



Kennisprogramma Natte Kunstwerken
Kennisplan 2024

*Vervangings- en renovatieopgave
natte kunstwerken in Nederland*

Kennisbijdrage:

Ontwikkelen systematiek voor uitwerken van opties

Kwantificering van de functionele prestatie
van sluizen met een zoutbeheerfunctie

Auteurs

Sam Maijvis	(Deltares)
Tom O'Mahoney	(Deltares)
Otto Weiler	(Deltares)
Jantine Hoekstra	(Rijkswaterstaat)

kenmerk	: KpNK-2024-KV2-functie-a007
versie	: 1.0
datum publicatie	: 23 oktober 2024



Voorwoord

Kennisprogramma Natte Kunstwerken

Sluizen, stuwen, gemalen en stormvloedkeringen zijn belangrijke assets waarvoor beheerders zoals Rijkswaterstaat en de waterschappen verantwoordelijk zijn. Veel van deze natte kunstwerken in de waterinfrastructuur bereiken de komende decennia het einde van hun (technische en/of functionele) levensduur. Zij kunnen daardoor hun functies naar verwachting niet meer adequaat blijven uitoefenen. Dit zal ten koste gaan van de mate waarin de waterinfrastructuur voldoet aan betrouwbaarheidseisen. In het kader van goed assetmanagement staan we dan ook voor de enorme opgave om deze kunstwerken te vervangen of te renoveren. Welke kennis hebben we nodig om dat efficiënt, kostenbesparend en toekomst-bestendig aan te pakken?

Deltares

MARIN



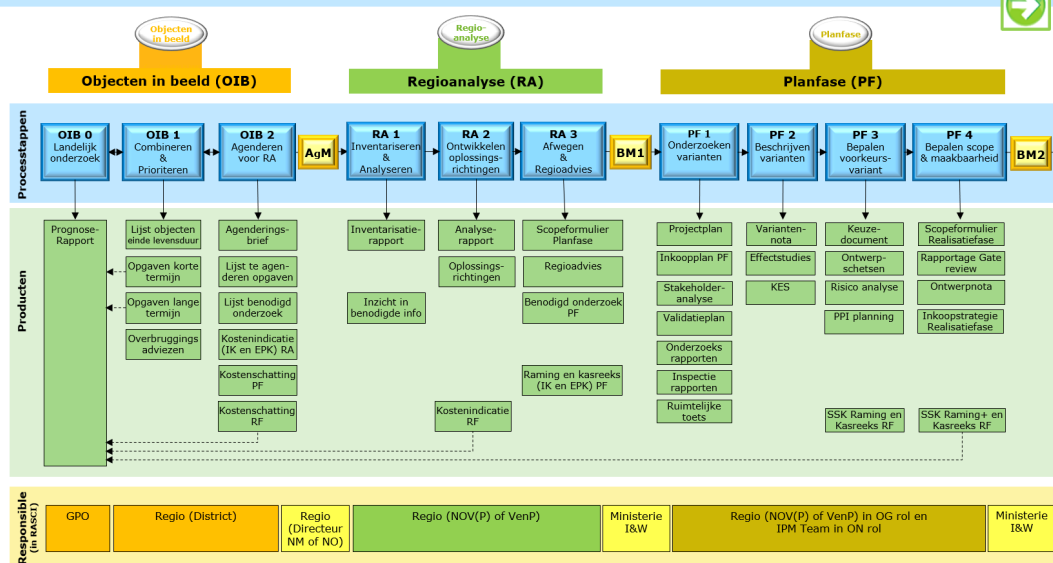
TNO

In het Kennisprogramma Natte Kunstwerken (KpNK) ontwikkelen en bundelen Deltares, MARIN, TNO en Rijkswaterstaat deze kennis op basis van de Samenwerkingsovereenkomst Natte Kunstwerken.

Werkwijze vervangings- en renovatieproces

De laatste jaren richten we ons niet meer uitsluitend op een-op-een vervanging van kunstwerken. We zoeken steeds meer naar mogelijkheden om hun levensduur te verlengen en (noodzakelijke) ingrepen te koppelen aan gebieds- en netwerkontwikkelingen en aan functionele ontwikkelingen. Rijkswaterstaat heeft als assetmanager een vernieuwde werkwijze voor dit vervangings- en renovatieproces (VenR) opgesteld om een uniform en systematisch proces te hebben waarmee een VenR-maatregel transparant onderbouwd kan worden (zie Figuur 1).

Procesketen VenR (tot aan Realisatie)



Figuur 1: Procesketen VenR binnen Rijkswaterstaat

Deze procesketen vormt de basis waar de kennisontwikkeling van het kennisprogramma aan bijdraagt.



Twee-stappen-benadering en drie kernvragen

De kennis die we ontwikkelen binnen het Kennisprogramma Natte Kunstwerken draagt bij aan de stapsgewijze-benadering binnen deze Procesketen VenR:

- stap 1 (*Objecten in Beeld*): richt zicht op (het einde van) de technische levensduur van een kunstwerk en het agenderen van de VenR-opgave in het *Prognose rapport*;
- stap 2 (*Regioanalyse*): brengt vooral de relatie in kaart tussen het kunstwerk en de netwerken waar het (samen met andere kunstwerken) deel van uitmaakt. In het resulterende *Regioadvies* gaat het ook over (het einde van) de functionele levensduur.

Inhoudelijk vindt het onderzoek plaats aan de hand drie *kernvragen*:

1. Hoe lang gaat mijn kunstwerk nog mee, zowel technisch als functioneel?
2. Welke alternatieven heb ik, behalve een-op-een vervanging?
3. Hoe weeg ik de alternatieven tegen elkaar af?

Programmaplan, jaarlijkse kennisplannen en samenwerking

Het programmaplan omvat de achtergronden en ambities voor de gehele looptijd van het Kennisprogramma Natte Kunstwerken. Jaarlijks worden deze ambities uitgewerkt in een kennisplan en een bijbehorend financieringsplan. Andere partijen zoals waterschappen, adviesbureaus en andere (commerciële) organisaties, nodigen we uitdrukkelijk uit om deel te nemen aan het gezamenlijk uitvoeren van een kennisplan, bijvoorbeeld met kennisbijdragen in voor hen relevante onderzoeksprojecten, met praktijkervaringen of financiële bijdragen.

Resultaten delen

Bijdragen en onderzoeksresultaten uit ons Kennisprogramma Natte Kunstwerken delen we met de hele sector via onze website (www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl) en op andere manieren.

Hieronder vindt u een kennisbijdrage binnen werkpakket 2.1 'Ontwikkelen systematiek voor uitwerken opties' uit het kennisplan 2024. Het omvat eerst de samenvatting van het onderzoek 'Kwantificering van de functionele prestatie van sluizen met een zoutbeheerfunctie'. Deze activiteit is namens het Kennisprogramma Natte Kunstwerken geleid door Deltares. Na de samenvatting vindt u het volledige onderzoeksverslag in de vorm van een rapportage.

N.B. De volledige rapportage is gelijk aan het originele document van Deltares, met uitzondering van het titelblad. Bij publicatie van dit onderzoeksverslag op de KpNK-website, is deze om privacyredenen verwijderd.



Kennisprogramma Natte Kunstwerken *Kennisplan 2024*

Meer informatie

- Het Kennisprogramma Natte Kunstwerken is de uitwerking van de onderzoeklijn 'Toekomstbestendige Natte Kunstwerken' binnen het Nationaal Kennisplatform voor Water en Klimaat (NKWK). Zie www.waterenklimaat.nl

NKWK

- Voor meer informatie over het programma Kennisprogramma Natte Kunstwerken, zie www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl.



- Voor vragen over het Kennisprogramma Natte Kunstwerken en het kennisplan 2023 kunt u terecht bij Martine Brinkhuis, email martine.brinkhuis@rws.nl
- Voor vragen over de voorliggende kennisbijdrage kunt u terecht bij de auteurs:

Sam Majvis sam.majvis@deltares.nl

Tom O'Mahoney tom.omahoney@deltares.nl

Otto Weiler otto.weiler@deltares.nl



Samenvatting

Ontwikkelen systematiek voor uitwerken opties

Kwantificering van de functionele prestatie van sluizen met een zoutbeheerfunctie

Hieronder vindt u een kennisbijdrage van het werkpakket 'Ontwikkelen systematiek voor uitwerken opties' uit het kennisplan 2024. De bijdrage – geleid door Deltares - omvat de samenvatting van het onderzoek 'Kwantificering van de functionele prestatie van sluizen met een zoutbeheerfunctie'. Na de samenvatting vindt u het volledige onderzoeksverslag in de vorm van een rapportage.

Aanleiding en probleemstelling

Veel sectoren hebben belang bij voldoende zoetwaterbeschikbaarheid. Door de bouw van schut- en spuisluizen op overgangen tussen zoet en zout water verdwijnt de natuurlijke getijdynamiek en ontstaat er een harde grens tussen zoet en zout water. Bij een harde grens trekt zout water, dat bijvoorbeeld via het schutten van schepen in het zoete water terechtkomt, verder de zoete wateren in dan bij een geleidelijke overgang. Zoutindringing door sluizen op een overgang tussen zoet en zout water zorgt daarom voor extra druk op de zoetwaterbeschikbaarheid, vooral tijdens droogte. Voor nieuwe en te vernieuwen zoet-zoutsluizen is het daarom van belang dat er weloverwogen keuzes worden gemaakt waarbij rekening wordt gehouden met zoutindringing. Om dat te kunnen doen moet de mate van zoutindringing onder verschillende omstandigheden gekwantificeerd worden.

Onderzoeksvraag (WAT)

Eisen aan zoutgehalten worden over het algemeen gesteld aan het watersysteem en niet aan de zoet-zoutsluis. Om die reden is er een behoefte aan methodes die een brug slaan tussen de eisen aan het watersysteem en de hoeveelheid zout die per tijdseenheid door de sluis naar binnenkomt. Daarnaast is er in de verkennende fase van de vernieuwing of bouw van een sluis behoefte aan een snelle eerste benadering van verschillende opties waarbij nog geen gedetailleerd (3D) rekenmodel ingezet hoeft te worden. De onderzoeksvraag is daarmee: 'Kan er een methode worden ontwikkeld die, ook bij gebrek aan directe eisen, een eerste orde inzicht kan geven in de functionele prestatie van schut- en/of spuisluizen voor de functie zoutbeheer?'

Onderzoeksaanpak en -methode (HOE)

In dit onderzoek is via twee benaderingen en aan de hand van de casus Noordersluis IJmuiden en het naastgelegen spuicomplex, naar een methode gezocht die een eerste orde inzicht geeft in de functionele prestatie van schut- of spuisluizen voor de functie zoutbeheer:

- De eerste benadering heeft zich gericht op de zoutindringing door een individuele schutsluis, waarvoor zoals gezegd geen directe eisen beschikbaar zijn. Bij het uitwerken van deze benadering kon de eerder al ontwikkelde Zeesluisformulering (ZSF) worden ingezet.



- De tweede benadering heeft zich gericht op de (verandering in) zoutconcentratie in een watersysteem waar meerdere schut- en/of spuisluizen deel van uitmaken. Naast de ZSF kon daarin de eveneens eerder ontwikkelde Spuisluisformulering (SSF) worden ingezet.

In beide benaderingen is er rekening mee gehouden dat de mate van zoutindringing via een schutsluis afhankelijk is van meerdere factoren: de geometrie van de sluis (hoe breed, diep en lang is de sluiscolk?), de operatie van de sluis (hoeveel schepen worden dagelijks geschut, hoelang blijven de sluisdeuren openstaan?) en de zoutgehaltenes en waterstanden aan de binnen- en buitenzijde ervan.

Onderzoeksresultaten en synthese

Bij beide benaderingen zijn aan de hand van genoemde case twee methodes bedacht en uitgewerkt om de zoutindringing bij sluisen als functionele prestatie te kwantificeren:

- Methode 1: Met behulp van de ZSF en een massabalans kan het evenwicht tussen het zoutgehalte aan de binnenzijde van een schutsluis en de afvoer van zoet water via de sluis worden berekend. Een toename van het zoutgehalte op die locatie kan hierdoor worden vertaald in een hoeveelheid extra afvoer van zoet water via de schutsluis die nodig zou zijn om het zoutgehalte in het achterliggende watersysteem gelijk te houden.
- Methode 2: Met het ZoutTransportmodel (ZTM) is een bakjesmodel ontwikkeld dat, gebruikmakend van de ZSF en de SSF, veranderingen in het zoutgehalte in voorhavens en aangrenzende kanalen op grotere afstand van de aanwezige schut- en spuisluizen kan kwantificeren.

Met behulp van deze methodes kan op basis van deze parameters de (huidige) functionele prestatie worden bepaald, en vervolgens de wijze waarop de functionele prestatie verandert in de tijd als gevolg van bijvoorbeeld zeespiegelstijging of van een socio-economische trend zoals een toename van het scheepvaartverkeer. Daarnaast kunnen de gevolgen van maatregelen die getroffen worden voor het beperken van zoutindringing of juist ten behoeve van een andere kerntaak van het watersysteem, snel doorgerekend worden. De ontwikkelde methodes kunnen daardoor ingezet worden in het proces om weloverwogen keuzes te maken op het gebied van zoutindringing. Honderden variaties in de invoerparameters kunnen namelijk in enkele seconden doorgerekend worden.

Evaluatie en vooruitblik

De ontwikkelde methodes zijn beschikbaar en inzetbaar. Het ZoutTransportmodel wordt bijvoorbeeld al toegepast op verschillende sluiscomplexen en watersystemen. Ook de Zeesluisformulering, die onderdeel is van beide ontwikkelde methodes en ook ontwikkeld is in het KpNK (2017-2020), wordt inmiddels onder andere toegepast in het Kennisprogramma Zeespiegelstijging en om randvoorwaarden te genereren voor 3D-modellen.

Functionele prestatie (algemeen, zout en biodiversiteit)

Kwantificering van de functionele prestatie van sluisen met een zoutbeheerfunctie



 enabling delta life



KENNISPROGRAMMA
NATTE KUNSTWERKEN



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Functionele prestatie (algemeen, zout en biodiversiteit)

Kwantificering van de functionele prestatie van sluizen met een zoutbeheerfunctie

Auteur(s)

Sam Majjvis

Tom O'Mahoney

Otto Weiler

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	7
1.1	Zoutindringing	7
1.2	Leeswijzer	8
2	Functionele prestatie	9
2.1	Eisen en wensen	9
2.2	Drivers	10
2.2.1	Klimaatdrivers	10
2.2.2	Socio-economische drivers	10
2.2.3	Beleidsmatige drivers	11
2.3	Maatregelen, varianten en oplossingsrichtingen	11
2.4	Kwantificeren van de functionele prestatie	11
3	Kwantificeren van de functionele prestatie	12
3.1	Methode Zeesluisformulering (ZSF) en massabalans	13
3.1.1	Achtergrondinformatie en resultaat	13
3.1.2	Praktisch stappenplan	16
3.2	Methode ZoutTransportModel (ZTM)	18
3.2.1	Achtergrondinformatie en resultaat	18
3.2.2	Praktisch stappenplan	20
3.3	Visualisatie van functionele prestatie	22
4	Afweging van maatregelen	26
4.1	Maatregelen om zoutindringing te bestrijden	26
4.1.1	Schutoperatie	26
4.1.2	Bellenschermen	28
4.1.3	Spoelen	29
4.1.3.1	Spoelen via spuisluis of gemaal	29
4.1.3.2	Spoelen via de schutkolk	30
4.1.3.3	Selectieve onttrekking	30
4.1.4	Drempels	31
4.1.4.1	Drempels in het sluishoofd	31
4.1.4.2	Drempels in het spuikanaal	31
4.2	Maatregelen met gevolgen voor zoutindringing	31
4.2.1	Vlot en veilig vaarwegverkeer: Afmetingen	32
4.2.2	Schoon en gezond water: Aanleg vismigratiemiddelen, visvriendelijk spuibehoor en natuurlijke zoet-zoutovergangen	32
5	Conclusie	34
6	Referenties	35

A	Uitwerking ZSF en massabalans	37
B	Uitwerking ZTM Noordersluis	39
C	Uitgangspunten modulaire opbouw Zouttransportmodel (ZTM)	44
C.1	Toepassing	44
C.2	Modulaire opbouw en transporten	46
C.3	Lijst van symbolen	52
C.4	Massatransporten voor de verschillende cases	53
D	Ontwikkeling Spuisluisformulering (SSF)	57
D.1	Waterstandsveranderingen in de bakjes	57
D.1.1	Bestaande module: bakjes	57
D.1.2	Verandering van volume bakje – enkel bakje	58
D.1.2.1.	Opgaand tij	58
D.1.2.2.	Neergaand tij	59
D.1.3	Verandering van volume bakje – twee bakjes	59
D.1.3.1.	Opgaand tij	60
D.1.3.2.	Neergaand tij	60
D.1.4	Kanttekeningen bij deze methode	61
D.2	Afvoerberekeningen binnen de SSF	61
D.3	Selectieve onttrekking	62
D.4	Lekkage door de schuiven (Lekmodule)	62
D.5	Zoutlek door visvriendelijk zoutbeheer (Vismodule)	62
D.6	Samenvatting modules SSF	62

1 Introductie

Veel natte kunstwerken bereiken in de komende decennia het einde van hun levensduur (Rijkswaterstaat, 2022). In het Kennisprogramma Natte Kunstwerken (KpNK) ontwikkelen en bundelen Deltares, MARIN, TNO en Rijkswaterstaat daarom de kennis die nodig is om de taak om deze verouderende kunstwerken te Vervangen of Renoveren (de VenR-opgave) op een efficiënte, kostenbesparende en toekomstbestendige wijze aan te pakken.

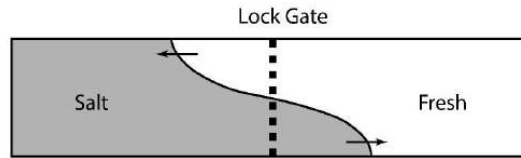
De functionele prestatie van een kunstwerk geeft aan in welke mate een kunstwerk presteert onder de functionele eisen die aan dat kunstwerk gesteld worden. Door de functionele prestatie te kwantificeren kan een beeld worden gevormd van de mate waarin een kunstwerk zijn functies kan vervullen, zowel in de huidige situatie als onder een veranderende toekomst. Het voorliggende rapport is een verdiepende rapportage over de functionele prestatie van sluizen met een zoutbeheersfunctie. Een uitgebreide algemene beschrijving van het begrip functionele prestatie is beschikbaar in KpNK (2024d). Functionele prestatie is ook onderdeel van de binnen het KpNK-ontwikkelde, iteratieve werkwijze om het VenR-proces te doorlopen (KpNK, 2024a).

1.1 Zoutindringing

Er zijn veel sectoren die belang hebben bij voldoende zoetwaterbeschikbaarheid: drinkwater, ecologie, landbouw, visserij, scheepvaart, recreatie en industrie (Kerstma, Kolkman, & Regeling, 1994). Zoutindringing heeft nadelige gevolgen voor het gebruik van water en waterwegen door deze sectoren en zorgt, met name tijdens droogte, voor extra druk op de zoetwaterbeschikbaarheid vanwege de doorspoelbehoefte. Door het schutten van schepen en lekkage via spuisluizen zal echter toch zout in zoete wateren terecht komen. Eén aspect van de functionele prestatie van sluizen is daarom het beperken van zoutindringing. De focus van deze rapportage ligt bij schutsluizen, maar ook enkele aspecten van zoutindringing bij spuisluizen worden benoemd in de verschillende hoofdstukken.

Zoutindringing is een natuurlijk proces in estuaria en riviermondingen. Het dichtheidsverschil tussen het zee- en rivierwater zorgt voor een landwaartse drukgradiënt die het zoute water landinwaarts laat stromen. Omdat zout water zwaarder is dan zoetwater stroomt het langs de bodem. De scheiding tussen zout- en zoetwater verschuift in een estuarium afhankelijk van het getij en de hoeveelheid rivierafvoer. Door kunstwerken als schut- en spuisluizen op de grens van zoet en zout water ontstaat er echter een harde scheiding.

Voor schutsluizen geldt dat iedere keer dat een schip een zeesluis passeert er een hoeveelheid zout water wordt getransporteerd die het zoetwatersysteem binnendringt: als de deuren open staan naar de zee vult de kolk zich met zout water, en als de deuren vervolgens open staan naar de binnenzijde stroomt dit zoute water het zoete water in, en vult de kolk zich weer met zoet water. Ook tijdens het nivelleerproces kan zouttransport plaatsvinden indien de schutsluis van de (zoute) kolk naar de zoete zijde van de sluis genivelleerd wordt. De grote dichtheidsgradiënt die door de harde scheiding ontstaat tussen beide zijden van de sluis zorgt ervoor dat de zouttong (zie Figuur 1.1) verder landinwaarts trekt (bij het schutten van schepen) dan bij een geleidelijke overgang tussen zout en zoet met hetzelfde dichtheidsgradiënt. In periodes van droogte en lage afvoeren trekt het zoute water nog verder landinwaarts.



Figuur 1.1: Schematische weergave van een kolkuitwisseling. De stippe lijn geeft de initiële positie van de geopende sluisdeur weer (PIANC, 2021).

Kunstwerken op zoet-zoutovergangen die in de vorige eeuw zijn aangelegd voldoen in de toekomst mogelijk niet meer aan de huidige eisen en moeten daarom mogelijk worden vernieuwd. Dit kan komen door veroudering van de constructie, veranderingen in het klimaat, veranderende gebruiksfuncties maar ook wet- en regelgeving. Bij vernieuwing van een kunstwerk op een zoet-zoutovergang is het van belang dat er weloverwogen keuzes gemaakt worden met betrekking tot zoutindringing.

1.2 Leeswijzer

In dit rapport wordt in Hoofdstuk 2 toegelicht welke elementen nodig zijn om tot de gekwantificeerde functionele prestatie voor de functie zoutbeheer komt. Deze elementen zijn onderdeel van zowel de iteratieve werkwijze (KpNK, 2024a) als het stappenplan Functionele Prestatie (KpNK, 2024d). Vervolgens wordt in Hoofdstuk 3 in detail toegelicht welke informatie verzameld moet worden en hoe de ontwikkelde methodes voor het kwantificeren van de functionele prestatie toegepast kunnen worden. In Hoofdstuk 4 worden de afwegingen die mogelijk gemaakt moeten worden bij het vervangen of renoveren van een kunstwerk op een zoet-zoutovergang en de maatregelen die getroffen kunnen worden beschreven. Tot slot bestaat Hoofdstuk 5 uit een conclusie. In de bijlagen worden de modelontwikkelingen die in het KpNK zijn uitgevoerd uitgebreid behandeld.

2 Functionele prestatie

De functionele prestatie is de mate waarin een kunstwerk presteert of voldoet aan de gestelde functionele eisen. Als het beschouwde kunstwerk niet aan de functionele eisen voldoet treedt einde functionele levensduur op. In dit hoofdstuk wordt stap voor stap uiteengezet hoe de functionele prestatie voor de functie zoutbeheer gekwantificeerd kan worden: welke eisen en wensen (kunnen) gelden, welke drivers invloed hebben op zoutbeheer, mogelijke oplossingsrichtingen en tot slot de berekeningen. Een uitgebreide algemene beschrijving van het begrip functionele prestatie en bijbehorende aspecten zoals eisen, wensen en drivers zijn beschikbaar in KpNK (2024d; 2024c), het voorliggende rapport gaat specifiek in op de functionele prestatie van sluizen met een zoutbeheerfunctie.

2.1 Eisen en wensen

Nadat alle functies van het beschouwde kunstwerk in kaart gebracht zijn en gebleken is dat zoutbeheer tot één van die functies behoort, is de volgende stap om de eisen en wensen voor deze functies en de beschouwde kunstwerken in kaart te brengen (KpNK, 2024d). De uitdaging bij het bepalen van de functionele prestatie van sluizen voor de functie zoutbeheer is dat de eisen worden gesteld aan het achterliggende watersysteem en niet aan het kunstwerk zelf. Op een bepaalde afstand van de sluis kunnen namelijk signaal- of interventiewaarden gelden voor verschillende doeleinden, zoals drinkwater voor de mens en verschillende soorten vee, koelwater voor industrie en irrigatiewater voor groente-, fruit-, boom- en bollenteelt. De hoeveelheid zout die binnenkomt bij het kunstwerk is echter bepalend voor de zoutgehaltenes in het systeem.

Om die reden is er altijd een vertaalslag nodig tussen de eisen die gesteld worden aan het watersysteem (chlorideconcentratie in mg Cl⁻ per liter) en de grootheden die direct bij de sluis berekend kunnen worden (bijvoorbeeld de zoutindringing uitgedrukt in kg/s). Voor schutcomplexen kan de eis aan het zoutgehalte daarnaast niet los worden gezien van de beschikbare hoeveelheid zoetwater waarmee het zout dat naar binnenkomt weer wordt teruggespoeld. Over de verdeling van zoetwater zijn veelal ook afspraken gemaakt (bijv. in Waterakkoorden) (Deltares, 2013). Enkele manieren om deze vertaalslag te maken worden besproken in Paragraaf 3.

Enkele voorbeelden van eisen die gesteld worden aan zoutgehaltenes in het watersysteem zijn weergegeven in Tabel 2.1. Sommige van deze voorbeelden laten ruimte voor interpretatie, bijvoorbeeld over de diepte waarop de eis geldt. Idealiter laten de eisen die gesteld worden aan zoutgehaltenes geen ruimte voor interpretatie, en daarom moeten de volgende aspecten in ieder geval expliciet zijn vastgelegd (Deltares, 2013):

- De periode waarin de eis wordt gesteld;
- De middeling van de eis over een bepaalde tijd (bijv. gemiddeld over het hele jaar);
- De locatie in de waterkolom (bijv. dieptegemiddeld of op een specifieke diepte).

Tabel 2.1: Voorbeelden van eisen die gesteld worden aan het zoutgehalte in het watersysteem of zoutschadedrempels voor enkele verschillende sectoren en doelen.

Eis	Toepassing	Bron
≤ 150 mg Cl ⁻ per liter, gemiddeld over het jaar	Drinkwater (mens)	(KWR, 2017)
≤ 101 mg Cl ⁻ per liter	Aardbeien (gietwater)	(Praktijkonderzoek Plant & Omgeving BV, 2007)
≤ 288 mg Cl ⁻ per liter	Tomaten (gietwater)	(Praktijkonderzoek Plant & Omgeving BV, 2007)
≤ 300 mg Cl ⁻ per liter	Bloembollen	(Rijkswaterstaat Waterdienst, 2009)
≤ 150 mg Cl ⁻ per liter, zomerhalfjaargemiddelde (april t/m september)	Goede ecologische toestand (GET) voor KRW-Rivieren R5, R6, R7, R10, R12, R14, R15, R16, R18	(Van der Molen, Boers, & Evers, 2006)
≤ 200 mg Cl ⁻ per liter, zomerhalfjaargemiddelde (april t/m september)	Goede ecologische toestand (GET) voor KRW-Meren M5, M14, M20, M21, M23, M27	(Van der Molen, Boers, & Evers, 2006)

Een alternatieve methode om in afwezigheid van eisen naar de functionele prestatie te kijken is door het toepassen van wensen (wat zou een mogelijke, wenselijke streefwaarde zijn?) of door de huidige situatie als referentie te nemen, deze referentie vervolgens te vergelijken met een toekomstscenario en te laten zien hoe sterk de functionele prestatie verandert.

