



Kennisprogramma Natte Kunstwerken  
*Kennisplan 2018*

# Zoutindringing schut- en spuisluizen

## Opzet en verkenning Zeesluisformulering

Otto Weiler	(Deltares)
Tom O'Mahoney	(Deltares)
Roel Burgers	(Rijkswaterstaat)

Kenmerk	: KpNK-2018-SKW-01c002
Versie	: 1.0
Datum publicatie	: 15 juli 2019





In het **Kennisprogramma Natte Kunstwerken** (KpNK) werken Deltares, MARIN, Rijkswaterstaat en TNO samen aan de kennisontwikkeling om de vervangings- en renovatieopgave bij natte kunstwerken (stuwen, sluizen, gemalen en stormvloedkeringen) efficiënt en kostenbesparend aan te pakken.

**Deltares**

**MARIN**



**TNO**

Voor het kennisprogramma wordt er jaarlijks een inhoudelijk **Kennisplan** inclusief bijbehorend financieringsplan opgesteld. Andere partijen (zoals waterschappen en marktpartijen) worden nadrukkelijk uitgenodigd om deel te nemen.

Meer informatie over het Kennisprogramma Natte Kunstwerken vindt op [www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl](http://www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl) waar ook de onderzoeksresultaten ter beschikking worden gesteld.

**NKWK**

De samenwerking binnen het Kennisprogramma Natte Kunstwerken vormt de uitwerking van de onderzoekslijn “Toekomstbestendige Natte Kunstwerken” binnen het **Nationaal Kennisplatform voor Water en Klimaat** (NKWK). Dit kennisplatform brengt Nederlandse overheden, kennisinstellingen en bedrijven bij elkaar om samen te werken aan pilots, actuele vraagstukken en lange termijnontwikkelingen op gebied van water- en klimaatvraagstukken.

Meer informatie staat op [www.waterenklimaat.nl](http://www.waterenklimaat.nl).

Voor vragen met betrekking tot het rapport kunt u terecht bij de auteurs:

Otto Weiler - [otto.weiler@deltares.nl](mailto:otto.weiler@deltares.nl)  
Tom O'Mahoney - [tom.omahoney@deltares.nl](mailto:tom.omahoney@deltares.nl)  
Roel Burgers - [roel.burgers@rws.nl](mailto:roel.burgers@rws.nl)

Voor vragen over Kennisprogramma Natte Kunstwerken en Kennisplan 2018 kunt u terecht bij:  
Maarten van der Vlist - [maarten.vander.vlist@rws.nl](mailto:maarten.vander.vlist@rws.nl)

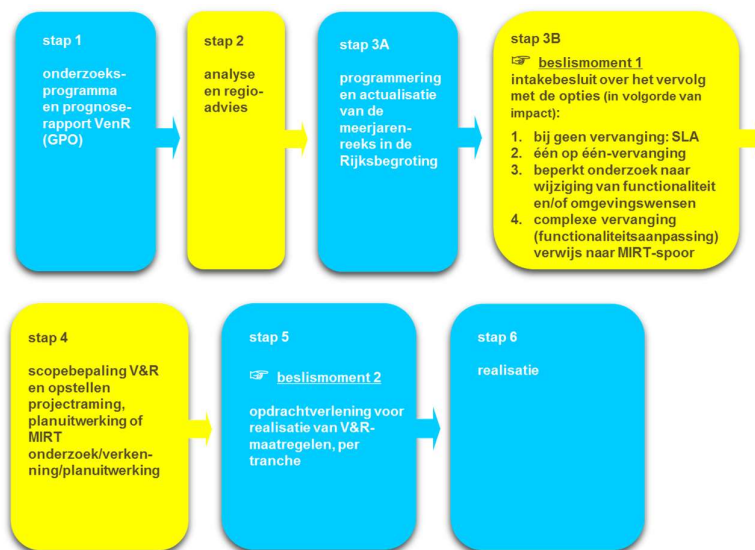




## Voorwoord

Sluizen, stuwen, gemalen en stormvloedkeringen zijn belangrijke assets van beheerders zoals Rijkswaterstaat en de waterschappen. Een groot deel van deze natte kunstwerken bereikt komende decennia het einde van de (technische) levensduur waarvoor het is ontworpen. Er dient zich dan ook een aanzienlijke vervangings- en renovatieopgave van deze kunstwerken aan.

De laatste jaren wordt steeds meer gezocht naar mogelijkheden om levensduur van kunstwerken te verlengen, en om bij einde levensduur (noodzakelijke) ingrepen aan gebiedsontwikkelingen en/of functionele/netwerk ontwikkelingen te koppelen. Rijkswaterstaat heeft daartoe als asset manager een vernieuwde werkwijze voor het Vervanging en Renovatie (VenR) proces opgesteld, welke de basis vormt voor de inrichting van het Kennisprogramma Natte Kunstwerken (zie Figuur 1).



Figuur 1. Vernieuwde RWS-werkwijze Vervanging en Renovatie.

In het Kennisprogramma Natte Kunstwerken wordt kennis ontwikkeld die bijdraagt aan de verschillende stappen binnen deze vernieuwde VenR-werkwijze, met als focuspunten stap 1 (prognoserapport) en stap 2 (regio-analyse en -advies). Het prognoserapport richt zicht op de (einde) technische levensduur, het regio-advies brengt met name de relatie object-netwerk-gebied in kaart.

Het onderzoek in het Kennisprogramma Natte Kunstwerken vindt plaats langs de onderstaande 3 onderzoekssporen en heeft tot doel om een effectieve en efficiënte aanpak van de vervanging- en renovatie-opgave en nieuwbouw van natte kunstwerken mogelijk te maken:

- bestaand object
  - inzicht in (einde) technische levensduur
  - levensduurverlenging
- object-systeem
  - inzicht in (einde) functionele levensduur en object-systeemrelaties
- nieuw(e) object/objectonderdelen
  - toepassen innovaties
  - inspelen op toekomstige ontwikkelingen.



## Kennisprogramma Natte Kunstwerken *Kennisplan 2018*

Sinds enkele jaren is er het Nationaal Kennisplatform voor Water en Klimaat (NKWK). Hieronder lopen diverse onderzoekslijnen. Eén van de onderzoekslijnen is “Toekomstbestendige Natte Kunstwerken”. Voor het praktisch laten functioneren van deze onderzoekslijn is er een Samenwerkingsovereenkomst Natte Kunstwerken en een Kennisprogramma Natte Kunstwerken opgesteld:

- Samenwerkingsovereenkomst Natte Kunstwerken. De partijen die momenteel binnen deze overeenkomst samenwerken aan onderwerpen rondom de vervangings- en renovatieopgave bij natte kunstwerken zijn Deltares, MARIN, Rijkswaterstaat en TNO.
- In het kader van de bovengenoemde Samenwerkingsovereenkomst Natte Kunstwerken en de 3 onderzoekssporen van het Kennisprogramma Natte Kunstwerken wordt er jaarlijks een inhoudelijk Kennisplan inclusief bijbehorend financieringsplan opgesteld.

Naast de genoemde partijen zijn en worden andere partijen nadrukkelijk uitgenodigd om deel te nemen aan de Samenwerkingsovereenkomst Natte Kunstwerken en/of het Kennisplan. Inzet kan zowel in kind en/of financieel zijn. In het Kennisplan 2018 is er binnen het kader van Kennisprogramma Natte Kunstwerken samengewerkt met Acotec BV, Arcadis en ArcelorMittal.

Resultaten uit het Kennisprogramma Natte Kunstwerken worden gedeeld met de gehele sector, onder andere via de website [www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl](http://www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl).

De hierop volgende samenvatting heeft betrekking op het onderliggende onderzoeksrapport “Zoutindringing schut- en spuisluizen – Opzet en verkenning Zeesluisformulering”. Dit onderzoek is geleid door Deltares in het kader van het Kennisplan 2018. In verband met de Algemene Verordening Gegevensbescherming is het originele Deltares rapport ten behoeve van het publiceren op de website alleen qua persoonsgegevens, maar niet qua inhoud aangepast.



## Samenvatting

# Zoutindringing schut- en spuisluizen – Opzet en verkenning Zeesluisformulering

### Aanleiding

Aan het zoutgehalte van oppervlaktewateren die zijn afgeschermd van de zee worden eisen gesteld. Zout dringt binnen in deze wateren op twee manieren: via het grondwater en via schut- en spuisluizen, waarmee deze binnenwateren verbonden zijn met zoute buitenwateren. Dit rapport gaat over de laatste van deze twee. Deze zoutindringing door schut- en spuisluizen is een probleem dat zich afspeelt in interactie tussen kunstwerk en watersysteem: de zoutindringing speelt zich af ter plaatse van het kunstwerk, maar het is pas een probleem als het verder bovenstrooms in het systeem leidt tot ongewenste zoutgehalten. De eis aan het kunstwerk kan dus niet los gezien worden van de verspreiding van zout in het watersysteem.

Het is daarmee wenselijk de relatie tussen deze twee aspecten te kunnen verkennen met een netwerkmodel, middels het uitvoeren van berekeningen waarin verschillende scenario's en maatregelen (zoals een bellenscherm) worden getoetst. Dat is tot op heden echter niet goed mogelijk: er is geen eenvoudige en tegelijkertijd betrouwbare beschrijving van zoutindringing door kunstwerken beschikbaar, die gemakkelijk gebruikt kan worden in netwerkmodellen voor de verspreiding van het zout.

De essentiële uitdaging voor zoutindringing bij schutsluizen is hierbij om de schutoperatie schematisch te beschrijven in enkele kenmerkende grootheden, zodanig dat de zoutindringing die we hieruit afleiden goed overeenkomt met de zoutindringing zoals die volgt uit de werkelijke operatie, die wordt gekenmerkt door een grote variabiliteit van de frequentie en deur-opentijden.

In 2017 is een begin gemaakt met het ontwikkelen van deze formulering, die de naam Zeesluisformulering heeft gekregen (zie kennisprogramma product KpNK-2017-SKW-01c001). Verder werkend op de basis van het Zoutlekmodel, zoals ontwikkeld in het project rond de Volkeraksluizen, is een stelsel van vergelijkingen opgesteld waarmee het proces van zoutindringing kan worden beschreven.

### Onderzoeksvraag en -opzet (WAT)

Er is begin 2018 besloten dat de Zeesluisformulering als een *stand alone* tool moet worden doorontwikkeld, zodat deze te zijner tijd in D-Flow kan worden geïmplementeerd. Alvorens deze formulering op te nemen in de officiële software is het noodzakelijk om de consistentie van resultaten bij constante en variabele operatie van een schutsluis te testen en er ervaring mee op te doen.

In de formulering is de kalibratiefactor een essentiële schakel tussen de (specifieke) werkelijkheid en de (algemene) formulering: het vatten van de complexe en variabele schutoperatie (in de werkelijkheid) in parameters (voor het model) met representatieve waarden; de waarde van de kalibratiefactor moet een relatie hebben met de operatie en ook leiden tot de berekening van de juiste zoutindringing. Alleen dan is er sprake van een eenvoudige en toch betrouwbare bepaling van de zoutindringing door een schutsluis.



### Onderzoeksaanpak en -methode (HOE)

Voor 2018 zijn globaal de volgende activiteiten uitgevoerd (meer detail in de rapportage):

1. Inventariseren van criteria die hebben geleid tot de keuze voor ontwikkeling *stand-alone* versie;
2. Opstellen implementatiedocument (door samenvoegen van en aanvullen op rapportage 2017);
3. Tot stand brengen van implementatie *stand alone* versie Zeesluisformulering;
4. Controle op interne consistentie van resultaten (bij constante operatie);
5. Indirecte validatie bij constante operatie door vergelijking resultaten met WANDA-Locks;
6. Bepaling kalibratiefactor op deur-opentijden bij cases met variabele operatie, inclusief indirecte validatie door vergelijking resultaten met WANDA-Locks.

De resultaten van de bovenstaande stappen zijn vastgelegd in het onderliggende rapport.

### Onderzoeksresultaten en synthese

De tests op consistentie en betrouwbaarheid van de implementatie van de Zeesluisformulering in een *stand alone* versie zijn veelbelovend: de resultaten laten zien dat de nieuwe code, bij constante operatie, voorspelbare en begrijpelijke resultaten produceert over een range aan condities. Daarbij is een aantal aandachtspunten geconstateerd, die in het vervolg aandacht zullen krijgen.

Uit de doorgerekende cases volgt dat de waarde van de kalibratiefactor afhangt van de bezetting van de sluis: hoe drukker het is, hoe hoger de waarde van de kalibratiefactor (dichter bij 1). Ook hangt de waarde af van hoeveel details van de operatie er worden meegenomen, in welke mate de operatie asymmetrisch is. Er worden op dit moment twee manieren gezien om tot een passende keuze van de kalibratiefactor te komen:

- De eerste, ook toegepast in het huidige onderzoek, is de kalibratie-factor te bepalen door het vergelijken van de resultaten van de Zeesluisformulering met die uit een WANDA-Locks berekening. Omdat voor de berekening met WANDA-Locks veel gedetailleerde data nodig is, is deze aanpak bewerkelijk, maar wel noodzakelijk zolang er nog niet een voldoende kennis is voor het kiezen van een waarde van de kalibratie-factor.
- De tweede manier is het berekenen van de kalibratiefactor op basis van een gekozen waarde voor de representatieve deur-opentijd. Deze moet dan kunnen worden bepaald uit de ervaring van de sluismeesters of door analyse van registraties van de deur-bewegingen. Hiervoor zijn in 2018 de eerste stappen gezet.





### Evaluatie en vooruitblik

De tests op consistentie en betrouwbaarheid van de implementatie van de Zeesluisformulering in een *stand alone* versie voor het berekeningen van de zoutindringing door schutsluizen is veelbelovend. Voor het vervolgonderzoek komend jaar kunnen de volgende werkzaamheden worden overwogen:

- een verdere analyse voor de Noordersluis IJmuiden waarbij kan worden gedacht aan het beschouwen van een groter aantal dagen uit 2005, nagaan of op basis van een analyse van de deur-opentijden middels een histogram tot een representatieve deur-opentijd kan worden gekomen, hoe het verschil in bezetting 's nachts en overdag in de operationele parameters (waaronder de kalibratiefactor) verwerkt kan worden en wat het al of niet meenemen van parameter  $c_{M/Gem}$  (een waarde ongelijk aan 1) betekent voor de te hanteren kalibratie-factor
- het uitvoeren van een vergelijkbare analyse voor de Krammersluizen (ook daarvoor zijn simulaties beschikbaar van de verkeersafwikkeling).

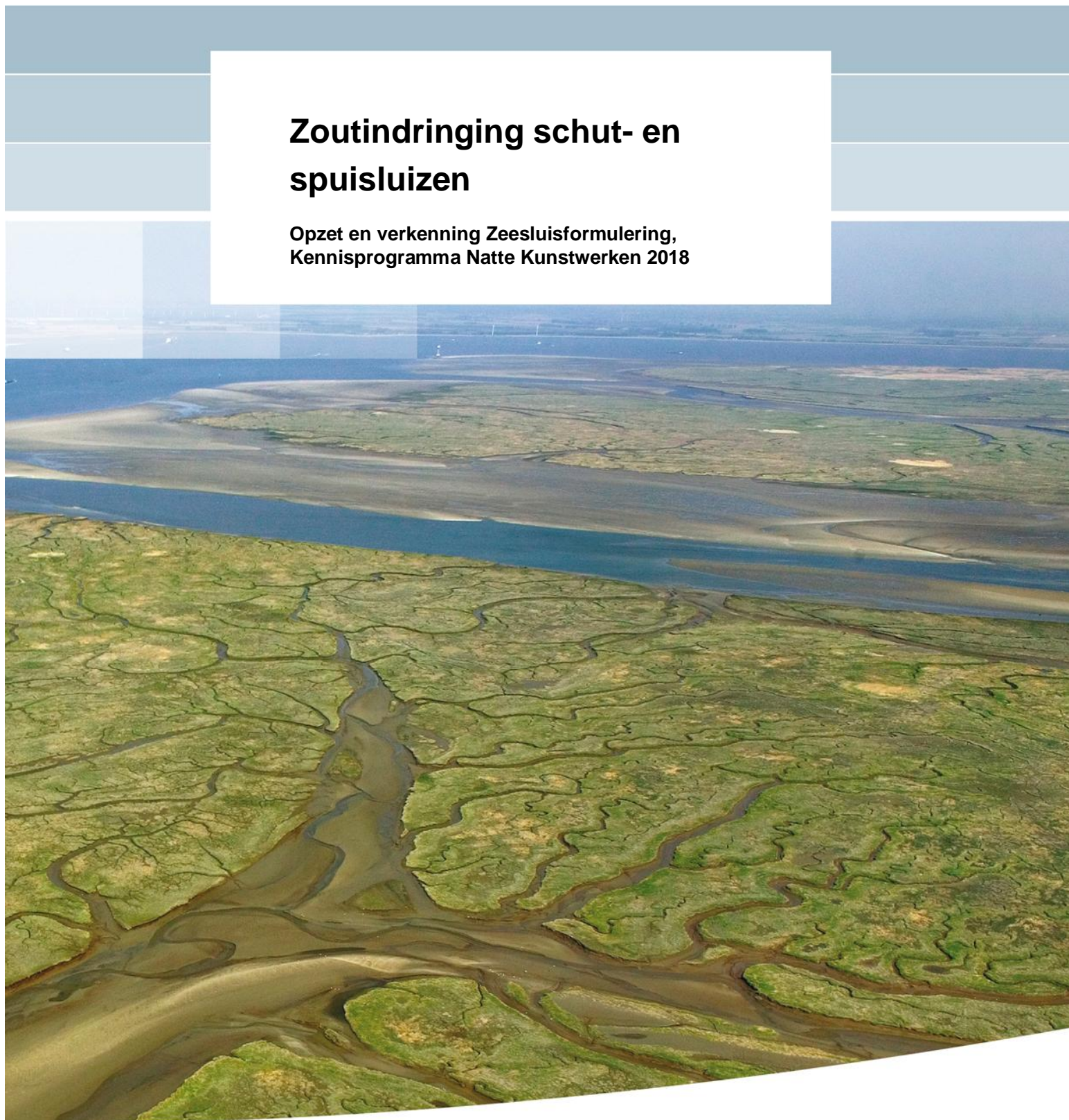
Daarnaast kunnen stappen gezet worden naar een operationele inzetbaarheid van de *stand alone* versie bij toepassing in een Beslissings Ondersteunend Systeem (BOS) en/of kunnen stappen gezet worden richting de implementatie van deze code in D-Flow FM.



Kennisprogramma Natte Kunstwerken  
*Kennisplan 2018*

## **Zoutindringing schut- en spuisluizen**

**Opzet en verkenning Zeesluisformulering,  
Kennisprogramma Natte Kunstwerken 2018**





# **Zoutindringing schut- en spuisluizen**

**Opzet en verkenning Zeesluisformulering, Kennisprogramma  
Natte Kunstwerken 2018**

Otto Weiler

## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Algemeen	1
1.2 Probleemstelling	1
1.3 Resultaat van 2017 en doelstelling voor het vervolg	2
1.4 Aanpak en leeswijzer	3
1.5 Definities	3
<b>2 Keuze, codering en controle stand-alone versie</b>	<b>5</b>
2.1 Keuze voor stand-alone	5
2.2 Codering	6
2.3 Aanpassingen na eerste berekeningen	7
2.4 Beschrijving in- en uitvoer	7
Invoer:	7
Uitvoer:	7
<b>3 Controle interne consistentie</b>	<b>9</b>
3.1 Systematische serie van cases	9
3.2 Verwachting en resultaat	9
3.3 Vergelijking met analytische oplossing o.b.v. 3 <sup>e</sup> graads polynoom	12
3.4 Conclusies	13
<b>4 Vergelijking met WANDA-Locks bij constante operatie</b>	<b>15</b>
4.1 Constante operatie, zonder getij	15
4.2 Constante operatie, met getij	16
4.3 Conclusies	19
<b>5 Evaluatie bij variabele operatie: de kalibratiefactor</b>	<b>21</b>
5.1 Inleiding	21
5.2 Noordersluis IJmuiden	21
5.3 Vergelijking bij middeling over 14 dagen	22
5.4 Berekeningen zeesluisformulering bij middeling per dag	25
5.5 Vergelijking met WANDA-Locks, keuze kalibratiefactor	29
5.6 Conclusies	31
<b>6 Samenvatting, conclusies, aanbevelingen</b>	<b>33</b>
<b>7 Referenties</b>	<b>35</b>
<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A Plan van Aanpak 2018</b>	<b>A-1</b>
<b>B Implementatiedocument</b>	<b>B-1</b>
<b>C Uitvoer controle interne consistentie</b>	<b>C-1</b>



# 1 Inleiding

## 1.1 Algemeen

Het in dit rapport beschreven onderzoek is een voortzetting van onderzoek in 2017 [1] en maakt, net als vorig jaar, deel uit van het Kennisprogramma Natte Kunstwerken, voor 2018 beschreven in [2]. Het Kennisprogramma is de praktische uitwerking van de NKWK<sup>1</sup>-onderzoekslijn 'Toekomstbestendige Natte Kunstwerken'. In het kennisprogramma werken momenteel Deltares, TNO, Marin en RWS samen aan onderwerpen op het gebied van natte kunstwerken (stuwen, sluisen, gemalen en stormvloedkeringen).

Een groot deel van deze kunstwerken bereikt in de komende decennia het einde van de technische levensduur. Er dient zich dan ook een aanzienlijke vervangings- en renovatieopgave van deze kunstwerken aan. Een opgave die niet alleen technisch van aard is, maar die ook rekening moet houden met het functioneren van het kunstwerk in het watersysteem.

Voor het onderwerp zoutindringing speelt daarbij een rol dat, door klimaatverandering, langere perioden van weinig neerslag en lage rivierafvoer en op langere termijn ook zeespiegelstijging, zoutindringing door kunstwerken steeds meer als een belangrijke bedreiging voor de beschikbaarheid van zoetwater wordt gezien.

## 1.2 Probleemstelling

In het Kennisprogramma (zie [2], 'Stap 4') wordt gesproken over het ontwikkelen van ontwerptools om te komen tot een goede specificatie van eisen aan het hydraulisch functioneren van kunstwerken. (Het ontwerptool is daarbij ook bedoeld als een vehikel om kennis beschikbaar en toepasbaar te maken.) Merk op dat het tool erop gericht is het formuleren van eisen te ondersteunen, en dat is wat anders dan het maken van het (uiteindelijke) ontwerp.

Als we hierbij inzoomen op het onderwerp zoutindringing hebben we te maken met eisen t.a.v. zoutgehalte *ergens in het watersysteem* te realiseren met maatregelen of ontwerpkeuzes *op een kunstwerk*. Hierbij is het zo dat het zoutgehalte nabij de sluis ongelijk is aan het zoutgehalte op de locatie waar aan de eis moet worden voldaan. De problematiek die we willen beschouwen bestaat daarmee uit twee delen:

- het zouttransport door het kunstwerk, en
- de verspreiding in het gebied tot aan de locatie waar de eis geldt.

De eis te stellen aan het kunstwerk kan dus niet los gezien worden van de verspreiding van zout in het watersysteem. De relatie tussen deze twee aspecten moet kunnen worden verkend met een netwerkmodel, middels het uitvoeren van berekeningen waarin verschillende scenario's (o.a. waterbeschikbaarheid) en verschillende maatregelen (b.v. bellenschermen op de sluis) worden getoetst. Echter, dat is tot op heden niet goed mogelijk: er is geen eenvoudige en tegelijkertijd betrouwbare beschrijving van zoutindringing door kunstwerken beschikbaar, die gemakkelijk gebruikt kan worden in netwerkmodellen voor de verspreiding van het zout.

---

<sup>1</sup> Nationaal Kennisplatform Water en Klimaat



### 1.3 Resultaat van 2017 en doelstelling voor het vervolg

Het doel van het project is om te komen tot een eenvoudige en tegelijkertijd betrouwbare beschrijving van zoutindringing door schutsluizen op te nemen in netwerkmodellen, zodat het mogelijk wordt om scenarioberekeningen te doen. De nieuwe formulering zorgt er dan voor dat het proces van zoutindringing door de schutsluis, zowel qua fysica als qua hoeveelheden, goed in het model zit, waarmee dan de invloed van veranderingen in het watersysteem (waaronder klimaatveranderingen) en veranderingen in gebruik kan worden verkend. Met hetzelfde netwerkmodel kan dan ook (in verkennende zin) gekeken worden naar effecten van maatregelen op het kunstwerk ter reductie van de zoutindringing, op basis waarvan realistische eisen aan dat kunstwerk kunnen worden geformuleerd. Zie Bijlage A, het Plan van Aanpak 2018, voor een meer uitgebreide behandeling van ambities en doelstellingen van dit project.

In 2017 (zie [1]) is een begin gemaakt met het ontwikkelen van deze formulering, die de naam zeesluisformulering (ZSF) heeft gekregen. Verder werkend op de basis van het Zoutlekmodel, zoals ontwikkeld in het project rond de Volkeraksluizen [3], is een stelsel van vergelijkingen opgesteld waarmee het proces van zoutindringing kan worden beschreven. Op basis van de geometrie (de afmetingen van de sluis), de condities (waterstand en saliniteit aan weerszijden van de sluis) en de operatie van de sluis (o.a. het aantal schutcycli per dag en de deur-opentijden) wordt uitgerekend welke debieten er aan de voorhavens worden onttrokken en op de voorhavens worden geloosd, en met name voor de laatste genoemde debieten welk zoutgehalte die debieten dan hebben.

Door alle lozingen en onttrekkingen te middelen over de duur van een complete schutcyclus worden cyclus-gemiddelde debieten bepaald. Deze cyclus-gemiddelde debieten zijn de essentie van de zeesluisformulering. Door deze benadering is het niet meer nodig om de verschillende stappen in de schutoperatie precies door te rekenen, en dat maakt het o.a. mogelijk om in dat netwerkmodel te rekenen met grotere tijdstappen. Met deze vereenvoudiging wordt ook de benodigde invoer sterk gereduceerd: de schutoperatie, inclusief de passerende schepen, wordt gevangen in een beperkt aantal kenmerkende parameters. Deze kenmerken van de zeesluisformulering maken het mogelijk om deze formulering op te nemen in de hydrodynamische software D-Flow FM, waarbij de 'zeesluis' dan een nieuw type kunstwerk zal zijn.

Alvorens deze formulering op te nemen in de officiële software is het noodzakelijk om de formulering te testen en er ervaring mee op te doen. Dit om vertrouwen te krijgen in de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid ervan, en om een beeld te krijgen van wat er wel, en wat er niet van verwacht mag worden. Daarbij speelt de in de formulering opgenomen kalibratiefactor een belangrijke rol: welke waarde moet die krijgen, en waardoor wordt dat bepaald? Zijn er bijvoorbeeld andere waarden nodig voor zeevaartsluizen (IJmuiden en Terneuzen), binnenvaartsluizen (Krammersluizen) en sluizen waar veel recreatievaart passeert (Kornwerderzand)?

Deze kalibratiefactor vormt een essentiële schakel tussen de (specifieke) werkelijkheid en de (algemene) formulering: het vatten van de complexe en variabele schutoperatie (in de werkelijkheid) in parameters met *representatieve* waarden (voor het model), dat wil zeggen, waarden die een relatie hebben met de werkelijke operatie en die ook leiden tot de berekening van de juiste zoutindringing. Alleen dan kan er sprake zijn van een eenvoudige en toch betrouwbare bepaling van de zoutindringing door een schutsluis.

## 1.4 Aanpak en leeswijzer

De doelstelling voor 2018 is vertaald in een aanpak zoals beschreven in het Plan van Aanpak (Bijlage A) die hieronder kort is weergegeven.

Op de eerste plaats moet er een keuze worden gemaakt voor de manier waarop de formulering in software wordt ingebouwd met het oog op het testen en opdoen van ervaring. Dat zou kunnen in een voorlopige versie binnen SOBEK (D-Flow 1D), maar ook in een losse 'stand-alone' code, die buiten SOBEK / D-Flow gebruikt kan worden. Gekozen is voor de laatste optie, dit wordt toegelicht in Paragraaf 2.1.

Als basis voor de implementatie in code is de formulering uitgebreid beschreven in het Implementatiedocument, waarvan een eerste versie is opgenomen als bijlage bij het rapport over 2017. Eerste resultaten van de code gaven aan dat er op sommige aspecten nog aanpassingen nodig waren. Die zijn verwerkt in het Implementatiedocument en in de code. Bovenstaande werkzaamheden zijn beschreven in de rest van Hoofdstuk 2.

Met de code is daarna (opnieuw) een serie van berekeningen gedaan om de interne consistentie te controleren: leidt een verandering in een van de invoerparameters tot een logische verandering van het berekende resultaat. Daarbij is gebruik gemaakt van de inzichten zoals beschreven in [1] en ook zijn de resultaten vergeleken met een analytische oplossing berekend met de 3<sup>e</sup> graads polynoom, zoals beschreven in Hoofdstuk 3 van [1]. De vergelijking tussen de resultaten van de beide rekenmethoden (zeesluisformulering versus analytische oplossing) wordt beschreven in Hoofdstuk 3 van dit rapport.

Na de eerste check op interne consistentie is begonnen de resultaten te vergelijken met die van WANDA-Locks: aangezien WANDA-Locks is gevalideerd tegen een groot aantal veldmetingen [4] kan dit beschouwd worden als een indirecte validatie. Het vergelijken van de resultaten van de zeesluisformulering met die van WANDA-Locks is uitgesplitst in twee delen:

- het eerste deel betreft de situatie met een constante operatie, waarmee de berekening in WANDA-Locks aansluit op wat er wordt beschouwd in de zeesluisformulering; dit is het onderwerp van Hoofdstuk 4;
- het tweede deel betreft situaties met een variabele operatie: deze variabele operatie wordt beschreven in WANDA-Locks, maar niet (of slechts gedeeltelijk) in de zeesluisformulering: om het gat te dichten gaat de kalibratiefactor een rol spelen; dit is onderwerp van Hoofdstuk 5.

Tenslotte worden in Hoofdstuk 6 de samenvatting en conclusies gepresenteerd.

## 1.5 Definities

In dit rapport worden een aantal termen vaak gebruikt. Voor de helderheid worden deze hieronder kort omschreven. De omschrijving is identiek aan de omschrijving in 2017, met uitzondering van de laatste.

### **zoutindringing:**

het fysische proces waardoor zout, in het kader van deze studie via een kunstwerk (schutsluis), terecht komt in een deel van het min of meer zoete watersysteem dat gevoed wordt door zoetwater; door de zoutindringing stijgt het zoutgehalte waardoor het water minder- of ongeschikt wordt voor diverse doeleinden;

**zoutvracht:**

de hoeveelheid zout per eenheid van tijd die het kunstwerk passeert, vaak uitgedrukt in kg/s;

**zoutlek:**

de resterende zoutvracht na het toepassen van maatregelen om de zoutvracht te beperken;

**zoutlekmodel:**

een numeriek model, opgezet in het kader van de studies naar maatregelen om te komen tot een zeer beperkte zoutlek door de Volkeraksluizen, in de situatie van een zout Volkerak-Zoommeer; het model berekent de zoutlek, en gaat daarbij uit van een zeer beperkte zoutvracht door het toepassen van maatregelen, waaronder bellenschermen; later is dit model opgenomen in WANDA-Locks;

**zeesluisformulering:**

een formulering, op te nemen in software (stand-alone, SOBEK, Delft3D of D-Hydro FM), waarmee de debieten door schutten en kolk-uitwisseling worden berekend, samen met de bijbehorende zoutgehalten, om daarmee, naast het debiet, ook de zoutvracht door de schutsluis te kwantificeren;

**netwerkmodel:**

de schematisatie van een gebied of een watersysteem, ten behoeve van het doorrekenen van de waterbeweging in dat gebied met behulp van hydrodynamische software (zoals D-Flow FM); voor het begrip 'netwerkmodel' worden ook woorden als 'gebiedsschematisatie' of 'watersysteemmodel' gebruikt.

## 2 Keuze, codering en controle stand-alone versie

### 2.1 Keuze voor stand-alone

Alvorens te beginnen met het implementeren van de formulering in software moest een keuze gemaakt worden over de aard van die software:

- 1 De eerste mogelijkheid is alvast stappen te zetten naar een definitieve implementatie in D-Flow FM. Dit zou kunnen door te kiezen voor het inbouwen van de formulering in een voorlopige versie binnen SOBEK (D-Flow 1D), daarmee aansluitend op de bestaande formuleringen voor kunstwerken in SOBEK (D-Flow 1D).
- 2 De tweede mogelijkheid is om een aparte stand-alone tool te bouwen, waardoor daarmee zelfstandig berekeningen kunnen worden gemaakt, buiten de kaders van SOBEK (of een ander pakket).

De eerste optie biedt voor en nadelen, waaronder:

Voordelen:

- Voorsorteren op een uiteindelijke implementatie binnen D-Flow, die daardoor t.z.t. sneller zal zijn te realiseren.
- Beschikbaarheid van routines en user-interface voor invoer en uitvoer.

