

Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II

Systemanalyses zoetwater regio Rijn-Maasmonding

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: *Meike Coonen, Simon Muurman, Maarten Spijker, Jos van der Baan en Michiel van Reen*
- Geschreven in opdracht van *Rijkswaterstaat WVL* voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging
- Maart, 2023.

Systemanalyses zoetwater regio Rijn-Maasmonding

28 maart 2023

**Kennisprogramma
Zeespiegelstijging**



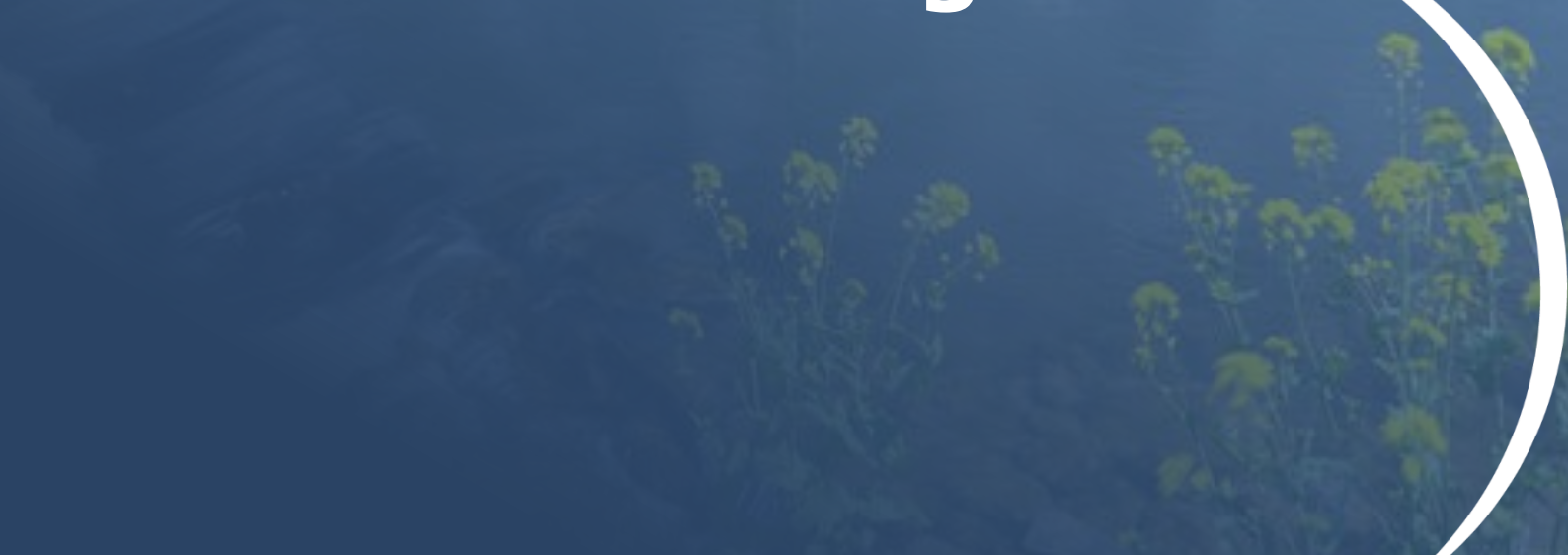
| | |
|---|-----------|
| Samenvatting | 1 |
| 1. Inleiding | 3 |
| 1.1 Aanleiding | 3 |
| 1.2 Doel en kennisvragen | 3 |
| 1.2.1 Toets modelinstrumentaria..... | 3 |
| 1.2.2 Waterstaatkundige effecten zoetwaterbuffers en -zones RMM ... | 4 |
| 1.2.3 Link met kennisvragen..... | 6 |
| 1.3 Modellerstrategie | 7 |
| 1.4 Leeswijzer | 7 |
| 1.5 Definities en afkortingen | 7 |
| 2. Het RMM-systeem | 10 |
| 2.1 Inleiding..... | 10 |
| 2.2 Essentie systeemwerking RMM..... | 11 |
| 2.3 De huidige beheerstrategie (KZH) en definitie waterstaatkundige houdbaarheid per buffer/zone..... | 11 |
| 2.4 Expertverwachting effecten zeespiegelstijging en lagere rivierafvoeren op essentie systeemwerking RMM..... | 14 |
| 3. Methodiek | 17 |
| 3.1 Modellerstrategie | 17 |
| 3.2 Modelinstrumentaria 1D en 3D | 19 |
| 3.2.1 Eindimensionaal model | 19 |
| 3.2.2 Driedimensionaal model..... | 19 |
| 3.2.3 Gebruik in deze studie | 20 |
| 3.3 Aanpak analyses | 21 |
| 3.3.1 Getrapte analyse zoetwaterbuffers en -zones | 21 |
| 3.3.2 Keuze varianten | 21 |
| 3.4 Randvoorwaarden en uitgangspunten | 23 |
| 3.5 Post-processing..... | 26 |
| 3.4.1 Transecten chlorideconcentraties | 26 |
| 3.4.2 Staafdiagrammen | 27 |
| 4. Resultaten modelschematisatie | 29 |
| 4.1 Toets modelinstrumentaria | 29 |
| 4.1.1 Kwalitatieve beschrijving chloridepatronen 1D en 3D | 29 |
| 4.1.2 Vergelijking gevoeligheid voor variaties in zee en rivier randvoorwaarden..... | 32 |
| 4.2 Waterstaatkundige effecten zoetwaterbuffers en -zones . | 36 |
| 4.2.1 Zoetwaterzone Hollandsche IJssel | 36 |
| 4.2.2 Zoetwaterzone Lek..... | 39 |
| 4.2.3 Zoetwaterbuffer Brielse Meer..... | 41 |
| 4.2.4 Zoetwaterzone Haringvliet - Hollands Diep | 43 |
| 4.2.5 Effecten chlorideconcentraties en waterstanden op andere locaties in de Rijn-Maasmonding | 44 |
| 5. Discussie en kennisleemtes..... | 46 |
| 6. Conclusies en aanbevelingen | 50 |

Inhoud

| | | |
|-------------------|---|-----------|
| 6.1 | Beantwoording vragen houdbaarheid zoetwaterbuffers en -zones | 50 |
| 6.2 | Aanbevelingen | 52 |
| 7. | Referenties | 54 |
| Appendix A | | 56 |
| Appendix B | | 66 |



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 – Zoet water' waarin de houdbaarheid en oprekbaarheid van vier strategische regio's wordt onderzocht door middel van een modelstudie gericht op de verziltingsproblematiek. Deze rapportage bevat de studie van één van deze regio's, de Rijn-Maasmonding (RMM).

Deze studie is uitgevoerd met bestaande modellen die in meer of mindere mate in staat zijn om de in de RMM relevante processen weer te geven. Desalniettemin lijken de resultaten vrij robuust: er is gebruik gemaakt van twee verschillende modelbenaderingen die het zelfde overkoepelende beeld laten ontstaan. Omdat het 3D model meer fysica bevat, zijn de 3D resultaten in het algemeen zowel kwalitatief als kwantitatief betrouwbaarder dan de 1D benadering. De belangrijkste kanttekening hierbij is dat het huidige 3D model niet in staat is om alle deelgebieden naar behoren te beschrijven, waaronder de structurele onderschatting van de verzilting op de bovenloop van de HIJ. Aangezien hetzelfde model de verzilting van de Lek goed lijkt te beschrijven is dit een indicatie dat de juiste processen in het model aanwezig zijn, alleen blijkt het relatieve belang van de processen onderling in het geval van de HIJ niet goed te worden weergegeven.

De Rijn-Maasmonding is een 'open' systeem met direct samenspel tussen getij en rivierafvoer die het gemiddelde zoet-zout evenwicht in de hoofdtakken van de RMM bepalen en daarmee de zoutdruk aan de rand van de zoetwaterzones HIJ, Lek en Haringvliet-Hollands Diep, en de zoetwaterbuffer Brielse Meer. Uit deze studie volgt het beeld dat de zoetwaterbuffers en -zones door ZSS en afnemende rivierafvoeren onder druk komen te staan. Wat dit betekent voor de waterstaatkundige houdbaarheid van Rijn-Maasmonding zoetwaterbuffers en -zones wordt bepaald door hoe effectief de bufferstrategie is in het opvangen van de toename van zoutdruk aan de rand van de buffers/zones. Voor alle vier de zoetwaterbuffers/-zones is de NWW afvoer de grote 'stuurknop', indirect stuurbaar via de Haringvlietssluisen en andere keuzes in de waterverdeling bovenstrooms. Door ZSS zal het minimaal benodigd ondergrensdebiet op de NWW toenemen om de zoetwaterbuffers en -zones in stand te kunnen houden. Het zorgvuldig bepalen van dit ondergrensdebiet is een van de belangrijkste aanbevelingen uit deze studie.

Voor de noordrand van de RMM zit er waterstaatkundig gezien rek in de zoetwaterstrategie, mits maatregelen worden genomen om een toename in aanvoersurplus naar de zoetwaterzones HIJ en Lek technisch mogelijk te maken. De haalbaarheid daarvan valt buiten de scope van voorliggende studie. Een aandachtspunt voor de zoetwaterzone Lek is de aanvoer naar de zoetwaterzone via stuw Hagestein. Vanaf ongeveer 2 m ZSS kan de aanvoer naar de zoetwaterzone Lek niet meer direct worden gestuurd (geen/nauwelijks verval over stuw Hagestein).

De zoetwaterbuffers en -zones aan de zuidkant van de Rijn-Maasmonding (Haringvliet-Hollands Diep, Brielse Meer en VZM) worden door zeespiegelstijging gevoeliger voor windopzet en achterwaartse verzilting (kwantificering geen onderdeel van deze studie). In welke mate dan nog zoete inlaatvensters voorkomen bij de Bernisse inlaat zal bepalend zijn voor de waterbeschikbaarheid van het Brielse Meer. Door de hogere waterstand op het Spui zal de inlaatcapaciteit van de Bernisse inlaat toenemen bij ZSS. Zonder windopzet is bij ZSS richting 3 m ZSS en een NWW afvoer onder de 900 à 400 m³/s continue achterwaartse verzilting via het Spui te verwachten.



1

Inleiding

1. Inleiding

1.1 Aanleiding

Het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP ZSS) ontwikkelt kennis om Nederland voor te bereiden op zeespiegelstijging tot 5m. 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 (Arcadis/HydroLogic, 2023a)
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 de RMM (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 voorkeurstrategie voor de Rijn-Maasmonding (RMM) onder extreme zeespiegelstijging en in de wijze waarop die houdbaarheid fysisch eventueel is te vergroten. Met systeemanalyses en modelstudie wordt bijgedragen aan de informatiebehoefte rond extreme zeespiegelstijging en lage rivierafvoeren op het waterstaatkundig functioneren van zoetwaterbuffers en -zones (onderdeel van de voorkeursstrategie Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatervoorziening, KZH) in de RMM.

De Rijn-Maasmonding is een 'open' systeem met direct samenspel tussen getij en rivierafvoer. Daarin verschilt de RMM van de andere onderzochte systemen (IJsselmeer, ARK en VZM). Dit vraagt allereerst om een **toets op de bruikbaarheid van de bestaande modelinstrumentaria** (paragraaf 1.2.1), bekeken vanuit de essentie van de systeemwerking. Deze inzichten zijn vervolgens nodig om de modelinstrumentaria in te kunnen zetten voor de analyses van de **waterstaatkundige effecten op de zoetwaterbuffers en -zones** (paragraaf 1.2.2), maar ook voor vervolganalyses binnen het KPZSS.

Deze twee 'hoofddoelen' en onderliggende vragen vormen de leidraad van dit rapport. Paragraaf 1.2.3 geeft verwijzingen hoe de kennisvragen (Deltares, 2021; Rijkswaterstaat, 2021) hierin terugkomen, of in een andere document.

1.2.1 Toets modelinstrumentaria

Voor 1D en 3D: hoe gevoelig is het zoet-zout evenwicht voor variaties in rivierafvoer en in zeespiegelstijging?

Denk hierbij aan de vragen:

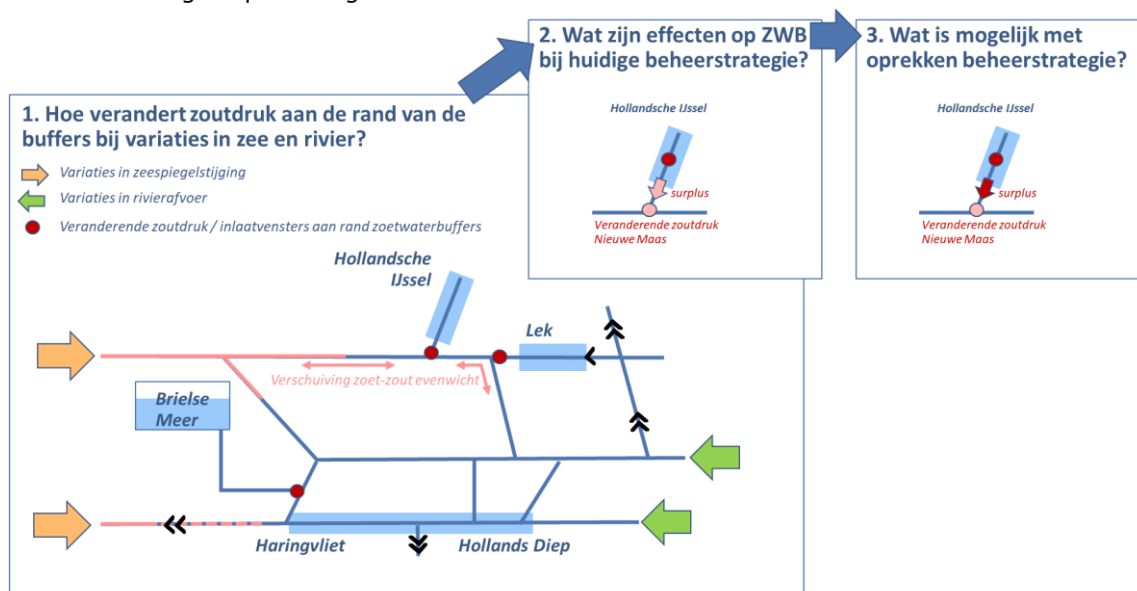
- Welke ruimtelijke variaties in chloridepatronen laten 1D en 3D zien?
- Laten 1D en 3D een vergelijkbare reactie zien op variaties in zeespiegelstijging?
- Laten 1D en 3D een vergelijkbare reactie zien op variaties in rivierafvoer?

Hierbij wordt gekeken of het gaat om systematische afwijkingen of dat de afwijkingen met name spelen in een bepaald (afvoer/zee/chloride)domein. Hierbij wordt gekeken naar het traject van de monding van de NWW tot aan de randen van de zoetwaterbuffers/-zones: een ruimtelijk beeld van de verschuivingen in de zoet-zout overgang (juist ook voor de hogere chlorideconcentraties) geeft experts een beter beeld van het modelgedrag, wat belangrijk is bij toepassing buiten het bekende domein.

De focus ligt op het identificeren van de verschillen. Daar waar mogelijk met expertkennis is een hypothese gegeven voor de oorzaak van de verschillen. Eventuele verdiepende, modelvergelijkende analyses, vallen buiten de scope van deze studie.

1.2.2 Waterstaatkundige effecten zoetwaterbuffers en -zones RMM

De RMM heeft meerdere zoetwaterbuffers en -zones: de Hollandsche IJssel, Lek, Haringvliet - Hollands Diep en het Brielse Meer. Deze hebben elk hun eigen karakteristieken, zoet-zout dynamiek en mogelijke 'faalmechanismes' voor de zoetwaterbuffers en -zones. In dit rapport worden de vier buffers en zones apart beschouwd. Paragraaf 2.3 beschrijft de essentie van de waterstaatkundige houdbaarheid voor elk van de systemen. Uit die analyse volgt onderstaande getrapte vraagarticulatie voor deze studie.



Figuur 1. Getrapte analyse van de waterstaatkundige effecten van zeespiegelstijging en lage rivierafvoeren op de zoetwaterbuffers en -zones in de Rijn-Maasmonding.

1) Hoe verandert de zoutdruk aan de rand van de buffers/zones bij variaties in randvoorwaarden ZSS en rivierafvoer?

Denk hierbij aan de vragen:

- Welke combinaties van zeespiegelstijging en rivierafvoer leiden tot verzilting aan de rand van de zoetwaterbuffers/zones?
- Bij verzilting aan de rand van de zoetwaterbuffers/zones: hoeveel (ordegrootte) hoger worden de chlorideconcentraties?
- Voor Haringvliet/Hollands Diep (indirect ook voor Brielse Meer en VZM): check op knikpunt - is bij een bepaalde mate van zeespiegelstijging en rivierafvoer continue achterwaartse verzilting te verwachten?

2) Wat zijn de effecten op de zoetwaterzones bij de huidige beheerstrategie (nader beschreven in hoofdstuk 2)?

Denk hierbij aan de vragen:

- Hoe gevoelig zijn de chlorideconcentraties op de bovenloop van de HIJ en Lek voor variaties in 'zoutdruk' aan de rand van de zones (resultaat stap 1) bij gelijkblijvend surplus van de zone?
- Wat is de functionele levensduur van stuw Hagestein (als belangrijke stuurknop in beheerstrategie voor aanvoer naar zoetwaterzone Lek¹) bij ZSS en rivierafvoer variaties?

Afbakening

Voor vraag 2 en 3 van deze studie ligt de **focus op de HIJ en de Lek**, zoetwaterzones die in open verbinding staan met de rest van de Rijn-Maasmonding. Voor het Brielse Meer worden ook de chloridelocaties en waterstanden bij de Bernisse en Spijkenisse inlaat gegeven op basis van de semi-stationaire analyses naar het zoet-zout evenwicht in de Rijn-Maasmonding zoals voor deze studie is ingezet. Het Brielse Meer en Haringvliet vragen echter aanvullend ook een ander type analyses, zoals in de aanbevelingen (paragraaf 6.2) is toegelicht als verdiepingsslag.

3) Wat is mogelijk met het oprekken van de huidige beheerstrategie?

- Hoe reageren chlorideconcentraties op de bovenloop van HIJ en Lek op verschillende surplus varianten ('oprekken huidige beheerstrategie')?

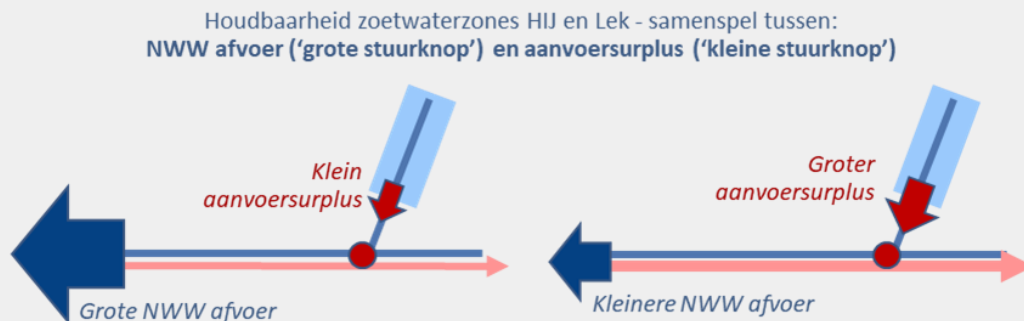
Inzicht in de fysische haalbaarheid van (het oprekken van) de huidige strategie bij zeespiegelstijging, vraagt ook een analyse van de bovenregionale waterbeschikbaarheid (bijv. vanuit ARK voor zoetwaterzone HIJ). Dit laatste is onderdeel van het Bovenregionale deel van deze KP ZSS studie. Alternatieven op de huidige beheerstrategie (denk aan ingrepen in de morfologie van de bodemligging) vallen buiten de scope van deze studie.

Kader: NWW debiet en houdbaarheid zoetwaterbuffers en -zones

Rivierafvoer is een belangrijke variabele voor de houdbaarheid van de zoetwaterbuffers en -zones in de Rijn-Maasmonding. In de Rijn-Maasmonding gaat het primair om de afvoer door de Nieuwe Waterweg (NWW). Die bepaalt voor een belangrijk deel hoe ver de zee invloed reikt.

In deze studie wordt voor de variaties in rivierafvoer daarom primair gesproken over de NWW afvoer. Aangezien de Lobith afvoer echter meer tot de verbeelding spreekt, is deze koppeling wel gemaakt. Deze kan echter variëren met de bovenregionale watervragen en waterverdelingskeuzes. Er is daarom een bandbreedte aan Lobith afvoeren gegeven, waarbij de NWW afvoer mogelijk is.

De NWW afvoer is indirect (via keuzes in de landelijke waterverdeling en onttrekkingen) een stuurknop voor de houdbaarheid van de Rijn-Maasmonding zoetwaterbuffers en -zones. Het is een 'grote knop' die invloed heeft op het benodigde debiet via de 'kleinere knop' van het surplus van een zoetwaterzones.



¹ Voor de bovenloop van de HIJ zijn in de huidige infrastructuur de regionale kunstwerken Waaiersluis, gemaal de Waaier en gemaal Verdoold belangrijk voor de aanvoer naar de zoetwaterzone. De functionele levensduur van die kunstwerken bij zeespiegelstijging valt buiten de scope van deze studie.

1.2.3 Link met kennisvragen

Voorafgaand aan deze studie zijn voor de RMM kennisvragen opgehaald en afgebakend zoals weergegeven in onderstaande tabel (Deltares, 2021; Rijkswaterstaat, 2021). In de tabel is toegelicht hoe met deze vragen is omgegaan binnen deze studie. De aangescherpte vraagarticulatie zoals aan het begin van deze studie met het expertteam is opgesteld (paragraaf 1.2) vormt verder de leidraad voor dit rapport.

| | Vraag | Verwijzing |
|----|---|---|
| E2 | Wat zijn de mogelijke veranderingen in de landelijke waterverdeling (afvoerdeling over IJssel, Nederrijn-Lek en Waal)? | Rapport Bovenregionaal (Arcadis/Hydrologic, 2023e) |
| C1 | Tot welk niveau van zeespiegelstijging loopt functionele levensduur van huidige kunstwerken? | Paragraaf 4.2.2 (stuw Hagestein) |
| C2 | Hoe verandert de aan- of afvoercapaciteit van de kunstwerken als gevolg van zeespiegelstijging? | Afgebakend tot kunstwerken in het hoofdwatersysteem. Paragraaf 4.2.2 (stuw Hagestein) |
| C3 | Hoe verandert de zoutvracht door kunstwerken als gevolg van zeespiegelstijging? | Afgebakend tot kunstwerken in het hoofdwatersysteem en daardoor niet van toepassing. Enige kunstwerk binnen hoofdwatersysteem in deze regio op zoet-zout grensvlak zijn Haringvlietsluizen. Hoe zoutvracht verandert door deze sluisen is onderdeel van het <i>Onderzoeksprogramma Verzilting Lerend Implementeren Kierbesluit Haringvlietsluizen</i> |
| C4 | In welke mate verandert het beheer van kunstwerken bij zeespiegelstijging en wat betekent dat voor waterstanden en afvoermogelijkheden vanuit het achterland? | Paragraaf 3.4 (Haringvlietsluizen) Paragraaf 4.2.2 (Hagestein) |
| B1 | Hoe verandert de watervraag (doorspoelbehoefte) als gevolg van toename van zoute kwel tgv zeespiegelstijging uitgesplitst naar (deel)gebieden...? | Grondwaterverzilting en watervraag bij een stijgende zeespiegel (Deltares, 2022) |
| A1 | Tot welke mate van zeespiegelstijging kan de waterstand binnen reguliere normen (d.w.z. niet waterveiligheid) blijven op bepaalde locaties voor voorkeursstrategie? | Appendix B |
| A2 | Tot welke mate van zeespiegelstijging kan de watervoorziening gehandhaafd blijven op bepaalde locaties voor voorkeursstrategie? | Paragraaf 4.2 |
| A3 | Tot welke mate van zeespiegelstijging blijft de chlorideconcentratie op een voldoende laag niveau op bepaalde locaties voor voorkeursstrategie? | Paragraaf 4.2 |

1.3 Modelleerstrategie

De houdbaarheid en oprekbaarheid van het RMM systeem worden onderzocht door modelmatig de verschillende vrijheidsgraden te exploreren die bepalen hoe zowel waterstand als chlorideconcentratie reageren. De verschillende vrijheidsgraden beschrijven een multidimensionale parameterruimte of *hyperkubus* waarvan elke vrijheidsgraad één as vormt. De systeemrespons binnen deze parameterruimte wordt geëxploreerd door verschillende combinaties van waarden langs de verschillende vrijheidsgraden door te rekenen. De verkende parameterruimte van het RMM systeem, welke aan de basis ligt voor de uitgevoerde modelstudie, is in meer detail toegelicht in hoofdstuk 3.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 beschrijft de essentie van de systeemwerking van de RMM en de huidige beheerstrategie. Daarbij wordt de *waterstaatkundige houdbaarheid van de zoetwaterbuffers en -zones* gedefinieerd. Ook wordt hier een samenvatting gegeven van de expertteam bijeenkomsten welke (onder andere) zijn benut voor hypothesevorming over de effecten van zeespiegelstijging en lage rivierafvoeren op de systeemwerking in de RMM.

Hoofdstuk 3 bevat de methodiek waarin de gebruikte modelinstrumentaria zijn toegelicht, de getrapte aanpak van de analyses, de uitgangspunten en randvoorwaarden, en de aanpak van de post-processing.

Hoofdstuk 4 beschrijft de resultaten van model en geeft duiding aan deze resultaten. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de twee onderdelen van deze studie: de toets op bruikbaarheid van de modelinstrumentaria voor ZSS effecten, en de analyses van de waterstaat kundige houdbaarheid van de zoetwaterbuffers en -zones in de RMM.

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

Hoofdstuk 6 beschrijft de conclusies en aanbevelingen.

1.5 Definities en afkortingen

| Term/afkorting | Definitie/Betekenis |
|----------------|---|
| KP ZSS | Kennisprogramma Zeespiegelstijging |
| KZH | Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatersysteem |
| ZSS | Zeespiegelstijging |
| VZM | Volkerak-Zoommeer |
| RMM | Rijn-Maasmonding |
| ARK-NZK | Amsterdam-Rijnkanaal en het Noordzeekanaal |
| IJM | IJsselmeer/ Markermeer |
| HIJ | Hollandsche IJssel |
| NWW | Nieuwe Waterweg |

| Term/afkorting | Definitie/Betekenis |
|-----------------------------------|---|
| BRWVS | Het bovenregionaal waterverdelingsstelsel (hoofdwatersstelsel, beheerd door Rijkswaterstaat) |
| Assen (van de hyperkubus) | De stelselvariabelen die gekozen zijn om te variëren in de modelstudie. Zie ook primaire en secundaire vrijheidsgraden. |
| Variant | Een bepaalde combinatie aan modelinvoer met de bijbehorende modeluitvoer |
| Surplus | Zoet water debiet beschikbaar voor het leveren van tegendruk tegen de zouttong. |
| Primaire vrijheidsgraad | Randvoorwaarde en/of stelselparameter welke van groot belang is voor het gedrag en functioneren van het stelsel. Deze variabele vormt doorgaans één van de assen van de hyperkubus. |
| Secundaire vrijheidsgraad | Randvoorwaarde en/of stelselparameter welke van minder groot belang is voor het gedrag en functioneren van het stelsel. Deze variabele wordt vaak constant gekozen op een representatieve waarde. |
| Advectieve zoutindringing | Zoutindringing gedreven door (getij)stroming |
| Dispersieve zoutindringing | Zoutindringing gedreven door mengingsprocessen |
| Waterstaatkundige effecten | Effecten op chlorideconcentraties en waterstanden |
| Surplus | Overschot in aanvoer van zoetwater naar ten opzichte van de onttrekkingen uit de bovenloop van de HIJ of Lek |



2

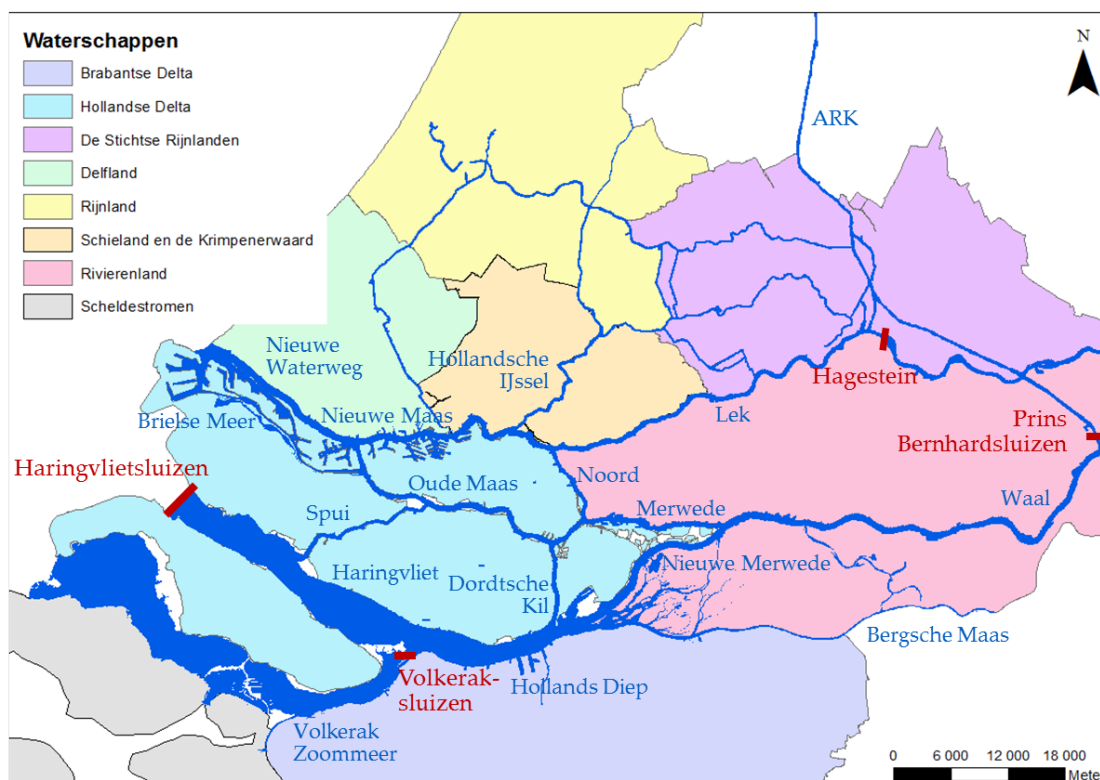
Het RMM-systeem

2. Het RMM-systeem

2.1 Inleiding

Het hoofdwatersysteem van de Rijn-Maasmonding (RMM) staat via de Nieuwe Waterweg (NWW) in open verbinding met zee. Hierdoor staat het systeem onder invloed van de getijdewerking van de Noordzee, en de effecten van wind op de zeewaterstand. Ook is dit het gebied waar het water van de rivieren de Nederrijn/Lek, Waal en Maas samenkomen. Dit maakt de waterstromen en (bij lage rivierafvoeren) met name de zoutindringing in dit systeem een complex samenspel van processen, welke deels nivellerend dan wel versterkend werken. De waterverdeling over de rivierarmen is vanzelfsprekend van groot belang, maar het is belangrijk om te beseffen dat deze verdeling grotendeels is vastgelegd in de morfologie van de rivieren en daarmee slechts ten dele stuurbaar. De grootste stuurknop voor de waterverdeling in de RMM zijn de Haringvlietsluizen. De beheergebieden van de waterschappen Brabantse Delta, Hollandse Delta, De Stichtse Rijnlanden, Delfland, Rijnland, Schieland en de Krimpenerwaard liggen in de Rijn-Maasmonding. De beheergebieden van Rijnland, De Stichtse Rijnlanden, Scheldestromen en Rivierenland grenzen hieraan (Figuur 2).

