markermeer, mits er via het NZK in de toekomst geen grote veranderingen qua zoutvracht richting het Markermeer zullen plaatsvinden. Het Markermeer is, blijkt uit de kalibratie gevoelig voor de gekozen waarde voor de zoutvracht door de Oranjesluizen. De aanname dat deze term niet verder toeneemt als gevolg van zeespiegelstijging of klimaatverandering is in deze studie niet verder onderzocht.

De T20 jaargemiddelde chlorideconcentraties nemen binnen hetzelfde klimaatscenario slechts heel beperkt toe (Tabel 3-4). Als voorbeeld kunnen de 2100Ln scenario's genomen worden, waarbij het verschil in jaargemiddelde chlorideconcentratie tussen 1 en 5 meter zeespiegelstijging slechts 6mg/l betreft (149.4 t.o.v. 155.5 mg/l). De grotere hoeveelheden chloride die vanuit de Afsluitdijk het IJsselmeer op komen lijken niet ver genoeg te komen om van significante invloed te zijn op de jaargemiddelde chlorideconcentraties van het Markermeer.

Uit de resultaten blijkt ook dat verschillen tussen droge versus natte scenario's geen eenduidige impact op de chlorideconcentraties in het Markermeer heeft. Als voorbeeld kunnen de nattere 2100Ln scenario's vergeleken worden met de drogere 2150Hd scenario's, waarbij het verschil in T20 jaargemiddelde chlorideconcentratie bij gelijke zeespiegelstijging zelfs afneemt in het drogere 2150Hd scenario (151.3 t.o.v. 150.4mg/l bij 3 m zeespiegelstijging). Dit is een indicatie dat de invloed van verandering in verdamping en neerslag niet significant doorwerkt op de concentratie van het Markermeer gegeven hoe het beheer ervan in deze studie gemodelleerd is. Het directe (via open water) en indirecte (via laterale aanvoer en afvoer) effect van verdamping en neerslag blijkt secundair. Aangezien de inkomende zoutlasten vaste fluxen zijn, is het effect van neerslag en verdamping enkel van invloed op de watervolumebalans in het Markermeer. Het verdunningseffect van een kleiner volume in het meer speelt daarbij maar een kleine rol bij de resulterende chlorideconcentraties. Op het IJsselmeer hebben neerslag en verdamping, door de spui-interactie bij de Afsluitdijk, wel een link met de chloridebalans. Daarnaast blijkt de statistiek vooral bij grotere herhalingscycli enorm onzeker. Bij herhalingscycli voorbij T20 werken de natte scenario's zouter door dan de droge.

Er kan worden geconcludeerd dat er geen significante trend te vinden is ten aanzien van de jaargemiddelde chlorideconcentratie op het Markermeer. Noch zeespiegelstijging, noch

klimaatverandering lijken te resulteren in verzilting, wat betekent dat het Markermeer op zichzelf relatief robuuste zoetwaterbuffer is. De relatief hoge chlorideconcentratie in het Markermeer is het gevolg van de aannames die bij de Oranjesluizen zijn gedaan. Bij de kalibratie leverde dit realistische chloridewaarden op. Aangenomen is dat de zoutvracht die bij de Oranjesluizen binnen komt op het Markermeer onafhankelijk is van de mate van ZSS, omdat rondom verzilting van het NZK/ARK hetzelfde beleid rondom waterbeheer wordt gevoerd. De zoutvracht vanuit Zuiderzeeland speelt ook een rol in de hoge chlorideconcentraties. Omdat deze zoutvracht met zeespiegelstijging nauwelijks toeneemt, zijn de chloridewaarden op het meer relatief stabiel tussen de verschillende scenario's.

Het Markermeer opzichzelf is relatief robuust bij verschillende klimaatscenario's en maten van zeespiegelstijging, onder boven genoemde aannames. Dit biedt mogelijkheden voor het gedifferentieerd benutten van de twee zoetwaterbekkens van het Markermeer en het IJsselmeer binnen de toekomstige zoetwaterstrategie.

IJsselmeer

De Hovmöller diagrammen (Figuur 3-9 tot en met Figuur 3-11) geven een goed inzicht in de ruimtelijke en temporele dynamiek van zoutconcentraties in het IJsselmeer. Hieruit blijkt onder andere dat ook bij extremere scenario's het IJsselmeer in de winterperiode meestal weer goed kan 'ontladen'. In Figuur 3-11 is te zien dat zelfs na extreme verzilting de chlorideconcentraties in de winter weer afnemen, bijna altijd weer tot onder de 120 mg/l.

De scenarioanalyse laat zien dat de chlorideconcentraties in het IJsselmeergebied sterker reageren op zeespiegelstijging dan op variaties binnen de klimaatscenario's. Zeker voor de T20 statistiek is dit het geval. Als voorbeeld: de drempel van 150 mg/l bij Andijk (bakje XI) wordt bij 3 meter zeespiegelstijging in zowel het 2100Ln scenario als het 2150Hd scenario ongeveer 85 dagen overschreden. Bij een zeespiegelstijging van 5 m neemt het aantal dagen overschrijding in beide klimaatscenario's bijna gelijk toe tot een kleine 150 dagen. De chloridebelasting is primair afkomstig uit zoutindringing via de Afsluitdijk en de toegenomen regionale zoutvrachten als gevolg van ZSS. Belangrijk aandachtspunt is dat de verschillen als gevolg van verschillende klimaatscenario's bij kleinere herhalingstijden dan T20 soms verder uit elkaar lijken te liggen (zie bijvoorbeeld de paarse en bruine lijn in Figuur 3-14). Uit de jaargemiddelde en zomerhalfjaargemiddelde T20 chlorideconcentraties blijkt dat het klimaatscenario wel degelijk een significant effect heeft op de chloridedynamiek, maar het effect is aanzienlijk kleiner dan het effect van zeespiegelstijging. Het zoutgehalte van het IJsselmeer wordt pas van aanmerkelijke invloed op de waterbeschikbaarheid voorbij 1m ZSS. Bij 1m ZSS in combinatie met het Hd scenario zullen in 2100 de zomerconcentraties eens in de 20 jaar langer dan ca. een maand boven 150 mg/L zijn en naderen de T20 jaargemiddelden deze referentiewaarde binnen de onzekerheidsmarges die onze methode met zich meebrengt. Wel legt de verziltings-bestrijding een voortdurende claim op de waterbalans.

Voor de waterbalans van de zoetwaterbuffer van het IJsselmeer, met als belangrijke indicator het aantal dagen per zomer dat het spuidebiet wordt beperkt omdat het peil te ver uitzakt, geldt dat zowel het klimaatscenario als de zeespiegelstijging bepalend zijn. In droge scenario's wordt vaker gekort op spuivolumes en is er een groter tekort in de levering van de watervraag. Omdat er in het model niet wordt gestuurd op chlorideconcentraties werkt zeespiegelstijging enkel door in deze waterbalansresultaten via de extra watervraag voor doorspoeling om verzilting in de regio tegen te gaan. Vergelijking van het ZSS1_2100Ln scenario met respectievelijk de ZSS1_2100Hd en het ZSS5_2100Ln scenario's geeft een goed beeld van de relatieve impact van zeespiegelstijging en klimaatverandering. Beide laatstgenoemde scenario's resulteren namelijk in dezelfde orde van grootte toename van het aantal dagen met een beperkt spuidebiet (toename van 20 dagen tot respectievelijk 69 en 79 dagen). De extra ZSS van 1 tot 5 m heeft dus dezelfde orde-grootte impact als het effect van het 2100Ln klimaat t.o.v. het 2100Hd klimaat. Hierbij dient in het achterhoofd te worden gehouden dat deze studie een sterk invloed aantoonde van de gebruikte randvoorwaarden op de chloridestatistiek. Doordat de ondergrens in het peilbeheer van -0,30 m NAP directe gevolgen heeft voor het spuivolume, is de afhankelijkheid tussen de randvoorwaarden voor

de waterbalans en de chloridestatistieken groot. Een kleine verandering in de randvoorwaarden, waarbij het minimale peil vaker wordt bereikt, kan grote gevolgen hebben voor de resulterende statistiek. Een vergelijking tussen het effect van zeespiegelstijging en het effect van het klimaatscenario kan beter gemaakt worden, wanneer deze bovenstaand beschreven relatie met bijbehorende onzekerheden beter in beeld wordt gebracht.

De resultaten laten zien dat een tijdelijke overschrijding van 150 mg/l in bakje XI nabij Andijk binnen enkele scenario's (ZSS3_2100Ln en ZSS5_2150Hd bijv.) langer voorkomt dan het aantal dagen waar gekort wordt op de watervraag (via spui/gemaaldebit Afsluitdijk en vanuit de regio). Dit effect is zichtbaar vanaf 1 m ZSS; bij 1m ZSS en hoger treedt verzilting structureel eerder op dan watertekorten. Dit is bijvoorbeeld het geval in het ZSS3m_2100Ln scenario, waar de T20 chlorideconcentratie 86 dagen hoger dan 150 mg/l is, maar slechts 42 dagen een korting op het spuidebiet van kracht is. Onder de 1m ZSS komt het juist vaker voor dat er langer op de watervraag gekort moet worden dan dat er tijdelijke overschrijdingen van 150 mg/l voorkomen in bakje XI nabij Andijk.

De combinatie van deze dynamiek laat zien dat het systeem kwetsbaarder lijkt voor verzilting dan voor verdroging bij toekomstige scenario's: zoutgehalten overschrijden eerder kritieke waarden dan dat het peil zakt onder operationele grenzen bij scenario's met >1 m ZSS. Op de kortere termijn (met lagere mate van ZSS) is het omgekeerde het geval; daar lijkt verdroging en peiluitzakking een groter probleem dan verzilting. Tegelijkertijd behoudt het systeem deels zijn veerkracht: na een extreme verzilting kan het systeem in een winterperiode meestal weer volledig 'ontladen'. Alleen in extreme jaren (rond T20) is dit bij sommige scenario's niet het geval.

Hierbij dient opgemerkt te worden dat de indicatoren voor verzilting en watertekort verschillen van aard. Bij verzilting ligt de formele indicator voor drinkwatervoorziening op de jaargemiddelde chlorideconcentratie van 150 mg/l. Deze grens wordt enkel in scenario's met 5 m ZSS bereikt. Hoewel het aantal dagen boven de 150 mg/l bij 1-3 m ZSS ook al vaker voorkomt dan het aantal dagen met een watertekort, is deze indicator formeel gezien minder relevant. Bij dreigend watertekort (en daadwerkelijk korten op de watervraag) zijn er echter wel directe problemen voorzien, waarbij bepaalde sectoren, afhankelijk van hun plek in de verdringingsreeks) gekort worden. De twee indicatoren zijn daarmee niet op een gelijke manier te interpreteren. Dit betekent dat ook bij hogere mate van ZSS, het watertekort een nijpender probleem vormt dan de verzilting. Pas bij scenario's met 5 m ZSS komt de formele drinkwaternorm (jaargemiddeld < 150mg/l) in het gedrang. De overige indicatoren die gehanteerd worden (aantal dagen >150 mg/l) geven echter wel inzicht in het systeemgedrag en wat er verwacht kan worden bij verschillende toekomstige scenario's. Ondanks dat deze formeel een mindere status hebben, zeggen deze indicatoren iets over de mate van aanpassingen die nodig zijn betreffende chloridenormen voor drinkwater en landbouw op kleinere schaal.



4

Maatregelenanalyse

4 Maatregelenanalyse

In dit hoofdstuk wordt beschreven welke maatregelen er zijn doorgerekend met het aangepaste bakjesmodel van het IJsselmeergebied. Hierbij wordt ingegaan op hoe de maatregelen zijn geïmplementeerd en welke varianten op de maatregelen zijn doorgerekend. Daarna is een analyse uitgevoerd op de modelresultaten. De effecten van de maatregelen zijn beschouwd ten opzichte van het nul-alternatief en ten opzichte van eventuele varianten binnen de maatregelen. De vergelijking is uitgevoerd op basis van de standaard indicatoren; chloride, waterpeil en watergebruik/watertekort.

4.1 Maatregelen en methodiek

Maatregelen

Tijdens de uitvoering van deze studie is op basis van de vraagspecificatie en meerdere overleggen gekomen tot een set van vier soorten maatregelen die afzonderlijk beschouwd zijn, om een breed maar realistisch beeld te krijgen van de effecten van deze maatregelen. Onderstaand staat per maatregel uitgewerkt hoe deze is toegepast en welke varianten er per maatregel zijn geanalyseerd.

1. Bronmaatregelen Afsluitdijk

Door de binnenkomende zoutflux te reduceren, kan het zoetwatersysteem langer gewaarborgd blijven. Er is daarom gekeken naar het effect van zogenaamde bronmaatregelen bij de Afsluitdijk.

Deze zijn in het model opgelegd bij de bron van het zout (lek- en schutverliezen) als een procentuele reductie van de totale hoeveelheid zout (kg/s) die het model binnenkomt. Hierbij zijn drie varianten doorgerekend: 33%, 66% en 100% reductie (t.o.v. de som zonder maatregelen, het nul-alternatief) op de bruto inkomende zoutvracht door de Afsluitdijk door de spui- en schutcomplexen bij Den Oever en Kornwerderzand (totaal van de termen 4 en 6 in Figuur 2-2). Bij deze varianten is geen expliciet onderscheid gemaakt in maatregelen voor lekverliezen of schutverliezen, maar wordt enkel gekeken naar de totale zoutlast die via de spui- en schutcomplexen binnenkomt. De netto doorvoer naar de rest van het meer en de afvoertermen (5 en 9 in Figuur 2-2) zijn gegeven deze aanpassingen volgens de methode beschreven in Hoofdstuk 2 door het model zelf berekend. Er is in de maatregel-berekeningen geen aanpassing van de volumedebieten (1, 2 en 3 in Figuur 2-2) doorgevoerd. In werkelijkheid valt te verwachten dat bepaalde zoutlekbeperkende maatregelen ook invloed hebben op de (netto) lek- en schutdebieten, maar er zijn diverse manieren mogelijk om eenzelfde vrachtreductie te bewerkstelligen, met elk een ander effect op de volumefluxen (Deltares is parallel aan deze studie in 2025 hier mee bezig). De koppeling tussen de vrachtreductie en de volumes wordt buiten de voorliggende studie gemaakt.

2. Omgaan met hogere chloride grenswaarden

Het omgaan met hogere chloride grenswaarden betreft een maatregel welke kijkt naar het effect van het (tijdelijk) accepteren van een hogere chloridewaarde en/of een langere overschrijding in de tijd van een bepaalde grenswaarde. Het model is niet chloride-gestuurd, en het omgaan met hogere chloridegehalten behoeft daarom geen extra berekeningen. Het hanteren van hogere grenswaarden is in de nabewerking van de originele scenario-berekeningen meegenomen. Er is uiteindelijk gekeken naar het effect van het verhogen van de grenswaarde van 150 mg/l naar 175 en 200 mg/l Cl. Deze waarde is overeengekomen op basis van resultaten van de nul-variant (zie paragraaf 3.4).

3. Maatregelen om waterbuffer te vergroten

Het vergroten van de waterbuffer binnen het IJsselmeer wordt beoogd om beter droge zomers op te kunnen vangen. Door het vergroten van de buffer en/of het verlagen van de watervraag, kan langer worden ingeteerd op het beschikbare zoete water voordat gekort moet worden op de watervraag en/of niet meer voldaan kan worden aan het peilbeheer. Er zijn verschillende maatregelen mogelijk om de waterbuffer op het IJsselmeer te vergroten. Drie daarvan zijn beschouwd en zijn hieronder verder toegelicht.

Extra aanvoer via de nieuwe Amsterdam-Rijnkanaal-route (ARK-route)

Extra aanvoer vanuit de nieuwe ARK-route wordt meegenomen als een debiet van 50 m³/s in het voorjaar, tussen 16 maart en 21 juni¹³. Dit debiet is conform de middenvariant binnen het KZH-programma (Hydrologic, 2023). Deze maatregel wordt jaarlijks meegenomen in de 240-jarige reeksen. Het chloridegehalte van het extra water dat via het ARK het Markermeer bereikt wordt gelijk verondersteld aan de chlorideconcentratie op de IJssel.

Reductie regionale watervraag

In deze maatregel wordt niet zo zeer ingezet op het vergroten van de waterbuffer, maar het permanent verlagen van de watervraag ten opzichte van de watervraag van het reguliere scenario. Hiervoor wordt de totale regionale watervraag jaarrond 35% gereduceerd (betreffende dus de doorspoeling, beregening en peilhandhaving). De mate van reductie op de regionale watervraag is gebaseerd op (Hydrologic, 2023).

Vergroten bufferschijf (peilbeheer)

De bovenkant van het streefpeil in de zomerperiode wordt verhoogd van -0,20 m naar +0,1 m NAP. Deze grotere peilmarge wordt gehanteerd in de periode van 16 april tot 30 september. De sturing in het model blijft gelijk, waarbij -0,3 m NAP als ondergrens gehanteerd wordt, waaronder wordt gekort op spuivolume en de regionale watervraag.

4. Internationale afspraken om het zoutgehalte in de Rijn verder te verlagen

De huidige afspraak in het Rijnzoutverdrag stelt dat de chlorideconcentratie bij Lobith niet boven de 200 mg/l mag komen. Deze grenswaarde voor de achtergrondconcentratie van de Rijn kan verlaagd worden door verschillende internationale afspraken. Het effect van deze maatregel op de chlorideconcentratie van de Rijn zijn naar verwachting echter beperkt, omdat de natuurlijke achtergrondconcentratie in de scenario's niet vaak boven deze waarde uitkomt. Ter verificatie zijn alle scenario's doorgerekend waarbij de chlorideconcentratie is gelimiteerd op 150 mg/l.

Scenario's

Alle scenario's zijn doorgerekend per maatregel. Getracht is om bij de analyse de scenario's te selecteren die de range van gemodelleerde dynamiek weergeven, om zo inzicht te verkrijgen over het volle bereik van scenario's en maatregelen.

Aantal combinaties maatregelen

Samenvattend zijn binnen het KP ZSS drie verschillende typen maatregelen gemodelleerd. Acceptatie van een hogere grenswaarde en/of het aantal dagen overschrijding is als vierde type maatregel beschouwd op basis van postprocessing. In onderstaande tabel staat een

¹³ Er wordt verondersteld dat er vanaf 21 juni (in de zomer) geen water meer vanuit het ARK beschikbaar is voor het IJsselmeergebied. In deze periode zal de watervraag in West-Nederland hoog zijn en kan er door beperking in de hydraulische capaciteit van de aanvoerroute niet meer water richting het IJsselmeergebied geleverd worden.

overzicht van het aantal varianten dat per gemodelleerde maatregel is aangehouden. In totaal zijn er dus zeven verschillende varianten doorgerekend. Er zijn geen maatregelen gecombineerd, alleen het effect van elke maatregel afzonderlijk is meegenomen.

Alle varianten binnen elke maatregel zijn voor hetzelfde klimaatscenario combinaties als het nul-alternatief doorgerekend.

Tabel 4-1 Overzicht van de doorgerekende varianten binnen de maatregelen

Maatregel			
Bronmaatregelen	33% reductie	66% reductie	100% reductie
Acceptatie hogere grenswaarde*	175mg/l	200 mg/l	
Waterbuffer	ARK-route	Peilopzet	35% reductie regionaal
Zoutgehalte Rijn	150 mg/l limiet		

*Niet doorgerekend, enkel beschouwd in de post-processing.

4.2 Resultaten

Per maatregel worden de effecten geanalyseerd door middel van een vergelijking met het nul-alternatief. De indicatoren chloride, waterpeil en watergebruik/watertekort worden hierbij net als in de beschrijving van het nul-alternatief gehanteerd. Daartoe zijn de volgende aspecten uit de modelresultaten herleid:

- Het aantal dagen per zomerhalfjaar dat de chlorideconcentratie boven de 150 mg/l ligt, gespecificeerd voor de locatie Andijk;
- De jaargemiddelde chlorideconcentraties bij Andijk en het Markermeer, ten behoeve van de drinkwatergrens;
- De gemiddelde chlorideconcentraties bij bakje XI en het Markermeer over het groeiseizoen, met oog op overige zoetwaterfuncties;
- Het aantal dagen per zomerhalfjaar dat er maar 40 m³/s gespuid kan worden in verband met peilbeheer;
- Het percentage van de totale watervraag tijdens het zomerhalfjaar waarin niet voorzien kan worden.

Het zomerhalfjaar/groeiseizoen loopt in deze analyse van 16 april tot 1 oktober.

Het wisselt per maatregel of bovenstaande aspecten relevant zijn. Waar dit niet het geval is, is dit zodanig benoemd en zijn de figuren niet getoond.

4.2.1 Bronmaatregelen Afsluitdijk

Figuur 4-1 toont het **aantal dagen dat een chlorideconcentratie van meer dan 150 mg/l** voorkomt bij Andijk, als functie van de herhalingstijd, voor het nul-alternatief en alle drie varianten binnen de beschouwde maatregel (33, 66 en 100% reductie t.o.v. het nul-alternatief van de inkomende zoutflux door de Afsluitdijk). De herhalingstijd van eens per 20 jaar is weergegeven met de verticale streeplijn.

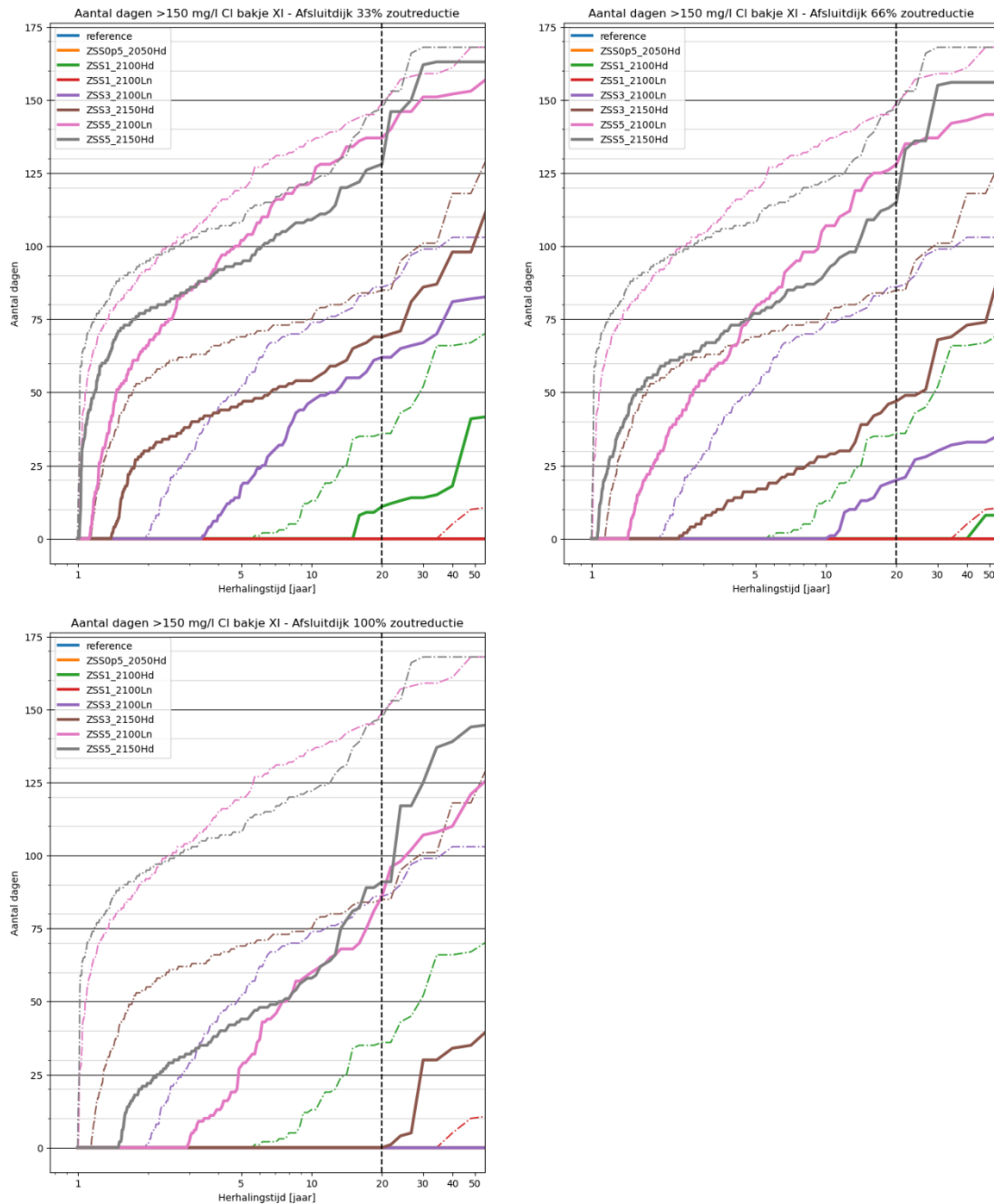
De impact op deze indicator is significant. Een reductie van 33% levert al een afname op van 10 tot 25 dagen waarbij een chlorideconcentratie van meer dan 150 mg/l optreedt eens per 20 jaar. Bij een reductie van 66% loopt deze afname op tot 20 tot 60 dagen en bij 100% reductie zelfs 60 tot 80 dagen. Bij deze laatste maatregel komt bij alle scenario's behalve de 5 m ZSS-scenario's, het chloridegehalte niet boven de 150 mg/l bij een herhalingstijd van 20 jaar. Daarnaast is het effect ook te analyseren door de verschuiving van de grafieken op de horizontale as. Hiervoor is gekeken naar de herhalingstijd van de conditie waarbij sprake is van een overschrijding van 30 dagen per zomerhalfjaar. Enkel de scenario's waarbij de overschrijding >30 dagen was bij een <T20 conditie zijn geanalyseerd. De resultaten zijn opgenomen in Tabel 4-2. Voor dit criterium is het effect fors bij de minder extreme scenario's. Bij ZSS1_2100Hd neemt de herhalingstijd met een factor 3 toe bij slechts een 33% reductie. ZSS3_2100Ln toont een toename van de herhalingstijd tot T7 (een factor 2,5) bij 33% reductie, maar de herhalingstijd springt naar ca. T30 (factor 10) bij een reductie van

66%. ZSS3_2150Hd toont zich ook relatief gevoelig voor de maatregel, maar hierbij is wel een reductie nodig van 100% om boven de T20 uit te komen.