2.2 Drivers

Externe ontwikkelingen waar een kunstwerk in de toekomst mee te maken kan krijgen worden 'drivers' genoemd. Deze drivers kunnen ervoor zorgen dat een kunstwerk in de toekomst niet meer aan de gestelde functionele eisen voldoet. Onder de drivers maken we vaak onderscheid tussen de effecten van klimaatverandering en autonome processen, socio-economische ontwikkelingen en veranderingen in beleid en wet- en regelgeving.

2.2.1 Klimaatdrivers

De klimaatdrivers die belangrijk zijn voor kunstwerken met een zoutbeheerfunctie zijn zeespiegelstijging en een afname van rivierafvoeren. Zeespiegelstijging zorgt via de hogere waterstand aan de zeezijde van de sluis voor een toename in de hoeveelheid zout dat naar binnen komt. Daarnaast zorgt een afname in de rivierafvoer ervoor dat er steeds vaker niet genoeg water beschikbaar is om het zoute water weg te spoelen. Er is hierdoor ook sprake van een zekere interactie tussen deze twee drivers: er mag minder zout worden doorgelaten omdat er niet voldoende spoelwater beschikbaar is, maar de hoeveelheid zout dat binnenkomt neemt toe door de stijgende zeespiegel. Een extra aandachtspunt bij zeespiegelstijging is dat voor waterafvoer uiteindelijk over moet worden gegaan van spuien onder vrij verval (spuisluis) naar pompen (gemaal), wat verhoogde energiekosten met zich meebrengt. Om in te schatten in welke mate of op welke termijn deze drivers de functionele prestatie voor zoutbeheer beïnvloeden zijn verschillende scenario's beschikbaar die regulier geüpdatet worden, zoals de KNMI- (KNMI, 2023) of Deltascenario's (Deltares, 2024).

2.2.2 Socio-economische drivers

De belangrijkste socio-economische ontwikkeling met invloed op zoutindringing is economische welvaart en de scheepvaarttrends die daarmee gepaard gaan. Een toename van de schutfrequentie zorgt namelijk direct voor meer zoutindringing. Deze toename kan ontstaan door een toename in het aantal schepen dat wil passeren, maar ook wanneer de passerende schepen steeds groter worden omdat er in dat geval minder schepen tegelijk in de kolk passen. Het schutten met een zo vol mogelijke kolk is daarbij wel wenselijk omdat in het deel van de sluisolk dat bezet wordt door een schip geen zout kan zitten.

Steeds grotere schepen kunnen ook gevolgen hebben voor de scheepvaartseisen die in de toekomst aan een nieuwe of vernieuwde sluis gesteld gaan worden, omdat er bijvoorbeeld meer lengte, breedte of diepgang nodig is in de sluiscolk. De afmetingen van de sluiscolk hebben een grote invloed op de hoeveelheid zoutindringing en zorgen voor een afname van de functionele prestatie voor zoutbeheer.

Socio-economische ontwikkelingen zijn ook onderdeel van de Deltascenario's (Deltares, 2024). De expliciete gevolgen voor de scheepvaartintensiteit bij een specifiek sluiscomplex zijn nog niet direct af te leiden uit deze scenario's. Dit vereist over het algemeen een aanvullende studie.

2.2.3 Beleidsmatige drivers

Er kan ook sprake zijn van beleidsmatige drivers zoals veranderingen in de eisen die gesteld worden aan de toegestane zoutgehalten in het achterland, welke gevolgen kunnen hebben voor de maximale hoeveelheid zout die door de sluisen binnen mag dringen. Voorbeelden hiervan zijn de overstap op zilte teelt in landbouwgebieden die onder druk staan door verzilting of het accepteren van een hoger zoutgehalte bij een innamepunt voor drinkwater door aanpassingen aan de zuiveringsinstallaties (bijv. het toepassen van omgekeerde osmose).

2.3 Maatregelen, varianten en oplossingsrichtingen

Het bepalen van de functionele prestatie kan helpen in het ontwikkelen van maatregelen of varianten en het bepalen van de uiteindelijke oplossingsrichting. Maatregelen of varianten die overwogen worden bij de vernieuwing van een sluis kunnen de functionele prestatie voor zoutbeheer op verschillende manieren beïnvloeden. Maatregelen en varianten kunnen bestaan uit (combinaties van) aanpassingen aan de geometrie van de sluis of het plaatsen van een constructie om de zoutindringing te mitigeren (bijvoorbeeld bellenschermen, een zoutscherm of drempels). Naast constructieve (vernieuwings-)aanpassingen kan een ander sluisbeheer een grote rol spelen in het beperken van de zoutindringing.

In Hoofdstuk 4 wordt dieper ingegaan op enkele mogelijke aanpassingen waarvan sprake kan zijn bij vernieuwing van een sluis op een zoet-zoutovergang. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen keuzes die gemaakt worden ten behoeve van een andere functie, zoals scheepvaart, en keuzes die specifiek gemaakt worden om de zoutindringing te beperken.

2.4 Kwantificeren van de functionele prestatie

Wanneer de eisen en/of wensen, drivers, en varianten en/of oplossingsrichtingen bekend zijn kan de functionele prestatie in de toekomstige situatie gekwantificeerd worden. Ook de huidige functionele prestatie kan worden bepaald – in dat geval is een driver of een alternatief niet noodzakelijk en kan puur op basis van de eisen en/of wensen, de huidige geometrie en de huidige omstandigheden berekend worden hoe goed het kunstwerk op dit moment presteert. Er zijn in het KpNK twee deterministische methodes uitgewerkt om de functionele prestatie van sluisen op een zoet-zoutovergang te kwantificeren. Deze methodes worden beide uitgebreid toegelicht in Hoofdstuk 3 en bijlagen A en B. In het KpNK zijn ook voor enkele andere functies methodes opgesteld. Deze methodes worden uitgebreid behandeld in KpNK (2024d).

3 Kwantificeren van de functionele prestatie

In het KpNK wordt onderscheid gemaakt tussen 'light', 'medium' en 'heavy' methodes voor het kwantificeren van de functionele prestatie, waarbij de mate van detail en de benodigde rekenkracht toeneemt van light naar heavy (KpNK, 2024d). In het KpNK (periode 2021-2024) ligt de focus op medium-toepassingen. Een voorbeeld van een light-toepassing is het maken van een expertoordeel op basis van eenvoudig beschikbare informatie. Heavy toepassingen zijn bijvoorbeeld numerieke 3D-modellen die veel rekenkracht vereisen. De medium-methodes zitten hier tussenin en bestaan over het algemeen uit snelle rekenmodellen en formules die toegepast worden op een datareeks. Er zijn in het KpNK twee medium deterministische methodes uitgewerkt om de functionele prestatie van sluizen op een zoet-zoutovergang te kwantificeren:

1. Zeesluisformulering (ZSF) met massabalans

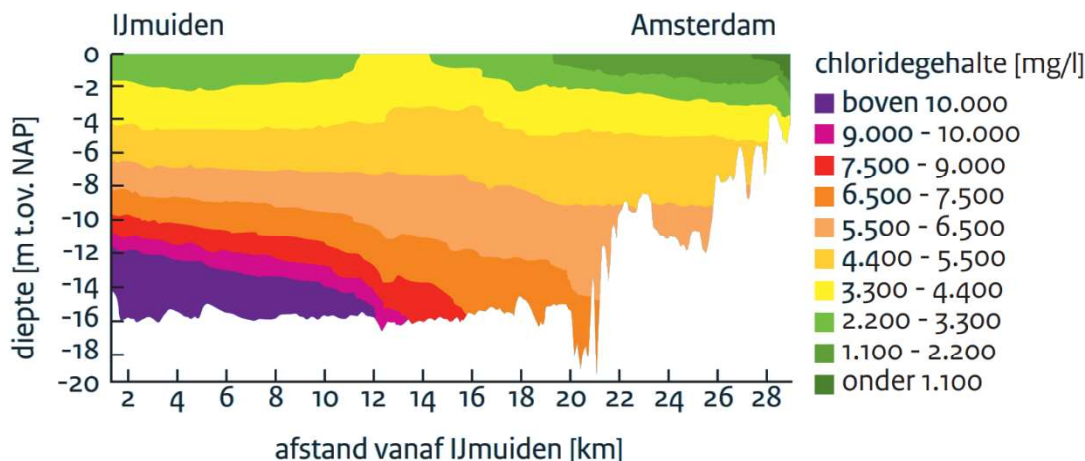
Met behulp van de zeesluisformulering¹ (ZSF) en een massabalans kan het evenwicht tussen het zoutgehalte aan de binnenzijde van een sluis en de afvoer van rivierwater langs de sluis worden berekend. Met deze berekening kan de verschuiving van het evenwicht direct aan de binnenzijde van de sluis onder invloed van drivers of maatregelen beschouwd worden en kunnen kansrijke maatregelen afgewogen worden voor schutsluizen die grenzen aan een kanaal.

2. ZoutTransportModel (ZTM)

Het ZoutTransportmodel (ZTM) is een bakjesmodel dat de veranderingen in het dieptegemiddelde zoutgehalte in voorhavens en aangrenzende kanalen op grotere afstand van de sluis kan kwantificeren. Deze aanpak maakt naast bakjes gebruik van de ZSF en de spuisluisformulering (SSF).

Beide methodes geven een eerste orde inzicht in de functionele prestatie en zijn een ruwe schematisatie van de werkelijkheid. Bij het ontwikkelen van deze methodes voor de functie zoutbeheer is gebruik gemaakt van de Noordersluis in IJmuiden (en het systeem Noordzeekanaal – Amsterdam-Rijnkanaal, zie Figuur 3.1) als casus. Met beide methodes kan in korte tijd veel verschillende berekeningen worden gedaan. De eerste methode vereist minder inzichten en systeemkennis om een som op te zetten (zie het stappenplan in Paragraaf 3.1.2), maar is alleen geschikt voor sluizen die grenzen aan een kanaal (bijvoorbeeld de sluizen bij IJmuiden). De tweede methode vereist meer inspanning (zie het stappenplan in Paragraaf 3.2.2), maar biedt de mogelijkheid om ook de invloed van zoutindringing op andere type systemen (bijvoorbeeld de sluizen in de Afsluitdijk) te kwantificeren.

¹ [ZSF documentation — libzsf documentation](#)



Figuur 3.1: Verloop van het chloridegehalte tussen het sluiscomplex in IJmuiden en Amsterdam (Bron: Infographic Operationeel Watermanagement Amsterdam-Rijnkanaal en Noordzeekanaal).

3.1 Methode Zeesluisformulering (ZSF) en massabalans

De Zeesluisformulering (ZSF) is een stelsel van vergelijkingen dat kan worden gebruikt om de zoutindringing door schutsluizen te berekenen. De ZSF is ontwikkeld in het KpNK (2017-2020) en wordt inmiddels onder andere toegepast in het Kennisprogramma Zeespiegelstijging en om randvoorwaarden te genereren voor 3D modellen. In het huidige KpNK (2021-2024) is de ZSF ingezet om de functionele prestatie van zeesluizen te kwantificeren.

3.1.1 Achtergrondinformatie en resultaat

Met deze methode kan met behulp van de ZSF en één aanvullende formule (vergelijking 3.1) die de massabalans beschrijft de verschuiving van het evenwicht onder invloed van drivers of maatregelen beschouwd worden. Ook kan worden gekwantificeerd wat de gevolgen zijn van het implementeren van kansrijke alternatieven. De ZSF is een stelsel van vergelijkingen dat kan worden gebruikt om de zoutindringing door schutsluizen te berekenen op basis van de geometrie, randvoorwaarden en sluisoperatie van een zeesluis.

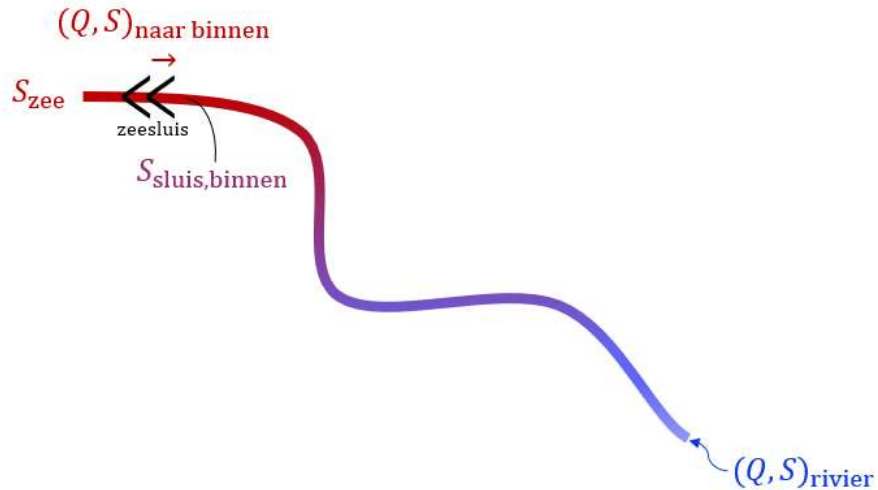
De ZSF-berekeningen zijn in dit geval cyclusgemiddeld, dat wil zeggen dat de normaal gesproken tijdsafhankelijke randvoorwaarden zijn gemiddeld over een periode van 24 uur en dat de transporten van zout en water gemiddeld worden over de cyclus. De volgende parameters moeten minimaal bekend zijn om deze methode toe te passen:

- Geometrie: sluiscolklengte, -breedte en -diepte en drempelhoogtes
- Operatie: gemiddelde schutfrequentie per 24 uur, tijd om de sluisdeuren te openen en de nivelleertijd
- Randvoorwaarden: gemiddelde (of evenwichts-)waterstanden en zoutgehaltes aan de meer- en zeezijde van de zeesluis, zoutgehalte van het rivierdebiet.

Om inzicht te krijgen in een specifieke situatie, bijvoorbeeld de evenwichtsverschuiving tijdens droogte, kan er voor gekozen worden om bovenstaande gemiddelde (of evenwichts-) randvoorwaarden te baseren op een droge periode. De benodigde afvoer Q_{rivier} om een evenwichtssituatie met zoutgehalte $S_{\text{sluis,binnen}}$ direct aan de (zoete) binnenzijde van de sluis van de zeesluis te behouden kan worden beschreven als (Deltares, 2020a):

$$Q_{\text{rivier}} = Q_{\text{naar binnen}} \frac{S_{\text{naar binnen}} - S_{\text{sluis,binnen}}}{S_{\text{sluis,binnen}} - S_{\text{rivier}}} \quad (3.1)$$

Deze vergelijking beschrijft dat het 'tekort' aan zout van het instromende rivierdebiet (ten opzichte van het zoutgehalte direct aan de binnenzijde van de sluis) gelijk is aan het 'overschot' aan zout in het debiet vanuit de sluis. In deze methode maken we gebruik van twee van de uitvoerparameters van de ZSF: het zoutgehalte van het water ($S_{\text{naar binnen}}$) en het debiet ($Q_{\text{naar binnen}}$) dat van de zoute naar de zoete zijde verplaatst via de zeesluis. Alle benodigde parameters zijn weergegeven in Figuur 3.2.

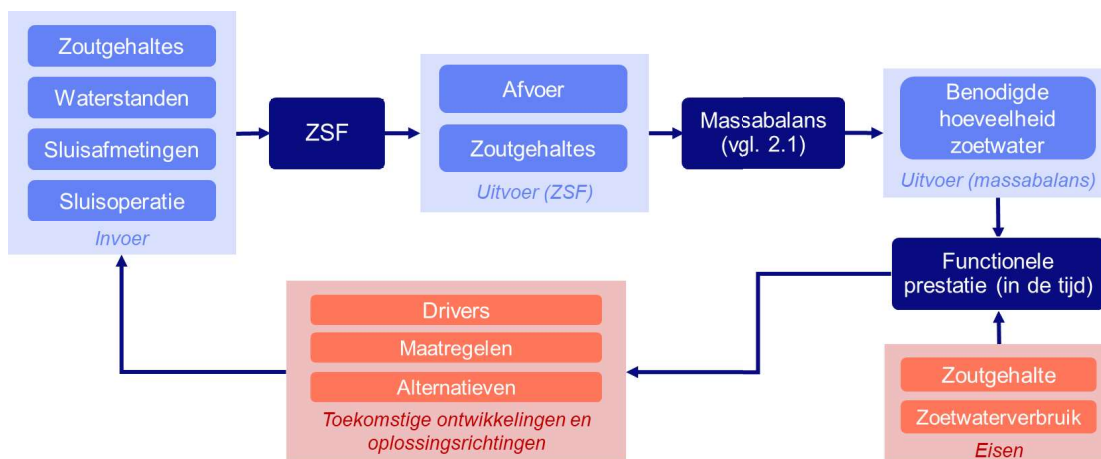


Figuur 3.2: Schematische weergave van de benodigde parameters om de balans tussen het zoutgehalte aan de binnenzijde van de sluis en de watervraag te kwantificeren.

In deze berekening moet een aanname worden gedaan van het zoutgehalte van het rivierwater S_{rivier} . Deze methode is door de inzet van deze massabalans alleen geschikt voor schutsluizen die direct grenzen aan een kanaal, zoals de sluizen in IJmuiden, Terneuzen of Farmsum (zie ook Bijlage A). De methode is bijvoorbeeld niet geschikt voor de sluizen in de Afsluitdijk omdat deze grenzen aan het IJsselmeer, waar het zoutgehalte in het afgevoerde water (via de spuisluizen) niet gelijk is aan het zoutgehalte in de voorhavens van de schutsluizen.

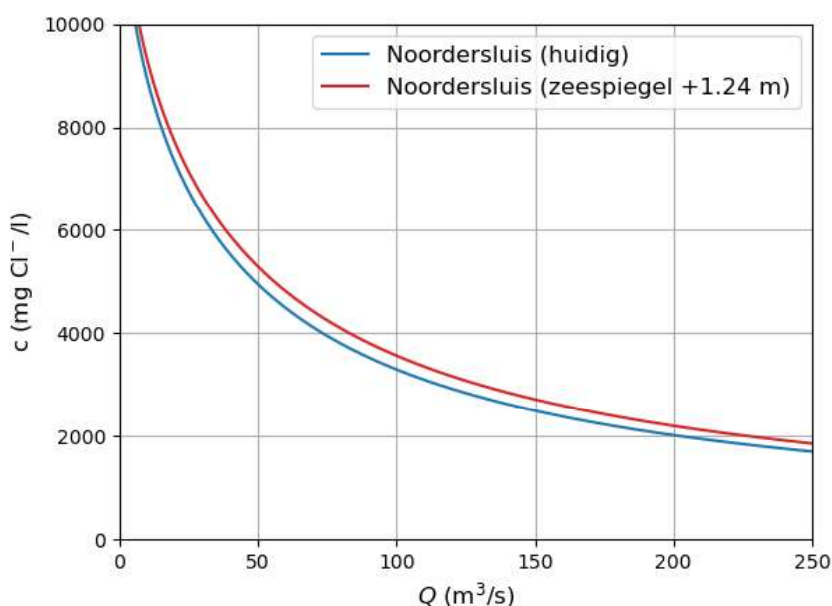
Deze methode kan op twee manieren ingezet worden: om verschuivingen in het evenwichtszoutgehalte vlak bij de sluizen te kwantificeren, of om de verschuiving in het evenwicht tussen zoutgehalte en de vraag naar zoetwater te kwantificeren.

De eerste optie is het beschouwen van de verschuiving in het evenwicht tussen het chloridegehalte aan de binnenkant van de sluis en de afvoer van rivierwater langs de sluis, en hoe dit evenwicht verschuift onder invloed van drivers.



Figuur 3.3: Schematische weergave van het berekenen van de functionele prestatie met de methode ZSF met massabalans. De rekeninvoer en -stappen zijn weergegeven in blauw, en de externe informatie waarop de kwantificering moet worden getoetst en/of aangepast in rood.

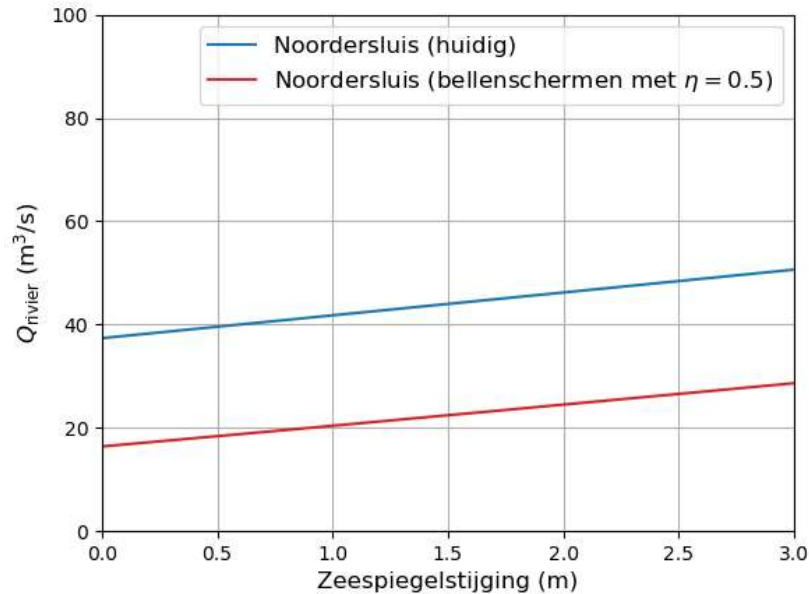
Een voorbeeld van deze methode is weergegeven in Figuur 3.4 op basis van de Noordersluis in IJmuiden onder invloed van zeespiegelstijging. Figuur 3.4 geeft het chloridegehalte aan de binnenzijde van de sluis bij een bepaalde afvoer over het kanaal. Met behulp van de ZSF kan ook de invloed van mitigerende maatregelen, zoals de inzet van bellenschermen, hogere drempels en kortere deur-opentijden worden gekwantificeerd. Ook overwegingen bij het ontwerpen van een sluiskolk qua sluiskolk lengte, -breedte en -diepte kunnen snel worden doorgerekend met deze methode.



Figuur 3.4: Verband tussen het chloridegehalte aan de binnenkant van en de afvoer van rivierwater langs de Noordersluis (blauw), en hoe dit evenwicht verschuift bij zeespiegelstijging (rood) op basis van KNMI'23 scenario Hoog in 2100 (KNMI, 2023).

De tweede manier om de methode in te zetten is door de toenemende vraag naar water te kwantificeren door het huidige evenwichtschloridegehalte als referentie te nemen. Onder invloed van drivers of maatregelen kan dan gekwantificeerd worden in hoeverre de vraag naar water toe- of juist afneemt. In Figuur 3.5 wordt de beschreven methode toegepast op de Noordersluis in IJmuiden met en zonder bellenschermen. In Figuur 3.5 is zichtbaar dat de inzet

van bellenschermen in dit geval resulteert in ongeveer de halvering van het zoutgehalte direct aan de binnenzijde van de sluis.



Figuur 3.5: Watervraag om het huidige evenwichtschloridegehalte aan de binnenzijde van de Noordersluis te behouden bij een stijgende zeespiegel zonder (blauw) en met (rood) bellenschermen.

Met name bij een gebrek aan eisen kan het zinvol zijn om de toe- of afname van de watervraag uit te drukken als percentuele toe of -afname ten opzichte van het huidige evenwicht. Op deze manier wordt de grootte van de verandering inzichtelijker (zie bijvoorbeeld Figuur 3.8).

3.1.2 Praktisch stappenplan

Onderstaand stappenplan beschrijft welke praktische stappen genomen moeten worden om de functionele prestatie te bepalen met behulp van de methode ZSF en massabalans. Bij elke stap worden enkele aandachtspunten benoemd. Functionele prestatie heeft als algemeen begrip niet één eenheid – deze kan verschillend zijn voor verschillende functies of toepassingen. In deze methode wordt de functionele prestatie uitgedrukt als het tekort aan zoetwater om het systeem voldoende zoet te houden. Vanwege de hoeveelheid aannames in de kwantificering van functionele prestatie voor zoutbeheer is het altijd aanbevolen om ter controle met een bredere groep experts naar de gemaakte aannames te kijken.

1. Achterhaal de dimensies en kenmerkende operatie van de sluis

- Informatie over sluisdimensies is beschikbaar via het Data Informatie Systeem Kunstwerken (DISK). Enkele openbare aanvullende bronnen zijn [Stichting Historische Sluizen en Stuwen Nederland](#) en [waterkaart.net](#). Merk op dat het voor zoutindringing gaat om de 'natte' afmetingen, niet de afmetingen die voor de scheepvaart gehanteerd worden.
- Het aantal schutcycli per 24 uur kan worden bepaald op basis van data uit het Informatie- en Volgstelsel voor de Scheepvaart (IVS). Dit gemiddelde kan worden bepaald op basis van enkele jaren maar bijvoorbeeld ook op basis van een seizoen, bijvoorbeeld om een worst-case scenario te bekijken waarin de (droge) zomer het meest relevant is.
- Nivelleertijd wordt op dit moment niet geregistreerd in het IVS. In Nederland is 8 tot 10 minuten gebruikelijk voor binnenvaartsluizen en kleine zeesluizen (vervallen van 2 tot 6 m), en 11 tot 15 minuten voor grote zeesluizen (vervallen tussen 1.5 en 5 m) (Rijkswaterstaat Bouwdienst, 2000). Ook de tijd

om de sluisdeuren te openen en sluiten moet worden geschat. Indien het sluiscomplex aangesloten is aan Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) zijn er mogelijk registraties van deurbewegingen beschikbaar.

- d. De ZSF maakt ook gebruik van een kalibratieparameter voor de deur-opentijden (c_{DOT}) die de gemiddelde deur-opentijd omzet in een representatievere deur-opentijd. Uit het aantal schutcycli per 24 uur (uit Stap 1b) volgt de gemiddelde tijd per cyclus. De helft daarvan is de tijd per schutting (één kant op). Door daar de tijd voor het nivelleren en de tijd voor het openen of sluiten van de deuren (uit Stap 1c) van af te trekken wordt de gemiddelde tijd dat de deuren open staan verkregen. Met deze tijd de zoutindringing berekenen resulteert over het algemeen in een te hoge zoutindringing. De representatieve tijd om mee te rekenen is kleiner omdat de schuttingen vaak (enigszins) zijn geconcentreerd in de daglichturen en op de doordeweekse dagen, en omdat schuttingen onregelmatig verlopen. Om tot een juiste inschatting te komen van de zoutindringing moet de gemiddelde deur-opentijd worden gereduceerd met de factor c_{DOT} om een representatieve deur-opentijd te vinden. Deze factor bedraagt voor een zeevaartsluis ca. 0.6 en voor een binnenvaartsluis ca. 0.35.

2. Vraag zoutgehalte-, waterstand en afvoerdata vlakbij de sluis op

- a. Een goede bron van zoutgehalte-, waterstand- en afvoerdata is het Landelijk Meetnet Water (LMW) via [Rijkswaterstaat Waterinfo \(rws.nl\)](https://www.rws.nl).
- b. Voor het zoutgehalte van de rivierafvoer kan een aanname gedaan worden, maar alternatief kan ook gebruik gemaakt worden van een gemiddelde (achtergronds)waarde op een (LMW-)locatie ver bovenstrooms en buiten de invloedssfeer van de sluis.