Bij lage rivierafvoeren krijgt het getij en daarmee de verzilting in de RMM meer invloed. Het geleidelijk indringen van het zoute water zorgt ervoor dat een deel van de inlaatpunten kan verzilten. Afhankelijk van de locatie in het systeem zijn de rivierafvoer, het getij, de wind en de onttrekkingen factoren die in meer of mindere mate bepalend zijn in het proces van verzilting vanaf zee. Watertekort in de RMM betekent meestal dat er onvoldoende water is van de juiste kwaliteit (gerelateerd aan de gebruikseisen voor landbouw, drinkwater, industrie en natuur). Een kwantitatief tekort komt minder voor, maar kan ontstaan door langdurig lage afvoeren, waardoor bij inlaatlocaties zoals Bernisse-Brielse Meer onvoldoende water kan worden ingelaten door een te beperkt verval bij de Bernisse inlaat. Als wordt gesproken over de noordrand van de RMM wordt het gebied rondom de Nieuwe Maas, Hollandsche IJssel en Lek bedoeld. Wanneer wordt gesproken over de zuidrand van de RMM wordt verwezen naar het gebied van de Oude Maas, Spui, Haringvliet en Hollands Diep.



Figuur 2. De Rijn-Maasmonding.

2.2 Essentie systeemwerking RMM

- **Zeewaterstand en rivier** zijn de primaire variabelen die het gemiddelde **zoet-zout evenwicht** in de hoofdtakken van de RMM bepalen en daarmee de gevoeligheid van de zoetwaterbuffers en -zones voor verzilting. Dit is de resultante van een complex samenspel tussen onder andere waterstands- en dichtheidsverschillen, en afvoerverdeling. De Haringvlietsluizen zijn de primaire stuurknop voor de verdeling van het rivierwater (en instromend zeewater) over de verschillende takken, waarmee bij lage rivierafvoeren vrijwel al het rivierwater via de NWW wordt afgevoerd. Daarnaast is de morfologie van de rivierbodem mede bepalend voor hoe ver het zoute zeewater kan indringen en voor de verdeling van het rivierwater (en instromend zeewater).
- Bij lagere rivierafvoeren is de verziltingsgevoeligheid voor **wind en opzet op zee** groter. Deze kunnen zorgen voor tijdelijke variaties om het bovengenoemde evenwicht heen. Deze variaties kunnen grote invloed hebben op verzilting, maar door de relatief korte duur hebben ze een minder grote invloed op de waterbeschikbaarheid dan de lage afvoeren. Uitzondering hierop vormt het Haringvliet - Hollands Diep waar de zoutinstroom bij gesloten sluisen niet weer direct na de gebeurtenis uitstroomt, maar voor langere tijd kan naleveren. Dit is van invloed op de zoetwaterbuffers Haringvliet - Hollands Diep, VZM en de Bernisse inlaat naar het Brielse Meer. Voor de zoetwaterzones Hollandse IJssel (HIJ) en Lek zijn de variaties in de monding (advectieve deel) van korte duur. In hoeverre die doorwerken op de bovenloop van de HIJ en Lek (dispersieve deel) is in het huidige systeem afhankelijk van het beheer op de HIJ. Bij zeespiegelstijging kan de overgang van advectief naar dispersief transport (en daarmee het effect van windinvloed) verschuiven in bovenstroomse richting.
- Bovenloop HIJ en Lek zijn doodlopende riviertakken: geen grote advectieve instroom, en in lage afvoersituaties vrijwel geen bovenstrooms debiet. In deze 'dispersieve delen' zijn mengingsprocessen dominant in verspreiding (tijdschaal over enkele dagen).
- Onttrekkingen (watervraag regio) zijn (1) een secundaire variabele in het zoet-zout evenwicht in de RMM (verlaging afvoer NWW), en (2) een primaire variabele voor het zoet-zout evenwicht binnen de dispersieve delen van de HIJ en Lek.
- De watervraag voor de dispersieve delen van de HIJ en Lek kent naast de watervraag voor de regionale watersystemen en drinkwater (Lek) ook een watervraag voor de instandhouding van de zoetwaterzone (aanvoersurplus tegen dispersieve zouttransport). Deze watervraag voor de zones wordt niet 'opgebruikt' en draagt nog bij aan de resterende afvoer door de NWW, al is deze relatief beperkt ten opzichte van de NWW afvoer.
- Voor de zuidrand van de Rijn-Maasmonding is het optreden (en de omvang) van achterwaartse verzilting (en moment in het jaar) bepalend voor de zoetwaterbuffers Haringvliet-Hollands Diep, VZM en de Bernisse inlaat van het Brielse Meer.

2.3 De huidige beheerstrategie (KZH) en definitie waterstaatkundige houdbaarheid per buffer/zone

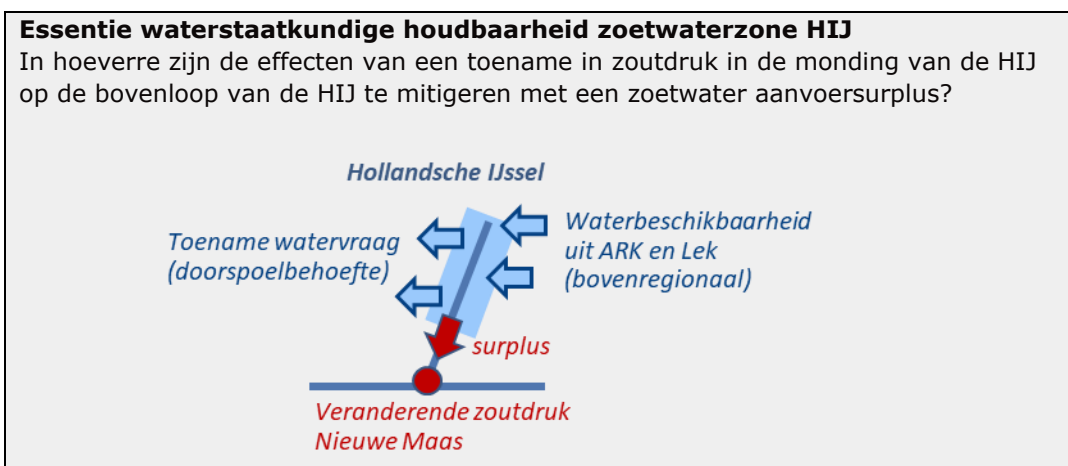
De Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatersysteem (KZH) strategie zet in op het organiseren van de zoetwatervoorziening vanuit de zoetwaterrobuuste en stuurbare delen van het hoofdwatersysteem. In de RMM zijn daarvoor de zoetwaterzones HIJ, Lek, Haringvliet-Hollands Diep, en de zoetwaterbuffer Brielse Meer aangewezen.

Hollandsche IJssel

De HIJ staat in open verbinding met de Nieuwe Maas en staat daarmee in de monding direct onder invloed van het getij en de rivierafvoer aan de noordrand van de RMM (afvoer NWW). Bij lage rivierafvoeren (afvoer bij Lobith van minder dan 1000-1200 m³/s (Deltares, 2021a), deze grens ligt hoger als er sprake is van windopzet) verzilt de monding van de HIJ en ontstaat ook het risico op verzilting van de rest van de HIJ. De getijwerking heeft daarbij in

de benedenloop van de HIJ een relatief grote invloed: per getijdencyclus gaan grote debieten de benedenloop in en uit². Dit advectieve transport is vele malen groter dan bijvoorbeeld de grootte van onttrekkingen en daarmee zeer beperkt te beïnvloeden. Het water dat bij vloed de HIJ op stroomt, stroomt vanuit de monding niet in één vloedperiode tot aan Gouda, maar komt ongeveer tot 6 km op de HIJ (advectief transport) (Deltares, 2015).

Vanaf deze (dynamische) grens, het getijwegfront, kan het verzilte water de bovenloop van de HIJ op dringen. Dit kan gebeuren middels dispersief transport - meerdere mengingsprocessen, zoals turbulentie, menging, scheepvaart en het lokaal achterblijven van zout water in uitstulpingen van de rivier - of door advectief transport in de vorm van onttrekkingen. Dit leidt ertoe dat niet al het zoute water terugstroomt bij terugtrekkend tij en zout achterblijft op de HIJ. Dispersief transport is een veel trager proces en is beter te mitigeren met een beperkt debiet (Deltares, 2015). Binnen de huidige strategie wordt in periodes van (dreigende) verzilting van de monding van de HIJ een zoetwaterzone op de bovenloop ingesteld: een surplus in de wateraanvoer ten opzichte van de inlaat uit de bovenloop van de HIJ kan het dispersieve zouttransport op de bovenloop van de HIJ tegengaan.



Lek

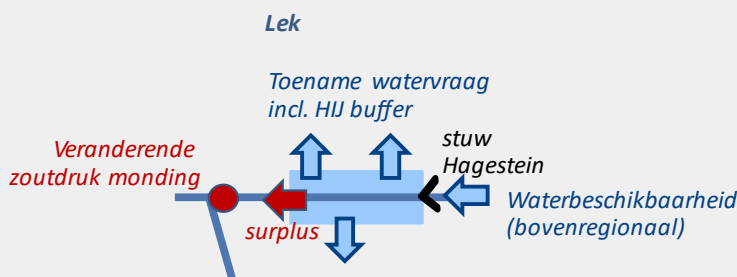
In de Lek spelen vergelijkbare processen als in de HIJ. De verzilting van de monding van de Lek wordt vooral beïnvloed door de verzilting in de Nieuwe Maas, als resultante van Bovenrijnafvoer, bovenstroomse waterverdeling en getijde. Bij **rivierafvoeren** lager dan 900 m³/s in combinatie met beperkte **opzet** kan de monding van de Lek (Krimpen a/d Lek en Kinderdijk) permanent verzilten, dus ook tijdens eb (Deltares, 2017). Afhankelijk van de netto onttrekkingen en afvoeren op de Lek, kan de bovenloop van de Lek ook verzilten. Bij afvoeren tussen de 900 en 1400 m³/s zal getijgemiddelde verzilting van de monding vrijwel alleen optreden als de waterstand bij Hoek van Holland hoger is dan 1.7 meter.

De verzilting op het grootste deel van de Lek - bovenstrooms van de advectieve getijweg - wordt beïnvloed door (1) de verzilting in de monding van de Lek, en (2) de netto afvoer op de Lek (in droge periodes combinatie onttrekkingen en eventuele afvoer Hagestein).

² Daarnaast zijn het faseverschil tussen de HIJ en de Nieuwe Maas en de aanwezigheid van de Sliksloot twee factoren die ervoor zorgen dat verzilting van de benedenloop HIJ niet hetzelfde is als in de Nieuwe Maas in dit gebied.

Essentie waterstaatkundige houdbaarheid zoetwaterzone Lek

In hoeverre zijn de effecten van een toename in zoutdruk in de monding van de Lek op de bovenloop van de Lek te mitigeren met een zoetwater aanvoersurplus?



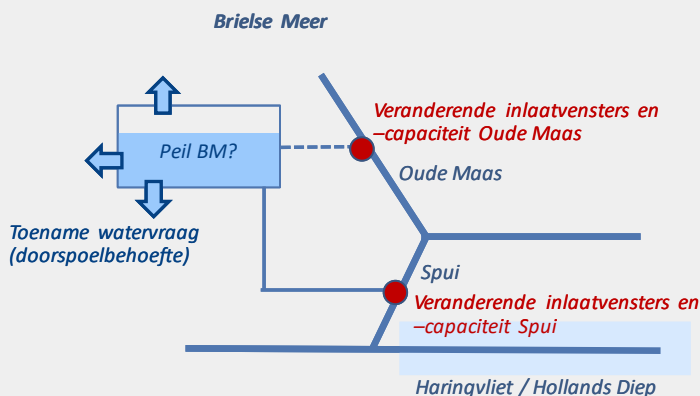
Brielse Meer

Elke getijdencyclus stroomt bij opkomend tij water vanuit de NWW de Oude Maas in en bij afnemend tij weer terug. Wind en stormopzet kunnen zorgen voor kortdurende hoge pieken in de chlorideconcentraties op het Spui, waarbij in extreme situaties achterwaartse verzilting kan optreden. Aan het Spui ligt de Bernisse inlaat als primaire inlaat naar het Brielse Meer. Wanneer veel zout in het Haringvliet achterblijft, kan dit in de daaropvolgende periode voor hogere chlorideconcentraties op het Spui zorgen als gevolg van nalevering van 'zout' water. Bij langdurig lage rivierafvoeren kan ook de achtergrondconcentratie chloride oplopen tot de kwaliteitseis voor hoogwaardige industrie (150 mg/l).

Het Brielse Meer heeft een bufferende werking, ten opzichte van de watervraag hooguit enkele dagen. Als de verzilting langere periode aanhoudt (door hoge achtergrondconcentraties bij lage rivierafvoeren, of door nalevering na achterwaartse verzilting) vraagt dit waterkwaliteitsafwegingen bij de gebruikers van het Brielse Meer.

Essentie waterstaatkundige houdbaarheid zoetwaterbuffer Brielse Meer

Hoe verandert de waterbeschikbaarheid van het Brielse Meer door de effecten van zeespiegelstijging en lagere rivierafvoeren (kleinere zoete inlaatvensters, grotere inlaatcapaciteit, toename frequentie achterwaartse verzilting met nalevering) in relatie tot de watervraag?



Haringvliet-Hollands Diep

Evenals bij het Brielse Meer is voor het Haringvliet en Hollands Diep het al dan niet optreden van achterwaartse verzilting bepalend voor de zoetwaterbeschikbaarheid. Achterwaartse verzilting is het proces dat de vloedstroom met zout water via de Oude Maas en Spui of (in extremere situaties) via Dordtsche Kil richting het Haringvliet en Hollands Diep stroomt. Dit gebeurt in de huidige situatie doordat er grote waterstandsverschillen optreden tussen de

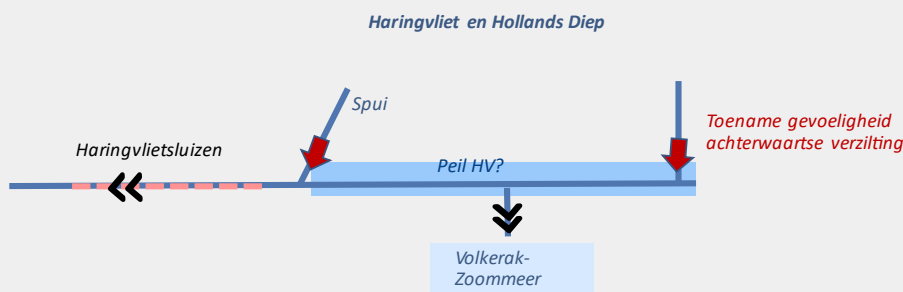
noord- en zuidrand (Hoek van Holland en Moerdijk), als gevolg van springtij of wind, waardoor de vloedstroom richting het Haringvliet langer dan één getijdperiode aanhoudt (Deltares, 2019). Als de Rijnafvoer op dat moment verlaagd is, kan het zoutere water weken tot maanden op het Haringvliet of Hollands Diep blijven en vandaaruit zout water naleveren naar bijvoorbeeld het Spui richting de Bernisse inlaat.

Essentie waterstaatkundige houdbaarheid zoetwaterzone Haringvliet - Hollands Diep

Hoeveel gevoeliger worden Haringvliet en/of Hollands Diep voor achterwaartse verzilting door zeespiegelstijging en lagere rivierafvoeren?

- In hoeverre gaat het hier om langdurige effecten voor de inlaatlocaties (combinatie met lage rivierafvoer omstandigheden);
- En hoe effectief is de onderzoeksmaatregel van het doorspoelen van de bovenlaag?

Aanname: voor het Kierbesluit Haringvlietsluizen is geen verzilting voorbij Middelharnis-Spui een randvoorwaarde.



2.4 Expertverwachting effecten zeespiegelstijging en lagere rivierafvoeren op essentie systeemwerking RMM

In voorbereiding op de modelanalyses zijn expertbijeenkomsten benut voor hypothesevorming over de effecten van zeespiegelstijging en lage rivierafvoeren op de systeemwerking in de RMM. Onderstaande punten vatten de bevindingen samen.

- Door ZSS neemt het advectieve zouttransport, gedreven door waterstands- en drukverschillen toe. Hierin speelt de gravitatiecirculatie³ naar verwachting een belangrijke rol (sterkere longitudinale⁴ zoutgradiënt). Belangrijke vraag is waar met ZSS gegeven verschillende afvoercondities het nieuwe zoet-zout evenwicht komt te liggen. Komen inlaatlocaties uit de zoetwaterzones HIJ en Lek in het advectieve deel te liggen? En onder welke omstandigheden komt de getijweg voorbij de Bernisse inlaat?
- Lagere rivierafvoeren dragen in potentie ook bij aan een verdere stroomopwaartse verplaatsing van het zoet-zout evenwicht. Echter, een lage rivierafvoer kan ook zorgen voor een beperktere gelaagdheid, wat indringing van zout water in potentie tegenwerkt. Dat laatste effect is naar verwachting echter ondergeschikt aan de beperking in tegendruk als gevolg van de lagere rivierafvoer. Grosso modo wordt dan ook verwacht dat het zoet-zout grensvlak zich bij ZSS stroomopwaarts verplaatst.
- Belangrijk voor het begrip van de effecten van ZSS op de RMM zoetwaterbuffers en -zones, is wat ZSS doet met de zo bepalende afvoerverdeling in de RMM? Hierbij spelen

³ Fenomeen waarin bovenin de waterkolom de stroming een andere stromingsrichting kent dan onderin, gedreven door dichtheidsverschillen.

⁴ in de lengterichting

onder andere de vragen: Wat is de invloed van ZSS op de waterverdeling Oude en Nieuwe Maas (zowel rivierzijde (verdeling rijnafvoer over noord- en zuidrand) als zeezijde (vloedinstroom-verdeling over splitsingspunten))? Beïnvloedt ZSS het faseverschil tussen uitstromen van Nieuwe Maas en HIJ (waardoor HIJ minder snel verzilt)?

- Interessant inzicht is ook de omgekeerde vraag: met welke afvoerverdeling (welk minimum debiet via de NWW) kunnen de zoetwaterbuffers en -zones HIJ, Lek en Brielse Meer (waterstaatkundig) in stand worden gehouden (gegeven een haalbaar/realistisch surplus voor HIJ en Lek)? Daarmee samenhangend: hoe vaak en hoe lang zouden Haringvlietsluizen dicht moeten vanwege lage rivierafvoeren?
- Een andere belangrijke vraag is wat het effect van ZSS is op dispersief zouttransport in de bovenloop van de HIJ en Lek. Hoe worden de mengingsprocessen daar beïnvloed door een grotere waterdiepte, hogere zoutdruk in de monding en andere dynamiek? En wat vraagt dit, gegeven een bepaalde afvoerverdeling, van het surplus op de bovenloop van de HIJ en Lek?



3

Methodiek

3. Methodiek

Dit hoofdstuk beschrijft de methodiek waarmee de doelen en kennisvragen van deze studie (paragraaf 1.2) zijn geanalyseerd.

- Allereerst beschrijft paragraaf 3.1 kort welke modelleerstrategie binnen deze systeemanalyse (Spoor 2 - Zoetwater) is gevolgd.
- Paragraaf 3.2 geeft de voor deze studie belangrijkste kenmerken van de 1D en 3D modelinstrumentaria die voor deze studie zijn gebruikt, en motiveert hoe de beide instrumentaria in deze studie zijn ingezet.
- Paragraaf 3.3 beschrijft de ZSS en rivierafvoer varianten die in deze studie zijn geanalyseerd en hoe deze analyse voor de RMM zoetwaterbuffers en -zones is opgebouwd.
- Een motivatie en overzicht van de gekozen uitgangspunten en randvoorwaarden is gegeven in paragraaf 3.4.
- Tot slot geeft paragraaf 3.5 inzicht in de keuzes die zijn gemaakt in de post-processing van de modelresultaten.

3.1 Modelleerstrategie

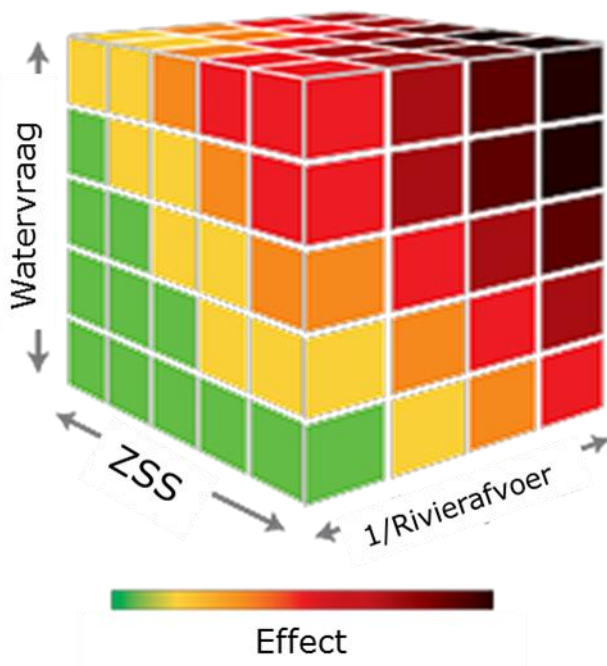
De voorgestelde aanpak in deze modelstudie wordt 'exploratief' genoemd. De werking van de (strategische) zoetwaterbuffers is afhankelijk van de trend en coïncidenties in drie dominante klimaatvariabelen: lage afvoeren van de grote rivieren; neerslag en verdamping (zoetwatervraag); en zeespiegel. Met 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 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. Schets van de voorgestelde gevoeligheidsanalyse in matrixstructuur waarin de hoofdassen de te onderzoeken factoren (als randvoorwaarden, systeemparameters) weergegeven 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. De verkende parameteromgeving van het RMM systeem, welke aan de basis ligt voor de uitgevoerde modelstudie, is in meer detail toegelicht in dit hoofdstuk.

3.2 Modelinstrumentaria 1D en 3D

In deze studie is gebruik gemaakt van het 1D SOBEK3 model, welke gebruik maakt van de naar bovenstrooms uitgebreide bestaande RMM schematisatie, en het 3D D-HYDRO RMM model. Deze paragraaf geeft een beknopte toelichting op beide modelconcepten, en hoe deze zijn ingezet in deze studie (paragraaf 3.2.3).

3.2.1 Eindimensionaal model

Voor de Rijn-Maasmonding is reeds een eindimensionaal (1D) Rijkswaterstaat model beschikbaar in de SOBEK3 software. Dit RMM model is echter niet geschikt voor deze studie omdat de effecten van zeespiegelstijging verder reiken dan de modelranden van dit model (HKV, 2021). Om deze reden is binnen het waterveiligheid spoor van het KP ZSS een SOBEK3 model van de RMM opgesteld welke in bovenstroomse richting is uitgebreid ten opzichte van het standaard SOBEK3 RMM model. In deze studie is gebruik gemaakt van dit naar bovenstrooms uitgebreide SOBEK3 RMM model. Dit 1D model heeft de volgende voordelen:

- Door deze ruimtelijke discretisatie in 1D werkt het model erg snel en kan een periode van enkele maanden in circa een half uur worden berekend.
- Door de manier van schematiseren kunnen zowel de bovenstroomse als benedenstroomse randvoorwaarden eenvoudig worden opgesteld en aangepast.

Het eindimensionale SOBEK3 RMM model brengt de volgende nadelen met zich mee:

- Doordat de discretisatie in 1D worden complexe driedimensionale zoutverspreidingsprocessen benaderd met behulp van dispersietermen. Kalibratie van het model met metingen in het beoogde toepassingsbereik is nodig voor een betrouwbare dispersieformulering.
- Op basis van eerdere studies is gebleken dat het model niet tot beperkt geschikt is om uitspraken te doen over exacte chlorideconcentraties of overschrijdingsduren (Deltares, 2018).

Effectieve domein 1D

De zoutverspreidingsmechanismen worden onderverdeeld in advection (stromingsgedreven) en dispersieve (mengings-) processen. Het advies is om het 1D model met name in te zetten om een globaal beeld te krijgen van de zoutverspreiding in de takken van de Rijn- Maasmonding waar advection processen dominant zijn (Deltares, 2019). Het SOBEK3 RMM model is in staat om verziltingsgebeurtenissen te reproduceren aan de noordrand. Hierbij geeft het model gemiddeld genomen een onderschatting van de mate van verzilting (Deltares, 2019).

3.2.2 Driedimensionaal model

Het 3 dimensionale (3D) RMM model is opgesteld met als doel om verwachtingen te geven van de verzilting in de RMM onder verschillende omstandigheden (Deltares, 2022a). Dit sluit goed aan bij het doel van de voorliggende studie. Dit 3D model heeft de volgende voordelen:

- Door het gebruik van 3 dimensies blijft het model dicht bij de fysieke processen. Hiermee worden de verschillende mechanismen die bijdragen aan het verspreiden van zout dicht bij de werkelijkheid benaderd. Daardoor is het model beter inzetbaar voor vraagstukken buiten het bekende (bemeten) domein dan het 1D model.
- In een eerder onderzoek is met behulp van een modelberekening een periode uit 2018 gemodelleerd. Met deze simulatie is aangetoond dat het 3D D-Hydro RMM model gemeten verziltingsituatie in de hoofdtakken van de RMM bij lage rivierafvoeren goed

simuleert (Deltares, 2022a). Hierbij zijn voor de HIJ twee kanttekeningen te plaatsen zoals toegelicht in onderstaand kader.

Validatierapport 3D RMM model

Eén van de beoogde toepassingen van het 3D RMM model is om de zoutindringing op de Hollandse IJssel te bepalen bij verzilting van de monding en bij de inzet van maatregelen om verzilting tegen te gaan. Uit het validatierapport van het model blijkt dat het tweedelige karakter van zoutverspreiding op de Hollandse IJssel nog lastig is om de modelleren (Deltares, 2022a). In de Hollandse IJssel treedt zogenoemde directe en indirecte verzilting op (ofwel advectief/dispersief).

- Op basis van de vergelijking tussen metingen en berekening in de validatie wordt geconcludeerd dat het model toepasbaar is voor het bepalen van effecten van ingrepen in het systeem op directe verzilting, zoals veranderingen in de forcering van het systeem, bijvoorbeeld door zeespiegelstijging en/of verandering van afvoeren als gevolg van klimaatverandering. Kanttekening hierbij is dat de berekende chlorideconcentraties in de monding van de HIJ enige onderschatting geven ten opzichte van de metingen (systematische afwijking van 100 mg/l, en 500 mg/l voor piek chlorideconcentraties).
- Voor het "indirecte" verziltingdomein op de Hollandse IJssel wordt geconstateerd dat het 3D RMM model de metingen niet voldoende nauwkeurig reproduceert. Het model onderschat de mate waarmee zout stroomopwaarts de HIJ op trekt. Wat de oorzaak is van deze afwijking, en daarmee wat de bruikbaarheid is voor andere toepassingen, is niet vastgesteld.

