



Kennisprogramma Natte Kunstwerken
Kennisplan 2019

*Vervangings- en renovatieopgave
natte kunstwerken in Nederland*

Kennisbijdrage:

Zoutindringing schut- en spuisluisen

Verbetering implementatie
Zeesluisformulering

Diederik Vreeken (Deltares)
Otto Weiler (Deltares)
Roel Burgers (Rijkswaterstaat)

Kenmerk : KpNK-2019-SKW-01c004
Versie : 1.0
Datum publicatie : 31 december 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, sluisen, gemalen en stormvloedkeringen) efficiënt en kostenbesparend aan te pakken.

Deltares

MARIN



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

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 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.

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

Otto Weiler - otto.weiler@deltares.nl

Diederik Vreeken - diederik.vreeken@deltares.nl

Voor vragen over Kennisprogramma Natte Kunstwerken en Kennisplan 2019 kunt u terecht bij:

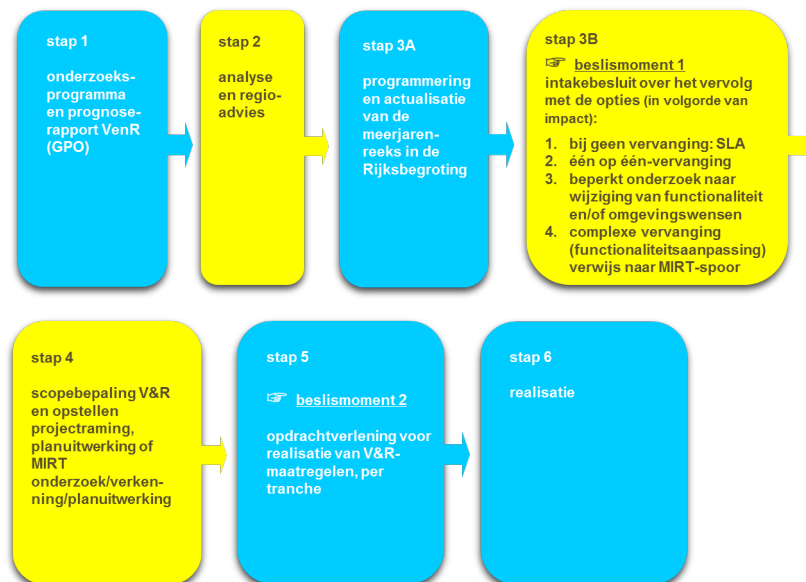
Martine Brinkhuis - martine.brinkhuis@rws.nl



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 zich 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 2019*

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 2019 is er binnen het kader van Kennisprogramma Natte Kunstwerken samengewerkt met Acotec BV, Arcadis en ArcelorMittal, Koninklijke Boskalis en DIANA FEA.

Resultaten uit het Kennisprogramma Natte Kunstwerken worden gedeeld met de gehele sector, onder andere via de website www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl.

De hierop volgende samenvatting heeft betrekking op het onderliggende onderzoeksrapport “Zoutindringing schut- en spuisluisen – Verbetering en implementatie Zeesluisformulering”. Dit onderzoek is geleid door Deltares in het kader van het Kennisplan 2019. 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

Verbetering implementatie Zeesluisformulering

Hieronder vindt u een kennisbijdrage van het werkpakket 'Zoutindringing schut- en spuisluizen' uit het kennisplan 2019. De bijdrage – geleid door Deltares – omvat de samenvatting van onderzoek 'Verbetering en implementatie Zeesluisformulering'. Na de samenvatting vindt u het volledige onderzoeksverslag in de vorm van een onderzoeksrapport.

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. In 2018 is de Zeesluisformulering geïmplementeerd in een stuk software (stand-alone) om de formulering te testen op consistentie en betrouwbaarheid (zie kennisprogramma product KpNK-2018-SKW-01c002).

Onderzoeksvraag (WAT)

Uit de werkzaamheden van 2018 is een aantal vervolgvragen ontstaan. Dat betreft ten eerste **aandachtspunten** over beperkingen in de Zeesluisformulering qua invloed van het spoeldebiet, de waterverplaatsing van schepen en het waterscherp op de zoutlast. Hoe kunnen deze aandachtspunten beter in de softwarecode uit 2018 worden beschreven?



Verder zijn er vervolgvragen over discrepanties tussen Wanda-Locks en de Zeesluisformulering, en wordt de mogelijkheid gezien om een **kalibratiefactor** dichterbij 1 te verkrijgen. Deze worden in 2019 opgepakt.

Onderzoeksaanpak en -methode (HOE)

Voor 2019 zijn globaal de volgende activiteiten uitgevoerd (meer detail in de rapportage):

1. Controleren en aanpassen van de softwarecode uit 2018 op de **aandachtspunten**;
2. Vergroten inzicht in en achtergrond bij kalibratiefactor op basis van een patroonanalyse van de schuttingen bij Noordersluis IJmuiden;
3. Opnieuw vergelijken van de verbeterde Zeesluisformulering en WANDA-Locks;
4. Op basis van bevindingen aanpassen van ZSF implementatiedocument uit 2018;
5. Uitvoeren van een literatuuronderzoek naar een theoretisch kader voor het modelleren van de zoutindringing door spuisluisen.

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

Onderzoeksresultaten en synthese

Wat betreft de **aandachtspunten** is de softwarecode uit 2018 op de volgende aspecten aangepast:

- Het rekenen met een spoeldebiet als maatregel tegen zoutindringing is verbeterd.
- Net als in WANDA-Locks, wordt in de verbeterde implementatie van de ZSF de waterverplaatsing door schepen en kolkuitwisseling sequentieel beschouwd.
- Het waterscherm, die tot op heden en (voor zover bekend) in de nabije toekomst nergens wordt ingezet, is als maatregel uit de ZSF gehaald.

Voor de Noordersluis van IJmuiden is via een vergelijking tussen de ZSF en WANDA-Locks een passende waarde voor de **kalibratiefactor** (behorende bij de beschouwde bezettingsgraad) bepaald. Om de ZSF met vertrouwen in te zetten op andere locaties is het gewenst om eenzelfde vergelijkende analyse uit te voeren voor verschillende typische sluisen met typisch (variërend) schutbedrijf. Dat vereist gedetailleerde gegevens van de uitgevoerde schuttingen, afkomstig uit simulaties of uit registraties.

Evaluatie en vooruitblik

Het werk van 2019 heeft verder aangetoond dat de Zeesluisformulering (ZSF) een heel nuttige tool is voor het onderzoeken van de zoutlek bij schutsluisen. De ontwikkelingen van de afgelopen jaren hebben een model en implementatie opgeleverd die al in projecten buiten het Kennisprogramma Natte Kunstwerken worden gebruikt. De verkenningen met berekeningen bij IJmuiden met de ZSF en WANDA-Locks geven ook inzichten in hoe het model het best ingezet kan worden, met name welke waarde van de kalibratiefactor geschikt is voor dit type sluis. Verdere ontwikkelingen van de ZSF zullen het model aanscherpen maar het is nu al klaar voor gebruik.



