

Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II

Systemanalyses zoetwater regio Volkerak-Zoommeer

Colofon

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

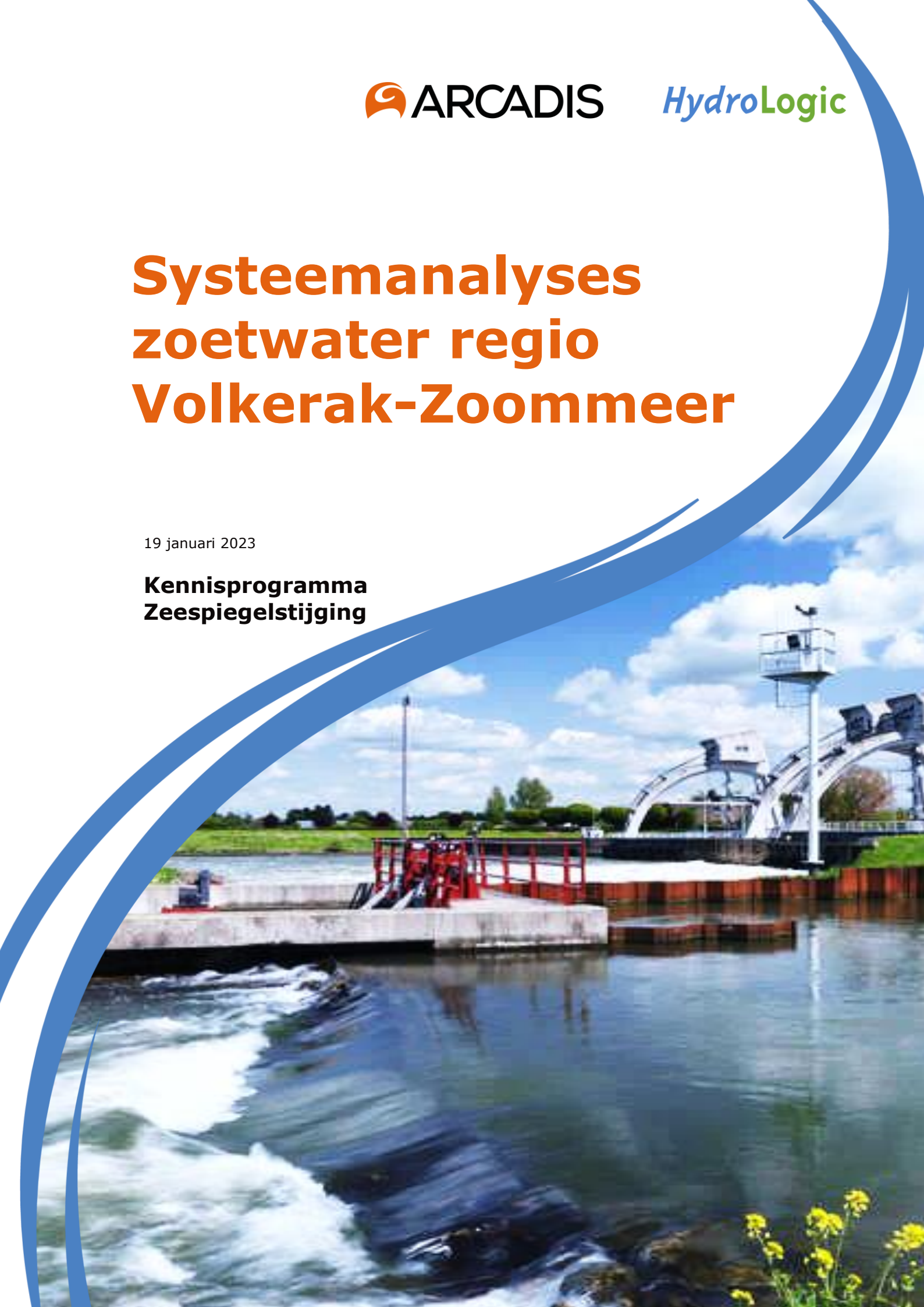
Meer informatie over het kennisprogramma en een overzicht van alle publicaties staat op kennisprogrammazeespiegelstijging.nl.

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

Systemeanalyses zoetwater regio Volkerak-Zoommeer

19 januari 2023

**Kennisprogramma
Zeespiegelstijging**



Samenvatting	1
1 Inleiding	3
1.1 Aanleiding	3
1.2 Doel en kennisvragen	3
1.3 Modellerstrategie	4
1.4 Leeswijzer	4
1.5 Definities en afkortingen	5
2 Het VZM-systeem	7
2.1 Inleiding.....	7
2.2 De huidige beheerstrategie	8
2.3 Overzicht systeemvariabelen	9
2.3.1 Rivieren	9
2.3.2 Neerslag en Verdamping	10
2.3.3 Volkeraksluizen.....	11
2.3.4 Krammersluizen.....	12
2.3.5 Bergse Diepsluis	16
2.3.6 Bathse spuisluis	17
2.3.7 Kreekraksluizen	17
2.3.8 Grondwater (zoute kwel)	18
2.3.9 Directe watervraag waterschappen.....	19
2.3.10 Overige kleine posten	20
2.3.11 Samenvatting systeemvariabelen.....	22
3 Methodiek	25
3.1 Modellerstrategie	25
3.2 Gebruikte modelschematisatie	26
3.3 De modelexercities.....	29
3.4 De modelinvoer	32
3.4.1 De assen van de hyperkubus	32
3.4.2 De constante posten in het model	38
3.4.3 Posten die niet worden meegenomen in het model	39
3.5 Post-processing.....	40
3.5.1 Berekening zoetwateroverschot	40
4 Resultaten.....	43
4.1 Modelexercitie 1: Huidige infrastructuur	43
4.1.1 A1 Tot welke mate van zeespiegelstijging kan de waterstand gehandhaafd blijven?	43
4.1.2 A3 Tot welke mate van zeespiegelstijging blijft de chlorideconcentratie op een voldoende laag niveau?.....	47
4.1.3 C2 Hoe verandert de aan- of afvoercapaciteit van de kunstwerken als gevolg van zeespiegelstijging?	50
4.2 Modelexercitie 2: Vergroten houdbaarheid zoetwaterbuffer 52	
4.2.1 A1 Tot welke mate van zeespiegelstijging kan de waterstand gehandhaafd blijven?	52
4.2.2 A3 Tot welke mate van zeespiegelstijging blijft de chlorideconcentratie op een voldoende laag niveau?.....	53

4.2.3	B1 Hoe verandert de doorspoelbehoefte als gevolg van een toename van zoute kwel als gevolg van zeespiegelstijging?.....	55
4.2.4	A2 Tot welke mate van zeespiegelstijging kan de waterbeschikbaarheid gehandhaafd blijven?	56
5	Discussie.....	61
5.1	Kalibratie, validatie en de gekozen initiele zoutBakjesmodel	61
5.2	Initiële zoutwaarde Bakjesmodel	61
5.3	De Krammersluizen	61
5.4	Gevoeligheid randvoorwaarden.....	62
5.5	Oprekken streefpeilen	62
6	Conclusies, aanbevelingen en kennisleemten.....	65
6.1	Beantwoording kennisvragen	65
6.2	Aanbevelingen en kennisleemten.....	68
7	Referenties.....	70



Samenvatting



Samenvatting

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

Voor deze studie is een bakjesmodel gebruikt, wat de waterstand en de chlorideconcentratie berekent over een tijdsspanne van 2 jaar. Dit model was vooraf aan deze studie al gebouwd en voor zowel de hydrologie als de chlorideconcentratie gevalideerd.

Voor deze studie zijn twee sets van 1620 scenario's doorgerekend. Bij alle scenario's is de aanname gedaan dat de dijken en kades aan de randen van het VZM meegroeien met de zeespiegelstijging. De eerste set (modelexercitie 1) focust op het VZM-systeem met de huidige infrastructuur en bijbehorende randvoorwaarden. De tweede set (modelexercitie 2) beschouwt het VZM-systeem zonder infrastructurele grenzen waarbij er aangenomen wordt dat op een aantal plekken pompen aanwezig zijn. Daarnaast ligt de focus van deze studie op de huidige beheerstrategie voor zowel de waterstand als de chlorideconcentratie.

De modeluitkomsten laten het volgende zien. De Innovatieve-Zoet-Zout Scheiding (IZSS) van de Krammersluizen, die in 2025 operationeel is, speelt een grote rol in de houdbaarheid van het systeem in relatie tot een stijgende zeespiegel. Dit geldt voor zowel de houdbaarheid van de waterstand als de houdbaarheid van het chloridegehalte. De IZSS is namelijk afhankelijk van vrij verval waardoor het systeem niet meer functioneert als de zeespiegel met $\sim 1,25$ m is gestegen. Wanneer de IZSS niet meer functioneert neemt de zoutvracht flink toe, en er wordt niet meer voldaan aan de chlorideconcentratie-eis. Daarnaast spelen de Brabantse rivierdebieten aan de randen van het VZM en de daaraan gekoppelde neerslag ook een grote rol in de houdbaarheid van de waterstand.

De resultaten laten zien dat met de huidige infrastructuur de doorspoelbehoefte toeneemt en de spuicapaciteit bij Bath afneemt (verval neemt af) met een stijgende zeespiegel. Hierdoor wordt het handhaven van de waterstand en de chlorideconcentratie lastiger naarmate de zeespiegel stijgt. Voor de waterstand geldt dit voor de meest water aanvoerende scenario's en voor de chlorideconcentratie voor de minst water aanvoerende scenario's. Daarnaast is uit de studie gebleken dat het effect van zoute kwel relatief gering is.



1

Inleiding

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS) ontwikkelt kennis om Nederland voor te bereiden op zeespiegelstijging tot 5 m. Spoor 2, 'Systeemverkenningen', binnen het KP ZSS focust zich op de houdbaarheid en oprekbaarheid van de voordeurstrategieën voor 1) Zandige Kust, 2) Waterveiligheid en 3) Zoetwater (verziltingsproblematiek). Deze studie is onderdeel van 'Spoor 2 – Zoetwater'. Voor vier strategische zoetwaterbuffers verbonden aan de Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatersysteem is de houdbaarheid en oprekbaarheid onderzocht door middel van een modelstudie. Daarnaast is ook de waterverdeling van het bovenregionale systeem beschouwd:

1. Volkerak-Zoommeer (VZM) = voorliggend rapport
2. Rijn-Maasmonding (RMM) (Arcadis/Hydrologic, 2023b)
3. Amsterdam-Rijnkanaal en het Noordzeekanaal (ARK-NZK) (Arcadis/Hydrologic, 2023c)
4. IJsselmeer/ Markermeer (IJM) (Arcadis/Hydrologic, 2023d)
5. Het bovenregionaal waterverdelingssysteem (BRWVS) (Arcadis/Hydrologic, 2023e)

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

1.2 Doel en kennisvragen

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

De volgende kennisvragen zijn de 'must-have' kennisvragen vanuit de vraagspecificatie die aan de voorkant van het KP ZSS, Spoor 2 - Zoetwater, zijn gedefinieerd voor de regio van het VZM (Deltares, 2021; Rijkswaterstaat, 2021). De 'must-have' kennisvragen onder **A**, **B**, en **C**, worden in deze rapportage beantwoord binnen de kaders en reikwijdte van deze studie. Daarbij is de 'should-have' kennisvraag A2 toegevoegd aangezien deze ook binnen de studie ook beantwoord wordt:

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

- **A1** Tot welke mate van zeespiegelstijging kan de waterstand gehandhaafd blijven?
- **A2** Tot welke mate van zeespiegelstijging kan de waterbeschikbaarheid gehandhaafd blijven?
- **A3** Tot welke mate van zeespiegelstijging blijft de chlorideconcentratie op een voldoende laag niveau?

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

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

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

- **C1** Tot welke niveau van zeespiegelstijging loopt de functionele levensduur van de huidige kunstwerken?

- **C2** Hoe verandert de aan- of afvoercapaciteit van de kunstwerken als gevolg van zeespiegelstijging?
- **C3** Hoe verandert de zoutvracht door de kunstwerken als gevolg van zeespiegelstijging?

D. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) zoute kwel:

- **D1** Hoe verandert de zoute kwel naar de polders als gevolg van zeespiegelstijging?
- **D2** Hoe verandert de zoute kwel door en onderlangs de dammen als gevolg van zeespiegelstijging?

E. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) randvoorwaarden op Hollands Diep, Oosterschelde en Westerschelde:

- **E1** Hoe verandert de waterbeschikbaarheid op het Hollands Diep als gevolg van zeespiegelstijging en rivierafvoer?
- **E2** Hoe verandert de chlorideconcentratie op het Hollands Diep als gevolg van zeespiegelstijging en rivierafvoer?
- **E3** In hoeverre beïnvloeden mogelijke maatregelen in de Rijn-Maasmonding de waterbeschikbaarheid en chlorideconcentratie op het Hollands Diep?
- **E4** In hoeverre beïnvloeden mogelijk gewijzigde afspraken over de landelijke waterverdeling de waterbeschikbaarheid en chlorideconcentratie op het Hollands Diep?

De kennisvragen over de ontwikkeling van zoute kwel in relatie tot zeespiegelstijging (**D**) zijn beantwoord in de studie van Deltares (2022) en worden daarom binnen dit rapport niet verder behandeld. Wel worden de uitkomsten van de studie van Deltares (2022) gebruikt in deze studie.

De kennisvragen over de randvoorwaarden op het Hollands Diep, Oosterschelde en Westerschelde (**E**) worden beantwoord in de rapportage van het bovenregionaal waterverdelingsstelsel (Arcadis/Hydrologic, 2023e). Ook deze worden dus niet in deze rapportage behandeld.

1.3 Modelleerstrategie

De houdbaarheid en oprekbaarheid van het VZM systeem worden onderzocht door modelmatig de verschillende vrijheidsgraden (zoals bijvoorbeeld neerslag en de debieten bij de Volkeraksluizen) te exploreren die bepalen hoe zowel waterstand als chlorideconcentratie reageren. De verschillende vrijheidsgraden beschrijven een multidimensionale parameterruimte of hyperkubus waarvan elke vrijheidsgraad één as vormt. De parameterruimte wordt geëxploreerd door vele verschillende combinaties van waarden langs de verschillende vrijheidsgraden door te rekenen. De verkende parameterruimte van het VZM systeem, welke aan de basis ligt voor de uitgevoerde modelstudie, is in meer detail toegelicht in Hoofdstuk 3. Daarnaast is in dit hoofdstuk de modelleerstrategie verder toegelicht.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bevat de systeemanalyse van het VZM waarin de beheerstrategie en alle systeemvariabelen worden toegelicht en het effect van zeespiegelstijging op deze individuele variabelen.

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

Hoofdstuk 4 beschrijft de resultaten van model en de duiding van deze uitkomsten.

Hoofdstuk 5 bevat de discussie waarin kritisch wordt gekeken naar de modelstudie en nieuwe kennisleemtes en -vragen worden gedefinieerd.

Hoofdstuk 6 bevat de conclusies en aanbevelingen.

De kennisvragen gedefinieerd in 1.2 worden deels beantwoord in de systeemanalyse (Hoofdstuk 2) en deels in de Resultaten van de modeluitkomsten (Hoofdstuk 4) (op de kennisvragen van **D** en **E** na). In de conclusie en aanbevelingen zullen deze kennisvragen langsgelopen worden.

1.5 Definities en afkortingen

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



2

Het VZM-Systeem

2 Het VZM-systeem

2.1 Inleiding

Het VZM ligt in zuidwest Nederland en heeft een belangrijke zoetwatervoorzienings- en afvoerfunctie aan de zuidrand van de Rijn-Maasmonding voor Waterschap Brabantse Delta, Waterschap Scheldestromen en Waterschap Hollandse Delta (Figuur 2-1). Het VZM en de aangrenzende gebieden hebben verschillende functies waaronder natuur, landbouw, scheepvaart, visserij en recreatie. Voor een aantal van deze functies is naast het peilbeheer is ook het doorspoelbeheer van groot belang, om zo de chlorideconcentraties in het VZM aanvaardbaar te houden. Door zeespiegelstijging komt doorspoelbeheer onder druk te staan doordat de zoutvracht o.a. via de sluisen en zoute kwel toeneemt. In dit hoofdstuk worden



Figuur 2-1 Overzicht projectgebied Volkerak-Zoommeer (Hydrologic, 2017).

de systeemvariabelen, waaronder de sluiscomplexen en zoute kwel, toegelicht. Ook wordt het kwalitatieve verwachte effect van zeespiegelstijging op deze variabelen toegelicht (Sectie 2.3). In Sectie 2.3.11 staat een overzicht van de systeemvariabelen en het effect van zeespiegelstijging. Daarnaast wordt de beheerstrategie in relatie tot het chloridegehalte en het waterpeil beschreven; wat is aanvaardbaar en wat niet (Sectie 2.2)?

2.2 De huidige beheerstrategie

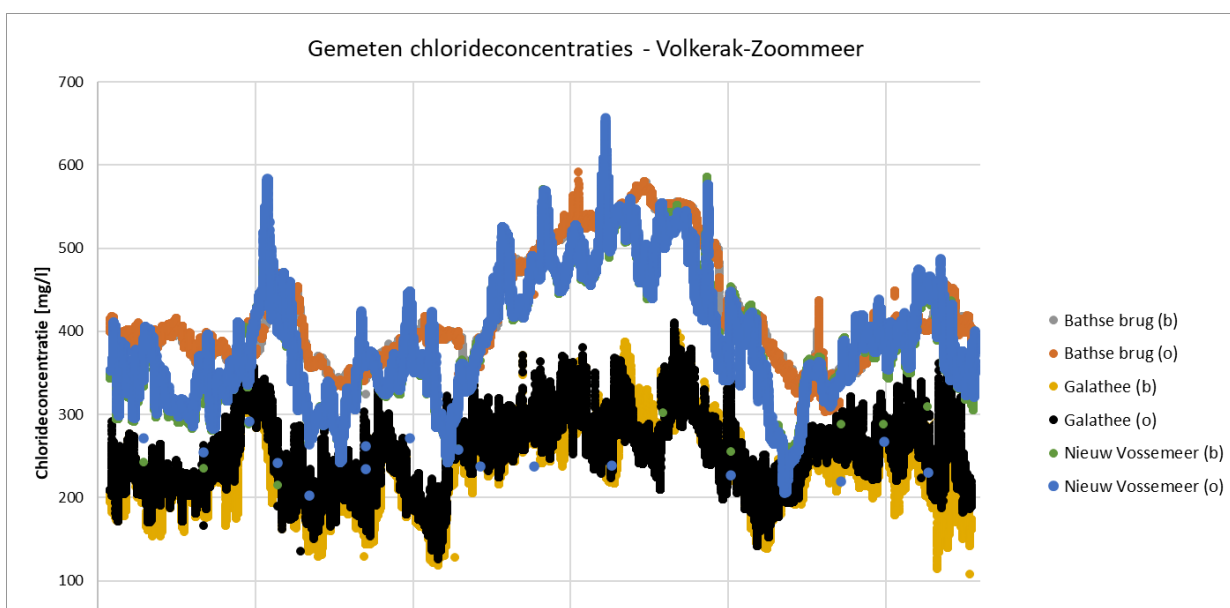
Waterpeil

De huidige beheerstrategie streeft ernaar om het waterpeil tussen NAP -10 cm en +15 cm te behouden. Binnen deze grenzen wordt getracht het meerpeil een peiltrap te laten volgen ten behoeve van onder andere broedvogels. Binnen deze studie wordt er niet verder ingegaan op deze peiltrap omdat dit seizoenvariatie betreft, een tijdschaal waar binnen de modelstudie niet naar gekeken is. Boven NAP+50cm en beneden de NAP-25cm wordt er gesproken van een calamiteit (Waterakkoord, 2016). Overtollig water wordt afgevoerd via de Bathse spuisluis ten zuiden van het VZM, dit is de reguliere stuurknop van het systeem. Wanneer het waterpeil boven de NAP+0,50m komt gaat de calamiteitenregeling in en wordt er extra gespuid via de Krammersluizen.

Bij extreme omstandigheden kan het VZM worden gebruikt als waterberging van overtollig water uit het Haringvliet/ Hollands Diep. Het peil kan dan tot NAP+2,30m stijgen. Deze mogelijkheid is er sinds 2016 maar is nog nooit gebruikt. De kans dat dit moet worden toegepast is gesteld op 1/1400 per jaar. Echter neemt deze kans toe door zeespiegelstijging (Deltares, 2020).

Chlorideconcentratie

Voor de chlorideconcentratie geldt een drempelwaarde van 450 mg Cl/l (gemiddeld per dag) in het groeiseizoen (15 maart – 15 september) bij meetpunt de Bathse brug (Figuur 2-1). Bij de Bathse brug is de chlorideconcentratie doorgaans het hoogst, vandaar dat vanaf deze locatie het chloridegehalte wordt genomen als maat voor het VZM binnen het groeiseizoen. In Figuur 2-2 is dit zichtbaar. Hierin zijn de gemeten chlorideconcentraties van januari 2021 tot augustus 2022 van de drie meetpunten op het VZM te zien (Galathea (noord), Nieuw Vossemeer (midden) en Bathse brug (zuid): locaties in Figuur 2-1).



Figuur 2-2 De gemeten chlorideconcentraties in het Volkerak-Zoommeer voor de meetpunten Bathse brug, Galathee en Nieuw Vossemeer. Per meetpunten is er op twee locaties in de waterkolom gemeten: (b) staat voor boven en (o) staat voor onder (de exacte diepte is niet bekend).

Zeespiegelstijging en de huidige beheerstrategie

Vanaf een bepaalde hoeveelheid zeespiegelstijging zal deze beheerstrategie onder druk komen te staan en zal het systeem falen. De begrippen 'falen' of 'houdbaar' binnen deze rapportage sluiten aan bij de huidige eisen die het systeem heeft. Of het systeem houdbaar is hangt af van wat het systeem binnenkomt (zoutvracht/ wateraanvoer) en wat het systeem verlaat (zoutvracht/ waterafvoer). Qua peilbeheer reageert het systeem echter in de orde van dagen. Voor de chlorideconcentratie is dit in de orde van weken tot maanden. Dit is voor zowel de waterstanden als de chlorideconcentratie zichtbaar in de modelresultaten in Hoofdstuk 4. In de volgende sectie worden alle systeemvariabelen die zorgen voor de invoer van zout/water naar het VZM en afvoer van zout/water van het VZM toegelicht. Daarnaast wordt besproken wat het effect van zeespiegelstijging is op deze variabelen.

2.3 Overzicht systeemvariabelen

De systeemvariabelen van het VZM zijn op hoofdlijnen de rivierdebieten, sluis- en spuicomplexen, atmosfeer, grondwater en de watervraag vanuit de waterschappen. Onderstaand worden deze systeemvariabelen in meer detail kort toegelicht; wat voor rol hebben deze variabelen in het systeem en wat is het effect van ZSS op deze variabelen?

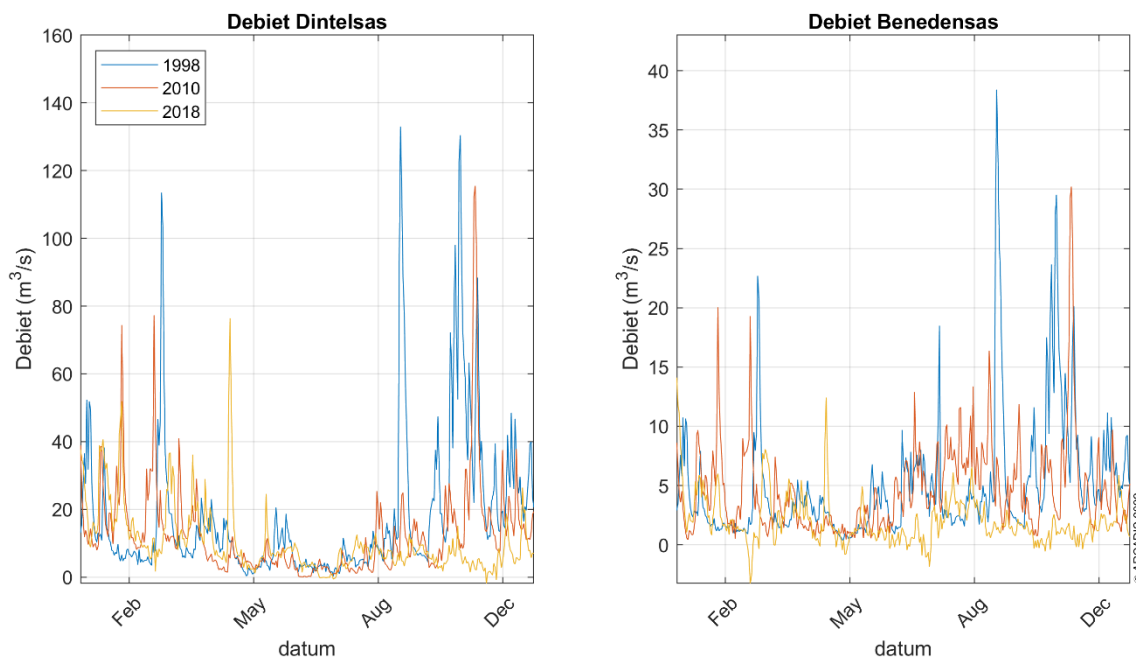
2.3.1 Rivieren

De rivieren de Dintel (via de Dintelsas, sluis bij de monding), Steenbergse Vliet (via de Benedensas, sluis bij de monding) en de Zoom monden uit in het VZM (Figuur 2-1 en Figuur 2-3). De debieten zijn gecorreleerd aan de neerslag en verdamping en zorgen doorgaans voor een deel van het zoetwaterdebiet dat het VZM instroomt. Wanneer deze aanvoerdebieten laag zijn, wordt er meer water ingelaten bij de Volkeraksluizen (inlaat van water uit het Hollands Diep, Figuur 2-1) om het systeem voldoende zoet te houden ('doorspoelbeheer' (Waterakkoord, 2016)). De rivierdebieten worden niet direct beïnvloed door ZSS maar de debieten zijn wel van belang om de verzilting van het VZM, wat een effect is van ZSS, tegen te gaan. Door klimaatverandering is de verwachting dat er meer extreme droge (extreem lage afvoeren) en meer extreme natte periode aankomen (extreem hoge afvoeren). De droge perioden leggen druk op het beheer van de chlorideconcentratie en de natte perioden zorgen voor druk op het peilbeheer.



Figuur 2-3 Overzicht van de rivieren die uitmonden in het Volkerakmeer en het Hollands Diep (Hydrologic, 2015).

In Figuur 2-4 zijn de debieten via de Dintelsas en de Benedensas te zien voor de jaren 1998, 2010 en 2018. Het jaar 1998 is een relatief nat jaar, 2018 is een relatief droog jaar en 2010 is een gemiddeld jaar (bepaald d.m.v. een neerslaganalyse met KNMI gegevens van weerstation Wilhelminadorp). Gemiddeld in 2010 waren de debieten van de Dintelsas en de Benedensas 12,3 en 4,7 m³/s. De debieten van de Zoom zijn naar verhouding laag, in het relatief natte jaar 1998 was deze gemiddeld 0,35 m³/s (Rijkswaterstaat, 2003).



Figuur 2-4 Debiet Dintelsas en Benedensas in 1998 (relatief nat jaar), 2010 (gemiddeld jaar) en 2018 (relatief droog jaar).

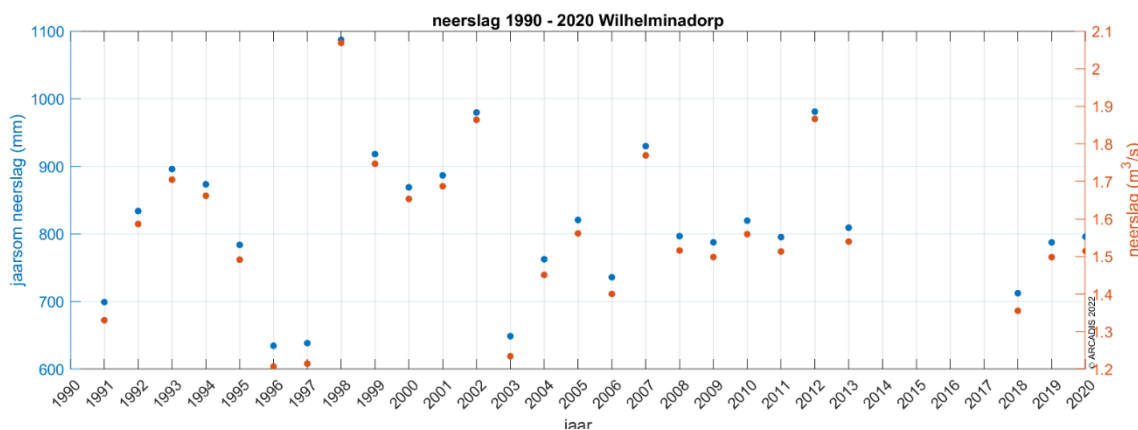
De rivierdebieten kunnen ook tijdelijk negatief zijn in droge zomers, dan vormen ze een (tijdelijke) watervraag op het systeem. Dit is te zien als de negatieve debieten in Figuur 2-4 voor het droge jaar 2018. Bij lage afvoeren in de Mark-Dintel-Vliet (MDV) boezem wordt er water aan het VZM onttrokken (water stroomt 'terug') (Figuur 2-3, locatie Mark, Dintel en Vliet). Anderzijds wordt er bovenstrooms water ingelaten naar de MDV boezem via de inlaat Oosterhout (vanuit de Amer). De watervraag van de peilbeheerde gebieden langs de MDV boezem (o.b.v. 0,3 l/s/ha) bedraagt ruim 5 m³/s, maar slechts een klein deel hiervan (max. 5%) is afkomstig uit het VZM (informatie verkregen via mailcorrespondentie met Waterschap Brabantse Delta).

Daarnaast is sinds eind 2021 de inlaat via de Roode Vaart (vanuit het Hollands Diep) gerealiseerd. Als het water relatief lager is op het Hollands diep ten opzichte van de Roode Vaart wordt er water gepompt vanuit het Hollands Diep naar de Rode Vaart om zo in droge perioden het gebied van zoet water te voorzien. Dit is niet zichtbaar in de meetperioden (jaren voor de realisatie) en is verder niet meegenomen in deze studie.

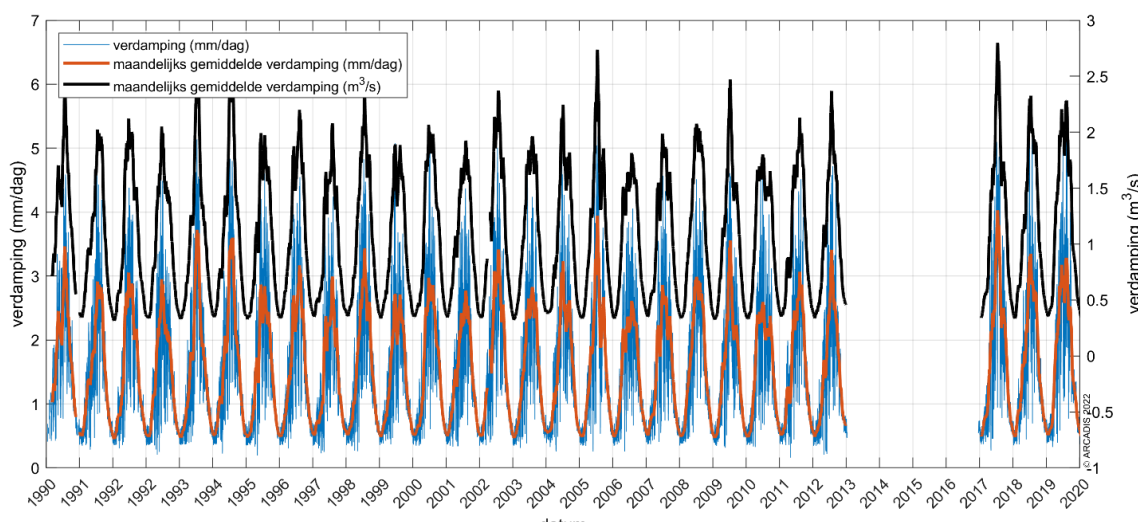
2.3.2 Neerslag en Verdamping

De neerslag (Figuur 2-6) en verdamping (Figuur 2-5) zorgen voor een relatief kleine aan- en afvoer van water in en uit het systeem ten opzichte van de rivierdebieten van de Dintel en de Steenbergse Vliet.