Het gebruik van een 3D schematisatie brengt ook enkele nadelen met zich mee:

- Vanwege de nauwkeurige schematisatie is het model rekentechnisch zwaar. Hierdoor heeft een periode van 4 weken circa 7 dagen rekentijd.
- De zee-randvoorwaarden beslaan een grote afstand en zijn complex. Het is daarom een relatief grote modelleerinspanning om veranderingen aan te brengen aan de benedenstroomse randvoorwaarden.
- Ook al benadert het model de werkelijkheid in 3 dimensies, er is alsnog een ruimtelijke discretisatie in deze drie dimensies. Door deze discretisatie worden de (zout)processen die op een (kleinere) schaal plaatsvinden dan de discretisatie samengevat in dispersietermen.

3.2.3 Gebruik in deze studie

Het doel in deze studie is tweedelig (paragraaf 1.2).

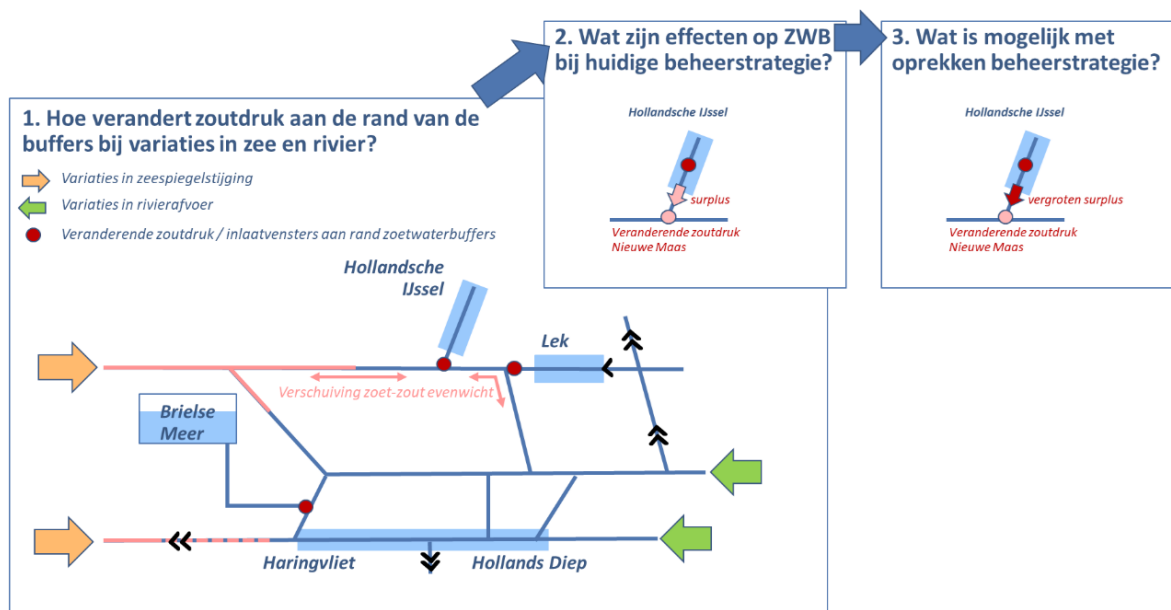
- In het eerste deel van deze studie wordt in beeld gebracht hoe de zoet-zoutovergang in de bestaande modelinstrumentaria reageert op variaties in randvoorwaarden. Hierbij wordt zowel het 1D als het 3D model gebruikt.
- In het tweede deel van de studie worden de waterstaatkundige effecten op de zoetwaterbuffers en -zones geëvalueerd. Voor dit doel is uiteindelijk en na een uitgebreide vergelijking 1D-3D primair het 3D D-HYDRO RMM model ingezet. Voor het in een aantal grote stappen verkennen van het speelveld aan effecten, te verwachten door variaties in zeespiegelstijging en rivierafvoer, is de langere rekentijd van 3D in deze studie geen belemmering. Daarnaast is meer vertrouwen in de resultaten van het 3D model voor analyses buiten het bekende (te kalibreren) domein, vanwege het explicieter modelleren van de belangrijkste fysische processen. Alleen voor de referentievariant (*geen zeespiegelstijging*) zijn de resultaten van het 1D model gebruikt.

3.3 Aanpak analyses

3.3.1 Getrapte analyse zoetwaterbuffers en -zones

In lijn met de essentie van de systeemwerking van de zoetwaterbuffers en -zones in de Rijn-Maasmonding (paragraaf 2.3), wordt een getrapte aanpak gehanteerd voor inzicht in de waterstaatkundige effecten (Figuur 4).

- Stap 1 - veranderingen in de zoutdruk aan de rand van de buffers en zones door variaties in zeespiegelstijging en rivierafvoer.**
 Hiertoe wordt met de afvoer- en ZSS-varianten (Tabel 1) zoals toegelicht in de volgende paragraaf het speelveld aan mogelijke varianten verkend. Hieruit volgt bij welke varianten de 'rand' (monding/inlaat) van de buffers en zones verzilt raakt en deze actief moet worden ingesteld (aanvoersurplus naar bovenloop inzetten), evenals de hoogte van de chlorideconcentraties. Beide zijn input voor stap 2 - de doorvertaling naar de effecten op de zoetwaterzones.
- Stap 2 - de effecten op de zoetwaterzones bij de huidige beheerstrategie**
 De varianten waarbij verzilting optreedt aan de rand van de zones (o.b.v. stap 1) zijn de basis voor de analyse van de huidige beheerstrategie. In deze analyse wordt het aanvoersurplus naar de bovenloop van de zoetwaterzones gevarieerd. Hieruit volgt een beeld van de effecten van variaties in zoutdruk aan de rand van de zoetwaterzones HIJ en Lek op de chlorideconcentraties in de zones.
- Stap 3 - de mogelijkheden voor het oprekken van de beheerstrategie**
 Voor een deel van de in stap 2 doorgerekende varianten zal de huidige beheerstrategie afdoende zijn om de zoetwaterzones HIJ en Lek zoet te houden. Daar waar de grotere zoutdruk in de monding van deze zoetwaterzones bij de huidige beheerstrategie zorgt voor geleidelijk toenemende chlorideconcentraties in de zoetwaterzones (aanname: onvoldoende om dispersieve verzilting tegen te gaan), is in stap 3 een gevoeligheidsanalyse gedaan met een groter aanvoersurplus naar de zoetwaterzones.



Figuur 4. Getrapte aanpak voor de analyse van de waterstaatkundige effecten op de zoetwaterbuffers en -zones.

3.3.2 Keuze varianten

De volledige bandbreedte aan **zeespiegelstijging- en rivierafvoervariaties** voor deze studie is weergegeven in Tabel 1. Aangezien de rekentijd van het 3D model een limiterende factor is, wordt slechts een deel van de varianten doorgerekend. Hierbij is in ogenschouw genomen dat de combinatie aan varianten zowel de gevoeligheid voor zeespiegelstijging als voor rivierafvoer laat zien. De geselecteerde varianten die met het 3D model zijn

doorgerekend, staan aangegeven in Tabel 1. Deze varianten worden ook met het 1D model doorgerekend voor de analyse van de gevoeligheden van het zoet-zout evenwicht in beide modelinstrumentaria (vragen paragraaf 1.2.1). Daarnaast wordt ook de variant zonder zeespiegelstijging doorgerekend met 1D om als referentie te dienen voor de analyse naar de waterstaatkundige effecten op de zoetwaterbuffers en -zones (vragen paragraaf 1.2.2).

Tabel 1. Gedefinieerde varianten en met welke modelinstrumentaria de geselecteerde varianten zijn gesimuleerd.

| Debiet Lobith/ ZSS | 500 m ³ /s | 1000 m ³ /s | 1500 m ³ /s | 2000 m ³ /s |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0 m | 1D | 1D | 1D | 1D |
| 0.5 m | | | | |
| 1 m | 1D/3D | 1D/3D | 1D/3D | 1D/3D |
| 2 m | | | | |
| 3 m | 1D/3D | 1D/3D | 1D/3D | 1D/3D |
| 5 m | | | | |

Effect van variaties in regionale watervraag

Naast zeespiegelstijging en afvoer via de NWW, speelt de watervraag een rol in dit vraagstuk, en wel op twee manieren: (1) de grootte van de watervraag bepaalt mede (in combinatie met waterverdelingskeuzes) hoeveel Bovenrijnafvoer in de NWW terecht komt. De variaties in watervraag zijn geen onderdeel van voorliggend rapport, maar uit het Bovenregionale spoor (Arcadis/Hydrologic, 2023e) volgt wel welke bandbreedte aan NWW afvoeren mogelijk zijn bij een Lobith afvoer. En (2) de grootte van de watervraag vanuit de zoetwaterbuffers en -zones bepaalt de waterbalans en daarmee ook de houdbaarheid van de buffers en zones. Dit is een vervolgstap op deze studie. Voor de HIJ en Lek (open verbinding met de rest van het hoofdwatersysteem) heeft het aanvoersurplus (de resultante van aanvoer minus onttrekkingen) directe invloed op de mate van verzilting van deze 'doodlopende' riviertakken. Wat een dergelijk aanvoersurplus (watervraag om zoetwaterzone in stand te houden) in combinatie met verschillende watervraagvarianten vraagt van de (via regionale wateren aan te voeren) toevoer naar de buffer/zone is onderdeel van het vervolg op voorliggende studie.

Voor de varianten waarbij (in analysestap 1, Figuur 4) verzilting optreedt in de monding van de HIJ en Lek, wordt in analysestap 2 nog met **subvarianten gerekend waarbij wordt gevarieerd in het zoetwateraanvoersurplus** (als resultante van aanvoer naar de bovenloop van de zoetwaterzones minus watervragen ook een primaire variabele voor deze zoetwaterzones). Gegeven de onzekerheden in de modelinstrumentaria zijn deze subvarianten bedoeld als gevoeligheidsanalyses om een beeld te krijgen bij de gevoeligheid van de chlorideconcentraties in de zoetwaterzones op een variatie in het surplus. Zowel het 1D- als het 3D-modelinstrumentarium is niet geschikt om exact het benodigde surplus te bepalen.

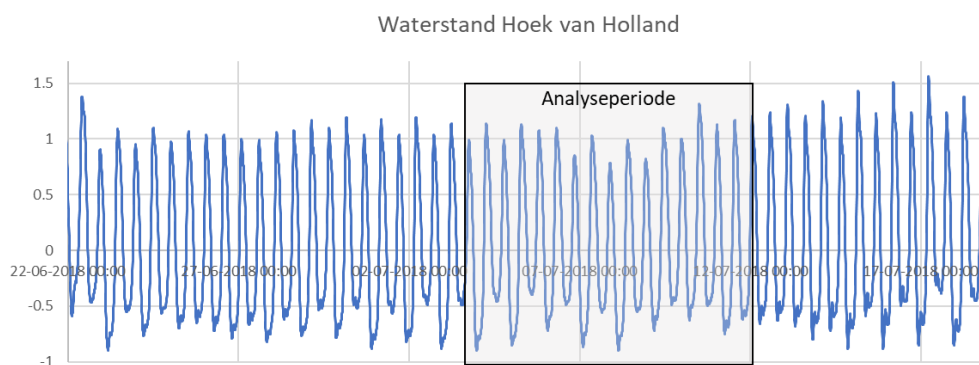
In de basis varianten (Tabel 1) wordt gerekend met een aanvoersurplus op de HIJ zoetwaterzone van 2 m³/s in lijn met de huidige beheerstrategie. Voor de gevoeligheidsberekening wordt gerekend met een surplus van 10 m³/s op de zoetwaterzone HIJ. Voor de gevoeligheidsanalyse is een relatief grote stap gekozen, welke met de huidige infrastructuur en afspraken zeker niet mogelijk is. Dit sluit aan bij de uitgangspunten van de zoetwater systeemverkenningen dat huidige beperkingen van de infrastructuur worden losgelaten. Een surplus van deze omvang zou echter nog steeds kleiner zijn dan de watervraag aan de HIJ.

3.4 Randvoorwaarden en uitgangspunten

Deze paragraaf beschrijft de randvoorwaarden en uitgangspunten van de modelstudie. In lijn met de uitgangspunten voor de systeemverkenningen zoetwater, wordt ook in de RMM studie gewerkt met constante waarden van de vrijheidsgraden (dus ook de randvoorwaarden), om zo verschillende combinaties vrijheidsgraden te kunnen exploreren (paragraaf 3.1).

Zeerandvoorwaarden

Voor het 3D model zijn de randvoorwaarden op zee complex. De modelrand op zee beslaat een grote afstand waarover de waterstand varieert in ruimte en tijd. Daarnaast wordt op deze rand ook een verticaal zoutprofiel gedefinieerd. In voorgaande berekeningen met het 3D D-Hydro RMM model zijn de randvoorwaarden op zee gegenereerd op basis van het werkelijk opgetreden getij met behulp van het 3D DCSM-FM model (Deltares, 2021a). In de voorliggende studie is ervoor gekozen gebruik te maken van de eerder opgestelde randvoorwaarden. Deze randvoorwaarde is gereduceerd tot de periode 14 juni 2018 tot 12 juli 2018⁵ (Figuur 5). Deze periode is geselecteerd vanwege het uitgangspunt om deze eerste verkenning te doen met een periode zonder grote windopzet.



Figuur 5. Waterstandsrandvoorwaarde Hoek van Holland.

Het modelleren van zeespiegelstijging is gedaan door alle waterbodemhoogte punten in het model die lager liggen dan 0 mNAP met 1m te verlagen. Dezelfde aanpak is gehanteerd voor een zeespiegelstijging van 3m. De fysica van zoutverspreidingsprocessen blijft hiermee gehandhaafd zoals die is. De aanname is hierbij wel dat alle buitendijkse gebieden boven NAP meestijgen met ZSS. Het modelleren van zeespiegelstijging door het verlagen van de waterbodem is gedaan, omdat het verhogen van de waterstand erin zou resulteren dat het water over de kades van de Rotterdamse haven stroomt. Het model bevat alle buitendijkse gebieden en het aanpassen van de bodemligging in het hele model zou qua inspanning heel ingrijpend zijn geweest.

De zeerandvoorwaarden in het 1D model zijn opgesteld door de waterstandsmetingen bij Hoek van Holland van 2018 op te leggen op de rand van het model. Op deze rand is een zoutgehalte gehanteerd van 31 psu (chloridegehalte van circa 17.000mg/l). Zeespiegelstijging is gemodelleerd door de waterstandsreeks te verhogen met 1 en 3m.

Met de manier waarop de zeerandvoorwaarden in de modellen zijn opgesteld, wordt de aanname gedaan dat in het geval van zeespiegelstijging de eigenschappen van het getij

⁵ De data van 2018 zijn gebruikt, omdat hiervoor de randvoorwaarden voor het 3D model beschikbaar waren, en het gaat om een periode zonder substantiële windopzet. Deze periode is niet gekozen om de droogteperiode van 2018 te simuleren. Uitgangspunt van deze studie is namelijk dat met constante randvoorwaarden (behalve de getij fluctuaties) wordt gerekend. Zo worden voor de bovenrand ook verschillende constante afvoervarianten gehanteerd.

gelijk blijven. Hierbij verandert alleen de hoogte van de waterstand ten opzicht van het land en blijven de amplitude en asymmetrie van het getij gelijk.

Rivierrandvoorwaarden

Voor de rivierrandvoorwaarden zijn de Lobith afvoeren van 500, 1000, 1500 en 2000 m³/s als uitgangspunt gehanteerd. Deze Lobith afvoeren zijn vertaald naar de bovenstroomse randen van het model zoals weergegeven in Tabel 2, volgens lineaire inter-/extrapolatie van de afvoerverdeling in lijn met de eerdere KPZSS studie naar de RMM (HKV, 2021). Hierbij is de Lobith afvoer gerelateerd aan de afvoer op de Maas gebaseerd op de fysische 1-op-1 relatie. De waarden die in Tabel 2 zijn gegeven zijn als stationaire randvoorwaarden op het 1D model opgelegd.

Tabel 2. Vertaling Lobith afvoeren (m³/s) naar bovenstroomse modelranden (HKV, 2021).

| Lobith | Waal | Nederrijn/Lek | Maas |
|--------|------|---------------|------|
| 500 | 406 | 0 | 43 |
| 1000 | 780 | 26 | 103 |
| 1500 | 1113 | 127 | 162 |
| 2000 | 1445 | 232 | 222 |

Het modeldomein van het 3D RMM model reikt tot minder ver bovenstrooms dan het 1D model. De rivierrandvoorwaarden voor het 3D model (debieten bij Hagestein, Tiel en Lith) zijn afgeleid uit de output van het 1D model.

Bij de rivierrandvoorwaarden worden ook een chlorideconcentratie gedefinieerd. Deze chlorideconcentratie is afhankelijk van de Lobith afvoer en de waardes worden in Tabel 3 weergegeven.

Tabel 3. Chlorideconcentratie opgelegd op de rivierrandvoorwaarden afhankelijk van de Lobith afvoer (Bonte, 2009).

| Lobith | Chloridewaarde rivierafvoer [mg/l] |
|--------|------------------------------------|
| 500 | 150 |
| 1000 | 100 |
| 1500 | 85 |
| 2000 | 75 |

De Rijn-Maasmonding: de NWW afvoer centraal

Voor de presentatie van de RMM resultaten is níet de Lobith afvoer gebruikt voor de rivierafvoer, maar is **de Nieuwe Waterweg (NWW) afvoer centraal gesteld**. Dit is de bepalende variabele voor hoe ver de zee invloed reikt in de Rijn-Maasmonding (paragraaf 1.2.2). Aangezien de Lobith afvoer wel meer tot de verbeelding spreekt dan de NWW afvoer, is bij de NWW afvoerwaarden een bandbreedte aan Lobith afvoer gegeven, afhankelijk van de waterverdelingskeuzes en watervragen bovenstrooms.

Aan het einde van deze studie zijn de (berekende) NWW debieten **via een iteratie met het bovenregionale spoor⁶ gekoppeld aan mogelijke Lobith afvoeren**. Tabel 4 geeft deze koppeling weer. De Haringvlietsluizen staan in alle afvoervarianten dicht, een uitgangspunt dat is toegelicht in onderstaande paragraaf 'kunstwerken'. Volgens het

⁶ Uit de bovenregionale KPZSS analyse voor zoetwater volgt per Lobith afvoervariant (500-1000-1500-2000 m³/s) een bandbreedte aan mogelijke NWW debieten, vanwege een lage, midden of hoge watervraag (subvarianten). De NWW debieten uit de RMM modelstudie zijn via interpolatie van de bovenregionale resultaten gekoppeld aan een bandbreedte van Lobith debieten.

Lozings Programma Haringvlietsluizen (LPH'84)⁷ staan de Haringvlietsluizen deels open boven 1100 m³/s Lobith, waardoor bij de Lobith afvoeren boven 1100 m³/s minder water naar de NWW wordt gestuurd dan volgens de uitgangspunten van deze studie. Tot 1100 m³/s Lobith is er geen verschil; rond 1500 m³/s Lobith gaat het om 60-70 m³/s minder via de NWW, en voor 2000 m³/s Lobith gaat het richting de 400 m³/s minder via de NWW dan aangegeven in Tabel 4.

Tabel 4. Een inschatting van de mogelijke Lobith afvoeren (gebaseerd op bovenregionale spoor (Arcadis/Hydrologic, 2023e)), waarbij de genoemde NWW afvoeren kunnen voorkomen.

| Nieuwe Waterweg afvoer | Bandbreedte Lobith afvoeren bij gesloten Haringvlietsluizen |
|------------------------|---|
| 400 m ³ /s | 580 - 730 m ³ /s |
| 900 m ³ /s | 1100 - 1300 m ³ /s |
| 1400 m ³ /s | 1600 - 1800 m ³ /s |
| 1900 m ³ /s | 2100 - 2300 m ³ /s (grove inschatting) |

Kunstwerken

De **Haringvlietsluizen** zijn een belangrijke stuurknop voor de afvoerverdeling in de Rijn-Maasmonding. De Haringvlietsluizen gaan bij lagere rivierafvoeren steeds verder dicht om een steeds groter aandeel van de rivierafvoer in de Rijn-Maasmonding via de NWW af te voeren. Daarmee wordt zoutindringing via de NWW zoveel mogelijk beperkt. Vanuit dat uitgangspunt zijn de Haringvlietsluizen in voorliggende studie in alle afvoervarianten dicht gezet (in de huidige situatie pas bij Lobith afvoeren beneden 1100 m³/s). Hoe reëel dit uitgangspunt is, zal met name afhangen van de watervraag bij de Haringvlietsluizen om te kunnen blijven kieren. Ten opzichte van het Lozings Programma Haringvlietsluizen (LPH'84) heeft dit uitgangspunt vooral effect op de varianten met 2000 m³/s Lobithafvoer (bij LPH'84 Haringvlietsluizen nog niet dicht, waardoor minder via NWW) en in mindere mate op de 1500 m³/s Lobith varianten. Dit uitgangspunt heeft geen effect op de koppeling van modelresultaten aan NWW debieten, wel op de koppeling van NWW debieten met Lobith debieten boven 1100 m³/s.

Een andere belangrijke stuurknop in het hoofdwatersysteem van de RMM is **stuw Hagestein**. In periodes van lage rivierafvoeren gaat de stuw steeds verder dicht om de bovenstroomse waterstand (en daarmee vaardiepte) op te stuwen. Bij (dreigende) verzilting van de monding van de Lek, kan stuw Hagestein worden ingezet om de bovenloop van de Lek zoet te houden en te voorzien in de watervragen van uit die bovenloop. In de modelberekeningen met 1 m zeespiegelstijging is stuw Hagestein ingesteld volgens de huidige beheerstrategie: een aanvoersurplus van 20 m³/s. Uit modelberekeningen volgt dat de functionaliteit van stuw Hagestein in het geding komt rond de 2 meter zeespiegelstijging: er is dan nauwelijks of zelfs negatief verval over de stuw. Om deze reden is ervoor gekozen om in de modelberekeningen met 3 m zeespiegelstijging stuw Hagestein uit het model te halen (paragraaf 4.2.2). Er ontstaat dan een open verbinding tussen de benedenstroomse Lek, het ARK-Betuwapand en de Waal, waardoor bij 3 m ZSS meer water over de Lek gaat dan het aanvoersurplus van 20 m³/s bij 1 m ZSS. Gemiddeld gaat het om ongeveer 70 m³/s bij de NWW afvoervariant van 400 m³/s, tot 420 m³/s bij de NWW afvoervariant van 1900 m³/s.

⁷ Dit bedienprogramma was erop gericht om gedurende eb overtollig rivierwater af te voeren naar zee. Bij invoering van het Kierbesluit (2018) is vanwege natuurdoelen de mogelijkheid ontstaan om de sluisen ook bij vloed te openen. Het nieuwe operationeel programma voor de Haringvlietsluizen moet nog worden vastgesteld met een periode van Lerend Implementeren.

3.5 Post-processing

De 3D modelberekeningen hebben een rekenperiode van vier weken per variant met relatief gemiddeld getij. Voor iedere variant worden de eerste 3 weken beschouwd als inreken tijd. De postprocessing en interpretatie van de resultaten wordt gebaseerd op de resultaten uit de laatste week (14 getijden) (Figuur 8). Voor de toets van de modelinstrumentaria (paragraaf 1.2.1) zijn transecten van de chlorideconcentraties over de noord- en zuidrand gemaakt. Voor de waterstaatkundige effecten op de zoetwaterbuffers en zones (paragraaf 1.2.2) zijn staafdiagrammen aan de rand van de buffers/zones gemaakt en transecten op voor de bovenloop van de HIJ en Lek.

3.4.1 Transecten chlorideconcentraties

Een transect figuur visualiseert het verloop van de chlorideconcentraties over de noordrand en zuidrand van de Rijn-Maasmonding. Op deze manier kan de zoutindringing van verschillende scenario's zo objectief mogelijk worden vergeleken, zonder dat bijvoorbeeld keuzes worden gemaakt in grenswaardes in chloridegehalte voor bijvoorbeeld indringingslengtes of overschrijdingsduren. Deze figuren worden gebruikt voor de volgende analyses:

- Het (kwalitatief) vergelijken van het verloop van de chlorideconcentraties tussen 1D en 3D.
- Het in beeld brengen van de relatieve verschuiving van de chlorideconcentraties bij variaties in de zee- of rivier randvoorwaarden.
- Het in beeld brengen van de doorwerking van de zoutlast in de monding van de Lek en HIJ op de zoetwaterzones.

Voor de 1D modelresultaten zijn de figuren gemaakt door op elk observatiepunt op het transect de minimum, maximum en gemiddelde chlorideconcentratie van de laatste week van de 3D simulatie te visualiseren. Voor de 3D resultaten is dezelfde aanpak gehanteerd waarbij ook is gemiddeld over de diepte. De transecten van de noordrand en de zuidrand van de RMM waarover deze figuren zijn gemaakt zijn respectievelijk weergegeven in Figuur 6 en Figuur 7.



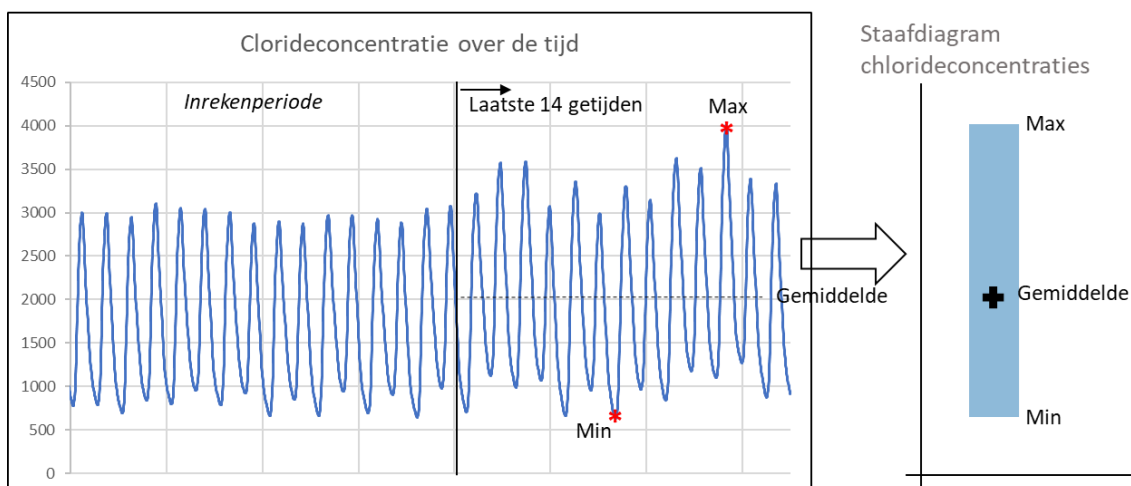
Figuur 6. Ligging transect noordrand RMM.



Figuur 7. Ligging transect zuidrand RMM.

3.4.2 Staafdiagrammen

Staafdiagrammen visualiseren de chlorideconcentraties voor verschillende varianten op een specifieke locatie. Deze diagrammen geven inzicht in de veranderende zoutdruk aan de rand van de zoetwaterbuffers en zones. Het gaat hier om de resultaten van de 3D berekeningen (paragraaf 3.2.3). Evenals bij de transect figuren worden de chlorideconcentraties van de laatste week (14 getijden) van de simulatie verwerkt. Deze resultaten van de 3D modellering worden gemiddeld over de diepte. Over deze dieptegemiddelde tijdserie wordt de minimum maximum en gemiddelde chlorideconcentratie bepaald (Figuur 8). In deze staafdiagrammen zijn ter referentie ook de resultaten van 0 m zeespiegelstijging varianten toegevoegd vanuit de 1D berekeningen.



Figuur 8. Uit de tijdreeks van berekende chlorideconcentraties wordt uit de laatste 14 getijden van de simulatie de minimale, maximale en gemiddelde chlorideconcentratie bepaald voor de staafdiagrammen in dit rapport.



4

**Resultaten
modelschematisatie**

4. Resultaten modelschematisatie

4.1 Toets modelinstrumentaria

Naast de analyses naar de waterstaatkundige effecten op de zoetwaterbuffers en -zones, zijn voor de Rijn-Maasmonding allereerst gevoeligheidsanalyses gedaan met de reeds beschikbare modelinstrumentaria. Het doel van deze analyses is om zowel voor 1D als voor 3D inzichtelijk te maken: *hoe gevoelig is het zoet-zout evenwicht in de Rijn-Maasmonding voor variaties in zeespiegelstijging en rivierafvoer?* De bestaande modelinstrumentaria zijn een 1D model (SOBEK3 RMM bovenstrooms uitgebreid) en een 3D model (D-HYDRO RMM) zoals toegelicht in paragraaf 3.2.

Dit is beschreven in paragraaf 4.1.2. In paragraaf 4.1.1 is eerst een *beknopte (kwalitatieve) typering gegeven van de verschillen die 1D en 3D* in het ruimtelijke patroon (transect) laten zien.