Nadelen:

- De voortgang wordt afhankelijk van capaciteit binnen de softwareafdeling van Deltares (DSC) en de prioritering van werkzaamheden binnen die afdeling.
- Na de implementatie in SOBEK volgt dan de validatie, o.a. tegen WANDA-Locks, en die is dan lastig omdat we in SOBEK niet de randvoorwaarden (zoutgehalte) direct voor de sluis kunnen voorschrijven zoals het geval is bij de zeesluisformulering; in SOBEK zit daar dan steeds tenminste één rekencel tussen.

Door de nadelen van de eerste optie, wordt het zinnig om na te denken over de tweede optie. De tweede optie maakt het mogelijk om meer flexibel te werken in deze test- en ontwikkelfase en sneller aanpassingen te doen op basis van bevindingen.

Deze tweede optie wordt aantrekkelijker omdat zo'n stand-alone versie ook eigen toepassingen zou hebben. Te denken valt aan beslissingsondersteunende systemen (BOS) voor het beheer van water op zoutgehalte. De ontwikkeling hiervan is actueel voor een aantal beheersgebieden van RWS, te weten Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal, het Volkerak-Zoomeer, het Kanaal van Gent naar Terneuzen en het IJsselmeergebied.

Voor het beheer op zoutgehalte van deze wateren zal (naar de huidige verwachting) een uitbreiding worden gebouwd op de huidige IWP-systemen voor het beheer op waterpeil. Deze IWP-systemen zijn applicaties in de FEWS-software van Deltares, en deze software heeft allerlei mogelijkheden om routines aan te roepen voor het uitvoeren van bewerkingen op data, waaronder zowel gemeten data als invoer door de gebruiker. Dat betekent dat een verbinding tussen de stand-alone code en FEWS / IWP-systemen niet veel moeilijkheden zal hoeven opleveren. En omdat in- en uitvoer t.z.t. door FEWS zal worden verzorgd, hoeft daar nu niet veel effort ingestoken te worden.

Al met al blijkt dat de ontwikkeling van een stand-alone versie een waardevolle stap zal zijn in voorbereiding op een toepassing in BOS-systemen voor beheer van water op zoutgehalte. Daarnaast kan de stand-alone versie ook gebruikt worden voor het berekenen van randvoorwaarden voor netwerkmodellen die met Delft3D of D-Flow worden doorgerekend.

Op basis van bovenstaande overwegingen is er gekozen voor een stand-alone implementatie. Dit vanwege de voordelen van flexibiliteit in deze fase van toetsen en ontwikkelen, en omdat dit uitzicht biedt op concrete toepassingen in de nabije toekomst.

## 2.2 Codering

Om berekeningen met de formulering te kunnen gaan doen zijn de formules zoals uitgewerkt in het Implementatiedocument (Bijlage B) geprogrammeerd in 'Python' [6]. De implementatie is inclusief de invloed van getij, scheepvaart en maatregelen ter beperking van de zoutindringing waaronder bellenschermen.

Bij de implementatie zijn de volgende keuzes gemaakt:

- Voor de rekenkundige aanpak (de manier waarop de vergelijkingen worden opgelost) is gekozen voor het iteratief doorrekenen van de schutcyclus (Paragraaf 5.1 in Bijlage B). Dit was eenvoudig te programmeren, en bleek tot zeer acceptabele (te verwaarlozen) rekentijden te leiden.
- Er is uitgegaan van een uniforme bodemligging van voorhavens tot voorhaven: het bodemniveau in de kolk wordt ook gebruikt voor de bodemligging van de drempels en de voorhavens. Verschillen in bodemniveau's en de aanwezigheid van drempels in de sluishoofden, zoals beschreven in Hoofdstuk 6 van het Implementatiedocument, zijn nog niet geïmplementeerd in de code.
- De aandachtspunten zoals beschreven in Hoofdstuk 7 van het Implementatiedocument zijn bij de implementatie buiten beschouwing gelaten. Dit betreft
  - de gelijktijdigheid van processen terwijl een sluisdeur open staat (uit- en invaren van schepen, kolkuitwisseling etc.);
  - de aard van de lozing op een voorhaven in aanwezigheid van een bellenscherm;
  - het verschil tussen continu en pulserende lozingen;
  - bij een bellenscherm: het voorschrijven van een luchtdebiet in plaats van een doorlaatfractie;
  - het beschrijven van een situatie dat de sluis minder dan 24 uur in bedrijf is, middels een variatie in de schutfrequentie over de dag.

Er zijn twee versies van de code gemaakt:

- 1 een versie waarmee een reeks van condities kan worden berekend met constante randvoorwaarden (waterstanden, saliniteit aan weerszijde van de sluis, operatie, scheepvaart etc.);
- 2 een versie waarmee een tijdafhankelijke berekening kan worden gedaan; de randvoorwaarden kunnen dan worden opgegeven als functie van de tijd.

### 2.3 Aanpassingen na eerste berekeningen

Na het doen van de eerste berekeningen en de eerste vergelijkingen met o.a. WANDA-Locks bleken er een aantal wijzigingen nodig in de code, en ook in het Implementatiedocument.

- in de berekening van de kolk-uitwisseling is de dichtheid nodig van het water in de kolk en in de voorhaven; deze wordt nu berekend op basis van de UNESCO-formulering [5];
- de code is nu alleen geschikt voor de situatie dat de sluis 24 uur per dag in bedrijf is; de variabele  $T_{\text{bedrijf}}$  heeft dus een constante waarde en is géén invoerparameter; de tijd dat de sluis buiten bedrijf is kan worden ingevoerd door de schutfrequentie te laten variëren over de dag;
- er is een aangescherpte definitie van dimensieloze grootheden opgesteld en de code is aangepast zodat deze grootheden ook worden berekend en uitgevoerd; het betreft het relatieve zouttransport,  $Z_{\text{fractie}}$ , en de relatieve deur-opentijd,  $T_{\text{open}}/T_{LE,MZ}$ , deze dimensieloze grootheden karakteriseren de berekende situatie, en maken een betere vergelijking mogelijk tussen berekeningen met de zeesluisformulering, de 3<sup>e</sup> graads polynoom en WANDA-Locks.

De veranderingen zijn doorgevoerd in het Implementatiedocument.

### 2.4 Beschrijving in- en uitvoer

De in- en uitvoer vinden plaats via één en hetzelfde spreadsheet dat wordt aangeroepen door de code. Het spreadsheet bestaat uit een vast volgorde van kolommen. In rijen staat, in het geval van een berekening voor constante randvoorwaarden, de waarden voor de verschillende cases, en, in het geval van een tijdafhankelijke berekening, de waarden per tijdstap.

De kolommen in het spreadsheet zijn de volgende (definities van de symbolen zijn gegeven in het Implementatiedocument, Bijlage B):

#### Invoer:

De parameters zoals gedefinieerd in het Implementatiedocument (Paragraaf 2.6):

- randvoorwaarden aan beide kanten van de sluis: waterstanden, saliniteiten en temperaturen:  $h_M, h_Z, S_M, S_Z, T_M, T_Z$ ,
- de afmetingen van de sluis kolk (constant in de tijd):  $L_K, B_K, Z_K$
- de operatie en scheepvaart:  $N_{\text{Cycli}}, T_{\text{Deur}}, T_{\text{Niv}}, c_{\text{Dot}}, c_{M/Gem}, V_{\text{Schip,Opw}}, V_{\text{Schip,Afw}}$
- de maatregelen om zoutindringing te beperken:  $\eta, Q_{\text{Spoel,LW}}, Q_{\text{Spoel,HW}}, Q_{Ws}$

N.B.: de parameter  $c_{\text{Dot}}$  is de kalibratiefactor waar in Hoofdstuk 5 verder op ingegaan wordt. De parameter  $c_{M/Gem}$  beschrijft of de operatie symmetrisch is (dwz: gelijke deur-opentijden op beide sluishoofden) of niet.

#### Uitvoer:

Eerst de parameters, de essentiële uitvoer, zoals gedefinieerd in het Implementatiedocument (Paragraaf 5.3), maar daarna nog een paar relevante grootheden:

- de essentiële uitvoer:  $M_M, \dot{M}_M, Q_M, Q_M^+, S_{K,Z,Niv}, M_Z, \dot{M}_Z, Q_Z, Q_Z^+, S_{K,M,Niv}$ .
- dan een aantal parameters die de invoer kenmerken:
  - geometrie:  $V_{K,M}$  en  $V_{K,Z}$ ;

- operatie:  $T_{Cyclus}$ ,  $T_{Open\_avg}$ ,  $T_{Open}$ ,  $T_{Open,M}$ ,  $T_{Open,Z}$ ;
- dan een aantal parameters die het zouttransport kenmerken:
  - de (theoretische) tijd voor een volledige kolk-uitwisseling, gebaseerd op het dichtheidsverschil over de kolk heen:  $T_{LE,MZ}$
  - de relatieve deur-opentijd:  $T_{Open} / T_{LE,MZ}$
  - het relatieve zouttransport:  $Z_{fractie}$
- dan (voor de test-fase) een aantal extra parameters ter controle van de tussenstappen zoals die in de code berekend worden:
  - saliniteiten in de kolk:  $S_{K,0}$  t/m  $S_{K,4}$
  - transporten per schutfase:  $M_{M1}$ ,  $M_{M2}$ ,  $M_{M4}$ ,  $M_M$  (is het totaal voor de Meerzijde),  $M_{Z2}$ ,  $M_{Z3}$ ,  $M_{Z4}$ ,  $M_Z$  (is het totaal voor de Zeezijde)

Een voorbeeld van spreadsheet met de hierboven genoemde kolommen is opgenomen in Bijlage C. Het bevat de resultaten van de controle op interne consistentie zoals beschreven in het volgende Hoofdstuk.

### 3 Controle interne consistentie

#### 3.1 Systematische serie van cases

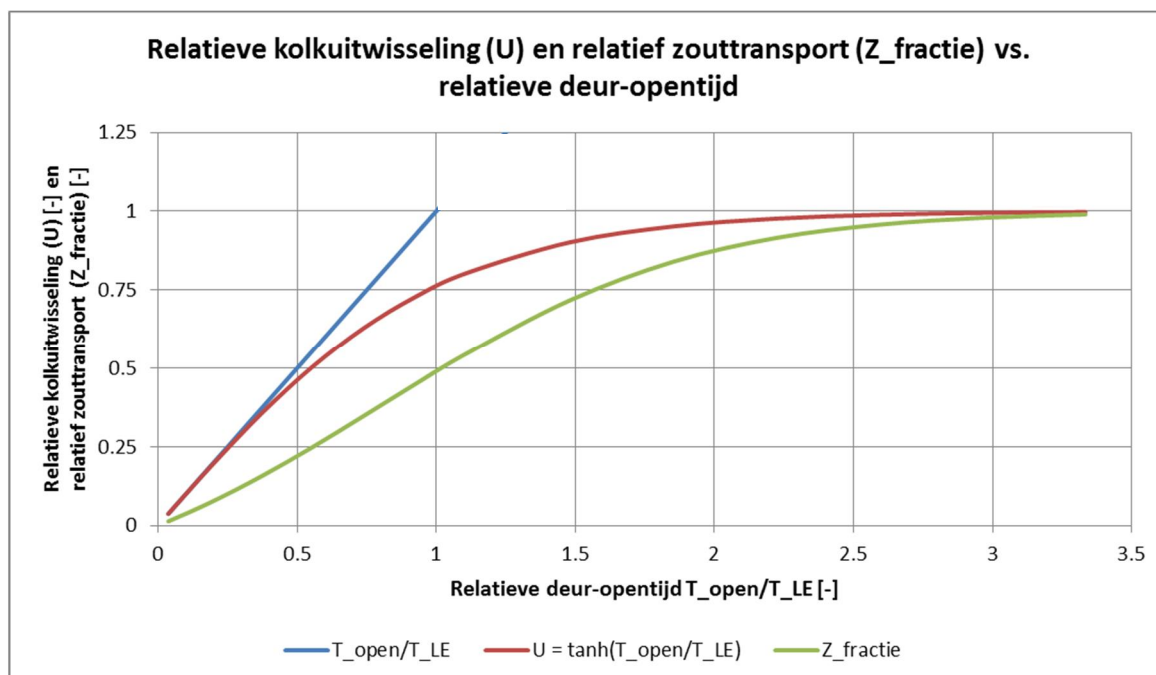
Om de interne consistentie te controleren is een serie van cases opgesteld waarbij systematisch alle parameters zijn gevarieerd. De condities en de berekende resultaten zijn opgenomen in Bijlage C. De serie is als volgt opgebouwd:

- Scenario nr. 0: een 'base case' met realistische randvoorwaarden en afmetingen, en een (vrij hoog) aantal schutcycli per etmaal van 24: hiermee bedraagt de relatieve deur-opentijd ca. 1; een goed startpunt om rond te variëren, omdat rond deze waarde de variatie in zoutindringing het sterkst is.
- nrs. 1 - 3: variatie in waterdiepte in de klok, door aanpassing randvoorwaarden of bodemligging;
- nrs. 4 en 5: variatie in verschil in saliniteit over de kolk;
- nrs. 6 en 7: verandering in lengte en breedte van de kolk;
- nrs. 8 - 15: variatie in het aantal schutcycli per dag waarmee de relatieve deur-opentijd varieert van ca. 0,2 - 4;
- nrs. 16 - 28: variatie in de (overige) parameters voor de operatie, de scheepvaart en de maatregelen;
- nrs. 29 - 32: variatie in de waterstand aan de Zeezijde en daarmee samenhangend een variatie in het Spoeldebiet.

#### 3.2 Verwachting en resultaat

De verwachting omtrent de invloed van een wijziging in de invoerparameters op het berekende zouttransport kan gebaseerd worden op onderstaande figuur, overgenomen uit [1]. De groene lijn geeft het verloop in het relatieve zouttransport als functie van de relatieve deur-opentijd. Deze groene lijn is berekend met de 3<sup>e</sup> graads polynoom (Hoofdstuk 3 van [1]). Deze kromme laat ook zien dat de verandering in zouttransport het grootst is rond een relatieve deur-opentijd van 1.





Figuur 3.1 Relatieve kolkuitwisseling en relatief zouttransport vs. relatieve deur-opentijd

Op basis van deze grafiek en de achterliggende vergelijkingen kan per case worden bepaald wat er van een variatie mag worden verwacht. In onderstaande tabel is dat aangegeven, samen met het resultaat van de berekening.

Tabel 3.1 Check op consistentie: verwachting en resultaat.

Scen. nr.	Wijziging t.o.v. '0'	Verwachting effect op zouttransport	Ook zo berekend?
1	waterdiepte 2x zo groot door hogere waterstand	factor $\sqrt{2}$ op snelheid kolkuitwisseling, factor 2 op volume, dus ca. 2,8 op transport	ja
2	idem door diepere kolk bodem	idem	ja
3	waterdiepte gehalveerd door hogere kolkbodem	idem, maar nu factor ca. 2,8 kleiner	ja
4	verschil in saliniteit gehalveerd	snelheid kolkuitwisseling factor $\sqrt{2}$ kleiner, water bevat half zoveel zout, dus zouttransport met factor ca. 2,8 kleiner	ja
5	verschil in saliniteit x 1,5	snelheid kolkuitwisseling factor $\sqrt{1,5}$ groter, water bevat 1,5 x zoveel zout, dus zouttransport met factor ca. 1,8 groter	ja
6	kolk 2 x zo lang	rel. deur-opentijd naar ca. 0,5, rel. zouttransport naar ruim 0,2 (ruim 40% van 0,5) maar op 2x zo grote kolk, dus zouttransport naar ruim 80%	ja
7	kolk 2x zo breed	zouttransport 2x zo groot	ja

8-15	aflopend aantal schutcycli per dag	oplopende deur-opentijd, toenemende kolkuitwisseling per cyclus ( $Z_{fractie}$ ), ..	ja
idem	idem	..., maar afnemend aantal cycli, dus eerst toename, daarna afname van zouttransport	ja
16	kleinere tijd voor deur-bewegen	binnen dezelfde cyclustijd meer tijd over dat deuropen staat, dus, groter zouttransport	ja
17	kleinere tijd voor nivelleren	idem	ja
18	kleiner aantal schutcycli in combinatie met kalibratie factor	kleiner aantal cycli per etmaal, dus langer tijd per cyclus, dus langere gemiddelde deur-opentijd (2x), gecorrigeerd met kalibratiefactor (0,5) naar dezelfde effectieve deur-opentijd, en dus dezelfde $Z_{fractie}$ , ..	ja
		maar minder cycli, dus minder transport	ja
19	asymmetrie: langer open naar zee-zijde	deur-opentijd zee-zijde x1,5, kolk wordt relatief zout, maar deur-opentijd meerzijde x 0,5, in totaal: zouttransport neemt af	ja
20	asymmetrie: langer open naar meer-zijde	deur-opentijd meer-zijde x1,5, kolk wordt relatief zoet, maar deur-opentijd zeezijde x 0,5, in totaal: zouttransport neemt af	ja
19-20		afname zouttransport gelijk in beide gevallen	ja, zeer klein verschil
21	scheepvaart stroomopwaarts (van zout naar zoet)	door retourstroom is verzoeting van de kolk te verwachten, dus minder zouttransport	nee, nakijken, i.s.m. neg. teken van scheepvaart stroomopwaarts
22	scheepvaart stroomafwaarts (van zoet naar zout)	door retourstroom is debiet van zout naar zoet te verwachten, dus meer zouttransport	ja, maar $Z_{fractie} > 1$ , nakijken
23	scheepvaart in beide richtingen	meer kolkuitwisseling aan beide kanten, dus meer transport	ja, maar $Z_{fractie} > 1$ , nakijken
24-25	bellenscherm, $\eta$ 0,5 en 0,25	afname zouttransport	ja
26	Spoeldebiet bij laag water	geen (of weinig effect) want er is geen sprake van laag water;	klein effect, nakijken
27	Spoeldebiet bij hoog water	wel effect, want ook bij gelijk water geldt dit spoeldebiet	ja
28	Waterscherm	afname zouttransport	ja
29	laagwater zeezijde	schutdebiet van zoet naar zout, minder kolkuitwisseling aan zeezijde, afname zouttransport	ja, maar wel berek. van rel. deur-opentijd nakijken

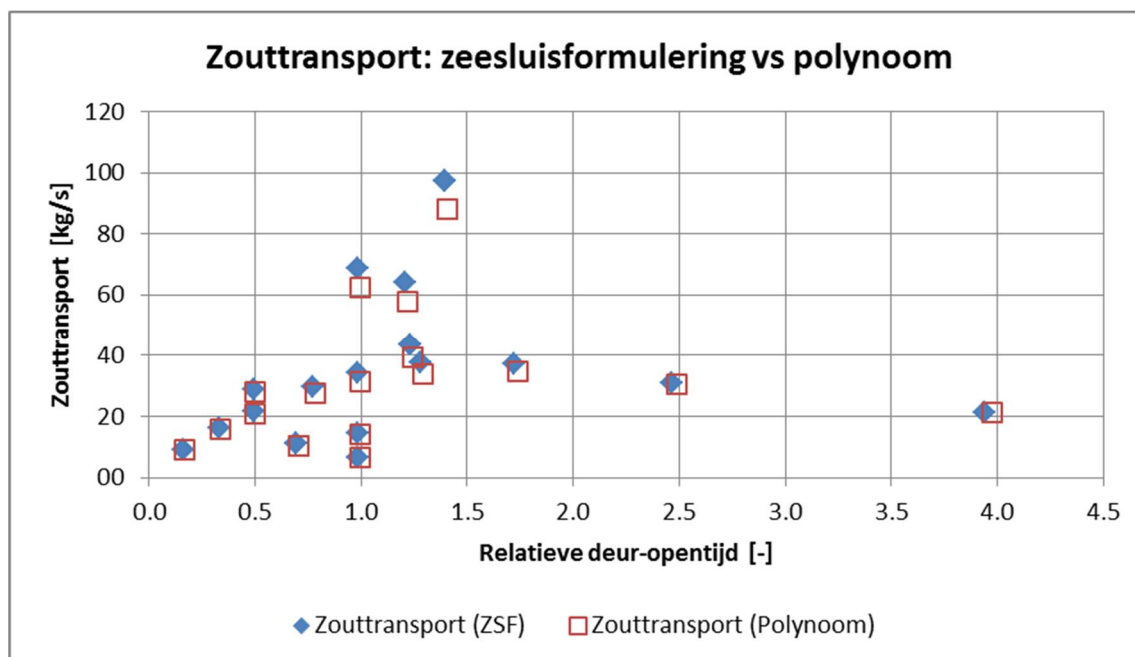
30	hoogwater zeezijde	schutdebiet van zout naar zoet, meer kolkuitwisseling aan zeezijde, meer zouttransport	ja, idem
31	laagwater zeezijde met spoeldebiet	veel minder zouttransport	ja, zelfs in omgekeerde richting
32	hoogwater zeezijde met spoeldebiet	tegengesteld effect van hoogwater en van spoeldebiet; zie scen's 27 en 30	ja

Uit bovenstaande vergelijking blijkt dat er nog een paar punten zijn die nadere beschouwing vragen. Deze hebben te maken met de invloed van scheepvaart (de waterverplaatsing en de retourstroom die daarmee samenhangt) en met de berekening van de relatieve deur-opentijd. Dit zal in het vervolg op de nu gerapporteerde werkzaamheden aandacht moeten krijgen.

### 3.3 Vergelijking met analytische oplossing o.b.v. 3<sup>e</sup> graads polynoom

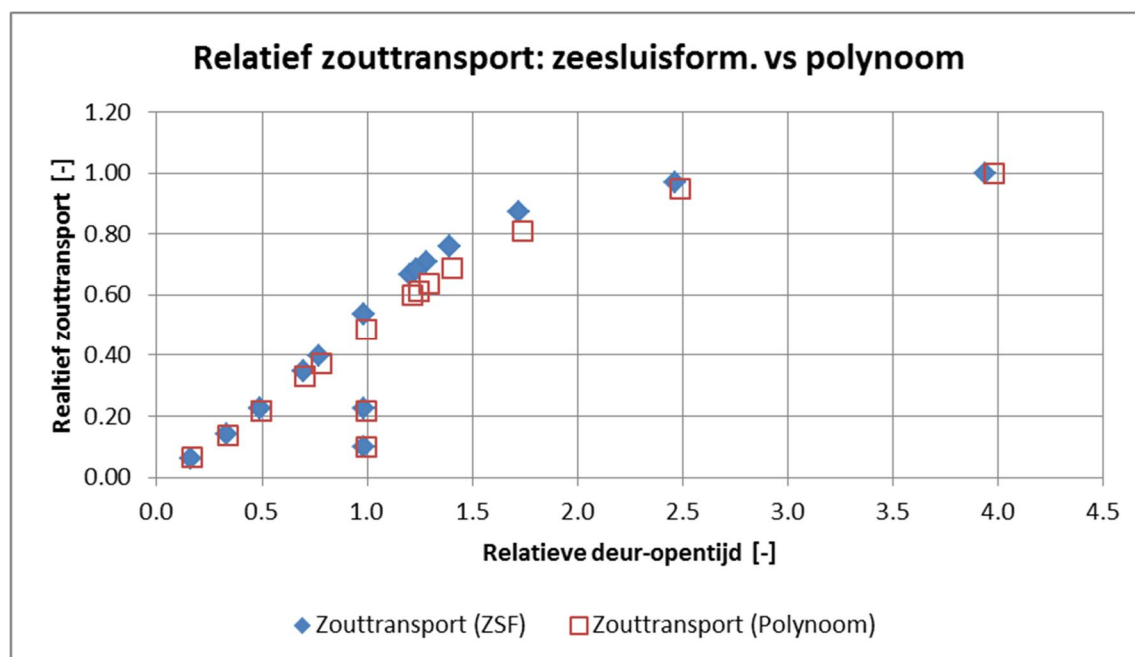
Ter verdere controle op de interne consistentie kan een deel van de scenario's worden vergeleken met het resultaat volgens de 3<sup>e</sup> graads polynoom (Hoofdstuk 3 van [1]). Deze vergelijking geeft een analytische oplossing voor het zouttransport door een schutsluis in het geval van een regelmatige schutoperatie bij constante randvoorwaarden (waterstanden en zoutgehalten) waarbij er geen verval is over de luis (de waterstanden zijn aan beide kanten gelijk) en er geen sprake is van scheepvaart of een spoeldebiet.

De vergelijking van de resultaten van de zeesluisformulering met de analytische oplossing beperkt zich logischerwijs tot de scenario's waarbij er géén sprake is van scheepvaart, er géén verschil is in waterstand aan weerszijden van de kolk, en er ook géén sprake is van spoeldebiet of waterscherm. Die vergelijking is hieronder grafisch uitgezet: eerst het zouttransport in kg/s, daarna het relatieve zouttransport ( $Z_{fractie}$ ), en beiden uitgezet tegen de relatieve deur-opentijd ( $T_{Open} / T_{LE,MZ}$ ).



Figuur 3.2 Vergelijking berekend zouttransport: zeesluisformulering vs. 3<sup>e</sup> graads polynoom

Figuur 3.2 laat zien in alle gevallen het zouttransport berekend met de zeeluisformulering iets hoger is dan berekend met de 3<sup>e</sup> graads polynoom. De achtergrond hiervan moet nog nader bekeken worden. Ook zijn de waarden voor de relatieve deur-opentijd niet exact gelijk: de berekening hiervan in de zeeluisformulering leidt tot iets kleinere waarden dan volgens de 3<sup>e</sup> graads polynoom. Ook dit moet nog nader bekeken worden; hier worden immers exact dezelfde waarden verwacht.



Figuur 3.3 Vergelijking berekend relatief zouttransport: zeeluisformulering vs. 3<sup>e</sup> graads polynoom

Door de berekende waarde voor het *relatieve* zouttransport te plotten, vallen alle resultaten (op twee na) op of rond de groene kromme zoals afgebeeld in Figuur 3.1. Ook nu weer zijn de resultaten volgens de zeeluisformulering iets hoger, hetgeen uitgezocht zou moeten worden.

De twee uitzonderingen zijn de punten waarbij bellenschermen actief zijn. Beide grafieken laten zien dat dit leidt tot lagere zouttransporten door de sluis. Deze punten zouden ook op dezelfde kromme vallen als het effect van de bellenschermen zou worden meegenomen in de berekening van de relatieve deur-opentijd, zoals is aangeduid in het Implementatiedocument (Bijlage B, paragraaf 2.5.3).

### 3.4 Conclusies

De controle op interne consistentie en de vergelijking van de resultaten met de 3<sup>e</sup> graads polynoom laten zien dat de nieuwe code voorspelbare en begrijpelijke resultaten produceert over een range aan condities. Aandachtspunten zijn de invloed van scheepvaart (de waterverplaatsing en de retourstroom die daarmee samenhangt) en de berekening van de relatieve deur-opentijd. Daarnaast zou ook het feit dat de code steeds tot hogere waarden leidt dan verwacht volgens de 3<sup>e</sup> graads polynoom onderzocht moeten worden om de betrouwbaarheid verder te verbeteren.

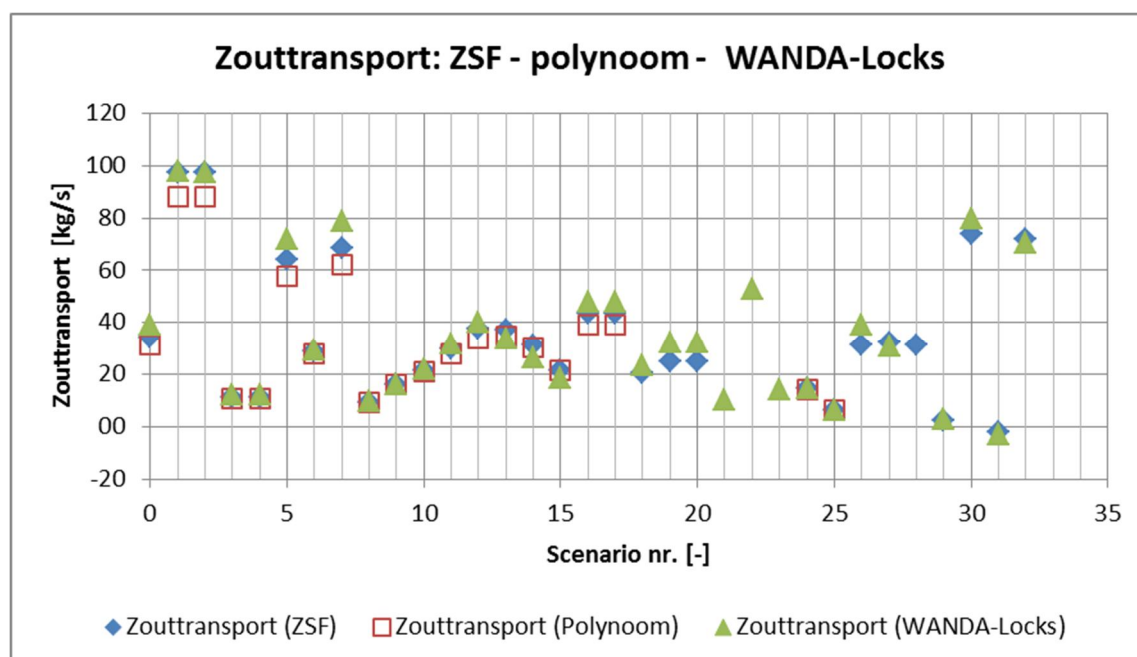


## 4 Vergelijking met WANDA-Locks bij constante operatie

### 4.1 Constante operatie, zonder getij

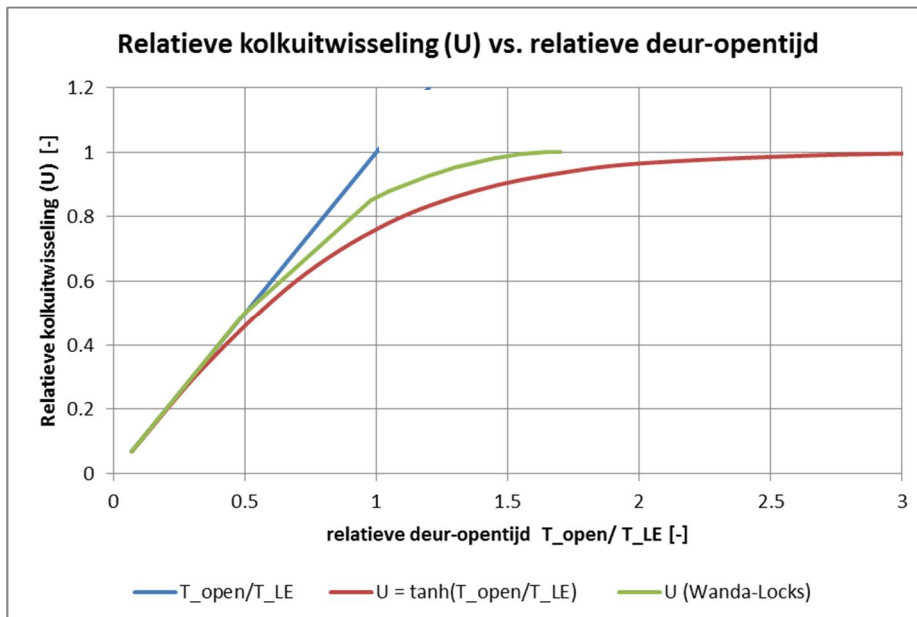
Een aanzienlijk deel van de scenario's zoals gedefinieerd en geëvalueerd in Hoofdstuk 3 is ook doorgerekend met WANDA-Locks. Er is daartoe een schematisatie opgezet van de sluis met de beschouwde afmetingen, waarbij aan weerskanten de waterstand en het zoutgehalte worden voorgeschreven. Voor de operatie is invoer gegenereerd om een lange serie van schuttingen uit te voeren, overeenkomend met de parameters zoals gebruikt voor de berekening met de zeeluisformulering. Het eerste deel van deze serie is bedoeld om in te spelen: vanuit een startconditie komen tot een constante cyclus van zoutgehalten in de kolk en zouttransporten. Over het tweede deel van deze serie zijn vervolgens cyclus-gemiddelde waarden van het zouttransport bepaald.

De resultaten van WANDA-Locks zijn gepresenteerd in Figuur 4.1, samen met de resultaten van de zeeluisformulering en van de 3<sup>e</sup> graads polynoom. De resultaten zijn hier uitgezet op het nummer van het scenario, omdat er door WANDA-Locks geen relatieve deur-opeentijd wordt berekend. Bovendien zorgt deze presentatie ervoor dat de resultaten apart te bekijken zijn.



Figuur 4.1 Resultaten WANDA-Locks vergeleken met ZSF en 3<sup>e</sup> graads polynoom

Voor een aantal scenario's, maar niet voor allemaal, is te zien dat WANDA-Locks een groter zouttransport berekent dan de zeeluisformulering. Dit is conform de verwachting, aangezien de snelheid van de kolkuitwisseling in WANDA-Locks hoger is dan volgens de tangens-hyperbolicus die is geïmplementeerd in de zeeluisformulering: zie hiervoor Figuur 4.2, overgenomen uit [1]: de groene lijn van WANDA-Locks ligt hoger dan de rode lijn volgens de tangens-hyperbolicus. Dit verschil is wel consequent zichtbaar met de 3<sup>e</sup> graads polynoom, maar dat is minder het geval met de zeeluisformulering. Men zou verwachten dat de waarden volgens de zeeluisformulering op dezelfde hoogte liggen als volgens de polynoom en wat lager dan volgens WANDA-Locks. Ze pakken echter soms wat hoger uit.