De jaarsom van de neerslag varieert tussen circa 635 en 1087 mm per jaar voor de periode 1990 – 2020 (meetstation Wilhelminadorp). Dit komt neer op een neerslagdebiet tussen de 1,21 en 2,07 m³/s voor het wateroppervlak van het VZM (aangenomen oppervlak: 60.000.000 m²). De openwater verdamping is berekend met de Bruin-Keijmanmethode (FutureWater, 2006) en is gemiddeld 1,1 m³/s voor het wateroppervlak van het VZM. Over een jaar is er daarmee sprake van een minimale netto aanvoer van water. Binnen het jaar is het wel vaker zo dat juist tijdens de zomer de verdamping groter is dan de (directe) neerslag en er sprake is van een netto onttrekking.



Figuur 2-6 Jaarsom neerslag (mm) en neerslag in m³/s op het VZM (genomen oppervlakte: 60.000.000 m²) berekend met uurlijkse neerslaggegevens van meetstation Wilhelminadorp.



Figuur 2-5 Verdamping voor open water berekend met KNMI-gegevens van meetstation Wilhelminadorp. Missende data is vervangen door data van meetstation Rotterdam. De openwaterverdamping is berekend met de Bruin-Keijmanmethode (FutureWater, 2006).

2.3.3 Volkeraksluizen

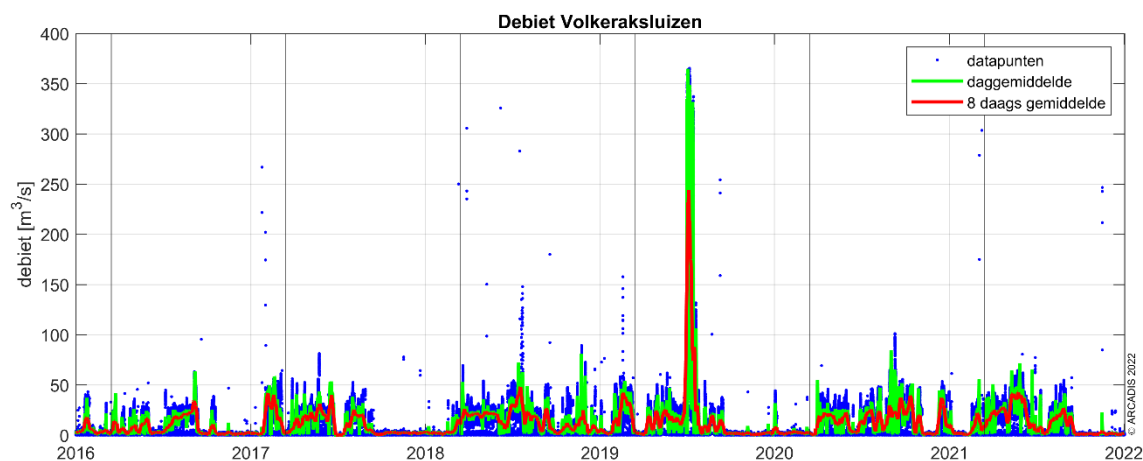
De Volkeraksluizen bestaan uit drie schutsluizen voor de beroepsvaart, vier spuisluizen en een jachtensluis. Via de spuisluizen kan daggemiddeld tot 67,5 m³/s water ingelaten worden vanuit het Hollands Diep naar het VZM (volgens de huidige doorspoelregimeregels). Dit komt doordat volgens deze regels maximaal 3 kokers bij Bath gebruikt mogen worden voor doorspoelen waarbij er wordt uitgegaan van een daggemiddeld spuidebiet van 22,5m³/s per koker. Echter is de maximale watervraag aan het Hollands Diep 50 m³/s (Waterakkoord, 2016). In de praktijk gaan de daggemiddelde debieten daar echter soms overheen (Figuur 2-7). Jaargemiddeld zijn de debieten tussen de 7 en 19 m³/s (o.b.v. data tussen 2016 en 2022) (Figuur 2-7).

Technisch gezien kunnen de daggemiddelde debieten richting de 300 m³/s gaan bij een groot verval tussen het Hollands Diep en het Volkerak (Figuur 2-7) (mailcorrespondentie RWS beheerder). Dit is van belang wanneer het VZM moet worden gebruikt om in korte tijd veel water te bergen bij extreem hoge afvoeren vanuit de RMM zoals beschreven in Sectie 2.2.

Hoeveel water er binnenkomt hangt af van de zoetwatervraag van het VZM (o.a. afhankelijk van het chloridegehalte van het VZM en de watervraag vanuit de waterschappen) maar ook

van wat er bovenstrooms beschikbaar is en dus van het waterbeheer binnen de Rijn-Maasmonding regio. De zoetwatervraag vanuit het VZM resulteert in een groter debiet in de zomer (groeiseizoen) en een kleiner debiet in de winter. Dit is zichtbaar in de debieten tussen 2016 en 2022 (Figuur 2-7). In het groeiseizoen is de wateraanvoer vanuit de Brabantse rivieren vaak kleiner en niet voldoende om het VZM zoet te houden. Dan is de aanvoer via de Volkeraksluizen van groot belang. Deze vorm van doorspoeling is er sinds 2016 en van ongeveer februari tot oktober.

De Volkeraksluizen zijn dus belangrijk voor de doorspoeling van het VZM, zodat deze voldoende zoet blijft. De chlorideconcentratie in het Hollands Diep zou echter kunnen toenemen met een stijgende zeespiegel. Deze kennisleemte is gedefinieerd in de studie van (Deltares, 2020).



Figuur 2-7 Debieten Volkeraksluizen tussen 2016 en 2022. De verticale lijnen zijn de lijnen op 15 maart (start groeiseizoen). In 2017 en 2019 is er een piek te zien vóór het groeiseizoen.

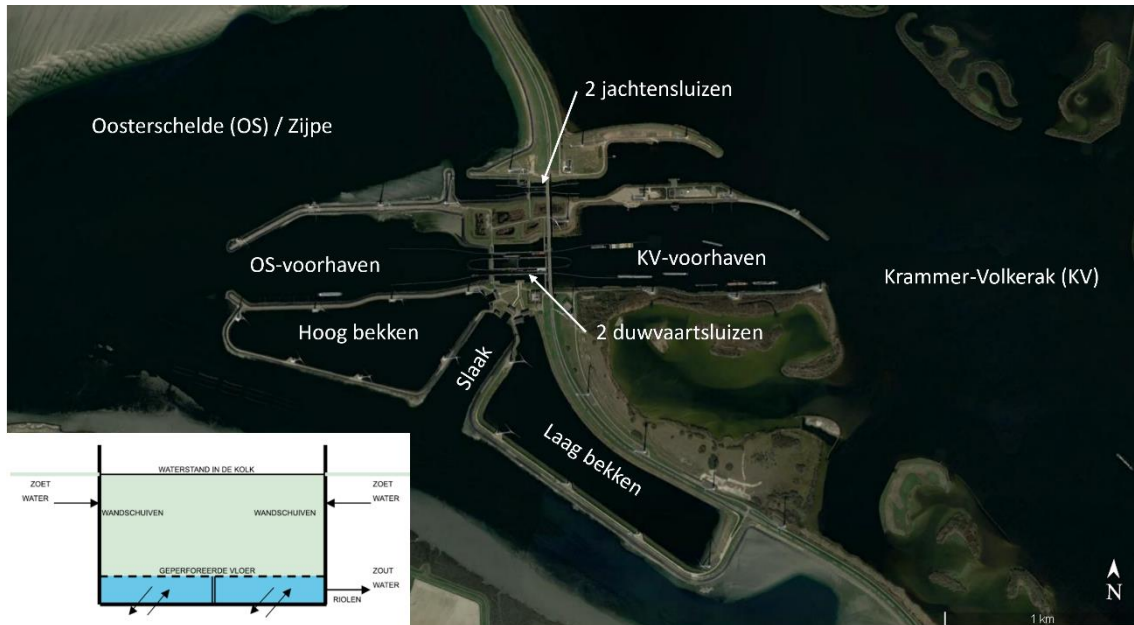
2.3.4 Krammersluizen

De Krammersluizen hebben als belangrijkste functie om scheepvaart te laten passeren. Het sluisencomplex bestaat uit 2 'grote' duwvaartsluizen en 2 'kleine' jachtensluizen voor de recreatievaart (Figuur 2-8). Bij de duwvaartsluizen wordt in 2025 de huidige Zout-Zoet-Scheiding (ZZS) vervangen door de Innovatieve Zout-Zoet-Scheiding (IZZS). Aangezien in deze studie gekeken wordt naar toekomstbeelden met zeespiegelstijging, worden de Krammersluizen binnen deze studie alleen met de IZZS beschouwd. Dit innovatieve systeem is afhankelijk van vrij verval en maakt gebruik van het Laagbekken gelegen aan de Oosterscheldezijde (Figuur 2-8). Het Hoog bekken, wordt niet gebruikt en de IZZS treedt alleen in werking voor de twee duwvaartsluizen. De duwvaartsluizen zijn beiden uitgerust met een 3 meter dikke vloer en een geperforeerde tussenvloer. In het midden van elke schutkolk, onder de geperforeerde vloer monden riolen uit die water kunnen afvoeren richting het Laag bekken en het Slaak, mits er vrij verval is (Figuur 2-8) (Deltares, 2012).

Figuur 2-9 beschrijft de verschillende fasen van het schutproces bij Krammersluizen met de IZZS. Alle wateruitwisseling gaat onder vrij verval. De fasen in het proces zijn (HW=hoog water, LW=laag water) (Deltares, 2016):

- **HW 1** Opwaarts nivelleren – Brak water komt van het Slaak de schutkolken binnen
- **HW 2** Deuren openen aan de Oosterschelde zijde en uit- en invaren, deuren sluiten.
- **HW 3** Neerwaarts nivelleren – Hierbij gaat het brakke water uit de kolk richting het Laag bekken.
- **HW 4** Deuren openen aan de VZM-zijde en uit- en invaren, deuren sluiten. Hierbij wordt met water vanuit het VZM gespoeld richting het Laag Bekken gebruikmakend van het verval tussen het Laag bekken en het VZM.
- **LW 1** Neerwaarts nivelleren – Hierbij gaat het brakke kolkwater naar het Slaak.

- **LW 2** Deuren openen en uit- en invaren, deuren sluiten – hierbij wordt gespoeld met water vanuit het VZM. Dit spoelwater gaat deels naar het Slaak en deels naar de voorhaven aan de Oosterschelde (gele pijlen).
- **LW 3** Opwaarts nivelleren – Hierbij wordt zoet water vanuit het VZM ingelaten
- **LW 4** Deuren openen aan de VZM-zijde en uit- en invaren, deuren sluiten – Hierbij wordt de kolk gespoeld met water vanuit het VZM om zo de zoutlast te beperken.



Figuur 2-8 Overzicht Krammersluizen met een schematische dwarsdoorsnede van de geperforeerde vloer. Het Hoog bekken wordt met de IZZS niet meer gebruikt (Deltares, 2012).

Het Laag bekken wordt gedurende alle LW-fases gelegegd onder vrij verval naar het Slaak. Hierdoor is het Slaak overwegend brak.

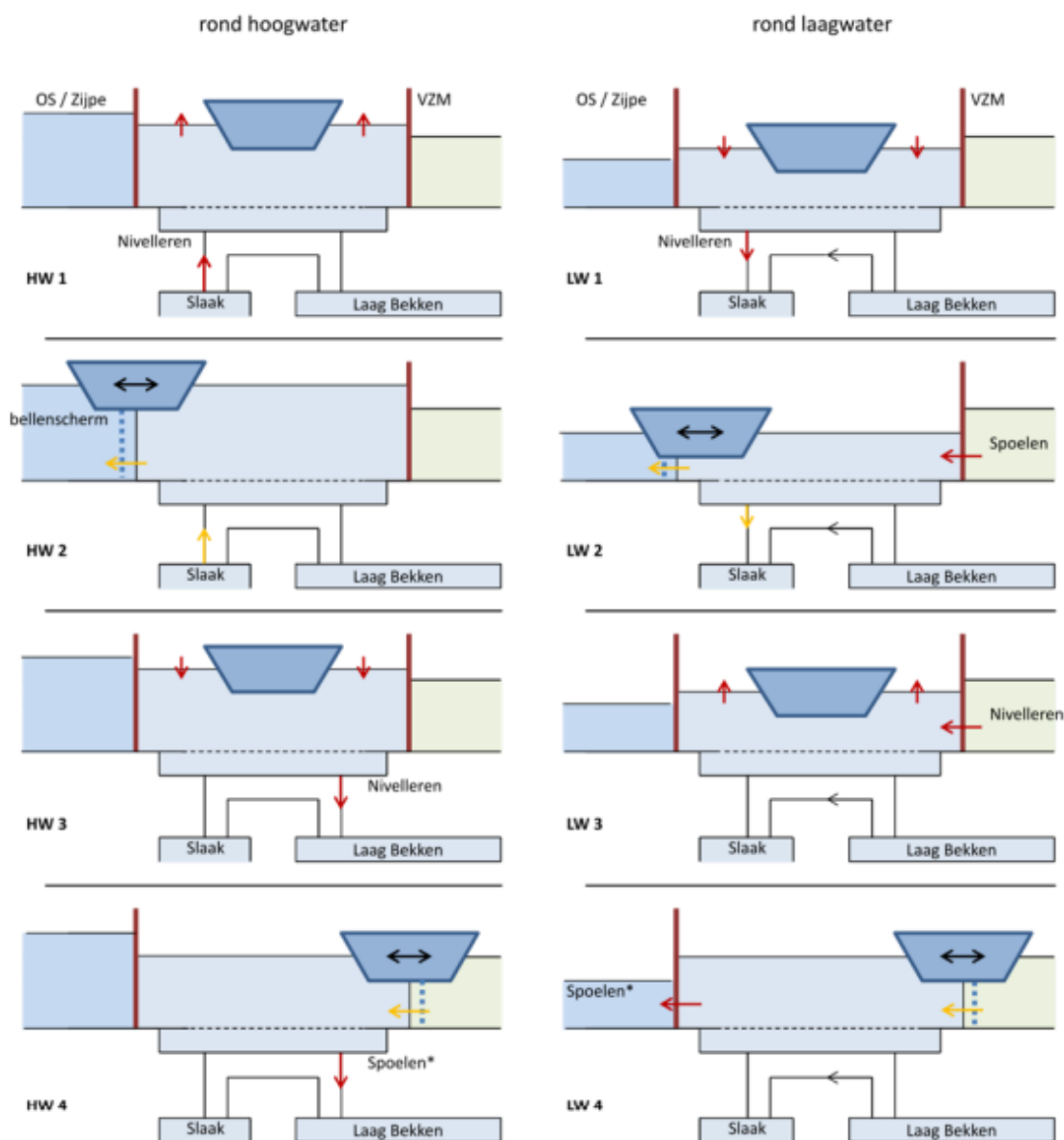
Effect zeespiegelstijging

Wanneer de zeespiegel stijgt komt dit systeem onder druk te staan. Respectievelijk is het met een hogere zeespiegel vaker HW dan LW. Hierdoor zal het Laag bekken relatief meer opgevuld worden met brak water vanuit de kolk bij HW (aangezien het vaker HW is). Dit brakke water moet bij LW het Laag bekken verlaten onder vrij verval. De tijdspanne waarin het Laag bekken onder vrij verval leeg moet lopen wordt dus korter met een stijgende zeespiegel. Er komt dus een moment waarop er geen ‘tijd’ genoeg is om het Laag Bekken te legen onder vrij verval. Hierdoor zal het Laag Bekken zich steeds meer opvullen totdat de waterstand gelijk is aan de waterstand op de Oosterschelde. Vervolgens zal gedurende de HW3-fase en de HW4-fase het water niet meer richting het Laag bekken kunnen doordat er geen vrij verval meer is. Het brakke kolkwater moet daarom geloosd worden op het VZM. Dit wordt binnen dit rapport beschouwd als een falende IZZS en resulteert in een grote toename in zoutlast richting het VZM. De overgang van een werkende IZZS naar het moment dat de IZZS ‘faalt’ is gradueel en zal rond de 1,25m zeespiegelstijging liggen.

Een bellenscherm, spoelen én spuien om de zoutlast te beperken

Zoals in Figuur 2-9 te zien is wordt spoelen en een bellenscherm gebruikt in de schutcyclus om de zoutlast op het VZM te beperken. Dit zijn echter niet de enige methodes die gebruikt zullen worden bij het in werking treden van de IZZS. Ook zal er gespuid worden buiten de sluiscolken om. Zo wordt het brakke water dat in de voorhaven (Volkerak-Krammerzijde) aanwezig is afgevoerd en neemt de chlorideconcentratie af. Spuien gaat uiteraard ook onder vrij verval.

De spoel- en spuidebieten bepalen voornamelijk de zoutvracht op het VZM. Als er meer wordt gespuid en gespoeld is de zoutvracht lager dan wanneer er relatief minder wordt gespuid en gespoeld (uitgaande van een gelijke schutintensiteit) (Deltares, 2016). Binnen de studie van Deltares is inzicht gegeven in de relatie tussen het waterverbruik en de zoutlast op het VZM. Vanuit deze studie blijkt dat spoelen effectiever is dan spuien om de zoutlast te beperken.



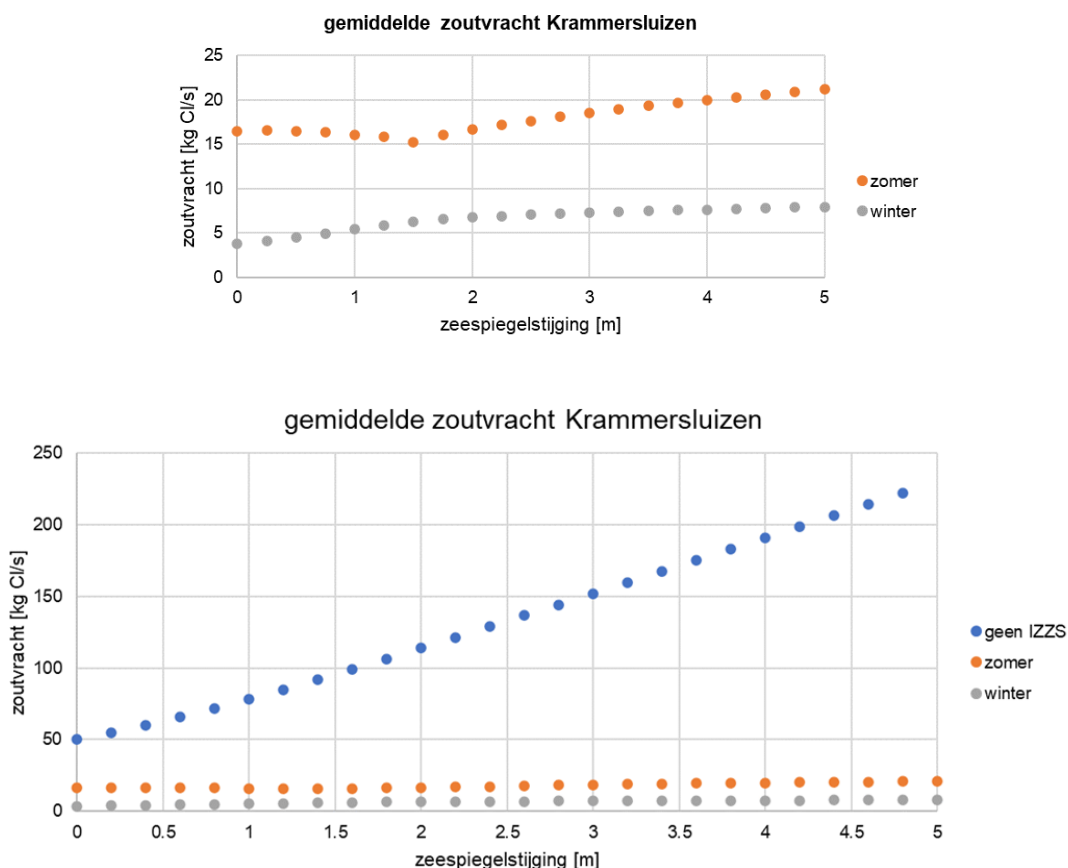
Figuur 2-9 Verschillende fasen in de schutcyclus van de Krammersluizen met de IZZS. De rode peilen geven aan waarop gestuurd wordt. De gele peilen geven aan welke stroming het resultaat is van de sturing (Deltares, 2016).

Wanneer de IZZS is geïmplementeerd zal voor het uitgaande debiet (spoelen + spuien) tijdens het groeiseizoen $9 \text{ m}^3/\text{s}$ aangehouden worden en buiten het groeiseizoen $29 \text{ m}^3/\text{s}$. De keuze voor het lagere debiet in de zomer is gestuurd door de ecologie in de Oosterschelde (Zijpe), met name de mosselbanken, om deze te ontlasten in het groeiseizoen. Ook in de winter mag de zoetlast op het Slaak niet te groot zijn, vandaar het maximum van $29 \text{ m}^3/\text{s}$. Deze specifieke debieten zijn in de studie van Deltares (2013) gebruikt voor de zomer en

winter situatie en zijn conform de Planstudie Krammersluizen. Daarom zijn deze varianten (zomer & winter) ook binnen deze studie gebruikt samen met de variant dat de IZZS niet werkt.

De zoutlast op het VZM

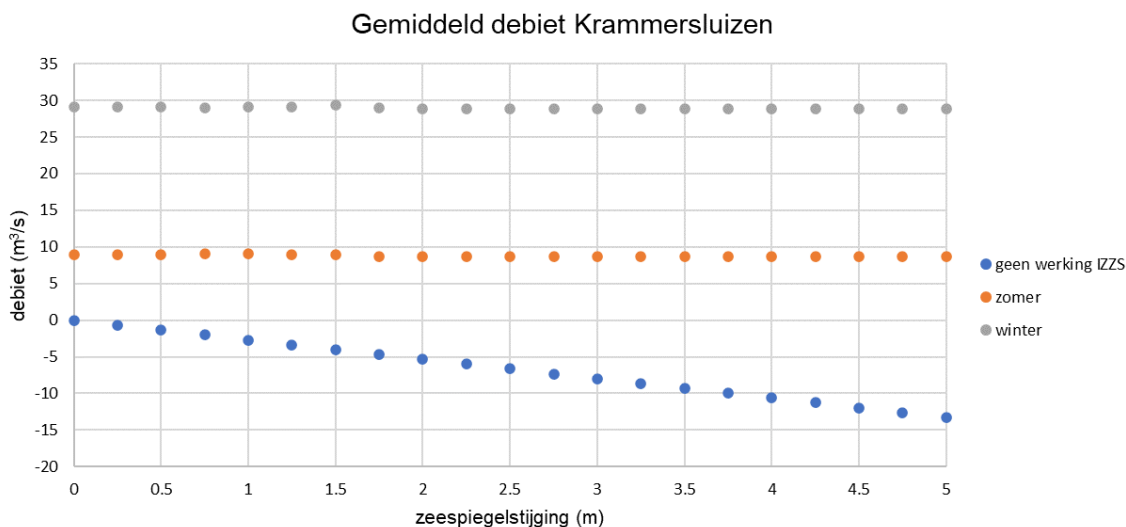
De zoutvracht behorend bij deze winter en zomer spoel -en spuidebieten met een functionerende IZZS in relatie tot de ZSS (tussen 0 en 5 m) is gevisualiseerd in Figuur 2-10. Dit is circa 6 en 17 kg Cl/s voor het winter- en zomerdebiet. De zoutvracht in dit figuur is berekend met de Zeesluisformulering¹ die is aangeleverd door Deltares en gelijk is aan de formulering die is gebruikt voor de studie van Deltares (2020). In deze berekeningen van de zoutvracht is ervan uitgegaan dat het Laag bekken altijd laag blijft en dat spuien mogelijk blijft, ongeacht de zeespiegelstijging die ervoor zorgt dat er op een gegeven moment geen vrij verval meer is van het VZM naar de Oosterschelde/het Laag bekken. In werkelijkheid zou vanaf circa 1,25 m zeespiegelstijging het Laag bekken laag gehouden moeten worden door de implementatie van pompen en zou het spuien ook overgenomen moeten worden door pompen. Dus wanneer er geen infrastructurele aanpassingen aan het systeem zouden gebeuren zou de zoutlast vanaf circa 1,25 m zeespiegelstijging enorm toenemen omdat dan de IZZS niet meer werkt. De zoutlast voor wanneer de IZZS niet meer functioneert is zichtbaar in Figuur 2-11 (hierbij zijn de bellenschermen niet meegenomen en wordt het Laag Bekken niet gebruikt, de sluisen werken als ‘gewone’ schutsluizen). De bijbehorende debieten staan in Figuur 2-12. Dit is een zoutlast van tussen de circa 50 en 220 kg Cl/s voor zeespiegelstijging van 0 tot 5m. Het is zichtbaar dat de zoutvracht bij 0 m zeespiegelstijging



Figuur 2-11 De zoutvracht richting het VZM voor een functionerende IZZS met het zomer- (9 m³/s) en winterdebiet (29 m³/s). Daarnaast is de zoutvracht geplot wanneer het IZZS niet meer werkend is. De berekening is gedaan met de Zeesluisformulering¹ (ZSF).

¹ De Zeesluisformulering is een Python en Excel tool die de zoutvracht door sluisen kan berekenen. Door Deltares zijn bepaalde aanpassingen gedaan om dit te kunnen berekenen voor de Krammersluizen. Deze staan in Deltares (2020) verder toegelicht.

verdrievoudigt wanneer de IZZS faalt, ten opzichte van de zoutvracht in de zomersituatie. Dit heeft voornamelijk met de richting van de debieten te maken. Wanneer de IZZS faalt nemen de debieten toe en zijn deze in de richting van het VZM. Het zoute water uit de kolk wordt op het VZM geloosd. In de zomer- en wintersituatie wordt ervan uitgegaan dat dit relatief zoute water juist afgevoerd wordt naar de Oosterscheldezijde. Hoe meer de zeespiegel stijgt, des te groter het verschil wordt tussen de zoutvracht in de zomer/winter ten opzichte van wanneer de IZZS faalt.



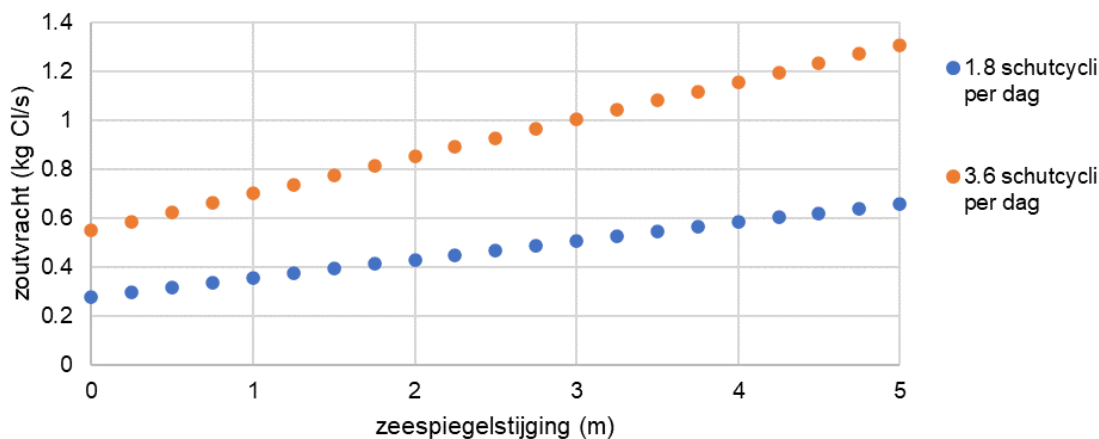
Figuur 2-12 Het gemiddelde debiet bij de Krammersluizen voor de zomer en winter en voor wanneer de IZZS faalt. In dit figuur is positief een uitgaand debiet en negatief een inkomend debiet ten opzichte van het VZM.

Effect van de schutintensiteit

De schutintensiteit speelt ook geen grote rol in de grootte van de zoutvracht. Wanneer er minder geschut wordt, zal de zoutvracht naar het VZM afnemen maar zal de IZZS ook langer houdbaar blijven wanneer zeespiegel stijgt. Dit is echter niet verder meegenomen binnen deze modelstudie: de schutintensiteit wordt gelijk gehouden voor alle scenario's.

2.3.5 Bergse Diepsluis

De Bergse Diepsluis is een klein sluisencomplex dat bestaat uit één relatief kleine kolk. De zoutlast vanuit de sluis op het systeem is daarom ook beperkt ten opzichte van de zoutlast bij Krammersluizen. In Figuur 2-13 is de zoutvracht richting het VZM door het schutbedrijf van de Bergse Diepsluis gevisualiseerd, in relatie tot de zeespiegelstijging. Deze zoutvracht

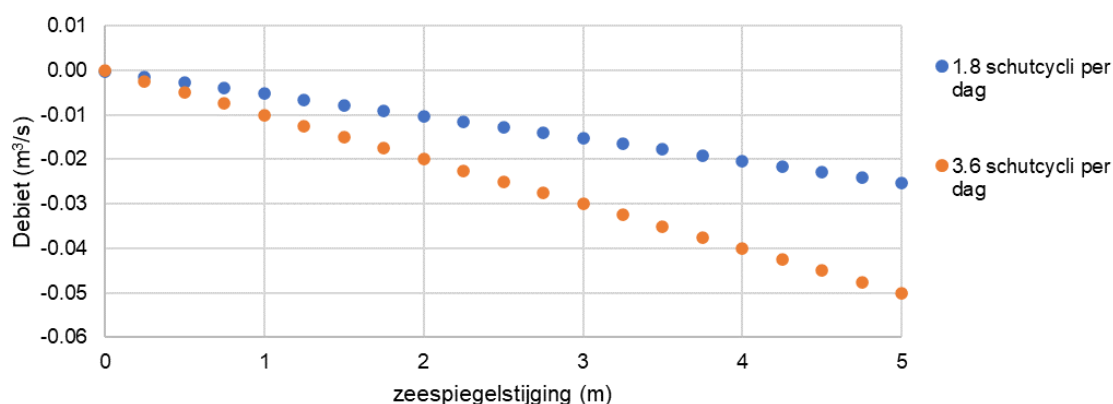


Figuur 2-13 Zoutvracht Bergse Diepsluis berekend met de Zeesluisformulering.

is berekend met de Zeesluisformulering. De informatie van het schutbedrijf en de kolkdimensies zijn verkregen uit het rapport van (WL, 1992).

Wanneer er neerwaarts genivelleerd wordt bij hoogwater (HW3-fase) komt het zoute kolkwater terecht in het VZM. Door zeespiegelstijging is het vaker hoogwater aan de zeezijde dan laagwater en daarnaast groeit het volume dat in de HW3-fase richting het VZM moet. Dit is zichtbaar in Figuur 2-14 in de meer negatief wordende debieten naarmate de zeespiegel stijgt, en hierdoor neemt de zoutvracht toe zoals te zien is in Figuur 2-13.