Bij de extreme scenario's (de ZSS5 scenario's) is 100% reductie benodigd om een significant effect waar te nemen en dan nog wordt geen herhalingsjijd van >T20 verkregen bij dit criterium. Een combinatie met andere maatregelen lijkt daar noodzakelijk. Het effect is daarmee het grootst bij de scenario's met 1 en 3 m ZSS, waar de 33% en 66% reductie maatregelen de grootste meerwaarde bieden.

Tabel 4-2 Effect van de bronmaatregelen uitgedrukt in de verschuiving van de conditie waarbij sprake is van 30 dagen overschrijding, op de horizontale as (herhalingsjijd).

Scenario	Nul-alternatief	33% reductie	66% reductie	100% reductie
ZSS1_2100Hd	T15	T45	>T50	>T50
ZSS3_2100Ln	T3	T7	T30	>T50
ZSS3_2150Hd	T1	T2	T13	T30
ZSS5_2100Ln	T1	T1	T2	T6
ZSS5_2150Hd	T1	T1	T1	T3



Figuur 4-1 Aantal dagen dat een chlorideconcentratie van meer dan 150 mg/l voorkomt bij Andijk, als functie van de herhalingstijd. Linksboven: 33% reductie, rechtsboven: 66% reductie en linksonder: 100% reductie in bruto zoutvracht door de spui-gemaal-schut-complexen van de Afsluitdijk. De gestippelde grafieken geven de nul-variant weer.

Figuur 4-2 toont de herhalingstijd als functie van de **jaargemiddelde chlorideconcentratie nabij Andijk**, voor het nul-alternatief en alle drie varianten binnen de beschouwde maatregel. De herhalingstijd van eens per 20 jaar is weergegeven met de streeplijn. Figuur 4-3 toont de herhalingstijd als functie van de **groei-eisgezondengemiddelde chlorideconcentratie nabij Andijk**.

De impact op de jaargemiddelde chlorideconcentratie is ook duidelijk zichtbaar. Als gekeken wordt naar de jaargemiddelde drinkwaternorm (feitelijk een inspanningsverplichting) van 150 mg/l met een herhalingstijd van 20 jaar, voldoen alleen de 5 m ZSS-scenario's niet bij het nul-alternatief. Bij een reductie van 66% wordt ook bij deze scenario's aan de inspanningsverplichting voldaan. De jaargemiddelde chlorideconcentratie is bij het

ZSS5_2150Hd scenario afgenomen van 198 mg/l tot circa 153 mg/l, een afname van 23%. Bij een 100% reductie van de inkomende zoutflux ontstaat een marge voor deze indicator bij een herhalingsjijd van 20 jaar. Enkel het ZSS5_2150Hd laat nog een overschrijding zien, vanaf een herhalingsjijd van 50 jaar.

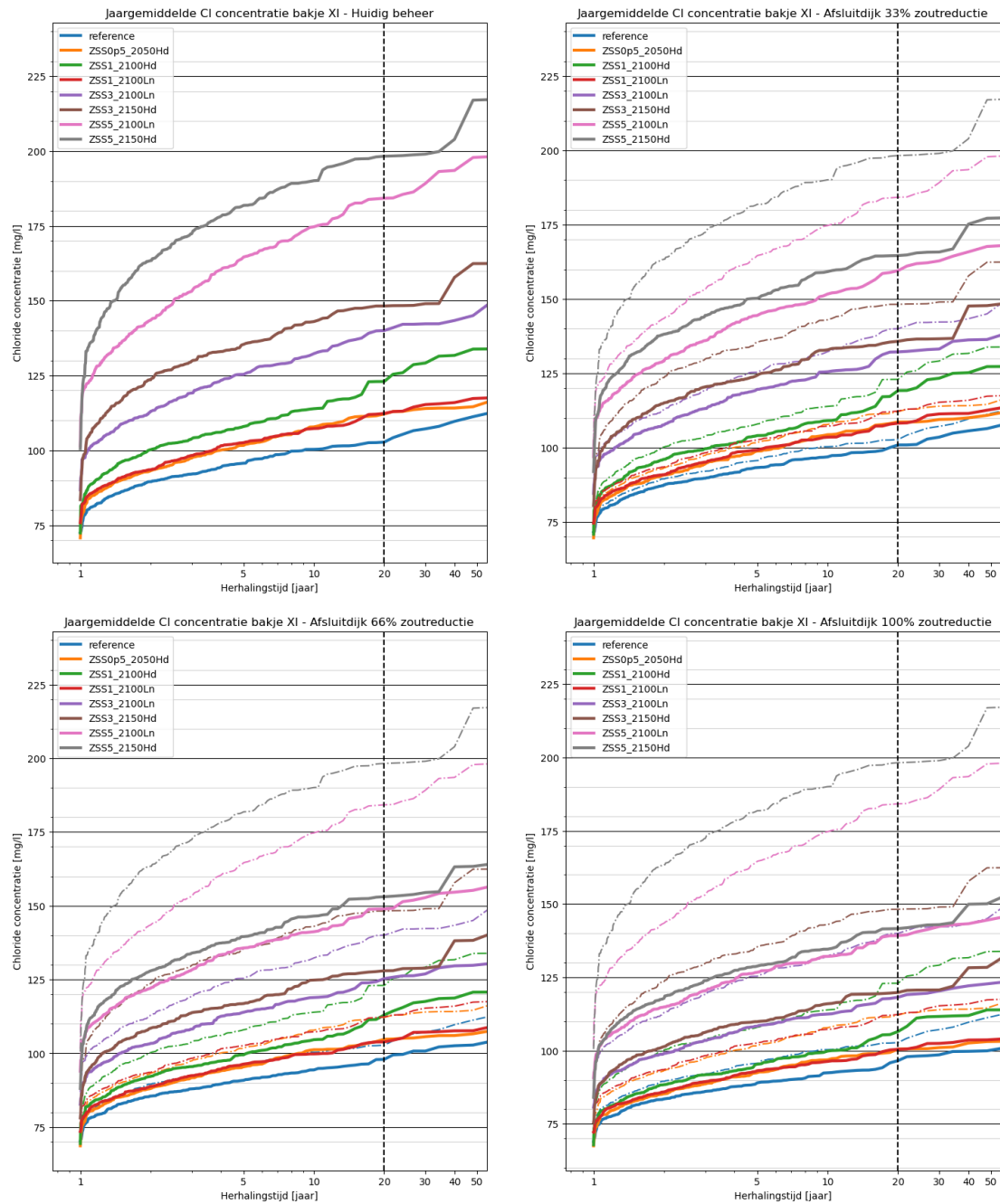
De chlorideconcentraties gemiddeld over het groeiseizoen (16 april - 30 september) vertonen een beeld vergelijkbaar met de jaargemiddelde concentraties. De maatregel heeft een groter effect op de scenario's met hoge mate van zeespiegelstijging. Bij de hoogste zeespiegelstijging (5 m) is een 100% reductie nog niet voldoende; de grens van 150 mg/l wordt in deze scenario's nog steeds geslecht met een herhalingsjijd die lager is dan T20.

Figuur 4-2 is ook getalsmatig geanalyseerd in Tabel 4-3. Hierin is de jaargemiddelde chlorideconcentratie bij Andijk getoond voor alle scenario's, ter hoogte van de T20 conditie. Per maatregelvariant is tussen haakjes weergegeven wat de percentuele afname is van de chloridewaarde ten opzichte van het nul-alternatief. Bij alle varianten is ook hier de oplopende impact te zien bij de extreme scenario's. Er kan ook afgeleid worden dat het effect dat verkregen wordt met de 33% reductie, gemiddeld genomen verdubbeld kan worden met de 100% reductie. Het effect van 66% reductie zit daar ongeveer tussenin. De relatieve effectiviteit van een toename in reductie, neemt dus af (een verdriedubbeling van de reductie resulteert in een verdubbeling van de impact).

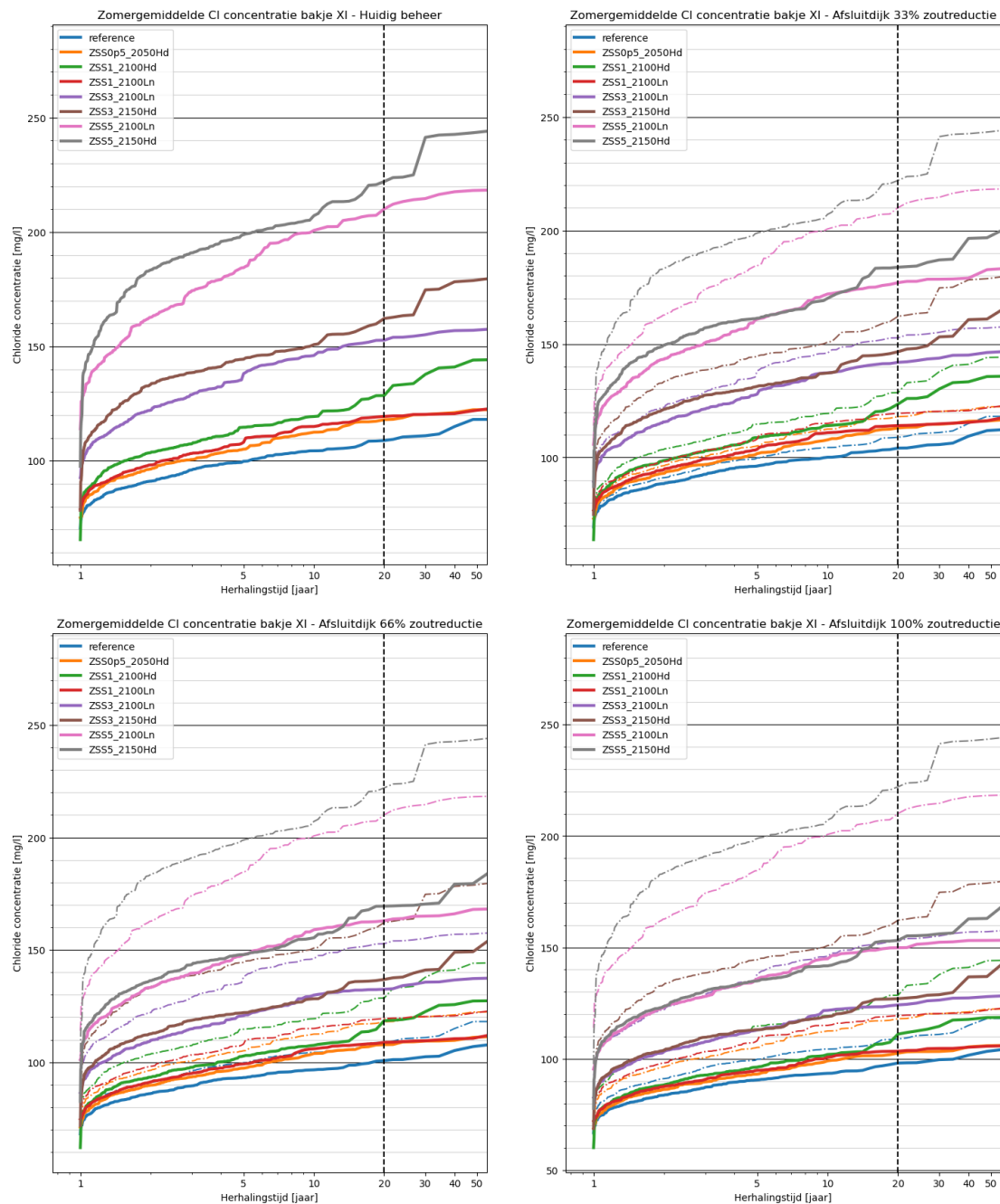
Tabel 4-3 Jaargemiddelde chlorideconcentratie (mg/l) bij Andijk bij een T20 conditie voor verschillende maten van reductie van de bruto zoutvracht door de spui-gemaal-schutcomplexen van de Afsluitdijk.

Scenario	Nul-alternatief	33% reductie	66% reductie	100% reductie
Referentie	102	100 (-2%)	97 (-5%)	96 (-6%)
ZSS0p5_2050Hd	112	108 (-4%)	104 (-7%)	100 (-11%)
ZSS1_2100Ln	112	108 (-4%)	103 (-7%)	100 (-11%)
ZSS1_2100Hd	123	119 (-4%)	113 (-8%)	106 (-14%)
ZSS3_2100Ln	140	132 (-6%)	125 (-11%)	118 (-16%)
ZSS3_2150Hd	148	135 (-9%)	128 (-14%)	119 (-20%)
ZSS5_2100Ln	184	159 (-13%)	149 (-19%)	139 (-25%)
ZSS5_2150Hd	198	164 (-17%)	153 (-23%)	141 (-29%)

Ondanks 100% reductie van de inkomende zoutflux door de schut- en spuisluizen bij de Afsluitdijk treedt in de scenario's vanaf 1 m ZSS nog wel een toename op van het jaargemiddelde chloridegehalte en het aantal dagen overschrijding van 150 mg/l ten opzichte van het referentie scenario (huidig klimaat en 0 m ZSS). Zeespiegelstijging en klimaatverandering leiden immers ook tot een grotere zoutvracht op het IJsselmeer door interne verzilting in de afwaterende polders, verhoogde chloride in het IJsselwater en meer verdamping.



Figuur 4-2 Jaargemiddelde chlorideconcentratie bij bakje XI (nabij Andijk), als functie van de herhalingstijd. Linksboven: nul-alternatief, rechtsboven: 33% reductie, linksonder: 66% reductie en rechtsonder: 100% reductie. De streepgrafieken geven de nul-variant weer.



Figuur 4-3 Gemiddelde chlorideconcentratie over het groeiseizoen (16 april - 30 september) in bakje XI (nabij Andijk), als functie van de herhalingstijd. Linksboven: nul-alternatief, rechtsboven: 33% reductie, linksonder: 66% reductie en rechtsonder: 100% reductie. De streepgrafieken geven de nul-variant weer.

De impact van deze maatregel op de **jaargemiddelde chlorideconcentratie op het Markermeer** lijkt relatief beperkt. Echter werd voor deze indicator bij alle scenario's al aan de inspanningsverplichting voldaan bij het nul-alternatief bij een herhalingstijd van 20 jaar. Met deze maatregel kan de overschrijdingsfrequentie nog wel verder worden teruggebracht.

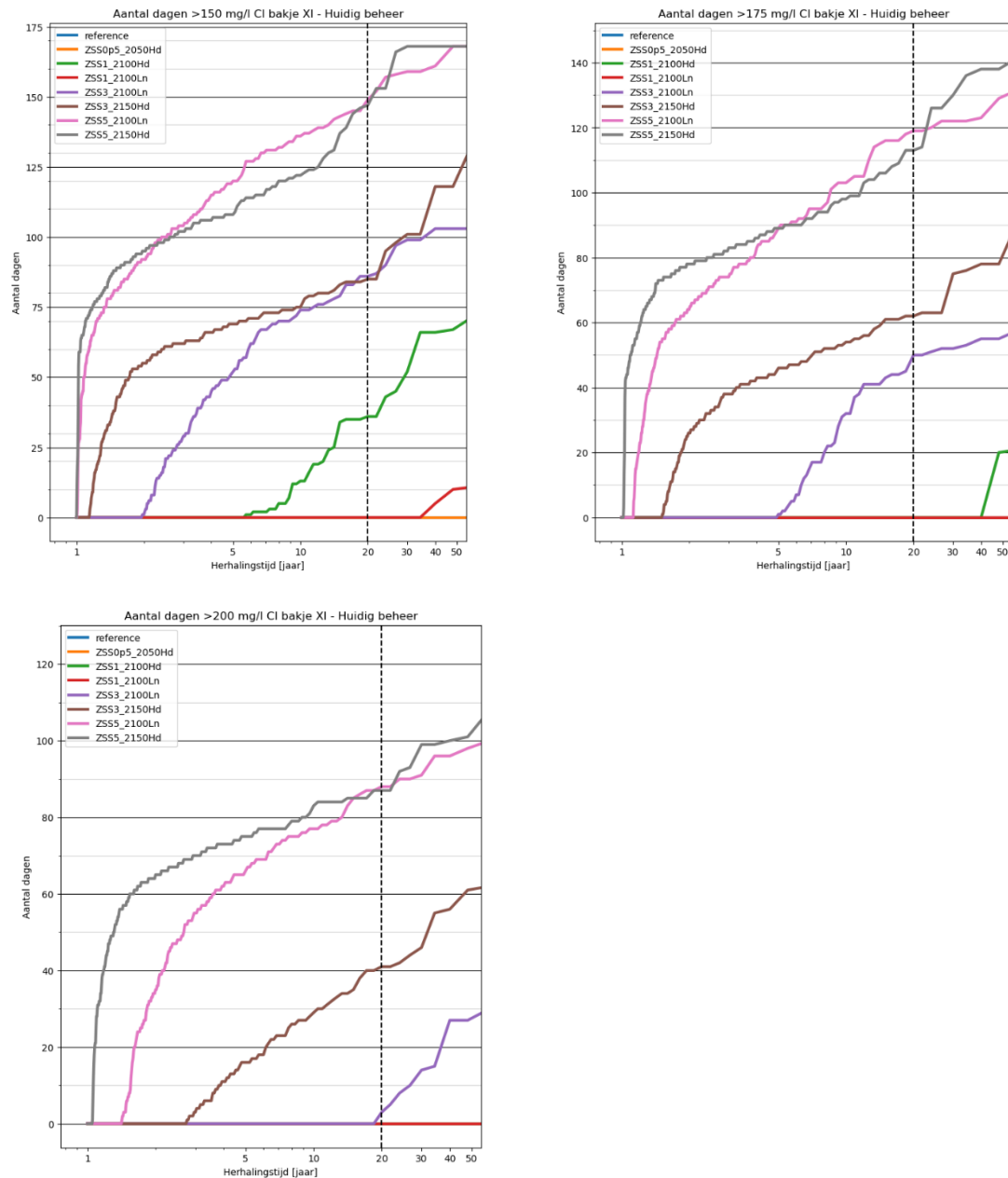
De bronmaatregelen zijn zonder aanpassing van de volumefluxen doorgevoerd in het bakjesmodel. In de praktijk zal de reductie van de chloridelast gepaard gaan met een aanpassing van de volumefluxen. Enerzijds zal bijvoorbeeld het zoetspoelen van de schutkolken en voorhavens een extra zeewaarts debiet over de schutsluis vragen, anderzijds kunnen bepaalde uitvoeringen (zoals dichten van spuisluisen en al het water en zout afpompen) leiden tot een reductie van de spuibehefte. De resultante van eventuele extra

inzet en eventuele besparing van water is afhankelijk van diverse factoren en afwegingen ten aanzien van de bronmaatregelen. Deze factoren en overwegingen zijn apart beschouwd buiten de voorliggende studie in (Weiler, et al., 2025). De koppeling tussen beide richting de waterbalans wordt binnen KP ZSS buiten de scope van dit rapport tot stand gebracht.

4.2.2 Omgaan met hogere grenswaarden

De maatregel waarbij de grenswaarde voor de chlorideconcentratie wordt verhoogd van 150 mg/l naar 200 mg/l, is doorgevoerd in de naverwerking van het nul-alternatief. De maatregel heeft een vrij objectief te beschouwen effect. Als gekeken wordt naar het aantal dagen per jaar dat een grenswaarde van 150 mg/l, 175 mg/l dan wel 200 mg/l wordt overschreden per scenario (Figuur 4-4), is het volgende te concluderen:

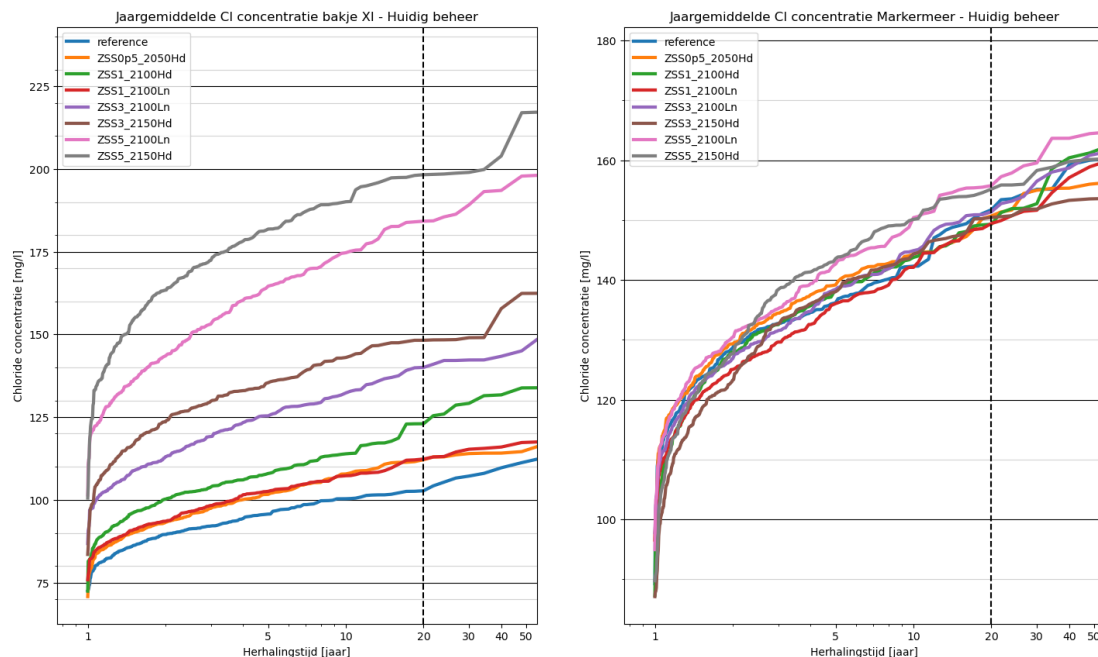
- Waar de grenswaarde van 150 mg/l nog overschreden wordt met een herhalingsstijd van minder dan 20 jaar bij de scenario's ZSS1_2100Hd en ZSS3_2100Ln, verschuift de overschrijdingsfrequentie naar >20 jaar als gewerkt wordt met een grenswaarde van 175 mg/l voor ZSS1_2100Hd, en naar >20 jaar met een grenswaarde van 200 mg/l voor ZSS3_2100Ln.
- Voor de resterende drie scenario's waar de overschrijdingsfrequentie nog wel minder dan 20 jaar is, te weten: ZSS3_2150Hd, ZSS5_2100Ln en ZSS5_2150Hd, is het aantal dagen wel afgenomen van 80, 145 en 135 (bij 150 mg/l), naar ca. 62, 119 en 113 (bij 175 mg/l) naar circa 41, 87 en 87 (bij 200 mg/l), respectievelijk.