Figuur 4.2 Relatieve kolkuitwisseling vs. relatieve deur-opentijd, Figuur 3.1 uit [1]

Verder gelden voor een aantal scenario's de volgende opmerkingen bij Figuur 4.1:

- nrs. 21 - 23, de scenario's waarin scheepvaart is geschouwd; hier zijn geen resultaten van de zeeluisformulering getoond omdat deze als niet betrouwbaar zijn beoordeeld (zie Paragraaf 3.2)
- nr. 28, waarbij een waterscherm actief is: hier is het resultaat van WANDA-Locks niet afgebeeld omdat deze situatie in WANDA-Locks anders wordt behandeld dan in de zeeluisformulering; dit zal nader uitgezocht moeten worden;
- in nrs. 26, 27, 31 en 32 is sprake van een spoeldebiet: voor deze scenario's worden de resultaten wel gepresenteerd, maar opgemerkt wordt dat de interactie tussen een spoeldebiet en de kolk-uitwisseling in WANDA-Locks anders wordt beschreven dan in de zeeluisformulering: uitgaande van dezelfde bron (het Zoutlekmode, zie [3]), is op basis van de Pilot op de Kramerjachtensluis de formulering in WANDA-Locks aangepast: daarbij worden de debieten van spoelen en kolkuitwisseling niet meer als onafhankelijk beschouwd, maar wordt de snelheid van de uittredende zouttong gecorrigeerd met de (dieptegemiddelde) snelheid van het spoeldebiet; hierdoor kan in WANDA-Locks het zouttransport nul of negatief worden; het verschil tussen beide benaderingen behoeft nadere aandacht om tot een goede keuze te komen voor de zeeluisformulering.

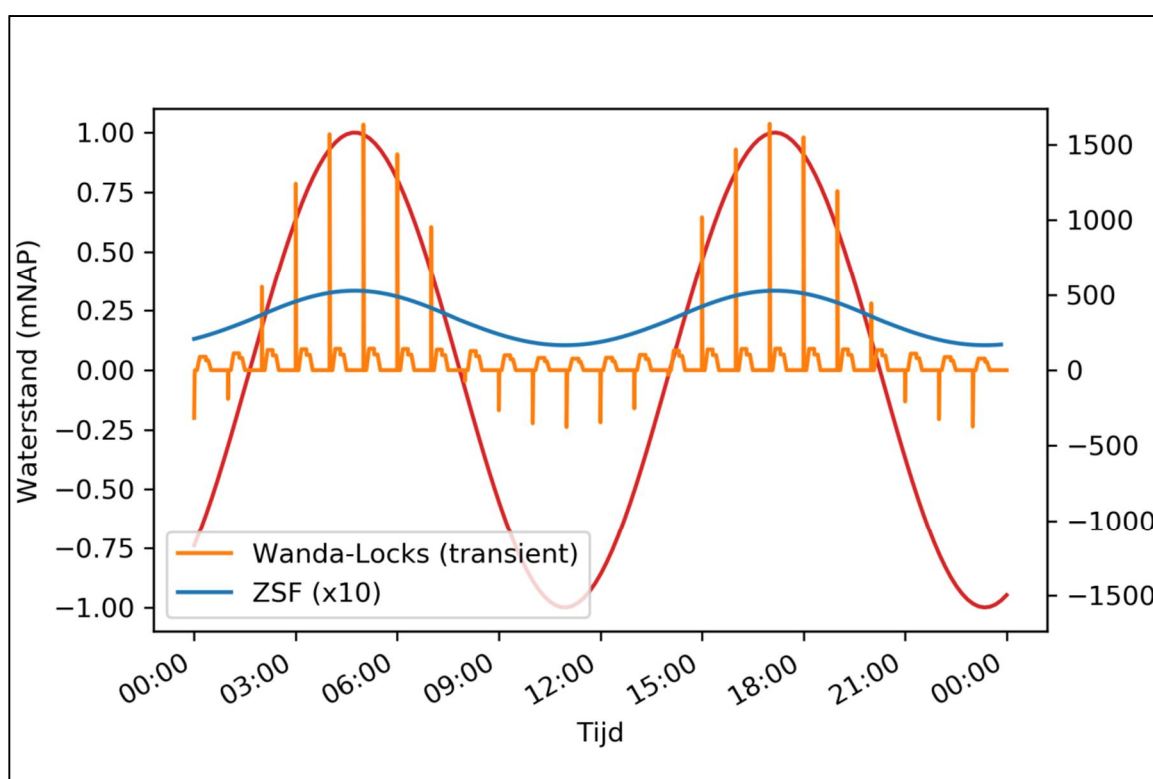
## 4.2 Constante operatie, met getij

De volgende stap in de verkenning met de zeeluisformulering betreft een situatie met een getij. Hiertoe is de vaste waterstand aan de zeezijde vervangen door een regelmatig, harmonisch getij met een amplitude van 1 m (de waterstand varieert dan van -1 m NAP naar +1 m NAP) en een periode van 12,4 uur. We beschouwen het basis-scenario met 24 schutcycli per dag, en kijken naar het zouttransport aan het sluishoofd aan de zoete kant, daar waar het zout uit de sluis komt bij het nivelleren (rond hoogwater aan de zeezijde) en als de deur in dat sluishoofd open staat.

In Figuur 4.3 worden de resultaten gepresenteerd. De rode lijn geeft de variërende waterstand door het getij. De oranje lijn geeft de resultaten volgens WANDA-Locks. Daarin zijn de twee processen te onderscheiden:

- er treden scherpe pulsen op bij het nivelleren: rond hoogwater een positieve waarde (er komt zout naar binnen) als een deel van het water in de kolk wordt geloosd naar de zoete kant, en negatieve waarden rond laagwater: dan wordt water met enig zout onttrokken aan de binnenkant om de waterstand in de kolk te verhogen naar de waterstand aan de binnenkant;
- de pulsen van het nivelleren worden gevolgd door een periode waarin de deur open staat; daarin zijn, als je goed kijkt, steeds twee 'niveaus' te zien, samenhangend met de snelheid van de kolkuitwisseling in de eerste en tweede fasen van de kolkuitwisseling; deze twee snelheden zijn ook te zien in Figuur 4.2: de twee delen van de groene curve met een constante helling.

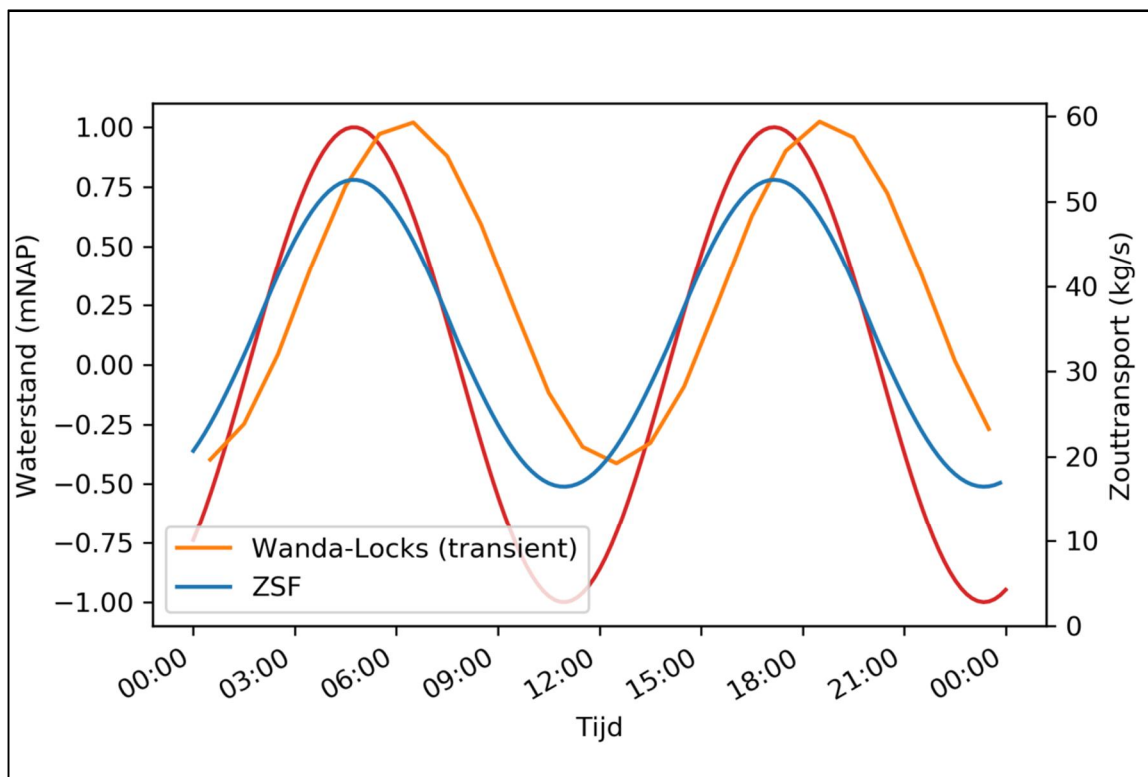
De oplossing volgens de zeesluisformulering is weergegeven met een blauwe lijn, waarbij (ten behoeve van de duidelijkheid) de waarden met een factor 10 zijn vermenigvuldigd. De kromme varieert rond een waarde van 340 kg/s, waarmee het zouttransport dus varieert rond 34 kg/s, overeenkomstig met de berekeningen voor een constante waterstand van 0 m NAP (zie Bijlage C voor dit zouttransport in het scenario '0'). De variatie houdt gelijke tred met de variatie in de waterstand.



Figuur 4.3 Resultaten constante operatie met getij, WANDA-Locks vs. zeesluisformulering

Deze vergelijking tussen de oranje en de blauwe kromme is wat ongemakkelijk. Om iets meer te zien zijn uit de resultaten van WANDA-Locks de cyclus-gemiddelde waarden bepaald: het zouttransport is gemiddeld over de duur van een cyclus (1 uur) en die waarde is geplotted tegen de waterstand halverwege de middelingsperiode. Dit leidt tot Figuur 4.4. Hierin is te zien dat het zouttransport in WANDA-Locks in fase achterloopt ten opzichte van de waterstand.





Figuur 4.4 Resultaten constante operatie met getij, cyclus-gemiddelde waarden WANDA-Locks vs. zeesluisformulering,

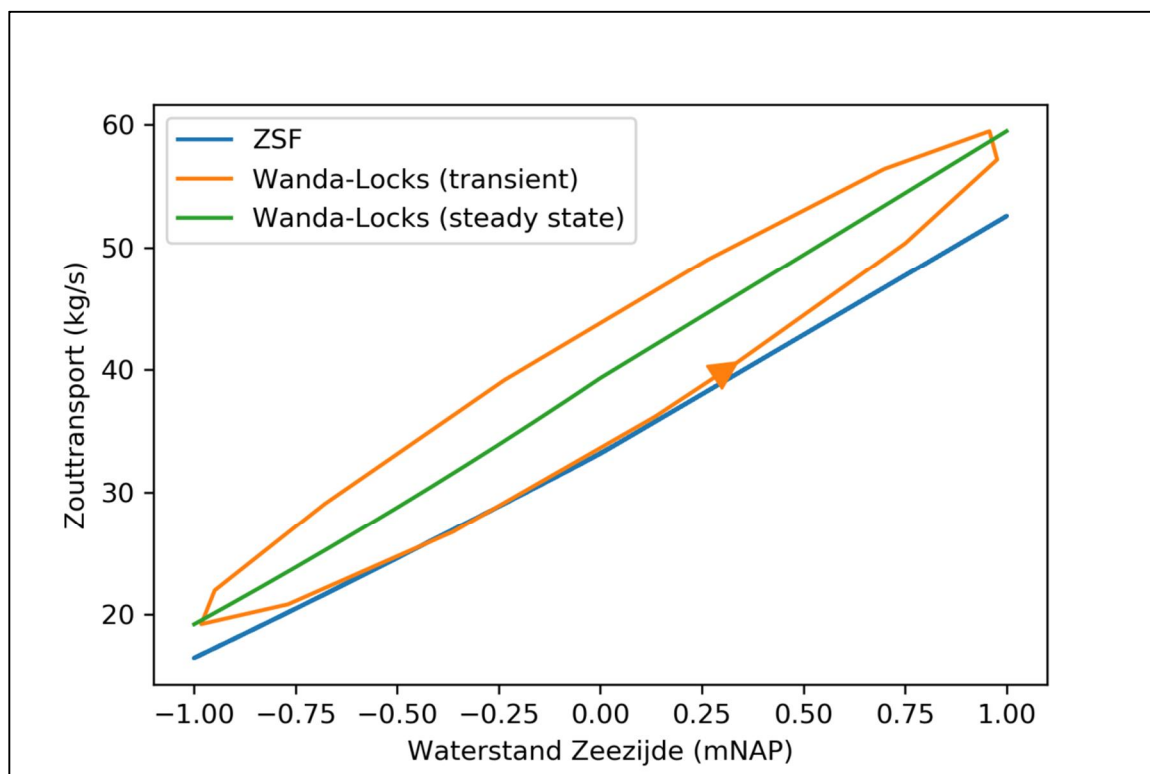
Dit is ook vastgesteld tijdens de Pilot op de Kramerjachtensluis [7]: bij een gedeeltelijke kolkuitwisseling loopt de ontwikkeling van het zoutgehalte in de kolk achter bij de verandering in de randvoorwaarden: als de waterstand aan de zoute kant toeneemt, neemt daardoor aan die kant de snelheid van de kolkuitwisseling toe, zal de kolk zouter worden, en zal daardoor ook het zouttransport aan de zoete kant groter worden. Echter, die aanpassing gaat wat vertraagd omdat het water in de kolk in een cyclus niet helemaal uitwisselt; er zijn een paar cycli nodig om de aanpassing te doen plaatsvinden, maar intussen gaat de verandering van de waterstand door.

De zeesluisformulering rekent steeds een nieuwe evenwichtssituatie uit, waardoor er geen achterstand (fase-verschil) ontstaat. Hier ontstaat dus een verschil tussen WANDA-Locks en de zeesluisformulering, maar dat verschil is acceptabel aangezien de zeesluisformulering vooral bedoeld is voor berekeningen over grotere perioden en grotere gebieden. Daarbij is een verschil binnen een getijperiode van minder groot belang.

Iets anders dat opvalt in Figuur 4.4, is dat het zouttransport volgens WANDA-Locks hoger is dan volgens de zeesluisformulering. Dit is in lijn met de verwachting volgens Figuur 4.2, die aangeeft dat de kolkuitwisseling in WANDA-Locks iets sneller loopt dan in de zeesluisformulering.

Dezelfde resultaten zijn uitgezet in Figuur 4.5: daarbij zijn de waarden voor het zouttransport uitgezet tegen de waterstand. Het pijltje op de oranje kromme geeft de draairichting aan in de getijcyclus. Waar de zeesluisformulering in fase blijft met het getij (een rechte lijn), loopt de berekening in WANDA-Locks achter. Met een groene lijn worden 'steady state' berekeningen

getoond, waarin gerekend wordt met vaste waterstanden (overeenkomstig de berekeningen in Paragraaf 4.1). Deze waarden liggen binnen de hystereselus van de oranje lijn, en consequent iets hoger dan volgens de zeeluisformulering. Ook dit is weer conform de verwachting van Figuur 4.2.



Figuur 4.5 Resultaten constante operatie met getij, cyclus-gemiddelde waarden WANDA-Locks ('transient' en 'steady state') vs. zeeluisformulering, geplot tegen de waterstand

Figuur 4.5 geeft de twee verschillen tussen WANDA-Locks en de zeeluisformulering goed weer: een verschil in het berekende zouttransport, gemiddeld over het getij, en een fase-verschuiving. Deze fase-verschuiving zal voor de zeeluisformulering van minder belang zijn, omdat in de beoogde toepassingen ervan de aandacht primair uit zal gaan naar het effect van het zouttransport over grotere afstanden en over langere tijd.

### 4.3 Conclusies

De vergelijking van de zeeluisformulering met WANDA-Locks bevestigt dat, voor de beschouwde situaties met een constante operatie, de zeeluisformulering betrouwbare en bruikbare resultaten geeft voor het beoogde doel: het kunnen bepalen van het effect van het zouttransport over grotere afstanden en over langere tijd. Er zijn nog wel een paar aandachtspunten:

- conform de verwachting zijn de resultaten van WANDA-Locks hoger dan volgens de polynoom, maar WANDA-Locks zou ook hoger moeten uitkomen dan de zeeluisformulering; dat verschil is echter minder duidelijk; de resultaten volgens de zeeluisformulering lijken daarmee dus aan de hoge kant;
- het waterscherm wordt in WANDA-LOCKS anders behandeld dan in de zeeluisformulering; dit nader uit te zoeken;

- hetzelfde geldt voor de behandeling van het spoeldebiet; ook dit nader uit te zoeken.

## 5 Evaluatie bij variabele operatie: de kalibratiefactor

### 5.1 Inleiding

De evaluatie bij variabele operatie gaat over een essentieel aspect van de zeesluisformulering en de bruikbaarheid daarvan: in hoeverre is het zouttransport bij een realistische, variabele operatie, te voorspellen op basis van gemiddelde operationele parameters.

Op basis van eerdere projecten inzake de zoutindringing door schutsluizen is de verwachting uitgesproken dat een berekening op basis van gemiddelde operationele parameters zou leiden tot een overschatting van het zouttransport (zie o.a. het Plan van Aanpak in Bijlage A). Om daarvoor te corrigeren is een kalibratiefactor gedefinieerd: een factor waarmee de gemiddelde deur-opentijd wordt gecorrigeerd naar een representatieve deur-opentijd. In dit hoofdstuk wordt de kalibratiefactor bepaald voor de Noordersluis te IJmuiden, gebruik makend van daarvoor beschikbare gegevens.

Deze gegevens zijn in essentie een gedetailleerde beschrijving van de variabele operatie. Deze zijn beschikbaar in de vorm van de uitvoer van een simulatiemodel dat de afhandeling van scheepvaart door het sluizen-complex beschrijft ([7] en [9]). Dit model is gebouwd ten behoeve van studies omtrent de capaciteit van het sluizencomplex en is gevalideerd op wachttijden. Het bevat veel details van zowel de schutoperatie als de aankomst- en vertrekpatronen van verschillende scheepsklassen. Dat maakt het een waardevolle, realistische beschrijving van de operatie.

Om nog een stap dichterbij de werkelijkheid te komen zouden gedetailleerde registraties nodig zijn van de deur-bewegingen, het nivelleren, en de waterverplaatsing van de schepen in de kolk. Deze zijn echter niet beschikbaar. Vandaar dat een vergelijking met deze gesimuleerde operatie nu de beste optie is.

### 5.2 Noordersluis IJmuiden

Zoals hierboven al genoemd, maken we gebruik van data omtrent een gesimuleerde operatie, meer specifiek voor de berekeningen van de situatie van 2005 waarvoor de validatie is uitgevoerd. Deze data zijn eerder gebruikt voor berekeningen met WANDA-Locks ([10] en [11]). Die berekeningen betroffen het hele sluiscomplex en de voorhavens. Voor ons doel is de schematisatie 'uitgekleed' zodat die alleen de Noordersluis bevat, en de randvoorwaarden direct buiten de sluis worden opgelegd.

De afmetingen van de sluis zijn als volgt: lengte 400 m, breedte 50 m, bodem/drempel op NAP -15,5 m. De aangehouden saliniteiten zijn gelijk gehouden aan de tot op heden gehanteerde waarden: 5 en 25 psu (resp. de kanaalzijde (in de formele terminologie de Meerzijde) en de Zeezijde). (Let wel: deze waarden zijn niet persé representatief voor de locatie, maar gekozen voor het doel van de huidige berekeningen.)

Bij 12 schutcycli per etmaal (dat is een realistische waarde voor deze sluis) is de gemiddelde deur-opentijd 44 minuten en dat is ca. 2,6 maal de theoretische tijd voor kolkuitwisseling,  $T_{LE}$ . Bij een berekening o.b.v. de gemiddelde deur-opentijd zou de kolk dus in iedere cyclus praktisch volledig uit. Bij een onregelmatige operatie zullen zowel kortere als langere deur-opentijden voorkomen. Bij langere deur-opentijden verandert er niet veel meer, want meer dan

volledig uitwisselen kan niet. Bij kortere deur-opentijden zal de sluis niet meer volledig uitwisselen, en zal het zouttransport dus kleiner worden. Dat leidt ertoe dat we voor een onregelmatige operatie een kleiner zouttransport verwachten dan bij een regelmatige, 'gemiddelde' operatie.

### 5.3 Vergelijking bij middeling over 14 dagen

Om een berekening te maken met de zeesluisformulering zijn de resultaten van de verkeerssimulaties geanalyseerd. Gekeken is naar de daarin opgetreden gemiddelde deur-opentijd per sluishoofd, de tijd voor het openen of sluiten van de deur, de tijd voor het nivelleren en het aantal cycli. Deze getallen moeten samen optellen tot 24 uur per etmaal.

Deze middeling is in eerste instantie gedaan voor een periode van twee weken (18 januari t/m 31 januari 2005). De gemiddelde waarden voor die periode zijn weergegeven in onderstaande tabel.

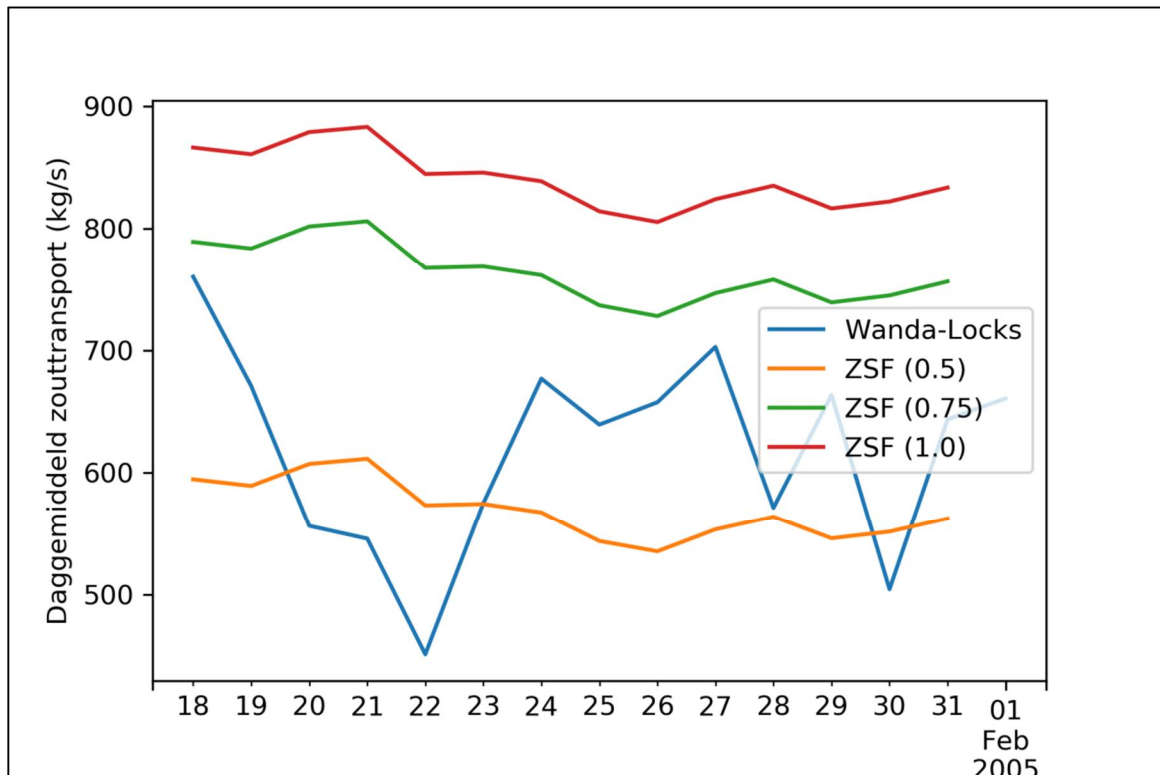
Tabel 5.1 Gemiddelde operationele parameters over 14 dagen (periode 18 t/m 31 januari 2005)

Parameter	symbool	waarde
Aantal cycli per etmaal	N_Cycli	12,5
tijd voor nivelleren	T_Niv	719 s $\approx$ 12 min
deur-opentijd meerzijde	deur_meer	2013 s $\approx$ 33,6 min
deur-opentijd zeezijde	deur_zee	2980 s $\approx$ 49,7 min
gemiddelde deur-opentijd	deur_gem	2496 s $\approx$ 41,6 min
symmetrie-factor	c_M/Gem	0,81

Hiermee is de gemiddelde operatie gedefinieerd. Deze gemiddelde operatie is vervolgens gecombineerd met drie waarden voor de kalibratiefactor: 1,0, 0,75 en 0,5.

Voor de saliniteiten zijn vaste waarden aangehouden (5 en 25 psu voor resp. binnenkant en buitenkant), de waterstand aan de binnen kant heeft een vaste waarde van NAP -0,4 m, en aan de buitenkant varieert die door getij en door op- en afwaaiing. Hiervoor is dezelfde tijdreeks gebruikt als gehanteerd in de oorspronkelijke studies ([10] en [11]).

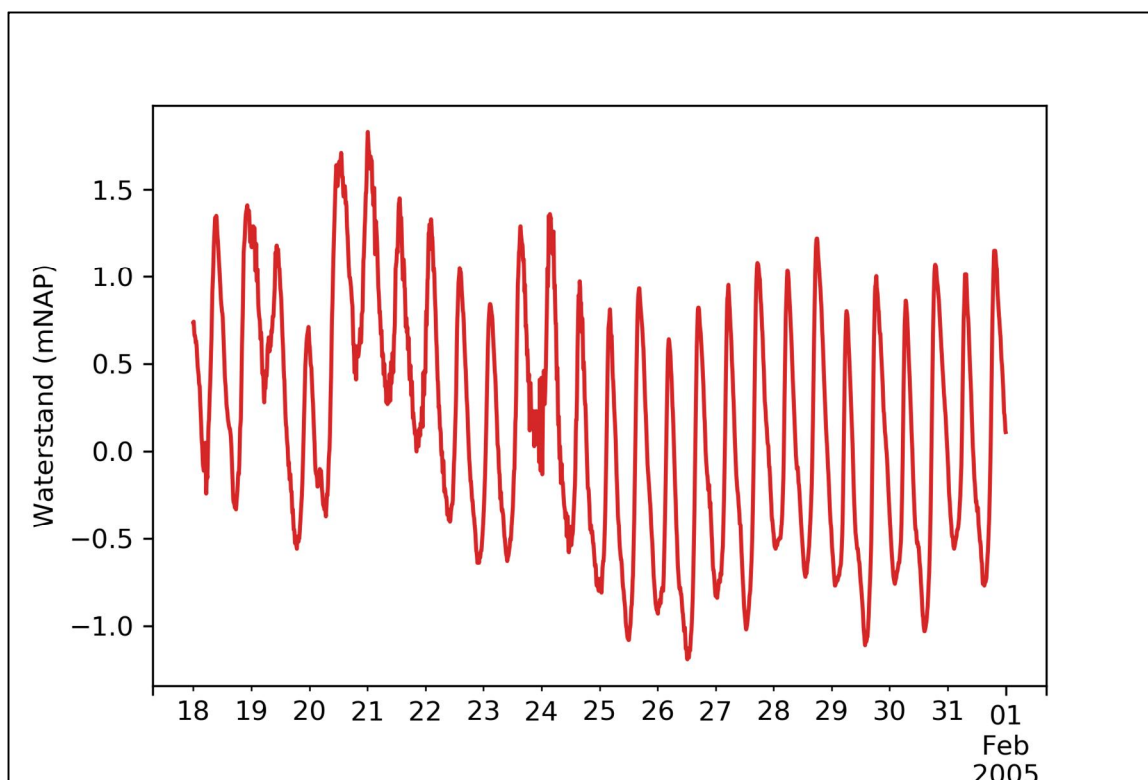
Op basis van deze invoer zijn berekeningen uitgevoerd met de zeesluisformulering. Omdat er in de resultaten van WANDA-Locks erg veel variatie in de uitvoer zit is de uitvoer (bij WANDA-Locks het zouttransport over het binnenhoofd) geanalyseerd naar dag-gemiddelde waarden. Deze worden getoond in Figuur 5.1.



Figuur 5.1 Daggemiddelde waarden zouttransport: WANDA-Locks vs. zeesluisformulering, met verschillende waarden van de kalibratiefactor; de berekening met de zeesluisformulering is gedaan o.b.v. operationele parameters gemiddeld over 14 dagen.

De blauwe lijn toont de resultaten van WANDA-Locks. De daggemiddelde waarden variëren van ca. 450 kg/s tot ruim 750 kg/s. Voor een deel kan deze variatie samenhangen met de afwisseling tussen weekdays en weekenddagen: de weekend vallen op 22 en 23 januari en op 29 en 30 januari.

De resultaten van de zeesluisformulering variëren veel minder: voor de operatie worden iedere dag dezelfde (gemiddelde) waarden gebruikt, dus de enige variatie die er nog in zit moet gerelateerd zijn aan de waterstanden. Die waterstanden zijn afgebeeld in Figuur 5.2 en die figuur lijkt dit vermoeden te bevestigen. (N.B.: De daggemiddelde waarden in Figuur 5.1 zijn geplot op het begin van elke dag, terwijl de waterstand wordt afgebeeld verdeeld over de hele dag. Dit leidt tot een zekere verschuiving.)



Figuur 5.2 Waterstand buiten voor de periode van de berekeningen getoond in Figuur 5.1

Verder geeft Figuur 5.1 een beeld van de kalibratiefactor die nodig is om voor de hele periode (twee weken) met de zeesluisformulering te komen tot dezelfde gemiddelde waarde als met WANDA-Locks. De gemiddelde waarden zijn als volgt:

Tabel 5.2 Gemiddelde zouttransport over 14 dagen: WANDA-Locks en zeesluisformulering met verschillende kalibratiefactoren, berekend o.b.v. operationele parameters gemiddeld over 14 dagen

Berekening:	kalibratiefactor [-]	gemiddeld zouttransport [kg/s]
WANDA-Locks		619
zeesluisformulering	1,0	841
zeesluisformulering	0,75	763
zeesluisformulering	0,5	570

Uitgaande van de berekening van de zeesluisformulering (kalibratiefactor van 1) is een reductie nodig van het zouttransport met een factor van ongeveer 0,74 (factor op het zouttransport). Hiervoor is een kalibratiefactor (factor op de deur-opentijd) nodig van ongeveer 0,57.

Deze factoren worden echter ook bepaald door de verschillen tussen WANDA-Locks en de zeesluisformulering die bleken in Hoofdstuk 4. Daar waren de resultaten van WANDA-Locks groter, door de hogere snelheden van de kolkuitwisseling. Zou dit geen rol spelen, dan zou de hierboven bepaalde kalibratiefactor dus nog kleiner zijn.