In Figuur 2-13 zijn twee reeksen te zien. De blauwe reeks is gebaseerd op een schutbedrijf met 1,8 schutcycli per dag, zoals in WL (1992). De oranje reeks is gebaseerd op 3,6 schutcycli per dag, een verdubbeling ten opzichte van WL (1992). Deze reeks is gevisualiseerd omdat de verwachting is dat het schutbedrijf is toegenomen in de afgelopen 20 jaar. Kijkend naar de hoekpunten van de grafiek is de zoutvracht op het VZM tussen de 0,3 en 1,3 kg Cl/s voor zeespiegelstijging tussen de 0 en 5 m. Dit is zeer klein ten opzichte van de zoutvracht vanuit de Krammersluizen.



Figuur 2-14 De debieten door de Bergse Diepsluis behorend bij de zoutvracht

2.3.6 Bathse spuisluis

De Bathse spuisluis is de 'stuurknop' op de waterbalans binnen het VZM-systeem. Bij een te hoge waterstand wordt er meer gespuid en bij een te lage waterstand wordt er minder gespuid om zo het streefpeil te behouden. Een neven-doel van de Bathse spuisluis is doorspoeling om zo de chlorideconcentratie onder de drempelwaarde van 450 mg Cl/l te houden. Jaargemiddeld wordt er bij Bath ongeveer tussen de 3 en 22 m³/s gespuid (o.b.v. data tussen 1988 en 2009) (Deltares, 2013).

Door zeespiegelstijging zal het spuienvenster kleiner worden waardoor de spuidebieten zullen afnemen. Laag water bij doortij is NAP±-1,6m bij Bath. Bij NAP+±1,6m ZSS zal er dus al een flinke afname zijn in het spuidebiet. Dan kan er bij doortij niet meer gespuid worden. Daarvoor zal er ook al sprake zijn van een afname van de spuicapaciteit door een afname van het verval/het spuienvenster. Laag water rond springtij is NAP±-2,7m bij Bath. Er kan dus helemaal niet meer gespuid worden vanaf NAP±2,7m zeespiegelstijging.

Ondanks dat er alleen water uit gaat bij de Bathse spuisluis is er een klein zoutlek door de vismigraat. In Deltares (2020) is deze als constante waarde meegenomen (0,1 kg Cl/s).

2.3.7 Kreekraksluizen

De Kreekraksluizen zijn niet direct met de zee verbonden en de invloed van zeespiegelstijging erop zal afhankelijk zijn van beheerkeuzes in het Antwerpse havengebied. Door de inzet van deze sluizen (en met hoge uitzondering het gemaal) wordt er water naar

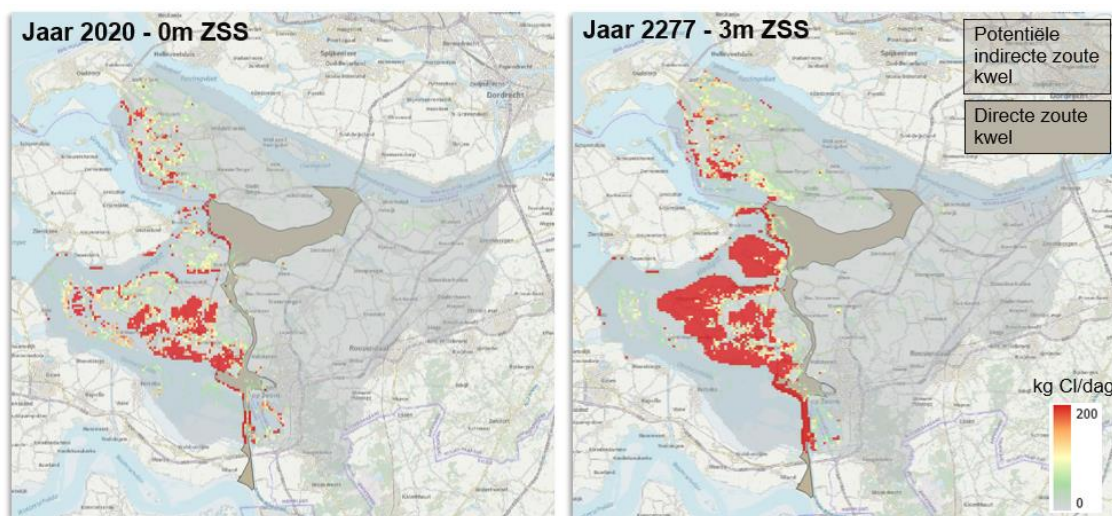
de zijde van het Antwerps Kanaalpand afgevoerd. Hierdoor ontstaat er een 'zoete bel' die de zoutlast vanuit het Kanaalpand op het Volkerak-Zoommeer beperkt. Jaargemiddeld wordt er ongeveer tussen de 2 en 8 m³/s afgevoerd (o.b.v. data tussen 1988 en 2009) (Deltares, 2013). Door zeespiegelstijging kan de zoutlast vanuit het Kanaalpand toenemen waardoor de spuibehoefte om de zoete bel in het Antwerps Kanaalpand te onderhouden ook zal toenemen (indirecte beïnvloeding van Zeespiegelstijging). Dit is echter niet verder onderzocht in deze studie aangezien de verwachte kwel klein is (Sectie 2.3.8) en het beheer van het Antwerps Kanaalpand onbekend is.

2.3.8 Grondwater (zoute kwel)

Zoute kwel komt via het grondwater in het systeem. Dit is nu, zonder zeespiegelstijging, voornamelijk van belang aan de meest zeewaarts gelegen gebieden van het VZM. Met zeespiegelstijging is de verwachting dat de zoute kwel meer landwaarts trekt en daarnaast ook toeneemt. Deltares heeft een modelstudie gedaan naar het effect van ZSS (van 0 t/m 3 m) op zoute kwel met het Landelijk Hydrologisch Model (LHM). In Figuur 2-15 staan de ruimtelijke resultaten van de studie voor 0 en 3m zeespiegelstijging uit het regionale VZM model binnen het LHM (Deltares, 2022). Het is zichtbaar dat, zoals verwacht, de zoute kwel ruimtelijk toeneemt in landwaartse richting en ook per locatie toeneemt.

Directe zoute kwel

De directe zoute kwel is de zoutvracht die via het grondwater onder het meer het VZM betreedt. De cumulatieve directe zoute kwel op het VZM (som van de donkergrijze polygoon in Figuur 2-15) is opgenomen in Figuur 2-16. In dit figuur is ook de directe zoute kwel voor 4 en 5 m ZSS opgenomen, berekend door middel van lineaire extrapolatie. Volgens deze data bedraagt de huidige directe zoute kwel op het VZM 0,65 kg Cl/s (0 m ZSS). Deze zal toenemen naar 3,54 kg Cl/s wanneer de zeespiegel 5m stijgt.



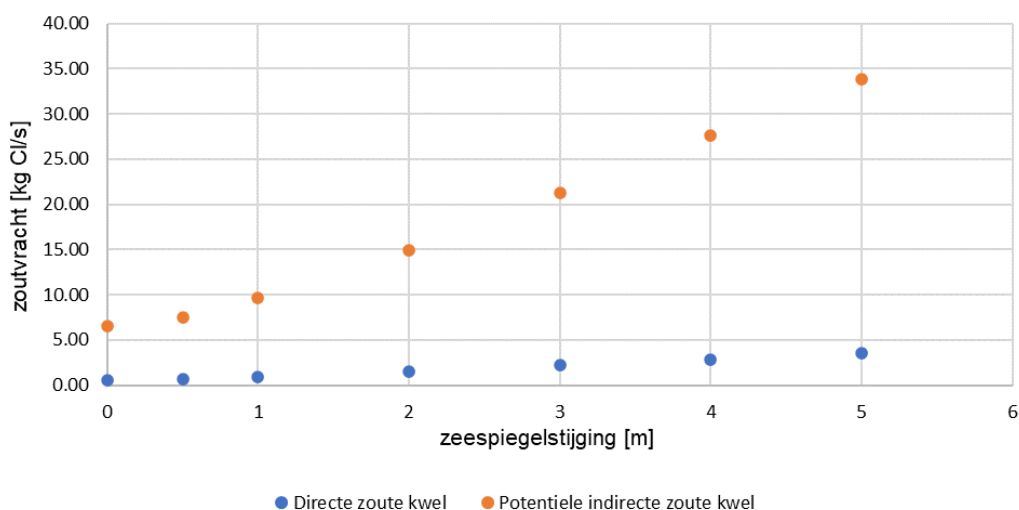
Figuur 2-15 Zoute kwel met 0 m ZSS en met 3 m ZSS. Uitkomsten langjarige modelberekening uit het LHM (regio VZM), verkregen van Deltares op d.d. 22-04-2022 (Joost Delsman).

Potentiële indirecte zoute kwel

Indirecte zoute kwel is in deze studie gedefinieerd als de zoutvracht die via het grondwater in de kleine lateralen beland en vervolgens via de kleine lateralen in het VZM beland. In Figuur 2-15 zijn de licht grijze gebieden het modeldomein van het LHM van de gehele VZM-regio. Dit gebied kan gezien worden als het gebied waar potentiële indirecte zoute kwel op het VZM plaatsvindt, aangezien dit deels kan belanden in de kleine lateralen/polders en zo richting het VZM getransporteerd kan worden. Een deel hiervan zal echter niet richting het

VZM getransporteerd worden door de grondwaterstromingsrichtingen (zoals o.a. de zoute kwel op Tholen). De sommatie van de potententiele indirecte zoute kwel (sommatie licht grijze gebied) is gevisualiseerd in Figuur 2-16. In dit figuur is ook de potentiële indirecte zoute kwel voor 4 en 5m zeespiegelstijging opgenomen, berekend door middel van lineaire extrapolatie.²

De relatie tussen de watertoevoer vanuit het grondwater in relatie tot zeespiegelstijging is niet beschouwd binnen deze studie omdat aangenomen is dat dit ten opzichte van de totale in- en uitfluxen verwaarloosbaar is (Deltares, 2020).



Figuur 2-16 Cumulatieve directe zoute kwel en de potentiële indirecte zoute kwel op het VZM voor 0m, 0,5m, 1m, 2m en 3m ZSS vanuit de data van het LHM. De punten voor 4 en 5m ZSS zijn lineair geëxtrapoleerd.

2.3.9 Directe watervraag waterschappen

De directe watervraag vanuit de waterschappen bevat onttrekking ten behoeve van het peilbeheer, beregening en doorspoeling. Drie waterschappen gebruiken water van het VZM: Waterschap Brabantse Delta, Waterschap Scheldestromen en Waterschap Hollandse Delta.

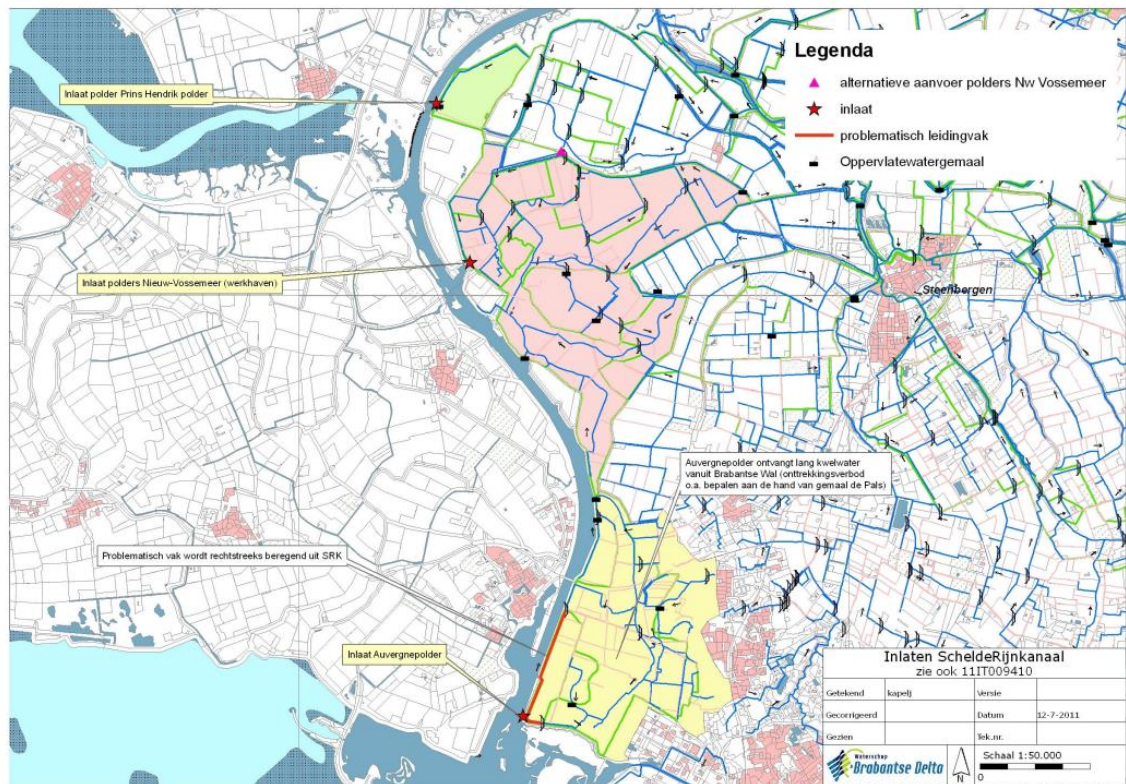
Door waterschap Brabantse Delta wordt er op drie locaties direct water aan het VZM onttrokken (Figuur 2-17) (mailcorrespondentie met het waterschap op 12-04-2022):

- Inlaat Prins Hendrikpolder, piekwatervraag (o.b.v. 0,3 l/s/ha): 0,04 m³/s; maximale inlaatcapaciteit bij VZM = 0 m NAP: 0,37 m³/s
- Inlaat Nieuw Vossemeer, piekwatervraag (o.b.v. 0,3 l/s/ha): 0,45 m³/s; maximale inlaatcapaciteit bij VZM = 0 m NAP: 1,58 m³/s
- Inlaat Auvergnepolder, piekwatervraag (o.b.v. 0,3 l/s/ha): 0,32 m³/s; maximale inlaatcapaciteit bij VZM = 0 m NAP: 0,79 m³/s

De totale piekwatervraag o.b.v. 0,3 l/s/ha is 0,81 m³/s en de maximale inlaatcapaciteit is in totaal 2,74 m³/s voor deze drie locaties. De indirecte zoute kwel voor zeespiegelstijging tussen 0 en 5m is in deze drie poldergebieden is zeer klein wanneer Figuur 2-15 als waarheid

² In de studie van Deltares (2022) is de indirecte en directe zoute kwel ook berekend, deze rapportage kwam echter te laat uit om dit binnen deze studie mee te nemen. Met de eerder verkregen ruwe data van Deltares, is daarom een inschatting gemaakt zoals bovenstaand beschreven. De getallen van de directe zoute kwel wijken om die reden lichtelijk van elkaar af.

wordt genomen aangezien deze gebieden ten oosten van het VZM liggen. Hierdoor is er geen grote toename te verwachten in watervraag vanuit waterschap Brabantse Delta i.r.t ZSS. Extreem droge perioden, die vaker voor zullen komen door klimaatverandering, zullen echter wel zorgen voor een grotere watervraag. Een inschatting hiervan valt echter buiten de scope van deze studie.



Figuur 2-17 Waterinlaten vanuit het VZM naar de aangrenzende polders waar water onttrokken kan worden door Waterschap Brabantse Delta.

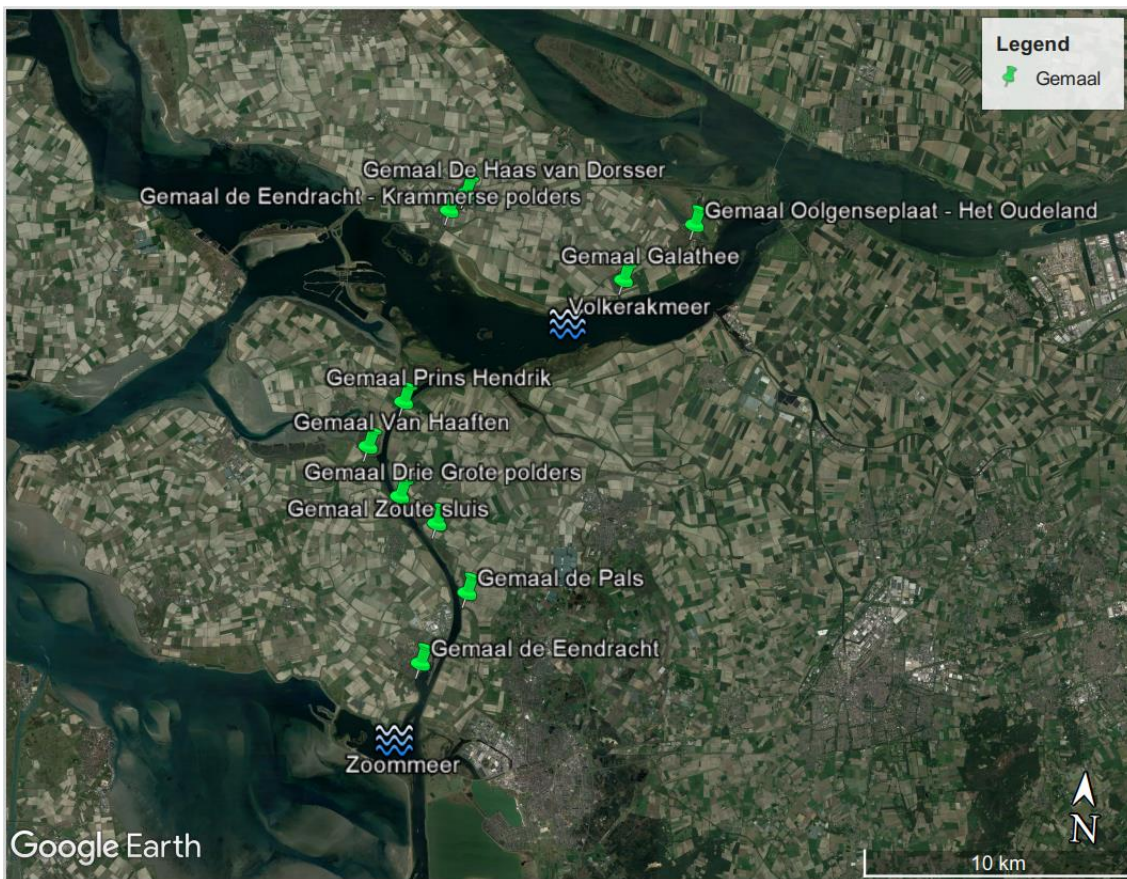
De directe watervraag van waterschap Scheldestromen (provincie Zeeland) en waterschap Hollandse Delta (zuid Zuid-Holland) zijn respectievelijk 3 m³/s en 0,5 m³/s (Deltares, 2020). De zoute kwel in de polders van waterschap Scheldestromen en Hollandse Delta zal toenemen door zeespiegelstijging. Hierdoor zal mogelijk ook de watervraag toenemen.

2.3.10 Overige kleine posten

Aan de randen van het VZM bevinden zich 10 gemalen (Figuur 2-18, boven): Gemaal Van Haaften, Drie Grote Polders, Prins Hendrikpolder, Zoutesluis, De Pals, Eendrachtsgemaal, Ooltgensplaat, Galathee, De Haas van Dorsser en Krammerse polders. Deze gemalen lozen allemaal water op het VZM, jaargemiddeld in totaal tussen de 1,6 en 2,3 m³/s (tussen 1996 en 2000) (Rijkswaterstaat, 2003). Naar verwachting zullen deze debieten een hogere chlorideconcentratie bevatten naar mate de zeespiegel zal stijgen door zoute kwel in de naastgelegen polders zoals te zien in Figuur 2-15.

Langs het VZM bevinden zich 4 rioolwaterzuiveringsinstallaties (RWZI's), RWZI Oude-Tonge, Ooltgens-plaat, Dinteloord en Tholen (Figuur 2-18, beneden). Deze resulteren jaargemiddeld in een wateraanvoer richting het VZM van 0,1 m³/s (RWS, 2003).

Naast de RWZI's en de gemalen zijn er nog twee andere kleine posten, namelijk Plaatvliet en het Markiezaatsmeer ten westen van het Zoommeer. Deze voeren samen jaargemiddeld 0,2 m³/s water aan.



Figuur 2-18 Boven: Locaties gemalen langs het VZM. Onder: Locaties van de RWZI's, Plaatvliet en het Markiezaatsmeer.

2.3.11 Samenvatting systeemvariabelen

In de onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de systeemvariabelen en het effect van zeespiegelstijging op deze variabelen (Tabel 2-1). Ook is er aangegeven of het gaat om een variabele die resulteert in een ingaand debiet/zoutvracht (+) of een uitgaand debiet/zoutvracht (-). Wat zijn de directe en indirecte effecten van zeespiegelstijging op deze variabelen voor het VZM-systeem?

Tabel 2-1 De systeemvariabelen van het VZM en het effect van zeespiegelstijging (ZSS) op deze variabelen.

	Variabelen	In (+)/uit (-)	Effect van ZSS
<i>Watertoevoer: Rivieren en kleine lateralen</i>	Dintel	+	Geen
	Steenbergse Vliet	+	Geen
	Zoom	+	Geen
	Wateraanvoer polders/gemalen	+	Veel polders ten westen van het VZM zullen verzilten door zoute kwel. De debieten van deze kleine lateralen naar het VZM zullen dus ook een hogere chlorideconcentratie krijgen.
<i>Menselijk watergebruik</i>	RWZI's	+	Geen
	Watervraag waterschappen	-	ZSS en dus zoute kwel zal weinig tot geen effect hebben op de polders ten oosten van het VZM maar wel op de polders ten westen van het VZM. In deze polders neemt de zoute kwel toe, en daarmee waarschijnlijk ook de watervraag.
<i>Atmosfeer</i>	Neerslag	+	Geen
	Verdamping	-	Geen
<i>Spui-, gemaal- en schutcomplexen</i>	Volkeraksluizen	+	Door ZSS is verzilting verwacht van het Hollands diep. Daardoor zal de zoutvracht richting het VZM toenemen en zal het water minder effectief gebruikt kunnen worden voor doorspoeling van het systeem.
	Krammersluizen (met IZZS)	-/+	Werkende IZZS: De zoutvracht zal licht toenemen met ZSS. Spoel- en spuidebieten zorgen ervoor dat de zoutvracht wordt beperkt Falende IZZS: De zoutvracht neemt sterk toe.
	Bergse Diepsluis	-/+	Debiet: door ZSS zal er netto zout water binnen komen op het VZM doordat het vaker hoog water is dan laag water t.o.v. het VZM (gedurende het schutproces). In de huidige situatie is dit nog andersom. Zoutvracht: Door ZSS zal de zoutvracht naar het VZM toenemen doordat er meer zoutwater wordt afgevoerd richting het VZM.
	Bathse spuisluis	-	Door ZSS zal het spuienster kleiner worden waardoor de spuidebieten zullen afnemen.

	Variabelen	In (+)/uit (-)	Effect van ZSS
Grondwater	Kreekraksluizen	-	Mogelijk toename spuien om de zoete bel in het Antwerps Kanaalpand te onderhouden. Het Antwerps Kanaalpand kan verzilten door de ZSS (directe zoute kwel).
	Debiet grondwater	+	<i>Niet beschouwd binnen deze studie</i>
	Zoute kwel	+	Toename zoutvracht (ruimtelijk en per locatie locatie)



3

Methodiek

3 Methodiek

In dit hoofdstuk staat de aanpak beschreven van de modelschematisatie waarbij de keuzes voor de modelinvoer gemaakt zijn op basis van de systeemanalyse in Hoofdstuk 2. In Sectie 3.1 is de modelleerstrategie beschreven. In Sectie 3.2 is het bakjesmodel beschreven dat is gebruikt in deze studie om de waterbalans en de chlorideconcentraties in het VZM te berekenen. In Sectie 3.3 staan de twee modelexercities beschreven die binnen deze studie zijn gebruikt. Deze kunnen gezien worden als twee benaderingen om naar het systeem te kijken: 1) met de huidige infrastructuur en 2) buiten de huidige infrastructurele grenzen. In Sectie 3.4 wordt de specifieke modelinvoer beschreven per modelexercitie. Afsluitend wordt in Sectie 3.5 de post-processing beschreven: Hoe zijn de vele modeluitkomsten vertaald naar de resultaten in Hoofdstuk 4?

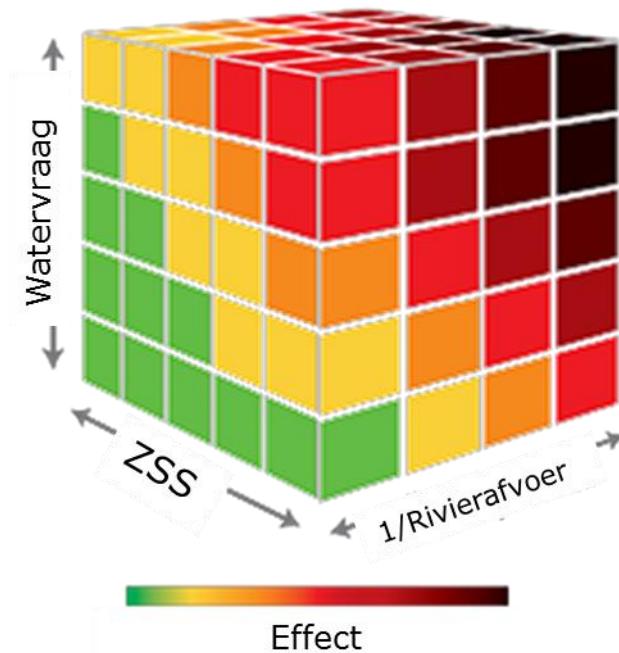
3.1 Modelleerstrategie

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

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

In Figuur 3-1 wordt geschetst hoe de 'wat-als' vragen in de vorm van een gevoeligheidsanalyse eruit kunnen zien voor variatie van de 3 hoofdfactoren zeespiegel, watervraag aan de zoetwaterbuffer en wateraanbod via de rivieren. Een zoekruimte van hogere dimensie (een zogenaamde hyperkubus) is voorstelbaar waarbij ook de gevoeligheid voor systeemparameters (bijv. representatief voor inzet van kunstwerken of maatregelen) of bepaalde uitsplitsing in randcondities mogelijk is.

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



Figuur 3-1 Schets van de voorgestelde gevoeligheidsanalyse in matrixstructuur waarin de hoofdfassen de te onderzoeken factoren (als randvoorwaarden, systeemparameters) weergeven en de kleuren de waterstaatkundige effecten en in termen van nader te definiëren indicatoren.

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

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

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

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

3.2 Gebruikte modelschematisatie

Voor deze studie is een bakjesmodel gebruikt wat de waterstand en de chlorideconcentratie berekent over een tijdsspanne van twee jaar met tijdsstappen van een dag. Het bakjesmodel is gebruikt in de klimaatrobuustheidsstudie van Deltares (2020) en voor zowel de hydrologie als de chlorideconcentratie gevalideerd.

Voor deze studie zijn twee modelexercities gedaan waarbij het oorspronkelijke bakjesmodel is aangepast. De aanpassingen aan het model en het effect daarvan worden in detail benoemd in Sectie 3.3. Het model zoals in deze sectie beschreven vormt de basis voor de modellen die zijn gebruikt voor beide modelexercities.

Het bakjesmodel bestaat uit 10 bakjes die samen het VZM voorstellen (Figuur 3-2, rode contouren). De locatie en grootte van de bakjes is zo gekozen dat zowel de oost-west gradiënt over het Krammer-Volkerak als de noord-zuid gradiënt over de Eendracht, het Zoommeer en het Bathse spuikanaal (enigszins) kunnen worden gereproduceerd. Voor elk bakje is een oppervlak, een diepte en een volume gedefinieerd. Tussen de bakjes is een uitwisselingslengte en een dispersiecoëfficiënt gedefinieerd voor de modellering van de chlorideconcentratie. De waardes daarvan staan vermeld in Deltares (2020).

De pijlen in Figuur 3-2 geven de ingaande en uitgaande posten (debieten/zoutvrachten) weer in het model:

- **Paarse pijlen:** ingaande waterdebieten bij de Volkeraksluizen, Dintel en Steenbergse Vliet met bijbehorende chlorideconcentratie.
- **Lichtgroene pijlen:** uitgaande waterdebieten bij de Bathse spuisluis, Krammersluizen (bij werkende IZZS, anders een ingaand debiet), Bergse Diepsluis, Kreekraksluizen en door de watervraag vanuit de waterschappen.
- **Gele pijlen:** Zoutvracht door zoute kwel en kunstwerken (de krammersluizen, Bergse Diepsluis en de Bathse spuisluis). Zoute kwel is verdeeld over verschillende bakjes in percentages: Krammer West (bakje IV, 30%), Eendracht Noord (bakje V, 10%), Eendracht Zuid (bakje VI, 10%), Zoommeer (bakje VII, 25%) en Zoommeer Zuid (bakje VIII, 25%). Deze verdeling is conform Deltares (2020) en op basis van expert judgement.
- **[+/-]:** Neerslag en verdamping

Voor alle hierboven benoemde posten wordt voor elke tijdsstap in het model een aanname gedaan voor de termen van de waterbalans (debiet) en de chloridebalans (zoutvracht). Alleen voor de Bathse spuisluis hoeft dit niet, aangezien deze berekend wordt met het model. Hoe de debieten van de Bathse spuisluis berekend worden in het model wordt in Sectie 3.3 verder toegelicht aangezien dit verschilt per modelexercitie.

Aannames en modelkeuzes

- Voor de initiële conditie in het model is een chlorideconcentratie van 125mg/l gekozen voor elk bakje. Dit is een waarde die overeenkomt met een relatief zoete periode in het VZM (Figuur 2-2 en Deltares (2020)).
- In het model is aangenomen dat de dijken en randen van de kunstwerken meegroeien met de zeespiegelstijging.
- In het model is aangenomen dat de waterbeschikbaarheid vanuit het Hollands Diep niet beperkend is. Binnen het model is het debiet dat bij de Volkeraksluizen het VZM binnenkomt altijd beschikbaar. Of dit ook echt zo is in relatie tot de waterverdeling bovenregionaal wordt in het deelonderzoek over de bovenregionale verdeling beschouwd (Arcadis/Hydrologic (2023e)).
- In het model wordt aangenomen dat er geen veranderingen zijn in de chlorideconcentratie van het Hollands Diep. Dit wordt verder beschouwd in de discussie (Hoofdstuk 5).
- In het model is de streefwaterstand -0,1 m. De seizoensmatige peiltrap wordt niet meegenomen.
- Er is geen inspeeltijd meegenomen.
- Wind is niet direct meegenomen in het model als randvoorwaarde. De invloed van wind op horizontale en verticale menging is wel meegenomen in de modelbenadering via onder anderen de dispersiecoëfficiënt. In de discussie wordt de dispersiecoëfficiënt uitgebreider beschouwd (Hoofdstuk 5).
- **De invoer/uitvoer vanuit alle posten is binnen elk scenario elke dag hetzelfde: De invoer is stationair.** Deze keuze is gemaakt omdat de focus in deze

studie niet ligt op dagelijkse of maandelijkse variatie (seizoenen). Dit is verder toegelicht in de modelleerstrategie (Sectie 3.1).

- Het model rekent twee jaar door met één jaar aan modelinvoer die twee keer achtereenvolgens gebruikt wordt.



Figuur 3-2 Verdeling van de bakjes in het bakjesmodel en in- en uitgaande posten (Deltares, 2020).

