

Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II

# Systeme analyses zoetwater regio Amsterdam-Rijnkanaal - Noordzeekanaal

## Colofon

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

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

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

# Systemeanalyses zoetwater regio Amsterdam-Rijnkanaal - Noordzeekanaal

19 januari 2023

**Kennisprogramma  
Zeespiegelstijging**

<b>Samenvatting .....</b>	<b>1</b>
<b>1 Inleiding .....</b>	<b>3</b>
1.1 <b>Aanleiding .....</b>	<b>3</b>
1.2 <b>Doel en kennisvragen .....</b>	<b>3</b>
1.3 <b>Modellerstrategie .....</b>	<b>4</b>
1.4 <b>Leeswijzer .....</b>	<b>4</b>
1.5 <b>Definities en afkortingen .....</b>	<b>5</b>
<b>2 Het ARK-NZK systeem .....</b>	<b>7</b>
2.1 <b>Inleiding.....</b>	<b>7</b>
2.2 <b>De huidige beheerstrategie .....</b>	<b>7</b>
2.3 <b>Overzicht systeemvariabelen .....</b>	<b>8</b>
2.3.1 Waterinlaat Systeem Irenesluizen (WIS).....	8
2.3.2 Lateralen .....	8
2.3.3 Neerslag en verdamping .....	9
2.3.4 Spui/maal complex IJmuiden.....	10
2.3.5 Schutsluizen.....	10
2.3.6 Grondwater (zoute kwel) .....	11
2.3.7 Samenvatting systeemvariabelen.....	11
<b>3 Methodiek .....</b>	<b>14</b>
3.1 <b>Inleiding.....</b>	<b>14</b>
3.2 <b>Modellerstrategie .....</b>	<b>14</b>
3.3 <b>Relevante variabelen .....</b>	<b>16</b>
3.3.1 Primaire vrijheidsgraden .....	16
3.3.2 Secundaire variabelen, gevoeligheden en losse vraagstukken .	19
3.4 <b>Afkadering en beschouwing van de relevante variabelen .</b>	<b>20</b>
3.4.1 Zoutvracht .....	20
3.4.2 Lateraal debiet, inclusief (indirecte) zoute kwel.....	24
3.4.3 Water Inlaat Systeem (WIS) Irenesluizen .....	26
3.4.4 Waterpeil ARK-NZK .....	26
3.4.5 Conclusie .....	28
3.5 <b>Systeem indicatoren.....</b>	<b>28</b>
3.5.1 Ruimtelijk: NZK .....	28
3.5.2 Ruimtelijk: ARK .....	29
3.5.3 Temporeel.....	29
<b>4 Resultaten modelberekeningen.....</b>	<b>31</b>
4.1 <b>Chlorideconcentratie ARK-NZK .....</b>	<b>31</b>
4.1.1 Chlorideconcentratie in het ARK .....	31
4.1.2 Chlorideconcentratie in het NZK.....	37
4.1.3 Relatieve gevoeligheid van het systeem .....	39
4.1.4 Conclusie .....	40
4.2 <b>Zoutflux IJmuiden .....</b>	<b>40</b>
4.2.1 Algemeen .....	40
4.2.2 Schutcomplex.....	41
4.2.3 Spui/maalcomplex .....	43
4.2.4 Conclusie .....	45
<b>5 Discussie.....</b>	<b>47</b>
5.1 <b>Modelschematisatie.....</b>	<b>47</b>

# Inhoud

5.2	Modelinvoer.....	47
5.3	Studiekader.....	48
6	Conclusies.....	50
7	Referenties.....	54
	Bijlage A.....	55



# 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, het Amsterdam-Rijnkanaal binnen de Amsterdam-Rijnkanaal en Noordzeekanaal regio (ARK-NZK).

Het modelinstrumentarium dat voor deze studie is gebruikt, is het 3D D-Hydro model voor de ARK-NZK regio (versie 2022). Dit model was vooraf aan deze studie al gebouwd en voor zowel de hydrodynamica als de saliniteit gevalideerd. Het model is primair ingezet om het ruimtelijke gedrag van het zout ten gevolge van een bepaalde combinatie van randvoorwaarden te simuleren. Voor deze studie is een set van 90 scenario's doorgerekend. Bij alle scenario's is de aanname gedaan dat de dijken en kades aan de randen van het ARK-NZK meegroeien met de zeespiegelstijging. Ten behoeve van de verkenning wordt ook aangenomen dat kunstwerken meegroeien zodat de waterbalans binnen het systeem behouden kan blijven. Binnen de beschouwde scenario's wordt het systeemgedrag geëxploreerd ten gevolge van een combinatie van een zoutvracht bij IJmuiden, een cumulatief lateraaldebiet en een bovenstrooms surplus vanuit het bovenregionaal systeem. Daarnaast ligt de focus van deze studie primair op de huidige beheerstrategie voor zowel de waterstand als het chloridegehalte.

De modeluitkomsten laten het volgende zien. De houdbaarheid van de zoet waterbuffer in het ARK is in hoge mate afhankelijk van het beschikbare zoet water surplus. Dit debiet zorgt voor directe tegendruk op de zouttong en leidt daarnaast tot extra afvoercapaciteit bij IJmuiden zodat meer zout kan worden afgevoerd binnen het spui/maaldebiet. Bij voldoende surplus is het ARK zoet te houden tot 5 m ZSS, zelfs in combinatie met een (forse) toename van de scheepvaart. Het NZK is echter minder gevoelig voor het 'zoetspoelen' met dit surplus debiet. Het principe van tegendruk geldt hier niet en extra debiet zorgt enkel voor een toename van de afvoer van zout bij het spui/maal complex. Vooral in de zomer betekent dit (verdere) verzilting van het NZK ten gevolge van ZSS en/of een toename van de scheepvaartintensiteit. Het selectief onttrekken (SO) van zout(er) water zal daarin een mitigerende rol vervullen. Zo zal bij hetzelfde afvoerdebiet doorgaans meer zout kunnen worden afgevoerd. Het systeemevenwicht, bestaande uit een zoutbelasting, een cumulatieve afvoer en een zoutwaarde op het NZK, zal zich daarmee instellen bij een lagere zoutwaarden op het NZK, uitgaande van gelijkblijvende zoutbelasting en afvoerdebiet. Dit resulteert in een lagere zoutdruk op de monding van het ARK. De werkelijke effectiviteit van de SO zal afhangen van de exacte combinatie van zoutbelasting, lateraal debiet en bovenstroomse afvoer.

Spuicapaciteit toont zich heel gevoelig voor de verandering van de zeespiegel. Zelfs bij een ZSS van slechts 0,1 m gaat al ruim een derde van de spuicapaciteit verloren. Een rekenkundige verkenning gebruikmakend van de courante afvoerrelatie voor het spuumiddel IJmuiden, laat zien dat de spuicapaciteit terugloopt als functie van de ZSS en volledig wegvalt bij een ZSS van 0,5 m. De implementatie van de SO zal dit proces versnellen waardoor bij een ZSS van 0,4 m de spuicapaciteit al verwaarloosbaar is. Ook de maalcapaciteit zal uiteindelijk af gaan nemen ten gevolge van ZSS. Initieel is sprake van een toename van de maalcapaciteit door het groeien van het maalvenster, tot circa 0,75 m ZSS. Bij een verdere stijging van de zeespiegel zal de maximale opvoerhoogte van de huidige pompen steeds vaker worden bereikt. Vanaf dat punt zal de maalcapaciteit afnemen. Als de huidige maalfuncties voor de pompen worden gehanteerd, zal de capaciteit wegvallen bij circa 3 m ZSS. In de praktijk blijkt echter nu al dat spuicapaciteit onontbeerlijk is voor een robuust beheer. Dit zou betekenen dat het huidige peilbeheer onder druk komt te staan vanaf 0,4 m ZSS.



# 1

## Inleiding



# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

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

1. Volkerak-Zoommeer (VZM), (Arcadis/Hydrologic, 2023a)
2. Rijn-Maasmonding (RMM), (Arcadis/Hydrologic, 2023b)
3. Amsterdam-Rijnkanaal en het Noordzeekanaal (ARK-NZK), (Arcadis/Hydrologic, 2023c) = voorliggend rapport
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 ARK-NZK regio (Spoor 2 -Zoet water).

## 1.2 Doel en kennisvragen

Het doel van deze rapportage is het vergroten van inzicht in de mate van houdbaarheid van de voorkeurstrategie van het ARK-NZK systeem onder extreme zeespiegelstijging (3 tot 5 meter) en in de wijze waarop die houdbaarheid eventueel is te vergroten. Dit is gedaan door middel van een modelschematisatie. Primair wordt gekeken naar de verziltingsproblematiek gerelateerd aan de fysische grootheid chlorideconcentratie. Secundair wordt er ook gekeken naar de waterstand aangezien het een peilgereguleerd systeem betreft.

De volgende kennisvragen zijn de must-have kennisvragen vanuit de vraagspecificatie die aan de voorkant van het KP ZSS, Spoor 2 - Zoet water, zijn gedefinieerd voor de regio ARK-NZK (Deltares, 2021; Rijkswaterstaat, 2021):

### A. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) waterstand, waterbeschikbaarheid en chlorideconcentratie in het ARK-NZK systeem ten gevolge van ZSS:

- **A1** Hoe verandert de chlorideconcentratie bij de monding van het ARK (Diemen) als gevolg van zeespiegelstijging? Waar ligt de 150 mg/l chloride-grens als gevolg van zeespiegelstijging en afhankelijk van rivieraanvoer?
- **A2** Hoe verloopt de chloridebalans als functie van ZSS op jaarschaal (winterspoelen, verzilten)? Hoe op korte schaal (tijdens een droogte)?
- **A3** Wat is het effect van een bellenscherm op chlorideconcentratie bij Diemen (en zuidelijker)?

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

- **B1** Hoe verandert de watervraag (doorspoelbehoefte) als gevolg van een toename van zoute kwel door zeespiegelstijging?
- **B2** Hoe verandert de zoutlast op het ARK-NZK vanuit de polders als gevolg van zoute kwel door zeespiegelstijging?
- **B3** Hoe verandert de watervraag van het ARK-NZK vanuit het Markermeer als gevolg van een toename van zoute kwel door zeespiegelstijging?
- **B4** Hoe veranderen waterstand en chlorideconcentratie in de Amstelboezem en Amsterdamse stadswateren als gevolg van zeespiegelstijging?

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

- **C1** Hoe verandert de zoutvracht door het IJmuiden-complex als gevolg van zeespiegelstijging? Wat is de (uitgaande) zoutvracht door het spui-maalcomplex incl. de selectieve onttrekking als functie van ZSS?
- **C2** Wat is het effect van de ontwikkeling van scheepvaart en bijbehorende schutbewegingen op de zoutvracht?
- **C3** Tot welke niveau van zeespiegelstijging loopt de functionele levensduur van de huidige kunstwerken?
- **C4** Hoe verandert de aan- of afvoercapaciteit van de kunstwerken als gevolg van zeespiegelstijging (o.a. onderscheid spui/maal)?

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

- **D1** Neemt zoute kwel naar het hoofdwatersysteem toe ten gevolge van ZSS?

**E. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) randvoorwaarden:**

- **E1** Hoe ver oostwaarts komt de verzilting van de RMM? Wat is de mate van beschikbaarheid van water van uit de Lek (Irenesluizen) voor het ARK-NZK systeem als functie van ZSS? Wat worden de chloridegehalten in het rivierengebied waaruit het ARK onttrekt als functie van ZSS?
- **E2** Wat is het beschikbare debiet van alternatieve aanvoeren vanuit Nederrijn-Lek, Waal, Markeermeer als functie van ZSS?

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

Voor de antwoorden op de kennisvragen over de ontwikkeling van randvoorwaarden (**E**) wordt doorverwezen naar de rapportage over het Boven Regionaal Water Verdeel Systeem (BRWVS), (Arcadis/Hydrologic, 2023e).

## 1.3 Modelleerstrategie

De houdbaarheid en oprekbaarheid van het ARK-NZK 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 vele verschillende combinaties van waarden langs de verschillende vrijheidsgraden door te rekenen. De modelleerstrategie alsmede de verkende parameterruimte van het ARK-NZK systeem, welke aan de basis ligt voor de uitgevoerde modelstudie, is in meer detail toegelicht in hoofdstuk 3.

## 1.4 Leeswijzer

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

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

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

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

Hoofdstuk 6 bevat de conclusies en aanbevelingen.

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

## 1.5 Definities en afkortingen

Definitie/afkorting	Betekenis
<b>KP ZSS</b>	Kennisprogramma zeespiegelstijging
<b>ZSS</b>	Zeespiegelstijging
<b>KZH</b>	Klimaatbestendige Zoet watervoorziening Hoofdwatersysteem
<b>VZM</b>	Volkerak-Zoommeer
<b>RMM</b>	Rijn-Maasmonding
<b>ARK-NZK</b>	Amsterdam-Rijnkanaal en het Noordzeekanaal
<b>IJM</b>	IJsselmeer-Markermeer
<b>BRWVS</b>	Het bovenregionaal waterverdelingssysteem
<b>Assen (van de hyperkubus)</b>	De systeemvariabelen die gekozen zijn om te variëren in de modelstudie. Zie ook primaire en secundaire vrijheidsgraden.
<b>Scenario</b>	Een bepaalde combinatie aan modelinvoer met de bijbehorende modeluitvoer
<b>AGV</b>	Waterschap Amstel, Gooi en Vecht
<b>HDSR</b>	Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden
<b>HHNK</b>	Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier
<b>HVR</b>	Hoogheemraadschap van Rijnland
<b>Lateraal</b>	Debiet en/of onttrekking gelegen op de systeemrand.
<b>Surplus</b>	Zoet water debiet beschikbaar voor het leveren van tegendruk tegen de zouttong in het ARK. Ook wel restdebiet genoemd. In deze studie gelijk verondersteld aan het debiet ter hoogte van Weesp.
<b>Primaire vrijheidsgraad</b>	Randvoorwaarde en/of systeempaarparameter welke van groot belang is voor het gedrag en functioneren van het systeem. Deze variabele vormt doorgaans één van de <b>assen</b> van de hyperkubus.
<b>Secundaire vrijheidsgraad</b>	Randvoorwaarde en/of systeempaarparameter welke van minder groot belang is voor het gedrag en functioneren van het systeem. Deze variabele wordt vaak constant gekozen op een representatieve waarde.
<b>ZSF</b>	ZeeSluisFormulering, tool waarmee de zoutvracht door een schutkolk kan worden bepaald aan de hand van een aantal variabelen



**2**

**Het ARK-NZK  
systeem**

## 2 Het ARK-NZK systeem

### 2.1 Inleiding

Het ARK-NZK systeem loopt van de Irenesluizen bij Wijk bij Duurstede tot aan het sluisencomplex bij IJmuiden, een lengte van circa 86 km. Het NZK beslaat hiervan 28 km. De monding van het ARK bevindt zich ter hoogte van de Amsterdamse brug. Het stuk tussen Nederrijn-Lek en Waal tot aan de Prins Bernhardsluizen (nog eens circa 12 km) wordt niet beschouwd.

Het ARK-NZK systeem heeft naast haar boezemfunctie ook een scheepvaart, afvoer en zoet waterfunctie. Vier waterschappen lozen water op en/of onttrekken water aan het ARK-NZK systeem: Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden (HDSR), waterschap Amstel Gooi en Vecht (AGV (Waternet)), Hoogheemraadschap van Rijnland (HVR) en Hoogheemraadschap Hollandse Noorder Kwartier (HHNK).

In dit hoofdstuk wordt de beheerstrategie in relatie tot het chloridegehalte en het waterpeil beschreven; wat is aanvaardbaar en wat niet (Sectie 2.2)? Daarnaast worden de systeemvariabelen, waaronder de sluiscomplexen en de lateralen, toegelicht. Ook wordt het kwalitatieve effect van zeespiegelstijging op deze variabelen beschouwd (Sectie 2.3). In Sectie 2.3.7 staat een overzicht van de systeemvariabelen en het effect van zeespiegelstijging.

### 2.2 De huidige beheerstrategie

#### **Waterbalans en waterpeil**

Het ARK-NZK systeem bevat ruim 200 balansposten, variërend van grote schutcomplexen (IJmuiden, Schellingwoude, Wijk bij Duurstede), poldergemalen tot kleine inlaten. Ook wordt het systeem gebruikt voor afvoer van water door een aantal grote RWZI's van de waterschappen en diverse industrie. Tot slot staat het grootste gemaal van Europa in IJmuiden, is er een spuisluiscomplex in IJmuiden en staat het grachtenstelsel van Amsterdam en de Amstel in open verbinding met het systeem. Dat grachtenstelsel kan overigens nog wel worden afgesloten van het systeem. Ook wordt er water ingelaten richting de polders voor landbouw, natuur, voor verversing en voor drinkwater. Het systeem is peilgereguleerd en binnen de huidige beheerstrategie is het streven om het waterpeil tussen NAP -0,53 m en -0,32 m te behouden.

#### **Chloridegehalte**

De voornaamste chloridebron voor de indringing van zout op het ARK-NZK systeem, zijn de schutsluizen bij IJmuiden. Door het dichtheidsverschil over dit schutcomplex vindt bij elke schutting een uitwisseling plaats tussen het water in de schutkolk en het water aan de zijde waar de deur open staat. Dit resulteert in een netto inname van chloride richting het NZK. Het relatief diepe NZK krijgt hierdoor een hoger chloridegehalte, wat een bepaalde chloridedruk oplevert bij de monding van het ARK. De aanvoer van zoet water vanuit het ARK en afvoer vanuit de omliggende waterschappen biedt een tegendruk. Hoever het zout indringt in het systeem, hangt primair af van de hoeveelheid chloride die er (netto) bij de sluisen binnenkomt, hoe groot de afvoercapaciteit bij IJmuiden is en hoe groot de tegendruk is vanuit het ARK. Zo zal er tijdens een droge periode een lagere hoeveelheid zoet water afgevoerd worden op het ARK vanuit de lateralen en vervolgens vanaf het ARK op het NZK, wat leidt tot minder afvoerend vermogen en minder tegendruk. Dit resulteert in een toename van de zoutinvasie.

Het chloridegehalte op het NZK wordt bepaald op basis van het 5-daags voortschrijdend gemiddelde van de chloridewaarde op een aantal meetpunten, de zogenaamde Z5 waarde die ook in de praktijk gebruikt wordt (Hydrologic, 2022). De mate van zoutinvasie op het ARK wordt beschouwd op basis van het chloridegehalte bij Diemen, eveneens in overeenstemming met de huidige praktijk.

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

Qua peilbeheer wordt het systeem het meest belast in perioden van veel en aanhoudende neerslag. Er wordt dan veel water afgevoerd op het ARK-NZK systeem, wat vervolgens weer afgevoerd moet worden naar zee via het spui/maalcomplex bij IJmuiden. Deze waterbalans komt in de toekomst, gegeven het huidige beheer, onder meer druk te staan op twee fronten. Zo bestaat de kans dat neerslag events zullen verergeren (denk aan de clusterbuien boven Zuid-Limburg in 2019). Ook zal de afvoercapaciteit van het spui/maalcomplex afnemen bij een stijgende zeespiegel.

Voor wat betreft het beheer van het chloridegehalte zijn met name (extreem) droge zomers problematisch. Er is dan minder zoet water beschikbaar vanuit de lateralen en vanuit het ARK. Dat levert minder tegendruk op het ARK en minder afvoerend vermogen van zout water bij IJmuiden. Recente droge zomers (2018 maar ook 2022) gaven al hoogoplopende chlorideconcentraties op het NZK en een toename van de intrusie in het ARK, zelfs bij aangepast beheer van het systeem. Het is de verwachting dat bij zeespiegelstijging deze nijpende situaties zullen toenemen in frequentie. Zo zal bij gelijkblijvend beheer meer zout ingenomen worden bij IJmuiden als gevolg van zeespiegelstijging en is de verwachting dat droge zomers frequenter zullen worden door klimaatverandering.

### **Respons van het systeem**

Qua peil reageert het systeem in orde uren tot dagen. Voor het zoutgehalte is dit in de orde van weken tot maanden. Deze responstijd werkt door in de gevoeligheid van het systeem voor de relevante systeemvariabelen en hoelang het duurt voor het systeem in equilibrium komt, gegeven een combinatie van 'pressures'.

In de volgende sectie worden alle systeemvariabelen die zorgen voor de in- en uitvoer van zout/water naar het ARK-NZK systeem toegelicht. Daarnaast wordt besproken wat het effect van zeespiegelstijging is op deze variabelen.

## **2.3 Overzicht systeemvariabelen**

De systeemvariabelen van het ARK-NZK systeem zijn op hoofdlijnen het inlaat debiet bij de Irenesluizen, de lateralen die lozen op en/of onttrekken aan het ARK-NZK systeem (inclusief watervraag vanuit de waterschappen), de atmosfeer, het grondwater, de onttrekking bij het spui/maal complex en de schutbewegingen bij het sluisencomplex te IJmuiden. Onderstaand worden deze systeemvariabelen in meer detail kort toegelicht; wat voor rol hebben deze variabelen in het systeem en wat is het effect van ZSS op deze variabelen?

### **2.3.1 Waterinlaat Systeem Irenesluizen (WIS)**

De Irenesluizen vormen de bovenstroomse rand van het ARK-NZK systeem. Naast het schutten van schepen is het ook mogelijk hier extra zoet water in te laten vanuit de Nederrijn-Lek wanneer dit nodig is, bijvoorbeeld in tijden van droogte om zoutintrusie te mitigeren. Dit is het Waterinlaat Systeem Irenesluizen (WIS). Doorgaans wordt hier in tijden van droogte 15 tot 30 m<sup>3</sup>/s ingelaten om bij Weesp een daggemiddeld debiet te garanderen van ten minste 25 m<sup>3</sup>/s. Bij (extreme) aanhoudende droogte kan het WIS-debiet opgevoerd worden tot daggemiddeld maximaal 80 m<sup>3</sup>/s, zo waren er in de zomer van 2022 perioden waar 's nachts tot wel 95 m<sup>3</sup>/s werd ingelaten. Nota bene: vanaf 30 m<sup>3</sup>/s is de volledige inzet van een sluiswolk nodig en treedt belemmering van de scheepvaart op.

### **2.3.2 Lateralen**

Zoals al eerder benoemd, zijn er veel lateralen die aantakken op het ARK-NZK systeem in de vorm van een lozing of onttrekking. De meest voorkomende vormen zijn gemalen, stuwen, (spui)sluizen, RWZI's en waterinname punten (inlaten). Het voert te ver om in te gaan op individuele lateralen, maar het is wel essentieel om in te gaan op de locatie. Het restdebiet (gedefinieerd als de lozingen minus de onttrekkingen) bovenstrooms van de zouttong vervult namelijk een dubbele rol; enerzijds zorgt dit debiet voor een zoete tegendruk op de zouttong in de monding van het ARK, anderzijds is dit debiet beschikbaar om af te voeren bij IJmuiden en daarmee zout uit het systeem te onttrekken. Het restdebiet dat het ARK-NZK opkomt

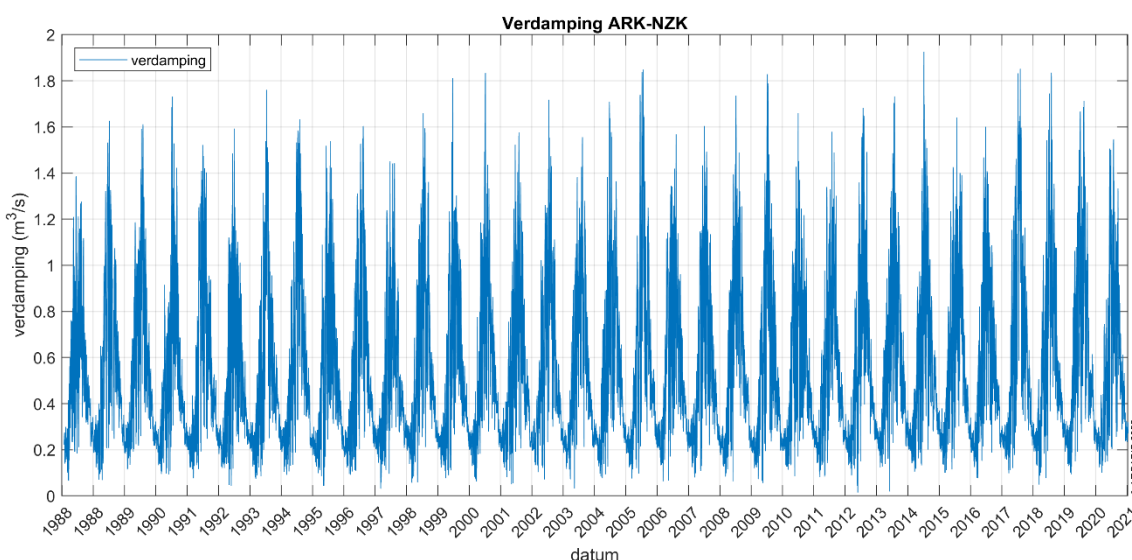
benedenstreams van de zouttong is enkel beschikbaar om zout water af te voeren bij IJmuiden.