#### 5.4 Berekeningen zeesluisformulering bij middeling per dag

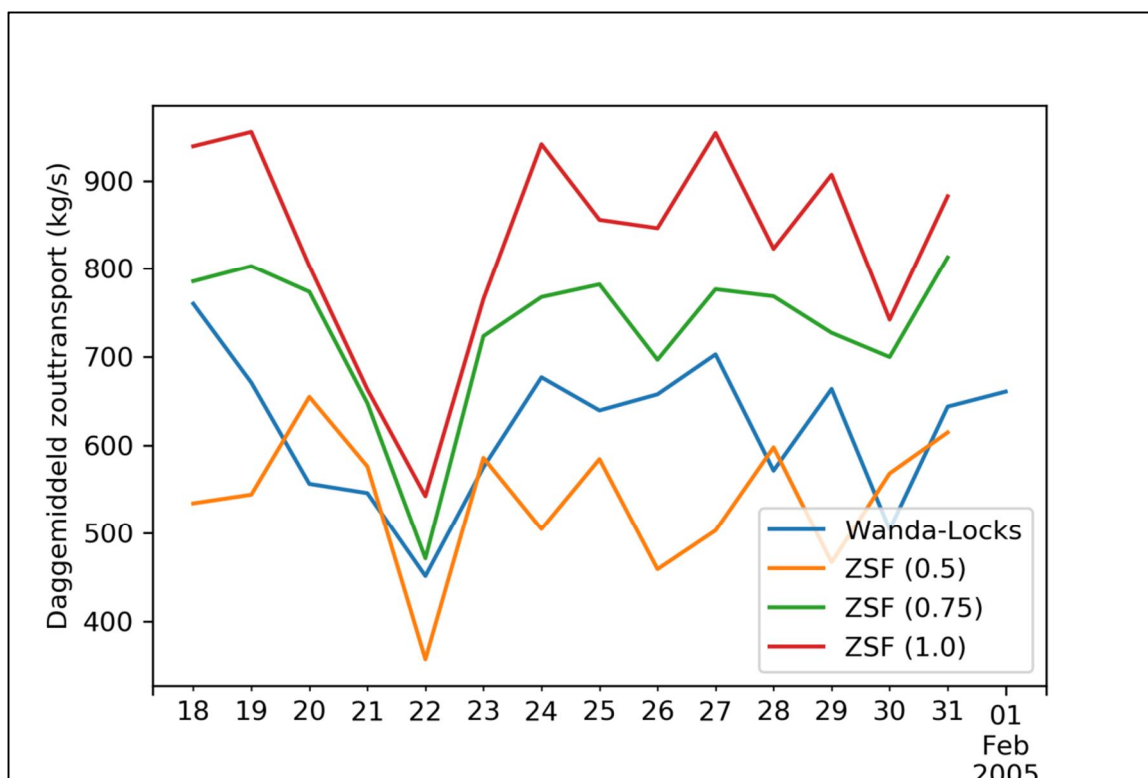
De blauwe lijn in Figuur 5.1 laat zien dat de dag-gemiddelde waarden van het zouttransport sterk fluctueren. Dit duidt op een sterke variatie in de operatie. Om dit nader te onderzoeken zijn van de operationele parameters dag-gemiddelde waarden bepaald, in plaats van de gemiddelde waarden over 14 dagen, zoals in eerste instantie. De resultaten van deze middeling per dag zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 5.3 Dag-gemiddelde waarden van de operationele parameters

Datum	N_Cycli [-]	T_Niv		deur_meer		deur_zee		deur_gem		c_M/Gem [-]
		[s]	[min]	[s]	[min]	[s]	[min]	[s]	[min]	
18-Jan-05	15	688	11.5	1423	23.7	2481	41.4	1952	32.5	0.729
19-Jan-05	15	715	11.9	1583	26.4	2268	37.8	1925	32.1	0.822
20-Jan-05	11	547	9.1	2848	47.5	3433	57.2	3140	52.3	0.907
21-Jan-05	9	903	15.0	3008	50.1	4307	71.8	3657	61.0	0.822
22-Jan-05	9	678	11.3	1296	21.6	6469	107.8	3882	64.7	0.334
23-Jan-05	11	715	11.9	2402	40.0	3542	59.0	2972	49.5	0.808
24-Jan-05	16	619	10.3	1357	22.6	2324	38.7	1841	30.7	0.737
25-Jan-05	13	536	8.9	2928	48.8	2166	36.1	2547	42.5	1.150
26-Jan-05	15	613	10.2	1311	21.9	2743	45.7	2027	33.8	0.647
27-Jan-05	16	693	11.5	1805	30.1	1730	28.8	1768	29.5	1.021
28-Jan-05	12	686	11.4	2652	44.2	2697	44.9	2674	44.6	0.992
29-Jan-05	16	702	11.7	1380	23.0	2136	35.6	1758	29.3	0.785
30-Jan-05	11	558	9.3	2294	38.2	3964	66.1	3129	52.1	0.733
31-Jan-05	13	550	9.2	2583	43.1	2483	41.4	2533	42.2	1.020

Op basis van deze operationele parameters, die dus per dag anders zijn, zijn opnieuw berekeningen gedaan met de zeesluisformulering, wederom voor drie verschillende waarden voor de kalibratiefactor: 1,0, 0,75 en 0,5. Het resultaat is gepresenteerd in Figuur 5.3.





Figuur 5.3 Daggemiddelde waarden zouttransport: WANDA-Locks vs. zeesluisformulering, met verschillende waarden van de kalibratiefactor; de berekening met de zeesluisformulering is gedaan o.b.v. daggemiddelde waarden van de operationele parameters.

Het eerste dat opvalt aan deze figuur is dat alle krommen een lage waarde laten zien op 22 januari. Op die dag zijn er volgens Tabel 5.3 slechts 9 schutcycli, duidelijk minder dan op de andere dagen. Maar er zijn ook 9 schutcycli op 21 januari.

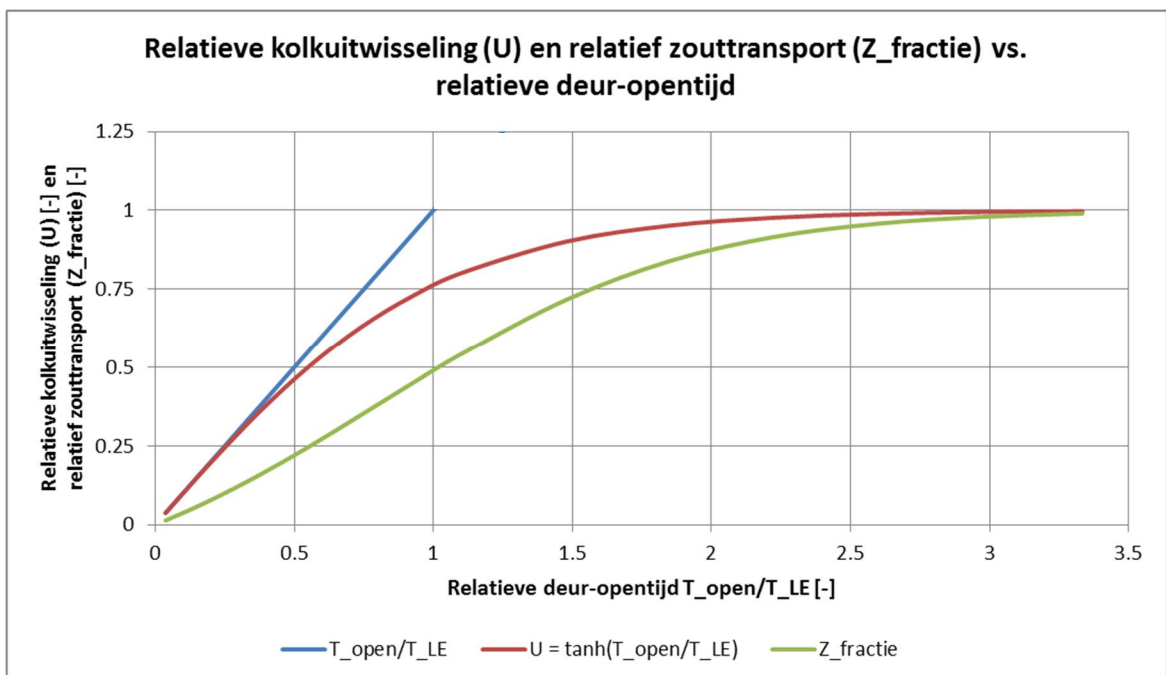
Een belangrijk verschil tussen deze twee dagen zit in de parameter  $C_{M/Gem}$ : de parameter die aangeeft in welke mate de operatie in de tijd symmetrisch verloopt: of de deur-opentijden aan beide kanten ongeveer even lang zijn. De tabel laat zien dat op 22 januari deze parameter zeer klein is, door korte deur-opentijden aan de meerzijde van slechts ca. 22 minuten, tegen zeer lange deur-opentijden aan de zeezijde van ca. 108 minuten: deze asymmetrie kan erop duiden dat er vooral schepen het kanaal opvaren: voor het uitvaren aan de meerzijde is niet veel tijd nodig, waardoor daar kortere deur-opentijden ontstaan.<sup>2</sup>

Deze asymmetrie in de operatie levert een forse beperking op in het zouttransport: door de korte deur-opentijd aan de meerzijde kan de kolk aan die kant niet volledig uitwisselen, terwijl er aan de zeezijde niet veel verandert; daar was de kolk-uitwisseling toch al praktisch volledig.

Een tweede ding dat opvalt is dat de krommen van de zeesluisformulering niet alle drie dezelfde vorm hebben. Dit geeft aan dat de invloed van de kalibratiefactor niet altijd even groot is.

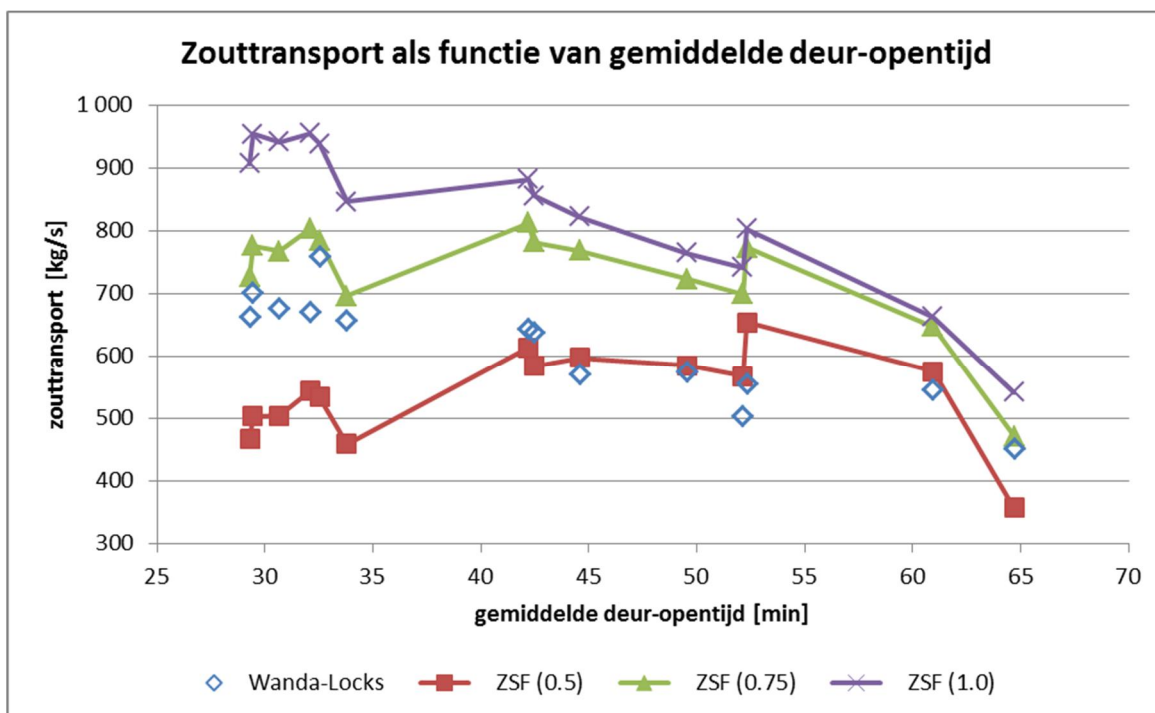
<sup>2</sup> Van IJmuiden is overigens bekend dat er op zondagavond veel schepen naar binnen komen, om op maandag in de haven te zijn voor laden of lossen. Op vrijdagavond vertrekken juist veel schepen naar zee. Beide tendensen zijn gerelateerd aan het feit dat schepen minder graag in het weekend in de haven zijn omdat er dan niet, of tegen een hoger tarief, gewerkt wordt, terwijl er toch liggeld betaald moet worden en het schip niet vaart, en dus geen geld verdient.

Die invloed kan inderdaad klein worden als de ongecorrigeerde deur-opentijd heel erg groot is. Dan leidt een reductie daarvan tot een beperkte reductie van de kolkuitwisseling. Kijkend naar Figuur 5.4 (dezelfde figuur als Figuur 3.1): als door de kalibratiefactor de relatieve deur-opentijd afneemt van 3 naar 2 (kalibratiefactor 0,67), dan neemt het relatieve zouttransport af van bijna 1,0 naar ca. 0,85, dus een reductie met ca. 15% t.o.v. de ongecorrigeerde waarde. Als door dezelfde kalibratiefactor de relatieve deur-opentijd afneemt van 1,5 naar 1, dan neemt het relatieve zouttransport af van bijna 0,75 naar bijna 0,5: een reductie met ca. 30% t.o.v. de ongecorrigeerde waarde.

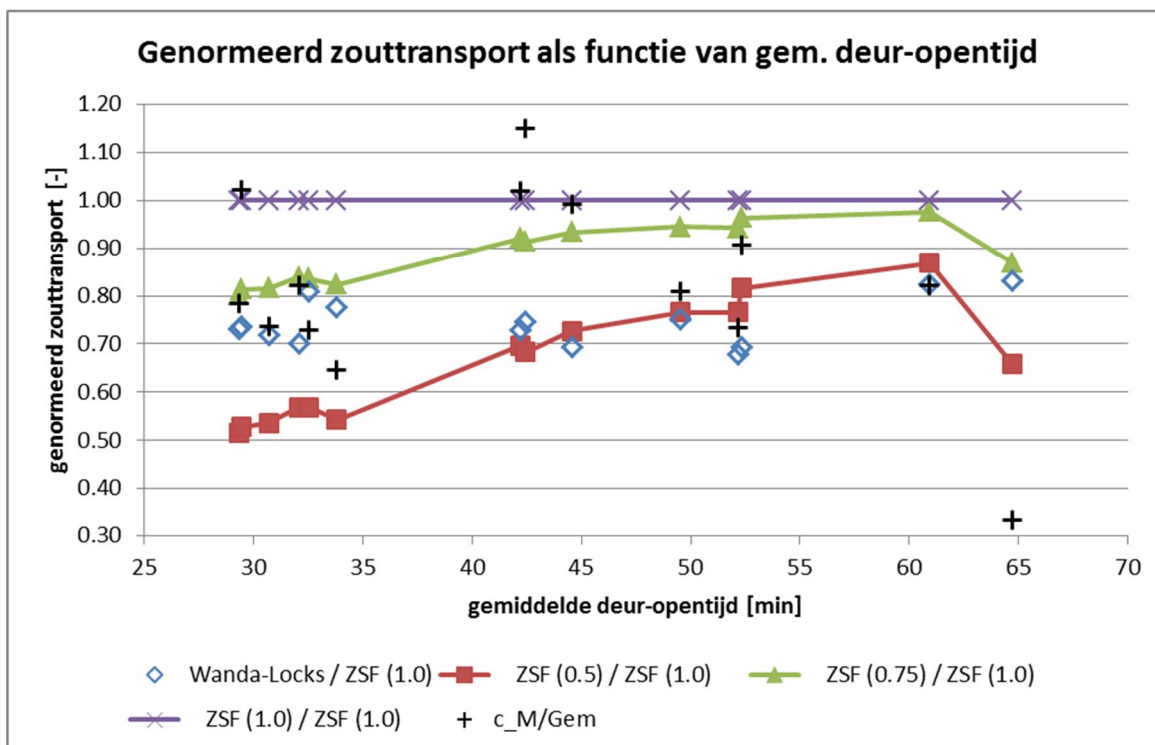


Figuur 5.4 Relatieve kolkuitwisseling en relatief zouttransport vs. relatieve deur-opentijd (gelijk aan Figuur 3.1)

Om vast te stellen of dit inderdaad de reden is voor de grillige vormen in Figuur 5.3, zijn de resultaten van Figuur 5.3 uitgezet tegen de gemiddelde deur-opentijd: de waarden uit Tabel 5.3: de gemiddelde waarde over beide sluishoofden. Dit leidt tot Figuur 5.5. Hierin is te zien dat de verschillen tussen de waarden berekend met verschillende kalibratiefactoren kleiner wordt naarmate de deur-opentijd langer wordt. Ook is te zien dat het zouttransport daarmee afneemt: een gevolg van het feit dat een langere deur-opentijd samenhangt met een kleiner aantal schuttingen.



Figuur 5.5 Berekende waarden zouttransport uitgezet tegen de gemiddelde deur-opentijd



Figuur 5.6 Genormeerde waarden zouttransport uitgezet tegen de gemiddelde deur-opentijd

Om het beeld nog duidelijker te maken zijn alle berekende waarden van het zouttransport (zowel de waarden berekend met de zeeluisformulering als met WANDA-Locks) gedeeld door de berekende waarde van de zeeluisformulering met een kalibratiefactor van 1. Dat leidt tot Figuur 5.6. Daarin is goed te zien hoe de krommen naar elkaar toe bewegen met toenemende deur-opentijd. De uitzondering daarop is het laatste punt: dat zijn de waarden voor 22 januari,

de dag met de sterke asymmetrie in de schutoperatie, waardoor het zouttransport kleiner is dan volgt uit de gemiddelde waarde van de deur-opentijd over beide sluishoofden. Dit punt hoort daarmee eigenlijk verder naar links in de figuur te staan: bij een deur-opentijd van ca. 38 minuten.

In Figuur 5.6 is ook parameter  $C_{M/Gem}$  geplot (de parameter die aangeeft of de operatie in de tijd symmetrisch verloopt). De figuur laat zien dat de 'sprongetjes' in de berekende waarden van het zouttransport samengaan met verschillen in de waarde van  $C_{M/Gem}$ . (Merk daarbij op dat ook als de waarde van  $C_{M/Gem}$  groter wordt dan 1, dit leidt tot een kleinere waarde van het zouttransport.) In Figuur 5.5 zijn de sprongen zichtbaar in zouttransporten berekend voor alle kalibratiefactoren: parameter  $C_{M/Gem}$  is dus van invloed op het berekende zouttransport. Figuur 5.6 laat zien dat deze parameter ook een rol speelt in de invloed van de kalibratiefactor.

De invloed van de kalibratiefactor is dus afhankelijk van de relatieve deur-opentijd (zie de tekst bij Figuur 5.4) en van de mate van asymmetrie in de deur-opentijd.

## 5.5 Vergelijking met WANDA-Locks, keuze kalibratiefactor

In voorgaande paragraaf is gekeken naar de verschillen tussen de resultaten van de zeesluisformulering bij verschillende kalibratiefactoren, en deze verschillen zijn verklaard. De meer wezenlijke vraag is welke waarde er voor de kalibratiefactor gekozen moet worden om te komen tot een goede waarde voor het zouttransport. Daarvoor moeten we de resultaten van de zeesluisformulering vergelijken met die van WANDA-Locks.

In Paragraaf 5.3 is deze vergelijking gemaakt bij berekeningen op basis van constante operationele parameters: de gemiddelden over 14 dagen. Deze vergelijking kunnen we nu opnieuw maken voor de berekeningen op basis van de dag-gemiddelde operationele parameters. Om de kalibratiefactor te bepalen voor de beschouwde periode vergelijken we de resultaten over dezelfde periode van 14 dagen. De getallen staan in Tabel 5.4 hieronder: zowel bij middeling van de operationele parameters over 14 dagen (zie ook Tabel 5.2) als bij het werken met daggemiddelde waarden.

Tabel 5.4 Gemiddelde zouttransport over 14 dagen: WANDA-Locks en zeesluisformulering met verschillende kalibratiefactoren, berekend o.b.v. operationele parameters gemiddeld over 14 dagen en bij middeling per dag

Berekening:	Kalibratie-factor [-]	Gemiddeld zouttransport [kg/s]	
		middeling operationele parameters over 14 dagen	middeling operationele parameters per dag
WANDA-Locks		619	
zeesluisformulering	1,0	841	830
zeesluisformulering	0,75	763	731
zeesluisformulering	0,5	570	539

De tabel laat zien dat bij het werken met de daggemiddelde waarden de berekeningen met de zeesluisformulering iets lagere waarden oplevert. Door de kortere periode van middelen ontstaan er dagen met minder zouttransport (hetzij door een lager aantal schuttingen, hetzij door kortere deur-opentijden, aan een of beide zijden), waardoor het zouttransport gemiddeld over 14 dagen iets afneemt. Dit werkt ook door in de kalibratiefactor: om hetzelfde gemiddelde zouttransport te berekenen als WANDA-Locks is nu een kalibratiefactor nodig van ongeveer 0,60: iets groter dan de waarde van 0,57 die eerder werd gevonden.

Het verschil tussen de resultaten bij middeling over 14 dagen en die bij middeling per dag is beperkt: de kalibratiefactor schuift niet wezenlijk op richting de 1. Kennelijk voegt het meenemen van verschillen tussen dagen (weekdagen en weekenddagen) niet veel informatie toe. Mogelijk dat ook de korte beschouwde periode (14 dagen) daarin een rol speelt.

Het zou kunnen zijn dat de verschillen tussen dag en nacht groter zijn, en dat het in rekening brengen daarvan (middels een variatie in de schutfrequentie) wel iets toevoegt. De huidige vergelijking geeft daarmee nog niet veel inzicht in hoe de juiste waarde voor de kalibratie-factor te kiezen.

Figuur 5.5 en Figuur 5.6 geven wel een handvat: we zien min of meer twee groepen van punten: een groep bij kleinere deur-opentijden en een bij grotere deur-opentijden. Bij grotere deur-opentijden zou de kalibratiefactor ca. 0,5 moeten zijn, en bij kleinere deur-opentijden ca. 0,7. Deze trend, een hogere kalibratiefactor bij kleinere deur-opentijden, lijkt wel verklaarbaar als we de werkelijke operatie beschouwen.

- Als de sluis werkelijk volcontinu bezet is (beide kanten op, dag en nacht, door de week en in het weekend) dan is de deur-opentijd vanzelf beperkt en constant op een soort operationeel minimum voor het schutten met volle kolken. Als de deur-opentijden (bijna) constant zijn dan moet de kalibratie factor (bijna) 1 zijn: de beschrijving volgens de zeesluisformulering met daggemiddelde waarden voor de operatie ligt dan heel dicht bij de werkelijke situatie.
- Als de sluis iets minder druk bezet is ontstaat er enige marge in de tijd. Daarmee is er ruimte voor variatie in bezetting tussen b.v. dag en nacht en zullen de deur-opentijden gaan variëren, waardoor de representatieve waarde kleiner wordt dan de gemiddelde waarde, waarvoor dan een kleinere kalibratiefactor nodig is, bijvoorbeeld een waarde rond de 0,7 zoals volgt uit de data voor de Noordersluis. (De andere benadering zou kunnen zijn de variatie tussen dag en nacht in te voeren in de berekening middels een variatie in de schutfrequentie).
- Als de sluis ook overdag niet vol bezet is ontstaat nog meer marge in de tijd, gaan de deur-opentijden nog meer variëren en is een nog lagere kalibratiefactor nodig, bijvoorbeeld een waarde van ca. 0,5.

De relatie die hiermee ontstaat is: hoe drukker de sluis bezet is, hoe meer regelmaat er in de schutbeweging zal zitten, hoe groter de kalibratiefactor moet worden gekozen (dichter bij 1). En omgekeerd, naar mate de sluis minder druk bezet is, des te kleiner moet de kalibratiefactor gekozen worden.

Als de operatie sterk asymmetrisch is ontstaat daardoor een kleinere deur-opentijd aan een kant. Als de asymmetrie zit verwerkt in de gebruikte waarde van  $C_{M/Gem}$  dan wordt dit effect meegenomen in de berekening. Zijn er echter geen gegevens over de asymmetrie en wordt hiervoor ten onrechte de default-waarde van 1 gebruikt, dan wordt er dus gerekend met een deur-opentijd die gemiddeld is over beide sluishoofden, en daarvoor wordt dus een te groot zouttransport berekend. Om dit te voorkomen zou de kalibratie-factor in zo'n geval kleiner gekozen moeten worden.

Ter illustratie hiervan: kijkend naar Figuur 5.5 en Figuur 5.6 hebben we al geconstateerd dat daarin twee groepen van punten zijn aan te wijzen. Bij kleiner deur-opentijden zou de kalibratiefactor ca. 0,7 moeten zijn, en bij grotere deur-opentijden ca. 0,5. Hiermee zou, afgezien van de laatste twee punten, de representatieve deur-opentijd gelijk worden aan een

waarde tussen 20 en 25 minuten. Kijken we naar Tabel 5.1, dan volgt uit de gemiddelde deur-opentijd van 41,6 minuten en de kalibratiefactor van 0,57 een representatieve deur-opentijd van ca. 23,7 minuten, bij een gemiddelde waarde van  $C_{M/Gem}$  van 0,81 (zie ook Tabel 5.1). Als de asymmetrie niet apart ingeschat wordt, maar op 1 gehouden wordt, zou een nog kleinere waarde voor de deur-opentijden nodig zijn.

Overigens: door keuzes te maken in de operatie kan de zoutindringing worden beperkt. Als er tijdelijk geen scheepvaart is die de sluis wil passeren, kan na het uitvaren van een schip de deur worden gesloten. Dat zou de kolkuitwisseling onderbreken en dat zou de zoutindringing, ook in volgende schuttingen, beperken. Helaas gebeurt dit in de praktijk zelden. Dit kan echter met de zeesluisformulering wel worden beschreven, en dus ook worden onderzocht, door een nog kleinere kalibratiefactor te kiezen.

## 5.6 Conclusies

De berekeningen en analyses bevestigen dat een berekening op basis van gemiddelde deur-opentijd (kalibratiefactor = 1) een overschatting geeft van het zouttransport. Voor de beschouwde case, afgeleid van de Noordersluis te IJmuiden, zou de kalibratiefactor ca. 0,6 moeten zijn. Het meenemen van meer details van de variatie in de operatie zou moeten leiden tot een kalibratiefactor dicht bij de 1. Dit zou b.v. verder te onderzoeken zijn voor het dag/nacht ritme van de schutoperatie.

Een sterke asymmetrie in de operatie heeft ook een grote invloed op de zoutindringing. Als deze asymmetrie niet aan de berekeningen wordt meegegeven middels de waarde van parameter  $C_{M/Gem}$  dan moet een kleinere kalibratiefactor worden gehanteerd.

Verder is duidelijk geworden dat de kalibratiefactor samenhangt met de bezetting van de sluis: hoe meer volcontinu de sluis bezet is, hoe dicht de kalibratiefactor bij 1 zou moeten liggen. Een minder vol bezette sluis leidt tot een kleinere kalibratiefactor. Het voorkomen dat deuren onnodig open staan (sluiten na uitvaren van een schip als er (nog) geen andere scheepvaart bedien hoeft te worden) zou leiden tot een nog lagere kalibratiefactor.



## 6 Samenvatting, conclusies, aanbevelingen

Nadat in 2017 de basis is gelegd voor de zeesluisformulering, is deze formulering in 2018 geïmplementeerd in een stuk software (stand-alone) om de formulering te testen op consistentie en betrouwbaarheid. De resultaten zijn veelbelovend. Daarmee zijn belangrijke stappen gezet naar de implementatie van deze formulering in de hydrodynamische software. Bovendien biedt de stand-alone versie mogelijkheden voor toepassing in het genereren van randvoorwaarden voor netwerkmodellen en voor toepassing in operationele systemen voor het beheer van water op zoutgehalte.

De controle op interne consistentie en de vergelijking van de resultaten met de 3<sup>e</sup> graads polynoom (Hoofdstuk 3) en ook de vergelijking met WANDA-Locks (Hoofdstuk 4) laten zien dat de nieuwe code, bij constante operatie, voorspelbare en begrijpelijke resultaten produceert over een range aan condities. Daarbij zijn de volgende aandachtspunten geconstateerd:

Hoofdstuk 3:

- 1 de behandeling van waterverplaatsing scheepvaart in de zeesluisformulering;
- 2 de berekening van de relatieve deur-opentijd in de zeesluisformulering;
- 3 de berekening met de zeesluisformulering leidt tot hogere zouttransporten dan de 3<sup>e</sup> graads polynoom; het is nog niet duidelijk waarom;

Hoofdstuk 4:

- 4 de berekening met WANDA-Locks leidt soms tot hogere zouttransporten waarden dan de zeesluisformulering (conform verwachting), maar niet altijd; de resultaten van de zeesluisformulering zijn daarmee (soms) aan de hoge kant; de zeesluisformulering op dit punt nog te controleren;
- 5 het waterscherm wordt in WANDA-LOCKS anders behandeld dan in de zeesluisformulering; dit nader uit te zoeken;
- 6 hetzelfde geldt voor de behandeling van het spoeldebiet; ook dit nader uit te zoeken.

De berekeningen en analyses voor een situatie met een realistische, variabele operatie (Hoofdstuk 5) bevestigen dat een berekening op basis van de gemiddelde deur-opentijd (een kalibratiefactor gelijk aan 1) een overschatting geeft van het zouttransport. Uit de nu uitgevoerde berekeningen voor de Noordersluis IJmuiden blijkt de te hanteren kalibratie-factor ca. 0,6 te bedragen. Het meenemen van meer details van de variatie in de operatie, bijvoorbeeld het verschil tussen de operatie 's nachts en overdag, zou moeten leiden tot een kalibratiefactor dicht bij de 1.

Een sterke asymmetrie in de operatie heeft ook een grote invloed op de zoutindringing. Als deze asymmetrie niet aan de berekeningen wordt meegegeven middels de waarde van parameter  $C_{M/Gem}$  dan moet een kleinere kalibratiefactor worden gehanteerd.

Verder is duidelijk geworden dat de kalibratiefactor samenhangt met de bezetting van de sluis: hoe meer volcontinu de sluis bezet is, hoe dichterbij de kalibratiefactor bij 1 zou moeten liggen.



Op basis van deze overwegingen is op dit moment het volgende te zeggen over de manieren om te komen tot een keuze van een kalibratie-factor.

- 1 De eerste route, tevens de meest nauwkeurige manier, is een bepaling door middel van kalibratie van de zeesluisformulering tegen een berekening met WANDA-Locks; daarvoor zijn dan wel gedetailleerde data (geregistreerd of uit simulatie) van de schutoperatie nodig.
- 2 De tweede route is het berekenen van de kalibratiefactor op basis een gekozen waarde voor de representatieve deur-opentijd. De kalibratiefactor is dan (vanuit de definitie daarvan) gelijk aan de representatieve deur-opentijd gedeeld door de gemiddelde deur-opentijd (die volgt uit het aantal cycli per etmaal en de tijd voor nivelleren en voor het openen/sluiten van de deuren).

Via de tweede route moet er dus een representatieve waarde worden bepaald van de deur-opentijd. Daarvoor zijn een tweetal benaderingen mogelijk:

- op basis van de ervaring van de sluismeesters: dit dan specifiek te maken voor dag/nacht, week/weekend en per sluishoofd, waarbij ook de variatie in schutfrequentie en schutrichting beschouwd en benoemd moet worden;
- op basis van een registratie van de deur-bewegingen. Hoe daarbij van een registratie te komen tot een representatieve waarde zou nader uitgewerkt kunnen worden: een eerste stap daarin zou zijn het maken van een histogram van de optredende deur-opentijden.

Voor het vervolg op dit onderzoek komend jaar kunnen de volgende werkzaamheden worden overwogen:

- een verdere analyse voor de Noordersluis IJmuiden; daarbij kan gedacht worden aan het beschouwen van:
  - een groter aantal dagen uit 2005,
  - een analyse van de deur-opentijden middels een histogram; is hieruit een representatieve deur-opentijd te schatten,
  - het verschil in bezetting 's nachts en overdag, hoe dit in de operationele parameters verwerkt kan worden, en wat dat betekent voor de kalibratie-factor,
  - het al of niet meenemen van parameter  $C_{M/Gem}$  (een waarde ongelijk aan 1): wat betekent dat voor de te hanteren kalibratie-factor,
- een uitvoeren van een vergelijkbare analyse voor de Krammersluizen (ook daarvoor zijn simulaties beschikbaar van de verkeersafwikkeling).

Daarnaast kunnen stappen gezet worden naar een operationele inzetbaarheid van de stand-alone versie bij toepassing in een Beslissings Ondersteunend Systeem (BOS), en/of kunnen stappen gezet worden richting de implementatie van deze code in D-Flow FM.

## 7 Referenties

- [1] "Zoutindringing door schutsluizen, overzicht projecten en aanzet formulering t.b.v. netwerkmodellen, Kennisprogramma Natte Kunstwerken 2017", Otto Weiler, 11200741-003, Deltares, juni 2018
- [2] "Kennisprogramma Natte Kunstwerken, Kennisplan 2018", Definitief, 20 maart 2018
- [3] "Voorstudie : ontwerpstudie en praktijkproef zoutlekbeperving Volkeraksluizen : model voor zoutvrachtberekeningen", R.E. Uittenbogaard, 1201226-011, Deltares, juni 2010
- [4] "Validatierapport WANDA-Locks, het nieuwe zoutlekmiddel", Ida de Groot-Wallast, Tjerk Vreeken, 1209463, Deltares, januari 2016
- [5] "The Practical Salinity Scale 1978 and the International Equation of State of Seawater 1980", Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards, UNESCO, 1981
- [6] <https://www.python.org/>
- [7] "Pilot Krammerjachtensluis, Meet- en monitoringprogramma", P.P.D. van der Ven, 1207406-004, Deltares, januari 2015
- [8] "Simulatiestudie Capaciteit Zeetoegang Amsterdam-Noordzeekanaalgebied, Modelbeschrijving en resultaten", ir. R. Groenveld, PMSS, januari 2008
- [9] "Wijzigingen simulatiemodel voor Planstudie; Modelwijzigingen en simulatieresultaten voor validatie". ir. R. Groenveld, PMSS, april 2009.
- [10] "Berekening zoutindringing IJmuiden met WANDA-Locks", Matthijs Rietveld, 1220309, Deltares, oktober 2016, Opgenomen in [11] als Bijlage K
- [11] "Selectieve Onttrekking IJmuiden, Fase 1 - Studie naar hydraulische eisen en verificatie"; Arnout Bijlsma, Otto Weiler, 11200215-000, Deltares, september 2017



## **A Plan van Aanpak 2018**



## Memo

**Aan**  
Roel Burgers, RWS-WVL

**Datum**  
6 april 2018

**Aantal pagina's**  
8

**Van**  
Otto Weiler

**Doorkiesnummer**  
+31(0)88 335 8358

**E-mail**  
Otto.Weiler@deltares.nl

**Onderwerp**  
Zoutindringing spui- en schutsluizen - Plan van Aanpak - KpNK 2018

---

## Inleiding

Zoutindringing door spui- en schutsluizen is een probleem dat zich afspeelt in interactie tussen het kunstwerk en het watersysteem: de zoutindringing speelt zich af ter plaatse van het kunstwerk, maar het is pas een probleem als het verder bovenstrooms, in het watersysteem, leidt tot ongewenste zoutgehaltenes. Daarmee maakt dit onderwerp deel uit van een van de drie hoofdonderwerpen in het Kennisprogramma Natte Kunstwerken [1], namelijk de relatie object - systeem. Deze relatie betreft de vragen en eisen die het watersysteem stelt aan een kunstwerk (in dit geval het beperken van de zoutindringing) en de mate waarin het kunstwerk aan die vragen en eisen tegemoet kan komen, waarmee het kunstwerk (mede) het functioneren (in dit geval: het zoutgehalte) van het watersysteem bepaalt.