Aanpak toets modelinstrumentaria

Dit is nadrukkelijk geen gedetailleerde modelstudie, maar een verkennende (gevoeligheids)analyse naar de verschillen tussen 1D en 3D in reactie van de zoet-zoutovergang op variaties in ZSS en rivierafvoer. Hierbij wordt gekeken naar het traject van de monding van de NWW tot aan de randen van de zoetwaterbuffers/-zones: een ruimtelijk beeld van de verschuivingen in de zoet-zout overgang (juist ook voor de hogere chlorideconcentraties) geeft experts een beter beeld van het modelgedrag, wat belangrijk is bij toepassing buiten het bekende domein. Vanaf paragraaf 4.2 wordt juist ingezoomd op effecten aan de randen van de zoetwaterbuffers en -zones, veelal het domein van de lagere chlorideconcentraties.

Deze analyse is gericht op het identificeren van verschillen tussen de modelinstrumentaria. In hoeverre de verschillen relevant zijn is erg afhankelijk van de locatie en vraagstuk waarvoor de modellen worden ingezet. Deze analyse geeft dan ook geen eenduidig eindoordeel. Daar waar mogelijk met expertkennis is een hypothese gegeven voor de oorzaak van de verschillen. Eventuele verdiepende, modelvergelijkende analyses, vallen buiten de scope van deze studie.

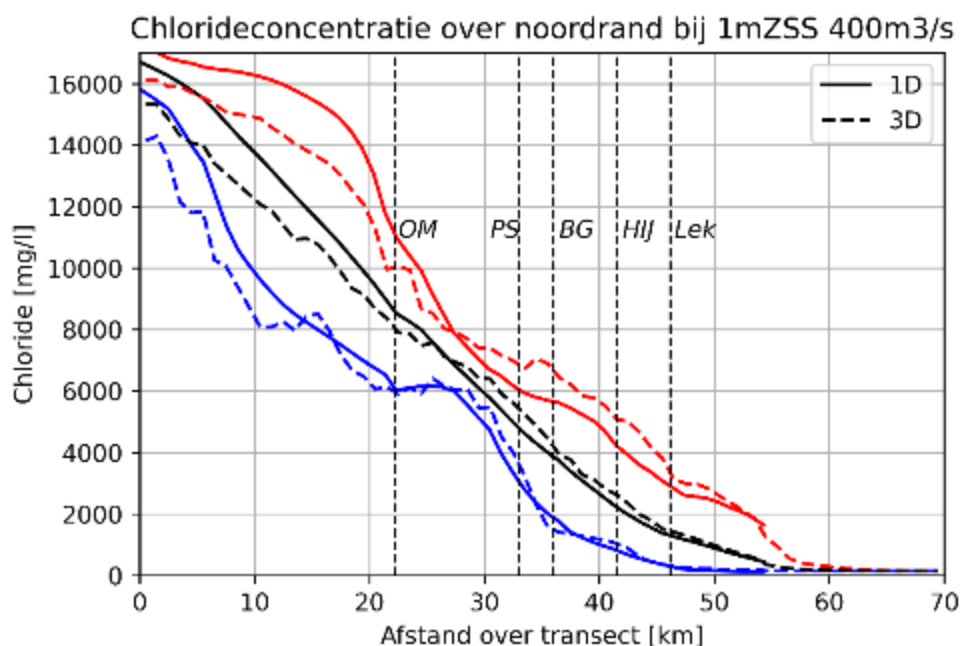
4.1.1 Kwalitatieve beschrijving chloridepatronen 1D en 3D

De zoet-zout overgang varieert in beide modellen als functie van ZSS en rivierafvoer. In deze paragraaf zijn enkele algemene constateringingen gegeven over de vergelijking in ruimtelijke chloridepatronen tussen 1D en 3D:

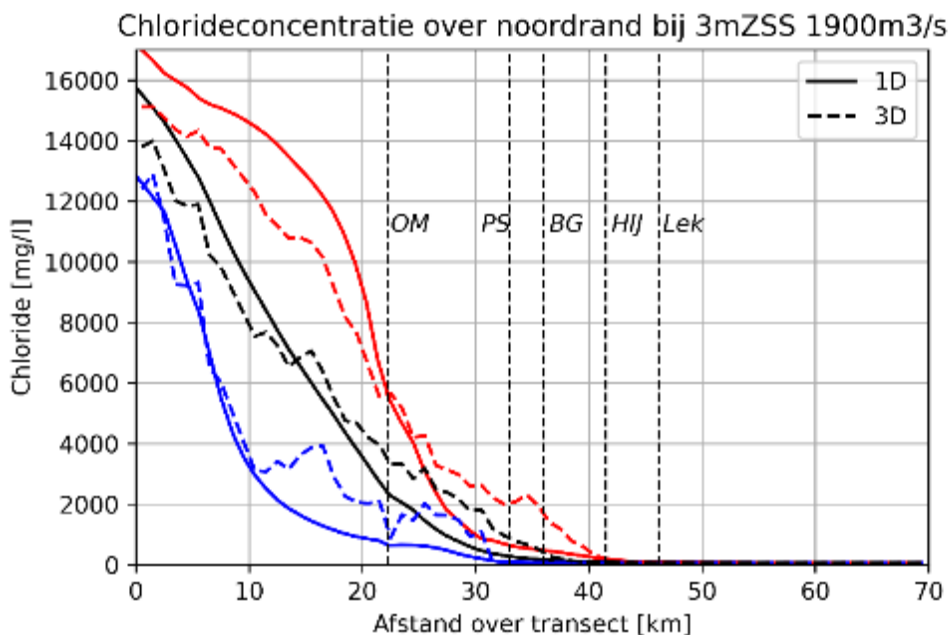
- Het 3D modeldomein reikt tot verder op zee en de chlorideconcentraties in de monding van de NWW zijn onderdeel van de berekeningen. Hierdoor wordt de dynamiek en reactie op rivierafvoer beter meegenomen, waar dit in het 1D model vereenvoudigd gebeurt. In het 1D model is de monding van de NWW de rand van het model (beschrijving zeerandvoorwaarde in paragraaf 3.4) De *chlorideconcentraties in de monding van de NWW* zoals in deze studie opgelegd in het 1D model liggen hoger dan het 3D model (o.a. zichtbaar in figuur 6), en zouden vanuit het oogpunt van een eenduidigere vergelijking anders kunnen worden gekozen.
- Beide modellen geven de overgang van zout naar zoet weer (zie o.a. Figuur 10, Figuur 11 en Figuur 12, waarbij het gaat om de vergelijking tussen 1D en 3D (binnen een figuur), niet om de vergelijking tussen de figuren). De steilheid van de overgang varieert enigszins vergelijkbaar in beide modellen als functie van ZSS en rivierafvoer. Maar als er

in detail wordt gekeken laten beide modellen onderling grote verschillen zien, bijvoorbeeld waar veel havenbekkens aanwezig zijn. In hoeverre deze verschillen relevant zijn is erg afhankelijk van de locatie en vraagstuk waarvoor de modellen worden ingezet.

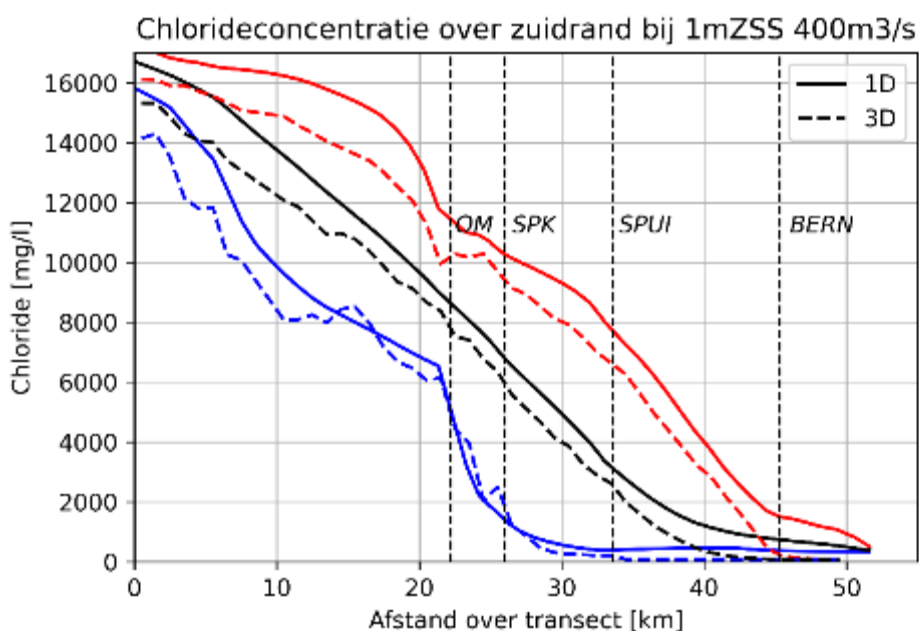
- Het 3D model simuleert *meer variaties in het ruimtelijk verloop* van de minimale, gemiddelde en maximale chlorideconcentraties ten opzichte van het 1D model (voorbeeldfiguren Figuur 9 t/m Figuur 12). Dit kan worden verklaard door het grotere detailniveau van het 3D model (fijnere ruimtelijke discretisatie). Door deze fijnere discretisatie worden variaties in de bathymetrie zoals de havenbekkens gedetailleerder gemodelleerd.



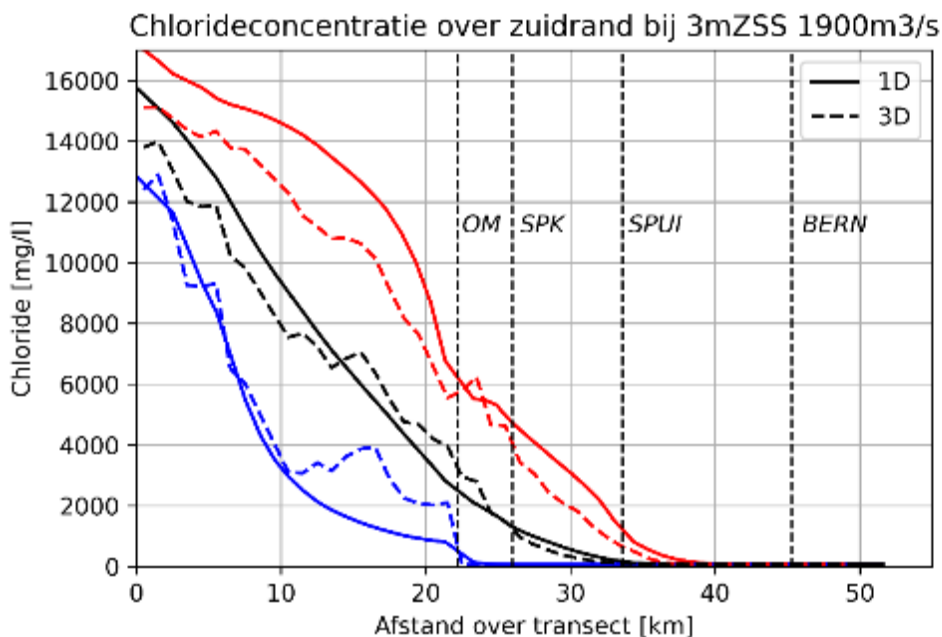
Figuur 9. Verloop chlorideconcentraties over de noordrand (Figuur 6) van de Rijn-Maasmonding bij 1 m ZSS en 400 m³/s NWW afvoer. De kleuren geven de minimale (blauw), gemiddelde (zwart) en maximale (rood) chlorideconcentraties weer. Voor de oriëntatie is in het transect de ligging weergegeven van het splitsingspunt met de Oude Maas (OM), Parksluizen (PS), Boerengat (BG), de monding van de HIJ (HIJ) en de Lek (Lek).



Figuur 10. Verloop chlorideconcentraties over de noordrand (Figuur 6) van de Rijn-Maasmonding bij 3 m ZSS en 1900 m³/s NWW afvoer. De kleuren geven de minimale (blauw), gemiddelde (zwart) en maximale (rood) chlorideconcentraties weer. Voor de oriëntatie is in het transect de ligging weergegeven van het splitsingspunt met de Oude Maas (OM), Parksluizen (PS), Boerengat (BG), de monding van de HIJ (HIJ) en de Lek (Lek).



Figuur 11. Verloop chlorideconcentraties over de zuidrand (Figuur 7) van de Rijn-Maasmonding bij 1 m ZSS en 400 m³/s NWW afvoer. De kleuren geven de minimale (blauw), gemiddelde (zwart) en maximale (rood) chlorideconcentraties weer. Voor de oriëntatie is in het transect de ligging weergegeven van het splitsingspunt met de Oude Maas (OM), Spijkenisse inlaat (SPK), de splitsing Oude Maas - Spui (Spui) en de Bernisse inlaat (BERN).



Figuur 12. Verloop chlorideconcentraties over de zuidrand (Figuur 7) van de Rijn-Maasmondung bij 3 m ZSS en 1900 m³/s NWW afvoer. De kleuren geven de minimale (blauw), gemiddelde (zwart) en maximale (rood) chlorideconcentraties weer. Voor de oriëntatie is in het transect de ligging weergegeven van het splitsingspunt met de Oude Maas (OM), Spijkenisse inlaat (SPK), de splitsing Oude Maas - Spui (Spui) en de Bernisse inlaat (BERN).

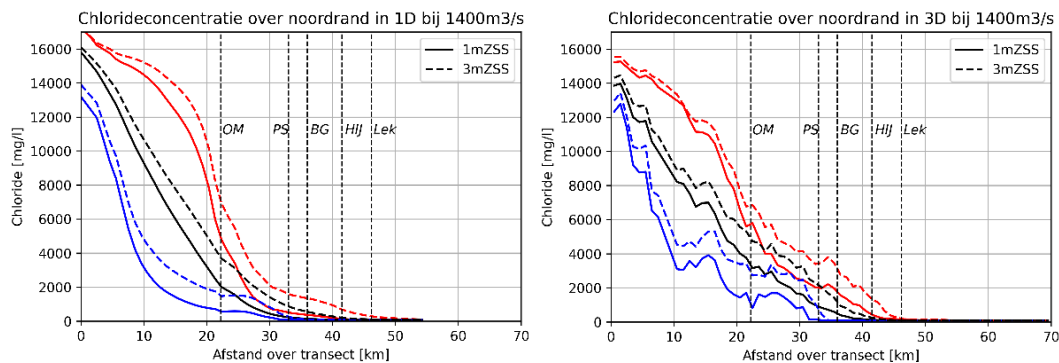
4.1.2 Vergelijking gevoeligheid voor variaties in zee en rivier randvoorwaarden

Op hoofdlijnen laten het 1D en 3D model een vergelijkbaar patroon zien. Dit geldt zowel voor de absolute vergelijking als voor de vergelijking op de gevoeligheid op variaties in zeespiegelstijging en rivierafvoer. Deze paragraaf beschrijft systematisch de gevoeligheden voor beide modellen op variaties in de randvoorwaarden. De resultaten zijn niet beschreven voor een specifieke chlorideconcentratie. Er is juist ('door de oogharen heen') naar de verschuiving over het gehele traject gekeken, waarbij bijvoorbeeld de gemiddelde of maximale verschuiving wordt genoemd. Opvallende uitschieters zijn apart benoemd. Specifieke aandacht voor de verschuivingen in de lage chlorideconcentraties volgt in paragraaf 4.2.

Noordrand - gevoeligheid voor zeespiegelstijging in 1D en 3D

Het 3D model laat voor de stap van 1 naar 3 m ZSS een verschuiving van de chlorideconcentraties zien tot 5-10 km (Figuur 13). Het 1D model laat gemiddeld eenzelfde gevoeligheid zien. Met als nuanceringen:

- Het 1D model geeft bij lagere afvoeren een wat grotere verschuiving en bij grotere afvoeren juist een wat kleinere verschuiving in de chlorideconcentraties.
- In het domein van de lagere chlorideconcentraties (~200 mg/l) schuiven de chlorideconcentraties in het 1D model door ZSS verder op.



Figuur 13. Voorbeeld transecten noordrand die voor 1D (links) en 3D (rechts) de gevoeligheid van chlorideconcentraties laten zien voor 1 naar 3 m ZSS.

Tabel 5. Samenvattende tabel die ordegrrootte de verschuiving van chlorideconcentraties aan de noordrand samenvat bij een zeespiegelstijging van 1 naar 3 meter.

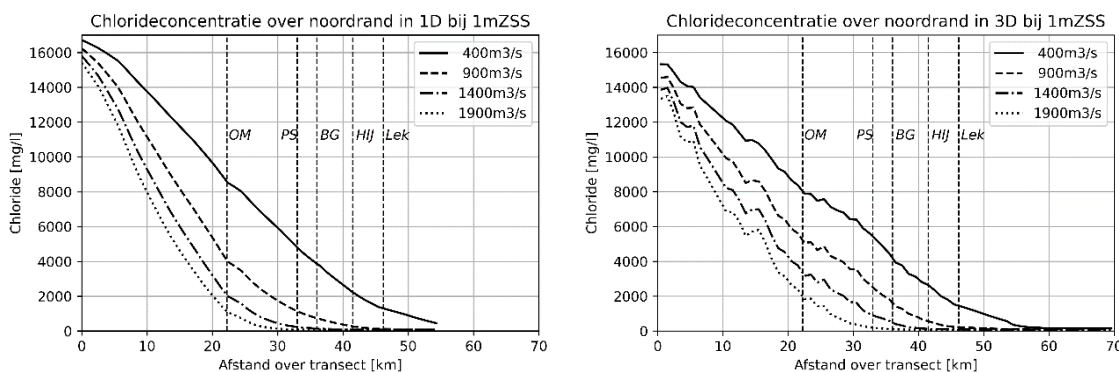
| NWW afvoervarianten | Max verschuivingen in chlorideconcentraties over transect noordrand RMM bij stap van 1 naar 3 m ZSS |
|--|---|
| 400 m ³ /s | 1D: tot 5 à 10 km 3D: tot 5 à 10 km |
| 900 m ³ /s | 1D: tot 5 à 10 km 3D: tot 5 à 10 km |
| 1400 m ³ /s (getoond in voorbeeldgrafieken) | 1D: tot 5 à 10 km 3D: tot 5 à 10 km |
| 1900 m ³ /s | 1D: tot ordegrrootte 5 km 3D: tot 5 à 10 km |

Noordrand - gevoeligheid voor rivierafvoer in 1D en 3D

Zowel het 1D als het 3D model laten (bij 1 en 3m ZSS) dezelfde plausible reactie zien op variaties in rivierafvoer: een stap van 500 m³/s in de NWW afvoer heeft een groter effect op de verschuiving van de chlorideconcentraties als de afvoer van 900 m³/s naar 400 m³/s gaat, dan wanneer de afvoer van 19000 m³/s naar 1400 m³/s gaat. Hierbij geeft het 1D model dezelfde ordegrrootte chlorideverschuiving als het 3D model (Figuur 14). Met als nuancering:

- Het 1D model geeft een grotere chlorideverschuiving dan het 3D model bij de afvoerverschuiving van 900 naar 400 m³/s.

De beschreven gevoeligheden voor variaties in rivierafvoer zijn vergelijkbaar voor 1 en 3 m ZSS.



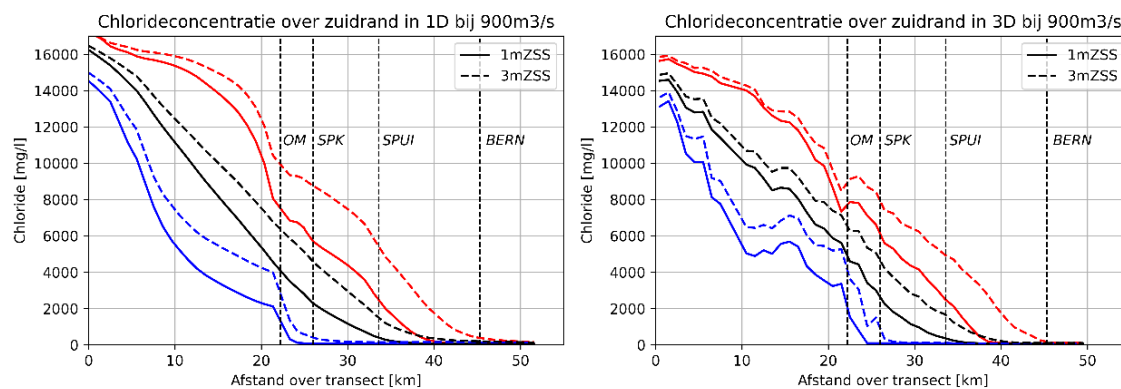
Figuur 14. Voorbeeld transecten die voor 1D (links) en 3D (rechts) de gevoeligheid van chlorideconcentraties laten zien voor stappen van 500 m³/s in NWW afvoer.

Tabel 6. Samenvattende tabel die ordegrootte de verschuiving van chlorideconcentraties aan de noordrand samenvat bij variaties in NWW afvoer.

| Variaties in NWW afvoer | Max verschuivingen in chlorideconcentraties over transect noordrand RMM door variaties NWW afvoer (bij 1 m ZSS) |
|--------------------------------|---|
| 400 -> 900 m ³ /s | 1D: tot ordegrootte 15 km 3D: tot 10 à 15 km |
| 900 ->1400 m ³ /s | 1D: tot 5 à 10 km 3D: tot 5 à 10 km |
| 1400 -> 1900 m ³ /s | 1D: tot ordegrootte 5 km 3D: tot ordegrootte 5 km |

Zuidrand - gevoeligheid voor zeespiegelstijging in 1D en 3D

Ook aan de zuidrand laten het 1D en 3D model over het algemeen eenzelfde verschuiving (3-5 km) in chlorideconcentraties zien bij de stap van 1 naar 3m ZSS (Figuur 15).



Figuur 15. Voorbeeld transecten zuidrand die voor 1D (links) en 3D (rechts) de gevoeligheid van chlorideconcentraties laten zien voor 1 naar 3 m ZSS.

Bovenstaande kent als uitzondering:

- De 500 m³/s afvoervariant laat in het 1D model een grote afwijking (3 keer zo grote verschuiving) zien ten opzichte van het 3D model (Tabel 7).

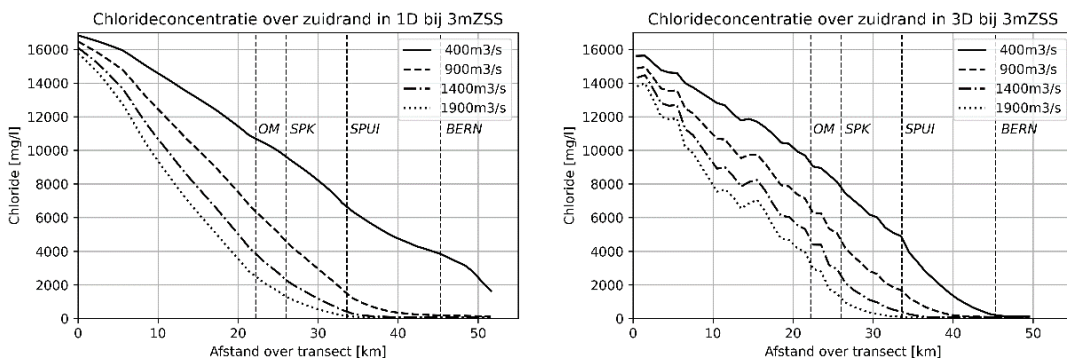
Tabel 7. Samenvattende tabel die ordegrootte de verschuiving van chlorideconcentraties aan de zuidrand samenvat bij een zeespiegelstijging van 1 naar 3 meter.

| NWW afvoer varianten | Verschuivingen chlorideconcentraties zuidrand RMM bij 1 --> 3m ZSS |
|---|--|
| 400 m ³ /s | 1D: tot ordegrootte 15 km 3D: tot ordegrootte 5 km |
| 900 m ³ /s (getoond in voorbeeldgrafieken) | 1D: tot ordegrootte 5 km 3D: tot ordegrootte 5 km |
| 1400 m ³ /s | 1D: tot ordegrootte 5 km 3D: tot ordegrootte 5 km |
| 1900 m ³ /s | 1D: tot ordegrootte 5 km 3D: tot ordegrootte 5 km |

Zuidrand - gevoeligheid voor rivierafvoer in 1D en 3D

Voor de afvoervariaties 2000-1500, 1500-1000 en 1000-500 laten de modellen een vergelijkbare gevoeligheid in chlorideconcentraties zien (Figuur 16), met een iets kleinere gevoeligheid bij de hogere rivierafvoeren.

Voor de afvoerstep van 1000 naar 500 m³/s laat het 1D model duidelijk een grotere gevoeligheid in chlorideconcentraties zien dan het 3D model (Tabel 8). Dit gebeurt zowel bij 1 m (1.5 keer zo groot) als bij 3 m (2.5 keer zo groot) zeespiegelstijging.



Figuur 16. Voorbeeld transecten zuidrand die voor 1D (links) en 3D (rechts) de gevoeligheid van chlorideconcentraties laten zien voor stappen van 500 m³/s in rivierafvoer.

Tabel 8. Samenvattende tabel die ordegrrootte de verschuiving van chlorideconcentraties aan de zuidrand samenvat bij variaties in rivierafvoer.

| Variaties in rivierafvoer | Verschuivingen chlorideconcentraties zuidrand RMM voor variaties rivierafvoer (bij 1 m ZSS) |
|--------------------------------|---|
| 400 -> 900 m ³ /s | 1D: tot 10 à 15 km (tot 15 à 20 km bij 3 m ZSS) 3D: tot 5 à 10 km |
| 900 ->1400 m ³ /s | 1D: tot ordegrrootte 5 km 3D: tot ordegrrootte 5 km |
| 1400 -> 1900 m ³ /s | 1D: tot ordegrrootte 5 km 3D: tot ordegrrootte 5 km |

4.2 Waterstaatkundige effecten zoetwaterbuffers en -zones

Deze paragraaf beschrijft de waterstaatkundige effecten van zeespiegelstijging en lage rivierafvoeren op de zoetwaterbuffers en -zones in de RMM. Zoals toegelicht in paragraaf 3.3 is de analyse opgebouwd aan de hand van drie stappen:

1. Hoe verandert de zoutdruk aan de rand van de zoetwaterbuffers en -zones door ZSS en lagere rivierafvoeren? Dit geeft bijvoorbeeld inzicht of door zeespiegelstijging de zoetwaterbuffer/-zone al bij veel hogere rivierafvoeren actief moet worden ingesteld. Dit zegt nog niets over de houdbaarheid van de strategie om de zoetwaterbuffer/zone zoet te houden.

2. Wat zijn de effecten op de zoetwaterzones HIJ en Lek bij de huidige beheerstrategie?

3. Wat is mogelijk met het oprekken van de huidige beheerstrategie?

Deze vragen zijn per zoetwaterbuffer/zone beschreven.

4.2.1 Zoetwaterzone Hollandsche IJssel

Effect ZSS en rivierafvoer op rand van de zoetwaterzone

- Door **1 m ZSS** is de verwachting dat de monding van de HIJ (Krimpen aan de IJssel) al bij hogere rivierafvoeren te maken krijgt met verzilting (Figuur 17), namelijk bij 900 à 1400 m³/s NWW (1200-1700 m³/s Lobith bij gemiddelde watervraag en geen windopzet). Zonder zeespiegelstijging (huidige situatie) raakt de monding van de HIJ verzilt onder de 1000-1200 m³/s Lobith.

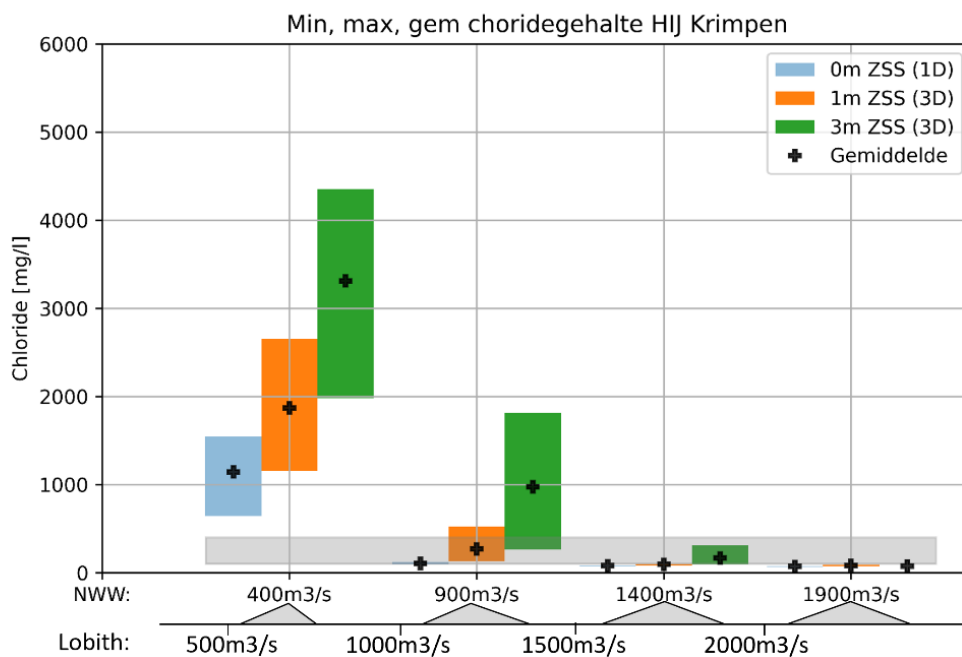
Grofweg blijven de chlorideconcentraties in de sommen met rivierdebieten boven de 1000 m³/s Lobith en zonder windopzet, naar verwachting onder de 1000 mg Cl/l met mogelijk nog relatief zoete vensters. Bij lagere afvoeren nemen de gemiddelde chlorideconcentraties met bijna een factor twee toe ten opzichte van de situatie zonder ZSS: bij 400 m³/s NWW (rond 600 m³/s Lobith) en 1 m ZSS komt de gemiddelde chlorideconcentratie rond 2000 mg Cl/l in plaats van rond 1000 mg Cl/l te liggen. Wat deze toename in zoutdruk aan de rand van de zoetwaterzone voor effect heeft op de chlorideconcentraties in de zoetwaterzone, komt aan bod in de paragraaf onder Figuur 17.