Vier waterschappen gebruiken water van het ARK-NZK systeem: HDSR, AGV (Waternet), Rijnland en HHNK (marginaal). De directe watervraag vanuit de waterschappen bevat onttrekking ten behoeve van het peilbeheer, beregening en doorspoeling. Daarnaast zijn er meerdere onttrekking ten behoeve van drinkwatervoorziening. Ook de Klimaatbestendige Water Aanvoer (KWA) is een belangrijke post.

Belangrijke onttrekkingen zijn te vinden bij Nieuwersluis (drinkwatervoorziening, à 2,3 m<sup>3</sup>/s), bij gemaal De Aanvoerder en het Noordergemaal (KWA, à 7 en 6 m<sup>3</sup>/s) en bij gemaal De Doorslag (drinkwatervoorziening, à 4,4 m<sup>3</sup>/s). Daar bovenop komt nog de watervraag voor peilbeheer, beregening en doorspoeling. In een droge periode is deze cumulatieve watervraag al snel circa 30 m<sup>3</sup>/s (volgens opgave van Waternet/AGV, persoonlijke communicatie Tijsen, 2022). De totale piekwatervraag in een droge periode kan daarmee oplopen tot 50 m<sup>3</sup>/s en zal naar verwachting groeien door combinatie van factoren zoals een toename van de verdamping, doorspoeling om zoute kwel weg te spoelen, drinkwater, functieveranderingen en het nieuwe veenweidebeleid. Belangrijk om op te merken is dat deze onttrekkingen bovenstreams van de zouttong zullen plaatsvinden omdat voor alle doeleinden een chlorideconcentratie van <370 mg/l vereist is en voor sommige doeleinden, zoals drinkwater, zelfs <150 mg/l.

### 2.3.3 Neerslag en verdamping

Het ARK-NZK is een relatief 'slank' systeem vergeleken bij andere zoet waterbuffers in Nederland. Het totale oppervlak is daarmee beperkt tot circa 28,8 km<sup>2</sup> of 39,0 km<sup>2</sup> als de AGV-boezem wordt meegerekend. Dit oppervlak is minder dan de helft van het VZM en minder dan 4% van het IJM. De bijdrage van directe neerslag (en verdamping) op het ARK-NZK is daarmee beperkt, zo geeft 1 mm regen op het systeem zelf een volume van nog geen 40.000 m<sup>3</sup>. Een korte verkenning leert dat de verdamping in drogere periodes gemiddeld 1,5 m<sup>3</sup>/s bedraagt (zie Figuur 1). Onderstaande verdamping is berekend volgens de methodiek in (FutureWater, 2006).



Figuur 1 Daggemiddelde verdamping voor het totale ARK/NZK systeem, periode 1988 - 2021.

Echter, het neerslag afstroomareaal naar het ARK-NZK systeem bedraagt bijna 2300 km<sup>2</sup> als alleen gekeken wordt naar directe afwatering en zelfs 4000 km<sup>2</sup> als ook indirecte afwatering wordt meegenomen (Rijkswaterstaat, 2004). Indirecte afwatering vindt hoofdzakelijk plaats via het Markermeer. Bij een verzadigde bodem, resulteert 1 mm neerslag over een zekere tijdsperiode in een volume van 40 miljoen m<sup>3</sup> op het systeem. Mocht dit niet binnen diezelfde periode afgevoerd kunnen worden, zou dit leiden tot een waterstandsverhoging van circa 9 cm op het ARK-NZK systeem. Het is daarmee niet nodig geacht om neerslag en verdamping die direct op het ARK-NZK valt mee te nemen. In deze studie wordt alleen de neerslag en verdamping meegenomen die in het afstroomareaal van het ARK-NZK systeem valt, middels lateralen. Tot slot werkt dit ook door in de eisen die gesteld worden aan een robuuste afvoermogelijkheid, zodanig dat peilbeheer mogelijk blijft.

### 2.3.4 Spui/maal complex IJmuiden

Het spui/maal complex bestaat uit een 7-tal spuiokers en een 6-tal pompen. Afhankelijk van de waterstand buiten kan tot 760 m<sup>3</sup>/s worden afgevoerd en bij calamiteiten tot 960 m<sup>3</sup>/s (Rijkswaterstaat, 2004).

De afvoer van de spuiokers kan als volgt worden beschreven met de afvoerrelatie:

$$Q = 1250 * \sqrt{\Delta H - 0,12},$$

waarbij Q de afvoer is en  $\Delta H$  het verval tussen het NZK en de zee. Doorgaans wordt niet meer gespuid dan 500 m<sup>3</sup>/s, maar in een hoogwatersituatie op het NZK kan worden gespuid tot 700 m<sup>3</sup>/s, op basis van beschikbaar verval. In uitzonderlijke gevallen kunnen ook de omloopriolen van de Noordersluis worden ingezet om tot 160 m<sup>3</sup>/s te spuien.

Het gemaal bestaat uit 4 pompen met een afvoer van 40 m<sup>3</sup>/s en een opvoerhoogte tussen de 0 en 2,3 m, aangevuld met 2 pompen met een nominale afvoer van 50 m<sup>3</sup>/s en een opvoerhoogte tussen de -0,2 en 2,7 m. Theoretisch kan er daarmee tot 260 m<sup>3</sup>/s worden afgevoerd. Wat exact verpompt kan worden is afhankelijk van de benodigde opvoerhoogte en de dichtheid van het verpompte water. Belangrijk om te benoemen is dat, in tegenstelling tot de spui mogelijkheden, de maalcapaciteit initieel zal toenemen ten gevolge van ZSS door het groeien van het maalvenster. Dit is in paragraaf 3.4.4.2 verder toegelicht.

### 2.3.5 Schutsluizen

#### 2.3.5.1 Complex IJmuiden

Het schutcomplex IJmuiden bestaat sinds april 2022 uit de Zeesluis IJmuiden, de Noordersluis, de Middensluis, de Zuidersluis en de Kleine sluis. Voor elke schutkolk geldt dat een volledige schutbeweging een zekere chloridelast vormt op het NZK. De chloridelast per schutkolk per schutting is een functie van primair de zoutgradiënt over de schutkolk, het oppervlak van de schutkolk, de drempel diepte en de schutschijf. De totale chloridelast per tijdseenheid volgt dan uit hoe vaak geschut wordt per kolk en hoelang de sluisdeuren openblijven. Voor de oplevering van de Zeesluis IJmuiden, was de Noordersluis verantwoordelijk voor 90% van de totale chloridelast op het systeem (Verbruggen & Van der Baan, 2020). Na ingebruikname van de Zeesluis zal het aandeel van de Zeesluis en de Noordersluis tezamen liggen op circa 95% (Arcadis, 2022), afhankelijk van de verdeelsleutel over de kolken.

#### 2.3.5.2 Overige sluizen

Ook verder bovenstrooms wordt het ARK-NZK afgebakend door scheepvaartsluizen. Zo zijn er de scheepvaartsluizen bij Schellingwoude die het Binnen-IJ (west) verbinden met het Buiten-IJ (oost). Vanwege het relatief kleine effect op de water- en zoutbalans, wordt deze interactie meegenomen met een representatieve waarde.

Tot slot zijn er twee sluizencomplexen die het Amsterdam-Rijnkanaal verbinden met de Lek (Prinses Beatrixsluizen en de Prinses Irenesluizen). Deze sluizen leveren geen bijdrage aan de zoutlast en worden daarom hier niet meegenomen. NB: het inlaatdebiet bij de Irenesluizen staat hier los van, zoals beschreven in paragraaf 2.3.1.



### 2.3.6 Grondwater (zoute kwel)

Zoute kwel komt via het grondwater in het afstroomareaal van het ARK-NZK systeem. Met zeespiegelstijging is de verwachting dat de zoute kwel meer landinwaarts trekt en daarnaast ook toeneemt. Deltares heeft een modelstudie gedaan naar het effect van ZSS (van 0 t/m 3 m) op zoute kwel met het Landelijk Hydrologisch Model (LHM), (Deltares, 2022). Hieronder is samengevat wat hieruit geconcludeerd kan worden ten behoeve van de directe zoute kwel en de indirecte zoute kwel.

#### **Directe zoute kwel**

De directe zoute kwel is de zoutvracht die via het grondwater direct het ARK-NZK systeem betreedt. Met name relevant in de regio IJmuiden. Hoewel hier wel een toename te verwachten is als functie van de zeespiegelstijging, valt deze in het niet bij de reeds aanwezige zoutlast à 1000 kg/s door met name schutten; van 0,01 kg zout per seconde bij 0 m ZSS tot 0,04 kg zout per seconde bij 3 m ZSS. Dit is begrijpelijk aangezien het relatief kleine interactievlak en de relatief lage lokale zoutgradiënt.

#### **Potentiële indirecte zoute kwel**

Indirecte zoute kwel is in deze studie gedefinieerd als de zoutvracht die via het grondwater in de kleine lateralen beland en vervolgens via de kleine lateralen in het ARK-NZK systeem beland. Uit (Deltares, 2022) is geen significante toename van de verzilting van het grondwater van het afstroomareaal van het ARK-NZK systeem zichtbaar. De bijdrage van indirecte zoute kwel is daarmee niet direct te kwantificeren. Wel zal in de studie gekeken worden naar de gevoeligheid van het systeem voor verzilting van de lateralen in de vorm van een 'wat-als'-analyse.

De relatie tussen de watertoevoer vanuit het grondwater in relatie tot zeespiegelstijging is niet beschouwd binnen deze studie.

### 2.3.7 Samenvatting systeemvariabelen

In de onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de geselecteerde systeemvariabelen en het effect van zeespiegelstijging op deze variabelen (Tabel 1). Ook is aangegeven of het gaat om een variabele die resulteert in een ingaand debiet/zoutvracht (+) of een uitgaand debiet/zoutvracht (-). Daarnaast zijn de *pressures* aangegeven op deze variabelen. DE derde kolom in onderstaande tabel vat daarmee kort samen wat het directe en indirecte effect is van zeespiegelstijging op de variabelen.

Tabel 1 De systeemvariabelen van het ARK-NZK systeem en het effect van zeespiegelstijging (ZSS) op deze variabelen.

	Variabelen	In/uit	Effect van ZSS
Watertoevoer	Inlaatdebiet WIS	+	Geen, tenzij water in een andere regio nodig is
	Surplus of 'restdebiet' bovenstrooms zoutong	+	Geen, tenzij water in een andere regio nodig is (mogelijk nieuwe KZH-maatregel ARK-route Markermeer)
	Surplus of 'restdebiet' benedenstrooms zoutong	+	Geen
Atmosfeer	Neerslag	+	Geen
	Verdamping	-	Geen
Spui/maal complex IJmuiden	Spuicapaciteit	-	Afname van spuicapaciteit door afname verval over spuimiddel
	Maalcapaciteit	-	Eerst toename door vergroot maalvenster, daarna afname en later wegvallen door toename benodigde opvoerhoogte
Sluizen	Zeesluis IJmuiden	+	Toename chloridelast door schuttschijf, eventuele toename gradiënt
	Noordersluis	+	
	Overige sluizen	+	Verwaarloosbaar tot geen
Grondwater	Debiet grondwater	+/-	<i>Niet beschouwd binnen deze studie</i>
	Zoute kwel	+/-	Verwaarloosbaar
Watervraag	Waterschappen	-	ZSS en dus zoute kwel zal weinig tot geen effect hebben op de polders rondom het ARK. De watervraag kan wel toenemen door andere factoren zoals: drinkwater, functieveranderingen en het nieuwe veenweidebeleid.
	KWA	-	De verwachting is dat ZSS direct of indirect zal leiden tot een meer frequente inzet van de KWA of zelfs vergroting van de KWA.



# 3

## Methodiek

## 3 Methodiek

### 3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de methodiek en achterliggende strategie achter de modelstudie voor de ARK-NZK regio binnen het KP ZSS KZH programma. Bij de start van de studie is besloten primair gebruik te maken van het bestaande 3D D-Hydro model van deze regio, inclusief de schil met *scripts en tooling* eromheen, ter ondersteuning van de systeemanalyse<sup>1</sup>. Dit in plaats van de eerder beoogde aanpak (in combinatie) met een zogenaamd bakjesmodel. De complexiteit van de zoutdynamica in het ARK-NZK systeem en de relatieve korte rekentijd van het 3D model plus de ondersteunende scripts, gaven de doorslag bij deze beslissing. In dit hoofdstuk wordt daarom met name gefocust op een inventarisatie van relevante systeemvariabelen. Middels een weging op basis van relatieve impact van deze variabelen, is een afweging gemaakt tussen primaire vrijheidsgraden, welke in meer detail zullen worden onderzocht, en secundaire variabelen, waarvan beperkter de gevoeligheid wordt geïnventariseerd of waarbij het zelfs niet (direct) nodig is om ze met het 3D model te onderzoeken. Bijvoorbeeld omdat een simpele (balans)berekening of bestaande literatuur voldoende steun biedt. Deze methodiek is primair voortgekomen uit bestaande kennis en gedurende de sprints binnen de studie en expertsessies aangepast op basis van voortschrijdend inzicht. De hier beschreven methodiek is de finale versie.

### 3.2 Modelleerstrategie

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

Om deze beperkingen het hoofd te bieden, is gekozen voor gevoeligheidsanalyses waarin deze factoren onafhankelijk van elkaar gevarieerd worden om de kwetsbaarheid onder verschillende combinaties van omstandigheden in beeld te brengen ('wat-als aanpak'). Er is ervoor gekozen de effecten van zeespiegelstijging door te rekenen voor bepaalde vaste zichtwaarden van de zeespiegel boven het huidige niveau (tussen 0m en +5 m) en niet om het tijdpad 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.

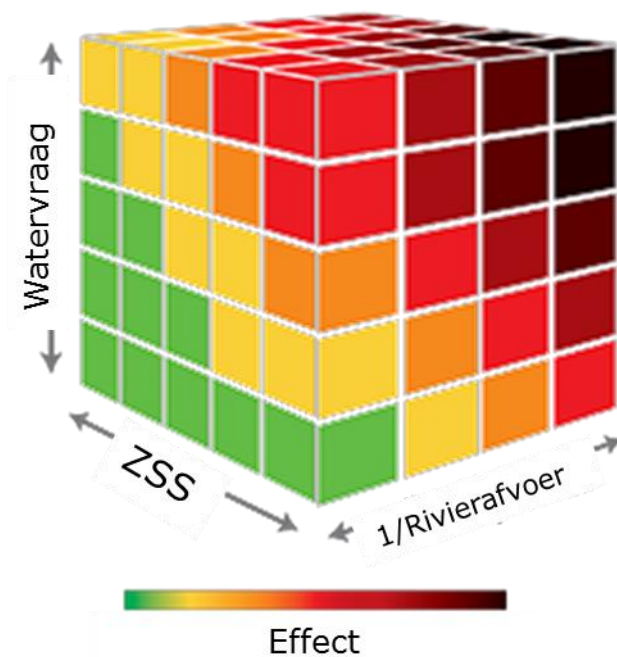
In Figuur 2 wordt geschetst hoe de 'wat-als' vragen in de vorm van een gevoeligheidsanalyse eruit kunnen zien voor variatie van de 3 hoofdfactoren zeespiegel, watervraag aan de zoetwaterbuffer en wateraanbod via de rivieren. Een zoekruimte van hogere dimensie (een zogenaamde hyperkubus) is voorstelbaar waarbij ook de gevoeligheid voor

---

<sup>1</sup> Het betreft hier specifiek de vraagstukken omtrent saliniteit. Voor het beantwoorden van de vragen in relatie tot waterverdeling en peilbeheer is het niet nodig om het 3D model in te zetten, maar zijn (simpele) balansberekening of in het uiterste geval het SOBEK 1D model toereikend.

stysteemparameters (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 2 Schets van de voorgestelde gevoeligheidsanalyse in matrixstructuur waarin de hoofdassen de te onderzoeken factoren (als randvoorwaarden, systeemparameters) weergeven en de kleuren de waterstaatkundige effecten en in termen van nader te definiëren indicatoren.*

In de modeloefening worden de primaire variabelen als een constante flux (semi-stationair) aan het model opgelegd, niet als variabele tijdreeksen. 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 tijdreeksen maakt de analyse en interpretatie van modelresultaten veel complexer. Dit heeft meerdere oorzaken:

- de herkomst van zout in een complexe tijdreeks is vaak niet meer te achterhalen;
- het gebruik van tijdreeksen op basis van bestaande data is niet echt realistisch omdat er op grotere tijdschalen en in de toekomst gekeken wordt;
- het verzinnen van geschikte tijdreeksen 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 modelexercitie 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 ordegrrootte van de eventduur die de buffer wel of niet kan weerstaan. Hier moet wel worden opgemerkt dat de uitgangssituatie (initiële chlorideconcentratie) bij deze semi-stationaire gevoeligheidsanalyse een bepalende factor is.

## 3.3 Relevante variabelen

### 3.3.1 Primaire vrijheidsgraden

Om tot een selectie te komen van de primaire vrijheidsgraden welke de assen zullen vormen van de (hyper)kubus aan modelberekeningen, is hieronder een overzicht opgenomen van de belangrijkste veranderingen van de *pressures* op het systeem.

#### **Zeespiegelstijging**

De ZSS heeft op meerdere vlakken een impact op het systeem:

- zo zal de schuttschijf vrijwel lineair toenemen,
- is de verwachting dat de zoutwaarde in de buitenhaven en daarmee in de schutkolken toeneemt
- en is het de primaire drijfveer achter de toename van zoute kwel en eventuele zoutlek(ken) bij het schut- en spui/maal complex IJmuiden.

Uiteraard beïnvloedt het ook de spui- en maalcapaciteit, maar hiervoor is geen 3D modelberekening nodig. Er zal gewerkt worden met een ZSS zoals in de oorspronkelijke aanpak beschreven: 0, 0.5, 1, 2 3 en 5 m.

#### **(Zoet water) debiet**

Het beschikbare zoet water debiet is op te delen in het bovenstrooms debiet (WIS-debiet) en de (som van de) overige lateralen.

1. Het bovenstrooms (zoet) water debiet, is de belangrijkste stuurparameter bij het terugdringen van het zout in het ARK-NZK systeem. Het geeft tegendruk tegen eventuele intrusie op het ARK, maar zorgt er ook voor dat er meer water onttrokken kan worden bij IJmuiden, waardoor er ook meer 'getrokken' wordt aan de achterkant van de zouttong. Het bovenstrooms debiet wordt ingelaten bij de Irenesluizen, middels het Water Inlaat Systeem (WIS). Tezamen met een eventueel restdebiet vanuit de lateralen op het ARK (lozingen minus onttrekkingen), is er op dit moment sprake van een meerdaags gemiddeld bovenstrooms debiet van 15 (laag) tot 45 (hoog) m<sup>3</sup>/s, gemeten bij Weesp. Bij de modelberekeningen zal het debiet door de WIS opgerekt worden tot maximaal een equivalent Weesp debiet van 95 m<sup>3</sup>/s, om zo een meer compleet spectrum af te dekken. Zie ook het tekstkader hieronder.
2. Op het ARK-NZK systeem komen ook honderden lateralen uit. De meeste lozen, sommige onttrekken, enkele doen beiden. De meeste lateralen variëren qua debiet in de tijd, afhankelijk van bijvoorbeeld regenval, watervraag en/of bovenstroomse afvoer<sup>2</sup>. Deze debieten dragen minder bij op het terugdringen van het zoutfront, maar zorgen wel voor verzoeting op het NZK en extra ruimte om te spuien en te malen. Vanuit een recente studie uitgevoerd in 2021 is veel bekend over de statistiek van de lateralen voor de meetjaren 2015 en 2018. Hiervoor is ook het Boezemmodel, een 1D neerslag afvoer in het beheer van Waternet, toegepast. Met bestaande *scripting* kan eenvoudig een set aan randvoorwaarden worden gegenereerd die representatief is voor de lateraaldebieten tijdens bijvoorbeeld een droge periode, een gemiddelde periode of een natte periode.

Beide posten zullen separaat beschouwd moeten worden.

---

<sup>2</sup> Wel kunnen deze lateralen grotendeels los worden gezien van het ingelaten debiet bij de Irenesluis, omdat hier vaak extra water wordt ingelaten tijdens droge perioden.

Tijdens de expertsessies is overeengekomen dat de zoetwatervraag doorgaans plaats zal vinden tussen het WIS en het zoutfront. Aangezien de onttrekkingen die deze watervraag vormen bovenstrooms van het zoutfront plaatsvinden, hebben deze netto geen effect op het terugdringen van het zoutfront en hoeven daarom eigenlijk ook niet (variabel) mee te worden genomen in de zoutberekeningen, maar kunnen achteraf als een surplus worden beschouwd om het WIS debiet terug te rekenen; stel dat uit een scenarioberekening volgt dat 40 m<sup>3</sup>/s benodigd is om het ARK zoet te houden en er is daarnaast een zoetwatervraag van 20 m<sup>3</sup>/s bovenstrooms van het zoutfront, dan zal er 60 m<sup>3</sup>/s ingelaten moeten worden bij het WIS om aan de totale watervraag te voldoen. In deze studie wordt het WIS-debiet (exclusief zoetwatervraag) daarom gezien als een equivalent Weesp debiet. De keuze voor Weesp als locatie is tweeledig; hier is in het huidige meetnetwerk een debietmeting aanwezig en deze locatie bevindt zich, gegeven huidig beheer, bovenstrooms van de zouttong en daarmee benedenstrooms van de zoetwatervraag. De betreffende vrijheidsgraad is daarentegen wel WIS genoemd vanwege het sturende karakter dat hiermee geassocieerd wordt, in tegenstelling tot Weesp waar niet gestuurd wordt.

N.B. alle eventuele onttrekkingen benedenstrooms van Weesp zijn wèl meegenomen in de modelberekeningen op basis van de in de hoofdtekst beschreven methodiek.

### Zoutlek/zoute kwel

Het zoutlek en de zoute kwel bestaat uit:

- een zoutlek rond het schutcomplex IJmuiden; en
- een zoute kwel component bij IJmuiden en in de (verdere) verzilting van de (meest westelijke) lateralen die uitkomen op het NZK.

De precieze belasting ten gevolge van deze laatste component is in hoge mate gecorreleerd aan de mate van ZSS. Op basis van de modeldata ontwikkeld met het LHM (Deltares, 2022) kan gesteld worden dat zoute kwel zal toenemen, maar vrij beperkt in vergelijking met de bestaande zoutlast op het ARK-NZK systeem. Afgezet tegen elkaar volgt het volgende:

- De zoute kwel onder het schut- en spui/maal complex bij IJmuiden neemt toe van 0,01 kg/s nu naar 0,04 kg/s bij 3 m ZSS. Op basis van extrapolatie zal de zoutlast ook bij 5 m ZSS onder de 0,1 kg/s blijven. Deze zoutlast is relatief klein door het beperkte interactie oppervlak tussen het NZK en de zee. Ook is de gradiënt beperkt omdat het NZK bij IJmuiden vrij zout is. De impact van directe zoute kwel blijft daarmee verwaarloosbaar klein in vergelijking met de zoutlast door het schutcomplex zelf (480 kg/s voor het huidig gebruik van de Noordersluis) en valt weg in de onzekerheidsmarge van deze zoutlast. De directe zoutlast ten gevolge van zoute kwel zal daarom niet expliciet meegenomen worden;
- De zoute kwel binnen het volledige afstroomareaal van de ARK-NZK regio neemt af als functie van ZSS. In de kustzone is wel een toename zichtbaar, maar verder het binnenland in is juist sprake van een afname waardoor de som een afname laat zien als functie van ZSS (Deltares, 2022). Om toch een indicatie te kunnen geven van de verzilting van lateralen is daarom besloten een 'wat-als?'-scenario door te rekenen. Hierbij zullen de lateraaldebieten volgend uit het extreem droge scenario, benedenstrooms van Weesp, gecombineerd worden met een toename van de chlorideconcentraties met een factor 20. Dit houdt in dat de representatieve chloride waarde verhoogd wordt van 270 naar 5.400 mg/l chloride.