De zoutindringing speelt een rol bij het beoordelen van de functionele levensduur van kunstwerken tussen zout- en zoetwater en eveneens bij het beoordelen van varianten voor een aanpassing, vervanging of renovatie van dergelijke kunstwerk. En net als voor andere functies van kunstwerken, geldt ook voor de zoutindringing dat, om het functioneren van een kunstwerk in het watersysteem te onderzoeken, het uiteraard noodzakelijk is dat het kunstwerk goed beschreven kan worden in een rekenmodel voor het watersysteem.

In de afgelopen jaren is in een aantal grote projecten van RWS veel werk gedaan om het proces van zoutindringing door schutsluizen te kunnen berekenen. Daarvoor is o.a. het zoutlekmodel ontwikkeld, later ingebracht in WANDA-Locks. Voor de verbinding hiervan met modellen voor het watersysteem zijn in verschillende projecten verschillende aanpakken ontwikkeld en met wisselend succes toegepast. Het werken met deze gekoppelde modellen was in het algemeen complex en (zeer) rekenintensief. Ook vraagt deze aanpak om zeer gedetailleerde invoer omtrent de schutoperatie: informatie die er vaak niet is. De projecten zijn verzameld en beschreven in het rapport van afgelopen jaar [2].

Omdat de koppelingen zo complex en rekenintensief zijn is er vorig jaar een verkenning gedaan naar de mogelijkheden voor een compacte beschrijving van het transport van water en zout door een schutsluis, zoals bepaald door de geometrie, de condities aan weerskanten van een sluis en de essentiële kenmerken van de schutoperatie. Op basis van de uitkomsten van die verkenning is een begin gemaakt met het opstellen van deze formulering, die als werktitel 'zeesluisformulering' heeft gekregen. Deze formulering moet uiteindelijk ingebouwd kunnen worden in D-Flow, op een vergelijkbare manier als andere kunstwerken in D-Flow beschikbaar (zullen) zijn [2], [3].

In het laatste hoofdstuk van het rapport van vorig jaar [2] is een aantal aandachtspunten verzameld en is een aanzet gedaan voor het Plan van Aanpak voor 2018. Dat Plan van Aanpak is in dit document concreet gemaakt en, in overleg met betrokkenen van RWS en het Programmateam van het Kennisprogramma, voorzien van een raming en een planning.

Dit jaar zal een groot deel van de inspanning gericht zijn op het bouwen een eerste versie van een routine die kan rekenen met de formulering, en het testen ervan. Daarnaast is het streven een begin te maken met dezelfde problematiek voor Spuisluizen.

## Probleem

Zoals beschreven in [2] is het, voor gebieden waar zoutindringing door spui- en schutsluizen een rol speelt, tot op heden eigenlijk niet mogelijk om, binnen redelijke rekentijden, berekeningen te doen over een groter gebied en over langere tijd waarin b.v. klimaatscenario's of de inzet van maatregelen (waaronder aanpassing of vervanging van kunstwerken) worden onderzocht. Het is echter wel wenselijk om dergelijke berekeningen te kunnen doen, bijvoorbeeld: door klimaatverandering (langere perioden van droogte en lage rivierafvoer) kan een kunstwerk het einde van de functionele levensduur bereiken en wordt vervanging of renovatie ervan noodzakelijk.

Om dit mogelijk te maken is het wenselijk om spui- en schutsluizen tussen zout- en zoetwater als kunstwerk in een netwerkmodel te kunnen beschrijven, zodanig dat een goede berekening kan worden gemaakt van de transporten van water en zout door deze kunstwerken. De verspreiding van het zout in het watersysteem moet dan door het netwerkmodel worden verzorgd.

De essentiële uitdaging voor schutsluizen is hierbij om de schutoperatie te beschrijven in enkele kenmerkende grootheden, zodanig dat de zoutindringing die wordt berekend goed overeenkomt met de zoutindringing zoals die volgt uit de werkelijke operatie, die wordt gekenmerkt door een grote variabiliteit van de schutfrequentie en deur-opentijden. Zoals is aangetoond in [2] spelen beide parameters en hun variabiliteit een zeer grote rol in de grootte van de zoutindringing.

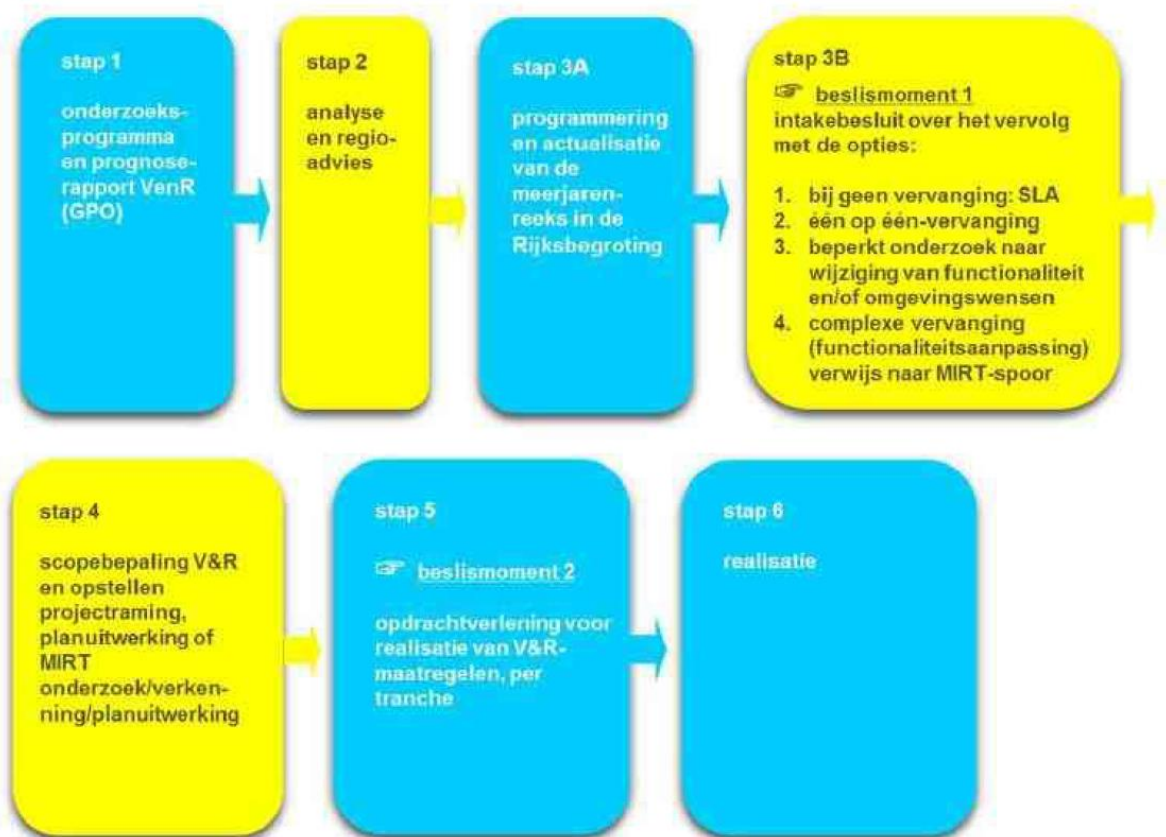
## Ambitie

Het einddoel voor de zeeluisformulering, wat betreft de ontwikkeling en implementatie ervan en het gebruik ervan in modelschematisaties, zou als volgt omschreven kunnen worden:

- 1 de zeeluisformulering is opgenomen in D-Flow FM,
- 2 waarbij er goede schematisaties zijn van de relevante sluiscomplexen in het Nederlandse Hoofdwatersysteem,
  - danwel: gegevens om die schematisaties te maken,
- 3 inclusief de juiste operationele parameters,
  - danwel: toegang tot de informatie om die parameters uit af te leiden en een voorschrift voor een werkwijze,
- 4 en specifiek de juiste verhouding (kalibratiefactor) tussen de gemiddelde deur-opentijden en de representatieve deur-opentijden,
  - danwel: een werkwijze om die te bepalen.

Voor spuisluizen op de grens van zout- en zoetwater geldt, mutatis mutandis, hetzelfde als hierboven beschreven in punten 1, 2 en 3.

Deze ontwikkeling zal het (uiteindelijk) mogelijk maken om de interactie tussen het watersysteem en de kunstwerken op de grens van zout- en zoetwater te onderzoeken, en dat is noodzakelijk bij het beantwoorden van vragen omtrent het einde van de functionele levensduur en het beschouwen van varianten voor vervanging en renovatie van kunstwerken. Daarmee draagt deze ontwikkeling bij aan een gestructureerde aanpak in Stap 2 van de vernieuwde werkwijze van het Programma Vervanging en Renovatie van Rijkswaterstaat: analyse en regio-advies (zie de figuur hieronder).



Figuur 2: Vernieuwde werkwijze van het Programma Vervanging en Renovatie van Rijkswaterstaat, Figuur 1 uit [1]

## Doelstelling

De ambitie zoals hierboven beschreven zal waarschijnlijk niet binnen het Kennisprogramma kunnen worden gerealiseerd. Voor het Kennisprogramma luidt de doelstelling voor schutsluizen daarom:

- 1 de zeesluisformulering is opgenomen in D-Flow FM (evt. in een onderzoeksversie),



Datum  
6 april 2018

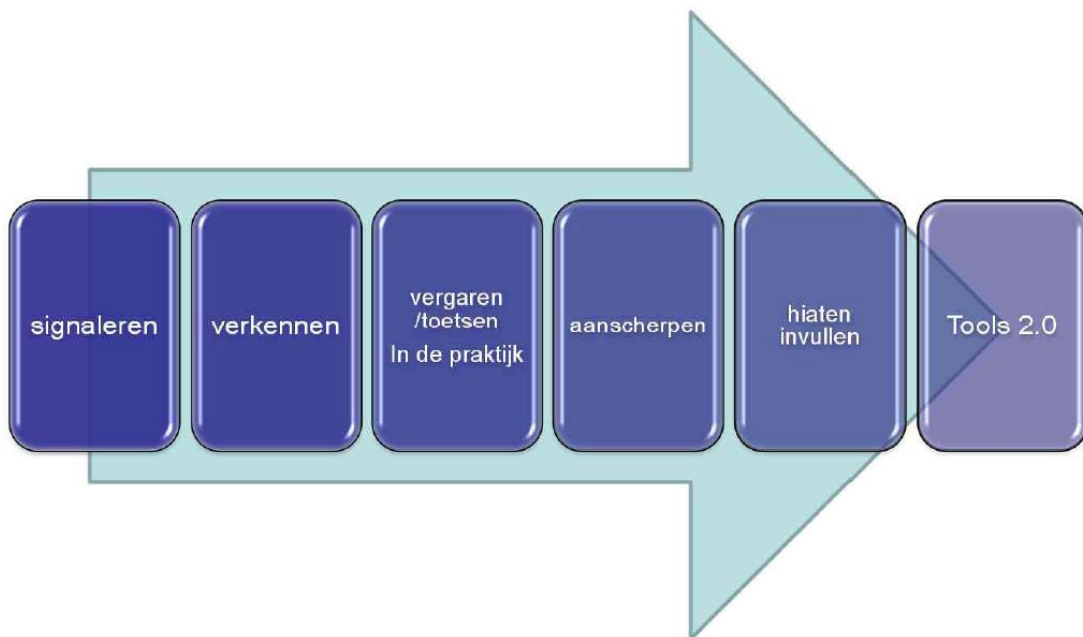
Pagina  
4/8

- 2 waarbij bekend is hoe een goede schematisatie van een sluiscomplex moet worden opgezet,
- 3 inclusief de manier waarop uit beschikbare informatie (bij RWS) de juiste operationele parameters moeten worden bepaald,
- 4 en waarbij voor een paar typische sluisen de juiste verhouding (kalibratiefactor) tussen de *gemiddelde* - en de *representatieve* deur-opeentijden is bepaald.

Wederom geldt voor spuisluizen op de grens van zout- en zoetwater geldt, mutatis mutandis, hetzelfde als hierboven beschreven in punten 1, 2 en 3.

Daarbij is van punt 1 nog onzeker hoe ver dat gereed kan zijn, o.a. vanwege de afhankelijkheid van de ontwikkelingen rondom het beschrijven van kunstwerken in D-Flow FM. Om de andere elementen niet afhankelijk te maken van die onzekerheid is het verstandig om, zoals al eerder beschreven, eerst een werkende versie van de formulering beschikbaar te maken: een stand-alone versie, eventueel met een beperkte functionaliteit. Alternatief kan gekozen worden voor een voorlopige versie in SOBEK (D-Flow 1D), als dat qua kosten de meest effectieve benadering zou zijn. Deze keuze is de eerste stap in de activiteiten van komend jaar.

Voor de formulering voor de zoutindringing door schutsluizen zouden de werkzaamheden van vorig jaar gekenmerkt kunnen worden als 'signaleren' en 'verkennen', zoals weergegeven in onderstaande figuur, overgenomen uit Paragraaf 2.1 van [1]. De werkzaamheden voor komend jaar zijn te typeren als 'verkennen' en 'toetsen'. Wat betreft de spuisluizen zijn de werkzaamheden voor komend jaar te typeren als 'verkennen'.



Figuur 3: Fasen van kennisontwikkeling, uit [1]

## Aanpak Schutsluizen

Voor 2018 worden de volgende activiteiten voorzien.

- 1 Keuze voor ontwikkeling met een stand-alone versie danwel een voorlopige versie binnen SOBEK (D-Flow 1D); keuze te maken op basis van het rapport over 2017 en a.d.h.v. criteria zoals:
  - welke gebruiksdoelen zijn er voor een stand-alone versie (voor onderstaande stappen in de ontwikkeling van de formulering, maar ook voor toepassing in IWP-systemen, waaronder IJmuiden, Krammer en Kanaal Gent-Terneuzen);
  - welke eisen en wensen zijn er aan in- en uitvoer voor die toepassingen;
  - welke eisen worden er gesteld aan rekentijd;
  - keuze voor de functionaliteit: volledige functionaliteit (b.v. incl. drempels, waterverplaatsing van schepen, spoeldebiet etc.) of alleen een (te definiëren) basis-functionaliteit;
- N.B.: Deze keuze is inmiddels gemaakt: er zal gewerkt worden aan een stand-alone versie. De overwegingen zullen nader worden beschreven in de rapportage. Het nu bouwen van een stand-alone versie betekent dat deze formulering t.z.t. in D-Flow zal moeten worden geïmplementeerd.
- 2 Delen uit rapportage 2017 samenvoegen/aanvullen tot implementatie-document, met daarin:
  - beschrijving processen (achtergrond);
  - beschrijving formules (bijlage D);
  - beschrijving numerieke aanpak;
  - definiëren inputs, incl. format:
    - geometrie (constant);
    - zoutlekbeperkende maatregelen (constant of gestuurd);
    - randvoorwaarden (tijdafhankelijk);
    - operatie (tijdafhankelijk);
  - definiëren outputs incl. format:
    - debieten en zoutgehalten;
    - massaflux zout;
- 3 Implementatie:
  - stand-alone versie;
- 4 controle op interne consistentie van resultaten (bij constante operatie):
  - lijst met test-cases opstellen;
    - systematische verandering van allerlei parameters,
    - o.a. zonder of met getij aan zoute kant;
  - uitvoeren, analyse, rapportage
- 5 Constante operatie: vergelijking resultaten met WANDA-Locks:
  - lijst met test-cases opstellen:
    - cases oplopend in complexiteit;
  - uitvoeren, analyse, rapportage
- 6 Variabele operatie: bepaling kalibratiefactor op deur-opentijden:
  - selectie uit beschikbare dataset (waarschijnlijk IJmuiden);
  - evt. aanpassingen aan opzet/input/cases WANDA-Locks;

- berekeningen met WANDA-Locks (variabele operatie);
- analyse tijdreeksen operatie naar invoer voor zeesluisformulering:
  - verloop schutfrequentie over dag en week, per richting
  - verloop gemiddelde deur-opentijden over dag en week, per richting
- berekeningen met zeesluisformulering; vergelijking met WANDA-Locks; onderzoek invloed / gevoeligheid voor kalibratiefactor

Afhankelijk van de voortgang in relatie tot het beschikbare budget zullen, gaandeweg, keuzes gemaakt worden omtrent een meer of minder complete functionaliteit van de software en in, samenhang daarmee, de uitgebreidheid van de test-cases en analyses.

- 7 Over het geheel van taken 1 t/m 6 hierboven, ontwikkeling en kalibratie, zal een rapport worden geschreven.

Voor een volgend jaar of bij aanvulling van het budget lopende het jaar, zou ook een begin te maken zijn met het in kaart brengen van bronnen van informatie voor het schematiseren van de sluisen en de operatie. Daarbij zou er ook aandacht moeten zijn voor de relatie tussen ladingstroom en schutoperatie: dit omdat scenario's (toekomstbeelden) zich i.h.a. wel uitspreken over de ontwikkeling van ladingstromen, maar dat daarmee nog niet duidelijk is wat dit betekent voor de schutoperatie.

- 8 Indentificeren van informatiebronnen voor schematisatie sluisen en operatie:
- afmetingen:
    - let op verschil tussen hydraulische lengte en lengte tussen de stopstrepen c.q. max. scheepslengte;
    - idem voor de breedte: de (gemiddelde) breedte van de kolk, de breedte in het sluishoofd en de maximale scheepsbreedte;
    - dieptes van de drempels, de kolk en de beide voorhavens;
    - tijd voor nivelleren (gemiddeld of verval-afhankelijk) en tijd voor openen/sluiten van de deuren;
  - registraties van schutoperatie:
    - aantallen en typen/afmetingen schepen: IVS90 (Informatie- en Volgstelsel voor de Scheepvaart)
    - aantal schuttingen: nu via NIS (Netwerkmanagement Informatie Systeem), in de toekomst mogelijk ook beschikbaar via ODS (Object Data Services, project van RWS-CIV, Therry van der Burgt)
    - deur-opentijden: nu niet beschikbaar, af te leiden uit aantal schuttingen, in de toekomst mogelijk beschikbaar via ODS
  - Verkenning relaties ladingstroom - schutoperatie:
    - literatuur, deskundigen (RWS, Deltares, MARIN), software (BIVAS).

## Verkenning inzake spuisluisen

Naast de ontwikkeling van een formulering voor de zoutindringing door schutsluisen, bestaat ook behoefte aan een ontwikkeling van vergelijkbare formulering voor de zoutindringing door spuisluisen: ook hierbij is de behoefte te komen tot een formulering die opgenomen kan worden in een netwerkmodel.

In het laatste hoofdstuk van het rapport over 2017 zijn al een aantal overwegingen beschreven. Als eerste stap naar de ontwikkeling ervan zou dit kunnen worden aangevuld met een verkenning naar de aard van de formulering, de daarvoor benodigde informatie (voor de schematisatie van de geometrie en van de operatie) en een verkenning van wat er van een dergelijke formulering verwacht mag worden, afhankelijk van de aard van het gebiedsmodel (1D, 2D of 3D, resolutie, tijdstap etc.).

## Producten

De producten van 2018 betreffende schutsluizen zullen (naar verwachting) bestaan uit:

- een implementatie-document,
- een stand-alone versie van de routine,
- een rapport met de resultaten van de testen en het bepalen van de kalibratiefactor tussen gemiddelde en representatieve deur-opentijden.

Voor spuisluizen zal er dit jaar als product opgeleverd worden:

- een memo met een verkenning van een formulering inz. spuisluizen.

## Planning

Onderstaande raming is gebaseerd op de inmiddels gemaakte keuze voor een stand-alone versie van de routine.

maand	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Verkenning, PvA												
Toekenning budget												
1. Keuze stand-alone vs SOBEK												
2. Implementatie-document												
3. Implementatie												
4. Controle interne consistentie												
5. Constantie operatie: vgl. met WANDA-Locks												
6. Variabele operatie: kalibratiefactor												
7. Rapportage ontwikkeling en kalibratie												
8. Informatiebronnen schem. en operatie (p.m.)												
9. Verkenning spuisluizen												

## Organisatie

Aan de kant van RWS wordt het project aangestuurd door Roel Burgers (WVL). Verder wordt bijgedragen door Yann Friocourt (WVL) en Herbert Berger (WVL). Aan de kant van Deltares wordt het project geleid door Otto Weiler.

Om sturing te houden op de voortgang en de resultaten zal er ca. 4x overleg plaatsvinden tussen RWS en Deltares. Tussendoor wordt de voortgang bilateraal besproken.

## Budget

Op basis van de beschrijvingen hierboven is onderstaande raming opgezet. Deze raming sluit op een bedrag van EUR 57.200,- excl. BTW, in overeenstemming met het Kennisplan 2018 [1].

Omschrijving	Budget € excl. BTW	Budget € incl. BTW
Verkennd overleg t/m Plan van Aanpak	2.500	
Voortgangsoverleg	4.000	
1. Keuze: stand-alone vs. prototype in SOBEK	1.500	
2. Implementatie-document	p.m.	
3. Implementatie	18.000	
4. Controle interne consistentie	4.000	
5. Constante operatie: vgl. met WANDA-Locks	5.000	
6. Variabele operatie: kalibratiefactor	8.000	
7. Rapportage ontwikkeling en kalibratie	5.500	
8. Informatiebronnen schematisatie en operatie (p.m.)	-	
9. Verkenning spuisluizen	5.000	
Management en onvoorzien	3.700	
Totaal excl. BTW / incl. BTW	57.200	69.212

## Referenties

- [1] “Kennisprogramma Natte Kunstwerken, Kennisplan 2018”, Definitief, 20 maart 2018
- [2] “Zoutindringing door schutsluizen: overzicht projecten en aanzet formulering t.b.v. netwerkmodellen, Kennisprogramma Natte Kunstwerken 2017”, Otto Weiler, 11200741.003, Deltares (in voorbereiding)
- [3] “Kunstwerken in Netwerkmodellen - Plan van Aanpak - KpNK 2018”, Otto Weiler, memo, Deltares, april 2018

## **B Implementatiedocument**



# Memo

**Aan**  
RWS-WVL

<b>Datum</b> 6 augustus 2018	<b>Kenmerk</b> 11200741-000-HYE-0004	<b>Aantal pagina's</b> 34
<b>Van</b> Otto Weiler	<b>Doorkiesnummer</b> +31(0)88 335 8358	<b>E-mail</b> Otto.Weiler@deltares.nl

**Onderwerp**  
Zeesluisformulering, implementatie document

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0	1-jun-'18	Otto Weiler		Tom O'Mahoney		Baas van Vossen	
1	03-aug-'18						

benadering voor  $\bar{\rho}$ ,  $T_{\text{Bedrijf}}$  is constant, berekening  $Z_{\text{fractie}}$  en  $T_{LE,MZ}$  voor uitvoer.

## 1 Inleiding

### 1.1 Behoeftte en doelstelling

Bij Rijkswaterstaat (en andere partijen) bestaat de behoefte berekeningen te kunnen doen omtrent de invloed van zoutindringing door een schutsluis op het zoutgehalte op het binnenwater op enige afstand van de sluis. Dergelijke berekeningen zouden daarbij een lange periode en een groot gebied moeten beslaan. In die berekeningen moeten bovendien verschillende scenario's kunnen worden beschouwd (economische- en klimaatscenario's) en moeten maatregelen kunnen worden geëvalueerd, waaronder maatregelen op de sluis. Om deze redenen is er behoefte aan een compacte formulering van de processen op de sluis, zodat deze in de modelschematisatie van het beschouwde gebied kunnen worden ingebracht op een manier die vergelijkbaar is met de manier waarop andere kunstwerken in dergelijke schematisaties worden beschreven. Ook moet het daarbij mogelijk zijn om te rekenen met een relatief grote tijdstap, bij voorbeeld 10 - 30 minuten.

Een dergelijke formulering zou ook dienst kunnen doen om, los van een gebiedsmodel, het transport van water en zout door een sluis te kunnen berekenen. Dit kan van grote waarde zijn bij het beheer van een watersysteem op zoutgehalte. Hiervoor kan een stand-alone versie worden gebouwd.

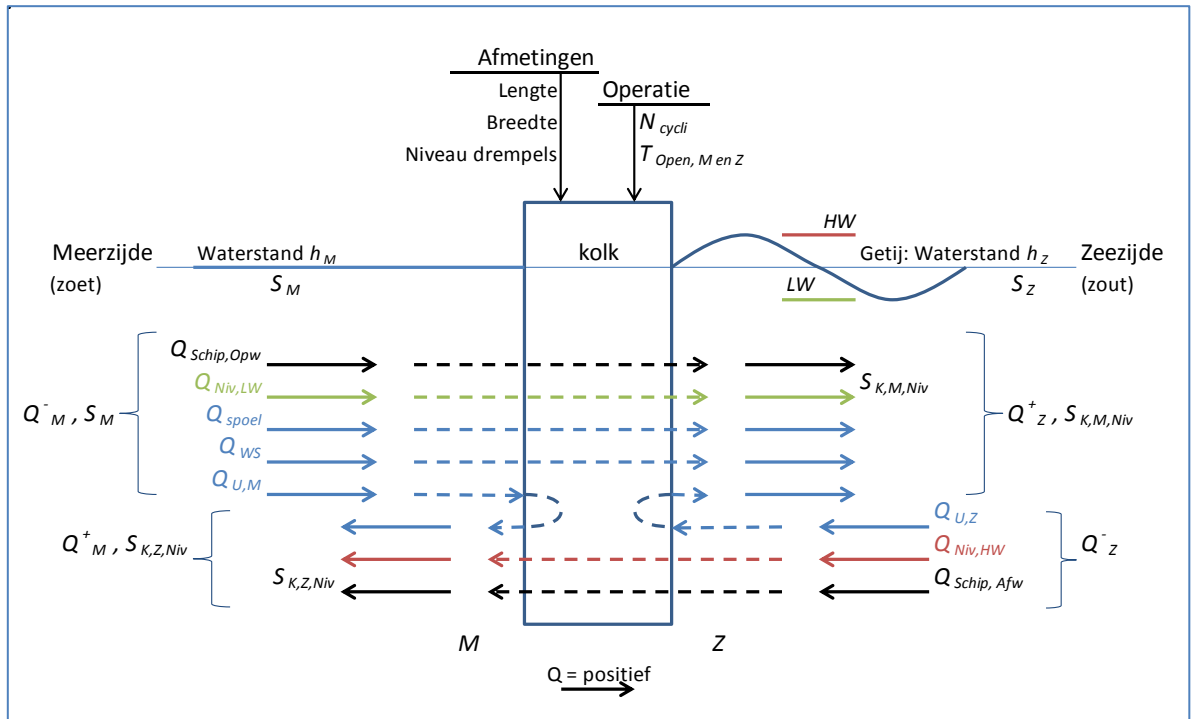
Als fundament voor deze zeesluisformulering beschrijft dit document de afleiding van een set van vergelijkingen die tezamen een complete beschrijving geven van de transporten die optreden door de operatie van een schutsluis. In het bijzonder betreft dit het proces van zoutindringing door een sluis tussen zout- en zoetwater, maar ook het 'gewone' schutdebiet wordt in het stelsel van vergelijkingen beschreven.



## 1.2 Aanpak en modelconcept

De gekozen aanpak behelst het opstellen van vergelijkingen voor alle hoeveelheden water die aan weerskanten de kolk in- en uitstromen, voor alle fases van de schutcyclus. (Dit betreft de volumes ten gevolge van nivelleren, kolkuitwisseling, scheepvaart en de spui- en spoeldebieten door de kolk.) Door voor elk sluishoofd per richting (in of uit) de volumes bij elkaar op te tellen worden de totale volumes gevonden per schutcyclus, met de bijbehorende saliniteiten. Door deze volumes vervolgens te delen door de tijdsduur van een complete schutcyclus worden 'cyclus-gemiddelde debieten' bepaald, elk met een bijbehorende saliniteit. Deze debieten vormen de relatie tussen de schutsluis en de omgeving, zoals te beschrijven met een modelschematisatie van het beschouwde gebied.

Vooruitlopend op de behandeling van de verschillende grootheden, is in onderstaande figuur het modelconcept weergegeven. De randvoorwaarden bestaan uit de waterstanden en saliniteiten aan weerskanten van de sluis. Op basis van deze randvoorwaarden, de geometrie van de sluis en de operatie worden debieten bepaald die de sluis ingaan met de lokale saliniteit, en ook debieten die de sluis uitkomen met een saliniteit die in de sluiskolk ontstaat als gevolg van het schutproces. ( $S_{K,Z,Niv}$  is de saliniteit in de Kolk, nadat de sluis heeft opengestaan aan de Meerzijde en na het Nivelleren van de sluis naar de andere kant; equivalent voor  $S_{K,M,Niv}$ ). De debieten die de kolk instromen zijn een onttrekking aan het gebied aan weerskanten van de sluis,  $Q_M^-$  en  $Q_Z^-$ , en de debieten die uit de kolk komen zijn lozingen naar dat gebied,  $Q_M^+$  en  $Q_Z^+$ .



Figuur 1.1 Schematische weergave van het modelconcept: de debieten die aan weerskanten de sluis in- en uitstromen, met bijbehorende saliniteiten

## 1.3 Opbouw van dit document

Als eerste stap in het opstellen van de formulering worden (Hoofdstuk 2) alle relevante aspecten geïntroduceerd die onderdeel uitmaken van de processen die beschreven moeten worden in de op te stellen vergelijkingen. Het gaat daarbij om een korte beschrijving van de essentiële processen (waaronder kolk-uitwisseling), om de verschillende grootheden die een rol spelen (en dus zullen voorkomen in de vergelijkingen), en om de berekening van bepaalde volumes die de sluis in- en uitstromen.

Op basis hiervan worden de vergelijkingen per schutfase opgesteld (Hoofdstuk 0), die vervolgens worden opgeteld tot de totale transporten per sluishoofd voor een complete schutcyclus (Hoofdstuk 4). Deze totale transporten vormen de basis voor de cyclus-gemiddelde debieten (lozingen en onttrekkingen).

Hoofdstukken 0 en 4 bevatten samen een beschrijving van de transporten en hoe de saliniteit in de kolk zich ontwikkelt van fase naar fase. Op basis van deze beschrijving, een verzameling vergelijkingen, moeten dan de onbekenden worden bepaald. In Hoofdstuk 5 worden hiervoor twee mogelijkheden gepresenteerd. De eerste mogelijkheid is een iteratieve aanpak, waarin de schutcyclus een aantal malen wordt doorgerekend tot er een evenwicht is ontstaan en de uitkomsten niet meer veranderen. De tweede aanpak is het opstellen van een stelsel van vergelijkingen, in dit geval acht vergelijkingen met acht onbekenden. (Een oplosmethode voor dit stelsel, inclusief niet-lineaire vergelijkingen, wordt niet uitgewerkt.)

De vergelijkingen voor de kolkuitwisseling zijn opgesteld voor een situatie zonder niveauverschillen in de bodem en zonder drempels in de sluishoofden. De invloed daarvan op de kolk-uitwisseling wordt uitgewerkt in Hoofdstuk 6.

Tenslotte zijn in Hoofdstuk 7 een aantal aspecten verzameld die in een later stadium misschien nadere aandacht behoeven.

## 2 Processen en definities

Om vergelijkingen op te kunnen stellen, is het nodig de verschillende grootheden te definiëren. En een begrip van de relevante grootheden kan alleen bestaan op basis van enig inzicht in de relevante processen. Vandaar dat in dit hoofdstuk eerst deze processen (kort) worden geïntroduceerd. Vervolgens worden de grootheden gedefinieerd waar in de volgende hoofdstukken mee wordt gewerkt. Dit betreft zowel 'primaire' als daarvan afgeleide grootheden.

### 2.1 Processen in de schutcyclus

#### 2.1.1 Nivelleren

Het schutten van schepen bestaat in essentie uit het overbruggen van een verschil in waterstand, door in een schutkolk, waar een schip tijdelijk is afgemeerd, de waterstand aan te passen van de ene naar de andere kant: het nivelleren. Het verhogen van de waterstand in de schutkolk wordt gedaan door water in te laten vanaf de hoge kant ('vullen'), het verlagen wordt gedaan door water uit te laten naar de lage kant ('ledigen').