3. Bepaal de evenwichtswaarden vlakbij de sluis

- a. De in- en uitvoer van zoutgehaltes in de ZSF heeft de eenheid kg/m^3 . De beschikbare metingen zijn die van chlorideconcentratie (mg Cl^- per liter). Reken de meetresultaten daarom om met behulp van:

$$\text{kg m}^{-3} = 0.0018 \text{ mg Cl}^- \text{ per liter} \quad (3.2)$$

of een andere voor de locatie-passende omrekenformule.

- b. Bij het middelen kunnen een aantal keuzes worden gemaakt. Om een worst-case scenario te bekijken kan er voor worden gekozen om te middelen over een droog jaar of zelfs een droge maand. Om een gemiddelde situatie te bekijken is het goed om te middelen over een reeks van enkele jaren. Deze middeling moet aansluiten bepaalde gemiddelde aantal schutcycli (zie stap 1). Deze keuze hangt ook samen met de eisen die gesteld worden (zie Paragraaf 2.1 en Tabel 2.1).

4. Pas de ZSF toe voor de huidige situatie en berekende functionele prestatie

- a. De zeesluisformulering (ZSF) is open-source software die beheerd wordt op [GitHub](https://github.com). De code is geschreven in programmeertaal C en is voor de eindgebruiker aan te roepen via Python library *pyzsf*. Wanneer voor het eerst met *pyzsf* wordt gewerkt moet deze eerst geïnstalleerd worden met het commando *pip install pyzsf*. Er is eventueel ook een Excel wrapper beschikbaar. Uitgebreide documentatie van de ZSF software en de achterliggende theorie is beschikbaar op [Read the Docs](#). Hier zijn ook enkele [voorbeelden](#) beschikbaar die kunnen helpen bij het opzetten van een ZSF berekening.

- b. Bereken na het draaien van de ZSF het evenwicht tussen zoutgehalte en waterafvoer met behulp van vergelijking 3.1:

$$Q_{\text{rivier}} = Q_{\text{naar binnen}} \frac{S_{\text{naar binnen}} - S_{\text{sluis,binnen}}}{S_{\text{sluis,binnen}} - S_{\text{rivier}}}. \quad (3.1, \text{herhaald})$$

5. Verander de randvoorwaarden op basis van drivers en maatregelen

- a. Drivers: pas de waterstand aan de zeezijde aan (zeespiegelstijging), het spui- of pompdebiet (veranderende rivierafvoer), aantal schutcycli of scheepsvolume (toename scheepvaart door economische welvaart)
- b. Maatregelen: spoeldebieten, aangepaste deur-opentijden, bellenschermen, andere kolk lengte, -breedte of -diepte, drempels

6. Pas de ZSF toe voor de toekomstige situatie en bereken de functionele prestatie

- a. Herhaal Stap 4 met de nieuwe randvoorwaarden. Bereken na het draaien van de ZSF de verandering in het evenwicht tussen zoutgehalte en waterafvoer met behulp van vergelijking 3.1.
- b. Geef de functionele prestatie weer als functie van tijd met de huidige situatie (stap 4) als uitgangspunt.

7. Bepaal de beslismomenten in de tijd

- a. Bepaal aan de hand van de drivers op welk moment (bijvoorbeeld bij welke mate van zeespiegelstijging) de functionele prestatie van het huidige kunstwerk of een alternatief niet meer voldoet aan de eisen of wensen.
- b. Bepaal aan de hand van bijvoorbeeld de KNMI- (KNMI, 2023) of Deltascenario's (Deltares, 2024) het daarbij horende moment in de tijd

3.2 Methode ZoutTransportModel (ZTM)

Na de ontwikkeling van de ZSF is in het KpNK (2021-2024) gewerkt aan de ontwikkeling van de Spuisluisformulering (SSF) om ook rekening te houden met het spuien van het zoute water en een eventueel zoutlek. De ontwikkelingen op het gebied van de SSF zijn samengevat in Bijlage D. Met behulp van deze formuleringen en de schematisatie van watersystemen in 'bakjes' is het Zouttransportmodel (ZTM) ontwikkeld. Net als de ZSF wordt het ZTM inmiddels ingezet in het Kennisprogramma Zeespiegelstijging en om randvoorwaarden te genereren voor 3D-modellen. Op het moment van schrijven van dit rapport is het ZTM nog continu in ontwikkeling door Deltares: de kwantificering die in deze rapportage beschreven wordt betreft de eerste versie van het ZTM. Deze versie is uitgebreid beschreven in Bijlage C.

3.2.1 Achtergrondinformatie en resultaat

Voor het beschrijven van de functionele prestatie voor de functie zoutbeheer kan ook gebruik worden gemaakt van (een voorlopige² versie van) het ZoutTransportModel (ZTM). Het ZTM is een deterministisch bakjesmodel dat de ZSF met de Spuisluisformulering (SSF) en een bakjesmodule combineert. Dit model is met name geschikt om een inzicht te geven in trends en verschuivingen in het evenwicht tussen aan- en afvoer van water en het daarin aanwezige zout bij veranderingen in sluisontwerp en -operatie en onder invloed van drivers. Het ZTM wordt ontwikkeld als aanvulling op de ZSF omdat de ZSF alleen de zoutlast door een schutsluis berekent (zoutmassa per tijdseenheid), en niet de doorwerking van de zoutlast in aangrenzende voorhavens, kanalen of andere waterlichamen ('bakjes' in dit model), terwijl dat juist de plaatsen zijn waar eisen gesteld worden aan zoutgehalten (zie Paragraaf 2.1).

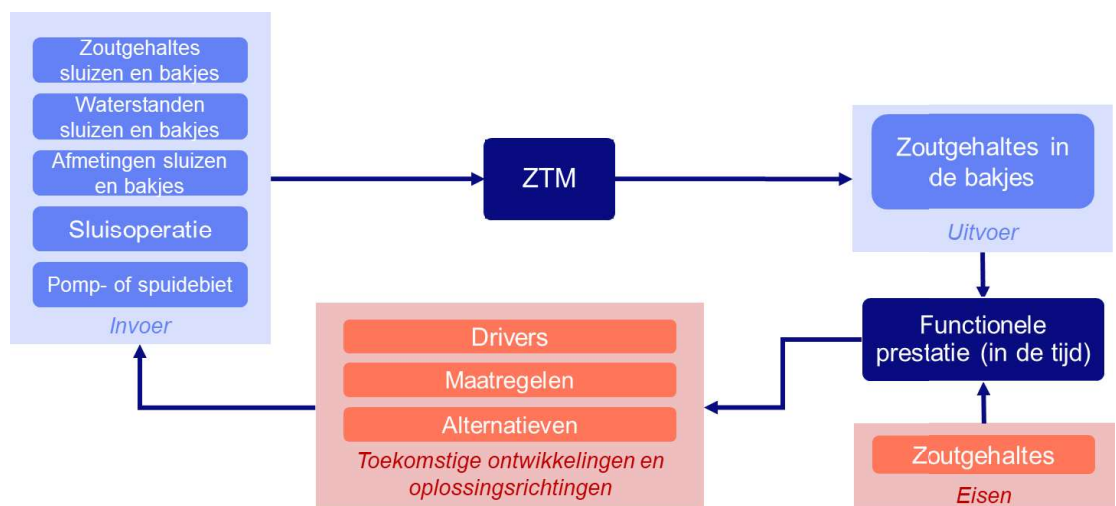
² Het ZTM is continu in ontwikkeling door Deltares. De versie van het ZTM waarmee de hier beschreven methodeontwikkeling is uitgevoerd (maart 2023) wordt beschreven in Bijlage C.

De volgende parameters moeten minimaal bekend zijn om deze methode toe te passen:

- Geometrie: sluiscolklengte, -breedte en -diepte en drempelhoogtes, en de lengte, breedte en diepte van de bakjes
 - In tegenstelling tot de eigenschappen van de sluiscol zijn de eigenschappen van de bakjes niet op voorhand beschikbaar en moeten daarom gekozen worden door de modelleur.
- Operatie: gemiddelde schutfrequentie per 24 uur, tijd om de sluisdeuren te openen en de nivelleertijd
- Randvoorwaarden: gemiddelde (of evenwichts-)waterstanden en dieptegemiddelde zoutgehalten aan de meer- en zeezijde van de zeeluis en in de bakjes, spui- of pompdebiet

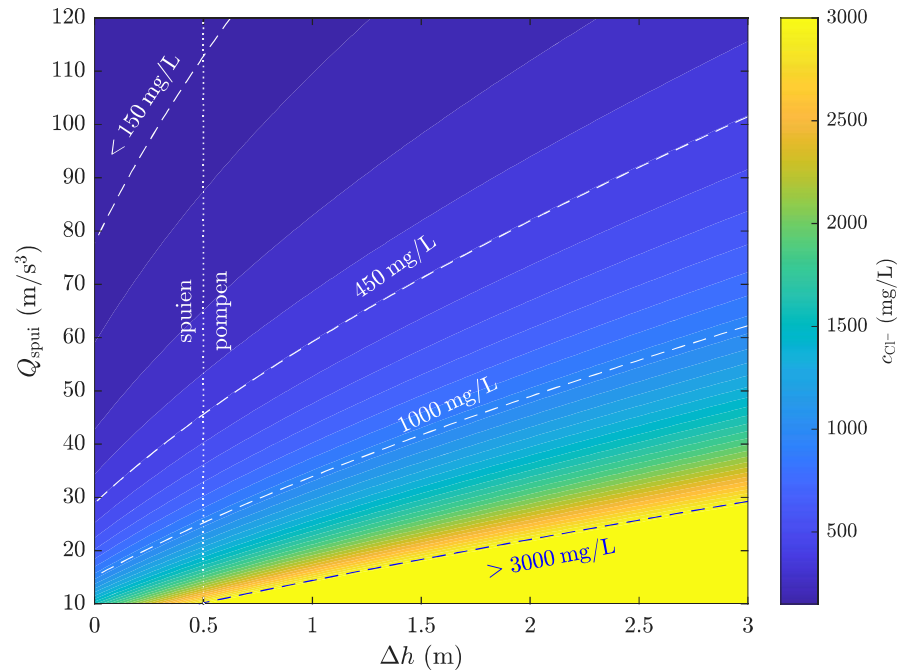
Met opzet is het bakjesmodel erg eenvoudig opgezet: we hanteren een grove schematisatie van de werkelijkheid om zo efficiënte en compacte berekeningen te kunnen doen. Dat betekent dat we met dit bakjesmodel geen nauwkeurige uitspraken kunnen doen over het zoutgehalte op één specifiek punt. Het ZTM kan wel een indicatie geven van bijvoorbeeld de verschuiving in het evenwicht in het systeem door verandering in de randvoorwaarden. Het bakjesmodel berekent dan wat er gebeurt in het beschreven gebied, waarmee er een indicatie is van de te verwachten verandering bij een meetpunt.

Tussen de bakjes van het model vinden meerdere vormen van transport plaats: advectief door het transport van water (spuien, pompen, kolkuitwisseling) en dispersief ten gevolge van het dichtheidsverschil. Mitigerende maatregelen zoals bellenschermen en spoeldebieten kunnen, net als in de methode beschreven in Paragraaf 3.1, meegenomen worden met behulp van de ZSF.



Figuur 3.6: Schematische weergave van het berekenen van de functionele prestatie met de ZTM methode. De rekeninvoer en -stappen zijn weergegeven in blauw, en de externe informatie waarop de kwantificering moet worden getoetst en/of aangepast in rood.

Figuur 3.7 laat een voorbeeld van een mogelijk eindresultaat zien van een reeks sommen met het ZTM voor de Noordersluis bij verschillende maten van zeespiegelstijging en afvoer. Uit Figuur 3.7 kan afgelezen worden hoeveel extra afvoer er nodig is om het chloridegehalte in een bakje afgebakend rond Diemen en Weesp op dezelfde chlorideconcentratie te houden bij een stijgende zeespiegel. De figuur is met name illustratief voor de mogelijkheden met het ZTM en moet niet worden geïnterpreteerd als een exacte weergave van een mogelijke toekomstige situatie in het Noordzeekanaal.



Figuur 3.7: Ontwikkeling van de chlorideconcentratie c_{Cl^-} in het bakje Diemen/Weesp als functie van de drivers (lokale) zeespiegelstijging Δh en veranderende afvoer.

Deze methode is ook geschikt om voor andere zeesluizen inzicht te geven in de verschuivingen in de evenwichtssituatie in het lokale watersysteem onder invloed van drivers of veranderingen aan het kunstwerk of de operatie daarvan. Deze methode vergt vanwege de bakjes en de benodigde kalibratie daarvan een grotere inspanning dan de methode beschreven in Paragraaf 3.1. Een gedetailleerde beschrijving van onder andere dit kalibratieproces en de andere eigenschappen van het voorbeeld in Figuur 3.7 zijn beschreven in Bijlage B.

3.2.2 Praktisch stappenplan

Onderstaand stappenplan beschrijft welke praktische stappen genomen moeten worden om de functionele prestatie te bepalen met behulp van de ZTM-methode. Bij elke stap worden enkele aandachtspunten benoemd. In deze methode wordt de functionele prestatie uitgedrukt als het zoutgehalte in het watersysteem op verschillende locaties ('in bakjes'). Vanwege de hoeveelheid aannames die gemaakt worden in de kwantificering van functionele prestatie voor zoutbeheer is het altijd aanbevolen om ter controle met een bredere groep experts naar de gemaakte aannames te kijken.

1. Achterhaal de dimensies en typische operatie van de sluis

- Informatie over sluisdimensies is beschikbaar via het Data Informatie Systeem Kunstwerken (DISK). Enkele openbare aanvullende bronnen zijn [Stichting Historische Sluizen en Stuwen Nederland](#) en [waterkaart.net](#). Merk op dat het voor zoutindringing gaat om de 'natte' afmetingen, niet de afmetingen die voor de scheepvaart gehanteerd worden.
- Het aantal schutcycli per 24 uur kan worden bepaald op basis van data uit het Informatie- en Volgsysteem voor de Scheepvaart (IVS). Dit gemiddelde kan worden bepaald op basis van enkele jaren maar bijvoorbeeld ook op basis van een seizoen, bijvoorbeeld om een worst-case scenario te bekijken waarin de (droge) zomer het meest relevant is.
- Nivelleertijd wordt niet geregistreerd in het IVS. In Nederland is 8 tot 10 minuten gebruikelijk voor binnenvaartsluizen en kleine zeesluizen (vervallen van 2 tot 6 m), en 11 tot 15 minuten voor grote zeesluizen (vervallen tussen

1.5 en 5 m) (Rijkswaterstaat Bouwdienst, 2000). Ook de tijd om de sluisdeuren te openen en sluiten moet worden geschat. Indien het sluiscomplex aangesloten is aan Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) zijn er mogelijk registraties van deurbewegingen beschikbaar.

- d. De ZSF maakt ook gebruik van een kalibratieparameter voor de deur-opentijden (c_{DOT}) die de gemiddelde deur-opentijd omzet in een representatievere deur-opentijd. Uit het aantal schutcycli per 24 uur (uit Stap 1b) volgt de gemiddelde tijd per cyclus. De helft daarvan is de tijd per schutting (één kant op). Door daar de tijd voor het nivelleren en de tijd voor het openen of sluiten van de deuren (uit Stap 1c) van af te trekken wordt de gemiddelde tijd dat de deuren open staan verkregen. Met deze tijd de zoutindringing berekenen resulteert over het algemeen in een te hoge zoutindringing. De representatieve tijd om mee te rekenen is kleiner omdat de schuttingen vaak (enigszins) zijn geconcentreerd in de daglichturen en op de doordeweekse dagen, en omdat schuttingen onregelmatig verlopen. Om tot een juiste inschatting te komen van de zoutindringing moet de gemiddelde deur-opentijd worden gereduceerd met de factor c_{DOT} om een representatieve deur-opentijd te vinden. Deze factor bedraagt voor een zeevaartsuis ca. 0.6 en voor een binnenvaartsuis ca. 0.35.

2. Bepaal de lokale eis aan het zoutgehalte

- a. Het oppervlakte water heeft vaak verschillende gebruiksfuncties (bijvoorbeeld zowel drinkwater als irrigatie voor bollenteelt), waardoor er mogelijk meerdere grenswaarden op meerdere locaties relevant zijn.

3. Schematiseer het lokale watersysteem met behulp van bakjes

- a. Het is goed om bakjes af te bakken op punten waar bijvoorbeeld grote veranderingen in de breedte of diepte aanwezig zijn.
- b. Stem de hoeveelheid bakjes af op basis van de locatie van de eis. Het is goed om het bakje waarin de eis wordt gesteld (zie stap 2) niet te dicht bij een constante randvoorwaarde te plaatsen omdat deze randvoorwaarde een grote invloed heeft op het aangrenzende bakje.
- c. Over het algemeen zal een bakje geen constante breedte en diepte hebben over de hele lengte en daarom moeten gemiddelde afmetingen worden bepaald.

4. Vraag zoutgehalte- en waterstandsdata vlakbij de sluis en in de bakjes op

- a. Een goede bron van zoutgehalte- en waterstandsdata is het LMW via [Rijkswaterstaat Waterinfo \(rws.nl\)](https://www.rws.nl).

5. Bepaal de evenwichtswaarden vlakbij de sluis en in de bakjes

- a. De in- en uitvoer van zoutgehaltes in het ZTM heeft de eenheid kg/m^3 , terwijl de metingen van zoutgehalte vaak gegeven zijn in mg Cl^- per liter. Reken deze daarom om, bijvoorbeeld met behulp van vergelijking 3.1:

$$Q_{\text{rivier}} = Q_{\text{naar binnen}} \frac{S_{\text{naar binnen}} - S_{\text{sluis,binnen}}}{S_{\text{sluis,binnen}} - S_{\text{rivier}}}. \quad (3.1, \text{herhaald})$$

- b. Bij het middelen kunnen een aantal keuzes worden gemaakt. Om een worst-case scenario te bekijken kan er voor worden gekozen om te middelen over een droog jaar of zelfs een droge maand. Om een gemiddelde situatie te bekijken is het goed om te middelen over een reeks van enkele jaren. Deze middeling moet aansluiten bepaalde gemiddelde aantal schutcycli (zie stap 1).
- c. In Bijlage B wordt de benodigde kalibratie van de bakjes in detail beschreven.

6. **Pas het ZTM toe voor de huidige situatie en bereken de functionele prestatie**
 - a. Het zouttransportmodel (ZTM) is open-source software in beheer en ontwikkeling bij Deltares. De code is geschreven in programmeertaal Python en maakt gebruik van de ZSF Python library. Inzet van het ZTM is complexer dan de ZSF vanwege de inhoudelijke kennis die nodig is om de verschillende benodigde coëfficiënten af te schatten. De code is op moment van schrijven van deze rapportage nog in ontwikkeling en kan op verzoek door Deltares ingezet worden. Er zijn enkele [voorbeelden](#)³ beschikbaar die kunnen helpen bij het opzetten van een eerste (eenvoudige) ZTM berekening.
 - a. Net als de metingen hebben de eisen aan zoutgehalte vaak de eenheid mg Cl⁻ per liter. Gebruik vergelijking 3.2 om de eis om te rekenen naar kg/m³.
7. **Verander de randvoorwaarden op basis van drivers, maatregelen of alternatieven**
 - a. Drivers: pas de waterstand aan de zeezijde aan (zeespiegelstijging), het spui- of pompdebiet (veranderende rivierafvoer), aantal schutcycli of scheepsvolume (toename scheepvaart door economische welvaart)
 - b. Maatregelen: spoeldebieten, aangepaste deur-opentijden, bellenschermen
 - c. Alternatieven: andere kolk lengte, -breedte of -diepte, drempels
8. **Pas het ZTM toe voor de toekomstige situatie en bereken de functionele prestatie.**
 - a. Herhaal Stap 7 met de nieuwe randvoorwaarden. Geef de functionele prestatie weer als functie van tijd met de huidige situatie (Stap 6) als uitgangspunt.
9. **Bepaal de beslismomenten in de tijd.**
 - a. Bepaal aan de hand van de drivers op welk moment (bijvoorbeeld bij welke mate van zeespiegelstijging) de functionele prestatie van het huidige kunstwerk of een alternatief niet meer voldoet aan de eisen
 - b. Bepaal aan de hand van bijvoorbeeld de KNMI- (KNMI, 2023) of Deltascenario's (Deltares, 2024) het daarbij horende moment in de tijd

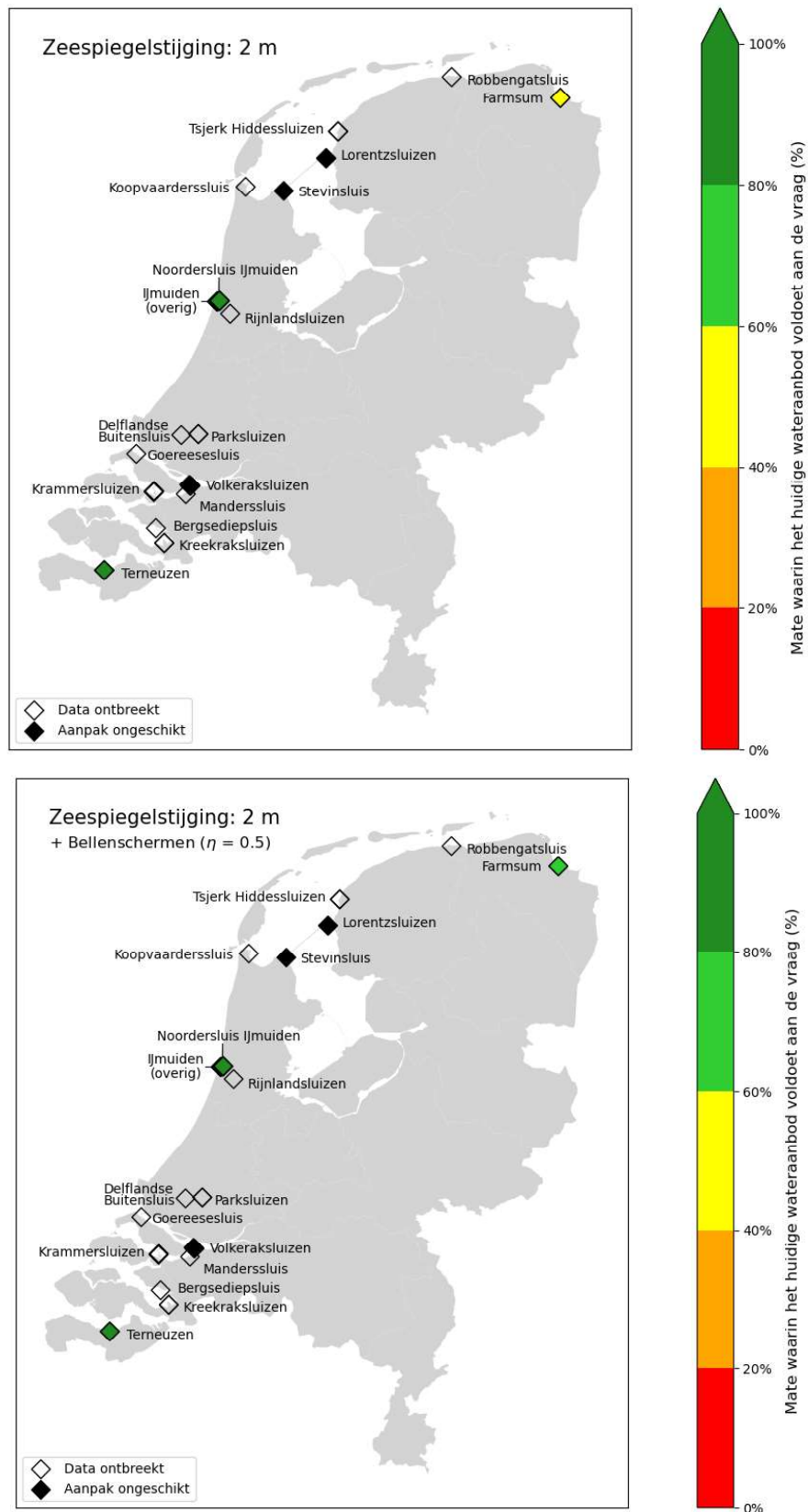
3.3 Visualisatie van functionele prestatie

In het KpNK is ook gewerkt aan het weergeven van de gekwantificeerde functionele prestatie voor verschillende kunstwerken en functies op kaarten en in andere figuren. Het doel van het visualiseren op een kaart is het mogelijk maken om in één oogopslag een eerste orde inzicht te krijgen in de veranderingen (ten gevolge van drivers of maatregelen) bij meerdere kunstwerken of waterlichamen (KpNK, 2024d). De berekeningen op basis van de methodes beschreven in Paragrafen 3.1 en 3.2. zijn ook geschikt om op deze manier gevisualiseerd te worden.

Hieronder worden twee voorbeelden van het visualiseren van functionele prestatie voor zoutbeheer gegeven: in de vorm van een landelijke kaart op objectniveau en een lokale kaart op systeemniveau.

³ [Examples — libzsf documentation](#)

Figuur 3.8 geeft een voorbeeld van een landelijke kaart waarop voor de Noordersluis in IJmuiden en sluiscomplexen Terneuzen en Farmsum de functionele prestatie wordt weergegeven op basis van methode ZSF en massabalans (zie ook KpNK (2024d)). De functionele prestatie is hier uitgedrukt in de mate waarin het huidige wateraanbod voldoet aan de watervraag. Er wordt hier gekeken naar de prestatie wanneer de zeespiegel met twee meter gestegen is, en hoe dit verandert indien er bellenschermen in gebruik zijn. Bij deze berekeningen is geen rekening gehouden met de praktische haalbaarheid van bellenschermen in het desbetreffende sluiscomplex. Het is bij deze berekeningen belangrijk om op te merken dat een veel groter percentage bij het ene sluiscomplex dan het andere niet direct betekent dat de situatie daar ernstiger verslechtert of dat er een knelpunt ontstaat. De absolute toename kan, ondanks de grote relatieve toename, alsnog klein zijn (zie bijvoorbeeld ook Figuur A.1).

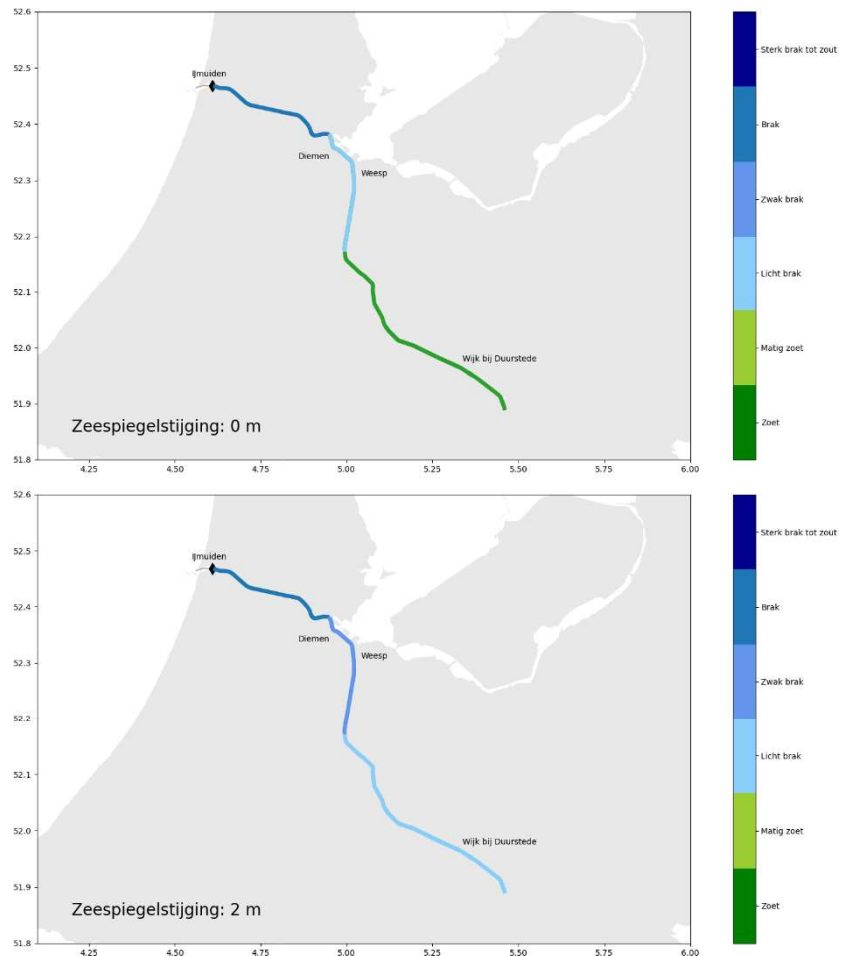


Figuur 3.8: Een voorbeeld van een landelijke kaart waarop per sluiscomplex aangegeven wordt in welke mate aan de watervraag voldaan wordt om de huidige zoet-zoutbalans vlakbij de sluis te handhaven (methode ZSF + massabalans) bij 2 m zeespiegelstijging zonder (boven) en met bellenschermen (onder). Zwarte ruitjes geven aan dat er geen berekening is gedaan voor dat sluisencomplex.