Stappen die in het model doorlopen worden

In het model worden de volgende stappen doorlopen voor elk scenario dat doorgerekend wordt:

1. Voor iedere post van de waterbalans (m^3/s) en de chloridebalans ($kg\ Cl/s$) (Figuur 3-2) wordt per dag een aanname gedaan (modelinvoer) (behalve voor de Bathse spuisluis). De modelinvoer is statisch dus elke dag wordt dezelfde aanname gedaan.
2. Met een Python script wordt achtereenvolgens per tijdsstap van één dag:

- a. De spuidebieten bij de Bathse spuisluis berekend (per modelexercitie anders).
 - b. De waterstandverandering over het gehele VZM berekend, gegeven de in- en uitgaande debieten en het zojuist berekende debiet bij de Bathse spuisluis.
 - Hierbij wordt een correctie uitgevoerd wanneer de waterstand onder NAP -0,1 m komt (dan wordt er $0\text{ m}^3/\text{s}$ gespuid bij de Bathse Spuisluis, watertekort). Dan wordt er maximaal $9\text{ m}^3/\text{s}$ minder gespuid en/of gespoeld bij de Krammersluizen. Hoeveel er minder gespuid en/of gespoeld moet worden hangt af van wat er nodig is om de waterstand op -0,1m te behouden. (Nb: Dit is alleen voor de variant waarbij er $29\text{ m}^3/\text{s}$ wordt gespuid en gespoeld, de zogenaamde wintervariant, Sectie 3.4.1.4.)
 - c. De wateruitwisseling tussen de 10 bakjes van het bakjes-model berekend.
3. Met waterkwaliteitssoftware D-WAQ wordt op basis van
- a. de berekende wateruitwisseling tussen de bakjes,
 - b. de termen van de chloridebalans waaronder de berekende zoutvracht van de Krammersluizen,
- de chlorideconcentratie in de 10 bakjes van het bakjesmodel berekend. De formule die in D-WAQ gebruikt wordt met uitleg staat beschreven in Deltares (2020).

3.3 De modelexercities

Het VZM-systeem wordt in deze studie op twee manieren benaderd:

1. Het VZM-systeem met de huidige beheerstrategie en infrastructuur.
2. Het VZM-systeem waarin aanpassingen zijn gedaan aan de infrastructuur (o.a. aanleg pompen/ vergroting spuicapaciteit).

Deze twee manieren om het systeem te beschouwen zijn gevat in twee modelexercities. Modelexercitie 1 kijkt naar het systeem met de huidige infrastructuur waarbij getracht wordt het streefpeil te behouden. Modelexercitie 2 kijkt naar het systeem buiten de huidige infrastructurale grenzen, waarin er gekeken wordt naar wat het systeem nodig heeft om de chlorideconcentratie onder de drempelwaarde te behouden en om het streefpeil te behouden. In onderstaande tabel (Tabel 3-1) staan de specificaties van deze modelexercities. De modelexercities verschillen op 3 vlakken van elkaar: de benadering van 1) de Bathse spuisluis, 2) de Krammersluizen en 3) de Volkeraksluizen. In de tabel worden deze kort toegelicht. De technische toelichting staat verderop in deze sectie. In Tabel 3-2 worden de onderzoeksvragen uit de vraagspecificatie (Sectie 1.2) die specifiek door de modelexercities beantwoord worden toegelicht.

Tabel 3-1 De twee modeloefeningen met de modelmatige verschillen ertussen.

	Modeloefening 1: Huidige infrastructuur	Modeloefening 2: Wat heeft het systeem nodig om houdbaarheid van de zoetwaterbuffer te vergroten?
<i>Bathse spuisluis</i>	Beperkingen spuidebieten <u>Bathse spuisluis</u> i.r.t. zeespiegelstijging. Er wordt gespuid wat er mogelijk is met de huidige infrastructuur.	Geen beperkingen spuidebieten <u>Bathse spuisluis</u> . Er wordt gespuid/gepompt wat nodig is om het waterpeil te behouden op -0,1m.
<i>Krammersluizen</i>	De <u>Krammersluizen</u> falen bij 1,25m zeespiegelstijging waardoor de zoutlast sterk toeneemt.	Voor de <u>Krammersluizen</u> worden de spui- en spoeldebieten overgenomen door pompen. Daarnaast wordt bekeken wat het systeem nodig heeft (doorspoeling) wanneer de IZZS faalt en de zoutvracht flink hoger wordt.
<i>Volkeraksluizen</i>	Sturing op waterinlaat <u>Volkeraksluizen</u> : Wanneer de waterstand boven het streefpeil dreigt te gaan (bijvoorbeeld door een periode met hoge rivierdebieten), zal er geen water ingelaten worden bij de Volkeraksluizen. Het debiet wat opgelegd wordt, is dus het maximale debiet wanneer dit haalbaar is voor het systeem.	Geen sturing op waterinlaat <u>Volkeraksluizen</u> . Het debiet wat opgelegd wordt is het debiet wat ook het model binnenkomt.

Tabel 3-2 De twee modeloefeningen en de kennisvragen uit de vraagspecificatie die specifiek worden beantwoord met de modeloefeningen.

	Modeloefening 1: Huidige infrastructuur	Modeloefening 2: Wat heeft het systeem nodig?
<i>A. Kennisvragen over waterstand, waterbeschikbaarheid en chlorideconcentratie in het VZM</i>	A1 Tot welke mate van zeespiegelstijging kan de waterstand gehandhaafd blijven? – Gebruikmakend van de huidige infrastructuur.	A1 Tot welke mate van zeespiegelstijging kan de waterstand gehandhaafd blijven? – Welke infrastructurele aanpassingen zijn hiervoor nodig?
	<i>n.v.t. aangezien dit voor modeloefening 2 al wordt beantwoord.</i>	A2 Tot welke mate van zeespiegelstijging kan de waterbeschikbaarheid gehandhaafd blijven? – maximale watervraag waterschappen waarbij het chloridegehalte aanvaardbaar blijft
	A3 Tot welke mate van zeespiegelstijging blijft de chlorideconcentratie op een voldoende laag niveau? –	A3 Tot welke mate van zeespiegelstijging blijft de chlorideconcentratie op een voldoende laag niveau? –

	Gebruikmakend van de huidige infrastructuur.	Welke systeeminvoer en infrastructuur is hiervoor benodigd.
<i>B. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) watervraag en afvoerbehoefte van de omliggende gebieden</i>	<i>n.v.t. aangezien binnen deze modelexercitie de debieten vanuit de Volkeraksluizen dynamisch zijn.</i>	B1 Hoe verandert de watervraag (doorspoelbehoefte) als gevolg van een toename van zoute kwel als gevolg van zeespiegelstijging?
<i>C. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) debiet en zoutvracht door de kustwerken:</i>	C2 Hoe verandert de aan- of afvoercapaciteit van de kunstwerken als gevolg van zeespiegelstijging? - binnen deze modelexercitie wordt de vraag specifiek voor de Bathse Spuisluis beantwoord. Voor de andere kunstwerken is hier al op ingegaan in de systeemanalyse (Hoofdstuk 2)	<i>n.v.t. aangezien binnen deze modelexercitie er gespuid wordt wat nodig is</i>

Verschillen in de modelcode tussen de modelexercities

In de modelcode is er op twee vlakken een verschil tussen de modelexercities, 1) de berekening van de spuidebieten van de Bathse spuisluis en 2) de inlaat van de Volkeraksluizen. Onderstaand zijn deze verschillen toegelicht:

1. Berekening spuidebieten Bathse spuisluis

- **Modelexercitie 1:** Huidige infrastructuur

Gedurende de twee jaar die doorgerekend wordt, wordt per dag berekend wat gespuid kan worden. Dit wordt berekend met behulp van een waterstandstijdsreeks bij Bath aan de Westerschelde. Om de debieten te berekenen is een eenvoudige afvoerrelatie gebruikt, waarbij het waterstandsverschil tussen het VZM en de Westerschelde altijd positief moet zijn, anders is het spuidebiet 0 (Deltares, 2020):

$$Q_{Bathse\ spuisluis} = A \cdot \mu \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{VZM} - h_{WS})}$$

Met:

- A = Doorstroomoppervlak van de Bathse spuisluis (85m² voor de 6 kokers)
- μ = afvoercoëfficiënt (0,65)
- g = zwaartekrachtsversnelling (9,81m/s²)
- h_{VZM} = waterstand VZM
- h_{WS} = waterstand Westerschelde

Als de benodigde afvoer om het waterpeil te handhaven groter is dan de maximale capaciteit ($Q_{Bathse\ spuisluis}$), kan niet alles afgevoerd worden en zal de waterstand in het Volkerak-Zoommeer stijgen. Wanneer de zeespiegel stijgt (de waterstand aan de Westerschelde h_{WS} gaat omhoog) wordt het verval kleiner ($h_{VZM} - h_{WS}$) en kan er dus ook minder gespuid worden.

- **Modelexercitie 2:** Geen infrastructurele grenzen van de kunstwerken

In deze modelexercitie wordt er gekeken hoeveel spui- of pompcapaciteit er nodig is om de waterstand te behouden.

2. Inlaat Volkeraksluizen

- **Modelexercitie 1:** Huidige infrastructuur

Sturend op het waterpeil: In het Bakjesmodel wordt na elke tijdstap een check uitgevoerd of de waterstand boven de 10cm NAP uitkomt. Als dat zo is dan moet het

debiet bij de Volkeraksluizen gereduceerd worden naar $0\text{m}^3/\text{s}$ zodat het waterpeil zakt. Als het waterpeil voldoende ($<10\text{cm}$ NAP) is gezakt dan wordt het oorspronkelijk maximaal aangeboden debiet weer gehanteerd (het opgegeven debiet). Dit komt overeen met hoe er nu met het systeem wordt omgegaan.

- **Modeloefening 2:** Geen infrastructurele grenzen van de kunstwerken
Wanneer er bij de Bathse spuisluis geen beperkingen zijn (er wordt gespuid wat nodig is om het peil te behouden) is deze sturing niet meer nodig. Vandaar dat bij de tweede modeloefening de debieten die opgegeven zijn gewoon gehanteerd kunnen worden.

3.4 De modelinvoer

Voor de modelstudie zijn keuzes gemaakt welke systeemvariabelen worden meegenomen in de modeloefeningen als randvoorwaarden (zie Tabel 2-1 voor een overzicht). Bij ieder scenario wordt een unieke set systeemvariabelen (randvoorwaarden) doorgerekend. De systeemvariabelen die gevarieerd worden noemen we de assen van de hyperkubus die alle mogelijke scenario's beschrijft. In deze sectie worden deze keuzes langsgelopen, samen met de keuzes van de variatie binnen de assen van de hyperkubus. Daarnaast wordt een overzicht gegeven van de modelinvoer per modeloefening.

3.4.1 De assen van de hyperkubus

De systeemvariabelen die meegenomen worden in de modeloefening als primaire vrijheidsgraden zijn de volgende posten (de 'assen van de hyperkubus'):

- Zeespiegelstijging (Sectie 3.4.1.1)
- Neerslag, verdamping en lokale rivierafvoer (samen als één as) (Sectie 3.4.1.2)
- Inlaat Volkeraksluizen (Sectie 3.4.1.3)
- Debiet/zoutvracht Krammersluizen (Sectie 3.4.1.4)
- Directe en indirecte zoute kwel (Sectie 3.4.1.5)

3.4.1.1 Zeespiegelstijging

Voor primaire vrijheidsgraad zeespiegelstijging is er een verschil in bereik tussen de modeloefeningen. Voor de modeloefening die kijkt binnen de huidige infrastructuur (modeloefening 1) is het bereik tussen 0 en 2m zeespiegelstijging, met intervallen van 0,25m, omdat voortschrijdend inzicht liet zien dat met 2m zeespiegelstijging het systeem zeker niet meer houdbaar is in de huidige staat. Voor de modeloefening die kijkt zonder infrastructurele grenzen (modeloefening 2) is het bereik tussen 0 en 5m zeespiegelstijging, met intervallen van 1m.

3.4.1.2 Neerslag, verdamping en lokale rivierafvoer

Neerslag, verdamping en rivierafvoer uit de lokale lateralen zijn in hoge mate aan elkaar gecorreleerd (Sectie 2.3.1 en 2.3.2). Bijvoorbeeld, bij veel neerslag zal de rivier afvoer hoog zijn en de verdamping klein. Om die reden worden deze drie componenten samengenomen als as. Voor de rivierdebieten is de keuze gemaakt om alleen de Dintel en de Steenbergse Vliet mee te nemen. De Zoom en de wateraanvoer via de kleine lateralen van de polders/gemalen worden niet meegenomen vanwege hun kleine aandeel (zie Sectie 3.4.3 voor een verdere toelichting).

Voor deze as zijn 5 varianten genomen:

1. Wat als: Extreem nat
2. Nat
3. Gemiddeld

4. Droog
5. Wat als: Extreem droog

Voor elke bovenstaande variant wordt een constante (stationaire) waarde genomen voor de water aan- en afvoeren van de Dintel, Steenbergse Vliet, neerslag en verdamping. Met constante waarde wordt bedoeld dat voor elke tijdsstap in het model dezelfde waarde wordt genomen voor een bepaald scenario (stationair). Deze keuze is gemaakt omdat het onderzoek zich richt op de lange termijn (3 maanden/ half jaar) en niet op de tijdschaal van wekelijkse of dagelijkse variatie.

Algeheel is voor elke post (neerslag/ verdamping/ afvoer Dintel/ afvoer Steenbergse Vliet) het natte en droge scenario bepaald aan de hand van het lopende gemiddelde over 3 maanden (boven en ondergrens). De periode van 3 maanden is gekozen om niet op een te korte tijdschaal te kijken, zoals neerslag events of een extreem droge zomermaand, aangezien in deze studie gekeken wordt naar een langere tijdschaal. Een periode van een half jaar is niet gekozen omdat dan het verschil tussen droog en nat erg klein wordt door de seizoenen.

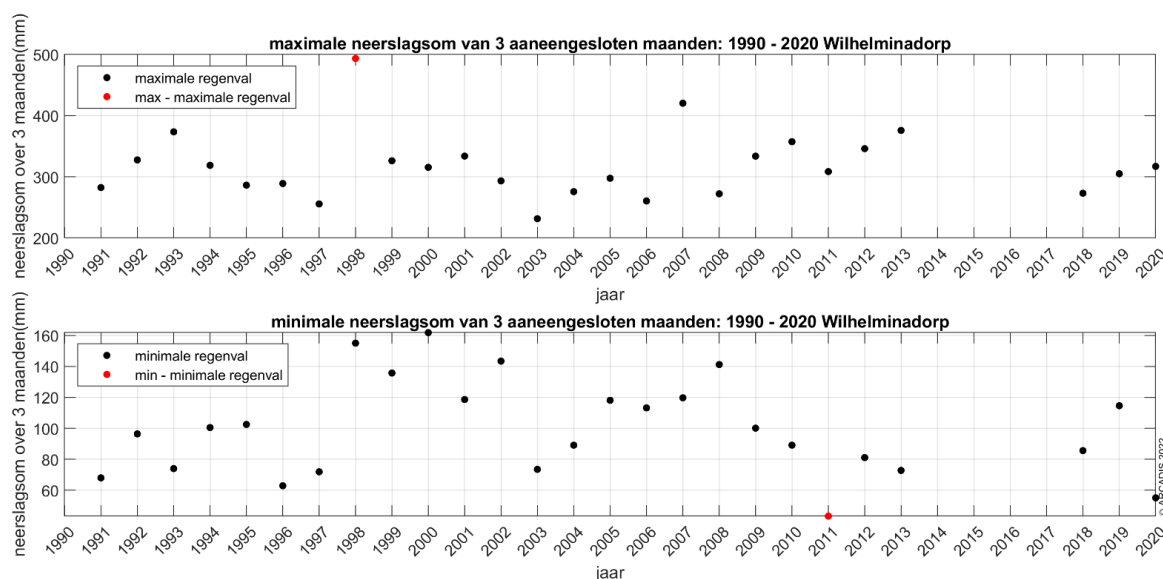
Het 'extreem natte' en 'extreem droge' scenario is gelijk aan het 'natte' en 'droge' scenario vermenigvuldigd met een factor van respectievelijk 1,25 en 0,75. Deze extreme scenario's zijn daarmee minder gebaseerd op de data en kunnen meer gezien worden als 'wat als?' situaties. Onderstaand wordt dit per post gespecificeerd. Daarnaast staat in Tabel 3-3 een overzicht van de varianten en de bijbehorende debieten per post. Voor de chlorideconcentratie zijn vaste waarden gekozen. Voor de Dintel en de Steenbergse Vliet is 80 mg Cl/l gehanteerd, voor de neerslag is deze 5 mg Cl/l en voor de verdamping is deze 0 mg Cl/l (conform Deltares (2020)).

Tabel 3-3 Overzicht debieten varianten van de as: verdamping, neerslag en rivierdebieten.

Variant	Neerslag [m³/s]	Verdamping [m³/s]	Debiet Dintel [m³/s]	Debiet Steenbergse vliet [m³/s]	Totaal [m³/s]
<i>Extreem nat</i>	4,71	-0,28	45,5	11,4	61,33
<i>Nat</i>	3,77	-0,37	36,4	9,1	48,90
<i>Gemiddeld</i>	1,56	-1,10	10,2	4,5	15,16
<i>Droog</i>	0,33	-2,20	4,7	0,9	3,73
<i>Extreem droog</i>	0,25	-2,75	3,5	0,7	1,69

Neerslag

De gemiddelde neerslag variant is bepaald door het gemiddelde te nemen van de jaarsommen tussen 1990 en 2020 voor het meetstation Wilhelminadorp (Figuur 2-6). Het natte en droge scenario is bepaald door de maximale en minimale neerslagsom van 3 aaneengesloten maanden per jaar te berekenen (Figuur 3-3). De natste 3 aaneengesloten maanden vielen in 1998 (gemiddeld 4,88 mm/dag) en de droogste 3 aaneengesloten maanden in 2011 (gemiddeld 0,48 mm/dag). Deze constante waarden zijn genomen voor de natte en droge variant. Voor het extreem natte scenario is 25% opgeteld bij 4,88 mm/dag en voor het extreem droge scenario is 25% afgetrokken van de 0,48 mm/dag.



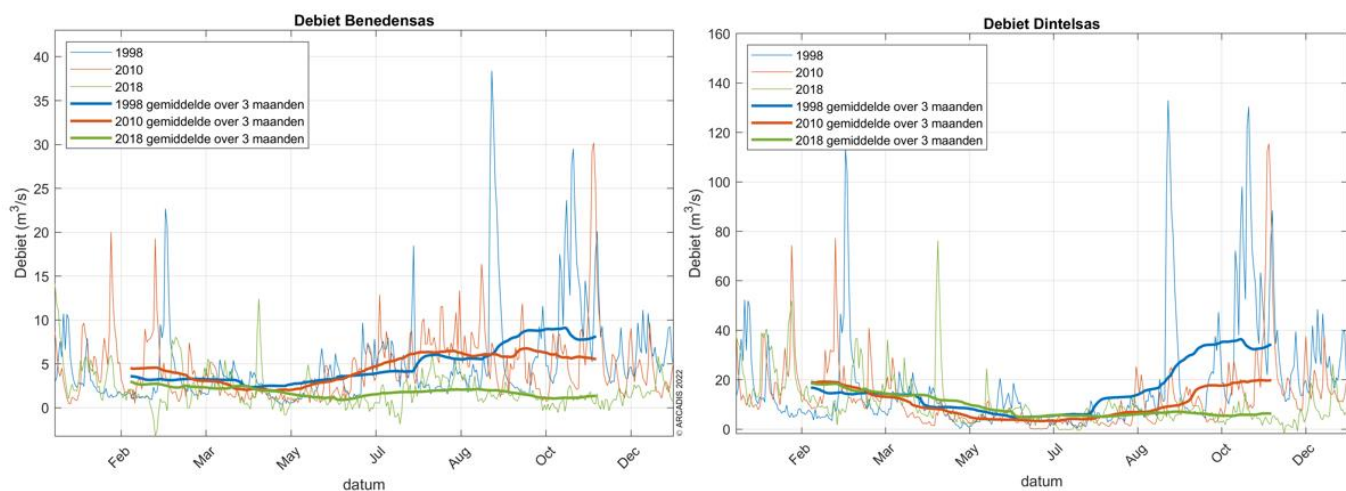
Figuur 3-3 De maximale en minimale neerslagsom van 3 aaneengesloten maanden per jaar. Neerslagdata van 1990 tot 2020 van meetstation Wilhelminadorp is hiervoor geanalyseerd.

Verdamping

Het gemiddelde verdampingsscenario is bepaald door het gemiddelde te nemen van het lopend 3-maandelijks gemiddelde van data tussen 1990 en 2020 op basis van meetgegevens van meetstation Wilhelminadorp (Figuur 2-5, $-1,10 \text{ m}^3/\text{s}$). De natte (verdamping laag) en droge (verdamping hoog) variant is bepaald door de minimale en maximale verdamping te nemen van het lopend gemiddelde over 3 maanden (oranje en zwarte lijn in Figuur 2-5). Dit is $-0,37 \text{ m}^3/\text{s}$ en $-2,20 \text{ m}^3/\text{s}$, respectievelijk. De extreem natte variant (verdamping extreem laag) is bepaald door 25% af te trekken van $-0,37 \text{ m}^3/\text{s}$. De extreem droge variant (verdamping extreem hoog) is bepaald door 25% op te tellen bij $-2,20 \text{ m}^3/\text{s}$.

Rivierdebiet Dintel en Steenbergse Vliet/ Benedensas

Rivierdebietgegevens bij de Dintelsas en de Benedensas zijn geanalyseerd voor de jaren 1998 (nat jaar), 2010 (gemiddeld jaar) en 2018 (droog jaar) (Figuur 3-4). De gemiddelde variant is bepaald door het gemiddelde te nemen van het lopend gemiddelde over 3 maanden van 2010 (gemiddelde van de dikke rode lijn in Figuur 3-4). De natte variant is bepaald door het maximale debiet van de dikke blauwe lijn te nemen (data uit 1998, gemiddelde over 3 maanden). De droge variant is bepaald door het minimale debiet van de dikke groene lijn te nemen (data uit 2018, gemiddelde over 3 maanden).



Figuur 3-4 De rivierdebieten bij de Dintelsas en Benedensas voor het jaar 1998 (nat), 2010 (gemiddeld) en 2018 (droog). De dikke lijnen zijn het lopend gemiddelde van 3 aaneengesloten maanden uit 1998, 2010 en 2018.

3.4.1.3 Inlaat Volkeraksluizen

De waterinlaat bij de Volkeraksluizen is, zeker in droge tijden wanneer de wateraanvoer vanuit Brabant klein is, van groot belang om het systeem voldoende zoet te houden. Daarom wordt deze post meegenomen als as. De volgende range aan debieten (varianten) zijn in het bakjesmodel opgelegd: 15, 25, 40, 60, 80 en 100m³/s. De extreme waarden van 60, 80 en 100m³/s zijn gekozen om af te tasten of deze debieten toereikend zijn om de chlorideconcentratie in het VZM onder de drempelwaarde van 450mg Cl/l te houden in de meer extreme zeespiegelstijging scenario's. In de rapportage van het bovenregionaal systeem (Arcadis/Hydrologic, 2023e) wordt beschouwd of deze debieten ook haalbaar zijn.

De chlorideconcentratie (100 mg Cl/l) wordt constant genomen voor deze inlaatdebieten hoewel deze zou kunnen toenemen met een stijgende zeespiegel (verzilting Hollands-Diep). Hier wordt in de discussie een verdere toelichting op gegeven.

In de modeloefeningen wordt verschillend omgegaan met de zoetwaterinlaat bij de Volkeraksluizen. Bij modeloefening 1 (huidige infrastructuur) is het debiet afhankelijk van de waterstand. Als het waterpeil van het VZM onder de 10cm NAP is, dan is het debiet gelijk aan 15/25/40/60/80 of 100 m³/s. Komt het waterpeil boven de 10cm uit dan is het debiet vanuit de Volkeraksluizen tijdelijk 0 m³/s totdat het waterpeil genoeg gezakt is. Dit wordt in de resultaten aangeduid als 'maximaal aangeboden debiet' (semi-stationair).

Voor modeloefening 1 is het debiet wel volledig stationair.

3.4.1.4 Debiet/zoutlast Krammersluizen

De Krammersluizen zijn de grootste sluisen die schutten op het VZM met ook de grootste zoutvracht. Daarom wordt deze post meegenomen als primaire as van de hyperkubus. De zoutvracht op het VZM vanuit de Krammersluizen hangt direct af van de zeespiegelstijging maar ook van de mate van spoelen en spuien (zie uitleg in Sectie 2.3.4). Het netto debiet, de zoutvracht en de koppeling met de zeespiegelstijging kunnen dus niet los van elkaar gezien worden. De modelinvoer voor modeloefening 1 en 2 verschillen van elkaar en zijn daarom hier toegelicht.

Modeloefening 1 – huidige infrastructuur: twee varianten

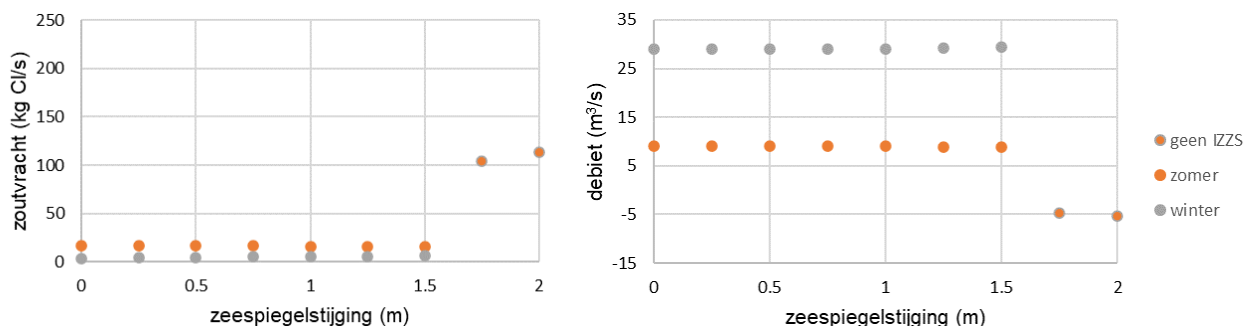
Voor deze modeloefening zijn berekeningen uitgevoerd tussen 0 en 2m zeespiegelstijging met stappen van 25cm.

1. Zomervariant – huidige infrastructuur

Het spoel- en spuidebiet is 9m³/s met de bijbehorende zoutvracht berekend met de Zeesluisformulering. Wanneer de zeespiegelstijging groter is dan 1,25m wordt aangenomen dat de IZZS faalt en neemt de zoutvracht toe. Daarnaast worden de debieten negatief (het zoute kolkwater wordt op het VZM geloosd) (Figuur 3-5).

2. Wintervariant – huidige infrastructuur

Het spoel- en spuidebiet is 29m³/s met de bijbehorende zoutvracht berekend met de Zeesluisformulering. Wanneer de zeespiegelstijging groter is dan 1,25m wordt aangenomen dat de IZZS faalt en neemt de zoutvracht toe. Daarnaast worden de debieten negatief (het zoute kolkwater wordt op het VZM geloosd) (Figuur 3-5).



Figuur 3-5 De debiet/zoutlast vanuit de Krammersluizen voor de varianten van modeloefening 1 (huidige infrastructuur).

Modeloefening 2 – geen beperkingen huidige infrastructuur: drie varianten

Voor deze modeloefening is er gekeken tussen 0 en 5m zeespiegelstijging met stappen van 1m.

1. Zomervariant met overname door pompen

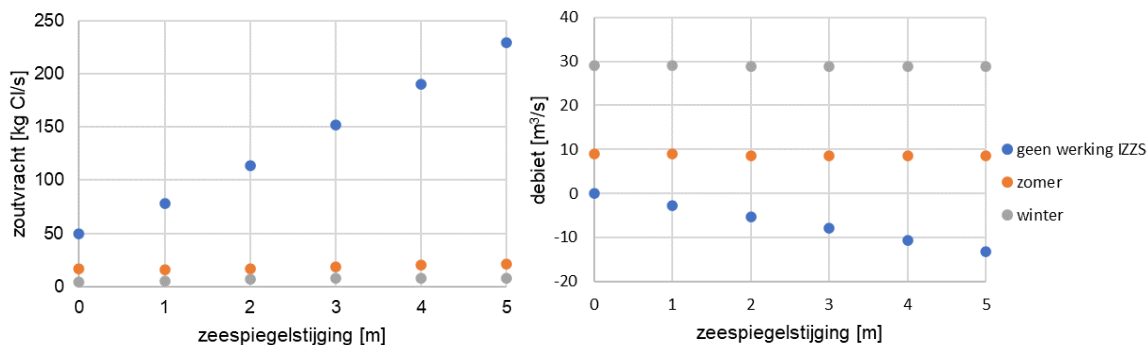
Het spoel- en spuidebiet is 9m³/s met de bijbehorende zoutvracht berekend met de Zeesluisformulering. Wanneer de zeespiegelstijging groter is dan 1,25m wordt aangenomen dat er pompen worden ingezet om het Laag bekken laag te houden en om de spuien (Figuur 3-6).

2. Wintervariant met overname door pompen

Het spoel- en spuidebiet is 29m³/s met de bijbehorende zoutvracht berekend met de Zeesluisformulering. Wanneer de zeespiegelstijging groter is dan 1,25m wordt aangenomen dat er pompen worden ingezet om het Laag bekken laag te houden en om de spuien (Figuur 3-6).

3. De IZZS werkt niet meer

De spoel- en spuidebieten zijn niet meer mogelijk onder vrij verval, de IZZS werkt niet meer. Hierdoor zullen de debieten inkomend worden op het VZM en neemt de zoutlast sterk toe (Figuur 3-6). Deze variant is genomen om te onderzoeken wat de doorspoelbehoefte is wanneer de IZZS niet meer werkt.

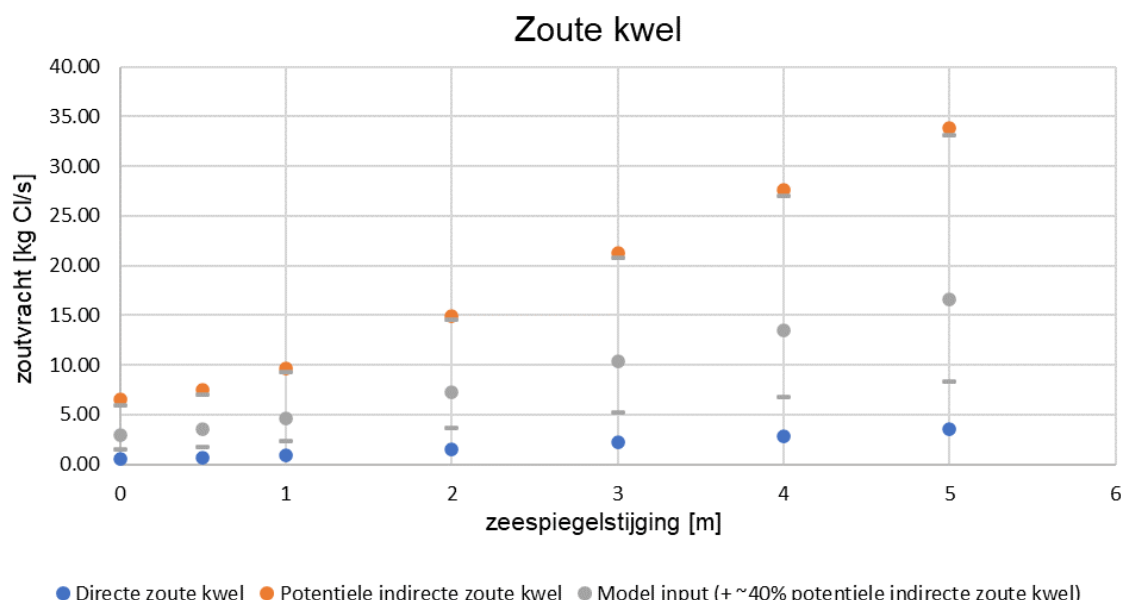


Figuur 3-6 De debiet/zoutlast vanuit de Krammersluizen voor de varianten van modelexercitie 2.