Betrouwbaarheid modelresultaten

De berekende chlorideconcentraties zijn naar verwachting enige onderschatting van de werkelijkheid. Op basis van het validatierapport gaat het om een systematische afwijking van ongeveer 100 mg/l en voor de piekconcentraties 500 mg/l (paragraaf 3.2.1).

Een vergelijking met de metingen van de lage afvoerperiodes in 2022 is geen onderdeel van deze studie. Het is echter wel meegenomen in de aanbevelingen (paragraaf 6.2) om deze meetperiode te benutten voor het verder kwantificeren van de modelprestaties.

- Bij **3 m ZSS** is de verwachting dat de monding van de HIJ te maken krijgt met verzilting tussen de 1400 en 1900 m³/s NWW (1700-2200 Lobith bij gemiddelde watervraag). Vooral onder de 1400 m³/s NWW (1700 Lobith bij gemiddelde watervraag) nemen de chlorideconcentraties duidelijk toe tot gemiddeld rond 1000 mg/l bij 900 m³/s NWW (1200 Lobith bij gemiddelde watervraag) en rond 3000 mg/l bij 400 m³/s NWW (rond 600 Lobith bij gemiddelde watervraag).



Figuur 17. Berekende variatie in chlorideconcentraties bij verschillende zeespiegelstijging varianten (kleuren) en afvoervarianten (x-as) bij Krimpen aan de IJssel. De grijze balk ligt (met enige bandbreedte vanwege modelonzekerheden) rond 250 mg/l, de grenswaarde voor de meeste inlaatlocaties vanuit de HIJ.

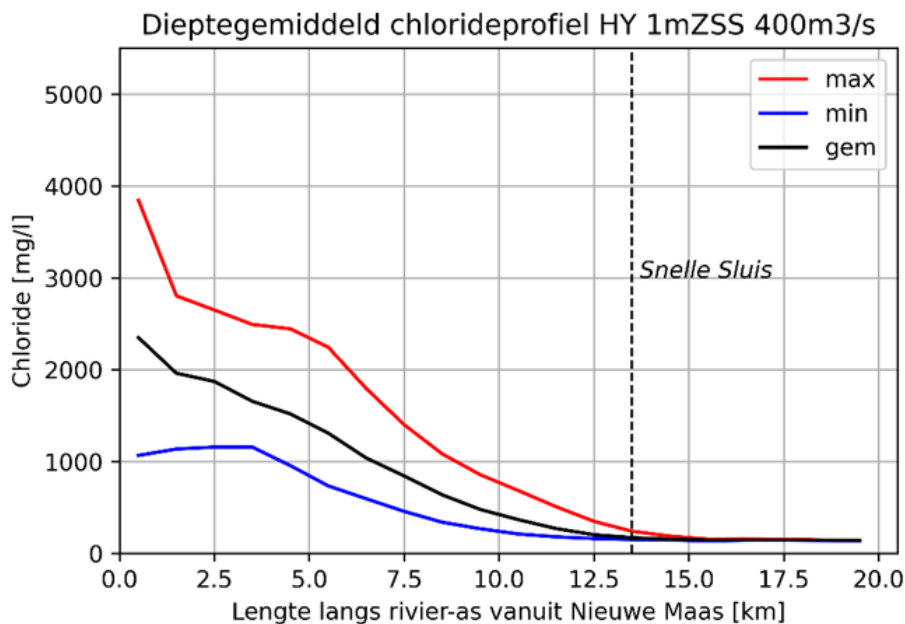
Effect ZSS op verzilting bij inlaatlocaties zoetwaterzone HIJ bij huidige strategie (2 m³/s aanvoersurplus)

Betrouwbaarheid modelresultaten

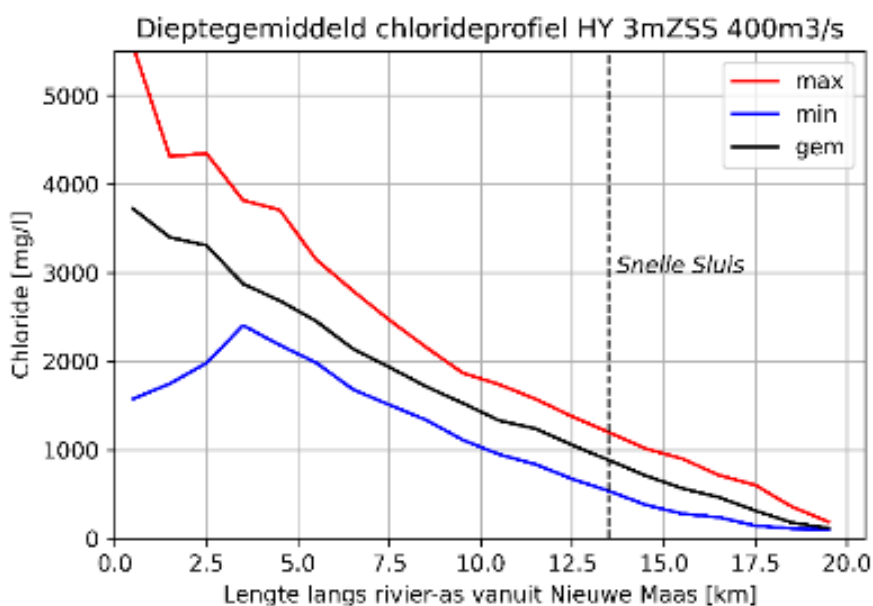
Gezien de in paragraaf 3.2.2 genoemde tekortkomingen van het huidige 3D-model voor de HIJ, geven onderstaande resultaten naar verwachting een overschatting van de effectiviteit van het surplus.

- Tot ongeveer 900 m³/s NWW blijft inlaat Snelle Sluis (de meest benedenstroomse inlaat in de zoetwaterzone) in de berekeningen bij alle ZSS varianten in de rekenperiode (vier weken) zoet⁸, bij de huidige beheerstrategie met een surplus van rond de 2 m³/s. Dit is bij een chlorideconcentratie in de monding van de HIJ ('zoutdruk' aan de rand van de zoetwaterzone) tot gemiddeld ongeveer 1000 mg/l. Bij 400 m³/s NWW is de zoutdruk aan de rand van de zoetwaterzone dusdanig hoog (gemiddeld 1000 - 3000 mg/l) dat het huidige surplus onvoldoende is om Snelle Sluis volledig zoet te houden.
- Bij 1 m ZSS en 400 m³/s NWW gaat het in de modelresultaten om een relatief beperkte verhoging (Figuur 18). Inlaat Gouda blijft zoet in deze rekenperiode. Bij 3 m ZSS gaat het om een substantiële verhoging (na 4 weken rond 1000 mg/l bij Snelle Sluis) (Figuur 19), waarbij ook inlaat Gouda verzilt raakt. Aangezien het aanvoersurplus van 2 m³/s voor die varianten onvoldoende is om dispersieve zoutindringing in de zoetwaterzone tegen te gaan, zullen de concentraties in de tijd steeds verder oplopen.

⁸ ten minste in de eerste 4 weken nog geen duidelijke toename in chlorideconcentraties te zien.



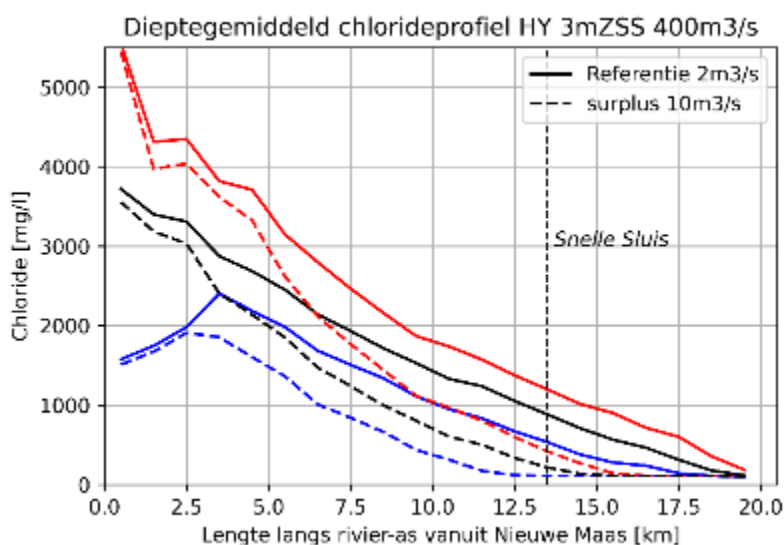
Figuur 18. Verloop chlorideconcentraties over de HIJ over transect vanaf de monding bij de Nieuwe Maas (links) tot aan de Waaiersluis (rechts) bij 1 m ZSS en 400 m³/s NWW afvoer. De kleuren geven de minimale (blauw), gemiddelde (zwart) en maximale (rood) chlorideconcentraties weer (statistiek over laatste week rekenperiode).



Figuur 19. Verloop chlorideconcentraties over de HIJ vanaf de monding bij de Nieuwe Maas (links) tot aan de Waaiersluis (rechts) bij 3 m ZSS en 400 m³/s NWW afvoer. De kleuren geven de minimale (blauw), gemiddelde (zwart) en maximale (rood) chlorideconcentraties weer (statistiek over laatste week rekenperiode).

Effect ZSS op verzilting bij inlaatlocaties zoetwaterzone HIJ bij oprekken huidige strategie

- Voor de variant met 3 m ZSS en 400 m³/s NWW afvoer is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met 10 m³/s aanvoersurplus op de HIJ zoetwaterzone. Gelet op de tekortkomingen van het 3D model voor de HIJ kan niet met zekerheid worden geconcludeerd dat een surplus van 10 m³/s voldoende is om de gemiddelde chlorideconcentraties bij Snelle Sluis voldoende te verlagen. Wel kan worden geconcludeerd dat het significant vergroten van het surplus (met ongeveer één orde grootte) tot een significante verlaging leidt van de gemiddelde chlorideconcentraties bij Snelle Sluis (Figuur 20). De vloedconcentraties liggen hoger, maar lijken wel gestabiliseerd. Dit duidt erop dat Snelle Sluis onder invloed van de advectieve verzilting (via getijstroom) te maken kan krijgen met inlaatventsters.



Figuur 20. Verloop chlorideconcentraties over de HIJ vanaf de monding bij de Nieuwe Maas (links) tot aan de Waaiersluis (rechts) bij 3 m ZSS en 400 m³/s NWW afvoer. De kleuren geven de minimale (blauw), gemiddelde (zwart) en maximale (rood) chlorideconcentraties weer (statistiek over laatste week rekenperiode).

4.2.2 Zoetwaterzone Lek

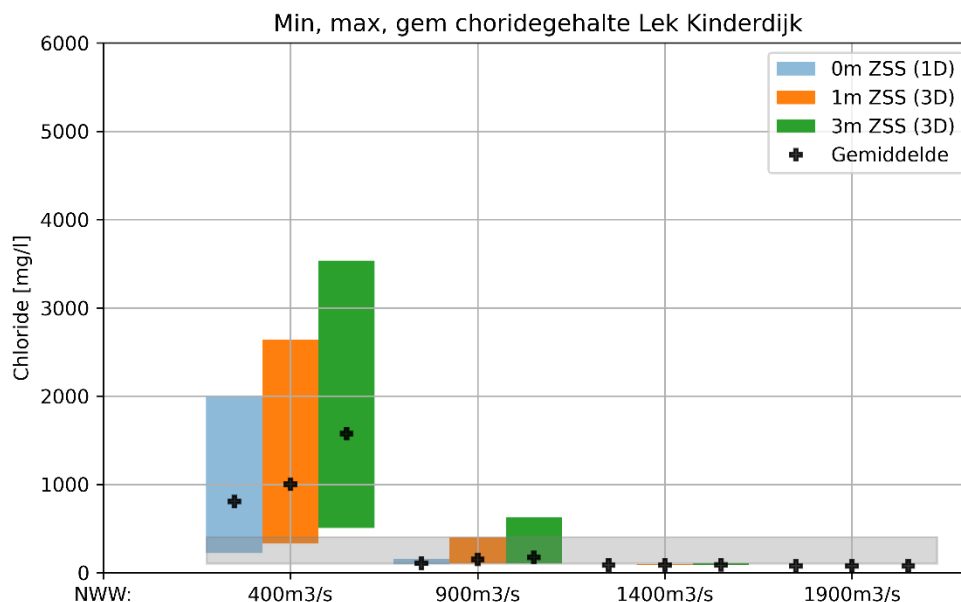
Effect ZSS en rivierafvoer op rand van de zoetwaterzone

- De Lek is eenzelfde type zoetwaterzone als de HIJ, maar ligt verder bovenstrooms en verzilt daardoor bij wat hogere rivierafvoeren. Zowel bij 1 als bij 3 m ZSS gebeurt dit tussen de 900 en 1400 m³/s NWW (1200-1700 m³/s Lobith bij gemiddelde watervraag) (Figuur 21).

Afvoer over de Lek

Bij de 3 m ZSS sommen is stuw Hagestein eruit gehaald, omdat er geen verval meer is over de stuw (paragraaf 3.4). De afvoer over de Lek is dan groter dan bij 1 m ZSS waar stuw Hagestein nog in bedrijf is en netto 20 m³/s via de Lek wordt stroomt. Gemiddeld gaat het om netto ongeveer 70 m³/s bij de NWW afvoervariant van 400 m³/s, tot 420 m³/s bij de NWW afvoervariant van 1900 m³/s.

- Hierbij moet worden opgemerkt dat rond 900 m³/s NWW (1200 m³/s Lobith) met name de maximale chlorideconcentraties toenemen tot 500 à 1000 mg/l. De gemiddelde chlorideconcentraties zijn licht verhoogd ten opzichte van de achtergrondconcentratie.
- Bij lagere afvoeren nemen de chlorideconcentraties in de monding steeds verder toe. Bij 400 m³/s NWW (rond 600 m³/s Lobith) zorgt elke meter zeespiegelstijging voor ongeveer 200 mg/l hogere gemiddelde chlorideconcentraties. Indien stuw Hagestein bij 3 m ZSS nog in werking zou zijn (met netto gemiddeld 20 m³/s afvoer), zou dit verschil nog iets groter zijn.



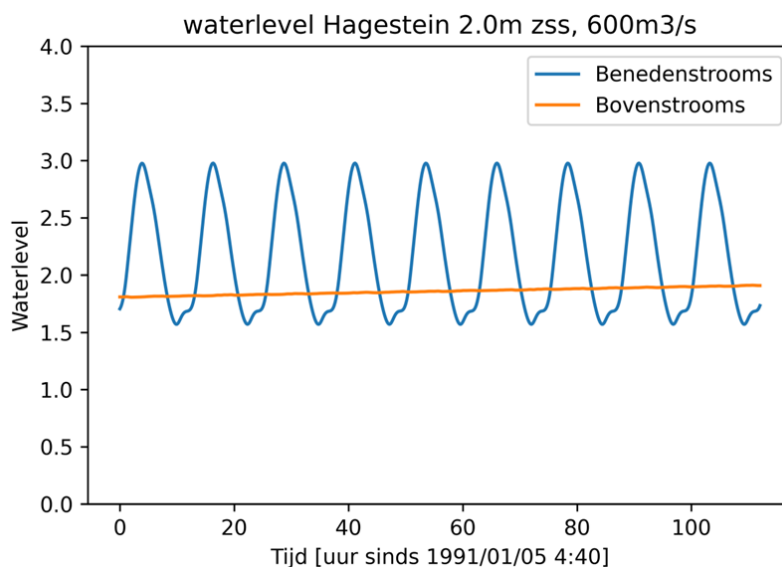
Figuur 21. Berekende chlorideconcentraties bij verschillende zeespiegelstijging varianten (kleuren) en afvoervarianten (x-as) bij Kinderdijk (Lek). De grijze balk ligt (met enige bandbreedte vanwege modelonzekerheden) rond 150-250 mg/l, relevante grenswaarden voor de inlaatlocaties langs de Lek.

Effect ZSS op verzilting bij inlaatlocaties zoetwaterzones Lek bij huidige strategie (20 m³/s aanvoersurplus)

- Bij 1 m ZSS laat de Lek alleen bij 400 m³/s NWW (rond 600 m³/s Lobith) een lichte verhoging zien van met name de piek chlorideconcentraties tot aan Bergambacht bij de huidige beheerstrategie, met een aanvoersurplus van 20 m³/s op de zoetwaterzone. Dit lijkt met name verhoging door de getijstrooming (hogere maximum concentraties). De chlorideconcentraties in de monding van de Lek komen dan gemiddeld tot ongeveer 1000 mg/l.
- Vanaf circa 2 m ZSS komt de functionaliteit van stuw Hagestein (dé aanvoerstuurknop naar de Lek zoetwaterzone) in het geding, door nauwelijks of zelfs negatief verval over de sluis (Figuur 22). Ervan uitgaande dat de stuw dan uit bedrijf wordt gehaald, is de zoetwaterzone dan niet meer actief inzetbaar.

Wat is mogelijk met het oprekken van de huidige beheerstrategie?

- Niet onderzocht, omdat huidige beheerstrategie via inzet Hagestein alleen mogelijk is tot 2 m ZSS.



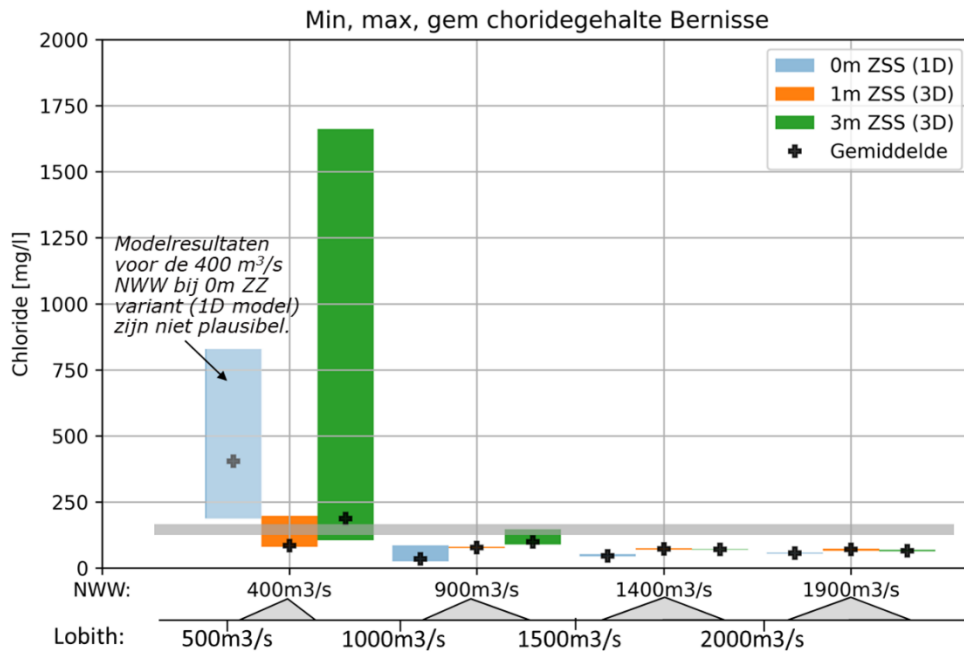
Figuur 22. Waterstanden bovenstrooms en benedenstrooms van stuw Hagestein bij 2m ZSS, waaruit blijkt dat het bij die ZSS (of hoger) niet of beperkt mogelijk is om water onder vrij verval door te voeren naar de Lek.

4.2.3 Zoetwaterbuffer Brielse Meer

Effect ZSS en rivierafvoer op rand van de zoetwaterbuffer

- Voor de Bernisse inlaat op het Spui zijn windeffecten en het optreden van achterwaartse verzilting naar verwachting een van de bepalende factoren voor de waterbeschikbaarheid. De Bernisse inlaat wordt gevoeliger voor verzilting door windopzet, omdat door zeespiegelstijging het zoet-zout evenwicht al verder op de Oude Maas of zelfs het Spui komt te liggen. Kwantificeren van hoeveel vaker dit door windopzet zal optreden, is geen onderdeel van deze studie.
- In periodes *zonder* windopzet is verzilting van de Bernisse inlaat bij 1 m ZSS te verwachten als de NWW afvoer afneemt tot rond 400 m³/s (600 m³/s Lobith bij gemiddelde watervraag). Bij 3 m ZSS is dit de verwachting rond 900-400 m³/s NWW (1200-600 Lobith). Op basis van de modelresultaten zouden er nog wel inlaatvensters zijn. De minimale concentraties in een getijperiode blijven onder 150 mg/l. Dergelijke conclusies kunnen echter niet met voldoende zekerheid worden getrokken voor deze studie⁹. De chlorideconcentraties liggen dichtbij de grenswaarde, waardoor kleine afwijkingen voor een heel ander beeld kunnen zorgen.

⁹ Daarom is de *duur* van de inlaatvensters ook niet verder onderzocht.

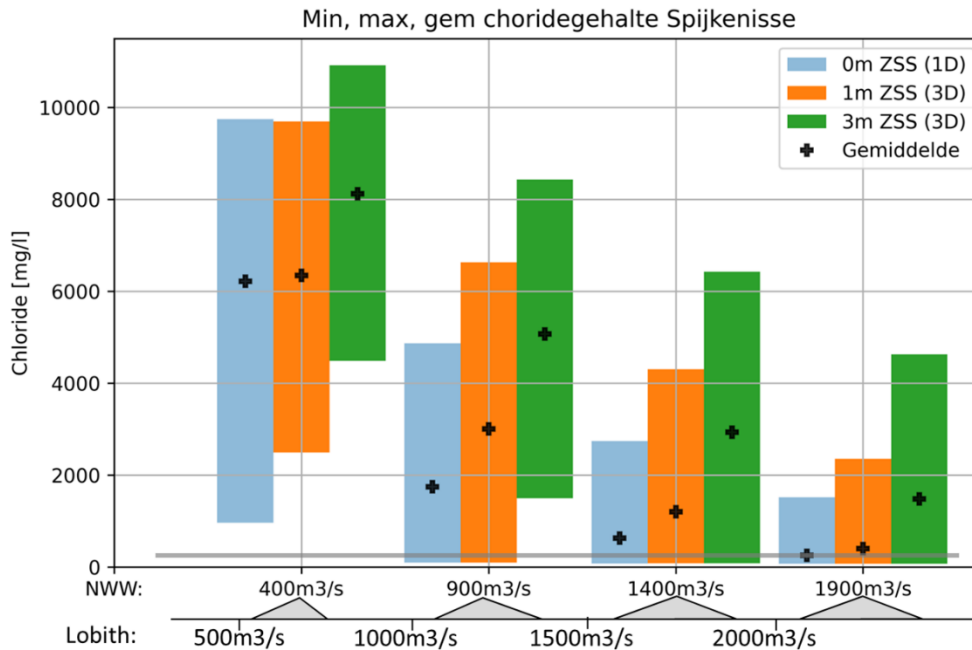


Figuur 23. Berekende chlorideconcentraties bij verschillende zeespiegelstijging varianten (kleuren) en afvoervarianten (x-as) op het Spui ter hoogte van de Bernisse inlaat. Dit zijn rekenresultaten zónder windopzet. De grijze balk ligt rond 150 mg/l, relevante grenswaarde voor het Brielse Meer.

Vergelijking met eerdere modelstudie

Bovengenoemde resultaten voor de Bernisse inlaat geven een gunstiger beeld dan in eerdere studies van Deltares. De oorzaak is niet onderzocht, maar in de discussie (paragraaf 5) zijn wel de verschillen in modelinstrumentarium en uitgangspunten tussen beide studies besproken.

- De secundaire inlaat van het Brielse Meer, de Spijkenisse inlaat (Figuur 24), is bij 1 m ZSS helemaal niet meer bruikbaar als de NWW afvoer onder de 900 à 400 m³/s komt. Bij 3 m ZSS gebeurt dit als de NWW afvoer onder de 1400 à 900 m³/s komt. Al bij hogere rivierafvoeren nemen de maximum en gemiddelde chlorideconcentraties toe en zijn de inlaatvensters kleiner.



Figuur 24. Berekende chlorideconcentraties bij verschillende zeespiegelstijging varianten (kleuren) en afvoervarianten (x-as) op de Oude Maas ter hoogte van de Spijkenisse inlaat. De grijze balk ligt rond 150 mg/l, relevante grenswaarde voor het Brielse Meer.

Effect ZSS op verzilting Brielse Meer bij huidige strategie

Dit valt buiten de scope van deze studie. In combinatie met de (nog te onderzoeken) toename in achterwaartse verzilting moet worden bekeken hoe de afname in zoete inlaatvensters, en juist toename in inlaatcapaciteit (groter verval) zich verhouden tot de watervraag aan de zoetwaterbuffer Brielse Meer.

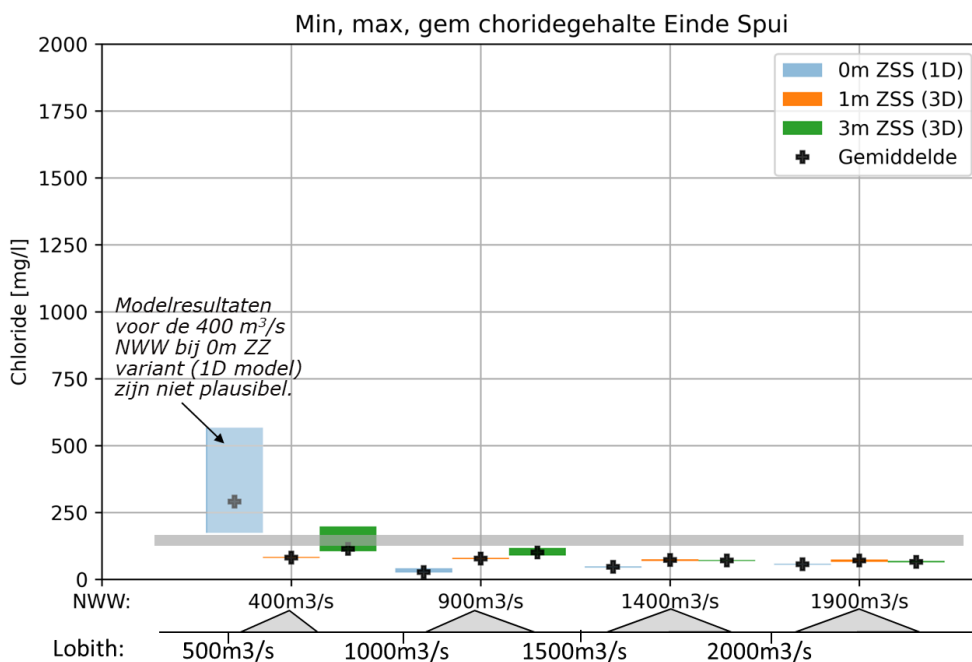
4.2.4 Zoetwaterzone Haringvliet - Hollands Diep

Effect ZSS en rivierafvoer op rand van de zoetwaterzone

- Continue achterwaartse verzilting van het Haringvliet is binnen de uitgangspunten van deze studie (tot 3 m ZSS en 400 m³/s NWW afvoer) niet te verwachten (Figuur 25). Aangezien het zoet-zout evenwicht door ZSS wel steeds verder op de Oude-Maas en Spui komt te liggen (bijv. bij 3 m ZSS en 400-900 m³/s NWW afvoer ligt het zoet-zout evenwicht rond Bernisse inlaat) zal een relatief beperkte windopzet al voor achterwaartse verzilting kunnen zorgen.

Effect ZSS op verzilting Haringvliet bij huidige strategie

- De effecten op de zoetwaterzone Haringvliet en Hollands Diep (maar ook Brielse Meer en VZM) zijn afhankelijk van de mate van achterwaartse verzilting en de mogelijkheid om het Haringvliet daarna door te spoelen. De effectiviteit van het gericht doorspoelen van het Haringvliet wordt onderzocht in het traject van *Lerend Implementeren Kierbesluit Haringvlietssluisen*.



Figuur 25. Berekende chlorideconcentraties bij verschillende zeespiegelstijging varianten (kleuren) en afvoervarianten (x-as) op het Spui net voor de instroom vanuit het Haringvliet.

4.2.5 Effecten chlorideconcentraties en waterstanden op andere locaties in de Rijn-Maasmonding

In voorgaande paragrafen ligt primair de focus op de zoetwaterbuffers en -zones, in lijn met de voorkeursstrategie KZH. Appendix A geeft een beeld van de berekende **effecten van ZSS op de chlorideconcentraties in de gehele RMM**. Dit zijn zowel locaties in de zoetwaterbuffers en -zones (zie aandachtspunten en onzekerheden modelresultaten in paragraaf 3.2), locaties die een link hebben met de zoetwaterbuffers en -zones (verzilting bij Parksluizen en Boerengat leidt tot een hogere watervraag aan de zoetwaterbuffers/-zones), en een aantal overige locaties verspreid over de RMM om een overkoepelend beeld van de effecten te krijgen.

