

Kennisprogramma Zeespiegelstijging

Oprekmogelijkheden door maatregelen op spui- en schutsluizen

Colofon

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

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

- Opsteller: Deltares
- Auteurs: Otto Weiler, Nino Zuidervijk, Arnout Bijlsma
- Geschreven in opdracht van Rijkswaterstaat WVL voor het Kennisprogramma Zeespiegelstijging
- Datum: 9 april 2025

KP-ZSS Systemverkenningen Zoetwater

Oprekmogelijkheden door maatregelen op spui- en schutsluizen



KP-ZSS Systemverkenningen Zoetwater

Oprekmogelijkheden door maatregelen op spui- en schutsluizen

Auteur(s)

Otto Weiler

Nino Zuiderwijk

Arnout Bijlsma

KP-ZSS Systeemverkenningen Zoetwater

Oprekmogelijkheden door maatregelen op spui- en schutsluizen

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Jantine Hoekstra
Referenties	Kennisprogramma Zeespiegelstijging, zoetwaterbeschikbaarheid. oprekmaatregelen
Trefwoorden	Schutsluizen, spuisluizen, zoutindringing, zeespiegelstijging, zoetwaterbeschikbaarheid, IJsselmeer, Noordzeekanaal, Volkerak-Zoommeer, bellenschermen, spoeldebiet

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	09-04-2025
Projectnummer	11210315-004
Document ID	11210315-004-BGS-0001
Pagina's	78
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Otto Weiler Nino Zuiderwijk Arnout Bijlsma	

Samenvatting

Het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KPZSS) stuurt het onderzoek aan naar de mogelijke gevolgen voor Nederland van een zeespiegelstijging tot 5 meter. Het onderzoek moet tevens kennis opleveren om keuzes te kunnen maken voor de bescherming en inrichting van Nederland in voorbereiding op die gevolgen. Het kennisprogramma bestaat uit verschillende sporen. Het spoor Systeemverkenningen (voormalig Spoor II) beoogt uiteindelijk de houdbaarheid en oprekbaarheid van de huidige deltabeslissingen en strategieën in beeld te brengen. Dit gebeurt voor de thema's waterveiligheid, zandige kust (het kustfundament) en zoetwater (verzilting).

In fase 1 van het KP-ZSS is gebleken dat zoutindringing bij zeesluizen één van de meest belangrijke bronnen is van zoutintrusie op het achterliggende zoetwatersysteem, ook bij een stijgende zeespiegel. De afgelopen jaren is dit ook in toenemende mate in beeld gekomen buiten het KP-ZSS, onder andere door verzilting tijdens lage rivierafvoeren, ingebruikname van de nieuwe Zeesluis IJmuiden, de renovatie van de Krammersluizen en door plannen voor het vergroten van de Lorentzsluizen bij Kornwerderzand.

Verder is uit de analyses binnen de Systeemverkenningen gebleken dat het effect van zeespiegelstijging op de zoutintrusie bij zeesluizen afhankelijk is van veel factoren en dat het lastig is om in te schatten welke maatregelen effect hebben op de reductie van de zoutvracht en hoeveel zoetwater hiervoor nodig is. Ook in het ontwerpend onderzoek in andere delen van het KP-ZSS (voormalig Spoor IV) is gebleken dat (de gevolgen van) zoutintrusie bij een mogelijk (gedeeltelijk) gesloten strategie nog onvoldoende in beeld zijn.

Het voorliggende rapport probeert antwoorden te geven op deze kennisvragen. Het transport van water en zout door schutsluizen is te berekenen met de Zeesluisformulering (ZSF) (zie onder andere [22]) Maar het probleem is niet zozeer het transport van zout door de schutsluizen als wel het zoutgehalte dat op enige afstand daarvan ontstaat. De verspreiding van zout speelt dus een grote rol en deze wordt sterk beïnvloed door de geometrie (een kanaal of een meer) en het doorspoeldebiet (een van de te onderzoeken maatregelen). Omdat de gebieden waarvoor deze vragen moeten worden beantwoord zo verschillende zijn, is een generieke benadering niet goed mogelijk.

Daarom is gekozen voor een rekenkundige benadering per gebied. Daarbij wordt het transport door de sluizen bepaald met de ZSF en wordt de verspreiding van het zout bepaald met een bakjesmodel van het betreffende gebied. Deze benadering bouwt voort op eerdere projecten waarin een vergelijkbare aanpak is gehanteerd. Een aanpak met een bakjesmodel is uiteraard beperkt in resolutie en nauwkeurigheid. Dat geldt ook voor de beschouwde condities: per gebied wordt gekeken naar situaties die representatief zijn voor dat gebied en waarvoor getallen voorhanden zijn. Ondanks deze beperkingen kan hiermee verkend worden wat de invloed is van zeespiegelstijging en van maatregelen om de zoutindringing te beperken.

Voor het IJsselmeer wordt gekeken naar de zoutindringing door zowel de schutsluizen als de spuisluizen in de Afsluitdijk. Daarbij wordt ook gekeken naar de berging van zout in de erosiekuilen aan de binnenkant van de spuisluizen. Voor het Noordzeekanaal – Amsterdam-Rijnkanaal wordt gekeken naar de schutsluizen te IJmuiden en de daar recent gebouwde Selectieve Onttrekking (ook wel zoutdam genoemd). Voor het Volkerak-Zoommeer wordt geen nieuw rekenwerk gedaan: op basis van het vele rekenwerk voor het ontwerp van de

nieuwe methode van zout-zoetscheiding aldaar (de IZZS: Innovatieve ZoutZoetScheiding) kan beredeneert worden wat er te verwachten is.

Het globale beeld is dat er met maatregelen veel gedaan kan worden om de toename van de zoutindringing die het gevolg is van zeespiegelstijging te mitigeren. Echter, dit is moeilijker voor het IJsselmeer, waar de lekkage door de spuisluizen zal toenemen totdat deze geheel gesloten zullen worden omdat, door de zeespiegelstijging, de spuisluizen hun functie verliezen. Dit speelt op de relatief korte termijn: bij 0,5 m zeespiegelstijging zullen er al maatregelen nodig zijn bij Kornwerderzand en bij Den Oever kan er dan al haast niet meer gespuid worden. Dus zolang de spuisluizen nog niet volledig zijn vervangen door pompen, levert de lek door deze spuisluizen een steeds zwaardere zoutbelasting op het systeem.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
2	Aanpak	9
3	IJsselmeergebied	10
3.1	Inleiding	10
3.2	Aansluiting op modelberekeningen Arcadis/Hydrologic	10
3.3	Aanpak spuisluizen en gemalen in de Afsluitdijk	13
3.4	Schematisatie spuisluizen en gemalen	14
3.4.1	Spuisluizen	14
3.4.2	Gemalen	15
3.4.3	Spuihavens en directe omgeving, meerzijde	17
3.4.4	Spuihavens en directe omgeving, zeezijde	18
3.4.5	Kalibratie / validatie spuisluizen	20
3.5	Resultaten spuisluizen en gemalen	21
3.5.1	Algemeen	21
3.5.2	Resultaten spuisluizen en gemalen KWZ	21
3.5.3	Resultaten spuisluizen en gemalen DO	24
3.5.4	Discussie resultaten spuisluizen en gemalen	25
3.5.5	Berekeningen bij halvering van het lek-oppervlak	26
3.5.6	Discussie aanvullende berekeningen	29
3.6	Aanpak schutsluizen	29
3.6.1	Gescheiden behandeling spui- en schutsluizen	29
3.6.2	Opzet model, operatie en kalibratie	30
3.7	Schematisatie schutsluizen	30
3.8	Resultaten schutsluizen	31
3.8.1	De beschouwde maatregelen	31
3.8.2	Resultaten schutsluizen KWZ	33
3.8.3	Resultaten schutsluizen DO	34
3.8.4	Discussie	35
3.8.5	Aanvullende berekeningen	35
3.9	Samenvatting en conclusies IJsselmeergebied	37
4	Noordzeekanaal – Amsterdam-Rijnkanaal	39
4.1	Inleiding	39
4.2	Aanpak	39
4.3	Schematisatie	39
4.3.1	NZK en ARK in 4 bakjes	39
4.3.2	Schutsluizen	39
4.3.3	Spui- / maalcomplex en Selectieve Onttrekking	40
4.3.4	Kalibratie / validatie	40
4.4	Resultaten	42

4.5	Conclusies	45
5	Volkerak-Zoommeer	46
6	Samenvatting, conclusies en aanbevelingen	50
6.1	Algemeen	50
6.2	IJsselmeergebied	50
6.3	Noordzeekanaal – Amsterdam-Rijnkanaal	51
6.4	Volkerak-Zoommeer	52
7	Referenties	53
A	Aanvraagspecificatie RWS	55
B	Reactie Deltares op aanvraag RWS	57
C	Korte omschrijving ZoutTransportModel inclusief gelaagd bakje	58
C.1	Algemeen	58
C.2	Schematisatie vorm erosiekuil nabij spuisluizen DO & KWZ	59
C.3	Schematisatie van zouttransport bij lekkage, spuien en pompen	61
C.3.1	Lekkage	61
C.3.1.1.	Conditie 1	62
C.3.1.2.	Condities 2	63
C.3.2	Spuien	64
C.3.2.1.	Conditie 1	64
C.3.2.2.	Conditie 2	66
C.3.3	Pompen	66
C.3.3.1.	Lekkage via pompen	67
C.3.3.2.	Afvoer via pompen	67
C.4	Randvoorwaarden zouttransport van en naar overige bakjes	70
D	Kalibratie van het ZoutTransportModel voor de spuisluizen in de Afsluitdijk	71
D.1.1	Kalibratie invoer	71
D.1.2	Kalibratie resultaat	73

1 Inleiding

Het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KPZSS) stuurt het onderzoek aan naar de mogelijke gevolgen voor Nederland van een zeespiegelstijging tot 5 meter. Het onderzoek moet tevens kennis opleveren om keuzes te kunnen maken voor de bescherming en inrichting van Nederland in voorbereiding op die gevolgen. Het kennisprogramma bestaat uit verschillende sporen. Het spoor Systeemverkenningen (voormalig Spoor II) beoogt uiteindelijk de houdbaarheid en oprekbaarheid van de huidige deltabeslissingen en strategieën in beeld te brengen. Dit gebeurt voor de thema's waterveiligheid, zandige kust (het kustfundament) en zoetwater (verzilting).

In de systeemanalyses in Fase 1 van de Systeemverkenningen Zoetwater van het KPZSS is gebleken dat zoutindringing bij zeesluizen één van de belangrijkste bronnen is van zoutinrusie op het achterliggende zoetwatersysteem, ook in relatie tot de effecten van een stijgende zeespiegel. De afgelopen jaren is dit ook in toenemende mate in beeld gekomen buiten het KPZSS, onder andere door verzilting tijdens lage rivierafvoeren, bij ingebruikname van de nieuwe Zeesluis IJmuiden, bij de renovatie van de Krammersluizen en bij onderzoek voor het vergroten van de Lorentzsluizen bij Kornwerderzand.

Verder is uit de analyses binnen de Systeemverkenningen gebleken dat het effect van zeespiegelstijging op de zoutinrusie bij zeesluizen afhankelijk is van veel factoren en dat het lastig is om in te schatten met welke maatregelen de zoutvrucht succesvol gereduceerd kan worden en hoeveel zoetwater hiervoor nodig is. Ook in het ontwerpend onderzoek binnen voormalig Spoor IV (Lange-Termijnstrategieën) is gebleken dat de gevolgen van zoutinrusie bij een mogelijk gesloten strategie nog onvoldoende in beeld zijn.

Daarom is er behoefte aan een inventariserend onderzoek dat een overzicht biedt van de maatregelen tegen zoutinrusie bij zeesluizen. RWS heeft Deltares gevraagd om als onderdeel van Fase 2 van het thema Zoetwater binnen de Systeemverkenningen van het KPZSS dit inventariserende onderzoek uit te voeren en in kaart te brengen wat voor maatregelen er op de verschillende kunstwerken te nemen zouden zijn en wat hiervan de invloed is op de zoutindringing en de doorspoelbehoefte, zie Bijlage A.

Naast de schutsluizen spelen ook de daaraan verbonden spuisluizen een grote rol bij zoutindringing. Voor het IJsselmeer betreft het de spui- en schutsluizen in de Afsluitdijk. Voor het Noordzeekanaal en het Amsterdam-Rijnkanaal gaat het om de schutsluizen in IJmuiden, met het naastgelegen spui- en maalcomplex, inclusief de Selectieve Onttrekking (Zoutdam). Voor het Volkerak-Zoommeer zijn het de verschillende kunstwerken die de verbinding vormen naar Oosterschelde (met name de Krammersluizen), Westerschelde (de spuisluis bij Bath) en de Antwerpse havendokken (de Kreekraksluizen). Op de verschillende locaties zijn verschillende aspecten dominant in de zoutindringing en in de behoefte aan zoetwater om dit te bestrijden.

2 Aanpak

In de door RWS opgestelde aanvraagspecificatie (zie Bijlage A) wordt gevraagd om een algemeen (generiek) overzicht van maatregelen op schut- en spuisluisen en wat die kunnen betekenen (kwantitatief) qua beperking van de zoutindringing en de doorspoelbehoefte. In reactie daarop heeft Deltares aangegeven (Bijlage B) dat de combinatie van generiek en kwantitatief niet goed mogelijk is: de watersystemen met de kunstwerken zijn daarvoor te verschillend en bovendien is er interactie tussen verschillende maatregelen. Het is daarom noodzakelijk om per watersysteem een rekenkundige verkenning te doen naar de toename van zoutindringing door zeespiegelstijging en naar de effecten van daarop in te zetten maatregelen.

Om die verkenning te doen is er behoefte aan de (door-)ontwikkeling van het Zout-Transport-Model (ZTM), dat bestaat uit (onder andere) de Zeesluisformulering (ZSF) voor het zouttransport door de schutsluisen, inclusief het effect van maatregelen op de schutsluisen, aangevuld met een bakjesmodel dat een (versimpelde) beschrijving geeft van de verspreiding van het zout in het zoete watersysteem, inclusief het effect van het doorspoelen daarvan. Een dergelijke aanpak is eerder gebruikt voor het Noordzeekanaal ([16] en [17]) en voor het genereren van randvoorwaarden voor 3D-modelonderzoek voor het IJsselmeer ([9], [10], [11]).

Een zorgvuldige en toekomstbestendige ontwikkeling van het ZTM paste niet binnen het budget en de planning van dit project. Om die reden is er gewerkt met ad-hoc-versies van het ZTM: deze zijn doorontwikkeld op basis van bestaande Python-scripts zoals gebouwd in de al genoemde studies voor het Noordzeekanaal en het IJsselmeer.

Deze bestaande rekentools bevatten de mogelijkheid om schut- en spuisluisen te beschrijven en het zoete watersysteem met een of meerdere bakjes. Voor de zoutindringing naar het IJsselmeergebied speelt echter ook de zoutindringing via de spuisluisen in de Afsluitdijk een belangrijke rol [3]. Daarbij is ook de berging van zout in de erosiekuilen aan de binnenzijde van de spuisluisen van groot belang. Om dit effect enigszins te kwantificeren is gewerkt aan de ontwikkeling van een 'twee-laags bakje' tussen de spuisluisen en het IJsselmeer, waarmee deze berging en uitspoeling wordt beschreven.

Met de op deze manier aangevulde ad-hoc versies van het ZTM zijn berekeningen gedaan voor het IJsselmeer en voor het Noordzeekanaal – Amsterdam-Rijnkanaal (NZK-ARK). Voor het Volkerak-Zoommeer (VZM) zijn geen berekeningen gedaan, maar is alleen een rapportage geschreven, voortbouwend op wat voor dit gebied is gedaan voor de Deltascenario's [3]. Daarin is uiteengezet dat, na ombouw van de Krammersluisen naar de nieuwe IZZS (Innovatieve Zout-Zoetscheiding), er eigenlijk niet veel extra's meer te bedenken is; zeespiegelstijging vormt wel een bedreiging voor de werking van de IZZS, maar dit is grotendeels op te lossen door het bouwen van gemalen voor het afvoeren van water dat nu nog op vrij verval geloosd kan worden.

3 IJsselmeergebied

3.1 Inleiding

De zoutindringing vanaf de Waddenzee naar het IJsselmeer wordt veroorzaakt door de spuisluizen en de schutsluizen in de Afsluitdijk, beiden aanwezig bij zowel Den Oever (de Stevinsluizen) als bij Kornwerderzand (de Lorentzsluizen). Beide typen kunstwerken veroorzaken zoutindringing op zeer verschillende manieren. Om de zoutindringing te kwantificeren is er daarom voor elk type behoefte aan een aparte rekenkundige beschrijving van die processen, zodanig dat er een voorspelling kan worden gedaan van de verandering in de zoutindringing door zeespiegelstijging (ZSS), en van de effectiviteit van maatregelen tegen de zoutindringing.

Om het zoutgehalte in het IJsselmeer te beperken wordt er regelmatig gespuid, ook in de zomers als er maar weinig water beschikbaar is. Daarmee wordt water met een (al of niet verhoogd) zoutgehalte afgevoerd naar de Waddenzee. De netto zoutindringing (de hoeveelheid zout die in het IJsselmeer zorgt voor een verandering van het zoutgehalte) is daardoor een functie van hoeveel water er wordt afgevoerd.

Binnen Fase 2 van het Kennis-programma Zeespiegelstijging heeft RWS een opdracht verstrekt aan Arcadis en Hydrologic om tezamen een verkenning te doen naar het beheer van het IJsselmeergebied onder verschillende scenario's van klimaatverandering. Het werk van Deltares zoals in dit rapport beschreven moet daarop aansluiten. Die aansluiting is als volgt te omschrijven:

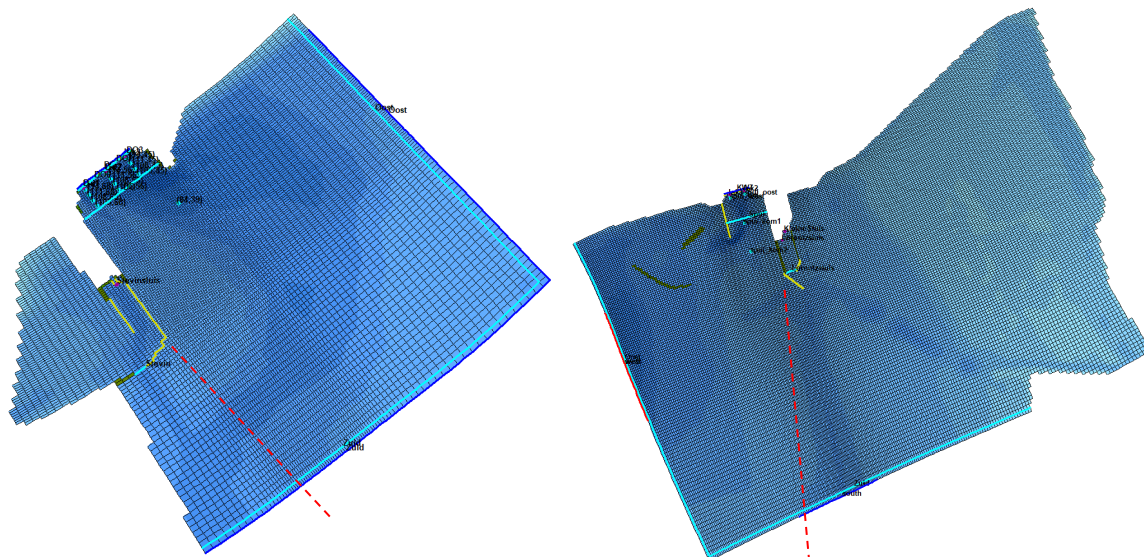
- Arcadis/Hydrologic (A/H) brengt met haar model in beeld welke daggemiddelde netto zoutvracht naar het IJsselmeer **toelaatbaar is** voor Andijk, voor verschillende criteria voor Chloride-gehalte en duur van overschrijding, gegeven een bepaalde daggemiddelde afvoer over de Afsluitdijk. Voor de randvoorwaarden bij de kunstwerken in de Afsluitdijk heeft A/H haar eigen aanpak uitgewerkt.
- Aan Deltares is gevraagd om te bepalen welke reductie van de daggemiddelde netto zoutvracht **haalbaar is** gegeven een bepaalde daggemiddelde afvoer over de kunstwerken, voor verschillende waarden van zeespiegelstijging en verschillende maatregelen op (enerzijds) de schutsluizen en (anderzijds) de spuisluizen en apart voor beide locaties (DO en KWZ).

Op basis van de resultaten van beide studies is dan te bepalen **welke combinaties van maatregelen** op de spui- en schutsluizen bij resp. Den Oever en Kornwerderzand passend zijn **bij welk scenario van zeespiegelstijging en rivierafvoer**.

3.2 Aansluiting op modelberekeningen Arcadis/Hydrologic

Het toekomstig beheer van het IJsselmeergebied wordt door Arcadis/Hydrologic (A/H) onderzocht met hetzelfde bakjesmodel als gebruikt in Fase 1 [1]: dit model beslaat het hele IJsselmeer en het Markermeer. Met dit model worden de toekomstige veranderingen, samenhangend met de klimaatverandering, onderzocht op hun invloed op het meerpeil en het zoutgehalte. De veranderingen betreffen met name de zeespiegelstijging, de IJsselafvoer en de neerslag en verdamping (boven het meer en in omliggende gebieden).

Voor het kwantificeren van de zoutindringing door de kunstwerken is door A/H gebruik gemaakt van lokale 3D-modellen van het gebied rondom Den Oever en Kornwerderzand. Een afbeelding hiervan is weergegeven in onderstaande figuren.



Figuur 3.1 De Delft3D4 modellen waarmee de principeberekeningen zijn uitgevoerd. Links: Den Oever. Rechts: Kornwerderzand.

Wat er door de kunstwerken aan zout naar binnenkomt wordt door A/H aangeduid als bruto transporten, en wat er dit gebied verlaat naar het IJsselmeer wordt aangeduid al netto transporten. De relatie tussen die twee transporten is bepaald met de 3D-modellen, waarin de berging van zout in de erosiekuilen mede wordt beschouwd. De netto transporten van zout vormen randvoorwaarden van het bakjesmodel, samen met de afvoer van water over dezelfde rand.

De vraag aan Deltares is om de transporten over dezelfde rand te bepalen, voor verschillende waarden van zeespiegelstijging en met verschillende maatregelen om de zoutindringing te beperken. Ook hierbij gaat het over hoeveel zout ontsnapt aan de directe omgeving van de kunstwerken bij Den Oever en Kornwerderzand, en hoeveel water uit het IJsselmeer daarbij wordt afgevoerd.

De maatregelen worden apart verkend voor Den Oever en Kornwerderzand en apart voor de spuisluizen en de schutsluizen. Voor elk object moet dus in kaart worden gebracht hoeveel zout er ontsnapt aan de omgeving van de kunstwerken en hoeveel water daarbij wordt gebruikt. Daartoe is in de aanpak voor de maatregelen voor beide locaties het gebied opgedeeld zoals aangegeven in Figuur 3-1 met een rode stippellijn: een deel voor de spuisluizen en een deel voor de schutsluizen.

De afmetingen van de buitencontour van de 3D-detailmodellen zijn daarmee als volgt:

Tabel 3.1 Afmetingen buitencontour 3D-detailmodellen.

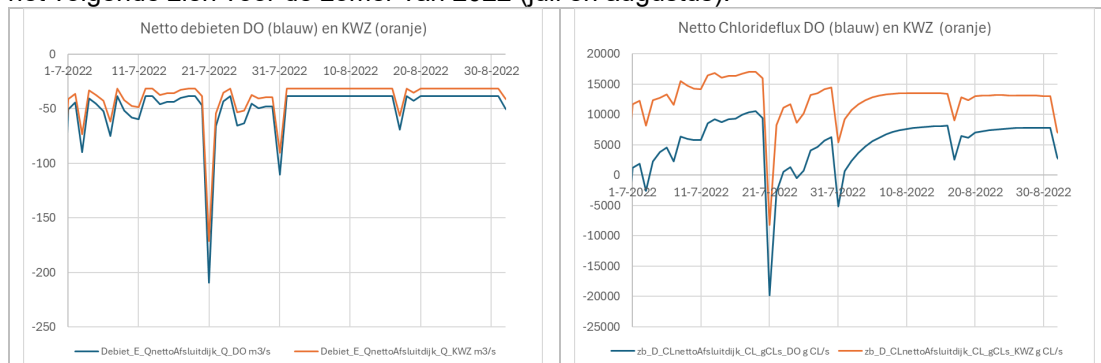
	Den Oever	Kornwerderzand
Parallel aan Afsluitdijk (ZO-rand)	$650 + 2250 = 2900$ m	$1000 + 2950 = 3950$
Loodrecht op Afsluitdijk	2400	3900

Voor de bruto transporten door de kunstwerken (zoutflux en afvoer) worden door A/H onder andere de volgende waarden genoemd, afkomstig van berekeningen met de ZSF in Fase 1 [1] en een document "Nieuwe inzichten IJsselmeer 2018.pdf". De precieze herkomst en betekenis van deze getallen is nog niet helemaal duidelijk. Deze getallen worden daarom hier nu wel genoemd als referentiewaarden, maar zijn van minder groot belang voor de kalibratie.

Tabel 3.2 bruto jaargemiddelde zouttransporten door de kunstwerken richting IJsselmeer genoemd door Arcadis / Hydrologic.

Locatie	Object	Bruto zoutflux [kg/s]
Den Oever	Schutsluizen	10,40
	Spuisluizen	16,35
Kornwerderzand	Schutsluizen	15,50
	Spuisluizen	10,85

De (voorlopige) kalibratie van het bakjesmodel van A/H (data ontvangen op 11 juni 2024) laat het volgende zien voor de zomer van 2022 (juli en augustus):



Figuur 3.2 Detail uit voorlopige kalibratie bakjesmodel IJsselmeergebied van Arcadis / Hydrologic.

In augustus stabiliseert de afvoer en daarmee stabiliseert ook de zoutflux. De waarde van de afvoer is daarbij een tussen A/H en RWS overeengekomen minimale afvoer van 70 m³/s waarvan 55% via Den Oever en 45% via Kornwerderzand. De zoutflux bij deze afvoer is de netto zoutflux zoals bepaald door A/H met het 3D-model, passend bij deze afvoer.

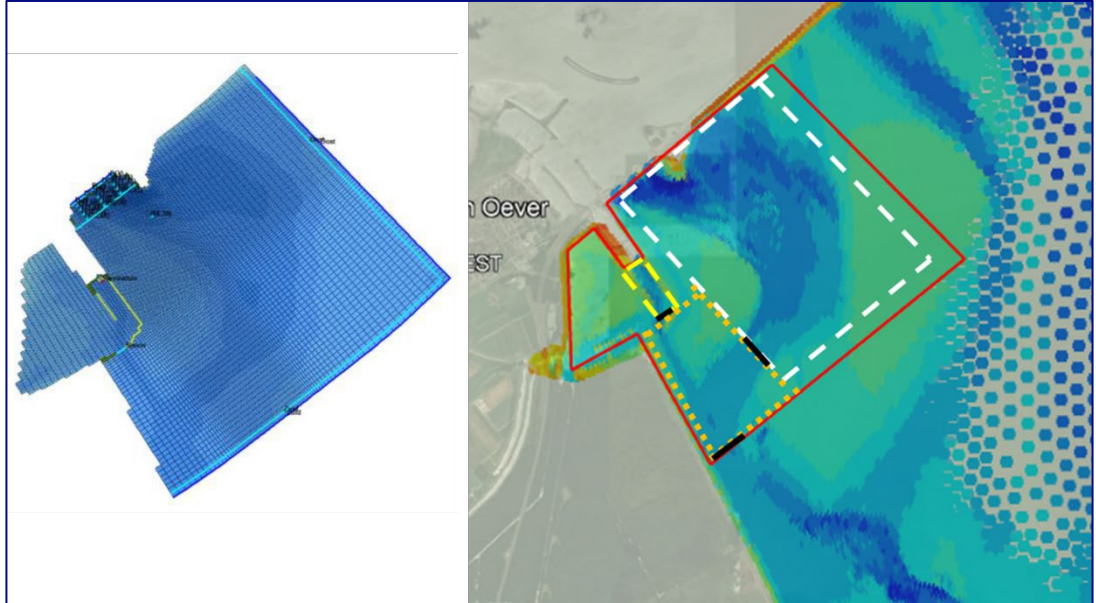
Tabel 3.3 Waarden uit voorlopige kalibratie bakjesmodel IJsselmeergebied voor Augustus 2022.

Locatie	Afvoer	Netto Chloride / Zoutflux
Den Oever (schut + spui)	38,5 m ³ /s	circa 7.800 gCl/s Chloride
		circa 14 kg/s zout
Kornwerderzand (schut + spui)	31.5 m ³ /s	circa 13.000 gCl/s Chloride
		circa 23,4 kg/s zout

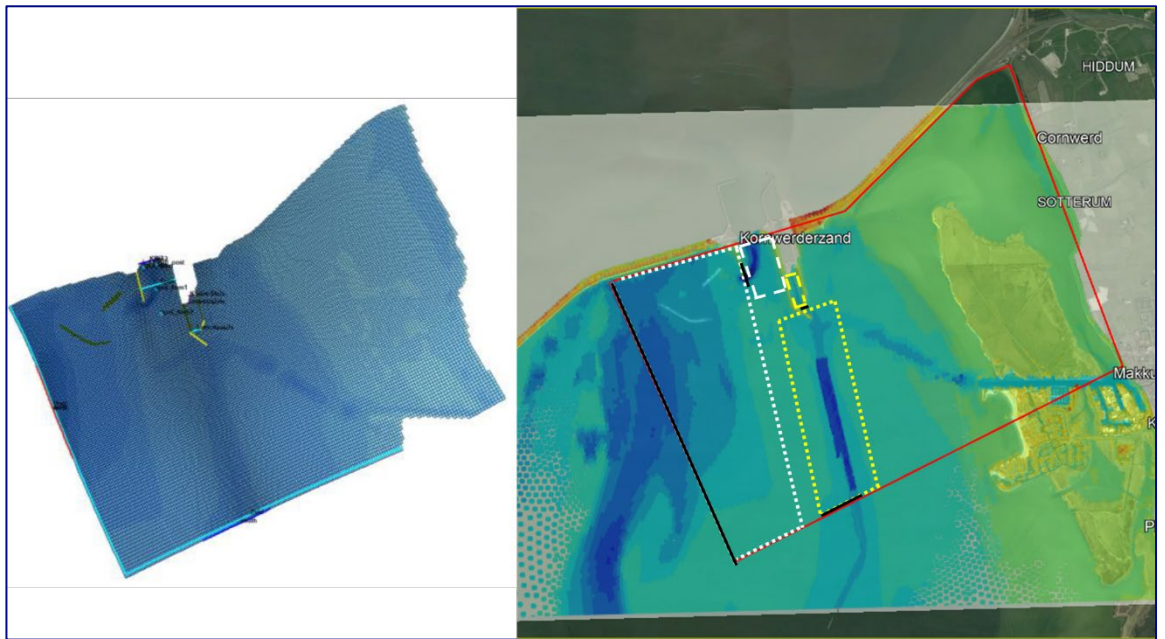
Als we deze waarden vergelijken met de waarden voor de bruto transporten zoals getoond in Tabel 3.2 dan lijkt er een redelijke aansluiting voor Kornwerderzand, maar een wat groter verschil voor Den Oever. Zoals al is opgemerkt is de herkomst en betekenis van de waarden in Tabel 3.2 op dit moment niet helemaal duidelijk. Voor de huidige situatie (geen zeespiegelstijging en geen maatregelen) moet het werk van Deltares daarom vooral aansluiten op de waarden in Tabel 3.3.

In de benadering van Deltares wordt (ook) gebruik gemaakt van bakjesmodellen, en wel om een verbinding te leggen tussen de randvoorwaarden op zee (zoutgehalte en zeespiegelstand) en op het IJsselmeer (zoutgehalte en meerpeil) met daartussen de kunstwerken met hun operatie, de zoutindringing en de afvoer. Voor zowel de spuisluizen als de schutsluizen zijn er twee bakjes tussen de kunstwerken en de randvoorwaarden op het IJsselmeer (het bakjesmodel van A/H).

In onderstaande figuur is aangegeven hoe deze bakjes zijn gepositioneerd op het gebied van de 3D-modellen van A/H. De zwarte lijnstukken geven aan langs welke randen de verschillende bakjes met elkaar zijn verbonden: over deze randen vindt het transport plaats.



Figuur 3.3 Geometrische aansluiting detailmodel A/H (links) en bakjesmodel Deltares (rechts) voor Den Oever.



Figuur 3.4 Geometrische aansluiting detailmodel A/H (links) en bakjesmodel Deltares (rechts) voor Kornwerderzand.

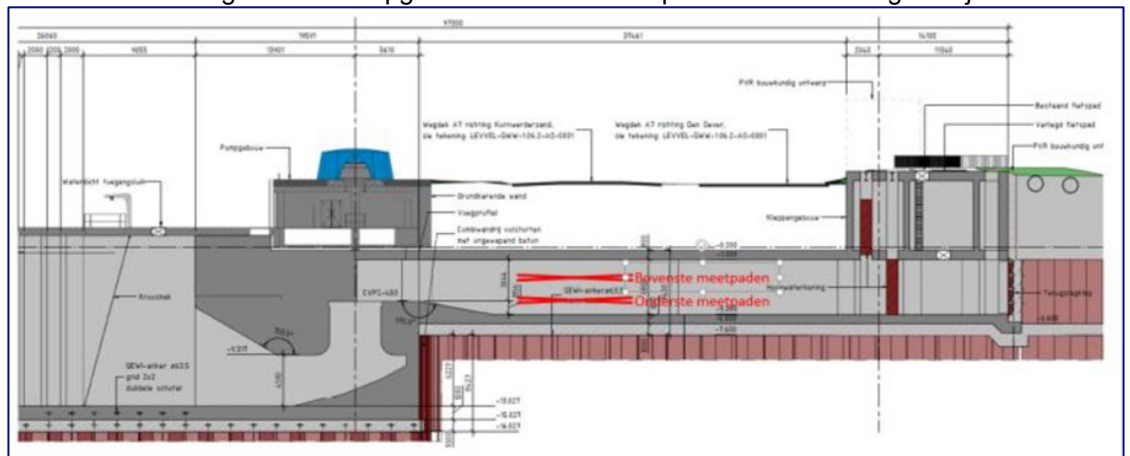
Ook aan de zeezijde zijn er in de bakjesmodellen van Deltares steeds twee bakjes tussen de kunstwerken en de randvoorwaarden op de Waddenzee (Zie Paragraaf 3.4.4).