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

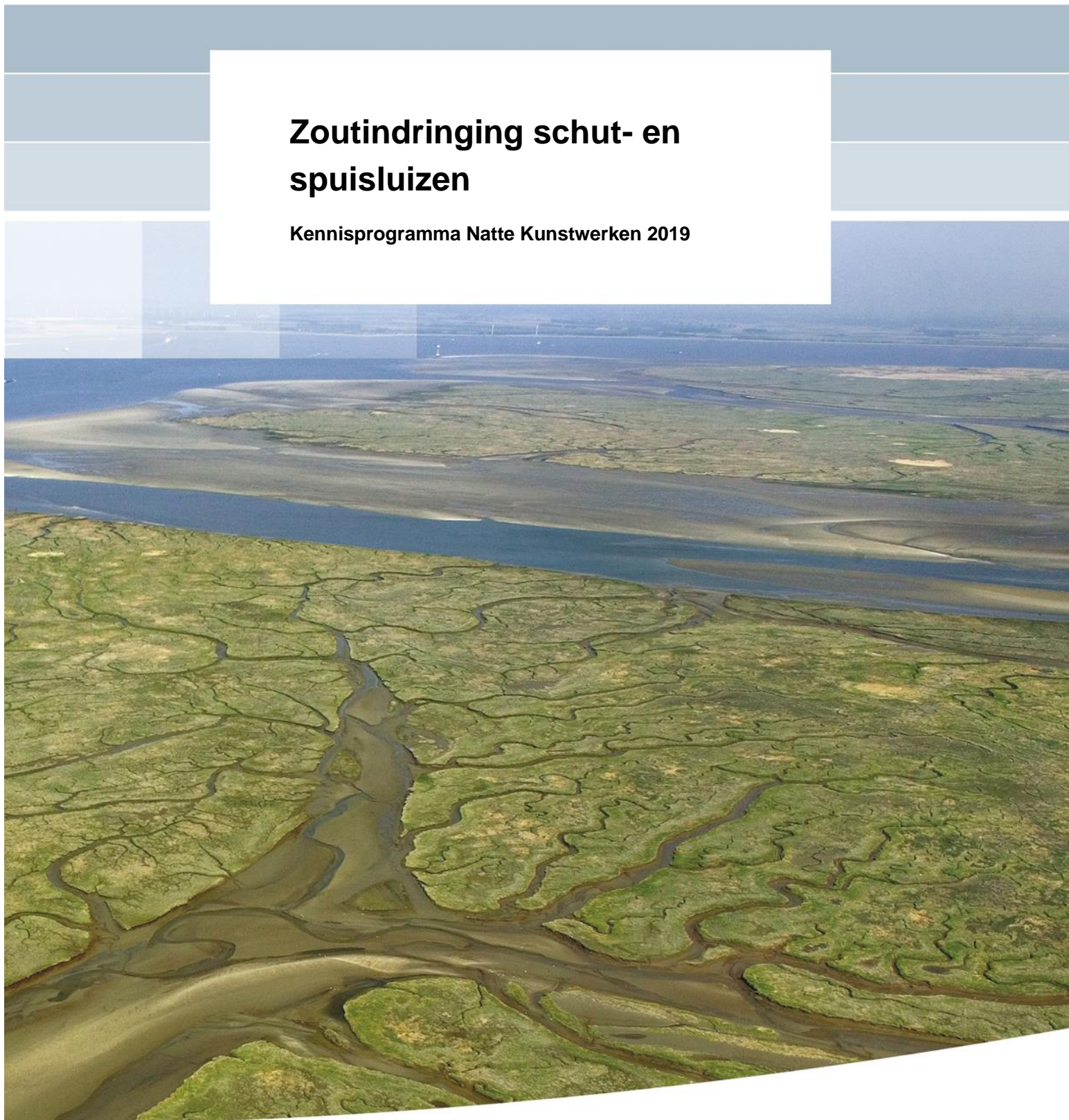
- een verdere uitwerking van een formulering voor de spuisluizen, zoals het gedrag rond kentering, met de Afsluitdijk als pilot;
- de ZSF onderbrengen en praktisch inzetbaar maken in hydrodynamische software voor de zoutverspreiding in netwerken (SOBEK en D-Hydro), samen met een handleiding;
- bepalen van een typische kalibratiefactor door zoutindringing bij verscheidene schutsluizen;
- verdere verkenning van de fout (t.o.v. de ZSF) van de derdegraads polynoom met een tangens hyperbolicus.



Kennisprogramma Natte Kunstwerken
Kennisplan 2019

Zoutindringing schut- en spuisluizen

Kennisprogramma Natte Kunstwerken 2019



Zoutindringing schut- en spuisluizen

Kennisprogramma Natte Kunstwerken 2019

Diederik Vreeken

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Algemeen	1
1.2 Probleemstelling	1
1.3 Resultaat van 2017 en 2018, en doelstelling voor het vervolg	2
1.4 Aanpak en leeswijzer	3
1.5 Definities	3
2 Verbeteringen formulering	5
2.1 Waterverplaatsing door schepen	5
2.2 Spoeldebiet	5
2.3 Waterscherm	6
3 Analyse derdegraads polynoom	7
4 Evaluatie schutpatroon bij Noordersluis IJmuiden	8
4.1 Schutpatronen	8
4.2 Analyse IJmuiden geheel jaar	12
4.3 Conclusie	14
5 Doorontwikkeling implementatie formulering	15
5.1 Van Python naar C	15
5.2 Zowel cyclusgemiddeld als fasegewijs	15
6 Zoutindringing door spuisluisen	16
7 Samenvatting, conclusies, aanbevelingen	17
8 Referenties	18
Bijlage(n)	
A Plan van Aanpak 2019	A-1
B Implementatiedocument	B-1
C Afleiding analytische oplossing met tangens-hyperbolicus	C-1
D Conceptmodellering zouttransport door spuisluisen	D-2

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Het in dit rapport beschreven onderzoek is een voortzetting van onderzoek in 2017 [1] en 2018 [2] en maakt, net als vorige jaren, deel uit van het Kennisprogramma Natte Kunstwerken, voor 2019 beschreven in [3]. Het Kennisprogramma is de praktische uitwerking van de NKWK¹-onderzoekslijn 'Toekomstbestendige Natte Kunstwerken'. In het kennisprogramma werken momenteel Deltares, TNO, Marin en RWS samen aan onderwerpen op het gebied van natte kunstwerken (stuwen, sluizen, 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 [3], '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 was tot op heden niet goed mogelijk: er was geen eenvoudige en tegelijkertijd betrouwbare beschrijving van zoutindringing door kunstwerken beschikbaar, die gemakkelijk gebruikt kan worden in netwerkmodellen voor de verspreiding van het zout.

¹ Nationaal Kennisplatform Water en Klimaat

1.3 Resultaat van 2017 en 2018, 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.

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 [4], 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.

In 2018 is de ZSF geïmplementeerd in een stuk software (stand-alone) om de formulering te testen op consistentie en betrouwbaarheid. Vergelijkingen met een derdegraads polynoom en Wanda-Locks lieten zien dat, bij constante operatie, de ZSF voorspelbare en begrijpelijke resultaten produceert over een range aan condities. Bij een variabele operatie geeft een berekening met de zeesluisformulering op basis van de gemiddelde deur-opentijd een overschatting van het zouttransport. Dit is conform verwachting, en om die reden is er een kalibratiefactor opgenomen in de formulering: een factor (kleiner dan 1) toe te passen op de gemiddelde deur-opentijd, om daarmee de kolk-uitwisseling te beperken. Voor een testmodel van de Noordersluis IJmuiden blijkt de hanteren kalibratiefactor 0,5 à 0,6.

Uit de werkzaamheden van 2018 zijn een aantal vervolgvragen ontstaan. Deze vervolgvragen betreffen o.a. discrepanties tussen Wanda-Locks en de zeesluisformulering, en een mogelijkheid om een kalibratiefactor dichterbij 1 te verkrijgen op basis van patroonanalyse van de schuttingen bij Noordersluis IJmuiden.

Naast schutsluizen kunnen ook spuisluizen een bron zijn van zoutindringing. Dat is tijdens de droogte van 2018 duidelijk geworden. Ook daarbij spelen geometrie en operatie een belangrijke rol. Er is behoefte aan soortgelijke rekenregels voor spuisluizen (o.a. voor het recentelijk

opgestarte programma zeespiegelstijging), zodat ook voor deze objecten een zo werkelijkheidsgetrouw mogelijke zoutlast in de netwerkmodellen kan worden meegenomen.

Als laatste kunnen er buiten het Kennisprogramma Natte Kunstwerken stappen worden gezet naar toepassingen in modelontwikkeling en projecten t.b.v. operationeel waterbeheer, met name voor het Kanaal Gent-Terneuzen en het Volkerak-Zoommeer.

1.4 Aanpak en leeswijzer

De doelstelling voor 2019 is vertaald in een aanpak zoals beschreven in het Plan van Aanpak (Bijlage A) die hieronder kort is weergegeven.

Allereerst zijn er in 2018 een aantal beperkingen in de formulering duidelijk geworden. Dit betreft de invloed van het spoeldebiet, de waterverplaatsing van schepen, en het waterscherm op de zoutlast. De verbetering van deze elementen en de afwegingen daarbij worden besproken in Hoofdstuk 2.

In de vergelijking van de zeesluisformulering met de derdegraads polynoom in 2018 kwam naar voren dat de zeesluisformulering tot hogere zouttransporten leidt. De vraag of de derdegraads polynoom goed is afgeleid, en of de hogere transporten zijn te verklaren, wordt behandeld in Hoofdstuk 3.

De toepassing van de zeesluisformulering op schuttingen bij de Noordersluis IJmuiden leidden tot een kalibratiefactor van 0,5~0,6 om de (gemiddelde) zoutlast van de zeesluisformulering gelijk aan die van Wanda-Locks te krijgen. Mogelijk kan het belang van de kalibratiefactor gereduceerd worden door patronen in de schuttingen mee te nemen, e.g. een dag-nachtpatroon. Deze patroonanalyse en de mogelijke invloed daarvan op o.a. de representatieve deur-opentijd en kalibratiefactor wordt behandeld in Hoofdstuk 4.

Doorontwikkeling van de implementatie van de zeesluisformulering in software wordt behandeld in Hoofdstuk 5.

De verkenning van een formulering voor zoutindringing door spuisluizen komt aan bod in Hoofdstuk 6.

Tenslotte worden in Hoofdstuk 7 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 zoutgehaltes, 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 Verbeteringen formulering

2.1 Waterverplaatsing door schepen

In de formulering van 2018 was het zouttransport door de waterverplaatsing van schepen onafhankelijk van (doch gelijktijdig met) het zouttransport door de kolkuitwisseling [5]. Als gevolg hiervan kon de kolk in de berekening zoeter worden dan de zoete voorhaven, of zouter dan de zoute voorhaven. Dit is niet realistisch, en er zijn twee mogelijke oplossingen geïdentificeerd:

1. Controleren of de saliniteit buiten die van de randvoorwaarden treedt, en vervolgens begrenzen.
2. Waterverplaatsing door schepen en kolkuitwisseling sequentieel beschouwen, zoals in Wanda-Locks.