### Conclusie

Hieruit volgen onderstaande primaire assen van de hyperkubus:

1. Zoutvracht (Q en C) uit zee naar binnen;
2. Zoet waterdebiet (Q en C) uit lateralen;
3. Het bovenstrooms (zoet water) debiet.

In Tabel 2 is een overzicht opgenomen van de primaire vrijheidsgraden en de voorgestelde bandbreedte. De combinatie van de bandbreedte per variabele geeft een rekenbezwaar van  $6 * 5 * 3 = 90$  modelberekeningen. Het is de verwachting dat vooral bij lage zoutvrachten vanuit zee de bovenstroomse debieten hoger dan  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  geen toegevoegde waarde bieden, omdat het systeem dan al 'voldoende zoet' is. Deze hogere debieten worden pas in toenemende mate relevant bij hogere ZSS. In principe kan hetzelfde gezegd worden voor de combinatie van hogere zoutvrachten vanuit zee en lagere debieten (de huidige beheerstrategie kan dan met zekerheid niet behouden blijven), maar deze berekeningen zullen meer een 'wat als?' karakter dienen om te beoordelen hoe ver de zouttong het ARK zal binnenlopen. De afweging is daarom gemaakt om de volledige kubus aan randvoorwaardecombinaties door te rekenen om het volledige spectrum af te dekken. Ook om dat dit interpolatie of zelfs eventuele extrapolatie van de totale resultatentabel vergemakkelijkt.

Tabel 2 Overzicht primaire vrijheidsgraden en voorgestelde bandbreedte voor de modelstudie.

Primaire vrijheidsgraad	Voorgestelde bandbreedte	Opmerking
<b>Zoutvracht (Q en C) uit zee naar binnen*</b>	500, 1500, 2500, 3500, 5000 en 7500 kg/s (bruto)	De hoekpunten zijn bepaald m.b.v. Zeesluisformulering, zo is 1500 kg/s representatief voor de huidige situatie, 2500 voor een ZSS van 5 m met de huidige configuratie. 3500 en 5000 kg/s zijn opgenomen voor scenario's waarbij scheepvaart (significant) toeneemt. De zoutvracht van 7500 kg/s dient om alle (on)overzienbare wat-als scenario's af te dekken waarbij de zoutvracht nog verder kan toenemen. Tot slot is ook een zoutvracht van 500 kg/s beschouwd om tegemoet te komen aan de scenario's waarbij de scheepvaart afneemt.
<b>Zoet waterdebiet (Q en C) uit lateralen*</b>	Extreem droog (wat als?) + verzilte lateralen, extreem droog, gemiddeld droog	Extreem droog (wat als?), extreem droog en gemiddeld droog. Gemiddeld nat en extreem nat zijn alleen relevant voor de waterbalans en zijn daarom niet opgenomen in de kubus van de 3D modelstudie.
<b>Bovenstrooms debiet (WIS)*</b>	15, 35, 55, 75, 95 $\text{m}^3/\text{s}$	Zoals ingelaten bij de Irenesluizen om aan te sluiten bij huidige methodiek operationeel beheer. 100 $\text{m}^3/\text{s}$ wordt op dit moment gezien als maximale capaciteit, binnen de huidige strategie, inclusief uitbreiding van het WIS.

\*Zie voor de onderbouwing van de verdere definitie en de gekozen bandbreedte de technische uitwerkingen in paragraaf 3.4.

De bandbreedte binnen de primaire vrijheidsgraad 'zoutvracht naar binnen vanuit zee' is overkoepelend voor de bandbreedte van een aantal onderliggende variabelen. De gevoeligheid van deze variabelen is apart verkend. Denk hierbij aan de schutfrequentie, de Deur Open Tijd (DOT), de zoutwaarde buiten, enzovoorts. Deze verkenning is uitgevoerd met een select aantal berekeningen en bestaande resultaten van (recente) studies uitgevoerd door Deltares en Arcadis (Verbruggen & Van der Baan, 2020), (Arcadis, 2022) en opgenomen in paragraaf 3.4.



### 3.3.2 Secundaire variabelen, gevoeligheden en losse vraagstukken

#### 3.3.2.1 Selectieve onttrekking

De Selectieve Onttrekking (SO) is voorzien om de toename in zoutlast door de ingebruikname van de Zeesluis IJmuiden in plaats van de Noordersluis (ten minste) te compenseren. Dit wordt bereikt door de chlorideconcentratie in het spui/maal debiet te verhogen door zouter water aan te trekken uit de Velserkom (Figuur 3). Hoewel het fysiek meenemen van de SO niet is opgenomen in de uitgangspunten van deze studie, is wel rekening gehouden met een beschouwing van de werking van de SO in de nabewerking van de modelresultaten. Anderzijds kan het effect van de SO alsnog benaderd worden door een verwachte effectiviteit te verdisconteren in de (netto) zoutvracht uit zee. Daarmee is de resultatenmatrix ook overkoepelend te zien voor een systeem met SO. De verdiscontering in de netto zoutvracht uit zee is hier de meest voor de hand liggende optie aangezien de SO onttrekt uit de zoute onderlaag, waarin ook de zoutlast van de schutsluizen terecht komt.



Figuur 3 Principeschets werking selectieve onttrekking

#### 3.3.2.2 Zout in de buitenhaven

Het is de verwachting dat, doordat aangenomen wordt dat de bodem niet 'meegroeit' met de ZSS, de buitenhaven relatief zouter zal worden bij een toenemende ZSS. Ook zal de implementatie van de SO het spui/maal water zouter maken, wat ook zal bijdragen aan een zoutere buitenhaven. Zo zal de saliniteit bij de buitendeur toenemen en daarmee ook de saliniteit in de schutkolken. Op basis van beschikbare kennis en *expert judgement*, wordt geoordeeld dat het systeem gevoelig is voor deze toename. De impact hiervan is afgedekt door de toegepaste bandbreedte in de variabele 'zoutvracht uit zee'. Wel is inzichtelijk gemaakt wat de specifieke gevoeligheid is van een toename van de zoutwaarden in de buitenhaven met behulp van de ZSF (paragraaf 3.4).

#### 3.3.2.3 Gebruik schutcomplex

Zoals al eerder benoemd wordt het gebruik van het schutcomplex en de impact hiervan op de zoutlast niet gezien als een primaire vrijheidsgraad binnen deze studie. Hiermee worden specifiek de schutfrequentie en de deur-open-tijd bedoeld. De toename van de schutschijf en de representatieve saliniteit in de schutkolk zijn gekoppeld aan de ZSS en wel meegenomen. Uiteraard is het systeem wel gevoelig voor het gebruik van het schutcomplex. De impact hiervan is afgedekt door de toegepaste bandbreedte in de variabele 'zoutvracht uit zee'. Er zal echter nog wel inzichtelijk worden gemaakt wat de specifieke gevoeligheid is van het gebruik van het schutcomplex met behulp van de ZSF (zie paragraaf 3.4).

#### 3.3.2.4 Peilbeheer

Het is de verwachting dat er slechts beperkt afgeweken kan worden van het peilbeheer binnen het huidige systeem (bijvoorbeeld vanwege de open verbinding met de grachten van

Amsterdam). Daarom is besloten een peilverhoging (in deze fase) niet modelmatig te beschouwen. Wel moet gezegd worden dat een peilverhoging een positief effect heeft op de houdbaarheid van het spui/maal complex. Er zal langer voldaan kunnen worden aan de benodigde afvoercapaciteit met de huidige infrastructuur.

### 3.3.2.5 Zoutvang

Er zijn al tijden plannen om mogelijk een zoutvang aan te brengen achter het schutcomplex (gezien vanuit de zeezijde) om zo de zoutintrusie (verder) te beperken. Deze plannen zijn echter nog niet concreet en een dergelijke ingreep zal niet modelmatig beschouwd worden. Het effect van een dergelijke zoutvang, wanneer deze bekend is, kan wel worden verdisconteerd in de netto zoutvracht vanuit zee om een beeld te krijgen van de impact op het zoutgedrag binnen het systeem. De redenatie achter de verdiscontering in de netto zoutvracht is identiek aan die benoemd bij de SO.

### 3.3.2.6 Spuicapaciteit

De ZSS heeft een direct effect op de spuicapaciteit bij IJmuiden. De verdeling spuien en malen is nu doorgaans 55/45 maar zal in de nabije toekomst al ontwikkelen richting de 50/50. Een korte verkenning toont aan dat vanaf 0,5 m ZSS spuien niet meer mogelijk is en het onttrekken van water ten behoeve van het peilbeheer geheel door het malen zal moeten worden opgevangen.

### 3.3.2.7 Maalcapaciteit

Ook zal uiteindelijk de maalcapaciteit in de huidige vorm ontoereikend worden bij een verdere ZSS. Op dit moment bestaat de maalcapaciteit uit 4 pompen à 40 m<sup>3</sup>/s met een maximale opvoerhoogte van 2,40 m en 2 nieuwere pompen à 50 m<sup>3</sup>/s met een opvoerhoogte van 2,70 m. Ten behoeve van de scenarioberekeningen voor het zoutgedrag, is aangenomen dat de maalcapaciteit door aangepaste infrastructuur meegroeit als functie van de ZSS en eventuele toename van de afvoerbehoefte. Zo zullen binnen het huidige Vervanging & Renovatie traject al drie van de vier oude pompen worden vervangen. Wel is verkend hoe de spui/maal capaciteit van het huidige kunstwerk zal afnemen als functie van ZSS. Deze beschouwing is opgenomen in paragraaf 3.4.

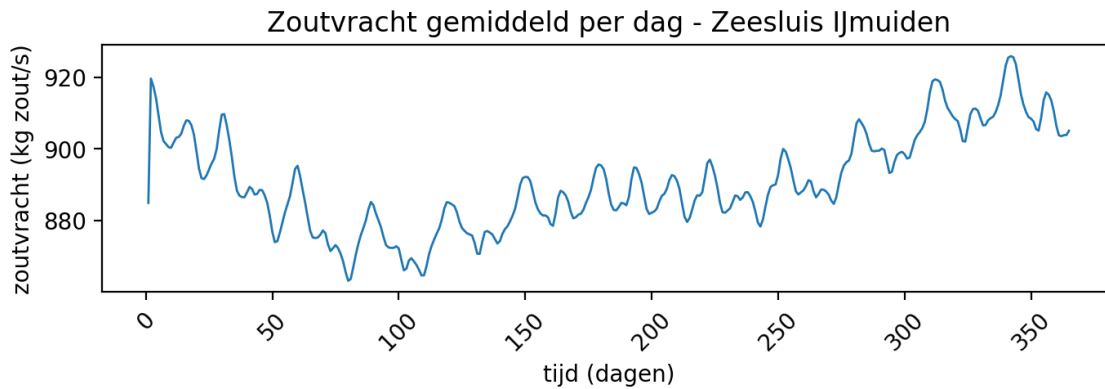
## 3.4 Afkadering en beschouwing van de relevante variabelen

In deze paragraaf is een onderbouwing opgenomen van de gekozen bandbreedte voor elk van de primaire vrijheidsgraden welke de hyperkubus vormen, te weten: zoutvracht, lateraal debiet en WIS. Tot slot is bij elke combinatie van variabelen afzonderlijk beschouwd of de huidige spui/maal infrastructuur nog kan voorzien in de resulterende afvoerbehoefte.

### 3.4.1 Zoutvracht

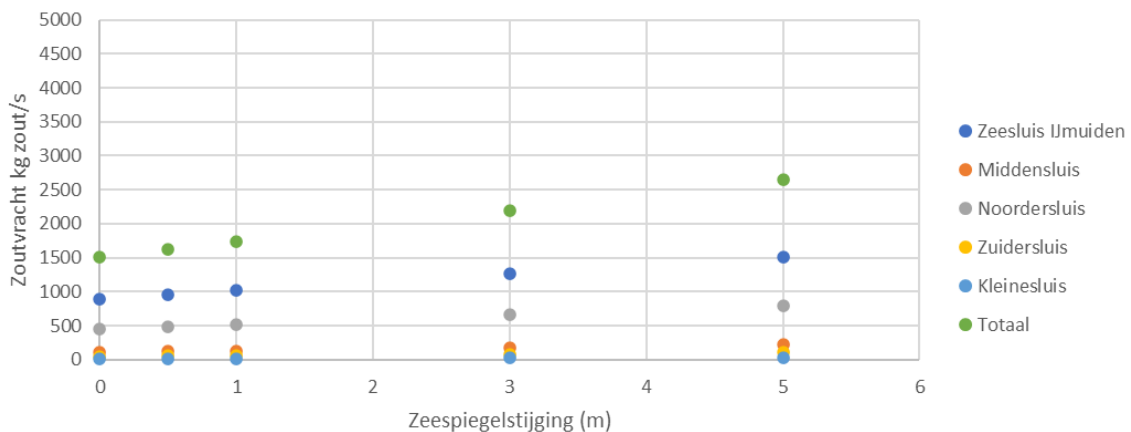
De as die de zoutvracht bij het sluizencomplex IJmuiden beschrijft, is het lastigst te kiezen zodat alle mogelijke toekomstige ontwikkelingen afgedekt zijn, zonder al te veel detail te verliezen in bandbreedte die voor de huidige situatie relevant is. Daarom zijn een aantal stappen doorlopen om zo te kunnen komen tot een zo goed mogelijk onderbouwde bandbreedte, inclusief de intervallen voor deze as.

Allereerst is gekeken naar de 'natuurlijke' variatie in zoutvracht enkel ten gevolge van getij en wind. Hiervoor is gebruik gemaakt van de gemeten waterstand in de buitenhaven van IJmuiden over het gehele jaar 2015. Vervolgens is met de ZeeSluisFormulering (ZSF) (Deltares, 2018) berekend wat de zoutvracht is door de Zeesluis IJmuiden in het geval van 10 schuttingen per dag (uiteraard fictief omdat in 2015 deze sluis nog niet bestond). De daggemiddelde zoutvracht varieert tussen 865 en 925 kg/s, een bandbreedte van bijna 7% rond de jaargemiddelde zoutvracht.



Figuur 4 Berekende daggemiddelde zoutvracht door de Zeesluis IJmuiden bij 10 schuttingen per dag.

Vervolgens is voor alle schutkolken binnen het sluzencomplex IJmuiden berekend wat de huidige zoutvracht is en hoe dit toeneemt ten gevolge van ZSS. De toename is weergegeven in Figuur 5. Hierbij zijn alle parameters constant gehouden (qua gebruik van de schutkolken) en neemt enkel de schutstijf toe. Nota Bene: er zijn op het moment van schrijven niet genoeg gegevens beschikbaar om een 'gemiddeld gebruik' van de Zeesluis IJmuiden af te leiden. Daarom is aangenomen dat deze gelijk is aan het huidige gebruik van de Noordersluis qua schutfrequentie. De indicatie van de totale zoutvracht in Figuur 5 is met het gebruik van de Noordersluis en de Zeesluis tegelijk, wat gezien kan worden als zeer conservatief. De stijging van de zoutvracht louter door ZSS is vrijwel lineair en bedraagt circa 65% bij 5 m.



Figuur 5 Zoutvracht per schutkolk als functie van ZSS.

Tot slot is met de ZSF de gevoeligheid afgetast voor alle relevante parameters die een impact hebben op de zoutvracht door het schutcomplex. Deze parameters inclusief de bijbehorende bandbreedtes, zijn beschreven in Tabel 3. De bandbreedtes zijn gebaseerd op schutdata tussen 2000 en 2021, *expert judgement* of anders (zie opmerkingen tabel).

Tabel 3 Parameters waarvan de impact op de zoutvracht onderzocht is met de ZSF. Zoutwaarden gegeven in PSU en mg/L chloride.

Parameter	Bandbreedte			Opmerking
	'Laag'	'Midden'	'Hoog'	

<b>Zoutgehalte binnen</b>	10 PSU (5.600 mg/l)	14 PSU (7.800 mg/l)	18 PSU (10.000 mg/l)	Op basis van langjarige metingen Binnenspuikanaal/Velserkom
<b>Zoutgehalte buiten</b>	28 PSU (15.500 mg/l)	30 PSU (16.600 mg/l)	35 PSU (19.400 mg/l)	Huidig: 28 PSU als fictieve ondergrens. 35 PSU is representatief voor offshore en daarmee te zien als bovengrens.
<b>Schuttingen per dag</b>	-50%	Gemiddeld	+75%	Gemiddeld op basis van schutdata 2000-2021. -50% voor als deel scheepvaart naar buitenhaven wordt verplaatst. +75% als scheepvaart significant toeneemt. NB: dit is +75% boven op het simultaan gebruik van de Noordersluis en Zeesluis; een ruime factor 3 t.o.v. huidig gebruik. Voor een dergelijke toename zijn 1 of meerdere extra kolken nodig.
<b>Deur Open Tijd</b>	Gemiddeld	+10%	+20%	Gemiddeld op basis van schutdata 2000-2021.
<b>Scheepsvolume</b>	Gemiddeld ±10%			Schutdata 2000-2021 niet toereikend om bandbreedte te bepalen
<b>Nivelleringsstijd</b>	Gemiddeld ±10%			Schutdata 2000-2021 niet toereikend om bandbreedte te bepalen
<b>Tijd deuren open/dicht</b>	Gemiddeld ±10%			Schutdata 2000-2021 niet toereikend om bandbreedte te bepalen

De impact per parameter, uitgedrukt als een procentuele verandering ten opzichte van de basis zoutvracht, is weergegeven in Tabel 4. De grootste impact volgt uit de toename van de schuttschijf, de zoutgehalten van de binnen- en buitenhaven en het aantal schuttingen per dag. Hierbij dient de kanttekening gemaakt te worden dat in deze berekeningen met de ZSF het zoutgehalte binnen opgelegd is, terwijl dit eigenlijk een resultante is van een bepaalde aanhoudende zoutvracht. Het zoutgehalte binnen zal immers inspelen op een bepaalde aanhoudende zoutvracht. Dit aspect is niet verwaarloosbaar en is nader beschouwd bij de analyse van de resultaten van de modelberekeningen.

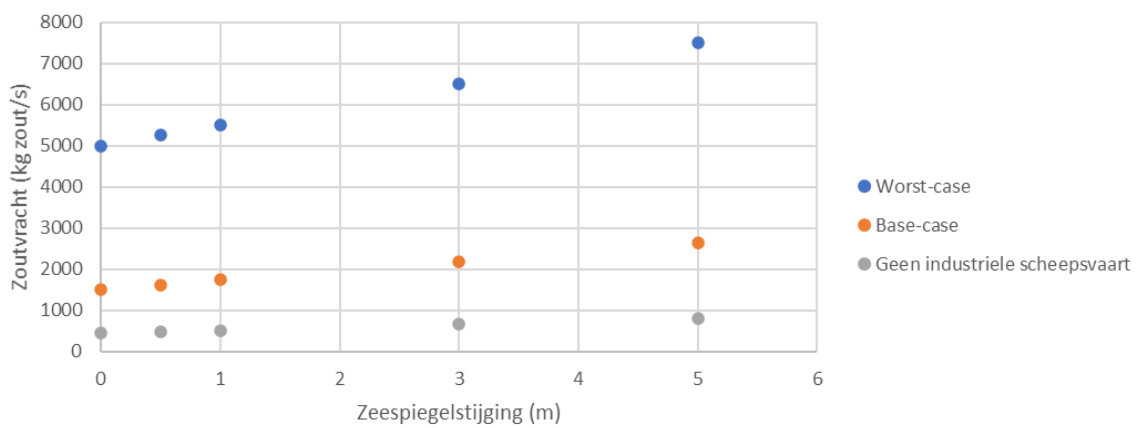
Tabel 4 Impact van parameters op zoutvracht.

Parameter	Impact op zoutvracht
<b>Natuurlijke variatie</b>	-7% tot +7%
<b>ZSS (schuttschijf)</b>	0 tot +65%
<b>Zoutgehalte binnen</b>	-37% tot +41%
<b>Zoutgehalte buiten</b>	0 tot +50%
<b>Schuttingen per dag</b>	-50% tot +75%
<b>Deur Open Tijd</b>	0 tot -15%
<b>Scheepsvolume</b>	<5%
<b>Nivelleringsstijd</b>	<5%
<b>Tijd deuren open/dicht</b>	<5%

Aan de hand van bovenstaande procentuele toenames, zijn drie situaties samen te stellen welke de hoekpunten en andere relevante steunpunten langs de zoutvracht as inzichtelijk maken:

1. De base-case: een situatie die het dichtst bij het maximale huidig gebruik ligt en het meest relevant voor een *business as usual* scenario. Deze situatie vormt de relevante punten centraal op de zoutvracht as.
2. Een worst-case: een situatie waar ook alle andere parameters veranderen richting de maximale toename in zoutvracht. Deze situatie geeft de relevante punten voor het uiteinde van de zoutvracht as.
3. Een verminderde base-case: een situatie waarbij (een groot deel van) de grote commerciële scheepvaart uit de binnenhaven wordt geweerd, bijvoorbeeld door overslag in de buitenhaven. Deze situatie geeft de relevante punten voor het begin van de zoutvracht as.

Bovenstaande is weergegeven in Figuur 6 waar deze zijn uitgezet als functie van de ZSS. Merk op dat de punten van de base-case identiek zijn aan de totale zoutvracht in Figuur 5. De worst-case ligt circa 275% hoger en de verminderde base-case ligt circa 300% lager.



Figuur 6 Overzicht van spreiding zoutvracht door schutcomplex IJmuiden.

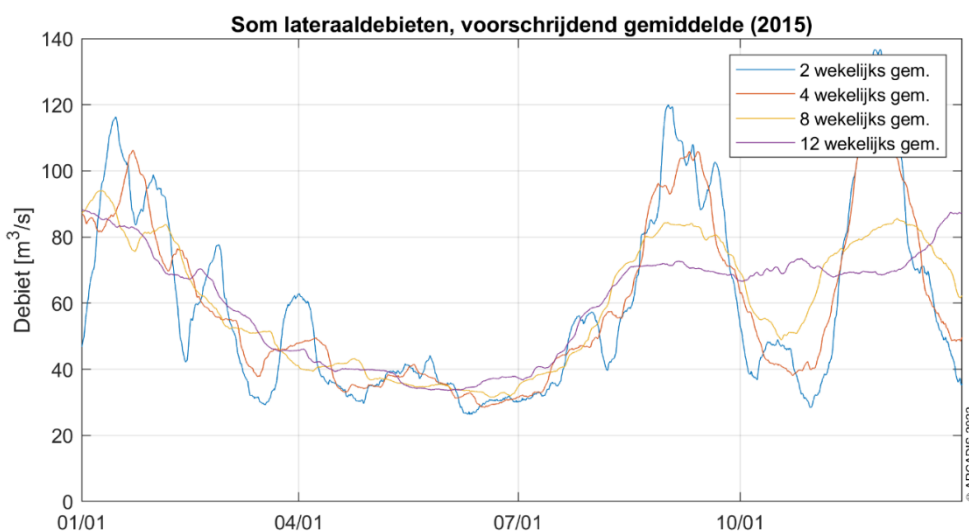
Gegeven de resulterende zoutvracht zoals weergegeven in de figuur, zowel de hoekpunten als de spreiding, zijn zowel een bandbreedte als intervallen voor de zoutvracht as geselecteerd. Deze is samengevat, inclusief denklijn, in Tabel 5.

Tabel 5 Bandbreedte en intervallen van de (initiële) zoutvracht as.