3.3 Aanpak spuisluisen en gemalen in de Afsluitdijk

De erosiekuil speelt een grote rol in hoe op dit moment zoutindringing via spuisluisen optreedt. Een deel van het binnenkomende zoute water blijft hangen in de erosiekuilen aan de IJsselmeer-zijde van de spuisluisen. Dit zoute water wordt naar buiten gespoeld tijdens het spuien, waarvoor op dat moment relatief veel water nodig is.

Door zeespiegelstijging zal de lekkage van zout water naar binnen toenemen, en door klimaatverandering zal de beschikbare hoeveelheid rivierwater om de kuilen zoet te spoelen afnemen. Met behulp van maatregelen op de spuisluizen zal geprobeerd moeten worden om toch de zoutindringing naar het IJsselmeer beperkt te houden. Om hier een beeld van te krijgen is een rekenmethode opgezet die bestaat uit een twee-laags bakje. De ontwikkeling van dit twee-laags bakje is beschreven in Bijlage C. Hieronder een beknopte samenvatting.

- Het zoute water dat naar binnen lekt zal voor een deel de erosiekuil inlopen, daarbij door menging zoetwater meenemend. In de erosiekuil wordt het steeds zouter, en daarboven blijft het relatief zoet. In de beschouwing van een twee-laags bakje loopt daarom ook een deel van het inkomende zoute water de kuil in (met enige menging met zoeter water uit de bovenlaag) en een ander deel mengt op in het water boven de erosiekuil. Na verloop van de tijd zal de kuil steeds verder gevuld raken met relatief zout water.
- Bij het spuien zal met name water boven de kuil worden afgevoerd, maar afhankelijk van de snelheid in het gespuide water en afhankelijk van de hoogte van grenslaag (de bovenste begrenzing van het zoutere water in de erosiekuil) zal er ook water uit de erosiekuil worden meegesleurd en afgevoerd naar zee. Als de spui lang genoeg aanhoudt is de kuil (praktisch) weer helemaal zoet.
- Door zeespiegelstijging zal er steeds minder verval beschikbaar zijn om te spuien; dan zal er steeds meer gepompt moeten worden. Deze pompen zullen ook enige lekkage kennen. De figuur hieronder geeft een verticale doorsnede over de nieuwe pompen in Den Oever. De tekening laat zien dat de aanzuigopening diep is aangebracht: de bodem zit op NAP -14 / -15 m en het laagste deel van het plafond zit op ongeveer NAP -10 m. Water dat door de pomp naar binnen lekt zal dus onder in de kuil terechtkomen zonder menging of verspreiding naar het IJsselmeer.
- Ook het afvoeren van water met pompen zal gebeuren vanuit de erosiekuil. Er zal water uit de bovenlaag worden meegenomen als de grenslaag in de buurt komt van de aanzuigopening van de pomp: dit conform het principe van Selectieve Onttrekking. Ook dit is opgenomen in het concept van het twee-laags bakje.



Figuur 3.5 Verticale doorsnede over de nieuwe pompen in Den Oever (bron?): links de diepe aanzuig vanuit het IJsselmeer, rechts de Waddenzee.

3.4 Schematisatie spuisluizen en gemalen

3.4.1 Spuisluizen

Voor de oude spuisluizen en voor de nieuwe spuisluizen bij Den Oever zijn de onderstaande lekoppervlakken aangehouden [3].

Bij Kornwerderzand:

- een totaal lekoppervlak van 1,25 m². Dit is 10 x 0,125 m², gebaseerd op 10 kokers met schuiven met elk 2 gaten van 0,25 x 0,25 m; Bij het berekenen van de lekdebieten wordt het verval gehalveerd, omdat er bij het opstellen van de randvoorwaarden van uit is gegaan dat de schuiven dubbel zijn gesloten.

Bij Den Oever:

- het lekoppervlak van de oude spuisluizen bedraagt 1,2 m². Dit is 15 x 0,08 m², gebaseerd op 15 kokers met schuiven met elk 2 gaten van 0,2 x 0,2 m per schuif; ook deze schuiven zijn steeds dubbel-gesloten;
- het lekoppervlak van de nieuwe spuisluizen (8 kokers) is afgeleid van de eis aan een maximaal lekdebiet van 0,3m³/s per spuiukoker bij een verval van 2 m [3] en onderliggende referentie [13]; als we uitgaan van het dubbelgesloten zijn van de kokers komt dit neer op een lekoppervlak van 0,068 m² per koker en in totaal 0,544 m² voor de nieuwe kokers ;
- het totale lekoppervlak bij Den Oever wordt hiermee gelijk aan 1,744 m².¹

3.4.2 Gemalen

Bij Den Oever zijn een zestal pompen gebouwd. Hiervan wordt aangenomen dat deze elk een lek-oppervlak hebben van 0,048 m² (x 6 = 0,29 m²). Hiervoor is in overleg met RWS in [3] aangenomen dat de lektheid van de maalkokers vergelijkbaar is met de nieuwe spuiukokers (zie hierboven). Bij een enkel gesloten koker komt deze eis overeen met een lekoppervlak van 0,048 m².

Bij toenemende zeespiegelstijging kan er steeds minder gespuid worden en is dus een steeds grotere pompcapaciteit nodig voor de peilbeheersing. Dit is verkend in [18]. Op basis van de getallen uit deze studie is een schatting gemaakt van de pompcapaciteit voor verschillende waarden voor de zeespiegelstijging, om op basis daarvan een schatting te maken van het lekoppervlak. Deze laatste vertaaltap is gebaseerd op de schatting voor het lekoppervlak van de huidige (nieuwe) pompen bij Den Oever zoals beschreven in Paragraaf 3.4.1 hierboven.

Van de huidige aanpassing aan het spuicomplex Den Oever is aangenomen dat die zal volstaan tot 0,5 m ZSS. De hierbij gerealiseerde pompcapaciteit van 275 m³/s is voldoende door de aangevulde spuicapaciteit (8 nieuwe spuiukokers). Onderstaande tabel laat zien hoe het aantal pompen te Den Oever en Kornwerderzand zou kunnen toenemen (toelichting na de tabel), en wat dat betekent voor de lekoppervlakken op beide locaties.

¹ In een eerdere, voorlopige versie van het rapport stond door een rekenfout een totaal lekoppervlak van 1,294 m². Hierop waren ook de berekeningen gebaseerd. De berekeningen zijn opnieuw uitgevoerd.

Tabel 3.4 Mogelijke toename van het aantal pompen te Den Oever en Kornwerderzand bij ZSS en bijbehorende lekoppervlakken.

ZSS [m]	Pompcapaciteit [m^3/s] bij 3 scenario's spuicapaciteit			met Aangevulde spuicapaciteit:		Verdeling lekoppervlak [m^2]	
	Geen spuicap. (0%)	Oorspr. spuicap. (100%)	Met nwe spuicap. DO	Aantal pompen DO+KWZ	Lek- oppervlak [m^2]	Den Oever	Korn- werder- zand
0			275	6 + 0 = 6	0.29	0.29	0
0,5	900*	700	550*	6 + 6=12	0.58	0.29	0.29
1	1050	950	900*	6 + 12=18	0.87	0.29	0.58
2	1200	1200	1200	12+12=24	1.16	0.58	0.58
3	1400	1400	1400	16+12=28	1.35	0.77	0.58
4	1500*	1500*	1500*	18+12=30	1.45	0.87	0.58
5	1500*	1500*	1500*	18+12=30	1.45	0.87	0.58

Getallen in Tabel 3.3 met * zijn aangenomen voor het doel van deze studie. De overige getallen zijn gebaseerd op [18].

De drie kolommen met Pompcapaciteit geven de benodigde capaciteit in drie scenario's: als er geen spuicapaciteit zou zijn, met de spuicapaciteit zoals die was voor de recente renovatie en uitbreiding, en met een spuicapaciteit inclusief de recente uitbreiding. De getallen zijn grotendeels overgenomen uit [18] en aangevuld op basis van onderlinge vergelijking.

De verdeling van de pompcapaciteit over beide locaties is daarbij als volgt bedacht. Hierbij is er rekening mee gehouden dat, binnen de grenzen van de huidige verkenning, die pompcapaciteit t.z.t. in de huidige spuicomplexen moet worden ingebouwd, aansluitend op de bestaande spuihavens. Zouden we dat loslaten, dan moeten ook de afmetingen van de spuihavens etc. worden aangepast naar waarden die we nog niet kennen.

- Er staan nu 6 pompen opgesteld in Den Oever met een capaciteit per stuk van circa $46 \text{ m}^3/\text{s}$ (totaal $275 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Bij 0.5 m ZSS is er behoefte aan nog eens 6 pompen. Hiervoor wordt aangenomen dat in Kornwerderzand dezelfde pompen worden geplaatst als nu al gebouwd bij Den Oever, b.v. ook in 2 groepen van 3, in de hoeken van de spuihavens (totaal $550 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Bij 1 m ZSS is behoefte aan 18 pompen van elk $50 \text{ m}^3/\text{s}$ (totaal $900 \text{ m}^3/\text{s}$). Daarbij zal (waarschijnlijk) de spuicapaciteit nog behouden moeten blijven als een nood-optie (spuien werkt nog bij een verhoogd peil op het IJsselmeer). Hierbij is aangenomen dat de bestaande pompen een 'up-grade' krijgen van 46 naar $50 \text{ m}^3/\text{s}$ (bij gelijkblijvend lekoppervlak) en dat de 6 extra pompen worden gerealiseerd bij Kornwerderzand, bv tussen de twee spui groepen in. Binnen het spuicomplex bij Den Oever is geen ruimte meer.
- Bij 2 m ZSS is er behoefte aan nog eens 6 pompen van $50 \text{ m}^3/\text{s}$ (totaal $1200 \text{ m}^3/\text{s}$). De spuicapaciteit mag nu vervallen zijn, want die levert geen bijdrage meer. Dan zouden die extra pompen bijvoorbeeld te realiseren zijn in de nieuwe spui kokers te Den Oever. Hierbij wordt aangenomen dat de oude kokers nog een monumenten-status hebben en dat de nieuwe kokers dat niet zullen hebben en dus makkelijker te verbouwen zijn. De oude spui kokers worden nu lekdicht afgesloten. Het in de berekening aangehouden lekoppervlak wordt nu gerelateerd aan de totale pompcapaciteit; niet aan dat van de spui kokers.

- Bij 3, 4 en 5 m ZSS is er behoefte aan nog eens 4 resp. 6 pompen: ook van deze pompen wordt nu aangenomen dat deze bij Den Oever gerealiseerd zullen worden. In totaal zou het gaan om 12 pompen bovenop de 6 die daar nu al gebouwd zijn. Er zijn 8 nieuwe spuikokers, dus per koker zou er een pompcapaciteit van 75 m³/s ingebouwd moeten worden.

Uiteraard kunnen er tegen die tijd ook andere afwegingen worden gemaakt, maar deze opbouw is plausibel en houdt er rekening mee dat dit gerealiseerd moet worden in aansluiting op de bestaande spuihavens.

3.4.3 Spuihavens en directe omgeving, meerzijde

Aan de binnenzijde van de spuisluizen bevindt zich op beide locaties een erosiekuil. Bij Kornwerderzand is dit een vrij klein deel, bij Den Oever is dit veel groter. Het gebied wordt op beide locaties als volgt opgedeeld in delen ('bakjes') (zie ook Paragraaf 3.2 en Figuur 3.3 en Figuur 3.4):

- Het gebied direct aan de binnenkant van de spuisluizen wordt aangeduid als de **Binnenspuihaven**; dit bakje bestrijkt het gebied waarbinnen de erosiekuil zich bevindt; het bakje Binnenspuihaven beschrijft de bovenlaag.
- Onder de Binnenspuihaven bevindt zich de **erosiekuil**; de horizontale afmetingen hiervan zijn in principe kleiner dan de binnenspuihaven.
- Het gebied tussen de Binnenspuihaven en de contour zoals gekozen door Arcadis/Hydrologic wordt aangeduid als **Meer-nabij-spu**.

In het rekenmodel zal de zoutlast vanuit de spuisluizen zich verplaatsen van de Binnenspuihaven en de erosiekuil via het overgangsgedebied Meer-nabij-spu naar het IJsselmeer. Het transport van zout over die laatste overgang moet overeenkomen met wat Arcadis/Hydrologic voor die rand heeft afgeleid.

Kornwerderzand (zie Figuur 3.4)

De afmetingen van de (geschematiseerde) **erosiekuil** zijn zodanig gekozen dat het bergend volume ongeveer klopt met de werkelijkheid. De erosiekuil is daarbij geschematiseerd als een prisma met een trapeziumvormige dwarsdoorsnede. De lengte van het prisma is gesteld op 600 m en de breedte is gesteld op 200 m. Gemiddeld over deze breedte is de hoogte van de drempel gesteld op NAP -3 m. Aan de bodem (op NAP -13 m) is de breedte 40 m, zie Bijlage C.

De **Binnenspuihaven**, gelegen boven de erosiekuil, heeft als afmetingen (lengte x breedte) 700 m x 400 m, met een diepte gelijk aan de drempel van de erosiekuil, NAP -3 m. Via deze breedte en diepte wordt er zout getransporteerd naar het gebied Meer-nabij-spu.

De afmetingen van het gebied **Meer-nabij-spu** (het gebied ten westen en zuidwesten van de Binnenspuihaven) zijn zodanig gekozen dat het volume ongeveer klopt en dat het zouttransport naar het IJsselmeer verloopt via de te kiezen breedte en de diepte. Het zout dat over de drempel ontsnapt naar het IJsselmeer zal, gezien de bathymetrie, zich voornamelijk naar het westen verplaatsen. De westelijke rand van dit gebied (loodrecht op de Afsluitdijk en aangegeven met een zwarte lijn) wordt daarmee de breedte-maat van dit gebied. Dit leidt tot een (kleine) lengte van 1500 m, een grote breedte van 4000 m en een diepte langs deze breedte van NAP -6 m.

Den Oever

Hoewel de vorm van de **erosiekuil** zich daar wat minder goed voor leent dan bij Kornwerderzand, is de erosiekuil weer beschreven als een prisma met een trapeziumvormige dwarsdoorsnede (zie Figuur 3.3). De horizontale afmetingen zijn echter veel groter dan bij

Kornwerderzand. De lengte van het prisma is bij Den Oever gelijk aan 1800 m en de breedte (op de hoogte van de drempel op NAP -4 m) van 1000 m. Aan de bodem (op NAP -7 m) is de breedte gesteld op 350 m.

De **Binnenspuihaven**, gelegen boven de erosiekuil, is qua afmetingen iets groter gekozen dan de erosiekuil: (lengte x breedte) 2000 m x 1200 m, met een diepte gelijk aan de drempel van de erosiekuil, NAP -4 m. Over deze drempel wordt er zout getransporteerd naar het IJsselmeer, in ons model via het gebied Meer-nabij-spui. De bathymetrie (in Bijlage C) toont een ondiepe rug tussen de erosiekuil en het IJsselmeer met dieptes tussen 1 en 2 m. Het zouttransport over deze rug zal klein zijn. Het zouttransport zal in hoofdzaak gebeuren via de diepere delen: via de vaargeul voor de scheepvaart (tussen IJsselmeer en de schutsluizen) en in mindere mate via een dieper deel langs de Afsluitdijk. De drempeldiepte van NAP -4 m is hierop gekozen.

De breedte voor die locaties samen zal circa 500 m zijn, dit is kleiner dan de breedte van het bakje Binnenspuihaven (1200 m), maar over deze kleinere breedte moet het transport worden berekend. De breedte van 500 m is gelijk aan de breedte aangehouden voor het gebied **Meer-nabij-Spui** en in de code wordt voor het transport tussen twee bakjes automatisch de kleinste van de twee breedtes aangehouden (en ook de kleinste van de twee dieptes van de bakjes.)

Voor de lengte van het gebied Meer-nabij-Spui is een waarde van 1250 m gekozen, grofweg de af te leggen afstand tussen de drempel, via de scheepvaart geul en dan richting IJsselmeer, tot aan de grens van de uitsnede zoals gehanteerd door Arcadis/Hydrologic. (De hiermee gekozen afmetingen van het gebied Meer-nabij-spui zijn ook aangehouden in de beschouwing van de schutsluizen; daar wordt dit gebied aangeduid als Meer-nabij-Schutsluizen).

3.4.4 Spuihavens en directe omgeving, zeezijde

Aan de buitenzijde van de spuisluizen zijn eveneens twee bakjes aangenomen die de verbinding vormen tussen de spuisluizen en de randvoorwaarden op zee. Voor de waterstand worden de gemeten waarden gebruikt. Voor de zoutgehalten de voor Den Oever de meetwaarden gebruikt van bij Doove Balg West en voor Kornwerderzand de daarvan afgeleide waarde voor Doove Balg Oost. (Zie Bijlage D).

Tijdens het spuien worden deze bakjes zoeter, maar in de periode daarna zal het zoete water aan het oppervlak wegstromen, en worden de bakjes dus weer zouter. Dit zoete water van het water direct buiten de spuisluizen is van belang voor het zoutgehalte van het water dat naar binnen lekt in de tijd kort na een spui. De bakjes tussen de spuisluizen en de randvoorwaarden zijn ervoor om dit proces te beschrijven.

Het zoutgehalte in de beide bakjes wordt ook beïnvloed door het (verticale) getij. Daarbij wordt aangenomen dat de beide bakjes steeds dezelfde waterstand hebben als de Waddenzee. Tijdens vloed wordt het buitenste bakje (Zee-nabij-spui) daartoe aangevuld met water met het zoutgehalte van de Waddenzee, en de Buitenspuihaven wordt aangevuld met water met het zoutgehalte van Zee-nabij-Spui. Tijdens eb gaat dit in de omgekeerde richting. Dit stijgen en dalen van de waterstand, in combinatie met de aanname van volledige menging in elke tijdstap (een bakje kent maar één waarde voor het zoutgehalte) leidt ook tot een uitwisseling van zout en daardoor worden, als er niet gespuid wordt, beide bakjes op den duur even zout als de randvoorwaarde op de Waddenzee.

Kornwerderzand

Voor de **Buitenspuihaven** zijn als afmetingen aangenomen: L x B x bodemligging = 900 m x 380 m x NAP -5 m. De breedte komt overeen met de breedte van de monding van de spuihaven. De lengte is zodanig gekozen dat het oppervlak overeenkomt met het werkelijke oppervlak. De gekozen diepte is representatief voor de breedte van de monding. In de Buitenspuihaven zijn diepe kuilen aanwezig, maar het effect hiervan op de zoutlek naar het IJsselmeer wordt verwaarloosd.

Voor het gebied **Zee-nabij-spui** is een gebied genomen buiten de spuihaven. Er is daar sprake van een oost-west georiënteerde geul (het zuidwestelijke deel van de geul richting Harlingen, genaamd 'Boontjes') en ten noorden daarvan ligt een ondiepe plaat, zie Figuur 3.6. De verspreiding van het zoete spuiwater naar de Waddenzee, gecombineerd met het tegelijkertijd weer aanvullen van het gebied met zoutwater van de Waddenzee, zal in werkelijkheid in grote mate worden bepaald door het getij: zowel door de vulling en lediging van het gebied als door de getijstroming door die geul. In de huidige aanpak wordt de invloed van het getij niet beschreven. In het model zal de verspreiding (de uitwisseling van zoet- en zoutwater) verlopen via de geul, in beide richtingen. Voor de gezamenlijke breedte van deze twee locaties is 2000 m aangehouden met een bodemligging van NAP -6 m. Voor de lengte van het gebied wordt de afstand tot de plaat gekozen; hiervoor is 1000 m is aangehouden.



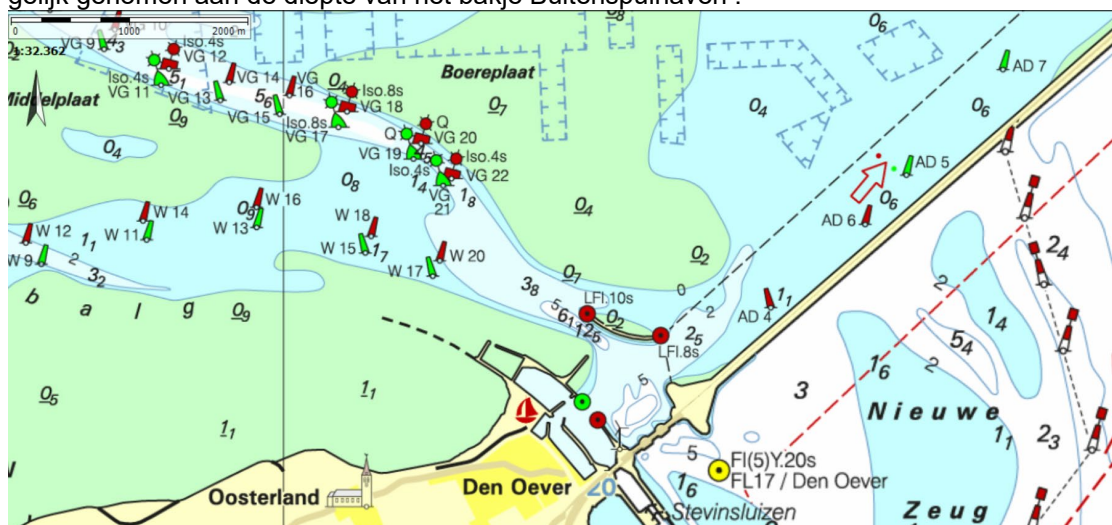
Figuur 3.6 Globaal beeld bodemligging zeezijde Kornwerderzand (deel uit zeekaart).

Den Oever

De geometrie van de havens aan de buitenkant van Den Oever is complex. Toch was het van belang om deze, binnen de grenzen van de huidige studie, middels twee bakjes te schematiseren.

De Buitenspuihaven van Den Oever loopt tot aan de gekromde golfbreker. Aan beide einden daarvan is een opening naar de Waddenzee. De gezamenlijke breedte van de twee openingen is circa 650 m, de diepte is op -4 m NAP gesteld. (Dichtbij de westelijke opening langs de golfbreker is het lokaal veel dieper, maar dat is beschouwd als een 'kuil' binnen de Buitenspuihaven: voor de uitwisseling naar het gebied buiten Buitenspuihaven is een kleinere waarde aangehouden.) De lengte van de Buitenspuihaven is zodanig gekozen dat het oppervlak ongeveer overeenkomt met de werkelijkheid is en is gesteld op 1250 m. Hierin is ook een deel van de oppervlakken van de havens buiten de schutsluizen meegenomen: ook die worden zoeter tijdens een spui.

Voor het gebied buiten de Buitenspuihaven, Zee-nabij-spui, zijn als maten aangehouden L x B x bodemligging = 1000 m x 1000 m x NAP -4 m. De lengte is een enigszins arbitraire keuze; de breedte met de diepte dekt beide geulen (oostelijk en westelijk). Hierbij is de diepte gelijk genomen aan de diepte van het bakje Buitenspuihaven.



Figuur 3.7 Globaal beeld bodemligging zeezijde Den Oever (deel uit zeekaart).

3.4.5 Kalibratie / validatie spuisluizen

Het bakjesmodel met het gelaagde bakje aan de binnenkant van spuisluizen is, voor zover mogelijk, gekalibreerd op beschikbare data. Deze kalibratie is uitgebreider beschreven in Bijlage D. Hieronder volgt een samenvatting op hoofdlijnen.

In de kalibratie is er eerst voor gezorgd dat de combinatie van de netto zoutflux naar het IJsselmeer en de gemiddelde afvoer naar de Waddenzee overeenkwam met de getallen zoals toegeleverd door Arcadis/Hydrologic (vooral Tabel 3.3).

Vervolgens is gekeken naar de berging van zout in de erosiekuil. Hiervoor is gebruik gemaakt van gemeten zoutgehalten in en boven die kuil. In de metingen is zichtbaar hoe het zoutgehalte in de kuil steeds verder oploopt waarbij de grenslaag tussen zout en zoeter water langzaam omhoog beweegt. Bij een spui wordt de kuil weer 'zoet gespoeld'. Het bakjesmodel bleek in staat dit gedrag goed te reproduceren. (Zie b.v de figuren in Bijlage D.) De kalibratie zoals uitgevoerd heeft onder andere als resultaat dat van het inkomende lekdebiet slechts 25% naar de erosiekuil gaat (onder de grenslaag), en dat de rest in de laag boven de grenslaag terecht komt. Hiervandaan verspreidt het zich verder naar het IJsselmeer. In het zoeken naar de juiste parameterinstellingen voor de berging van het zout in de kuil is ervoor gezorgd dat ook de zoutflux en de afvoer overeen bleven komen met de waarden zoals gehanteerd door Arcadis/Hydrologic.

Het is van belang hierbij op te merken dat er geen gedetailleerde meetdata beschikbaar zijn van hoeveel zout er ontsnapt aan het gebied boven en rond de erosiekuil naar het IJsselmeer: dit is ook amper te meten. Eventueel zou een vergelijking gemaakt kunnen worden met resultaten van 3D-berekeningen maar er zal dus altijd een zekere mate van onzekerheid blijven bestaan op dit punt.

De kalibratie is uitgevoerd op basis van een gemeten spuireeks: dit zijn spuidebieten zoals opgeslagen in LMW, die berekend zijn uit waterstanden en schuifposities. Om in de productiesommen het aantal spuiensters te kunnen variëren, is de overstap gemaakt worden een afvoer op basis van een afvoerformule.

Na een kalibratie hoort er ook een validatie uitgevoerd te worden. Deze is zeer beperkt gebleven. Bij het toepassen van hetzelfde model op de situatie in Den Oever, met uiteraard het daar geldende aantal spuiokers en de voor die locatie afgeleide afmetingen van de bakjes, werden waarden gevonden die voldoende goed bleken aan te sluiten op waarden zoals gehanteerd door A/H. Hiermee is de validatie afgerond.

3.5 Resultaten spuisluizen en gemalen

3.5.1 Algemeen

Met het bakjesmodel zoals gebouwd en gekalibreerd zijn vervolgens een groot aantal sommen gedraaid waarbij parameters zijn gevarieerd die een beschrijving zijn van de zeespiegelstijging en de spui-/maal-operatie: hoe vaak wordt er gespuid, hoeveel kokers worden er daarbij ingezet of met welk debiet wordt er gepompt. Ook wordt met de zeespiegelstijging het lekoppervlak van de pompen aangepast zoals beschreven in Paragraaf 3.4.2.

Wat betreft het pompen: aangenomen is dat voor het beheer van het IJsselmeer op het zoutgehalte aparte, kleinere pompen worden aangebracht; dit omdat het minimum debiet van de grote pompen zoals aangeduid in Tabel 3.4 circa 20 m³/s bedraagt, hetgeen wat veel zou zijn in het licht van het streven het doorspoeldebiet te beperken. Welk debiet die kleinere pompen dan zouden moeten kunnen verplaatsen moet gaan blijken uit de resultaten.

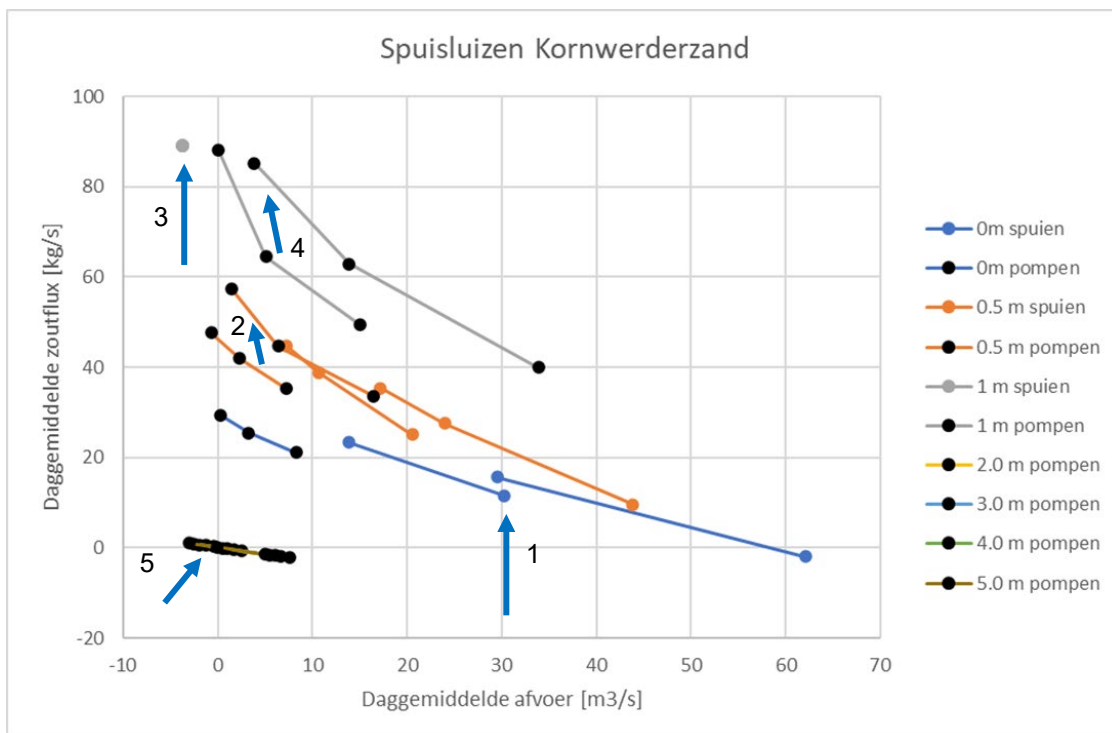
Ook deze kleine pompen zuigen het water uit de erosiekuil. Het pompdebiet is continu aangenomen, dus onafhankelijk van het getij. Een eventueel lekdebiet via deze extra, kleine pompen wordt verwaarloosd. Verder is het van belang op te merken dat het pompen met een dergelijke kleine pomp geen remedie is tegen de lekkage van de grote pompen: die blijven lekwater leveren naar de erosiekuil, waardoor de grenslaag omhoog beweegt, waardoor het (relatief zoute) water boven de erosiekuil naar het IJsselmeer wordt geduwd.

Verder is het van belang op te merken dat de berekening alleen de zoutindringing door de spuisluizen betreft: er is geen interactie met wat er door de schutsluizen gebeurt. Zeker voor Den Oever is dat een versimpeling van de werkelijkheid: door de geometrie van de voorhavens aan beide zijden en met de aangehouden afmetingen van de bakjes 'Meer-nabij-Spui' en 'Zee-nabij-Spui' zal er in de werkelijkheid wel sprake zijn van interactie, zowel aan de meer- als aan de zeezijde. In deze studie beschouwen we de spui- en schutsluizen echter apart, om voor beide typen (los van elkaar) te kunnen kijken wat het effect zou kunnen zijn van zeespiegelstijging en wat er te verwachten is van maatregelen.

3.5.2 Resultaten spuisluizen en gemalen KWZ

De resultaten van de berekeningen worden gepresenteerd in onderstaande figuren. Daarin wordt de netto zoutflux vanuit het bakje Meer-nabij-Spui naar het IJsselmeer, aangeduid met M' , uitgezet tegen de gemiddelde afvoer, Q . De resultaten zijn gegroepeerd (middels de kleur van de lijn) naar de zeespiegelstijging. De zwarte punten geven aan dat er niet wordt gespuid maar wordt gepompt. Onder de figuur worden de resultaten groepsgewijs kort toegelicht.

Er zijn in deze resultaten nog geen maatregelen beschouwd, anders dan het inbouwen en gebruiken van (kleine) pompen, omdat deze nodig zullen zijn voor peil- en zoutbeheer als er niet meer gespuid kan worden.



Figuur 3.8 Spuisluizen Kornwerderzand: nul alternatief en pompen; de resultaten voor 2 – 5 m ZSS liggen op elkaar.

0 m ZSS: blauwe krommen:

- Pijl 1 geeft aansluiting met waarden A/H (Tabel 3.3): afvoer circa 30 m³/s; zoutflux met circa 15 kg/s wat aan de hoge kant, maar passend binnen totaal van 23,4 kg/s;
- In het model wordt een afvoer van circa 30 m³/s onder andere bereikt met eens in de 14 spuiensters spuien met 10 kokers. Dit is het wat hoger gelegen blauwe punt nabij Pijl 1 (linker punt op de iets hoger gelegen blauwe kromme). Eens in de 14 spuiensters komt ongeveer overeen met eens in de 7 dagen spuien. Bij twee keer zo vaak spuien, eens in de 7 spuiensters, neemt de afvoer toe naar ruim 60 m³/s en neemt de netto zoutflux naar binnen af naar net iets onder nul (er gaat netto zout naar buiten, samenhangend met het (lage) zoutgehalte van het IJsselmeer).
- Een netto afvoer van circa 30 m³/s wordt ook bereikt door eens in de 7 spuiensters te spuien met 5 kokers. Dit is het wat lager gelegen blauwe punt nabij Pijl 1 (rechter punt op de lager gelegen kromme). Als er slechts eens in de 14 spuiensters wordt gespuid met 5 kokers loopt de afvoer terug naar circa 14 m³/s en neemt de netto zoutflux toe naar meer dan 20 kg/s.
- De algemene trend is duidelijk: meer afvoeren geeft een lagere netto zoutflux en vice versa.

van hoge naar lage afvoer (korte weergaven van de beschrijving hierboven):

- Q = 30 – 65 m³/s (kromme rechts op de x-as): spuien met 10 kokers, eens per 7 of eens per 14 spuiensters;
- Q = 15 – 30 m³/s (kromme halverwege de x-as): spuien met 5 kokers, eens per 7 of eens per 14 spuiensters;
- Q = 0 – 8 m³/s (kromme links op de x-as): alleen pompen met kleine pomp: continue pompdebieten van 2, 5 en 10 m³/s (de netto afvoer is wat kleiner door de lekkage naar binnen): de helling van deze lijn is vergelijkbaar aan die van het spuien, maar de punten liggen wat lager dan een (doorgetrokken) kromme voor het spuien; pompen lijkt daarmee dus relatief gunstig ten opzichte van spuien; met pompen is

een netto afvoer van circa $10 \text{ m}^3/\text{s}$ genoeg om de zoutflux te beperken tot circa 20 kg/s ; met spuien is daar ongeveer $20 \text{ m}^3/\text{s}$ voor nodig.