0 geeft voor een aantal locaties in de RMM ook inzicht in de effecten van ZSS en lagere rivierafvoeren op waterstanden.



5

Discussie en kennisleemtes

5. Discussie en kennisleemtes

- De hier gepresenteerde bevindingen zijn het resultaat van berekeningen met modellen die in meer of mindere mate in staat zijn om de in de RMM relevante processen weer te geven. Desalniettemin lijken de **resultaten vrij robuust**: er is gebruik gemaakt van twee verschillende modelbenaderingen die het zelfde overkoepelende beeld laten ontstaan. Omdat het 3D model meer fysica bevat zijn de 3D resultaten in het algemeen zowel kwalitatief als kwantitatief betrouwbaarder dan de 1D benadering.

De **belangrijkste kanttekening** hierbij is dat het huidige 3D model niet in staat is om alle deelgebieden naar behoren te beschrijven, met als voorbeeld de structurele onderschatting van de verzilting op de bovenloop van de HIJ (dispersieve processen) (paragraaf 3.2.2). Aangezien hetzelfde model de verzilting van de Lek goed lijkt te beschrijven is dit een indicatie dat de juiste processen in het model aanwezig zijn, alleen blijkt het relatieve belang van de processen onderling in het geval van de HIJ niet goed te worden weergegeven. De mate van onzekerheid op de kwantitatieve resultaten blijkt voorsnog moeilijk vast te stellen.

- Een conservatieve aanname voor de resultaten van voorliggende studie is de aanname dat de huidige **bodemligging** gehandhaafd blijft en daarmee de waterdiepte (en daarmee de blootstelling aan zee invloed) toeneemt. Bijvoorbeeld: bij 3 m ZSS ter hoogte van splitsing Oude Maas - Nieuwe Maas neemt de waterdiepte daardoor toe van circa 16.5 naar 19.5 m. Als de bodemligging in de RMM in enige mate zou 'meegroeien' met de ZSS, is minder zoutindringing te verwachten.
- De **afvoer via de NWW** is bepalend voor hoe ver de zee invloed reikt in de RMM. Het is belangrijk te realiseren dat bij een Lobith afvoer een variatie aan NWW afvoeren mogelijk is, afhankelijk van waterverdelingskeuzes, de grootte van de watervraag (onttrekkingen) onderweg en bovenal de sturing van Haringvlietsluizen. Bij de resultaten van deze studie zijn dan ook de NWW debieten gegeven. Bij welke Lobith afvoer het betreffende NWW debiet zich voordoet heeft te maken met:
 - Keuzes rondom inzet van de Haringvlietsluizen, de grootste stuurknop voor de NWW afvoer. Gaan deze boven 1100 m³/s Lobith geleidelijk open bij eb, in lijn met het huidige beheer; of blijven ze bij ZSS langer gesloten gericht op het zoveel mogelijk beperken van zoutindringing via de NWW. Deze keuze zal met name afhangen van de watervraag bij de Haringvlietsluizen om te kunnen blijven kieren.
 - De ernst van de droogtesituatie en daarmee van de onttrekkingen onderweg uit de rivieren.
 - Keuzes in de bovenregionale waterverdeling. De vertaling van Lobith afvoer naar Nederrijn, Waal en Maasafvoer (bovenranden model) is gebaseerd op de fysische 1-op-1 relatie uit de Benedenrijn systematiek/uitgangspunten van WBI2017 (HKV, 2021). Hierin zijn geen variaties in bovenregionale waterverdelingskeuzes meegenomen. In het huidige watersysteem zijn ook geen grote andere keuzes mogelijk. Voor de KZH-strategie wordt wel de mogelijkheid van een ARK-route naar het IJsselmeer verkend.

De bovenregionale studie van het KPZSS - Zoetwater (Arcadis/Hydrologic, 2023e) geeft een beeld bij de bandbreedte aan NWW debieten die bij verschillende Lobith afvoeren kan worden verwacht (paragraaf 3.4).

Ter vergelijking - eerdere studies naar ZSS effecten KZH

De effecten van ZSS op de zoetwaterbuffers en -zones van de voorkeursstrategie KZH zijn eerder onderzocht in (Deltares, 2018). In deze studie worden **hogere chlorideconcentraties berekend dan in voorliggende studie**. Er is geen verdiepende analyse naar de verschillen gedaan, maar onderstaande verschillen in de aanpak zijn vastgesteld, welke mogelijk deel uitmaken van de verklaring:

1. Ander 3D model: SIMONA OSR¹⁰ versus het (recentere) D-HYDRO 3D RMM model.
2. Nieuwe schematisatie bodemligging in het in voorliggende studie gebruikte nieuwe 3D RMM model
3. In voorliggende studie is stuw Hagestein eruit gehaald bij 2 m ZSS omdat uit de berekeningen blijkt dat deze bij dan niet meer kan functioneren. Dat is in de Deltares studie niet gedaan.
4. Groter verschil tussen NWW afvoer en Lobith afvoer (bijv. 1400-1500 NWW afvoer bij 2300 m³/s Lobith), doordat in voorgaande studie een ander uitgangspunt is gehanteerd voor de sturing van de Haringvlietsluizen. Bij 1500 en 2000 m³/s Lobith afvoer staan de Haringvlietsluizen in de Deltares berekeningen deels open, waardoor minder water via de NWW wordt afgevoerd.

De verwachting is dat met name punt 3 en 4 de oorzaak zijn van de verschillen, omdat hierdoor meer water over de noordrand (open stuw Hagestein) en door de NWW gaan (dichte Haringvlietsluizen bij Lobithafvoeren boven 1100 m³/s) dan in de voorgaande studie.

In voorliggende studie is ook specifiek de **afvoerverdeling Oude-Nieuwe Maas** (mede bepalend voor zoutindringing op deze riviertakken) anders dan in eerdere studies naar de effecten van zeespiegelstijging. De oorzaak is niet nader onderzocht, maar kan in theorie een link hebben met bovenstaande verschillen punt 2 en 3.

- Deze studie beschrijft de waterstaatkundige effecten van zeespiegelstijging en rivierafvoer varianten op de zoetwaterbuffers en -zones in de Rijn-Maasmond. Dit is een belangrijke basis om de houdbaarheid van de buffers en zones te kunnen beoordelen. Het is echter niet het hele verhaal. **Overige aspecten die relevant zijn voor de houdbaarheid**, maar in deze studie nog niet zijn meegenomen, zijn:
 - **Windeffecten** (waaronder ook achterwaartse verzilting en nalevering): deze zorgen meestal voor tijdelijke variaties in de ligging van het zoet-zout evenwicht in de Rijn-Maasmond. Uitzondering hierop vormt het Haringvliet - Hollands Diep waar de zoutinstroom niet weer direct na de gebeurtenis uitstroomt, maar voor langere tijd kan naleveren, van invloed op de zoetwaterbuffers Haringvliet - Hollands Diep, VZM en de Bernisse inlaat naar het Brielse Meer. Specifiek deze effecten vragen een aanvulling op de semi-stationaire analyse van deze studie. Hoe lager de rivierafvoeren, hoe groter de gevoeligheid van het zoet-zout evenwicht voor wind en opzet op zee.
 - **Werking inlaat Bernisse:** De zoetwaterbuffer Brielse Meer staat niet in open verbinding met het hoofdwatersysteem van de Rijn-Maasmond. Daar zit het Bernisse inlaatwerk tussen. Wat zeespiegelstijging en rivierafvoervarianten betekenen voor de aanvoer van de Brielse Meer buffer via de Bernisse inlaat, volgt uit (1) de resterende zoetwaterinlaatvensters, en (2) de inlaatcapaciteit (groter door zeespiegelstijging, bij gelijkblijvend peil Brielse Meer). Deze doorvertaling was geen onderdeel van voorliggende studie, maar is een relatief eenvoudige doorvertaling vanuit de rekenresultaten uit deze studie.

¹⁰ Het OSR model: door het Havenbedrijf Rotterdam ontwikkelde Operationeel Stromingsmodel Rotterdam, waarbij gebruik wordt gemaakt van SIMONA software.

- **Waternvraag:** Voor de HIJ, de Lek en het Brielse Meer is een inventarisatie van de waternvraagvarianten nodig om daadwerkelijk tot een conclusie over de houdbaarheid van de buffers en zones te komen.
- **Kans en duur van verziltingsevents:** Voor de kennisontwikkeling rondom zeespiegelstijging is inzicht wenselijk in de effecten, in combinatie met een inschatting van de herhalingstijden en duur van de verschillende situaties. Deze studie geeft inzicht in de *waterstaatkundige effecten* van mogelijke toekomstige varianten van zeespiegelstijging (ZSS) en rivierafvoer. De doorvertaling naar herhalingstijden en duur waarmee deze varianten zich kunnen voordoen valt buiten de scope van deze studie.
- **Beschikbaarheid extra surplus:** Tot slot is voor de HIJ en Lek zoetwaterzones geen analyse gedaan naar de *haalbaarheid van de zoetwateraanvoer* rekening houdend met (1) de bovenregionale waterverdeling, en (2) voor HIJ aanvoer de regionale aanvoercapaciteit. In deze studie is gerekend met 10 m³/s surplus op de HIJ als gevoeligheidsanalyse voor de effecten op de zoetwaterzone. Afhankelijk van de uiteindelijke interessante bandbreedte aan surplus om de zoetwaterzone in stand te houden, kan ook worden gekeken naar wat dit vraagt van capaciteitsvergroting van de wateraanvoer via het regionale watersysteem. Dit alles in verhouding tot gewenste capaciteitsvergroting vanwege autonome waternvraagontwikkelingen.



6

Conclusies en aanbevelingen

6. Conclusies en aanbevelingen

6.1 Beantwoording vragen houdbaarheid zoetwaterbuffers en -zones

Uit deze studie volgt het beeld dat de zoetwaterbuffers en -zones door ZSS en afnemende rivierafvoeren onder druk komen te staan. Wat dit betekent voor de waterstaatkundige houdbaarheid van Rijn-Maasmonding zoetwaterbuffers en -zones wordt bepaald door *hoe effectief de bufferstrategie is in het opvangen van de toename van zoutdruk aan de rand van de buffers/zones*. Voor alle vier de zoetwaterbuffers/-zones is de NWW afvoer de grote 'stuurknop', indirect stuurbaar via de Haringvlietsluizen en andere keuzes in de waterverdeling bovenstrooms. Door ZSS zal het **minimaal benodigd ondergrensdebiet op de NWW** toenemen om de zoetwaterbuffers en -zones in stand te kunnen houden. Het zorgvuldig bepalen van dit ondergrensdebiet is een van de belangrijkste aanbevelingen uit deze studie.

Het benodigd ondergrensdebiet voor de NWW hangt voor de noordrand van de RMM (de zoetwaterzones HIJ en Lek) samen met de effectiviteit (en, buiten de scope van deze studie, beschikbaarheid) van de 'kleine stuurknop': het aanvoersurplus naar de bovenloop van deze riviertakken, om een toename in de monding van de zoetwaterzones tegen te gaan. **Voor de noordrand van de RMM zit er waterstaatkundig gezien rek in de zoetwaterstrategie, mits maatregelen worden genomen om een toename in aanvoersurplus naar de zoetwaterzones HIJ en Lek technisch mogelijk te maken.** De haalbaarheid daarvan valt buiten de scope van voorliggende studie.

Het ondergrensdebiet op de NWW (via keuzes in de sturing van de Haringvlietsluizen en bovenregionale waterverdeling) is ook bepalend voor de waterstaatkundige houdbaarheid van de zoetwaterbuffers en -zones aan de zuidrand van de RMM. Door ZSS neemt de gevoeligheid van verzilting door windopzet toe, omdat het zoet-zout evenwicht al verder op de Oude Maas of zelfs het Spui komt te liggen. In welke mate dan nog zoete inlaatvensters voorkomen bij de Bernisse inlaat zal bepalend zijn voor de waterbeschikbaarheid van het Brielse Meer. Door de hogere waterstand op het Spui zal de inlaatcapaciteit van de Bernisse inlaat toenemen bij ZSS. Achterwaartse verzilting in combinatie met lage rivierafvoeren kunnen langdurig zorgen voor verhoogde chlorideconcentraties op het Haringvliet-Hollands Diep, en daarmee ook op het Brielse Meer en VZM. Het kwantificeren van hoeveel vaker dit zal optreden, is geen onderdeel van deze studie. Een conclusie over de **oprekbaarheid van de zoetwaterstrategie bij ZSS is voor de zuidrand van de RMM** daardoor nog niet mogelijk.

Vergelijking eerdere studies ZSS effecten

De conclusies van deze studie geven een gunstiger beeld (minder sterke verzilting) dan eerdere studies (Deltares, 2018). Hierbij spelen naar verwachting de volgende uitgangspunten een rol:

- de Haringvlietsluizen blijven ook bij hogere rivierafvoeren dan in het huidige beheer (boven 1100 m³/s Lobith) gesloten om verzilting op de noordrand RMM te beperken;
- Over de Lek is vrije afstroming mogelijk boven de 2 m ZSS, omdat stuw Hagestein dan zijn functionaliteit verliest.

Meer concreet volgen uit deze studie onderstaande conclusies.

- De **zoetwaterzone HIJ** moet door zeespiegelstijging al bij hogere rivierafvoeren dan in het huidige beheer actief worden ingesteld, wat betekent dat een aanvoersurplus op de bovenloop van de HIJ moet worden gezet. Bij 1 m ZSS is dat ergens rond 900 a 1400 m³/s NWW afvoer, en bij 3 m ZSS volgens deze studie rond 1400 a 1900 m³/s NWW

afvoer. Alternatieve aanvoerroutes krijgen daarmee een regulier karakter, in plaats van te worden gezien als calamiteitenmaatregel zoals in de huidige situatie.

- De huidige beheerstrategie met ordegrootte 2 m³/s aanvoersurplus naar de HIJ zoetwaterzone kan de toename in zoutdruk voor een deel van de ZSS en lage rivierafvoervarianten opvangen. Het lijkt onvoldoende bij hoge chlorideconcentraties in de monding van de HIJ (in rekenresultaten boven 1000 mg/l, bij NWW afvoer beneden 900 m³/s, maar precieze knikpunten met dit instrumentarium niet vast te stellen). Een aanvoersurplus van 10 m³/s (een orde groter dan de huidige aanvoercapaciteit, nog wel substantieel lager dan de regionale watervragen aan de HIJ) laat een substantiële verlaging van de chlorideconcentraties zien.
- Voor de **zoetwaterzone Lek** is de functionaliteit van stuw Hagestein een belangrijk aandachtspunt voor de huidige beheerstrategie. Vanaf ongeveer 2 m ZSS kan de aanvoer naar de zoetwaterzone Lek niet meer direct worden gestuurd (geen/nauwelijks verval over stuw Hagestein). Bij 1 m ZSS, wanneer de stuw nog functioneel is, wordt richting de 400 m³/s NWW afvoer een verhoging in de piek chlorideconcentraties zichtbaar tot aan Bergambacht (bij de huidige beheerstrategie, met een aanvoersurplus van 20 m³/s). Dit lijkt met name verhoging door de getijstroming (hogere maximum concentraties). De chlorideconcentraties in de monding van de Lek komen dan gemiddeld tot ongeveer 1000 mg/l.
- De **zoetwaterbuffers en -zones aan de zuidkant van de Rijn-Maasmonding (Haringvliet-Hollands Diep, Brielse Meer en VZM)** worden door zeespiegelstijging gevoeliger voor windopzet en achterwaartse verzilting (kwantificering geen onderdeel van deze studie, zie paragraaf 6.2). Zonder windopzet is geen continue achterwaartse verzilting te verwachten, behalve bij 3 m ZSS en een NWW afvoer onder de 900 à 400 m³/s (chlorideconcentraties van Spui naar Haringvliet rond 200 mg/l).
- In periodes *zonder* windopzet is verzilting van de **Bernisse inlaat** bij 1 m ZSS te verwachten als de NWW afvoer afneemt tot rond 400 m³/s. Bij 3 m ZSS is dit de verwachting rond 900-400 m³/s NWW. Op basis van de modelresultaten zouden er nog wel inlaatvensters zijn. De minimale concentraties in een getijperiode blijven onder 150 mg/l. Dergelijke conclusies kunnen echter niet met voldoende zekerheid worden getrokken voor deze studie. De chlorideconcentraties liggen dichtbij de grenswaarde, waardoor kleine afwijkingen voor een heel ander beeld kunnen zorgen.
- De secundaire inlaat van het Brielse Meer, de **Spijkenisse inlaat**, is bij 1 m ZSS helemaal niet meer bruikbaar als de NWW afvoer onder de 900 à 400 m³/s komt. Bij 3 m ZSS gebeurt dit als de NWW afvoer onder de 1400 à 900 m³/s komt. Al bij hogere rivierafvoeren nemen de maximum en gemiddelde chlorideconcentraties toe en zijn de inlaatvensters kleiner.

6.2 Aanbevelingen

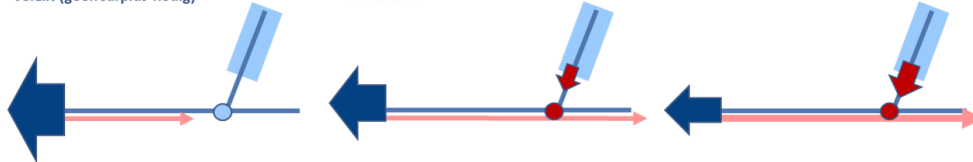
De zoetwaterzones in de RMM hebben twee stuurknoppen welke in samenhang moeten worden bekeken: de afvoer via de NWW en het aanvoersurplus naar de HIJ en Lek. Een belangrijke aanbeveling is dan ook **het zorgvuldig bepalen van het minimaal benodigde ondergrensdebiet via de NWW** voor het duurzaam in stand kunnen houden van de RMM zoetwaterzones bij ZSS.

BIJVOORBEELD BIJ 1M ZEEPIEGELSTIJGING:

I. NWW debiet waarbij monding HIJ niet verzilt (geen surplus nodig)

II. NWW debiet waarbij huidig surplus toereikend

III. NWW debiet waarbij groter surplus nodig



Figuur 26. Illustratie van de samenhang tussen de twee stuurknoppen in de RMM voor de zoetwaterzones HIJ en Lek: de NWW afvoer en het aanvoersurplus van de zoetwaterzones.

Mede vanuit de kennisleemtes zoals toegelicht in het discussiehoofdstuk volgt de aanbeveling tot de volgende, meest belangrijke, verdiepingsslagen:

- Voor een detaillering van de **waterstaatkundige effecten** op de zoetwaterbuffers en -zones:
 - Een gevoeligheidsanalyse voor het uitgangspunt dat de huidige bodemligging is gehandhaafd bij extreme ZSS.
 - Het kwantificeren van de toename in gevoeligheid door achterwaartse verzilting / verzilting door windopzet van de Bernisse inlaat (Brielse Meer) en het Haringvliet - Hollands Diep.
 - Een verdiepende analyse naar de doorwerking van een toenemende zoutdruk in de monding van de HIJ en Lek op de waterstaatkundige effecten in de zoetwaterzones, rekening houdend met de modelonnauwkeurigheid en langere duur waarover de effecten van het tragere dispersieve verziltingsproces moeten worden bekeken.
 - Een nadere bespiegeling van de hier gepresenteerde resultaten met de ervaringen en data van de droge jaren 2018 en 2022 en van verschillen met eerdere studies naar ZSS.
- Voor de **doorvertaling naar de houdbaarheid** van de zoetwaterbuffers en -zones:
 - Voor de zoetwaterzones HIJ en Lek speelt (buiten de scope van deze studie) de vraag van de technische haalbaarheid van een groter aanvoersurplus. Deze moet worden bekeken in relatie tot de maatregelen die wenselijk zijn vanwege ontwikkelingen in de regionale watervraag.
 - Voor het Brielse Meer moeten de waterstaatkundige effecten op het Spui ter hoogte van de Bernisse inlaat (en secundair op de Oude Maas ter hoogte van de Spijkenisse inlaat) worden doorvertaald naar een gemiddelde inlaatcapaciteit (zoete inlaatvensters in combinatie met inlaatcapaciteit), welke kan worden afgezet tegen verschillende watervraagvarianten.
 - Voor de effecten van ZSS op de zoetwaterzone Haringvliet (en indirect ook voor het VZM en het Brielse meer) speelt de effectiviteit van de beheersmaatregel om het Haringvliet gericht door te spoelen een bepalende rol. Voor het ophalen van deze inzichten kan aansluiting worden gezocht met het traject *Lerend Implementeren Kierbesluit Haringvlietssluisen*.
- In de kennisontwikkeling rondom de impact van zeespiegelstijging is het wenselijk (wordt aanbevolen om op termijn) uitspraken te kunnen doen over de **herhalingsstijden** door het simuleren van het gehele spectrum aan hydro-meteorologische omstandigheden in het droogtedomein, inclusief duur en dynamische karakter gedurende lange droge zomer.



7

Referenties

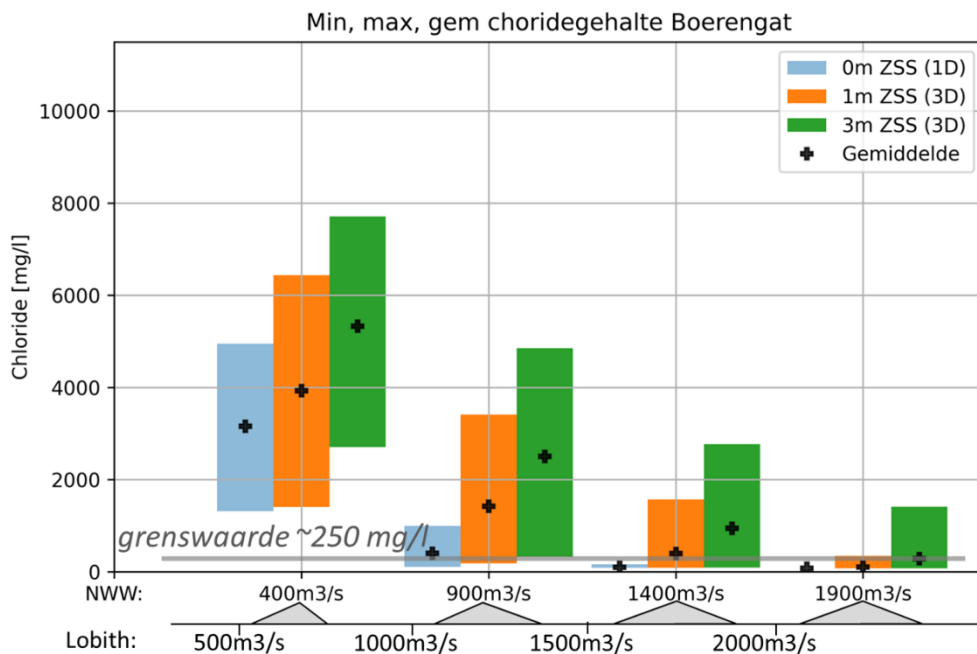
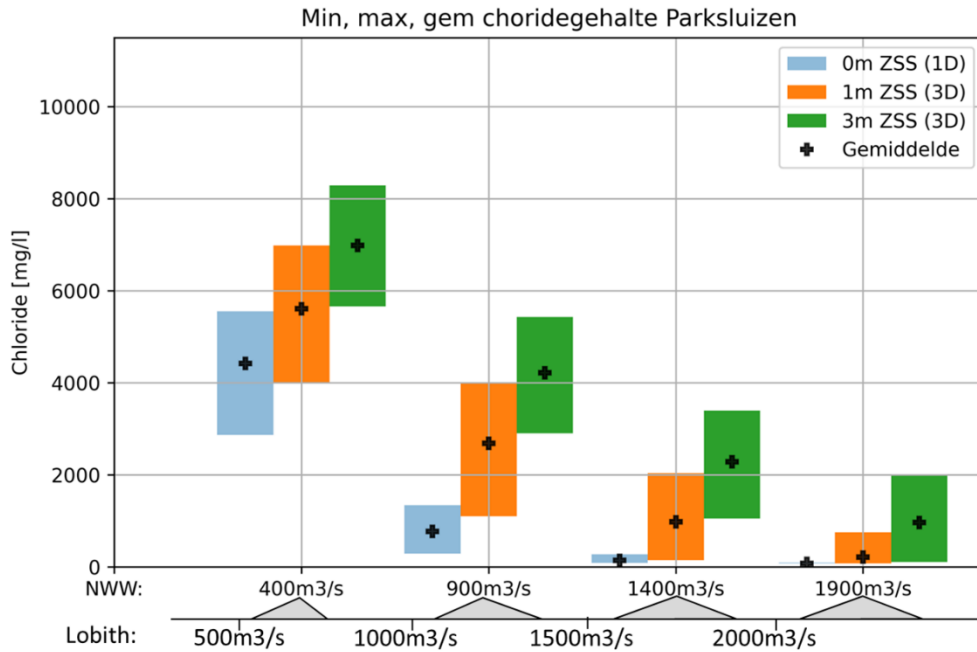
7. Referenties

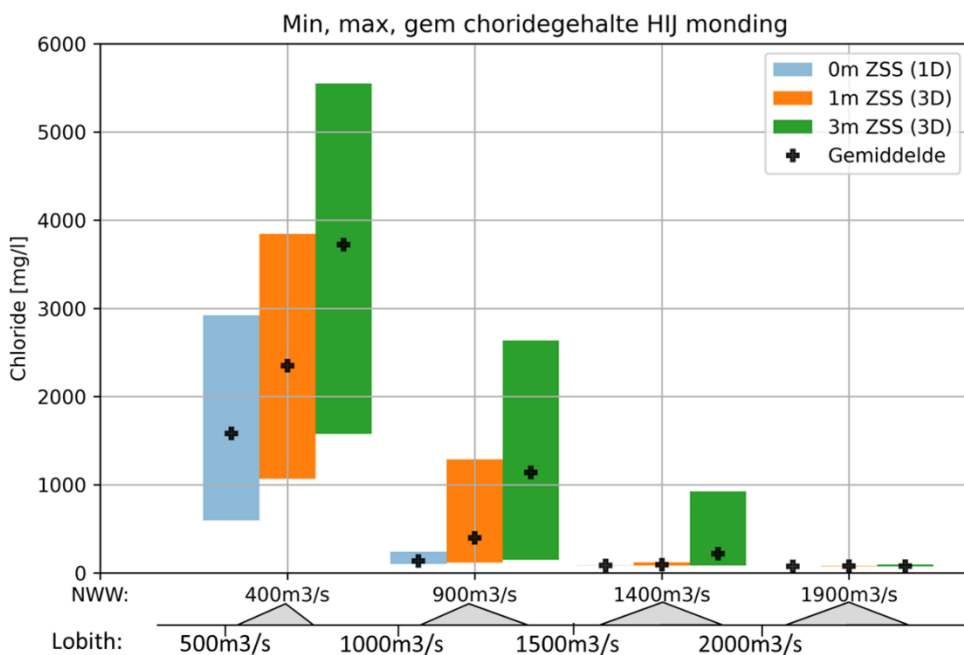
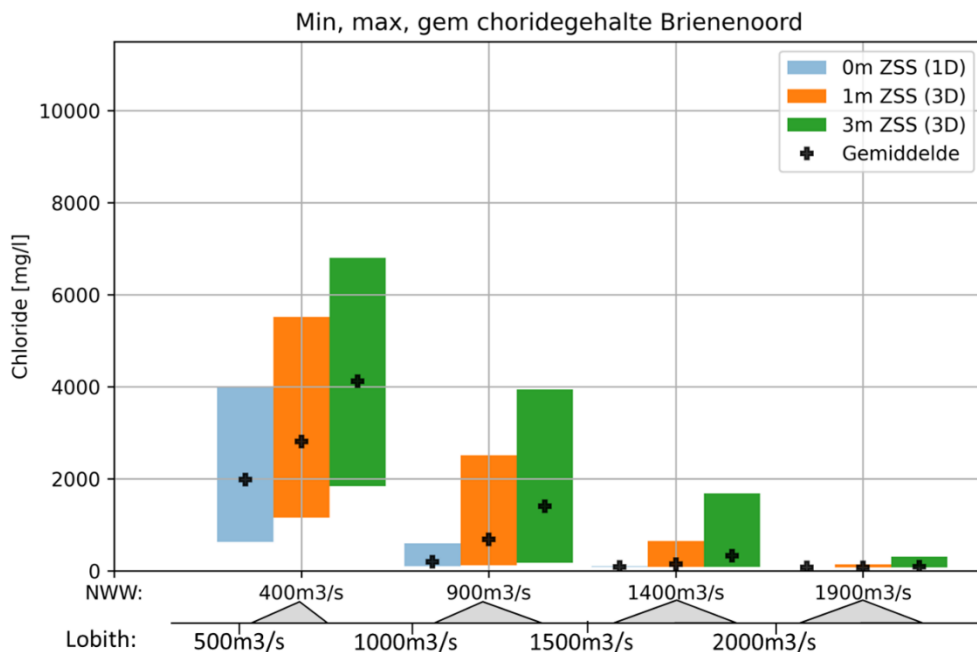
- Arcadis/HydroLogic. (2023a). *Eindrapportage KP ZSS Systeemanalyses zoetwater regio Volkerak-Zoommeer.*
- Arcadis/HydroLogic. (2023b). *Eindrapportage KP ZSS Systeemanalyses zoetwater regio Rijn-Maasmonding.*
- Arcadis/Hydrologic. (2023c). *Eindrapportage KP ZSS Systeemanalyses zoetwater regio Amsterdam-Rijnkanaal - Noordzeekanaal.*
- Arcadis/Hydrologic. (2023d). *Eindrapportage KP ZSS Systeemanalyses zoetwater regio IJsselmeer - Markermeer.*
- Arcadis/Hydrologic. (2023e). *Eindrapportage KP ZSS Systeemanalyses zoetwater bovenregionale waterverdeling.*
- Bonte, M. &.-J. (2009). *KWR Watercycle Research Institute: Klimaatverandering en verzoeting van de Rijn; H2O (42) 2009 22 .*
- Deltares. (2012). *Verkennd onderzoek haalbaarheid innovatief zout/zoet-schedingssysteem 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. (2015). *Analyse van de zoutmetingen in november 2015 langs de Hollandsche IJssel. Afleiding dispersiecoëfficiënt. Rapport 1230077-001.*
- Deltares. (2016). *Prestatie Innovatieve Zout-Zoet Scheiding op de Krammersluizen - berekeningen met WANDA-Locks.*
- Deltares. (2017). *Analyse van zoutmetingen in de Lek, met schatting dispersie Coëfficiënt. Rapport. 112000589-001.*
- Deltares. (2018). *Aanpassing, herkalibratie en verificatie SOBEK 3 model van de Rijn-Maasmonding. Waterstand, afvoer en saliniteit. Rapport 11202220-006.*
- Deltares. (2018). *Verkenning naar de effecten van extreme zeespiegelstijging in de regio Rijnmond Drechtsteden.*
- Deltares. (2019). *Verziltling Rijn-Maasmonding ten gevolge van 1 m zeespiegelstijging. Rapport 11203734-008-ZWS-0005.*
- Deltares. (2019). *Voorspellen optreden nalevering bij Bernisse.*
- Deltares. (2020). *Klimaatrobustheid van het waterbeheer van het Volkerak-Zoommeer. 8 juli 2020.*
- Deltares. (2021). *Vraagarticulatie en aanzet modelinstrumentarium Spoor 2 Systeemverkenningen Zoetwater.*
- Deltares. (2021a). *Development of a 3D model for the NW European Shelf (3D DCSM-FM). Rapport 11205259-015.*
- Deltares. (2021a). *Verziltling Hollandsche IJssel en Lek. Evaluatie en systeemanalyse op basis van metingen. .*
- Deltares. (2022). *Grondwaterverziltling en watervraag bij een stijgende zeespiegel. Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II. Rapportnr 1120 039-009-BGS-0001.*
- Deltares. (2022a). *RMM 3D, een nieuw 3D model van de RijnMaasMonding in D-HYDRO. Vergelijking met zout- en debietmetingen najaar 2018. Rapport 11206813-007.*
- FutureWater. (2006). *Berekening openwaterverdamping. Opdrachtgever: Wetterskip Fryslân.*
- HKV. (2021). *Pilotfase RMM.*
- 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_redeerlijnen_volkerak_zoommeer.pdf*