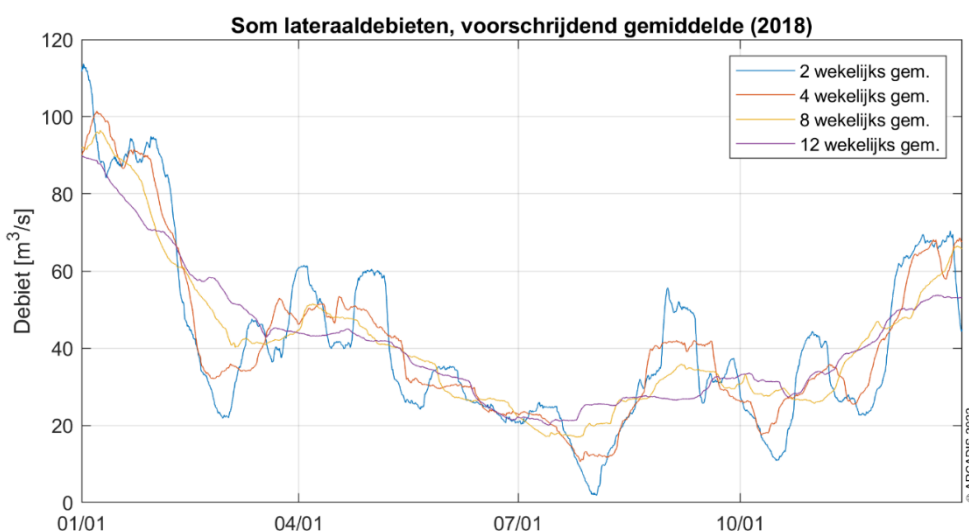
Scenario	Zoutvracht [kg/s]	Beargumentering
1	500	Linker as begrenzing, representatief voor de verminderde base-case
2	1.500	Steunpunt voor huidig gebruik, simultaan Noordersluis en Zeesluis
3	2.500	Steunpunt voor huidig gebruik bij 5 m ZSS (1500 * 1,65)
4	3.500	Centraal steunpunt
5	5.000	Steunpunt voor extreme toename in schutintensiteit
6	7.500	Rechter as begrenzing, representatief voor cumulatieve worst-case ontwikkelingen

### 3.4.2 Lateraal debiet, inclusief (indirecte) zoute kwel

Voor de bepaling van representatieve intervallen voor het totale, neerslag gedreven lateraal debiet, minus het WIS, is een debiet analyse uitgevoerd van de berekende debieten uit het Boezemmodel voor de jaargangen 2015 en 2018. Jaargang 2015 vormt hierbij de basis voor een representatief mild jaar met een gemiddelde zomer. Jaargang 2018 is representatief voor een afwijkend jaar waarbij vooral de zomer extreem droog was (Arcadis, 2021). Onderstaand Figuur 7 en Figuur 8 tonen de som van de lateraaldebieten aan de hand van 2 tot 12-wekelijks gemiddelden voor respectievelijk 2015 en 2018. Het is duidelijk dat de lagere debieten doorgaans voorkomen tijdens de (na)zomer. Ook is te zien dat de droge periode in 2018 gepaard ging met een (veel) lager lateraaldebiet dan de droge periode in 2015. De minima binnen deze drogere perioden zijn getalsmatig samengevat in Tabel 6.



Figuur 7 Som lateraaldebieten (2015)



Figuur 8 Som lateraaldebieten (2018)

Tabel 6 Minima som lateraaldebieten 2015 en 2018.

Middelingsperiode	Lateraal debiet minus WIS (lateraal debiet incl. WIS) [m <sup>3</sup> /s]	
	2015	2018
<b>2-wekelijks</b>	26 (43)	2 (31)
<b>4-wekelijks</b>	28 (45)	11 (35)
<b>8-wekelijks</b>	32 (49)	17 (36)
<b>12-wekelijks</b>	34 (50)	20 (39)

Uit bovenstaande tabel blijkt dat voor een gemiddelde zomer zoals 2015 de lengte van de periode waarover het lateraal debiet gemiddeld wordt maar beperkte invloed heeft. Het minimum over een 2-wekelijks gemiddelde ligt maar 8 m<sup>3</sup>/s lager dan de 34 m<sup>3</sup>/s die gevonden wordt als gemiddeld wordt over 12 weken. Ook is te zien dat in het geval van een gemiddelde zomer het ingelaten debiet bij de Irenesluizen vrij constant is; 16 à 17 m<sup>3</sup>/s. De fluctuatie in zowel het lateraal debiet als het totale zoet water debiet is daarmee beperkt. Dit beeld is echter heel anders bij de (extreem) droge zomer van 2018. Het lateraal debiet is hier niet alleen fors lager, ook is er een grote afhankelijkheid van de middelingsperiode. Zo is het debiet nog 20 m<sup>3</sup>/s over 12 weken, maar daalt dit tot slechts 2 m<sup>3</sup>/s als gemiddeld wordt over 2 weken. Deze dip is ook goed terug te zien in de blauwe grafiek in Figuur 8. Deze grotere fluctuatie blijkt wel (deels) opgevangen te worden door het WIS, welke nu varieert tussen 29 en 19 m<sup>3</sup>/s, afhankelijk van de middelingsperiode. Zo blijft de variatie in het totale debiet beperkt tot 8 m<sup>3</sup>/s (het verschil tussen 31 en 39 m<sup>3</sup>/s).

Omdat in de simulaties een constant debiet opgelegd zal worden als lateraal debiet (op basis van statistiek naar rato verdeeld over de posten), is een keuze gemaakt voor de representatieve middelingsperiode. Deze moet niet te kort zijn omdat het systeem slechts vrij traag reageert, maar moet ook niet te lang zijn omdat dan de echte droogtes eruit worden gefilterd. Uit (Arcadis, 2022) is bekend dat de halfwaardetijd van het ARK/NZK systeem circa 3 weken bedraagt, terwijl pas na circa 12 weken het systeem volledig is ingespeeld. Er is daarom besloten gebruik te maken van het 4-wekelijks gemiddelde voor zowel de bepaling van een representatief lateraal debiet voor een gemiddeld droge zomer als ook voor een zeer droge zomer. Deze periode, net langer dan de halfwaardetijd van 3 weken, heeft namelijk per definitie een impact op het systeem, maar is nog wel vrij conservatief om te gebruiken tot een equilibrium is bereikt (12 weken).

Tot slot is nog een 'wat-als' scenario toegevoegd om de gevoeligheid van het systeem voor verzilting van de lateralen te verkennen. Uit (Deltares, 2022) is af te leiden dat met een stijgende zeespiegel het aannemelijk is dat er (verdere) verzilting optreedt van het grondwater in de kustzone, verder naar het binnenland is er echter juist sprake van een afname. Er is daarom voor gekozen om bij dit 'wat-als' scenario een waarde van 1660 mg/l chloride op te leggen voor alle lateralen benedenstrooms van Weesp. Dit komt neer op een verzilting met een factor 10 à 20 ten opzichte van de huidige concentraties. In Tabel 7 zijn de resulterende bandbreedte en intervallen van deze as weergegeven.

Tabel 7 Bandbreedte en intervallen (zoet)waterdebiet lateralen

Scenario	Basis	Totaal lateraal debiet [m <sup>3</sup> /s]	Zoutwaarde lateralen benedenstrooms van Weesp [PSU (mg/l chloride)]
<b>1</b>	Gemiddelde zomer	28	0,15 - 0,30 (83 - 166)
<b>2</b>	Droge zomer	11	0,15 - 0,30 (83 - 166)
<b>3</b>	Wat als scenario	11	3,00 (1660)

### 3.4.3 Water Inlaat Systeem (WIS) Irenesluizen

Het in te laten zoet water debiet bij de Irenesluizen (WIS) is te zien als stuurparameter en daarmee minder onderhevig aan een technische onderbouwing. Bij de keuze voor de bandbreedte van deze parameter is het daarom vooral zaak een bandbreedte te selecteren die zowel representatief is voor de huidige inzet, als ook voor een mogelijke toename in capaciteit in de toekomst.

Er is gekozen voor de intervallen 15, 35, 55, 75, en 95 m<sup>3</sup>/s, daggemiddeld. Het huidig gebruik zit doorgaans tussen het eerste en tweede interval. Binnen de huidige configuratie is een in te laten debiet tot het derde interval waarschijnlijk haalbaar. Het vierde en laatste interval zijn opgenomen om voorbereid te zijn op een eventuele uitbouw van het WIS, indien een toename in zoutbelasting dit nodig acht om zo het ARK (vaker) zoet te houden. Tot slot zijn de intervallen constant en niet te groot, zodat interpolatie van het systeemgedrag bij tussenliggende debieten eventueel mogelijk is.

### 3.4.4 Waterpeil ARK-NZK

#### 3.4.4.1 Huidige status peilregulatie ARK-NZK en het effect van ZSS

De boezemfunctie van het ARK-NZK systeem houdt in dat polders en stedelijk gebied kunnen afwateren op het systeem zodat deze gebieden droog kunnen blijven. Het ARK-NZK voert vervolgens dit overtollige water af richting zee. Hiervoor wordt met name het spui/maalmiddel bij IJmuiden ingezet. Logischerwijs wordt deze functie vooral ingezet in periode van veel, aanhoudende neerslag. De studie Slim Watermanagement Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal (HKV/Hydrologic, 2018), heeft het falen van deze systeemfunctie onderzocht. Onder falen wordt verstaan het overschrijden van een waterhoogte van NAP 0 m binnen het ARK-NZK systeem, vanaf die waarde mogen de poldergemalen niet meer lozen op het ARK-NZK systeem en kan er wateroverlast optreden. Vooral het falen van één of meer pompen van het gemaal IJmuiden heeft een dominante invloed op het optreden van (te) hoge waterstanden op het ARK-NZK. Om falen in natte jaargetijden zoveel mogelijk te voorkomen is er in de zomermaanden altijd één pomp in langdurig onderhoud. Vaak is ook een tweede pomp in klein onderhoud, wat betekent dat deze binnen 24 uur weer operationeel kan zijn indien nodig. Buiten de zomermaanden, in de jaargetijden waarin doorgaans de meeste neerslag valt, zijn alle pompen doorgaans operationeel.

Samengevat vergroot de ZSS de kans op hoge waterstanden op het NZK-ARK. Bij 1 m ZSS wordt NAP 0 m gemiddeld eens in de tien jaar overschreden en met elke halve meter extra ZSS neemt de overschrijdingskans met circa een factor 3 toe. Dat wil zeggen dat vanaf 2 m ZSS NAP 0 m jaarlijks wordt overschreden (HKV/Hydrologic, 2019).

Hoe de ZSS exact doorwerkt in de afname van de spui/maalcapaciteit is in de volgende paragraaf beschouwd.

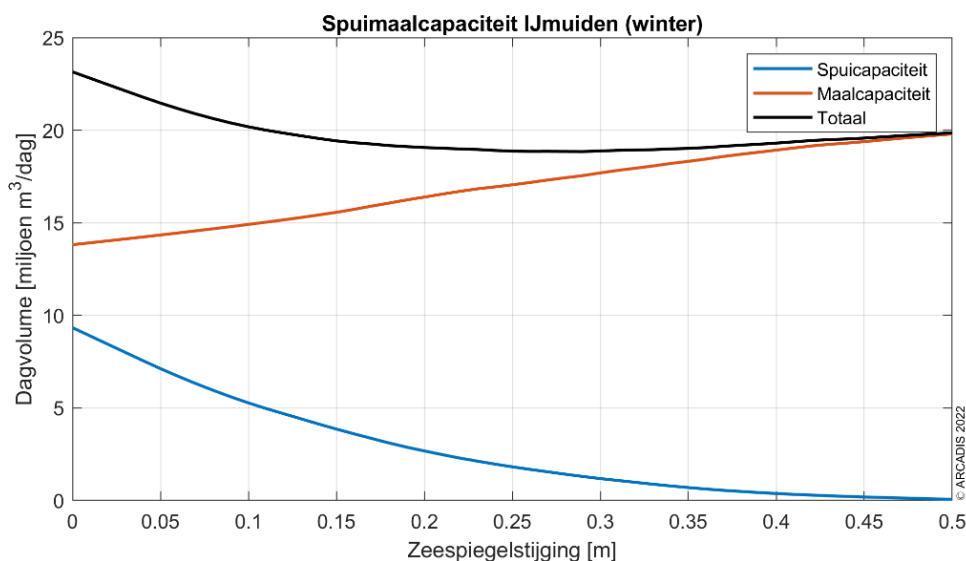
#### 3.4.4.2 Afname spui/maalcapaciteit als functie van ZSS

Spuicapaciteit toont zich heel gevoelig voor de verandering van de zeespiegel. Zelfs bij een ZSS van slechts 0,1 m gaat al bijna de helft van de spuicapaciteit verloren (Rijkswaterstaat, 2019). In (HKV, 2021) wordt geconcludeerd dat een stijging van 0,1 m resulteert in een reductie van 33%. Een rekenkundige verkenning gebruikmakend van de courante afvoerrelatie voor het spuimiddel IJmuiden (vergelijking in paragraaf 2.3.4), laat zien dat de spuicapaciteit in IJmuiden terugloopt als functie van de ZSS en volledig wegvalt bij een ZSS van 0,5 m (Figuur 9).

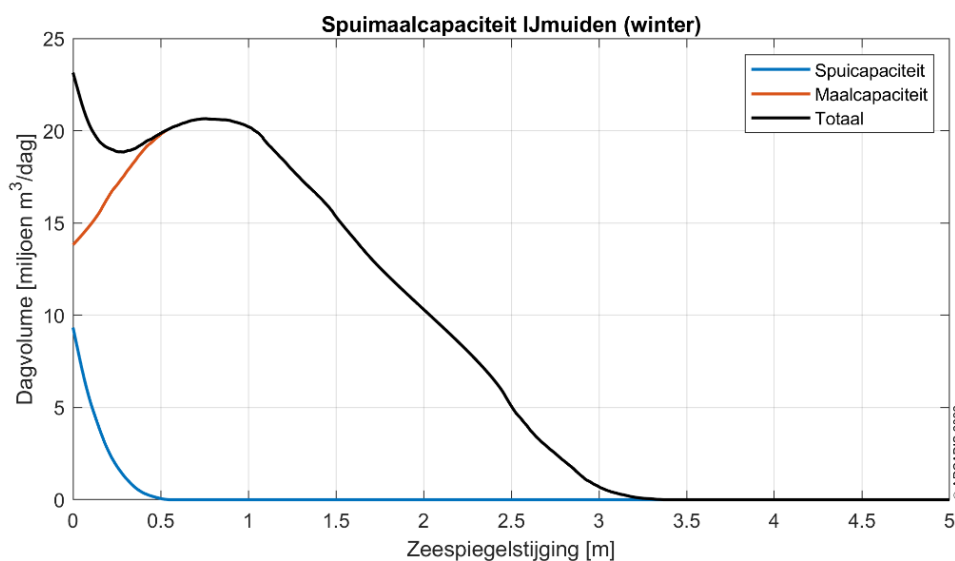
Ook de maalcapaciteit zal uiteindelijk af gaan nemen ten gevolge van ZSS. Wel laten de verkennende berekeningen zijn dat initieel sprake is van een toename van de maalcapaciteit door het groeien van het maalvenster (de periode dat de waterstand op zee hoger is dan in het Binnenspuikanaal). Bij een verdere stijging van de zeespiegel zal de maximale opvoerhoogte van de huidige pompen (2,3 m en 2,7 m) steeds vaker worden bereikt. Vanaf dat punt zal de maalcapaciteit afnemen. Als de huidige maalfuncties voor de pompen worden



gehanteerd (Rijkswaterstaat, 2004), zal de capaciteit wegvallen bij circa 3 m ZSS (zie ook Figuur 10).



Figuur 9 Berekende spui en maalcapaciteit als functie van ZSS (0 tot 0,5 m) op basis van de standaard afvoerrelatie.



Figuur 10 Berekende spui- en maalcapaciteit als functie van ZSS (0 tot 5 m) op basis van de standaard afvoerrelatie.

### 3.4.4.3 Effect selectieve onttrekking

Het effect van de selectieve onttrekking op het gemaal IJmuiden wordt verwaarloosbaar klein geacht. De lagere waterstand op het Binnenspuikanaal is relatief klein ten opzichte van de maximale opvoerhoogte van de pompen. Ook capaciteitsverlies doordat het zoutere water zwaarder is, is beperkt (HKV, 2021). De maatregel selectieve onttrekking heeft wel veel invloed op de afvoerrelatie van de spuisluis. Voornamelijk de lagere waterstand in het

Binnenspuikanaal à 0,1 m en marginaal de hogere zoutwaarde hebben hier terdege effect op de spuicapaciteit. Gedacht moet worden aan een afname van circa 35% van de spuicapaciteit na aanleg van de selectieve onttrekking (HKV, 2021). Hetgeen zou betekenen dat de spuicapaciteit al vanaf circa 0,3 m ZSS volledig weg zal vallen. Vanwege de relatieve gevoeligheid van het systeem voor de SO, is het de aanbeveling de impact hiervan opnieuw te beschouwen zodra meer studies of concrete metingen beschikbaar komen.

#### 3.4.4.4 Doorwerking in modelberekeningen

De modelberekeningen zijn primair gericht op het in kaart brengen van het zout in de vorm van de chloridegehalten binnen het ARK-NZK systeem. Hierbij rekening houdend met de fysieke limitaties van het huidige spui/maalkunstwerk bij IJmuiden zou te veel beperkend werken op deze verkenning. Er wordt daarom in deze modelverkenning aangenomen dat de spui/maalcapaciteit meegroeit met de afvoerbehoefte. De werkelijke afvoerbehoefte kan afgezet worden tegen de resultaten zoals gepresenteerd in paragraaf 3.4.4.2 om meer inzicht te krijgen in wanneer de verwachting is dat extra (maal)capaciteit benodigd zou zijn. In hoofdstuk 6 wordt ook de hier aan verwante kennisvraag beantwoord.

#### 3.4.5 Conclusie

De hyperkubus bestaat uit drie assen welke (1) de zoutvracht bij het schutcomplex IJmuiden, (2) de (zoet)waterlateralen en hun zoutvracht en (3) het zoet waterdebiet uit het bovenregionaal systeem (WIS) beschrijven.

Het totaal aantal simulaties voor het afdekken van de hyperkubus opgebouwd uit de primaire vrijheidsgraden is daarmee  $6 * 3 * 5 = 90$  simulaties. Voor de selectie van de bijbehorende as bandbreedtes en tussenliggende intervallen (steunpunten) is een balans gezocht tussen afdoende afdekking van mogelijk optredende situaties in de (verre) toekomst, maar ook voldoende inzicht in het systeemgedrag rond de *business-as-usual* bandbreedte.

### 3.5 Systeem indicatoren

De resultaten van de modelberekeningen zijn ruimtelijk en temporeel beschikbaar. Dat houdt in dat op elk punt in de ruimte binnen het ARK-NZK systeem (x,y,z) de ontwikkeling in de tijd van de chloridewaarde ten gevolge van de randforceringen uit is te lezen. In deze paragraaf wordt toegelicht hoe de modelresultaten toegepast om meer grip te krijgen op het effect van de randforceringen op de systeemfunctie: zoet waterbuffer.

#### 3.5.1 Ruimtelijk: NZK

Voor de beschouwing van met name het NZK wordt gebruik gemaakt van de zogenaamde Z5-waarde. Deze methodiek sluit aan bij de methodiek die nu ook wordt toegepast door RWS WNN om het systeem te monitoren. De Z5-waarde wordt berekend op basis van het 5-daags voortschrijdend gemiddelde van de gemeten chloridewaarde op een vijftal meetlocaties: Velserkom (3 dieptes), Zijkanaal C (2 dieptes), Spaarndammerpolder (2 dieptes), NDSM (2 dieptes) en Diemen (2 dieptes). Er is geopteerd voor een 5-daags voortschrijdend gemiddelde om korte termijn effecten (zoals bijvoorbeeld wind) grotendeels uit het signaal te filteren zodat de monitoringswaarde met name de respons van enerzijds de zoutbelasting en anderzijds de afvoer van zout plus de tegendruk uit het ARK beschrijft.

Ter beschouwing van de Z5-waarde zijn door RWS de volgende grenswaarden gedefinieerd:

- Bij een Z5-waarde van boven de 3500 mg/l wordt het niveau van het gemiddelde zoutgehalte in het NZK nauwgezet gevolgd. Dit Z5-waarde niveau wordt de waarschuwingswaarde genoemd.
- Bij een Z5-waarde van boven de 4000 mg/l worden er maatregelen genomen om het gemiddelde zoutgehalte in het NZK naar beneden te brengen. Dit Z5-waarde niveau wordt de interventiewaarde 1 genoemd.
- Bij een Z5-waarde van boven de 4500 mg/l worden er zware maatregelen genomen om het gemiddelde zoutgehalte in het NZK naar beneden te brengen. Dit Z5-waarde niveau wordt de interventiewaarde 2 genoemd.

### 3.5.2 Ruimtelijk: ARK

Hoewel de meetwaarden bij Diemen meegenomen worden in de Z5-berekening, geeft de Z5-waarde slechts beperkt de situatie op het ARK weer, zeker bij een (forse) toename van de zoutwaarde daar. Daarom wordt de status van het ARK als zoet waterbuffer beschouwd met behulp van de berekende chloridewaarde aan het oppervlak bij Diemen, en door te kijken naar de intrusielengte van de zouttong in km vanaf de monding van het ARK op basis van de 150 en 370 mg/l chloride contouren. Op deze manier wordt opnieuw aangesloten bij de reeds gehanteerde methodiek door RWS WNN. In Tabel 8 is een overzicht gegeven van belangrijke koppelpunten langs het ARK. Deze koppelpunten krijgen extra aandacht in de resultaatbeschouwing.

Tabel 8 Overzicht van belangrijke koppelpunten langs het ARK.

Intrusie [ARK km]	Beschrijving
<3.5 km	Zouttong beperkt tot de monding
3.5 km	Verziltig bij Diemen
5 km	Uitwisselpunt AGV bereikt
10 km	Uitwisselpunt Driemond/Weesp bereikt
13 km	Nigtevecht bereikt
18 km	Dreigende verziltig Nieuwersluis

### 3.5.3 Temporeel

Zoals reeds is benoemd, is het ARK-NZK zwak-dynamisch aangaande het zoutgedrag. De modelberekeningen worden daarom elk uitgevoerd voor een periode van 3 maanden met constante forcering. Dit is voldoende tijd om van de initieel opgelegde conditie 95 tot 99% van de equilibriumconditie te bereiken horend bij de opgelegde forcering (Arcadis, 2022). Omdat de initiële conditie samenhangt met de directe voorgeschiedenis van de situatie in het systeem in combinatie met de beheerstrategie, kan deze niet bekend verondersteld worden. Daarom is voor de resultaatbeschouwing enkel de uiteindelijke equilibrium status van het systeem uitgelezen. Dat houdt in dat de gemodelleerde forcering 2 à 3 maanden wordt aangehouden om slechts in zeer beperkte mate beïnvloed te worden door de (fictieve) initiële conditie binnen het systeem.



**4**

**Resultaten  
modelschematisatie**

## 4 Resultaten modelberekeningen

Met behulp van de modelresultaten is gekeken naar twee overkoepelende vraagstukken:

1. Hoe reageert de chlorideconcentratie in het ARK-NZK systeem ten gevolge van de opgelegde forceringen?
2. Hoe manifesteert de zoutflux (in, uit en netto) bij IJmuiden zich ten gevolge van de opgelegde forceringen?

Binnen deze hoofdvragen worden nog enkele subvragen beantwoord. De bevindingen worden hier integraal beschreven vanwege de sterke samenhang binnen de werking van het systeem. In hoofdstuk 6 wordt vervolgens geput uit dit hoofdstuk en hoofdstuk 3 om antwoorden te formuleren op de kennisvragen zoals opgenomen in paragraaf 1.2.