0.5 m ZSS: oranje krommen:

- De krommen schuiven naar links en naar boven ten opzichte van krommen voor 0 m ZSS: er is meer lekkage door groter negatief verval en er kan minder gespuid worden, ook met vaker spuien;

van hoge naar lage afvoer:

- $Q = 15 - 45 \text{ m}^3/\text{s}$: spuien met 10 kokers, eens per 2, 4 of 7 spuienster; hieruit blijkt dat, volgens dit rekenmodel, vaker spuien (eens per 2 spuienster) met 5 kokers (afvoer ongeveer $20 \text{ m}^3/\text{s}$, rechts op de lager liggende oranje kromme) gunstiger is (een lagere zoutflux) dan minder vaak spuien (eens per 4 tot 7 spuienster) met 10 kokers ($16 - 14 \text{ m}^3/\text{s}$, op de hoger liggende oranje kromme).
- Alleen pompen i.p.v. spuien (met kleine pompen); oranje krommen met zwarte punten; hier zijn twee lijnen weergegeven:
 - o de lagere van de twee krommen sluit aan op de krommen voor het spuien: $M' = 35 - 50 \text{ kg/s}$ bij continue pompdebieten van 2, 5 en $10 \text{ m}^3/\text{s}$; deze punten liggen weer gunstiger (lagere zoutflux bij hetzelfde watergebruik) dan de kromme voor het spuien met 5 kokers.
 - o De hogere van de twee krommen: $M' = 45 - 60 \text{ kg/s}$ bij continue pompdebieten van 5, 10 en $20 \text{ m}^3/\text{s}$: als hierboven maar nu met additioneel lek-oppervlak door aanvullende pompcapaciteit van 6 pompen (Tabel 3.3); de verschuiving is aangegeven met Pijl 2;

1.0 m ZSS: grijze krommen:

- $Q \approx -5 \text{ m}^3/\text{s}$ (lekdebet naar binnen), $M' = 90 \text{ kg/s}$: Pijl 3:
 - o Spuien is niet meer mogelijk, want er is geen verval meer naar buiten;
- Omdat spuien niet meer kan, moet alle afvoer via pompen; ook hier zijn twee lijnen weergegeven voor een toename van het lek-oppervlak vanwege toenemende pompcapaciteit:
 - o de lagere van de twee grijze krommen: $M' = 50 - 90 \text{ kg/s}$ bij continue pompdebieten van 5, 10 en $20 \text{ m}^3/\text{s}$: zoutflux incl. effect van additioneel lek-oppervlak door de aanvullende pompcapaciteit van 6 pompen zoals ook al verondersteld bij 0,5 m ZSS;
 - o de hogere van de twee grijze krommen: $M' = 40 - 90 \text{ kg/s}$ bij continue pompdebieten van 10, 20 en $40 \text{ m}^3/\text{s}$: zoutflux incl. effect van additioneel lek-oppervlak door aanvullende pompcapaciteit van 12 pompen; de verschuiving is aangegeven met Pijl 4.

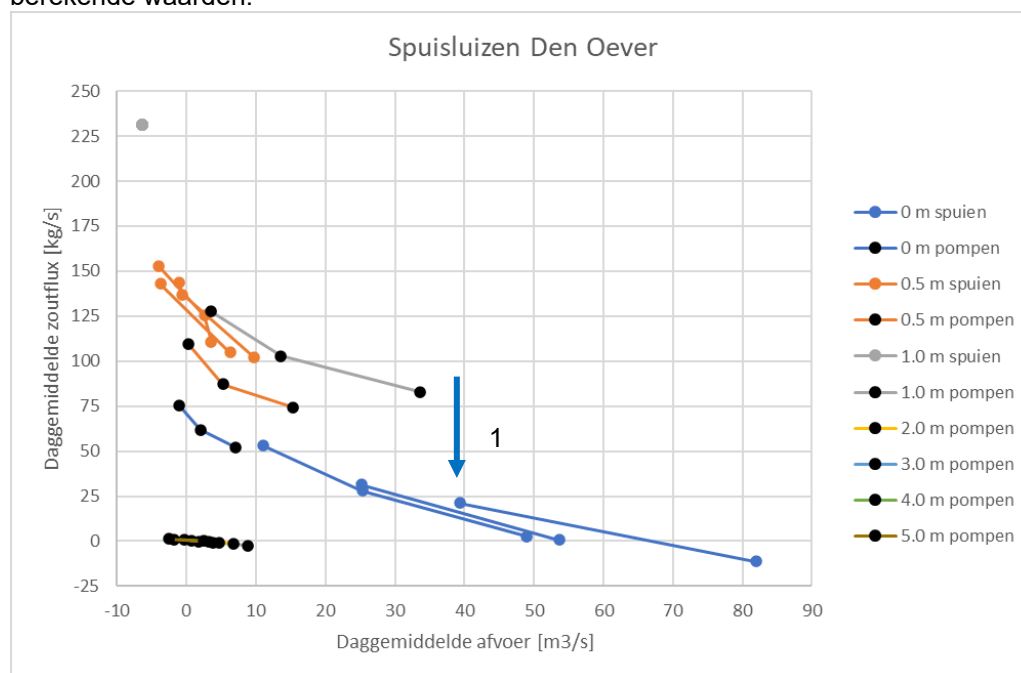
2 - 5 m ZSS (Pijl 5):

- De krommen voor 2 – 5 m ZSS liggen op elkaar;
- Spuien is niet meer mogelijk en de spuisluizen zijn dichtgemaakt. Er is geen lekkage meer door de spuisluizen; de grote pompen lekken direct naar de kuil en deze wordt geleegd door continu te pompen met de (aangenomen) kleine pompen met $Q = 2, 4$ of $8 \text{ m}^3/\text{s}$;
- Uit de aannamen in het rekenmodel volgt dat de zoutflux ongeveer 0 is; soms zelfs negatief omdat met het netto pompdebet er water (met een beetje zout) wordt afgevoerd vanaf het IJsselmeer.

3.5.3 Resultaten spuisluizen en gemalen DO

De resultaten voor Den Oever zijn weergegeven in onderstaande figuur en worden hieronder omschreven. (Let wel: dit is de situatie inclusief de nieuwe spuisluizen en de nieuwe grote pompen.)

Pijl 1 geeft weer de aansluiting met de berekeningen van A/H aan. (Zoals beschreven in Paragraaf 3.4.5 is dit te zien als de validatie van het bakjesmodel voor de spuisluizen.) Bij een afvoer van een kleine $40 \text{ m}^3/\text{s}$ worden door het model zoutfluxen van circa $12 - 24 \text{ kg/s}$ berekend. Dit is wat hoog in verhouding tot de waarden zoals berekend door A/H met hun 3D-model (Tabel 3.3): 14 kg/s bij een afvoer van $38,5 \text{ m}^3/\text{s}$ waarbij deze door A/H berekende zoutlast inclusief de zoutlast door de schutsluizen zou moeten zijn. Als we kijken naar Tabel 3.2 dan is de vergelijking iets beter: ruim 16 kg/s voor alleen de spuisluizen. Resultaten van 3D-berekeningen kunnen nog meer informatie leveren over wat er hier in werkelijkheid verwacht zou mogen worden. In de huidige verkenning met het eenvoudige bakjesmodel beschouwen we de invloed van ZSS en maatregelen relatief ten opzichte van de nu berekende waarden.



Figuur 3.9 Spuisluizen Den Oever: nul alternatief en pompen.

0 m ZSS (blauwe krommen) van hoge naar lage afvoer:

- $Q = 40 - 85 \text{ m}^3/\text{s}$: spuien met 15 kokers, eens per 7 of eens per 14 spuiensters;
- $Q = 28 - 57 \text{ m}^3/\text{s}$: spuien met 10 kokers, eens per 7 of eens per 14 spuiensters;
- $Q = 14 - 52 \text{ m}^3/\text{s}$: spuien met 5 kokers, eens per 4, 7 of 14 spuiensters;
- $Q = -2 - 8 \text{ m}^3/\text{s}$: alleen pompen met de kleine pompen bij continue pompdebieten van 2, 5 en $10 \text{ m}^3/\text{s}$;

0.5 m ZSS (oranje krommen):

- In vergelijking met de situatie bij Kornwerderzand liggen de oranje krommen ver naar links op de x-as (kleine afvoeren) en hoog op de Y-as (grote zoutflux). Deze verschuiving heeft te maken met het verschil in getij: de getijamplitude is bij Den Oever veel kleiner dan bij Kornwerderzand, waardoor er al bij een 0,5 m zeespiegelstijging nog maar weinig gespuid kan worden. De afvoeren worden erg klein en de punten voor meer of minder kokers en meer of minder spuiensters komen erg dicht op elkaar te liggen.

- De drie punten met pompen (zwarte punten op oranje krommen, continue pompedebieten van 5, 10 en 20 m³/s) liggen duidelijk gunstiger dan de punten met spuien, maar de zoutflux blijft groot.

1.0 m ZSS (grijze krommen):

- Spuien is niet meer mogelijk: de zoutflux loopt op naar circa 230 kg/s, bij een lekdebiet naar binnen van circa 6 m³/s (ook door lekkage door de huidige pompen);
- Met pompen (continu debiet van 10, 20 of 40 m³/s) is de zoutflux lager, maar blijft toch hoog: bij een afvoer van circa 34 m³/s (vergelijkbaar met de huidige zomerafvoer) is de zoutflux nog 80 kg/s;
- Door de kleinere getijamplitude bij Den Oever komt het afsluiten van de spuisluizen daar al eerder in beeld dan in Kornwerderzand; daarmee vervalt het lekdebiet door de spuisluizen.

2 – 5 m ZSS:

- Omdat spuien niet meer mogelijk is, worden de spuisluizen dichtgemaakt; het lekoppervlak van de spuisluizen vervalt; het lekdebiet door de pompen blijft maar dat gaat direct naar de erosiekuil, deze wordt geleegd door continu te pompen;
- $Q = 2, 4$ of 8 m³/s, $M' < 0$ omdat met het pompdebiet er water (met een beetje zout) wordt afgevoerd vanaf het IJsselmeer

3.5.4 Discussie resultaten spuisluizen en gemalen

Het (evidente) globale beeld is dat een kleinere afvoer leidt tot een grotere zoutflux. De meerwaarde van het rekenmodel is dat het getallen geeft aan deze trend: zowel in de huidige situatie als bij ZSS. Verder laten de berekeningen een effect zien van de wijze van opereren: het lijkt (iets) gunstiger om vaker te spuien met minder kokers. Het vraagt immers relatief veel spuiwater om ook het diepste deel van de erosiekuil helemaal zoet te spoelen.

Bij 0,5 m ZSS zien we bij Kornwerderzand een flinke toename van de zoutflux. Bij Den Oever is de situatie nog ingewikkelder: door de kleinere getijamplitude is er haast geen spuivolume meer, en dat leidt tot 3 tot 4 x zoveel zoutindringing. Er zal dan dus gepompt moeten worden, maar daarmee is de zoutflux onvoldoende te beperken.

Bij 1 m ZSS en hoger valt er (bij het huidige zomerpeil op het IJsselmeer) niets meer te spuien. Het overgaan op pompen geeft wel kleinere afvoer, maar de zoutflux blijft groot zolang spuicapaciteit operationeel moet blijven en er dus sprake blijft van een lekdebiet door de spuikokers. Als de spuicapaciteit niet meer nuttig of nodig is (en dat zou bij Den Oever eerder aan de orde kunnen zijn dan bij Kornwerderzand) en het lekoppervlak vervalt, dan is situatie meteen veel gunstiger: het lekdebiet door de pompen gaat direct naar de kuil en niet naar het IJsselmeer zolang de kuil niet overloopt. Het binnen komende lekwater is dan zonder verspreiding op het IJsselmeer weer af te voeren.

De resultaten geven ook aanwijzingen voor te overwegen maatregelen.

Een eerste logische maatregel is het verkleinen van het lekoppervlak door aanpassing aan de spuisluizen: hier mag een gunstig effect van worden verwacht, maar de technische mogelijkheden (en kosten) worden bepaald door de huidige constructies. Wat er mogelijk is kan nader worden verkend in een meer gedetailleerde (technische) studie, maar ter verkenning zijn aanvullende berekeningen gedaan met gehalveerd lekoppervlak.

Aanvullend of alternatief daarop: in het model van het twee-laags bakje gaat een groot deel (75%) van het inkomend lekwater naar de bovenlaag en niet naar de erosiekuil. Deze verhouding (nu bepaald in de huidige beperkte kalibratie) is te beïnvloeden door maatregelen

die het lekwater naar de kuil begeleiden, liefst met een kleine mate van opmenging (entrainment) met water uit de bovenlaag. Vanuit de kuil zou het dan met pompen kunnen worden teruggevoerd. Met minder zout in het water boven de erosiekuil zal er ook minder zout naar het IJsselmeer toe gaan.

Met het bakjesmodel zou ook hier een verkenning naar gedaan kunnen worden door het variëren van de parameters voor de verdeling van het inkomende lekwater en de mengfactor voor de entrainment. De technische haalbaarheid hiervan is echter onzeker. Het te bereiken effect zal globaal hetzelfde zijn als bij een kleiner lek-oppervlak: er gaat minder lek-water naar IJsselmeer.

Aangezien het vrij eenvoudig is om lekwater vanuit de erosiekuil af te voeren heeft het verkleinen van het lekoppervlak van de pompen, of het dubbel sluiten ervan, weinig toegevoerde waarde: het lekwater komt (in dit model) onverdund in de kuil en lekwater kan daarvandaan ook weer onverdund worden afgevoerd.

Andere maatregelen die eerder zijn genoemd zijn:

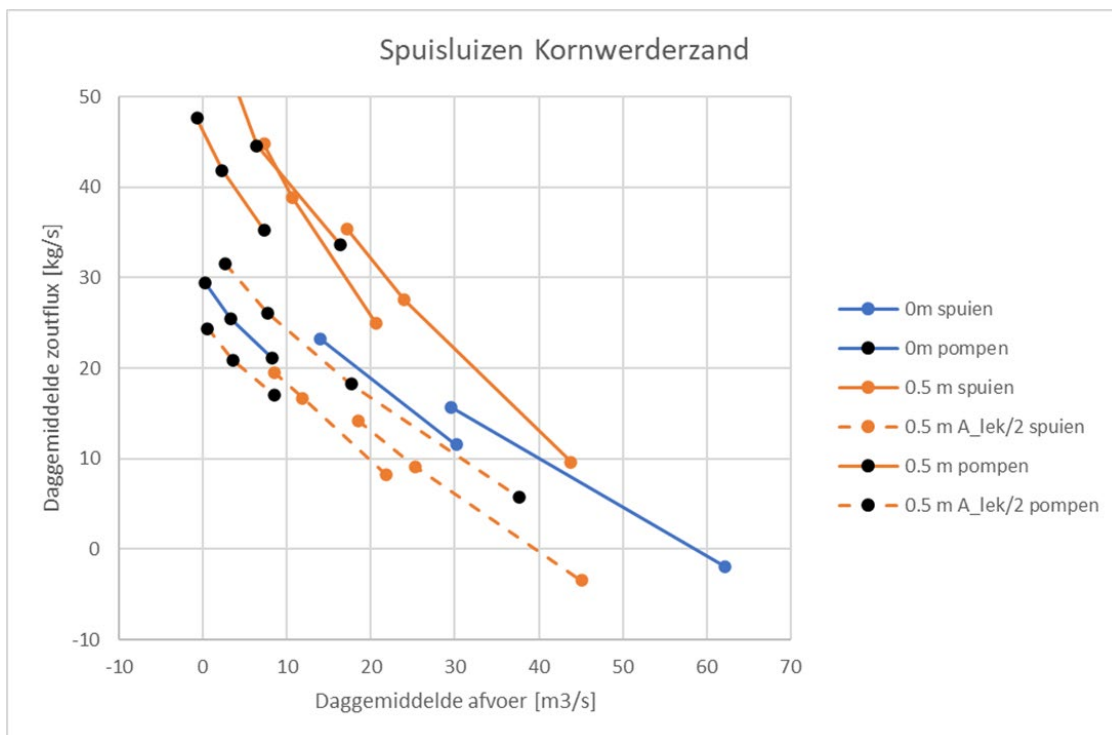
- Vergroten erosiekuil: dat geeft wel een grotere berging van zout, maar er is dan ook meer water nodig om kuil weer zout te spoelen. Al met al lijkt het erop dat er hiermee in de combinatie van de netto zoutflux en de benodigde afvoer geen winst te verwachten is.
- Het selectief afzuigen van water diep uit de erosiekuil tijdens spuien, waardoor er meer zout wordt afgevoerd per hoeveelheid water: constructief zal dat een complexe constructie zijn, die bovendien alleen van waarde is zolang er (met de zeespiegelstijging) gespuid kan worden. De hiervan te verwachten resultaten zijn af te lezen aan de hand van het pompen: ook deze zuigen water op diepte af.

Op basis van bovenstaande overwegingen zijn in deze studie alleen berekeningen gedaan met een halvering van het lekoppervlak langs de schuiven van de spuisluizen.

3.5.5 Berekeningen bij halvering van het lek-oppervlak

Om de situatie te verbeteren is, ter verkenning, een reeks van sommen gedaan met een halvering van het lek-oppervlak van de spuisluizen. (Zoals al is gebleken speelt het lek-oppervlak van de pompen onder de aannamen van deze berekeningen geen rol: wat er naar binnen lekt wordt er ook weer uitgepompt, zonder enig effect op de verspreiding van zout naar het IJsselmeer. In werkelijkheid zal dat wat genuanceerder liggen.)

Of het halveren van het lekoppervlak van de spuisluizen technisch mogelijk is en wat daarvoor nodig is, is niet beschouwd; er wordt alleen bekeken wat het zou kunnen opleveren. De resultaten worden gepresenteerd in onderstaande figuren.

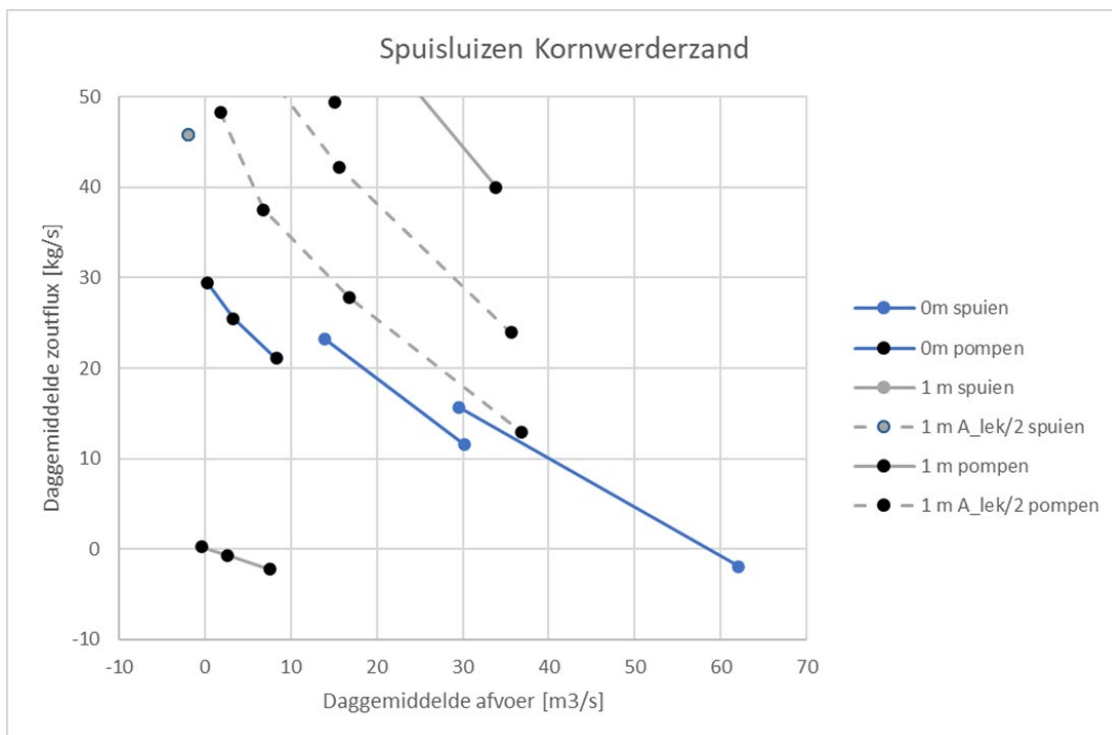


Figuur 3.10 Spuisluizen Kornwerderzand: halvering lekoppervlak bij 0,5 m ZSS.

In bovenstaande figuur zijn de blauwe krommen (0 m ZSS) en de getrokken oranje krommen (0,5 m ZSS) onveranderd weergegeven; de verticale schaal is opgerekt.

De gestippelde oranje lijnen geven de resultaten voor 0,5 m ZSS bij een gehalveerd lek-oppervlak. Deze lijnen liggen lager dan de getrokken blauwe lijnen (representatief voor de huidige situatie): met deze maatregel zou het bij 0,5 m ZSS dus mogelijk zijn om de zoutflux en/of de gebruikte afvoer van zoet water te reduceren ten opzichte van nu.

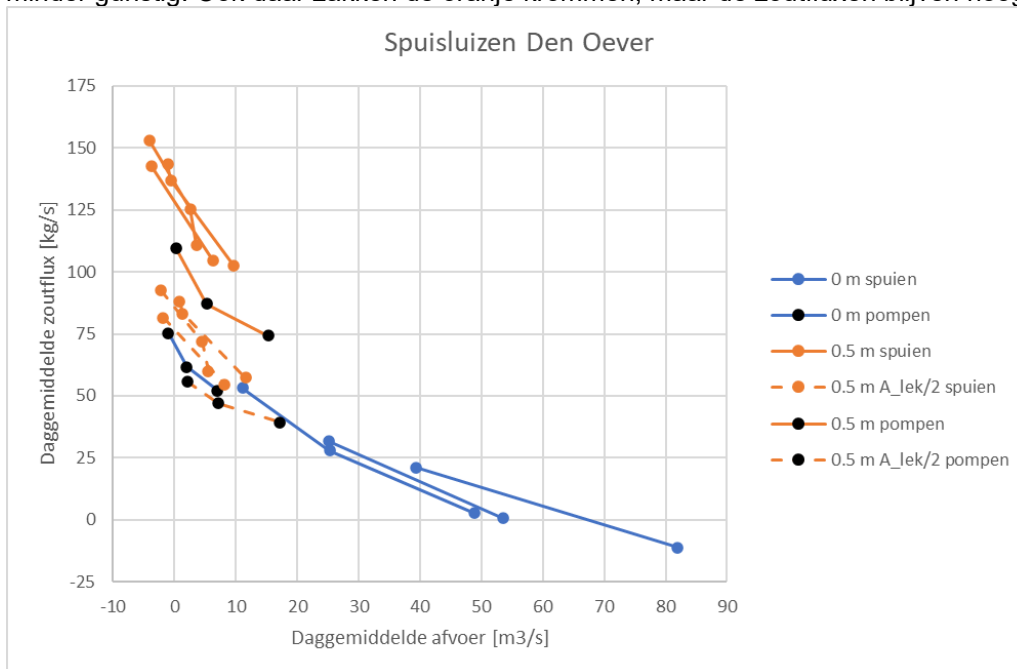
(Ook bij de huidige zeestand zou het een positief effect hebben. Die lijnen zijn niet getoond ten behoeve van de leesbaarheid van de figuur.)



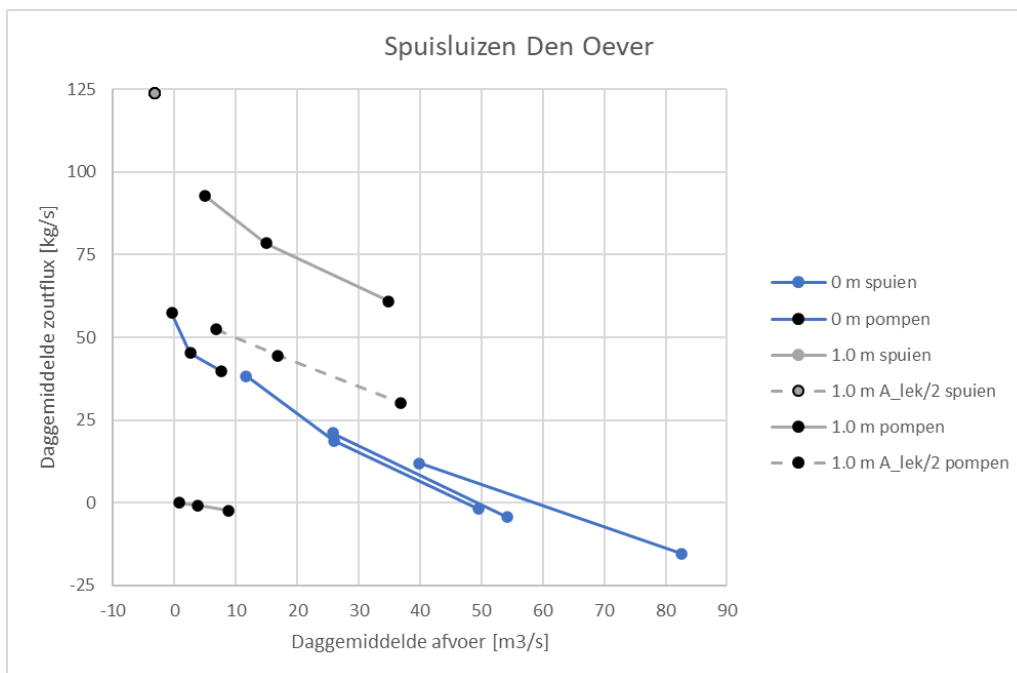
Figuur 3.11 Spuisluizen Kornwerderzand: halvering lekoppervlak, 1 m ZSS.

Bij 1 m ZSS blijkt een halvering van de lek-oppervlakken net wel / net niet voldoende: de gestippelde grijze lijnen (1 m ZSS bij gehalveerd lek-oppervlak) liggen allemaal hoger dan de getrokken blauwe lijnen die de huidige situatie weergeven: de lagere gestippelde grijze kromme is als er 6 pompen zijn geplaatst: deze kromme ligt net iets boven de blauwe kromme. De hogere gestippelde grijze kromme is als er 12 pompen zijn geplaatst: dan is de zoutflux duidelijk groter dan nu.

Dezelfde maatregel wordt hieronder getoond voor Den Oever. Daar lijken de resultaten minder gunstig. Ook daar zakken de oranje krommen, maar de zoutfluxen blijven hoog.



Figuur 3.12 Spuisluizen Den Oever: halvering lekoppervlak, 0,5 m ZSS.



Figuur 3.13 Spuisluizen Den Oever: halvering lekoppervlak, 1 m ZSS.

Bij een ZSS van 1 m is nog duidelijker te zien dat, ook bij hogere pompdebieten, vergelijkbaar met de huidige afvoer, de zoutflux hoger blijft dan nu het geval is. Het halveren van het lek-oppervlak is dus niet voldoende. Een grotere reductie van het lekoppervlak mogelijk wel.

3.5.6 Discussie aanvullende berekeningen

Bij 0,5 m zeespiegelstijging pakt het halveren van het lek-oppervlak van de spuisluizen gunstig uit voor Kornwerderzand, maar het levert nog te weinig op voor Den Oever. Bij 1.0 m ZSS is de zoutflux nog steeds te groot: iets te groot bij Kornwerderzand, duidelijk te groot bij Den Oever. Als de spuicapaciteit beschikbaar moet blijven zal een verdere reductie van het lek-oppervlak noodzakelijk zijn. Gedacht kan worden aan een semi-permanente afdichting, die verwijderd wordt als (incidenteel) er toch gespuid moet worden als het peil op het IJsselmeer oploopt omdat de pomp-capaciteit niet voldoende is.

Als de spuicapaciteit geheel mag komen te vervallen, de spuikokers geheel worden afgesloten en het lek-oppervlak gelijk wordt aan nul, is de situatie weer onder controle en gunstiger dan nu: een zeer kleine afvoer is dan genoeg om de zoutindringing tot circa nul terug te brengen.

3.6 Aanpak schutsluizen

3.6.1 Gescheiden behandeling spui- en schutsluizen

In de huidige situatie zal de zoutflux die naar binnen komt door de schutsluizen zich verspreiden op het IJsselmeer en uiteindelijk worden afgevoerd via de spuisluizen. Met de stijging van de zeespiegel zal de zoutflux toenemen en dat is ongewenst voor het beheer van het zoutgehalte van het IJsselmeer. Vanuit het project rond de Krammersluizen (onder andere de Pilot op de Krammerjachtensluis) en op basis van de verkenningen voor een nieuw te bouwen grotere sluis te Kornwerderzand (de Regiosluis) is bekend dat de zoutindringing vergaand is te beperken met een beperkt gebruik aan zoetwater. Dit wordt in deze paragraaf verder verkend. Deze beperking van de zoutindringing bij een kleine afvoer betekent ook dat de schutsluizen dan een kleinere invloed zullen hebben op wat er gebeurt bij de spuisluizen.

Wat betreft de spuisluisen: in de huidige situatie wordt er in een droge periode eens in de 5 - 7 dagen gespuid. Dat leidt er toe dat gedurende enige tijd (een halve tot een hele dag) het zoutgehalte aan de buitenzijde lager zal zijn. Het grootste deel van de tijd in zo'n droge periode zal die invloed veel minder sterk aanwezig zijn. In de voorgaande paragraaf is verder duidelijk geworden dat bij circa 1 m zeespiegelstijging de spuicapaciteit zijn waarde heeft verloren, en als de spuikokers worden afgesloten er nog maar zeer weinig water nodig is voor het bestrijden van de zoutindringing. Dit maakt dat er dan geheel geen invloed meer is van het spuien op de zoutindringing door de schutsluisen. Beide aspecten (de huidige spui-praktijk en het toekomstige afsluiten van de spuikokers) ondersteunen een gescheiden behandeling van schut- en spuisluisen.

3.6.2 Opzet model, operatie en kalibratie

Ook voor de schutsluisen op beide locaties is een bakjesmodel opgezet met aan beide zijden van de sluisen twee bakjes. Dit model is te zien als een doorontwikkeling van de bakjesmodellen zoals ingezet voor het genereren van randvoorwaarden voor de 3D-berekeningen van de zoutverspreiding op het IJsselmeer ([9], [10], [11]).

In vergelijking met die aanpak zijn de volgende uitbreidingen en toevoegingen gedaan:

- extra bakje toegevoegd aan de meerzijde voor aansluiting op de rand van het rekenmodel van A/H;
- bij Kornwerderzand zijn beide schutsluisen apart beschreven en ook beiden verbonden met de voorhavens aan weerszijden;
- er is een spui/maal koker toegevoegd waarmee water van de Binnenhaven naar de Voorhaven (direct zeewaarts van de sluisen) getransporteerd kan worden; daarmee kan zoetwater met relatief veel zout worden teruggevoerd naar de zee-zijde, die daardoor zoeter wordt.

De operatie van de schutsluisen wordt cyclus-gemiddeld doorgerekend bij gemiddelde waterstand op zee. Er is dus geen effect van het verticale getij. Het aantal schuttingen per etmaal is overgenomen uit de hierboven genoemde 3D_studies. Ter kalibratie van de zoutflux door de schutsluisen is de parameter op de deur-opentijden zodanig gekozen dat de zoutflux aansluit op de fase-gewijze berekeningen zoals uitgevoerd ten behoeve van de 3D-studies.

Deze operatie blijft ongewijzigd in alle te beschouwen scenario's, zowel wat betreft zeespiegelstijging als wat betreft het inzetten van maatregelen. Ook de inzet van deelkolken, nu al mogelijk bij Den Oever, wordt niet beschouwd. Deze zijn eigenlijk alleen effectief als deze meerder cycli achter elkaar kunnen worden ingezet. In welke mate dat nu (en in de toekomst) ook kan is niet bekend: er zijn geen registraties van beschikbaar. Om deze reden is de inzet van deelkolken niet opgenomen in deze verkenning.

3.7 Schematisatie schutsluisen

De afmetingen van de schutsluisen zijn ook overgenomen uit de 3D-studies en hetzelfde geldt voor de twee bakjes aan de zeezijde: dit zijn de Voorhaven (de haven tussen de schutsluisen en de verkeersbruggen) en de Buitenhaven (zeewaarts van de verkeersbruggen).