Beide oplossingen zouden tot gevolg hebben dat de cyclusgemiddelde formulering beschreven in Hoofdstuk 5 van [5] niet meer mogelijk zou zijn. Het zouttransport in de fasen dat de deur geopend is (fase 2 en 4) zou namelijk niet meer een optelsom zijn van de bijdragen van de kolkuitwisseling en waterverplaatsing op de zoutlast. De keuze tussen optie 1 en 2 moet dan gemaakt worden op basis van de accuraatheid van de oplossing, waarbij optie 2 de fysica beter beschrijft dan optie 1. Derhalve is gekozen om optie 2 te implementeren. Dit heeft tot gevolg dat fase 2 en fase 4 nu bestaan uit drie subfasen:

1. Zouttransport door uitvaren schepen
2. Zouttransport door kolkuitwisseling (met of zonder spoeldebiet)
3. Zouttransport door invaren schepen

Tevens is de saliniteit van het water dat richting meer of zee gaat niet altijd meer gelijk aan de saliniteit van de kolk aan het begin van de betreffende fase: aan het eind van iedere subfase is er nu een andere saliniteit waar de volgende subfase mee wordt ingegaan. Door daarna de transporten per sub-fase op een consistente manier te berekenen en op te tellen kunnen ook de cyclus-gemiddelde transporten weer worden bepaald.

Voor meer informatie, zie [6] (opgenomen als Bijlage B van dit rapport), specifiek Paragraaf 3.2 en 3.5.

2.2 Spoeldebiet

Het spoeldebiet zoals beschreven in [5] hield geen rekening met de wisselwerking ervan met de kolkuitwisseling/dichtheidsgolf, waar dit in Wanda-Locks wel wordt gedaan. Deze wisselwerking heeft een behoorlijke invloed op de zoutlast, en omdat een spoeldebiet een populaire maatregel is, is het dus van belang om deze zo goed mogelijk te beschrijven.

Een goede behandeling van het spoeldebiet bleek lastiger dan aanvankelijk gedacht. Er moet namelijk onderscheid gemaakt worden naar verschillende aspecten: de effecten over beide sluishoofden, welke deur er open staat en de verhouding tussen de stroomsnelheid door het spoeldebiet en de loopsnelheid van de kolkuitwisseling. Voor alle situaties moeten zowel het begin van de fase als de eindsituatie (bij een heel lange deur-opentijd) fysisch realistisch zijn.

Vervolgens moeten er, ten behoeve van een overzichtelijke implementatie, keuzes worden gemaakt omtrent vereenvoudigingen.

In Paragraaf 2.6 van [6] wordt in detail beschreven hoe het spoeldebiet nu in de zeesluisformulering is opgenomen.

2.3 Waterscherm

Het waterscherm zoals beschreven in [5] was anders dan in Wanda-Locks. In plaats van proberen de formulering aan te passen is besloten om het waterscherm als maatregel uit de zeesluisformulering te halen. In tegenstelling tot e.g. spoeldebiet en bellenschermen is een waterscherm geen populaire maatregel gebleken: deze wordt tot op heden en, voor zover bekend, in de nabije toekomst nergens ingezet.

3 Analyse derdegraads polynoom

In de vergelijking van de zeesluisformulering met de derdegraads polynoom in [2] kwam naar voren dat de zeesluisformulering tot hogere zouttransporten leidt. Deze derdegraads polynoom is een analytische formulering afgeleid in een eerdere studie [4]. Bij de afleiding van deze analytische formulering is een aantal aannames gedaan, zoals een constante snelheid van de dichtheidsgolf (en geen waterstandsverschil over de sluis). De zeesluisformulering [6] gaat uit van tangens hyperbolicus verloop van de kolkuitwisseling (snelheid dichtheidsgolf wordt steeds langzamer). De vraag is dan of de afleiding van de derdegraads polynoom te herhalen valt indien een dergelijk verloop wordt aangenomen.

Deze analyse is uitgewerkt in het Engels in Bijlage C. De conclusie is dat het gebruik van de tangens-hyperbolicus functie (of een polynomische benadering daarvan) niet formeel tot een analytische oplossing leidt. Het is echter praktisch mogelijk om de derdegraads polynoom zoals in [2] te gebruiken. De exacte of maximale fout t.o.v. de zeesluisformulering zou nog nader in kaart gebracht kunnen worden.

4 Evaluatie schutpatroon bij Noordersluis IJmuiden

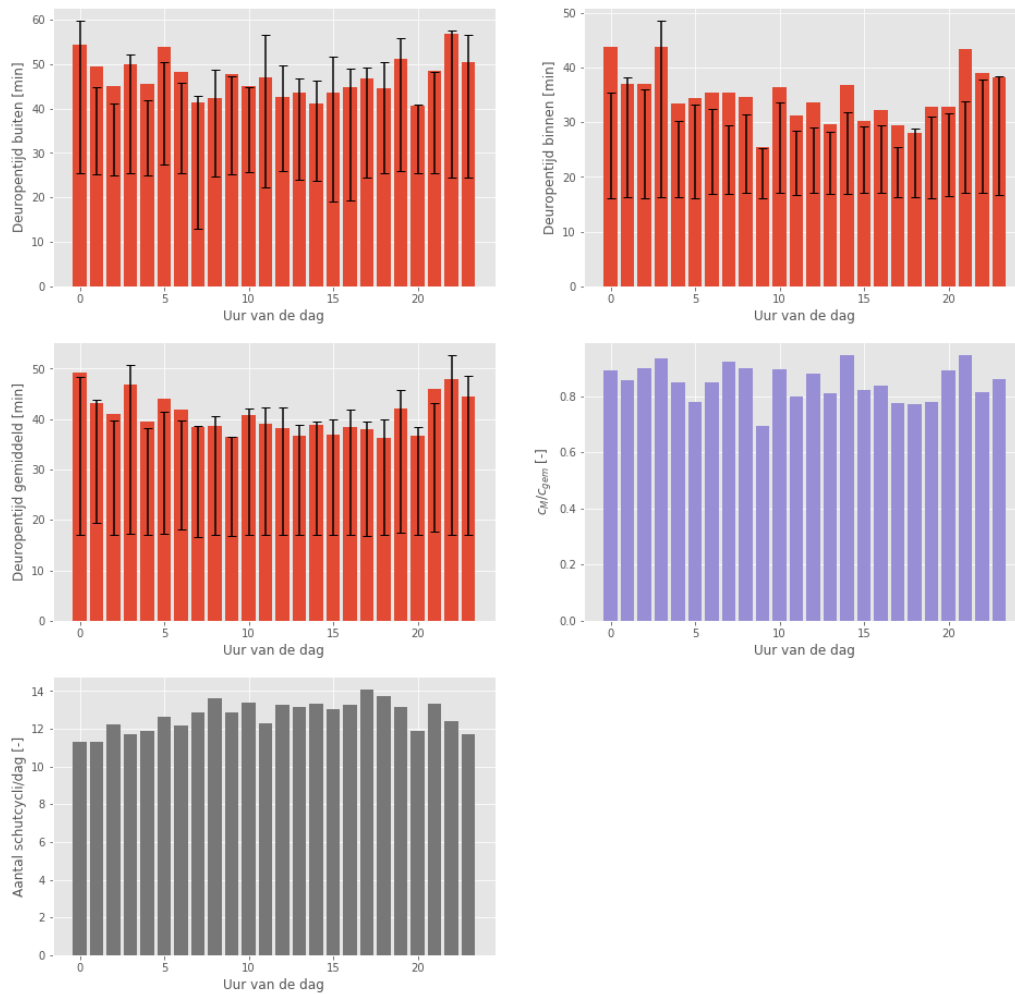
4.1 Schutpatronen

In 2018 (zie [2]) is een vergelijking gemaakt tussen de resultaten van berekeningen met een Wanda-Locks model van de Noordersluis bij IJmuiden en die met de zeesluisformulering (ZSF), op basis van dezelfde invoergegevens. De deur-opentijden die hierbij gehanteerd werden voor de ZSF waren constant verondersteld voor de gehele periode. Er is ook een variant bestudeerd die per dag de gemiddelde deur-opentijd bepaalde, om in te schatten of hiermee de kalibratiefactor veranderde.

Om te kijken of de operatie van de sluisen een zeker patroon in zich heeft die meegenomen kan worden in de ZSF, en daarmee mogelijk met een minder lage kalibratiefactor uit te kunnen, zijn de deur-opentijden/momenten bestudeerd. (Let wel, dit zijn de deurbewegingen zoals ze volgen uit de PMSS simulaties, niet de daadwerkelijke registraties.)