3.4.1.5 Zoute kwel

Zoute kwel bestaat uit twee takken. De indirecte zoute kwel, door de verzilting van lateralen die uitmonden op het VZM en de directe zoute kwel op het VZM. Deze twee takken worden samengenomen binnen de as zoute kwel.

Het bakjesmodel dat gebruikt wordt voor deze studie is gevalideerd en gekalibreerd voor de chlorideconcentraties door een constante (directe) zoute kwel op te leggen van 3 kg Cl/s (0m zeespiegelstijging). In deze studie wordt aangenomen dat deze waarde klopt. Wanneer deze waarde vergeleken wordt met de huidige directe zoute kwel uit de data van Deltares (2022) dan is er een groot verschil te zien. Deze waarde is 0,5 kg Cl/s voor 0m zeespiegelstijging. Het verschil van 2,5 kg Cl/s kan komen door indirecte zoute kwel die zo toch is meegenomen in de kalibratie en validatie van het bakjesmodel. Deze 2,5 kg Cl/s is ca. 40% van de potentiële zoute kwel zoals te zien in Figuur 3-7 (bij 0m ZSS). Daarom is in deze studie de zoute kwel (indirect + direct) berekend door de directe zoute kwel uit de studie van Deltares (2022) op te tellen bij ~40% van de potentiële zoute kwel uit deze studie (grijze datapunten in Figuur 3-7). Dit is gedefinieerd als de gemiddelde variant van de as zoute kwel.



Figuur 3-7 Directe zoute kwel, potentiële indirecte zoute kwel en de voorgestelde modelinput. Deze modelinput is de directe zout kwel ca. +40% van de potentiële indirecte zoute kwel. De streepjes zijn de onder- en bovengrens (keer 1/2 en keer 2 de grijze datapunten). De zoute kwel voor 4 en 5m ZSS zijn berekend door lineaire extrapolatie van de data.

Om ook een onzekerheidsband mee te nemen is er ook een boven- en een ondergrens meegenomen. Het is van belang dat er gewerkt wordt met een onder- en bovengrens ten opzichte van het gemiddelde zodat er een gevoeligheid wordt meegenomen in het onderzoek. De onder- en bovengrens is bepaald door keer ½ en keer 2 het gemiddelde te doen (grijze streepjes in Figuur 3-7). Dit is een grove inschatting om een zo groot mogelijke gevoeligheid af te dekken.³

3.4.1.6 Overzicht assen hyperkubus

In Tabel 3-4 zijn de primaire assen van de hyperkubus aangegeven met de intervallen/ scenario's per as en per modeloefening. Beiden modeloefeningen komen uit op een totaal van 1620 scenario's wat neer komt op ongeveer 14 uur rekentijd per modeloefening.

Twee assen zijn afhankelijk van de hoeveelheid zeespiegelstijging. Dit is het debiet/zoutvracht vanuit de Krammersluizen en de zoute kwel. Dus wanneer de zeespiegel stijgt zal neemt de zoutvracht toe voor de individuele varianten van de Krammersluizen en de zoute kwel.

Tabel 3-4 Overzicht van de assen van de hyperkubus per modeloefening met de intervallen.

Assen hyperkubus	Varianten per as modeloefening 1		Varianten per as modeloefening 2	
Zeespiegelstijging	0, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200cm	9	0, 100, 200, 300, 400, 500cm	6
Inlaat Volkeraksluizen	15, 25, 40, 60, 80 en 100m ³ /s	6	15, 25, 40, 60, 80 en 100m ³ /s	6
Neerslag/verdamping / rivieren	extreem nat / nat / gemiddeld / droog / extreem droog	5	extreem nat / nat / gemiddeld / droog / extreem droog	5
Debiet/zoutlast Krammersluizen	Zomersscenario huidige infrastructuur / winterscenario huidige infrastructuur	2	Zomersscenario met pompen/ winterscenario met pompen / IZZS werkt niet	3
Zoute kwel	Ondergrens / gemiddeld / bovengrens	3	Ondergrens / gemiddeld / bovengrens	3
Totaal aantal scenario's		1620		1620

3.4.2 De constante posten in het model

De systeemvariabelen die meegenomen worden in de modeloefening als constante post zijn:

- Bergse Diepsluis (debiet/zoutvracht)
- Kreekraksluizen (debiet/zoutvracht)
- Zoutlek Bathse spuisluis

³ In de studie van Deltares (2022) is de indirecte en directe zoute kwel ook berekend, deze eindrapportage kwam echter te laat uit om dit binnen deze studie mee te nemen. Met de eerder verkregen ruwe data van Deltares, is daarom een inschatting gemaakt van de directe en potentiële zoute kwel (sectie 2.3.8). De directe + indirecte zoute kwel van Deltares (2022) valt echter binnen de gekozen range (tussen de boven en ondergrens). Daarnaast is de zoute kwel post veel kleiner dan de zoutvracht vanuit de Krammersluizen waardoor het niet zinvol was om deze getallen aan te passen (geen grote veranderingen in de uitkomsten).

- Watervraag waterschappen

In Tabel 3-5 staat een overzicht van de constante posten met bijbehorende waarde.

Bergse Diepsluis

De Bergse Diepsluis fungeert als doorlaat voor de (kleine) scheepvaart. Deltares (2020) hanteert o.b.v. historische data hiervoor een constante afvoer van $1\text{m}^3/\text{s}$, en een constante zoutvracht van $0,5\text{ kg Cl/s}$. Er is gekozen om deze constante waarde over te nemen aangezien het om een klein sluiscomplex gaat. Hierdoor neemt de zoutvracht niet extreem toe met zeespiegelstijging tot 5m zoals ook gevisualiseerd in Figuur 2-13.

Kreekraksluizen/gemaal

In de studie van Deltares (2020) is gekozen voor een vaste waarde van $-2\text{m}^3/\text{s}$ (jaargemiddeld) op basis van historische data, hoewel deze tussen 1988 en 2009 schommelt tussen de -2 en $-8\text{m}^3/\text{s}$ (Deltares, 2003). Dit debiet zorgt ervoor dat de zoete bel in het Antwerps kanaalpand behouden blijft. Uit de modelstudie van Deltares (2022) kan worden opgemaakt dat de zoute kwel klein blijft (Figuur 2-15). Daarom wordt verwacht dat er geen enorm groter debiet nodig is voor het behoud van de zoete bel wanneer de zeespiegel stijgt. De post is daarom als een constante waarde meegenomen voor alle scenario's ($-2\text{m}^3/\text{s}$).

Zoutlek Bathse spuisluis

Ondanks dat er alleen water uit gaat bij de Bathse spuisluis, is er een klein zoutlek door de vismigratie. In Deltares (2020) is deze als constante waarde meegenomen ($0,1\text{kg Cl/s}$). Aangezien het om een klein zoutlek gaat zal deze post in deze studie ook als constante waarde worden meegenomen.

Watervraag waterschappen

De watervraag van de waterschappen (Brabantse Delta, Scheldestromen en Hollandse Delta) varieert per seizoen. In de studie van Deltares (2020) is de watervraag constant genomen en gebaseerd op historische data, representatief voor de zomer. Deze waarde wordt in deze studie overgenomen als constante (in totaal $-4,4\text{m}^3/\text{s}$). Dit bestaat uit een watervraag van $0,5\text{m}^3/\text{s}$ vanuit waterschap Hollandse Delta, $0,9\text{m}^3/\text{s}$ vanuit de Brabantse Delta en $3\text{m}^3/\text{s}$ vanuit waterschap Scheldestromen.

In de modelstudie wordt dus niet meegenomen dat de watervraag in de toekomst kan veranderen. Wel is in deze studie het zoetwateroverschot berekend van elk scenario (zie Sectie 3.5.1). Het zoetwateroverschot geeft inzicht in hoeveel water er nog 'gevraagd' kan worden vanuit de waterschappen voor ieder scenario.

Tabel 3-5 Overzicht constante posten.

Post	Debiet [m^3/s]	Zoutvracht [kg Cl/s]
Bergse diepsluis	-1	0,5
Kreekraksluizen	-2	Uitkomst bakjesmodel
Zoutlek Bathse spuisluis	Uitkomst bakjesmodel	0,1 kg Cl/s
Watervraag waterschappen	-4,4	Uitkomst bakjesmodel

3.4.3 Posten die niet worden meegenomen in het model

De systeemvariabelen die niet meegenomen worden zijn:

- Debieten van de Zoom
- Debieten van de RWZI's
- Debieten van de gemalen

De debieten van de kleine lateralen (Zoom), gemalen, polders en de RWZI's worden niet meegenomen als post door hun kleine aandeel binnen het systeem.

3.5 Post-processing

3.5.1 Berekening zoetwateroverschot

Het zoetwateroverschot is binnen deze studie gedefinieerd als het debiet dat daggemiddeld gedurende 3 maanden aan het systeem onttrokken kan worden, zodat voldaan wordt aan de volgende twee criteria:

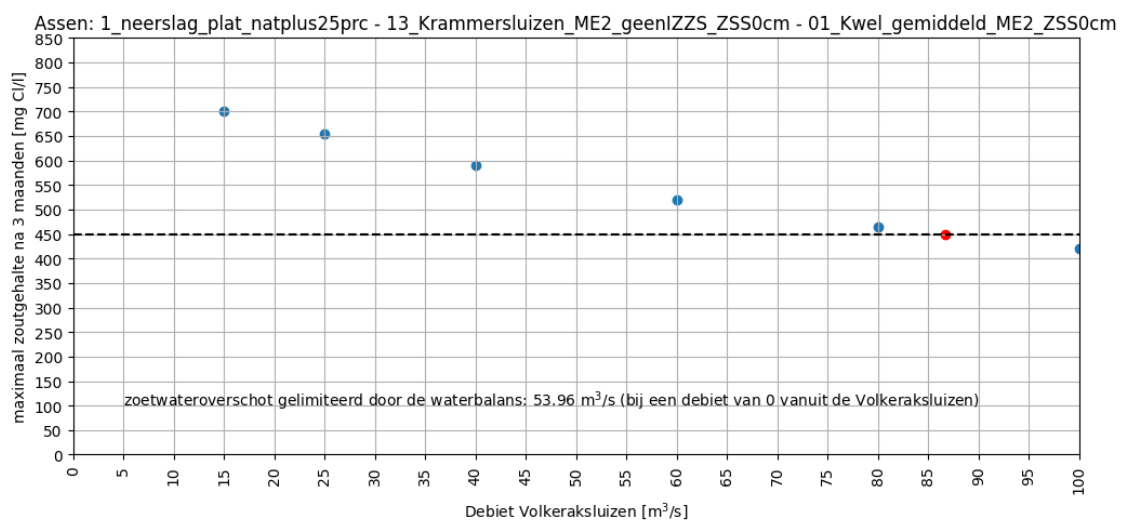
- **Chloridecriterium:** De chlorideconcentratie bij Bath aan het einde van die 3 maanden nog net 450mg/l is (zoetwateroverschot gelimiteerd door de chlorideconcentratie) **en**
- **Waterbalanscriterium:** De waterstand gehandhaafd blijft (-0,1m) (zoetwateroverschot gelimiteerd door de waterbalans).

De aanname die hier wordt gemaakt is dat in het meest optimale geval bij het onttrekken van het zoetwateroverschot: 1) de chlorideconcentratie van 450mg/l net na het eind van de 3 maanden wordt bereikt 2) zonder dat het water te laag zakt (niet onder de -0,1 m). Dus als de concentratie aan het eind van de 3 maanden lager is (als uitkomst van het model) is er meer water verbruikt voor doorspoeling dan strikt noodzakelijk en wordt dit hier als zoetwateroverschot gedefinieerd waarbij het waterpeil niet onder het streefpeil zakt. Hierbij wordt dus geen rekening gehouden met de locatie en moment van de onttrekking, vandaar de benoeming van 'het meest optimale geval'. In werkelijkheid heeft de locatie en het moment van onttrekken invloed op de doorspoeling van het systeem. Daarom is het hier gedefinieerde zoetwateroverschot niet gelijk aan het water dat gebruikt kan worden voor het vergroten van de watervraag.

Om het zoetwateroverschot te bepalen moet zowel aan het chloridecriterium als het waterpeilcriterium worden voldaan. Het zoetwateroverschot is alleen bepaald voor de modeluitkomsten van modeloefening 2 en is volgens de onderstaande stappen berekend:

1. Voor een bepaalde combinatie van assen (behalve de as debiet Volkeraksluizen) wordt de maximale chlorideconcentratie na drie maanden uitgezet ten opzichte van het debiet bij de Volkeraksluizen. In Figuur 3-8 (blauwe datapunten) is hier een voorbeeld van gegeven.
2. Vervolgens wordt door middel van interpolatie (of zo nodig extrapolatie), de intersectie bepaald met de drempelwaarde van 450mg Cl/l (Figuur 3-8, het rode datapunt). Dit punt bepaalt het zoetwateroverschot voor het chloridecriterium. In het geval van het voorbeeld is het zoetwateroverschot bij een inlaat van 100m³/s: 100-87 = 13m³/s. Bij een inlaat van 80m³/s is dit 0m³/s: 80-87 < 0 = 0m³/s.
3. Vervolgens wordt gecheckt wat het zoetwateroverschot is op basis van het waterbalanscriterium. Deze is afgerond 54m³/s bij een debiet van 0 m³/s vanuit de Volkeraksluizen (tekst in Figuur 3-8). Bijvoorbeeld: Bij een inlaat van 40m³/s vanuit de Volkeraksluizen is er een zoetwateroverschot van 54+40 = 94m³/s per dag gezien de waterbalans en bij een inlaat van 100m³/s vanuit de Volkeraksluizen is er een zoetwateroverschot van 54+100 = 154m³/s per dag gezien de waterbalans.
4. De het zoetwateroverschot berekend met het chloridecriterium wordt vervolgens vergeleken met de het zoetwateroverschot berekend met het waterbalanscriterium. De kleinste van de twee is de uiteindelijke het zoetwateroverschot gevisualiseerd in het resultaten hoofdstuk. Voor het gegeven voorbeeld (Figuur 3-8) is de het zoetwateroverschot voor een inlaat bij de Volkeraksluizen van 100m³/s, 13m³/s omdat het zoetwateroverschot gezien de waterbalans 154m³/s en het zoetwateroverschot gezien het chloridecriterium 13m³/s is (in dit geval is het zoetwateroverschot gelimiteerd door het

chloridecriterium). Voor de andere debieten vanuit de Volkeraksluizen is het zoetwateroverschot $0\text{m}^3/\text{s}$ aangezien het chloridegehalte van het VZM al te hoog is.



Figuur 3-8 Voorbeeld van de bepaling van het zoetwateroverschot van de scenario's uit modelexercitie 2.



4

**Resultaten
modelschematisatie**

4 Resultaten

De modelresultaten zijn in dit hoofdstuk opgedeeld in de resultaten van modelexercitie 1 (huidige infrastructuur) en modelexercitie 2 (buiten de infrastructurale grenzen). De kennisvragen die direct door deze modelexercities beantwoord worden zijn in de methode aangegeven in Sectie 3.3 (Tabel 3-2) en vormen de rode draad binnen dit hoofdstuk.

De figuren binnen dit hoofdstuk waarin de maximale waterstand, maximale chlorideconcentratie, debiet Bathse spuisluis of de maximale watervraag zijn geplot ten opzichte van de as zeespiegelstijging, hebben een korte toelichting nodig (bijvoorbeeld Figuur 4-2): Om duidelijk te visualiseren hoe de kleuren, die een bepaalde secundaire as laten zien, per ZSS-variant verdeeld zijn, zijn ze iets naast elkaar geplot. De x-as is in deze figuren is dus een discrete as en geen continue as.

Voor de figuren in dit hoofdstuk met de maximale chlorideconcentratie, is de keuze gemaakt om de maximale chlorideconcentratie op 3 maanden te laten zien, en niet na 6 of 12 maanden. Deze keuze is gemaakt omdat de as neerslag/rivieren/verdamping gebaseerd is op het 3-maandelijks gemiddelde van een heel nat, gemiddeld en een droog jaar (Sectie 3.4.1.2). De periode van 3 maanden is gekozen om niet op een te korte tijdschaal te kijken, zoals neerslag events of een extreem droge zomermaand, aangezien in deze studie gekeken wordt naar een langere tijdschaal. Het is in de huidige situatie niet waarschijnlijk dat, bijvoorbeeld het 3-maandelijks gemiddelde van het droogste jaar, binnenkort voor 6 maanden aanhoudt, maar het zou wel kunnen dat dit in de toekomst wel voorkomt. Om die reden zijn de figuren met het maximale chloride gehalte na 6 maanden in Appendix A (modelexercitie 1) en Appendix B (modelexercitie 2) toegevoegd.

4.1 Modelexercitie 1: Huidige infrastructuur

4.1.1 A1 Tot welke mate van zeespiegelstijging kan de waterstand gehandhaafd blijven?

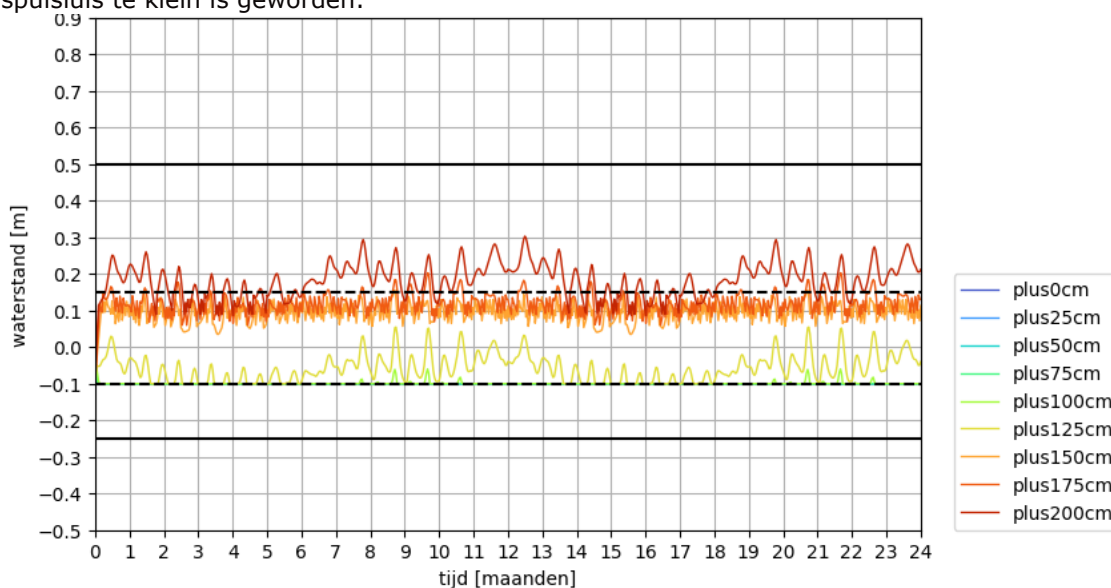
In Figuur 4-1 is een selectie aan waterstandstijdsreeksen te zien van modelexercitie 1. De asvarianten van deze tijdsreeksen zijn: 1) neerslag/verdamping/rivieren = gemiddeld; 2) Krammersluizen = zomervariant – huidige infrastructuur en 3) Volkeraksluizen = 40m³/s. De waterstandstijdsreeksen zijn getoond van alle zeespiegelstijgingsintervallen doorgerekend voor modelexercitie 1 (huidige infrastructuur). Zoute kwel heeft geen invloed op de waterstand en wordt dus niet beschouwd binnen deze sectie.

Het model streeft ernaar om de waterstand op -0,1m te behouden. Het is zichtbaar dat dit voor deze asvarianten haalbaar is tot 1m zeespiegelstijging. Bij meer dan 1m zeespiegelstijging komt de waterstand boven de -0,1m uit. De dynamiek die in deze tijdsreeksen (>1m ZSS) zichtbaar is, komt door 1) de springtijd-doodtijd cyclus en 2) het dynamisch beheer bij de Volkeraksluizen.

Gedurende doortijd kan er bij laagwater minder gespuid worden ten opzichte van springtijd. Wanneer de zeespiegel stijgt wordt het spuienster en dus de spuicapaciteit kleiner. Deze is extra klein bij doortijd waardoor de waterstand stijgt op het VZM wanneer de capaciteit kleiner is dan wat er nodig is om de waterstand op NAP -0,1 m te behouden (duidelijk zichtbaar in Figuur 4-1 voor 125cm en 200cm zeespiegelstijging). Bij springtijd is de spuicapaciteit relatief groter waardoor de waterstand iets zakt.

Voor 150cm en 175cm is duidelijk zichtbaar dat de waterstand rond de NAP +0,1 m zigzagt. De oorzaak hiervan is het dynamisch beheer bij de Volkeraksluizen. Wanneer de waterstand boven de NAP +0,1 m komt wordt de inlaat 0m³/s in plaats van de opgelegde 40m³/s. Bij 200cm zeespiegelstijging gaat de waterstand boven het streefpeil uit, ook ondanks het

dynamische waterbeheer bij de Volkeraksluizen, doordat de spuicapaciteit bij de Bathse spuisluis te klein is geworden.

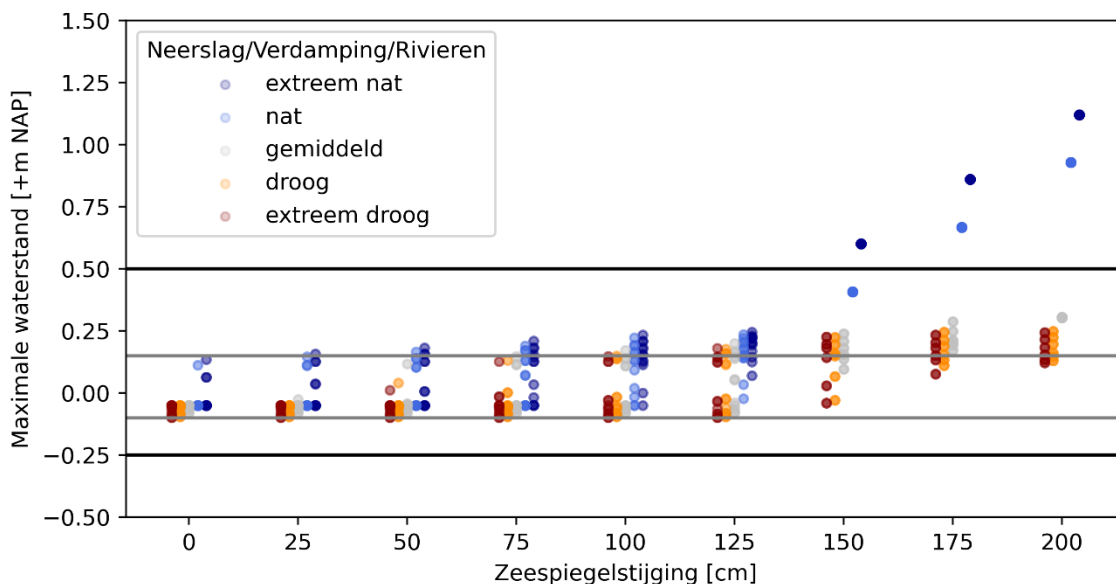


Figuur 4-1 Waterstandstijdseries van modeloefening 1. De horizontale lijnen geven de streefwaterstanden (NAP-0,1 en +0,15m) en de calamiteiten waterstanden (NAP-0,25 en NAP +0,5m) aan. De varianten binnen de assen zijn: neerslag/verdamping/rivieren = gemiddeld; Krammersluizen = zomervariant - huidige infrastructuur; Volkeraksluizen = 40m³/s.

In Figuur 4-2 zijn de maximale waterstanden voor alle scenario's geplotted ten opzichte van de zeespiegelstijgingvarianten. Daarnaast is in kleur aangegeven welke waarden horen bij de varianten van de as neerslag/verdamping/rivieren. Deze zijn naast elkaar geplotted per zeespiegelstijgingvariant om duidelijk zichtbaar te maken hoe de verdeling is. In dit figuur is zichtbaar dat vanaf 150cm zeespiegelstijging de waterstanden niet meer binnen het streefpeil (+15cm en -10cm, grijze lijnen) te behouden zijn voor alle natte en extreem natte scenario's. Ook voor de andere scenario's is vanaf 150cm zeespiegelstijging een sterke verhoging van de maximale waterstand te zien. Dit heeft met drie redenen te maken:

- 1) De IZZS van de Krammersluizen faalt vanaf 1,25m zeespiegelstijging. Hierdoor zijn er geen spoel- en spuidebieten (uitgaande debieten) meer maar wordt het zoute water geloosd op het VZM.
- 2) Het spuienster wordt kleiner bij de Bathse Spuisluis wanneer de zeespiegel stijgt. Hierdoor kan er minder water gespuid worden en gaat de waterstand omhoog wanneer er te veel water wordt aangevoerd (capaciteit is te klein).
- 3) Bij de natte en het extreem natte scenario's komt het meeste water het VZM in via neerslag en door rivierafvoer

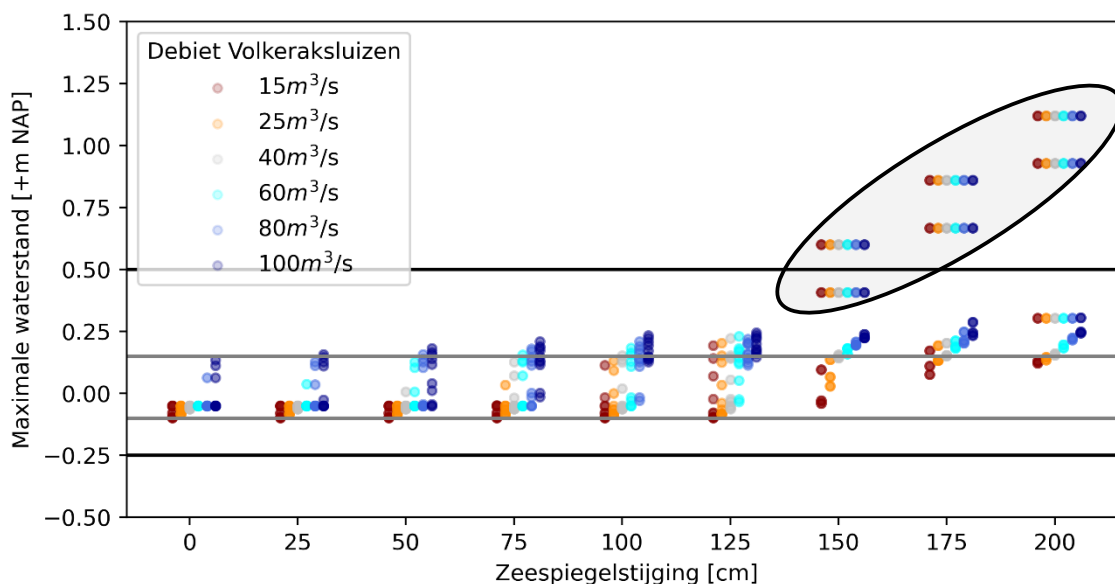
De varianten van neerslag/verdamping/rivieren zijn van grote invloed op de maximale waterstanden voor de zeespiegelstijging boven de 125cm doordat de debieten bij de Volkeraksluizen voor de meeste scenario's 0m³/s zijn voor bijna de gehele simulatie. Dit is zichtbaar in Figuur 4-3 waarin de punten voor zeespiegelstijging vanaf 150cm en corresponderend aan de natte en extreem natte neerslagvariant, voor alle debietvarianten van de Volkeraksluizen, dezelfde maximale waterstand hebben (zwarte ovaal).



Figuur 4-2 Maximale waterstand ten opzichte van zeespiegelstijging voor alle scenario's in modeloefening 1. De as neerslag/verdamping/rivieren is gevisualiseerd in de kleuren.

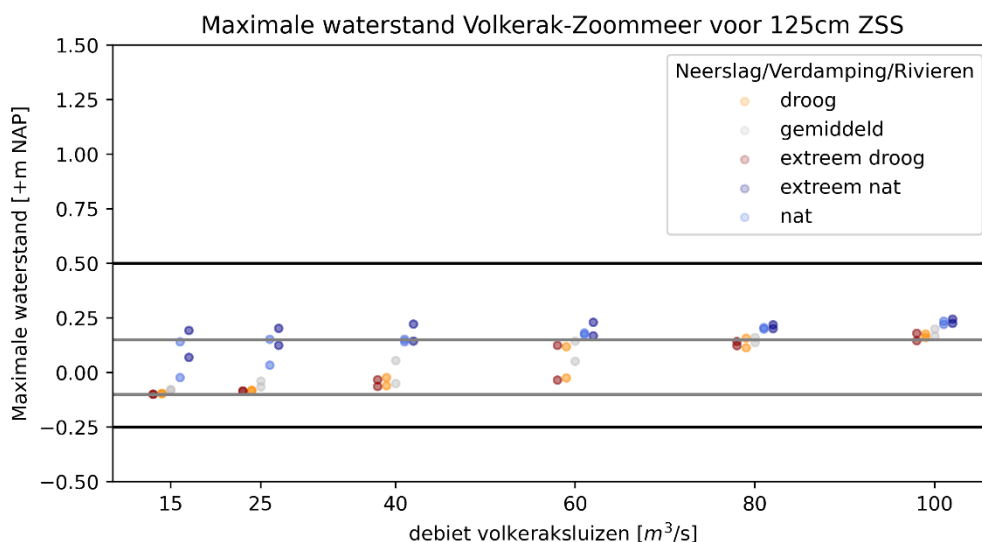
Onderstaand wordt aangegeven voor welke scenario's de waterstand gehandhaafd kan blijven met de streefpeilen van -10 en +15cm NAP als uitgangspunt:

- Voor 0 en 25cm zeespiegelstijging blijven alle scenario's tussen de streefpeilen.
- Voor 50 t/m 100cm zeespiegelstijging blijft de waterstand tussen de streefpeilen mits er een maximaal aangeboden debiet van 40m³/s of kleiner vanuit de Volkeraksluizen komt (Figuur 4-3). Bij een hoger maximaal aangeboden debiet zal de waterstand rond de 0,1m zo sterk fluctueren (zoals de fluctuatie zichtbaar in Figuur 4-1 voor 150cm ZSS) dat het streefpeil van 0,15cm overschreden wordt.
- Voor 125cm zeespiegelstijging blijft de waterstand tussen de streefpeilen
 - 1) mits er een maximaal toelaatbaar debiet vanuit de Volkeraksluizen komt van maximaal 40m³/s en het niet extreem nat wordt of,



Figuur 4-3 Maximale waterstand ten opzichte van zeespiegelstijging voor alle scenario's in modeloefening 1. De as maximale aangeboden debieten vanuit de Volkeraksluizen zijn gevisualiseerd in de kleuren.

- 2) mits er een maximaal toelaatbaar debiet vanuit de Volkeraksluizen komt van maximaal 60m³/s en het niet nat of extreem nat wordt (Figuur 4-4).
- Voor 150cm zeespiegelstijging blijft de waterstand gehandhaafd tussen de streefpeilen mits er maximaal 40m³/s komt vanuit de Volkeraksluizen en het niet nat of extreem nat wordt (varianten neerslag/verdamping/rivieren).
- Voor 175 en 200cm zeespiegelstijging kan de waterstand alleen gehandhaafd blijven mits het droog of extreem droog is en het maximaal aangeboden debiet bij de Volkeraksluizen 40m³/s of kleiner is.