Figuur 3.9 geeft een ruimtelijk voorbeeld weer van de methode ZTM voor het Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal waarin de zoutgehalten en de daarbij horende classificatie weergegeven worden (zie Tabel 3.1) in de huidige situatie en bij twee meter zeespiegelstijging. Figuur B.4 geeft dezelfde informatie weer als Figuur 3.9 voor het hele bereik van nul tot drie meter zeespiegelstijging.

Tabel 3.1: Classificatie waterlichaam op basis van chloridegehalte (naar [Rijkswaterstaat Waterinfo \(rws.nl\)](https://www.rws.nl)).

Kleur	Classificatie	Chloridegehalte
■	Zoet	minder dan 150 mg Cl/l
■	Matig zoet	tussen 150 en 300 mg Cl/l
■	Licht brak	tussen 300 en 1.000 mg Cl/l
■	Zwak brak	tussen 1.000 en 3.000 mg Cl/l
■	Brak	tussen 3.000 en 10.000 mg Cl/l
■	Sterk brak tot zout	meer dan 10.000 mg Cl/l



Figuur 3.9: Een voorbeeld van een landelijke kaart waarop de classificatie van het zoutgehalte in de bakjes van de Noordzeekanaal – Amsterdam-Rijnkanaal casus (methode ZTM) wordt gevisualiseerd in de huidige situatie (boven) en bij 2 m zeespiegelstijging (onder). De rivierafvoer is hier constant gehouden op $Q = 68 \text{ m}^3/\text{s}$.

4 Afweging van maatregelen

Bij vernieuwing van een schut- of spuisluis op een zoet-zoutovergang moeten vaak afwegingen worden gemaakt tussen verschillende (tegenstrijdige) functies, met name op het gebied van de kerntaken waterveiligheid, voldoende water, vlot en veilig vaarwegverkeer, en schoon en gezond water. Dit hoofdstuk beschrijft met behulp van praktische voorbeelden afwegingen die gemaakt moeten worden bij vernieuwing en eventuele maatregelen die getroffen kunnen worden om een balans te vinden tussen de kerntaken. Onder de maatregelen (of keuzes) wordt onderscheid gemaakt tussen maatregelen die worden getroffen ten behoeve van een andere functie met gevolgen voor de zout, en maatregelen die getroffen worden om zoutindringing te bestrijden.

4.1 Maatregelen om zoutindringing te bestrijden

Er zijn veel verschillende maatregelen mogelijk om zoutindringing bij sluiscomplexen te bestrijden, waaronder het plaatsen van bellenschermen, drempels, spoelen, het beperken van de deur-opentijden en het bouwen van een zoutscherm (selectieve onttrekking). Het terugspoelen van zout met de afvoer over het kanaal (of meer) is de meest gebruikelijke zoutbeheermethode. In een kanaal ontstaat dan een evenwichtstoestand: een gradiënt in het zoutgehalte die verschuift met fluctuaties in afvoer en schutbedrijf. Deze methode vergt echter veel zoet water, waardoor alleen het toepassen van deze maatregel niet altijd de meest gewenste methode is. Naast zoetwaterverbruik zijn ook de kosten en de nautische aspecten (veroorzaakte krachten op de schepen) van de maatregel belangrijk om te beschouwen (Deltares, 2013).

Voorbeelden van bronnen voor meer informatie over mitigerende maatregelen zijn het rapport van PIANC werkgroep 198 over het mitigeren van zoutindringing in binnenlandse waterwegen (PIANC, 2021), hoofdstuk 21 van het schutsluizen ontwerphandboek (Rijkswaterstaat Bouwdienst, 2000) en een verzameling van verschillende onderzoeken naar het scheiden van zoet en zout bij Nederlandse schutsluizen (Kerstma, Kolkman, & Regeling, 1994).

In de volgende paragrafen worden enkele maatregelen kort besproken. Elk van de besproken maatregelen kan in de ZSF en/of in het ZTM meegenomen worden om de invloed daarvan te kwantificeren. Er zijn meer en ook combinaties van deze maatregelen mogelijk. Een voorbeeld hiervan is het Innovatief Zoet-Zoutscheidingssysteem (IZZS) bij de Krammersluizen. Dit is een combinatie van bellenschermen, een spoeldebiet door én langs (tussen binnen- en buitenvoorhaven) de kolk, en de inzet van een laagbekken.

4.1.1 Schutoperatie

De schutoperatie heeft grote invloed op de hoeveelheid zoutindringing. Los van eventuele constructieve maatregelen is het daarom altijd goed om te kijken in hoeverre aanpassingen aan de sluisoperatie bij kunnen dragen aan het verminderen van de zoutindringing. Dit kan betekenen dat er een aanpassing van de eisen en wensen vanuit de scheepvaart gemaakt moet worden. Er zijn verschillende aspecten van de operatie die invloed hebben op de zoutindringing, deze worden hieronder verder toegelicht.

Hoe minder er geschut wordt, hoe minder zoutindringing er plaatsvindt. De totale hoeveelheid zout die binnendringt door één kolkuitwisseling is afhankelijk van hoe lang de sluisdeur geopend is: hoe korter de sluisdeur geopend is, hoe minder zoutindringing (zie Figuur 4.1). De efficiëntste en meest eenvoudig te implementeren maatregelen zijn daarom zo min mogelijk

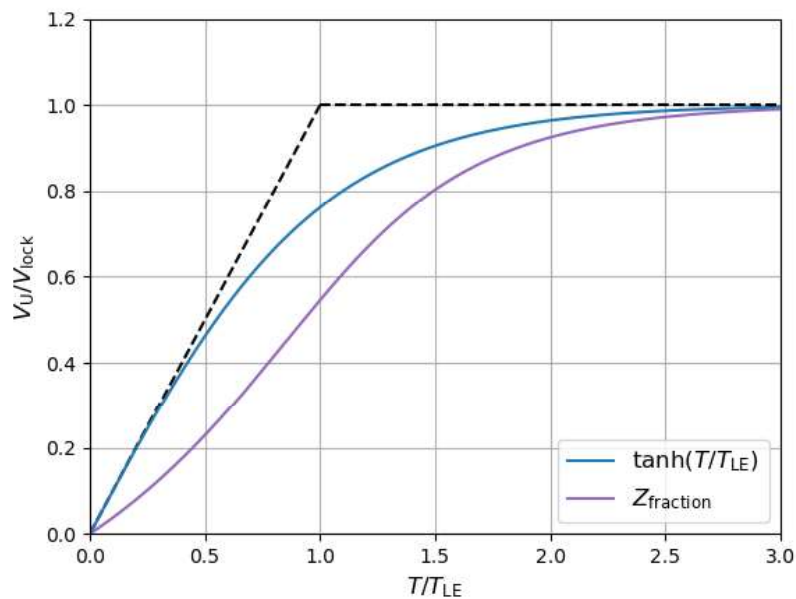
schutten (alleen schutten met een ‘volle’ kolk) en het zo veel mogelijk beperken van de deur-opentijden.

Figuur 4.1 geeft de relatieve kolkuitwisseling (verhouding uitwisselingsvolume V_U en sluisvolume V_{lock}) weer als functie van de relatieve deur-opentijd (verhouding tijd T en duur kolkuitwisseling T_{LE}). In de zeeluisformulering wordt het uitwisselingsvolume benaderd met een tangens hyperbolicus:

$$V_U = V_{lock} \tanh\left(\frac{\eta T_{open}}{T_{LE}}\right), \quad (4.1)$$

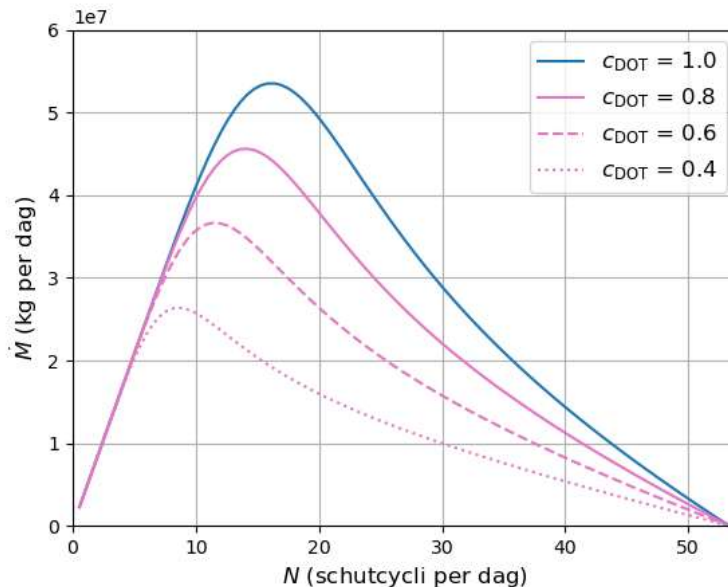
met T_{open} de deur-opentijd. In vergelijking 4.1 wordt ook de efficiëntie van eventuele bellenschermen η weergegeven. Deze parameter wordt nader toegelicht in Paragraaf 4.1.2. De blauwe lijn in Figuur 4.1 (vergelijking 4.1) laat zien dat, als de deuren lang genoeg open staan, de kolk na verloop van tijd (bijna) volledig is uitgewisseld, dat wil zeggen de relatieve kolkuitwisseling gaat langzaam naar 1.

Als de kolk aan één kant niet volledig uitwisselt, dan zal daarna de kolkuitwisseling aan de andere kant langzamer verlopen: het verschil in dichtheid tussen kolk en voorhaven is dan kleiner geworden. Bij dezelfde deur-opentijd is er dan weer minder kolkuitwisseling en dus minder zouttransport. Het niet volledig uitwisselen versterkt zichzelf. Het resultaat hiervan is weergegeven in Figuur 4.1 met de dimensieloze parameter $Z_{fractie}$ (paarse lijn). Deze parameter beschrijft het zouttransport per schutcyclus, uitgedrukt in het volume van de kolk en het verschil in zoutgehalte over de kolk. Deze kromme ligt veel lager dan de blauwe lijn, en daarin is het versterkende effect van opeenvolgende cycli met beperkte kolkuitwisseling zichtbaar. Dit geeft aan dat als er voldoende aandacht is voor het beperkt houden van de deur-opentijd, de te bereiken reductie in de zoutindringing veel groter kan zijn dan volgt uit de kromme voor een enkele kolkuitwisseling.



Figuur 4.1: De relatieve kolkuitwisseling V_U/V_{lock} als functie van de relatieve deur-opentijd T/T_{LE} . De zwarte stippellijn geeft de theoretische kolkuitwisseling weer. In de ZSF wordt de kolkuitwisseling benaderd met een tangens hyperbolicus (blauwe lijn). Bij opeenvolgende onvolledige kolkuitwisselingen is de uitwisseling langzamer, weergegeven met de paarse lijn ($Z_{fractie}$). De weergegeven berekeningen zijn gebaseerd op de eigenschappen van de Noordersluis (zie Tabel A.1) in een situatie met 0 m verval.

Figuur 4.2 geeft de zoutflux weer als functie van het aantal schutcycli per dag. Omdat in de cyclusgemiddelde aanpak van de ZSF de schutcycli evenredig over de dag verdeeld worden, zorgt een toename in het aantal schutcycli er automatisch voor dat de deur-opentijden korter worden. Uit Figuur 4.2 blijkt dat er een maximale zoutlast bij een bepaalde schutfrequentie. Dit betekent dat het beperken van het aantal schuttingen daardoor niet altijd de voorkeur krijgt. Figuur 4.2 geeft ook de invloed van het beperken van de deur-opentijden weer (met behulp van kalibratiefactor c_{DOT} , zie ook Paragrafen 3.1.2 en 3.2.2, stap 1). Uit de roze curves blijkt dat de maximale zoutlast hierdoor afneemt en dat deze naar een kleinere schutfrequentie verschuift.



Figuur 4.2: De zoutflux als functie van het aantal schutcycli per dag. De weergegeven berekeningen zijn gebaseerd op de eigenschappen van de Noordersluis (zie Tabel A.1) in een situatie met 0 m verval.

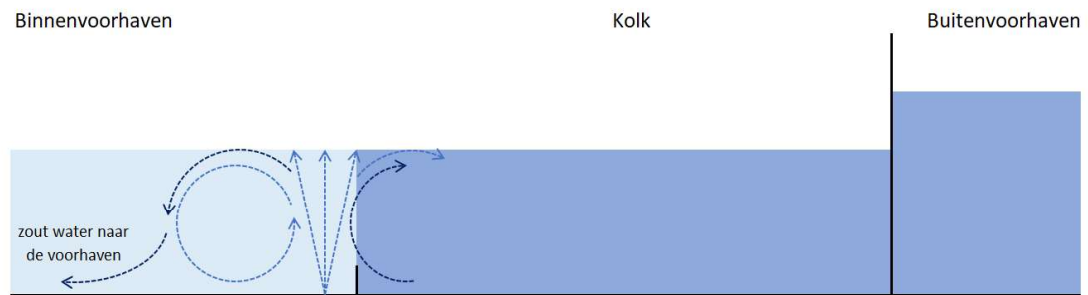
Het reduceren van de schutfrequentie (alleen) is dus niet altijd de juiste oplossing en moet gepaard gaan met gereduceerde deur-opentijden om effectief te zijn. Maatregelen omtrent schutoperatie vergen afweging met de kerntaak vlot en veilig vaarwegverkeer door de toenemende wachttijden (vlot) en eventueel een groter aantal schepen in de kolk (veilig). Een alternatieve sluisoperatie, waarbij de sluisdeuren tussen het uit- en invaren gesloten worden en schepen buiten de kolk moeten wachten op voldoende schepen in plaats van in de kolk (met geopende deuren), resulteren echter netto in dezelfde wachttijd en zijn daardoor maatregelen die het aspect 'vlot' niet in de weg hoeven te zitten.

4.1.2 Bellenschermen

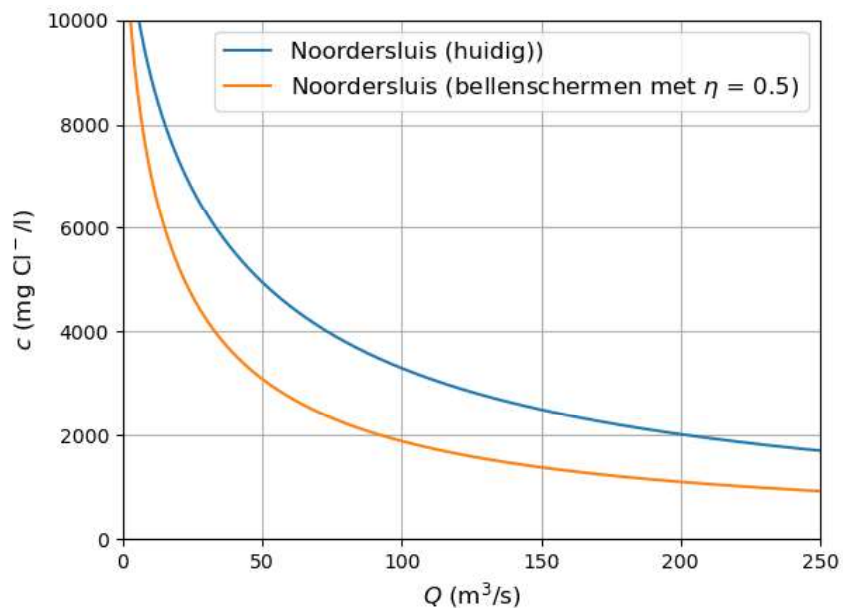
Bellenschermen zorgen met compressoren voor een barrière van stijgende bellen die de kolkuitwisseling en daarmee de uitwisseling van zoet- en zoutwater vertragen. Bellenschermen zijn het meest effectief wanneer ze op beide sluishoofden geplaatst worden. Figuur 4.4 geeft een voorbeeld weer van de verschuiving van het evenwicht tussen chloridegehalte aan de binnenzijde van de sluis en afvoer wanneer bellenschermen worden toegepast op beide sluishoofden. De efficiëntie van de bellenschermen η is hier gelijk aan 0.5.⁴ Deze efficiëntie wordt vermenigvuldigd met de snelheid van de kolkuitwisseling (zie vergelijking 4.1) en zorgt daardoor voor een vertraging van de kolkuitwisseling. Omdat de kolkuitwisseling alleen vertraagd wordt door bellenschermen hebben ze weinig nut wanneer de sluisdeuren langdurig

⁴ De waarde $\eta = 0.5$ komt overeen met de minimale hoeveelheid lucht die nodig is voor een stabiel bellenscherm. Een optimaal (efficiënt) bellenscherm heeft een η van 0.25, maar dit vraagt om veel lucht. Waardes $\eta < 0.25$ zijn niet haalbaar omdat de menging in dat geval dusdanig toeneemt dat de extra hoeveelheid lucht niet voor een verdere reductie zorgt.

open staan (Abraham, 1976; Keetels, Uittenboogaard, Cornelisse, Villars, & van Pagee, 2011). De nadelen van bellenschermen zijn de hoge energiekosten en de krachten op passerende schepen (Rijkswaterstaat Bouwdienst, 2000).



Figuur 4.3: Schematische weergave van de circulatie die veroorzaakt wordt door een bellenscherm aan het binnenhoofd (Deltares, 2021).



Figuur 4.4: Verband tussen het chloridegehalte aan de binnenkant van en de afvoer van rivierwater langs de Noordersluis (blauw), en hoe dit evenwicht verschuift bij inzet van bellenschermen (oranje).

4.1.3 Spoelen

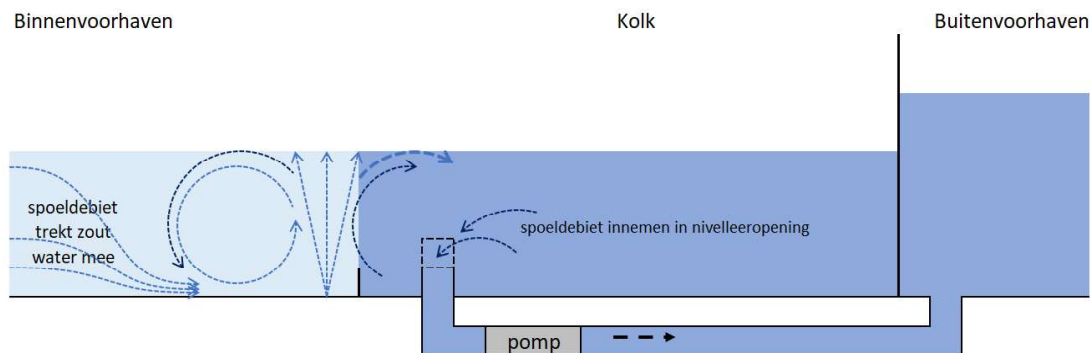
Er zijn over het algemeen twee manieren van spoelen: met een (grote) afvoer over het kanaal door een spuisluis of gemaal of met een spoeldebiet door de schutkolk. Selectieve onttrekking is een specifiek voorbeeld van afvoeren door een spuisluis of gemaal waarbij op effectieve wijze vooral zout water wordt afgevoerd.

4.1.3.1 Spoelen via spuisluis of gemaal

Het doorspoelen van een kanaal met afvoer via spuisluisen of een gemaal is de meest gebruikelijke methode om zoutindringing te beperken. Bij de Krammersluizen wordt van voorhaven naar voorhaven gespoeld: daarmee wordt de zoutgradiënt richting zee geduwd, waardoor de zoutindringing door de schutsluisen beperkt wordt. Dit is in wezen hetzelfde als het zoutbeheer met een afvoer over een kanaal, maar de lengte van het kanaal is dan beperkt tot de totale lengte over de voorhavens.

4.1.3.2 Spoelen via de schutkolk

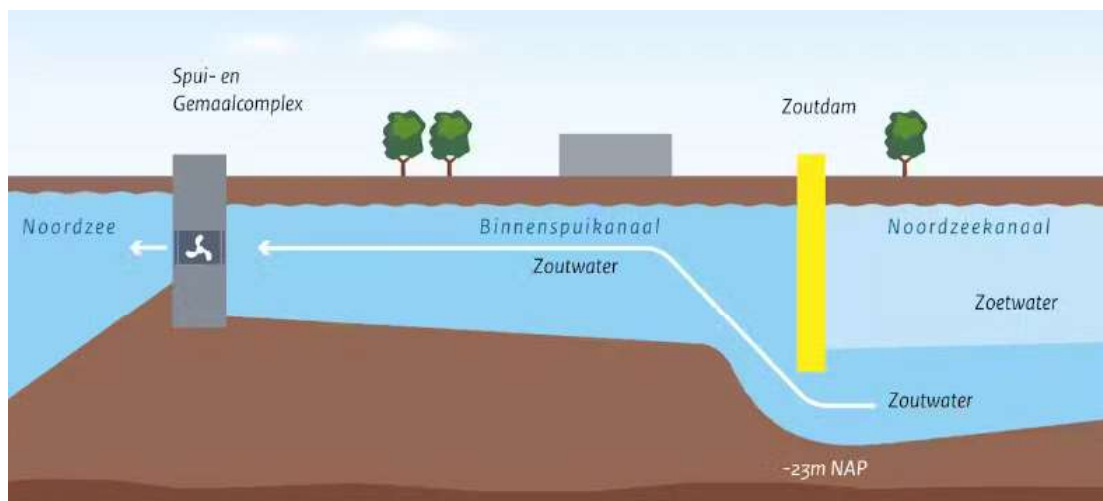
Een efficiënte maatregel is een spoeldebiet door de schutkolk tijdens de kolkuitwisseling. Om dezelfde beperking in zoutindringing te bereiken, gebruikt deze wijze van spoelen minder water dan het spoelen via een spuisluis of gemaal. Dit komt doordat deze maatregel gericht is op het tegengaan van de kolkuitwisseling, en daarmee voorkomt dat er zout in het binnenwater terecht komt. Deze maatregel is met name effectief in combinatie met bellenschermen (zie Figuur 4.5) en voorkomt dat er zout op het kanaal komt. Deze manier van spoelen is, zolang er sprake is van positief verval, mogelijk via conventionele sluisdeuren zonder dat daar een speciale installatie voor nodig is, maar afhankelijk van het kanaalpeil en het getij kan een pomp noodzakelijk zijn.



Figuur 4.5: Schematische weergave van de circulatie door een bellenscherm op het binnenhoofd in combinatie met een spoeldebiet (Deltares, 2021).

4.1.3.3 Selectieve onttrekking

Voor Zeesluis IJmuiden is gekozen voor het bouwen van een zoutscherm die het spoelen efficiënter maakt. Onderaan het zoutscherm zit een opening waardoor vooral het zwaardere zoute water terug naar zee gespuid of gepompt kan worden: per kubieke meter water wordt er daardoor meer zout teruggevoerd (principe 'selectieve onttrekking', zie Figuur 4.6). Ook bij gemaal De Helsdeur wordt selectieve onttrekking toegepast om de verzilting, met name voor de bollenteelt, tegen te gaan.

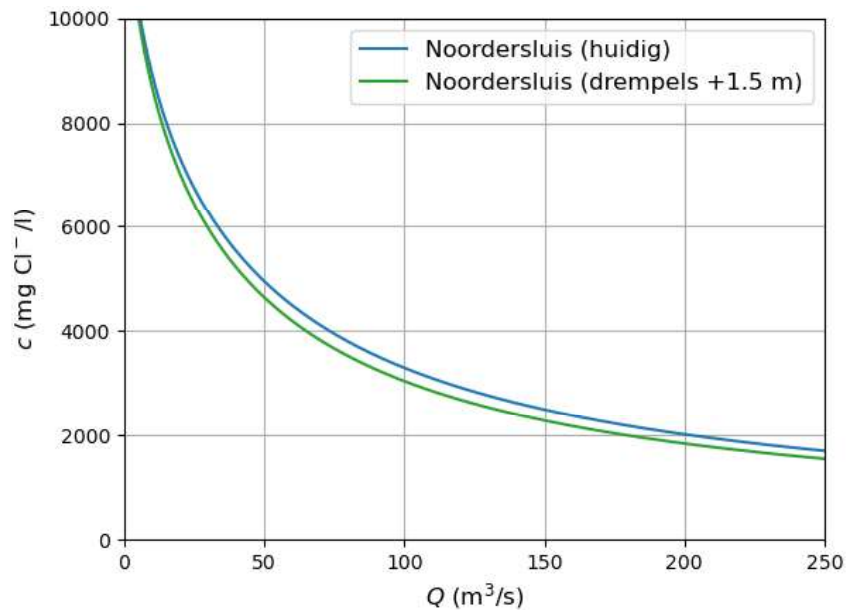


Figuur 4.6: Het principe van selectieve onttrekking (bron: [Selectieve Onttrekking bij Zeesluis IJmuiden](#)).

4.1.4 Drempels

4.1.4.1 Drempels in het sluishoofd

Sluisdeuren staan vaak op drempels en de hoogte daarvan kan bijdragen aan het beperken van de zoutindringing. Het zoute water bij de bodem blijft door de aanwezigheid van drempels deels achter, waardoor de effectieve diepte van de sluis eigenlijk bij de kruin van de drempel ligt. Het rendement van de drempel is ongeveer 80%, dat wil zeggen dat de diepte waarover de kolkuitwisseling plaatsvindt wordt gereduceerd met 80% van de drempelhoogte (Keetels, Uittenboogaard, Cornelisse, Villars, & van Pagee, 2011). Aan schutsluizen worden ook eisen gesteld voor de functie scheepvaart, namelijk voldoende diepgang, waardoor een hogere drempel niet altijd wenselijk is.



Figuur 4.7: Verband tussen het chloridegehalte aan de binnenkant van en de afvoer van rivierwater langs de Noordersluis (blauw), en hoe dit evenwicht verschuift na het verhogen van de drempels op beide sluishoofden (groen).

4.1.4.2 Drempels in het spuikanaal

Een andere mogelijkheid is een drempel in de waterweg op enige afstand van de sluisen. Het zout kan zich dan tot aan de drempel verspreiden, zodat er bijvoorbeeld een zoet-zoutovergang gecreëerd kan worden. Hier kan een drempel ervoor zorgen dat langere visvriendelijke spuiensters mogelijk zijn (ten behoeve van visintrek), zonder dat de zoutindringing te ver toeneemt (Deltares, 2019a).