Figuur 4-4 Aantal dagen dat een bepaalde chlorideconcentratie overschreden wordt in bakje XI (nabij Andijk), als functie van de herhalingstijd. Linksboven: 150 mg/l, rechtsboven: 175 mg/l, linksonder: 200 mg/l

Als op eenzelfde wijze wordt gekeken naar de jaargemiddelde concentraties bij Andijk en in het Markermeer (Figuur 4-5), kan het volgende worden geconcludeerd:

- Bij een grenswaarde van 150 mg/l jaargemiddeld, is waarneembaar dat beide scenario's met ZSS5 deze grenswaarde vaker overschrijden dan eens per 20 jaar. Met een grenswaarde van 200 mg/l daalt de overschrijdingsfrequentie ook bij deze scenario's naar een herhalingstijd van meer dan 20 jaar.
- Voor het Markermeer overschrijden bijna alle scenario's (met uitzondering van ZSS5) de 150 mg/l grens rond de herhalingstijd van 20 jaar. De grenswaarde van 175 mg/l of 200 mg/l wordt in het Markermeer niet bereikt (onder een herhalingstijd van 50 jaar)



Figuur 4-5 Jaargemiddelde chlorideconcentratie, als functie van de herhalingstijd. Links: bakje XI (nabij Andijk), rechts: Markermeer.

Aangezien het bakjesmodel niet chloride gestuurd is, is er geen effect van deze maatregel op het waterpeil en de watervraag/watertekort. Deze figuren zijn daarom niet opgenomen in de rapportage. In de praktijk zal er wel degelijk een effect zijn op het waterpeil en de watervraag/watertekort. Gegeven de hogere grenswaarde kan relatief later worden teruggevallen op een minimaal spuidebiet van 70 m³/s bij droogte en 40 m³/s bij (dreigend) watertekort of tot lagere effectieve debietwaarden (acceptatie van meer doorvoer van zout uit de erosiekuilen naar het meer door kleiner of laagfrequenter te spuien). Hierdoor zal meer water beschikbaar komen (blijven) om te voorzien in de regionale waterbehoefte. Dit effect is helaas niet te kwantificeren met het bakjesmodel in combinatie met de huidige afregeling van de zoutfluxrelaties voor Den Oever en Kornwerderzand.

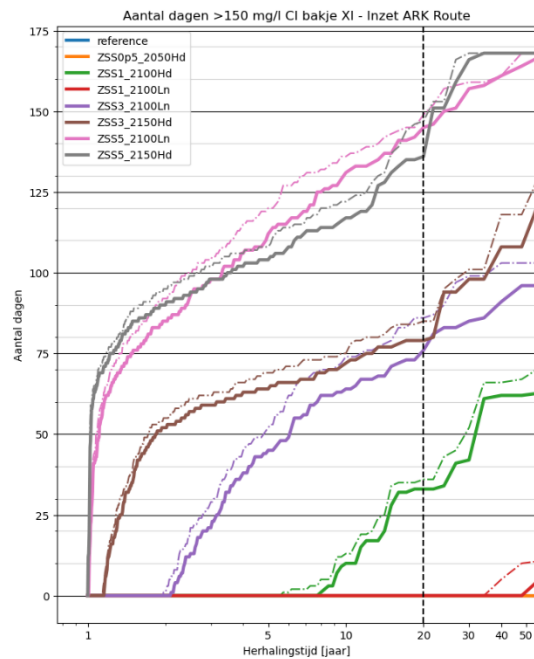
4.2.3 Vergroten waterbuffer IJsselmeer – inzet ARK-route

Het vergroten van de waterbuffer wordt bij deze maatregel behaald door het toevoeren van zoetwater via de ARK-route. 50 m³/s wordt in het voorjaar (16 maart tot 21 juni, een periode waarin extra zoetwater nog weinig directe meerwaarde heeft voor de zoutbalans) vanuit het ARK via het Markermeer naar het IJsselmeer geleid, waar het beschikbaar komt voor de doorspoelbehoefte, de watervraag en in zekere zin ook het peilbeheer. De verwachting is daarmee ook dat de maatregel een positief effect zal hebben op alle indicatoren.

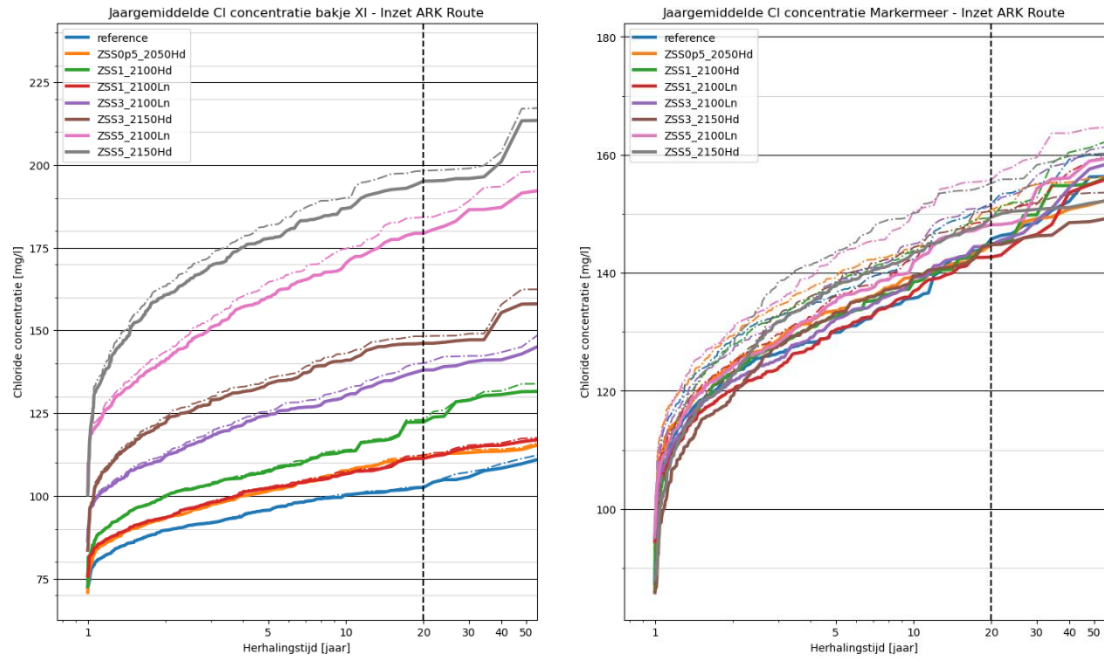
Figuur 4-6 toont het effect van het inzetten van de ARK-route op het aantal dagen dat de chloridewaarde bij Andijk de 150 mg/l overschrijdt. De maatregel heeft een positieve impact op beide indicatoren. Bij de overschrijding van de 150 mg/l grens is het effect positief bij alle scenario's waar een overschrijding plaatsvindt. De winst is echter beperkt tot een afname van een dag of 5. Figuur 4-7 en Figuur 4-8 laten respectievelijk de jaargemiddelde chloridewaarde en de groeiseizoengemiddelde chloridewaarde zien in bakje XI (nabij Andijk) en in het Markermeer. In beide gevallen heeft de maatregel hier een positief effect. Bij Andijk is het beter waarneembaar bij de extreme scenario's, omdat het zoete water hier juist in het voorjaar (de periode van de inzet van deze maatregel) al vaak nodig is om te voldoen aan de spuibehoefte en daarmee de efficiënte afvoer van zout. Op het Markermeer is het effect te zien bij alle scenario's omdat het zoete water hier mengt over het gehele Markermeer en zo de gemiddelde chloridewaarde omlaag brengt. Tot slot is in Figuur 4-9 het

aantal dagen per jaar getoond dat niet voldaan kan worden aan het minimale spuidebiet van 70 m³/s (links) en het percentage van de watervraag waar (minimaal) aan voldaan kan worden (rechts). Ook hier heeft de maatregelen een positief effect welke toeneemt bij de extreme scenario's.

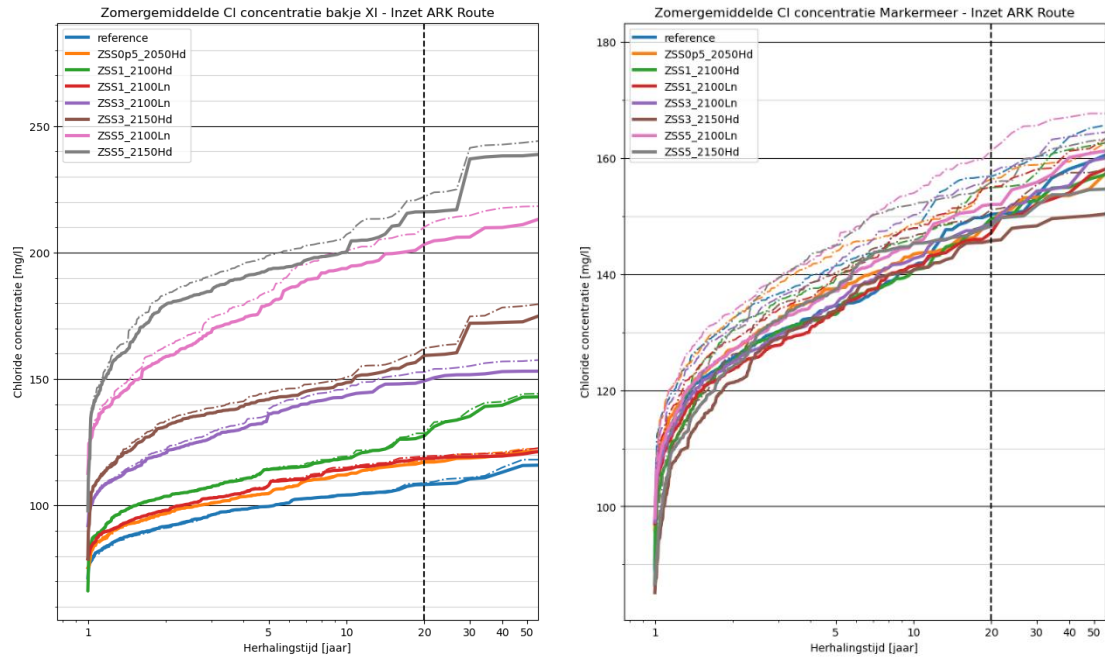
Hoewel positief, is het effect ook beperkt te noemen, terwijl wel periodiek 50 m³/s zoet water wordt ingezet. Dit is met name terug te leiden tot het feit dat de maatregel alleen ingezet wordt in het voorjaar. Een periode waar de druk op het systeem doorgaans nog niet hoog is (behalve in toenemende mate bij de extreme scenario's). Dat houdt in dat het extra water doorgaans vooral weer gelijk wordt gespuid zonder een echt positieve werking in de periode waar het (vaker) knelt. Het beschikbare water uit de ARK-route zou beter ingezet kunnen worden om een buffer te voeden (in de vorm van peilopzet, zoals beschouwd in 4.2.5), om langer in te kunnen teren tijdens (extreme) droogte.



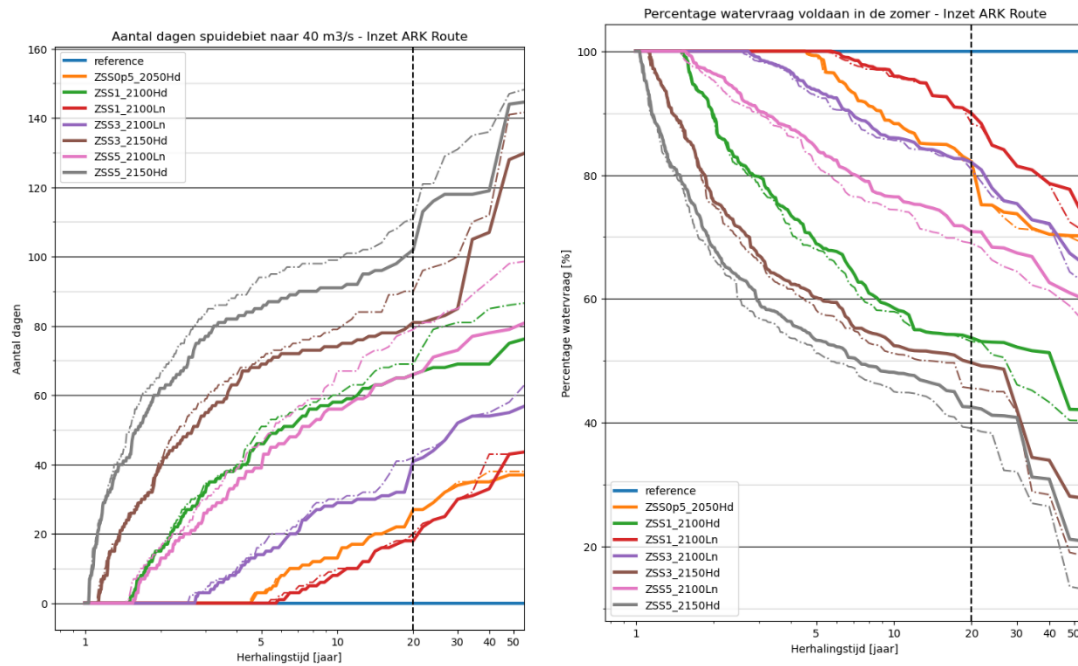
Figuur 4-6 Aantal dagen per jaar dat een chlorideconcentratie van 150 mg/l overschreden wordt bij bakje XI (nabij Andijk), als functie van de herhalingstijd. De streepgrafiek geeft de nul-variant weer.



Figuur 4-7 Jaargemiddelde chlorideconcentratie, als functie van de herhalingstijd. Links: bakje XI (nabij Andijk), rechts: Markermeer. De streepgrafiek geeft de nul-variant weer.



Figuur 4-8 Gemiddelde chloridewaarden over het groeiseizoen als functie van de herhalingstijd. Links: bakje XI (nabij Andijk), rechts: Markermeer. De streepgrafiek geeft de nul-variant weer



Figuur 4-9 Links: aantal dagen per jaar dat een verminderd spuidebiet moet worden ingezet ten behoeve van het peilbeheer, als functie van de herhalingstijd. Rechts: minimaal percentage van de totale watervraag waaraan voldaan kan worden, als functie van de herhalingstijd. De streepgrafiek geeft de nul-variant weer.

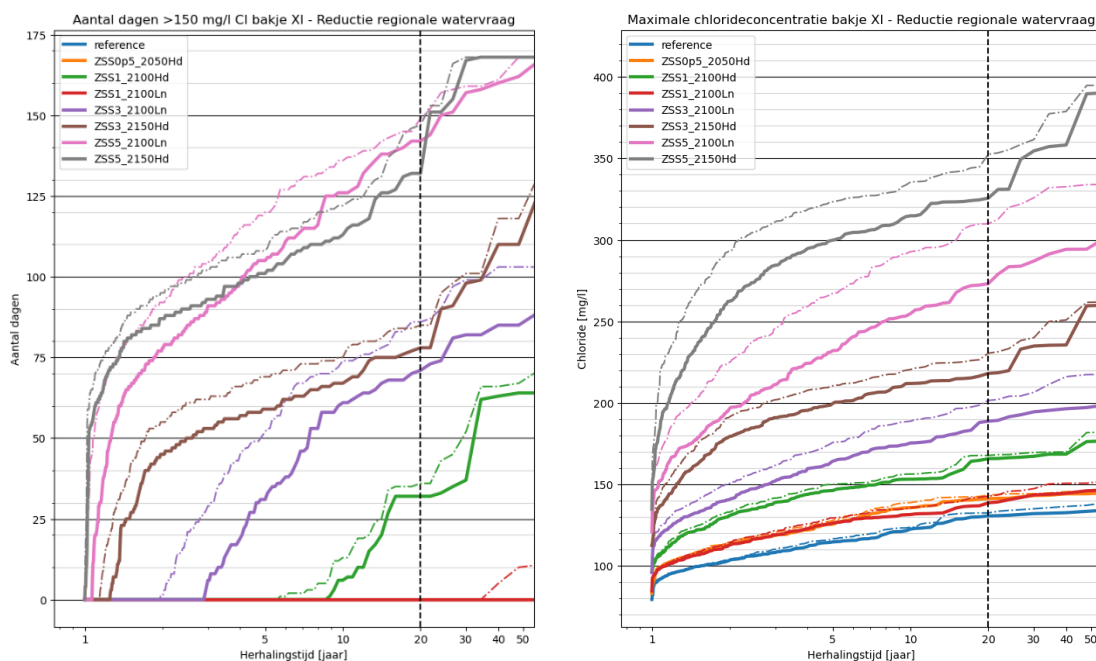
4.2.4 Vergroten waterbuffer IJsselmeer – reductie watervraag met 35%

Het vergroten van de relatieve waterbuffer wordt bij deze maatregel behaald door het permanent verkleinen van de regionale watervraag met jaarrond 35% (betreffende dus de doorspoeling, beregening en peilhandhaving). De verwachting is daarmee ook dat de maatregel een positief effect zal hebben op alle indicatoren, met name in het IJsselmeer.

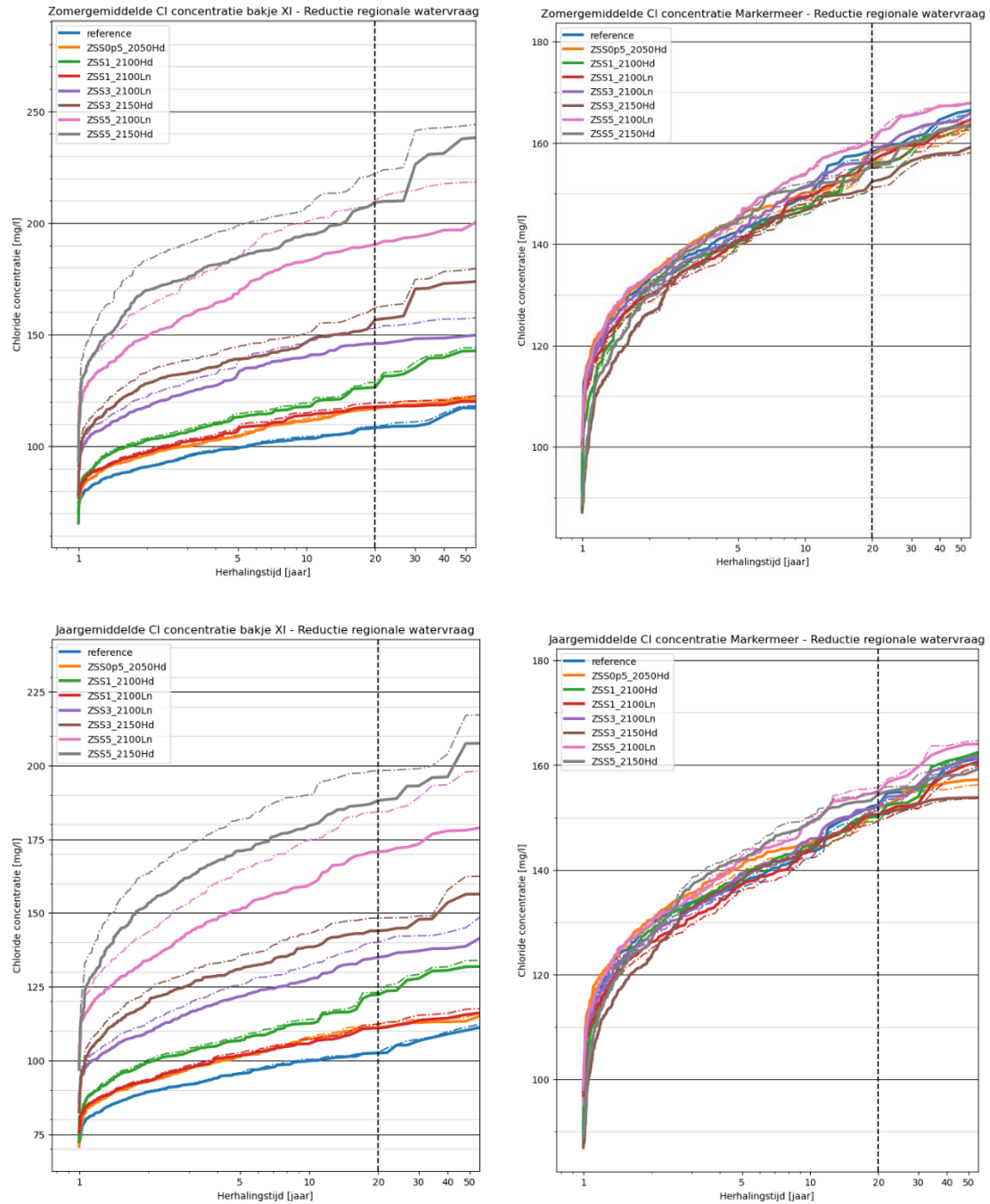
Figuur 4-10 toont het effect van de verminderde watervraag op het aantal dagen dat de chloridewaarde bij Andijk de 150 mg/l overschrijdt (links), als ook de maximale chlorideconcentratie op die locatie (rechts). Net zoals bij de ARK-route, heeft deze maatregel een positieve impact op beide indicatoren. Bij de overschrijding van de 150 mg/l grens is het effect positief bij alle scenario's waar een overschrijding plaatsvindt, vooral de 'Ln' scenario's. Bij de maximale concentratie is er ook met name een positief effect waarneembaar bij de 'Ln' scenario's.

Figuur 4-11 laat de groeisezoengemiddelde en jaargemiddelde chloridewaarden zien bij bakje XI (nabij Andijk) en in het Markermeer. Bij bakje XI is weer vooral een positief effect waarneembaar bij de 'Ln' scenario's. Op het Markermeer is het effect beperkt.

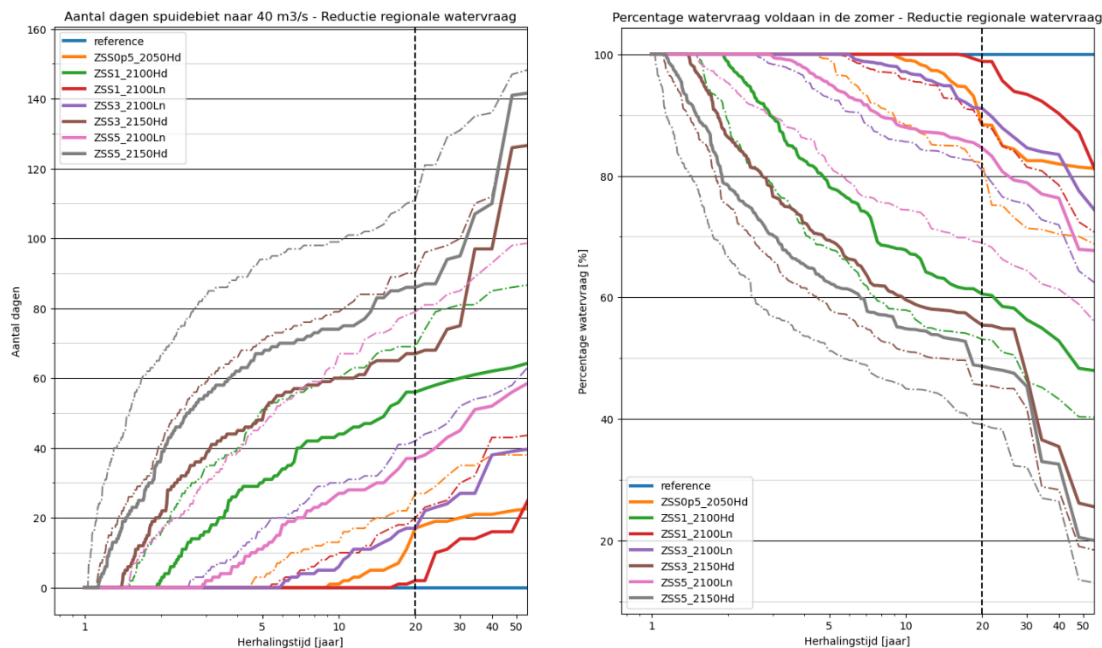
Tot slot is in Figuur 4-12 het aantal dagen per jaar getoond dat niet voldaan kan worden aan het minimale spuidebiet van 70 m³/s (links) en het percentage van de watervraag waar (minimaal) aan voldaan kan worden (rechts). Ook hier heeft de maatregel een positief effect wat logisch is aangezien er meer water beschikbaar blijft voor het spuien en makkelijker voldaan kan worden aan de gereduceerde watervraag. Dat geldt in principe voor elk scenario.