#### 2.1.2 Kolkuitwisseling

Als er sprake is van een verschil in zoutgehalte, en daarmee een verschil in dichtheid tussen beide kanten van de sluis, zal bij het openen van de sluisdeuren aan een kant een dichtheidsgedreven stroming op gang komen: de kolkuitwisseling. Het zoutere zwaardere water zakt uit en vormt een 'zouttong' die onder het zoete water gaan lopen naar de zoete kant, terwijl tegelijkertijd het lichtere zoete water gaat opdrijven en over het zoutere water gaat stromen naar de zoute kant. Na reflectie van de zoute of zoete tong tegen de gesloten deuren aan het andere einde van de kolk gaat de uitwisseling door totdat praktisch het hele kolkvolume is uitgewisseld: het water in de kolk is vervangen door water zoals aanwezig buiten de sluis.

#### 2.1.3 Schutoperatie

De schutoperatie betreft de cyclus van het openen en sluiten van deuren aan een kant, het nivelleren naar de andere kant, het aan die kant openen en weer sluiten van deuren, en het weer nivelleren naar de andere kant. Als de deuren open gaan zullen eerst schepen de kolk uitvaren, daarna zullen schepen die op weg zijn in tegengestelde richting weer invaren, en daarna zullen de deuren zich weer sluiten. Het debiet door de sluis door het proces van nivelleren wordt bepaald door het oppervlak van de sluis kolk, het waterstandsverschil en het aantal schutcycli per eenheid van tijd. Voor de kolkuitwisseling is juist de tijdsduur dat de deuren open staan van belang: die tijdsduur bepaalt in welke mate de kolk geheel of maar gedeeltelijk kan uitwisselen.

#### 2.1.4 Scheepvaart

De aanwezigheid van schepen in de schutcyclus heeft op twee manieren invloed op de kolkuitwisseling.

- 1 Als een schip een sluis kolk in vaart wordt er water uit de kolk geduwd. De hoeveelheid water die de kolk uit stroomt is gelijk aan het volume van het schip, ook wel aangeduid

als de waterverplaatsing. Omgekeerd, als schepen de kolk uitvaren stroomt er water de sluis in om het 'gat' dat de schepen in kolk achterlaten, op te vullen met water uit de voorhaven.

- 2 Het omhoog nivelleren van een sluiskolk betekent dat er water binnenstroomt van de hoge kant. In het geval van een sluis tussen zout- en zoetwater zal dat water een ander saliniteit en dichtheid hebben dan het water in de kolk. Aan het eind van het nivelleren ontstaat er een andere gemiddelde saliniteit in de kolk. Bij het bepalen van die nieuwe gemiddelde saliniteit moeten we er rekening mee houden dat, als er schepen in de kolk aanwezig zijn, er dus minder water in de kolk zit.

De aanwezigheid van schepen in de kolk heeft geen invloed op het debiet door de sluis door nivelleren.

In de formulering voor de transporten door de sluis gaat het over het totale volume van de schepen per schutcyclus, apart te definiëren voor de beide vaarrichtingen: (stroom-)opwaarts en (stroom-)afwaarts. Merk op dat deze gemiddeld in de tijd niet aan elkaar gelijk hoeven te zijn: als via een bepaalde sluis meer lading wordt geïmporteerd dan geëxporteerd komt dat tot uitdrukking in de belading van schepen, en dus in de volumes van die schepen in de sluis. Daarmee kan dus ook een netto debiet van water ontstaan.

## 2.1.5 Maatregelen ter bestrijding van zoutindringing

Om de zoutindringing te beperken zijn er een aantal maatregelen beschikbaar.

### **Bellenschermen**

Bellenschermen aangebracht in de sluishoofden vertragen het proces van kolkuitwisseling gedurende de tijd dat de deuren open staan. Daarmee kan de zoutindringing effectief worden beperkt, maar deze beperking hangt ook af van de mate waarin de deur-opentijden beperkt worden gehouden.

### **Spoeldebiet**

Als de waterstand aan de zoute zijde lager is dan aan de zoete kant, kan de zoutindringing worden beperkt door, gedurende een zo groot mogelijk deel van de schutcyclus, de sluiskolk te spoelen met water afkomstig van de zoete kant. Als de sluiskolk open gaat naar de zoete kant zal het water in de kolk hierdoor minder zout bevatten, waardoor de kolk-uitwisseling langzamer loopt en minder zout transporteert. Ook wordt de kolkuitwisseling deels tegengehouden door het spoeldebiet. Het zelfde principe kan ook worden toegepast als de waterstand aan de zoute kant hoger is, maar dan zullen er pompen nodig zijn om een debiet van zoet naar zout te realiseren.

### **Waterscherm**

Een waterscherm is een maatregel om de effectiviteit van een bellenscherm verder te verhogen. Een waterscherm is met name effectief aan de zeezijde van de sluis, en wordt daarom eigenlijk alleen daar toegepast. Het waterscherm brengt zoetwater in aan de teen van het bellenscherm en verhindert daarmee dat zouter water zich door het bellenscherm heen kan verplaatsen naar de zoete kant, de kolk. Naast de effecten die samenhangen met het transport van zoetwater (vergelijkbaar met het spoeldebiet) wordt het effect van een waterscherm uitgedrukt in een verhoging van de effectiviteit van het bellenscherm.

## 2.2 Conventies

Voor de positieve richting voor de verplaatsing van water is gekozen voor de dominante stroomrichting in een rivier of delta: stroomafwaarts, richting de zee, en dus van zoet naar zout. Dit sluit aan op de conventie zoals vaak aangehouden in software en modelschematisaties. Door deze keuze is het proces van zoutindringing een transport van zout in de negatieve richting.

Deze conventie is ook aangehouden in de figuren in dit document: een positief debiet gaat van links naar rechts, de bovenstroomse kant is links getekend, de zeezijde rechts. Deze keuze, ontleent aan definities zoals gangbaar in modelschematisaties, wijkt af van wat tot op heden vaak is aangehouden, o.a. bij de ontwikkeling van WANDA-Locks. Daar is de zeezijde vaak links getekend, omdat op de kaart van Nederland (Noord boven) de zee aan de linkerkant is afgebeeld.

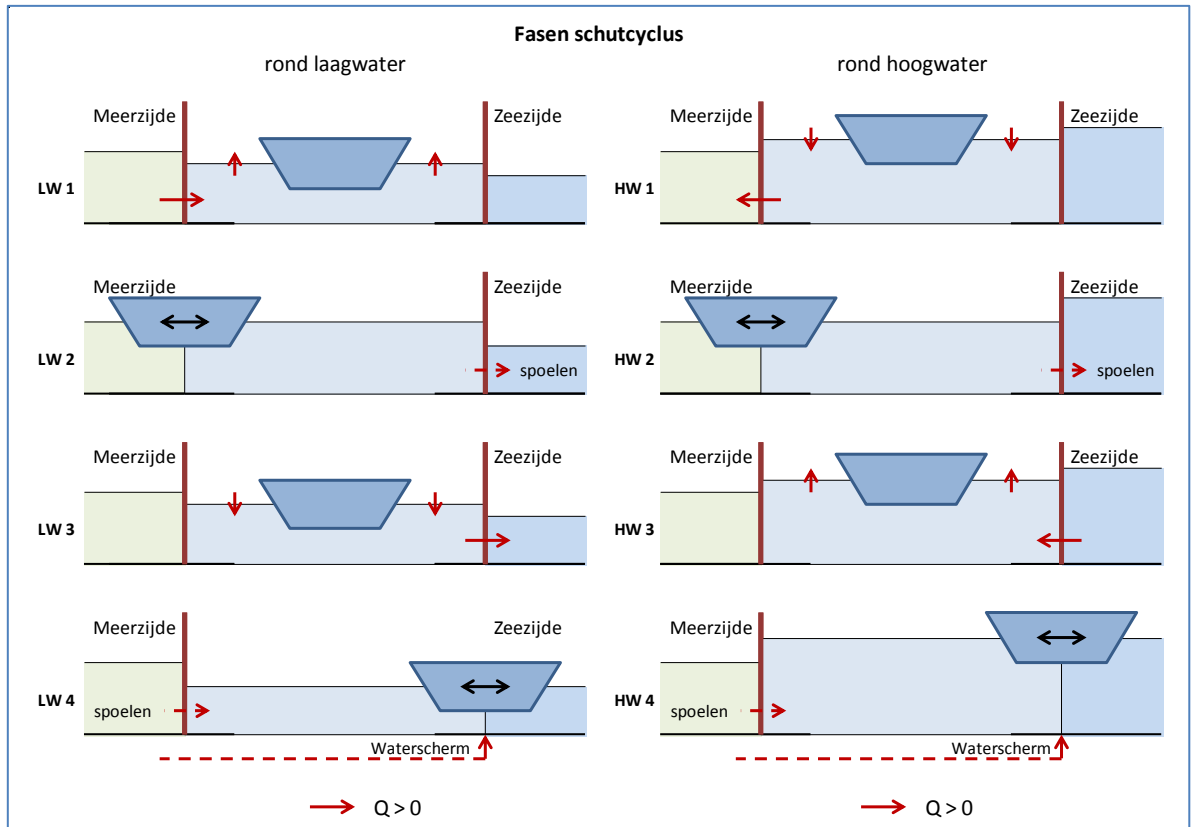
De beide zijden van de sluis zouden (logischerwijs) aan te duiden zijn als de zoute en de zoete zijde. Echter, omdat beide woorden met de letter 'Z' beginnen is dat niet handig. In aansluiting op eerdere studies, waarbij de zoete zijde een meer was, is gekozen voor de benaming 'Zeezijde' en 'Meerzijde'. Dit leidt in de te hanteren grootheden tot een suffix: *Z*, *M* of *K* voor Zeezijde, Meerzijde of Kolk.

## 2.3 Fasen van de schutcyclus

In de figuur hieronder worden de verschillende fasen van de schutcyclus weergegeven en benoemd. Omdat de richting van het nivelleren afhankelijk is van de richting van het verval zijn twee toestanden gedefinieerd, ontleend aan, maar niet gelijk aan, de fasen van het getij.

De waterstanden ( $h$ ) aan weerszijden van de sluis zijn gedefinieerd als  $h_M$  voor de waterstand aan de Meerzijde, en  $h_Z$  voor de waterstand aan de Zeezijde. Hieruit volgen de definities voor de twee situaties:

- als  $h_Z < h_M$  dan de toestand aan te duiden als LW,
- als  $h_Z \geq h_M$  dan de toestand aan te duiden als HW.



Figuur 2.1 De fasen van schutcyclus

In de figuur is de positieve richting aangegeven voor een debiet ( $Q$ ), maar zelfde tekenconventie geldt voor een getransporteerd volume ( $V$ ) en een getransporteerde massa zout ( $M$ ).

## 2.4 Grootheden

De transporten door een sluis worden bepaald door drie categorieën van grootheden: de condities (randvoorwaarden) aan weerskanten de sluis, de geometrie van de sluis en de operatie van de sluis. De berekende transporten worden uitgedrukt in een massa zout per schutcyclus, bepaald door verplaatste volumes met een saliniteit.

### 2.4.1 Condities, randvoorwaarden

De condities aan weerskanten van de sluis, de Meerzijde en de Zeezijde, bestaande uit een waterstand, een saliniteit en een dichtheid, vormen de randvoorwaarden van de berekening. In de stand-alone versie worden ze voorgeschreven door de gebruiker, ingebouwd in een gebiedsmodel worden deze parameters bepaald in dat gebiedsmodel, in de rekencellen grenzend aan de sluis. Ook in de sluis worden waterstanden en saliniteiten berekend.

- $h$ : waterstanden aan weerszijden van de sluis of in de kolk in [m NAP]  
suffix:  $M$ ,  $Z$  of  $K$  voor Meerzijde, Zeezijde of Kolk
- $S$ : saliniteit in [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  
suffix:  $M$ ,  $Z$  of  $K$  voor Meerzijde, Zeezijde of Kolk  
tweede suffix voor  $S_K$ :  
 $M$ : direct na sluiten deur aan Meerzijde,

Z: direct na sluiten deur aan Zeezijde  
derde suffix voor  $S_K$  of  $S_Z$ ;  
Niv : na nivelleren, dat volgt op sluiten deur aan de andere kant

$\bar{\rho}$  : de gemiddelde dichtheid van het water aan weerskanten van de sluis in  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ , deze waarden zijn i.h.a. beschikbaar in een netwerkmodel, of anders te berekenen o.b.v. saliniteit en temperatuur; als benadering voor  $\bar{\rho}$ , toe te passen in een stand-alone applicatie, wordt de volgende formule voorgesteld; deze volgt de benadering dat  $\Delta\rho \approx 0,8 \Delta S$ . Als we de (beperkte) invloed van de temperatuur op de dichtheid verwaarlozen volgt hieruit:

$$\bar{\rho} \approx 1000 + 0,8 \cdot \bar{S} = 1000 + 0,8 \cdot \left( \frac{S_M + S_Z}{2} \right) \quad (1)$$

## 2.4.2 Geometrie

$L_K$ : lengte van de kolk in [m]  
 $B_K$ : breedte van de kolk in [m]  
 $z_K$ : bodemligging van de kolk in [m NAP]

Hieruit volgen:

$H$ : waterstand boven de bodem van de sluis kolk, danwel in het sluishoofd in [m], waarbij de waterstand van een van beide kanten geldt:

$$\begin{aligned} H_M &= h_M - z_K \\ H_Z &= h_Z - z_K \end{aligned} \quad (2)$$

$V_K$ : volume van de kolk in  $[\text{m}^3]$ , bij een bepaalde waterstand in de kolk:

$$\begin{aligned} V_{K,M} &= L_K B_K H_M \\ V_{K,Z} &= L_K B_K H_Z \end{aligned} \quad (3)$$

Verschillen in bodemligging binnen en buiten de kolk en de aanwezigheid van drempels in de sluishoofden hebben invloed op de kolkuitwisseling. Voor de juiste berekening daarvan zijn dan extra parameters nodig, namelijk *effectieve* waarden van lengte, diepte en volume. Hier wordt verder op in gegaan in Hoofdstuk 7.

Als de ligging (diepte) van de bodem overal gelijk is en er geen sprake is van drempels in de sluishoofden geldt:

$$L_{K,eff} = L_K \quad (4)$$

en:

$$H_{M,eff} = H_M \quad \text{en} \quad H_{Z,eff} = H_Z \quad (5)$$

en:

$$V_{K,M,eff} = V_{K,M} \quad \text{en} \quad V_{K,Z,eff} = V_{K,Z} \quad (6)$$

### 2.4.3 Operatie

- $T_{\text{Bedrijf}}$ : het aantal uren per etmaal dat de sluis in bedrijf is [uur]; dit is een constante met als waarde 24 uur; een beschrijving van de uren dat de sluis buiten bedrijf is kan worden ingevoerd middels een variatie van de schutfrequentie gedurende de dag; zie Paragraaf 7.5;
- $N_{\text{Cycli}}$ : schutfrequentie: het aantal schutcycli (heen en weer) per etmaal [-]; default: 12
- $T_{\text{Deur}}$ : de tijd nodig voor het bewegen (openen of sluiten) van de sluisdeuren [min] default: 5 min
- $T_{\text{Niv}}$ : de gemiddelde tijd nodig voor het nivelleren van de sluiscolk [min] default: 5 min

Uit onderzoek is gebleken dat een variatie in het schutbedrijf over de tijd (uren van de dag, dagen van de week etc.) van significante invloed kan zijn op de zoutindringing. Om dit effect te beschrijven worden twee extra parameters geïntroduceerd:

- $c_{\text{Dot}}$ : een kalibratie-coëfficiënt: een factor op de deur-opentijd [-]; default: 1 (conservatief), range 0 - 1 (grenzen nader te verifiëren)
- $c_{M/Gem}$ : een symmetrie-coëfficiënt die aangeeft of de deuren aan beide kanten even lang open staan [-]; de definitie ligt besloten in vergelijking (10) hieronder; default: 1 (conservatief), range 0 - 2 (grenzen nader te verifiëren)

Hieruit volgen:

$T_{\text{Cyclus}}$ : de gemiddelde tijd voor een volledige schutcyclus [s]

$$T_{\text{Cyclus}} = \frac{T_{\text{Bedrijf}} \cdot 60 \cdot 60}{N_{\text{Cycli}}} \quad (7)$$

$T_{\text{Open, Gem}}$ : de gemiddelde deur-opentijd [s]

$$T_{\text{Open, Gem}} = \frac{1}{2} T_{\text{Cyclus}} - (T_{\text{Niv}} + \frac{2}{2} T_{\text{Deur}}) \cdot 60 \quad (8)$$

Merk op dat voor de berekening van de deur-opentijd twee maal de helft van de tijd voor het bewegen van de deur wordt afgetrokken. Hiermee wordt beschreven dat de kolk-uitwisseling loopt van halverwege de tijd voor het openen van de deur tot halverwege het sluiten van de deur.

$T_{\text{Open}}$ : de representatieve deur-opentijd [s]

$$T_{\text{Open}} = c_{\text{Dot}} T_{\text{Open, Gem}} \quad (9)$$

$T_{\text{Open, M}}$  en  $T_{\text{Open, Z}}$ : de (representatieve) deur-opentijd aan Meerzijde en Zeezijde [s]

$$\begin{aligned} T_{\text{Open, M}} &= c_{M/Gem} T_{\text{Open}} \\ T_{\text{Open, Z}} &= (2 - c_{M/Gem}) T_{\text{Open}} \end{aligned} \quad (10)$$

### 2.4.4 Transporten

- $M$ : hoeveelheid getransporteerd zout [kg] per schutfase; deze transporten te bepalen over beide sluishoofden; eerste suffix: Z, of M voor sluishoofd aan Zeezijde of Meerzijde



tweede suffix: *LW1 - HW4* : fase van de schutcyclus, vereenvoudigd tot 1 - 4 indien de formules voor beide getijfasen hetzelfde zijn

V : een volume water met zout dat zich verplaatst tussen kolk en voorhaven:  
suffixen:

*Niv* : door nivelleren,

gevolgd door *LW* of *HW*, bepaald door de richting van het verval over de sluis;

*U* : door uitwisseling a.g.v. dichtheidsstroming;

gevolgd door *Z* of *M* voor Zeezijde of Meerzijde

*Schip* : de totale waterverplaatsing van de schepen die meegaan in de schutcyclus,

*Opw* : voor scheepvaart in stroomopwaartse richting, naar meerzijde

*Afw* : voor scheepvaart in stroomafwaartse richting, naar zee

*Spoel* : door een Spoel- of spuidebiet door de kolk

gevolgd door *LW* of *HW*, bepaald door de richting van het verval over de sluis;

*Ws* : door het waterscherm

## 2.5 Berekening verplaatste volumes

### 2.5.1 Nivelleervolume

Het nivelleervolume speelt o.a. een rol bij het vullen van de sluis: daarbij verandert de saliniteit in de kolk. Bij het legen van de sluis (nivelleren naar een kant met een lagere waterstand) verandert de saliniteit in de kolk niet.

Omdat de relaties bij vullen en legen anders zijn worden de formules apart beschreven, per getijfase. Daarbij is het handig om aparte grootheden te hebben voor de beide getijfasen:

$$\text{LW: } V_{Niv,LW} = L_K B_K (h_M - h_Z) , V_{Niv,HW} = 0 \quad (11)$$

$$\text{HW: } V_{Niv,LW} = 0 , V_{Niv,HW} = L_K B_K (h_Z - h_M) \quad (12)$$

### 2.5.2 Kolkuitwisseling

De kolkuitwisseling is vaak het belangrijkste proces voor zoutindringing door schutsluizen. Het proces van kolkuitwisseling in de tijd laat zich beschrijven (benaderen) met een tangens hyperbolicus. Daarmee gaat de relatieve kolkuitwisseling,  $U (= V_U / V_K)$ , langzaam naar 1 als de deuren erg lang open blijven staan.

$$V_U = V_K U = V_K \tanh\left(\frac{T_{Open}}{T_{LE}}\right) \quad (13)$$

De deur-opentijd,  $T_{open}$ , wordt hierbij gerelateerd aan de (theoretische) waarde:  $T_{LE}$ : dit is de tijd die het zoute (of zoete) front nodig heeft om twee maal de lengte van de kolk af te leggen, om daarmee (bij ruwe benadering) een volledige kolkuitwisseling te bewerkstelligen.

De (initiële) snelheid van het front,  $c_i$ , wordt bepaald door het relatieve dichtheidsverschil  $\Delta\rho/\bar{\rho}$  en door  $H$ , de hoogte van de waterkolom in het sluishoofd.

$$c_i = \frac{1}{2}\sqrt{g'H} = \frac{1}{2}\sqrt{g\frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}}H} \approx \frac{1}{2}\sqrt{g\frac{0,8\Delta S}{\bar{\rho}}H} \quad (14)$$

Het verschil in dichtheid kan benaderd worden als 0,8 maal het verschil in saliniteit tussen kolk en voorhaven (waarbij de saliniteit in de kolk is bepaald door de voorgaande processen: het open staan naar de andere kant en door het nivelleren).

Strikt genomen zou voor  $\bar{\rho}$  een waarde moeten worden afgeleid van de zoutgehalten aan weerskanten van de sluisdeur. Echter, door een vaste waarde af te leiden uit de randvoorwaarden (het gemiddelde van de zoutgehalten aan weerszijden van de sluis) wordt slechts een zeer kleine fout geïntroduceerd.

Met deze snelheid van het front is  $T_{LE}$  gedefinieerd als:

$$T_{LE} = \frac{2L}{c_i} = \frac{4L}{\sqrt{g\frac{0,8\Delta S}{\bar{\rho}}H}} \quad (15)$$

De aanwezigheid van drempels en niveauverschillen in de bodem kan invloed hebben op de kolkuitwisseling. In zo'n geval worden aangepaste waarden voor de lengte en volume van de sluis en de diepte in het sluishoofd gebruikt.

### 2.5.3 Maatregelen ter beperking van de zoutindringing

#### **Bellenschermen**

De effectiviteit van een bellenscherm wordt uitgedrukt in een **doorlaatfractie**  $\eta$ . De doorlaatfractie is een factor (een getal kleiner dan 1) op het transport door kolkuitwisseling. Door het bellenscherm wordt de tijd benodigd voor een volledige kolkuitwisseling, gekenschetst door  $T_{LE}$ , dus langer, en wel met een factor  $1/\eta$ . In deze vorm kan de doorlaatfractie eenvoudig worden ingebracht in de vergelijking voor de kolkuitwisseling:

$$V_U = V_{K,eff}U = V_{K,eff} \tanh\left(\frac{\eta T_{Open}}{T_{LE}}\right) \quad (16)$$

N.B. 1:

Deze manier om de  $\eta$  in te brengen is een elegante oplossing in de formules. Het impliceert echter dat het zouttransport vanuit de kolk naar de voorhaven (of vice versa) bestaat uit een door de doorlaatfractie beperkt debiet met de ongewijzigde saliniteit van

de kolk c.q. de voorhaven. Dat klopt in de zin van de zoutmassa die daarmee wordt getransporteerd. De lozing in de voorhaven echter zal, door de circulatie aangedreven door het bellenscherm, enigszins worden opgemengd, waardoor het debiet dat uit de circulatiezone komt groter wordt (namelijk: aangevuld met debiet dat vanuit de voorhaven die circulatiezone in gaat) en waarvan de saliniteit is opgeschoven naar de waarde van de voorhaven. Deze menging wordt nu dus niet beschreven door de formulering, maar zal evt. in het gebiedsmodel moeten worden beschreven. In Hoofdstuk 7 wordt hier nader op ingegaan.

N.B. 2:

In plaats van het voorschrijven van de doorlaatfractie zou ook een luchtdebiet kunnen worden voorgeschreven. In Hoofdstuk 7 wordt hier kort op ingegaan.

## Spoeldebiet

Een spoeldebiet loopt altijd van zoet naar zout, en zo'n debiet zal in de regel alleen mogelijk zijn in de LW situatie; dan staat het verval de goede kant op. Bij HW zal het spoeldebiet vaak nul zijn. Vanuit operationele overwegingen zal er een maximum 'momentaan' spoeldebiet gelden: een debiet dat acceptabel is voor het vlot en veilig in- en uitvaren van de schepen. Deze momentane waarde van het debiet (te onderscheiden van het gemiddelde debiet over de cyclus heen) wordt door de gebruiker ingevoerd, apart voor LW en HW (deze laatste zal meestal nul zijn).

$$\text{LW: } Q_{\text{Spoel}} = Q_{\text{Spoel,LW}} \quad (17)$$

$$\text{HW: } Q_{\text{Spoel}} = Q_{\text{Spoel,HW}} \quad (18)$$

Het debiet loopt alleen als aan één van beide sluishoofden de deuren openstaan. Het getransporteerde volume wordt dus bepaald door het debiet maal de gesommeerde deur-opentijd van beide sluishoofden:

$$V_{\text{Spoel}} = Q_{\text{Spoel}} (T_{\text{Open,M}} + T_{\text{Open,Z}}) \quad (19)$$

## Waterscherm

Het waterscherm wordt altijd gevoed met een pomp, en kan daardoor in bedrijf zijn in zowel de LW- als de HW-fase. Het getransporteerde volume wordt bepaald door het debiet maal de deur-opentijd aan het sluishoofd aan de zeezijde:

$$V_{\text{Ws}} = Q_{\text{Ws}} T_{\text{Open,Z}} \quad (20)$$

## 2.6 Overzicht van de invoer

**Randvoorwaarden** (alleen i.g.v. stand-alone versie):

$$h_M, h_Z, S_M, S_Z, T_M, T_Z,$$

Hiervan zal in de stand-alone versie met name  $h_z$  een tijdsafhankelijke variabele zijn, voor het beschouwen van een getij aan de Zeezijde.

**Geometrie** (nog zonder beschouwing drempels en niveauverschillen in de bodem):

Constant in de tijd:  $L_K, B_K, z_K$

### Operatie en scheepvaart

$N_{Cycli}, T_{Deur}, T_{Niv}, C_{Dot}, C_{M/Gem}, V_{Schip,Opw}, V_{Schip,Afw}$

In eerste instantie zijn alle waarden constant in de tijd. Echter, om (indien nodig) een variatie van de operatie in de tijd te kunnen beschrijven (dukkere en minder drukken momenten in een dag / week / jaar) en om variatie in schutrichting te kunnen beschrijven (meer schepen uitgaan of meer schepen ingaand) zouden  $N_{Cycli}, C_{M/Gem}, V_{Schip,Opw}$  en  $V_{Schip,Afw}$  tijdsafhankelijke parameters moeten zijn. (De parameter  $T_{Bedrijf}$  is een constante met waarde 24 uur en behoort niet tot de invoer.)

### Maatregelen

Constant in de tijd:  $\eta, Q_{Spoel,LW}, Q_{Spoel,HW}, Q_{Ws}$

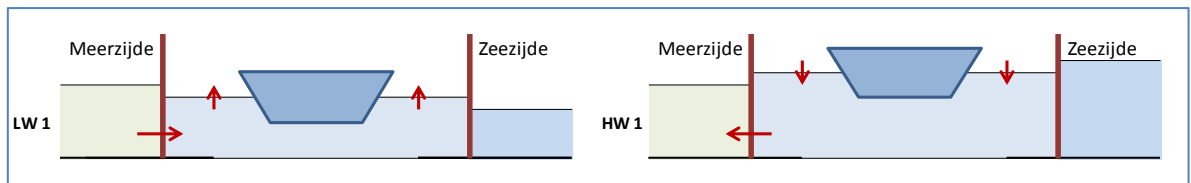
## 3 Vergelijkingen per schutfase

Hieronder worden per fase van de schutcyclus vergelijkingen opgesteld voor het massa-transport van zout, uitgedrukt in een volume en een zoutgehalte. Uiteindelijk kunnen dan de transporten over de totale cyclus worden bepaald door het combineren van de vergelijkingen per fase van de cyclus.

Omdat sprake is van een cyclus stellen we de begincondities, o.a. de saliniteit in de kolk, gelijk aan de condities aan het eind van de cyclus.

### 3.1 LW 1 / HW 1: Nivelleren Meerzijde, debiet van meer naar kolk of omgekeerd

Het nivelleren speelt zich af aan het sluishoofd aan de Meerzijde. Aan de Zeezijde zijn er geen transporten.



Het zouttransport door nivelleren bij LW is te beschrijven als:

$$LW : M_{M,LW1} = V_{Niv,LW} S_M \quad (21)$$

Idem bij HW:

$$HW : M_{M,HW1} = -V_{Niv,HW} S_{K,Z} \quad (22)$$

Omdat per definitie (zie vergelijkingen (11) en (12)) óf  $V_{Niv,LW} = 0$  óf  $V_{Niv,HW} = 0$  kunnen beide vergelijkingen worden opgeteld tot één vergelijking:

$$M_{M,1} = V_{Niv,LW} S_M - V_{Niv,HW} S_{K,Z} \quad (23)$$

Door het nivelleren wordt, in de fase van LW, de saliniteit in de kolk beïnvloed door het instromen van water met een ander (lager) zoutgehalte. Er ontstaat een andere gemiddelde saliniteit in de kolk,  $S_{K,Z,Niv}$ , en bij het bepalen daarvan kunnen we rekening houden met een volume aan schepen dat in de kolk aanwezig is.

$$LW : S_{K,Z,Niv} = \frac{S_{K,Z} (V_{K,Z} - V_{Schip,Opw}) + S_M V_{Niv,LW}}{V_{K,M} - V_{Schip,Opw}} \quad (24)$$

In de situatie rond HW wordt er water uit de kolk gelaten om de waterstand in de kolk te doen zakken, waarbij de saliniteit in de kolk niet verandert:

$$HW : S_{K,Z,Niv} = S_{K,Z} \quad (25)$$

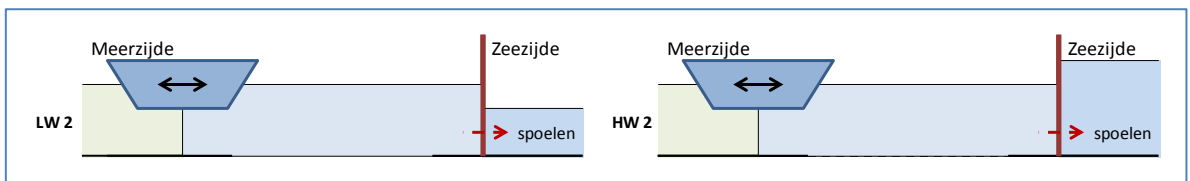
Hiermee mogen we vergelijking (23) ook schrijven als:

$$M_{M,1} = V_{Niv,LW} S_M - V_{Niv,HW} S_{K,Z,Niv} \quad (26)$$

(Het zoutgehalte in de kolk na Fase 1,  $S_{K,Z,Niv}$ , kan ook geschreven worden als  $S_{K,1}$ .)

### 3.2 LW 2 / HW 2: deur-open naar Meerzijde, uitwisseling van debieten tussen kolk en meer

De figuren geven aan dat er in beginsel geen onderscheid is tussen LW en HW. In geval van spoelen is er nu ook transport over het sluishoofd Zeezijde.



Gedurende de tijd dat de deuren aan een kant open staan vinden er verschillende processen plaats die bijdragen aan het zouttransport over het sluishoofd aan de Meerzijde. Deze zijn:

(1): Zouttransport door uitvaren schepen:

$$M_{M,2}(1) = V_{Schip,Opw} S_M \quad (27)$$

(2): Zouttransport door kolkuitwisseling:

$$M_{M,2}(2) = V_{U,M} S_M - V_{U,M} S_{K,Z,Niv} \quad (28)$$

(3): Zouttransport door invaren schepen:

$$M_{M,2}(3) = -V_{Schip,Afw} S_{K,Z,Niv} \quad (29)$$

(4): Zouttransport over het sluishoofd Meerzijde, door een spoeldebiet (waarbij de waarde van het spoeldebiet verschillend kan zijn per getij-fase):

$$M_{M,2}(4) = Q_{Spoel} T_{Open,M} S_M \quad (30)$$

Het totale zouttransport over het sluishoofd Meerzijde tijdens deze schutfase volgt uit de som van componenten (1) t/m (4):

$$M_{M,2} = (V_{Schip,Opw} + V_{U,M} + Q_{Spoel} T_{Open,M}) S_M - (V_{U,M} + V_{Schip,Afw}) S_{K,Z,Niv} \quad (31)$$

met:

$$V_{U,M} = V_{K,M,eff} \tanh\left(\frac{\eta_M T_{Open,M}}{T_{LE,M}}\right) \quad (32)$$

waarin:

$$T_{LE,M} = \frac{4L_K}{\sqrt{g \frac{0,8(S_{K,Z,Niv} - S_M)}{\bar{\rho}} H_{M,eff}}} \quad (33)$$

Bij een spoeldebiet is er ook een zouttransport over het sluishoofd Zeezijde:

$$M_{Z,2} = Q_{Spoel} T_{Open,M} S_{K,Z,Niv} \quad (34)$$

N.B.:

Merk op de processen uitvaren, kolkuitwisseling, invaren en spoelen alle vier beschouwd zijn bij dezelfde zoutgehalten: het zoutgehalte aan de Meerzijde (die waarde is beschikbaar als randvoorwaarde), en één en dezelfde waarde voor het zoutgehalte in de sluiscolk. Dat laatste is strikt genomen onjuist, omdat de processen zich (deels) na elkaar afspelen en deze processen steeds invloed hebben op het zoutgehalte in de colk. Zie hierover ook Hoofdstuk 7.