Figuur 4-4 Maximale waterstand ten opzichte van het debiet vanuit de Volkeraksluizen, voor alleen de scenario's met 125cm zeespiegelstijging (modeloefening 1).

Onderstaand wordt aangegeven voor welke scenario's de waterstand gehandhaafd kan blijven met de calamiteitenpeilen van -25 en +50cm NAP als uitgangspunt:

- Voor zeespiegelstijging t/m 125cm blijven alle scenario's tussen de calamiteitenpeilen.
- Voor zeespiegelstijging van 150cm blijven alle scenario's tussen de calamiteitenpeilen mits het niet extreem nat wordt (neerslag/verdamping/rivieren as).
- Voor zeespiegelstijging van 175 en 200cm blijven alle gemiddelde, droge en extreemdroge scenario's (neerslag/verdamping/rivieren as) onder het calamiteitenpeil van 0,5m.

A1 Tot welke mate van zeespiegelstijging kan de waterstand gehandhaafd blijven? - Huidige infrastructuur

Bij handhaving tussen de streefpeilen (-10 cm - +15 cm):

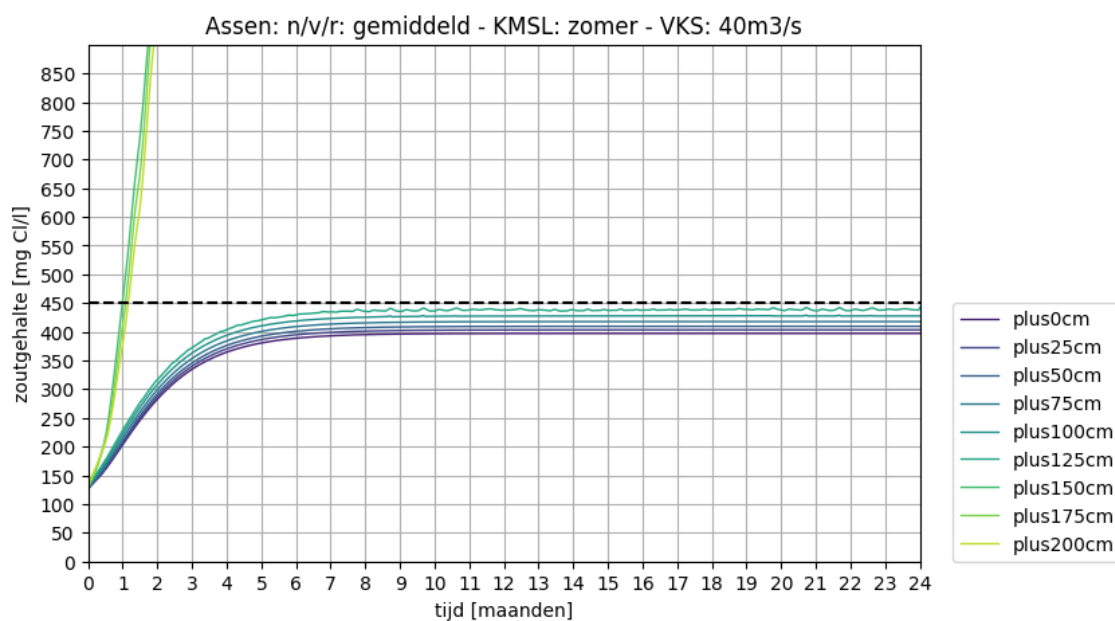
Tot 25 cm zeespiegelstijging kan de waterstand gehandhaafd blijven. Wanneer de zeespiegel 50 tot 100 cm stijgt blijft deze gehandhaafd mits er een maximaal aangeboden debiet van 40 m³/s of kleiner vanuit de Volkeraksluizen komt. Voor zeespiegelstijging vanaf 125 cm bepalen het neerslagoverschot en toestroom vanuit de lateralen, samen met het debiet vanuit de Volkeraksluizen of de waterstand gehandhaafd kan blijven. Wanneer de zeespiegel stijgt naar 150cm is onder de natte of extreem natte omstandigheden het waterpeil niet binnen de streefpeilen te handhaven. Vanaf 175 cm zeespiegelstijging is handhaving van de streefpeilen ook onder gemiddelde weeromstandigheden niet meer mogelijk.

Bij handhaving tussen de calamiteitenpeilen (-25cm - +50cm):

Tot 125cm zeespiegelstijging kan de waterstand gehandhaafd blijven. Wanneer de zeespiegel stijgt naar 150cm kan de waterstand gehandhaafd blijven mits het niet extreem nat wordt. Wanneer de zeespiegel stijgt naar 175 en 200cm kan de waterstand alleen gehandhaafd blijven mits het niet nat of extreem nat wordt.

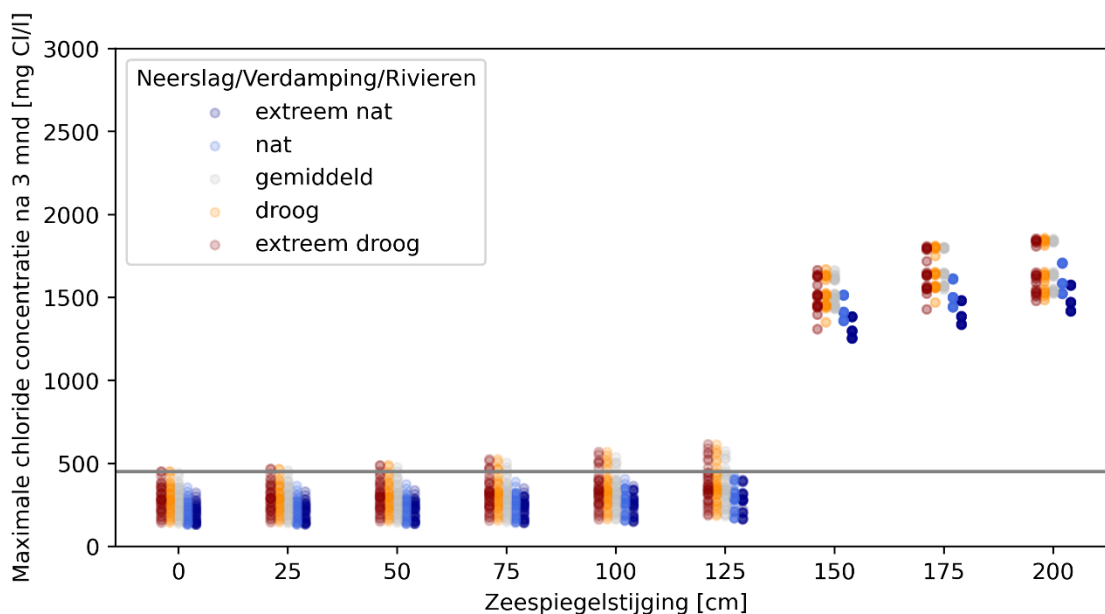
4.1.2 A3 Tot welke mate van zeespiegelstijging blijft de chlorideconcentratie op een voldoende laag niveau?

Figuur 4-5 laat een selectie aan tijdseries zien van de chlorideconcentratie bij Bath (bakje VIII, Figuur 3-2) van modeloefening 1. De asvarianten van deze tijdseries zijn: 1) neerslag/verdamping/rivieren = gemiddeld; 2) Krammersluizen = zomervariant – huidige



Figuur 4-5 Tijdseries van de chlorideconcentratie van modeloefening 1. De varianten binnen de assen zijn: neerslag/verdamping/rivieren = gemiddeld; Krammersluizen = zomervariant – huidige infrastructuur; Volkeraksluizen = 40m³/s.

infrastructuur en 3) Volkeraksluizen = 40m³/s. Hierin is zichtbaar dat wanneer de IZZS van de Krammersluizen faalt (voor zeespiegelstijgingvarianten 150, 175 en 200cm), de chlorideconcentratie sterk omhoog gaat. Dit geldt ook voor de meest wateraanvoerende scenario's van de as neerslag/verdamping/rivieren, wat zichtbaar is in Figuur 4-6. In dit figuur zijn de maximale chlorideconcentraties na drie maanden zichtbaar voor alle scenario's. Voor meest wateraanvoerende scenario's, de natte en het extreem natte scenario's is de chlorideconcentratie rond de 1500 mg Cl/l na drie maanden, wanneer de Krammersluizen falen. Dit is ver boven de drempelwaarde van 450 mg Cl/l.



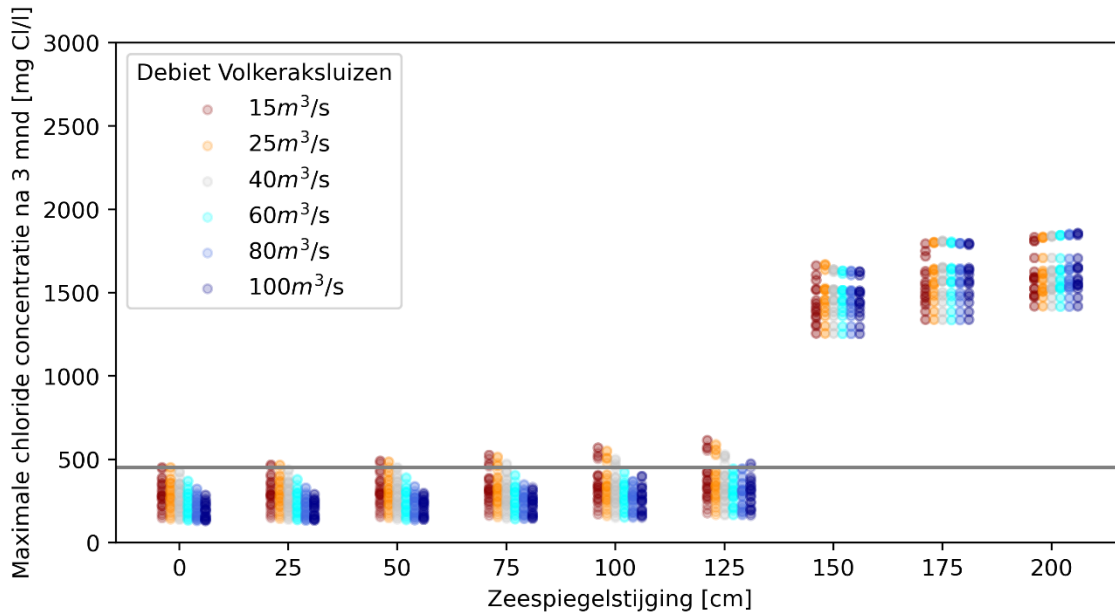
Figuur 4-6 Maximale chlorideconcentratie na 3 maanden ten opzichte van zeespiegelstijging voor alle scenario's in modeloefening 1. De as neerslag/verdamping/rivieren is gevisualiseerd in de kleuren.

Voor de zeespiegelstijgingvarianten vanaf 0 t/m 125 cm zeespiegelstijging blijft de chlorideconcentratie na drie maanden voor alle scenario's onder de drempelwaarde van 450 mg/l, mits het maximaal toelaatbare debiet bij de Volkeraksluizen 60 m³/s of hoger is (Figuur 4-7). Deze debieten zijn voornamelijk van belang bij (extreem) droge scenario's. Bij (extreem) natte scenario's is een debiet van 15 m³/s bij de Volkeraksluizen ook voldoende om de chlorideconcentratie te handhaven. De zoute kwel heeft minder invloed op de chlorideconcentratie ten opzichte van het debiet bij de Volkeraksluizen en de as neerslag/verdamping/rivieren zoals zichtbaar in Figuur 4-8.

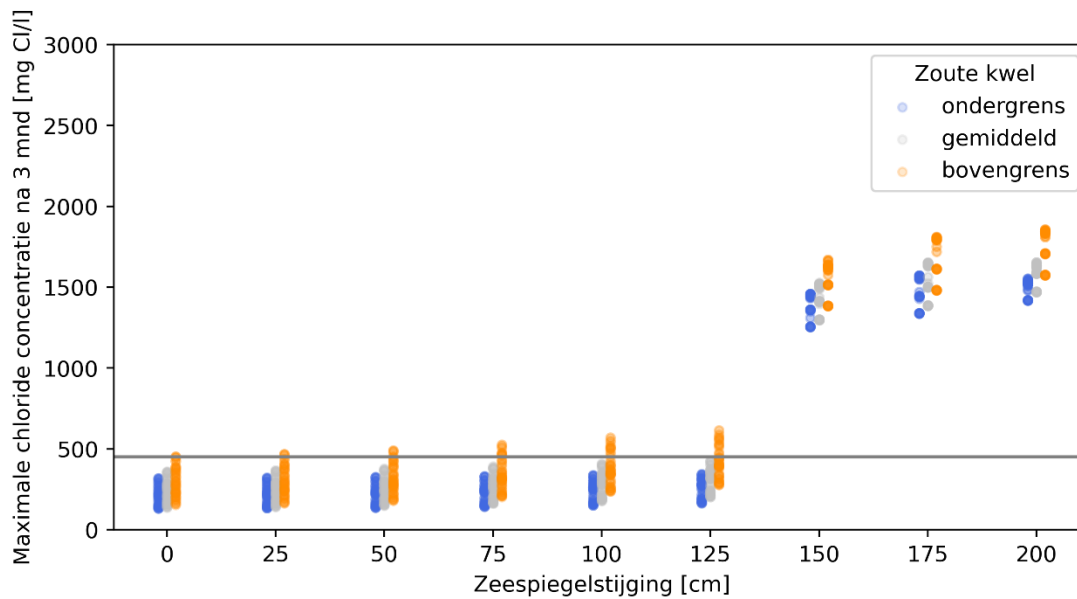
A3 Tot welke mate van zeespiegelstijging blijft de chlorideconcentratie op een voldoende laag niveau? - Huidige infrastructuur

Het systeem blijft houdbaar tot 125cm zeespiegelstijging. Dan blijft de chlorideconcentratie onder de 450mg/l mits de maximaal toelaatbare debieten bij de Volkeraksluizen 60m³/s of hoger zijn. Deze debieten zijn voornamelijk van belang bij (extreem) droge scenario's. Bij (extreem) natte scenario's is een debiet van 15m³/s bij de Volkeraksluizen ook voldoende om de chlorideconcentratie te handhaven.

Voor 150 t/m 200cm zeespiegelstijging kan door het falen van het IZZS bij de Krammersluizen de chlorideconcentratie niet meer op een voldoende laag niveau gehouden worden.



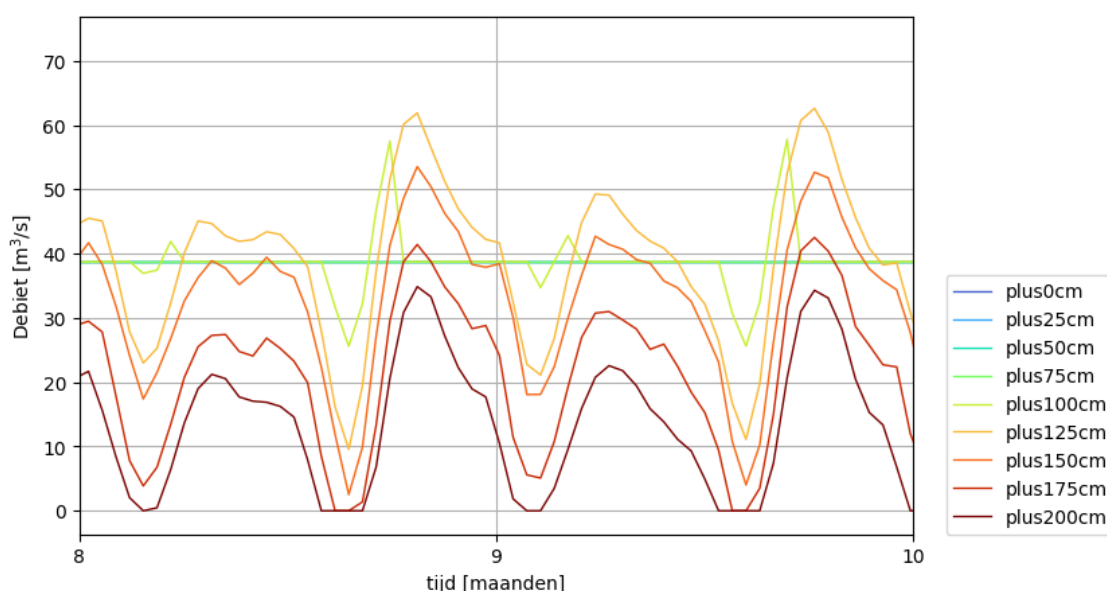
Figuur 4-7 Maximale chlorideconcentratie na 3 maanden ten opzichte van zeespiegelstijging voor alle scenario's in modeloefening 1. De as debiet Volkeraksluizen is gevisualiseerd in de kleuren.



Figuur 4-8 Maximale chlorideconcentratie na 3 maanden ten opzichte van zeespiegelstijging voor alle scenario's in modeloefening 1. De as zoute kwel is gevisualiseerd in de kleuren.

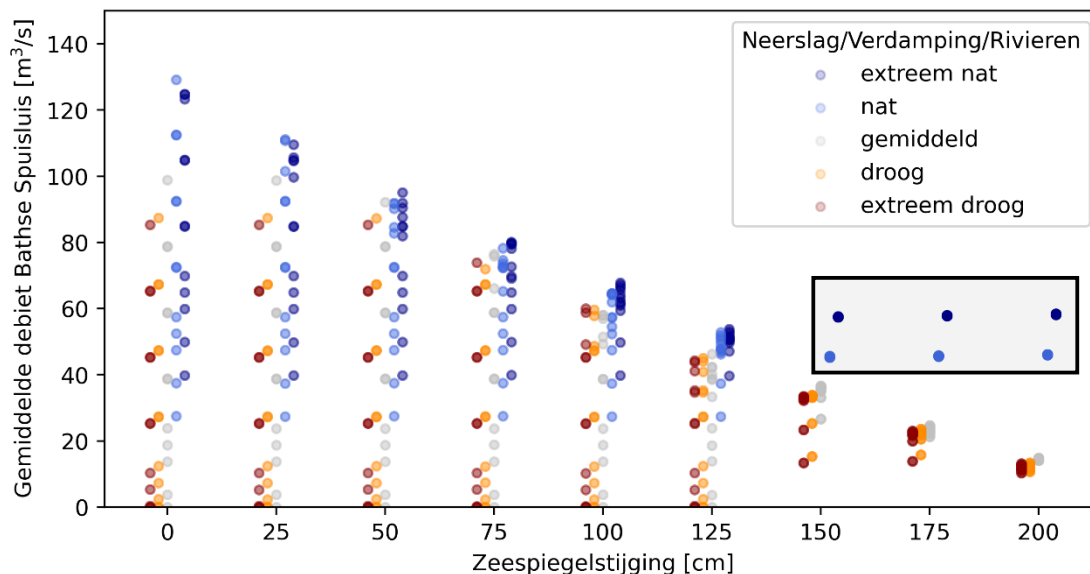
4.1.3 C2 Hoe verandert de aan- of afvoercapaciteit van de kunstwerken als gevolg van zeespiegelstijging?

Hoe verandert de aan- of afvoercapaciteit van de kunstwerken als gevolg van zeespiegelstijging? Deze vraag wordt binnen modeloefening 1 alleen beantwoord voor de Bathse Spuisluis. In Figuur 4-9 zijn tijdseries van de debieten van de Bathse spuisluis zichtbaar voor een selectie aan scenario's van modeloefening 1 (maand 8 t/m 10). De varianten binnen de assen zijn: neerslag/verdamping/rivieren = gemiddeld; Krammersluizen = zomervariant - huidige infrastructuur; Volkeraksluizen = 40m³/s. Hierin is zichtbaar dat wanneer het waterpeil op het streefpeil blijft van -0,1m, het spuidebiet constant blijft. Dit geldt voor zeespiegelstijgingvariant 0 tot en met 75cm waarbij het spuidebiet constant circa 39m³/s is. Wanneer het waterpeil in het model fluctueert (zoals in Figuur 4-1) is er ook een andere spuibeheer en een veranderlijk verval (in Figuur 4-9 vanaf 100cm zeespiegelstijging). Wanneer er niet genoeg gespuid kan worden ten opzichte van wat er nodig is (technisch limiet) gaat de waterstand omhoog. Hierdoor neemt het spuivenster (verval) toe en neemt vervolgens het spuidebiet toe. Vervolgens neemt het verval af en ook het spuidebiet. Dit is in Figuur 4-9 zichtbaar vanaf 100cm zeespiegelstijging.



Figuur 4-9 Tijdseries van de debieten van de Bathse spuisluis in relatie tot zeespiegelstijging voor maand 8 t/m 10. De varianten binnen de assen zijn: neerslag/verdamping/rivieren = gemiddeld; Krammersluizen = zomervariant - huidige infrastructuur; Volkeraksluizen = 40m³/s.

Figuur 4-10 toont het debiet van de Bathse Spuisluis, gemiddeld over de gehele duur van elk scenario van modeloefening 1. Bij 2m zeespiegelstijging kan er nog gespuid worden rond springtij wanneer de waterstand op het VZM -0,1m is (de waterstand waarop het model stuurt). Echter is de waterstand op het VZM een stuk hoger bij de meeste scenario's voor 2m zeespiegelstijging door een te kleine spuicapaciteit. Deze is extra hoog bij de natte en extreem natte scenario's waardoor de spuidebieten voor die varianten een stuk hoger zijn (Figuur 4-10, rechthoek).



Figuur 4-10 Het gemiddelde debiet van de Bathse Spuisluis voor elk scenario van modelexercitie 1. De as neerslag/verdamping/rivieren is gevisualiseerd in de kleuren.

De spuicapaciteit is nog voldoende tot en met 125cm zeespiegelstijging om de waterstand tussen de streefpeilen te behouden. Vanaf 150cm zeespiegelstijging is deze te klein bij (extreem) natte omstandigheden (Figuur 4-10).

C2 Hoe verandert de aan- of afvoercapaciteit van de kunstwerken als gevolg van zeespiegelstijging? - Huidige infrastructuur

Bathse spuisluis

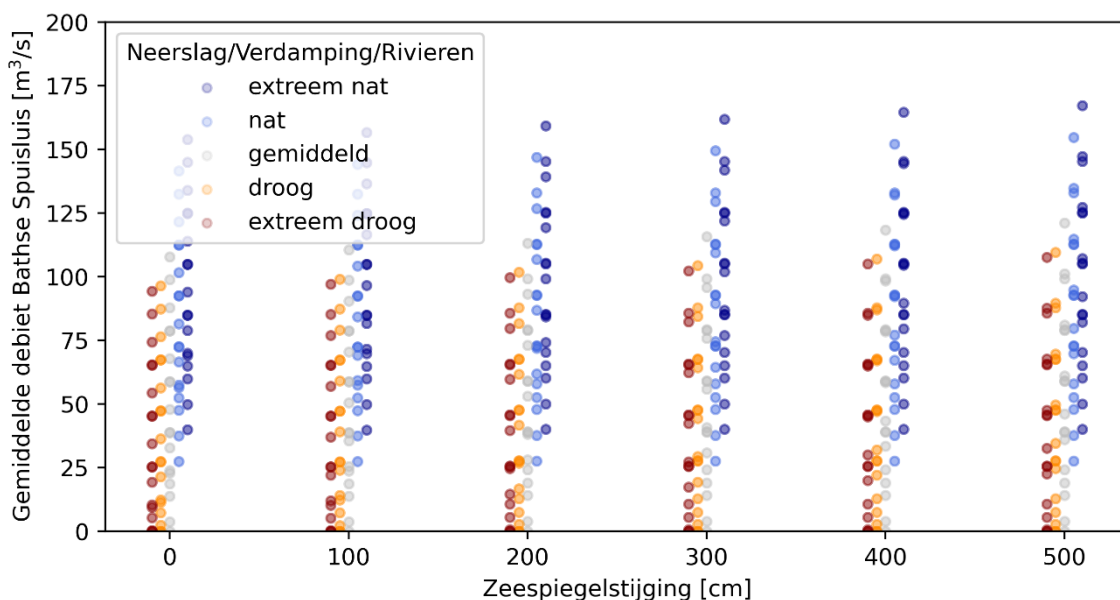
Door zeespiegelstijging neemt het verval tussen het VZM en de Westerschelde af bij laagwater. Hierdoor neemt de spuicapaciteit af. Als gevolg hierop neemt de waterstand op het VZM toe wanneer de spuicapaciteit kleiner is dan wat er nodig is om de waterstand op -0,1m te behouden. Door de toenemende waterstand neemt de spuicapaciteit iets toe en vervolgens weer af wanneer het verval weer kleiner wordt. Tot en met 125cm zeespiegelstijging is de spuicapaciteit nog voldoende om de waterstand tussen de streefpeilen te behouden. Vanaf 150cm zeespiegelstijging is deze te klein bij (extreem) natte omstandigheden. De spuicapaciteit verdwijnt helemaal bij 2,7m zeespiegelstijging.

4.2 Modelexercitie 2: Vergroten houdbaarheid zoetwaterbuffer

4.2.1 A1 Tot welke mate van zeespiegelstijging kan de waterstand gehandhaafd blijven?

In modelexercitie 1 (sectie 4.1.1) is beantwoord tot welke mate van zeespiegelstijging de waterstand gehandhaafd kan blijven (huidige beheerstrategie als kader). In deze sectie wordt de vervolgvraag, *Wat heeft het systeem nodig om de waterstand te handhaven wanneer dat met de huidige infrastructuur niet meer kan?*, beantwoord.

In Figuur 4-11 is het debiet van de Bathse Spuisluis, gemiddeld over de gehele duur van elk scenario van modelexercitie 2, zichtbaar. Hierin is zichtbaar dat het systeem een spuidebiet (of pompdebiet wanneer er niet genoeg spuicapaciteit is) nodig heeft tussen de 0 en 170m³/s. De hoogste spuicapaciteit (170m³/s) is benodigd voor de extreem natte scenario's waarbij er geen spoel-, spui en pompdebieten worden gebruikt bij Krammersluizen (asvariant 'de IZZS van de Krammersluizen faalt').



Figuur 4-11 Het gemiddelde debiet bij de Bathse Spuisluis voor elk scenario van modelexercitie 2. De as neerslag/verdamping/rivieren is gevisualiseerd in de kleuren.

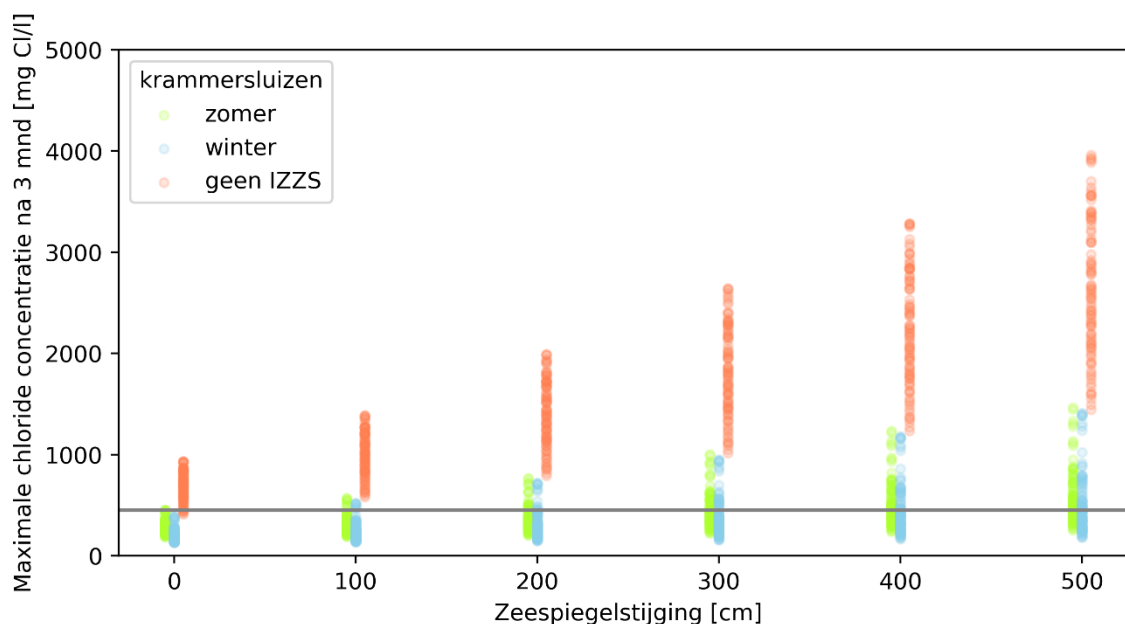
A1 Tot welke mate van zeespiegelstijging kan de waterstand gehandhaafd blijven? – Buiten huidige infrastructurele grenzen

Wat heeft het systeem nodig om de waterstand te handhaven wanneer dat met de huidige infrastructuur niet meer kan?

Een spui- en/of pompcapaciteit van ~170m³/s is benodigd bij de Bathse Spuisluis om voor alle scenario's de waterstand te handhaven tot en met 5m zeespiegelstijging. Deze capaciteit is benodigd wanneer er bij de Krammersluizen niet gespuid en/of gepompt wordt, voor het meest water aanvoerende scenario met 5m zeespiegelstijging. Wanneer er wel gespuid of gepompt wordt bij de Krammersluizen dan is de benodigde spui- en/of pompcapaciteit bij de Bathse Spuisluis lager.

4.2.2 A3 Tot welke mate van zeespiegelstijging blijft de chlorideconcentratie op een voldoende laag niveau?

In Figuur 4-12 is de maximale chlorideconcentratie na drie maanden geplot voor alle scenario's van modeloefening 2. In de kleuren is aangegeven welke scenario's horen bij de varianten van de Krammersluizen (zomer, winter, geen IZZS). Het is zichtbaar dat voor vrijwel alle combinaties aan scenario's de chlorideconcentratie boven de 450 mg Cl/l uitkomt wanneer de IZZS faalt. Het systeem is dus niet meer houdbaar wanneer de IZZS faalt, ook niet wanneer er 100m³/s binnenkomt bij de Volkeraksluizen en het extreem natte scenario wordt genomen.

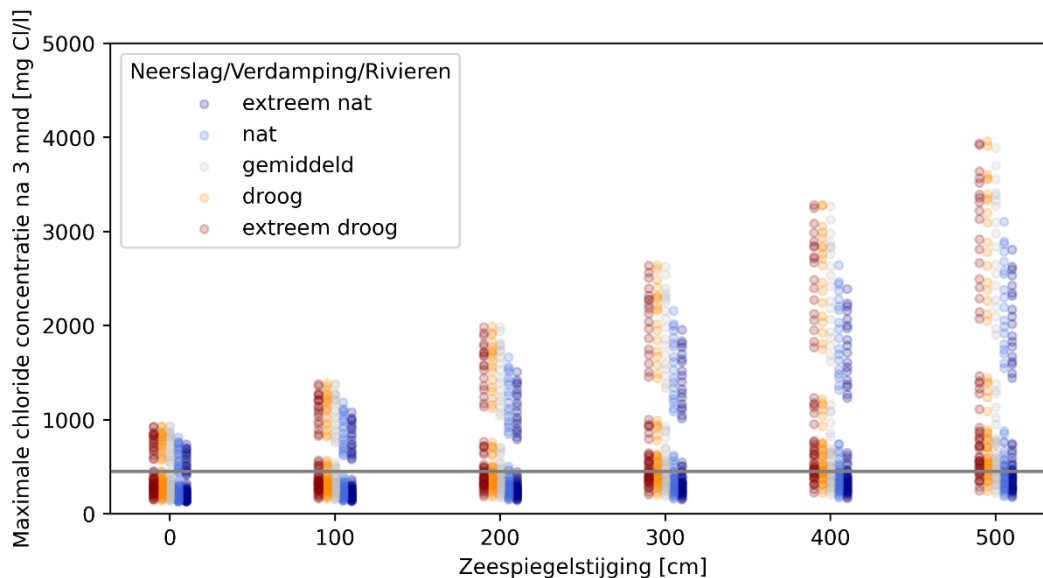


Figuur 4-12 Maximale chlorideconcentratie na 6 maanden ten opzichte van zeespiegelstijging voor alle scenario's in modeloefening 2. De varianten van de as Krammersluizen zijn gevisualiseerd in de kleuren.