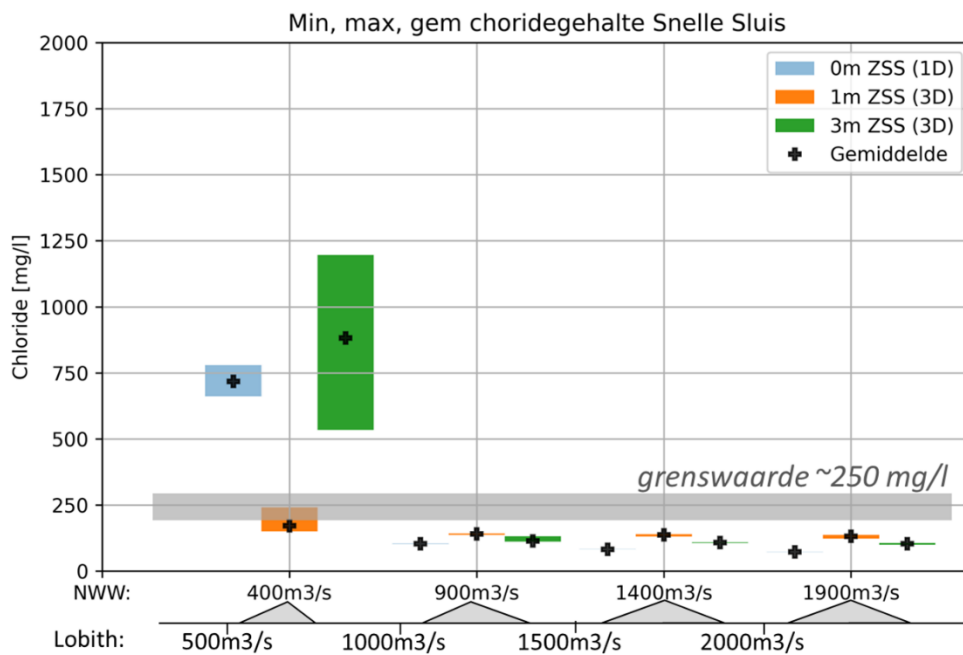
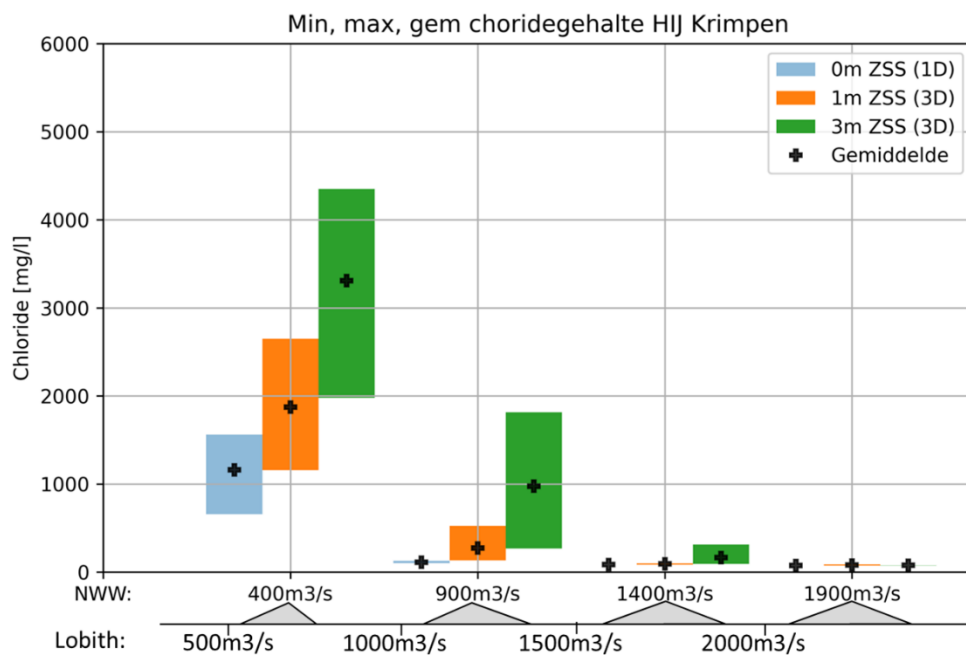
- Rijkswaterstaat. (2003). *Water- en stoffenbalans Volkerak-Zoommeer; microverontreinigingen en nutriënten 1996-2000. RIZA werkdocument 2003.204X. Projectnummer 6100.010.042. . Dordrecht.*
- Rijkswaterstaat. (2003). *Water- en stoffenbalans Volkerak-Zoommeer; microverontreinigingen en nutriënten 1996-2000. 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.*

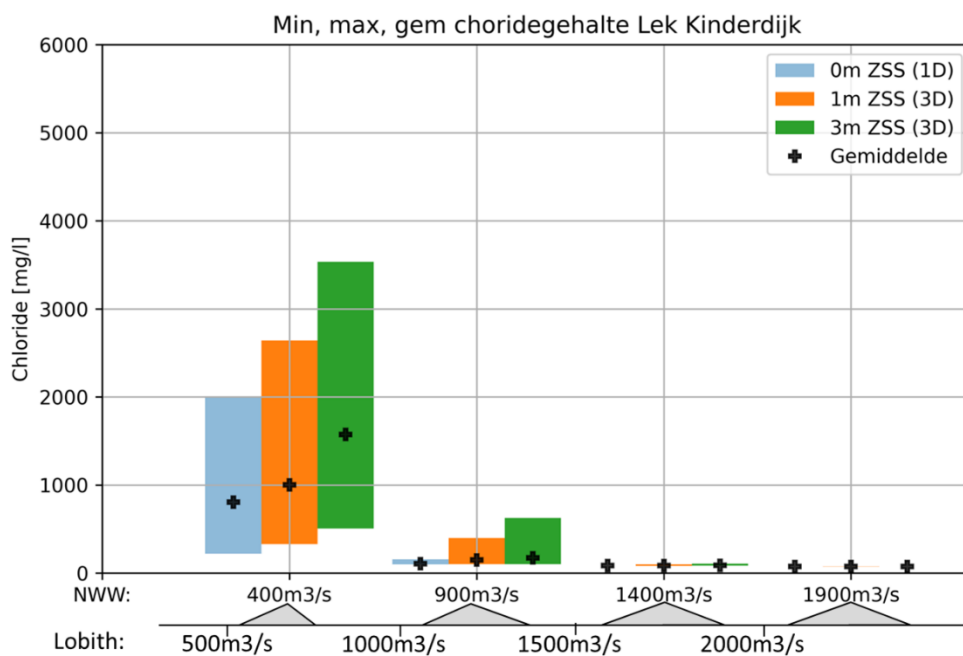
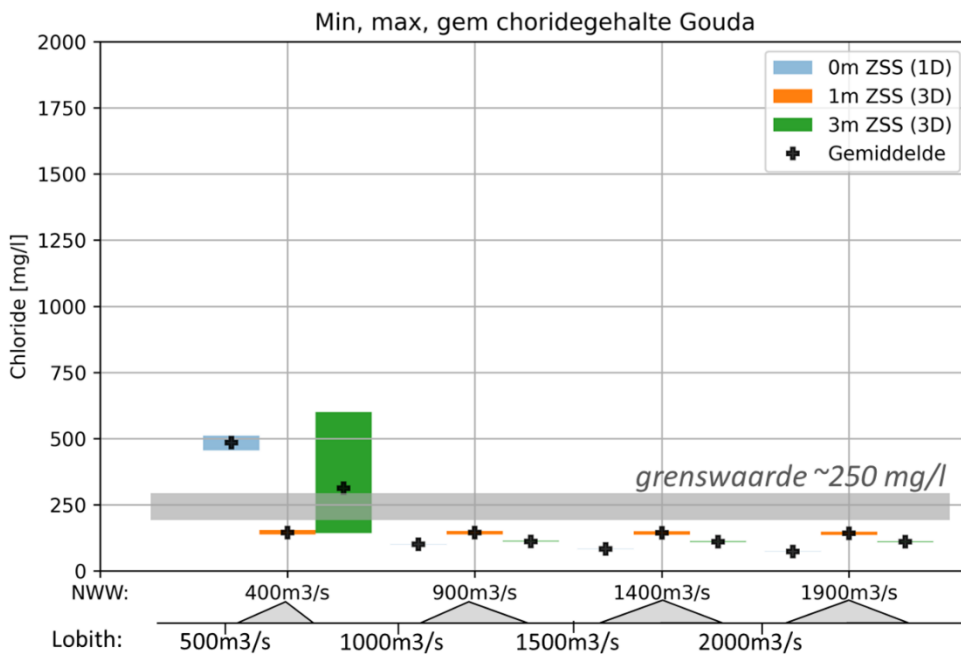
Appendix A

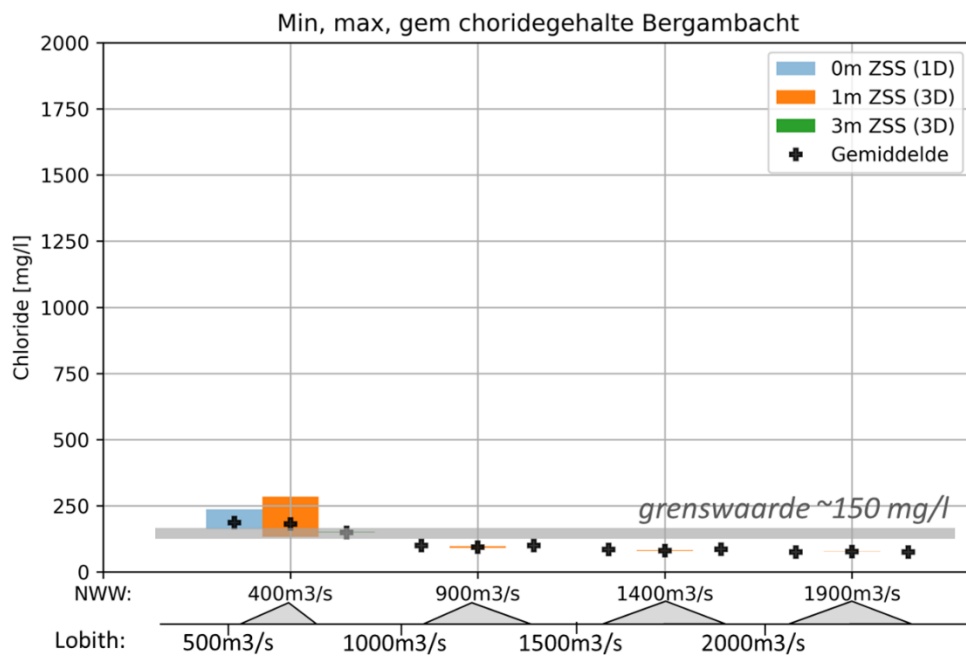
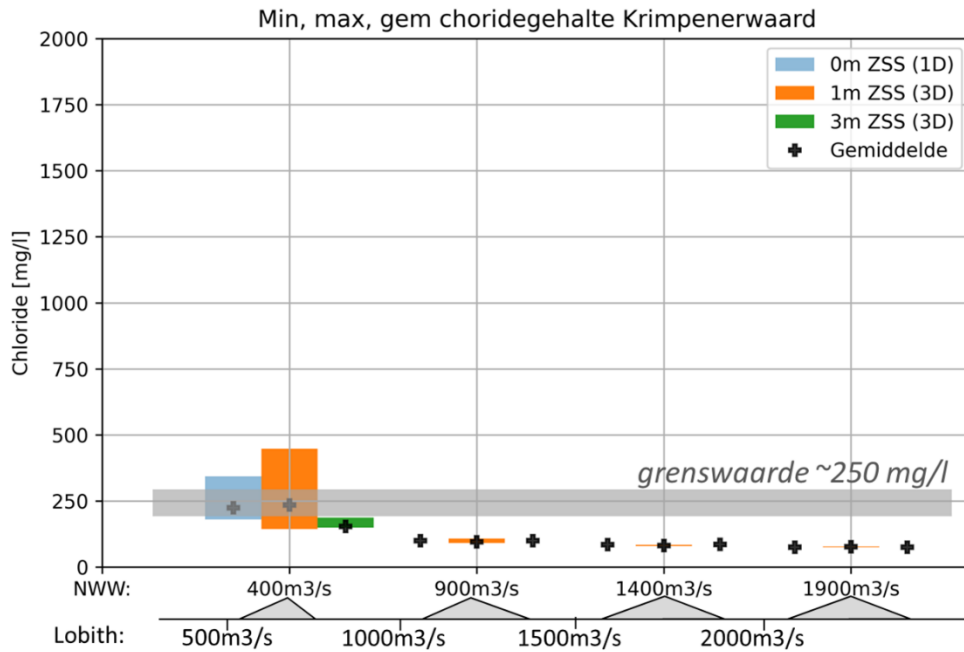
Appendix A. Effecten chlorideconcentraties RMM

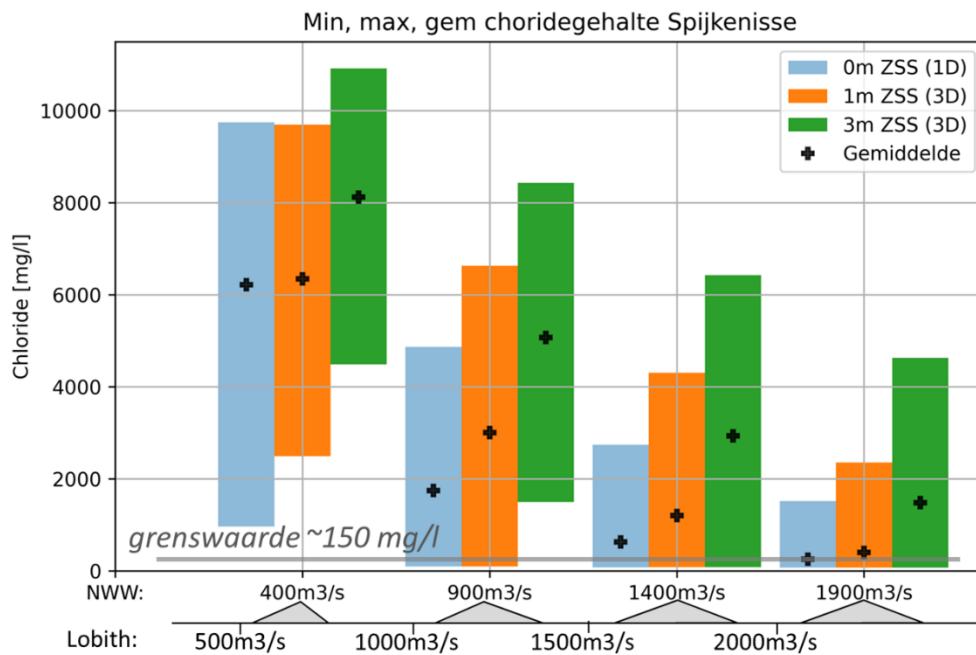
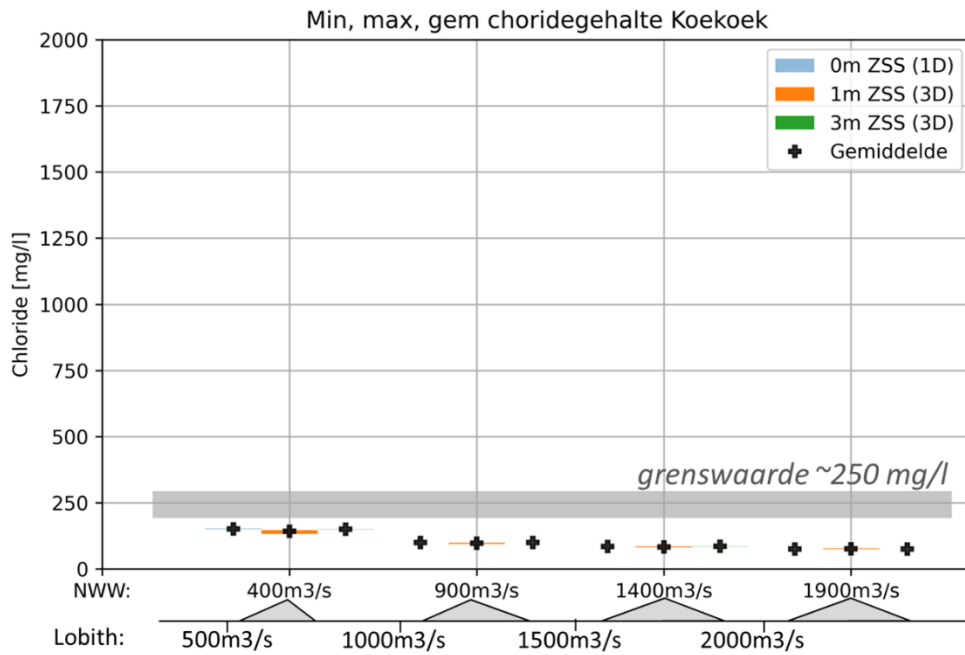


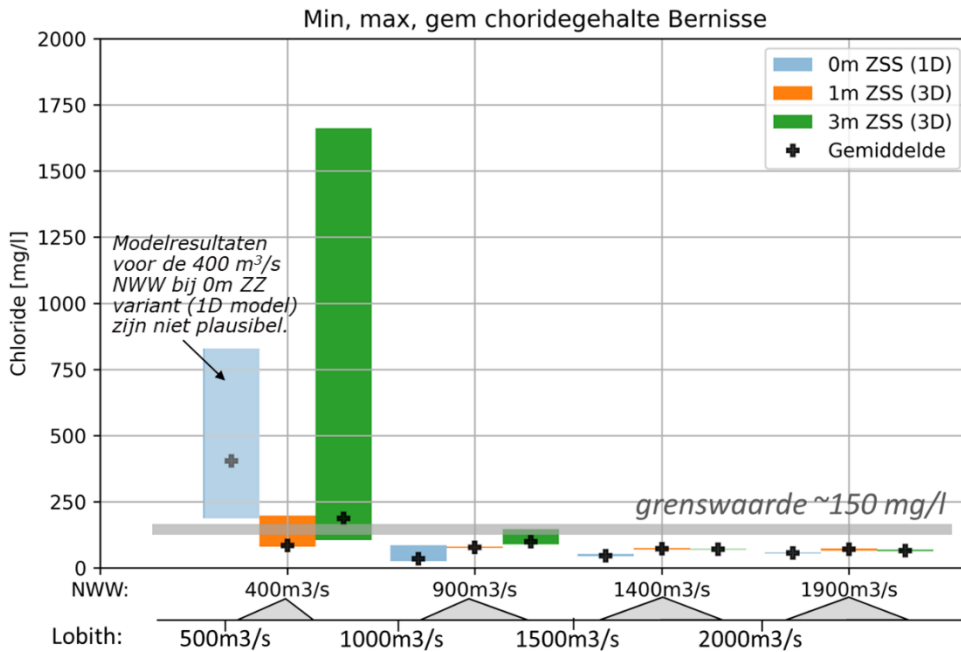
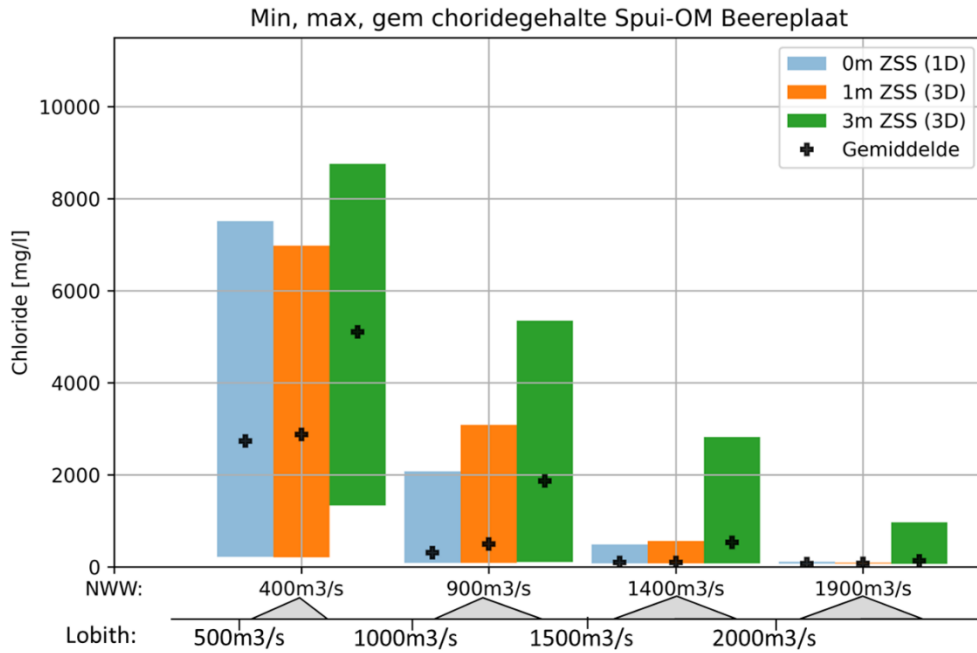


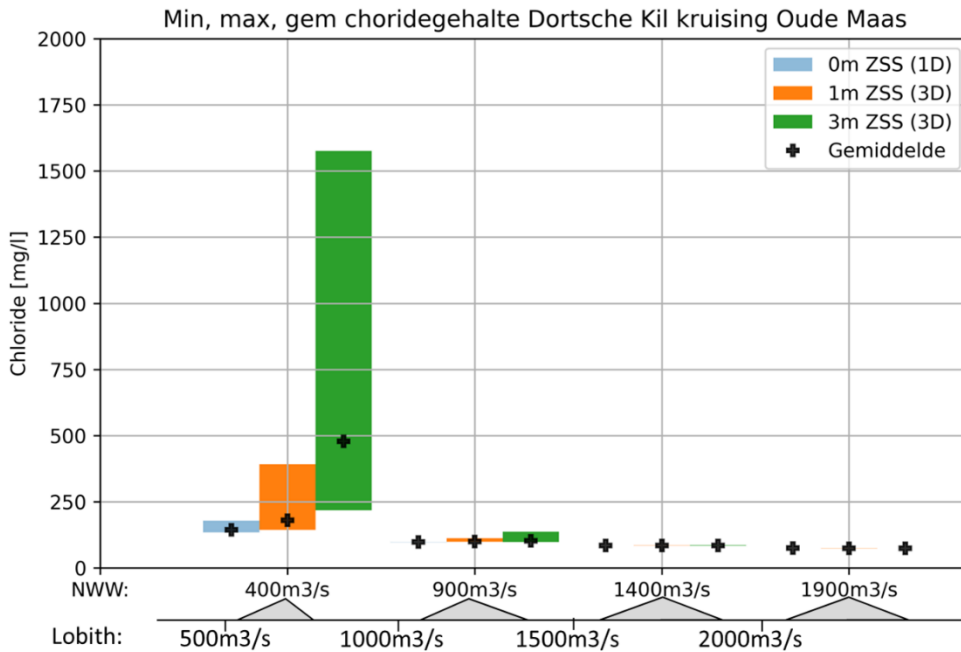
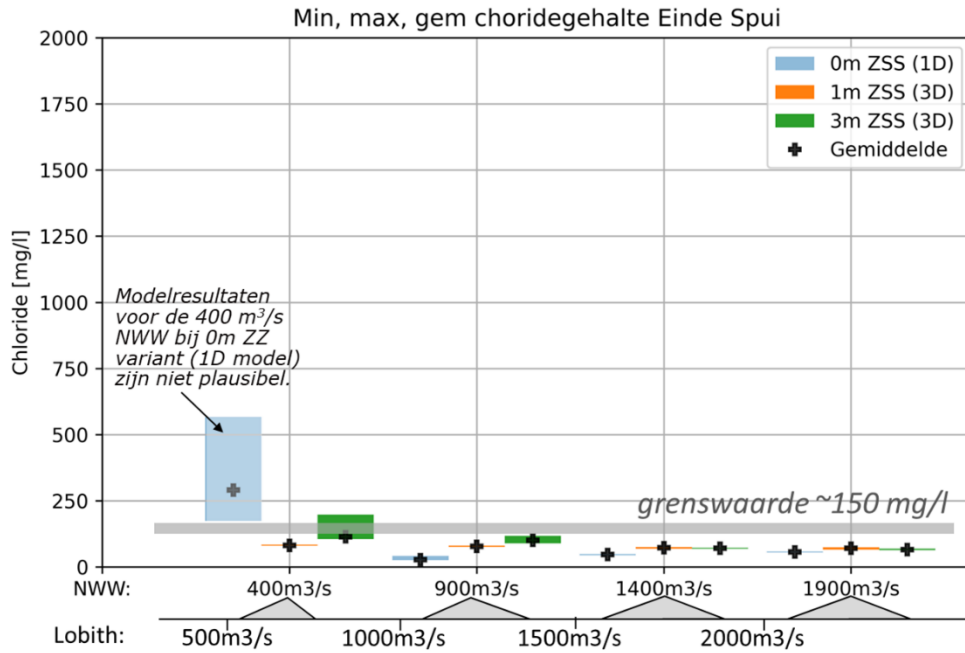