### 3.3 Zoutgehalte in de colk aan het einde van fase LW 2 / HW 2

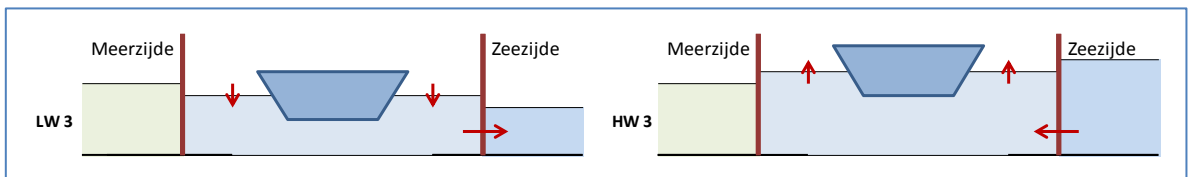
Aan het einde van deze fase is het zoutgehalte in de colk gelijk aan  $S_{K,M}$ . In deze fase zijn er een aantal transporten geweest, de colk in en de colk uit. Samen met de beginconditie, met een zoutgehalte gelijk aan  $S_{K,Z,Niv}$ , bepalen die transporten de hoeveelheid zout in de colk aan het eind van de fase: de nieuwe zoutmassa is gelijk aan de oude zoutmassa plus de transporten in en uit. Dit leidt tot de volgende vergelijking, gesteld in zoutmassa's in de colk (saliniteit maal volume) en transporten van zoutmassa's, waaruit  $S_{K,M}$  kan worden berekend.

$$\begin{aligned} S_{K,M} (V_{K,M} - V_{Schip,Afw}) &= S_{K,Z,Niv} (V_{K,M} - V_{Schip,Opw}) + M_{in} - M_{uit} \\ M_{in} = M_{M,2} &= (V_{Schip,Opw} + V_{U,M} + Q_{Spoel} T_{Open,M}) S_M - (V_{U,M} + V_{Schip,Afw}) S_{K,Z,Niv} \\ M_{uit} = M_{Z,2} &= Q_{Spoel} T_{Open,M} S_{K,Z,Niv} \end{aligned} \quad (35)$$

(Het zoutgehalte in de colk na Fase 2,  $S_{K,M}$ , kan ook geschreven worden als  $S_{K,2}$ .)

### 3.4 LW 3 / HW 3: Nivelleren Zeezijde, debiet van colk naar zee of omgekeerd

Het nivelleren speelt zich af aan het sluishoofd aan de Zeezijde. Aan de Meerzijde zijn er geen transporten.



Net als in de fase LW 1 en HW 1 geldt dat per definitie óf  $V_{Niv,LW} = 0$  óf  $V_{Niv,HW} = 0$ . Daarom kunnen ook nu de vergelijkingen voor LW en HW worden gecombineerd tot één vergelijking:

$$M_{Z,3} = V_{Niv,LW} S_{K,M} - V_{Niv,HW} S_Z \quad (36)$$

In de situatie rond LW wordt er water uit de kolk gelaten om de waterstand in de kolk te doen zakken, waarbij de saliniteit in de kolk niet verandert:

$$LW : S_{K,M,Niv} = S_{K,M} \quad (37)$$

Hiermee mogen we vergelijking (36) ook schrijven als:

$$M_{Z,3} = V_{Niv,LW} S_{K,M,Niv} - V_{Niv,HW} S_Z \quad (38)$$

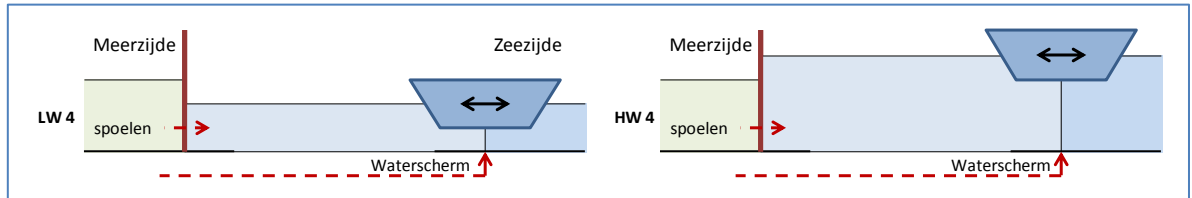
In de fase van HW wordt de saliniteit in de kolk beïnvloed door het instromen van water met een ander (hoger) zoutgehalte. Er ontstaat dus een andere gemiddelde saliniteit in de kolk, en bij het bepalen daarvan kunnen we rekening houden met een in de kolk aanwezig volume aan schepen.

$$HW : S_{K,M,Niv} = \frac{S_{K,M} (V_{K,M} - V_{Schip,Afw}) + S_Z V_{Niv,HW}}{V_{K,Z} - V_{Schip,Afw}} \quad (39)$$

(Het zoutgehalte in de kolk na Fase 3,  $S_{K,M,Niv}$ , kan ook geschreven worden als  $S_{K,3}$ .)

### 3.5 LW 4 / HW 4: deur-open naar Zeezijde, uitwisseling van debieten tussen kolk en zee

De figuren geven weer aan dat er in beginsel geen onderscheid is tussen LW en HW. Spoelen en een debiet door een waterscherm leiden nu ook transport over het sluishoofd Zeezijde.



Gedurende de tijd dat de deuren aan een kant open staan vinden er verschillende processen plaats die bijdragen aan het zouttransport aan de Zeezijde. Deze zijn:

(1): Zouttransport door uitvaren schepen:

$$M_{Z,4}(1) = -V_{Schip,Afw} S_Z \quad (40)$$

(2): Zouttransport door kolkuitwisseling:

$$M_{Z,4}(2) = V_{U,Z} S_{K,M,Niv} - V_{U,Z} S_Z \quad (41)$$

(3): Zouttransport door invaren schepen:

$$M_{Z,4}(3) = V_{Schip,Opw} S_{K,M,Niv} \quad (42)$$

(4): Zouttransport over het sluishoofd Zeezijde, door een spoeldebiet:



$$M_{Z,LW4}(4) = Q_{Spoel} T_{Open,Z} S_{K,M,Niv} \quad (43)$$

Daarnaast is er nu (mogelijkerwijs) naast spoelen door de kolk ook sprake van een debiet door een waterscherm. Conform eerdere formuleringen, waaronder WANDA-Locks, wordt het debiet door het waterscherm in het sluishoofd aan de Zeezijde gecombineerd met de saliniteit van de kolk. Dat impliceert dus een debiet vanuit de kolk naar de zeezijde met die saliniteit. In die zin worden, in de juiste schutfase, spoeldebiet en waterscherm helemaal hetzelfde behandeld.

(5): Zouttransport over het sluishoofd Zeezijde, door een waterscherm:

$$M_{Z,4}(5) = Q_{Ws} T_{Open,Z} S_{K,M,Niv} \quad (44)$$

Het totale zouttransport over het sluishoofd Zeezijde tijdens deze schutfase volgt uit de som van componenten (1) t/m (5).

$$M_{Z,4} = (V_{U,Z} + V_{Schip,Opw} + (Q_{Spoel} + Q_{Ws}) T_{Open,Z}) S_{K,M,Niv} - (V_{Schip,Afw} + V_{U,Z}) S_Z \quad (45)$$

met:

$$V_{U,Z} = V_{K,Z,eff} \tanh\left(\frac{\eta_Z T_{Open,Z}}{T_{LE,Z}}\right) \quad (46)$$

waarin:

$$T_{LE,Z} = \frac{4L_{K,eff}}{\sqrt{g \frac{0,8(S_Z - S_{K,M,Niv})}{\bar{\rho}} H_{Z,eff}}} \quad (47)$$

Bij een spoeldebiet en bij een waterscherm is er ook een zouttransport over het sluishoofd Meerzijde, afhankelijk van de getijfase. Spoeldebiet en waterscherm zijn hierbij in de vergelijkingen gecombineerd:

$$M_{M,4} = (Q_{Spoel} + Q_{Ws}) T_{Open,Z} S_M \quad (48)$$

### 3.6 Zoutgehalte in de kolk aan het einde van fase LW 4 / HW 4

Aan het einde van deze fase is het zoutgehalte in de kolk gelijk aan  $S_{K,Z}$ . Ook in deze fase zijn er een aantal transporten geweest, de kolk in en de kolk uit, en samen met de begin conditie, met een zoutgehalte gelijk aan  $S_{K,M,Niv}$ , bepalen die transporten de hoeveelheid zout in de kolk aan het eind van de fase: de nieuwe zoutmassa is gelijk aan de oude zoutmassa plus de transporten in en uit. Dit leidt tot de volgende vergelijking in zoutmassa's waaruit  $S_{K,Z}$  kan worden bepaald.

$$\begin{aligned} S_{K,Z} (V_{K,Z} - V_{Schip,Opw}) &= S_{K,M,Niv} (V_{K,Z} - V_{Schip,Afw}) + M_{in} - M_{uit} \\ M_{in} = M_{M,4} &= (Q_{Spoel} + Q_{Ws}) T_{Open,Z} S_M \\ M_{uit} = M_{Z,4} &= (V_{U,Z} + V_{Schip,Opw} + (Q_{Spoel} + Q_{Ws}) T_{Open,Z}) S_{K,M,Niv} - (V_{Schip,Afw} + V_{U,Z}) S_Z \end{aligned} \quad (49)$$



**Datum**  
6 augustus 2018

**Ons kenmerk**  
11200741-000-HYE-0004

**Pagina**  
19/34

(Het zoutgehalte in de kolk na Fase 4,  $S_{K,Z}$ , kan ook geschreven worden als  $S_{K,4}$ .)

## 4 De cyclus-gemiddelde debieten en saliniteiten

Op basis van de volumes per schutcyclus, kunnen nu, voor elk van beide sluishoofden, de totale volumes worden bepaald met de bijbehorende saliniteiten. En uit deze volumes kunnen de cyclus-gemiddelde debieten worden bepaald.

### 4.1 Meerzijde

De gecombineerde vergelijking voor de Meerzijde geeft het totaal van de transporten tijdens een volledige schutcyclus. De vergelijking luidt:

$$M_M = M_{M,1} + M_{M,2} + M_{M,4} \quad (50)$$

met

$$M_{M,1} = V_{Niv,LW} S_M - V_{Niv,HW} S_{K,Z,Niv} \quad (51)$$

en

$$M_{M,2} = (V_{Schip,Opw} + V_{U,M} + Q_{Spoel} T_{Open,M}) S_M - (V_{U,M} + V_{Schip,Afw}) S_{K,Z,Niv} \quad (52)$$

en

$$M_{M,4} = (Q_{Spoel} + Q_{Ws}) T_{Open,Z} S_M \quad (53)$$

Gebruikmakend van de eerder opgestelde uitdrukkingen voor  $V_{Spoel}$  en  $V_{Ws}$  wordt de gecombineerde uitdrukking voor het transport over de Meerzijde:

$$M_M = (V_{Niv,LW} + V_{Schip,Opw} + V_{U,M} + V_{Spoel} + V_{Ws}) S_M - (V_{Niv,HW} + V_{U,M} + V_{Schip,Afw}) S_{K,Z,Niv} \quad (54)$$

In de sommatie van een aantal volumes schuilt een zeker gevaar: het totaal van de volumes die de kolk uitgaan (laatste term hierboven) mag niet groter worden dan het volume van de kolk zelf, want meer water met dat zoutgehalte is er niet beschikbaar.

Het (potentieel) grootste aandeel in het totale volume is de kolkuitwisseling, hierboven  $V_{U,M}$ . Door het gebruik van een formulering met een tangenshyperbolicus wordt bereikt dat dit volume niet groter kan worden dan de inhoud van de kolk. De combinatie met de eerste term, gerelateerd aan het nivelleren, geeft geen probleem: deze heeft betrekking op de schutscijf en dat volume is gescheiden van het volume daaronder, dat deelneemt aan de kolk-uitwisseling. De laatste term is in potentie wel conflicterend: als de kolk al praktisch helemaal is uitgewisseld (bij een lange deur-opentijd) en er vaart daarna een groot schip de kolk in, dan kan het totale volume dat de kolk uitgaat groter worden dan het volume van de kolk. Een oplossing hiervoor is niet meteen voorhanden (zie ook Hoofdstuk 7). Vooralsnog lijkt het verstandig op dit punt een **waarschuwing** te genereren in de te maken code.

Vergelijking (54) drukt het totale transport per schutcyclus uit in twee debieten met elk een zoutgehalte; het zijn de twee termen in de vergelijking:

- een volume van de Meerzijde naar de Kolk, met het zoutgehalte aan de Meerzijde,  $S_M$ , zoals bekend als randvoorwaarde,
- een volume van de Kolk naar de Meerzijde, met een zoutgehalte van de Kolk,  $S_{K,Z,Niv}$ , zoals berekend door de achterliggende vergelijkingen.

Door beide volumes te delen door de tijd voor een complete schutcyclus zijn de debieten te vertalen in 'cyclus-gemiddelde debieten', elk met een eigen zoutgehalte, en deze zijn dan te verbinden aan de aangrenzende rekencellen als een 'onttrekking' en een 'lozing':

- onttrekking aan de Meerzijde, met de daar geldende saliniteit  $S_M$ :

$$Q_M^- = \frac{(V_{Niv,LW} + V_{Schip,Opw} + V_{U,M} + V_{Spoel} + V_{Ws})}{T_{Cyclus}} \quad (55)$$

- lozing aan Meerzijde met een door de formulering berekende saliniteit:

$$Q_M^+ = \frac{(V_{Niv,HW} + V_{U,M} + V_{Schip,Afw})}{T_{Cyclus}}; \quad S = S_{K,Z,Niv} \quad (56)$$

In het geval van een stand-alone toepassing, maar ook ter vergelijking met andere uitdrukkingen voor het zouttransport, kan het zinnig zijn het zouttransport ook uit te drukken in een netto massa-flux van zout. Deze kan eenvoudig worden bepaald door het transport, formule (54), te delen door de tijd voor een complete schutcyclus:

$$\dot{M}_M = \frac{M_M}{T_{Cyclus}} \quad (57)$$

## 4.2 Zeezijde

De gecombineerde vergelijking voor de Zeezijde is:

$$M_Z = M_{Z,2} + M_{Z,3} + M_{Z,4} \quad (58)$$

met:

$$M_{Z,2} = Q_{Spoel} T_{Open,M} S_{K,Z,Niv} \quad (59)$$

en:

$$M_{Z,3} = V_{Niv,LW} S_{K,M,Niv} - V_{Niv,HW} S_Z \quad (60)$$

en:

$$M_{Z,4} = (V_{U,Z} + V_{Schip,Opw} + (Q_{Spoel} + Q_{Ws}) T_{Open,Z}) S_{K,M,Niv} - (V_{Schip,Afw} + V_{U,Z}) S_Z \quad (61)$$

Wederom gebruikmakend van de uitdrukkingen voor  $V_{Spoel}$  en  $V_{Ws}$  wordt de gecombineerde uitdrukking voor het transport over de Zeezijde:

$$M_Z = (V_{Niv,LW} + V_{U,Z} + V_{Schip,Opw} + V_{Spoel} + V_{Ws}) S_{K,M,Niv} - (V_{Niv,HW} + V_{Schip,Afw} + V_{U,Z}) S_Z \quad (62)$$

Opnieuw worden er een aantal volumes bij elkaar opgeteld die allemaal de kolk uitstromen, maar samen groter zouden kunnen zijn dan het volume van de kolk. Net als beschreven voor vergelijking (54) vormt de combinatie van nivelleren en kolk-uitwisseling geen gevaar. De andere termen, gerelateerd aan het opwaarts varende schip, het spoeldebiet en het debiet van het waterscherm, zouden er wel toe kunnen leiden dat het totale volume dat de kolk uit stroomt groter wordt dan het volume van de kolk. Zoals gezegd, een oplossing hiervoor is niet meteen

voorhanden (zie ook Hoofdstuk 7). Vooral nog lijkt het dus verstandig op dit punt een **waarschuwing** te genereren in de te maken code.

Vergelijking (62) drukt het totale transport per schutcyclus weer uit in twee debieten met elk een zoutgehalte; het zijn de twee termen in de vergelijking:

- een volume van de Kolk naar de Zeezijde, met een zoutgehalte van de Kolk,  $S_{K,M,Niv}$ , zoals berekend door de achterliggende vergelijkingen.
- een volume van de Zeezijde naar de Kolk, met het zoutgehalte aan de Zeezijde,  $S_Z$ , zoals bekend als randvoorwaarde.

Door beide volumes te delen door de tijd voor een complete schutcyclus zijn de debieten te vertalen in 'cyclus-gemiddelde debieten', elk met een eigen zoutgehalte, en deze zijn dan te verbinden aan de aangrenzende rekencellen als een 'onttrekking' en een 'lozing':

- lozing aan Zeezijde met een door de formulering berekende saliniteit:

$$Q_Z^+ = \frac{(V_{Niv,LW} + V_{U,Z} + V_{Schip,Opw} + V_{Spoel} + V_{Ws})}{T_{Cyclus}}; S = S_{K,M,Niv} \quad (63)$$

- onttrekking aan de Zeezijde, met de daar geldende saliniteit  $S_Z$ :

$$Q_Z^- = \frac{(V_{Niv,HW} + V_{Schip,Afw} + V_{U,Z})}{T_{Cyclus}} \quad (64)$$

De netto massa-flux van zout kan weer eenvoudig worden bepaald door het transport, formule (62), te delen door de tijd voor een complete schutcyclus:

$$\dot{M}_Z = \frac{M_Z}{T_{Cyclus}} \quad (65)$$

## 5 Rekenkundige aanpak

De beschrijving in Hoofdstuk 0 van de transporten en hoe de saliniteit in de kolk zich ontwikkelt van fase naar fase, levert ook een recept op voor de berekening van de waarden van volumes en saliniteiten, namelijk door een iteratieve aanpak: de schutcyclus een aantal keren doorrekenen tot de berekende waarden nagenoeg niet meer veranderen. Uit die evenwichtswaarden kunnen de cyclus-gemiddelde debieten (lozingen en onttrekkingen) worden berekend, samen met de saliniteiten (Paragraaf 5.1).

Een alternatieve rekenkundige benadering is het opstellen van een stelsel van vergelijkingen (Paragraaf 5.2). Uit Hoofdstukken 0 en 4 kunnen de essentiële vergelijkingen worden geselecteerd, die samen een stelsel van acht vergelijkingen met acht onbekenden opleveren. Het oplossen van dit stelsel levert dan de onbekenden die nodig zijn voor het berekenen van de cyclus-gemiddelde debieten en de bijbehorende saliniteiten.

### 5.1 Iteratief doorrekenen van de schutcyclus

In Hoofdstuk 4 zijn de uitdrukkingen voor de debieten (lozingen en onttrekkingen) opgesteld, maar daar zitten nog een paar onbekenden in: de volumes van de kolkuitwisseling  $V_{U,M}$ ,  $V_{U,Z}$ , en de saliniteiten in de kolk  $S_{K,M,Niv}$  en  $S_{K,Z,Niv}$ . Deze waarden ontstaan in de schutcyclus, zoals beschreven in Hoofdstuk 0.

Deze cyclus kan beschouwd worden als een iteratief proces: bij constante randvoorwaarden ontstaan uiteindelijk, na een voldoende aantal cycli, constante waarden voor de onbekende parameters. Door dit cyclische proces een voldoende aantal keren door te rekenen kunnen die waarden ook worden berekend. Om deze iteratie in te gaan, bijvoorbeeld te beginnen bij schutfase LW 1 / HW 1 (zie Paragraaf 3.1), is alleen een initiële waarde nodig voor de saliniteit in de kolk,  $S_{K,Z}$ . Voor een berekening voor bepaalde (constante) condities kan de beginwaarde hiervan gelijk gesteld worden aan  $S_Z$ , of aan het gemiddelde tussen  $S_Z$  en  $S_M$ , of iets daar tussenin.

In het geval van een berekening in de tijd, bij variërende randvoorwaarden (b.v. een getij aan de zeezijde, of een operatie die niet constant is in de tijd), kan de oplossing van de vorige tijdstap als initiële waarde worden gekozen: als de randvoorwaarden geleidelijk veranderen zal slechts een beperkt aantal iteraties nodig zijn.

De rekenkundige aanpak voor het bepalen van de lozingen en onttrekkingen bestaat daarmee uit twee stappen: het iteratief bepalen van  $V_{U,M}$ ,  $V_{U,Z}$ ,  $S_{K,M,Niv}$  en  $S_{K,Z,Niv}$ , gevolgd door de directe berekening van de lozingen,  $Q_M^+$  en  $Q_Z^+$  en de onttrekkingen  $Q_M^-$  en  $Q_Z^-$ .

### 5.2 Stelsel van vergelijkingen

Een alternatief voor de iteratieve benadering zoals hierboven beschreven, is het opstellen van een stelsel van vergelijkingen, waarbij het aantal vergelijkingen gelijk moet zijn aan het aantal onbekenden. Uit de voorgaande hoofdstukken kunnen we de relevante vergelijkingen selecteren met daarin steeds een aantal onbekende grootheden. (De onbekende grootheden zijn daarbij alle grootheden die niet direct beschikbaar zijn vanuit randvoorwaarden of direct te berekenen zijn uit de invoer.) We beginnen bij de vergelijkingen voor de gecombineerde

transporten over een sluishoofd (eerst Meerzijde, daarna Zeezijde) en zoeken vervolgens de vergelijkingen op voor de daarin onbekende grootheden.

Meerzijde:

1) voor onbekende  $M_M$ : vergelijking (54):

$$M_M = (V_{Niv,LW} + V_{Schip,Opw} + V_{U,M} + V_{Spoel} + V_{Ws})S_M - (V_{Niv,HW} + V_{U,M} + V_{Schip,Afw})S_{K,Z,Niv} \quad (66)$$

Met onbekenden:  $V_{U,M}$ ,  $S_{K,Z,Niv}$

2) voor  $V_{U,M}$ : vergelijkingen (32) en (33):

$$V_{U,M} = V_{K,M,eff} \tanh\left(\frac{\eta_M T_{Open,M}}{T_{LE,M}}\right) \quad (67)$$

met:

$$T_{LE,M} = \frac{4L_K}{\sqrt{g \frac{0,8(S_{K,Z,Niv} - S_M)}{\bar{\rho}} H_{M,eff}}} \quad (68)$$

Met onbekenden:  $S_{K,Z,Niv}$

3) voor  $S_{K,Z,Niv}$ : vergelijkingen (24) of (25):

$$LW : S_{K,Z,Niv} = \frac{S_{K,Z}(V_{K,Z} - V_{Schip,Opw}) + S_M V_{Niv,LW}}{V_{K,M} - V_{Schip,Opw}} \quad (69)$$

of:

$$HW : S_{K,Z,Niv} = S_{K,Z} \quad (70)$$

Met onbekenden:  $S_{K,Z}$

4) voor  $S_{K,Z}$ : vergelijking (49):

$$\begin{aligned} S_{K,Z}(V_{K,Z} - V_{Schip,Opw}) &= S_{K,M,Niv}(V_{K,Z} - V_{Schip,Afw}) + M_{in} - M_{uit} \\ M_{in} = M_{M,4} &= (Q_{Spoel} + Q_{Ws})T_{Open,Z}S_M \\ M_{uit} = M_{Z,4} &= (V_{U,Z} + V_{Schip,Opw} + (Q_{Spoel} + Q_{Ws})T_{Open,Z})S_{K,M,Niv} - (V_{Schip,Afw} + V_{U,Z})S_Z \end{aligned} \quad (71)$$

Met onbekenden:  $S_{K,M,Niv}$ ,  $V_{U,Z}$

De laatste twee onbekenden brengen ons naar de Zeezijde:

5) voor onbekende  $M_Z$ : vergelijking (62):

$$M_Z = (V_{Niv,LW} + V_{U,Z} + V_{Schip,Opw} + V_{Spoel} + V_{Ws})S_{K,M,Niv} - (V_{Niv,HW} + V_{Schip,Afw} + V_{U,Z})S_Z \quad (72)$$

Met onbekenden:  $V_{U,Z}$ ,  $S_{K,M,Niv}$

6) voor  $V_{U,Z}$  en  $S_{K,M,Niv}$ : vergelijking (46) met (47):

$$V_{U,Z} = V_{K,Z,eff} \tanh \left( \frac{\eta_Z T_{Open,Z}}{T_{LE,Z}} \right) \quad (73)$$

met:

$$T_{LE,Z} = \frac{4L_{K,eff}}{\sqrt{g \frac{0,8(S_Z - S_{K,M,Niv})}{\bar{\rho}} H_{Z,eff}}} \quad (74)$$

Met onbekenden:  $S_{K,M,Niv}$

7) voor  $S_{K,M,Niv}$ : vergelijking (37) of (39):

$$LW : S_{K,M,Niv} = S_{K,M} \quad (75)$$

of:

$$HW : S_{K,M,Niv} = \frac{S_{K,M}(V_{K,M} - V_{Schip,Afw}) + S_Z V_{Niv,HW}}{V_{K,Z} - V_{Schip,Afw}} \quad (76)$$

Met onbekenden:  $S_{K,M}$

8) en tenslotte, voor  $S_{K,M}$ : vergelijking (35):

$$\begin{aligned} S_{K,M}(V_{K,M} - V_{Schip,Afw}) &= S_{K,Z,Niv}(V_{K,M} - V_{Schip,Opw}) + M_{in} - M_{uit} \\ M_{in} = M_{M,2} &= (V_{Schip,Opw} + V_{U,M} + Q_{Spoel} T_{Open,M}) S_M - (V_{U,M} + V_{Schip,Afw}) S_{K,Z,Niv} \\ M_{uit} = M_{Z,2} &= Q_{Spoel} T_{Open,M} S_{K,Z,Niv} \end{aligned} \quad (77)$$

Met onbekenden:  $S_{K,Z,Niv}, V_{U,M}$

Hiermee is de hele cyclus gedekt en hebben we een stelsel van 8 vergelijkingen met de volgende 8 onbekenden:

$$M_M, V_{U,M}, S_{K,M}, S_{K,M,Niv}, M_Z, V_{U,Z}, S_{K,Z}, S_{K,Z,Niv}$$

Omdat het stelsel van vergelijkingen ook niet-lineaire vergelijkingen bevat zal er een geschikte numerieke aanpak gekozen moeten worden om het stelsel op een effectieve manier op te lossen. Dit wordt in dit document nu niet verder uitgewerkt.

Als de onbekende parameters zijn bepaald kunnen daarmee, door directe berekening, de lozingen,  $Q_M^+$  en  $Q_Z^+$  en de onttrekkingen  $Q_M^-$  en  $Q_Z^-$  worden berekend.

### 5.3 Overzicht uitvoer

Door de formulering worden, langs een van beide methoden, uiteindelijk de (evenwichts)-waarden berekend van de volgende grootheden, allemaal als functie van de tijd:

$$M_M, \dot{M}_M, Q_M^-, Q_M^+, S_{K,Z,Niv}, M_Z, \dot{M}_Z, Q_Z^-, Q_Z^+, S_{K,M,Niv}.$$

Deze parameters zijn waar de formulering voor is bedoeld: de massa's (per cyclus) en de fluxen en debieten (cyclus-gemiddeld) die de sluis in- en uitstromen.



Daarnaast zijn er nog een aantal andere parameters denkbaar die kunnen helpen bij het interpreteren van de uitvoer. Dit zijn bijvoorbeeld de geometrische parameters, zoals het volume van de sluiskolk, of operationele parameters zoals deur-opentijden. Ook kunnen de transporten per schutfase worden uitgevoerd. Dit zijn allemaal parameters die in de code bekend zijn.

Daarnaast zijn er nog een paar parameters waar behoefte aan kan bestaan, zeker in de ontwikkelfase van de formulering. De uitkomsten van verschillende rekenmethoden willen we met elkaar kunnen vergelijken, en ook met theoretische relaties. Daarvoor plotten we de resultaten graag als dimensieloze grootheden: een dimensieloos transport tegen een dimensieloze deur-opentijd.

### Dimensieloos zouttransport

Voor het dimensieloze zouttransport over de sluis per schutfase gebruiken we de parameter  $Z_{fractie}$ , gedefinieerd als een factor op het kolkvolume maal het verschil in zoutgehalte aan beide kanten.

$$M = Z_{fractie} V_K \cdot \Delta S \quad (1.78)$$

Daarmee geeft  $Z_{fractie}$ , aan welk deel (factor) van de kolk, in het regelmatige schutfaseproces, uitwisselt en bijdraagt aan het zouttransport.

Nu worden er in het rekenproces transporten uitgerekend per sluishoofd, en is ook het volume van de kolk, door een verschil in waterstand aan beide kanten, niet altijd gelijk. Vandaar dat we rekenen met gemiddelde waarden hiervoor. Hieruit volgt voor  $Z_{fractie}$ :

$$Z_{fractie} = \frac{\bar{M}}{\bar{V}_K \cdot (S_Z - S_M)} = \frac{0,5 \cdot (M_M + M_Z)}{0,5 \cdot (V_{K,M} + V_{K,Z}) \cdot (S_Z - S_M)} \quad (1.79)$$

### Dimensieloze deur-opentijd

De dimensieloze deur-opentijd is  $T_{LE} / T_{Open}$ . In de berekening wordt de  $T_{LE}$  berekend per sluishoofd, met het daar geldende dichtheidsverschil. Maar daarmee wordt de  $T_{LE}$  niet alleen bepaald door de invoer, maar is de waarde afhankelijk van de berekening, en is er bovendien een aparte waarde per sluishoofd. Om een  $T_{LE}$  te bepalen die alleen wordt bepaald door de invoer (randvoorwaarden en geometrie) wordt nu een aparte variant van de  $T_{LE}$  gedefinieerd, te weten  $T_{LE,MZ}$  die gebaseerd is het dichtheidsverschil over de sluis heen. Deze parameter wordt niet gebruikt in de berekening, maar wel in de uitvoer, o.a. van de dimensieloze deur-opentijd:  $T_{LE,MZ} / T_{Open}$

$$c_{i,MZ} = \frac{1}{2} \sqrt{g' H} = \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} H} \approx \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{0,8(S_Z - S_M)}{\bar{\rho}} \left( \frac{H_M + H_Z}{2} \right)} \quad (80)$$

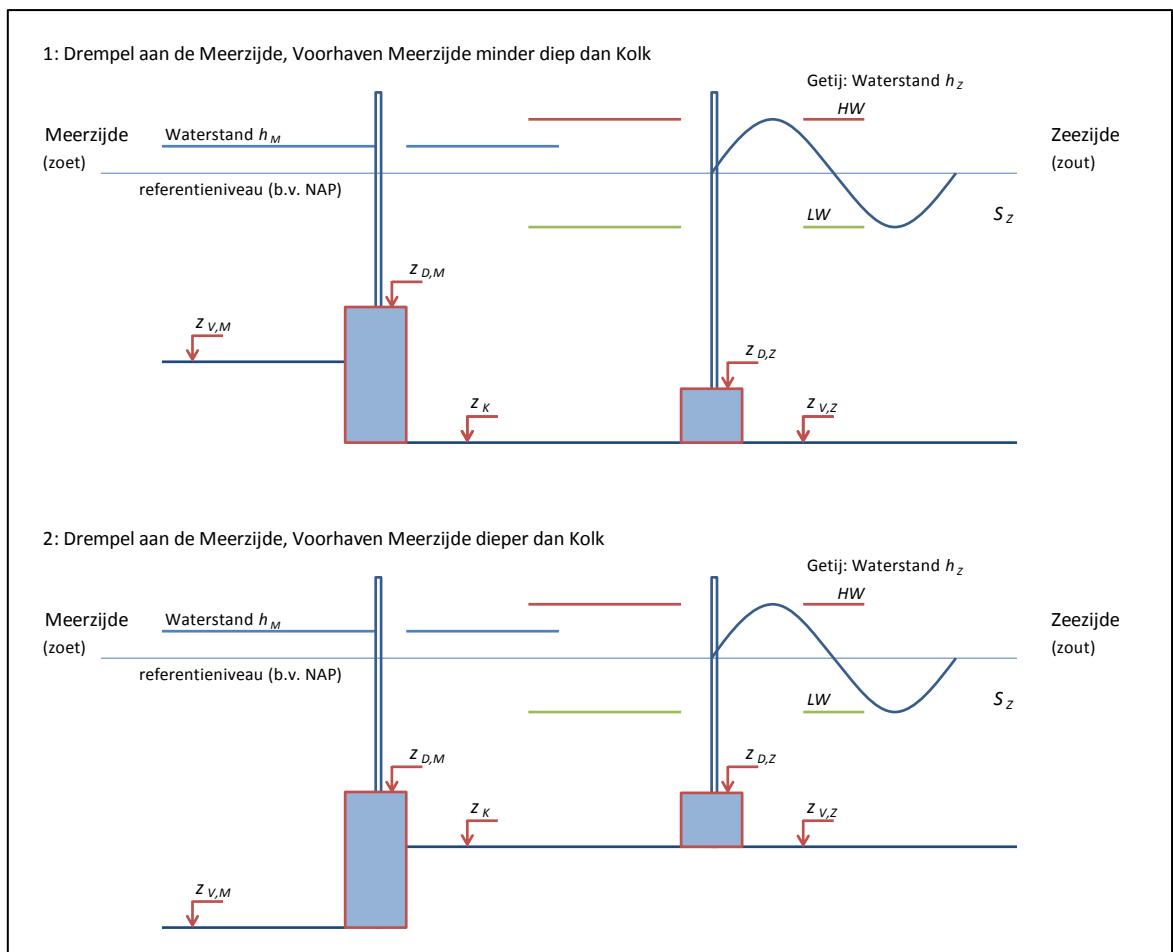
$$T_{LE,MZ} = \frac{2L}{c_{i,MZ}} \quad (81)$$

## 6 De invloed van verschillen in bodemniveau en drempels

In de vergelijkingen voor het volume van de kolkuitwisseling,  $V_{U,M}$  en  $V_{U,Z}$ , staan parameters voor een *effectieve* lengte van de sluiskolk, een *effectieve* hoogte van de waterkolom in het sluishoofd en een *effectief* uit te wisselen kolkvolume. Hierin speelt de invloed van drempels in de sluishoofden een rol, alsmede de verschillen in diepte tussen de kolk en de beide voorhavens. We behandelen hieronder de beide sluishoofden apart.