### 4.1 Chlorideconcentratie ARK-NZK

Ten gevolge van een bepaalde randforcering ontstaat een ruimtelijk chlorideveld variërend in de horizontaal en verticaal binnen het ARK-NZK systeem. Op dat moment is er grofstoffelijk een evenwicht tussen de zoutforcering bij het schutcomplex IJmuiden, de zoutafvoer bij het spui/maal IJmuiden en de zoete tegendruk uit het ARK. Kenmerkend voor het systeem is dat het NZK zouter zal zijn, met name in de diepere delen. De chloridewaarde neemt hier dus toe richting de bodem. Op het ARK ontstaat verzilting vanuit de monding op het NZK en bepaalt de tegendruk doorgaans hoe ver deze verzilting het ARK op binnendringt. De stratificatie is hier relatief klein, wat inhoudt dat de chloride waarde aan de bodem hier maar marginaal hoger is dan aan het oppervlak. In werkelijkheid zal een equilibrium nooit bereikt worden, omdat randvoorwaarden niet lang genoeg constant zijn. Een beschouwing van het equilibrium wordt wel representatief verondersteld voor een dynamisch evenwicht waarbij de randvoorwaarde zich gemiddeld genomen in een bepaalde bandbreedte bevinden. Ook kan eenvoudig de gevoeligheid van het systeem voor een bepaalde randvoorwaarde bepaald worden. In onderstaande paragrafen is deze beschouwing uitgevoerd voor het ARK en het NZK.

#### 4.1.1 Chlorideconcentratie in het ARK

##### 4.1.1.1 Algemeen

De equilibrium chloridewaarde bij Diemen (-1,4 m NAP) als functie van de primaire vrijheidsgraden (zoutvracht, lateraaldebieten, WIS) is weergegeven in Tabel 9. Nota Bene: deze equilibriumwaarden zijn nog exclusief de inzet van de Selectieve Onttrekking (dit wordt beschouwd in paragraaf 4.2.3.2).

Voor een aantal scenario's is het oppervlaktewater zoet, te zien aan de chloridewaarde van 83 mg/l, de opgelegde achtergrondwaarde van het bovenstroomse zoete water. Om de chloridewaarde onder de grenswaarde van 150 mg/l te houden, zijn de volgende WIS-debieten benodigd:

- Bij een zoutvracht van 500 kg/s voldoet 35 m<sup>3</sup>/s, behalve bij een extreem droge zomer, dan is 5 à 10 m<sup>3</sup> meer nodig.
- Bij een zoutvracht van 1500 kg/s voldoet 55 m<sup>3</sup>/s bij een gemiddelde droogte, bij extreme droogte is meer debiet benodigd.
- Bij een zoutvracht van 2500 kg/s voldoet 75 m<sup>3</sup>/s.
- Bij een zoutvracht van 3500 kg/s voldoet 75 m<sup>3</sup>/s bij een gemiddelde droogte, bij extreme droogte is 5 à 10 m<sup>3</sup> extra nodig.
- Bij een zoutvracht van 5000 m<sup>3</sup>/s voldoet 75 m<sup>3</sup>/s nog steeds enkel bij een gemiddelde droogte, bij extreme droogte is meer debiet benodigd.
- Bij een zoutvracht van 7500 m<sup>3</sup>/s voldoet enkel een WIS-debiet van 95 m<sup>3</sup>/s of meer.

Hieruit kan geconcludeerd worden dat bij een maximale inzet van de huidige configuratie van het schutcomplex IJmuiden (zegge 1000 kg/s) en bij de maximale inzet waarbij ook de Zeesluis IJmuiden wordt ingezet (zegge 1500 kg/s) een WIS-debiet van 60 m<sup>3</sup>/s (exclusief watervraag) voldoende is om het ARK volledig zoet te houden. Bij een gemiddelde zomer volstaat zelfs al 50 m<sup>3</sup>/s. Bij maximale inzet waarbij ook de Zeesluis IJmuiden wordt ingezet

in combinatie met 5 m ZSS (zegge 2500 kg/s) is 70 m<sup>3</sup>/s toereikend tijdens een gemiddeld droge zomer. Ook bij een combinatie van een groei van scheepvaart en 5 m ZSS (3500 tot 7500 kg/s) is het ARK zoet te houden met 75 tot 95 m<sup>3</sup>/s; dit is te herleiden door in de tabel het WIS-debiet te zoeken dat nodig is om in de 3500 tot 7500 kg/s zoutlast de chlorideconcentratie rond de 150 mg/l chloride te behouden. Om dit debiet structureel te kunnen leveren, zonder significante scheepvaart hinder, zal een uitbreiding van het kunstwerk bij Wijk bij Duurstede of een extra kunstwerk (elders) benodigd zijn.

Tabel 9 Equilibrium chloridewaarde bij Diemen (-1,4 m NAP) voor alles 90 scenario's.

WIS [m <sup>3</sup> /s]	Lateralen [ - ]	Fictieve zoutvracht [kg zout per seconde]					
		500	1500	2500	3500	5000	7500
95	<b>gemiddeld droog</b>	83	83	83	83	83	83
	<b>extreem droog</b>	83	83	83	83	87	110
	<b>wat als</b>	83	83	83	84	87	112
75	<b>gemiddeld droog</b>	83	83	83	87	104	154
	<b>extreem droog</b>	83	85	113	155	251	389
	<b>wat als</b>	83	85	118	163	259	401
55	<b>gemiddeld droog</b>	83	93	173	246	384	581
	<b>extreem droog</b>	83	289	548	711	981	1300
	<b>wat als</b>	83	318	578	735	1013	1323
35	<b>gemiddeld droog</b>	83	482	835	1040	1389	1768
	<b>extreem droog</b>	204	1471	2042	2347	2849	3349
	<b>wat als</b>	281	1564	2117	2404	2914	3401
15	<b>gemiddeld droog</b>	455	2128	2813	3180	3752	4354
	<b>extreem droog</b>	2318	4810	5597	6145	6739	7499
	<b>wat als</b>	2601	4986	5717	6265	6842	7583

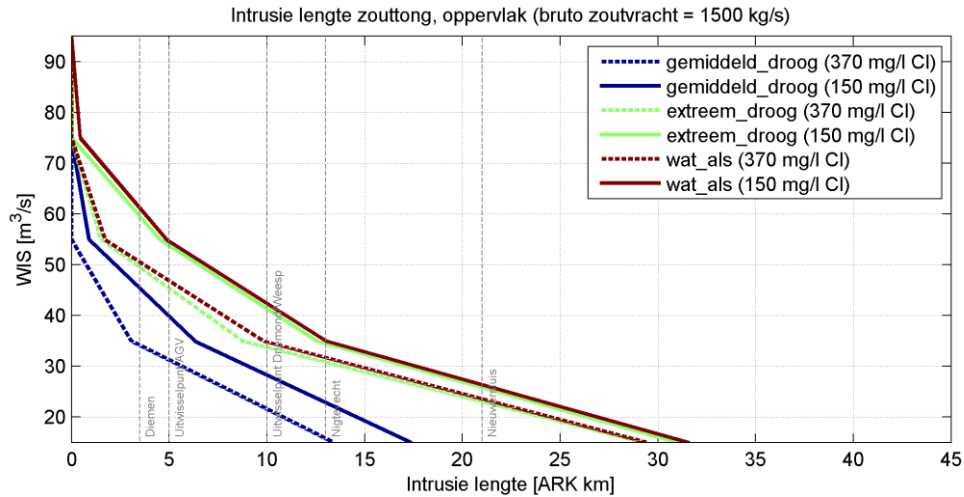
Figuur 11 en Figuur 12 tonen de zoutintrusie langs de lengte-as van het ARK, aan het oppervlak en langs de bodem respectievelijk, als functie van het WIS-debiet, bij een zoutvracht van 1500 kg/s bij IJmuiden. Belangrijke (koppel)punten langs het ARK zijn aangegeven met verticale lijnen in de grafiek<sup>3</sup>. De intrusielijnen zijn getoond voor de 150 en 370 mg/l chloride contouren. De figuren voor alle doorgerekende zoutvrachten (500 tot 7500 kg/s) zijn opgenomen in **Bijlage A**. Een overzicht van de maximale intrusie als functie van de primaire vrijheidsgraden (zoutvracht, lateraaldebiet en WIS) is opgenomen in Tabel 10 (oppervlak) en Tabel 11 (bodem) voor de 150 mg/l chloride contour en in Tabel 12 (oppervlak) en Tabel 13 (bodem) voor de 370 mg/l chloride contour. De kleuren in deze tabellen geven weer wat de status is van de verzilting op basis van de verzilting van belangrijke koppelpunten langs het ARK. Hiervoor is de kleurindicatie uit Tabel 8 gebruikt.

Op basis van de deze resultaten, kan het volgende geconcludeerd worden:

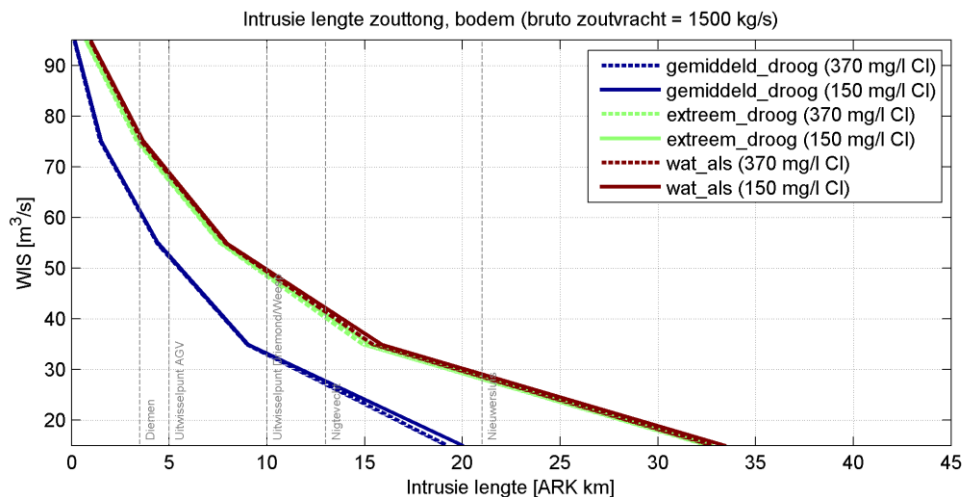
- Het verschil tussen de 150 mg/l en 370 mg/l chloride contour is alleen significant aan het oppervlak.
- Toename van het WIS-debiet heeft bij de lagere debieten binnen de verkende bandbreedte een relatief grotere impact om de zouttong terug te dringen en neemt daarna af.
- Voor de hogere zoutvrachten is een hoger WIS-debiet echter wel nodig om het ARK zoet te houden.

<sup>3</sup> Overige punten van interesse: kilometer 0 bevindt zich ter hoogte van de Amsterdamse brug, gemaal de Aanvoerde bevindt zich rond km 36,6, het Noordgemaal bevindt zich rond km 40,8 en drinkwaterinname punt De Doorslag bevindt zich 1,8 km bovenstrooms van het splitsingspunt op km 42,1.

- Het verschil in intrusielengte langs het wateroppervlak en langs de bodem is nooit groter dan 4 km.
- Bij een gelijke WIS en lateraaldebiet neemt de intrusie minder snel toe naarmate de zoutvracht verder toeneemt.
- Waar extreme droogte vaak een verdubbeling van de intrusielengte oplevert ten opzichte van een gemiddelde droogte, is de intrusie bij het wat-als scenario niet veel hoger.



Figuur 11 Zoutintrusie langs de lengte-as van het ARK aan het oppervlak, als functie van het WIS-debiet, bij een zoutvracht van 1500 kg/s bij IJmuiden. Blauw: gemiddeld droge zomer, groen: extreem droge zomer, bruin: extreem droge zomer met verzilte lateralen. Doorgetrokken lijn: 150 mg/l Chloride contour, gestippelde lijn: 370 mg/l Chloride contour.



Figuur 12 Zoutintrusie langs de lengte-as van het ARK aan de bodem, als functie van het WIS-debiet, bij een zoutvracht van 1500 kg/s bij IJmuiden. Blauw: gemiddeld droge zomer, groen: extreem droge zomer, bruin: extreem droge zomer met verzilte lateralen. Doorgetrokken lijn: 150 mg/l chloride contour, gestippelde lijn: 370 mg/l chloride contour.

Tabel 10 Intrusielengte langs lengte-as van het ARK in km aan het wateroppervlak op basis van de 150 mg/l chloride grens.

WIS [m <sup>3</sup> /s]	Lateralen [ - ]	Fictieve zoutvracht [kg zout per seconde]					
		500	1500	2500	3500	5000	7500
95	gemiddeld droog	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	extreem droog	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	1.0
	wat als	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	1.1
75	gemiddeld droog	0.0	0.0	0.0	0.4	0.9	2.1
	extreem droog	0.0	0.0	1.5	2.5	3.9	4.8
	wat als	0.0	0.5	1.7	2.6	4.2	4.8
55	gemiddeld droog	0.0	0.9	3.0	4.1	4.9	6.3
	extreem droog	0.0	4.5	6.5	7.3	8.3	10.6
	wat als	0.0	4.9	6.6	7.4	8.4	10.7
35	gemiddeld droog	0.1	6.3	8.0	9.0	11.7	12.1
	extreem droog	3.7	12.6	16.0	16.8	19.8	21.3
	wat als	4.4	13.0	16.5	17.3	20.1	21.6
15	gemiddeld droog	6.1	17.4	21.6	22.0	24.3	25.5
	extreem droog	21.7	31.0	33.8	33.8	35.7	36.3
	wat als	23.5	31.6	33.8	34.1	35.7	36.6

Tabel 11 Intrusielengte langs lengte-as van het ARK in km langs de bodem op basis van de 150 mg/l chloride grens.

WIS [m <sup>3</sup> /s]	Lateralen [ - ]	Fictieve zoutvracht [kg zout per seconde]					
		500	1500	2500	3500	5000	7500
95	gemiddeld droog	0.0	0.2	0.7	1.7	1.9	2.9
	extreem droog	0.0	0.7	2.0	2.8	4.1	4.9
	wat als	0.0	1.0	2.2	2.9	4.2	4.9
75	gemiddeld droog	0.0	1.5	2.9	3.8	4.8	5.9
	extreem droog	0.0	3.5	5.3	6.1	7.3	8.5
	wat als	0.0	3.7	5.5	6.2	7.4	8.5
55	gemiddeld droog	0.0	4.4	6.3	7.0	8.5	9.4
	extreem droog	1.6	7.6	9.6	10.3	11.7	12.6
	wat als	1.9	7.9	9.8	10.4	11.8	12.8
35	gemiddeld droog	2.2	9.0	11.3	12.1	13.8	14.9
	extreem droog	5.7	15.3	19.0	19.6	22.5	23.9
	wat als	6.5	15.9	19.5	19.9	22.9	24.1
15	gemiddeld droog	7.8	20.0	23.9	23.8	26.6	27.6
	extreem droog	22.8	32.8	35.7	35.7	37.2	37.7
	wat als	24.7	33.5	35.7	35.7	37.2	38.3



Tabel 12 Intrusielengte langs lengte-as van het ARK in km aan het wateroppervlak op basis van de 370 mg/l chloride grens.

WIS [m <sup>3</sup> /s]	Lateralen [ - ]	Fictieve zoutvracht [kg zout per seconde]					
		500	1500	2500	3500	5000	7500
95	gemiddeld droog	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	extreem droog	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	wat als	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
75	gemiddeld droog	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	extreem droog	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	2.0
	wat als	0.0	0.0	0.0	0.1	0.9	2.0
55	gemiddeld droog	0.0	0.0	0.5	0.9	1.9	3.6
	extreem droog	0.0	1.5	3.4	4.2	5.9	6.8
	wat als	0.0	1.7	3.5	4.4	6.0	6.9
35	gemiddeld droog	0.0	3.1	5.0	6.3	7.5	9.2
	extreem droog	1.1	8.8	12.2	12.9	16.0	17.7
	wat als	1.8	9.8	12.5	13.2	16.3	17.9
15	gemiddeld droog	3.5	13.4	17.6	18.4	21.5	22.9
	extreem droog	18.5	29.3	30.7	31.0	32.3	33.8
	wat als	20.5	29.5	31.0	31.6	32.6	34.1

Tabel 13 Intrusielengte langs lengte-as van het ARK in km langs de bodem op basis van de 370 mg/l chloride grens.

WIS [m <sup>3</sup> /s]	Lateralen [ - ]	Fictieve zoutvracht [kg zout per seconde]					
		500	1500	2500	3500	5000	7500
95	gemiddeld droog	0.0	0.2	0.7	1.6	1.9	2.8
	extreem droog	0.0	0.7	2.0	2.8	4.1	4.9
	wat als	0.0	0.9	2.2	2.8	4.1	4.9
75	gemiddeld droog	0.0	1.5	2.8	3.7	4.8	5.8
	extreem droog	0.0	3.4	5.2	6.0	7.2	8.4
	wat als	0.0	3.6	5.4	6.1	7.4	8.5
55	gemiddeld droog	0.0	4.4	6.3	7.0	8.5	9.4
	extreem droog	1.5	7.6	9.6	10.2	11.6	12.6
	wat als	1.8	7.9	9.7	10.3	11.8	12.7
35	gemiddeld droog	2.1	9.0	11.3	11.7	13.7	14.8
	extreem droog	5.5	14.9	18.5	19.1	22.2	23.7
	wat als	6.2	15.4	19.0	19.4	22.5	23.8
15	gemiddeld droog	7.1	19.2	23.1	23.2	26.1	27.4
	extreem droog	21.4	32.6	34.5	34.8	36.3	37.2
	wat als	23.3	32.8	34.8	35.7	36.6	37.7

#### 4.1.1.2 Zoute kwel

De gevoeligheid voor zoute kwel is onderzocht met een fictief scenario waarbij alle lateralen benedenstreams van Weesp met een factor 10 tot 20 verzilten tot een chloridewaarde van 1.660 mg/l. Dit kan gezien worden als een 'wat-als?'-scenario.

Op basis van Tabel 9 kan gesteld worden dat de chloridewaarde aan het wateroppervlak bij Diemen, gegeven dat deze al verzilt was (>370 mg/l) toeneemt met 1 tot 10%. 10% bij de lagere zoutvrachten bij IJmuiden tot 1% bij de extreme zoutvrachten bij IJmuiden. Qua intrusielengte resulteert dat in een toename van 50 tot 500 m. Bij de meer relevante zoutvrachten van 1.500 kg/s tot 2.500 kg/s resulteert de zoute kwel in een toename van de intrusielengte van circa 250 meter. Daarmee is de gevoeligheid voor zoute kwel vrij beperkt.

#### 4.1.1.3 Bellenscherm

Sinds de droge zomer van 2018 is een bellenscherm geïnstalleerd in de monding van het ARK. Deze kan in tijden van droogte vrij snel operationeel worden gemaakt. Gebaseerd op de algemene werking van een bellenscherm (Kobus, 1999), is het effect van dit bellenscherm tweeledig gegeven dat de zouttong rond de monding van het ARK ligt. Bij de bodem zorgt het opwaartse luchtdebiet dat de zouttong minder gemakkelijk het ARK opdringt. In plaats daarvan vindt er een zekere scheiding van waterlagen plaats. Ook vindt er gering opwaarts debiet plaats rond het bellenscherm wat zorgt voor opmenging van het zoutere water dat zich aan de bodem bevindt. Dit zoutere water ondervindt daarna meer tegendruk van het water vanuit het ARK en meer richting het NZK teruggedrongen. Dit beschikbare debiet wordt als het ware 'effectiever' ingezet.

Het systeem is sindsdien beperkt ingezet en er zijn vooralsnog niet voldoende metingen om het effect van het bellenscherm te kwantificeren. De beperkte metingen die beschikbaar zijn, lijken te wijzen op een reductie van de chloridewaarde bovenstroom van het bellenscherm tot 40% (Rijkswaterstaat, 2020).

Twee opmerkingen dienen gemaakt te worden:

1. Het zout wordt niet afgevoerd uit het systeem, maar blijft in het NZK en/of in de monding van het ARK hangen. Als het bellenscherm zou worden uitgezet, herstelt het oorspronkelijke evenwicht zich in orde uren tot dagen (de responstijd van het ARK).
2. Als de zouttong het bellenscherm (ver) gepasseerd is, zal de effectiviteit afnemen. De zoute en zoete waterlaag kunnen minder goed gescheiden worden en door de beperkte stratificatie is de winst van zouter water opmengen ook beperkter.

#### 4.1.1.4 Buiten de zomer

Buiten de zomer is er doorgaans meer afvoer beschikbaar uit de lateralen die instromen op het ARK-NZK systeem. Om de gevoeligheid van het systeem in kaart te brengen, is een extra lateraal debiet scenario verkend, aangeduid met 'gemiddeld nat'. Op basis van 2015 is het bijbehorend lateraaldebiet bepaald, namelijk het maximum van het 12-wekelijks gemiddelde van deze jaargang. Om te kunnen vergelijken met bestaande simulaties binnen de verkende assen, is gekozen voor een combinatie met een WIS van 15 m<sup>3</sup>/s en de volledige zoutvracht bandbreedte. De resultaten in de vorm van de chlorideconcentratie bij Diemen en de intrusielengte langs het ARK, zijn opgenomen in Tabel 14 en Tabel 15, respectievelijk.

Het effect van een verhoogde lateraalafvoer buiten de zomermaanden blijkt significant. Grofstoffelijk kan geconcludeerd worden dat het verschil tussen een gemiddeld droog scenario en een extreem droog scenario qua chloridewaarde bij Diemen (-1,4 m NAP), vergelijkbaar is met het verschil tussen een gemiddeld nat scenario en het gemiddelde droge scenario. Het verschil qua intrusie lengte is nog forser. Dit zou betekenen dat:

- de fluctuatie van de chloridewaarde binnen het systeem toe zal nemen ten gevolge van ZSS;
- het systeem makkelijker houdbaar blijft buiten de zomermaanden,
- er daarom mogelijkheden zijn om het systeem intensiever te gebruiken (bijvoorbeeld meer scheepvaart) buiten de zomermaanden binnen de huidige strategie,

- eventueel de mogelijkheden tot zoetspoelen van het systeem buiten de zomermaanden te verkennen, om zo een zoete buffer op te bouwen in de diepere delen van het NZK.

Tabel 14 Equilibrium chloridewaarde bij Diemen (-1,4 m NAP), enkel voor een WIS van 15 m<sup>3</sup>/s.

WIS [m <sup>3</sup> /s]	Lateralen [ - ]	Fictieve zoutvracht [kg zout per seconde]					
		500	1500	2500	3500	5000	7500
15	gemiddeld nat	83	114	289	389	631	911
	gemiddeld droog	455	2128	2813	3180	3752	4354
	extreem droog	2318	4810	5597	6145	6739	7499
	wat als	2601	4986	5717	6265	6842	7583

Tabel 15 Intrusielengte langs lengte-as van het ARK in km langs het wateroppervlak op basis van de 150 mg/l chloride grens, enkel voor een WIS van 15 m<sup>3</sup>/s.

WIS [m <sup>3</sup> /s]	Lateralen [ - ]	Fictieve zoutvracht [kg zout per seconde]					
		500	1500	2500	3500	5000	7500
15	gemiddeld nat	0.0	2.1	4.5	5.8	6.9	8.3
	gemiddeld droog	6.1	17.4	21.6	22.0	24.3	25.5
	extreem droog	21.7	31.0	33.8	33.8	35.7	36.3
	wat als	23.5	31.6	33.8	34.1	35.7	36.6

#### 4.1.1.5 Effect van ZSS

Het effect van ZSS op de chlorideconcentraties in het ARK, kan worden beschouwd binnen de verkende bandbreedte van de zoutvracht. Met de ZSF is bepaald dat de zoutvracht ten gevolge van ZSS vrijwel lineair toeneemt tot 65% bij 5 m ZSS. In de situatie dat volledig gebruik van het huidige schutcomplex à 1500 kg/s bij gecombineerd gebruik van de Noordersluis en Zeesluis IJmuiden, gecombineerd wordt met 5 m ZSS, komt dit neer op een zoutvracht van 2500 kg/s. Op basis van Tabel 9, Tabel 10 en

Tabel 11 kan het effect van ZSS gekwantificeerd worden, zoals:

- In het geval van een gemiddeld droge zomer zal het WIS-debiet verhoogd moeten worden van 55 naar 75 m<sup>3</sup>/s om het ARK volledig zoet te houden.
- Als het WIS-debiet op 55 m<sup>3</sup>/s ingesteld blijft, zal de intrusie in het ARK met circa 2 km toenemen.