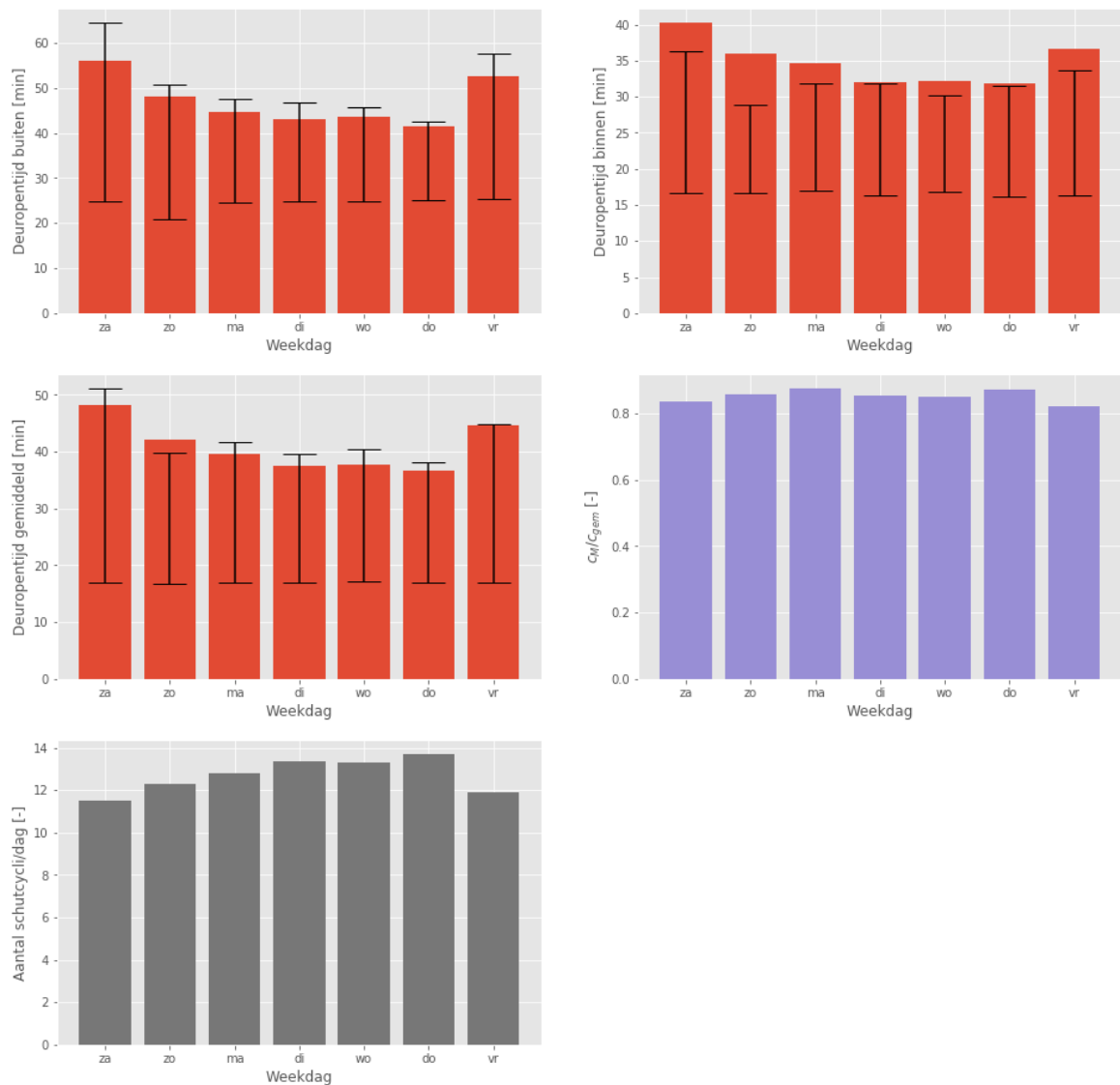
Allereerst is gezocht naar een patroon op basis van het moment van de dag. In onderstaande histogrammen zijn de deur-opentijden weergegeven. De bovenste twee histogrammen geven de gemiddelde deur-opentijd weer aan de buiten (zee) en binnenzijde (kanaal), met de zwarte verticale lijnen die het 25%-75% percentiel aangeven. De onderste drie histogrammen geven dezelfde informatie op andere manieren weer, namelijk de gemiddelde deur-opentijd + onbalans, of het aantal schutcycli per etmaal (inverse van gemiddelde deur-opentijd).

Uit de histogrammen als functie van uur van de dag (zie Figuur 4.1) valt op te maken dat, ondanks een kleine variatie over de dag, er niet een duidelijk dag-/nacht-ritme te herkennen valt. Wel valt op dat de variatie in de deur-opentijden significant is, en tevens groter is dan de variatie in de gemiddelden. Daarnaast is de gemiddelde deur-opentijd, vooral aan de binnenzijde, vaak hoger dan het 75% percentiel. Dit duidt op een (beperkt) aantal zeer lange deur-opentijden. Verder valt op te maken dat de gemiddelde deur-opentijd aan de binnenzijde korter is dan die aan de buitenzijde: de verhouding tussen deze twee tijden (de parameter $c_{M/gem}$) bedraagt ongeveer 0.85.



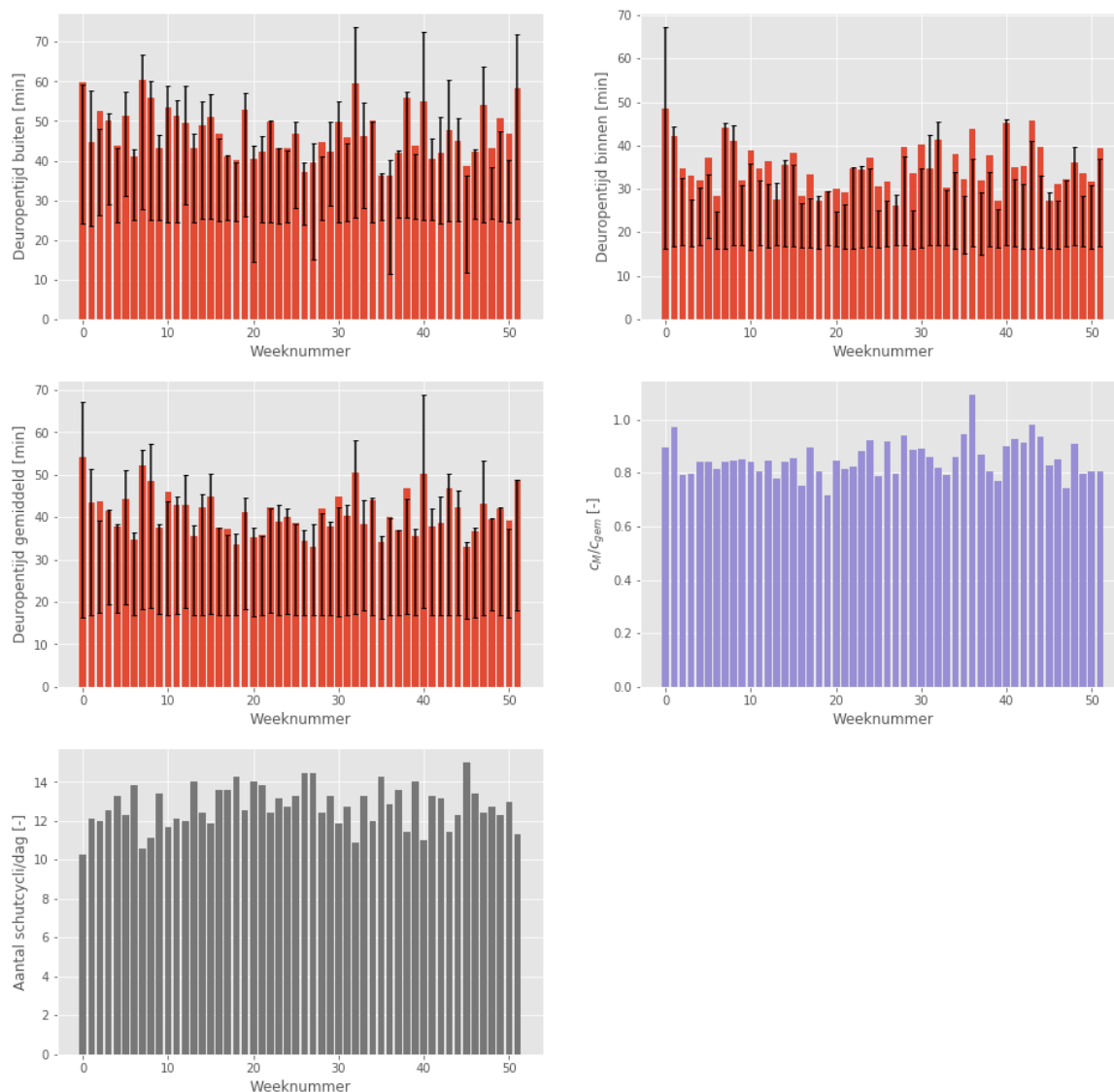
Figuur 4.1 Histogrammen van de deur-opentijden als functie van uur van de dag

Vervolgens is gezocht naar een patroon op weekbasis (zie Figuur 4.2). Hier is een lichtelijke patroon terug te vinden in dat vrijdag en zaterdag rustiger zijn: minder schuttingen, langere deur-opentijden. De variatie van de gemiddelden is echter nog steeds ruim minder dan variatie binnen een bepaalde werkdag.