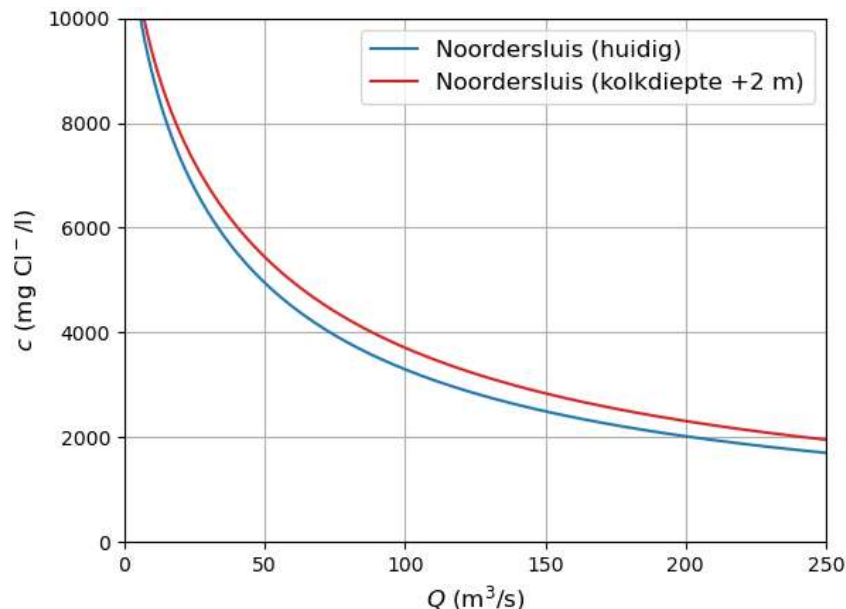
4.2 Maatregelen met gevolgen voor zoutindringing

Sommige maatregelen die getroffen kunnen worden ten behoeve van de andere kerntaken van een sluiscomplex hebben ook gevolgen voor de hoeveelheid zoutindringing, bijvoorbeeld het bouwen van grotere sluisen ten behoeve van de scheepvaart of visvriendelijk spui-beheer ten behoeve van een gezond watersysteem.

4.2.1 Vlot en veilig vaarwegverkeer: Afmetingen

Bij het vernieuwen van een sluis zal rekeningen moeten worden gehouden met de beoogde scheepvaartklasse die gebruik moet kunnen maken van de achterliggende vaarweg. Grote sluizen (groot kolkvolume) kunnen echter zorgen voor meer zoutindringing dan kleinere, waardoor een afweging zal moeten worden gemaakt tussen de functies scheepvaart en zoutbeheer. Over het algemeen geldt dat diepere en bredere sluizen leiden tot meer zoutindringing, maar voor een langere sluis is dat niet per se het geval: wel bij een volledige kolkuitwisseling (lange deur-opentijden), maar niet bij beperkte deur-opentijden. Ook passage- en wachttijden en nautische veiligheid spelen een rol in deze afweging. Voor het beperken van de zoutindringing is een zo gevuld mogelijk kolk wenselijk (zie Paragraaf 4.1.1), maar hier zitten limieten aan voor wat betreft nautische veiligheid.

In Figuur 4.8 wordt een voorbeeld weergegeven van een ZSF berekening van de gevolgen van twee meter extra sluisdiepte. Uit deze berekening blijkt bijvoorbeeld dat om een evenwichtschloridegehalte van 4000 mg Cl⁻/l te behouden, de benodigde afvoer 15 m³/s hoger ligt als gevolg van de diepere sluis. Vergelijkbare berekeningen kunnen worden gemaakt voor een andere kolk lengte of -breedte. Indien een grotere of diepere sluis wenselijk is voor de functie scheepvaart, maar niet voor de zoutindringing, zouden ook maatregelen zoals het scheiden van zee- en binnenvaart overwogen kunnen worden.



Figuur 4.8: Verband tussen het chloridegehalte aan de binnenkant van en de afvoer van rivierwater langs de Noordersluis (blauw), en hoe dit evenwicht verschuift in het geval dat de sluis 2 m dieper zou zijn geweest (rood).

4.2.2 Schoon en gezond water: Aanleg vismigratiemiddelen, visvriendelijk spuibeheer en natuurlijke zoet-zoutovergangen

Voor de ecologie is het belangrijk om een geleidelijke overgang te hebben tussen zoet en zout water. Door de aanleg van kunstwerken ontstaat er echter een harde grens. Wanneer maatregelen getroffen worden om deze overgang en de connectiviteit tussen zoet en zout te verbeteren, zal de hoeveelheid zoutindringing naar de zoete kant en de hoeveelheid zoetwater naar de zoute kant toenemen.

Om de vismigratie tussen de Waddenzee en het IJsselmeer te bevorderen wordt bijvoorbeeld dwars door de Afsluitdijk de zogenoemde vismigratierivier gebouwd. De overgang tussen zoet en zout wateren wordt hierdoor ook meer gradueel en daardoor vergelijkbaar met de natuurlijke situatie. Een van de eisen die gesteld is aan het ontwerp van de vismigratierivier bij de Lorentzsluizen is dat er geen zout via de vismigratierivier in het IJsselmeer terecht mag komen. Het ontwerp van de vismigratie is daarom dusdanig gedimensioneerd dat de natuurlijke en geleidelijke zoet-zoutovergang die in de vismigratierivier ontstaat, welke met het getij van locatie verschuift, niet in het IJsselmeer komt. Om een beeld te krijgen van de kennis die opgedaan is over zoet-zoutovergangen worden in het KpNK in 2024 interviews gehouden met verschillende mensen die bij dit type projecten betrokken zijn geweest. Deze interviews en de 'lessons learned' worden apart gerapporteerd.

Visvriendelijk spuibeheer is een ander voorbeeld van een maatregel ten behoeve van een gezond watersysteem die gevolgen heeft voor zoutindringing. Het doel van visvriendelijk spuibeheer is het mogelijk maken van migratie tussen zoete en zoute wateren – de harde grens tussen zoet en zout blijft in principe bestaan. Bij de verschillende spuicomplexen wordt dit op een andere manier aangepakt, bijvoorbeeld door de spuikokers na het spuien enkele minuten open te laten staan of door een van de schuiven soms op een kier te zetten. De frequentie en de duur van dit alternatieve spuibeheer moet dusdanig worden afgestemd dat de vismigratie maximaal profijt heeft zonder dat er te veel zoutindringing ontstaat.

5 Conclusie

Een eerste kwantitatief inzicht verkrijgen in de functionele prestatie van sluizen met een functie in het zoutbeheer van een watersysteem vereist nog geen gedetailleerde 3D-modellen en kan goed bereikt worden met de methodes die in dit rapport beschreven zijn. Voor sluizen die grenzen aan een kanaal kan met behulp van de Zeesluisformulering (ZSF) en een massabalans een eerste kwantificering worden gemaakt van het evenwichtszoutgehalte direct aan de binnenzijde van de sluis en de hoeveelheid zoet water die nodig is om dat evenwicht te behouden. Echter: in het algemeen gelden er eisen aan het zoutgehalte op een locatie op wat grotere afstand van sluizen. Om daar inzicht in te krijgen, is inzet van het Zouttransportmodel (ZTM) nodig. Het ZTM is op moment van schrijven van dit rapport nog continu in ontwikkeling door Deltares. Enkele voorbeelden van recente ontwikkelingen zijn gelaagde (in plaats van dieptegemiddelde) bakjes en het kunnen onttrekken van zout uit een zoutvang of ontgrondingskuil tijdens het spuien. Ook wordt er voor zowel de ZSF als de SSF gewerkt aan validatie met behulp van veldmetingen.

Met behulp van de gepresenteerde methodes kan worden bepaald hoe de functionele prestatie verandert in de tijd als gevolg van klimaatdrivers als zeespiegelstijging en veranderende rivierafvoer, en socio-economische trends zoals een toename van het scheepvaartverkeer. Daarnaast kunnen de gevolgen van maatregelen, die getroffen worden voor het beperken van zoutindringing of juist ten behoeve van een andere kerntaak van het watersysteem, snel doorgerekend worden. Het in beeld brengen van de functionele prestatie biedt ondersteuning in de afweging van varianten in het gehele proces van de iteratieve werkwijze (KpNK, 2024a).

6 Referenties

- Abraham, G. (1976). Density currents due to differences in salinity. *Proceedings of a seminar on Salt distribution in Estuaries* (pp. 11-40). The Hague: Government Publishing Office.
- Deltares. (2013). *Toepassing afwegingskader zoutlekbeperkende maatregelen: een handvat voor het proces*. 1207941-002-VEB-0008.
- Deltares. (2018). *Zeesluisformulering, implementatie document*. 11200741-000-HYE-0004-v2.
- Deltares. (2019a). *Wel visintrek, geen zoutindringing*. 11203690-004-BGS-0002.
- Deltares. (2019b). *Zoutindringing schut- en spuisluisen, Kennisprogramma Natte Kunstwerken 2019*. 11200741-003.
- Deltares. (2020a). *Memo 'Zeespiegelstijging, 'Plan Sluizen' en zoutindringing in de benedenrivieren'*. 11203871-004.
- Deltares. (2020b). *Eemskanaal, toename doorspoelvraag bij zeespiegelstijging (memo)*. 11205271-005-ZWS-0001.
- Deltares. (2021). *Zoutindringing Parksluizen - KPP-SWM 2021*. 11206831-006-BGS-0002.
- Deltares. (2022). *Rapport Zoutlast IJmuiden bij testen en ingebruikstelling nieuwe zeesluis*. 11206063-000-HYE-0002.
- Deltares. (2022). *Verificatie Spuisluisformulering (SSF) tegen Noordland experimenten van een zoutscherm*. 11207401-021-HYE-0001.
- Deltares. (2022c). *Besluit memo - spuisluisformulering KpNK 2022*, 11207401-021-HYE-0002.
- Deltares. (2022d). *Rapport Zoutlast IJmuiden bij testen en ingebruikstelling nieuwe zeesluis*. 11206063-000-HYE-0002.
- Deltares. (2024). *Deltascenario's voor Nederland - Wateropgaven in 2050 en 2100*. Nationaal Deltaprogramma.
- Fan, J. (2008). Stratified flow through outlets. *Journal of Hydro-environment Research*, 2, 3-18.
- Keetels, G., Uittenboogaard, R., Cornelisse, J., Villars, N., & van Pagee, H. (2011). Field study and supporting analysis of air curtains and other measures to reduce salinity transport through shipping locks. *Irrigation and Drainage*, 60, 42-50.
- Kerstma, J., Kolkman, P., & Regeling, H. (1994). *Water Quality Control at Ship Locks: Prevention of Salt- and Fresh Water Exchange*. Rotterdam: A.A. Balkema.
- KNMI. (2023). *KNMI'23 Klimaatscenario's voor Nederland (gebruikersrapport)*.
- KpNK. (2024a). *Iteratieve werkwijze om te komen tot een advies in Regio-analyse en Planfase*. 11207401-007-HYE-0005.
- KpNK. (2024c). *Inventarisaren en Probleem Ontrafelen - Stap 2 in de Iteratieve Werkwijze*. 11207401-009-HYE-0004.
- KpNK. (2024d). *Bepalen Functionele prestaties - Stap 4 in de Iteratieve Werkwijze*. 11207401-009-HYE-0005.
- KWR. (2017). *Gevolgen van zoetwatertekorten voor industrie en drinkwaterproductie*. KWR 2017.099.
- Nortier, I., & De Koning, P. (1996). *Toegepaste Vloeistofmechanica: Hydraulica voor Waterbouwkundigen*.
- PIANC. (2021). *Saltwater intrusion mitigation in inland waterways*. InCom WG Report n198 - 2021.
- Praktijkonderzoek Plant & Omgeving BV. (2007). *Zouttolerantie van landbouwgewassen - Deelrapport Leven met zout water*. PPO nr. 32 340194 00.
- Rijkswaterstaat. (2022). *Vervanging en Renovatie. Prognoserapport 2022. Prognose voor de periode 2023 tot en met 2050*.

- Rijkswaterstaat Bouwdienst. (2000). *Ontwerp van Schutsluizen*.
- Rijkswaterstaat Waterdienst. (2009). *Hoe zout wordt het zoete water? Een samenvattend overzicht van te verwachten chlorideconcentraties in het Benedenrivierengebied na verzilting van het Volkerak-Zoommeer*.
- RWS-WVL. (2023). *Inventarisatie Visvriendelijke spuien RWS kunstwerken op zoet-zout overgangen (concept)*.
- Van der Molen, D., Boers, P., & Evers, N. (2006). KRW-normen voor algemene fysisch-chemische kwaliteitselementen in natuurlijke wateren. *H2O Waternetwerk*, pp. 31-33.
- WL | Delft Hydraulics. (2005). *Herformulering implementatie waterbouwkundige constructies*. Rapportnummer M3827.

A Uitwerking ZSF en massabalans

De methode zoals beschreven in Paragraaf 3.1 kan toegepast worden op sluisen die grenzen aan een kanaal. Voor IJmuiden (alleen Noordersluis), Terneuzen (West- en Oostsluis) en Farmsum (kleine en grote sluis) zijn de benodigde parameters en randvoorwaarden op de volgende manier verkregen:

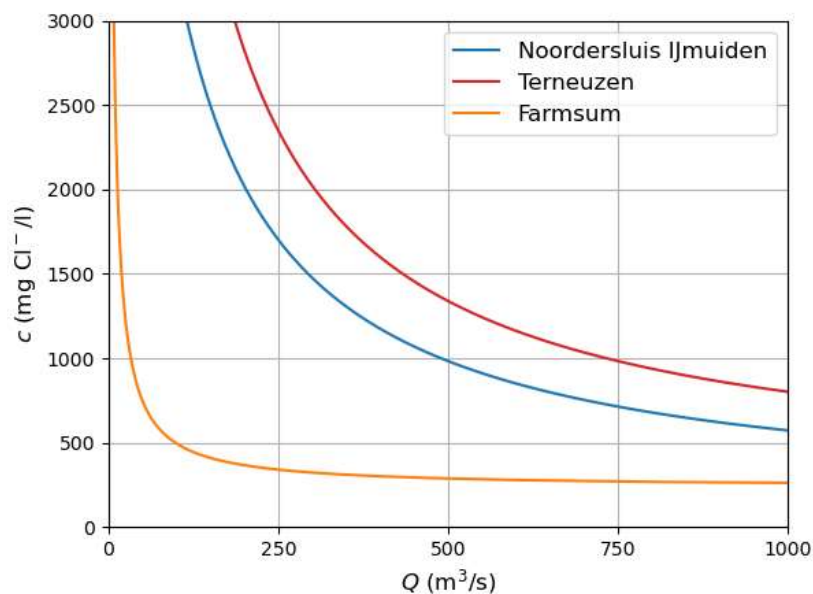
- Kolkafmetingen via [Stichting Historische Sluizen en Stuwen Nederland](#)
- Gemiddelde waterstanden via [Waterhoogte - Rijkswaterstaat Waterinfo \(rws.nl\)](#)
- Zoutgehaltes via [Zoutgehalte - Rijkswaterstaat Waterinfo \(rws.nl\)](#)
- Gemiddelde schutfrequentie op basis van schutregistraties uit het Informatie- en Volgsysteem voor de Scheepvaart (IVS) in de periode 2018 – 2023
- Tijd om de sluisdeuren te openen (aanname): $t_{\text{deuren-openen}} = 60$ s voor puntdeuren (Deltares, 2021). Grote roldeuren zijn wat trager met 3 à 4 minuten per 50 m kolkbreedte.
- Nivelleertijd (aanname): $t_{\text{niv}} = 10$ min. In Nederland is 8 tot 10 minuten voor binnenvaartsluizen en kleine zeesluizen (vervallen van 2 tot 6 m) gebruikelijk, en 11 tot 15 minuten voor grote zeesluizen (vervallen tussen 1.5 en 5 m) (Rijkswaterstaat Bouwdienst, 2000).
- De kalibratiefactor op de deur-opentijd zijn eerder berekend voor de Noordersluis ($c_{\text{DOT}} = 0.56$) en grote sluis Farmsum ($c_{\text{DOT}} = 0.32$) (Deltares, 2019b; Deltares, 2020b). Voor de overige sluisen is aangenomen dat de kalibratiefactor gelijk is aan 0.35 en 0.60 voor respectievelijk binnenvaartsluizen en zeesluizen.

Tabel A.1 geeft een overzicht van de geometrie, parameters en randvoorwaarden voor elk van de beschouwde zeesluizen. Bellenschermen staan in het referentiescenario altijd uit en er is geen spoeldebiet. In het geval van meerdere zeesluizen in één sluiscomplex worden dezelfde randvoorwaarden (waterstanden en zoutgehaltes) toegepast op elke sluis in het complex.

Tabel A.1: Gebruikte geometrie en randvoorwaarden voor elk van de beschouwde zeesluizen, aannamen ten behoeve van de methodeontwikkeling in dit rapport.

	Geometrie				Operatie				Randvoorwaarden				
	Kolklengte (m)	Kolkbreedte (m)	Kolkdiepte (m NAP)	Drempelhoogte (m t.o.v. kolkbodem)	Schutfrequentie (cycli per 24 uur)	Tijd om de deuren te openen (s)	Nivelleertijd (s)	Kalibratiefactor deur-openertijd (-)	Zoutgehalte zeezijde (kg/m ³)	Zoutgehalte kanaalzijde (kg/m ³)	Zoutgehalte rivier (kg/m ³)	Waterstand zeezijde (m NAP)	Waterstand kanaalzijde (m NAP)
Terneuzen Westsluis	290	40	-13	0	10.61	180	600	0.60	24.7	6.36	0.22	0.21	2.1
Terneuzen Oostsluis	280	23	-6.5	0	16.48	60	600	0.35	24.7	6.36	0.22	0.21	2.1
Zeesluis Farmsum Groot	174	16	-5.45	0	24.13	60	600	0.32	28.8	3	0.22	0.23	0.53
Zeesluis Farmsum Klein	87	7	-2.7	0	4.47	60	600	0.35	28.8	3	0.22	0.23	0.53
IJmuiden Noordersluis	400	50	-15.5	0.5	14.14	210	600	0.56	24.1	10.3	0.22	0.05	-0.4

Figuur A.1 geeft het evenwicht tussen de zoutgehalten aan de binnenzijde van de sluiscomplexen en de benodigde rivierafvoer weer.



Figuur A.1: Evenwicht tussen het gemiddelde zoutgehalte aan de binnenzijde van de sluis of sluiscomplexen en de rivierafvoer op basis van de werkwijze in Paragraaf 3.1.

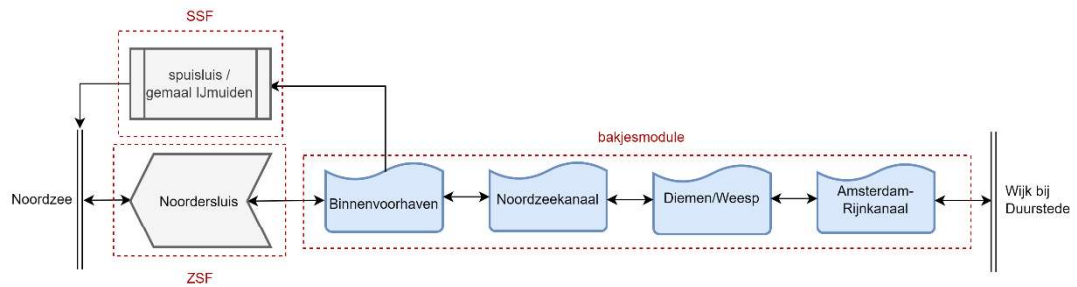
B Uitwerking ZTM Noordersluis

Bij het ontwikkelen van de methode voor de functie zoutbeheer met het zouttransportmodel (ZTM) is gebruik gemaakt van het systeem Noordzeekanaal – Amsterdam-Rijnkanaal als casus. Deze casus wordt in deze bijlage nader beschreven. Bij het sluisencomplex in IJmuiden wordt zoutindringing veroorzaakt door het schutten van schepen door de zeesluizen. De functionele prestatie van de sluisen bij IJmuiden wordt beïnvloed door verschillende drivers. De uitwerking van de case beschreven in deze bijlage blijft beperkt tot het zouttransport door de Noordersluis, bijdragen door de overige sluisen in het sluisencomplex IJmuiden zijn hier buiten beschouwing gelaten. De aangenomen schutfrequentie van de Noordersluis is in onderstaande berekeningen 14 schuttingen per dag, wat gebaseerd is op schattingen uit een eerder project (Deltares, 2022). Het Amsterdam-Rijnkanaal wordt beschouwd tot aan Wijk bij Duurstede.

Het ZTM wordt ontwikkelt als aanvulling op de ZSF, omdat de ZSF alleen de zoutlast door een schutsluis berekent (zoutmassa per tijdseenheid). Eisen aan watersystemen worden daarentegen gesteld in de vorm van zoutgehalte of chlorideconcentratie op een bepaald punt, veelal op enige afstand van de sluis. Om de situatie op dat punt het systeem te kunnen evalueren, moet de verspreiding van het zout in het systeem worden berekend. Voor een aantal toepassingen, waaronder de evaluatie van de functionele prestatie, is er daarom behoefte van een model dat iets kan zeggen over het zoutgehalte in het watersysteem aan de kanaalzijde van de sluis. Omdat de eisen voor toegestane zoutgehaltenes aan het watersysteem gesteld worden en niet aan het kunstwerk, wordt de functionele prestatie van de sluis hier geëvalueerd op basis van de zoutgehaltenes in het achterliggende watersysteem.

Met opzet houden we het bakjesmodel erg eenvoudig: we hanteren een grove schematisering van de werkelijkheid om zo efficiënte en compacte berekeningen te kunnen doen. Dat betekent dat we met dit bakjesmodel geen nauwkeurige uitspraken kunnen doen over het zoutgehalte op één specifiek punt. Het ZTM kan wel een indicatie geven van bijvoorbeeld de verschuiving in het evenwicht in het systeem door verandering in de randvoorwaarden. Het bakjesmodel berekent dan wat er gebeurt in het beschreven gebied, waarmee er een indicatie is van de te verwachten verandering bij een meetpunt.

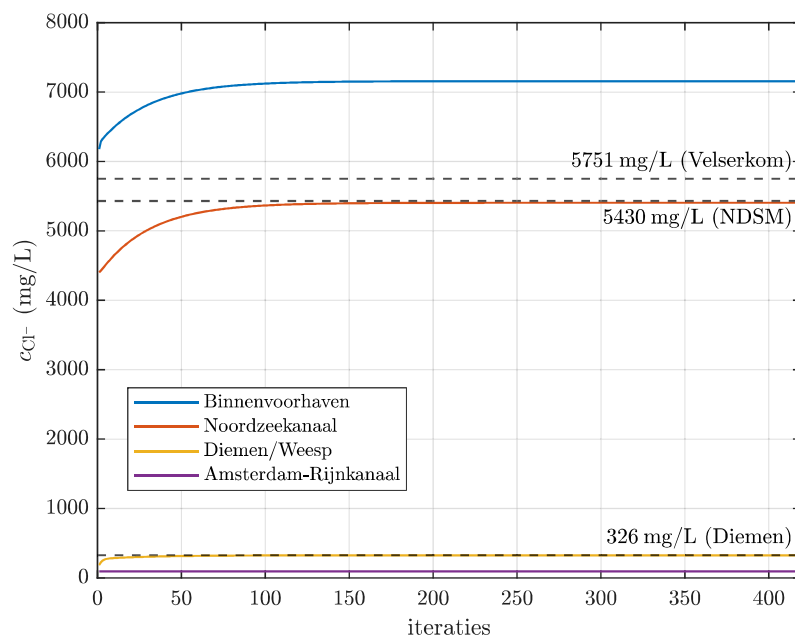
Tussen de bakjes van het model vinden meerdere vormen van transport plaats: advectioneel door het bulktransport van water (spuien, pompen, kolkuitwisseling) en dispersief ten gevolge van dichtheidsverschil. Mitigerende maatregelen zoals bellenschermen en spoeldebieten kunnen meegenomen worden met behulp van de ZSF module. Het model bestaat voor deze case uit vier in serie geschakelde bakjes aan de kanaalzijde van de sluis, zoals schematisch weergegeven in Figuur B.1. De transporten die plaats vinden tussen de verschillende objecten (een bakje, kunstwerk of constante randvoorwaarde) hangen af van de verbindingen met andere objecten en de stroomrichting van de netto nivelleer- en spuidebieten.



Figuur B.1: Schematische weergave van het bakjesmodel voor de case Noordersluis.

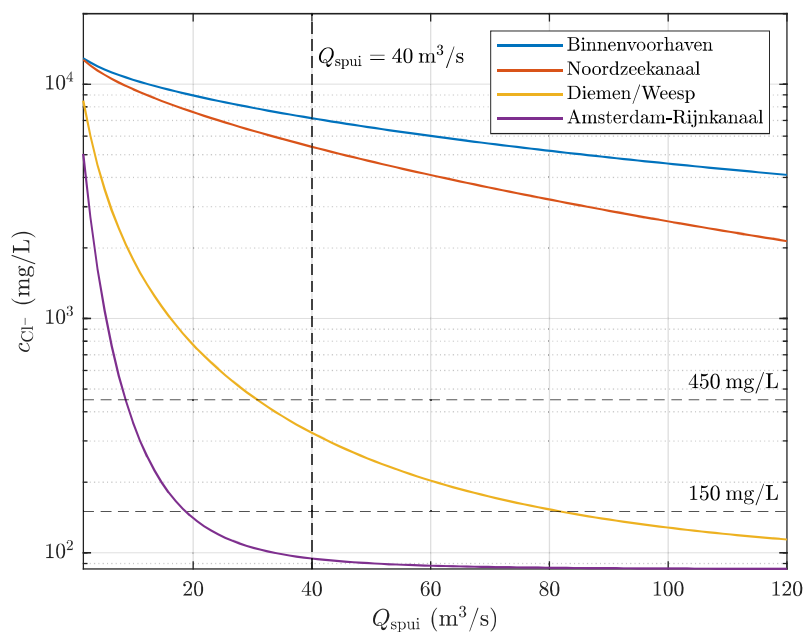
Het dispersieve transport wordt in het ZTM beschreven met behulp van een vergelijking die in principe een kolkuitwisseling beschrijft. Er wordt vervolgens gebruik gemaakt van een dispersiecoëfficiënt c_d die er voor zorgt dat onderscheid wordt gemaakt tussen een dichtheidsstroming na een initiële abrupte scheiding (sluisdeuren die openen bij kolkuitwisseling) en uitwisseling tussen twee bakjes met een open verbinding, waarbij in het laatste geval $c_d < 1$. Dichtheidsstroming treedt alleen op in een gelaagd systeem en zal daardoor een relatief grote dispersiecoëfficiënt hebben. Wanneer een bakje bijna volledig gemengd is, is de bijdrage door dispersie en zo ook de dispersie coëfficiënt klein. De waarde van c_d wordt gebruikt als kalibratieparameter in het ZTM.