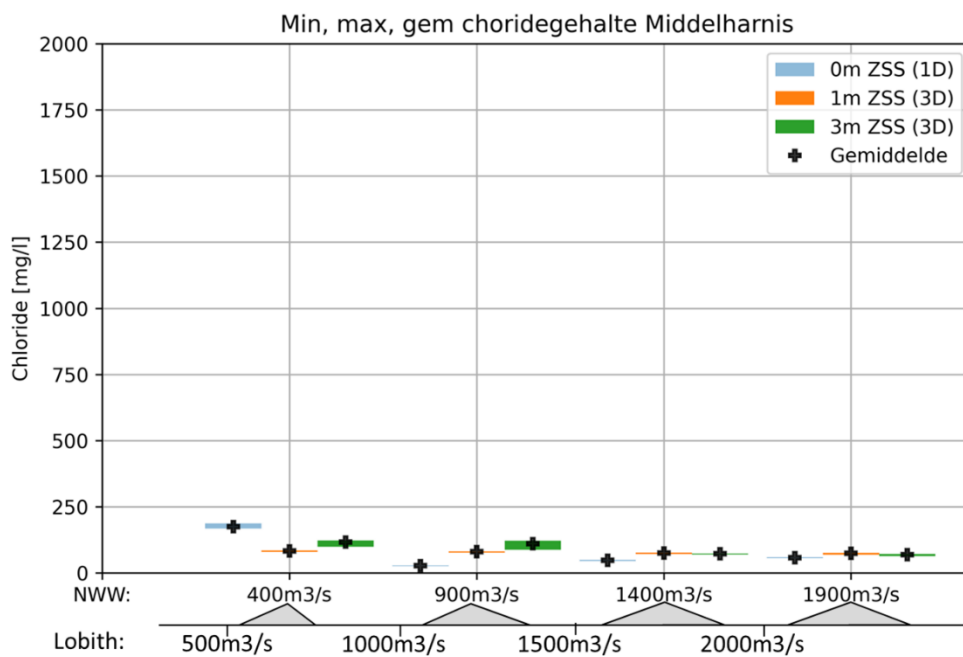
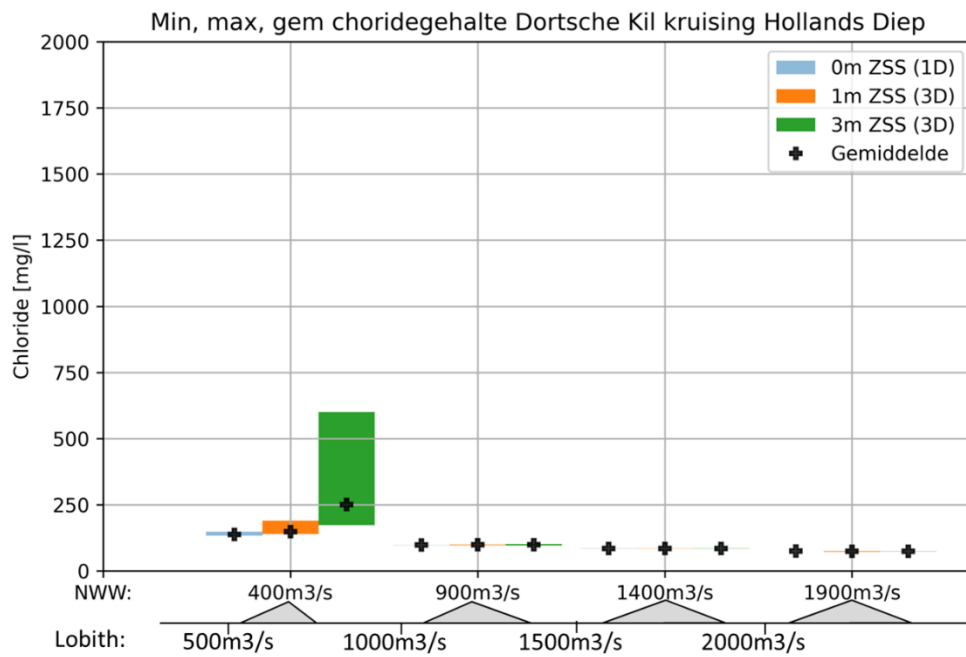


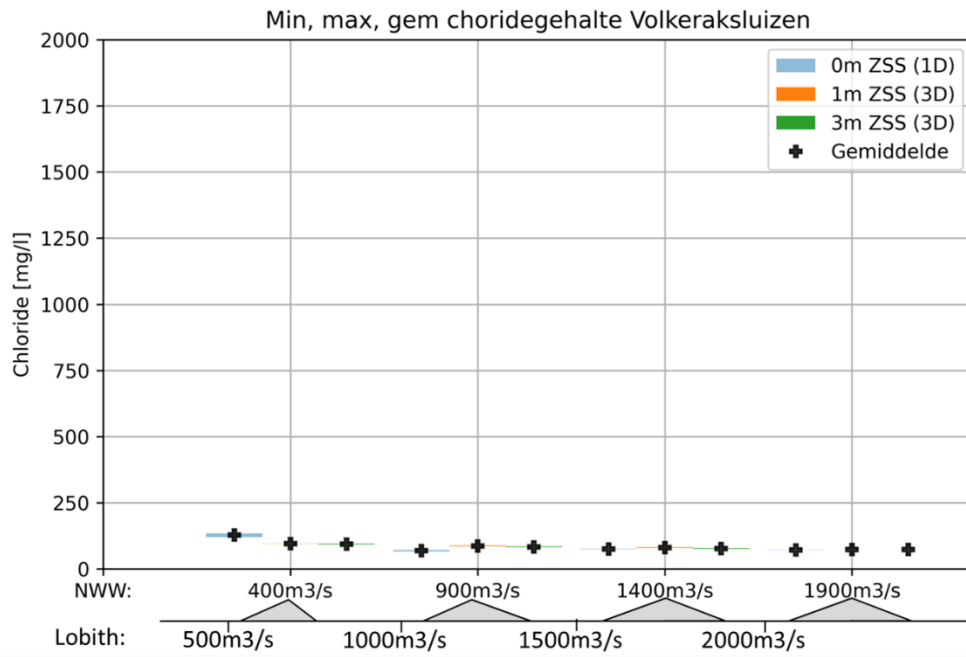






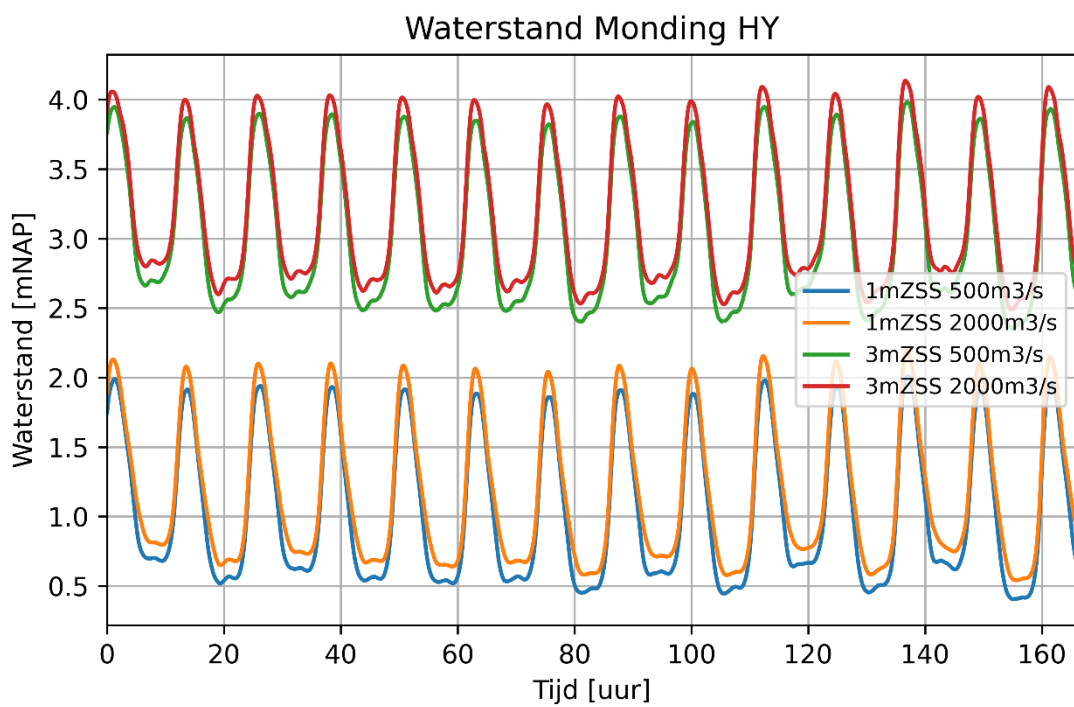
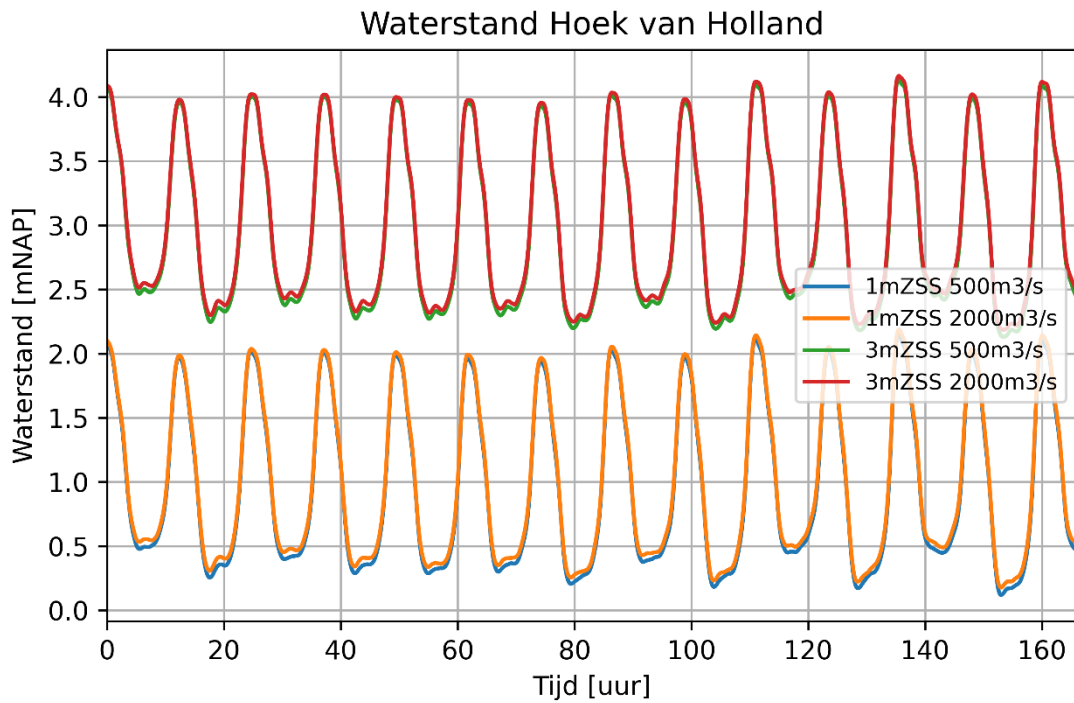




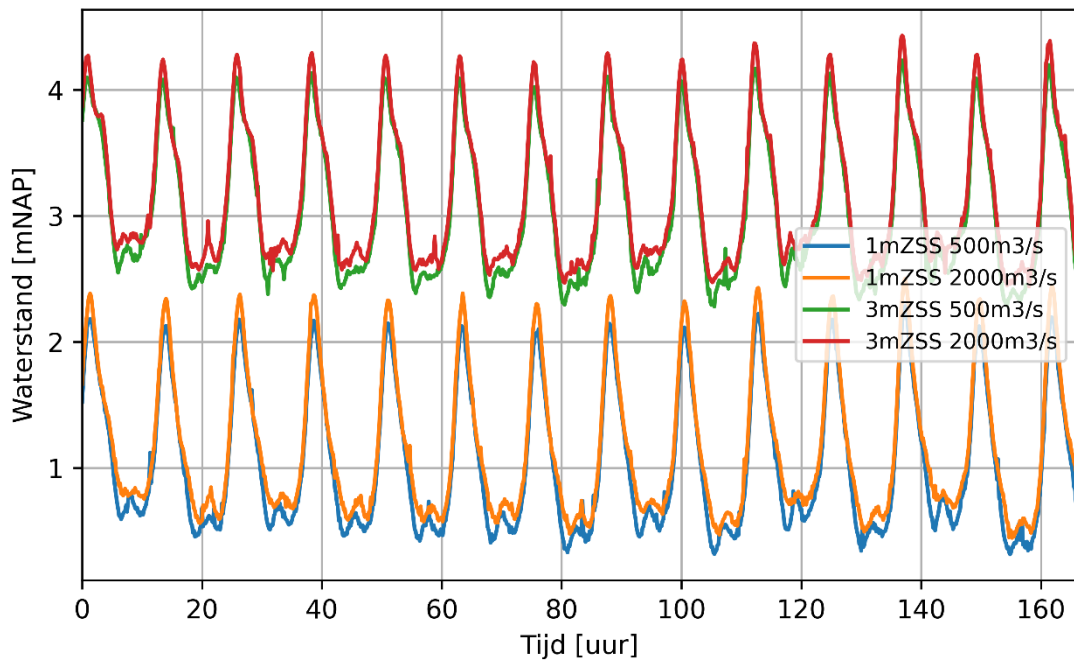


Appendix B

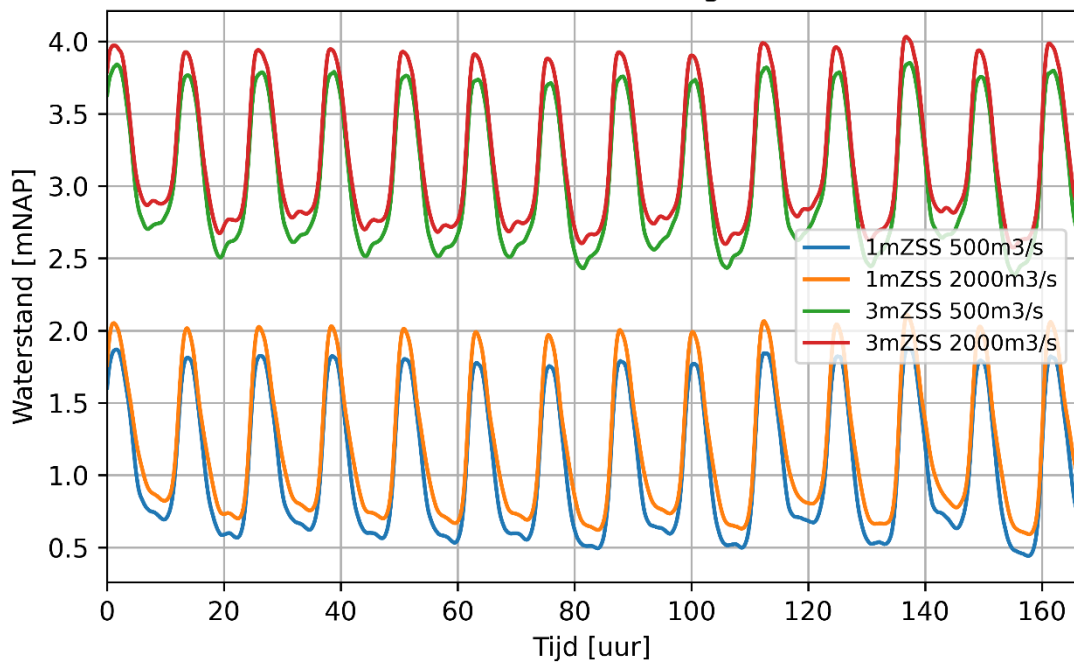
Appendix B. Effecten waterstanden RMM



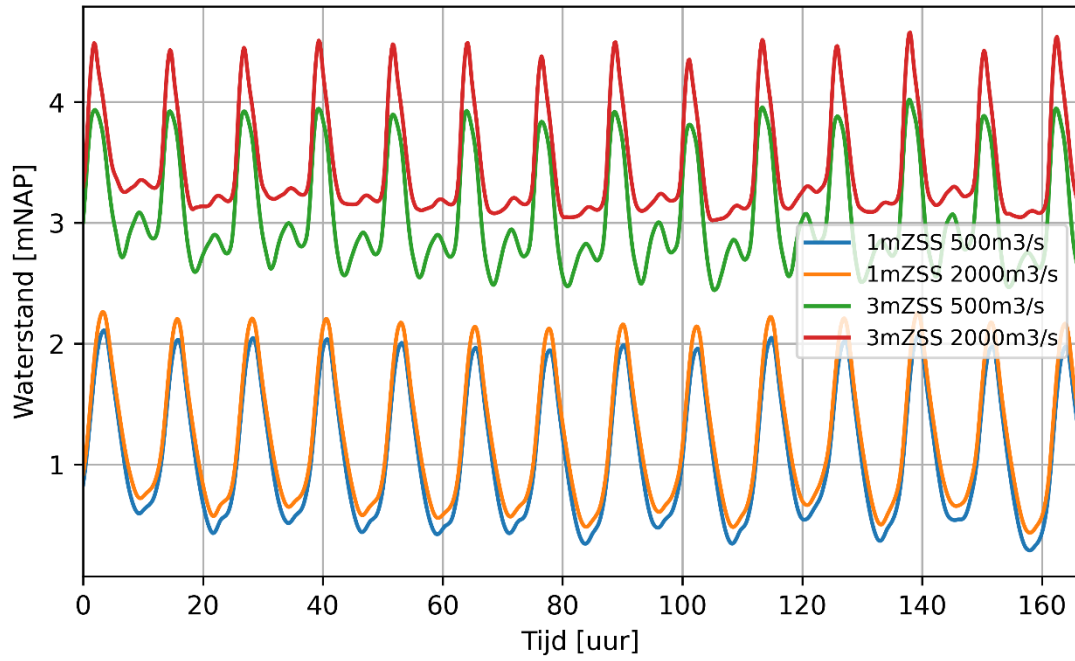
Waterstand Gouda



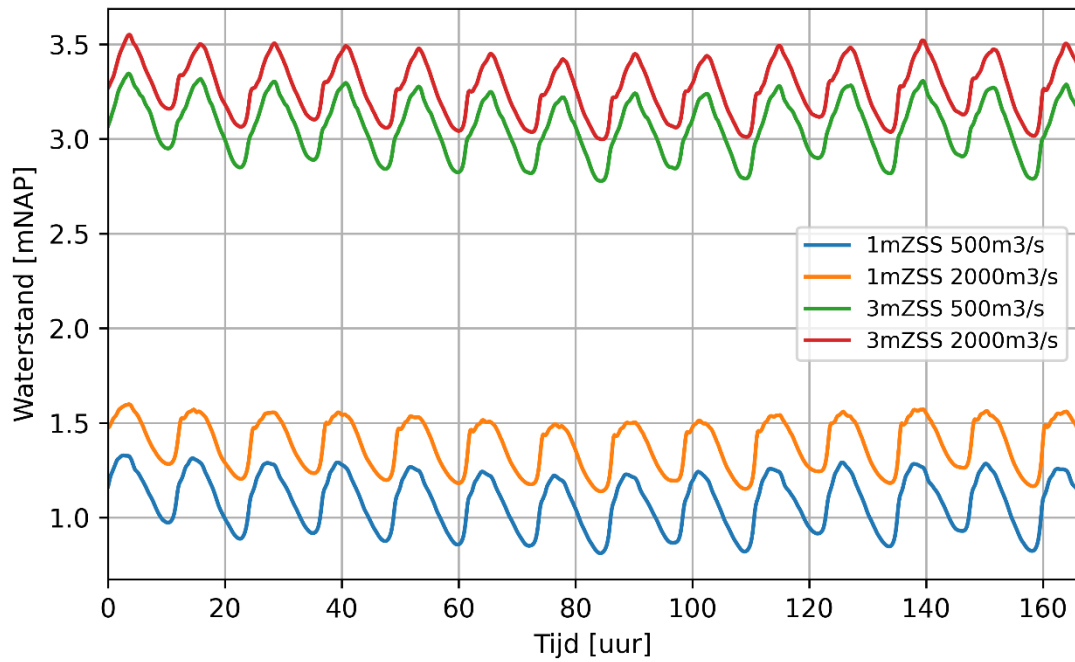
Waterstand Monding Lek

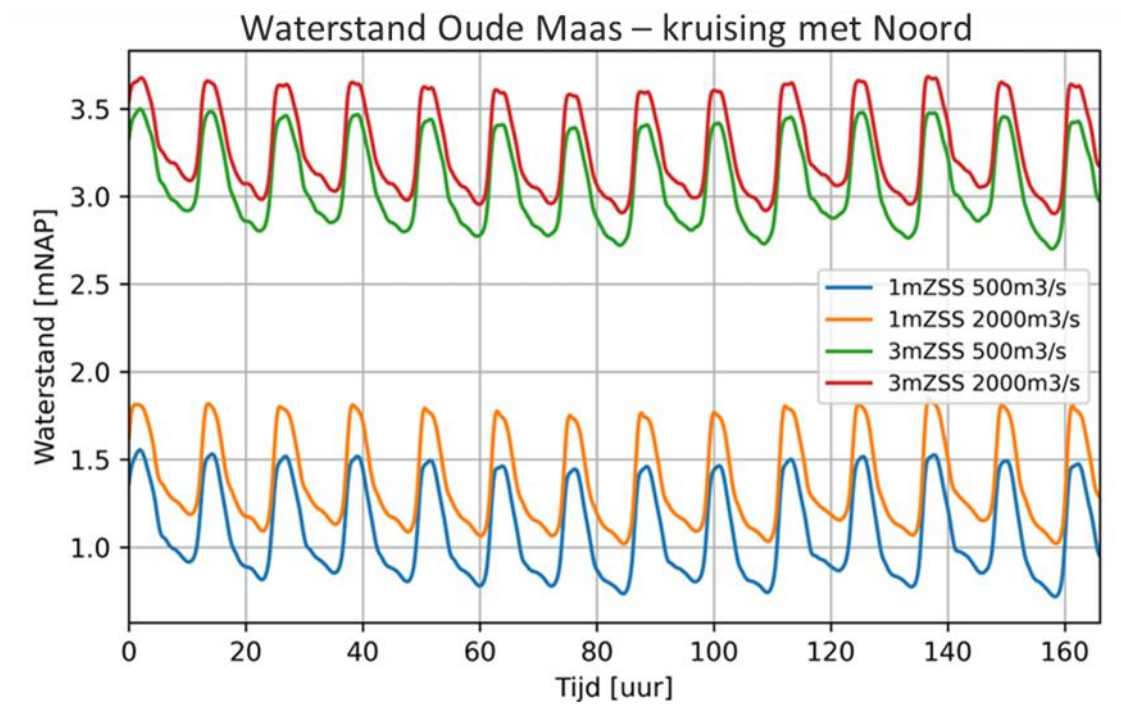
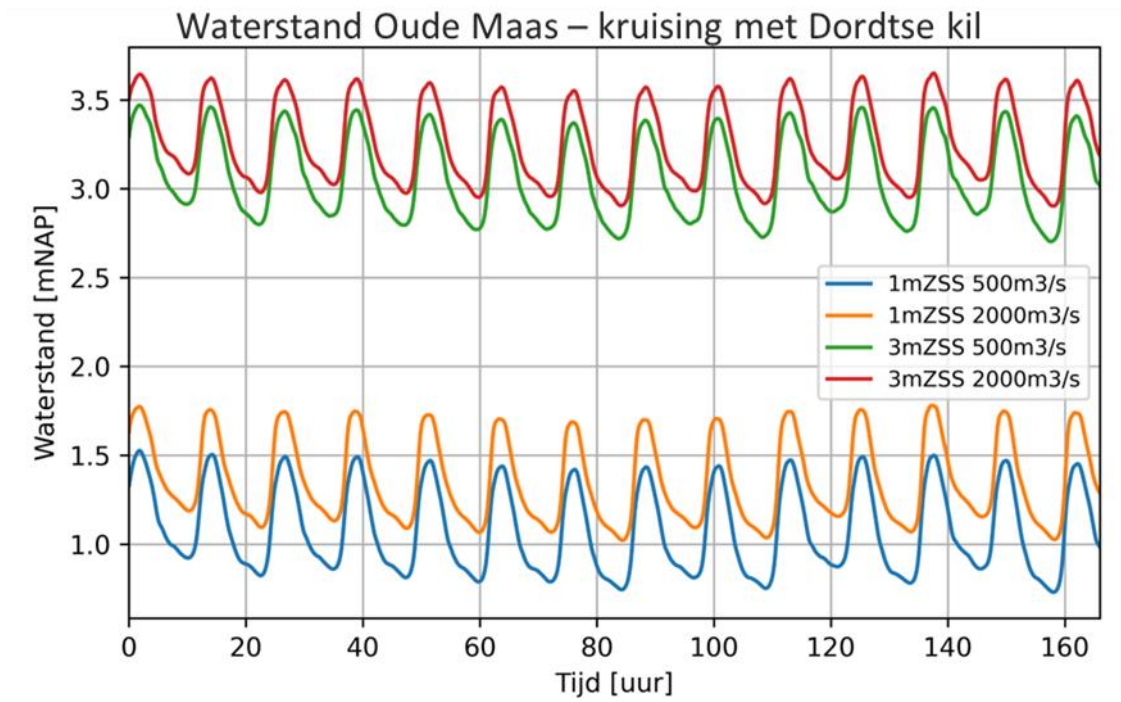


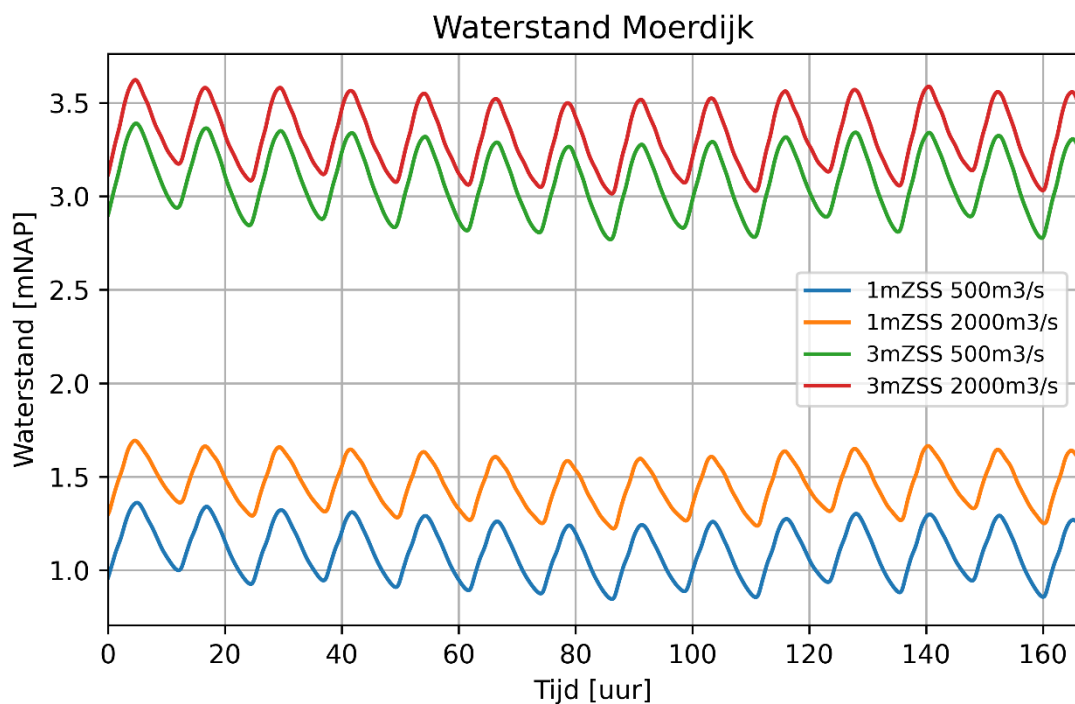
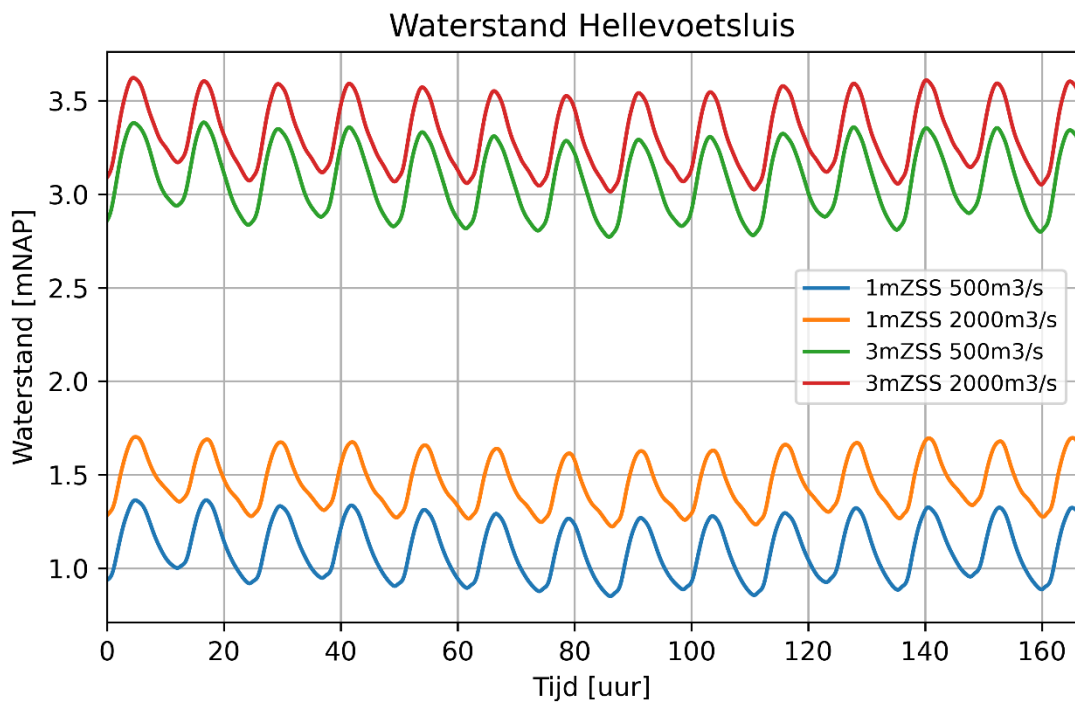
Waterstand Lek Hagestein



Waterstand Spui Bernisse







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