Figuur 4.2 Histogrammen van de deur-opentijden als functie de weekdag

Als laatste is gekeken naar mogelijke patronen op jaarbasis, e.g. seizoensgebonden, zie Figuur 4.3. Ondanks dat sommige weken aanmerkelijk drukker zijn dan andere weken, is ook hier de variatie binnen de week veel groter dan de variatie tussen de weken.



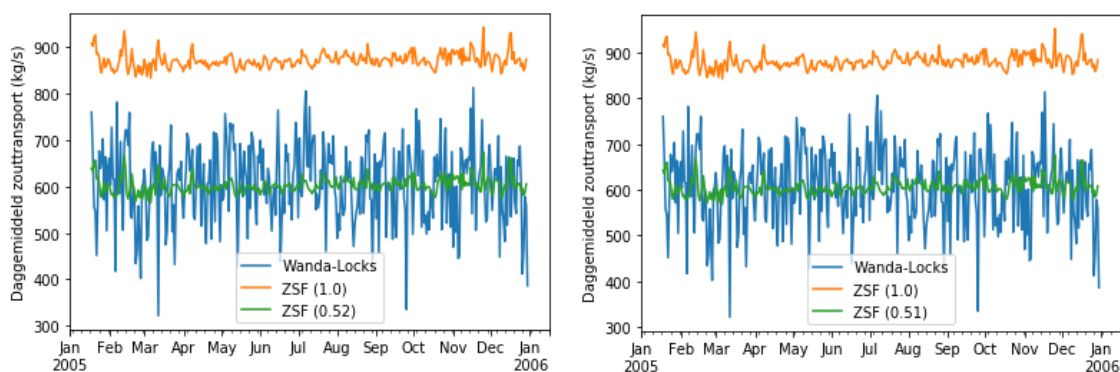
Figuur 4.3 Histogrammen van de deur-opentijden als functie het weeknummer

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat er geen duidelijk patroon herkenbaar is in de deur-opentijden als functie van het uur van de dag, de weekdag, of weeknummer. De variatie van schutting tot schutting is groter dan enig patroon dat zich voordoet op deze intervallen. Een patroon op basis van het moment in de getijcyclus is niet onderzocht, dit zou nog in een vervolg geanalyseerd kunnen worden.

De operatie van de Noordersluis te IJmuiden, zoals beschreven door de simulaties van PMSS (zie [8], [9], [10] en [11]), kan dus het best gekenschetst worden met constante parameters, te weten een gemiddeld aantal schuttingen per etmaal, waaruit een gemiddelde deur-opentijd volgt, in combinatie met de juiste kalibratiefactor, al of niet samen met de asymmetrie-factor. De verdere analyse en vergelijking met Wanda-Locks, beschreven in de volgende paragraaf, zal dan ook daarvan uitgaan.

4.2 Analyse IJmuiden geheel jaar

Zonder duidelijk patronen om mee te nemen, is het volledige jaar (na enige inspeeltijd) door Wanda-Locks berekend en vergeleken met de zeesluisformulering. Dit is gedaan door alle parameters te middelen, dus de gemiddelde deur-opentijd van het binnen- en buitenhoofd. De analyse is gedaan voor een onbalansfactor $C_{M/gem}$ van 0,85 (zoals bepaald uit de deur-opentijden), en voor een onbalansfactor van 1,0 (i.e. deur-opentijd binnenhoofd is gelijk aan die van buitenhoofd).

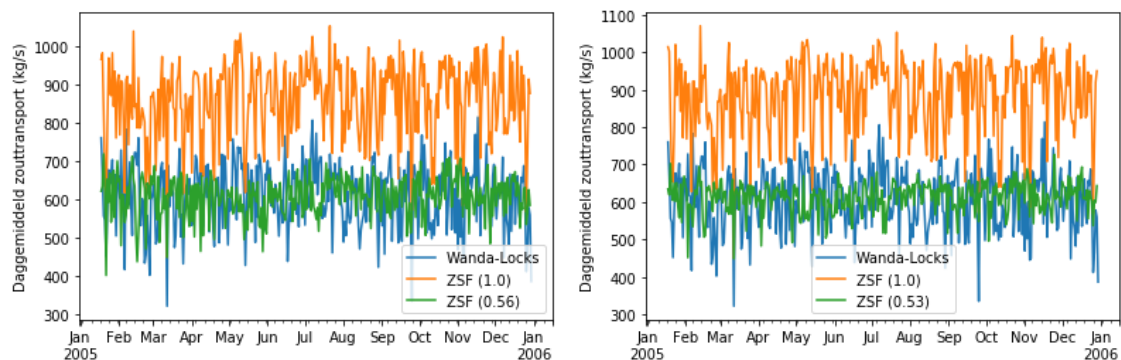


Figuur 4.4 Zoutlast Noordersluis IJmuiden voor Wanda-Locks en de ZSF (kalibratiefactor 1.0 en de beste mogelijke kalibratiefactor), parameters gemiddeld hele periode

In Figuur 4.4 zijn de resultaten van de vergelijking tussen de ZSF en Wanda-Locks weergegeven. De linker grafiek geeft de resultaten weer voor een $C_{m/gem}$ van 0,85, en rechts voor 1,0. De kalibratiefactor die nodig is om gemiddelde zoutlast over het jaar te benaderen verandert van ongeveer 0,52 naar ongeveer 0,51. Bij grotere onbalans zouden we een grotere invloed op de kalibratiefactor verwachten, maar in dit geval is de gevoeligheid voor een $C_{m/gem}$ van 0,85 niet zo groot.

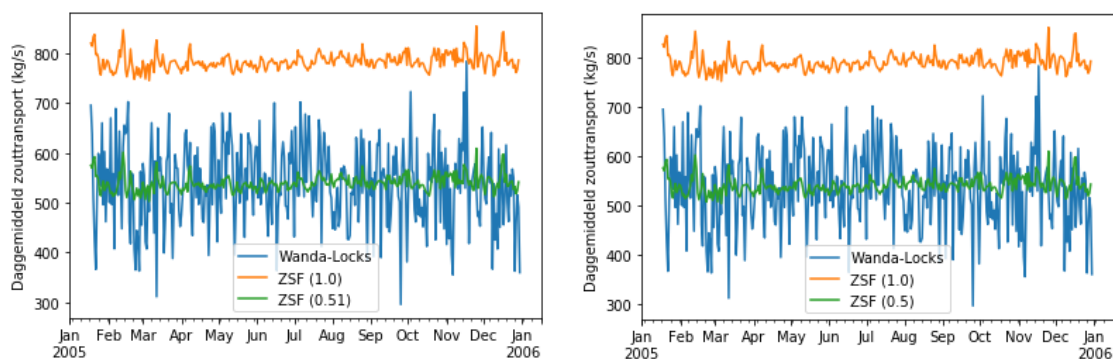
De kalibratiefactor van 0,51 is redelijk laag. De waarschijnlijke reden waarom zo'n lage factor nodig is, is dat de variatie in de deur-opentijd zo groot is. Zoals aangetoond in 2018 (zie [2]), is voor constante operatie (de validatie) het verschil tussen ZSF en Wanda-Locks beperkt.

Ook als we per dag het gemiddelde zouden nemen voor de parameters blijft een relatief kleine kalibratiefactor benodigd:



Figuur 4.5 Zoutlast Noordersluis IJmuiden voor Wanda-Locks en de ZSF (kalibratiefactor 1.0 en de beste mogelijke kalibratiefactor), parameters gemiddeld per dag

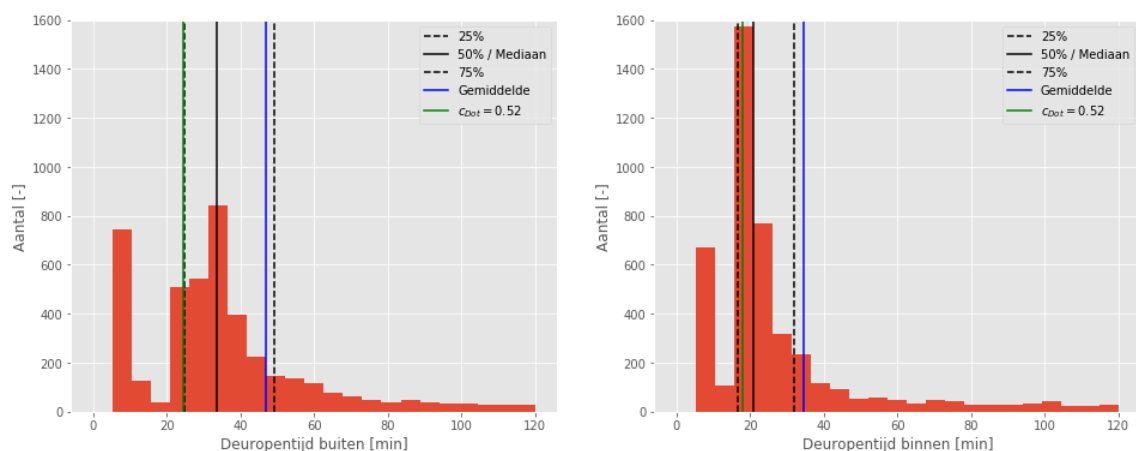
Dit beeld wordt versterkt als we waterverplaatsing meenemen bij de vergelijking. De totale zoutlast wordt wat minder, maar nog steeds blijft een kalibratiefactor van ongeveer 0,5 nodig om een gelijkwaardige gemiddelde zoutlast te verkrijgen als Wanda-Locks.