Figuur B.2 laat de evenwichtssituatie zien die in het rekenmodel wordt bereikt na een aantal iteraties en na afregeling op basis van de gemeten dieptegemiddelde zoutgehalten uit het LMW in de Velserkom (binnenvoorhaven), de NDSM scheepswerf (Noordzeekanaal) en Diemen in augustus 2022. Deze dieptegemiddelde waarden zijn een middeling over, afhankelijk van het meetpunt, twee of drie metingen op specifieke hoogtes in de waterkolom. De bakjes binnenvoorhaven en Diemen/Weesp laten (na kalibratie van de waarden van c_d) een goede overeenkomst zien tussen de modelberekeningen en de gemiddelde zoutgehalten gemeten in augustus 2022. Het berekende zoutgehalte in de binnenvoorhaven (blauwe lijn) is hoger dan in de metingen. Dit is te verklaren door het feit dat het model een gemiddeld zoutgehalte berekend voor het hele bakje, terwijl de meetapparatuur in de Velserkom het zoutgehalte op één locatie en op specifieke dieptes -1, -6 en -8 m NAP meet. Dit geldt uiteraard ook op de andere meetlocaties, maar met name in de binnenvoorhaven is het dicht bij de bodem erg zout (zie Figuur 3.1) en reikt de meetapparatuur maar tot een beperkte diepte, waardoor het te verwachten is dat het werkelijke dieptegemiddelde zoutgehalte juist in dat deel van het watersysteem hoger ligt. Vanwege de doelstellingen van deze uitwerking, het verkrijgen van inzicht, zijn we met deze kalibratie tevreden.



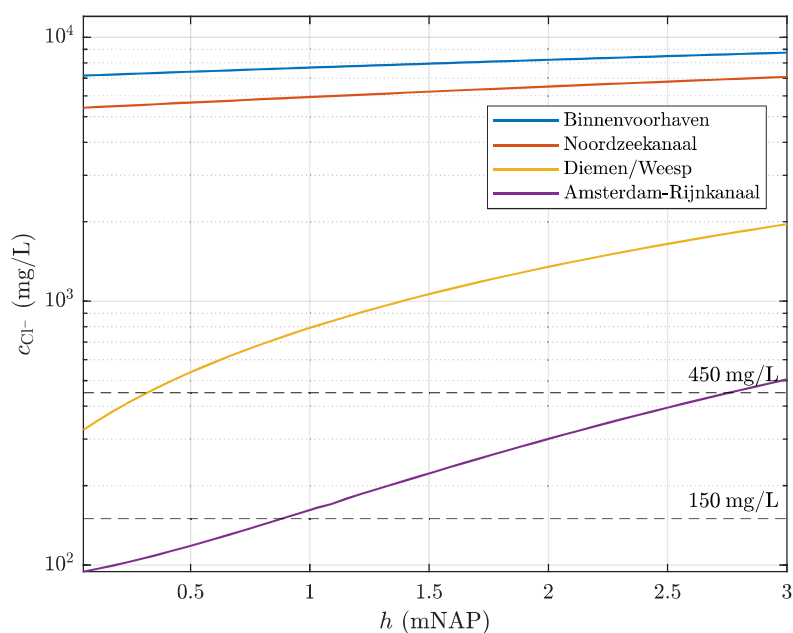
Figuur B.2: De evenwichtssituatie die in het bakjesmodel wordt bereikt na een aantal iteraties aan de hand van de gemiddelde afvoer bij Weesp en de gemiddelde chlorideconcentratie bij Diemen, de NDSM scheepswerf en de Velserkom. Stippellijnen geven de waarden weer zoals gemeten in augustus 2022, en de gekleurde lijnen geven de (afgeregelde) uitkomsten van het ZTM voor de beschouwde locaties.

De invloed van de drivers veranderende afvoer en zeespiegelstijging op het zoutgehalte in de bakjes is weergegeven in Figuur B.3 en Figuur B.4. Ook voor de functie zoutbeheer is het belangrijk om de eenheid van de eisen te definiëren. Dan kan ook de functionele prestatie bepaald worden in dezelfde eenheid. Deze definitie moet gekozen worden in nauw overleg met de probleemeigenaar. Ter interpretatie zijn hier de grenswaarden voor drinkwater ($c_{Cl^-} < 150 \text{ mg/l}$) en natuur ($c_{Cl^-} < 450 \text{ mg/l}$) weergegeven. Figuur B.5 combineert de invloed van beide drivers in één overzichtelijke contourplot. Alle hier gepresenteerde berekeningen beperken zich tot schutten met enkel de Noordersluis, met een schutfrequentie van 14 schuttingen per dag (zie ook Tabel A.1).



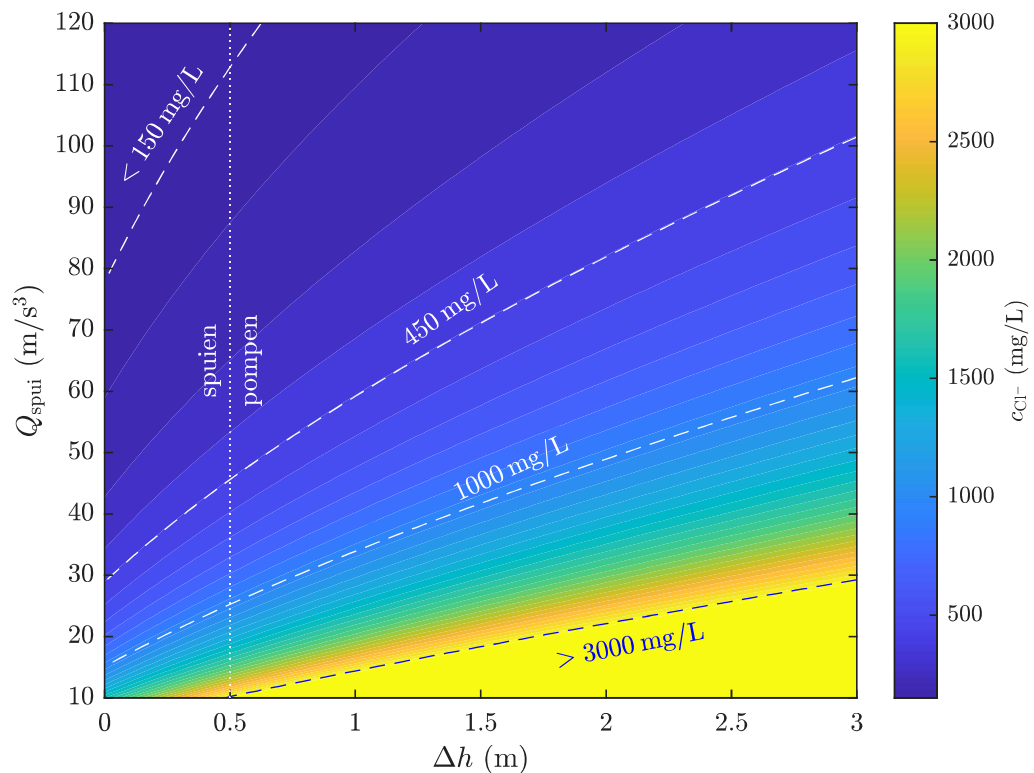
Figuur B.3: Ontwikkeling van de chlorideconcentratie c_{Cl^-} in de bakjes als functie van de driver veranderende afvoer. De horizontale stippellijnen geven de grenscriteria voor drinkwater en natuur aan, en de verticale stippellijn geeft het huidige referentiedebiet aan.

In Figuur B.3 is te zien in welke mate het chloridegehalte bij Diemen en Weesp en in het Amsterdam-Rijnkanaal zal toenemen bij een afname van het debiet over het kanaal: een verschuiving van het evenwicht zoals berekend met het bakjesmodel.



Figuur B.4: Ontwikkeling van de chlorideconcentratie c_{Cl^-} in de bakjes als functie van de driver (lokale) zeespiegelstijging. De stippellijnen geven de grenscriteria voor drinkwater en natuur aan.

Figuur B.4 laat zien hoe het evenwicht verschuift als gevolg van zeespiegelstijging: het leidt tot hogere chloridegehalten bij Diemen en Weesp en in het Amsterdam-Rijnkanaal. Uit Figuur B.5 kan bijvoorbeeld, als eerste indicatie, afgelezen worden hoeveel extra afvoer er nodig zou zijn om het zoutgehalte in bakje Diemen/Weesp op hetzelfde niveau te houden bij een stijgende zeespiegel.



Figuur B.5: Ontwikkeling van de chlorideconcentratie c_{Cl^-} in het bakje Diemen/Weesp als functie van de drivers (lokale) zeespiegelstijging Δh en veranderende afvoer.

Met dit bakjesmodel kunnen geen precieze uitspraken gedaan worden over het zoutgehalte op één specifiek punt: het ZTM kan alleen laten zien hoe het evenwicht in een bakje verschuift en daarmee een indicatie geven van de veranderingen die optreden in een gebied. Voor analyse en afweging van verschillende potentiële toekomstscenario's en de impact daarvan op de functie zoutbeheer is het model wel geschikt. Het is hiertoe wel belangrijk om samen met de probleemeigenaar goed te definiëren wat de functionele eisen en de daarbij horende eenheden zijn, zodat de functionele prestatie in diezelfde eenheid kan worden bepaald.

C Uitgangspunten modulaire opbouw Zouttransportmodel⁵ (ZTM)

De zeesluisformulering (ZSF) is een stelsel van vergelijkingen dat kan worden gebruikt om de zoutindringing door schutsluizen te berekenen op basis van de geometrie, randvoorwaarden (zoutgehalte, waterstand) en sluisoperatie van een zeesluis. De ZSF bestaat uit enkel een schutsluis tussen een zout en een zoet gebied. Een beschrijving van een spuisluis of gemaal zit daar niet in. Er is een behoefte om deze beschrijving van zouttransport door schutsluizen uit te breiden met transporten naar het achterliggende watersysteem om zo bijvoorbeeld verzilting van bovenstroomse kanalen te kunnen berekenen. Voor de cases IJmuiden en Parksluizen is dit al eens ad-hoc uitgevoerd (Deltares, 2022; Deltares, 2021).

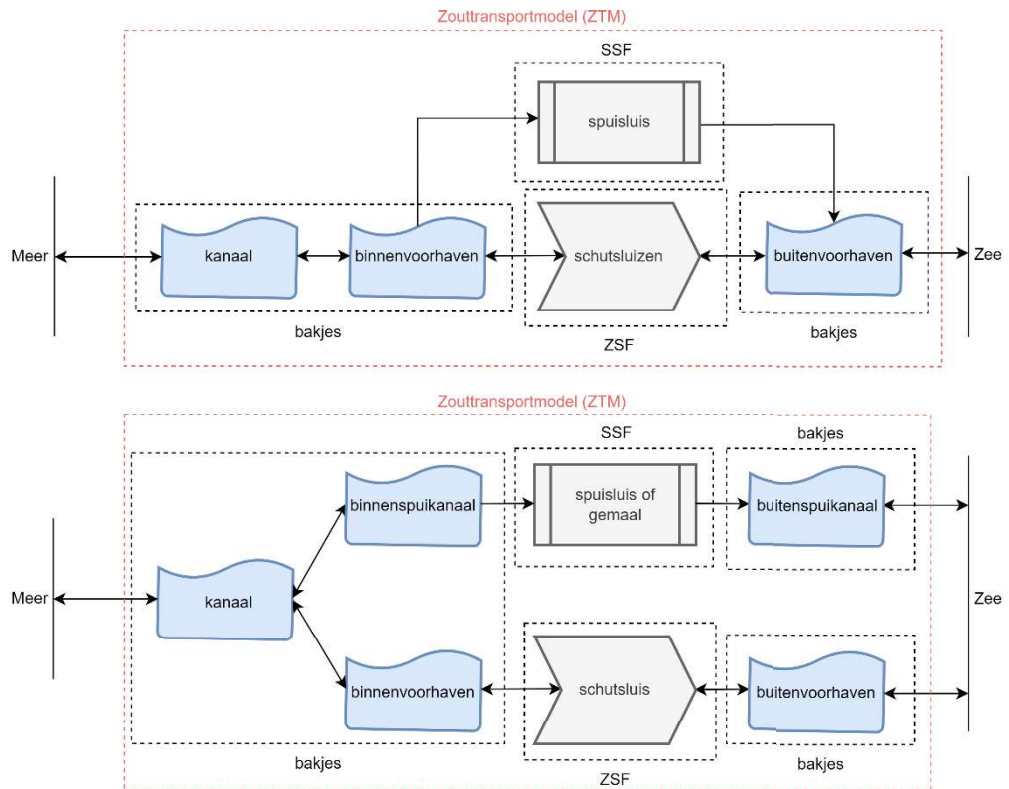
De ZSF is beschikbaar⁶ als DLL, geschreven in programmeertaal C. Voor de gebruiker is de ZSF aan te roepen in Python of Excel. Het doel is nu om een overkoepelend en eenvoudig ZoutTransportModel (ZTM) te maken dat kan worden aangeroepen in Python. Dit model zal bestaan uit een verzameling modules die op verschillende manieren aan elkaar te koppelen zijn. De ZSF wordt hier in opgenomen als module die de transporten door schutsluizen beschrijft, en wordt aangevuld met modules voor 'bakjes', zoals voorhavens en (spui)kanalen, en voor spuisluisen. Met behulp van de 'bakjesmodule' kan dan het gevolg van zoutindringing in achterliggende watersystemen worden verkend: de zoete en zoute zijde aan weerszijde van een kunstwerk worden dan niet meer beschouwd als één groot reservoir met voorgeschreven eigenschappen (randvoorwaarden), maar het zoutgehalte kan worden berekend als functie van o.a. de sluisoperatie en het doorspoeldebiet.

C.1 Toepassing

Het ZTM is een ruwe schematisatie van de werkelijkheid en het is niet de intentie om er een gedetailleerd model van te maken: het voordeel van het ZTM is dat er snel en eenvoudig mee gerekend kan worden en dat moet behouden blijven. Het ZTM zou geschikt moeten zijn om de ontwikkeling van de zoutgehaltes in achterliggende systemen te bepalen onder invloed van drivers als zeespiegelstijging en veranderende afvoer. De ambitie is om hiermee bijvoorbeeld het Volkerak-Zoommeer en het Noordzeekanaal te kunnen verkennen. Figuur C.1 laat een paar voorbeelden zien van configuraties van bakjes en kunstwerken. De randvoorwaarden voor de aanvoer van water en zout vanuit het omliggende gebied aan de meer- en zeezijde worden voorgeschreven in de vorm van debieten, waterstanden en zoutgehaltes. Het ZTM kan ook worden gebruikt om randvoorwaarden te genereren voor gedetailleerdere 3D modellen voor het berekenen van zoutverspreiding (Deltares, 2018).

⁵ NB Het ZTM is continu in ontwikkeling. Deze beschrijving (Bijlage C) gaat over de versie van het ZTM waarmee de methodeontwikkeling in Paragraaf 3.2 en de uitwerking in Bijlage B zijn uitgevoerd.

⁶ <https://github.com/Deltares/libzsf>



Figuur C.1 Schematische weergave van twee voorbeelden van configuraties van bakjes en kunstwerken die beschreven kunnen worden met het Zouttransportmodel (ZTM). 'Meer' en 'Zee' hebben constante waterstanden en zoutgehalten.

Tijdsintegratie

De ZSF bestaat uit twee 'versies' waarmee cyclusgemiddeld of fasegewijs kan worden gerekend. Het ZTM zal in eerste instantie ontwikkeld worden voor cyclusgemiddeld rekenen. Het fasegewijs rekenen moet daar later aan worden toegevoegd.

Een goede tijdsintegratie is hierbij wel belangrijk. Schut- en spuisluizen gedragen zich ieder op een andere manier in de tijd. Bij het cyclusgemiddeld rekenen in de ZSF is dit verschil niet van belang, maar het updaten van de bakjes na een schutcyclus vereist wel een tijdstap. In het Landelijk Meetnet Water (LMW) worden waterstanden geregistreerd met tijdstap $\Delta t = 10$ minuten. Ook het ZTM zou daarom met een tijdstap van 10 minuten moeten kunnen rekenen. Maar afhankelijk van de aard van de vraag zou dit ook een uur of een dag kunnen zijn.

Voor fasegewijs rekenen moet de beschrijving van de transporten in de tijd nog nader worden uitgewerkt, met name wanneer meerdere kunstwerken verbonden zijn aan hetzelfde bakje. De ZSF levert dan transporten per fase van het schutproces, maar de duur van die fasen is steeds anders. Een mogelijke aanpak is om de transporten per schutfase te verdelen over vaste tijdstappen (van bv. 10 minuten) waarmee het ZTM dan kan rekenen op dezelfde wijze als bij de cyclus-gemiddelde aanpak.

C.2 Modulaire opbouw en transporten

Het doel van de modulaire opbouw van het ZTM is om met behulp van de verschillende modules willekeurige combinaties van bakjes en spui- en schutsluizen te kunnen maken zoals in de voorbeelden weergegeven in Figuur C.1. Tussen de modules vinden verschillende vormen van transport plaats: advectioneel en dispersief transport.

Het bulktransport, of de verplaatsing van water als gevolg van kolkuitwisseling, spuien of pompen, wordt gemodelleerd m.b.v. advectionetermen. De waterstanden aan weerszijden van de schut- en/of spuisluis worden voorgeschreven: aan elke zijde geldt één waterstand voor alle bakjes aan die zijde. Een verandering van die waterstand, bv. door het getij aan de zoute zijde, leidt daarmee ook tot advectioneel transport.

Het transport ten gevolge van saliniteitsverschillen wordt gemodelleerd met behulp van een dispersieterm. Het saliniteitsverschil zorgt ervoor, onder invloed van zwaartekracht, dat het lichtere, zoete water over het zwaardere, zoute water gaat stromen. Dit dispersieve transport wordt naast het dichtheidsverschil $\Delta\rho$ ook gedreven door de waterdiepte h . Voor de beschrijving van dit dispersieve transport wordt uitgegaan van de formules voor een kolkuitwisseling. De golfsnelheid c van zo een dichtheidsgolf is daarbij gelijk aan

$$c = \frac{1}{2} \sqrt{g'h} \quad (\text{C.1})$$

waarbij de gereduceerde zwaartekracht g' is gedefinieerd als

$$g' = g \frac{|\Delta\rho|}{\bar{\rho}} \quad (\text{C.2})$$

met g de zwaartekrachtversnelling en $\bar{\rho}$ de gemiddelde dichtheid. Het dichtheidsverschil is bepalend voor de richting van vergelijking C.1. In de volgende paragrafen worden de verschillende modules en de daarbij horende transporten in meer detail beschreven.

Module: ZSF

De randvoorwaarden die nodig zijn om met behulp van de ZSF het zouttransport door een schutsluis te bepalen zijn de dichtheid en de waterstand aan beide zijden van de schutsluis, waarbij de dichtheid wordt bepaald door het zoutgehalte en de temperatuur. Samen met de geometrie van de schutsluis en de eigenschappen van de sluisoperatie en schepen wordt vervolgens de grootte van de debieten en de hoeveelheid zout die daarmee getransporteerd wordt bepaald. In de ZSF kan rekening worden gehouden met maatregelen die zoutindringing tegen kunnen gaan, zoals bellenschermen en spoeldebieten.

Bij het cyclus-gemiddeld rekenen bestaat de beschrijving van de sluisoperatie uit de gemiddelde schutfrequentie (het aantal schutcycli per dag), de tijd die het kost om de deuren volledig te openen of te sluiten en de nivelleertijd. De gemiddelde deur-opentijd wordt hier vervolgens uit afgeleid als het gemiddelde over een hele dag, en veronderstelt daarmee dat de sluis de hele dag in gebruik is met een continu ritme. Omdat dit in het algemeen niet het geval is, waardoor het zouttransport kleiner wordt, is er een kalibratiefactor c_{DOT} gedefinieerd die wordt gebruikt om deze gemiddelde deur-opentijd om te zetten in een representatievere deur-opentijd (Deltares, 2018). De deur-opentijd is bepalend voor de mate waarin de dichtheidsgolf voor een volledige kolkuitwisseling zorgt. Er kan ook een symmetrie coëfficiënt c_M worden opgegeven als sluisoperatie parameter om rekening te houden met een situatie waarin de sluisdeuren aan weerszijden van de kolk niet even lang geopend zijn.

Bij cyclusgemiddeld rekenen wordt de ZSF doorgerekend voor deze set randvoorwaarden en eigenschappen tot dat de resultaten geconvergeerd zijn tot een evenwichtswaarde voor het zouttransport door de schutsluis. De verplaatste volumes per fase van het schutproces, elk met een eigen zoutgehalte, worden daarbij opgeteld tot totale volumes en een bijbehorend zoutgehalte per cyclus (aan elk sluishoofd een totale lozing en een totale onttrekking). Deze totale volumes worden dan gedeeld door de totale tijdsduur van een cyclus, met als resultaat de cyclusgemiddelde debieten en zouttransporten. Deze debieten zijn constant te veronderstellen zolang de invoer (randvoorwaarden en sluisoperatie) niet verandert. In de ZSF is positief transport gedefinieerd in de richting zoet naar zout, wat ook in het ZTM zal worden aangehouden. Een uitgebreidere beschrijving van de ZSF is beschikbaar in de documentatie (Deltares, 2018).⁷

Het ZTM maakt gebruik van de volgende uitvoerparameters van de ZSF: de massaflux ϕ_{ZSF} (in kg/s), ofwel het totale cyclusgemiddelde zouttransport, en het netto cyclusgemiddelde debiet door de schutsluis $Q_{niv,netto}$ (in m³/s), bestaande uit het nivelleerdebiet (verschil debieten van en naar zoet, of van en naar zout) en het debiet door de waterverplaatsing van schepen.

Module: spuisluis of gemaal

Bij het spuien van water is alleen sprake van advectioneel transport, waarbij altijd wordt gespuid van de zoetere naar de zoutere zijde van het kunstwerk. Het netto spuidebiet kan echter ook negatief zijn door een zoutlek of visvriendelijk spuibehoor. Het spuidebiet Q_{spui} is een invoerparameter van het ZTM en kan de vorm hebben van een constante of een tijdreeks. De zoutmassa M_{spui} die getransporteerd wordt door de spuisluis is gelijk aan

$$M_{spui} = Q_{spui} c_{spui} S_{bakje} \Delta t \quad (C.3)$$

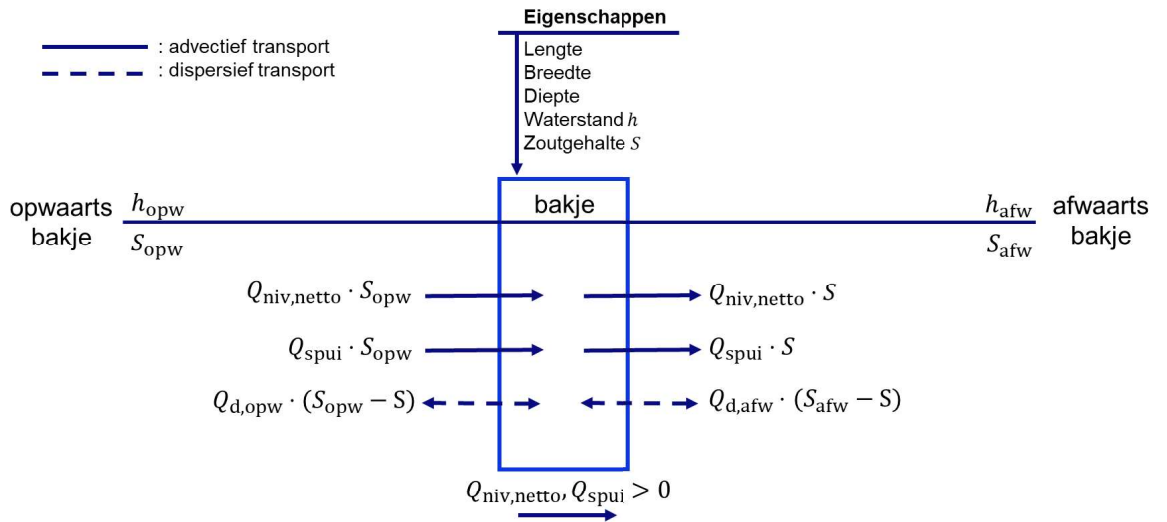
met S_{bakje} het gemiddelde zoutgehalte in het bakje (bv. binnenspuikanaal) waaruit water onttrokken wordt. Een factor $c_{spui} < 1$ kan bij een kunstwerk worden gebruikt om het effect weer te geven van een ondiep binnenspuikanaal, waardoor relatief veel water uit de zoetere bovenlaag wordt onttrokken. Voor spuisluisen met selectieve onttrekking geldt $c_{spui} > 1$ (Deltares, 2022d). Let op dat deze factor alleen van toepassing is bij het kunstwerk zelf, voor advectioneel transporten ten gevolge van het spuien in omliggende bakjes geldt $c_{spui} = 1$. Ook een gemaal met een pompdebiet kan met behulp van vergelijking C.3 worden beschreven. Voor spuisluisen is een specifieke module in ontwikkeling, de spuisluisformulering (SSF), die te zijner tijd ook onderdeel kan zijn van het ZTM, ter vervanging van deze vereenvoudigde formulering (zie Bijlage D).

Module: bakjes

Het is nuttig om een groot watersysteem op te delen in kleinere bakjes om de ontwikkeling van het zoutgehalte op een specifiekere locatie te verkennen, bijvoorbeeld op locaties waar water wordt onttrokken voor irrigatie of door drinkwaterzuiveringsinstallaties. Een bakje stelt dus een deel van het watersysteem voor, bv. een voorhaven of (een deel van) een kanaal, en wordt beschreven met behulp van de geometrie (lengte, breedte, diepte), de waterstand en het zoutgehalte. In een bakje vindt zowel advectioneel als dispersief transport plaats tussen randen en andere bakjes; tussen het bakje en kunstwerken is dit enkel advectioneel transport. Figuur C.2 toont een schematische weergave van de debieten en daarbij horende zoutmassa's die een bakje passeren voor een voorbeeld waarin het bakje is verbonden met andere bakjes, en waarbij het netto debiet in de positieve richting is gedefinieerd.

Bakjes zijn typisch niet symmetrisch en daarom moet een keuze worden gemaakt voor gemiddelde afmetingen voor de breedte en diepte, wat invloed heeft op de grootte van het doorstroomoppervlak dat wordt gebruikt bij het afleiden van de dispersie naar andere objecten.

⁷ <https://libzsf.readthedocs.io/en/latest/index.html>



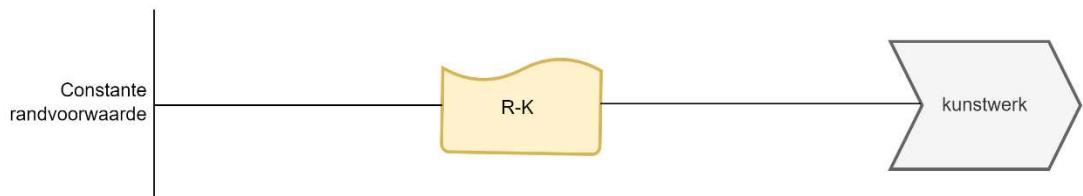
Figuur C.2: Schematische weergave van een bakje voor het geval $Q_{niv,netto}, Q_{spui} > 0$ met de debieten Q en daarbij horende zoutgehaltes S die aan weerszijden een bakje in- en uitstromen.