### 4.1.2 Chlorideconcentratie in het NZK

#### 4.1.2.1 Algemeen

De equilibrium Z5-waarde in het NZK als functie van de primaire vrijheidsgraden (zoutvracht, lateraaldebieten, WIS) is weergegeven in Tabel 16. Nota Bene: deze equilibriumwaarde zijn exclusief de inzet van de Selectieve Onttrekking. De kleurschaal van de waarden is volgens de huidige interventiewaarden zoals beschreven in paragraaf 3.5.1. Wat direct opvalt is dat de huidige beheerstrategie nauwelijks houdbaar is wanneer de zoutvracht in deze vorm toeneemt. De impact van hogere WIS-debieten is wel zichtbaar, maar hogere WIS-debieten zijn bij lange na niet in staat om de Z5-waarde onder de eerste interventiewaarde van 4000 mg/l te houden bij een zoutvracht van 1500 kg/s of hoger.

Tabel 16 Equilibrium Z5-waarden voor alle 90 scenario's.

WIS [m <sup>3</sup> /s]	Lateralen [ - ]	Fictieve zoutvracht [kg zout per seconde]					
		500	1500	2500	3500	5000	7500
95	gemiddeld droog	1365	3807	4938	5688	6590	7740
	extreem droog	1654	4244	5383	6177	7210	8501
	wat als	1906	4413	5524	6309	7329	8610
75	gemiddeld droog	1687	4297	5440	6373	7341	8640
	extreem droog	2078	4911	6197	7088	8042	9352
	wat als	2327	5112	6364	7226	8175	9467
55	gemiddeld droog	2124	5038	6323	7211	8170	9480
	extreem droog	2666	5877	7148	8048	9000	10302
	wat als	2956	6089	7327	8200	9139	10429
35	gemiddeld droog	2729	6008	7286	8191	9148	10464
	extreem droog	3663	7117	8370	9242	10186	11471
	wat als	4054	7369	8570	9413	10348	11606
15	gemiddeld droog	3811	7290	8546	9428	10379	11677
	extreem droog	5302	8833	9952	10829	11682	12936
	wat als	5776	9120	10174	11037	11859	13088

#### 4.1.2.2 Amsterdamse grachten

Vanwege het ruimtelijke karakter van de modelresultaten, is het ook mogelijk om naar een apart onderdeel van het ARK-NZK systeem te kijken. Zo ook de Amsterdamse grachten. Deze staan sinds 2007 in open verbinding met het NZK en kunnen dus (verder) verzilten als het NZK dat doet. In Tabel 17 is de ruimtelijk gemiddelde equilibriumwaarde in mg/l van het oppervlaktewater weergegeven als functie van de primaire vrijheidsgraden. Het kan geconcludeerd worden dat, mits de grachten in open verbinding blijven, deze ook vrij snel zullen verzilten als het NZK dat doet.

Tabel 17 Ruimtelijk gemiddelde equilibrium chloridewaarde (mg/l) in oppervlaktewater van de Amsterdamse grachten, voor alle 90 scenario's.

WIS [m <sup>3</sup> /s]	Lateralen [ - ]	Fictieve zoutvracht [kg zout per seconde]					
		500	1500	2500	3500	5000	7500
95	gemiddeld droog	172	609	965	1226	1576	2087
	extreem droog	206	797	1245	1533	1916	2481
	wat als	251	860	1307	1580	1955	2530
75	gemiddeld droog	245	1016	1544	1876	2301	2951
	extreem droog	319	1376	1950	2364	2807	3547
	wat als	395	1455	2023	2417	2866	3588
55	gemiddeld droog	432	1728	2386	2862	3357	4158
	extreem droog	696	2330	3072	3588	4148	5021
	wat als	824	2438	3158	3665	4216	5082
35	gemiddeld droog	991	2884	3716	4304	4916	5872
	extreem droog	1634	3978	4877	5469	6141	7144
	wat als	1859	4132	5004	5574	6250	7228

15	<b>gemiddeld droog</b>	2266	4835	5831	6494	7236	8333
	<b>extreem droog</b>	3778	6661	7608	8290	8979	10038
	<b>wat als</b>	4127	6881	7773	8448	9111	10148

#### 4.1.2.3 Amstel ter hoogte van de Berlagebrug

Ook is gekeken naar de equilibriumchloridewaarde in de Amstel ter hoogte van de Berlagebrug als functie van de primaire vrijheidsgraden. Deze zijn verzameld in Tabel 18. De chloridewaarde blijft hier langere tijd laag. Op deze locatie is wel een sterke afhankelijkheid van het debiet op het ARK zichtbaar. Door de rechtstreekse verbinding met de monding van het ARK via het Lozingskanaal, lijkt het gedrag in grote mate op het chloridegedrag bij Diemen.

Tabel 18 Equilibrium chloridewaarde (mg/l) ter hoogte van de Berlagebrug, voor alles 90 scenario's.

WIS [m <sup>3</sup> /s]	Lateralen [ - ]	Fictieve zoutvracht [kg zout per seconde]					
		500	1500	2500	3500	5000	7500
95	<b>gemiddeld droog</b>	83	86	85	96	110	161
	<b>extreem droog</b>	83	85	103	119	158	242
	<b>wat als</b>	83	85	106	121	161	249
75	<b>gemiddeld droog</b>	84	93	149	192	297	447
	<b>extreem droog</b>	84	131	234	328	500	658
	<b>wat als</b>	84	136	251	337	518	665
55	<b>gemiddeld droog</b>	85	239	457	596	857	1157
	<b>extreem droog</b>	97	497	740	921	1225	1550
	<b>wat als</b>	107	534	772	951	1248	1579
35	<b>gemiddeld droog</b>	124	897	1351	1613	1994	2478
	<b>extreem droog</b>	314	1343	1801	2097	2528	2946
	<b>wat als</b>	369	1419	1867	2142	2580	2994
15	<b>gemiddeld droog</b>	748	2421	3094	3549	4138	4779
	<b>extreem droog</b>	1228	2889	3481	3839	4262	4764
	<b>wat als</b>	1409	3017	3579	3928	4332	4833

#### 4.1.3 Relatieve gevoeligheid van het systeem

Als gekeken wordt naar de totale bandbreedte aan equilibriumwaarden in het ARK (op basis van Diemen) en in het NZK (op basis van de Z5-waarde), kan een indicatie worden gegeven hoe gevoelig het systeem is voor elk van de verkende randvoorwaarden. Door de resultaten te beschouwen waar twee van de drie assen van de primaire vrijheidsgraden (zoutvracht, lateralen en WIS) constant worden gehouden, kan de gevoeligheid van het systeem voor de derde as bepaald worden. Deze relatieve gevoeligheid is wel gekoppeld aan het (afgewogen) bereik van de onderzochte vrijheidsgraden van het systeem. Het is vooral interessant om te zien hoe de gevoeligheid verschilt per sub regio. Een overzicht van de relatieve gevoeligheden per regio is opgenomen in Tabel 19. Zo is het NZK significant gevoeliger voor de zoutvracht ten opzichte van het ARK (55% versus 33%). Het ARK is daarentegen significant gevoeliger voor het WIS-debiet ten opzichte van het NZK (47% versus 32%). De gevoeligheid voor de lateraaldebieten is voor beide regio's vrij klein, maar dit komt voornamelijk omdat enkel (droge) zomers zijn beschouwd bij deze zoutberekeningen.

Dergelijke inzichten zijn nuttig bij het inzetten van maatregelen. Zo kan het beste naar het WIS gekeken worden om het ARK zoet te houden, maar is het beter om minder te schutten om de chloridewaarde in het NZK omlaag te krijgen. Uiteraard werkt een combinatie van beide maatregelen nog altijd het beste.

Tabel 19 Overzicht van de relatieve gevoeligheid van (delen van) het systeem voor elk van de primaire assen.

Regio	1. Zoutvracht	2. Lateralen	3. WIS
NZK (Z5-waarde)	<b>55%</b>	13%	32%
ARK (chloridewaarde bij Diemen)	33%	20%	<b>47%</b>
ARK/NZK (gemiddelde)	43%	17%	40%

#### 4.1.4 Conclusie

Puntsgewijs de belangrijkste conclusies op basis van de analyse van de chlorideconcentraties in het ARK-NZK systeem:

- Het ARK is relatief goed zoet te houden door het WIS-debiet op te voeren, zelfs bij (extreem) hoge zoutbelasting bij de monding.
- Het NZK is minder gevoelig voor het WIS-debiet en verzilt vrij snel bij een (verdere) toename van de zoutbelasting. Bij het openhouden van de Amsterdamse grachten verzilt ook hier het oppervlaktewater relatief snel bij een toename van de zoutbelasting.
- Het verzilten van lateraaldebieten tot een factor 20 heeft een relatief klein effect op de verzilting van het ARK-NZK systeem.
- Wanneer de lateraaldebieten buiten de (droge) zomerperiodes toenemen, zal ook in de toekomst de verzilting fors afnemen. Dit biedt mogelijkheden voor het uitbaten van systeemfuncties of het creëren van een zoete buffer. De effectiviteit van deze zoute buffer is niet verder onderzocht.
- Het effect van enkel ZSS op de chlorideconcentraties in het ARK-NZK is relatief beperkt. De toename van de zoutvracht met 65% bij 5 m ZSS resulteert in 'slechts' 2 km extra intrusie op het ARK en kan relatief eenvoudig gemitigeerd worden met 10 à 20 m<sup>3</sup>/s extra WIS-debiet (of een reductie van de zoutvracht door schutten met ~65%).
- Als gekeken wordt naar de relatieve gevoeligheid van het systeem voor elk van de primaire vrijheidsgraden, kan geconcludeerd worden dat het ARK het meest gevoelig is voor het bovenstrooms restdebiet, terwijl het NZK meer baat heeft bij minder schutten. Een combinatie van beiden werkt uiteraard het beste.

## 4.2 Zoutflux IJmuiden

### 4.2.1 Algemeen

De processen die de totale zoutflux bij IJmuiden bepalen zijn complex. Niet alleen is er sprake van een binnen-buiten koppeling rondom de sluizen, ook speelt de afvoer bij het spui/maal complex een rol. De belangrijkste componenten hierin zijn:

- Een toename van de zoutvracht naar binnen geeft een hogere zoutconcentratie binnen, daarmee een lagere zoutgradiënt over de kolken (het verschil tussen de zoutwaarde binnen en buiten) wat leidt tot een negatieve terugkoppeling op de initiële toename van de zoutvracht.
- Een toename van de afvoer van zout door het spui/maalmiddel geeft een lagere zoutconcentratie binnen, daarmee een hogere zoutgradiënt over de kolken wat leidt

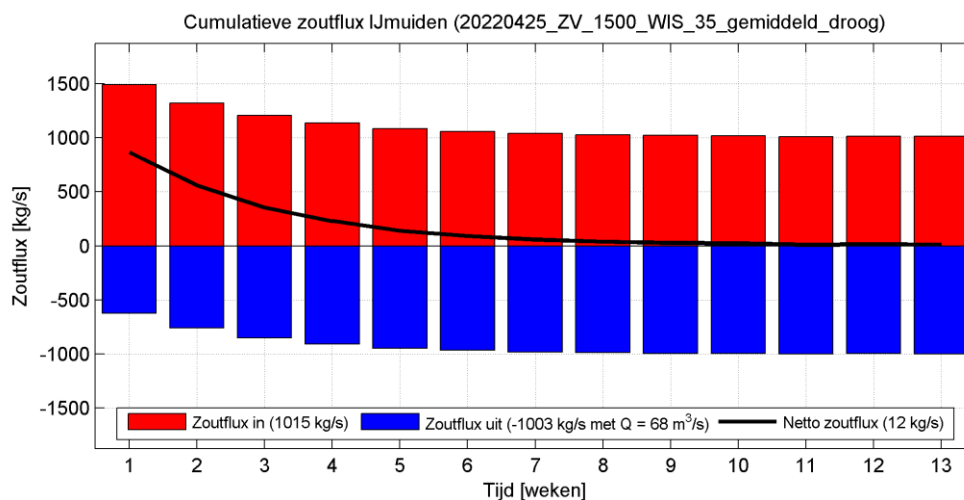
tot een negatieve terugkoppeling op de initiële afname van de zoutconcentratie binnen.

- Tot slot, als de afvoer van zout toeneemt door meer zout met hetzelfde debiet af te voeren (bijvoorbeeld ten gevolge van de Selectieve Onttrekking), zal niet alleen binnen de zoutwaarde afnemen, maar zal ook de zoutwaarden buiten (marginaal) toenemen. Dit resulteert in een grotere zoutgradiënt over de kolken met een negatieve terugkoppeling op de initiële afname van de zoutconcentratie tot gevolg.

### 4.2.2 Schutcomplex

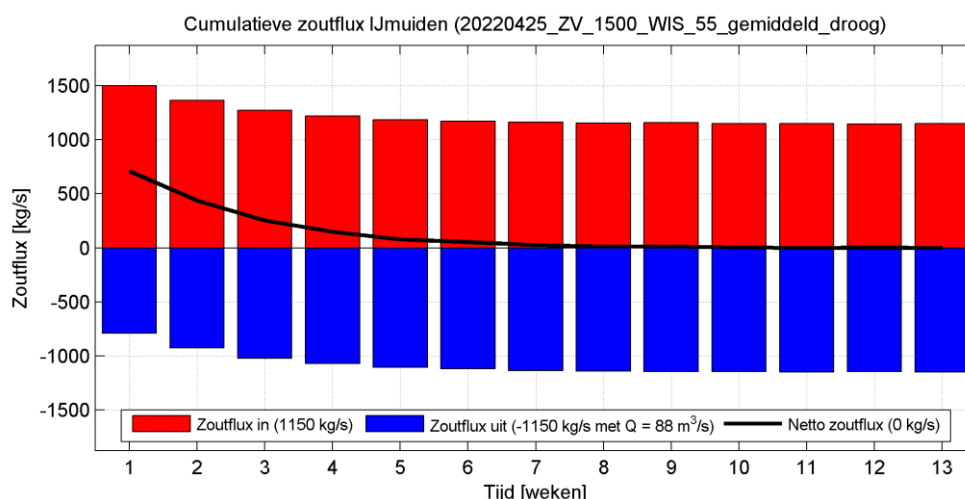
Het schutcomplex is waar de zoutvracht wordt opgelegd in het model. De verkende bandbreedte van de zoutvracht is bepaald met behulp van de ZSF. Deze tool berekent de zoutvracht op basis van belangrijke parameters zoals de zoutgradiënt over de kolk (het verschil in zoutwaarde aan de binnen- en buitenkant), het kolkvolume, de schutscijf en de deur-open-tijd en een aantal minder gevoelige parameters zoals nivellerings-tijd, scheepsvolume en de tijd waarin de deuren openen en sluiten. Tot slot geeft de schutfrequentie een bepaalde zoutvracht per tijdseenheid. Dit is in meer detail beschreven paragraaf 3.4.1.

Voor de verkende intervallen van de zoutvracht bandbreedte is de met de ZSF bepaalde bijbehorende set aan instellingen voor de hierboven genoemde parameters opgelegd in het D-Hydro rekenmodel. De modelresultaten laten zien dat de initieel berekende zoutvracht overeenkomt met de schatting met de ZSF. Zo is in Figuur 13 te zien dat de berekende zoutvracht van 1500 kg/s in de eerste week van de berekening overeenkomt met de opgelegde zoutvracht; de rode balk die de zoutflux in bij het schutcomplex beschrijft 1500 kg/s gemiddeld over de eerste week. Daarna is een afname zichtbaar in de daaropvolgende weken, tot een evenwicht gevonden wordt met de uitgaande zoutvracht bij het spui/maalmiddel. Het evenwicht waarbij de netto zoutvracht 0 bedraagt, blijkt bij deze configuratie (in combinatie met een WIS van 35 m<sup>3</sup>/s en gemiddelde droge zomer) te liggen op circa 1000 kg/s in en uit.



Figuur 13 Ontwikkeling van de zoutflux naar het equilibrium bij een initiële belasting van 1500 kg/s in combinatie met een gemiddelde zomer en een WIS van 35 m<sup>3</sup>/s.

Dit verandert als de afvoercapaciteit omhoog gaat. Bijvoorbeeld door het WIS te verhogen naar 55 m<sup>3</sup>/s. Dit is weergegeven in Figuur 14.



Figuur 14 Ontwikkeling van de zoutflux naar het equilibrium bij een initiële belasting van 1500 kg/s in combinatie met een gemiddelde zomer en een WIS van 55 m<sup>3</sup>/s.

Ook hier wordt het systeem belast met een initiële zoutlast van 1500 kg/s. Nu is echter sprake van een hoger afvoerdebiet en daarmee meer afvoer van zout. Daarmee blijft de zoutwaarde binnen lager en speelt de evenwichtszoutflux zich in op 1150 kg/s (in en uit). Dit illustreert het gekoppelde karakter van de zoutlast, de afvoer, het afgevoerde zout en de zoutwaarden binnen en buiten.

Om de gevoeligheid van de uiteindelijk equilibrium zoutflux voor de beschikbare afvoerende capaciteit te illustreren, is voor elke initieel geforceerde zoutflux in de uiteindelijke equilibrium flux getoond als functie van het WIS-debiet (Tabel 20). Zo zit de equilibrium zoutflux bij een initiële forcering van 500 tot 1500 kg/s hier nog vrij dicht op. Bij een hogere forcering stelt de equilibrium zoutflux zich steeds lager in. Tot circa de helft van de initiële flux bij 7500 kg/s. Uiteraard duidt dit op een steeds hogere zoutwaarde aan de binnenzijde en daarmee een NZK-systeem dat steeds verder afwijkt van de op dit moment vigerende zoutwaarden.

Nota Bene; het effect op de zoutwaarde buiten is hierbij verwaarloosd maar zal ook, weliswaar kleiner, een effect hebben op de equilibrium zoutflux. Ook zijn de hier getoonde equilibrium fluxen exclusief SO. De SO zal hier wel een effect op hebben. Door het vermogen tot het afvoeren van zout te vergroten bij een gelijk afvoerdebiet, zal de equilibrium zoutflux bij IJmuiden zich naar verwachting hoger inspelen.

Tabel 20 Equilibrium zoutflux als functie van de initiële zoutlast en het WIS-debiet, Waardes representatief tijdens een gemiddelde zomer.

Zoutflux			
Initieel zoutflux in (o.b.v. ZSF)	Equilibrium flux (WIS = 15 m <sup>3</sup> /s)	Equilibrium flux (WIS = 55 m <sup>3</sup> /s)	Equilibrium flux (WIS = 95 m <sup>3</sup> /s)
500	431	522	571
1.500	845	1150	1345
2.500	1073	1482	1791
3.500	1398	1885	2265
5.000	1851	2378	2792
7.500	2871	3438	3920



## 4.2.3 Spui/maalcomplex

### 4.2.3.1 Algemeen

Het spui/maalcomplex is het primaire regelwerk om de waterbalans van het ARK-NZK systeem sluitend te krijgen. Dat wil zeggen; het voert water af naar zee om zo het peil op het ARK-NZK te reguleren. Hoe het water precies wordt afgevoerd en welke impact ZSS hierop heeft, is beschreven in paragraaf 3.4.4. Echter, met dit water wat afgevoerd wordt, wordt ook zout afgevoerd. Hoe het spui/maalcomplex op deze manier verantwoordelijk is voor de zoutflux uit en daarmee welke equilibrium zoutflux bereikt wordt, is al aangekaart in paragraaf 4.2.2.

Op dit moment wordt deze zoutflux bepaald door het spui/maaldebiet en de momentane chloridewaarde in het Binnenspuikanaal waaruit onttrokken wordt (de eenheid is daarmee uit te drukken in  $\text{kg/m}^3 * \text{m}^3/\text{s} = \text{kg/s}$ ). Het Binnenspuikanaal is minder diep dan de Velserkom waar het op zijn beurt aan onttrekt. Dat houdt in dat niet het zoutste water afgevoerd wordt. Er zou meer zout kunnen worden afgevoerd met hetzelfde debiet door zouter water te onttrekken (een hogere zoutwaarde in  $\text{kg/m}^3$  bij een gelijk of hoger debiet in  $\text{m}^3/\text{s}$  levert een hogere zoutflux naar buiten in  $\text{kg/s}$ ). De toekomstige SO zal inspelen op dit principe door dieper uit de Velserkom water te onttrekken, dit water met een hogere chloridewaarde zal de chloridewaarde in het Binnenspuikanaal verhogen, wat betekent dat meer zout afgevoerd kan worden. De SO zal daarmee resulteren in een hogere equilibrium zoutflux bij IJmuiden, bij een lagere chloride waarde binnen, wat resulteert in een lagere Z5 en daarmee minder zoutdruk op de monding van het ARK. In de volgende paragraaf wordt hier dieper op ingegaan.

### 4.2.3.2 Selectieve onttrekking (SO)

Doordat de SO (nog) niet opgenomen is in de gebruikte modelschematisatie voor deze studie, is het precieze effect niet te kwantificeren op basis van de modelresultaten. Wel is, wanneer de effectiviteit van de SO in de vorm van de relatieve toename in de afvoer van zout bekend wordt, het effect op de Z5, de concentratie bij Diemen en de intrusielengte langs het ARK af te schatten met behulp van de reeds uitgevoerde berekeningen. Dit is mogelijk door de effectiviteit te verdisconteren in de initieel opgelegde zoutvracht naar binnen<sup>4</sup>. De resulterende zoutvracht in combinatie met het relevante WIS-debiet en lateraaldebiet vormt dan de representatieve situatie. Hieronder volgt een rekenvoorbeeld.

Stel, er is sprake van een initiële zoutvracht in van 2500  $\text{kg/s}$  en de werking van de SO blijkt dusdanig dat de afvoer van zout met 65% toeneemt ten opzichte van een situatie zonder SO. De effecten van deze situatie kunnen dan gevonden worden door te kijken naar de resultaten binnen de 1500  $\text{kg/s}$  kolom ( $2500/1.65 \approx 1500 \text{ kg/s}$ ):

- Gebruikmakend van Tabel 9 kan dan volstaan worden met een WIS-debiet van 55  $\text{m}^3/\text{s}$  in plaats van 75  $\text{m}^3/\text{s}$  om het ARK volledig zoet te houden tijdens een gemiddeld droge zomer.
- Of zal bij een gelijkblijvend WIS-debiet van 55  $\text{m}^3/\text{s}$  de intrusie afnemen met 2 km (op basis van Tabel 10).

Uiteraard is interpolatie van deze resultaten mogelijk, voor een meer accurate doorwerking van de effectiviteit van de SO. Hiermee is te kwantificeren in welke mate de SO van belang is voor de werking van het systeem en het oprekken van de huidige beheerstrategie.