Figuur 4.6 Zoutlast Noordersluis IJmuiden voor Wanda-Locks en de ZSF (kalibratiefactor 1.0 en de beste mogelijke kalibratiefactor), parameters gemiddeld per dag, inclusief displacement

Het belang van het kiezen van een goede kalibratiefactor is dus onmiskenbaar. De gemiddelde deur-opentijd is blijkbaar niet representatief, maar welke waarde dan wel. In onderstaande Figuur 4.7 is de verdeling van de deur-opentijden weergegeven in blokken van 5 minuten. Ook zijn enkele statistisch relevante waarden weergegeven, evenals de representatieve deur-opentijd ($0,52 \cdot$ gemiddelde) die benodigd is om de jaargemiddelde zoutlast van de ZSF gelijk te krijgen aan die van Wanda-Locks.

Een paar lange deur-opentijden, zeker aan de zeezijde, trekken de gemiddelde waarde sterk omhoog. Ook zijn er veel korte deur-opentijden, waarbij de deuren dus maar kort open staan, e.g. enkel uitvarende schepen en geen invarende schepen. De representatieve deur-opentijd ligt hiermee eerder bij het 25% percentiel, al heeft dit geen onderliggende fysische aanleiding. Een logischere representatieve deur-opentijd zou de mediaan zijn, maar die zou een lichte overschatting in de zoutlast geven.



Figuur 4.7 Verdeling deur-opentijden binnen en buitenhoofd

Samenvattend kan gezegd worden dat een histogram van de deur-opentijden al wel een belangrijk inzicht geeft, maar nog geen absolute zekerheid in het kiezen van de juiste kalibratiefactor.

4.3 Conclusie

Vooralsnog loopt de meest betrouwbare route om tot een goede kalibratiefactor te komen via een vergelijking met een berekening met Wanda-Locks (of als alternatief hiervoor: de fasegewijze inzet van de zeesluisformulering zoals beschreven in Paragraaf 5.2). Voor de Noordersluis van IJmuiden is hiermee een waarde voor de kalibratiefactor bepaald. Deze waarde geldt voor de beschouwde bezettingsgraad van de sluis. De bredere geldigheid ervan zou nader in kaart gebracht kunnen worden.

Om de zeesluisformulering met vertrouwen in te zetten op andere locaties is het gewenst, zoals ook al eerder gesteld, om eenzelfde vergelijkende analyse uit te voeren voor verschillende typische sluisen met typisch (variërend) schutbedrijf. Daartoe zijn gedetailleerde gegevens nodig van de uitgevoerde schuttingen, afkomstig uit simulaties (b.v. de SIVAK-berekeningen zoals uitgevoerd voor de Krammersluizen) of uit registraties.

5 Doorontwikkeling implementatie formulering

5.1 Van Python naar C

In 2018 is de formulering geïmplementeerd in Python, met als invoer- en uitvoerinterface een Excel bestand. Zowel Python als Excel zijn relatief makkelijk toegankelijke omgevingen, en daarmee geschikt voor de eerste verkenningen, maar hebben beperkingen als het gaat om snelheid en bruikbaarheid in andere software.

Met het uiteindelijke doel om de zeesluisformulering op te nemen in software als SOBEK en D-HYDRO, is in 2019 de implementatie omgezet naar een library geschreven in C. Dit heeft als voordeel dat het geheel (1) een stuk sneller draait en (2) software als SOBEK niet nogmaals de zeesluisformulering hoeft te implementeren, maar direct gebruik kan maken van de bestaande implementatie.

De code in de vorm van een library in C moet aangeroepen worden vanuit een interface. De oude Excel interface is herschreven om direct vanuit Excel (via VBA) de library aan te kunnen roepen. Hiermee is het voor de gebruiker nog eenvoudiger om berekeningen uit te voeren, omdat geen extern (buiten Excel) programma/script gestart hoeft te worden. Daarnaast is ook een Python interface ontwikkeld, zodat de zeesluisformulering direct vanuit Python aangeroepen kan worden. Dit is van waarde wanneer in Python gegevens over bijvoorbeeld schuttingen worden verzameld en bewerkt.

De nieuwe Excel interface is gebruikt in [11] voor de berekening van de zoutlast door de sluisen bij Den Oever en Kornwerderzand. De (later in 2019 ontwikkelde) Python interface is gebruikt bij het bepalen zoutlast bij de sluisen van Delfzijl [12].

5.2 Zowel cyclusgemiddeld als fasegewijs

De zeesluisformulering is opgezet om met beperkte gegevens over het schutbedrijf een uitspraak te doen over de (gemiddelde) zoutlast. In de berekening worden de verschillende fases van het schutbedrijf doorlopen in een iteratie, totdat convergentie is bereikt. In het geval er gedetailleerde gegevens over schuttingen c.q. deurbewegingen bekend zijn, kan daarmee ook stapsgewijs de zoutlast uitgerekend worden: de iteratie tot convergentie wordt dan achterwege gelaten. In plaats van cyclusgemiddelde debieten en zoutgehalten, worden dan per fase de transporten (debieten en zoutgehalten) berekend. Met de duur van die fase zijn dan de fase-gemiddelde debieten en de bijbehorende zoutgehalten te berekenen. Op basis hiervan kunnen dan tijdseries worden gemaakt: non-equidistante tijdseries van de (fase-gemiddelde) debieten met bijbehorend zoutgehalte. Zowel voor de kolk naar de voorhaven als van de voorhaven naar de kolk, en dat voor beide sluishoofden.

In 2019 is deze fasegewijze berekening ontwikkeld en toegepast voor de berekening van de zoutlast bij de sluisen van Delfzijl [11]. Hierbij is duidelijk geworden dat de ZSF een goede (en snelle) vervanging voor Wanda-Locks kan zijn voor eenvoudige schutsluisen in situaties waarbij de hydraulica, bijvoorbeeld het verloop van het nivelleren in de tijd, niet van belang is. Of de ZSF ook meer complexe sluisen als de Krammersluisen of Panamasluisen kan beschrijven is nog onzeker.

6 Zoutindringing door spuisluizen

Dit jaar is een literatuur onderzoek uitgevoerd om een theoretisch kader te vinden voor het modelleren van de zoutindringing door spuisluizen. De te beschrijven hydrodynamica speelt zich af in een kleine ruimte. Om geschikt te zijn voor berekeningen over een groot gebied en over langere tijd zal het gaan om subgrid-processen van een systeem model dichtbij een spuisluis, zie Bijlage D.

De keuze is gemaakt voor een empirische relatie uit Fan (2008) die gegeneraliseerd kan worden voor een arbitrair niveau van de spuiopening en voor zowel sterk gestratificeerde condities als condities met een lineair verloop van dichtheid over de hoogte. Deze methode zou in staat moeten zijn om enige selectieve onttrekking van de zoute laag mee te nemen, maar vooral het moment goed weer te geven dat er niet meer volledig selectief onttrokken wordt. De mate van meegevoerd zoetwater van de bovenste lagen wordt dan met behulp van empirische coëfficiënten uit lab experimenten in de literatuur bepaald. Deze formulering is belangrijk voor een nauwkeurig model van de hoeveelheid afgevoerd zout bij langdurig spuien, of stationaire stromingen.

De tijdsafhankelijke aspecten die te maken hebben met de operatie van de schuiven in de spuisluis (zoals bijvoorbeeld bij het kenteren van het getij voor visvriendelijke spuien) moeten in een volgende fase nog onderzocht worden. Het voorstel is om deze als prioriteit in het Kennis Programma Natte Kunstwerken van 2020 op te nemen, bijvoorbeeld met de Afsluitdijk als pilot case.

7 Samenvatting, conclusies, aanbevelingen

Nadat in 2017 en 2018 de basis is gelegd voor de zeesluisformulering, is deze formulering in 2019 doorontwikkeld. Er zijn verbeteringen aangebracht aan de bepaling van de zoutlast door de waterverplaatsing van schepen en aan het rekenen met een spoeldebiet als maatregel tegen zoutindringing (Hoofdstuk 2). Verder is de software herschreven als C-library, zodat deze makkelijk opneembaar is in e.g. SOBEK zonder dat de formulering opnieuw geïmplementeerd hoeft te worden (Hoofdstuk 5). Tenslotte is, naast de berekening van cyclus-gemiddelde debieten, ook het berekenen per schutfase mogelijk gemaakt.