Bij Kornwerderzand wordt buiten de Buitenhaven de randvoorwaarde (zoutgehalte en waterstand Waddenzee) opgelegd (Doove Balg Oost, zie Bijlage D.). Als al even niet gespuid is, is dat een logische waarde. Bij Den Oever is de geometrie complexer (zie Figuur 3.7): de Buitenhaven van de schutsluisen mondt uit in de spuihaven aan de zeezijde. Als er gespuid wordt zullen ook de havens (bakjes) voor de scheepvaart zoet worden en het duurt dan langer voordat dat zoete water zich weer heeft verspreid op de Waddenzee. Pas daarna

wordt het zoutgehalte daar alleen bepaald door het zoutgehalte op de Waddenzee (Doove Balg West, zie Bijlage D) en door de zout-zoetuitwisseling door het schutbedrijf. Toch is deze keuze voor de huidige studie te rechtvaardigen. Er wordt immers ver de toekomst in gekeken, waarbij er al snel geen spuicapaciteit meer beschikbaar is. Het dichtmaken van de spuisluizen zal bij Den Oever al tussen 0,5 en 1,0 m aan de orde kunnen zijn (zie Paragraaf 3.5) en dat zal de doorspoelbehoefte sterk beperken. In een droge zomer zal er dan dus maar weinig gespuid worden, waardoor de buitenzijde van de schutsluizen vrij goed wordt benaderd met de gekozen aanpak.

Aan de Meerzijde bestaat het eerste bakje uit de Binnenhaven. Vervolgens moet ook voor de schutsluizen de verbinding worden gemaakt met de rand van het rekenmodel van A/H. In Figuur 3.3 en Figuur 3.4 is dit weergegeven. De afmetingen van de bakjes 'Meer-nabij-schutsluis' zijn zodanig gekozen dat het volume ongeveer klopt en de breedte en diepte representatief zijn voor transport van zout naar het IJsselmeer over het betreffende deel van de rand van de uitsnede van Arcadis/Hydrologic.

Bij Kornwerderzand zijn de afmetingen: L = 3000, B = 500, NAP -4 m.

Bij Den Oever zijn de afmetingen: L = 1250, B = 500, NAP -4 m.

Bij Den Oever doet ook aan de meerzijde de gehanteerde configuratie van bakjes niet helemaal recht aan de werkelijke situatie: zoutwater afkomstig van de schutsluis kan ook de erosiekuil bereiken, en tijdens het spuien bij Den Oever wordt ook de aanloop naar de schutsluizen (mogelijk, gedeeltelijk) doorspoeld met water uit het IJsselmeer. Ook deze interactie tussen spui- en schutsluizen wordt (net als aan de zeezijde) in deze studie niet beschouwd: het zou een complexer model vragen en het zou de verkenning naar maatregelen veel complexer maken dan binnen deze studie mogelijk is.

3.8 Resultaten schutsluizen

3.8.1 De beschouwde maatregelen

De in deze studie te beschouwen maatregelen moeten realistisch zijn en toepasbaar op sluisen van de huidige afmetingen (of toekomstige vervanging daarvan). Op basis van kennis opgedaan in de onderzoeken in voorbereiding op de ombouw van de Krammersluizen wordt ingezet op de combinatie van bellenschermen en een spoeldebiet door de kolk, aangevuld met drempels waar dat de scheepvaart niet al te zeer in de weg zit. Deze maatregelen zijn ook opgenomen in de Zeesluisformulering (ZSF) en dus zijn de effecten daarvan goed te berekenen. Naast maatregelen op de schutsluis zelf wordt ook een spoel- of spuidebiet langs de kolk beschouwd, waarmee relatief zout water wordt teruggevoerd richting zee en tegelijkertijd de havens aan de zeezijde worden verzoet. Ook dit is onderdeel van de nieuwe zout-zoetscheiding op de Krammersluizen.

In een recent onderzoek naar mogelijkheden om de zoutindringing te beperken bij de bouw van een grotere sluis te Kornwerderzand, de Regiosluis [12], zijn ook vele andere maatregelen beschouwd. Door selectie op effectiviteit en kosten bleven er twee over, waaronder de combinatie van bellenschermen en een spoeldebiet door de schutsluis. De andere betrof de aanleg van een zoutvang in de Binnenhaven, om vandaaruit het binnengedrongen zoute water weer terug te voeren. Deze maatregel zal echter meer water vragen, als gevolg van de onvermijdelijke verdunning van het zout bij binnendringen en terugvoeren. Aangezien we juist zoeken naar manieren om met weinig water de zoutindringing zo veel mogelijk te beschermen, is deze optie niet verder beschouwd in deze studie.

De beschouwde maatregelen worden hieronder iets nader uitgewerkt.

Bellenschermen:

Deze zijn steeds aanwezig geacht op beide sluishoofden; afhankelijk van het in te zetten luchtdebiet is er een bepaalde effectiviteit mee te behalen; deze wordt aangeduid met de zogenaamde doorlaatfractie (een factor op vertraging kolkuitwisseling):

- 1 (geen bellenscherm),
- 0,5 (minimaal luchtdebiet voor stabiel scherm) en
- 0,25 (maximale effectiviteit).

Bellenschermen worden toegepast op zowel de Grote als de Kleine Sluis te Kornwerderzand.

Drempel in het buitenhoofd:

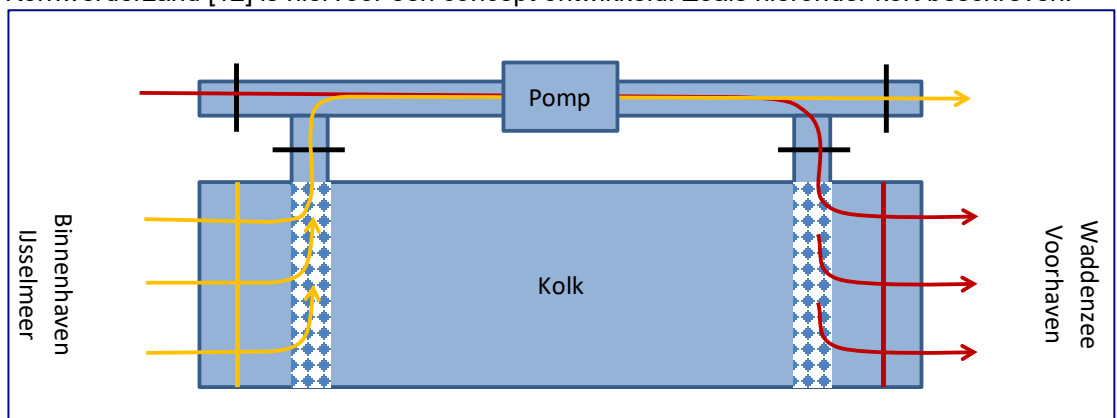
Een drempel op het Buitenhoofd met een hoogte gelijk aan de ZSS is niet nadelig voor de scheepvaart, maar ondersteunt de effectiviteit van het bellenscherm op het buitenhoofd (verdere vertraging van de kolkuitwisseling) en beperkt het benodigd luchtdebiet.

Drempel in het binnenhoofd:

Een drempel in het binnenhoofd is effectiever dan een drempel op het buitenhoofd: niet alleen vertraagt het de kolkuitwisseling, maar ook houdt het een deel van het zoute water vast in de kolk: het maximaal uit te wisselen volume (bij langere deur-opentijden) wordt dus kleiner. Omdat we uitgaan van een gelijkblijvend peil in het IJsselmeer heeft een drempel in het binnenhoofd wel direct consequenties voor de scheepvaart. Dit wordt daarom alleen toegepast op de Kleine Sluis te Kornwerderzand.

Spoeldebiet door en langs de kolk

Omdat in de toekomst er steeds een verval naar binnen zal staan zal het spoeldebiet gepompt moeten gaan worden. In het kader van de studies voor de Regiosluis te Kornwerderzand [12] is hiervoor een concept ontwikkeld. Zoals hieronder kort beschreven.



Figuur 3.14 Principeschets van een layout met een spoeldebiet door de kolk, onafhankelijk van het getij [overgenomen uit rapport KornwerderZout [12]].

Het spoeldebiet gaat door de sluis als binnen- of buitendeuren openstaan, en langs de sluis als deuren dicht staan. (In bovenstaande figuur is de route weergegeven via de sluishoofden en bodemroosters nabij de sluishoofden; de stroming in de kolk zelf is niet precies weergegeven.) De pomp hoeft dan niet steeds aan- en uitgeschakeld te worden en het geeft een eenvoudige layout van kokers en pompen:

- als binnenhoofd open staat (in oranje): afzuigen aan binnenhoofd, belangrijk bijkomend voordeel: geen extra stroming in de kolk door spoeldebiet die negatief kan zijn voor scheepvaart (bv invaren en afstoppen stroom-mee vanaf IJsselmeer);
- als buitenhoofd open staat (in rood): inbrengen in buitenhoofd; zelfde effect voor scheepvaart.

Het spoeldebiet is beschouwd in stappen van 0, 2 en 4 m³/s. Dit is het nominale debiet door de sluis; daggemiddeld is het debiet door de sluis echter kleiner, want niet altijd staat aan een

kant van de kolk de deur open. Het daggemiddelde debiet wordt aangevuld met een afvoer langs de sluis (te realiseren met continu draaiende pomp), waardoor het totaal daggemiddelde afvoer gelijk wordt aan het momentane debiet door de sluis.

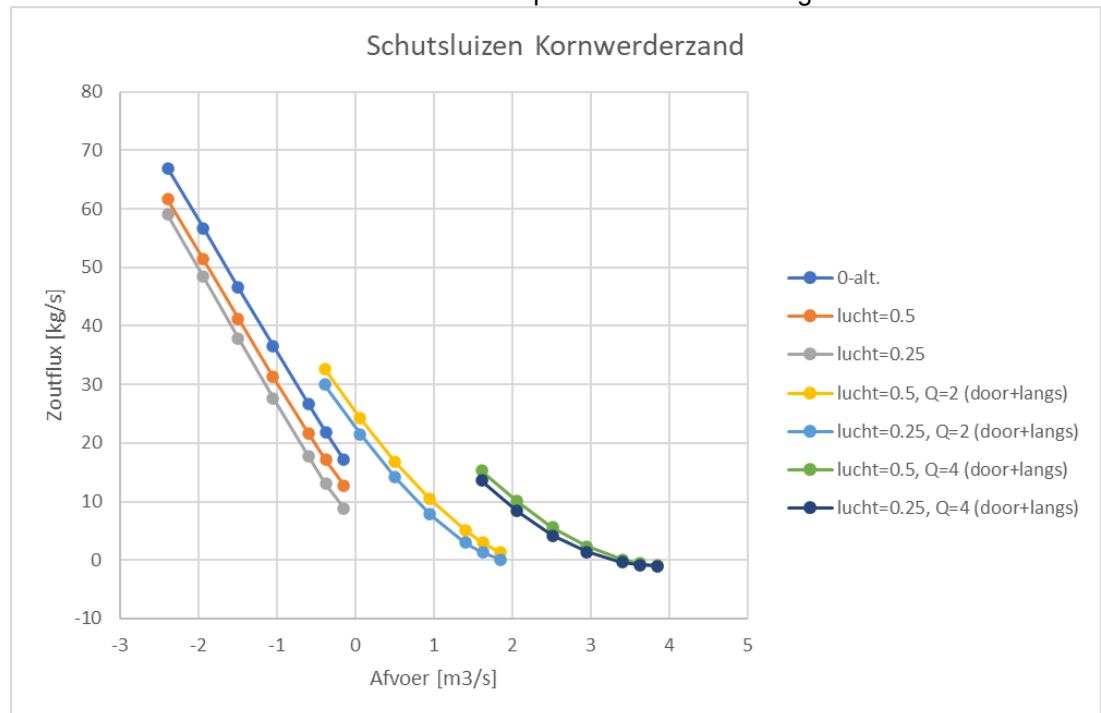
Een debiet van 4 m³/s door de Grote Suis te Kornwerderzand of de sluis bij Den Oever komt qua stroomsnelheid ongeveer overeen met 10 m³/s op de Krammersluizen (het maximum is daar groter); de snelheid door het sluishoofd is daarbij ongeveer ~0.05 m/s.

De **Kleine Sluis te Kornwerderzand** wordt niet voorzien van een speldebiet wegens de complexiteit van de installatie en de beperktere te behalen winst (omdat de Kleine Sluis sowieso al minder zoutindringing produceert). In de scenario's waarbij de Grote Sluis een speldebiet krijgt, krijgt de Kleine Sluis een drempel tot NAP -2.7; dit is circa 2.4 onder een zomerpeil van NAP -0.3 m; dit is voldoende voor praktisch alle recreatievaart.

De sluis te **Den Oever** heeft een **tussenhoofd**, waardoor er geschut kan worden met een kleinere kolk of zelf getrappt geschut kan worden. Dit is (net als in eerdere studies) niet beschouwd.

3.8.2 Resultaten schutsluizen KWZ

In onderstaande figuur worden de resultaten gepresenteerd voor Kornwerderzand. De verschillende punten op een kromme zijn de beschouwde stappen in ZSS (0, 0,5, 1, 2, 3, 4 en 5 m): daardoor loopt de zoutflux op terwijl het watergebruik terugloopt. De negatieve waarden van het watergebruik geven aan dat er, door het met de ZSS toenemende schutdebiet, water naar binnen komt. De verschillende krommen geven de resultaten voor verschillende inzet van bellenschermen en speldebiet door en langs de kolk.



Figuur 3.15 Resultaten Schutsluizen Kornwerderzand.

Aansluiting op waarden A/H:

- (onderste punt op donkerblauwe lijn): zoutflux van circa 17 kg/s; het is in de goede orde van grootte: samen met de 15 kg/s voor de spuisluizen (Paragraaf 3.5.2) is het misschien wat groot in relatie tot de 23,4 kg/s volgens A/H (Tabel 3.3).

Nul-alternatief:

- De donkerblauwe lijn toont de trend bij een oplopende ZSS zonder maatregelen. Er is een steeds grotere zoutflux, mede door het toenemende negatieve debiet. Dit laatste is het gevolg van het steeds groter wordende schutdebiet naar binnen.

Met bellenschermen (0,5 en 0,25):

- Het debiet blijft ongewijzigd, maar de zoutflux neemt af naar ongeveer de helft bij de huidige zeestand. Dit is conform eerdere bevindingen (onder andere het project rond de Regiosluis [12]) maar valt in het niet bij de stijging door de zeespiegelstijging.

Met een spoeldebiet van 2 m³/s

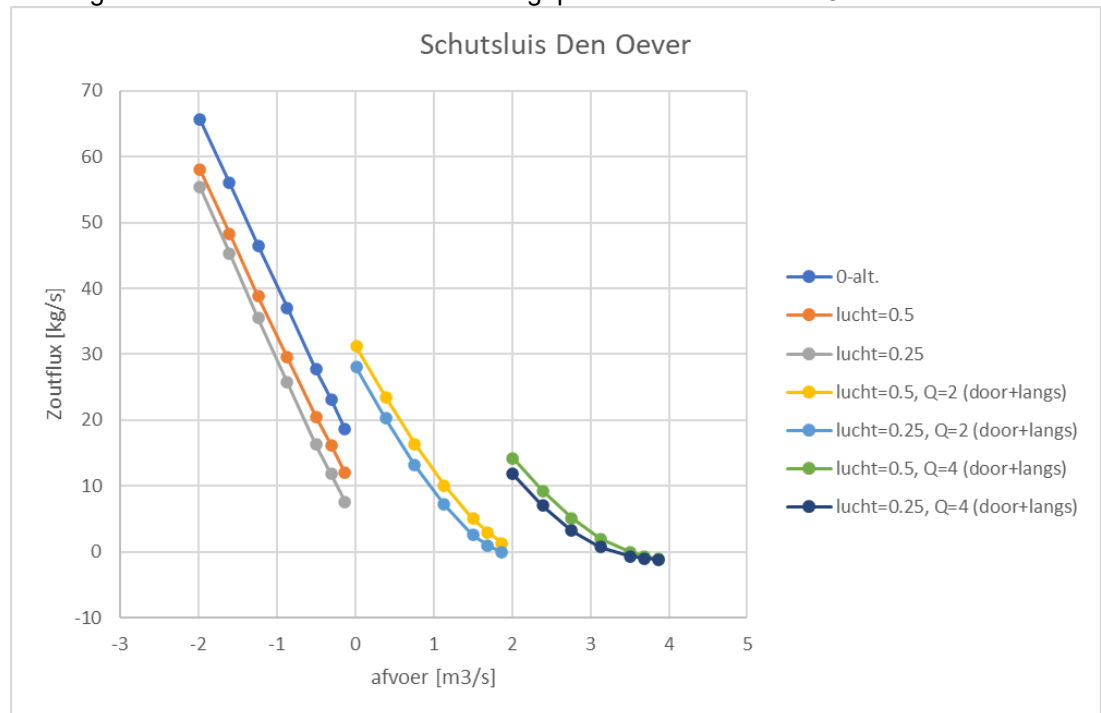
- De zoutflux neemt veel sterker af en er ontstaat ook een (positieve) afvoer van het IJsselmeer richting Waddenzee. Met toenemende ZSS neemt de afvoer weer af en wordt weer negatief. Bij een ZSS van 3 m is de zoutflux ongeveer even groot als 'nu' (het nul-alternatief zonder ZSS).

Met een spoeldebiet van 4 m³/s

- De afvoer neemt nog verder toe en de zoutflux neemt nog verder af. Met deze maatregelen is ook bij 5m ZSS de zoutflux te beperken tot de huidige waarde (zelfs nog iets daar onder). Daarbij (bij 5m ZSS) is er dan sprake van een netto afvoer naar de Waddenzee van 1.5 m³/s

3.8.3 Resultaten schutsluizen DO

In de figuur hieronder worden de resultaten gepresenteerd voor Den Oever.



Figuur 3.16 Resultaten schutsluis Den Oever.

Aansluiting op waarden A/H:

- (onderste punt op donkerblauwe lijn): zoutflux van circa 18 kg/s; dit is aan de grote kant: samen met de 12 kg/s voor de spuisluizen (Paragraaf 3.5.2) duidelijk meer dan de 14 kg/s volgens A/H (Tabel 3.3)

Een (gedeeltelijke) oorzaak hiervan is de invloed van de lozing door Gemaal Leemans: deze zorgt voor in de huidige situatie voor een verzoeting van de voorhavens aan de zeezijde wat

(sterk) reducerend werkt op de zoutindringing. Het is echter niet goed mogelijk om dit debiet mee te nemen in deze verkenning: het zou een aanpassing vragen in het model, en er het is niet direct duidelijk met welk debiet gerekend mag worden: het gemaal staat niet altijd aan en RWS heeft er ook geen sturing op. Een tweede oorzaak hiervan is dat de verzoeting van de buitenhaven door het spuien niet wordt meegenomen omdat we ons richten op perioden met weinig afvoer.

Verder geven de resultaten voor Den Oever ongeveer hetzelfde beeld als bij Kornwerderzand. Daarbij lijkt het effect van het spoeldebiet groter dan bij Kornwerderzand; mogelijk omdat er bij Kornwerderzand nog een Kleine Sluis is waar het spoeldebiet niet wordt toegepast.

3.8.4 Discussie

Zonder maatregelen neemt het zouttransport door de schutsluizen flink toe met de ZSS. Dit is het gevolg van een steeds grotere schuttschijf naar binnen, plus een steeds snellere, en daardoor meer volledige kolkuitwisseling op het buitenhoofd door de grotere waterdiepte in het buitenhoofd waardoor de kolk zouter wordt.

De effectiviteit van de bellenschermen is conform verwachting, maar bij lange na niet genoeg om de zoutindringing te beperken tot de huidige waarde of kleiner

Met de beschreven combinatie van bellenschermen en een spoeldebiet lijkt het ook bij 5 m ZSS mogelijk om de zoutindringing te beperken tot (om en nabij) het huidige niveau.

De effectiviteit van het spoelen is hoog. Dit roept de vraag op wat de zoutflux zou zijn als er alleen een afvoer wordt gerealiseerd, door en/of langs de kolk, zonder toepassing van bellenschermen. Dit wordt verkend in de volgende paragraaf.

Deze resultaten zijn de uitkomst van cyclusgemiddelde berekeningen zonder getij. Dat impliceert dat er in deze sommen minder dynamiek is dan in werkelijkheid te verwachten. In de werkelijkheid zal er (bij de huidige zeestand) rond hoogwater een debiet naar binnen staan en rond laagwater naar buiten. Met ZSS en met het toepassen van een spoeldebiet (door- en langs de kolk) zal de gemiddelde afvoer veranderen, maar de dynamiek blijft. Deze dynamiek zal in de werkelijkheid leiden tot fluctuaties in de zoutvracht naar het IJsselmeer, en het effect daarvan zal naar verwachting negatief zijn: het zout dat naar het IJsselmeer toe beweegt is niet zo makkelijk weer terug te halen: het zal (verder) verdunnen en dus is er meer water nodig voor het transport terug. In die zin geven de huidige berekeningen mogelijk een enigszins optimistisch beeld.

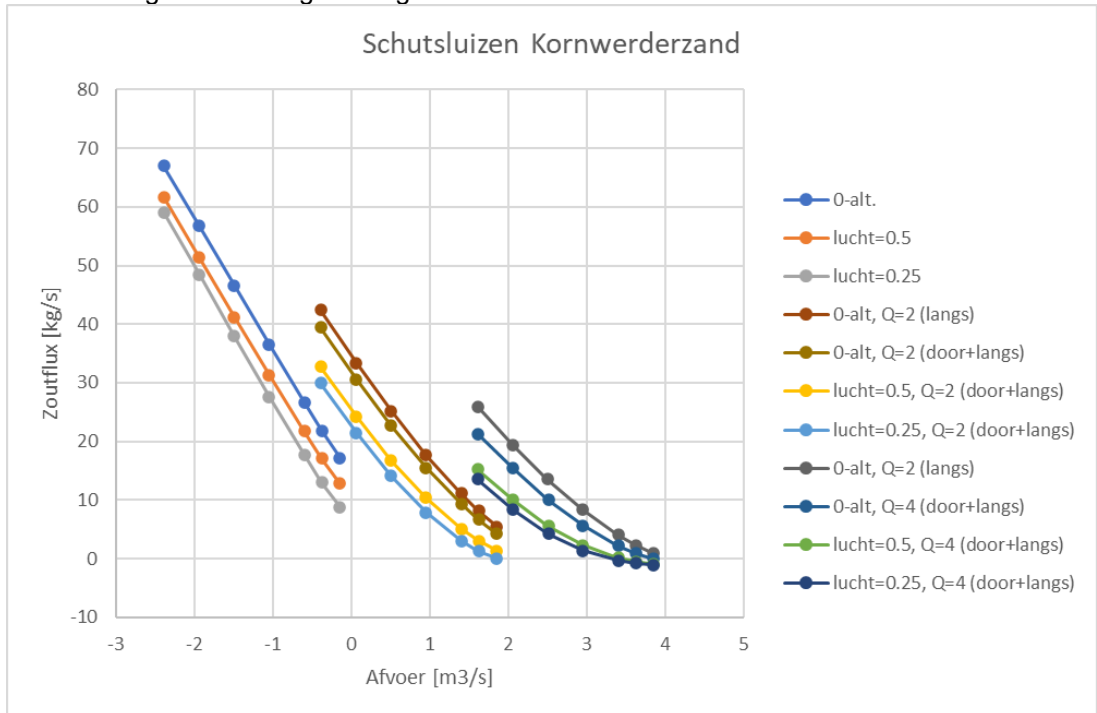
Daar staat tegenover dat het zouttransport van de Binnenhaven naar het gebied 'Meer-nabij-schut' en van daar naar het IJsselmeer op een conservatieve manier wordt bepaald: voor een betere bepaling van de dispersieve transporten (op basis van een lock exchange) zou eerst een superpositie met de netto afvoer moeten plaatsvinden: de netto afvoer reduceert de snelheid waarmee een zouttong zich richting het IJsselmeer beweegt, en kan deze ook geheel blokkeren, waarmee de zoutindringing nul zou worden. In de huidige code worden de dispersieve transporten apart berekend van het advectioneel transport, waardoor er ook bij een grote netto afvoer toch (door dispersie) zout richting het IJsselmeer wordt getransporteerd. Dit maakt de huidige berekeningen conservatief.

3.8.5 Aanvullende berekeningen

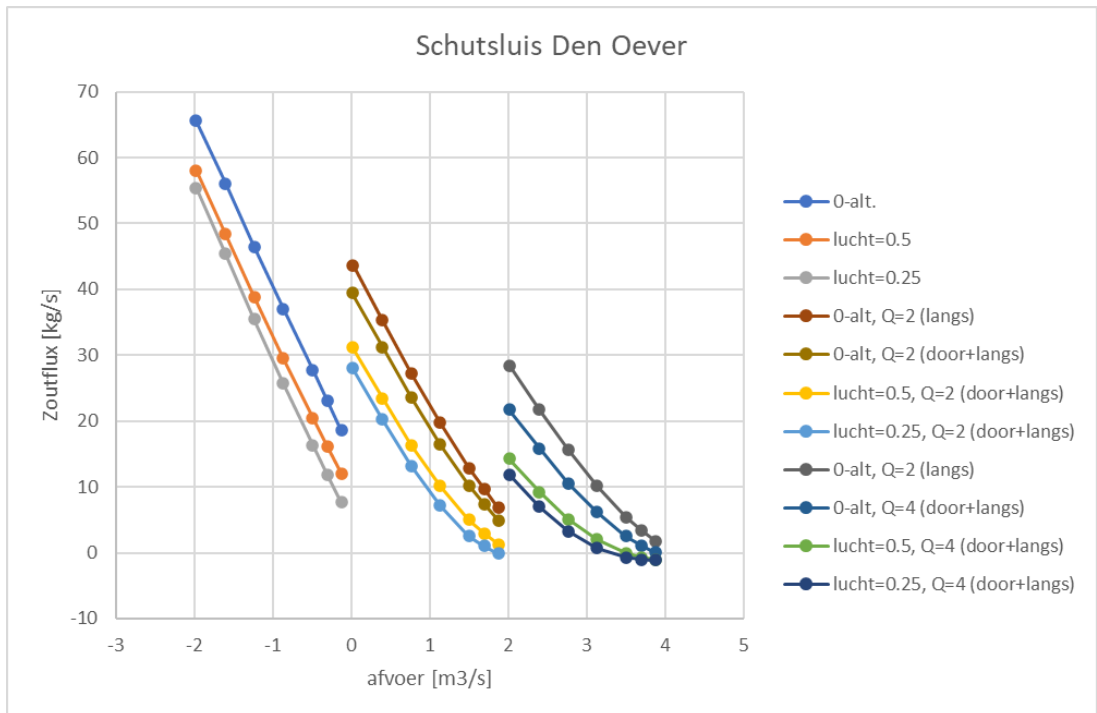
In aanvulling op de berekeningen met een combinatie van bellenschermen en een spoeldebiet door en langs de kolk zijn berekeningen gedaan waarin alleen water wordt

gebruikt. Dit water voert relatief zout water terug naar de Waddenzee en verzoet tegelijkertijd de zeezijde waardoor de zoutindringing afneemt. Er worden twee opties bekeken:

- een constante afvoer die altijd *langs* de kolk gaat;
- een constante afvoer die afwisselend *door en langs* de kok gaat, zoals ook in de vorige berekeningen aangehouden.



Figuur 3.17 Aanvullende resultaten Schutsluizen Kornwerderzand.



Figuur 3.18 Aanvullende resultaten Schutsluizen Den Oever.

De extra lijnen in deze figuur geven het volgende aan:

- De drie bovenste lijnen (blauw, rood en donker grijs) geven het effect aan van 0, resp. 2, resp. 4 m³/s langs de kolk. De reductie in de zoutlast is significant, zeker bij 0 m ZSS (onderste punt op elk lijn).
- Als het debiet afwisselend door de kok en langs de kolk wordt geleid is de reductie in zoutflux groter, maar bij beperkte waarden voor de ZSS en vooral bij een spoeldebiet van 2 m³/s lijkt die winst beperkt; de bellenschermen (in combinatie met een drempel in het buitenhoofd ter grootte van de ZSS) voegen daar dan veel aan toe. Bij 4 m³/s is het effect van het spoelen door de kolk (ipv alleen langs de kolk) groter.
- Voor zowel KWZ als DO lijkt een continu debiet van 4 m³/s langs de kolk voldoende om de zoutflux te beperken tot het huidige niveau tot een ZSS van circa 3 m; voor hogere waarden van ZSS is dan meer nodig: het debiet ook door de kolk sturen, bellenschermen toevoegen (plus drempel in het buitenhoofd) of een (nog) groter debiet door de voorhavens.
- Een andere optie om de effectiviteit verder te verhogen is om het af te voeren debiet af te zuigen uit een zoutvang in de Binnenhaven. Hiervoor zouden aanvullende berekeningen gedaan kunnen worden.
- Merk op dat de *netto afvoer* (de x-as in de figure) terugloopt met toenemende ZSS door het schutdebiet door de kolken; dit maakt het logisch om bij toenemende ZSS een steeds groter debiet richting Waddenzee te pompen; slecht een deel daarvan wordt netto onttrokken aan het IJsselmeer.

De effectiviteit van de afvoer via de schutsluizen in het beperken van de zoutflux naar het IJsselmeer is groot: met enkele kubieke meters water per seconde zijn vele kilogrammen zout per seconde tegen te houden: de afvoer voorkomt dat het zout naar binnenkomt; dit is effectiever dan het eerst binnen te laten komen en dan (na verdunning) weer terug te voeren.

Mogelijk zijn de resultaten met een spoeldebiet (ook in combinatie met bellenschermen) wat optimistisch: de bakjes tussen de Binnenhaven en de rand van het bakjesmodel van A/H zijn zo gekozen voor de verspreiding van zout naar het IJsselmeergebied: dit verspreid zich via de diepere delen, en die vormen de verbinding tussen de bakjes. In de berekeningen wordt vervolgens ook al het spoeldebiet door deze bakjes afgevoerd, waar dat in werkelijkheid niet in diezelfde mate zal gebeuren.

3.9 Samenvatting en conclusies IJsselmeergebied

Spuisluizen

1. Er is een prototype gebouwd van een 'twee-laagsbakje' voor het beschrijven van het effect van de erosiekuilen: op basis van kalibratie gaat slechts een kwart het zoute lekwater naar de erosiekuil, de rest gaat naar het IJsselmeer. Dit leidt ertoe dat er, volgens dit model met twee lagen, slechts beperkt voordeel te behalen is met pompen i.p.v. spuien: alleen de 25% die naar de erosiekuil gaat kan efficiënter (met minder water) worden afgevoerd. In werkelijkheid kan dit subtieler zijn.
2. Er zijn pompen toegevoegd om het verlies aan spuicapaciteit bij ZSS op te vangen; dit geeft ook extra lekkage, maar direct naar erosiekuil.
3. De zoutflux neemt flink toe met ZSS, totdat de spuisluizen worden dichtgemaakt omdat er toch niet meer gespuid kan worden; als dat punt eenmaal is bereikt is er geen zoutlek meer door de spuisluizen (nog wel door de pompen) en is er ook geen netto afvoer meer nodig: wat door de pompen lekt kan (praktisch) onverdund weer worden afgevoerd. Dit moment wordt in Den Oever eerder bereikt dan bij

Kornwerderzand omdat de getijamplitude daar kleiner is: laagwater bij Den Oever is minder laag dan bij Kornwerderzand.

4. Als een tussenstap (tussen nu en het moment dat de spuisluizen geheel worden afgesloten) zou onderzocht kunnen worden of het technisch mogelijk is om het lekoppervlak (bijvoorbeeld) te halveren. Zo iets als dit is noodzakelijk om de zoutindringing te beheersen.

Schutsluizen

5. De zoutflux door de schutsluizen lijkt vrij eenvoudig te beperken door een spoeldebiet door de voorhavens. Daarbij wordt opgemerkt dat de resultaten van de huidige berekeningen wat optimistisch kunnen zijn. Met alleen een spoeldebiet langs de kolk is, volgens de huidige berekeningen, de zoutflux op het huidige niveau te stabiliseren tot een ZSS van circa 3 m, met slechts een zeer beperkte netto-onttrekking vanuit het IJsselmeer.
6. Met een spoeldebiet door de kolk en/of met bellenschermen op beide sluishoofden is een verder reductie mogelijk, zodat de zoutflux tot 5 m ZSS onder het huidige niveau blijft, nog steeds met een zeer beperkte netto-onttrekking vanuit het IJsselmeer.
7. Ook zou een verdere verhoging van het spoeldebiet overwogen kunnen worden (nog niet berekend).

Combinatie van schut- en spuisluizen

8. Op de kortere termijn lijkt het makkelijker om de zoutflux door de schutsluizen te reduceren (met een beperkt debiet) dan de zoutflux door de spuisluizen; dit zou een bijdrage kunnen leveren aan het beperkt houden van de totale zoutindringing over de Afsluitdijk tot het moment dat de spuisluizen geheel kunnen worden afgesloten.
9. Als (vanaf circa 1 m ZSS) de spuisluizen geheel zijn afgesloten, dan is nog maar een beperkte netto afvoer vanaf het IJsselmeer nodig om de zoutindringing tot zeer lage waarden terug te brengen.

Over de gebruikte bakjesmodellen

10. De resultaten bereikt met de nu gebruikte bakjesmodellen behoeven verdere verfijning, met name waar het gaat over de spuisluizen en de bijdrage van de erosiekuil. Er zijn tot nu toe echter onvoldoende complete sets aan gemeten kalibratiegegevens voorhanden (zoutprofielen aan zowel de zoete als de zoute zijde, vastlegging van de schutoperatie (deur-bewegingen), spui-operatie etc.). Wel zou er gebruik gemaakt kunnen worden van de resultaten van 3D-berekeningen.
11. Ondanks de tekortkomingen aan de gebruikte rekenmodellen laten de resultaten zien dat het bouwen van een ZoutTransportModel (ZTM), nu nog op basis van ad-hoc modellen uit eerdere projecten, van grote waarde is voor de verkenning van toekomstige ontwikkelingen en maatregelen.

4 Noordzeekanaal – Amsterdam-Rijnkanaal

4.1 Inleiding

Net als voor de zoutindringing naar het IJsselmeergebied door de kunstwerken in de Afsluitdijk, is er voor het Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal gekeken naar de zoutindringing door het sluiscomplex te IJmuiden. Ook hier is een rekenkundige verkenning gedaan naar de invloed van zeespiegelstijging en naar de effectiviteit van maatregelen.