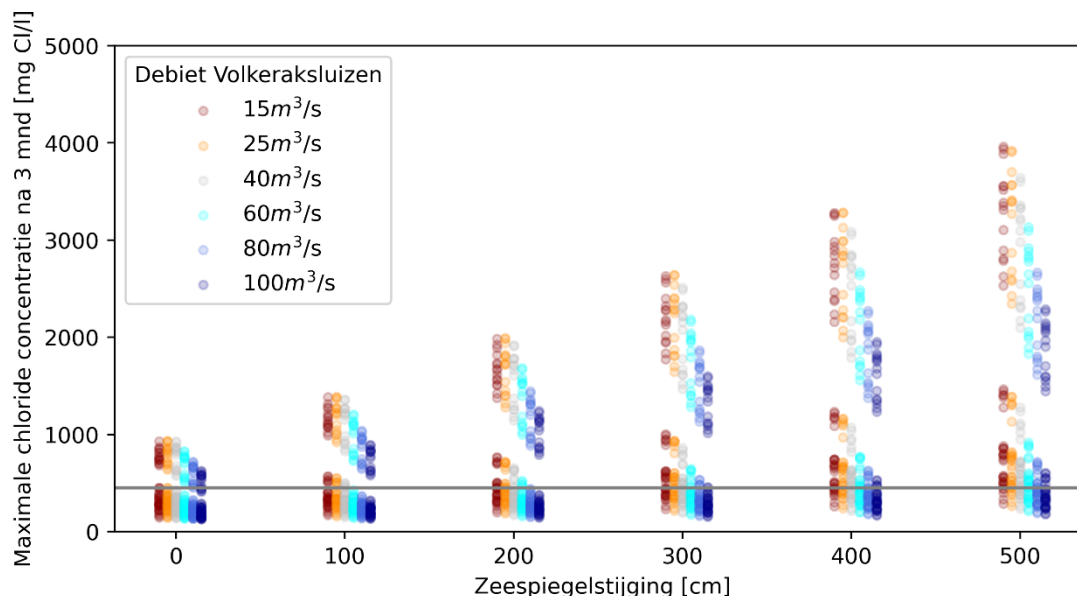
In Figuur 4-13 is de maximale chlorideconcentratie na 6 maanden geplot voor alle scenario's van modeloefening 2. In de kleuren is aangegeven welke scenario's horen bij de varianten van neerslag/verdamping/rivieren. Het is zichtbaar dat voor alle (extreem) natte scenario's, waarbij de Krammersluizen nog functioneren (zomer/winter variant), de maximale chlorideconcentratie nog onder de drempelwaarde van 450mg/l blijft. Wanneer het systeem bekeken wordt vanuit de doorspoelbehoefte (debiet Volkeraksluizen) per zeespiegelstijginginterval kan het volgende gezegd worden aan de hand van Figuur 4-12 en Figuur 4-14:

- Tot 0m zeespiegelstijging blijft het systeem houdbaar wanneer de IZZS bij de Krammersluizen niet faalt en er minimaal een daggemiddeld debiet van 40m³/s binnenkomt bij de Volkeraksluizen.
- Tot 1m zeespiegelstijging blijft het systeem houdbaar wanneer de IZZS bij de Krammersluizen niet faalt en er minimaal een daggemiddeld debiet van 60m³/s binnenkomt bij de Volkeraksluizen.
- Bij 2m zeespiegelstijging blijft het systeem houdbaar wanneer de IZZS bij de Krammersluizen niet faalt en er minimaal een daggemiddeld debiet van 80m³/s binnenkomt bij de Volkeraksluizen.
- Bij 3m zeespiegelstijging blijft het systeem houdbaar wanneer de IZZS bij de Krammersluizen niet faalt en er minimaal een daggemiddeld debiet van 100m³/s binnenkomt bij de Volkeraksluizen.

- Bij 4 en 5m zeespiegelstijging blijft het systeem voor de meeste scenario's houdbaar wanneer de IZZS bij de Krammersluizen niet faalt en er minimaal een daggemiddeld debiet van 100m³/s binnenkomt bij de Volkeraksluizen. Voor enkele scenario's, waarbij het (extreem) droog is en er 100m³/s binnenkomt bij de Volkeraksluizen, wordt de 450mg/l wel overschreden.



Figuur 4-13 Maximale chlorideconcentratie na 3 maanden ten opzichte van zeespiegelstijging voor alle scenario's in modeloefening 2. De varianten van de neerslag/verdamping/rivieren zijn gevisualiseerd in de kleuren.



Figuur 4-14 Maximale chlorideconcentratie na 3 maanden ten opzichte van zeespiegelstijging voor alle scenario's in modeloefening 2. De varianten van de debiet Volkeraksluizen zijn gevisualiseerd in de kleuren. In de huidige situatie is de technische capaciteit van de sluisen X m³/s. In het waterakkoord voor het Hollandsch Diep is afgesproken dat niet meer dan Y m³/s wordt ingelaten vanuit Hollandsch Diep naar VZM.

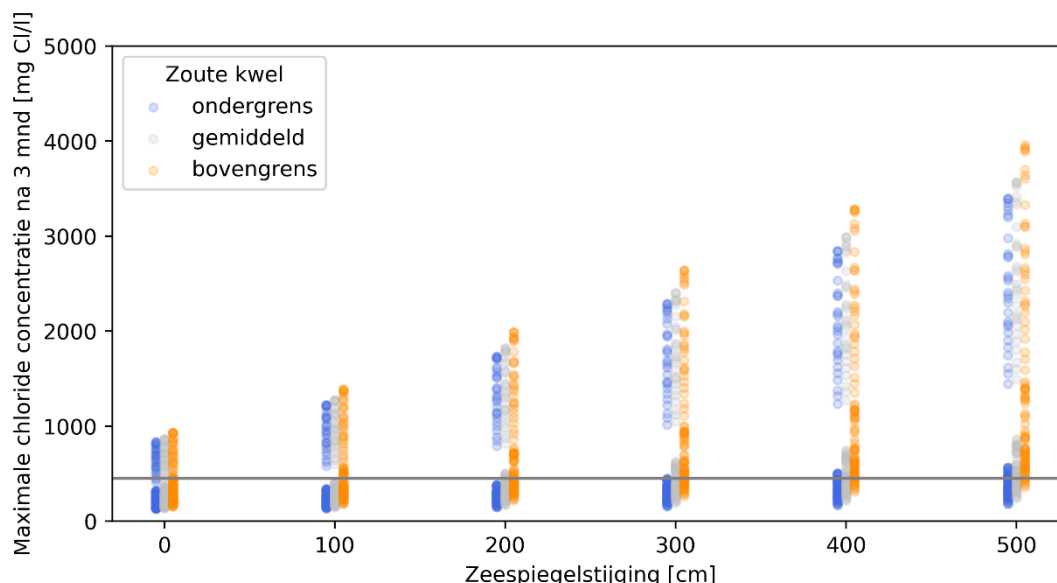
A3 Tot welke mate van zeespiegelstijging blijft de chlorideconcentratie op een voldoende laag niveau? – Buiten huidige infrastructurele grenzen

Tot en met 1 m zeespiegelstijging blijft de chlorideconcentratie laag genoeg wanneer de IZZS bij de Krammersluizen niet faalt en er minimaal een daggemiddeld debiet van 60m³/s binnenkomt bij de Volkeraksluizen. Wanneer de zeespiegel verder stijgt, groeit ook deze benodigde doorspoelbehoefte om de chlorideconcentratie laag genoeg te houden. Bij 2m zeespiegelstijging is dit 80 m³/s, bij 3m 100 m³/s en bij 4 en 5 m ligt de spoelbehoefte bij enkele extreem droge scenario's boven de 100 m³/s.

4.2.3 B1 Hoe verandert de doorspoelbehoefte als gevolg van een toename van zoute kwel als gevolg van zeespiegelstijging?

In Sectie 4.2.2 is gekeken naar wat het systeem nodig heeft aan doorspoeling (inlaat Volkeraksluizen en de rivierdebieten/neerslag) ten opzichte van zeespiegelstijging. In deze sectie wordt gefocust op het effect van zoute kwel op de chloride concentratie en de bandbreedte die gekozen is voor de zoute kwel (bovengrens en ondergrens).

In Figuur 4-15 zijn de maximale chlorideconcentraties na drie maanden in relatie tot zeespiegelstijging zichtbaar voor alle scenario's. De kleuren geven de ondergrens, gemiddelde en bovengrens weer. Het is zichtbaar dat de bandbreedtes voor de ondergrens en de bovengrens niet enorm verschillen per zeespiegelstijgingvariant. Dit verschil groeit echter een beetje naar mate de zeespiegelstijging toeneemt, wat logischerwijs overeenkomt met de gekozen invoer (Figuur 3-7).



Figuur 4-15 Maximale chlorideconcentratie na 3 maanden ten opzichte van zeespiegelstijging voor alle scenario's in modeloefening 2. De varianten van de as zoute kwel zijn gevisualiseerd in de kleuren.

Aangezien de bandbreedte van de zoute kwel relatief weinig invloed heeft op de chlorideconcentratie, is de verwachting dat de doorspoelbehoefte ook niet enorm veranderd door zoute kwel. Het kwantitatief maken is momenteel niet mogelijk met de uitkomsten van het model. Om dit wel te doen zou er een modeloefening gedaan moeten worden waarbij er 2 varianten worden genomen voor de zoute kwel: 1) waarbij de zoute kwel hetzelfde blijft ten opzichte van de zeespiegelstijging (constante) en 2) waarbij de zoute kwel vanaf die constante oploopt met zeespiegelstijging. Daarna kunnen deze vergeleken worden om het verschil te kwantificeren. Aangezien het effect nu zichtbaar echter al klein is, is ervoor gekozen om dit niet verder te onderzoeken.

B1 Hoe verandert de doorspoelbehoefte als gevolg van een toename van zoute kwel als gevolg van zeespiegelstijging? – buiten huidige infrastructurele grenzen

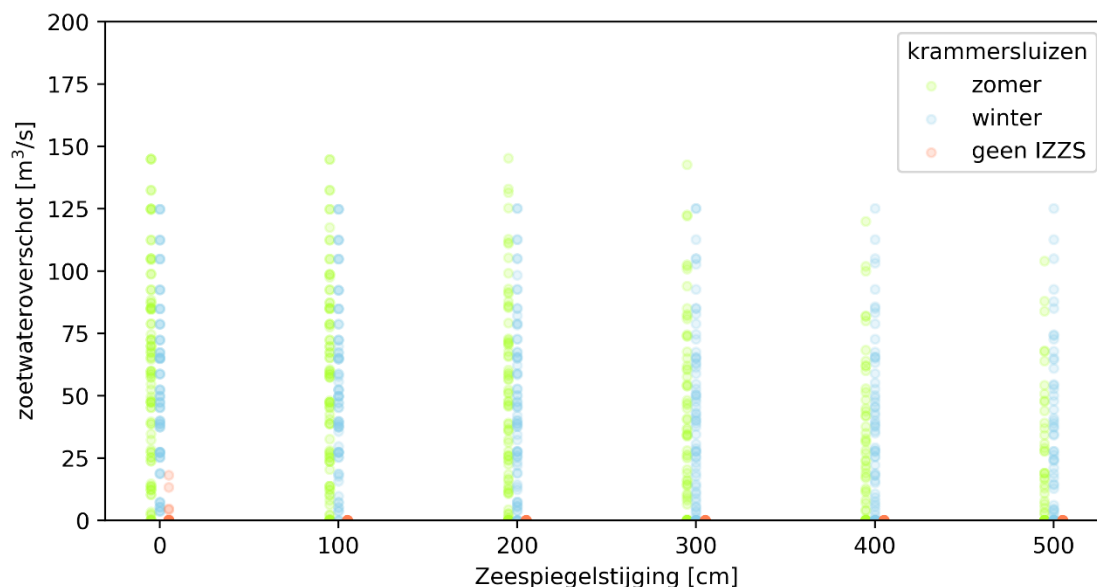
De gekozen bandbreedte voor de zoute kwel, die gebaseerd is op de modelstudie van Deltares (2022), resulteerde niet in grote verschillen in de chlorideconcentratie. Daarom is de verwachting dat de doorspoelbehoefte van het VZM ten gevolge van zoute kwel ook niet extreem toeneemt.

4.2.4 A2 Tot welke mate van zeespiegelstijging kan de waterbeschikbaarheid gehandhaafd blijven?

Of de waterbeschikbaarheid gehandhaafd kan blijven is bepaald door middel van het zoetwateroverschot. Het zoetwateroverschot is het debiet waarbij 1) het chloridegehalte nog onder een bepaalde drempelwaarde blijft en 2) de waterstand niet onder het streefpeil van -0,1 m zakt. In deze studie is de drempelwaarde 450 mg Cl/l wat overeenkomt met de huidige beheerstrategie. Daarnaast is het zoetwateroverschot bepaald op basis van de maximale chloride concentratie na drie maanden. Dus het zoetwateroverschot in deze sectie is het teveel aan zoetwater dat is ingelaten en weer afgevoerd wordt over 3 maanden. Het is indicatief voor de hoeveelheid water die aan het systeem onttrokken kan worden, zodat de chlorideconcentratie bij Bath aan het einde van die 3 maanden nog net 450 mg Cl/l is en de waterstand niet onder de -0,1 m zakt. Hier wordt wel aangenomen dat het moment en de locatie van onttrekkingen geen invloed hebben op de effectiviteit van de doorspoeling, wat in werkelijk niet waar is: de locatie heeft een effect op de stromingspatronen en dus op de chlorideverspreiding in het VZM. In het algemeen geldt dat hoe noordelijker de locatie van de onttrekkingen, hoe nadeliger voor de doorspoeling en dus hoe minder een toename van de watervraag kan worden geleverd. Het zoetwateroverschot is berekend nadat alle scenario's waren doorgerekend (post-processing). In Sectie 3.5 is dit toegelicht.

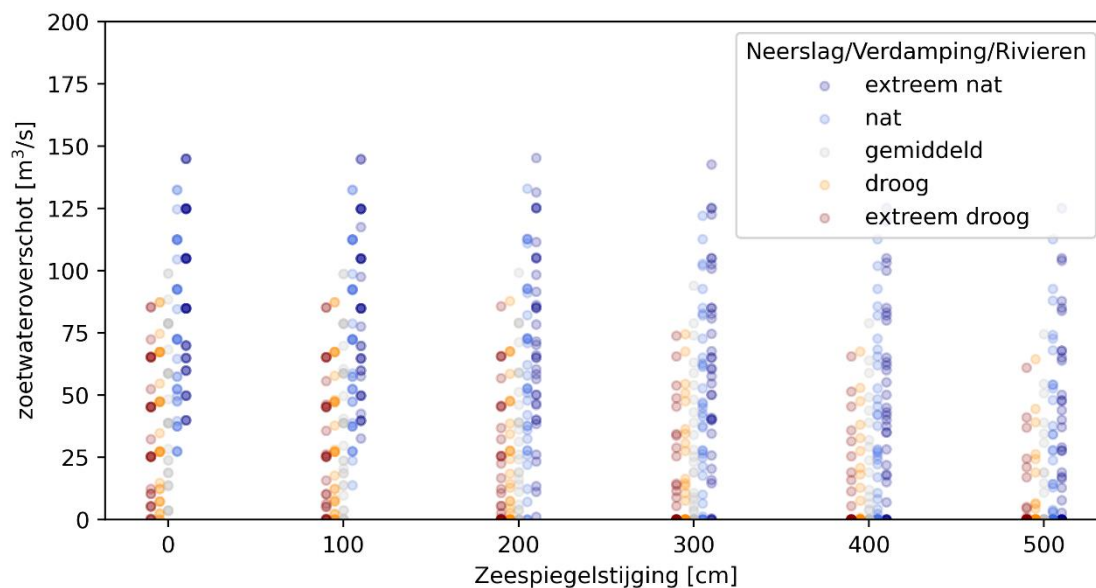
Binnen deze studie is voor elk scenario een vaste hoeveelheid gehanteerd voor de watervraag vanuit de Waterschappen (-4,4 m³/s). In de toekomst zou deze watervraag toe kunnen nemen. Stel de watervraag verdubbeld, dan kan met het zoetwateroverschot indicatief bepaald worden of het systeem dat water kan leveren. Als voorbeelden: wanneer er geen zoetwateroverschot is kan het systeem geen toename van de watervraag weerstaan. Als er een wateroverschot is, dan kan het systeem (afhankelijk van de daadwerkelijke locatie van de onttrekkingen) een toename van de watervraag leveren. Met de hier gebruikte aannames betekent een zoetwateroverschot van 8 m³/s niet direct dat een toename van de watervraag met 8 m³/s daadwerkelijk mogelijk is, maar wel dat er enige ruimte is binnen die 8 m³/s.

In Figuur 4-16 is het zoetwateroverschot ten opzichte van de zeespiegelstijging geplot. In kleur zijn de varianten van de Krammersluizen zichtbaar. Wanneer de Krammersluizen falen is het zoetwateroverschot voor bijna alle scenario's 0 m³/s omdat het systeem al te zout is (zie Sectie 4.2.2 voor de chlorideconcentraties). Voor een paar scenario's met 0 m zeespiegelstijging ligt deze boven 0. Dit zijn de scenario's met de meeste watertoevoer (inlaat Volkeraksluizen 100m³/s, (extreem) nat). Voor de zomer en de wintervariant is zichtbaar dat het zoetwateroverschot afneemt met een stijgende zeespiegel.



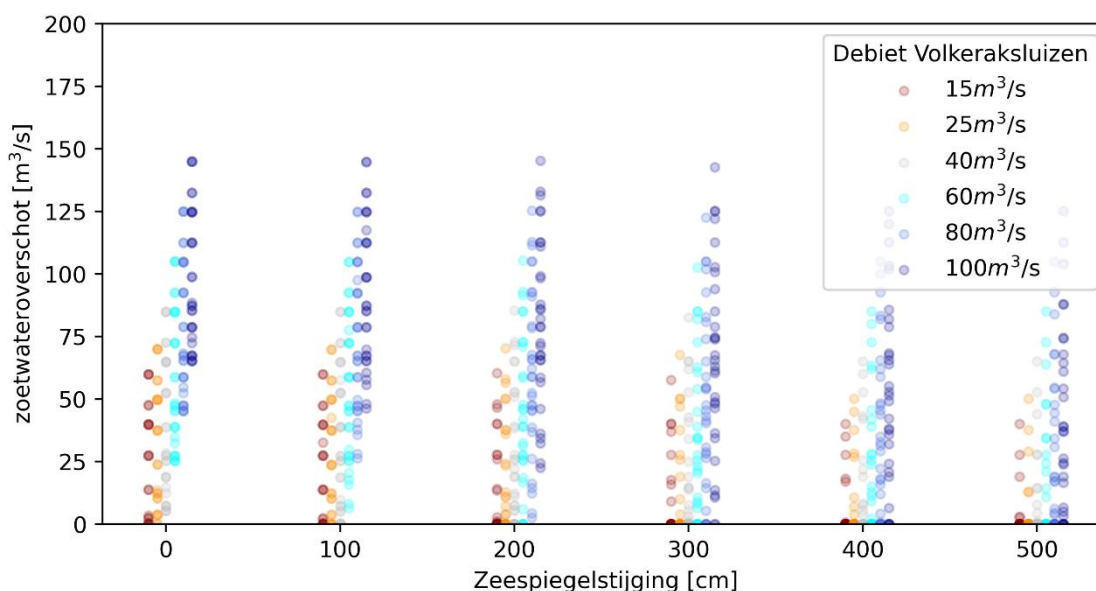
Figuur 4-16 Het zoetwateroverschot zodat het VZM bij Bath onder de drempel van 450mg Cl/l blijft in de eerste 3 maanden, en de waterstand gehandhaafd blijft. De varianten van de as Krammersluizen zijn gevisualiseerd in de kleuren met bijbehorend lineaire trendlijnen.

In Figuur 4-17 is het zoetwateroverschot zichtbaar waarbij de kleuren de as neerslag/verdamping/rivieren representeert. De scenario's waarbij de IZZS niet werkt zijn in dit figuur niet meegenomen (ter nuance: de IZZS blijft functioneren tot 1,25m zeespiegelstijging wanneer geen pompen worden toegevoegd). Het is zichtbaar dat het zoetwateroverschot het grootst is voor de meest natte scenario's. Bij 0m zeespiegelstijging is het zoetwateroverschot boven 0m³/s voor alle scenario's die gemiddeld, nat en extreem nat zijn en waarbij de IZZS wel functioneert. Bij 1m zeespiegelstijging is het zoetwateroverschot boven 0m³/s voor alle scenario's die nat en extreem nat zijn en waarbij de IZZS wel functioneert. Bij meer dan 2m zeespiegelstijging is er voor een aantal scenario's het zoetwateroverschot 0 voor alle varianten ook wanneer de IZZS wel functioneert.



Figuur 4-17 Het zoetwateroverschot zodat het VZM bij Bath onder de drempel van 450mg Cl/l blijft in de eerste 3 maanden, en de waterstand gehandhaafd blijft. De varianten van de as neerslag/verdamping/rivieren zijn gevisualiseerd in de kleuren met bijbehorende lineaire trendlijnen. De scenario's waarbij de IZZS niet functioneert zijn niet meegenomen.

In Figuur 4-18 is het zoetwateroverschot zichtbaar voor alle scenario's, behalve de scenario's waarbij de IZZS niet functioneert. De kleuren representeren de as debiet Volkeraksluizen. Hoe groter de inlaat bij de Volkeraksluizen, hoe groter het zoetwateroverschot. Bij 0m zeespiegelstijging is de maximale watervraag boven 0m³/s bij een inlaat van 40m³/s of meer mits de IZZS functioneert. Bij 1m en 2m zeespiegelstijging is dat 60m³/s en bij 3m of meer ligt dat bij sommige scenario's boven de 100m³/s (wanneer de IZZS functioneert).



Figuur 4-18 Het zoetwateroverschot zodat het VZM bij Bath onder de drempel van 450mg Cl/l blijft in de eerste 3 maanden, en de waterstand gehandhaafd blijft. De varianten van de as debiet Volkeraksluizen zijn gevisualiseerd in de kleuren met bijbehorende lineaire trendlijnen. De scenario's waarbij de IZZS niet functioneert zijn niet meegenomen.

A2 Tot welke mate van zeespiegelstijging kan de waterbeschikbaarheid gehandhaafd blijven?

Voor deze studie is een proxy voor de waterbeschikbaarheid gedefinieerd, namelijk het zoetwateroverschot. Dit is het maximale zoetwater debiet dat daggemiddeld over 3 maanden in het systeem is ingelaten en weer is afgevoerd, waarbij de chloride concentratie bij Bath aan het einde van die 3 maanden nog net 450mg/l is en de waterstand niet onder de -0,1m zakt.

Het zoetwateroverschot neemt af naarmate de zeespiegel stijgt. Voor bijna alle doorgerekende scenario's was er geen overschot bij een falende IZZS. Voor de andere scenario's, waarbij de IZZS wel functioneert, heeft het systeem soms een overschot die sterk afhangt van wat er het systeem binnenkomt vanuit de Volkeraksluizen en de rivieren (wat samenhangt met de verdamping en neerslag).



5

Discussie

5 Discussie

5.1 Kalibratie, validatie en de gekozen initiele zoutBakjesmodel

Het model is voor de chlorideconcentratie gekalibreerd en gevalideerd door de dispersielengte en de dispersiecoëfficiënt (Deltares, 2020). De dispersielengte (in combinatie met de dispersiecoëfficiënt) is een belangrijke instelling van het bakjesmodel die gekalibreerd is op de huidige situatie. Het kan zijn dat in een andere situatie de waarden veranderen. Echter, gezien de aanpak van het bakjesmodel en de andere onzekerheden en bandbreedtes, is de verwachting dat het voor de relatieve vergelijking tussen de scenario's niet veel uitmaakt.

Bij het opstellen van het model was niet bekend welke waarde de zoute kwel precies zou hebben, deze was toen der tijd geschat op 3kg Cl/s (*expert judgement* en indirecte afleiding op basis van zoutbalans VZM) en wordt in het model percentueel verdeeld over een aantal bakjes (Deltares, 2020). Deze verdeling over het systeem was echter niet goed bekend en dus ook op basis van *expert judgement* gedaan en op basis van modelvalidatie. Tijdens de verificatie van het model bleek wel dat deze verdeling van groot belang was. Het zou waardevol zijn om die verdeling te vergelijken met de uitkomsten van de modelstudie naar de relatie tussen zoute kwel en zeespiegelstijging (Deltares, 2022). Daarnaast zou het waardevol zijn om een validatiestudie uit te voeren met deze nieuwe verdeling en de nieuwe waarden uit de recente modelstudie van Deltares (2022). De waarden van de zoute kwel zijn namelijk lager dan de geschatte waarde van 3kg Cl/s (voor 0m zeespiegelstijging).

5.2 Initiële zoutwaarde Bakjesmodel

In het bakjesmodel wordt een initiële chlorideconcentratie gebruikt voor alle bakjes aan het begin van elk scenario. Deze initiële waarde is 125 mg Cl/l. Echter fluctueert deze waarde door het jaar heen en is deze verschillend in de ruimte. Daarnaast zou deze waarde in de toekomst hoger kunnen liggen. De keuze voor deze initiële waarde is dus niet triviaal. Een gevoeligheidsstudie zou op zijn plaats zijn om ook af te tasten wat bijvoorbeeld het percentuele verschil is tussen de scenario's wanneer de initiële chlorideconcentratie verdubbeld.

5.3 De Krammersluizen

Modelimplementatie door middel van de ZSF

De Krammersluizen zorgen voor de grootste zoutlast op het VZM ten opzichte van de andere sluiscomplexen. Om die reden is de modelinvoer van de Krammersluizen van grote invloed op de modeluitvoer. Voor het berekenen van de invloed van zeespiegelstijging op de zoutlast is de Zeesluisformulering gebruikt. Vervolgens is de gemiddelde zoutvracht uit deze formulering gebruikt als modelinvoer voor het bakjesmodel. Hierbij is in de Zeesluisformulering geen rekening gehouden met het fluctueren van de chlorideconcentratie op het VZM in het bakjesmodel omdat deze modellen niet aan elkaar gekoppeld zijn. Een veranderende chlorideconcentratie op het VZM heeft echter wel invloed op de zoutvracht door de Krammersluizen. Wanneer de chlorideconcentratie in het VZM toeneemt dan zal de zoutvracht richting het VZM door het schutten afnemen. Andersom zal de zoutvracht toenemen wanneer de chlorideconcentratie op de Oosterschelde toeneemt. Deze koppeling tussen het bakjesmodel en de zeesluisformulering is er nu niet maar zou wel een waardevolle toevoeging zijn. Waarschijnlijk is er nu soms een kleine overschatting van de zoutvracht richting het VZM wanneer de chlorideconcentratie in het VZM erg hoog is.

Een online koppeling tussen het Bakjesmodel en de Zeesluisformulering zorgt voor nog een waardevolle verandering, namelijk voor de scenario's met zeer weinig watertoevoer. In zo'n geval wordt er bij de Krammersluizen minder gespoeld of gespuid om zo de waterstand niet verder te laten zakken. De zoutvracht neemt hierdoor toe (theoretisch gezien), maar dit wordt niet in het model meegenomen. Dit is echter maar voor een beperkt aantal scenario's binnen het onderzochte bereik het geval.

De onzekerheden van de IZZS

De IZZS treedt pas in 2025 in werking en wordt dan intensief gemonitord. Door lerend implementeren zal het beheer aangepast worden voor de IZZS. Voor nu is, gezien de voorziene optionele inzet, gekozen voor 2 varianten: een zomervariant waarbij er met 9 m³/s wordt gespoeld en gespuid en een wintervariant waarbij er met 29 m³/s wordt gespoeld en gespuid. Deze varianten zijn het startpunt waarmee in 2025 begonnen zal worden. Wellicht volgt na lerend implementeren een aanpassing. Deze is vanzelfsprekend nog niet bekend. Daarnaast is voor de modeloefening zonder infrastructurele grenzen aangenomen dat deze spoel- en spuidebieten worden overgenomen door pompen als dit niet meer onder vrij verval kan. Of pompen even efficiënt zijn om zoutintrusie te beperken is niet meegenomen in deze studie en zou nader onderzocht moeten worden.

De factor die het nog complexer maakt is de schutintensiteit. Deze heeft veel invloed op de zoutvracht naast zeespiegelstijging. Stel de schutintensiteit neemt toe in de toekomst, dan zal de zoutvracht ook nog meer toenemen. Binnen deze studie is daar geen rekening mee gehouden maar dit is wel een punt van aandacht.

5.4 Gevoeligheid randvoorwaarden

In deze studie is de gevoeligheid van de chlorideconcentratie op het Hollands Diep niet meegenomen (chlorideconcentratie van de inlaat bij de Volkeraksluizen). In de studie van Deltares (2020) wordt aangegeven dat de chlorideconcentratie in het Hollands Diep mogelijk toeneemt in relatie tot zeespiegelstijging. De volgende punten zijn daarbij belangrijk:

- Bij een zouter Hollandsch Diep (maar nog wel onder 450 mg Cl/L) zal meer water aangevoerd moeten worden om het VZM zoet te houden.
- Op het moment dat het Hollandsch Diep 450 mg/L nadert, worden de conclusies significant anders omdat het VZM dan alleen ververst kan worden door aanvoer uit de Brabantse rivieren en neerslag.

Om die reden zou de gevoeligheid van de chlorideconcentratie op het Hollands Diep en het effect daarvan op het VZM onderzocht moeten worden. Deze hangt echter af van het beheer van de RMM waardoor dit niet een voor de hand liggende relatie betreft. In de gevoeligheidsstudie zouden de uitkomsten van het RMM (Arcadis/Hydrologic, 2023b) ernaast gelegd moeten worden om de concentraties van deze gevoeligheidsstudie te bepalen.

Ook is de gevoeligheid van de zoutvracht bij de Kreekraksluizen en van het doorspoeldebiet richting het Antwerps Kanaalpand niet meegenomen. Een extra zoutvracht vanuit het Antwerps kanaalpand zou leiden tot een aanvullende inkomende zoutpost in het systeem en vermindert de houdbaarheid van het systeem ten opzichte van de hier gepresenteerde resultaten. Een extra doorspoeldebiet richting het Antwerps Kanaalpand betekent een extra uitgaande post in de waterbalans en komt overeen met een toename van de watervraag. Beide aspecten kunnen vrij eenvoudig nader worden onderzocht met het hier gebruikte instrumentarium.