Verder zijn vragen en aandachtspunten uit 2018 beantwoord. Zo blijken er geen schutpatronen te zijn bij de Noordersluis IJmuiden die de zoutlast zoals berekend door de zeesluisformulering (zonder kalibratiefactor) dichter bij de gemiddelde zoutlast van Wanda-Locks brengen (Hoofdstuk 4). Het belang van een goede kalibratiefactor is daarmee nogmaals bevestigd. Om ook voor andere typische sluisen een goede waarde voor de kalibratiefactor te verkrijgen zijn dezelfde vergelijkende analyses nodig: berekeningen waarin door de schutfasen heen wordt gerekend (Wanda-locks of fasegewijs met de ZSF), vergelijken met berekeningen op basis van de cyclusgemiddelde debieten.

Daarnaast is de afleiding van een analytische oplossing (derdegraads polynoom) met een tangens-hyperbolicus gecontroleerd. Ondanks dat de afleiding formeel niet klopt, is deze praktisch gezien nog steeds inzetbaar (Hoofdstuk 3). Als laatste zijn er stappen genomen om een formulering voor zoutindringing op te zetten voor spuisluizen (Hoofdstuk 6).

Het werk van dit jaar heeft verder aangetoond dat de ZSF een heel nuttige tool is voor het onderzoeken van de zoutlek bij schutsluizen. De ontwikkelingen van de afgelopen jaren hebben een model en implementatie opgeleverd die al in projecten buiten het Kennis Programma gebruikt worden. De verkenningen met berekeningen bij IJmuiden met de ZSF en Wanda-Locks geven ook inzichten in hoe het model het best ingezet kan worden, met name welke waarde van de kalibratiefactor geschikt is voor dit type sluis. Verdere ontwikkelingen van de ZSF zullen het model aanscherpen maar het is nu al klaar voor gebruik.

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

- een verdere uitwerking van een formulering voor de spuisluizen, zoals het gedrag rond kentering, met de Afsluitdijk als pilot.
- de zeesluisformulering onderbrengen en praktisch inzetbaar maken in SOBEK en D-Hydro, samen met een handleiding.
- bepalen van typische kalibratiefactor door zoutindringing bij verscheidene schutsluizen te berekenen
- verdere verkenning van de fout (t.o.v. de zeesluisformulering) van de derdegraads polynoom met een tangens hyperbolicus

8 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] “Zoutindringing door schutsluizen, Opzet en verkenning Zeesluisformulering, Kennisprogramma Natte Kunstwerken 2018”, Otto Weiler, 11200741-003-HYE-0006-v2.0, Deltares, juni 2019
- [3] “Kennisprogramma Natte Kunstwerken, Kennisplan 2019”, Definitief, 28 januari 2019
- [4] “Vorstudie : ontwerpstudie en praktijkproef zoutlekbeperking Volkeraksluizen : model voor zoutvrachtberekeningen”, R.E. Uittenbogaard, 1201226-011, Deltares, juni 2010
- [5] “Zeesluisformulering, implementatie document (2018)”, O. Weiler, 11200741-000-HYE-0004-v2, februari 2019
- [6] “Zeesluisformulering, implementatie document (2019)”, O. Weiler, T. Vreeken, 11200741-000-HYE-0004-v1, november 2019, Opgenomen als Bijlage B
- [7] “Simulatiestudie Capaciteit Zeetoegang Amsterdam-Noordzeekanaalgebied, Modelbeschrijving en resultaten”, ir. R. Groenveld, PMSS, januari 2008
- [8] “Wijzigingen simulatiemodel voor Planstudie; Modelwijzigingen en simulatieresultaten voor validatie”. ir. R. Groenveld, PMSS, april 2009.
- [9] “Berekening zoutindringing IJmuiden met WANDA-Locks”, Matthijs Rietveld, 1220309, Deltares, oktober 2016, Opgenomen in [10] als Bijlage K
- [10] “Selectieve Onttrekking IJmuiden, Fase 1 - Studie naar hydraulische eisen en verificatie”; Arnout Bijlsma, Otto Weiler, 11200215-000, Deltares, september 2017
- [11] “Verkenning noodmaatregelen verzilting IJsselmeer”, O. Weiler, 11203735-005-ZWS-0002-v2.0, oktober 2019
- [12] “Zeesluizen Farmsum – zoutlast op het Eemskanaal”, O. Weiler, T. Vreeken, 11203735-012-ZWS-0003-v0.1, oktober 2019

B Implementatiedocument

Memo

Aan
RWS-WVL

Datum
14 november 2019

Kenmerk
11200741-000-HYE-0004

Aantal pagina's
45

Van
Otto Weiler

Doorkiesnummer
+31(0)88 335 8358

E-mail
Otto.Weiler@deltares.nl

Onderwerp
Zeesluisformulering, implementatie document

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.

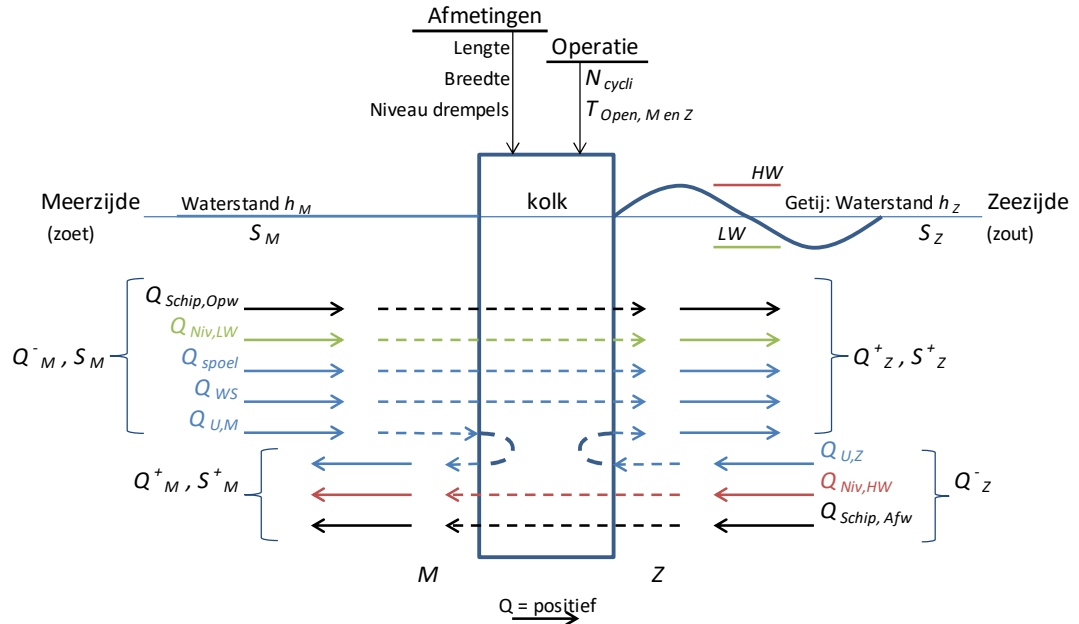
1.2 Aanpak en modelconcept

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.

Indien er registraties beschikbaar zijn van o.a. de deurbewegingen, kan per fase van de schutcyclus worden bepaald wat in die betreffende fase de transporten zijn over beide sluishoofden. Zo kan op basis van historische registraties worden uitgerekend wat de zouttransporten zijn geweest.

Indien geen registraties beschikbaar zijn, dan kan een cyclus-gemiddeld transport worden uitgerekend op basis van enkele kentallen van de sluis(operatie). Door voor elk sluishoofd per richting (in of uit) de volumes van de schutfases bij elkaar op te tellen worden de totale volumes gevonden per schutcyclus, en kunnen ook de bijbehorende saliniteiten worden berekend. 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 sluis kolk ontstaat als gevolg van het schutproces. 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 weergeven 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 3), 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 3 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 twaalf vergelijkingen met twaalf 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.

1.4 Versies

Hieronder worden de belangrijkste wijzigingen in het implementatiedocument weergegeven t.o.v. voorgaande versies:

Versie 3 (Juni 2019)

- Beschrijving van de berekening van de lozingen en onttrekkingen en de bijbehorende saliniteiten per schutfase.
- Het splitsen van de processen in LW2/HW2 en LW4/HW4 in Hoofdstuk 3. In plaats van één fase met een bijbehorende start en eindsaliniteit, zijn er nu 3 subfases; het uitvaren van schepen, de kolkuitwisseling (met of zonder spoeldebiet), en het invaren van schepen. Met deze aanpak wordt voorkomen dat de saliniteit van de kolk lager wordt dan die van Meerszijde of zouter dan Zeeszijde. Deze subfases aanpak lijkt op de aanpak die gehanteerd wordt in Wanda-Locks, zie ook [2].
- In Hoofdstuk 4 is de uitsplitsing van het totale massatransport in volumes en saliniteiten weggehaald. Met de extra subfases en daarbij behorende saliniteiten is het niet nuttig meer om dit uit te schrijven.
- Beschrijving oplossen d.m.v. stelsel van vergelijkingen in Paragraaf 5.2 gereduceerd, omdat de iteratieve aanpak praktischer is. In plaats daarvan wordt verwezen naar de formulering en oplosmethode van de “voorganger” van de zeesluisformulering in [1].
- De bespreking van het waterscherm is beperkt tot de definitie ervan. Verdere uitwerking is verwijderd, omdat een waterscherm in de praktijk niet wordt overwogen als maatregel.