Voor dit watersysteem wordt gekeken naar het zoutgehalte nabij Diemen (monding ARK) en hoe dit verandert door ZSS en door maatregelen in beheer en operatie. Dit zoutgehalte wordt steeds geplot als functie van de (netto) afvoer via het sluizencomplex te IJmuiden.

4.2 Aanpak

De referentie is de situatie met de nieuwe Zeesluis (in plaats van de Noordersluis) en de Selectieve Onttrekking IJmuiden (SO-IJ) in werking. Voor deze situatie is een bakjesmodel opgesteld, waarin ook het NZK en het ARK zijn opgenomen.

Met dit model is nagegaan wat er met het zoutgehalte in de monding van het ARK gebeurt als de zeespiegel stijgt met 1 tot 5 m. Daarbij bleek dat door een toenemend schutdebiet naar binnen, de afvoer via het spui- en maalcomplex verhoogd moet worden om dezelfde (netto) afvoer door het ARK te kunnen behouden. Vervolgens is gekeken wat de invloed van een drietal maatregelen hierop is:

- het verhogen van de afvoer (meer debiet via het ARK toevoeren),
- het vergroten van de zoutvang in de Velserkom (conform schetsen uit de SO-IJ studies) en
- minder schutten met de Zeesluis.

Het alsnog installeren van bellenschermen op de nieuwe Zeesluis is hierbij niet overwogen. Afgezien van de nautische onwenselijkheid en het grote energieverbruik (reden voor de aanleg van de SO-IJ en niet van bellenschermen) is het op voorhand ook niet duidelijk of bellenschermen in zo'n grote kolk en de SO-IJ wel goed samen gaan: een bellenscherm zorgt voor menging, terwijl de effectiviteit van Selectief Onttrekken juist stoelt op de afvoer van water met een hoog zoutgehalte. Deze vraag is te groot voor het bakjesmodel.

Ook de optie van een spoeldebiet door de schutkolk is niet beschouwd. Dit is niet eenvoudig te realiseren op de bestaande Zeesluis vooral omdat bij ZSS de optie van spuien door de rinketten onder vrij verval al snel verdwijnt.

4.3 Schematisatie

4.3.1 NZK en ARK in 4 bakjes

Het beschouwde gebied van NZK-ARK is (ruw) beschreven met 4 bakjes, te weten: de Velserkom, het NZK, een deel van het ARK nabij Diemen en de rest van het ARK tot aan de Irenesluizen. De afmetingen van deze bakjes zijn overgenomen uit [16].

4.3.2 Schutsluizen

In de hierboven aangehaalde verkenning, gericht op het ontwikkelen van een methodiek, is alleen de Noordersluis opgenomen. In de huidige studie zijn alle sluizen (m.u.v. de Kleine

Sluis) apart en naast elkaar opgenomen in het model, zodat de zeespiegelstijging op de juiste manier doorwerkt in zowel het schutdebiet als de zoutindringing.

De operatie van de schutsluizen is beschreven op basis van de cyclus-gemiddelde rekenwijze bij gemiddelde waterstanden op zee (geen getij). De aantallen schutcycli en de representatieve deur-opentijden zijn overgenomen uit eerdere studies.

4.3.3 Spui- / maalcomplex en Selectieve Onttrekking

De werking van de Selectieve Onttrekking is opgenomen in het model middels een factor op het zoutgehalte: het water dat wordt afgevoerd via spuien of malen krijgt een zoutgehalte dat een factor 1,5 bedraagt ten opzichte van het (dieptegemiddelde) zoutgehalte in het bakje 'Velserkom'. Deze factor is eerder bepaald door kalibratie op 3D-berekeningen [3]. Zonder de Selectieve Onttrekking is deze factor circa 0.86; kleiner dan 1 omdat het Binnenspuikanaal ondieper is dan de Velserkom en dus relatief weinig water afvoert uit de diepere delen van de Velserkom waar het zoutgehalte het hoogst is [17].

4.3.4 Kalibratie / validatie

Het bakjesmodel is gekalibreerd op het eerder gebruikte bakjesmodel [17] en voor de Deltascenario's [3] dat was gekalibreerd op 3D-berekeningen. Dat model had echter maar twee bakjes en liep tot de monding van het ARK. Het ARK zelf werd dus niet beschreven. Het huidige model heeft wel twee bakjes voor het ARK (een relatief klein bakje voor het deel rondom Diemen en een langer deel tot aan de Irenesluizen). Daarnaast bevat het alle sluizen in IJmuiden (m.u.v. de Kleine Sluis).

De kalibratie van dit nieuwe model (vier bakjes) heeft zich in eerste instantie gericht op het opnieuw produceren van dezelfde zoutgehalten in het bakje Noordzeekanaal als eerder berekend met het model met twee bakjes [17] en [3]. Daarbij zijn verschillende referentie-berekeningen gebruikt, die elk verschillende delen bevatten van de nu beschouwde situatie. Tezamen vormen zij een grondslag voor de huidige verkenning.

De kalibratie omvatte, net als eerder gedaan [17], het variëren van de waarde voor de factor op de dispersie, die in dit model wordt berekend met een formulering voor uitwisseling door dichtheidsstroming (lock exchange). De gehanteerde waarde voor deze factor is gelijk gehouden voor alle verbindingen tussen de vier bakjes, alhoewel deze in werkelijkheid kan variëren. Het bleek daarbij dat een goede representatie van het zoutgehalte in het bakje NZK leidde tot een onrealistisch hoge waarde van het zoutgehalte in het bakje 'Diemen'. Er is een compromis gevonden waarbij het model een wat lage waarde berekent voor het NZK en een wat hoge waarde voor Diemen.

De gebruikte referentie-situaties zijn de volgende. De genoemde getallen zijn ook weergegeven in Tabel 4.1.

- Het model gebruikt in [17] beschrijft onder andere de toestand volgens de zgn. Autonome Ontwikkeling (AO), d.w.z. de situatie met maximale toekomstige operatie van de Noordersluis en nog zonder Zeesluis en SO; hierbij geldt een jaargemiddelde afvoer via spui-/maalcomplex van 68 m³/s. In [17] wordt het zouttransport door de kleinere sluizen meegenomen middels een vaste waarde. Voor deze toestand wordt daarbij een zoutgehalte berekend in het NZK van $S_{\text{NZK}} = 8,9 \text{ kg/m}^3$. Dat is de doelwaarde voor de kalibratie. Het nu gehaalde resultaat is een netto afvoer over het NZK van $Q=66,5 \text{ m}^3/\text{s}$ en zoutgehalten S_{NZK} van $5,9 \text{ kg/m}^3$ en $S_{\text{Diemen}} = 1,0 \text{ kg/m}^3$ (~550 mg Cl/l).

- Hetzelfde model is gebruikt in [3] voor het beschrijven van het zgn. Project Alternatief met Selectieve Onttrekking (PA+SO: geen Noordersluis, maar wel Zeesluis met SO), met een jaargemiddelde van 68 m³/s. De zoutlast door de kleinere sluisen wordt hierin beschreven met dezelfde vaste waarden. In [3] berekent dit model een zoutgehalte in het NZK (doelwaarde) van S_NZK is 8,7 kg/m³. Het resultaat met het huidige model een netto afvoer van Q = 65,3 m³/s en zoutgehalten S_NZK = 6,7 kg/m³ en S_Diemen = 1,2 kg/m³ (~670 mg Cl/l).
- In [3] is ook een berekening voor de situatie PA+SO met een zomerafvoer van 35 m³/s. Hierbij werd een zoutgehalte in het NZK berekend van S_NZK = 13,2 kg/m³. Het resultaat nu is een netto afvoer van Q = 32,3 m³/s en zoutgehalten S_NZK = 10,6 kg/m³ en S_Diemen = 3,24 kg/m³ (~1800 mg Cl/l).

Om ook het effect van ZSS via de Midden- en de Zuidersluis mee te nemen is vervolgens de overstap gemaakt van een vaste zoutlast naar een beschrijving van de schutoperatie. De aantallen schutbewegingen van deze sluisen zijn overgenomen uit [21]. De factor op de deuropentijd is zodanig gekozen dat dezelfde waarde voor de zoutlast wordt berekend. Deze berekening leidt tot een netto afvoer van Q=65,6 m³/s en zoutgehalten van S_NZK = 7,0 kg/m³ en S_Diemen = 1,25 kg/m³ (~ 700 mg Cl/l).

Tabel 4.1 Resultaten kalibratie Noordzeekanaal – Amsterdam-Rijnkanaal

Situatie		Doelwaarden		Resultaat in kalibratie			
		Afvoer gemaal IJmuiden	zout- gehalte NZK	Netto afvoer NZK	zout- gehalte NZK	zout- gehalte Diemen	Chloride- gehalte Diemen
		[m ³ /s]	[kg/m ³]	[m ³ /s]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[mg Cl/l]
AO	Autonome Ontwikkeling Noordersluis	68	8,9	66,5	5,9	1	550
PA+SO	Zeesluis met Selectieve Onttrekking	68	8,7	65,3	6,7	1,2	670
		35	13,2	32,3	10,6	3,24	1800
PA+SO	idem met doorrek. Midden- en Zuidersluis	68	-	65,6	7	1,25	700

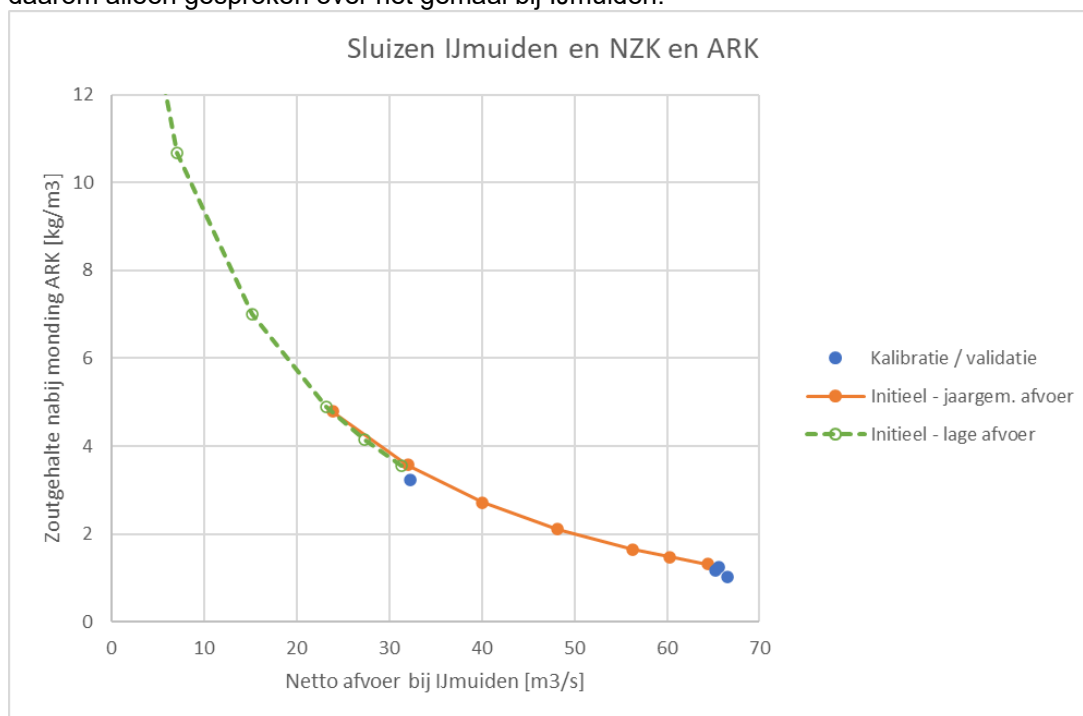
De nu berekende waarden voor de zoutgehalten bij Diemen zijn dus duidelijk hoger dan de gemeten waarden (300 – 400 mg Cl/l). De reden hiervoor is nog niet helemaal duidelijk. In de berekening wordt wel de verandering in de dwarsdoorsnede van NZK naar ARK meegenomen: hier is sprake van een overgang naar een kleinere breedte en kleinere diepte. Voor het transport tussen bakjes NZK en Diemen worden de kleinere afmetingen gebruikt maar de stratificatie in het NZK wordt niet meegenomen. Ook zou hier een andere factor voor de dichtheidsstroming meer passend kunnen zijn. Dit alles kan ertoe leiden dat het berekende zouttransport naar het bakje 'Diemen' nu groter wordt berekend dan in werkelijkheid optreedt.

Omdat de tijd ontbrak om dit verder te onderzoeken, is verder gewerkt met de waarden getoond in Tabel 4.1: zoutgehalte nabij Diemen omstreeks 1 – 1,25 kg/m³ (~550 – 700 mg Cl/l). De veranderingen door ZSS en de effectiviteit van maatregelen moet dan worden beschouwd ten opzichte van deze modeluitvoer.

4.4 Resultaten

Met ZSS loopt de netto afvoer bij IJmuiden terug: dit is het gevolg van het toenemend schutdebiet naar binnen. Met het afnemen van de netto afvoer loopt het zoutgehalte in de monding van het ARK sterk op. De onderstaande figuur toont 2 krommen: bij de oranje kromme wordt er jaargemiddeld steeds 68 m³/s afgevoerd door het spui- en maalcomplex bij IJmuiden. In stappen (0, 0,5, 1, 2, 3, 4 en 5 m ZSS) loopt de *netto* afvoer bij IJmuiden (en over het kanaal) terug naar ~22 m³/s bij een ZSS van 5 m door de toenemende schutdebieten. Bij de groene gestippelde kromme is er sprake van een lage zomerafvoer van 35 m³/s via het spui- en maal complex. Deze kromme eindigt bij circa -10 m³/s (buiten de grafiek). Een lage zomerafvoer van 35 m³/s bij het spui- en maalcomplex kan dus zelfs tot negatieve netto afvoer over het kanaal leiden: er komt meer water naar binnen dan er wordt afgevoerd.

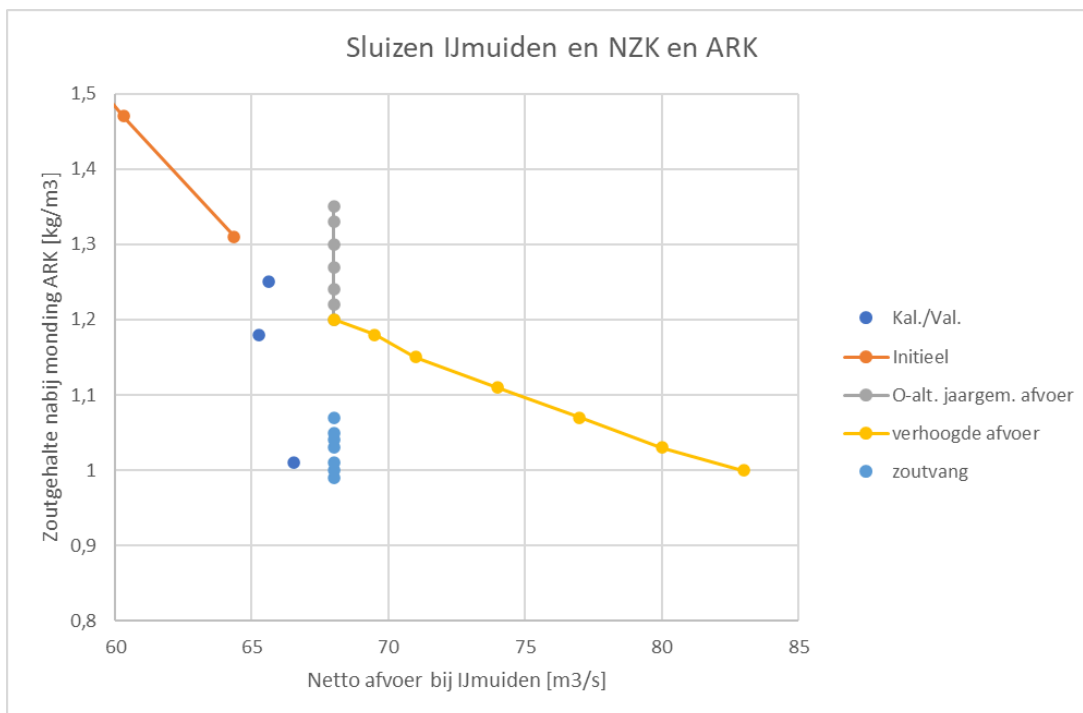
Met toenemende ZSS zal er steeds minder kunnen worden gespuid. In het vervolg wordt er daarom alleen gesproken over het gemaal bij IJmuiden.



Figuur 4.1 Zoutgehalte nabij Diemen als functie van de netto afvoer bij IJmuiden.

Het teruglopen van de afvoer is niet in lijn met het huidige waterbeheer: er is in principe water beschikbaar om de zoutindringing te bestrijden. Daarom is als eerste de afvoer via het gemaal bij IJmuiden zodanig verhoogd dat de netto afvoer steeds gelijk is aan 68 m³/s: zie de grijze punten in onderstaande figuur.

- Nu valt ook op dat, ook bij 0 m ZSS in de initiële berekening, de netto afvoer bij IJmuiden niet gelijk is aan 68 m³/s: ook nu komt er water naar binnen door het schutten, zij het slechts enkele m³/s.
- Het zoutgehalte bij Diemen neemt nog steeds toe met ZSS, maar volgens het model niet heel sterk: 15% bij 5m ZSS.
- Om de netto afvoer gelijk te houden moet de afvoer via het gemaal toenemen met ~45 m³/s bij 5 m ZSS. Deze toename is alleen ter compensatie van het binnenkomende schutdebiet; het legt geen beslag op de zoetwaterbeschikbaarheid in Nederland.



Figuur 4.2 Zoutgehalte nabij Diemen vs netto afvoer IJmuiden met extra afvoer of vergroten zoutvang.

De grijze punten in bovenstaande grafiek geven dus een beeld van de toename in het zoutgehalte bij oplopende ZSS bij hetzelfde doorspoeldebiet over NZK-ARK. Om deze toename te bestrijden zijn een aantal maatregelen onderzocht.

1^e maatregel: verhoogde afvoer (gele punten)

Bij het onderzoek ten behoeve van de Delta-scenario's [3] was er circa 8 m³/s extra afvoer nodig voor 1 m ZSS; dit was gebaseerd op het zoutgehalte in het bakje NZK in het destijds gebruikte model met twee bakjes (Velserkom en NZK). Het huidige rekenmodel heeft echter ook nog twee bakjes voor het ARK. Het bakje nabij Diemen ('nabij monding ARK') zal minder extra water vragen voor het zelfde zoutgehalte; immers: door de kleinere dwarsdoorsnede op die plaats zal een verhoging van het debiet meer effect hebben.

Voor de huidige verkenning is het effect doorgerekend van een verhoging van de netto afvoer van 3 m³/s per 1 m ZSS. De gele lijn in Figuur 4-2 laat zien dat het watergebruik hierdoor toeneemt (van 68 naar 83 m³/s), maar het zoutgehalte daalt zelfs wat. De verhoging van de afvoer zou volgens het model dus kleiner kunnen zijn dan 3 m³/s per meter ZSS.

2^e maatregel: zoutvang zoals onderzocht in ontwerpstudies SO-IJ (lichtblauwe punten):

De SO-IJ is aangelegd om bij spuien en malen het zoutste water af te voeren uit de Velserkom en daarmee uit het Noordzeekanaal. Hiertoe loopt de bodem van de Velserkom langzaam af naar een diepte van NAP -23 m ter plaatse van het zoutscherm. Van een echte zoutvang (een groot bergend volume voor het opslaan van het binnenkomende zoute water) is geen sprake: de berging vindt hoofdzakelijk plaats in de Velserkom en het Noordzeekanaal.

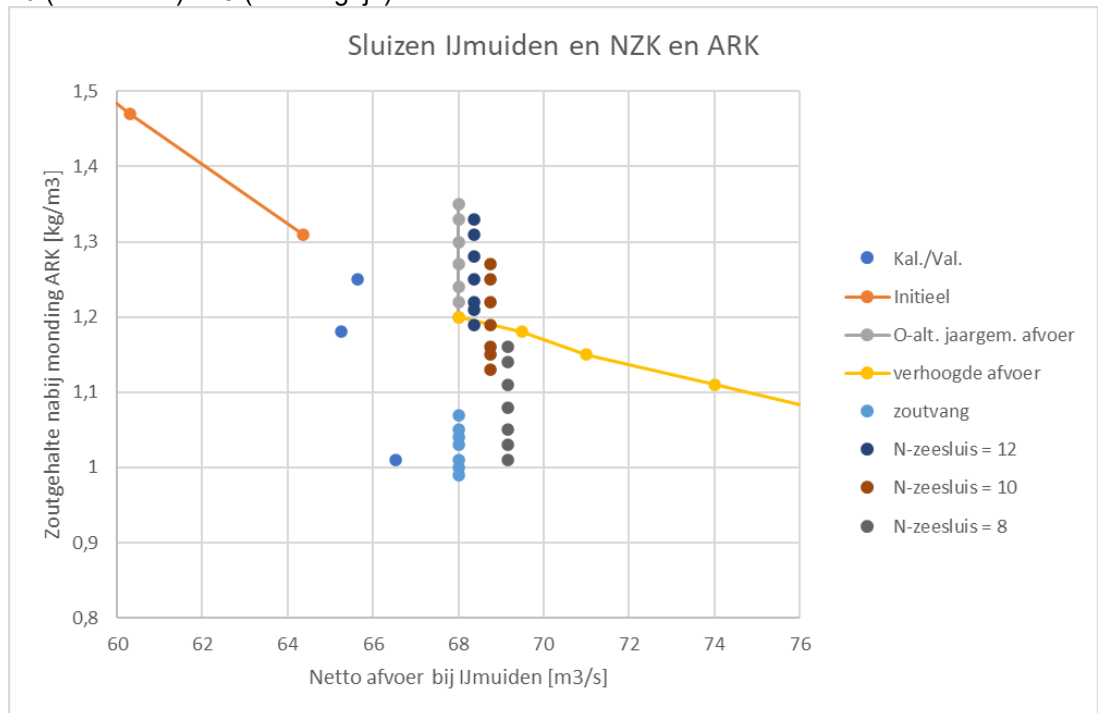
In een vroeg stadium van het onderzoek naar de selectieve onttrekking is ook een berekening gedaan met een zoutvang die zo ongeveer de hele Velserkom besloeg en een diepte had van NAP -24 m (bij het zoutscherm NAP -25 m) [19]. Deze bleek een positief effect te hebben op de netto zoutflux naar het Noordzeekanaal. Dit is uit te drukken in een verlaging van het zoutgehalte in het Noordzeekanaal van ongeveer 0,8 kg/m³. Met het nu gebruikte model wordt deze verlaging in het bakje NZK bereikt met het verhogen van de

factor op het zoutgehalte van 1.5 naar 2.0 (factor tussen dieptegemiddeld zoutgehalte Velserskom en zoutgehalte in de afvoer via het spui-maalcomplex).

Figuur 4.2 laat zien dat het resultaat positief is: zelfs tot 5 m ZSS is het zoutgehalte in het bakje Diemen lager dan in de referentie. Hierbij moet echter wel een voorbehoud worden gemaakt: het is niet op voorhand te zeggen of de factor op het zoutgehalte op dezelfde manier geldig blijft: door de ZSS komt er veel meer water naar binnen, wat er vervolgens ook weer uit moeten worden gepompt; het is niet zeker of deze factor wel onafhankelijk is van de ZSS.

3^e maatregel: minder schuttingen met de Zeesluis:

Alleen het aantal schuttingen met de Zeesluis is gevarieerd; de operatie met de overige sluisen is gelijk gehouden. De Zeesluis zou (in de toekomst) 13,82 schutcycli per dag doen (grijze punten). In onderstaande figuur is dit aantal gewijzigd naar maar 12 (donker blauw), 10 (rood-bruin) of 8 (donkergrijs).



Figuur 4.3 Zoutgehalte nabij Diemen vs netto afvoer IJmuiden, kleiner aantal schuttingen Zeesluis.

In de figuur is te zien dat de punten wat betreft de afvoer net niet op elkaar liggen: met het beperken van het aantal schuttingen moet ook het pomp-debiet worden aangepast; dit is net niet helemaal sluitend uitgevoerd.

De figuur laat zien dat, zonder verdere maatregelen, er bij 5 m ZSS nog steeds 8 schuttingen per dag kunnen worden gedaan: het bovenste van de donkergrijze punten (5 m ZSS) ligt nog altijd lager dan het onderste van de lichtgrijze punten (0 m ZSS); dit lijkt een sterke schutbeperking, maar in de zomer 2022 is een vergelijkbare ingreep gedaan: toen is een tijdlang alleen de Noordersluis gebruikt tussen 6:00 en 18:00. Er waren minder schuttingen, maar de kolk was steeds wel vol bezet.

4.5 Conclusies

De verkennende berekeningen laten het volgende zien wat betreft de invloed van ZSS en de effectiviteit van de beschouwde maatregelen.

- Door ZSS komt er steeds meer water naar binnen als gevolg van de schutoperatie; dit moet worden afgevoerd door het spui- en maalcomplex bij IJmuiden om de netto afvoer over het kanaal in stand te houden. (Dit vraagt dus geen extra water vanuit het Hoofdwatersysteem).
- Een beperkte aanvulling van het aangevoerde debiet over het ARK zou voldoende kunnen zijn om het zoutgehalte nabij Diemen te beheersen: circa 3 m³/s per meter ZSS.
- De aanleg van een grotere en diepere zoutvang lijkt voldoende t/m 5 m ZSS; dit vraagt wel om een nadere onderbouwing door verdere ontwikkeling en validatie van het gebruikte bakjesmodel in combinatie met 3D-sommen.
- De aanleg van een zoutvang zou ook nu al tot een reductie van de doorspoelvraag kunnen leiden, maar waarschijnlijk slechts enkele m³/s. Dit omdat de netto afvoer over het ARK zo'n sterke invloed blijkt te hebben op het zoutgehalte bij Diemen.
- Door ZSS komt er steeds meer water naar binnen door het schutproces. Om de netto afvoer gelijk te houden moet er steeds meer water door het gemaal bij IJmuiden worden afgevoerd naar zee, en dat bij een toenemende opvoerhoogte. Dit zal leiden tot hogere kosten voor energie en onderhoud van het gemaal.
- Deze hogere afvoer voor het beheer op het zoutgehalte zal waarschijnlijk niet een-op-een doorwerken in de benodigde maximale capaciteit van het gemaal (afvoer en opvoerhoogte); die zal vooral bepaald worden door weersafhankelijke extreme afvoersituaties (ook beïnvloed door klimaatverandering) in combinatie met ZSS.

Wat het model vooral duidelijk maakt is dat het effect van zeespiegelstijging en maatregelen vooral voelbaar is nabij de sluizen en op het Noordzeekanaal en veel minder in de monding van het ARK, zolang de netto afvoer maar op niveau blijft. In vergelijking met [2] is de meerwaarde van de huidige studie dat de conclusies over mogelijke maatregelen bij ZSS zijn onderbouwd door middel van een bakjesmodel dat de invloed op de zoutgehaltes bij de mond van het ARK weergeeft, gegeven de randvoorwaarden bij IJmuiden-buiten (onder andere constant zoutgehalte), de operatie van de sluizen, een inschatting van de werking van de SO-IJ en de feedback tussen de zoutvracht naar binnen en het zoutgehalte aan de binnenkant van de sluizen (in de Velserkom).

5 Volkerak-Zoommeer

In vervolg op de *Systeemanalyses zoetwater, regio Volkerak-Zoommeer*, uitgevoerd door Arcadis / Hydrologic in het kader van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging [4] wordt in dit hoofdstuk gekeken naar de mogelijkheden om het huidige beheer van dit zoete watersysteem 'op te rekken' met maatregelen op de kunstwerken op de overgangen tussen zoet en zout. Voor het Volkerak-Zoommeer (VZM) betreft het de verschillende kunstwerken die de verbinding vormen naar de Oosterschelde (met name de Krammersluizen), de Westerschelde (de spuisluis bij Bath) en de Antwerpse havendokken (de Kreekraksluizen). Daarbij is gebruikgemaakt van de schatting van de doorspoelbehoeften van het Volkerak-Zoommeer (VZM) die zijn gemaakt voor de definitie van de Deltascenario's 2024, zie paragraaf H.3 uit Bijlage H van [3].

Het Volkerak-Zoommeer, met de Krammersluizen als voornaamste zoutbron, is een watersysteem dat is ingeklemd tussen het Hollands Diep, de Oosterschelde, de Westerschelde en het Antwerps Kanaalpand (AKP). Daarmee ontstaat een ingewikkelde samenhang bij extreme ZSS scenario's.

Om die reden was het nodig een aantal uitgangspunten te formuleren, zie ook [3]:

- Het huidige peil in het Antwerps Kanaalpand (AKP) en de Antwerpse havendokken is 1,9 m NAP, en de zoutindringing via het Antwerps Kanaalpand naar de Kreekraksluizen kan worden beheerst met een relatief klein (pomp-) debiet van circa 2 – 4 m³/s bij de Kreekraksluizen [5]. Onbekend is hoe het beheer van Antwerpse havendokken qua peil en zoutgehalte zal zijn bij een grote mate van ZSS (meer dan 1 m). De mogelijke invloed daarvan op het VZM systeem is niet beschouwd.
- Voor de schuttingen van de Krammersluizen is uitgegaan van een 'stand still' ten opzichte van de prognose die gebaseerd is op een SIVAK-simulatie van de verkeersafwikkeling (en daarmee de sluis-operatie) voor 2045 ([6] en [7]).
- Als het systeem, na de ombouw naar de nieuwe manier van zout-zoetscheiding (de Innovatieve Zout-Zoet Scheiding, IZZS) op de Krammersluizen qua doorspoeling blijft werken bij ZSS zou de zoutindringing geen probleem hoeven zijn. Als we aannemen dat de zoutvracht vanuit de schutsluizen (ongeveer) gelijk blijft, is het oprekken van het waterbeheer vooral een kwestie van voldoende afvoercapaciteit in de vorm van spuien of pompen beschikbaar houden op 3 locaties: bij de Krammersluizen (Laag Bekken, jachtensluizen en het Spui- en Vismigratiemiddel (SPVM)), de Bathse Spuisluis en het gemaal voor het AKP bij de Kreekraksluizen. Spuisluisen zullen daarbij op den duur door pompen moeten worden vervangen.
- Met het stijgen van de zeespiegel zal ook het peil op het Hollandsch Diep toenemen. Als het peil op het VZM gehandhaafd blijft zal met het toenemen van het verval ook de afvoercapaciteit van de doorlaatsluizen in de Volkerakdam toenemen. Om die reden was er geen reden om een check te doen op de afvoercapaciteit van deze doorlaatsluizen (zie ook [3]).

Om een indicatie te hebben van de grootte van de benodigde spuumiddelen of gemalen is een globale schatting van de gemiddelde debieten gegeven voor de verschillende niveaus van ZSS voor de situatie buiten het groeiseizoen, zie Tabel 5.1.

- Het spoeldebiet en het schutdebiet van de duwvaartsluizen wordt afgevoerd naar het Laag Bekken, en moet vandaaruit gespuid of gepompt worden naar de Oosterschelde. Het spoeldebiet is onafhankelijk van de ZSS (9 m³/s daggemiddeld), maar de schutdebieten nemen toe bij ZSS. Daarbij nemen de getijvensters voor het ledigen van het Laag Bekken op vrij verval af met ZSS, waardoor al bij een ZSS van

20 – 30 cm er behoefte zal zijn aan pompen om het peil op het Laag Bekken voldoende laag te kunnen houden [14]. (In de ombouw van de sluizen naar IZZS is ook rekening gehouden met het kunnen plaatsen van deze pompen.) De schutdebieten van de duwvaartsluizen zijn geschat op basis van het aantal schutcycli (25000 schuttingen per jaar voor twee kolken, zie [7]), de kolkafmetingen van een lengte van 285 m tussen de deuren en een natte breedte van circa 26 m (tot achter de wandroosters, zie [8]), en het waterstandsverschil over de sluis (~ZSS). De waarden van het spoeldebiet en het schutdebiet zijn weergegeven in Tabel 5.1. Hun som geeft het daggemiddelde afvoerdebiet vanuit het Laag Bekken. NB. Het daar genoemde totaal is dus een daggemiddelde waarde (bij continu pompen) en is exclusief een extra capaciteit die nodig is voor het opvangen van onderhoud en storingsen².