Figuur 4-10 Links: aantal dagen per jaar dat een chlorideconcentratie van 150 mg/l overschreden wordt bij bakje XI (nabij Andijk), als functie van de herhalingsjijd, bij 35% reductie van de regionale watervraag. Rechts: maximale dag-chloridewaarde bij bakje XI (nabij Andijk), als functie van de herhalingsjijd, bij 35% reductie van de regionale watervraag.



Figuur 4-11 Groeiseizoensgemiddelde (boven) en jaargemiddelde chlorideconcentratie (onder), als functie van de herhalingstijd, bij 35% reductie van de regionale watervraag. Links: bakje XI (nabij Andijk), rechts: Markermeer.



Figuur 4-12 Links: aantal dagen per jaar dat een verminderd spuidebiet moet worden ingezet ten behoeve van het peilbeheer, als functie van de herhalingsstijd. Rechts: minimaal percentage van de totale watervraag waaraan voldaan kan worden, als functie van de herhalingsstijd.

4.2.5 Vergroten waterbuffer IJsselmeer – peilopzet

Het vergroten van de relatieve waterbuffer wordt bij deze maatregel behaald door het peil op te zetten. In de zomer wordt het streefpeil naar +0,1 m NAP gezet (i.p.v. -0,2 m NAP bij het nul-alternatief)¹⁴. Deze maatregel vergroot de maximale bufferschijf in de zomerperiode met een factor 4. Om de peilopzet zo snel mogelijk te bewerkstelligen wordt, totdat dat streefpeil gehaald wordt, maximaal het minimale benodigde doorspoeldebiet van 70 m³/s gespuid, wat tot enige zoutoplading kan leiden.

Figuur 4-13 toont het effect van peilopzet op het aantal dagen dat de chloridewaarde bij Andijk de 150 mg/l overschrijdt (links), als ook de maximale chlorideconcentratie op die locatie (rechts). De maatregel lijkt een negatieve impact te hebben op het aantal dagen van overschrijding, maar doorgaans heeft het wel een positief effect op de maximale concentratie. Zie voor een mogelijke verklaring hiervoor verderop.

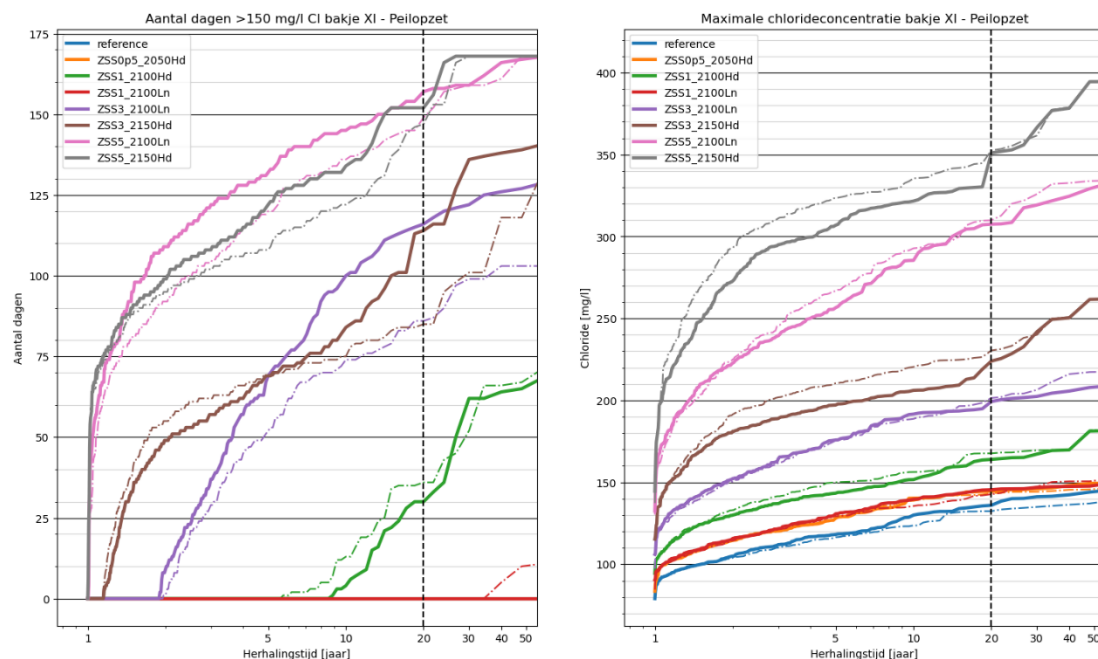
Figuur 4-14 laat de jaargemiddelde en groeiseizoengemiddelde chloridewaarde zien bij bakje XI (nabij Andijk) en in het Markermeer. Hier heeft de maatregel over het algemeen een neutraal effect bij de mildere 'Ln' scenario's en een licht positief effect bij de meer extreme 'Hd' scenario's.

Tot slot is in Figuur 4-15 het aantal dagen per jaar getoond dat niet voldaan kan worden aan het minimale spuidebiet van 70 m³/s (links) en het percentage van de watervraag waar (minimaal) aan voldaan kan worden (rechts). Ook hier lijkt de maatregel doorgaans een (zeer) positief effect te hebben.

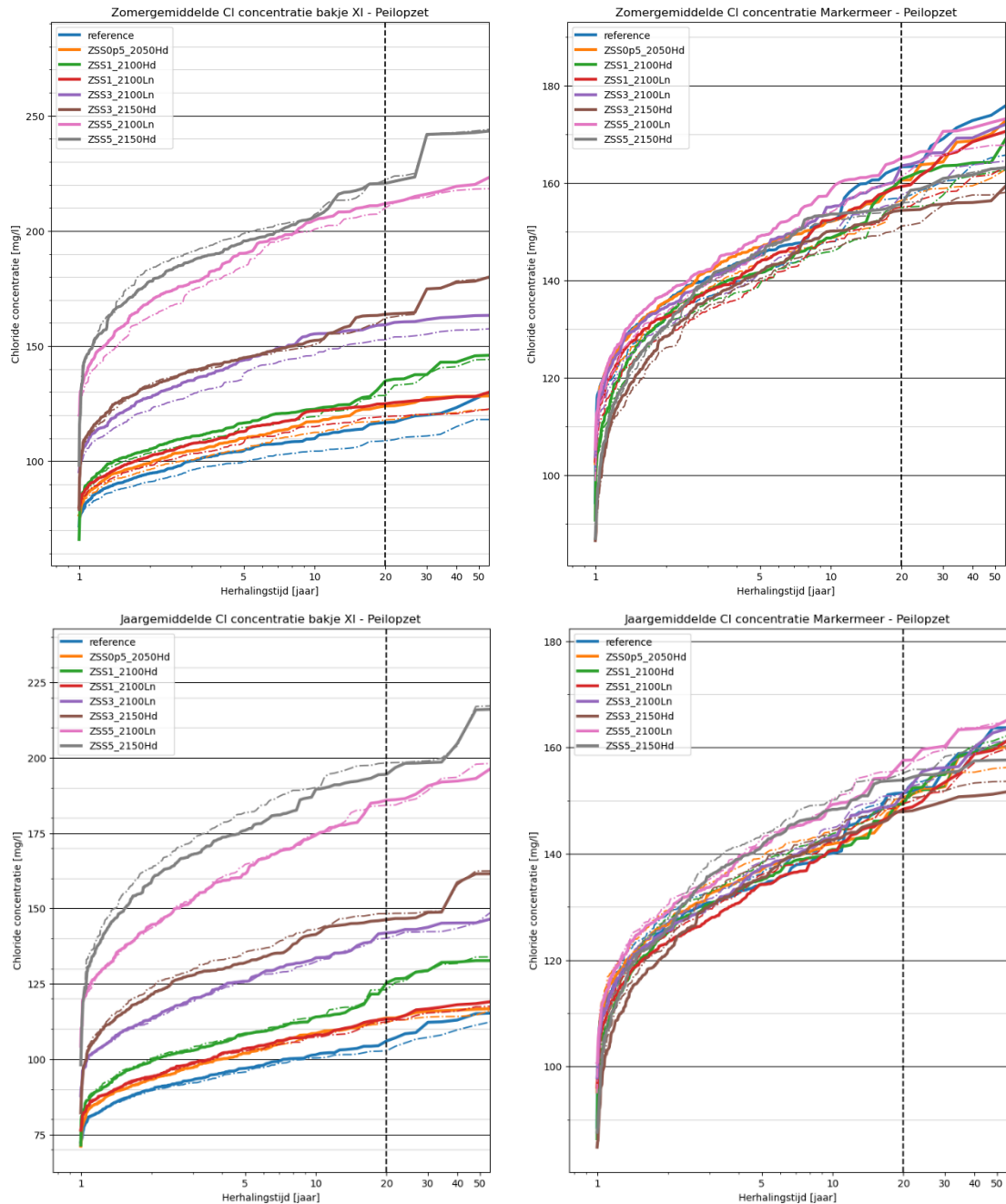
¹⁴ Het vergroten van de waterbuffer door de implementatie van een peilopzet is niet equivalent met éénzelfde waterschijf beschikbaar maken door middel van het meerpeil dieper laten uitzakken. Deze variant is in deze studie niet onderzocht.

Tijdens het opzetten van het peil wordt er relatief minder gespuid, waardoor het IJsselmeer zouter wordt, wat resulteert in meer dagen boven de 150 mg/l bij bakje XI (maar niet in het Markermeer). Door de grotere buffercapaciteit komt het vervolgens wel minder vaak voor dat het peil onder de -0,3 m NAP zakt en/of dat het spuibolume naar 40 m³/s moet worden teruggeschroefd. Vooral dat laatste is vaak de oorzaak voor de maximale chloridewaarden, welke daardoor dus afnemen.

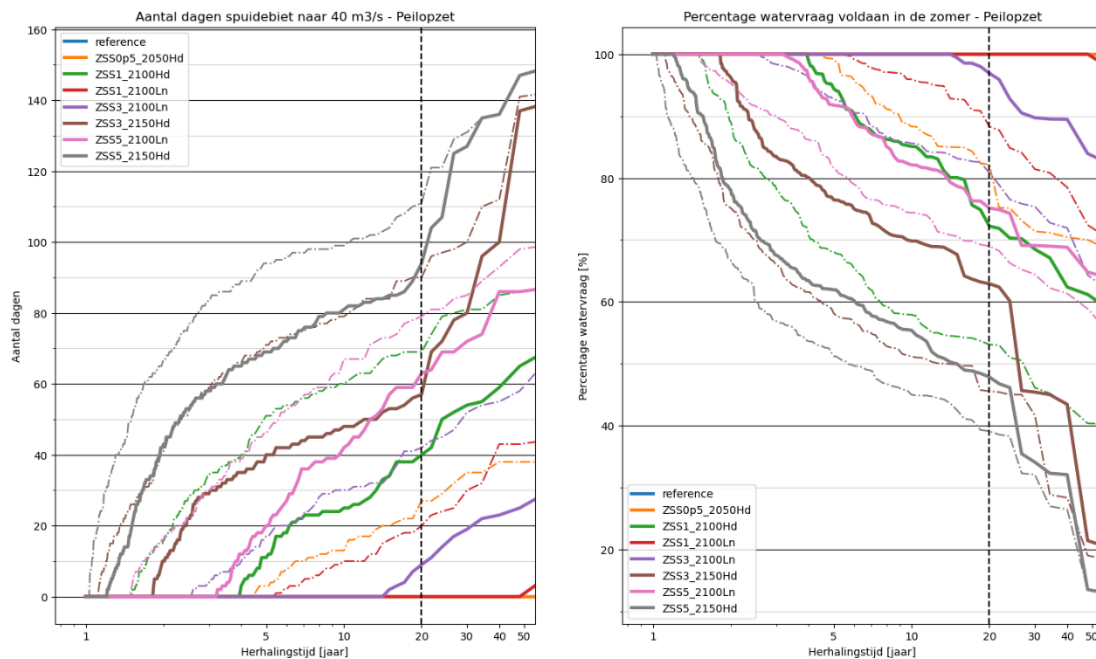
Samengevat is er meer buffercapaciteit wat positief werkt op het voldoen in de watervraag en de haalbaarheid van het peilbeheer, maar bij het opzetten van de buffer wordt relatief minder gespuid, waardoor de chloridewaarde (tijdelijk) oploopt. Er lijkt daarmee ruimte voor optimalisatie bij het implementeren van deze maatregel. Bijvoorbeeld alleen het peil op laten lopen boven een bepaald aanvoerdebiet zodat er sprake is van een bepaalde marge boven het huidige minimale spuidebiet van 70 m³/s. Dit is niet verder onderzocht.



Figuur 4-13 Links: aantal dagen per jaar dat een chlorideconcentratie van 150 mg/l overschreden wordt bij Andijk, als functie van de herhalingstijd, met peilopzet van -0,2 naar +0,1 m NAP. Rechts: maximale chloridewaarde in bakje XI (nabij Andijk), als functie van de herhalingstijd.



Figuur 4-14 Groeiseizoensgemiddelde chlorideconcentratie (boven) en jaargemiddelde chlorideconcentratie (onder), als functie van de herhalingstijd. Links: bakje XI (nabij Andijk), rechts: Markermeer.



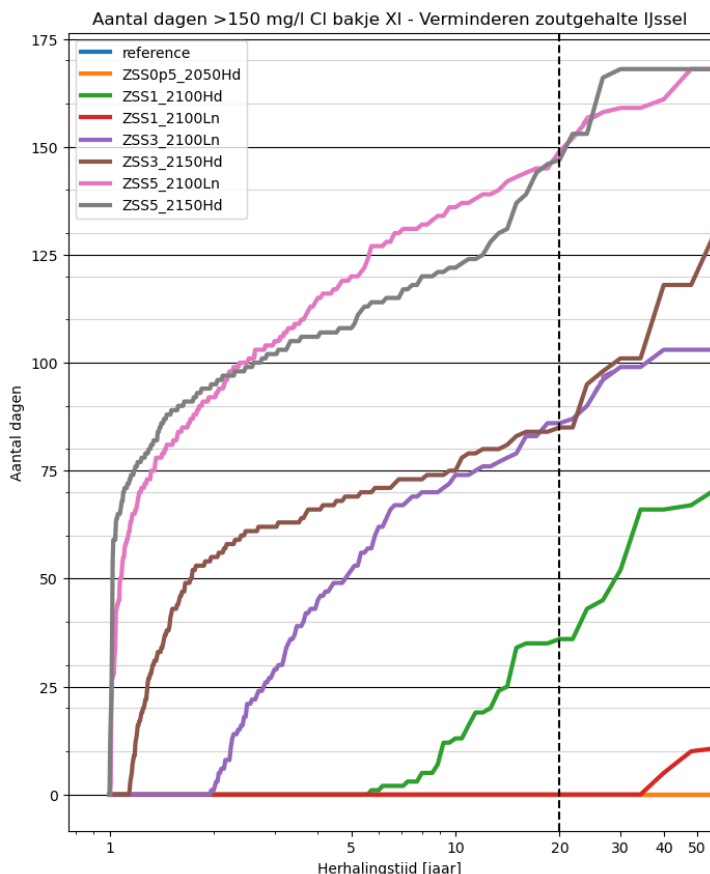
Figuur 4-15 Links: aantal dagen per jaar dat een verminderd spuidebiet moet worden ingezet ten behoeve van het peilbeheer, als functie van de herhalingstijd. Rechts: minimaal percentage van de totale watervraag waaraan voldaan kan worden, als functie van de herhalingstijd.

4.2.6 Zoutgehalte Rijnafvoer

Het verlagen van het chloridegehalte van de IJssel, door herziening van internationale afspraken, wordt bij deze maatregel behaald door de chlorideconcentratie van de IJssel niet boven 150 mg/l op te laten lopen.

Figuur 4-16 toont het aantal dagen dat een chlorideconcentratie van 150 mg/l overschreden wordt bij Andijk. De resultaten van de maatregel zijn weergegeven met een doorgetrokken lijn en liggen over de resultaten van het nul-alternatief, weergegeven met een streeplijn. Het effect van de maatregel is daarmee verwaarloosbaar.

Het minimale effect van de maatregel wordt veroorzaakt door de manier van implementeren van de maatregel. De chlorideconcentratie neemt af met hogere Rijnafvoeren. Het begrenzen van de concentratie heeft vooral een effect bij de extreem lage afvoeren ($C > 150$ mg/l als $Q_{Lobith} < 450$ m³/s). Omdat deze afvoeren zo extreem zijn, komt de concentratie in de modelinvoer voor de scenario's slechts sporadisch boven de 150 mg/l uit. Bovendien is, vanwege de lage afvoer, het gewonnen verdunnende effect van zoeter IJsselwater op de chloridewaarden in het IJsselmeer relatief beperkt. Er is dan ook geen significant verschil in chloride concentraties op de IJssel tussen de verschillende scenario's. *Figuur 3-8* toont de verdeling van chloride concentraties op de IJssel over de volledige 240 jaar per scenario. Dit figuur toont dat de chloride concentratie op de IJssel slechts sporadisch de 150 mg/l overschrijdt.



Figuur 4-16 Aantal dagen chlorideconcentratie van 150 mg/l overschreden wordt in bakje XI (nabij Andijk), als functie van de herhalingstijd.

De maatregel om de concentratie te maximaliseren op 150 mg/l heeft daarmee maar in weinig situaties effect. Mocht de chloridewaarde in de toekomst wel frequenter richting de huidige grenswaarde van 200 mg/l gaan, dan wordt een dergelijke maatregel proportioneel effectiever.

4.3 Discussie en conclusie

4.3.1 Discussie

Bronmaatregelen Afsluitdijk. De doorgevoerde varianten van bronmaatregelen bij de Afsluitdijk laten een duidelijk positief effect zien op zowel het aantal dagen dat de chlorideconcentratie bij Andijk de grenswaarde van 150 mg/l overschrijdt als de jaargemiddelde chlorideconcentraties. Zelfs bij een reductie van 33% is een substantiële verbetering te zien, en bij 66% reductie wordt ook bij de extremere klimaat- en zeespiegelstijging scenario's voldaan aan de inspanningsverplichting voor drinkwater van 150 mg/l jaargemiddeld. Bij 100% reductie van de zoutflux blijft het systeem alleen niet in de meest extreme scenario's van 5 m zeespiegelstijging (ZSS5) onder de 150 mg/l jaargemiddeld. Dit bevestigt het belang van het verminderen van de zoutinstroom via de Afsluitdijk.

Desondanks toont de analyse aan dat zelfs volledige eliminatie van het binnenkomende zoutlek (100% reductie) in combinatie met extreme zeespiegelstijging niet volledig effectief is, er blijft nog altijd zout via interne verzilting in de regio op het IJsselmeer afstromen. Wat suggereert dat aanvullende maatregelen nodig kunnen zijn om het systeem toekomstbestendig te maken, met name onder de invloed van verdere zeespiegelstijging en klimaatverandering.

Tot slot, een belangrijke kanttekening bij deze maatregel is dat het ook effect heeft op de functie vispassage van de spuisluisen. Zoals in paragraaf 2.1.2.1 benoemd, is een deel van de zoutlek ongewenst en een deel gewenst voor vispassage (visvriendelijk spui-beheer). Door in de bronmaatregelen de zoutlek te reduceren heeft dit ook effect op de mate van vispassage. Bij 100% reductie van de binnenkomende zoutvracht is er ook geen vispassage meer mogelijk, wat effect heeft op de ecologie in omliggende wateren. Hiervoor zullen aanvullende maatregelen genomen moeten worden.

Omgaan met hogere grenswaarden. Het verhogen van de chloridegrenswaarde van 150 mg/l naar 175 en 200 mg/l heeft, zoals verwacht, een groot effect op de overschrijdingsfrequentie van de grenswaarde. Vooral bij de extremere scenario's (ZSS5) leidt de maatregel tot een significante afname van het aantal overschrijdingsdagen. Dit benadrukt dat het accepteren van een hogere grenswaarde een relatief effectieve maatregel kan zijn om het systeem inzetbaar te houden in periodes van verzilting. Echter, het versoepelen van de grenswaarden kan potentiële nadelen met zich meebrengen voor de drinkwaterkwaliteit en de ecologische gezondheid van verziltingsgevoelige natuur. Daarom zal het toepassen van deze maatregel moeten worden afgestemd met drinkwaterbedrijven en ecologische beheerinstanties. Daarnaast kunnen structureel hogere chloridewaarden in het hoofdwatersysteem zorgen voor een grotere doorspoelvraag in de regio als in de regio het waterbeheer (streefwaarde chloride in de regio) gelijk blijft (Delsman, 2024). Zoals ook (Delsman, 2024) laat zien is er bij hogere inname-water-concentraties meer water nodig om dezelfde chloridestreefwaarde in de regio te behalen. Een acceptatie van verhoging van de concentraties in het IJsselmeer zal dus alleen volledig effectief zijn voor de waterbalans van de IJsselmeergebied als de acceptatie van chloride in boezems en polders daar gelijke tred mee houdt.

Vergroten waterbuffer IJsselmeer – inzet ARK-route. De inzet van de ARK-route als bron van extra zoetwater toont in alle scenario's een positieve impact op zowel de chloridewaarden bij Andijk als het voldoen aan de watervraag. Echter, deze positieve effecten blijven beperkt, met name door de periode van inzet (16 maart tot 21 juni), waarbinnen de zoute druk op het systeem over het algemeen beperkt is. In deze periode kan de ARK-route effectiever worden ingezet om peilopzet te genereren zonder dat het spuidebiet door de Afsluitdijk hoeft te worden geknepen, met de eventuele nadelige effecten van dien. De ARK-route kan ook worden ingezet ter doorspoeling van het systeem en het voorzien in watervraag, maar dan juist in periodes van droogte (veelal na 21 juni). De ARK-route lijkt daarom wel een robuuste maatregel voor het IJsselmeergebied, indien slim ingezet en gestuurd op van het moment in het jaar en de behoefte. Een inzet in tijden van droogte (en daarmee schaarste van zoetwater op landelijk niveau) vraagt echter om goede coördinatie met andere watergebruikers, naast een adequate infrastructuur om deze waterstromen te beheren.

Vergroten waterbuffer IJsselmeer – reductie watervraag. De permanente reductie van de regionale watervraag met 35% heeft in vrijwel alle scenario's een duidelijk positief effect op de chloridewaarden bij Andijk, vooral bij de extreme scenario's. Dit bevestigt dat een gerichte reductie van de vraag een effectieve maatregel kan zijn om het systeem robuuster te maken tijdens droogte en verziltingsperiodes. Tegelijkertijd is het verminderen van de watervraag complex in de uitvoering, omdat het een gedragsverandering vergt van de betrokken watergebruikers. Desondanks toont de analyse aan dat deze maatregel, als aanvulling op andere maatregelen, een substantiële bijdrage kan leveren aan het bereiken van de waterkwaliteitsdoelen.