Verbindingen en massatransporten tussen modules

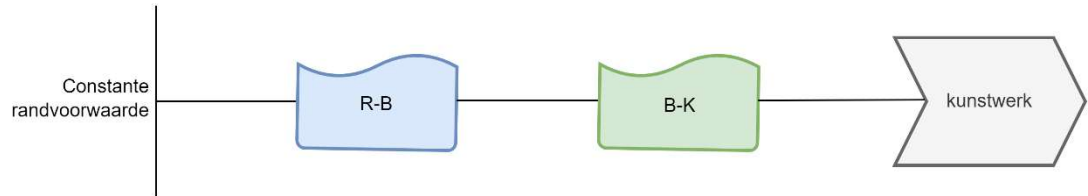
Afhankelijk van de configuratie van bakjes en kunstwerken bestaan er verschillende ‘verbindingen’ tussen de modules en vinden verschillende vormen van transport plaats. Binnen het ZTM onderscheiden we daarom meerdere varianten:

- Bakjes die alleen een verbinding vormen tussen een kunstwerk en een constante randvoorwaarde (zie Figuur C.3);
- Bakjes die naast de verbinding met kunstwerk of rand ook nog een verbinding hebben met een ander bakje (zie Figuur C.4);
- Bakjes die alleen verbonden zijn met andere bakjes (zie Figuur C.5).

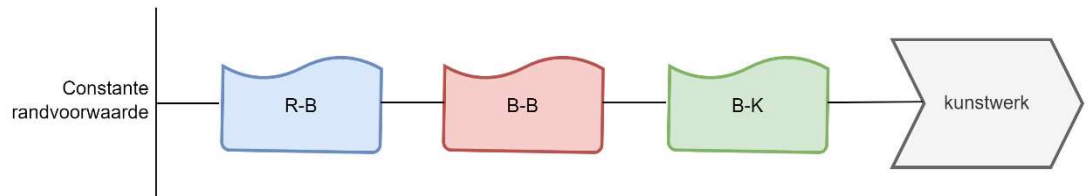
Hierbij is het ook van belang aan welke zijde van het object elke verbinding geldt: zitten de randen, bakjes of kunstwerken aan de stroom op- of afwaartse zijde? Voor elk van de verbindingen in de figuren geldt dus, met uitzondering van de symmetrische bakje-bakje verbinding, dat er nog een omgekeerde versie is. Dit wil zeggen dat bv. de verbindingen kunst-rand en rand-kunst niet identiek zijn, waarbij de verbinding genoteerd is als links-rechts, ofwel stroom op- en afwaarts t.o.v. van het desbetreffende bakje. Dit uit zich zowel in de richting als in de grootte van de massatransporten. Alle mogelijke transportvergelijkingen worden in detail uiteengezet in Paragraaf C.4. Tussen twee bakjes en tussen een bakje en een rand met constante voorwaarden vindt zowel advection als dispersief transport plaats. Tussen een bakje en een kunstwerk vindt alleen advection transport plaats.



Figuur C.3 Configuratie waarbij het bakje aan de ene zijde verbonden is met een constante randvoorwaarde (R) en aan de andere zijde met een kunstwerk (K).



Figuur C.4 Configuratie waarbij bakjes zowel met een ander bakje (B) als met een constante randvoorwaarde (blauw) of een kunstwerk (groen) verbonden zijn.



Figuur C.5 Configuratie waarbij één van de bakjes (rood) alleen verbonden is met andere bakjes.

De massatransporten in de verschillende typen bakjes kunnen beschreven worden met behulp van onderstaande vergelijkingen. De waterstanden van een serie bakjes aan één zijde van een kunstwerk worden als gelijk beschouwd. De totale afvoer Q door deze serie bakjes is, onder de veronderstelling dat de waterstand (en dus het volume van de bakjes) niet verandert, gelijk aan

$$Q = Q_{\text{spui}} + Q_{\text{niv,netto}} \quad (\text{C. 4})$$

waarbij het $Q_{\text{niv,netto}}$ wordt berekend door de ZSF aan de hand van waterstanden en de waterverplaatsing door schepen in de schutkolk. Afhankelijk van de waterstanden links en rechts van de schutsluis is er een netto nivelleerdebiet richting de zoete of de zoute zijde. Ook het spuidebiet kan zowel positief als negatief zijn: positief bij het spuien van overtollig water van de zoete naar de zoute zijde, negatief door een zoutlek of visvriendelijk spuibehaar. In deze gedetailleerde beschrijving beperken we ons tot het geval $Q_{\text{spui}}, Q_{\text{niv,netto}} > 0$, zie Paragraaf C.4 voor alle mogelijke combinaties van positieve en negatieve debieten en de daarbij horende massatransporten en saliniteitsverschillen.

Voor een bakje tussen een rand en een ander bakje (verbinding R-B, zie Figuur C.4), geldt voor de zoutmassa de volgende vergelijking:

$$M_{\text{RB}}^t = M_{\text{RB}}^{t-1} + M_{\text{spui}} + M_{\text{niv}} + M_{\text{d,rand}} + M_{\text{d,bakje}}, \quad (\text{C. 5})$$

waar advectieterm M_{spui} bij aanwezigheid van een spuisluis of gemaal gegeven is door

$$M_{\text{spui}} = Q_{\text{spui}} \Delta S \Delta t, \quad (\text{C. 6})$$

of bij afwezigheid door $M_{\text{spui}} = 0$. Er is geen kunstwerkobject in deze verbinding, en dus geen factor c_{spui} . In vergelijking C.5 wordt advectieterm M_{niv} gegeven door

$$M_{\text{niv}} = Q_{\text{niv,netto}} \Delta S \Delta t. \quad (\text{C. 7})$$

Het saliniteitsverschil ΔS in vergelijkingen C.6 en C.7 geeft het verschil tussen de saliniteit van het object stroom op- dan wel afwaarts en het desbetreffende bakje.

De totale zoutmassa M_d die wordt getransporteerd d.m.v. dispersie bestaat in dit geval uit twee termen vanwege de uitwisseling met zowel het andere bakje als de constante rand. De massaflux als gevolg van dispersie ϕ_d wordt als volgt berekend:

$$\phi_d = c_d Q_{LE} \Delta S \quad (C.8)$$

met $c_d < 1$ een kalibratiefactor, bepaald o.b.v. kennis uit eerdere projecten (Deltares, 2022). Deze factor houdt rekening met het feit dat de uitwisseling tussen de bakjes en randen niet begint met een harde scheiding tussen twee zoutgehalten zoals het geval is bij een kolkuitwisseling. Hieruit volgt dan een debiet t.g.v. dispersie,

$$Q_d = c_d Q_{LE}. \quad (C.9)$$

De afvoer als gevolg van de kolkuitwisseling Q_{LE} in bovenstaande vergelijkingen is gelijk aan

$$Q_{LE} = \frac{1}{2} c A_{\min} = \frac{1}{4} B_{\min} \sqrt{g' h_{\min}^3} \quad (C.10)$$

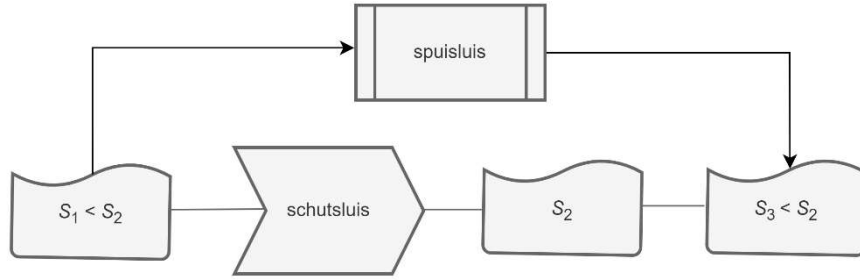
met A_{\min} het minimale doorstroomoppervlak van het bakje. De constante randvoorwaarde kan een heel groot reservoir ($V \gg V_{\text{bakje}}$) voorstellen. Om deze reden wordt gerekend met het minimale doorstroomoppervlak van de dichtheidsgolf, en dus met de kleinste waterdiepte h_{\min} en de kleinste breedte B_{\min} . Voor de gereduceerde zwaartekracht (zie vergelijking C.2) wordt in het ZTM gebruik gemaakt van de benadering

$$g' \approx g \frac{0.8 |\Delta S|}{1000 + \left(0.8 \cdot \frac{1}{2} (S_{\text{object}} + S)\right)}, \quad (C.11)$$

met S de saliniteit van het bakje en S_{object} de saliniteit van het object stroom op- of afwaarts van het bakje. De factor 0.8 wordt hier gebruikt om saliniteitsverschil (in kg/m^3) om te schrijven naar een dichtheidsverschil ($\Delta\rho \approx 0.8\Delta S$). Deze benadering wordt vervolgens ook in de noemer gebruikt om saliniteit naar de gemiddelde dichtheid $\bar{\rho}$ om te schrijven. Hierbij is aangenomen dat effecten door temperatuur verwaarloosbaar zijn vergeleken met die van de zoutmassa. Afhankelijk van welke bakjes verbonden zijn met de spuisluis (of gemaal), zal een reeks van opeenvolgende bakjes niet altijd alleen een toe- of juist afname in saliniteit zien. Dit komt voor wanneer de spuisluis en schutsluis niet beide met dezelfde bakjes verbonden zijn (zie Figuur C.6), bijvoorbeeld door de aanwezigheid van een aparte buitenvoorhaven en buitenspuikanaal. Door het saliniteitsverschil altijd te beschrijven als het verschil tussen het stroomopwaartse of stroomafwaartse object en zichzelf,

$$\Delta S = S_{\text{object}} - S, \quad (C.12)$$

zorgt het teken er altijd voor dat het transport in de juiste richting plaatsvindt: als het zouter is buiten het desbetreffende bakje dan is $\Delta S > 0$ en komt er zout binnen in het bakje, als het zoeter is buiten het bakje dan is $\Delta S < 0$ en zal er zout vanuit het desbetreffende bakje verplaatsen naar het object ernaast.



Figuur C.6 Configuratie waarin de saliniteit S in opeenvolgende bakjes niet strikt toe- of afneemt.

De zoutmassa die wordt getransporteerd door dispersie volgt uit vergelijking C.8 met behulp van:

$$M_d = \phi_d \Delta t \quad (C.13)$$

Voor de verbinding bakje-rand gelden dezelfde vergelijkingen als voor rand-bakje, echter verandert ΔS doordat het bakje en de rand nu aan tegenovergestelde zijden zitten. Voor bakjes verbonden met een ander bakje en met een kunstwerk (verbinding B-K, zie Figuur C.4) geldt dat:

$$M_{BK}^t = M_{BK}^{t-1} + M_{spui} + M_{niv} + M_{sluis} + M_{d,bakje} \quad (C.14)$$

In tegenstelling tot in vergelijking C.5 wordt het spuidebiet hier wel met een factor c_{spui} vermenigvuldigt. We nemen in deze beschouwing aan dat er geen dispersie plaats vindt tussen bakjes en kunstwerken, omdat de (schuif)deuren van de sluis meestal gesloten zullen zijn. De zoutmassa die wordt getransporteerd door de sluis (of sluisen) M_{sluis} wordt bepaald met behulp van de massaflux berekend door de ZSF:

$$M_{sluis} = \phi_{ZSF} \Delta t. \quad (C.15)$$

Voor bakjes die verbonden zijn met een rand en een kunstwerk (verbinding R-K, zie Figuur C.3) geldt:

$$M_{RK}^t = M_{RK}^{t-1} + M_{spui} + M_{niv} + M_{sluis} + M_{d,rand}. \quad (C.16)$$

In vergelijking C.16 verandert het teken van M_{niv} en van M_{sluis} , afhankelijk van de stroomopdan wel -afwaartse locatie van de rand en het kunstwerk. Ook ϕ_{ZSF} verandert (zie vergelijking C.15) afhankelijk van of deze reeks objecten zich aan de zoete of zoute zijde bevindt. Deze verschillen zijn in detail uitgewerkt in Paragraaf C.4. Ten slotte geldt voor bakjes die enkel met andere bakjes verbonden zijn (verbinding B-B, zie Figuur C.5) dat:

$$M_{BB}^t = M_{BB}^{t-1} + M_{spui} + M_{niv} + M_{d,bakje,opw} + M_{d,bakje,afw} \quad (C.17)$$

waarbij nu onderscheid wordt gemaakt tussen de massa transporten t.g.v. dispersie tussen meerdere bakjes: de een stroomopwaarts en de ander stroomafwaarts. Ook hier veranderen de richtingen van de transporten afhankelijk van de locatie (zoete of zoute zijde) van de bakjesreeks.

Vervolgens wordt na alle uitwisselingen het nieuwe zoutgehalte in het bakje berekend met behulp van de beschrijving van de zoutmassa M^t die van toepassing is op de desbetreffende verbinding (zie Paragraaf C.4 voor het overzicht per case) en het volume van het bakje V_{bakje} :

$$S_{bakje}^t = \frac{M^t}{V_{bakje}} \quad (C.18)$$

Door de in de bakjesmodule berekende zoutmassa's en zoutgehalten op tijdstip t weer als nieuwe randvoorwaarden in te voeren in het ZTM kan berekend worden hoe de zoutgehalten in de bakjes zich ontwikkelen in de tijd, ook onder invloed van veranderingen in de sluisoperatie, waterstand of afvoer.

C.3 Lijst van symbolen

Tabel C.1 geeft een overzicht van alle relevante grootheden en de daarbij horende eenheden en definities.

Tabel C.1: Lijst van gebruikte symbolen met eenheden en definities.

Symbool	Eenheid	Definitie
A_{\min}	m	Minimale doorstroomoppervlak
B_{\min}	m	Minimale breedte
c	m/s	Golfsnelheid
c_d	-	Kalibratie coëfficiënt op het dispersiedebiet, gebruikt indien er in de beginsituatie geen harde scheiding is tussen zoet en zout (Deltares, 2022d)
c_{DOT}	-	Kalibratie coëfficiënt die de deur-opentijd omzet in een representatieve waarde (Deltares, 2018)
c_{spui}	-	Kalibratie coëfficiënt op de zoutconcentratie van het onttrokken water, welke wordt beïnvloed door de geometrie van het spuikanaal en de aanwezigheid van selectieve onttrekking (Deltares, 2022d)
c_M	-	Symmetrie-coëfficiënt die aangeeft of de sluisdeuren aan beide kanten even lang open staan (Deltares, 2018)
g	m/s ²	Zwaartekrachtversnelling
g'	m/s ²	Gereducerde zwaartekracht
h	m	Waterdiepte
h_{\min}	m	Minimale waterdiepte
$M_{\text{d,opw}}$	kg	Zoutmassa die wordt verplaatst t.g.v. dispersie met stroomopwaarts object
$M_{\text{d,afw}}$	kg	Zoutmassa die wordt verplaatst t.g.v. dispersie met stroomafwaarts object
M_{niv}	kg	Zoutmassa die wordt verplaatst t.g.v. het nivelleren
M_{sluis}	kg	Zoutmassa verplaatst t.g.v. kolkuitwisseling
M_{spui}	kg	Zoutmassa verplaatst d.m.v. spuien
M^t	kg	Totale zoutmassa in het bakje op tijdstip t
M^{t-1}	kg	Totale zoutmassa in het bakje op tijdstip $t - 1$
Q	m ³ /s	Totale afvoer
Q_d	m ³ /s	Debiet t.g.v. dispersie
$Q_{\text{d,afw}}$	m ³ /s	Debiet t.g.v. dispersie in stroomafwaartse richting
$Q_{\text{d,opw}}$	m ³ /s	Debiet t.g.v. dispersie in stroomopwaartse richting
Q_{LE}	m ³ /s	Debiet t.g.v. kolkuitwisseling
$Q_{\text{niv,netto}}$	m ³ /s	Netto debiet door de schutsluis, berekend m.b.v. ZSF
Q_{spui}	m ³ /s	Spuidebiet
S	kg/m ³	Zoutgehalte van het bakje
S_{afw}	kg/m ³	Zoutgehalte in het object stroomafwaarts van het bakje
S_{bakje}	kg/m ³	Zoutgehalte in een aangrenzend bakje
$S_{\text{binnenspui}}$	kg/m ³	Zoutgehalte in het binnenspuikanaal, d.w.z. het object aan de meerzijde in verbinding met de spuisluis

$S_{\text{buitenspui}}$	kg/m ³	Zoutgehalte in het buitenspuikanaal, d.w.z. het object aan de zeezijde in verbinding met de spuisluis
S_{object}	kg/m ³	Zoutgehalte in een stroomop- of afwaarts, aangrenzend object
S_{opw}	kg/m ³	Zoutgehalte in het object stroomopwaarts van het bakje
S_{rand}	kg/m ³	Zoutgehalte van een constante randvoorwaarde
S_{spui}	kg/m ³	Zoutgehalte van water dat naar zee gespuid wordt
V_{bakje}	m ³	Volume van het bakje
ϕ_d	kg/s	Massaflux t.g.v. dispersie
ϕ_{ZSF}	kg/s	Totale massaflux door de schutsluis, berekend m.b.v. ZSF
ΔS	kg/m ³	Saliniteitsverschil
Δt	s	Tijdstap
$\Delta \rho$	kg/m ³	Dichtheidsverschil
ρ	kg/m ³	Dichtheid
$\bar{\rho}$	kg/m ³	Gemiddelde dichtheid

C.4 Massatransporten voor de verschillende cases

In algemene vorm kan de totale zoutmassa op tijdstip t worden beschreven met behulp van

$$M^t = M^{t-1} + M_{\text{spui}} + M_{\text{niv}} + M_{\text{sluis}} + M_{\text{d,opw}} + M_{\text{d,afw}}, \quad (\text{C.19})$$

bestaande uit de totale massa op de vorige tijdstap en advectieve bijdrages door spuien, nivelleren, schutten en dispersie met een rand of bakje aan de stroom op- of afwaartse zijde. De grootte van de zoutmassa is afhankelijk van de netto richting van de spui- en nivelleerdebielen en het type object waarmee het bakje verbonden is. Het is ook van belang of de reeks objecten die beschouwd wordt aan de zoete of zoute zijde van het kunstwerk zit. De complexiteit van het bakjesmodel neemt hierdoor flink toe: Tabel C.2 geeft weer wat de achtentwintig verschillende 'cases' als gevolg hebben voor de verschillende termen in vergelijking C.19.

Tabel C.2 Overzicht van de zoutmassa's die van toepassing zijn in een bakje met saliniteit S voor verschillende combinaties van positieve en negatieve spui- en nivelleerdebielen en de verbonden objecten. De verbindingen zijn genoteerd in de vorm stroomopwaarts object-stroomafwaarts object.

Q_{spui}	$Q_{\text{niv,netto}}$	verbinding	Zoutmassa's in vgl. (A1)
$Q_{\text{spui}} > 0$	$Q_{\text{niv,netto}} > 0$	rand-bakje	$M_{\text{spui}} = Q_{\text{spui}}(S_{\text{rand}} - S)\Delta t$ $M_{\text{niv}} = Q_{\text{niv,netto}}(S_{\text{rand}} - S)\Delta t$ $M_{\text{sluis}} = 0$ $M_{\text{d,rand}} = Q_{\text{d,opw}}(S_{\text{rand}} - S)$ $M_{\text{d,bakje}} = Q_{\text{d,afw}}(S_{\text{bakje}} - S)$
		bakje-rand	$M_{\text{spui}} = Q_{\text{spui}}(S_{\text{bakje}} - S)\Delta t$ $M_{\text{niv}} = Q_{\text{niv,netto}}(S_{\text{bakje}} - S)\Delta t$ $M_{\text{sluis}} = 0$ $M_{\text{d,rand}} = Q_{\text{d,afw}}(S_{\text{rand}} - S)$ $M_{\text{d,bakje}} = Q_{\text{d,opw}}(S_{\text{bakje}} - S)$
		rand-kunst	$M_{\text{spui}} = Q_{\text{spui}}(S_{\text{rand}} - c_{\text{spui}}S)\Delta t$ $M_{\text{niv}} = Q_{\text{niv,netto}}S_{\text{rand}}\Delta t$ $M_{\text{sluis}} = -\phi_{\text{ZSF,Zoet}}\Delta t$ $M_{\text{d,rand}} = Q_{\text{d,opw}}(S_{\text{rand}} - S)$ $M_{\text{d,kunst}} = 0$
		kunst-rand	$M_{\text{spui}} = Q_{\text{spui}}(c_{\text{spui}}S_{\text{binnenspui}} - S)\Delta t$ $M_{\text{niv}} = -Q_{\text{niv,netto}}S\Delta t$ $M_{\text{sluis}} = \phi_{\text{ZSF,Zout}}\Delta t$

			$M_{d,rand} = Q_{d,afw} (S_{rand} - S)$ $M_{d,kunst} = 0$
		bakje-kunst	$M_{spui} = Q_{spui} (S_{bakje} - c_{spui} S) \Delta t$ $M_{niv} = Q_{niv,netto} S_{bakje} \Delta t$ $M_{sluis} = -\phi_{ZSF,Zoet} \Delta t$ $M_{d,bakje} = Q_{d,opw} (S_{bakje} - S)$ $M_{d,kunst} = 0$
		kunst-bakje	$M_{spui} = Q_{spui} (c_{spui} S_{binnenspui} - S) \Delta t$ $M_{niv} = -Q_{niv,netto} S \Delta t$ $M_{sluis} = \phi_{ZSF,Zout} \Delta t$ $M_{d,bakje} = Q_{d,afw} (S_{bakje} - S)$ $M_{d,kunst} = 0$
		bakje,opw- bakje,afw	$M_{spui} = Q_{spui} (S_{bakje,opw} - S) \Delta t$ $M_{niv} = Q_{niv,netto} (S_{bakje,opw} - S) \Delta t$ $M_{sluis} = 0$ $M_{d,bakje,opw} = Q_{d,opw} (S_{bakje,opw} - S)$ $M_{d,bakje,afw} = Q_{d,afw} (S_{bakje,afw} - S)$
$Q_{spui} > 0$	$Q_{niv,netto} < 0$	rand-bakje,afw	$M_{spui} = Q_{spui} (S_{rand} - S) \Delta t$ $M_{niv} = Q_{niv,netto} (S - S_{bakje,afw}) \Delta t$ $M_{sluis} = 0$ $M_{d,rand} = Q_{d,opw} (S_{rand} - S)$ $M_{d,bakje} = Q_{d,afw} (S_{bakje,afw} - S)$
		bakje,opw-rand	$M_{spui} = Q_{spui} (S_{bakje,opw} - S) \Delta t$ $M_{niv} = Q_{niv,netto} (S - S_{rand}) \Delta t$ $M_{sluis} = 0$ $M_{d,rand} = Q_{d,afw} (S_{rand} - S)$ $M_{d,bakje} = Q_{d,opw} (S_{bakje,opw} - S)$
		rand-kunst	$M_{spui} = Q_{spui} (S_{rand} - c_{spui} S) \Delta t$ $M_{niv} = Q_{niv,netto} S \Delta t$ $M_{sluis} = -\phi_{ZSF,Zoet} \Delta t$ $M_{d,rand} = Q_{d,opw} (S_{rand} - S)$ $M_{d,kunst} = 0$
		kunst-rand	$M_{spui} = Q_{spui} (c_{spui} S_{binnenspui} - S) \Delta t$ $M_{niv} = -Q_{niv,netto} S_{rand} \Delta t$ $M_{sluis} = \phi_{ZSF,Zout} \Delta t$ $M_{d,rand} = Q_{d,afw} (S_{rand} - S)$ $M_{d,kunst} = 0$
		bakje,opw-kunst	$M_{spui} = Q_{spui} (S_{bakje,opw} - c_{spui} S) \Delta t$ $M_{niv} = Q_{niv,netto} S \Delta t$ $M_{sluis} = -\phi_{ZSF,Zoet} \Delta t$ $M_{d,bakje} = Q_{d,opw} (S_{bakje,opw} - S)$ $M_{d,kunst} = 0$
		kunst-bakje,afw	$M_{spui} = Q_{spui} (c_{spui} S_{binnenspui} - S) \Delta t$ $M_{niv} = -Q_{niv,netto} S_{bakje,afw} \Delta t$ $M_{sluis} = \phi_{ZSF,Zout} \Delta t$ $M_{d,bakje} = Q_{d,afw} (S_{bakje,afw} - S)$ $M_{d,kunst} = 0$
		bakje,opw- bakje,afw	$M_{spui} = Q_{spui} (S_{bakje,opw} - S) \Delta t$ $M_{niv} = Q_{niv,netto} (S - S_{bakje,afw}) \Delta t$ $M_{sluis} = 0$ $M_{d,bakje,opw} = Q_{d,opw} (S_{bakje,opw} - S)$ $M_{d,bakje,afw} = Q_{d,afw} (S_{bakje,afw} - S)$

$Q_{spui} < 0$	$Q_{niv,netto} > 0$	rand-bakje,afw	$M_{spui} = Q_{spui}(S - S_{bakje,afw})\Delta t$ $M_{niv} = Q_{niv,netto}(S_{rand} - S)\Delta t$ $M_{sluis} = 0$ $M_{d,rand} = Q_{d,opw}(S_{rand} - S)$ $M_{d,bakje} = Q_{d,afw}(S_{bakje,afw} - S)$
		bakje,opw-rand	$M_{spui} = Q_{spui}(S - S_{rand})\Delta t$ $M_{niv} = Q_{niv,netto}(S_{bakje,opw} - S)\Delta t$ $M_{sluis} = 0$ $M_{d,rand} = Q_{d,afw}(S_{rand} - S)$ $M_{d,bakje} = Q_{d,opw}(S_{bakje,opw} - S)$
		rand-kunst	$M_{spui} = Q_{spui}(S - c_{spui}S_{buitenspui})\Delta t$ $M_{niv} = Q_{niv,netto}S_{rand}\Delta t$ $M_{sluis} = -\phi_{ZSF,Zoet}\Delta t$ $M_{d,rand} = Q_{d,opw}(S_{rand} - S)$ $M_{d,kunst} = 0$
		kunst-rand	$M_{spui} = Q_{spui}(c_{spui}S - S_{rand})\Delta t$ $M_{niv} = -Q_{niv,netto}S\Delta t$ $M_{sluis} = \phi_{ZSF,Zout}\Delta t$ $M_{d,rand} = Q_{d,afw}(S_{rand} - S)$ $M_{d,kunst} = 0$
		bakje,opw-kunst	$M_{spui} = Q_{spui}(S - c_{spui}S_{buitenspui})\Delta t$ $M_{niv} = Q_{niv,netto}S_{bakje,opw}\Delta t$ $M_{sluis} = -\phi_{ZSF,Zoet}\Delta t$ $M_{d,bakje} = Q_{d,opw}(S_{bakje,opw} - S)$ $M_{d,kunst} = 0$
		kunst-bakje,afw	$M_{spui} = Q_{spui}(c_{spui}S - S_{bakje,afw})\Delta t$ $M_{niv} = -Q_{niv,netto}S\Delta t$ $M_{sluis} = \phi_{ZSF,Zout}\Delta t$ $M_{d,bakje} = Q_{d,afw}(S_{bakje,afw} - S)$ $M_{d,kunst} = 0$
		bakje,opw-bakje,afw	$M_{spui} = Q_{spui}(S - S_{bakje,afw})\Delta t$ $M_{niv} = Q_{niv,netto}(S_{bakje,opw} - S)\Delta t$ $M_{sluis} = 0$ $M_{d,bakje,opw} = Q_{d,opw}(S_{bakje,opw} - S)$ $M_{d,bakje,afw} = Q_{d,afw}(S_{bakje,afw} - S)$
$Q_{spui} < 0$	$Q_{niv,netto} < 0$	rand-bakje,afw	$M_{spui} = Q_{spui}(S - S_{bakje,afw})\Delta t$ $M_{niv} = Q_{niv,netto}(S - S_{bakje,afw})\Delta t$ $M_{sluis} = 0$ $M_{d,rand} = Q_{d,opw}(S_{rand} - S)$ $M_{d,bakje} = Q_{d,afw}(S_{bakje,afw} - S)$
		bakje,opw-rand	$M_{spui} = Q_{spui}(S - S_{rand})\Delta t$ $M_{niv} = Q_{niv,netto}(S - S_{rand})\Delta t$ $M_{sluis} = 0$ $M_{d,rand} = Q_{d,afw}(S_{rand} - S)$ $M_{d,bakje} = Q_{d,opw}(S_{bakje,opw} - S)$
		rand-kunst	$M_{spui} = Q_{spui}(S - c_{spui}S_{buitenspui})\Delta t$ $M_{niv} = Q_{niv,netto}S\Delta t$ $M_{sluis} = -\phi_{ZSF,Zoet}\Delta t$ $M_{d,rand} = Q_{d,opw}(S_{rand} - S)$ $M_{d,kunst} = 0$
		kunst-rand	$M_{spui} = Q_{spui}(c_{spui}S - S_{rand})\Delta t$ $M_{niv} = -Q_{niv,netto}S\Delta t$

			$M_{sluis} = \phi_{ZSF,Zout}\Delta t$ $M_{d,rand} = Q_{d,afw} (S_{rand} - S)$ $M_{d,kunst} = 0$
		bakje,opw-kunst	$M_{spui} = Q_{spui} (S - c_{spui} S_{buitenspui}) \Delta t$ $M_{niv} = Q_{niv,netto} S \Delta t$ $M_{sluis} = -\phi_{ZSF,Zoet} \Delta t$ $M_{d,bakje} = Q_{d,opw} (S_{bakje,opw} - S)$ $M_{d,kunst} = 0$
		kunst-bakje,afw	$M_{spui} = Q_{spui} (c_{spui} S - S_{bakje,afw}) \Delta t$ $M_{niv} = -Q_{niv,netto} S_{bakje,afw} \Delta t$ $M_{sluis} = \phi_{ZSF,Zout} \Delta t$ $M_{d,bakje} = Q_{d,afw} (S_{bakje,afw} - S)$ $M_{d,kunst} = 0$
		bakje,opw- bakje,afw	$M_{spui} = Q_{spui} (S - S_{bakje,afw}) \Delta t$ $M_{niv} = Q_{niv,netto} (S - S_{bakje,afw}) \Delta t$ $M_{sluis} = 0$ $M_{d,bakje,opw} = Q_{d,opw} (S_{bakje,opw} - S)$ $M_{d,bakje,afw} = Q_{d,afw} (S_{bakje,afw} - S)$

D Ontwikkeling Spuisluisformulering (SSF)

Na de ontwikkeling van de Zeesluisformulering (ZSF) in het eerste KpNK (2017-2020) is in het tweede KpNK (2021-2024) gewerkt aan de ontwikkeling van een vergelijkbare formulering voor spuisluizen: de Spuisluisformulering (SSF). Samen met de ZSF maakt de SSF onderdeel uit van het Zouttransportmodel (ZTM). In deze bijlage worden de ontwikkelingen van de SSF kort samengevat. Ook de bakjes in het ZTM zijn verder ontwikkeld om rekening te kunnen houden met waterstandsveranderingen in de bakjes (zie Paragraaf D.1). Paragrafen D.2 tot en met D.5 gaan in op de ontwikkelde modules in de SSF: spuien op basis van afvoerrelaties, selectieve onttrekking, lekkage en visvriendelijk spui-beheer. Tot slot worden alle ontwikkelingen in de kort samengevat in Paragraaf D.6.