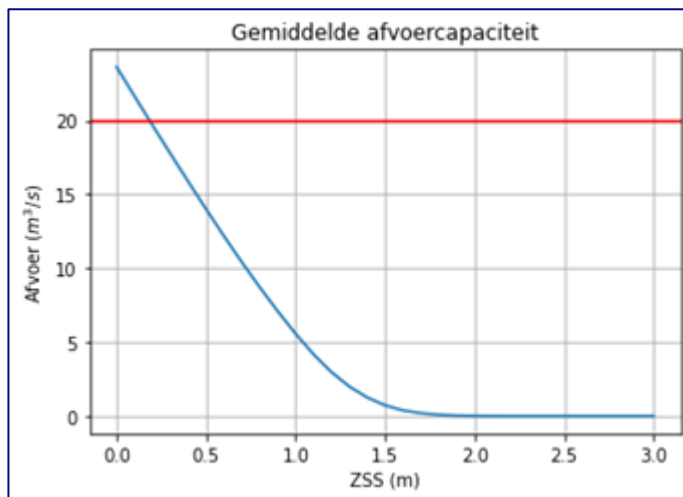
- Voor de jachtensluizen kan de huidige operatie, die 1 m³/s vergt, voortgezet worden bij ZSS. Dan zal ook, net als nu gebeurt rond hoogwater op de Oosterschelde, de schutschijf teruggepompt moeten kunnen worden. De benodigde pompcapaciteit is afhankelijk van de toelaatbare schutduur, en daarom laten we deze nu buiten beschouwing.
- De afvoercapaciteit van het SPVM loopt snel terug bij ZSS, zie Figuur 5.1. Vanaf 0,2 m ZSS wordt een spuidebiet van 20 m³/s niet meer gehaald en vanaf 1,8 m ZSS is er geen spui meer mogelijk. Ook hier zal de afvoercapaciteit moeten worden uitgebreid, aanvankelijk misschien door vergroten van de spuicapaciteit, en later door het aanleggen van eenemaal. Het aangehouden is debiet 20 m³/s.³
- Bij de Bathse Spuisluis zijn pompen nodig vanaf 1,5 m ZSS en vanaf 2,7 m ZSS is er geen spui meer mogelijk, zie Figuur 5.2, overgenomen uit [16] en ook aangehaald in [3]. De benodigde afvoercapaciteit voor peilbeheer onder extreem natte condities bij verschillende niveaus van ZSS zou uit [4] moeten volgen. Voor de extreem natte scenario's waarbij er geen spoel-, spui en pompdebieten worden gebruikt bij de Krammersluizen geeft [4] bij 5 m ZSS een waarde van ~170 m³/s. Daarbij wordt echter geen rekening gehouden met afvoer via de Krammersluizen. Als bij de Krammersluizen de afvoercapaciteit op peil wordt gehouden voor het beperken van de zoutindringing, zal daar (in de huidige presentatie van Figuur 5.1) 9 m³/s worden onttrokken voor het spoeldebiet via de sluiskolken en 20 m³/s via het SPVM. Deze 29 m³/s hoeft dan niet bij Bath te worden gerealiseerd en kan dan worden afgetrokken van de 170 m³/s zoals genoemd in [4].

² In de renovatie van de Krammersluizen worden twee van de bestaande vier riolen tussen het Laag Bekken en het Hoog Bekken, met een aftakking naar Slaak, geschikt gemaakt voor een afvoer onder vrij verval richting Slaak. De andere twee riolen blijven zoals ze zijn: daarin staan nu nog pompen die debiet kunnen leveren tegen het verval in (van het Laag Bekken naar het Hoog Bekken en via de aftakking ook naar Slaak).

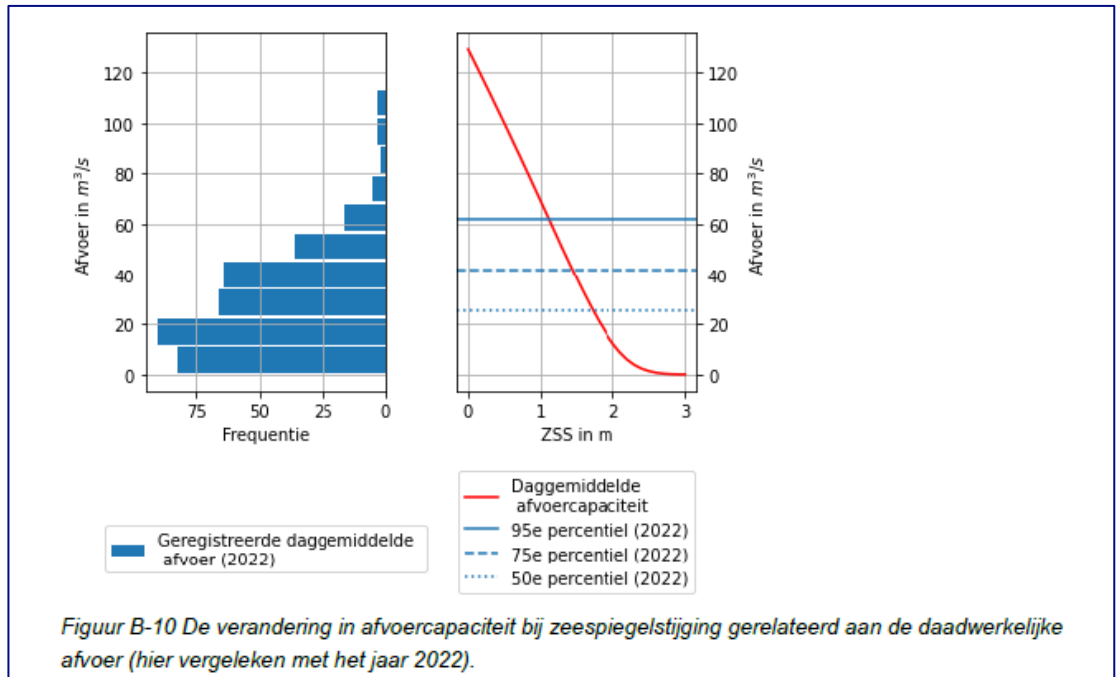
³ Een meer gedetailleerde behandeling hiervan is te vinden in [15] dat voortbouwt op [14]. Daar wordt een ZSS van 0,5 m gevonden als waarde waarbij de afvoercapaciteit van het VZM tekort gaat schieten. Het verschil met de in Figuur 5-1 gepresteerde waarde heeft te maken met het in de Planstudie 'geconstrueerde' jaar (gebaseerd op 2003) met een relatief droge winter, waardoor er minder water af te voeren was, waardoor de beperking door ZSS pas bij hogere waarden van ZSS merkbaar wordt.

Tabel 5.1 Benodigde daggemiddelde afvoer (m^3/s) buiten het groeiseizoen voor de Krammersluizen, de Bathse Spuisluis/Gemaal en het Antwerps Kanaalpand (AKP) bij diverse niveaus van ZSS.

ZSS (m)	Krammersluizen					Bathse Spuisluis / Gemaal	Gemaal AKP
	Spoel-debiet (1)	Schut-debiet (+IZZS) (2)	Laag Bekken (1)+(2)	Jachten-sluizen	SPVM		
huidig	9	0	9	1	20	[4]	2 – 4
1	9	2.9	11.9	pm	20, deels pompen af 0,2 m ZSS	[4]	2 – 4 tot KP 1,9m NAP
2	9	5.9	14.9	pm	20, geheel pompen af 1,8 m ZSS	[4] deels pompen af 1,5 m ZSS	Ntb
3	9	8.8	17.8	pm	20	[4] geheel pompen af 2,7 m ZSS	Ntb
4	9	11.7	20.7	pm	20	[4]	Ntb
5	9	14.7	23.7	pm	20	~170 [4] -/- 29 m^3/s	Ntb



Figuur 5.1 Daggemiddelde afvoercapaciteit Spui- en Vismigratiemiddel, te bouwen als onderdeel van de renovatie en ombouw van de Krammersluizen, afname met zeespiegelstijging, figuur overgenomen uit paragraaf H.3.2 in [3].



Figuur 5.2 Daggemiddelde afvoercapaciteit Bathse Spuisluizen, links: aantal dagen met geregistreeerde daggemiddelde afvoer in 2022, rechts: afname afvoercapaciteit met zeespiegelstijging en percentielwaarden 2022; figuur overgenomen uit [4].

6 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

6.1 Algemeen

In deze studie is een verkenning gedaan naar de invloed van zeespiegelstijging op de zoutindringing door de schut- en spuisluizen c.q. op het zoutgehalte van achterliggende zoete watersystemen. Daarnaast is gekeken naar de effectiviteit van maatregelen die daartoe zouden kunnen worden ingezet. Deze studie focust op drie watersystemen: het IJsselmeer, het Noordzeekanaal – Amsterdam-Rijnkanaal en het Volkerak-Zoommeer. Omdat de watersystemen zo verschillend zijn, was een rekenkundige benadering nodig per watersysteem. Hiertoe zijn bakjesmodellen ingezet. Deze zijn door-ontwikkeld op basis van eerdere ad-hoc modellen gemaakt voor eerdere studies. Ondanks de beperkingen blijken dit soort modellen van grote waarde voor de verkenning van toekomstige ontwikkelingen en maatregelen.

Het globale beeld is dat er met maatregelen veel gedaan kan worden om de toename van de zoutindringing die het gevolg is van zeespiegelstijging te mitigeren. Echter, dit is moeilijker voor het IJsselmeer, waar de lekkage door de spuisluizen zal toenemen totdat deze geheel gesloten zullen worden omdat, door de zeespiegelstijging, de spuisluizen hun functie verliezen. Dit speelt op de relatief korte termijn: bij 0,5 m zeespiegelstijging zullen er al maatregelen nodig zijn bij Kornwerderzand en bij Den Oever kan er dan al haast niet meer gespuid worden. Dus zolang de spuisluizen nog niet volledig zijn vervangen door pompen, levert de lek door deze spuisluizen een steeds zwaardere zoutbelasting op het systeem.

Hieronder worden de drie watersystemen in meer detail besproken.

6.2 IJsselmeergebied

Voor de zoutindringing door de spui- en schutsluizen in de Afsluitdijk zijn verkenningen gedaan: apart voor de beide locaties en apart voor de schutsluizen en de spuisluizen. Interacties tussen de schut- en spuisluizen op dezelfde locatie zijn binnen deze studie niet beschouwd.

Spuisluizen

1. Er is een prototype gebouwd van een 'twee-laagsbakje' voor het beschrijven van het effect van de erosiekuilen: op basis van kalibratie gaat slechts een kwart van het zoute lekwater naar de erosiekuil; dit leidt ertoe dat er slechts beperkt voordeel te behalen is met pompen i.p.v. spuien.
2. Er zijn pompen toegevoegd om het verlies aan spuicapaciteit bij ZSS op te vangen; dit geeft ook extra lekkage, maar direct naar erosiekuil, waarvandaan het ook weer goed kan worden weggepompt.
3. De zoutflux neemt flink toe met ZSS, totdat de spuisluizen worden dichtgemaakt omdat er toch niet meer gespuid kan worden; als dat punt eenmaal is bereikt is er eigenlijk geen zoutlek meer en is er ook geen afvoer meer nodig. Dit moment wordt in Den Oever eerder bereikt dan bij Kornwerderzand omdat de getijamplitude daar kleiner is: laagwater bij Den Oever is minder laag dan bij Kornwerderzand.
4. Bij wijze van tussenstap (tussen nu en het moment dat de spuisluizen geheel worden afgesloten) zou onderzocht kunnen worden of het technisch mogelijk is om het lekoppervlak (bijvoorbeeld) te halveren. Zoiets als dit is noodzakelijk om de zoutindringing te beheersen.

Schutsluizen

5. De zoutflux door de schutsluizen lijkt vrij eenvoudig te beperken door een spoeldebiet door de voorhavens. Daarbij wordt opgemerkt dat de resultaten van de huidige berekeningen wat optimistisch kunnen zijn. Met alleen een spoeldebiet langs de kolk is, volgens de huidige berekeningen, de zoutflux op het huidige niveau te stabiliseren tot een ZSS van circa 3 m, met slechts een zeer beperkte netto-onttrekking vanuit het IJsselmeer.
6. Met een spoeldebiet door de kolk en/of met bellenschermen op beide sluishoofden is een verder reductie mogelijk, zodat de zoutflux tot 5 m ZSS onder het huidige niveau blijft, nog steeds met een zeer beperkte netto-onttrekking vanuit het IJsselmeer.
7. Ook zou een verdere verhoging van het spoeldebiet overwogen kunnen worden (nog niet berekend).

Combinatie van schut- en spuisluizen

8. Op de kortere termijn lijkt het makkelijker om de zoutflux door de schutsluizen te reduceren (met een beperkt debiet) dan de zoutflux door de spuisluizen; dit zou een bijdrage kunnen leveren aan het beperkt houden van de totale zoutindringing over de Afsluitdijk tot het moment dat de spuisluizen geheel kunnen worden afgesloten.
9. Als (vanaf circa 1 m ZSS) de spuisluizen geheel zijn afgesloten, dan is nog maar een beperkte netto afvoer vanaf het IJsselmeer nodig om de zoutindringing tot zeer lage waarden terug te brengen.

Over de gebruikte bakjesmodellen:

10. De resultaten bereikt met de nu gebruikte bakjesmodellen behoeven verdere verfijning, met name waar het gaat over de spuisluizen en de bijdrage van de erosiekuil. Er zijn tot nu toe echter onvoldoende complete sets aan kalibratiegegevens voorhanden (zoutprofielen aan zowel de zoete als de zoute zijde, vastlegging van de schutoperatie (deur-bewegingen), spui-operatie etc.).
11. Ondanks de tekortkomingen aan de gebruikte rekenmodellen laten de resultaten zien dat het bouwen van een ZoutTransportModel (ZTM), nu nog op basis van ad-hoc modellen uit eerdere projecten, van grote waarde is voor de verkenning van toekomstige ontwikkelingen en maatregelen.

6.3 Noordzeekanaal – Amsterdam-Rijnkanaal

De verkennende berekeningen laten het volgende zien wat betreft de invloed van ZSS en de effectiviteit van de beschouwde maatregelen.

12. Door ZSS komt er steeds meer water naar binnen als gevolg van de schutoperatie; dit moet worden afgevoerd door het spui- en maalcomplex bij IJmuiden om de netto afvoer over het kanaal in stand te houden. (Dit vraagt dus geen extra water vanuit het Hoofdwatersysteem).
13. Een beperkte aanvulling van het aangevoerde debiet over het ARK zou voldoende kunnen zijn om het zoutgehalte nabij Diemen te beheersen: circa 3 m³/s per meter ZSS;
14. De aanleg van een grotere en diepere zoutvang lijkt voldoende t/m 5 m ZSS; dit vraagt wel om een nadere onderbouwing door verdere ontwikkeling en validatie van het gebruikte bakjesmodel in combinatie met 3D-sommen;

15. De aanleg van een zoutvang zou ook nu al tot een reductie van de doorspoelvraag kunnen leiden, maar waarschijnlijk slechts enkele m³/s. Dit omdat met minder bovenafvoer het zout sterker het bovenstroomse gebied kan indringen.
16. De capaciteit van het spui- en maalcomplex zal vooral bepaald worden door weersafhankelijke extreme afvoersituaties (klimaatverandering) in combinatie met ZSS, en niet door het extra schutdebiet van maximaal 45 m³/s bij 5 m ZSS. Voor de kosten voor energie en onderhoud van het gemaal speelt het moeten afvoeren van extra schutdebiet wel een rol.

Wat het model vooral duidelijk maakt is dat het effect van zeespiegelstijging en maatregelen vooral voelbaar is nabij de sluizen en op het Noordzeekanaal en veel minder in de monding van het ARK, zolang de afvoer maar op niveau blijft. In vergelijking met [2] is de meerwaarde van de huidige studie dat de conclusies over mogelijke maatregelen bij ZSS zijn onderbouwd door middel van een bakjesmodel dat de invloed op de zoutgehaltes bij de mond van het ARK weergeeft, gegeven de randvoorwaarden bij IJmuiden-buiten (onder andere constant zoutgehalte), de operatie van de sluizen, een inschatting van de werking van de SO-IJ en de feedback tussen de zoutvracht naar binnen en het zoutgehalte aan de binnenkant van de sluizen (in de Velserskom).

6.4 Volkerak-Zoommeer

Voor het Volkerak-Zoommeer is geen rekenkundige verkenning gedaan. In het verlengde van hetgeen is uitgewerkt ten behoeve van de Delta-scenario's [3] wordt het volgende geconcludeerd:

17. Als het systeem, na de ombouw naar de nieuwe manier van zout-zoetscheiding (de Innovatieve Zout-Zoet Scheiding, IZZS) op de Krammersluizen qua doorspoeling blijft werken bij zeespiegelstijging zou de zoutindringing geen probleem hoeven zijn. Als we aannemen dat de zoutvracht vanuit de schutsluizen (ongeveer) gelijk blijft, is het oprekken van het waterbeheer vooral een kwestie van voldoende afvoercapaciteit in de vorm van spuien of pompen beschikbaar houden op 3 locaties: bij de Krammersluizen (Laag Bekken, jachtensluizen en het Spui- en Vismigratiemiddel (SPVM)), de Bathse Spuisluis en het gemaal voor het AKP bij de Kreekraksluizen. Spuisluizen zullen daarbij op den duur door pompen moeten worden vervangen.

7 Referenties

- [1] “Systeemanalyses zoetwater, regio IJsselmeer – Markermeer”, Kennisprogramma Zeespiegelstijging, januari 2023, Arcadis / Hydrologic
- [2] “Systeemanalyses zoetwater, regio Amsterdam-Rijnkanaal - Noordzeekanaal, Kennisprogramma Zeespiegelstijging, januari 2023, Arcadis / Hydrologic
- [3] “Vertaling van de Deltascenario's 2024 naar invoer voor het Nationaal Water Model”, Deltares, 11209219-018-ZKS-0001, 19 april 2024
- [4] “Systeemanalyses zoetwater, regio Volkerak-Zoommeer, Kennisprogramma Zeespiegelstijging, januari 2023, Arcadis / Hydrologic
- [5] “Klimaatrobustheid van het waterbeheer van het Volkerak-Zoommeer”, Arno Nolte, Marc Weeber, David Geurts, Sonja Pans, Diederik Vreeken, Otto Weiler, 11203741-001, Deltares, juli 2020
- [6] “Verkeer- en vervoersprognoses binnenvaart Scheldegebied”, ECORYS Nederland BV, Resource Analysis, februari 2009
- [7] “SIVAK-simulatie IZZS Krammersluizen”, TBA, mei 2014
- [8] “Ontwerpnota Compartimenteringswerken, Deelnota 6: Krammersluizen”, Nota Z.BC. 87-20.001, Rijkswaterstaat Directie Zeeland, augustus 1989
- [9] “3D modelonderzoek verdieping vaargeul naar Kornwerderzand” Bijlsma, A.C., V. Chavarrias & M. Genseberger, 11208075-002-ZWS-0001, Deltares, 8 november 2022
- [10] “3D modelonderzoek verzilting IJsselmeer bij verruiming sluiscomplex Kornwerderzand en vaargeulverdieping - Vervolgscenario's met ambitieuze maatregelen tegen verzilting” Arnout Bijlsma Wilbert Verbruggen, 11210363-003-ZKS-0002, Deltares, 12 november 2024
- [11] “Ontwikkeling zesde-generatie 3D IJsselmeer model - Modelbouw, validatie” Wilbert Verbruggen, Maria Georgiou, Noor ten Harmsen van der Beek, Arnout Bijlsma, 11210333-007-ZWS-0002, Deltares, 19 december 2024
- [12] “KornwerderZout Fase 1 - Verkenning maatregelen tegen zoutindringing, 2023”, Otto Weiler, 11209260-011, Deltares, 26 juli 2024
- [13] “Variantenstudie Zoet-Zout Den Oever - Operationalisering Zoutmodel (IB-11.2)”, Gradussen, S.J.H.A. & A.L. de Jongste, Witteveen + Bos, rapport 133547-2.8/23-015.036, 21 september 2023
- [14] “Renovatie en ombouw Krammersluizen: de invloed van zeespiegelstijging op de zoutindringing en de operatie”, Otto Weiler, Diederik Vreeken, 11204995-006-HYE-0001, Deltares, oktober 2020
- [15] “Advies omtrent contractstukken renovatie Krammersluizen, Aanvullende analyse nautische aspecten en spoeldebieten”, Arne van der Hout, Otto Weiler, 11204995-005-HYE-0003, Deltares, december 2020
- [16] “Functionele prestatie (algemeen, zout en biodiversiteit), Iteratieve werkwijze Stap 4 – Bepalen van functionele prestatie”, Noor ten Harmsen van der Beek e.a., 11207401-009-HYE-0005, Deltares, november 2024
- [17] “Zoutlast IJmuiden bij testen en ingebruikstelling nieuwe zeesluis”, Otto Weiler, Arnout Bijlsma, 11206830-020, Deltares, november 2022

- [18] “Beleidsaanbevelingen voor het langetermijn peilbeheer in het IJsselmeergebied, Eindrapport Integrale Studie Waterveiligheid en Peilbeheer IJsselmeergebied”, Rijkswaterstaat, juni 2019
- [19] “Selectieve Onttrekking IJmuiden, Fase 1 - Studie naar hydraulische eisen en verificatie”; Arnout Bijlsma, Otto Weiler, 11200215-000, Deltares, september 2017
- [20] “Zoutindringing IJmuiden, Fase 3: Verdere uitwerking mogelijke bronmaatregelen, Eindrapport”, Arnout Bijlsma, Otto Weiler, 1220309-000, Deltares, oktober 2016
- [21] “Berekening zoutindringing IJmuiden met WANDA-Locks”, Matthijs Rietveld, 1220309, Deltares, oktober 2016, Opgenomen in [20] als Bijlage K
- [22] “ZSF documentation: <https://libzsf.readthedocs.io/en/latest/index.html>”, Tjerk Vreeken, Otto Weiler, Deltares, 2020
- [23] “The Practical Salinity Scale 1978 and the International Equation of State of Seawater 1980”, Alain Poisson, Mohamed Gadhoumi, Laboratoire de Physique et Chimie Marines, August 1993
- [24] “Validatie spuisluisformulering Haringvliet metingen”, Nino Zuiderwijk, Tom O’Mahoney, Deltares, december 2024
- [25] “Stratified flow through outlets”, Jiahua Fan, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, April 2008
- [26] “Shear driven purging of negatively buoyant fluid from trapezoidal depressions and cavities”, Michael Kirkpatrick, Nicholas Williamson, Steven Armfield, School of Aerospace, University of Sydney, December 2011
- [27] “Numerical modelling of selective withdrawal for the mitigation of salt intrusion”, Sam Maijvis, Eindhoven University of Technology, Deltares, July 2022

A Aanvraagspecificatie RWS

De tekst hieronder is de aanvraag van RWS aan Deltares zoals toegezonden per e-mail op 6 september 2023 en besproken op 3 oktober 2023.

Zeesluizen en zoetwater: Zoutintrusie en mitigerende maatregelen

KPZSS - Zoetwater

Achtergrond

In fase 1 van het KPZSS is gebleken dat zoutindringing bij zeesluizen één van de meest belangrijke bronnen is van zoutintrusie op het achterliggende zoetwatersysteem, ook in relatie tot effecten van stijgende zeespiegel. De afgelopen jaren is dit ook in toenemende mate in beeld gekomen buiten het KPZSS, onder andere door verzilting tijdens lage rivierafvoeren, ingebruikname van de nieuwe Zeesluis IJmuiden, de renovatie van de Krammersluizen en door plannen voor het vergroten van de Lorentzsluizen bij Kornwerderzand.

Verder is uit de analyses binnen spoor 2 gebleken dat het effect van zeespiegelstijging op de zoutintrusie bij zeesluizen afhankelijk is van veel factoren en het lastig is om in te schatten welke maatregelen effect hebben op de reductie van de zoutvracht en hoeveel zoetwater hiervoor nodig. Ook in het ontwerpend onderzoek binnen spoor 4 is gebleken dat (de gevolgen van) zoutintrusie bij een mogelijk gesloten strategie nog onvoldoende in beeld zijn.

Daarom is er behoefte aan een inventariserend onderzoek dat een overzicht biedt van de maatregelen tegen zoutintrusie bij zeesluizen.

Doel

Het overkoepelend doel is inzicht en bewustwording over zoutintrusie bij zeesluizen te vergroten, en welke maatregelen genomen kunnen worden.

- Beschrijving en kwantificering (middels zeesluisformulering) wat de belangrijkste factoren zijn die de zoutvracht bepalen bij een (bepaald type) zeesluis. Waarbij het effect van hogere zeespiegels op de zoutvracht ook in de beschrijving moet worden opgenomen.
- Overzicht van maatregelen, zowel preventief (zout komt niet binnen via sluiscomplex (bijvoorbeeld een bellenscherm in de kolk) of in het zoetwatersysteem (bijvoorbeeld een zoutvang) als mitigerend (zout versneld afvoeren uit het zoetwatersysteem, bijvoorbeeld een selectieve onttrekking).
- Uitwerking van effectiviteit (waar mogelijk kwantitatief) van maatregelen, waarbij per maatregel aandacht voor:
 - reductie zoutvracht;
 - verandering zoetwatervraag;
 - invloed van zeespiegelstijging op bovenstaande punten;
 - overige neveneffecten (bijvoorbeeld invloed op scheepvaart, ecologie, kosten etc).
- Het rapport moet bestaande kennis (literatuur op basis van modelberekeningen en metingen) ondersteund met resultaten van te draaienmodellen (zeesluisformulering en modules voor neveneffecten) combineren zodat deze breder wordt toegepast in projecten van marktpartijen in opdracht van RWS.

Omdat deze vraag speelt in meerdere gebieden, moet de uitwerking zo veel mogelijk generiek zijn. Er kunnen wel voorbeelden worden gebruikt uit bepaalde regio's. De

inventarisatie zal voortbouwen op recent uitgevoerd onderzoek bijvoorbeeld bij de Lorenzsluizen zodat ervaringen breder toepasbaar worden in andere gebieden.

Gebruikersgroep

- Primair zal het onderzoek c.q. overzicht gebruikt worden bij het beoordelen van de houdbaarheid van de zoetwatervoorkeursstrategie in het KPZSS. Gebruikers zijn RWS (deelnemers technisch team zoetwater) en mogelijk adviesbureaus die in opdracht van RWS analyses uitvoeren.
- Regionale overheden / RWS-diensten die aan de lat staan voor het DP-herijking en opzetten van maatregelpakketten.
- RWS-ers en adviesbureaus bij toekomstige projecten waar sluizen en zoetwater een rol in spelen (zowel vanuit zoetwater als scheepvaart).

Uitvoering

Vanwege specifieke kennis aanwezig bij een beperkt aantal experts bij Deltares (verkregen bij ontwikkeling van de zeesluisformulering) wordt dit onderzoek door Deltares uitgevoerd.

B Reactie Deltares op aanvraag RWS

In reactie op de aanvraag heeft Deltares een voorstel ingediend voor de ontwikkeling van het ZoutTransportModel en de toepassing ervan ten behoeve van het KP-ZSS.

C Korte omschrijving ZoutTransportModel inclusief gelaagd bakje

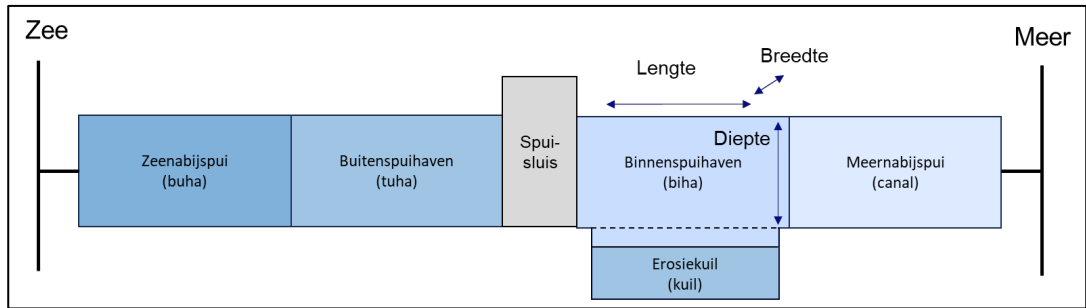
Binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging (KP-ZSS) wordt verkennend onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheden voor het oprekken van het zoetwaterbeheer in Nederland onder de invloed van zeespiegelstijging. Het model dat in dit hoofdstuk wordt gepresenteerd is genaamd het ZoutTransportModel (ZTM) waaraan een gelaagd bakje is toegevoegd. Dit model is ontwikkeld om randvoorwaarden te genereren voor het bakjesmodel van het IJsselmeergebied van Arcadis/Hydrologic (A/H) voor verschillende waarden van zeespiegelstijging en verschillende maatregelen op de spuisluizen. De randvoorwaarden van het bakjesmodel zijn de daggemiddelde zoutflux en afvoer van de meer- naar zeezijde door de aanwezige spuisluizen.

Ten eerste wordt achtergrondinformatie gegeven over de spuisluizen bij DO en KWZ en wordt het model geïntroduceerd. Ten tweede wordt behandeld hoe de complexe vormen van de aanwezig erosiekuilen bij DO en KWZ zijn geschematiseerd in het model. Ten derde wordt toegelicht hoe het zouttransport door advectieve processen (lekkage, spuien en pompen) wordt berekend in het gebied rondom de spuisluizen. Aanvullend wordt toegelicht hoe het transport wordt beïnvloed door de dynamica van de gelaagdheid in de erosiekuilen. Als laatste wordt besproken hoe zout wordt getransporteerd in de gebieden rondom de spuisluizen. Deze dienen als randvoorwaarde voor het transport door de spuisluizen. Veelvuldig wordt de definitie 'saliniteit' in dit hoofdstuk gebruikt. Ondanks dat de eenheid van saliniteit dimensieloos is (ofwel in PSU), wordt in dit hoofdstuk saliniteit gebruikt als de massa zout per volume water in kg/m^3 .

C.1 Algemeen

Voor deze verkenning is een eerder ontwikkelde python code, genaamd 'zouttransportmodel' (ZTM), als basis gebruikt en verder ontwikkeld. De eerdere versie van het ZTM bevatte verschillende bakjes, elk met een volume (lengte, breedte en diepte) en saliniteit. De bakjes aan zee- en meerzijde zijn gescheiden door de aanwezigheid van een spuisluis. Uitwisseling door de spuisluis worden berekend met de spuisluisformulering (SSF) [24]. Uitwisseling tussen aangrenzende bakjes (niet gescheiden door de spuisluis) en de rand worden kort toegelicht in hoofdstuk C.4. Het model rekent met dieptegemiddelde saliniteit waardoor het effect van stratificatie in een bakje niet meegenomen wordt.

Gezien de aanwezigheid van de erosiekuilen bij de spuisluizen van DO en KWZ vraagt dit om een aanpassing van het model. Namelijk, de erosiekuilen werken als zoutvang waardoor sterke stratificatie op kan treden. Zout water, dat via de spuisluizen naar de meerzijde stroomt (ofwel lekt), verzamelt in de erosiekuil. Hierdoor stroomt minder zout direct het meer in, tot de erosiekuil vol gelopen is en 'overstroomt'. Spuien of pompen zorgt ervoor dat de erosiekuil weer geleegd wordt. Om het effect hiervan te modelleren is een bakje toegevoegd aan het ZTM, genaamd erosiekuil. Via dit bakje kan de mate van stratificatie gemodelleerd worden als twee lagen met verschillende saliniteit gescheiden door een grenslaag met variërende hoogte. Figuur C.1 geeft een overzicht van het ZTM met gelaagd bakje.



Figuur C.1 ZTM met toevoeging erosiekuil

In het ZTM kunnen verschillende vooraf gekozen scenario-variabelen opgelegd worden via een invoerbestand in Excel, zie Figuur C.2. Elke rij bevat de variabelen van een nieuw scenario.

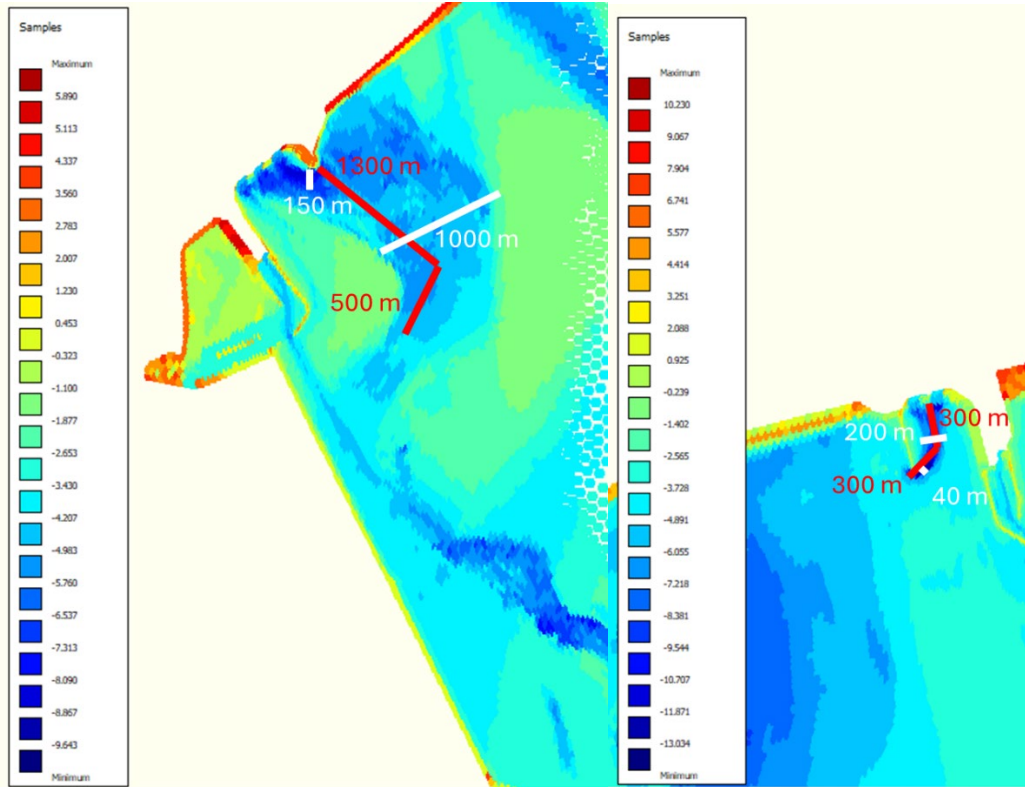
		INVOER								
		Zeesp.st.	meer wl	Lekkage spui	1x of 2x gesloten	Afvoer spuien		Lekkage pompen	1x of 2x gesloten	Afvoer pompen
scenario		ZSS	wl_meer	A_lek_s	n_sluit_s	kokers	1x per n LW	A_lek_p	n_sluit_p	Q_pomp
nr	naam	m	m	m2	-	-	-	m2	-	m3/s
nul-alternatief										
1		0,0	-0,3	1,74	2	15	14	0,29	1	0
2		0,0	-0,3	1,74	2	15	7	0,29	1	0

Figuur C.2 Voorbeeldoverzicht invoer bestand ZTM

Uitvoer van het model is een daggemiddeld zoetwater gebruik (afvoer in de richting van zee) en de netto zoutflux over de Meer-rand (in Figuur C.1 van Meernabijspui naar Meer).