Vergroten waterbuffer IJsselmeer – peilopzet. Het verhogen van het zomerpeil naar +0,1 m NAP blijkt een tweesnijdend zwaard te zijn. Hoewel de maatregel een positieve bijdrage levert aan het voldoen aan de watervraag en het peilbeheer, leidt het verhogen van het peil tijdelijk tot minder spuien, wat kan resulteren in een toename van de chlorideconcentratie. Dit geeft aan dat peilbeheer een delicate balans vereist tussen het optimaliseren van de waterbuffer en het waarborgen van de waterkwaliteit. Een verdere

optimalisatie van deze maatregel zou kunnen liggen in een dynamisch peilbeheer, waarbij alleen wordt overgegaan tot peilverhoging wanneer er voldoende aanvoer beschikbaar is.

Internationale afspraken om het zoutgehalte van de Rijn te verlagen. Het effect van internationale afspraken om de chlorideconcentratie in de Rijn te verlagen, blijkt in de huidige doorrekeningen verwaarloosbaar. Dit komt voornamelijk doordat de maatregel, zoals deze nu is ontworpen, enkel effectief is bij lage afvoeren, wanneer de zoutconcentratie hoger is. Echter, in de modelinvoer komt de chlorideconcentratie bij Lobith zelden boven de 160 mg/l uit, waardoor het effect van de maatregel beperkt is. Mocht de chlorideconcentratie in de toekomst vaker richting de huidige grens van 200 mg/l gaan, dan wordt deze maatregel proportioneel effectiever. Het belang van internationale samenwerking blijft echter groot, vooral in de context van toenemende droogte en verzilting door klimaatverandering.

Combinaties van maatregelen. In deze studie is enkel het nul-alternatief met individuele maatregelen onderzocht. Het is nog onduidelijk hoe combinaties van maatregelen uitwerken. Voor enkele maatregelen kan verwacht worden dat het effect van gecombineerde maatregelen kleiner is dan de som der delen, andere maatregelen gaan juist goed samen of kunnen elkaar mogelijk versterken.

4.3.2 Algemene conclusie

De geanalyseerde maatregelen bieden elk op hun eigen manier kansen om de chloridewaarden en waterbeschikbaarheid op het IJsselmeer en Markermeer te verbeteren. Sommige maatregelen, zoals het vergroten van de waterbuffer door middel van de ARK-route of reductie van de watervraag, tonen robuuste resultaten over verschillende scenario's heen. Andere, zoals het tijdelijk verhogen van het peil en/of het omgaan met hogere grenswaarden, bieden flexibiliteit maar vereisen zorgvuldige afstemming om negatieve gevolgen te beperken.

Daarnaast kan het nemen van maatregelen leiden tot een afname in de gevoeligheid die bestaat tussen het peilbeheer/de waterbalans van het IJsselmeergebied en de bijbehorende chloridestatistiek. Door de juiste maatregelen wordt er iets meer ruimte geboden voor mogelijke onzekerheid in de gehanteerde randvoorwaarden.

Voor de toekomst lijkt een integrale aanpak, waarbij meerdere maatregelen gecombineerd worden, de beste garantie te bieden voor een veerkrachtig zoetwatersysteem. Hierbij is voortdurende monitoring van de effectiviteit van deze maatregelen noodzakelijk, evenals samenwerking op regionaal en internationaal niveau om het systeem aan te passen aan veranderende omstandigheden.



5

Synthese, Conclusie & Aanbevelingen

5 Synthese, Conclusie & Aanbevelingen

Dit hoofdstuk presenteert de synthese van de belangrijkste bevindingen, c.q. kernboodschappen (paragraaf 5.1). In paragraaf 5.2 wordt dieper ingegaan op de reikwijdte en onzekerheden van de bevindingen, met specifieke aandacht voor de impact van inhoudelijke risico's op het eindresultaat. Terwijl paragraaf 5.3 de inzichten plaatst in het bredere perspectief. Tenslotte worden in paragraaf 5.4 aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek en -analyses.

5.1 Kernboodschappen

In de scenario-analyse (Hoofdstuk 3) is het nul-alternatief onderzocht om te begrijpen hoe het IJsselmeergebied reageert op verschillende klimaatscenario's en zeespiegelstijgingen zonder extra maatregelen. De analyse omvat zeven scenario's gebaseerd op de KNMI'23-klimaatscenario's, variërend van gematigde stijgingen tot een maximum van 5 meter zeespiegelstijging. De maatregelenanalyse (Hoofdstuk 4) bouwt voort op de scenario-analyse en bekijkt de impact van verschillende beheeropties. De belangrijkste kernboodschappen zijn:

Zoetwaterbeschikbaarheid van het IJsselmeergebied op korte termijn al onder druk

De zoetwatervoorraad van het IJsselmeer gebied kan op relatief korte termijn (reeds bij 0,5 meter ZSS in het 2050 Hd scenario) onder druk komen te staan. Het aantal zomerdagen in een T20 jaar waarin wordt gekort op de watervraag (voor spuien en zoetwateraanvoer naar de regio) neemt toe van 0 naar 23 dagen. In die T20 zomer kan slechts aan 81% van de regionale watervraag worden voldaan, er is dus een aanvoertekort naar de regio van 19% t.o.v. de vraag. Het toegepaste klimaatscenario speelt hier een belangrijke rol aangezien het scenario met meer zeespiegelstijging (1 meter) maar een gematigder klimaatscenario (2100 Ln) een kleinere toename in T20 'watertekortdagen' en 'aanvoertekorten naar de regio', namelijk respectievelijk 16 dagen en 10%.

Zoetspoelen van het IJsselmeer blijft mogelijk

Ondanks dat de watervoorraad vanuit kwantitatief oogpunt onder druk komt te staan (zie bovenstaande), lukt het in alle scenario's nog om het IJsselmeer in de winter weer voldoende zoet te spoelen. Enkel bij extreme situaties (T20 of extremer) doen er zich jaren voor waarin dit zoetspoelen onvoldoende lukt. Het doorwerken van een jaar met een hoge mate van verzilting op de volgende jaren lijkt daarmee mee te vallen. Binnen een zomer kan het IJsselmeer wel sterk verzilten, zeker bij hoge mate van ZSS. Deze mate van zoetspoeling is relevant voor de jaargemiddelde chlorideconcentraties op het IJsselmeer, de meest formele indicator wat betreft chloride in verband met de drinkwaterkwaliteit.

Grote invloed van klimaatscenario's (vooral bij beperkte zeespiegelstijging)

In het verlengde van de eerste kernboodschap kan geconcludeerd worden dat extremere klimaatverandering hoge uitstoot en droge klimaatomstandigheden (Hd) grote impact hebben op de waterbalans van het IJsselmeergebied, resulterend in hogere chloridewaarden en frequentere zoetwatertekorten dan de lage uitstoot en natte scenario's (Ln). Voor toekomstige zoetwatertekorten is de impact van de klimaat-as (neerslag, verdamping en rivierafvoeren) substantieel groter dan de impact van zeespiegelstijging-as (zie Figuur 3-16). Voor toekomstige chlorideconcentraties op het IJsselmeer is juist de impact van de zeespiegelstijging-as het grootst. Het is belangrijk om te benadrukken dat deze conclusie geldt bij toepassing van de huidige voorkeursstrategie en (onzekere) scenario-randvoorwaarden, aangezien oplopende chlorideconcentraties in het IJsselmeer en regionale zoetwatertekorten, via het toegepaste beheer, communicerende vaten zijn. De onderlinge relatie tussen deze twee wordt sterker zodra peilbehoud voor moet gaan boven zoutbestrijding. Dan zal de zoutlast als gevolg van ZSS sneller toenemen. De frequentie en duur waarmee dit punt wordt bereikt is sterk gevoelig voor de scenario-randvoorwaarden.

Het is daarom van belang om de impact van deze randvoorwaarden op de resulterende overschrijdingsstatistiek in kaart te brengen.

Technische oplossingen Afsluitdijk zeer effectief, maar bij extreme mate ZSS niet toereikend (normaanpassing of regionale maatregelen noodzakelijk)

Door toepassing van technische maatregelen om de binnenkomende zoutflux bij de Afsluitdijk te reduceren kunnen de oplopende chlorideconcentraties op het IJsselmeer als gevolg van zeespiegelstijging en klimaatverandering substantieel worden beperkt. Een reductie van 33% van de binnenkomende zoutflux zorgt ervoor dat tot bij 1 meter zeespiegelstijging het aantal dagen waarbij de chlorideconcentratie bij Andijk boven de 150 mg/l komt kan worden beperkt tot bijna nul (voor T20 jaren). Bij 100% reductie is dit op te rekken tot ruim 3 meter zeespiegelstijging. Echter, bij nog extremere zeespiegelstijging van 5 meter kan zelfs 100% reductie niet voorkomen dat de chlorideconcentratie bij Andijk in T20 jaren regelmatig boven de 150 mg/l komt. Oorzaak hiervan is de sterke toename van zoutvracht uit de regio, dat via doorspoeling weer in IJsselmeer terecht komt.

Bij deze mate van zeespiegelstijging zijn maatregelen in de regio of aanpassing van de normen voor chlorideconcentraties in het IJsselmeergebied noodzakelijk. Het is van belang om na te gaan denken over een toekomstig beheer in kustgebieden met sterk toenemende zoute kwel, en het al dan niet lozen van doorspoelwater direct op de Waddenzee. Ook kan de watervraag in de regio worden beperkt. Deze studie toont aan dat een reductie van de regionale watervraag met 35% in vrijwel alle scenario's een duidelijk positief effect heeft op de chloridewaarden bij Andijk, vooral bij de extreme scenario's.

Inzet ARK-route heeft een relatief klein effect op chlorideconcentraties

De ARK-route kan als extra aanvoer van zoetwater richting het IJsselmeer in droge jaren de beschikbaarheid vergroten, maar biedt beperkte ondersteuning bij milde droogte. Dit komt doordat in deze studie is aangenomen dat de ARK-route tot 21 juni kan worden ingezet. Daarmee heeft de maatregel vooral impact op extreem droge jaren waarbij de tekorten al voor die datum optreden. In jaren met meer gematigde droogte zal de maatregel slechts beperkte impact hebben.

Beperkte impact van peilverhogingen

Het verhogen van het zomerpeil naar +0,1 m NAP blijkt een tweesnijdend zwaard te zijn. Hoewel de maatregel een positieve bijdrage levert aan het voldoen aan de watervraag en het peilbeheer, leidt het verhogen van het peil tijdelijk tot minder spuien, wat kan resulteren in een toename van de chlorideconcentratie. Dit geeft aan dat peilbeheer een delicate balans vereist tussen het optimaliseren van de waterbuffer en het waarborgen van de waterkwaliteit. Het is van belang om ook tijdens de periode van peilopzet voldoende te blijven spuien om verzilting te voorkomen.

5.2 In breder perspectief

In eerdere modelstudies is de waterbalans en chloridedynamiek van het IJsselmeergebied in samenhang onderzocht door middel van een 1D-bakjesmodel (Bonte et. al, 2018; Arcadis/Hydrologic, 2023). Echter, deze studies zijn tot op heden altijd uitgevoerd met modelinput op basis van de huidige situatie en huidige metingen, of op basis een fictieve range aan mogelijke toekomstige inputvariabelen. Daarbij zijn enkel korte periodes (niet meer dan enkele jaren) doorgerekend.

In voorliggende studie is een stap verder gezet door de gekoppelde waterbalans en chloridedynamiek te onderzoeken voor een grote variatie aan (synthetische) klimaatscenario's, met een breed scala aan mogelijke maatregelen. Daarbij komt dat voor ieder scenario een periode van in totaal 240 jaar is doorgerekend. Dit vergroot functionele eisen die aan het 1D-bakjesmodel gesteld worden doordat het model moet functioneren binnen een heel breed toepassingsbereik. Het doorontwikkelde model is in staat gebleken om extreem droge en extreem natte scenario's naar behoren te simuleren, zonder dat de rekenfouten accumuleren en er een trend ontstaat binnen de langjarige reeks.

Om de zeer complexe materie, binnen een dergelijk groot toepassingsbereik (fysisch en temporeel), te kunnen simuleren met een relatief simpel 1D-bakjesmodel, zijn verschillende aannames noodzakelijk. De uiteindelijke resultaten van deze studie moeten daarom als richtinggevend beschouwd worden, ze geven inzicht in de bandbreedte van mogelijke ontwikkeling in de toekomst.

Enkele van de belangrijkste aannames die ten grondslag liggen aan de resultaten van deze studie zijn:

- Alle scenario's zijn doorgerekend met het huidige beheer als uitgangspunt. Dit uitgangspunt is waarschijnlijk niet realistisch op een tijdschaal van enkele honderden jaren, maar is de enige manier om een 'eerlijke vergelijking' tussen scenario's mogelijk te maken. Daarbij hoort ook het feit dat enkele randvoorwaardelijke parameters waarvan verwacht kan worden dat ze in de toekomst veranderen (bijvoorbeeld zoutflux via de Oranjesluizen), maar waarvan onzeker is hoe precies, als constanten zijn meegenomen.
- Er zijn wel aannames gedaan voor het plaatsen van pompen richting de toekomst, omdat deze pompen vanuit waterveiligheid noodzakelijk worden geacht. In deze studie is aangenomen dat bij 0 m zeespiegelstijging het volledige uitgaande volume wordt gespuid. Bij 0,5 m zeespiegelstijging wordt 50% gepompt en 50% gespuid en bij meer dan 0,5 m zeespiegelstijging wordt het volledige volume gepompt. De efficiëntie waarmee pompen zout uitslaan (lees chlorideconcentratie van uitgepompt water) is naar alle waarschijnlijkheid groter dan bij spuien, maar de exacte efficiëntie is zeer onzeker. Hiervoor is in deze studie een aanname gedaan die logischerwijs substantiële impact heeft op de resultaten van de studie.
- Het uitgangspunt voor de scenario-analyse zijn de KNMI'23 Klimaatscenario's, waarbinnen synthetische tijdreeksen zijn gecreëerd voor neerslag, verdamping en rivierafvoeren. Omdat het synthetische reeksen betreft, is het van belang dat alle andere scenarioafhankelijke invoerparameters, denk o.a. aan de regionale watervraag, -afvoer en -chloridevracht, gebaseerd zijn op deze synthetische basisreeksen. Dit levert de noodzakelijke congruentie in de timing van de verschillende invoerparameters op. Er zijn verschillende aannames gedaan om invoerparameters congruent te maken aan de synthetische reeksen van neerslag, verdamping, rivierafvoer en zeespiegelstijging.

5.3 Reikwijdte en onzekerheden

Het voorliggende onderzoek bevat een aantal noodzakelijke aannames, zowel wat betreft het modelconcept als in de opgelegde randvoorwaarden in de verschillende scenario's. Het is van belang om te benadrukken dat enkele van de korte termijn (weken en korter) uitschieters in chlorideconcentraties die op puntlocaties zijn gemeten niet door het model berekend worden. Dit heeft twee belangrijke redenen. Ten eerste moet het detailniveau van de modelinvoer (ruimtelijk en temporeel) in ogenschouw worden genomen. Voor enkele invoerparameters betreft het maand of decadegemiddelde invoer, wat beperkte variabiliteit van de modelresultaten t.o.v. metingen verklaart. Ten tweede berekent het model bakjesgemiddelde concentraties (in het horizontale en verticale vlak), die per definitie dus een vlakkere dynamiek laten zien dan gemeten puntlocaties, daarbij windeffecten ook niet zijn meegenomen in deze studie. Ten aanzien van de duiding van chlorideconcentraties die met het model worden berekend, en bijvoorbeeld verwerkt worden naar overschrijdingsstatistiek, is het daarom van belang om deze aandachtspunten in ogenschouw te nemen. Ten opzichte van puntmetingen zal de berekende overschrijdingsstatistiek lager uitvallen.

Daarnaast toont dit onderzoek aan dat de chloridestatistiek in sterke mate samenhangt met het kantelpunt in beheer wanneer het minimale peil wordt bereikt. Wanneer het minimale peil bereikt wordt, stijgen de chloride waarden door het plotseling verminderen van het spuivolume. Dit niet-lineaire kantelpunt beïnvloedt de chloridestatistiek sterk en is sterk

afhankelijk van de gekozen randvoorwaarden.

De inzichten uit dit onderzoek benadrukken dat een geïntegreerde aanpak van zoutlastreductie bij de Afsluitdijk, peilbeheer, regionale systeemaanpassingen essentieel is voor de toekomstbestendigheid van het IJsselmeergebied onder uiteenlopende klimaatscenario's. Terwijl sommige maatregelen effectief zijn bij lage tot matige zeespiegelstijging, worden gecombineerde oplossingen noodzakelijk bij extremere scenario's. De uitdaging is het creëren van een robuust systeem dat zowel de chloridewaarden onder controle houdt, als ook een duurzame zoetwateraanvoer garandeert voor drinkwaterproductie, natuur en landbouw.

In opdracht van RWS wordt door Deltares een onderzoek uitgevoerd naar de technische mogelijkheden voor bronmaatregelen bij de Afsluitdijk. Door de resultaten van Deltares naar de effectiviteit naar bronmaatregelen te spiegelen met de impact van de in voorliggende studie onderzochte zoutvracht reductiepercentages bij de bron (33, 66 en 100%), kan er een kwalitatieve inschatting worden gemaakt van het deel van de totale opgave die kan worden opgevangen door toepassing van technische maatregelen. Zo verkrijgt men ook een beeld van de omvang van het deel van de opgave dat niet opgevangen kan worden met technische maatregelen, en waarvoor dus gezocht moet worden naar 'systeemmaatregelen' en 'adaptatie' in de regio.

In de zoektocht naar doelmatige maatregelen is het van belang om niet enkel te kijken naar de doelen die in deze studie zijn geformuleerd (zoetwaterbeschikbaarheid en chloridelast), maar zeker ook de vele koppelkansen met overige (landelijke) opgaves te verkennen:

- Koppelkansen bronmaatregelen Afsluitdijk met opgave waterveiligheid: In de toekomst zullen er pompen bij de Afsluitdijk gerealiseerd moeten worden om de waterveiligheid bij een stijgende zeespiegel te kunnen waarborgen. Door bij het ontwerp van de pompen rekening te houden met beide opgaven kan de integrale doelmatigheid van de maatregel (en dus de kosten-baten verhouding) verbeterd worden. Daarbij is het wenselijk dat de pompen ook bij een laag debiet kunnen afvoeren (orde 20 m³/s), zo kan ook bij een lage (zoet)waterbeschikbaarheid zout water afgevoerd worden.
- Koppelkansen regionale maatregelen met overige landelijke opgaves: Binnen verschillende landelijke thema's groeit het besef dat conventionele (vaak technische) maatregelen niet altijd meer voldoende (of te kostbaar) zijn om de opgaves van de toekomst het hoofd te bieden. Enkele voorbeelden van dergelijke opgaves zijn o.a. de natuuropgave, regionale verzilting en verdroging, toenemende druk op schaarse ruimte (met o.a. de woningbouwopgave), regionale wateroverlast en waterveiligheid, zandwinning en de energietransitie. Voor veel van deze opgaves lijkt een 'adaptatie' of 'transitie' van het huidige systeem nuttig, wenselijk, en op enkel locaties zelfs noodzakelijk. Voor de in deze studie onderzochte maatregelen is het dus van belang om te onderzoeken hoe ze raken aan andere opgaves en zo onderdeel kunnen zijn van een integraal maatregelpakket als 'onderdeel van een klimaatbestendig Nederland'.

5.4 Aanbevelingen

Eén van de belangrijkste conclusies is dat er grenzen zitten aan de mogelijkheden om de waterbeschikbaarheidsopgave en verziltingsopgave van het IJsselmeer en het Markermeer uitsluitend via technische maatregelen bij de Afsluitdijk het hoofd te bieden. Op basis van deze studie wordt aanbevolen om de mogelijkheden voor andere vormen van beheer of regionale systeemmaatregelen verder te onderzoeken. De resultaten van deze studie moeten vanwege het toegepaste modelinstrumentaria en de scope van het onderzoek als richtinggevend worden beschouwd. Detailmodellering van specifieke elementen van het

onderzoek (denk aan specifieke maatregelen of de impact van een specifiek onderdeel van klimaatverandering) kunnen bijdragen om de bandbreedte van onzekerheid te verkleinen.

In deze studie is enkel het nul-alternatief met individuele maatregelen onderzocht. Het is nog onduidelijk hoe combinaties van maatregelen uitwerken. Voor enkele maatregelen kan verwacht worden dat het effect van gecombineerde maatregelen kleiner is dan de som der delen, andere maatregelen gaan juist goed samen of kunnen elkaar mogelijk versterken.

Het tijdspad waarin maatregelen genomen zullen moeten worden is, deels vanwege de grote bandbreedte van onzekerheid omtrent klimaatverandering en zeespiegelstijging, nog zeer ongewis. Er kunnen echter wel adaptatiepaden richting de toekomst worden ontwikkeld waarop juist ook deze bandbreedte van onzekerheid een plek krijgt. Door de uitkomsten van deze studie op een tijdlijn te plaatsen en deze te leggen naast de tijdlijn van andere projecten waarin een toekomstbestendig en klimaatadaptief Nederland wordt onderzocht, kunnen koppelkansen geconcretiseerd worden. Dit kan enorm helpen bij het ontwikkelen van realistische toekomstperspectieven.

Tenslotte toont dit model een sterke niet-lineaire relatie tussen de randvoorwaarden (betreffende de waterbalans) en de resulterende chloridestatistiek, door het stricte peilbeheer zoals dat in het model is opgelegd. Daarom wordt er aanbevolen om de gevoeligheid van voor de randcondities op deze chloridestatistiek in kaart te brengen. Dit kan de kwetsbaarheid van het systeem voor de gekozen randvoorwaarden beter aantonen en daarmee een extra voedingsbodem bieden om, bij een hoge kwetsbaarheid, eerder tot maatregelen over te gaan.

Referenties

- Arcadis/Hydrologic. (2023). *Systeemanalyses zoetwater regio IJsselmeer-Markermeer. Kennisprogramma Zeespiegelstijging.*
- Delsman. (2024). *Verkenning handelingsruimte in doorspoelen polders bij zeespiegelstijging, Rapport 11211024-002-BGS-0002.*
- Deltares. (2022). *Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II - Grondwaterverziltting en wtaervraag bij een stijgende zeespiegel.*
- Deltares. (2023). *Implications of the KNMI'23 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse.* Retrieved from https://publications.deltares.nl/11209265_002_0003.pdf
- Deltares. (2024). *Vertaling van de Deltascenario's 2024 naar invoer voor het Nationaal Water Model.* Retrieved from https://publications.deltares.nl/11209219_018_0001.pdf
- Deltares. (2025). *ZSF documentation — libzsf documentation.* Retrieved from <https://libzsf.readthedocs.io/en/latest/index.html>
- FutureWater. (2006). *Berekening openwaterverdamping. Opdrachtgever: Wetterskip Fryslân.*
- Hydrologic. (2023). *Zoetwaterbouwstenen IJsselmeer.* Amersfoort: Hydrologic.
- Jansen, F. A., & Teuling, A. J. (2019). *Evaporation from a large lowland reservoir – (dis)agreement between evaporation models from hourly to decadal timescales.* Hydrology and Earth System Sciences.
- KNMI. (2024). *KNMI National Climate Scenarios 2023 for the Netherlands.* Retrieved from <https://www.knmi.nl/research/publications/knmi-national-climate-scenarios-2023-for-the-netherlands>
- KWR. (2021). *Actualisatie regressiemodel voor chlorideconcentraties bij Lobith en Eijsden.* Retrieved from [https://api.kwrwater.nl/uploads/2021/07/KWR-2021.045-Actualisatie-regressiemodel-voor-chlorideconcentraties-bij-Lobith-en-Eijsden-\(zie-ook-KWR-2020.088\)-\(OPENBAAR\).pdf](https://api.kwrwater.nl/uploads/2021/07/KWR-2021.045-Actualisatie-regressiemodel-voor-chlorideconcentraties-bij-Lobith-en-Eijsden-(zie-ook-KWR-2020.088)-(OPENBAAR).pdf)
- RWS. (2020). *Nieuwe inzichten naar aanleiding van de verziltting van het IJsselmeer in 2018 en actualisatie vna de posten van de water- en zoutbalans van het meer.*
- 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.*
- Van Veen, N. (2021). *Spuiadvies Afsluitdijk.* Utrecht: Rijkswaterstaat.
- Weiler, et al. (2025). *Oprekmogelijkheden door maatregelen op spui- en schutsluizen, Rapport 11210315-004-BGS-0001.*
- Witteveen+Bos. (2015). *Verdiepend effectonderzoek waterkwaliteit en morfologie Afsluitdijk*

Appendix A. Toegepaste zoutfluxrelaties Afsluitdijk

In deze appendix zijn de relaties omtrent de zoutflux door de Afsluitdijk die ingebouwd zijn in het bakjesmodel opgenomen en is de gebruikte terminologie kort toegelicht. De gedachtegang achter de zoutfluxrelaties en de gebruikte methodiek waarbij modellering, literatuur en expert judgement zijn gecombineerd, is reeds toegelicht in paragraaf 2.1.2.1 en paragraaf 2.1.2.2.