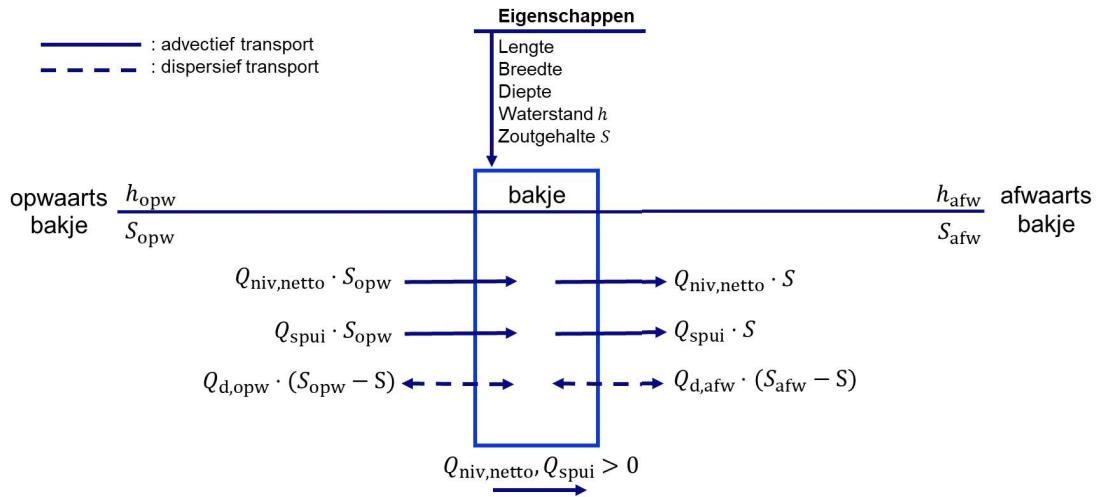
D.1 Waterstandsveranderingen in de bakjes

In de eerste versie van het ZTM (zie Bijlage B en C) is gewerkt met een constante waterstand in alle bakjes. Omdat het getij een grote invloed heeft op de hoeveelheid zoutindringing, is in 2023 gewerkt aan het mee kunnen nemen van waterstandsveranderingen.

D.1.1 Bestaande module: bakjes

Een bakje stelt een deel van het watersysteem voor, bijvoorbeeld een voorhaven of (een deel van) een kanaal, en wordt beschreven met behulp van de geometrie (lengte, breedte, diepte), de waterstand en het zoutgehalte. Het zoutgehalte is een volume gemiddelde in het bakje. In de bestaande basis code van de ZSF met bakjes wordt een constant volume gebruikt. De diepte en de breedte worden gebruikt om het doorstroomoppervlak tussen bakjes te berekenen dat wordt gebruikt bij het afleiden van de dispersie naar andere objecten. De diepte kan ook een effect hebben op de flux door een dichtheidsgolf bij een schutsluis (na het openen van de sluisdeur).

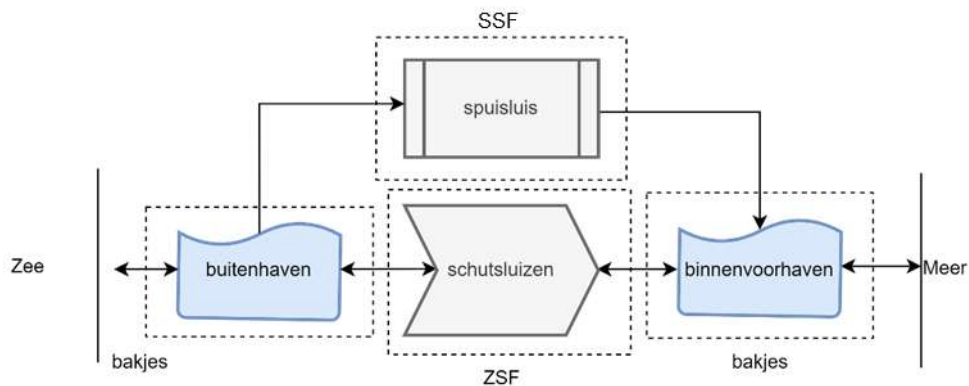
Als de waterstand bij de randvoorwaarde veranderd (op zee als gevolg van getij) dan zal het volume van de aangrenzende bakjes moeten veranderen. Dit vergt aanpassingen in de bestaande code van vergelijkingen van de ZSF met bakjes. Deze aanpassingen zijn in 2023 verwerkt. In een bakje vindt zowel advectioneel als dispersief transport plaats tussen randen en andere bakjes; tussen het bakje en kunstwerken is dit enkel advectioneel transport. Figuur D.1 toont een schematische weergave van de debieten en daarbij horende zoutmassa's die een bakje passeren voor een voorbeeld waarin het bakje is verbonden met andere bakjes, en waarbij het netto debiet in de positieve richting is gedefinieerd. Dit is de situatie waarin er geen waterstandsverandering plaatsvindt.



Figuur D.1: Schematische weergave van de transporten in een bakje voor het geval $Q_{niv,netto}, Q_{spui} > 0$ met de debieten Q en daarbij horende zoutgehaltes S die aan weerszijden een bakje in- en uitstromen.

D.1.2 Verandering van volume bakje – enkel bakje

In deze subsectie wordt een voorbeeld uitgewerkt van een bakje naast een modelrand waarin de waterstand verandert. De modelrand is de zeezijde met een getij.



Figuur D.2: Schematische weergave van het ZTM met aan weerszijden van de sluisen één bakje.

Er worden een paar aannames vereenvoudigingen gemaakt om het model simpel te maken:

- Bij elke modelstap zal de waterstand in alle bakjes aan een zijde van de sluisen hetzelfde zijn aan het einde van de modelstap;
- De volumeverplaatsingen tussen bakjes zal de concentratie hebben van het bakje 'ernaast' opwaarts van de getijbeweging (het water stroomt van zee naar sluis in opgaand tij en van sluis naar zee in neergaand getij). Let op: dit gebruik van 'opwaarts' is anders dan opwaarts elders in de beschrijvingen van de ZSF waarin opwaarts altijd richting meerzijde is.

D.1.2.1. Opgaand tij

Bij opgaand tij zal de waterstand van de modelrand bij elke modelstap, t , hoger zijn dan de vorige stap, $t - 1$. Er moet in deze situatie een volume water vanuit de zee het bakje in om ervoor de zorgen dat de waterstand in het bakje stijgt. Het volume van het bakje stijgt dan ook. De concentratie van het water dat verplaatst wordt vanuit de zee zal de concentratie van de zee hebben. De verandering in waterstand, Δh , is dan het verschil tussen de waterstand bij de vorige modelstap, h^{t-1} , en de nieuwe waterstand, h^t :

$$\Delta h = h^t - h^{t-1} \quad (D.1)$$

Om het verplaatste volume, ΔV , uit te rekenen op basis van een verandering in waterstand, δh , is een oppervlak van het bakje, A_{bakje} , nodig.

$$\Delta V = \Delta h A_{\text{bakje}} \quad (\text{D.2})$$

De parameter A_{bakje} wordt alleen hier gebruikt en in geen ander deel van de ZTM formuleringen. Vervolgens zal de toegevoegde zoutmassa aan het bakje M_{getij} als volgt zijn

$$M_{\text{getij}} = S_{\text{zee}} \Delta V \quad (\text{D.3})$$

In deze simpele situatie van maar één bakje tussen modelrand en sluis kan de variabelen van het bakje als volgt geüpdatet worden. Na de modelstap, t , geldt voor de zoutmassa de volgende vergelijking:

$$M_{\text{bakje}}^t = M_{\text{bakje}}^{t-1} + M_{\text{spui}} + M_{\text{niv}} + M_{\text{d,rand}} + M_{\text{d,bakje}} + M_{\text{getij}} \quad (\text{D.4})$$

En zal het volume van het bakje zijn als volgt:

$$V_{\text{bakje}}^t = V_{\text{bakje}}^{t-1} + \Delta V \quad (\text{D.5})$$

En de nieuwe concentratie zal zijn:

$$S_{\text{bakje}}^t = \frac{M_{\text{bakje}}^t}{V_{\text{bakje}}^t} \quad (\text{D.6})$$

D.1.2.2. Neergaand tij

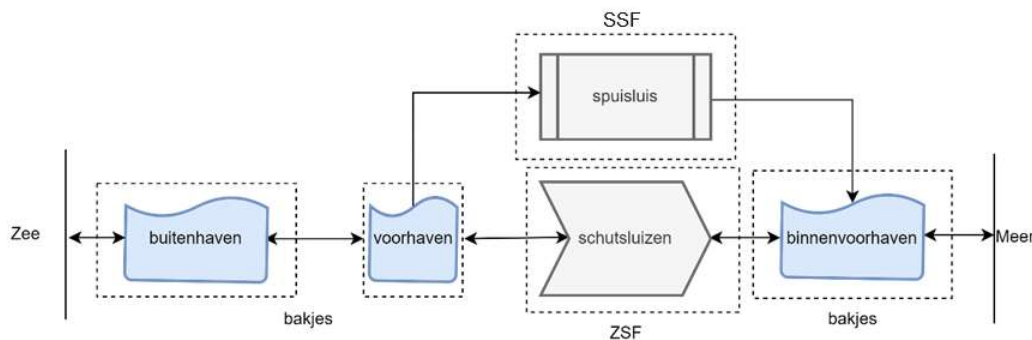
Bij neergaand tij zal de waterstand van de modelrand bij elke modelstap lager zijn dan de vorige stap. Er moet in deze situatie een volume water uit het bakje stromen richting zee. Deze zal de concentratie hebben van het bakje zelf. De toegevoegde massa aan het bakje is dan

$$M_{\text{getij}} = S_{\text{bakje}} \Delta V \quad (\text{D.7})$$

Omdat Δh in deze situatie negatief is zal ook ΔV negatief zijn en zal de massa afnemen met $|M_{\text{getij}}|$.

D.1.3 Verandering van volume bakje – twee bakjes

In deze subsectie wordt de methode in de voorgaande sectie uitgebreid naar de situatie waarin twee bakjes zich tussen modelrand en sluisen bevinden. Een voorbeeldcode met twee bakjes achter elkaar (in serie) aan de zeezijde is als onderdeel van dit project uitgewerkt. De onderliggende code is eenvoudig om te schrijven naar een situatie met twee bakjes naast elkaar (parallel), zoals in Figuur D.3.



Figuur D.3: Schematische weergave van het ZTM met twee bakjes aan de zeezijde en één bakje aan de meerzijde.

D.1.3.1. Opgaand tij

In deze situatie zijn er namelijk twee volumes die erbij komen: $\Delta V_1 = \Delta h A_{\text{buitenh.}}$ en $\Delta V_2 = \Delta h A_{\text{tussenh.}}$

Gegeven de aannames van de vorige subsectie zal de toegevoegde massa van het bakje naast de sluis berekend worden met de concentratie van het bakje ernaast, dat wil zeggen 'opwaarts' voor een getij beweging die van zee naar meer stroomt.

$$M_{\text{getij},2} = S_{\text{buitenh.}} \Delta V_2 \quad (\text{D. 8})$$

Omdat deze massa ook uit het bakje ernaast moet stromen is er vervolgens een extra term nodig in de vergelijking van de toegevoegde massa van het andere bakje, zodat het volume van dat bakje blijft toenemen met ΔV_1 :

$$M_{\text{getij},1} = S_{\text{zee}} (\Delta V_1 + \Delta V_2) - S_{\text{buitenh.}} \Delta V_2 \quad (\text{D. 9})$$

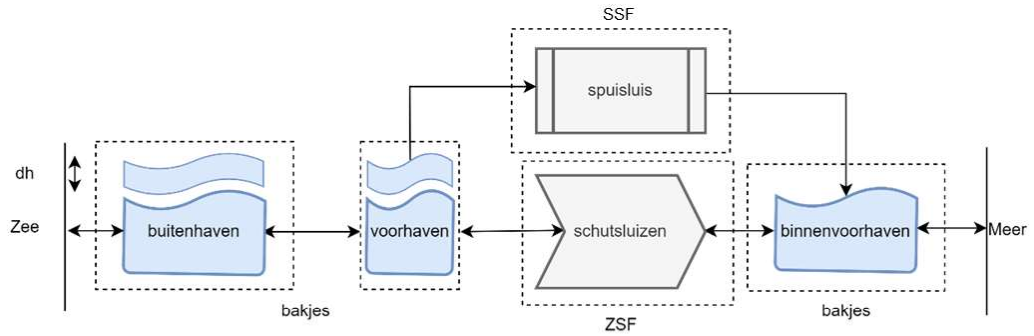
D.1.3.2. Neergaand tij

De analogie van de redenering hierboven leidt in de situatie van neergaand tij naar de volgende vergelijkingen voor de massa's

$$M_{\text{getij},2} = S_{\text{tussenh.}} \Delta V_2 \quad (\text{D. 10})$$

$$M_{\text{getij},1} = S_{\text{buitenh.}} (\Delta V_1 + \Delta V_2) - S_{\text{tussenh.}} \Delta V_2 \quad (\text{D. 11})$$

Nogmaals, omdat Δh in deze situatie negatief is zal ook ΔV_1 en ΔV_2 negatief zijn en zal de massa afnemen met $|M_{\text{getij}}|$, (zolang $S_{\text{buitenh.}} > S_{\text{tussenh.}}$).



Figuur D.4: Schematische weergave van de extra volumeverplaatsing door het meenemen van de getijdebeweging.

D.1.4 Kanttekeningen bij deze methode

1. Een te lange modelstap: een groot deel van het getij wordt overgeslagen en de tussentijds verzilting of verzoeting onderschat, en loopt achter op de werkelijkheid.
2. Te veel of grote bakjes: de getij golf loopt te snel door de zeezijde heen en de verzilting of verzoeting van de bakjes loopt voor op de werkelijkheid. Op dit moment is de implementatie van de waterstandsverandering ook alleen geschikt voor maximaal 3 bakjes aan een zijde (waar er verandering plaatsvindt).

D.2 Afvoerberekeningen binnen de SSF

In de eerste versie van het ZTM (zie Bijlage B en C) werd het spuien beschreven door een opgelegd debiet – vergelijkbaar met een pomp of gemaal. De spuimodule die nu is toegevoegd aan de code beschrijft spuien onder vrij verval middels een afvoerrelatie op basis van de waterstand bovenstrooms h_1 en benedenstrooms van de spuisluis h_2 , een afvoercoëfficiënt μ en de hoogte h_g en breedte W_0 van de schuifopening (WL | Delft Hydraulics, 2005). Afhankelijk van de omstandigheden, is het spuidebiet Q_{spui} gelijk aan:

$$Q_{\text{spui}} = \begin{cases} \mu W_0 h_g \sqrt{2g(h_1 - h_g)} & h_1 \geq \frac{3h_g}{2} \wedge 0 \leq h_2 \leq h_g \\ \mu W_0 \frac{2}{3} h_1 \sqrt{2g\left(h_1 - \frac{2}{3}h_2\right)} & h_1 < h_g \wedge h_2 \leq \frac{2h_1}{3} \\ \mu W_0 h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} & h_1 < h_g \wedge h_2 > \frac{2h_1}{3} \\ \mu W_0 h_g \sqrt{2g(h_1 - h_2)} & h_1 \geq \frac{3h_g}{2} \wedge h_2 > h_g \\ \mu W_0 h_g \sqrt{2g\left(h_1 - \frac{1}{2}h_g\right)} & h_1 \geq \frac{3h_g}{2} \wedge h_2 < 0 \end{cases} \quad (\text{D.12})$$

In elk van de beschreven condities wordt aangenomen dat de energiehogte gelijk is aan de bovenwaterstand: $E_1 = h_1$. De spuimodule van het ZTM maakt gebruik van een aantal parameters die al onderdeel zijn van de ZSF (waterstanden), maar vereist dus ook een aantal nieuwe parameters (afvoercoëfficiënt, spuirokerafmetingen). In de ZSF zijn alle hoogtes en dieptes uitgedrukt ten opzichte van NAP. In vergelijking D.12 zijn de hoogtes gedefinieerd ten opzichte van kruinhoogte – om die reden is ook de kruinhoogte een invoerparameter in de code. Afhankelijk van de richting van het spuidebiet, is het zoutgehalte van het gespuide volume gelijk aan het zoutgehalte van het bovenstroomse of benedenstroomse bakje.

Deze relatie voor Q_{spui} vervangt de Q_{spui} die in een eerdere versie van het ZTM toegepast is (zie Bijlage C). Het is echter vrij eenvoudig om alsnog een constant debiet op te leggen in de code, bijvoorbeeld voor de beschrijving van een gemaal.

D.3 Selectieve onttrekking

De zoutconcentratie van het gespuide water heeft standaard de concentratie van het bakje bovenstrooms. Deze concentratie kan aangepast worden middels een coëfficiënt om het fenomeen selectieve onttrekking mee te nemen (zie Bijlage C), waarbij water voornamelijk uit één laag van een gestratificeerd systeem onttrokken wordt. Deze coëfficiënt moet gekozen worden met behulp van kalibratie omdat de bakjes nu geen informatie bevatten over de mate van stratificatie die aanwezig is; de bakjes zijn volumegemiddeld. Om deze reden is er voor gekozen om de methode van Fan (Fan, 2008), die in 2021 en 2022 is onderzocht (Deltares, 2022), niet toe te passen in de SSF (Deltares, 2022c). Vooralsnog lijkt de gekozen methode middels een coëfficiënt voldoende aan te sluiten bij de gedefinieerde behoefte. De methode van Fan heeft in 2024 wel aansluiting gevonden in het ZTM voor de beschrijving van het zoutgehalte in het pompdebiet van een gemaal.

D.4 Lekkage door de schuiven (Lekmodule)

Om lekkage dat voorkomt door afsluitmiddelen bij spuisluizen ook mee te nemen in de massabalans, is er ook een zogenaamde lekmodule toegevoegd aan het ZTM. Het lekdebiet Q_{lek} wordt berekend op basis van de afvoerrelatie voor ondergedompelde openingen (Nortier & De Koning, 1996):

$$Q_{\text{lek}} = \mu_{\text{lek}} A_{\text{lek}} \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (\text{D.13})$$

met A_{lek} het lekoppervlak en μ_{lek} de afvoercoëfficiënt van de lekopening. Omdat de afvoercoëfficiënt van een lekopening doorgaans niet bekend is, is deze standaard gelijk aan 1, maar wel aan te passen door de gebruiker. Afhankelijk van de richting van het lekdebiet, is het zoutgehalte van het gelekte volume gelijk aan het zoutgehalte van het bovenstroomse of benedenstroomse bakje.

D.5 Zoutlek door visvriendelijk zoutbeheer (Vismodule)

De vismodule kan worden gebruikt om het zoutlek ten gevolge van visvriendelijk inlaten te kwantificeren en mee te nemen in de zoutbalans van de bakjes in het ZTM. Deze module is als het ware gelijk aan de afvoerrelaties (zie Paragraaf D.2), maar in tegengestelde richting. De vismodule wordt gebaseerd op een inventarisatie van de geometrie en het vismigratie protocol van de Bathse spuisluis, Krammersluizen, Haringvlietsluizen, IJmuiden en de Afsluitdijk (RWS-WVL, 2023). De verschillende visvriendelijk spui-beheer protocollen zijn gebaseerd op verschillende typen voorwaarden, zoals een maximaal spuienster (qua tijd) of maximale zoutconcentraties waarbij visvriendelijk gespuid mag worden. Deze module wordt in 2024 gevalideerd op basis van chloridemetingen bij en schuifstanden van de Haringvlietsluizen. Deze validatie wordt apart gerapporteerd.

D.6 Samenvatting modules SSF

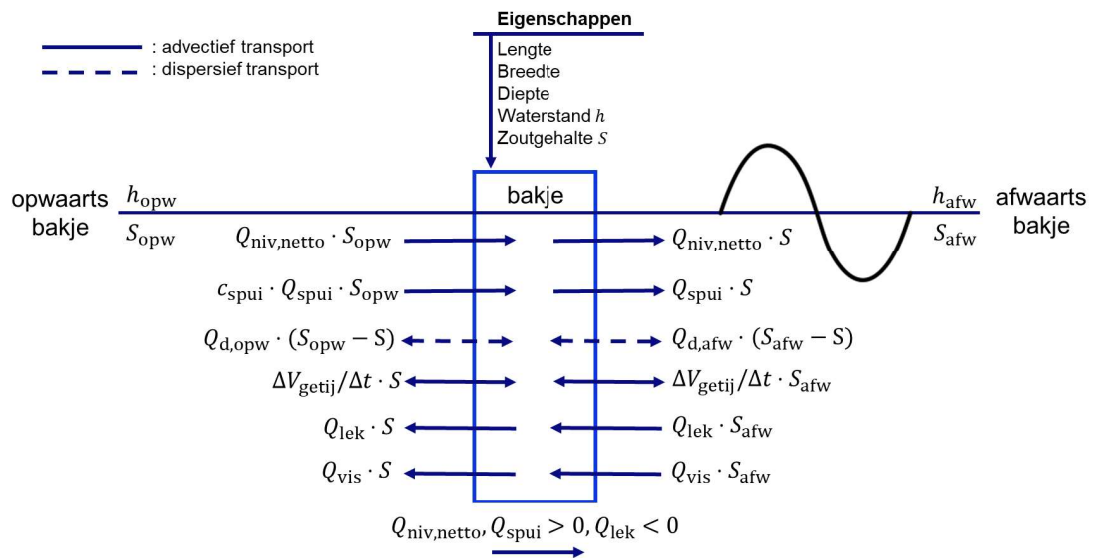
Na de aanpassingen in de code in 2023 kan de totale zoutmassa op tijdstip t worden beschreven met behulp van de volgende vergelijking:

$$M^t = M^{t-1} + M_{\text{spui}} + M_{\text{niv}} + M_{\text{sluis}} + M_{\text{d,opw}} + M_{\text{d,afw}} + M_{\text{lek}} + M_{\text{getij}} + M_{\text{vis}}, \quad (\text{D.14})$$

bestaande uit de totale zoutmassa op de vorige tijdstap en advectionele bijdrages door spuien, nivelleren, schutten, lekkage, visvriendelijk inlaten en dispersie met een rand of bakje aan de

stroom op- of afwaartse zijde, en de massa verplaatsing als gevolg van het getij of waterstandsveranderingen bij de rand. In de formule hierboven zijn de elementen waarop dit jaar aanpassingen zijn gedaan (of die toegevoegd zijn) ter illustratie dikgedrukt. Figuur D.5 geeft als voorbeeld een schematisch overzicht van het geüpdatete ZTM voor het geval $Q_{niv,netto}, Q_{spui} > 0$ en $Q_{lek} < 0$ weer.

Een voorbeeldcode met twee bakjes achter elkaar (in serie) aan beide zijden van de schutsluis is als onderdeel van dit project uitgewerkt. De voorbeeldcode gebruikt een cyclusgemiddelde berekening voor de schutsluis. In principe zijn de modules die in 2023 ontwikkeld zijn ook toepasbaar in een fasegewijze berekening. Een aandachtspunt hierbij is dat het bij fasegewijze berekeningen van belang is dat de tijdsintegratie aangepast wordt, dusdanig dat de updates van de bakjes niet alleen op het moment van een schutcyclus plaats vinden. Tijdens een lange periode zonder schuttingen moeten de bakjes namelijk ook geüpdatet worden vanwege de transporten die plaats vinden tussen de bakjes als gevolg van spuien, getij en diffusie. Deze aanpassing moet nog uitgevoerd worden.



Figuur D.5: Geüpdatete schematische weergave van de transporten in een bakje voor het geval $Q_{niv,netto}, Q_{spui} > 0$ en $Q_{lek} < 0$ met de debieten Q en daarbij horende zoutgehaltes S die aan weerszijden een bakje in- en uitstromen.

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