Daarom is het ook van belang de werking van de SO te beschouwen als functie van de drie verkende primaire vrijheidsgraden (zoutvracht, lateralen en WIS-debiet). Zoals eerder benoemd zit de SO niet in de bij deze studie gebruikte modelschematisatie en is deze op een andere manier beschouwd. De effectiviteit van de SO komt voort uit het verschil tussen dieptegemiddeld water onttrekken boven de -11 m NAP, zoals nu het geval is, en onttrekken

---

<sup>4</sup> Vanwege de complexe feedback loop rond in de zoutflux bij IJmuiden, is het nauwkeuriger om de effectiviteit van de SO te verdisconteren als een reductie van de zoutvracht naar binnen dan als een toename van de flux naar buiten, wanneer gebruik wordt gemaakt van de modelresultaten binnen deze studie. Zo wordt het effect van de SO zo volledig mogelijk meegenomen in de feedback loop.

tussen -16 en -23 m NAP na de constructie van de SO. De lokale gelaagdheid van het systeem bepaalt daarmee in grote mate de effectiviteit van de SO<sup>5</sup>. Aan de hand van de berekende zoutverticalen in de monding van het Binnenspuikanaal is vervolgens bepaald wat de relatieve effectiviteit is van de SO. Immers, hoe verder dit relatieve verschil afneemt, hoe kleiner de effectiviteit van de SO ten opzichte van de huidige situatie. Deze afname is met name evident bij een (verdere) verzilting van de Velserkom en het NZK. Het NZK vult zich met zout over de verticaal en het verschil tussen de diepere delen, die al zout waren, en de nu meer verzilte ondiepere delen, neemt af. De hieruit volgende relatieve effectiviteit van de SO, is weergegeven in Tabel 21 waarbij de percentages de relatieve effectiviteit van de SO weergegeven ten opzichte van een basis effectiviteit van 100% bij een fictief referentiescenario bestaande uit een zoutlast van 1000 kg/s, een gemiddeld droge zomer en 35 m<sup>3</sup>/s WIS. Dit fictieve referentiescenario is redelijk vergelijkbaar met de status van het systeem tijdens recentelijke zomers. Geconcludeerd kan worden dat de effectiviteit van de SO afneemt bij een toenemende zoutbelasting, zeker in combinatie met een afname van de totale afvoercapaciteit (lateralen + WIS). Bij een WIS van 35 m<sup>3</sup>/s neemt de effectiviteit van de SO tijdens een gemiddelde zomer af tot bijna 50% bij een zoutbelasting van 7500 kg/s. Gezegd moet worden dat op dit moment het systeem al lang niet meer verkeert binnen de huidige beheerstrategie (zowel het NZK als het ARK zijn dan volledig verzilt). Als specifiek gekeken wordt naar de impact van ZSS op de werking van de SO kan ook gebruik worden gemaakt van onderstaande tabel. De zoutvracht door 5 m ZSS neemt lineair toe tot 65% bij 5 m ZSS. De werking van de SO kan dus afgeleid worden door te kijken naar het verschil in effectiviteit tussen de 1500 en 2500 kg/s kolommen (een toename van ~65 %). Zo kan berekend worden dat de werking van de SO af zal nemen met 15% bij de hogere WIS-debietten tot 25% bij de lagere WIS-debietten.

Tabel 21 Relatieve effectiviteit van de selectieve onttrekking ten opzichte van een fictief referentiescenario bestaande uit een zoutlast van 1000 kg/s, een gemiddeld droge zomer en 35 m<sup>3</sup>/s WIS.

WIS [m <sup>3</sup> /s]	Lateralen [ - ]	Fictieve zoutvracht [kg zout per seconde]					
		500	1500	2500	3500	5000	7500
95	<b>gemiddeld droog</b>	135%	116%	101%	92%	86%	78%
	<b>extreem droog</b>	131%	109%	94%	86%	79%	71%
	<b>wat als</b>	128%	107%	93%	84%	78%	70%
75	<b>gemiddeld droog</b>	130%	109%	94%	85%	79%	70%
	<b>extreem droog</b>	125%	100%	85%	77%	71%	63%
	<b>wat als</b>	122%	98%	83%	76%	69%	62%
55	<b>gemiddeld droog</b>	124%	100%	84%	77%	70%	62%
	<b>extreem droog</b>	117%	89%	74%	68%	61%	54%
	<b>wat als</b>	114%	87%	72%	66%	59%	52%
35	<b>gemiddeld droog</b>	116%	88%	73%	67%	60%	53%
	<b>extreem droog</b>	105%	75%	61%	56%	49%	43%
	<b>wat als</b>	101%	72%	59%	54%	47%	42%
15	<b>gemiddeld droog</b>	105%	74%	60%	55%	48%	43%
	<b>extreem droog</b>	90%	58%	46%	42%	36%	32%

<sup>5</sup> Dit is een grove versimpeling van dit vraagstuk, aangezien er veel meer aspecten bij komen kijken. Echter, voor het detailniveau van deze studie is deze methodiek toegepast om met de voorhanden zijnde tools een relatief effect van de primaire vrijheidsgraden op de SO te kunnen berekenen.

	<b>wat als</b>	85%	55%	44%	40%	35%	31%
--	----------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

#### 4.2.4 Conclusie

Puntsgewijs de belangrijkste conclusies op basis van de analyse van de zoutfluxen bij IJmuiden:

- De zoutflux naar binnen ten gevolge van het schutten bij IJmuiden is opgebouwd uit verschillende componenten, zoals primair de schutfrequentie, deur open tijden, schuttschijf en het kolkvolume.
- Op basis van het kolkvolume kan berekend worden dat de Noordersluis en de Zeesluis IJmuiden tezamen goed zijn voor >95% van de zoutlast.
- Op basis van de gevoeligheid voor de schuttschijf, kan geconcludeerd worden dat de zoutlast tot 65% zal toenemen ten gevolge van 5 m ZSS. Dit effect is vrijwel lineair.
- De invloed van scheepvaart op de zoutlast is dominant ten opzichte van andere factoren, inclusief ZSS.
- De zoutflux die werkelijk naar binnen komt bij een systeem in evenwicht, is in hoge mate afhankelijk van de zoutflux naar buiten. Dit evenwicht wordt namelijk gevonden bij een bepaalde zoutwaarde binnen welke bepaald wat de zoutgradiënt is over de kolken, maar ook hoe zout het spui/maal debiet is.
- De SO is hier een onderdeel van. Het zorgt dat bij hetzelfde spui/maaldebiet meer zout afgevoerd kan worden door zouter water te onttrekken. Zo zal een hoger zoutflux equilibrium (ten gevolge van bijvoorbeeld ZSS en/of meer scheepvaart) bereikt kunnen worden bij een lagere bijbehorende chloridewaarde op het NZK (Z5) en daarmee een verminderde chloridedruk bij de monding van het ARK.
- Echter, als het NZK (fors) verzilt, neemt de stratificatie binnen het NZK af en zal de relatieve effectiviteit van de SO afnemen. Binnen het huidig beheer van het (ARK-)NZK speelt dit echter geen rol.



# 5

## Discussie

## 5 Discussie

### 5.1 Modelschematisatie

Ten tijde van deze studie was de SO nog niet opgenomen in de modelschematisatie van het 3D D-Hydro model van het ARK-NZK systeem. De effecten van de SO zijn in plaats daarvan beschouwd door middel van de berekende zoutverticalen bij de overgang van de Velserskom naar de monding van het Binnenspuikanaal, de locatie waar de SO zich in de toekomst zal bevinden. Zo is op hoofdlijnen de werking van de SO binnen de geëxploreerde bandbreedte van de primaire vrijheidsgraden van het systeem te kwantificeren. De exacte werking van de SO is veel complexer en zal in meer detail beschouwd moeten worden als dit kunstwerk is opgeleverd en de werking uitgebreid is bemeten. Het is aan te bevelen ook ervaring uit het SO-IJ traject mee te nemen om deze onzekerheden omtrent de impact van de SO te verkleinen.

De interactie met de buitenhaven is niet meegenomen in de modelschematisatie. De modelschematisatie faciliteert op het moment van deze studie enkel in de koppeling van buiten naar binnen. In werkelijkheid is er ook sprake van een interactie tussen het systeem binnen en de buitenhaven. Voor nu is deze onzekerheid afgedekt door een maximale zoutwaarde van 35 PSU (19.400 mg/l), de waarde die realistische gezien maximaal bereikt kan worden in de buitenhaven, mee te nemen in de onderzochte bandbreedte voor de zoutvracht.

Binnen de primaire vrijheidsgraad zoutvracht is een vrij forse bandbreedte voor de scheepsvaartintensiteit meegenomen, tot wel een factor drie meer dan de huidige intensiteit. Aangenomen is dat het schutcomplex IJmuiden in dat geval meegroeit zodat een vergelijkbaar schutbeheer en schutkarakter gehandhaafd kan blijven. Mogelijke fundamentele veranderingen hierin (significant afwijkende kolkafmeting, locatie, schutprincipe, e.d.) zijn niet beschouwd.

### 5.2 Modelinvoer

Een blijvend discussiepunt bij de modelinvoer is de initiële chloridewaarde in het ARK-NZK systeem. De werkelijke initiële Z5-waarde in het NZK en initiële chloridewaarde bij Diemen kan niet bekend worden verondersteld. Deze wordt nu constant genomen op 3500 en 150 mg/l chloride respectievelijk, representatieve waarden voor het huidig beheer. Maar deze waarde is te hoog voor sommige combinaties van primaire vrijheidsgraden en te laag voor andere combinaties. Om de gevoeligheid voor de initiële chloridewaarde te minimaliseren, is gewerkt met een simulatieduur van drie maanden, een periode waarbij het systeem voor meer dan 90% ingespeeld is op de nieuwe randvoorwaarden. Vervolgens zijn enkel de gesimuleerde equilibriumwaarden toegepast in de resultaatanalyse.

Zoals reeds benoemd bij de discussiepunten aangaande de modelschematisatie, kan de complexe feedback loop bij IJmuiden niet volledig meegenomen worden in de modelinvoer. Zo levert meer schutten een zoutere binnenhaven niet alleen een afname van de flux, maar ook een toename van de zoute afvoer en daarmee een (tijdelijk) zoutere buitenhaven, zeker in combinatie met de SO. Daarmee zou de flux weer toe kunnen nemen, afhankelijk van de ontstane zoutverdeling in de buitenhaven. Enkel het deel van deze feedback loop (iteratieve koppeling) aan de binnenzijde van het schutcomplex wordt nu meegenomen in de modelberekening. Het is aan te bevelen nogmaals naar de gevoeligheid van het maar deels meenemen van deze feedback loop te kijken mocht een modelschematisatie beschikbaar komen waar deze volledig in opgenomen is (bijvoorbeeld een volledig gekoppeld binnen-buiten modelschematisatie).

Tot slot is enkel met een constante chlorideconcentratie in de bovenstroomse afvoer (WIS-debiet) gerekend. Er is gebruik gemaakt van een representatieve waarde van 83 mg/l chloride terwijl dit in de zomer kan oplopen naar 110 mg/l. De bijdrage op de totale

zoutlast op het systeem is echter vele ordes kleiner dan inkomende concentratie IJmuiden en zal dus niet leiden tot significante andere resultaten.

### **5.3 Studiekader**

Binnen deze studie is uiteindelijk niet gekeken naar de impact van een mogelijke peilverhoging op het ARK-NZK. Een dergelijke wijziging in het beheer zou voordelig kunnen uitpakken voor met name het behoud van afvoercapaciteit (minder stijghoogte benodigd) en de zoutlast bij IJmuiden (afname van de gemiddelde schuttschijf). Op basis van de geëxploreerde vrijheidsgraden binnen deze studie, is wel tot op zekere hoogte af te leiden wat het effect zou zijn van een peilverhoging door het te zien als een reductie van de zeespiegel(stijging).

Tot slot moet benoemd worden dat deze studie uitgevoerd is op basis van de huidige systeemkennis, de huidige modelschematisatie in combinatie met de aannames zoals benoemd in voorliggende rapportage. Deze aannames zijn deels gedaan ten behoeve van het beoogde detailniveau, deels ten behoeve van kennisleemtes en deels ten behoeve van de gebruikte modelschematisatie. De resultaten van deze studie moeten daarom beschouwd worden met dit in het achterhoofd.



# 6

## Conclusies en aanbevelingen

## 6 Conclusies

In dit hoofdstuk worden de kennisvragen zoals in Sectie 1.2 opgesomd kort beantwoord. Voor het beantwoorden van de kennisvragen is primair gebruik gemaakt van de beschouwing van de relevante systeemvariabelen (paragraaf 3.3 en 3.4) en de beschouwing van de modelresultaten (hoofdstuk 4). Waar hiervan afgeweken wordt, is de bron expliciet vermeld.

### A. Kennisvragen over (de ontwikkeling van) waterstand, waterbeschikbaarheid en chlorideconcentratie in het ARK-NZK systeem:

- A1** Hoe verandert de chlorideconcentratie bij de monding van het ARK (Diemen) als gevolg van zeespiegelstijging? Waar ligt de 150 mg/l chloride-grens als gevolg van zeespiegelstijging en afhankelijk van rivieraanvoer?

*Het effect van ZSS is waarneembaar in de ligging van de 150 mg/l chloride-grens op het ARK. Uit de berekeningen blijkt dat de chloride-grens tot 2 km zal opschuiven het ARK in bij 5 m ZSS en een WIS-debiet van 55 m<sup>3</sup>/s. Uitgaande van een initiële zoutlast van 1500 kg/s bij IJmuiden, zal gedurende een gemiddelde zomer het WIS-debiet verhoogd moeten worden van 55 m<sup>3</sup>/s naar 75 m<sup>3</sup>/s om het effect van 5 m ZSS (equivalent met 2500 kg/s) te compenseren. Een toename van scheepvaart leidt mogelijk tot een grotere verschuiving van de 150 mg/l chloride-grens op het ARK (C2).*
- A2** Hoe verloopt de chloridebalans als functie van ZSS op jaarschaal (winterspoelen, verzilten)? Hoe op korte schaal (tijdens een droogte)?

*De seizoen verschillen in de chloridebalans zijn groot. De hogere debieten vanuit de lateralen door met name meer neerslag zorgen dat significant meer zoet water wordt toegevoegd aan het systeem en dat meer debiet beschikbaar is om zout water af te voeren bij IJmuiden. Tegelijkertijd is de watervraag kleiner. De lagere zoutdruk buiten de zomer drukt zich uit in een chlorideconcentratie tot 3000 mg/l lager bij Diemen en een intrusielengte tot 15 km minder. Een verschil dat in de zomer gecompenseerd moet worden met een hoger WIS-debiet en/of minder schutten.*
- A3** Wat is het effect van een bellenscherm op chlorideconcentratie bij Diemen (en zuidelijker)?

*Het kwalitatieve effect is dat door het opmengen van zout water in de verticaal de horizontale zoutindringing wordt tegengegaan, zodat de chlorideconcentratie op het ARK gereduceerd kan worden. De effectiviteit is echter heel afhankelijk van de locatie van de zouttong en het beschikbare bovenstrooms debiet. Er is (nog) te weinig bekend om het effect van een bellenscherm op de zoutintrusie op het ARK verder te kwantificeren.*

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

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

*Deze kennisvraag is niet beschouwd in deze studie. Hiervoor wordt verwezen naar Deltares (2022).*
- B2** Hoe verandert de zoutlast op het ARK-NZK vanuit de polders als gevolg van zoute kwel door zeespiegelstijging?

*Op basis van (Deltares, 2022) is er geen significante toename van zoute kwel vanuit de polders die op het ARK-NZK systeem afvoeren waarneembaar ten gevolge van ZSS. Ook is uit een gevoeligheidsanalyse gebleken dat het systeem qua chloridegedrag niet gevoelig is voor eventuele verzilting van lateralen.*
- B3** Hoe verandert de watervraag van het ARK-NZK vanuit het Markermeer als gevolg van een toename van zoute kwel door zeespiegelstijging?



*In deze studie is geen onderscheid gemaakt tussen bronnen van zoet water om te voorzien in de (toename in) doorspoelbehoefte om zoutintrusie tegen te gaan. Wel is aangetoond dat, teneinde het ARK zoet te houden, de inzet van doorspoeldebiet tot ruim tweemaal effectiever is bovenstrooms van de zouttong in vergelijking met benedenstrooms.*

- B4** Hoe veranderen waterstand en chlorideconcentratie in de Amstelboezem en Amsterdamse stadswateren als gevolg van zeespiegelstijging?  
*In deze studie is niet specifiek gekeken hoe de waterstanden in de tijd zullen veranderen ten gevolge van ZSS, maar is enkel een inschatting gemaakt omtrent de houdbaarheid van de huidige spui/maal configuratie (C3 en C4).  
 Qua chlorideconcentratie in de Amsterdamse stadswateren is geconcludeerd dat, als deze in open verbinding blijven staan met het NZK, ze vooral in de zomer (verder) zullen verzilten. Ten gevolge van ZSS, zal de chloridewaarde tot 30% toenemen gemiddeld over het oppervlaktewater binnen de Amsterdamse stadswateren. Dit effect is maar marginaal te mitigeren met een verhoogd WIS-debiet. Het effect van een verhoogd WIS-debiet is wel terug te zien in de Amstel bij de Berlagebrug, vanwege de toevoer van zoet water via het Lozingskanaal.  
 Verzilting van de Amstelboezem is in hoge mate afhankelijk van het WIS-debiet. Bij een toename van de zoutvracht bij IJmuiden en vervolgens van de verzilting van het NZK, is bij gelijkblijvende bovenstroomse afvoer zoutintrusie op het ARK waarneembaar. Koppelpunten zoals De Diemen, uitwisselpunt AGV, Driemond/Weesp en Nigtevecht zijn gevoelig voor verzilting. Echter, aangetoond is dat deze koppelpunten zoet zijn te houden bij voldoende WIS-debiet.*

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

- C1** Hoe verandert de zoutvracht door het IJmuiden-complex als gevolg van zeespiegelstijging? Wat is de (uitgaande) zoutvracht door het spui-maalcomplex incl. de selectieve onttrekking als functie van ZSS?  
*In theorie neemt de zoutvracht door het schutcomplex ten gevolge van ZSS vrijwel lineair toe tot 65% bij 5 m ZSS. Als gevolg hiervan zal, bij gelijkblijvende andere randvoorwaarden, de chloridewaarde op het NZK toenemen. De zoutgradiënt over het schutcomplex neemt daarmee af en zo zal de netto toename van de zoutvracht door ZSS lager uitvallen. Tegelijkertijd neemt ook de hoeveelheid zout in het afgevoerde water bij het spui/maal complex toe (bij evenwicht is de zoutvracht van de scheepvaartsluizen gelijk aan de zoutafvoer door het spui/maalcomplex, behoudens verschillen ten gevolge van andere kleinere zoutbronnen). Een dergelijke feedback loop is ook waarneembaar bij (een toename van) de zoutvracht door scheepvaart (C2). Het effect is dat er een nieuw evenwicht zal instellen bij een hogere chloridewaarde op het NZK. Deze waarde ligt tot 20% hoger bij 5 m ZSS. De hogere zoutdruk op het ARK hierdoor, is te compenseren met een 15 à 20 m<sup>3</sup>/s hoger WIS-debiet.  
 De SO gaat ook een rol spelen in deze feedback loop. Zo zal het evenwicht bij een bepaalde combinatie van belasting (zoutvracht) en weerstand (zoute afvoer) gevonden worden bij een lagere chloridewaarde binnen. Nota Bene: bij een significante toename van de chloridewaarde op het NZK, zal de effectiviteit van de SO afnemen. Bij handhaving van de huidige grenswaarden voor de chloridewaarde op het NZK, is de impact op de effectiviteit verwaarloosbaar.*
- C2** Wat is het effect van de ontwikkeling van scheepvaart en bijbehorende schutbewegingen op de zoutvracht?  
*Het effect van de eventuele ontwikkeling van scheepvaart is significant. In principe verloopt de toename van de zoutlast lineair met de toename in schutbewegingen, gegeven een gelijkblijvend schutbeheer en de ingebruikname van extra kolken wanneer dit in het geding komt. Dit betekent dat een toename van het aantal schutbewegingen met de Noordersluis/Zeesluis IJmuiden met 65% een vergelijkbaar effect heeft met 5 m ZSS qua zoutlast. In de praktijk zal de toename niet lineair zijn*

aangezien het NZK bij een significante toename van de zoutlast (door ZSS, schutten en/of andere factoren) verder zal verzilten waardoor de zoutgradiënt over de kolken afneemt en daarmee de netto zoutlast wat terugloopt. Met de olopende chloridewaarde op het NZK neemt ook de afvoer van zout toe door het spui/maal middel (eventueel geholpen door de SO). Het resultaat is dat een nieuw chloride evenwicht zich instelt bij een hogere chloridewaarde binnen.

- **C3** Tot welke niveau van zeespiegelstijging loopt de functionele levensduur van de huidige kunstwerken?  
*Er is enkel gekeken naar het functioneren van het spui/maal middel in relatie tot de afvoer. De afvoercapaciteit van het spuimiddel zal afnemen als functie van ZSS en volledig wegvallen bij 0,5 m ZSS (zie **C4** voor meer nuance). De afvoercapaciteit van het maalmiddel zal initieel toenemen ten gevolge van ZSS door toename van het maalvenster. Dit is echter niet voldoende om de gelijktijdige afname van de spuicapaciteit volledig te compenseren. Vanaf 0,75 m ZSS zal ook de maalcapaciteit gaan afnemen en volledig wegvallen tussen de 3 en 3,5 m ZSS. Ver daarvoor zal de spui/maal capaciteit niet meer toereikend zijn om het peil op het NZK te handhaven in gevallen van wateroverlast. In de praktijk blijkt dat spuicapaciteit nu vaak al onontbeerlijk is voor een adequaat peilbeheer. Zo kan geconcludeerd worden dat de functionele levensduur van het huidige spui/maalmiddel reikt tot maximaal 0,5 m ZSS. Ook moet benoemd worden dat de vergunde cumulatieve piekafvoer vanuit de polders à 300 m<sup>3</sup>/s tijdens en na forse neerslag maatgevend blijft boven het maximaal beschouwde WIS-debiet van 95 m<sup>3</sup>/s tijdens een droge zomer.*
- **C4** Hoe verandert de aan- of afvoercapaciteit van de kunstwerken als gevolg van zeespiegelstijging (o.a. onderscheid spui/maal)?  
*Er is enkel gekeken naar het functioneren van het spui/maal middel. Hier is een (verdere) verschuiving naar afhankelijkheid van maalcapaciteit zichtbaar. In recente jaren is de verdeling al gezakt van 60/40% spui/maal naar 50/50%. Deze trend zal in de toekomst doorzetten. Zo zal een ZSS van 0,1 m resulteren in een afname van spuicapaciteit tot 35%. De afvoerbehoefte zal opgevangen moeten met (extra) maalcapaciteit. Bij 0,5 m ZSS zal de spuicapaciteit volledig wegefallen zijn (aangenomen dat het peilbeheer op het NZK gelijk blijft). Ook moet opgemerkt worden dat de ingebruikname van de SO ook zal leiden tot een afname van de spuicapaciteit, voornamelijk door de extra hydraulische weerstand in het Binnenspuikanaal. De afname is vergelijkbaar met 0,1 m ZSS.*

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

De kennisvragen over de waterbeschikbaarheid vanuit de Lek en het beschikbare debiet van alternatieve aanvoeren (Neder-Rijn-Lek, Waal en Markermeer) als functie van ZSS (**E, zie sectie 1.2**) worden beantwoord in de rapportage van het bovenregionaal waterverdelingsstelsel (Arcadis/Hydrologic, 2023e) en worden daarom hier niet beantwoord.