Er zijn zoutfluxrelaties opgesteld voor Den Oever en Kornwerderzand voor meerdere situaties. Zo is onderscheid gemaakt tussen de zoutfluxrelaties in het geval van:

1. de huidige bodemligging,
2. de toekomstige bodemligging in combinatie met spuien en
3. de toekomstige bodemligging in combinatie met pompen.

De 6 (2 locaties maal 3 situaties) zoutfluxrelaties die daaruit volgen, zijn opgenomen in Tabel 5-2 tot en met Tabel 5-7. Deze relaties zijn opgesteld in tabelvorm waarbij de opgenomen waarden de 'knikpunten' beschrijven binnen de relaties. Tussen deze knikpunten dient lineair geïnterpoleerd te worden.

Bij de tabellen hoort de volgende beschrijving van de toegepaste terminologie:

- De gebruikte vulgraad betreft de vulgraad van de erosiekuil aan de binnenzijde van het lokale spuicomplex en wordt opgegeven in het aantal tonnen zout.
- De verhouding tussen de hoeveelheid zout dat doorschiet richting het IJsselmeer (netto) en de hoeveelheid zout dat binnenkomt (bruto), wordt toegepast als dimensieloze factor (0 tot 1). Het aandeel dat niet doorschiet, wordt (tijdelijk) opgeslagen in de lokale erosiekuil.
- Het spui- en pompvolume wordt ingevoerd in miljoenen m³ per getij-cyclus.
- Voor de uitgaande zoutflux tijdens spuien geldt dat de flux per getij wordt berekend op basis van twee componenten. De eerste component is de momentane achtergrondwaarde van de chlorideconcentratie in het lokale bakje (XIV_{zuid} voor Den Oever en XIV_{noord} voor Kornwerderzand) maal het spuivolume. De tweede component bestaat uit een factor maal de momentane vulgraad van de erosiekuil. De factor varieert op basis van het spuivolume. De 'kop' en de 'staart' van deze relatie bij relatief lage en hoge spui volumes, is enigszins afgevlakt om numerieke stabiliteit te bevorderen.
- Voor de uitgaande zoutflux tijdens pompen geldt dat de flux per getij wordt bepaald als functie van de vulgraad. Onder een gestelde grenswaarde voor de vulgraad (deze verschilt per locatie) zuigen de pompen geen zout water uit de erosiekuil en bestaat de zoutflux uit de momentane achtergrondwaarde van de chlorideconcentratie in het lokale bakje (XIV_{zuid} voor Den Oever en XIV_{noord} voor Kornwerderzand) maal het pompvolume. Boven de gehanteerde grenswaarde voor de vulgraad zuigen de pompen zout water uit de erosiekuil en wordt 10 PSU opgeteld bij de momentane achtergrondconcentratie. 10 PSU wordt als representatief gezien voor de zoutwaarde van water in een gevulde erosiekuil. Het meenemen van de achtergrondconcentratie in het verpompte water, onafhankelijk van de vulgraad, is toegepast om de numerieke stabiliteit te bevorderen.

Tot slot is in Tabel 5-1 een overzicht opgenomen met welke zoutfluxrelatie is toegepast in welke simulatie(s).

Tabel 5-1 Overzicht van welke zoutfluxrelatie is toegepast bij welke simulatie(s).

Simulatie	Toegepaste zoutfluxrelatie
Kalibratie	Huidige bodem
0 m ZSS (referentiescenario)	Toekomstige bodem
0.5 m ZSS met 2050 Hd data	Combinatie van toekomstige bodem + spuien (50%) en toekomstig bodem + pompen (50%)
1 m ZSS met 2100 Ln en 2100 Hd data	Toekomstige bodem + pompen (spuien niet meer mogelijk)
3 m ZSS met 2100 Ln en 2150 Hd data	Toekomstige bodem + pompen (spuien niet meer mogelijk)
5 m ZSS met 2100 Ln en 2150 Hd data	Toekomstige bodem + pompen (spuien niet meer mogelijk)

Tabel 5-2 Zoutflux relaties Den Oever, huidige bodem.

Den Oever: huidige bodem			
Schutcomplex - in		Spuicomplex - lekverlies	
<i>Vulgraad [ton zout]</i>	<i>Netto/bruto zoutflux [-]</i>	<i>Vulgraad [ton zout]</i>	<i>Netto/bruto zoutflux [-]</i>
0	0.5	0	0
10000	0.5	10000	0
30000	1	30000	1
		Spuicomplex - spuien	
		<i>Spuivolume</i>	<i>Zoutflux uit</i>
		0	Ca * spuivolume
		5 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 0.1 * vulgraad
		7.5 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 0.3 * vulgraad
		10 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 0.6 * vulgraad
		12.5 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 0.9 * vulgraad
		25 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 1.0 * vulgraad

Tabel 5-3 Zoutflux relaties Kornwerderzand, huidige bodem.

Kornwerderzand: huidige bodem			
Schutcomplex - in		Spuicomplex - lekverlies	
<i>Vulgraad [ton zout]</i>	<i>Netto/bruto zoutflux [-]</i>	<i>Vulgraad [ton zout]</i>	<i>Netto/bruto zoutflux [-]</i>
0	1	0	0
7000	1	7000	0
12000	1	12000	1
		Spuicomplex - spuien	
		<i>Spuivolume</i>	<i>Zoutflux uit</i>
		0	Ca * spuivolume
		5 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 0.1 * vulgraad
		7.5 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 0.3 * vulgraad
		10 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 0.6 * vulgraad
		12.5 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 0.9 * vulgraad
		25 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 1.0 * vulgraad

Tabel 5-4 Zoutflux relaties Den Oever, toekomstige bodem + spuien.

Den Oever: toekomstige bodem + spuien			
Schutcomplex - in		Spuicomplex - lekverlies	
<i>Vulgraad [ton zout]</i>	<i>Netto/bruto zoutflux [-]</i>	<i>Vulgraad [ton zout]</i>	<i>Netto/bruto zoutflux [-]</i>
0	0.5	0	0
12000	0.5	12000	0
36000	1	36000	1
		Spuicomplex - spuien	
		<i>Spuivolume</i>	<i>Zoutflux uit</i>
		0	Ca * spuivolume
		5 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 0.1 * vulgraad
		7.5 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 0.3 * vulgraad
		10 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 0.6 * vulgraad
		12.5 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 0.9 * vulgraad
		25 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 1.0 * vulgraad

Tabel 5-5 Zoutflux relaties Kornwerderzand, toekomstige bodem + spuien.

Kornwerderzand: toekomstige bodem + spuien			
Schutcomplex - in		Spuicomplex - lekverlies	
<i>Vulgraad [ton zout]</i>	<i>Netto/bruto zoutflux [-]</i>	<i>Vulgraad [ton zout]</i>	<i>Netto/bruto zoutflux [-]</i>
0	1	0	0
12000	1	12000	0
17000	1	17000	1
		Spuicomplex - spuien	
		<i>Spuivolume</i>	<i>Zoutflux uit</i>
		0	Ca * spuivolume
		5 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 0.1 * vulgraad
		7.5 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 0.3 * vulgraad
		10 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 0.6 * vulgraad
		12.5 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 0.9 * vulgraad
		25 miljoen m ³	Ca * spuivolume + 1.0 * vulgraad

Tabel 5-6 Zoutflux relaties Den Oever, toekomstige bodem + pompen.

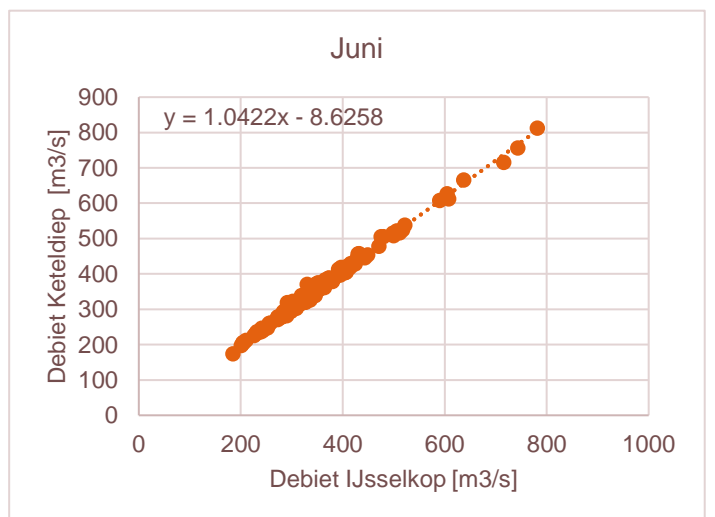
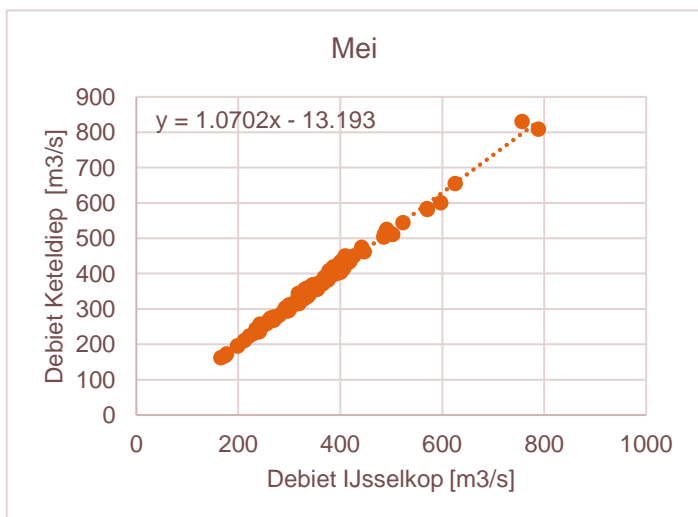
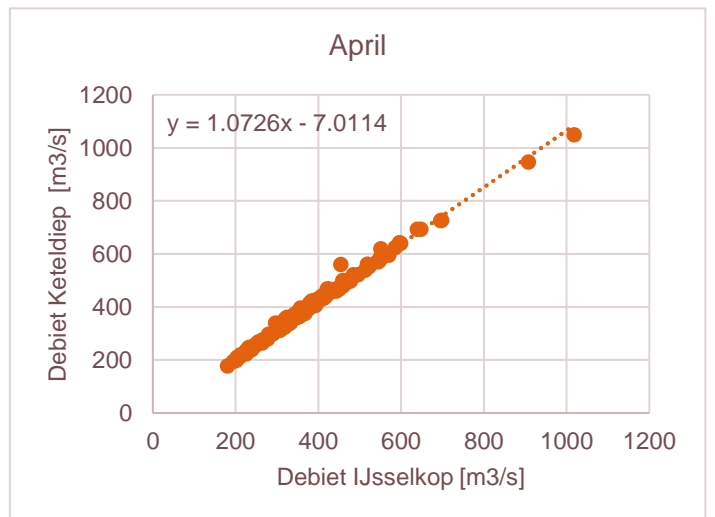
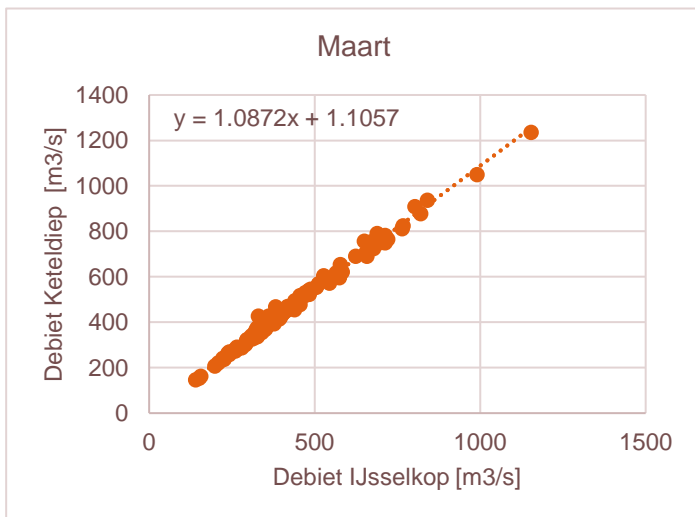
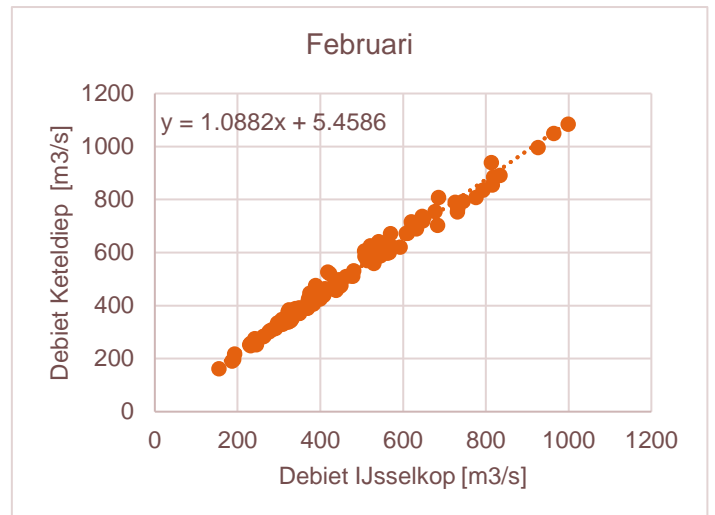
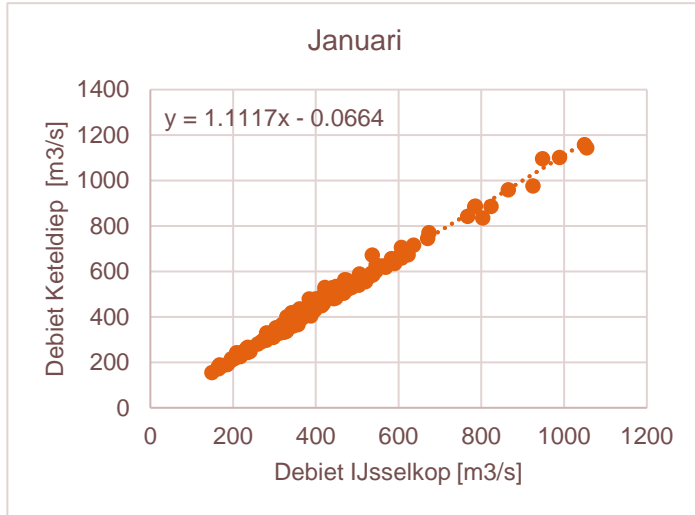
Den Oever: toekomstige bodem + pompen			
Schutcomplex - in		Spuicomplex - lekverlies	
<i>Vulgraad [ton zout]</i>	<i>Netto/bruto zoutflux [-]</i>	<i>Vulgraad [ton zout]</i>	<i>Netto/bruto zoutflux [-]</i>
0	0.5	0	0
12000	0.5	12000	0
36000	1	36000	1
		Spuicomplex - pompen	
		<i>Vulgraad [ton zout]</i>	<i>Zoutflux uit</i>
		0	Ca * pompvolume
		5000	(Ca + 10 PSU) * pompvolume
		36000	(Ca + 10 PSU) * pompvolume

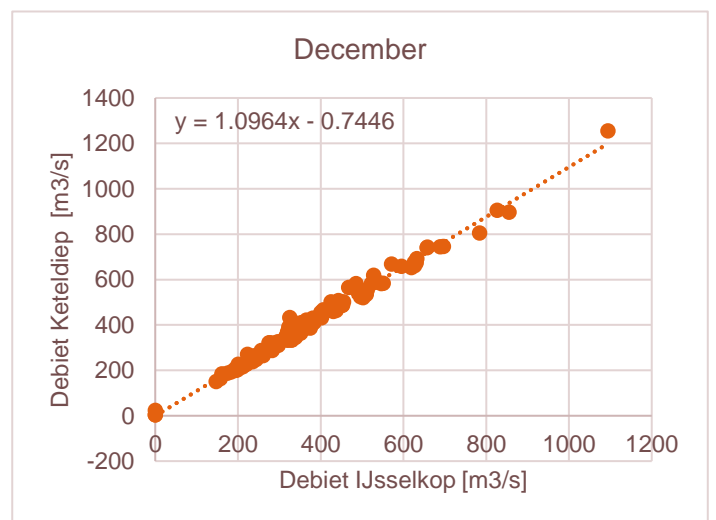
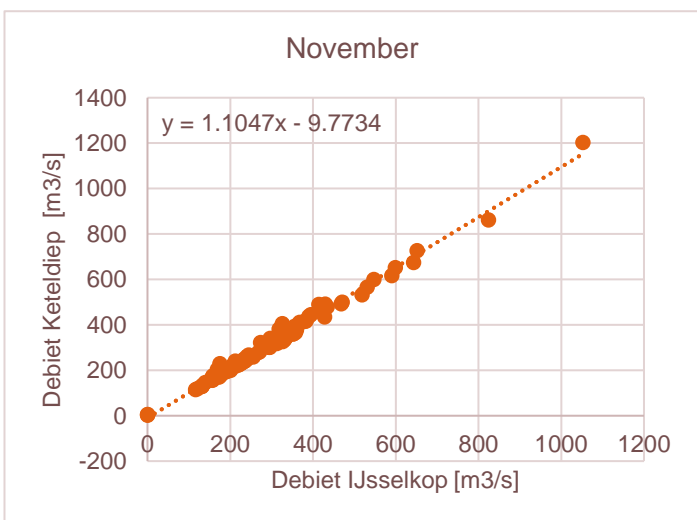
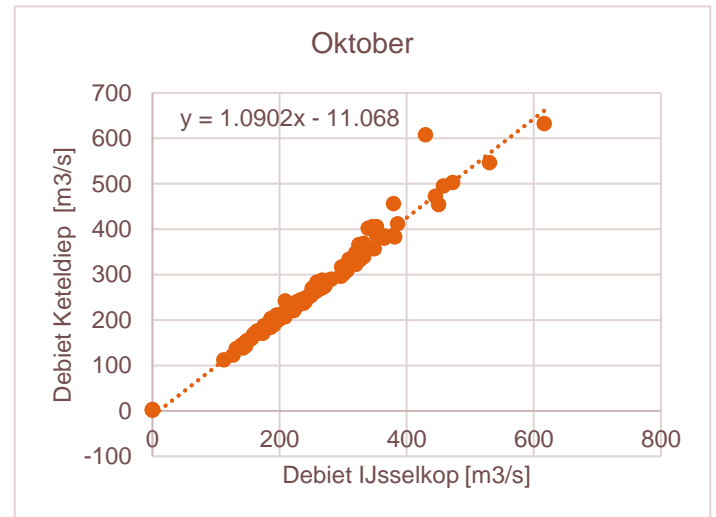
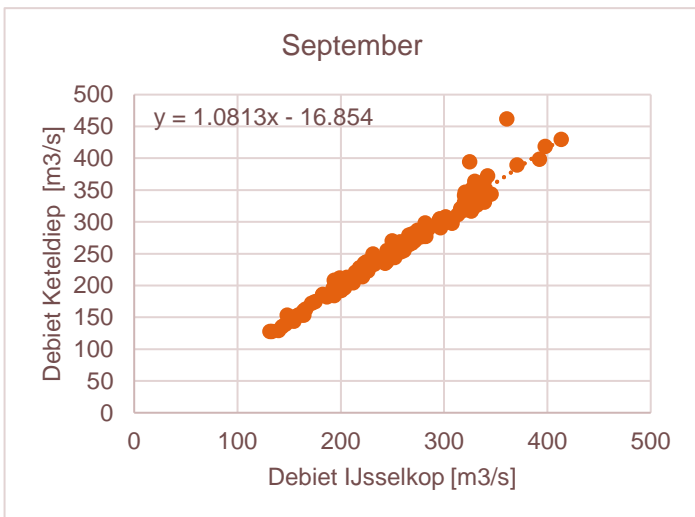
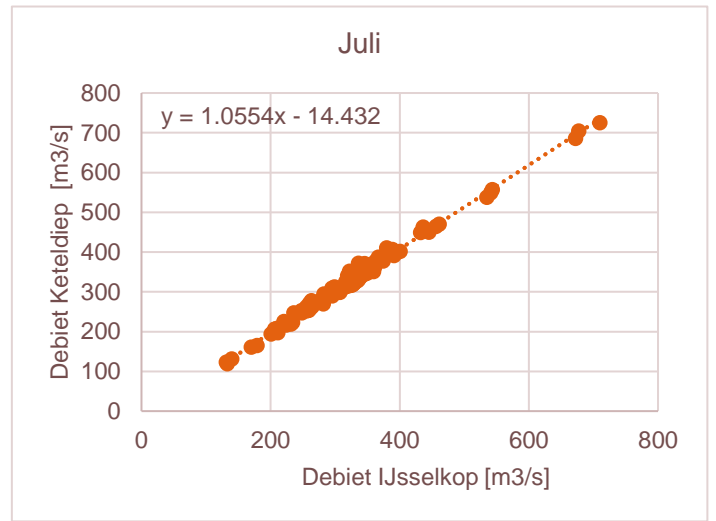
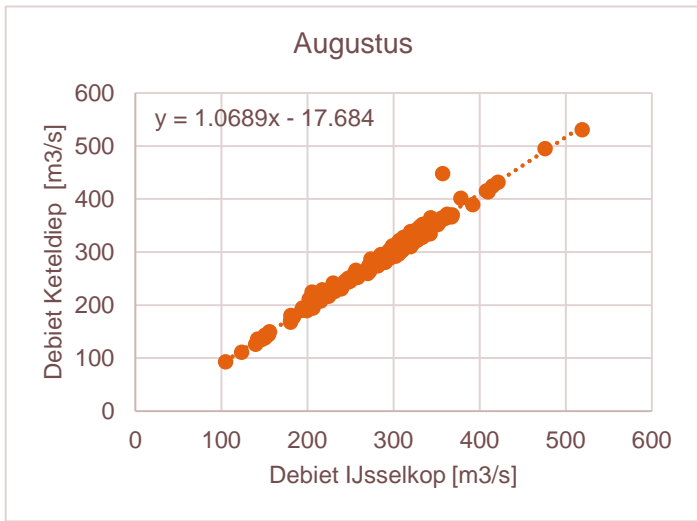
Tabel 5-7 Zoutflux relaties Kornwerderzand, toekomstige bodem + pompen.

Kornwerderzand: toekomstige bodem + pompen			
Schutcomplex - in		Spuicomplex - lekverlies	
<i>Vulgraad [ton zout]</i>	<i>Netto/bruto zoutflux [-]</i>	<i>Vulgraad [ton zout]</i>	<i>Netto/bruto zoutflux [-]</i>
0	1	0	0
12000	1	12000	0
17000	1	17000	1
		Spuicomplex - pompen	
		<i>Vulgraad [ton zout]</i>	<i>Zoutflux uit</i>
		0	Ca * pompvolume
		10000	(Ca + 10 PSU) * pompvolume
		17000	(Ca + 10 PSU) * pompvolume

Appendix B. Afgeleide afvoer IJssel Keteldiep

Onderstaande relaties zijn afgeleid o.b.v. de 50-jarige reeks met LHM4.3, waarbij gekeken is naar de debieten bij het Keteldiep en de IJsselkop.