### 6.1 Meerzijde

De situatie aan de meerzijde is hieronder geschetst, in twee varianten. In de eerste variant is de zoete voorhaven minder diep dan de Kolk (deze situatie lijkt op die voor de nieuwe sluis bij Terneuzen, vooral indien daar de drempel wordt gerealiseerd). In de tweede variant is de voorhaven juist dieper dan de kolk.



Figuur 6.1 Definitie verticale geometrie in twee varianten voor de meerzijde

De figuur definieert ook een aantal niveau's: naast de bodemligging in de kolk  $z_K$ , betreft dit de bodemligging in beide voorhavens,  $z_{V,M}$  en  $z_{V,Z}$ , en bovenkant van de beide drempels,  $z_{D,M}$  en  $z_{D,Z}$ .

De (theoretische) snelheid van de kolkuitwisseling, opgenomen in de uitdrukking voor de (theoretische) tijd voor een volledige kolkuitwisseling, zie o.a. formule (33), wordt o.a. bepaald door  $H_{M,eff}$ : de effectieve waterstand boven de drempel aan de meerzijde. Hierbij kan, naar inzichten uit de veldproef op de Stevinsluis, de hoogte van de drempel voor 80% worden meegenomen.

Echter, als de kolk en de voorhaven niet dezelfde diepte hebben, is de hoogte van de drempel nog niet eenduidig gedefinieerd: de hoogte t.o.v. de bodem van de kolk is anders dan t.o.v. de voorhaven. Verondersteld mag worden dat, in afwezigheid van een verhoogde drempel, de snelheid van de zouttong beperkt zou worden door de kleinste van de twee dieptes (kolk en voorhaven). In aansluiting daarop brengen we de drempel in rekening door de kleinste waterdiepte te reduceren met 80% van de 'kleinste' drempelhoogte. Rekenkundig komt dit overeen met het vergroten van de hoogte boven de drempel met 20% van de kleinste drempelhoogte:

$$H_{M,eff} = (h_M - z_{D,M}) + 0,2 \min((z_{D,M} - z_{V,M}), (z_{D,M} - z_K)) \quad (82)$$

Deze definitie van  $H_{M,eff}$  kunnen we ook gebruiken voor het maximaal uit te wisselen volume vanuit de kolk naar de meerzijde:

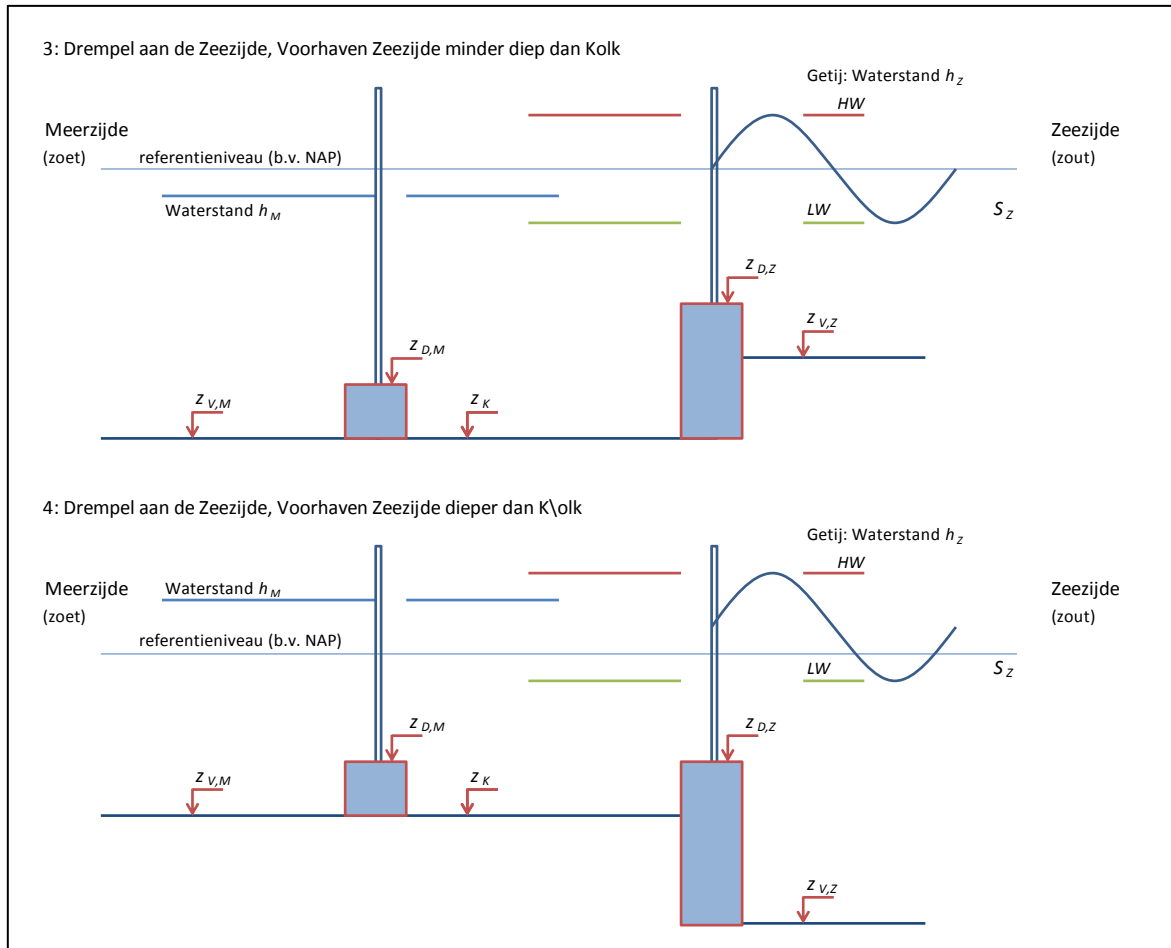
$$V_{K,M,eff} = L_K B_K H_{M,eff} \quad (83)$$

Deze keuze impliceert dat het uit te wisselen volume van de kolk op dezelfde manier gereduceerd wordt als de snelheid van de uitwisseling. Het zoute water onder het (effectieve) niveau van de drempel blijft in de kolk en doet niet mee in de uitwisseling.

Samenvattend geldt daarmee het volgende voor de meerzijde: door in de uitdrukkingen voor de kolkuitwisseling aan de meerzijde, (32) en (33), gebruik te maken van bovenstaande vergelijkingen (82) en (83) wordt de invloed van drempels en verschil in bodemligging in rekening gebracht.

## 6.2 Zeezijde

De situatie aan de zeezijde is geschetst in de volgende figuur, weer in twee varianten. In de eerste variant is de voorhaven minder diep dan de kolk. In de tweede variant is de voorhaven juist dieper dan de kolk.



*Figuur 6.2 Definitie verticale geometrie in twee varianten voor de zeezijde*

Ook aan deze kant van de kolk zal gelden dat de snelheid van de zouttong beperkt zal worden door de kleinste van de twee dieptes (Kolk en Voorhaven), en dat dus de invloed van de drempel gerelateerd moet worden aan de 'kleinste' drempelhoogte:

$$H_{Z,eff} = (h_Z - z_{D,Z}) + 0,2 \min((z_{D,Z} - z_{V,Z}), (z_{D,Z} - z_K)) \quad (84)$$

Voor de kolkuitwisseling is de situatie aan dit sluishoofd echter anders: bij de kolkuitwisseling zal de zouttong die over de drempel komt zich over de bodem van de kolk uitspreiden en, bij voldoende lange deur-opentijd, het hele kolkvolume uitwisselen. Voor de kolkuitwisseling moet aan de zeezijde dus gelden:

$$V_{K,Z,eff} = V_{K,Z} \quad (85)$$

Dit leidt echter tot een inconsistentie in de gebruikte formules: de snelheid van de kolkuitwisseling hebben we gereduceerd, maar als met deze lagere snelheid twee maal de kolk lengte is afgelegd, is nog niet (in theoretische zin) het hele kolkvolume uitgewisseld: de hoogte van de zouttong (over de drempel) is nu kleiner dan de helft van waterkolom in de kolk, en dus is er (nog) meer tijd nodig voor de (theoretisch) volledige kolkuitwisseling.

De eenvoudigste manier om dit tot uitdrukking te brengen is het verdisconteren van de grotere diepte van de kolk (groter dan twee keer de dikte van de zouttong) in een evenredige vergroting van de kolk lengte:

$$L_{K,eff} = L_K \frac{h_Z - z_K}{H_{Z,eff}} \quad (86)$$

Daarmee klopt dus ook het volume van de kolk:

$$V_{K,Z,eff} = L_{K,eff} B_K H_{Z,eff} = L_K \frac{H_Z}{H_{Z,eff}} B_K H_{Z,eff} = L_K B_K H_Z = V_K \quad (87)$$

Met deze correctie voldoet de formulering weer in de extremen van zowel een kleine kolkuitwisseling bij korte deur-opentijd als een bijna volledige kolkuitwisseling bij lange deur-opentijden. Daar tussenin zal de formulering waarschijnlijk niet helemaal voldoen: als de zouttong in de diepe kolk éénmaal heen en weer is zal de verdere kolkuitwisseling langzamer gaan lopen: in het sluishoofd zal op dat moment over een deel van de hoogte nog een dichtheidsverschil bestaan tussen de voorhaven en de kolk, namelijk over het bovenste deel van de kolk dat nog niet is uitgewisseld; over deze hoogte zal opnieuw een zouttong de kolk in gaan lopen, maar met een kleinere snelheid.

Samenvattend geldt daarmee het volgende voor de Zeezijde: door gebruik te maken van bovenstaande vergelijkingen (84) en (85) en (86) in de uitdrukkingen voor de kolkuitwisseling aan de Zeezijde, (46) en (47), wordt rekening gehouden met de invloed van drempels en verschil in bodemligging.

## 7 Aandachtspunten

Op een aantal plaatsen in dit document zijn opmerkingen geplaatst over aspecten die nadere aandacht verdienen. Deze worden in dit hoofdstuk wat verder uitgewerkt.

### 7.1 Gelijktijdigheid van processen als de deur open staat

In Paragraaf 3.2 is al opgemerkt dat, terwijl de sluisdeuren naar een kant open staan, er een aantal processen tegelijkertijd aan de orde zijn. Aan de Meerzijde zijn dit uitvaren, kolkuitwisseling, invaren en spoelen, en aan de Zeezijde kan daar nog een debiet door een waterscherm bijkomen. In de beschrijving in formules wordt aangenomen dat deze processen allemaal te maken hebben met dezelfde zoutgehalten (de ene in de betreffende voorhaven, de andere in de kolk). Dat impliceert dat ze onafhankelijk zijn en gelijktijdig optreden. Dat is strikt genomen onjuist, omdat de processen zich (deels) na elkaar afspelen en deze processen steeds invloed hebben op het zoutgehalte in de kolk.

Een alternatieve benadering is om de processen sequentieel te beschouwen, waarbij effecten op zoutgehalten in de kolk per fase wel worden meegenomen: de processen vinden na elkaar plaats, waarbij is aangenomen dat het uitvaren van schepen instantaan gebeurt, aan het begin van de deur-opentijd, en het uitvaren van schepen gebeurt instantaan aan het einde van de deur-opentijd:

- eerst varen schip of schepen de kolk uit; het daardoor instromende volume  $V_{Schip}$  brengt water uit de voorhaven in de kolk waardoor het zoutgehalte in de kolk verandert;
- pas daarna wordt de kolkuitwisseling beschouwd, uitgaande van het aangepaste zoutgehalte in de kolk door het uitvaren; dit heeft effect op het transport door kolkuitwisseling: zowel door het verschil in zoutgehalte tussen kolk en voorhaven (dat kleiner geworden is) als via de snelheid van de kolkuitwisseling (die lager is geworden);
- gelijktijdig met de kolkuitwisseling kan dan ook het spoelen en het waterscherm worden beschouwd; deze processen vinden wel gelijktijdig plaats met de kolkuitwisseling;
- na afloop van de periode van de kolk-uitwisseling, waarvoor dus de 'hele' deur-opentijd wordt beschouwd, vind het invaren van schepen plaats: dit verdringt water uit de kolk met een door de kolkuitwisseling (plus spoelen en waterscherm) veranderd zoutgehalte.

Het als 'instantaan' beschouwen van uitvaren en invaren is uiteraard ook niet juist, maar mogelijk het wel beter (in WANDA-Locks, in het project voor de Krammersluizen, is deze volgorde expliciet beschouwd zoals hierboven beschreven), maar het is nooit werkelijk onderzocht.

Deze invloeden vanuit volgorde zijn vooralsnog niet opgenomen in de vergelijkingen voor de zeesluisformulering. Deze (voorlopige) keuze is gemaakt vanuit twee overwegingen:

- er is nog geen theorie (vergelijkingen) beschikbaar hoe de processen van retourstroming en kolkuitwisseling beschreven zouden moeten worden terwijl ze gelijktijdig plaatsvinden;
- in veel gevallen is het scheepsvolume slechts een klein percentage van het kolkvolume waardoor de invloed sowieso beperkt zal zijn;

Deze aspecten ondersteunen het idee om de behandeling hiervan eenvoudige te houden: wel het directe effect van de retourstroming, maar niet de interactie met de kolkuitwisseling.

Gedurende de kolkuitwisseling is er ook een debiet door spoelen en evt. door een waterscherm. Voor de onttrekking van die debieten aan de kolk wordt gerekend met het zoutgehalte in de kolk aan het eind van de voorgaande fase, en dat zoutgehalte wordt constant verondersteld. Ook dat is niet altijd juist: niet alleen door de scheepvaart, maar ook door kolkuitwisseling kan het zoutgehalte in de kolk veranderen gedurende de deur-opentijd. Hier wordt dus vooralsnog geen rekening mee gehouden.

## 7.2 De lozing op een voorhaven door kolkuitwisseling, beperkt door een bellenscherm

CFD-berekeningen uitgevoerd in het kader van de studies voor de Volkeraksluizen lieten zien hoe uit een bellenscherm een dunne zouttong stroomde die dicht langs de bodem naar de zoete kant beweegt. Een recentere CFD-berekening laat een zouttong zien die, net als bij een ongeremde kolk-uitwisseling, de halve hoogte van de waterkolom in neemt. Hoe de werkelijkheid er precies uit ziet is nog niet helemaal duidelijk.

Het verschil tussen de twee situaties kan relevant zijn voor de aansluiting van de zeesluisformulering op een netwerkmodel, met name als dit een 3D-model is (of een 2DV-model): in welke concentratie en verdeeld over welke hoogte komt het zout in de zoete voorhaven (en idem voor een zoete lozing in een zoute voorhaven)? Dit kan van invloed zijn op de verdere verspreiding van het zout aan de zoete kant.

Als we aannamen dat de zouttong door opmenging in de zoete voorhaven de halve hoogte van de waterkolom in neemt, kan zowel de dichtheid als de snelheid van de zouttong worden berekend o.b.v. de vergelijkingen voor kolkuitwisseling, uitgaande van de bekende (gereduceerde) zoutvracht door het sluishoofd.

De zoutvracht in zouttong,  $\dot{M}_{Zouttong}$ , resultaat van de gereduceerde kolk-uitwisseling, manifesteert zich in een debiet in de zouttong en een verschil in saliniteit tussen de zouttong en de voorhaven. Dat debiet is te schrijven als de snelheid van de zouttong, maal de hoogte van de zouttong (de helft van de waterkolom) en de breedte van de zouttong, gelijk aan de breedte in het sluishoofd (i.h.a. gelijk aan de breedte in de sluis).

$$\dot{M}_{Zouttong} = \Delta S_{Zouttong} Q_{Zouttong} = \Delta S_{Zouttong} c_{i,Zouttong} \frac{1}{2} H B \quad (88)$$

De snelheid van de zouttong is conform vergelijking (14):

$$c_{i,Zouttong} = \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} H} = \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{0,8 \Delta S_{Zouttong}}{\bar{\rho}} H} \quad (89)$$

Uit deze twee vergelijkingen is het zoutgehalte in de zouttong te berekenen, en is via de snelheid ook het debiet in die zouttong te berekenen.

Deze berekening zou een nabewerking kunnen zijn op de berekening van de lozing en de onttrekking aan het betreffende sluishoofd: het verschil in zoutgehalte tussen lozing en

voorhaven wordt kleiner, het uitwisselingsvolume (debiet maal deur-opentijd) wordt daarmee groter: in de lozing, maar dus ook in de onttrekking.

Deze naverwerking is nog niet opgenomen in de zeesluisformulering. Als er meer bekend is over de mate van menging in de voorhaven door een bellenscherm zou dit alsnog kunnen worden uitgewerkt. Daarbij zou dan ook nagedacht kunnen worden over een ander aspect: zie de volgende paragraaf.

### **7.3 Lozingen in de voorhaven: pulserend of continu**

Een tweede vorm van menging in de voorhaven, los van de eventuele toepassing van een bellenscherm, betreft de invloed van het pulserende karakter van de transport naar de voorhaven in de werkelijkheid (namelijk met het schutritme, iedere keer als de sluisdeur open gaat) terwijl in de zeesluisformulering sprake is van een continue lozing met een kleiner debiet.

In de werkelijkheid, tijdens de deur-opentijd, zijn de momentane debieten en snelheden relatief groot, waardoor op die momenten een grotere menging optreedt. In de zeesluisformulering zijn de snelheden en debieten lager, waardoor de menging minder zal zijn. Dit zou ertoe kunnen leiden tot er een andere gelaagdheid ontstaat, wat van invloed kan zijn op de verdere verspreiding van het zout in het zoete gebied (en evt. ook op het ontstaan en de verspreiding van een bovenlaag van zoeter water in het zoute gebied).

### **7.4 Voorschrijven van doorlaatfractie of luchtdebiet**

Paragraaf 2.5.3 beschrijft hoe het effect van een bellenscherm is ingebracht in de berekening van de kolkuitwisseling, namelijk middels de doorlaatfractie.

Deze doorlaatfractie wordt bepaald door het luchtdebiet van het bellenscherm, het dichtheidsverschil over het sluishoofd en de waterdiepte in het sluishoofd. De vergelijkingen daarvoor zijn beschikbaar (zie bijvoorbeeld de Manual van WANDA-Locks). In plaats van het voorschrijven van de doorlaatfractie zou ook het luchtdebiet kunnen worden voorgeschreven (een eigenschap van een installatie), op basis waarvan de doorlaatfractie dan door het model kan worden berekend. Dit heeft voordelen als een specifieke installatie moet worden beschouwd. In veel gevallen is het luchtdebiet echter (nog) niet bekend, bijvoorbeeld als een bellenscherm slechts wordt overwogen.

Het is te overwegen om t.z.t. de gebruiker twee opties te bieden (net als in WANDA-Locks):

- het voorschrijven van een doorlaatfractie, waarbij dan het luchtdebiet wordt berekend en uitgevoerd,
- het voorschrijven van het luchtdebiet, waarbij dan de doorlaatfractie wordt berekend en uitgevoerd.

### **7.5 De sluis is minder dan 24 per etmaal in bedrijf**

In Paragraaf 2.4.3 is de parameter  $T_{\text{Bedrijf}}$  gedefinieerd als constante met als waarde 24 uur. Het is ook mogelijk dat een sluis niet 24 uur per dag wordt bedient, of bijvoorbeeld is gesloten in (een deel van) het weekend. Dit kan met de huidige code worden beschreven door de schutfrequentie te laten variëren middels een variatie rond de (gemiddelde) waarde van het





**Datum**  
6 augustus 2018

**Ons kenmerk**  
11200741-000-HYE-0004

**Pagina**  
34/34

aantal schuttingsen per etmaal. De gebruiker moet dan zelf deze tijdreeks aanmaken, zodanig dat de gemiddelde schutfrequentie klopt met het aantal cycli per etmaal.

## **C Uitvoer controle interne consistentie**



scenario nr.	Randvoorwaarden						Geometrie			Operatie						Maatregelen				
	m NAP	m NAP	kg/m3	kg/m3	oC	oC	m	m	m NAP	-	min	min	-	-	m3	m3	-	m3/s	m3/s	m3/s
	h_M	h_Z	S_M	S_Z	T_M	T_Z	L_K	B_K	z_K	N_Cycli	T_Deur	T_Niv	c_Dot	c_M/Gem	V_Schip,Opw	V_Schip,Afw	n	Q_Spoel,LW	Q_Spoel,HW	Q_Ws
0	0.0	0.0	5	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
1	4.0	4.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-8.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-2.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	10.0	20.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	30.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	480	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	24.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	54.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	43.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	36.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	28.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	20.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	16.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	12.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	8.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	0.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	0.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	14.4	5.0	5.0	0.5	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	0.5	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.5	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	-5 000	0	1.00	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	5 000	1.00	0.0	0.0	0.0
23	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	-5 000	5 000	1.00	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	0.50	0.0	0.0	0.0
25	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	0.25	0.0	0.0	0.0
26	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	1.0	0.0	0.0
27	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	1.0	0.0
28	0.0	0.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	1.0
29	0.0	-2.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
30	0.0	2.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	0.0	0.0
31	0.0	-2.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	1.0	0.0	0.0
32	0.0	2.0	5.0	25.0	15.0	15.0	240	12.0	-4.0	24.0	5.0	5.0	1.0	1.0	0	0	1.00	0.0	1.0	0.0

scenario nr.	Essentiele uitvoer										Kenmerken invoer						Kenmerken zouttransport			
	M_M	M_Flux_M	Q_M_ont	Q_M_los	S_K1	M_Z	M_Flux_Z	Q_Z_ont	Q_Z_los	S_K3	V_KM	V_KZ	T_Cyclus	T_Open_Avg	T_Open	T_Open_M	T_Open_Z	T_LE_MZ	T_Open / T_LE_MZ	Z_fractie
	kg	kg/s	m3/s	m3/s	kg/m3	kg	kg/s	m3/s	m3/s	kg/m3	m3	m3	min	min	min	min	min	min	min	-
0	-123 523	-34.3	2.23	2.23	20.36	-123 523	-34.3	2.23	2.23	9.63	11 520	11 520	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	1 219	0.984	-0.536
1	-350 112	-97.3	5.53	5.53	22.60	-350 112	-97.3	5.53	5.53	7.40	23 040	23 040	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	862	1.393	-0.760
2	-350 112	-97.3	5.53	5.53	22.60	-350 112	-97.3	5.53	5.53	7.40	23 040	23 040	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	862	1.393	-0.760
3	-40 145	-11.2	0.83	0.83	18.48	-40 145	-11.2	0.83	0.83	11.51	5 760	5 760	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	1 724	0.696	-0.348
4	-40 144	-11.2	1.65	1.65	16.74	-40 144	-11.2	1.65	1.65	13.26	11 520	11 520	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	1 724	0.696	-0.348
5	-231 004	-64.2	2.56	2.56	25.02	-231 004	-64.2	2.56	2.56	4.97	11 520	11 520	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	995	1.206	-0.668
6	-103 737	-28.8	2.35	2.35	17.24	-103 737	-28.8	2.35	2.35	12.74	23 040	23 040	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	2 439	0.492	-0.225
7	-247 045	-68.6	4.47	4.47	20.36	-247 045	-68.6	4.47	4.47	9.63	23 040	23 040	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	1 219	0.984	-0.536
8	-14 597	-9.1	0.86	0.86	15.62	-14 597	-9.1	0.86	0.86	14.35	11 520	11 520	1 600	200	200	200	200	1 220	0.164	-0.063
9	-32 269	-16.1	1.41	1.41	16.39	-32 269	-16.1	1.41	1.41	13.59	11 520	11 520	2 009	405	405	405	405	1 220	0.332	-0.140
10	-51 869	-21.6	1.77	1.77	17.24	-51 869	-21.6	1.76	1.76	12.74	11 520	11 520	2 400	600	600	600	600	1 220	0.492	-0.225
11	-91 803	-29.8	2.13	2.13	18.98	-91 803	-29.8	2.13	2.13	11.01	11 520	11 520	3 086	943	943	943	943	1 219	0.773	-0.398
12	-162 940	-37.7	2.21	2.21	22.07	-162 940	-37.7	2.21	2.21	7.93	11 520	11 520	4 320	1 560	1 560	1 560	1 560	1 219	1.280	-0.707
13	-200 759	-37.2	1.99	1.99	23.71	-200 759	-37.2	1.99	1.99	6.29	11 520	11 520	5 400	2 100	2 100	2 100	2 100	1 218	1.724	-0.871
14	-223 619	-31.1	1.58	1.58	24.71	-223 619	-31.1	1.58	1.58	5.29	11 520	11 520	7 200	3 000	3 000	3 000	3 000	1 218	2.463	-0.971
15	-230 051	-21.3	1.07	1.07	24.98	-230 051	-21.3	1.07	1.07	5.02	11 520	11 520	10 800	4 800	4 800	4 800	4 800	1 218	3.941	-0.998
16	-157 080	-43.6	2.59	2.59	21.81	-157 080	-43.6	2.59	2.59	8.18	11 520	11 520	3 600	1 500	1 500	1 500	1 500	1 219	1.231	-0.682
17	-157 080	-43.6	2.59	2.59	21.81	-157 080	-43.6	2.59	2.59	8.18	11 520	11 520	3 600	1 500	1 500	1 500	1 500	1 219	1.231	-0.682
18	-123 523	-20.6	1.34	1.34	20.36	-123 523	-20.6	1.34	1.34	9.63	11 520	11 520	6 000	2 400	1 200	1 200	1 200	1 219	0.984	-0.536
19	-88 946	-24.7	1.39	1.39	22.79	-88 946	-24.7	2.49	2.49	15.07	11 520	11 520	3 600	1 200	1 200	600	1 800	1 220	0.983	-0.386
20	-89 007	-24.7	2.49	2.49	14.92	-89 007	-24.7	1.39	1.39	7.19	11 520	11 520	3 600	1 200	1 200	1 800	600	1 218	0.985	-0.386
21	-140 380	-39.0	0.81	2.20	19.58	-140 380	-39.0	1.86	0.47	15.89	11 520	11 520	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	1 220	0.983	-0.609
22	-465 400	-129.3	2.67	4.06	35.11	-465 400	-129.3	4.14	2.75	-9.34	11 520	11 520	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	1 214	0.988	-2.020
23	-276 814	-76.9	0.92	3.70	22.04	-276 814	-76.9	3.42	0.64	13.40	11 520	11 520	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	1 220	0.984	-1.201
24	-51 869	-14.4	1.18	1.18	17.24	-51 869	-14.4	1.18	1.18	12.74	11 520	11 520	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	1 220	0.984	-0.225
25	-22 870	-6.4	0.58	0.58	15.98	-22 870	-6.4	0.58	0.58	14.00	11 520	11 520	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	1 220	0.984	-0.099
26	-113 007	-31.4	2.19	2.19	19.35	-113 007	-31.4	2.24	2.24	9.54	11 520	11 520	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	1 219	0.984	-0.490
27	-115 860	-32.2	2.25	2.25	20.76	-115 860	-32.2	2.30	2.30	8.02	11 520	11 520	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	1 219	0.985	-0.503
28	-112 445	-31.2	2.21	2.21	19.87	-112 445	-31.2	2.23	2.23	9.59	11 520	11 520	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	1 219	0.984	-0.488
29	-7 987	-2.2	3.21	1.61	11.33	-7 987	-2.2	0.90	2.50	8.13	11 520	5 760	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	1 407	0.853	-0.046
30	-266 259	-74.0	2.30	3.90	21.91	-266 259	-74.0	4.94	3.34	14.83	11 520	17 280	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	1 091	1.100	-0.925
31	6 670	1.9	3.18	1.58	11.00	6 670	1.9	0.92	2.52	7.41	11 520	5 760	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	1 407	0.853	0.039
32	-258 625	-71.8	2.31	3.91	22.17	-258 625	-71.8	5.06	3.46	13.65	11 520	17 280	3 600	1 200	1 200	1 200	1 200	1 091	1.100	-0.898

scenario nr.	Saliniteit in kolk				Getransporteerde zoutmassa per schutfase								
	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg/m3	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	
	S_K1	S_K2	S_K3	S_K4	M_M1	M_M2	M_M4	M_M	M_Z2	M_Z3	M_Z4	M_Z	
0	20.36	9.63	9.63	20.36	0	-123 523	0	-123 523	0	0	-123 523	-123 523	
1	22.60	7.40	7.40	22.60	0	-350 112	0	-350 112	0	0	-350 112	-350 112	
2	22.60	7.40	7.40	22.60	0	-350 112	0	-350 112	0	0	-350 112	-350 112	
3	18.48	11.51	11.51	18.48	0	-40 145	0	-40 145	0	0	-40 145	-40 145	
4	16.74	13.26	13.26	16.74	0	-40 144	0	-40 144	0	0	-40 144	-40 144	
5	25.02	4.97	4.97	25.02	0	-231 004	0	-231 004	0	0	-231 004	-231 004	
6	17.24	12.74	12.74	17.24	0	-103 737	0	-103 737	0	0	-103 737	-103 737	
7	20.36	9.63	9.63	20.36	0	-247 045	0	-247 045	0	0	-247 045	-247 045	
8	15.62	14.35	14.35	15.62	0	-14 597	0	-14 597	0	0	-14 597	-14 597	
9	16.39	13.59	13.59	16.39	0	-32 269	0	-32 269	0	0	-32 269	-32 269	
10	17.24	12.74	12.74	17.24	0	-51 869	0	-51 869	0	0	-51 869	-51 869	
11	18.98	11.01	11.01	18.98	0	-91 803	0	-91 803	0	0	-91 803	-91 803	
12	22.07	7.93	7.93	22.07	0	-162 940	0	-162 940	0	0	-162 940	-162 940	
13	23.71	6.29	6.29	23.71	0	-200 759	0	-200 759	0	0	-200 759	-200 759	
14	24.71	5.29	5.29	24.71	0	-223 619	0	-223 619	0	0	-223 619	-223 619	
15	24.98	5.02	5.02	24.98	0	-230 051	0	-230 051	0	0	-230 051	-230 051	
16	21.81	8.18	8.18	21.81	0	-157 080	0	-157 080	0	0	-157 080	-157 080	
17	21.81	8.18	8.18	21.81	0	-157 080	0	-157 080	0	0	-157 080	-157 080	
18	20.36	9.63	9.63	20.36	0	-123 523	0	-123 523	0	0	-123 523	-123 523	
19	22.79	15.07	15.07	22.79	0	-88 946	0	-88 946	0	0	-88 946	-88 946	
20	14.92	7.19	7.19	14.92	0	-89 007	0	-89 007	0	0	-89 007	-89 007	
21	19.58	15.89	15.89	19.58	0	-140 380	0	-140 380	0	0	-140 380	-140 380	
22	35.11	-9.34	-9.34	35.11	0	-465 400	0	-465 400	0	0	-465 400	-465 400	
23	22.04	13.40	13.40	22.04	0	-276 814	0	-276 814	0	0	-276 814	-276 814	
24	17.24	12.74	12.74	17.24	0	-51 869	0	-51 869	0	0	-51 869	-51 869	
25	15.98	14.00	14.00	15.98	0	-22 870	0	-22 870	0	0	-22 870	-22 870	
26	19.35	9.54	9.54	19.35	0	-113 007	0	-113 007	0	0	-113 007	-113 007	
27	20.76	8.02	8.02	20.76	0	-121 860	6 000	-115 860	24 917	0	-140 777	-115 860	
28	19.87	9.59	9.59	19.87	0	-118 445	6 000	-112 445	0	0	-112 445	-112 445	
29	11.33	8.13	8.13	17.66	28 800	-36 787	0	-7 987	0	46 853	-54 841	-7 987	
30	21.91	9.75	14.83	21.91	-126 175	-140 085	0	-266 259	0	-144 000	-122 259	-266 259	
31	11.00	7.41	7.41	17.00	28 800	-28 130	6 000	6 670	13 200	42 696	-49 226	6 670	
32	22.17	7.97	13.65	22.17	-127 693	-136 932	6 000	-258 625	26 603	-144 000	-141 228	-258 625	