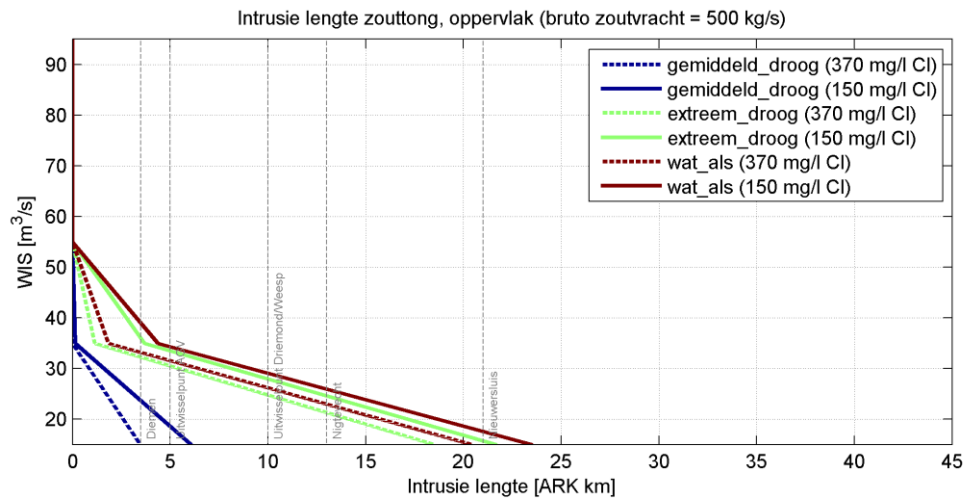
# 7

## Referenties

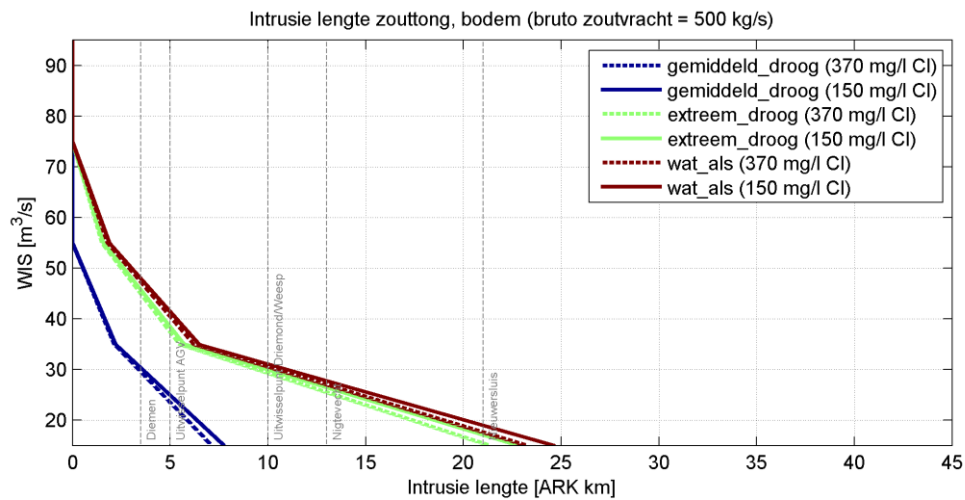
## 7 Referenties

- Arcadis. (2021). *Datarapport Zoutdynamiek NZKARK - D10037562*. Zwolle: Arcadis.
- Arcadis. (2022). *Rapport zoutdynamiek NZKARK, systeemgedrag - D10037562*.
- 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*.
- Deltares. (2018). *Zoutindringing door schutsluizen, overzicht projecten en aanzet formulering t.b.v. netwerkmodellen*. Delft: Deltares.
- Deltares. (2021). *Vraagarticulatie en aanzet modelinstrumentarium Spoor 2 Systeemverkenningen Zoetwater*.
- Deltares. (2022). *Grondwaterverziltting en watervraag bij een stijgende zeespiegel. Kennisprogramma Zeespiegelstijging, spoor II. Rapportnr 1120 039-009-BGS-0001*.
- FutureWater. (2006). *Berekening openwaterverdamping. Opdrachtgever: Wetterskip Fryslân*.
- HKV. (2021). *Toekomstbestendig watersysteem ARK/NZK - Effecten zeespiegelstijging (conceptversie)*.
- HKV/Hydrologic. (2018). *Slim Watermanagement, Redeneerlijnen Amsterdam-Rijnkanaal/Noordzeekanaal*.
- HKV/Hydrologic. (2019). *Slim Watermanagement - Nadere uitwerkingen faalkansanalyse Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal bij wateroverlast*.
- Hydrologic. (2022). *Slim Watermanagement Redeneerlijnen Amsterdam-Rijnkanaal / Noordzeekanaal*. Hydrologic.
- Kobus, H. (1999). *Air Bubble Screens as a Tool for Water Quality Control*. Karlsruhe: Universität Karlsruhe.
- Rijkswaterstaat. (2004). *Het Noordzeekanaal in cijfers anno 2004*. Rijkswaterstaat Directie Noord-Holland.
- Rijkswaterstaat. (2019). *Verkenkend onderzoeksrapport: Impact van klimaatverandering op de buitenwaterstanden bij Gemaal IJmuiden*. RWS WNN.
- Rijkswaterstaat. (2020). *Bellenscherm gaat verziltting Amsterdam-Rijnkanaal tegen (KRW artikel)*. Rijkswaterstaat.
- Rijkswaterstaat. (2021). *Memo bij het rapport Vraagarticulatie en Aanzet Modellerings KP ZSS Spoor II, Zoetwater*.
- Verbruggen, W., & Van der Baan, A. (2020). *Ontwikkeling zesde-generatie 3D Noordzeekanaal Amsterdam-Rijnkanaal model. Modelbouw, kalibratie en validatie*. Delft: Deltares.

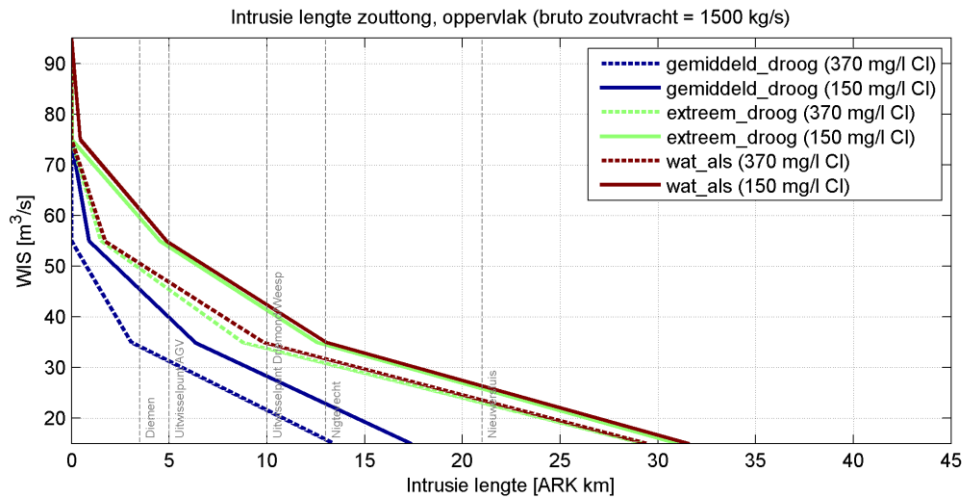
Bijlage A



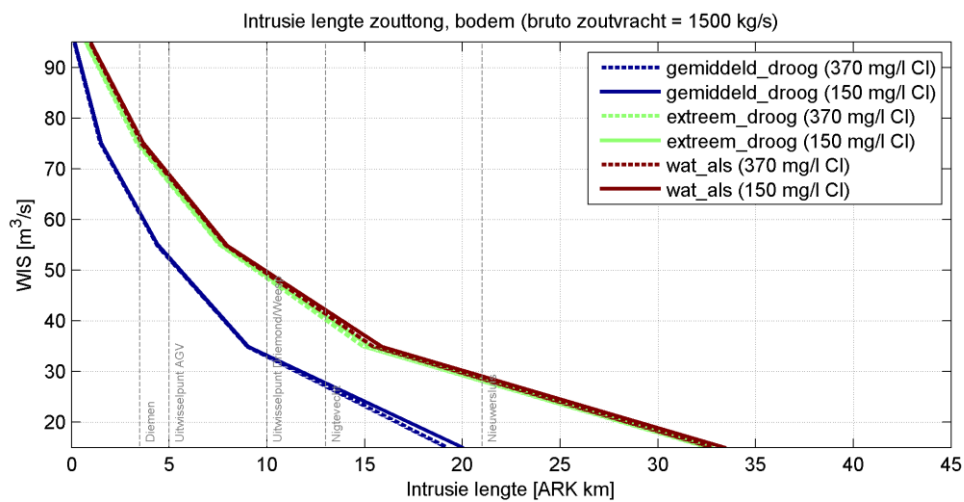
Figuur 15 Zoutintrusie langs de lengte-as van het ARK aan het oppervlak, als functie van het WIS-debiet, bij een zoutvracht van 500 kg/s bij IJmuiden. Blauw: gemiddeld droge zomer, groen: extreem droge zomer, bruin: extreem droge zomer met verzilte lateralen. Doorgetrokken lijn: 150 mg/l chloride contour, gestippelde lijn: 370 mg/l chloride contour.



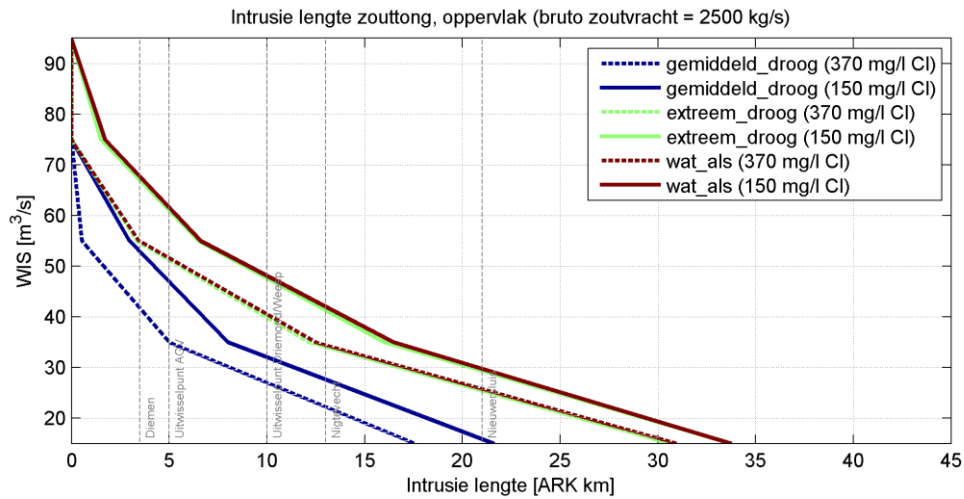
Figuur 16 Zoutintrusie langs de lengte-as van het ARK aan de bodem, als functie van het WIS-debiet, bij een zoutvracht van 500 kg/s bij IJmuiden. Blauw: gemiddeld droge zomer, groen: extreem droge zomer, bruin: extreem droge zomer met verzilte lateralen. Doorgetrokken lijn: 150 mg/l chloride contour, gestippelde lijn: 370 mg/l chloride contour.



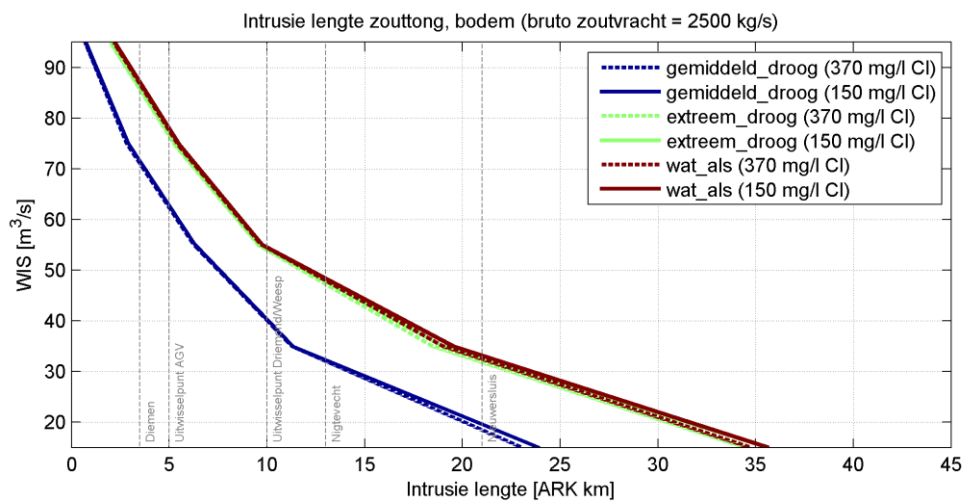
Figuur 17 Zoutintrusie langs de lengte-as van het ARK aan het oppervlak, als functie van het WIS-debiet, bij een zoutvracht van 1500 kg/s bij IJmuiden. Blauw: gemiddeld droge zomer, groen: extreem droge zomer, bruin: extreem droge zomer met verzilte lateralen. Doorgetrokken lijn: 150 mg/l Chloride contour, gestippelde lijn: 370 mg/l Chloride contour.



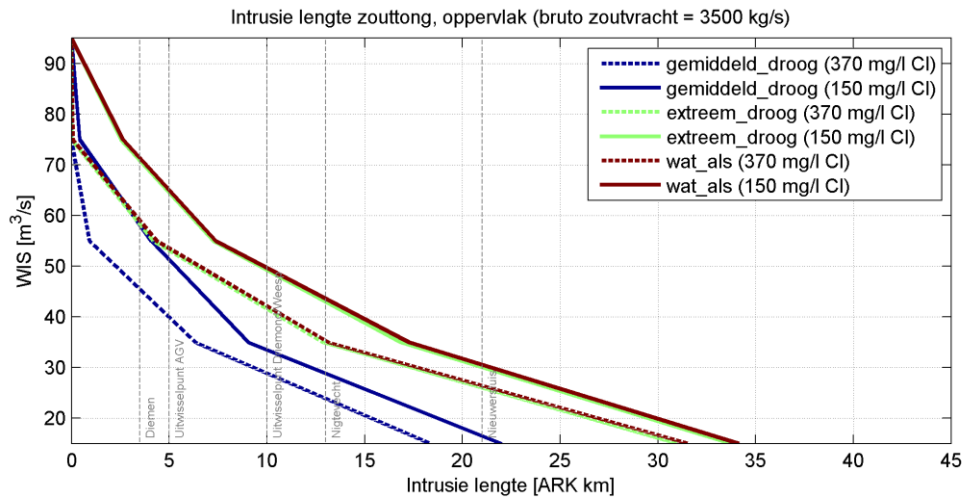
Figuur 18 Zoutintrusie langs de lengte-as van het ARK aan de bodem, als functie van het WIS-debiet, bij een zoutvracht van 1500 kg/s bij IJmuiden. Blauw: gemiddeld droge zomer, groen: extreem droge zomer, bruin: extreem droge zomer met verzilte lateralen. Doorgetrokken lijn: 150 mg/l Chloride contour, gestippelde lijn: 370 mg/l chloride contour.



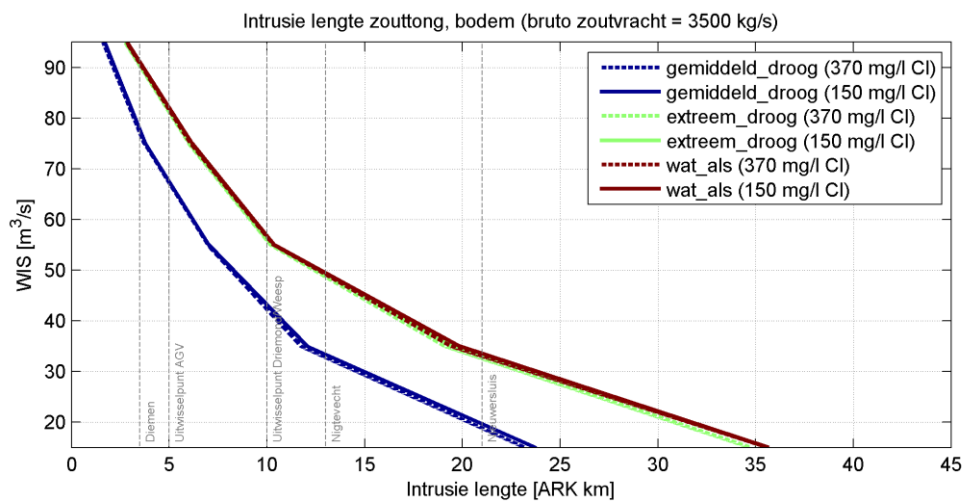
Figuur 19 Zoutintrusie langs de lengte-as van het ARK aan het oppervlak, als functie van het WIS-debiet, bij een zoutvracht van 2500 kg/s bij IJmuiden. Blauw: gemiddeld droge zomer, groen: extreem droge zomer, bruin: extreem droge zomer met verzilte lateralen. Doorgetrokken lijn: 150 mg/l chloride contour, gestippelde lijn: 370 mg/l chloride contour.



Figuur 20 Zoutintrusie langs de lengte-as van het ARK aan de bodem, als functie van het WIS-debiet, bij een zoutvracht van 2500 kg/s bij IJmuiden. Blauw: gemiddeld droge zomer, groen: extreem droge zomer, bruin: extreem droge zomer met verzilte lateralen. Doorgetrokken lijn: 150 mg/l chloride contour, gestippelde lijn: 370 mg/l chloride contour.

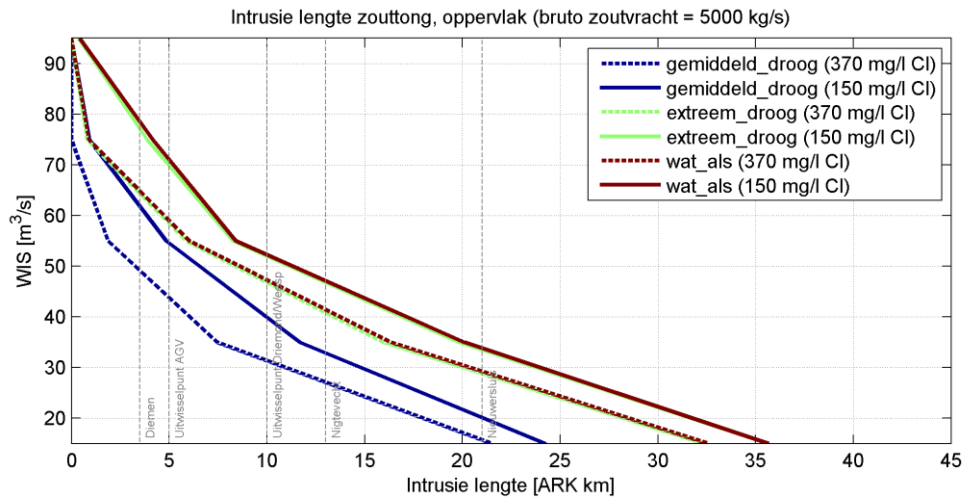


Figuur 21 Zoutintrusie langs de lengte-as van het ARK aan het oppervlak, als functie van het WIS-debiet, bij een zoutvracht van 3500 kg/s bij IJmuiden. Blauw: gemiddeld droge zomer, groen: extreem droge zomer, bruin: extreem droge zomer met verzilte lateralen. Doorgetrokken lijn: 150 mg/l chloride contour, gestippelde lijn: 370 mg/l chloride contour.

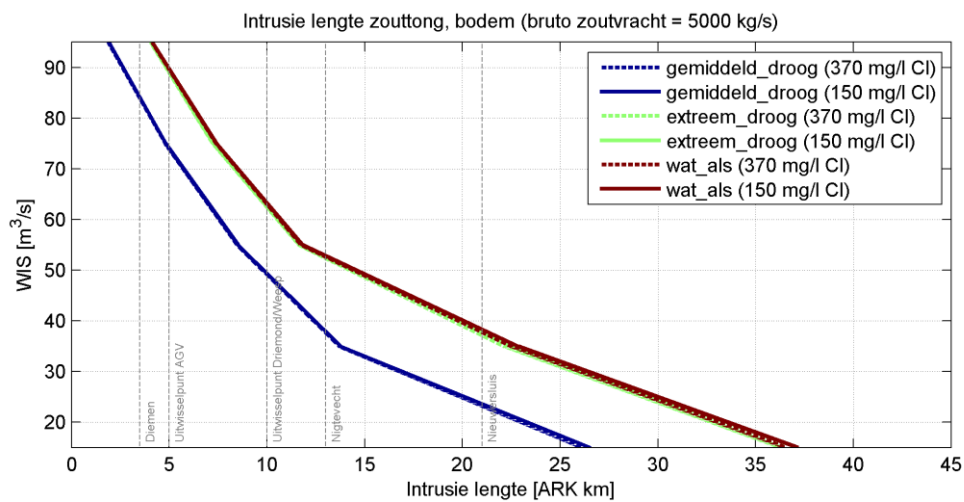


Figuur 22 Zoutintrusie langs de lengte-as van het ARK aan de bodem, als functie van het WIS-debiet, bij een zoutvracht van 3500 kg/s bij IJmuiden. Blauw: gemiddeld droge zomer, groen: extreem droge zomer, bruin: extreem droge zomer met verzilte lateralen. Doorgetrokken lijn: 150 mg/l chloride contour, gestippelde lijn: 370 mg/l chloride contour.

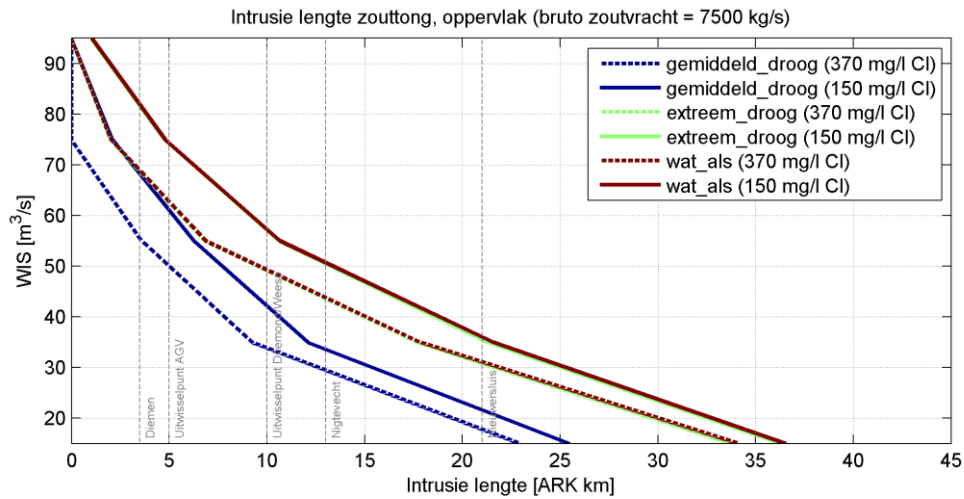




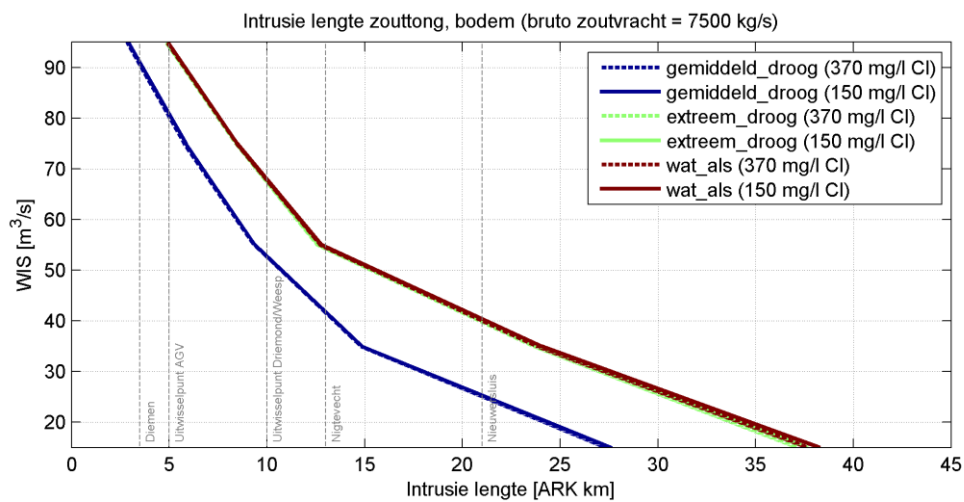
Figuur 23 Zoutintrusie langs de lengte-as van het ARK aan het oppervlak, als functie van het WIS-debiet, bij een zoutvracht van 5000 kg/s bij IJmuiden. Blauw: gemiddeld droge zomer, groen: extreem droge zomer, bruin: extreem droge zomer met verzilte lateralen. Doorgetrokken lijn: 150 mg/l chloride contour, gestippelde lijn: 370 mg/l chloride contour.



Figuur 24 Zoutintrusie langs de lengte-as van het ARK aan de bodem, als functie van het WIS-debiet, bij een zoutvracht van 5000 kg/s bij IJmuiden. Blauw: gemiddeld droge zomer, groen: extreem droge zomer, bruin: extreem droge zomer met verzilte lateralen. Doorgetrokken lijn: 150 mg/l chloride contour, gestippelde lijn: 370 mg/l chloride contour.



Figuur 25 Zoutintrusie langs de lengte-as van het ARK aan het oppervlak, als functie van het WIS-debiet, bij een zoutvracht van 7500 kg/s bij IJmuiden. Blauw: gemiddeld droge zomer, groen: extreem droge zomer, bruin: extreem droge zomer met verzilte lateralen. Doorgetrokken lijn: 150 mg/l chloride contour, gestippelde lijn: 370 mg/l chloride contour.



Figuur 26 Zoutintrusie langs de lengte-as van het ARK aan de bodem, als functie van het WIS-debiet, bij een zoutvracht van 7500 kg/s bij IJmuiden. Blauw: gemiddeld droge zomer, groen: extreem droge zomer, bruin: extreem droge zomer met verzilte lateralen. Doorgetrokken lijn: 150 mg/l chloride contour, gestippelde lijn: 370 mg/l chloride contour.

# Over Arcadis

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

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

# Contactpersoon



Michiel van Reen  
Projectleider Water