Appendix C. Afgeleide lateralen per regio

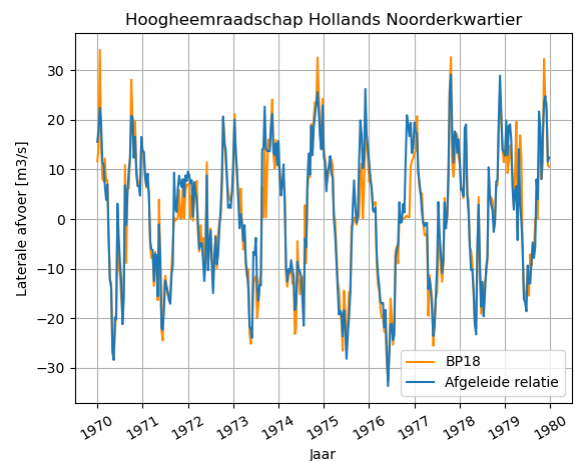
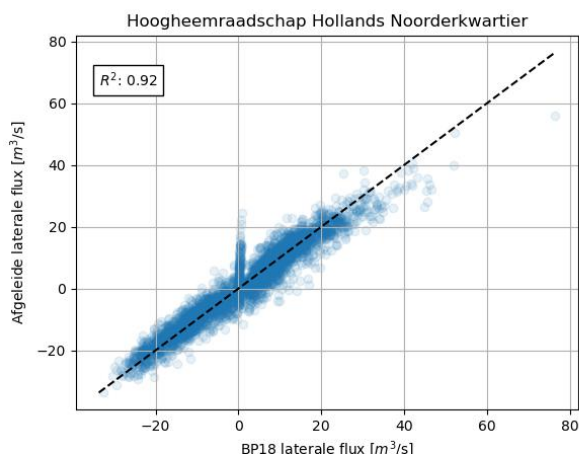
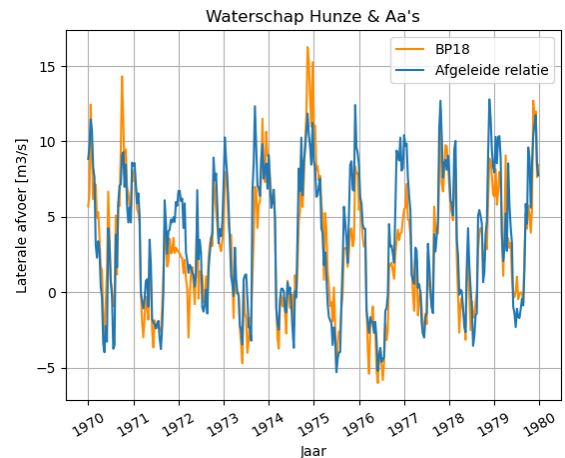
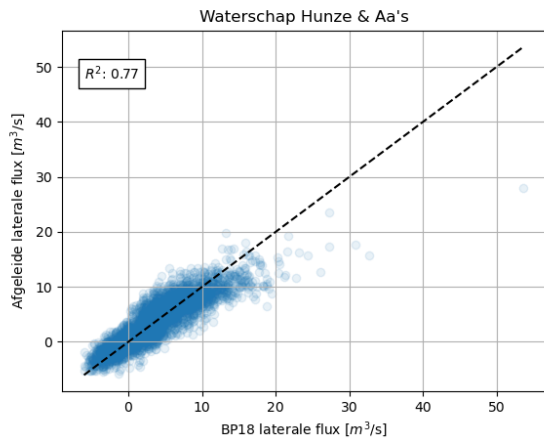
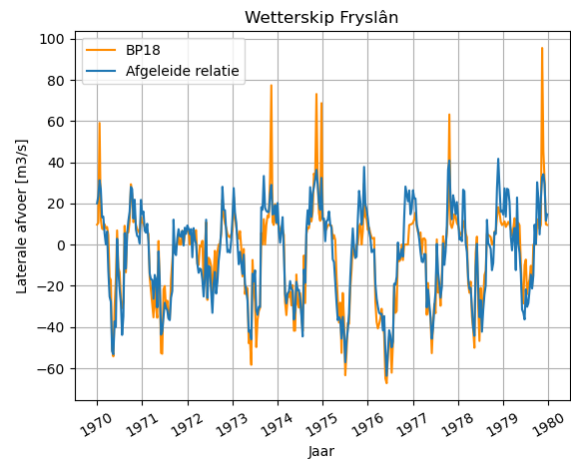
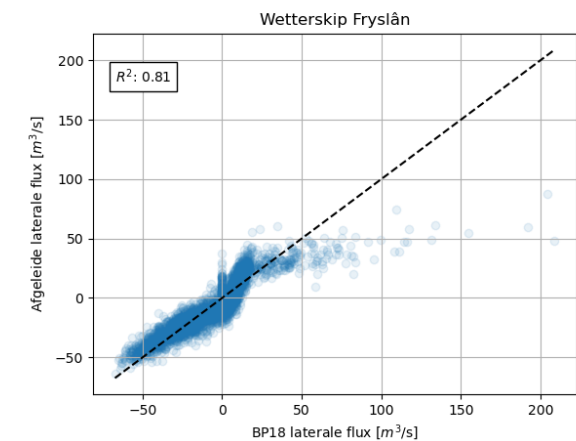
Onderstaande tabel toont de resulterende coëfficiënten en de bijbehorende P-waarden (alpha 0.05) van de meervoudige lineaire regressie om de laterale watervraag/-toevoer af te leiden gerelateerd aan het neerslagoverschot. De variabele 'Netto' staat voor het netto neerslagoverschot in de huidige decade. Het achtervoegsel '_-1' duidt op de vorige decade, enzovoorts voor '_-2' en '_-3'. Het achtervoegsel '_sq' duidt op de wortel. De variabelen 'jan_bool' tot 'dec_bool' zijn maandvariabelen. De licht gemarkeerde cellen zijn niet significante waarden (P-waarde >0.005).

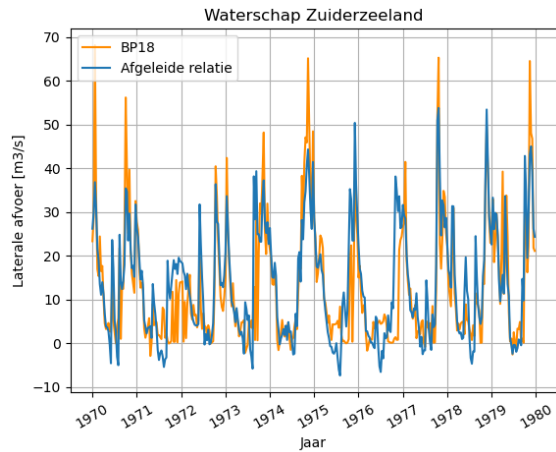
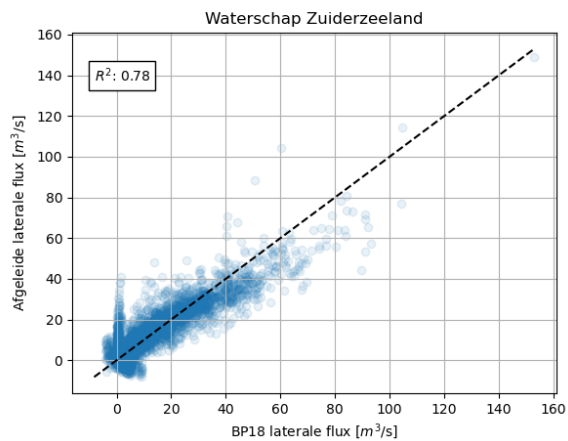
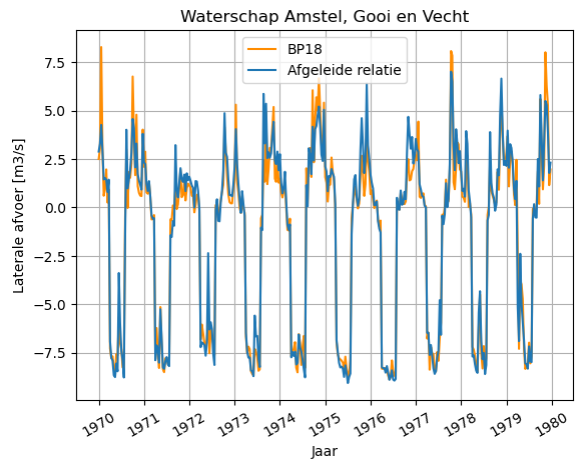
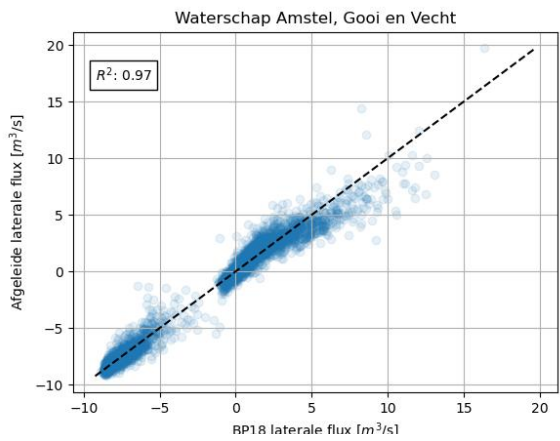
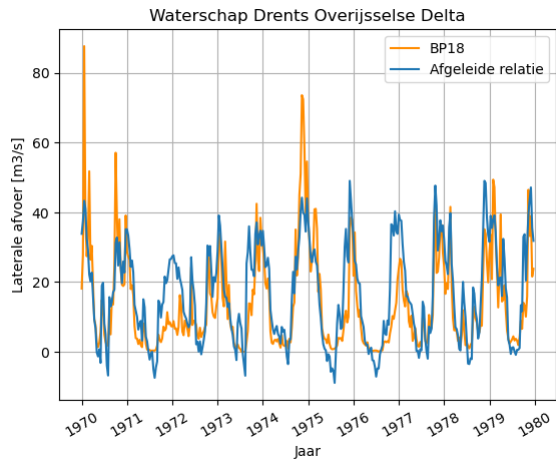
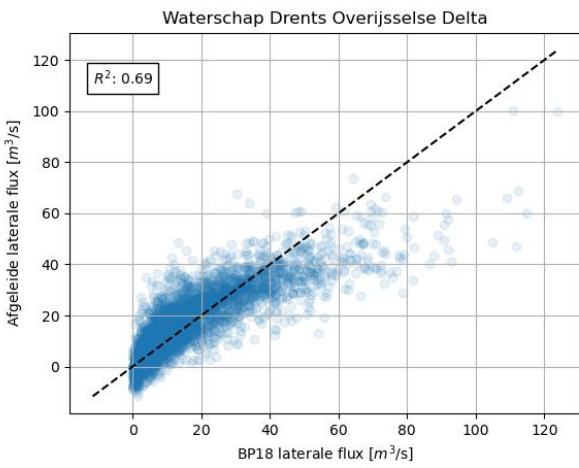
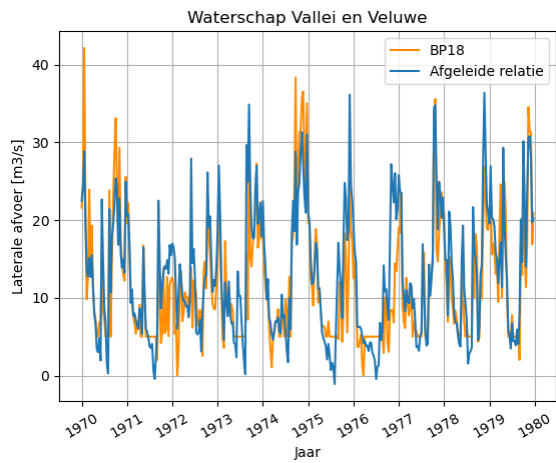
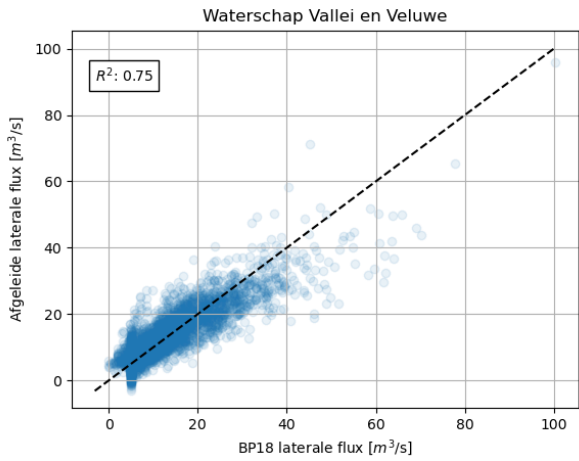
Variabelen	Totaal		Wetterskip Fryslân		Vallei en Veluwe		Zuiderzeeland		Amstel, Gooi en Vecht	
	Waarde	P-value	Waarde	P-value	Waarde	P-value	Waarde	P-value	Waarde	P-value
Rsquared adjusted	0.839		0.806		0.753		0.78		0.968	
intercept	25.9983	0.000	-8.7742	0.000	8.2865	0.000	6.012	0.000	-1.9961	0.000
Netto	1.841	0.000	0.5633	0.000	0.1877	0.000	0.1828	0.000	0.0506	0.000
Netto_-1	1.1728	0.000	0.2574	0.000	0.0924	0.000	0.1564	0.000	0.021	0.000
Netto_-2	0.7062	0.000	0.1669	0.000	0.0611	0.000	0.09	0.000	0.0094	0.000
Netto_-3	0.6835	0.000	0.1317	0.000	0.067	0.000	0.092	0.000	0.009	0.000
Netto_sq	0.0168	0.000	0.0002	0.317	0.0028	0.000	0.0058	0.000	0.0006	0.000
Netto_-1_sq	0.0106	0.000	0.0005	0.029	0.0013	0.000	0.0029	0.000	0.0002	0.000
Netto_-2_sq	0.0042	0.000	-0.0003	0.188	0.0006	0.000	0.0011	0.000	6.02E-05	0.001
jan_bool	40.6641	0.000	3.6864	0.000	2.8253	0.000	6.3319	0.000	2.4579	0.000
feb_bool	51.7391	0.000	6.6869	0.000	4.1091	0.000	6.4233	0.000	2.5525	0.000
mar_bool	52.8385	0.000	10.2425	0.000	-0.8407	0.002	6.0981	0.000	2.5339	0.000
apr_bool	10.8206	0.000	0.7178	0.220	1.0997	0.000	-0.0685	0.865	2.0807	0.000
mei_bool	8.4946	0.001	2.3871	0.000	2.7545	0.000	1.0439	0.016	-4.6325	0.000
jun_bool	-10.2023	0.000	-4.3629	0.000	2.2606	0.000	0.0901	0.844	-4.8069	0.000
jul_bool	-29.5967	0.000	-9.1903	0.000	0.7248	0.014	-2.3903	0.000	-5.0821	0.000
aug_bool	-43.3706	0.000	-10.6768	0.000	-0.9932	0.000	-4.811	0.000	-5.2889	0.000
sep_bool	-41.0857	0.000	-7.9714	0.000	-3.0583	0.000	-5.3957	0.000	1.7845	0.000
okt_bool	-14.3079	0.000	-0.105	0.859	1.6722	0.000	-4.8859	0.000	1.9796	0.000
nov_bool	-16.8819	0.000	-2.0072	0.001	-3.0336	0.000	-0.9427	0.028	1.9762	0.000
dec_bool	16.8867	0.000	1.8189	0.005	0.7663	0.010	4.5189	0.000	2.4491	0.000

Variabelen	Hollands Noorderkwartier		Hunze & Aa's		Noorderzijlvest		Vechtstromen		Drents Overijsselse Delta	
	Waarde	P-value	Waarde	P-value	Waarde	P-value	Waarde	P-value	Waarde	P-value
Rsquared adjusted	0.923		0.771		0.771		0.691		0.691	
intercept	-1.9146	0.000	1.8775	0.000	1.8775	0.000	10.3149	0.000	10.3149	0.000
Netto	0.3033	0.000	0.0804	0.000	0.0804	0.000	0.1962	0.000	0.1962	0.000
Netto_-1	0.1685	0.000	0.0556	0.000	0.0556	0.000	0.1829	0.000	0.1829	0.000
Netto_-2	0.0914	0.000	0.0369	0.000	0.0369	0.000	0.1068	0.000	0.1068	0.000
Netto_-3	0.0724	0.000	0.0395	0.000	0.0395	0.000	0.1162	0.000	0.1162	0.000
Netto_sq	0.0004	0.000	0.0006	0.000	0.0006	0.000	0.0029	0.000	0.0029	0.000
Netto_-1_sq	0.0003	0.000	0.0003	0.000	0.0003	0.000	0.0023	0.000	0.0023	0.000
Netto_-2_sq	0.000002091	0.980	0.0002	0.000	0.0002	0.000	0.0011	0.000	0.0011	0.000
jan_bool	3.4616	0.000	1.6611	0.000	1.6611	0.000	9.2895	0.000	9.2895	0.000
feb_bool	5.049	0.000	2.6914	0.000	2.6914	0.000	10.7677	0.000	10.7677	0.000
mar_bool	6.2935	0.000	3.0275	0.000	3.0275	0.000	11.2281	0.000	11.2281	0.000
apr_bool	0.852	0.000	-1.2749	0.000	-1.2749	0.000	4.3443	0.000	4.3443	0.000
mei_bool	0.1633	0.464	0.6927	0.000	0.6927	0.000	2.6965	0.000	2.6965	0.000
jun_bool	-4.0946	0.000	0.1185	0.431	0.1185	0.431	0.2372	0.685	0.2372	0.685
jul_bool	-6.429	0.000	-0.9701	0.000	-0.9701	0.000	-2.6448	0.000	-2.6448	0.000
aug_bool	-5.7519	0.000	-1.9576	0.000	-1.9576	0.000	-5.9669	0.000	-5.9669	0.000
sep_bool	-3.8478	0.000	-2.1993	0.000	-2.1993	0.000	-9.0992	0.000	-9.0992	0.000
okt_bool	-0.1374	0.511	0.6396	0.000	0.6396	0.000	-7.0553	0.000	-7.0553	0.000
nov_bool	0.2031	0.359	-0.8788	0.000	-0.8788	0.000	-5.6601	0.000	-5.6601	0.000
dec_bool	2.3236	0.000	0.3273	0.024	0.3273	0.024	2.1777	0.000	2.1777	0.000

Appendix D. Afgeleide lateralen tijdseries

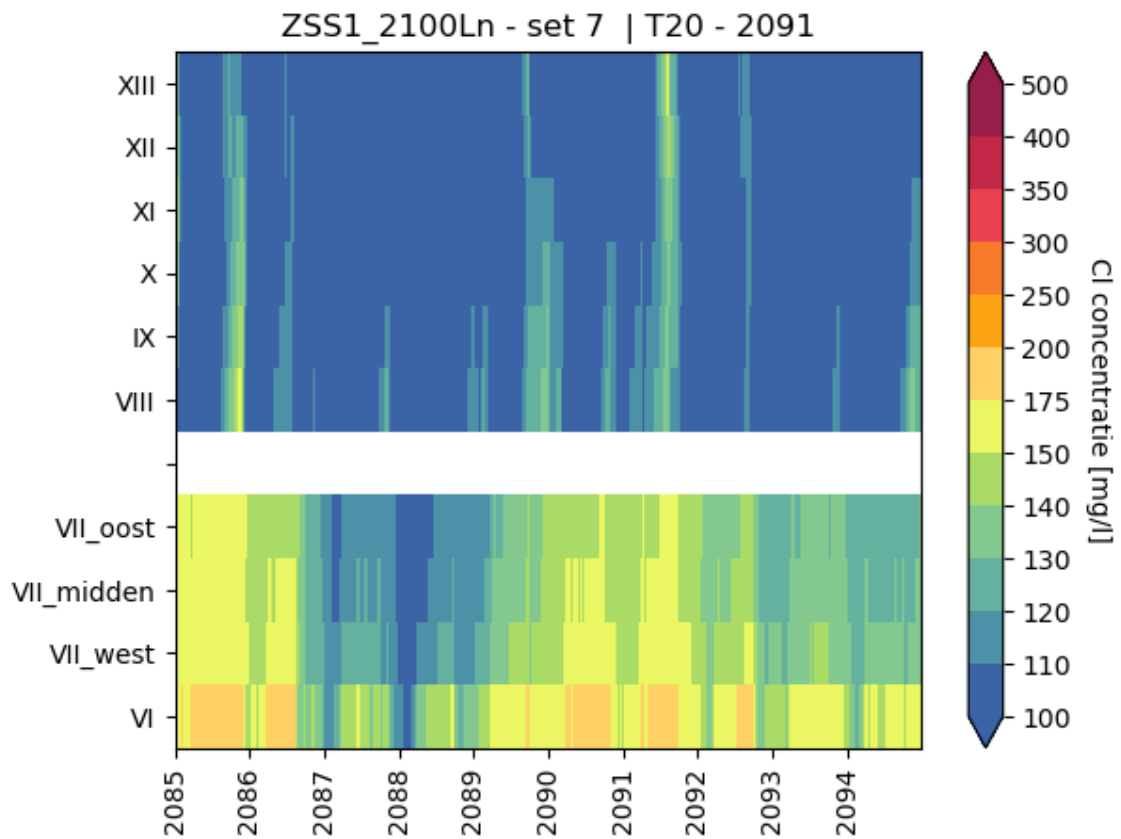
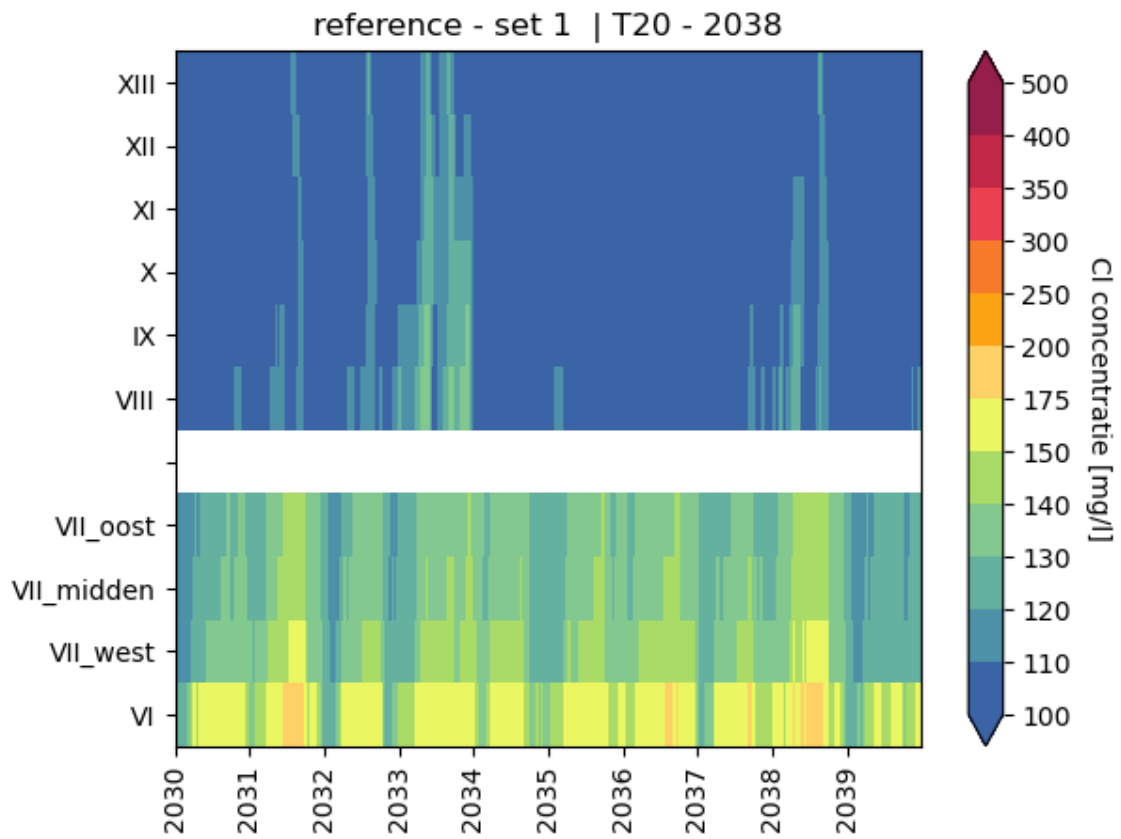
In deze bijlage zijn voor alle regio's de afgeleide lateralen weergegeven tegen de oorspronkelijke LHM berekende laterale fluxen. Voor Waterschap Hunze & Aa's en Waterschap Noorderzijlvest geldt, dat deze op dezelfde tijdserie uit het LHM zijn gebaseerd (met elk 50% van de afvoer op de betreffende locatie). Hierdoor zijn de afgeleide tijdseries gelijk. Ditzelfde geldt ook voor waterschap Vechtstromen en waterschap Drents Overijsselse Delta. De figuren van Noorderzijlvest en Vechtstromen worden hier daarom niet getoond. Voor alle afvoeren geldt dat negatieve afvoeren onttrekkingen uit het IJsselmeer zijn.