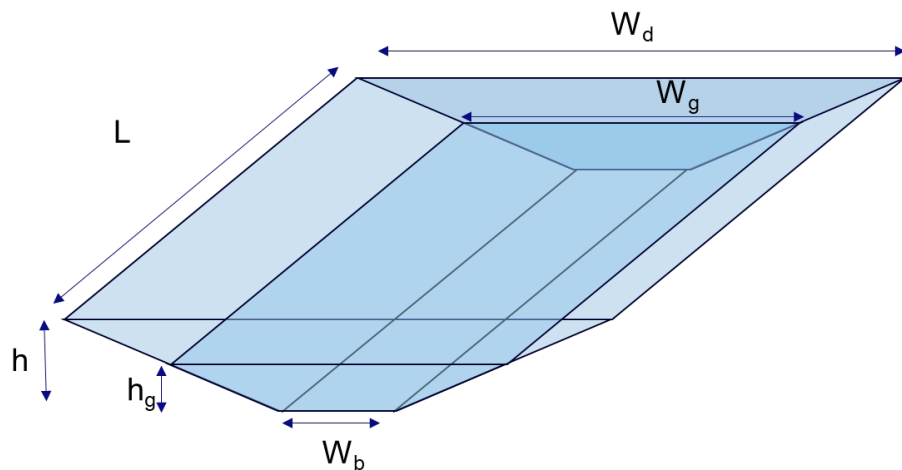
C.2 Schematisatie vorm erosiekuil nabij spuisluizen DO & KWZ

De hier beschouwde erosiekuilen bij DO en KWZ bevinden zich aan de meerzijde van de spuisluizen. De kuilen hebben een gehaakte vorm en zijn een verdieping ten opzichte van de omgeving, zie Figuur C.3. De breedte van de erosiekuilen is het grootste bovenin (ter hoogte van de zogenaamde drempel) en neemt af de diepte in. Grofweg hebben de erosiekuilen een lengte van 1800 m bij DO en 600 m bij KWZ. Daarnaast hebben de erosiekuilen een breedte van 1000 m op -2 m NAP voor DO en 200 m op -3 m NAP voor KWZ. De bodem van de kuilen ligt op -8 m NAP met een breedte van 150 m voor DO en -13 m NAP met een breedte van 40 m voor KWZ.



Figuur C.3 Diepteprofiel erosiekuilen aan de meerzijde bij DO (links) en bij KWZ (rechts)

Gezien de vorm van de erosiekuilen is gekozen voor een bakje geschematiseerd als een rechte trapezium, zie Figuur C.4. De verticale zijdes bevinden zich aan de aansluiting met omliggende bakjes (Figuur C.1 zicht op de schuine zijde van het trapezium vormige bakje genaamd Erosiekuil). De afmetingen van het bakje zijn gegeven door de breedte van de bodem (W_b), de breedte ter hoogte van de drempel (W_d), de lengte (L) en de hoogte (h) in meter. De vulling van de kuil wordt beschreven als de hoogte van de grenslaag (h_g) met minimale hoogte gelijk aan 0 ($h_{g,\min} = 0$ m) en maximale hoogte gelijk aan hoogte van de kuil ($h_{g,\max} = h$). De variabele grenslaaghoogte heeft een bijbehorende breedte (W_g). L is een vaste waarde en is niet afhankelijk van de grenslaaghoogte.



Figuur C.4 Trapezium vorm voor schematisatie erosiekuil

Het ZTM rekent met volumes. Voor het trapezium vormige bakje kan met de volgende formule het volume berekend worden:

$$V = \frac{1}{2} * (a + b) * l * h$$

Bij gedeeltelijke vulling van het bakje, zoals weergegeven in Figuur C.4, kan op basis van het volume van de zoutlaag (V_c) ook de terugvertaling naar grenslaaghoogte gemaakt worden als volgt:

$$V_c = \frac{1}{2} * (a + c) * l * h_c$$

$$h_c = \frac{2V}{(a+c)*l}, \text{ where } c = a + \frac{b-a}{h} * h_c$$

$$h_c = \frac{2V}{\left(a + \left(a + \frac{b-a}{h} * h_c\right)\right) * l}$$

$$h_c * \left(2a + \left(\frac{b-a}{h}\right) * h_c\right) = \frac{2V}{l}$$

$$h_c^2 + \frac{2ah}{b-a} * h_c - \frac{2V}{l} = 0$$

C.3 Schematisatie van zouttransport bij lekkage, spuien en pompen

Bij de spuisluisen van DO en KWZ zorgen diverse advectieve processen voor de uitwisseling van zout. Via spuien tijdens laagwater wordt eventueel aanwezig zout van de meerzijde geloosd terwijl lekkage zorgt voor een instroom van zout water ten tijde van hoogwater op zee. De spuikokers van de spuisluisen bij DO en KWZ kunnen dubbel worden gesloten waarmee het verval over de spuikokers wordt gehalveerd om lekkage te beperken. Aanvullend kunnen pompen worden ingezet om water af te voeren tijdens hoogwater. Afhankelijk van de vulgraad in de erosiekuil (ofwel hoogte van de grenslaag) leidt dit tot uitwisseling van zout van en naar de omgeving. Dit hoofdstuk beschrijft hoe deze processen geschematiseerd zijn in het ZTM. Het zoete volume in de kuil (volume boven de grenslaag) is onderdeel van het bakje genaamd binnenspuihaven. Hierdoor is het volume van dit bakje variabel met de vulgraad in de kuil.

De schematisatie van de 3 processen (lekken, spuien en pompen) worden apart behandeld aan de hand van de conditie/vulgraad van de erosiekuil. 2 condities zijn hierin te onderscheiden per tijdstap (verandering grenslaaghoogte aangeduid als dh_g) in het model:

(1) gedeeltelijk gevuld na de tijdstap:

$$0 < (h_g + dh_g) < h_{g,max}$$

(2) volledig gevuld of volledig leeg na de tijdstap:

$$(h_g + dh_g) = 0 \quad \text{OF} \quad h_g + dh_g = h_{g,max}$$

In de volgende sub-paragrafen worden de processen beschreven aan de hand van formules. De richting van de meerzijde naar zeezijde wordt beschouwd als positief. Debiet afkomstig van lekken ($Q_{lek} < 0$) is daarmee negatief en het spuidebiet positief ($Q_{spui} > 0$). Aanvullend wordt in de formules verwezen naar de bakjes met de naam gegeven in Figuur C.1 tussenhaakjes.

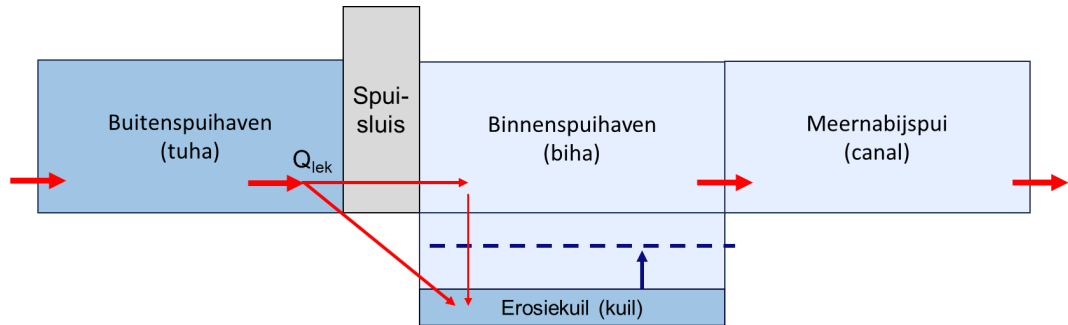
C.3.1 Lekkage

In het model vindt alleen lekkage plaats van zee naar meer. In de praktijk lekt water ook van het meer naar zee tijdens laagwater, maar dit is niet verder meegenomen in het model. Om

die reden omvat de lekkage beschrijving in deze paragraaf alleen lekkage van de zee- naar meerzijde. De beschrijving van de uitwisseling door lekkage wordt eerst gegeven voor conditie 1 en vervolgens voor conditie 2.

C.3.1.1. Conditie 1

Conditie 1 bevat het proces waarin de kuil door een instromend lekdebiet gedeeltelijk gevuld wordt, zie Figuur C.5.



Figuur C.5 Schematisatie lekdebiet bij erosiekuil conditie 1 (uitwisseling volume en zout weergegeven met rode pijlen en de verandering van het volume van de erosiekuil is weergegeven met een donker blauwe pijl)

Het lekdebiet (Q_{lek}) wordt berekend door de spuilsuisformulering (SSF) met de waterstanden aan de zee- en meerzijdes en de karakteristieken van de spuilsuizen. Op basis hiervan wordt per tijdstap berekend wat het lekvolume is evenals de massa van het naar binnen gelekte zout. Dubbele sluiting van de spuiokers zorgt voor een verlaging van dit lek debiet met een factor van wortel(2):

$$dV_{lek} = -Q_{lek} * dt$$

$$dM_{lek} = dV_{lek} * S_{tuha}$$

Een fractie van het lekdebiet stroomt naar de erosiekuil (φ_{lek}) waardoor het volume van de zoutlaag toeneemt en de grenslaag stijgt. Overig debiet stroomt de binnenhaven in en mengt ($1 - \varphi_{lek}$) met het water in de binnenhaven:

$$dV_{lek\ to\ kuil} = dV_{lek} * \varphi_{lek}$$

$$dM_{lek\ to\ kuil} = dM_{lek} * \varphi_{lek}$$

$$dV_{lek\ to\ biha} = dV_{lek} * (1 - \varphi_{lek})$$

$$dM_{lek\ to\ biha} = dM_{lek} * (1 - \varphi_{lek})$$

Aanvullend wordt het lek debiet naar de kuil gemengd op het debiet dat naar de erosiekuil stroomt. Dit extra debiet simuleert het mengproces van het water dat lekt naar de erosiekuil met water uit de binnenhaven. De menging is maximaal als de kuil leeg is gezien de grotere afstand tot de grenslaag dan als de kuil vol zit. Naarmate de erosiekuil vult, neemt de menging lineair af tot de erosiekuil vol is en er geen menging optreedt (zie Paragraaf C.3.1.2). De menging wordt vermenigvuldigd met een meng coëfficiënt (E_{meng}), zie Tabel D.1.

$$dV_{meng\ to\ kuil} = dV_{lek\ to\ kuil} * ((h_{g,max} - h_g) / (h_{g,max})) * E_{meng}$$

De vergelijkingen voor de massa- en volumeverandering van de erosiekuil voor lekconditie 1 zijn als volgt:

Erosiekuil (Kuil)

$$dV_{kuil} = dV_{lek\ to\ kuil} + dV_{meng\ to\ kuil}$$

$$dM_{kuil} = dV_{lek\ to\ kuil} * S_{tuha} + dV_{meng\ to\ kuil} * S_{biha}$$

De massaverandering van het zout in de binnenspuihaven bestaat uit 3 termen: 1) de instroom van het zout via lekkage vanuit de buitenspuihaven, 2) de uitstroom van zout naar het bakje meernabijspui en 3) het zout wat vanuit de binnenspuihaven naar de erosiekuil stroomt doormiddel van menging:

Binnenspuihaven (Biha)

$$dV_{biha} = -dV_{kuil}$$

$$dM_{biha} = (V_{lek\ to\ biha} * S_{tuha}) - (V_{lek} * S_{biha}) - (dV_{meng,kuil} * S_{biha})$$

Vanwege een toename in volume van de zoutlaag in de erosiekuil neemt het volume van de zoetere binnenhaven (boven de erosiekuil) af. In combinatie met het debiet wat direct de binnenhaven instroomt zorgt dit voor een uitstroom vanuit de binnenspuihaven naar het meernabijspui-bakje, gelijk aan het totale lekvolume met de saliniteit van de binnenspuihaven. Een gelijk volume stroomt vervolgens van meernabijspui verder het meer op:

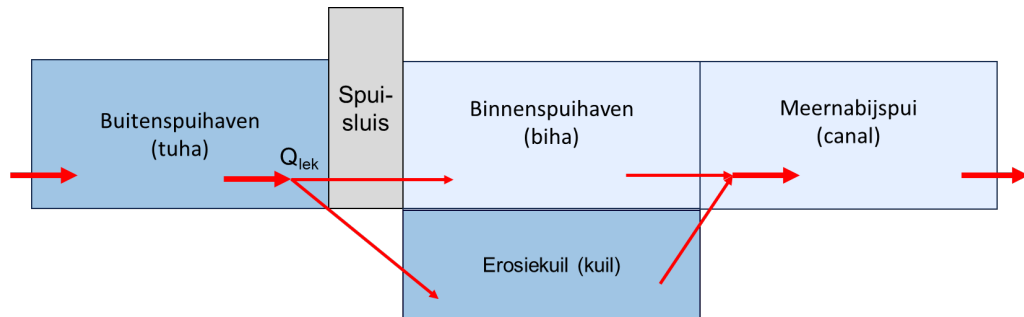
Meernabijspui (canal)

$$dV_{lek\ to\ canal} = dV_{lek}$$

$$dM_{lek,canal} = dV_{lek\ to\ canal} * S_{biha} - dV_{lek\ to\ canal} * S_{canal}$$

C.3.1.2. **Conditie 2**

Figuur C.6 is een schematisatie van de uitwisseling bij een instromend lekdebiet.



Figuur C.6 Schematisatie lekkage debiet bij erosiekuil condities 2 (uitwisseling van volumes en zout is weergegeven met rode pijlen)

Een lekdebiet stroomt door de spuisluizen van de zee- naar de meerzijde en verdeelt zich over de binnenspuihaven en erosiekuil (zie Paragraaf C.3.1.1 voor de berekening van het lekvolume per tijdstap (dV_{lek})). Als de erosiekuil vol zit (conditie 2) of volgelopen is na een tijdstap, dan 'loopt de erosiekuil over' en stroomt er een volume vanuit de erosiekuil verder het meer op. Dit volume is gelijk aan het volume dat lekt naar de erosiekuil minus het resterende volume boven de grenslaag (als de erosiekuil vol is (conditie 2) is het resterende volume 0). Aangenomen wordt dat er geen verdere menging plaats vindt van water dat lekt naar de erosiekuil ($dV_{meng,kuil} = 0$) aangezien de grenslaag ten hoogte van de drempel is, zie Paragraaf C.3.1.1. De volume- en massavergelijkingen zijn als volgt:

Erosiekuil (Kuil)

$$dV_{kuil} = V_{kuil,max} - V_{kuil,t}$$

$$dV_{kuil\ to\ canal} = dV_{lek,kuil} - dV_{kuil}$$

$$V_{kuil,t+1} = V_{kuil,t} + dV_{kuil} = V_{kuil,max}$$

$$dM_{kuil} = dV_{lek,kuil} * S_{tuha} + dV_{meng,kuil} * S_{biha} - dV_{kuil\ to\ canal} * S_{kuil}$$

Binnenspuihaven (Biha)

$$dV_{biha} = -dV_{kuil}$$

$$dM_{biha} = dV_{lek\ to\ biha} * S_{tuha} - dV_{lek} * S_{biha} - dV_{meng,kuil} * S_{biha}$$

Voor het bakje meernabijspui geldt dat het instromend volume voor een deel afkomstig is van de binnenspuihaven en een deel van de erosiekuil. Een volume gelijk aan de som van de volumes afkomstig uit beide bakjes (ookwel dV_{lek}) stroomt vanuit meernabijspui verder het meer op:

Meernabijspui (canal)

$$dM_{kuil\ to\ canal} = dV_{kuil\ to\ canal} * S_{kuil}$$

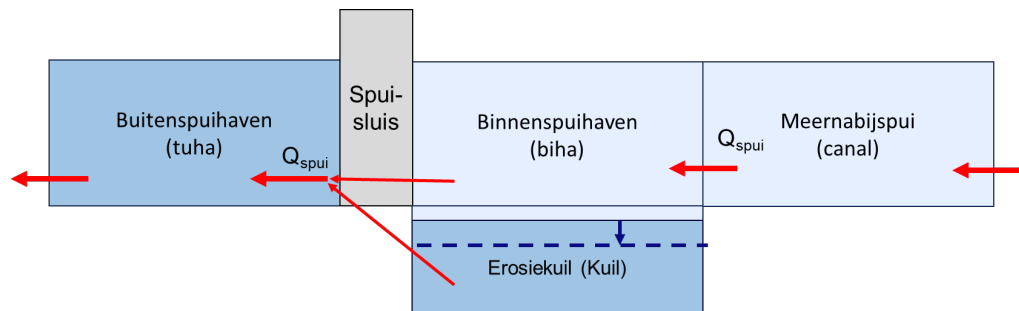
$$dM_{biha\ to\ canal} = (dV_{lek} - dV_{kuil\ to\ canal}) * S_{biha}$$

$$dM_{lek,canal} = dM_{kuil\ to\ canal} + dM_{biha\ to\ canal} - (V_{lek} * S_{canal})$$

C.3.2 Spuien

C.3.2.1. Conditie 1

De uitwisseling van volumes en zout tijdens het spuien bij conditie 1 is weergegeven in Figuur C.7.



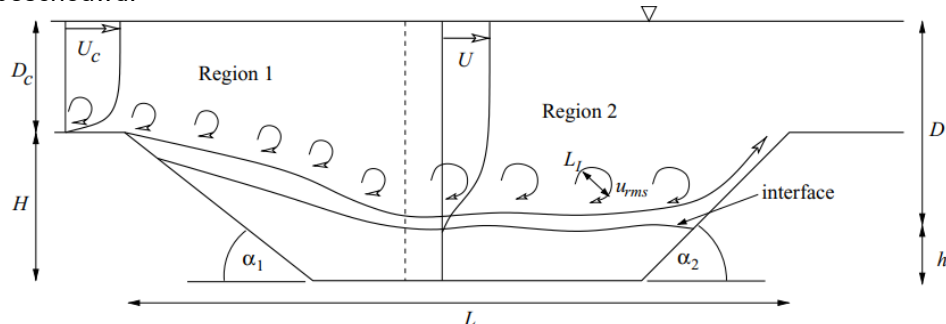
Figuur C.7 Schematisatie spuidebiet bij erosiekuil conditie 1 (uitwisseling volume en zout weergegeven met rode pijlen en de verandering van het volume van de erosiekuil is weergegeven met een donker blauwe pijl)

Het spuidebiet (Q_{spui}) wordt vergelijkbaar berekend als het lekdebiet, met de SSF [24]. Dit resulteert in de volgende vergelijkingen voor het berekenen van het volume en zout dat wordt afgevoerd door de spuisluis van de meer- naar zeezijde:

$$dV_{spui} = Q_{spui} * dt$$

$$dM_{spui} = dV_{spui} * S_{kanaal}$$

Tijdens het spuien ontstaat een stroming aan de meerzijde die een gedeelte van de zoutlaag in de erosiekuil oppakt en mee afvoert. Hierdoor leegt de erosiekuil en zakt de grenslaag. Dit geleegde volume wordt opgevuld met water uit de binnenspuihaven. Het spuidebiet is een samenstelling van water afkomstig uit de erosiekuil en de binnenspuihaven. De fractie van het spuidebiet uit de erosiekuil (φ_{spui}) kan worden benaderd met behulp van [26]. [26] beschrijft dat de afnamesnelheid waarmee de grenslaaghoogte van een zwaardere vloeistof in een holte berekend kan worden, zie Figuur C.8. Hiervoor wordt regio 2 (zie Figuur C.8) beschouwd.



Figuur C.8 - Schematisatie van de parameters voor de berekening van de fractie water dat wordt opgepakt uit de holte uit [24]

De snelheid waarmee de hoogte van de grenslaag afneemt is afhankelijk van de stromingssnelheid over de grenslaag en de grenslaaghoogte:

$$u_{e1} = C_1 * Ri^{-1} * U$$

Hierin is C_1 een coëfficiënt (-) en U de snelheid van de stroming over de grenslaag (m/s). U en Ri worden berekend als volgt:

$$U = \frac{Q_s}{D * W_g}$$

$$Ri = g' * \frac{D}{U^2}$$

Hierin is Q_{spui} het spuidebiet (m^3/s), D de laagdikte van de vloeistof boven de grenslaag (m) (in het model de diepte van de binnenspuihaven), W_g de breedte van de grenslaag (m) (zie Figuur C.4) en g' is de effectieve zwaartekracht tussen de vloeistof boven en onder de grenslaag (m/s^2):

$$g' = \frac{g * \Delta\rho}{\rho_0}, \quad \Delta\rho = \rho_{biha} - \rho_{kuil}$$

De dichtheden worden berekend uit de saliniteit van de desbetreffende bakjes (ρ_{biha} en ρ_{kuil}) volgens [23] wijze.

u_{e1} wordt vervolgens omgerekend naar de afname in grenslaaghoogte (m) over de tijdstap:

$$dh_g = u_{e1} * dt$$

Met het zakken van de grenslaag wordt de breedte van de kuil ter hoogte van de grenslaag kleiner (zie Figuur C.4, $W_{g,t} > W_{g,t+1}$). De verandering van het volume uit de kuil wordt als volgt berekend:

$$dV_{spui\ to\ kuil} = \frac{1}{2} * (W_{g,t} + W_{g,t+1}) * dh_g * L$$

Met het volume dat wordt onttrokken uit de kuil wordt de fractie water uit de kuil tot het totale gespuide volume bepaald (φ_{spui}):

$$\varphi_{spui} = \frac{dV_{spui\ to\ kuil}}{Q_{spui} * dt}$$

Gezien de empirische karakter van [26] is in de code ingebouwd dat φ_{spui} wordt gelimiteerd van 0 tot 0.7 (-). De uiteindelijke set aan vergelijkingen voor spuien onder conditie 2 voor de bakjes binnenspuihaven, erosiekuil en buitenspuihaven, zijn samen te vatten als volgt:

Erosiekuil (kuil):

$$dV_{kuil} = -(dV_{spui\ to\ kuil})$$

$$V_{kuil,t+1} = V_{kuil,t} + dV_{kuil}$$

$$dM_{kuil} = dV_{kuil} * S_{kuil}$$

Binnenspuihaven (Biha):

$$dV_{biha} = -dV_{kuil}$$

$$dV_{spui\ to\ biha} = dV_{spui} - dV_{spui\ to\ kuil}$$

$$dM_{biha} = (dV_{spui\ to\ biha} * S_{canal}) + (dV_{biha} * S_{canal}) - (dV_{spui\ to\ biha} * S_{biha})$$

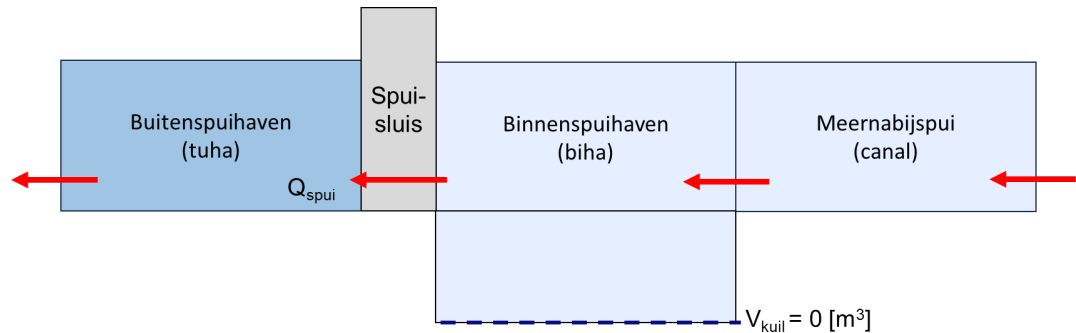
Buitenspuihaven (Tuha):

Het spuivolume wat vanuit de binnenspuihaven de buitenspuihaven op stroomt bevat de volgende saliniteit:

$$\begin{aligned}dM_{\text{kuil to tuha}} &= dV_{\text{kuil}} * S_{\text{kuil}} = dV_{\text{spui}} * \varphi_{\text{spui}} * S_{\text{kuil}} \\dM_{\text{biha to tuha}} &= dV_{\text{spui to biha}} * S_{\text{biha}} = dV_{\text{spui}} * (1 - \varphi_{\text{spui}}) * S_{\text{biha}} \\dM_{\text{spui to tuha}} &= dM_{\text{kuil to tuha}} + dM_{\text{biha to tuha}} - (dV_{\text{spui}} * S_{\text{tuha}})\end{aligned}$$

C.3.2.2. Conditie 2

Is de kuil volledig zoet gespoeld, stroomt het spuidebiet direct uit de binnenspuihaven naar de buitenspuihaven. Mocht er nog een minimaal volume zout water in kuil liggen, spoelt het resterend volume aan zout water uit de erosiekuil. Na de tijdstap is er geen zoutlaag in de kuil ($V_{\text{kuil}} = 0 \text{ m}^3$) en is deze volledig gevuld met water uit de binnenhaven. Figuur C.9 bevat de schematisatie van het uitwisseling door spuien bij een lege kuil (conditie 2).



Figuur C.9 Schematisatie spuidebiet bij erosiekuil conditie 2 (uitwisseling volume en zout weergegeven met rode pijlen)

De uitwisseling van volumes en zout wordt met de volgende formules berekend:

Erosiekuil (kuil):

$$\begin{aligned}dV_{\text{kuil}} &= -V_{\text{kuil},t} \\V_{\text{kuil},t+1} &= 0 \\dM_{\text{kuil}} &= dV_{\text{kuil}} * S_{\text{kuil}}\end{aligned}$$

Binnenspuihaven (Biha):

$$\begin{aligned}dV_{\text{biha}} &= -dV_{\text{kuil}} \\dM_{\text{biha}} &= (dV_{\text{spui}} * S_{\text{canal}}) + (dV_{\text{biha}} * S_{\text{canal}}) - (dV_{\text{spui}} * S_{\text{biha}})\end{aligned}$$

Buitenspuihaven (Tuha):

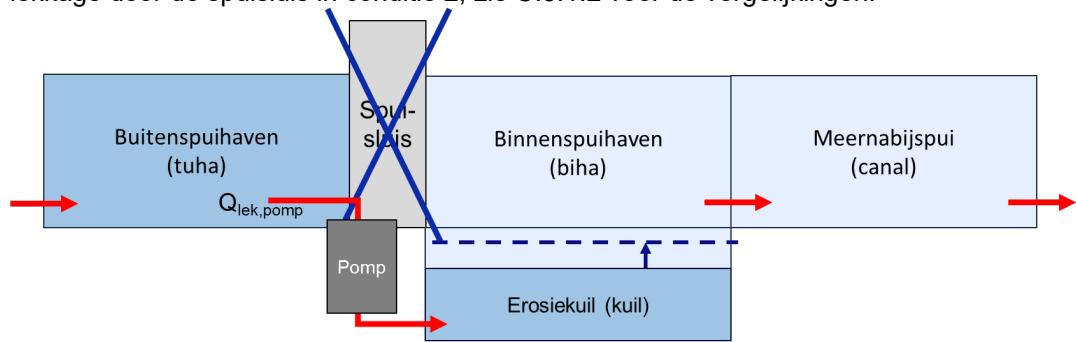
$$\begin{aligned}dM_{\text{kuil to tuha}} &= dV_{\text{kuil}} * S_{\text{kuil}} \\dM_{\text{biha to tuha}} &= (dV_{\text{spui}} - dV_{\text{kuil}}) * S_{\text{biha}} \\dM_{\text{spui,tuha}} &= dM_{\text{kuil to tuha}} + dM_{\text{biha to tuha}} - (dV_{\text{spui}} * S_{\text{tuha}})\end{aligned}$$

C.3.3 Pompen

Door zeespiegelstijging zal er op den duur minder tot geen verval meer beschikbaar zijn om te spuien. Met behulp van pompen kan water afgevoerd blijven worden ondanks de afname in verval. Deze pompen zullen ook enige lekkage kennen. De aanzuiging van water via de pompen vindt plaats vanuit de erosiekuil (zie Figuur 3.5). In deze paragraaf wordt eerst kort beschreven hoe lekkage via de pompen op relatief eenvoudige manier is opgenomen in het model. Vervolgens wordt toegelicht hoe onttrekking is gemodelleerd tijdens het pompen.

C.3.3.1. Lekkage via pompen

Het lekdebiet via de pompen stroomt direct de erosiekuil in zonder menging met water uit de binnenspuihaven, zie Figuur C.10. Is de kuil vol dan vindt eenzelfde uitwisseling plaats als bij lekkage door de spuisluis in conditie 2, zie C.3.1.2 voor de vergelijkingen.



Figuur C.10 Schematisatie pompdebiet bij gevulde erosiekuil (uitwisseling volume en zout weergegeven met rode pijlen en de verandering van het volume van de erosiekuil is weergegeven met een donker blauwe pijl)

Als de kuil nog niet gevuld is/raakt dan is het volume en hoeveelheid zout dat door de pompen naar de meerzijde lekt te berekenen als volgt:

$$dV_{\text{lek,pomp}} = -Q_{\text{lek,pomp}} * dt$$

$$dM_{\text{lek,pomp}} = dV_{\text{lek,pomp}} * S_{\text{tuha}}$$

Erosiekuil (Kuil)

$$dV_{\text{kuil}} = -dV_{\text{lek,pomp}}$$

$$V_{\text{kuil,t+1}} = V_{\text{kuil,t}} + dV_{\text{kuil}}$$

$$dM_{\text{kuil}} = dV_{\text{lek,kuil}} * S_{\text{tuha}}$$

Binnenspuihaven (Biha)

$$dV_{\text{biha}} = -dV_{\text{kuil}}$$

$$dM_{\text{biha}} = dV_{\text{biha}} * S_{\text{biha}}$$

Meernabijspui (canal)

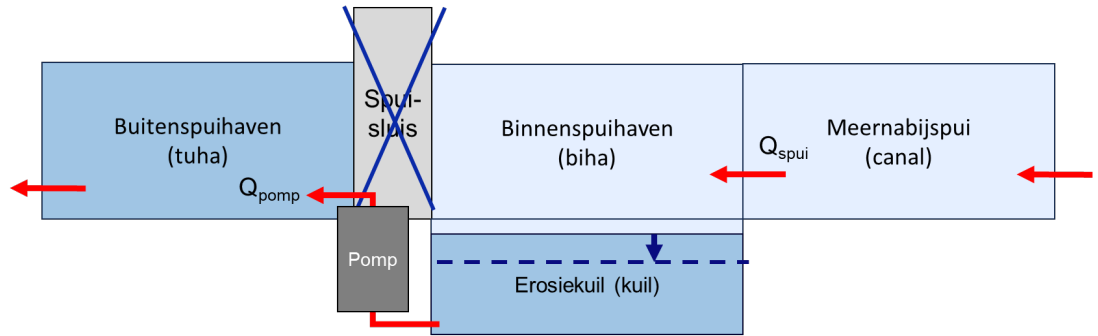
$$dM_{\text{biha to canal}} = dV_{\text{lek,pomp}} * S_{\text{biha}}$$

$$dM_{\text{lek,canal}} = dM_{\text{biha to canal}} - (V_{\text{lek}} * S_{\text{canal}})$$

Naast lekkage door de pompen, lekt er tegelijk ook water door de spuisluis. Lekkage door de spuisluis wordt hierbij opgeteld en wordt berekend zoals is toegelicht in paragraaf C.3.1.

C.3.3.2. Afvoer via pompen

Figuur C.11 laat een schematisatie zien van de uitwisseling bij het lozen van water via de pompen wanneer de erosiekuil grotendeels gevuld is.



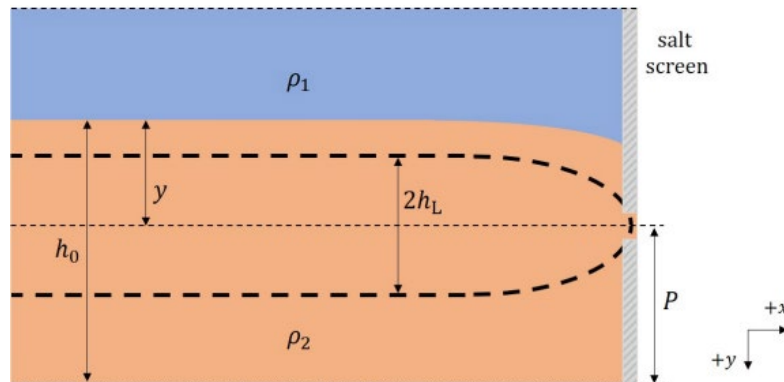
Figuur C.11 Schematisatie pompdebiet bij gevulde erosiekuil (uitwisseling volume en zout weergegeven met rode pijlen en de verandering van het volume van de erosiekuil is weergegeven met een donker blauwe pijl)

Door te pompen wordt effectiever zout water uit de erosiekuil afgevoerd dan tijdens spuien. Dit komt doordat de opening zich lager in de waterkolom bevindt en daarmee water direct uit de erosiekuil onttrekt.

Als de grenslaag zakt en de hoogte van de pompopening nadert, wordt water uit de binnenspuihaven meegezogen. Naarmate de grenslaag verder zakt, verschuift de verhouding meer naar water uit de binnenspuihaven. De uitstroombconcentratie (c_0 (kg/m^3)) van een afvoer q (m^2/s) op een hoogte P (m) afkomstig van twee lagen met dichtheiden ρ_1 en ρ_2 en een grenslaaghoogte ten opzichte van de uitstroombhoogte y (m) wordt berekend met de methode van [25], zie Figuur C.12. In de toepassing van [25] in het model wordt de uitstroombopening als 3D beschouwd:

$$\frac{c_0}{c_2} = \frac{h_L - y}{h_L - (-h_L)} = \frac{1}{2} - \frac{y}{2h_L} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{g'^{\frac{1}{3}} y}{Kq^{\frac{2}{3}}} \right)$$

Hierin is c_2 de concentratie van de onderste laag, h_L de beperkende opnamehoogte (m) (zie Figuur C.12), K een openingsvorm-afhankelijke coëfficiënt (waarde tussen 0.7 en 0.8 (-) voor 3D opening [25]), g' is de gereduceerde zwaartekracht (m/s^2) (zie C.3.2.1) en y de grenslaaghoogte boven de uitstroombhoogte (m).