5.5 Oprekken streefpeilen

Binnen deze studie lag de focus op het systeem met de huidige beheerstrategie. Een volgende stap zou kunnen zijn om te kijken wat er gebeurt als het beheer aanpast of oprekt wordt. Er kan bijvoorbeeld gekeken worden in hoeverre hogere streefpeilen kunnen helpen

om de houdbaarheid van het systeem op te rekken wanneer de zeespiegel stijgt. Wanneer het streefpeil hoger is dan nu, en alle dijken en randen van de sluiscomplexen meegroeien met de zeespiegelstijging heeft dit als gevolg dat de schuttschijven kleiner zijn wanneer de zeespiegel stijgt. Hierdoor wordt de zoutlast via de sluisen kleiner. Daarnaast wordt het volume in het VZM groter. Hierdoor loopt de chlorideconcentratie minder op bij eenzelfde zoutlast ten opzichte van een kleiner volume. Natuurlijk zou een dergelijke verandering grote gevolgen hebben die met deze modelbenadering grotendeels buiten beschouwing worden gehouden.



6

Conclusies en aanbevelingen

6 Conclusies, aanbevelingen en kennisleemten

6.1 Beantwoording kennisvragen

In deze Sectie worden de kennisvragen zoals in Sectie 1.2 gesommeerd kort beantwoord. De antwoorden die het directe resultaat zijn van de modelstudie komen overeen met de antwoorden uit de kaders aan het eind van elke sectie in Hoofdstuk 4.

A1 Tot welke mate van zeespiegelstijging kan de waterstand gehandhaafd blijven?

Tot 25 cm zeespiegelstijging kan de waterstand gehandhaafd blijven. Wanneer de zeespiegel 50 tot 100 cm stijgt blijft deze gehandhaafd mits er een maximaal aangeboden debiet van 40 m³/s of kleiner vanuit de Volkeraksluizen komt.

Voor zeespiegelstijging vanaf 125 cm bepalen het neerslagoverschot en toestroom vanuit de lateralen, samen met het debiet vanuit de Volkeraksluizen of de waterstand gehandhaafd kan blijven. Wanneer de zeespiegel stijgt naar 150cm is onder de natte of extreem natte omstandigheden het waterpeil niet binnen de streefpeilen te handhaven. Vanaf 175 cm zeespiegelstijging is handhaving van de streefpeilen ook onder gemiddelde weeromstandigheden niet meer mogelijk.

Bij handhaving tussen de streefpeilen met de huidige infrastructuur (tussen -10cm en +15 cm NAP):

Tot 25 cm zeespiegelstijging kan de waterstand gehandhaafd blijven. Wanneer de zeespiegel 50 tot 100 cm stijgt blijft deze gehandhaafd mits er een maximaal aangeboden debiet van 40 m³/s of kleiner vanuit de Volkeraksluizen komt. Voor zeespiegelstijging vanaf 125 cm bepalen het neerslagoverschot en toestroom vanuit de lateralen, samen met het debiet vanuit de Volkeraksluizen of de waterstand gehandhaafd kan blijven. Wanneer de zeespiegel stijgt naar 150cm is onder de natte of extreem natte omstandigheden het waterpeil niet binnen de streefpeilen te handhaven. Vanaf 175 cm zeespiegelstijging is handhaving van de streefpeilen ook onder gemiddelde weeromstandigheden niet meer mogelijk.

Bij handhaving tussen de calamiteitenpeilen met de huidige infrastructuur (tussen -25cm en +50cm NAP):

Tot 125cm zeespiegelstijging kan de waterstand gehandhaafd blijven. Wanneer de zeespiegel stijgt naar 150cm kan de waterstand gehandhaafd blijven mits het niet extreem nat wordt. Wanneer de zeespiegel stijgt naar 175 en 200cm kan de waterstand alleen gehandhaafd blijven mits het niet nat of extreem nat wordt.

Wat heeft het systeem nodig om de waterstand te handhaven wanneer dat met de huidige infrastructuur niet meer kan?

Een spui- en/of pompcapaciteit van ~170m³/s is benodigd bij de Bathse Spuisluis om voor alle scenario's de waterstand te handhaven tot en met 5m zeespiegelstijging. Deze capaciteit is benodigd wanneer er bij de Krammersluizen niet gespuid en/of gepompt wordt, voor het meest water aanvoerende scenario met 5m zeespiegelstijging. Wanneer er wel gespuid of gepompt wordt bij de Krammersluizen dan is de benodigde spui- en/of pompcapaciteit bij de Bathse Spuisluis lager.

A2 Tot welke mate van zeespiegelstijging kan de waterbeschikbaarheid gehandhaafd blijven?

Voor deze studie is een proxy voor de waterbeschikbaarheid gedefinieerd, namelijk het zoetwateroverschot. Dit is het maximale zoetwater debiet dat daggemiddeld over 3 maanden in het systeem is ingelaten en weer is afgevoerd, waarbij de chloride concentratie bij Bath aan het einde van die 3 maanden nog net 450mg/l is en de waterstand niet onder de -0,1m zakt.

Het zoetwateroverschot neemt af naarmate de zeespiegel stijgt. Voor bijna alle doorgerekende scenario's was er geen overschot bij een falende IZZS. Voor de andere scenario's, waarbij de IZZS wel functioneert, heeft het systeem soms een overschot die sterk afhangt van wat er het systeem binnenkomt vanuit de Volkeraksluizen en de rivieren (wat samenhangt met de verdamping en neerslag).

A3 Tot welke mate van zeespiegelstijging blijft de chlorideconcentratie op een voldoende laag niveau?

Huidige infrastructuur

Het systeem blijft houdbaar tot 125cm zeespiegelstijging. Dan blijft de chlorideconcentratie onder de 450mg/l mits de maximaal toelaatbare debieten bij de Volkeraksluizen 60m³/s of hoger zijn. Deze debieten zijn voornamelijk van belang bij (extreem) droge scenario's. Bij (extreem) natte scenario's is een debiet van 15m³/s bij de Volkeraksluizen ook voldoende om de chlorideconcentratie te handhaven.

Voor 150 t/m 200cm zeespiegelstijging kan door het falen van de IZZS bij de Krammersluizen de chlorideconcentratie niet meer op een voldoende laag niveau gehouden worden. Verder dan 2m zeespiegelstijging is er niet gekeken naar de huidige infrastructuur.

Benadering buiten infrastructurale grenzen

Tot en met 1m zeespiegelstijging (bij deze benadering is er met ZSS-intervallen van 1m gekeken) blijft de chlorideconcentratie laag genoeg wanneer de IZZS bij de Krammersluizen niet faalt en er minimaal een daggemiddeld debiet van 60m³/s binnenkomt bij de Volkeraksluizen. Wanneer de zeespiegel verder stijgt, groeit ook deze benodigde doorspoelbehoefte om de chlorideconcentratie laag genoeg te houden. Bij 2m zeespiegelstijging is dit 80m³/s, bij 3m 100m³/s en bij 4 en 5m ligt de spoelbehoefte bij enkele extreem droge scenario's boven de 100m³/s.

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

De gekozen bandbreedte voor de zoute kwel, die gebaseerd is op de modelstudie van Deltares (2022), resulteerde niet in grote verschillen in de chlorideconcentratie. Daarom is de verwachting dat de doorspoelbehoefte van het VZM ten gevolge van zoute kwel ook niet veel toeneemt.

C1 Tot welke niveau van zeespiegelstijging loopt de functionele levensduur van de huidige kunstwerken?

De grote kunstwerken (niet de regionale) die direct verbonden zijn aan het VZM en zee zijn de Krammersluizen, de Berse Diepsluis en de Bathse Spuisluis. Binnen deze studie is echter alleen gekeken naar de functionele levensduur van de IZZS bij de Krammersluizen ten gevolge van zeespiegelstijging. Voor de Bergse Diepsluis en de Bathse Spuisluis is dit niet onderzocht. Deze onderzoeksvraag valt namelijk (deels) buiten de scope van deze modelstudie en behoort voornamelijk bij het spoor 'waterveiligheid'. Onderstaand wordt de vraag voor de Krammersluizen beantwoord, gefocust op de functie van de IZZS, met de aanname dat de randen van de sluis en het laagbekken meegroeien met de zeespiegelstijging.

De IZZS van de Krammersluizen

De IZZS zorgt ervoor dat de 'zoute' schuttschijven bij hoogwater niet op het VZM worden geloosd maar richting het zogenaamde laagbekken gaan. Bij laagwater wordt dit laagbekken gelegegd. De IZZS is dus afhankelijk van vrij verval waardoor dit systeem onder druk komt te staan wanneer de zeespiegel stijgt. Wanneer het laagbekken niet genoeg gelegegd kan worden doordat het voornamelijk hoogwater is als resultaat van zeespiegelstijging, dan faalt het systeem. Hierdoor neem de zoutlast sterk toe omdat de schuttschijven bij hoogwater op het VZM geloosd moeten worden. Dit gebeurt rond $\sim 1,25\text{m}$ zeespiegelstijging.

C2 Hoe verandert de aan- of afvoercapaciteit van de kunstwerken als gevolg van zeespiegelstijging?

De grote kunstwerken (niet de regionale) die direct verbonden zijn aan het VZM en zee zijn de Krammersluizen, de Berse Diepsluis en de Bathse Spuisluis. Alleen de Krammersluizen en de Bathse spuisluis hebben een aan- of afvoerende functie. Echter is alleen de aan- of afvoercapaciteit van de Bathse spuisluis verder onderzocht:

Bathse spuisluis

Door zeespiegelstijging neemt het verval tussen het VZM en de Westerschelde af bij laagwater. Hierdoor neemt de spuicapaciteit af. Als gevolg hiervan neemt de waterstand op het VZM toe wanneer de spuicapaciteit kleiner is dan wat er nodig is om de waterstand op $-0,1\text{m}$ te behouden. Door de toenemende waterstand neemt de spuicapaciteit iets toe en vervolgens weer af wanneer het verval weer kleiner wordt. Tot en met 125cm zeespiegelstijging is de spuicapaciteit nog voldoende om de waterstand tussen de streefpeilen te behouden. Vanaf 150cm zeespiegelstijging is deze te klein bij (extreem) natte omstandigheden.

C3 Hoe verandert de zoutvracht door de kunstwerken als gevolg van zeespiegelstijging?

De grote kunstwerken (niet de regionale) die direct verbonden zijn aan het VZM en zee zijn de Krammersluizen, de Bergse Diepsluis en de Bathse Spuisluis. Aangezien het bij de Bathse Spuisluis enkel gaat om een zoutlek door vismigratie is de zoutvracht ten gevolge van zeespiegelstijging voor dit kunstwerk niet verder onderzocht.

Bergse Diepsluis

De zoutvracht neemt toe van $0,4 \pm 0,15$ kg Cl/s bij 0m zeespiegelstijging naar $1 \pm 0,3$ kg Cl/s bij 5m zeespiegelstijging, afhankelijk van de hoeveelheid schutcycli.

Krammersluizen

De zoutvracht neemt toe in relatie tot zeespiegelstijging. Het startpunt en de mate van deze toename hangt af van het wel of niet functioneren van de IZZS en de hoeveelheid die er gespoeld en gespuid wordt wanneer de IZZS functioneert.

Wanneer de IZZS niet meer functioneert neemt de zoutvracht toe van $\sim 50\text{kg Cl/s}$ bij 0m ZSS naar $\sim 240\text{kg Cl/s}$ bij 5m ZSS. Wanneer de IZZS wel werkt en er zo efficiënt mogelijk gespoeld en gespuid wordt, in combinatie met pompen wanneer er geen vrij verval meer is, is de zoutlast vele malen lager. Wanneer met $9\text{m}^3/\text{s}$ gespoeld en gespuid en/of gepompt wordt, dan is de zoutlast $\sim 15\text{kg Cl/s}$ bij 0m ZSS en $\sim 21\text{kg Cl/s}$ bij 5m ZSS. Wanneer met $29\text{m}^3/\text{s}$ gespoeld en gespuid en/of gepompt wordt is de zoutlast nog lager: $\sim 4\text{kg Cl/s}$ bij 0m ZSS en $\sim 9\text{kg Cl/s}$ bij 5m ZSS. Deze getallen zijn gebaseerd op berekeningen en nog niet gevalideerd met metingen. Of dit overeenkomt met de werkelijkheid kan pas bekeken worden na de aanleg van de IZZS in 2025.

De kennisvragen over de ontwikkeling van zoute kwel in relatie tot zeespiegelstijging (**D, zie sectie 1.2**) zijn beantwoord in de studie van Deltares (2022) en worden daarom hier niet beantwoord.

De kennisvragen over de randvoorwaarden op het Hollands Diep, Oosterschelde en Westerschelde (**E, zie sectie 1.2**) worden beantwoord in de rapportage van het bovenregionaal waterverdelingssysteem (Arcadis/Hydrologic, 2023e) en worden daarom hier niet beantwoord.

6.2 Aanbevelingen en kennisleemten

De focus in deze studie lag voornamelijk op de huidige beheerstrategie van zowel de waterstand als de chlorideconcentratie. Voor een volgende fase van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging is het aanbevolen om ook buiten de huidige peilbeheerstrategie te kijken. Er kan bijvoorbeeld gekeken worden hoe het systeem reageert als het streefpeil hoger komt te liggen ten opzichte van het huidige streefpeil.

In deze studie is niet gekeken naar de gevoeligheid van de chlorideconcentratie op het Hollands Diep. De verwachting is dat de chlorideconcentratie op het Hollands Diep zal toenemen met zeespiegelstijging maar dit is ook afhankelijk van het beheer van de Rijn-Maas monding. Om die reden is aanbevolen om deze gevoeligheid te onderzoeken. Hierbij is het van belang dat de uitkomsten vanuit de Rijn-Maas monding rapportage (Arcadis/Hydrologic, 2023b) meegenomen worden als randvoorwaarden.

Ook is niet gekeken naar de gevoeligheid van het VZM naar een mogelijke zoutlast vanuit de Kreekraksluizen noch naar een aanvullende doorspoeldebiet richting het Antwerps Kanaalpand. Het is ook aanbevolen om hierover een verdiepend onderzoek te doen.

Het is aanbevolen om de watervraag vanuit de waterschappen (doorspoelbehoefte van de regio) verder te onderzoeken met het model. De watervraag is constant gehouden in deze studie en daarnaast is het zoetwateroverschot berekend om een eerste inschatting te geven of het water beschikbaar is wanneer de watervraag vanuit de waterschappen zou veranderen. Wanneer de watervraag toeneemt op bepaalde locaties heeft dit invloed op de waterstroming en de doorspoeling van het VZM. Dit is nu niet meegenomen in deze studie. Met de kennis van de doorspoelbehoefte van de regio zou de gevoeligheid van de watervraag onderzocht kunnen worden.



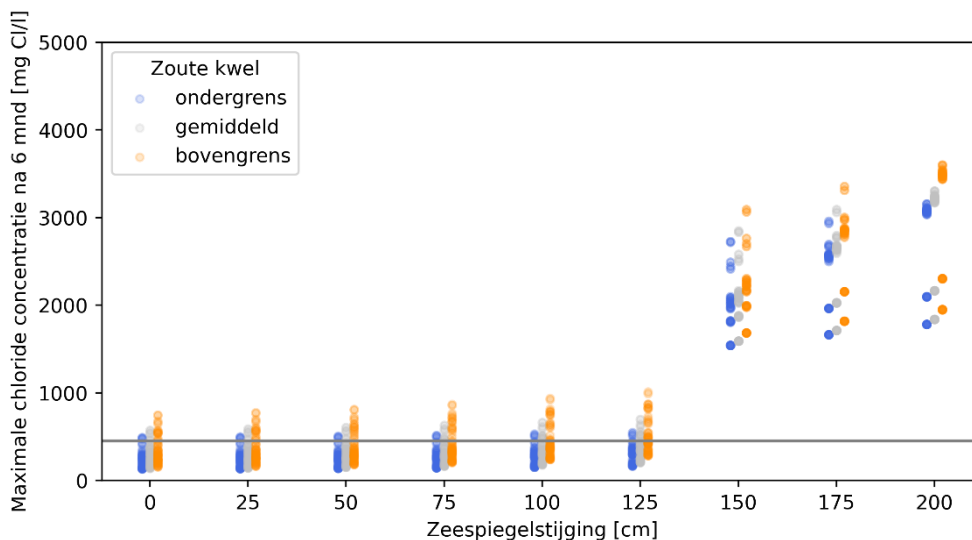
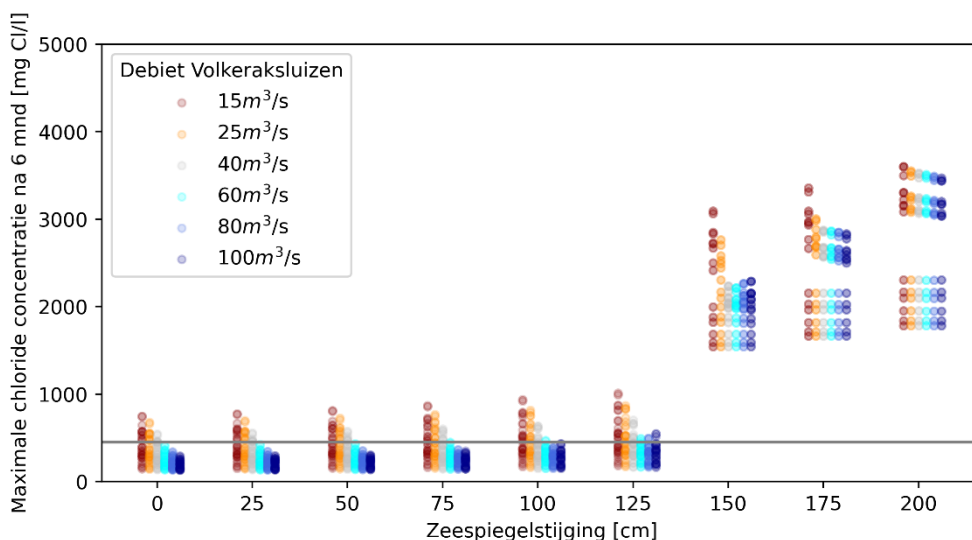
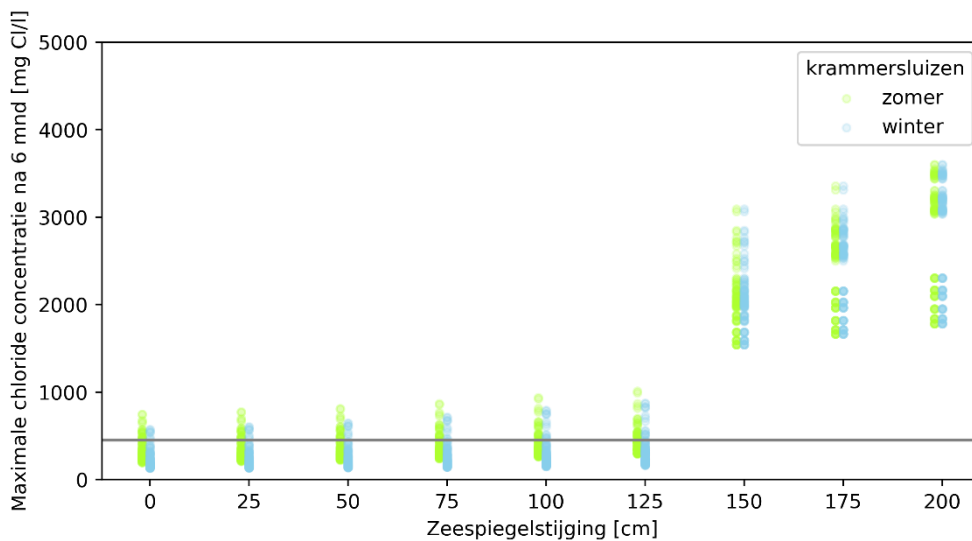
7

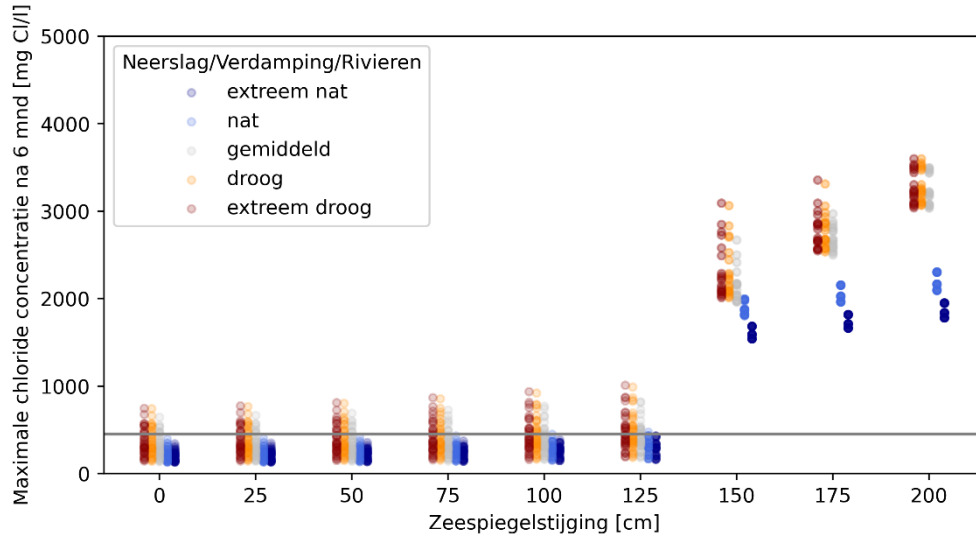
Referenties

7 Referenties

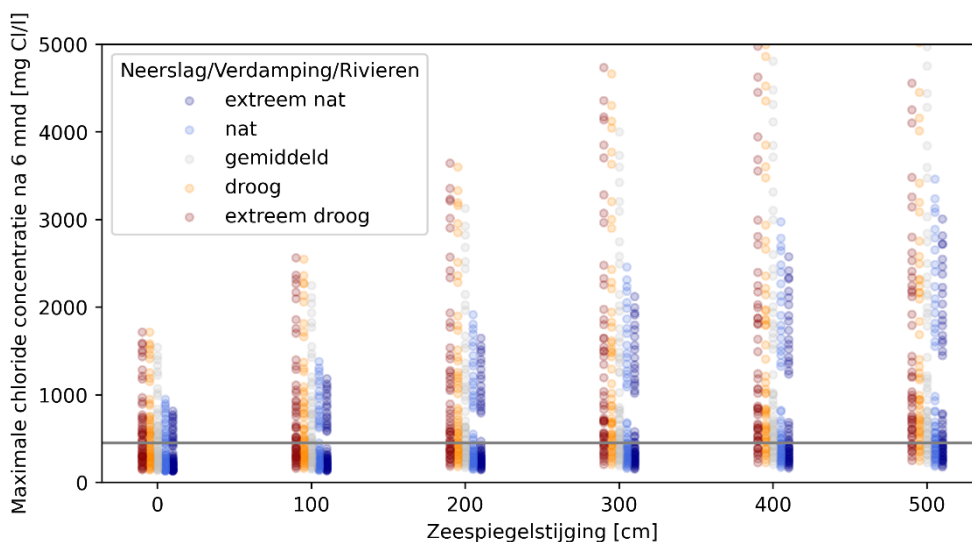
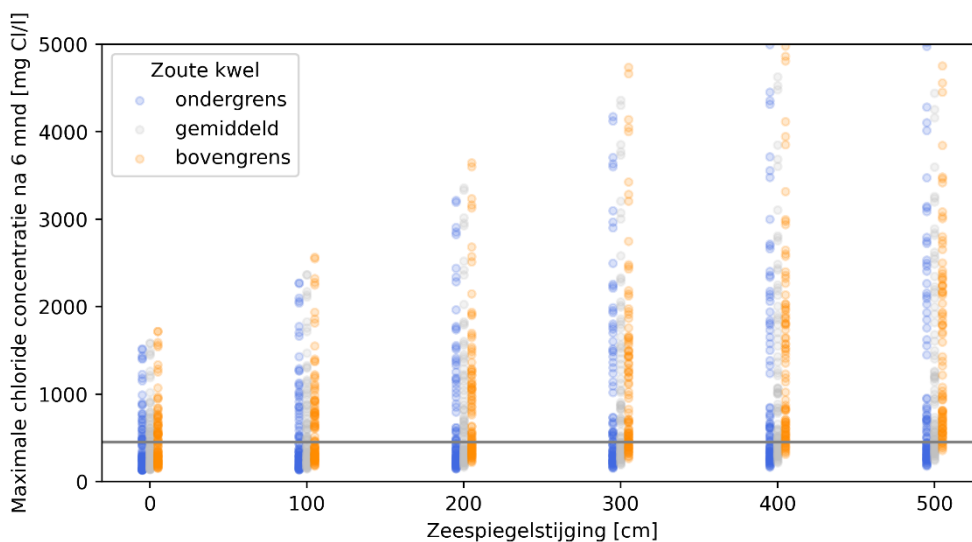
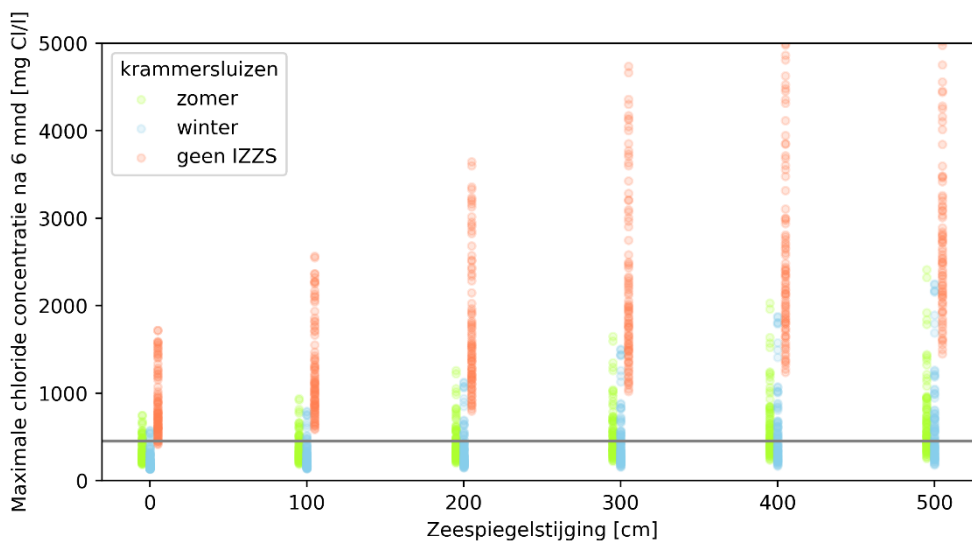
- Arcadis/Hydrologic. (2023b). *Eindrapportage KP ZSS Systeemanalyses zoetwater regio Rijn-Maasmonding*.
- Arcadis/Hydrologic. (2023c). *Eindrapportage KP ZSS Systeemanalyses zoetwater regio Amsterdam-Rijnkanaal - Noordzeekanaal*.
- Arcadis/Hydrologic. (2023d). *Eindrapportage KP ZSS Systeemanalyses zoetwater regio IJsselmeer - Markermeer*.
- Arcadis/Hydrologic. (2023e). *Eindrapportage KP ZSS Systeemanalyses zoetwater bovenregionale waterverdeling*.
- Deltares. (2012). *Verkennd onderzoek haalbaarheid innovatief zout/zoet-scheidingssysteem Krammersluizen*.
- Deltares. (2012). *Verkennd onderzoek haalbaarheid innovatief zout/zoet-scheidingssysteem Krammersluizen*.
- Deltares. (2013). *Effectiviteit en effect van winterdoorspoeling van het Volkerak-Zoommeer. Modelstudie en beknopte data-analyse. Referentie: 1208550-000*.
- Deltares. (2016). *Prestatie Innovatieve Zout-Zoet Scheiding op de Krammersluizen - berekeningen met WANDA-Locks*.
- Deltares. (2020). *Klimaatrobustheid van het waterbeheer van het Volkerak-Zoommeer. 8 juli 2020*.
- Deltares. (2021). *Vraagarticulatie en aanzet modelinstrumentarium Spoor 2 Systeemverkenningen Zoetwater*.
- Deltares. (2022). *Grondwaterverziltting en watervraag bij een stijgende zeespiegel. Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II. Rapportnr 1120 039-009-BGS-0001*.
- FutureWater. (2006). *Berekening openwaterverdamping. Opdrachtgever: Wetterskip Fryslân*.
- Hydrologic. (2015). *Inventarisatie Slim Watermanagement Rijn-Maasmonding. December, 2015. P720*.
- Hydrologic. (2017). *Redeneerlijnen waterbeheer regio Volkerak Zoommeer; Gezamenlijke uitwerking van Rijkswaterstaat (WVL, ZD, HMC) en waterschappen Brabantse Delta, Scheldestromen en Hollandse Delta*. Opgehaald van https://www.slimwatermanagement.nl/publish/pages/158579/rmm_2017_rapport_redeneerlijnen_volkerak_zoommeer.pdf
- Rijkswaterstaat. (2003). *Water- en stoffenbalans Volkerak-Zoommeer; microverontreinigingen en nutriënten 1996-2000. RIZA werkdocument 2003.204X. Projectnummer 6100.010.042. . Dordrecht*.
- Rijkswaterstaat. (2003). *Water- en stoffenbalans Volkerak-Zoommeer; microverontreinigingen en nutriënten 1996-2000. RIZA werkdocument 2003.204X. Projectnummer 6100.010.042. Dordrecht, december 2003*.
- Rijkswaterstaat. (2021). *Memo bij het rapport Vraagarticulatie en Aanzet Modellerings KP ZSS Spoor II, Zoetwater*.
- Waterakkoord. (2016). *Waterakkoord Volkerak-Zoommeer; Actualisatie 1 januari 2016*.
- WL. (1992). *Zoutbestrijding-systeem Bergsediepsluis. Opdrachtgever: Rijkswaterstaat. Juni 1992*.

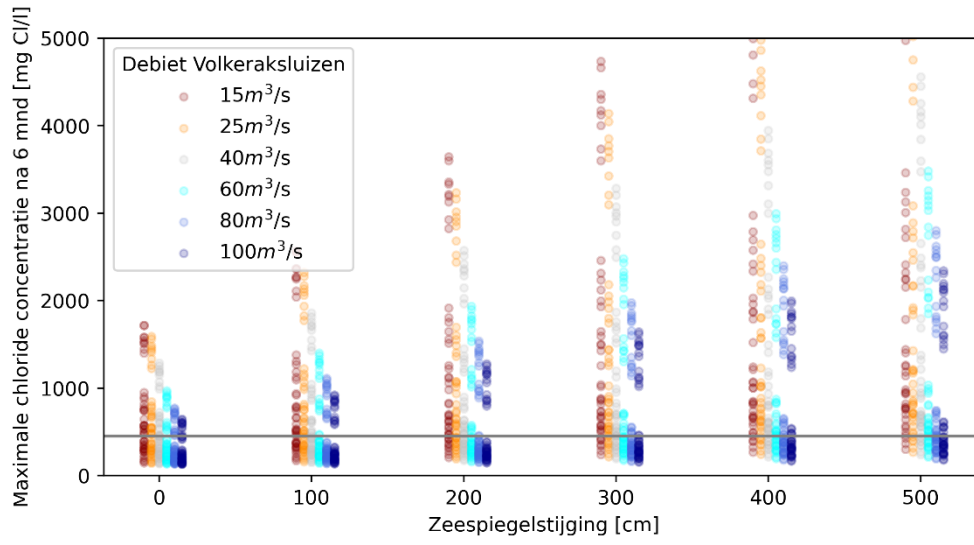
Appendix A. Modelresultaten waarbij de maximale chlorideconcentratie na 6 maanden is genomen – Modelexercitie 1





Appendix B. Modelresultaten waarbij de maximale chlorideconcentratie na 6 maanden is genomen – Modelexercitie 2





Over Arcadis

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

www.arcadis.com

Contactpersoon



Michiel van Reen
Projectleider Water