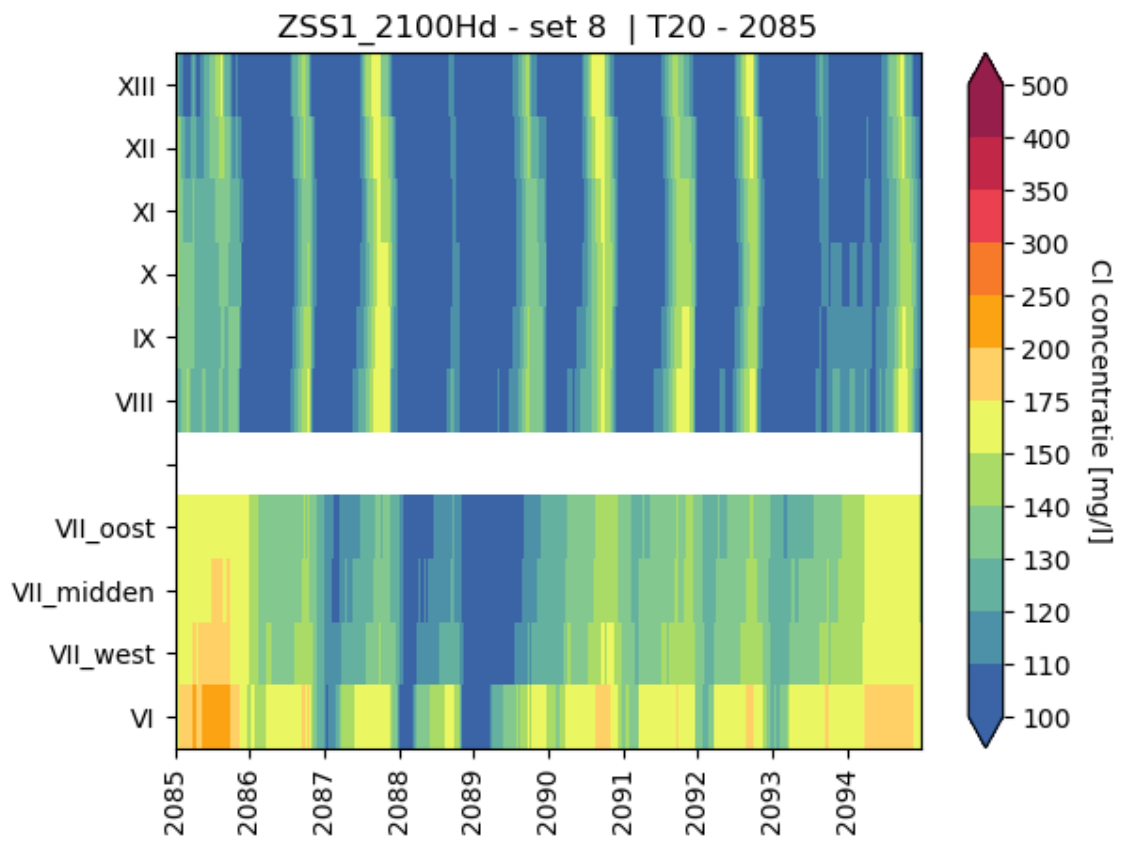
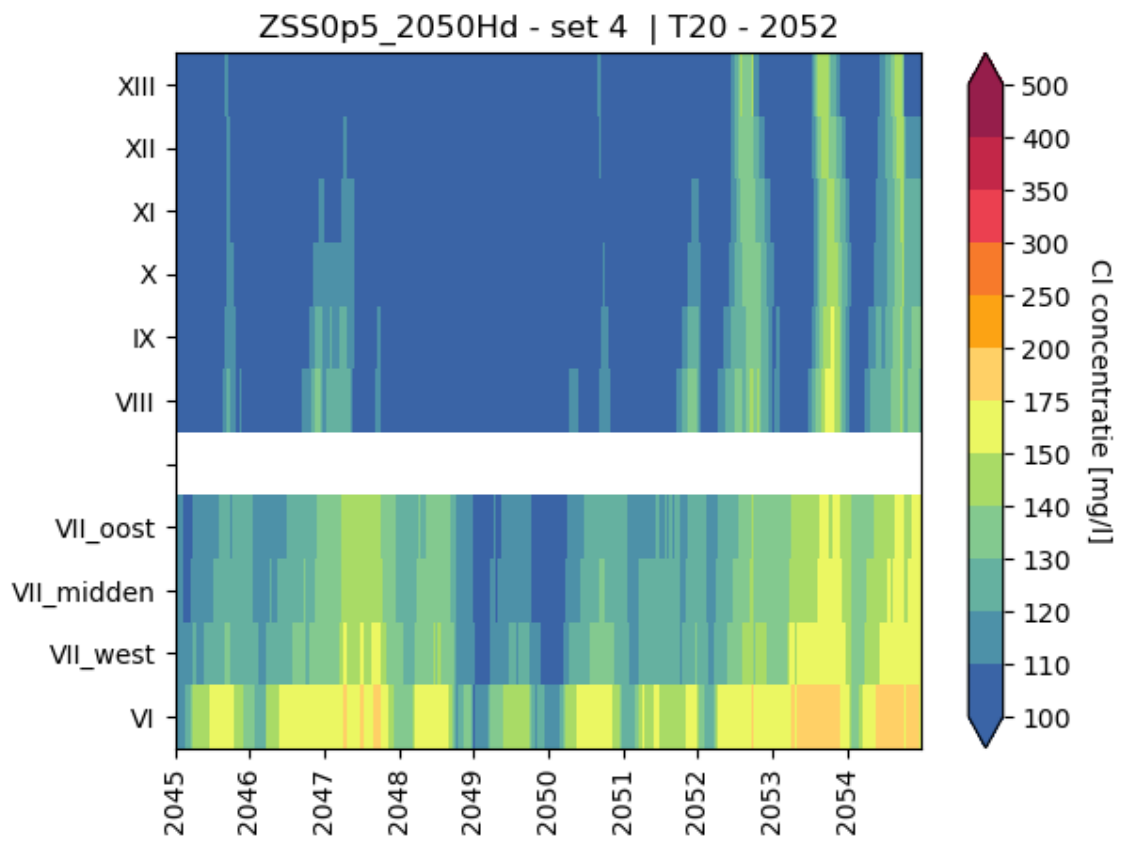




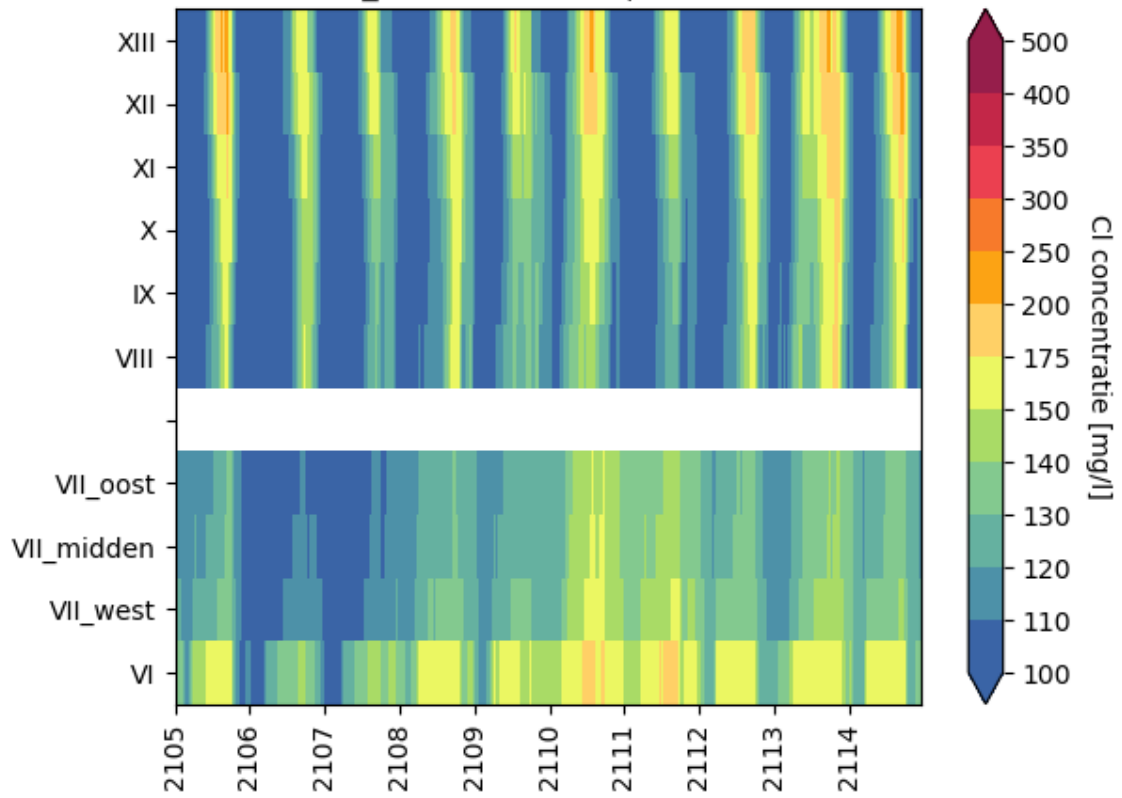
Appendix E. Representatieve dwarsdoorsnedes bakjes

Dwarsdoorsnedes representatief T20 decennium bakjes IJsselmeer en Markermeer.

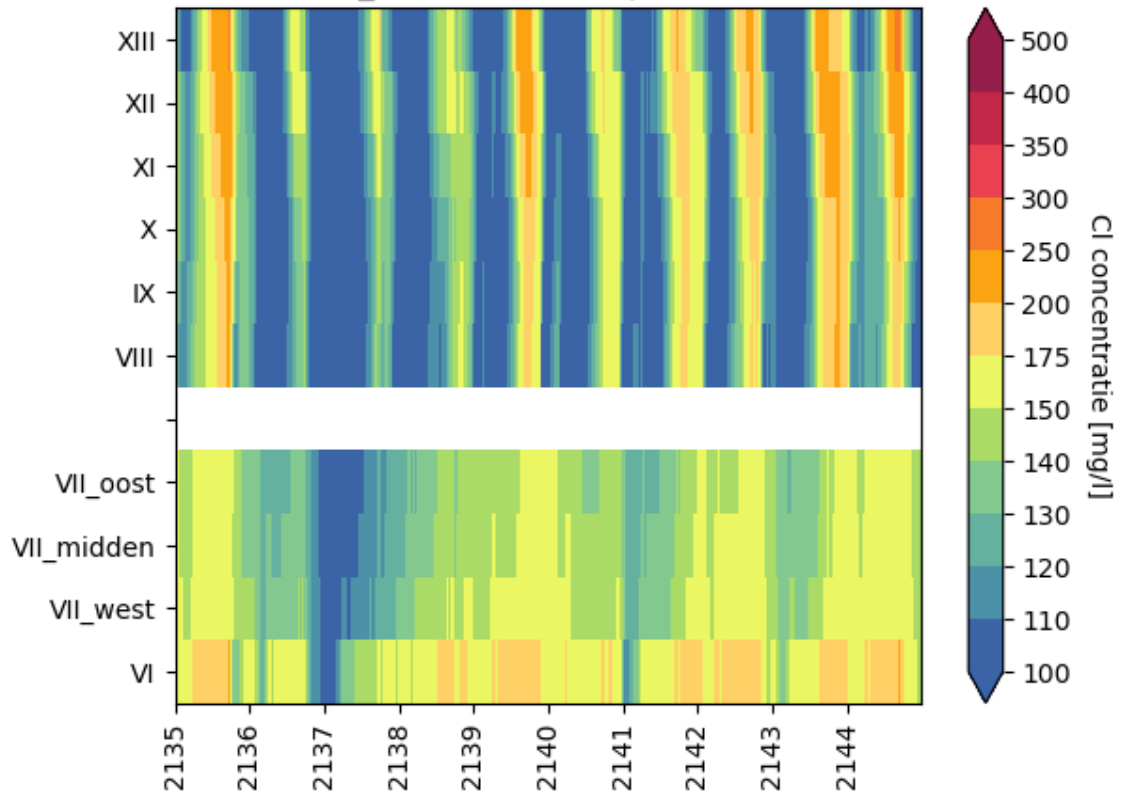




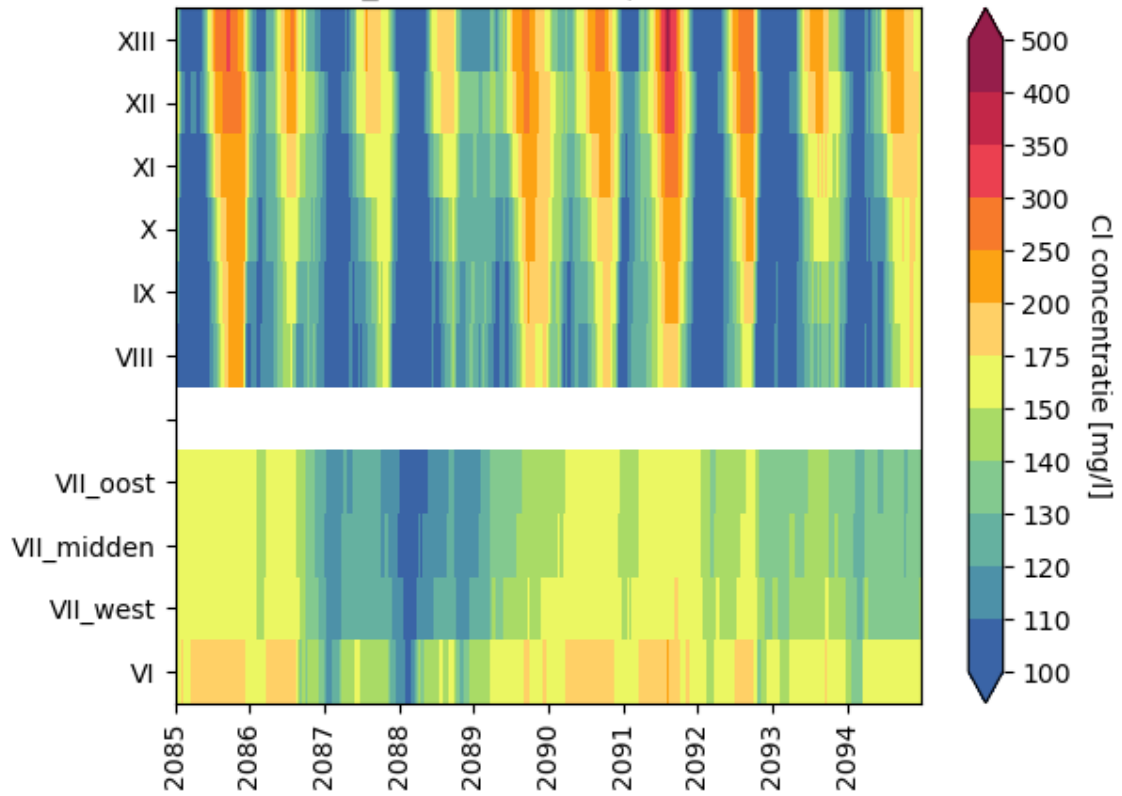
ZSS3_2100Ln - set 6 | T20 - 2110



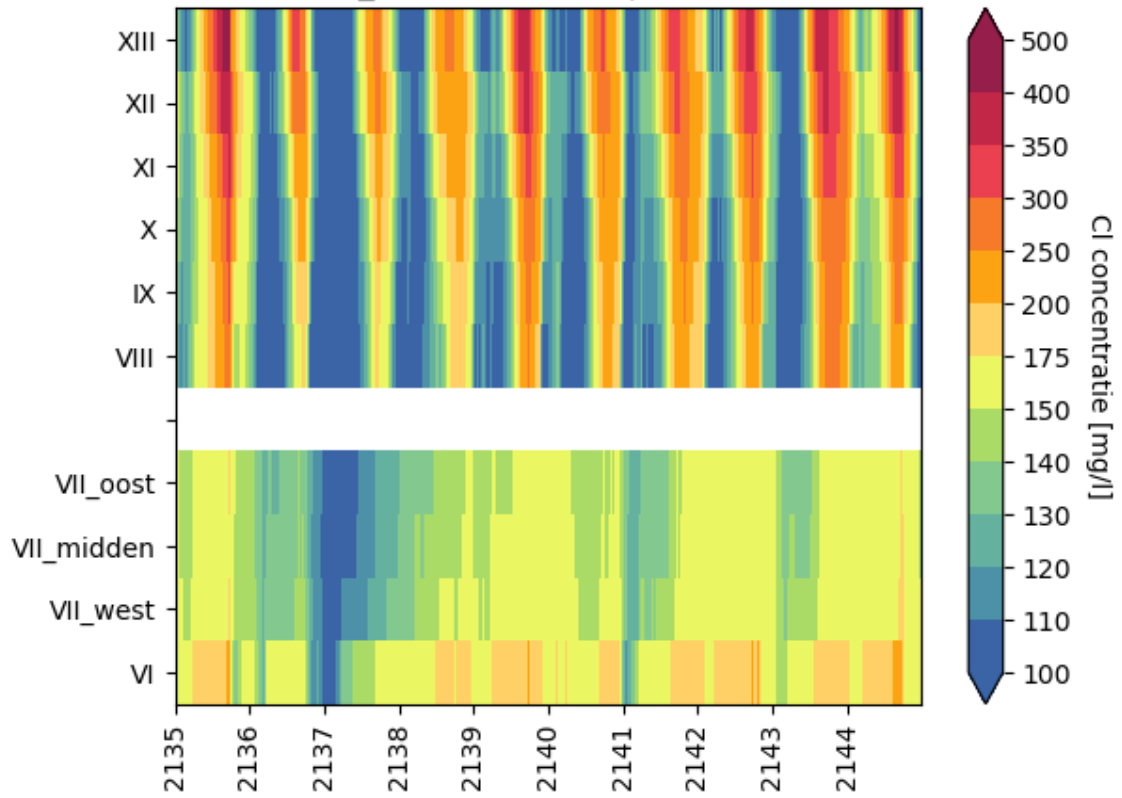
ZSS3_2150Hd - set 4 | T20 - 2144



ZSS5_2100Ln - set 7 | T20 - 2091



ZSS5_2150Hd - set 4 | T20 - 2144



Over Arcadis

Arcadis is de leidende wereldwijd opererende datagedreven duurzame ontwerp-, advies- en consultancyorganisatie op het gebied van de natuurlijke en gebouwde omgeving. Wij zijn met 36.000 architecten, data analisten, ingenieurs, projectplanners, water- en duurzaamheidexperts. Onze gedeelde passie is: Improving quality of life. Toewijding aan de strategie 'accelerating a planet positive future' onderschrijft onze wereldwijde samenwerking met klanten en hoe we hen helpen met duurzame projectkeuzes. We combineren digitale met mensgerichte innovaties en omarmen toekomstgerichte vaardigheden op het gebied van milieu, energie, water, gebouwen, transport en infrastructuur. We werken vanuit meer dan dertig landen en rapporteerden in 2023 een bruto omzet van 5 miljard euro.
www.arcadis.com.

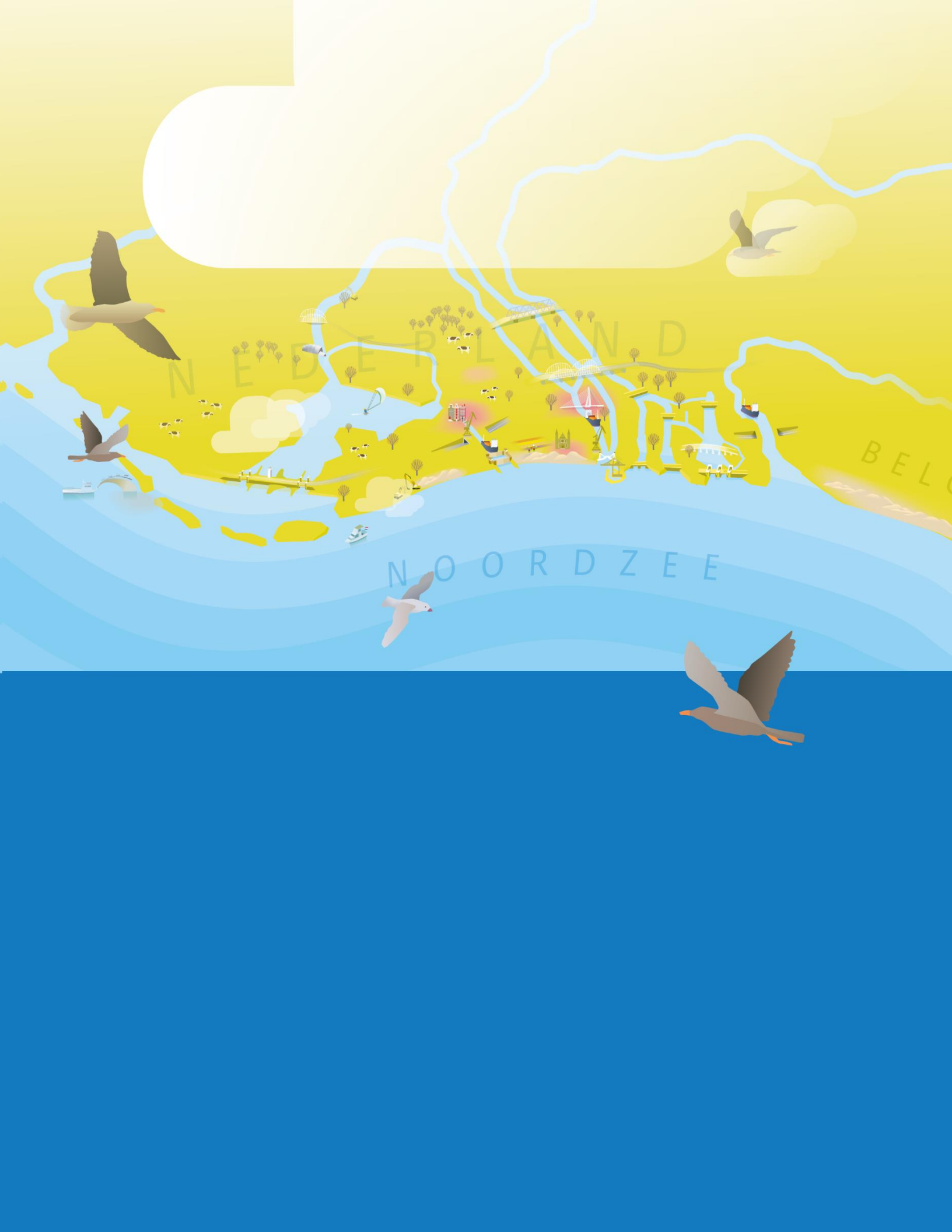
www.arcadis.com

Contactpersoon



Michiel van Reen
Projectleider Water

E michiel.vanreen@arcadis.com
T 06-50736328



NEDERLAND

NOORDZEE

BELGIË