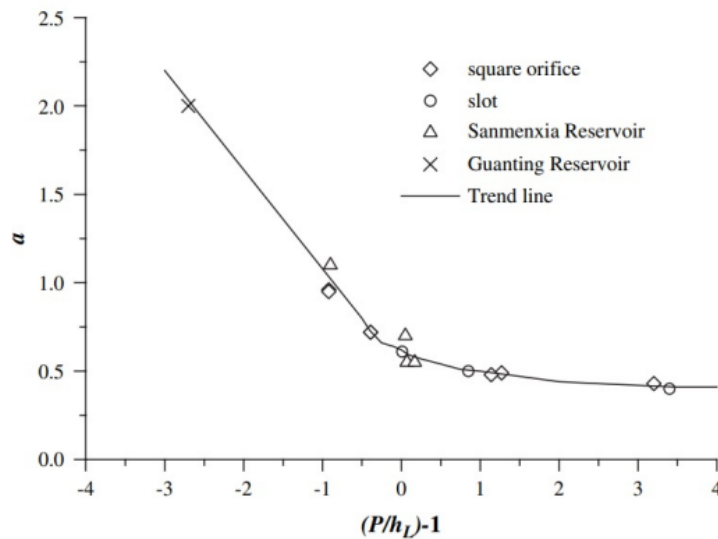


Figuur C.12 Overzicht van de definities in de methode van [25]. Overgenomen uit [27].

Aangezien experimenten hebben aangetoond dat de factor 0.5 lichtelijk afwijkt voor verschillende uitstroombopeningen is de formule te herschrijven tot een algemenere formule [25]:

$$\frac{c_0}{c_2} = a - b \left(\frac{g'^{\frac{1}{3}} y}{q^{\frac{2}{3}}} \right) = a - bGy$$

Hierin is a een coëfficiënt afhankelijk van $(P/h_L) - 1$ (zie Figuur C.13) en b een constante $(1/2K)$. Vanwege het empirische karakter van deze vergelijking moet de oplossing beperkt worden tot $0 < c_0/c_2 < 1$.



Figuur C.13 Relatie tussen a en $P/h_L - 1$ afkomstig van [25]

Aanvullend doet [25] de aanname dat het waterlichaam oneindig diep is. Als de beperkende opnamehoogte groter is dan de hoogte van de uitstroomopening boven de bodem ($P < h_L$ in Figuur C.12), moet de formule uitgebreid worden tot:

$$\frac{c_0}{c_2} = a - bGy', \text{ waar } y' = y + 2(h_L - P)$$

Voor de berekening van het ZTM is de waarde van de coëfficiënt a benaderd door gebruik te maken van interpolatie tussen een selectie aan punten op de trendlijn in Figuur C.13:

$$\begin{aligned} (P/h_L) - 1 &= [-3, -0.25, 0, 0.9, 2, 4] \\ a &= [2.23, 0.65, 0.6, 0.5, 0.45, 0.4] \end{aligned}$$

Aangezien c_2 bekend is (saliniteit van de zoute laag in de erosiekuil) kan berekend worden wat de uitstroomconcentratie (c_0) is. Met behulp van massabehoud kan bepaald worden welke fractie afkomstig is uit de erosiekuil (φ_{pomp} , met concentratie c_2 in kg/m^3) en welke fractie uit de binnenspuihaven ($1 - \varphi_{pomp}$, met concentratie c_1 in kg/m^3):

$$c_0 * V_{pomp} = c_2 * V_{pomp} * \varphi_{pomp} + c_1 * V_{pomp} * (1 - \varphi_{pomp})$$

Hierin is V_{pomp} gelijk aan het volume wat per tijdstap onttrokken wordt uit het de meerzijde. Hieruit volgt:

$$\varphi_{pomp} = \frac{c_0 - c_1}{c_2 - c_1}$$

Nu de verdeling bekend is kan op basis hiervan vervolgens de verdeling van het volume en de bijbehorende zoutmassa berekend worden voor de bakjes, zoals beschreven voor spuien bij conditie 1 in paragraaf C.3.2.1. Daarbij moet voor φ_{spui} de waarde van φ_{pomp} worden ingevuld en is V_{spui} gelijk aan V_{pomp} .

C.4 Randvoorwaarden zouttransport van en naar overige bakjes

In paragraaf C.3 is gepresenteerd hoe uitwisseling door advectionele transporten van en naar de erosiekuil en binnenspuihaven en naar aangrenzende bakjes en/of randen plaatsvindt. De uitwisseling op de connecties 'zee-zeenabijspui', 'zeenabijspui-buitenspuihaven', 'meernabijspui-meer' is samen te vatten tot de volgende set vergelijkingen. Hierbij is het lekkagedebiet te allen tijde negatief (stroomopwaarts) en spui debiet ten allen tijde positief (stroomafwaarts):

$$dV = ((Q_l - Q_s) * dt)$$

Als Lekkage ($Q_{lek} < 0$):

$$dM = dV * (S_{bakje} - S_{afw})$$

Als spuien ($Q_{spui} > 0$):

$$dM = dV * (S_{opw} - S_{bakje})$$

Aanvullend vindt er advectioneel transport plaats in de bakjes aan de zeezijde door de aanwezigheid van de getijstroom en wordt berekend als volgt:

$$dV = (h_{t+1} - h_t) * B_{bakje} * L_{bakje}$$

Voor het zouttransport in de buitenspuihaven (tuha):

Tijdens vloed ($h_{t+1} - h_t > 0$):

$$dM = dV * S_{buha}$$

Tijdens eb ($h_{t+1} - h_t < 0$):

$$dM = dV * S_{tuha}$$

Voor het zouttransport in het bakje zeenabijspui (buha):

Tijdens vloed ($h_{t+1} - h_t > 0$):

$$dM = dV * S_{zee} + dV_{tuha} * (S_{zee} - S_{buha})$$

Tijdens eb ($h_{t+1} - h_t < 0$):

$$dM = dV * S_{buha} + dV_{tuha} * (S_{buha} - S_{tuha})$$

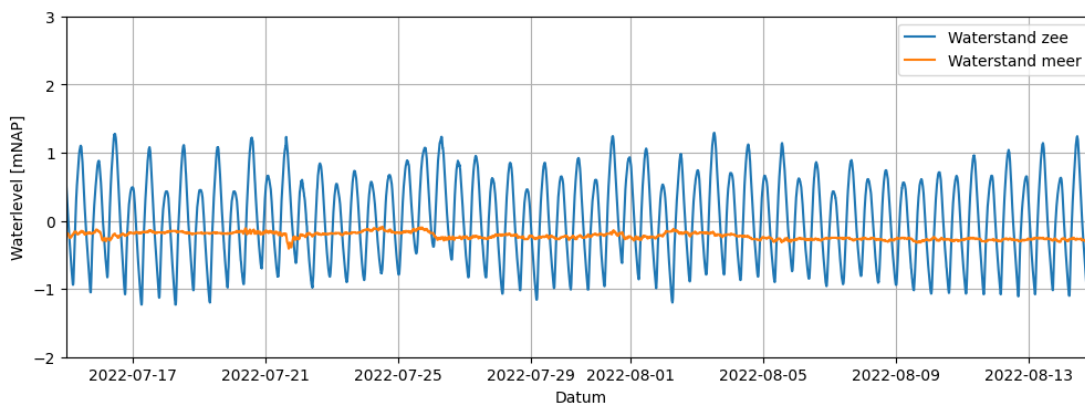
De uitwisseling door dispersief transport vindt plaats op connecties van bakje-rand en bakje-bakje (niet met de spuisluis) en wordt berekend op basis van de 'lock exchange' theorie vermenigvuldigd met een coëfficiënt, zie Tabel D.1. Dezelfde theorie wordt gebruikt in de Zeesluisformulering (ZSF) en is uitgebreid toegelicht in de ZSF documentatie [22].

D Kalibratie van het ZoutTransportModel voor de spuisluizen in de Afsluitdijk

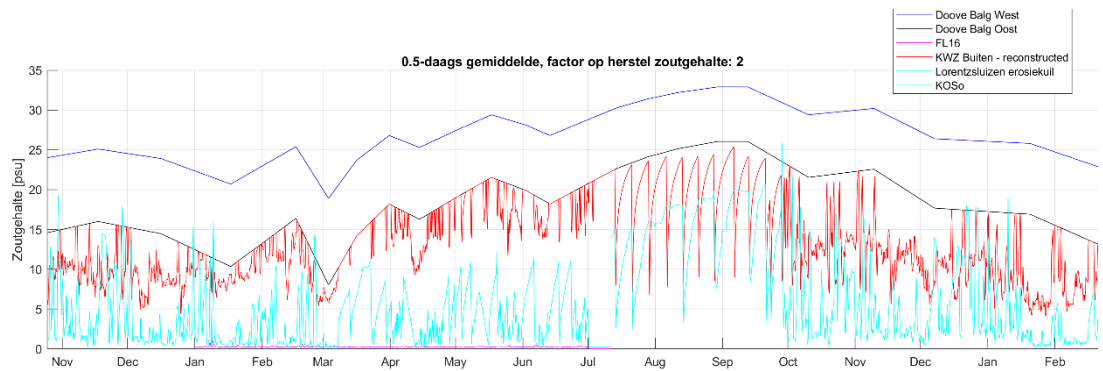
Het ZTM met gelaagd bakje bevat vele parameters die gekalibreerd moeten worden. Het model kan niet direct gekalibreerd worden met metingen aangezien de zoutflux door de spuisluizen van en naar het IJsselmeer niet gemeten wordt. Om die reden worden de waarden voor de bruto transporten door de spuisluis van Arcadis/Hydrologic overgenomen, zie Tabel 3.2 voor de zoutflux en Tabel 3.3 voor de afvoer. Eerst wordt de kalibratie-invoer besproken. Vervolgens worden de kalibratieresultaten en parameterinstellingen gepresenteerd.

D.1.1 Kalibratie invoer

De kalibratie wordt uitgevoerd voor de spuisluis bij KWZ over de periode 14 juli 2022 – 15 augustus 2022. Om het effect van eventuele numerieke afwijkingen bij het opstarten te verkleinen wordt het resultaat alleen gemiddeld over de laatste 2 weken van de doorgerekende periode (1 augustus 2022 tot 15 augustus 2022). Invoer voor het model zijn gemeten waterstanden aan de zee- en meerzijde (stations Kornwerderzand-buiten en Kornwerderzand-binnen), zie Figuur D.1. De saliniteit op de rand aan de zeezijde is gegeven door een aangevulde reeks ter hoogte van meetstation Doove Balg Oost, zie Figuur D.2 [9]. Tijdens de simulatieperiode ligt deze waarde tussen de 22 en 26 kg/m³. Een correctie wordt toegepast op deze reeks als randvoorwaarde aan de zeezijde in het ZTM aangezien de reeks gebaseerd is op een locatie ver weg van de spuisluis. Dichtbij de spuisluis zorgen schuttingen met de schutsluis ervoor dat de saliniteit aan de zeezijde zakt. Een verkennende ZTM som mét schutsluis gaf een correctie van -1 kg/m³. Voor de meerzijde is gekozen voor een constant zoutgehalte van 0.3 kg/m³ wat de continue aanwezigheid van zoetwater representeert.

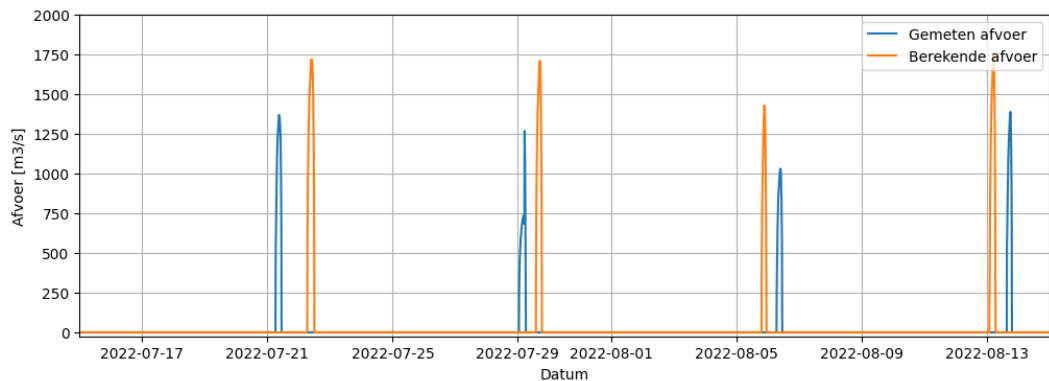


Figuur D.1 Gemeten waterstanden bij meetstations Kornwerderzand-binnen en Kornwerderzand-buiten over de zomer periode (14-07-2022 tot 15-08-2022)



Figuur D.2 Chloridegehalten ter hoogte van meetstation Doove Balg Oost over de periode november-2021 tot februari 2024 (zie zwarte lijn voor Doove Balg Oost) [9]

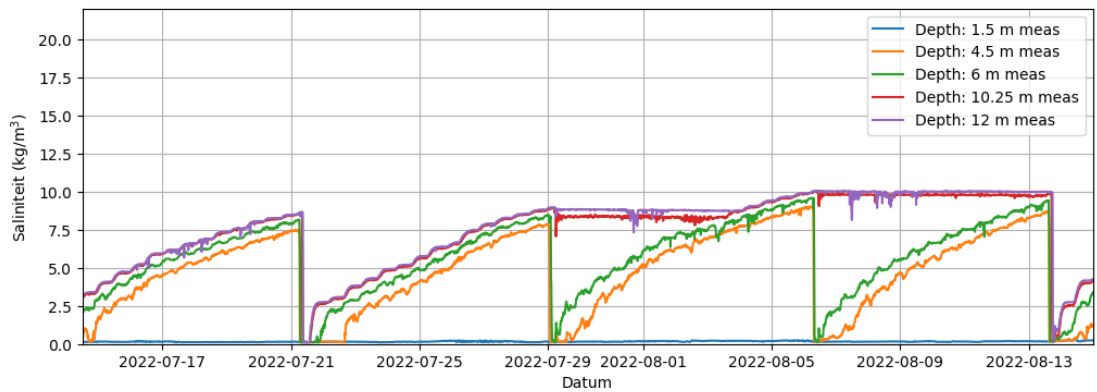
Tijdens de zomerperiode is een reeks met afvoer door de spuisluis beschikbaar. Deze reeks is afgeleid op basis van waterstanden en spuiokerstanden en is weergegeven in Figuur D.3 met de blauwe lijn in Figuur D.3. Deze afvoerreeks is invoer voor het ZTM bij de kalibratie om een correcte waarde te gebruiken zoals daadwerkelijk mde periode is afgevoerd. De gemiddelde afvoer in deze spuireeks is 22.6 m³/s en is daarmee aanzienlijk lager dan de waarde die wordt aangehouden door A/H (31.5 m³/s). De oranje lijn (berekende afvoer) in Figuur D.3 wordt toegelicht in paragraaf D.1.2.



Figuur D.3 - Reeks met berekende (oranje lijn) en geregistreerde (blauwe lijn) spuidebieten over de zomerperiode (14-07-2022 tot 15-08-2022)

Als onderdeel van de kalibratie wordt ook getracht het gedrag van de zoutlaag in de kuil grofweg gelijk te krijgen met chloridemetingen over dezelfde zomer periode. Bij meetstation 'Kwdznd sp b' worden op 5 verschillende dieptes in de erosiekuil chloridegehalten gemeten (-1.5, -4.5, -6, -10.25 en -12 m NAP). In Figuur D.4 zijn de gemeten reeksen te zien in saliniteit in kg/m³, omgezet met behulp van de volgende conversie:

$$S = 1.80655 * Cl^-$$



Figuur D.4 Gemeten chloridegehalten op dieptes -1.5, -4.5, -6, -10.25, -12 m NAP boven en in de erosiekuil bij Kornwerderzand

D.1.2 Kalibratie resultaat

De resultaten van het kalibreerde model worden hier gepresenteerd. De parameterinstellingen die volgen uit de kalibratie zijn weergegeven in Tabel D.1. In Tabel D.2 geeft de overige model instellingen die niet zijn gekalibreerd en eerder de rapportage zijn gedefinieerd.

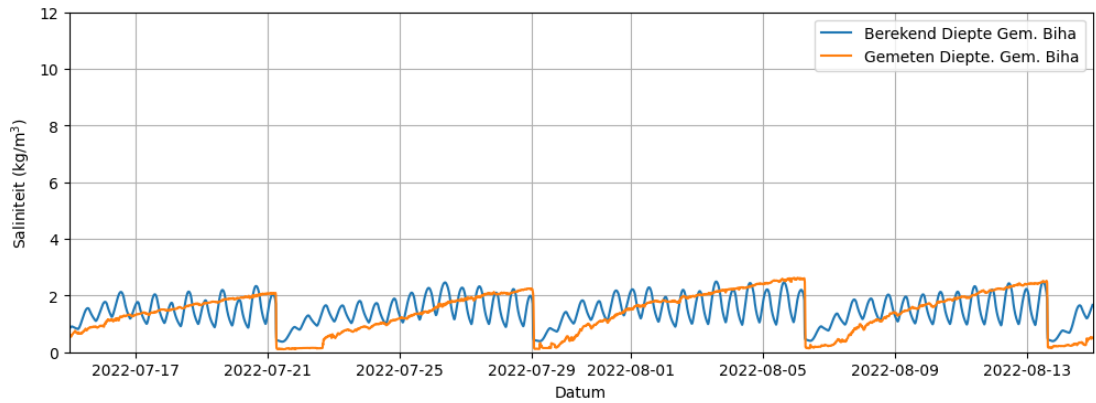
A/H heeft een zoutflux van 10.9 kg/s gebruikt voor de spuisluis bij KWZ waar het gekalibreerde ZTM een zoutflux van 15.7 kg/s berekent. Deze afwijking is verklaarbaar omdat de gemeten spuireeks die als invoer dient voor het ZTM veel minder water afvoert dan de waarde die wordt aangehouden door A/H (22.6 m³/s tegen 31.5 m³/s).

In de productiesommen wordt het ZTM gedraaid met een berekende spuireeks. Dit wordt opgelegd aan de hand van een spui frequentie (eens per X aantal spuiensters). Onderdeel van de kalibratie is het draaien van een som met opgelegde spui frequentie die vergelijkbaar is met de berekende reeks. De beste schatting van de spuiensters wordt gemaakt met een frequentie van spuien eens per 14 laagwaterensters, zie oranje lijn in Figuur D.3. Met de opgelegde spui frequentie wordt een daggemiddelde zoutflux van 11.2 kg/m³ berekend bij een afvoer van 31.2 m³/s. Deze getallen liggen dichtbij de waarden gebruikt door A/H. Daarbij is de verlaging van de zoutflux door het gebruik van meer zoetwater een logische reactie van het model.

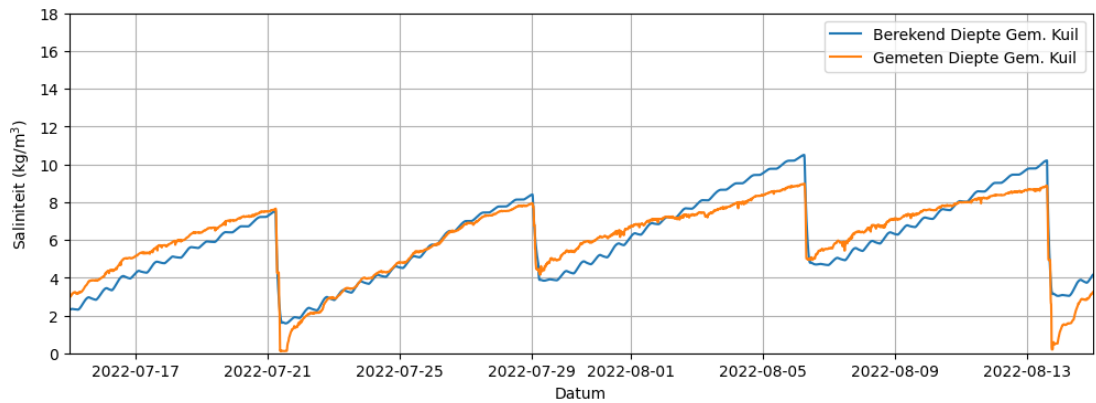
Aanvullend is het ZTM gekalibreerd op basis van het gedrag in de kuil. Dit bevat de volgende twee stappen: 1) dieptegemiddelde zoutgehalten boven en onder de absolute hoogte van de drempel (-3 m NAP) en 2) een video met frames per tijdstap die de berekende en gemeten zoutgehalten in de kuil laten zien. De resultaten van beide methoden worden hieronder toegelicht.

De uitvoer van het ZTM geeft dieptegemiddelde saliniteiten van elk bakje en een reeks met hoogte van de grenslaag in de erosiekuil. De metingen van chloridegehalte in- en boven de erosiekuil zijn puntmetingen. Om de metingen met modeluitvoer te vergelijken zijn de chloridemetingen omgezet tot diepte gemiddelde saliniteit in kg/m³ in de binnenspuihaven (0 tot -3 m NAP) en de erosiekuil (-3 tot -13 m NAP). Voor de berekende reeks houdt dit in dat de dieptegemiddelde saliniteit bepaald wordt door de saliniteit in de bakjes “binnenspuihaven” en “erosiekuil” en de hoogte van de grenslaag. Voor de gemeten reeks wordt de saliniteit tussen de meetpunten geïnterpoleerd. De dieptegemiddelde saliniteit in de binnenhaven bij de spuisluis is weergegeven in Figuur D.5 en voor de erosiekuil (-3 tot -13 m

NAP) in Figuur D.6.

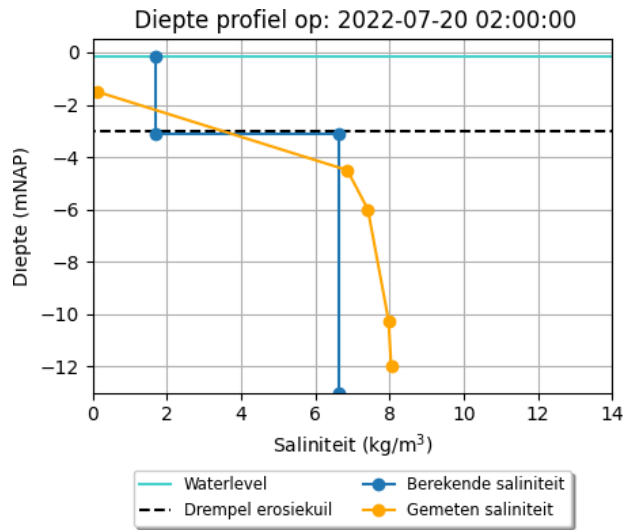


Figuur D.5 Dieptegemiddelde saliniteit in de binnenhaven (0 tot -3 m NAP) over de periode 2022-07-15 tot 2022-08-15 berekend door het ZTM en gemeten

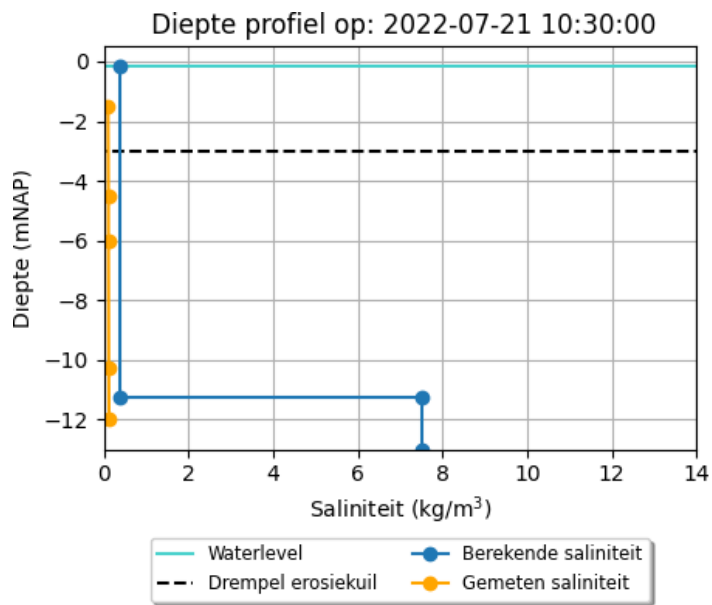


Figuur D.6 Dieptegemiddelde saliniteit in de erosiekuil (-3 tot -13 m NAP) over de periode 2022-07-15 tot 2022-08-15

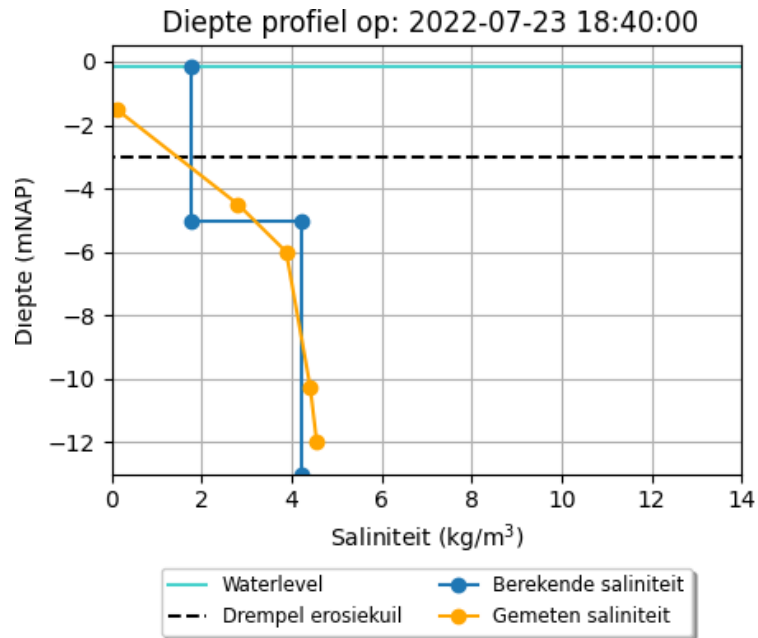
Naast de dieptegemiddelde waarden zijn hieronder enkele frames uit de video gepresenteerd om te laten zien hoe goed het ZTM in staat is de stratificatie in de erosiekuil bij verschillende processen te simuleren. Figuur D.7 laat de zoutgehaltenes over de waterkolom zien vlak voordat er gespuid wordt. Figuur D.8 laat de zoutgehaltenes zien vlak na een flinke spui. Figuur D.9 laat het vollopen van de kuil zien tussen twee spui events in. Alle drie de figuren laten de beperkte resolutie van het ZTM zien met twee scherp gesplitste lagen. Duidelijk zichtbaar is horizontale blauwe lijn, die de berekende grenslaaghoogte in de kuil representeert. In de metingen is een graduele overgang in zoutgehalte zichtbaar. De berekende saliniteit is van dezelfde orde grootte als de berekende waardes. Aanvullend is het ZTM in staat om de variatie in zoutgehaltenes door de verschillende processen op hoofdlijnen te volgen. Ook lijkt het legen en vullen van de kuil grofweg de metingen te volgen.



Figuur D.7 Berekende (blauw) en gemeten (oranje) saliniteit verticaal door de waterkolom op 2022-07-20 02:00:00, vlak voordat er gespuid is.



Figuur D.8 Berekende (blauw) en gemeten (oranje) saliniteit verticaal door de waterkolom op 2022-07-21 10:30:00, vlak na een spui event.



Figuur D.9 Berekende (blauw) en gemeten (oranje) saliniteit verticaal door de waterkolom op 2022-07-23 18:40:00, tijdens een periode tussen twee spui events waarin de kuil over de tijd gevuld wordt.

Uit de kalibratie volgt een set aan instellingen voor de kalibratie parameters, zie Tabel D.1. Voor KWZ en DO zijn de bakjes en initiële instelling niet gekalibreerd, zie tabel Tabel D.2.

Tabel D.1 Overzicht met kalibratie parameters ZTM met gelaagd bakje

Modelparameters	
Afvoercoëfficiënt	0.85
Phi_lek	0.25
Factor entrainment (max)	10
Phi_spui	Volgens [26]: $0 - 0.7$ ($\max(\text{phi_spui}) = 0.7$)
C1 [26]	$6 \cdot 10^{-3}$
K [25]	0.75
Factor zoutgehalte SO	1.0 (niet selectief)
C _{LE} , Meerzijde	0.2
C _{LE} , Zeezijde	0.5
dt	600 s (10 minuten)

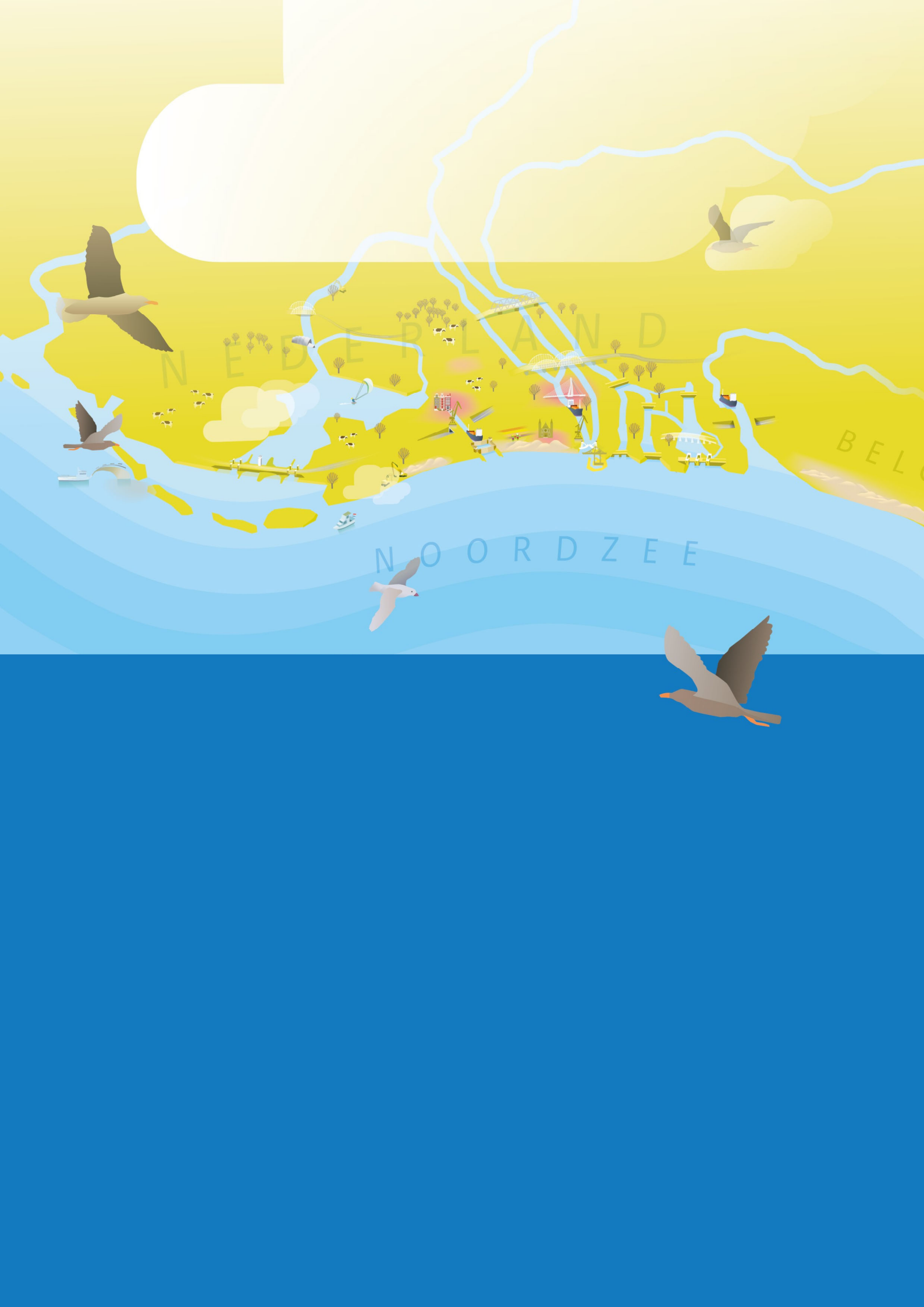
Tabel D.2 Overzicht met alle overige (niet gekalibreerde) parameter instellingen

Parameter	Waarde
Instellingen bakjes KWZ	L [m], B [m], Z _{bodem} [m], wl (initieel) [mNAP], S (initieel) [kg/m ³]
Zee (alleen wl en S)	-, -, -, -, (S Doovebalg Oost)
Zee-nabij-spui	1 ^e 3, 2 ^e 3, -6, -, 12
Buitenspuihaven	9 ^e 2, 3.8 ^e 2, -5.0, -, 10
Binnenspuihaven	7 ^e 2, 4 ^e 2, -3.0, -, 2
Meer-nabij-spui	1.5 ^e 3, 4 ^e 3, -6, -, 1
Meer (alleen wl en S)	-, -, -, -, 0.3
Erosiekuil (verticale wand loodrecht op stroomrichting)	L = 600 m, B _{bodem} = 40 m, B _{drempel} = 200 m, Z _{bodem} = -13 mNAP, Z _{drempel} = -3 [NAP]
instellingen bakjes DO	
Zee (alleen wl en S)	-, -, -, -, 20
Zee-nabij-spui	1 ^e 3, 1 ^e 3, -4, -, 12
Buitenspuihaven	1.25 ^e 3, 6.5 ^e 2, -4.0, -, 10
Binnenspuihaven	2 ^e 3, 1.2 ^e 3, -4.0, -, 2
Meer-nabij-spui	1.25 ^e 3, 5 ^e 2, -6, -, 1
Meer (alleen wl en S)	-, -, -, -, 0.3
Erosiekuil (verticale wand loodrecht op stroomrichting)	L = 1800 m, B _{bodem} = 350 m, B _{drempel} = 1000 m Z _{bodem} = -7 mNAP, Z _{drempel} = -4 mNAP

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl



N E D E R L A N D

B E L G I E

N O O R D Z E E