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 zoetere 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, 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. Hetzelfde 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.

In dit document wordt het gebruik van een waterscherm niet verder uitgewerkt, vanwege de beperkte toepassing in de praktijk, en omdat een spoeldebiet de voorkeur heeft als het om inzet van (extra) zoet water gaat.

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.

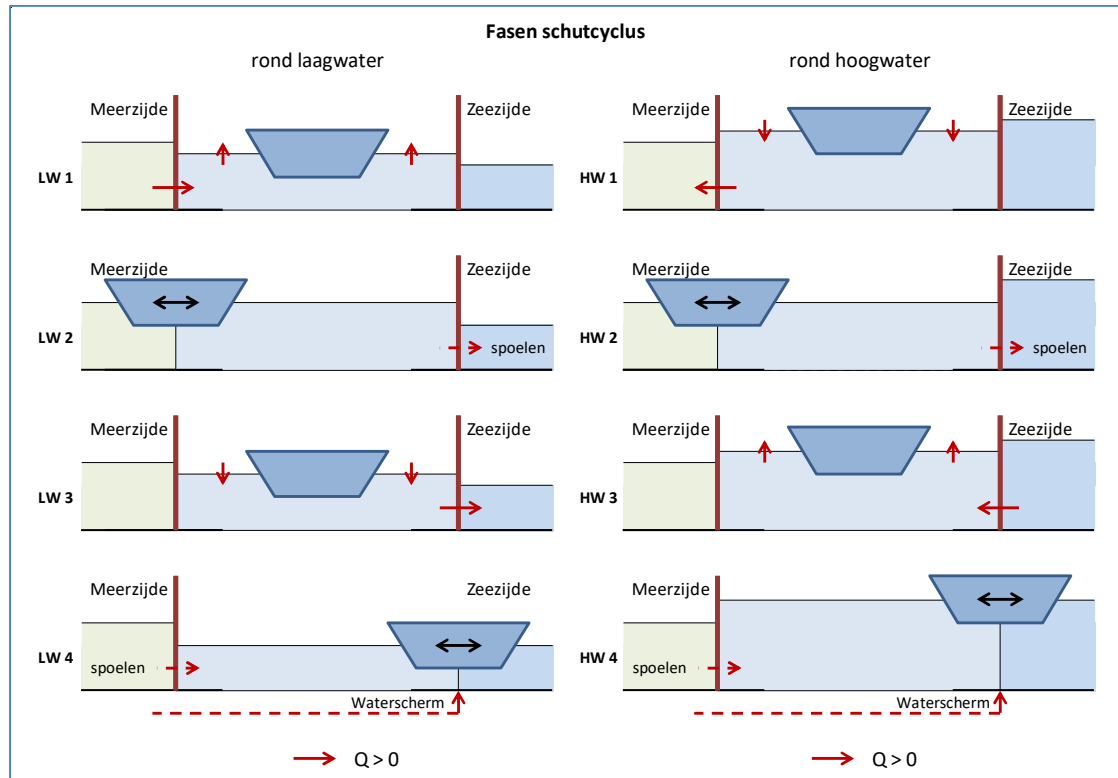
De beide zijden van de sluis zouden (logischerwijs) aan te duiden zijn als de zoute en de zoete zijde. Echter, omdat beide woorden met de letter 'Z' beginnen is dat niet handig. In aansluiting op eerdere studies, waarbij de zoete zijde een meer was, is gekozen voor de benaming 'Zeezijde' en 'Meerzijde'. 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 [kg/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 een sluishoofd in [kg/m³], deze waarden zijn i.h.a. beschikbaar in een netwerkmodel; in de stand-alone versie wordt hiervoor de UNESCO-formulering toegepast;

$\bar{\rho}_{MZ}$: de gemiddelde dichtheid van het water aan de meerzijde en de zeezijde [kg/m³], deze waarden zijn i.h.a. beschikbaar in een netwerkmodel; in de stand-alone versie wordt hiervoor de UNESCO-formulering toegepast;

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, danwel in het sluishoofd in [m], waarbij de waterstand van een van beide kanten geldt:

$$\begin{aligned} H_M &= h_M - z_K \\ H_Z &= h_Z - z_K \end{aligned} \quad (1)$$

V_K : volume van de kolk in [m³], bij een bepaalde waterstand in de kolk:

$$\begin{aligned} V_{K,M} &= L_K B_K H_M \\ V_{K,Z} &= L_K B_K H_Z \end{aligned} \quad (2)$$

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:

$$L_{K,eff} = L_K \quad (3)$$

en:

$$H_{M,eff} = H_M \quad \text{en} \quad H_{Z,eff} = H_Z \quad (4)$$

en:

$$V_{K,M,eff} = V_{K,M} \quad \text{en} \quad V_{K,Z,eff} = V_{K,Z} \quad (5)$$

2.4.3 Operatie

- $T_{Bedrijf}$: 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 7.6;
- N_{Cycli} : schutfrequentie: het aantal schutcycli (heen en weer) per etmaal [-]; default: 12
- T_{Deur} : de tijd nodig voor het bewegen (openen of sluiten) van de sluisdeuren [min] default: 5 min
- T_{Niv} : de gemiddelde tijd nodig voor het nivelleren van de sluis kolk [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_{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 (9) hieronder; default: 1 (conservatief), range 0 - 2 (grenzen nader te verifiëren)

Hieruit volgen:

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

$$T_{Cyclus} = \frac{T_{Bedrijf} \cdot 60 \cdot 60}{N_{Cycli}} \quad (6)$$

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

$$T_{Open, Gem} = \frac{1}{2} T_{Cyclus} - (T_{Niv} + \frac{2}{2} T_{Deur}) \cdot 60 \quad (7)$$

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_{Open} : de representatieve deur-opentijd [s]

$$T_{Open} = c_{Dot} T_{Open, Gem} \quad (8)$$

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

$$\begin{aligned} T_{Open, M} &= c_{M/Gem} T_{Open} \\ T_{Open, Z} &= (2 - c_{M/Gem}) T_{Open} \end{aligned} \quad (9)$$

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 formule 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;

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:

$$\text{LW: } V_{Niv,LW} = L_K B_K (h_M - h_Z) , V_{Niv,HW} = 0 \quad (10)$$

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

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.

$$V_U = V_K U = V_K \tanh \left(\frac{T_{Open}}{T_{LE}} \right) \quad (12)$$

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.

$$c_i = \frac{1}{2} \sqrt{g'H} = \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} H} \approx \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{0,8\Delta S}{\bar{\rho}_{MZ}} H} \quad (13)$$

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).

Voor $\bar{\rho}$ zou een waarde afgeleid kunnen worden uit de zoutgehalten aan weerskanten van de sluisdeur, gebruikmakend van de UNESCO-formulering. Door een vaste waarde af te leiden uit de randvoorwaarden (het gemiddelde van de zoutgehalten aan weerszijden van de sluis $\bar{\rho}_{MZ}$) wordt echter een zeer kleine fout geïntroduceerd.

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

$$T_{LE} = 2L/c_i = \frac{4L}{\sqrt{g \frac{0,8\Delta S}{\bar{\rho}_{MZ}} H}} \quad (14)$$

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.

Bellenschermen

De effectiviteit van een bellenscherm wordt uitgedrukt in een **doorlaatfractie** η . 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:

$$V_U = V_K U = V_K \tanh\left(\frac{\eta T_{Open}}{T_{LE}}\right) \quad (15)$$

N.B. 1:

Deze manier om de η 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.

2.6 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 zou hiervoor over het algemeen een pomp nodig zijn, en zal het spoeldebiet in de praktijk daarom 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).

$$\text{LW: } Q_{\text{Spoel}} = Q_{\text{Spoel,LW}} \quad (16)$$

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

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:

$$V_{\text{Spoel}} = Q_{\text{Spoel}} (T_{\text{Open,M}} + T_{\text{Open,Z}}) \quad (18)$$

In de praktijk zal tijdens het invaren van schepen als de deur naar Meerzijde open staat ook niet gespoeld worden om schepen veilig te kunnen laten afmeren. In de Zeesluisformulering kan dit onderscheid niet worden gemaakt, en vindt het spoelen plaats gedurende de gehele deur-opentijd.

Spoeldebiet heeft interactie met de dichtheidsgolf en de schepen. Voor de onderstaande bespreking van het spoeldebiet gaan we uit van een kolk die echter geen schepen meer bevat.

We gaan over het algemeen uit van een simpele superpositie van de snelheid van de dichtheidsgolf en de snelheid van het spoeldebiet, net als Wanda-Locks dat doet. Dit heeft gevolgen voor het maximaal uitwisselbaar volume door de dichtheidsgolf, die hieronder verder worden toegelicht aan de hand van vier verschillende scenario's. Deze scenario's verschillen in de sterkte van het spoeldebiet (in verhouding tot die van de dichtheidsgolf):

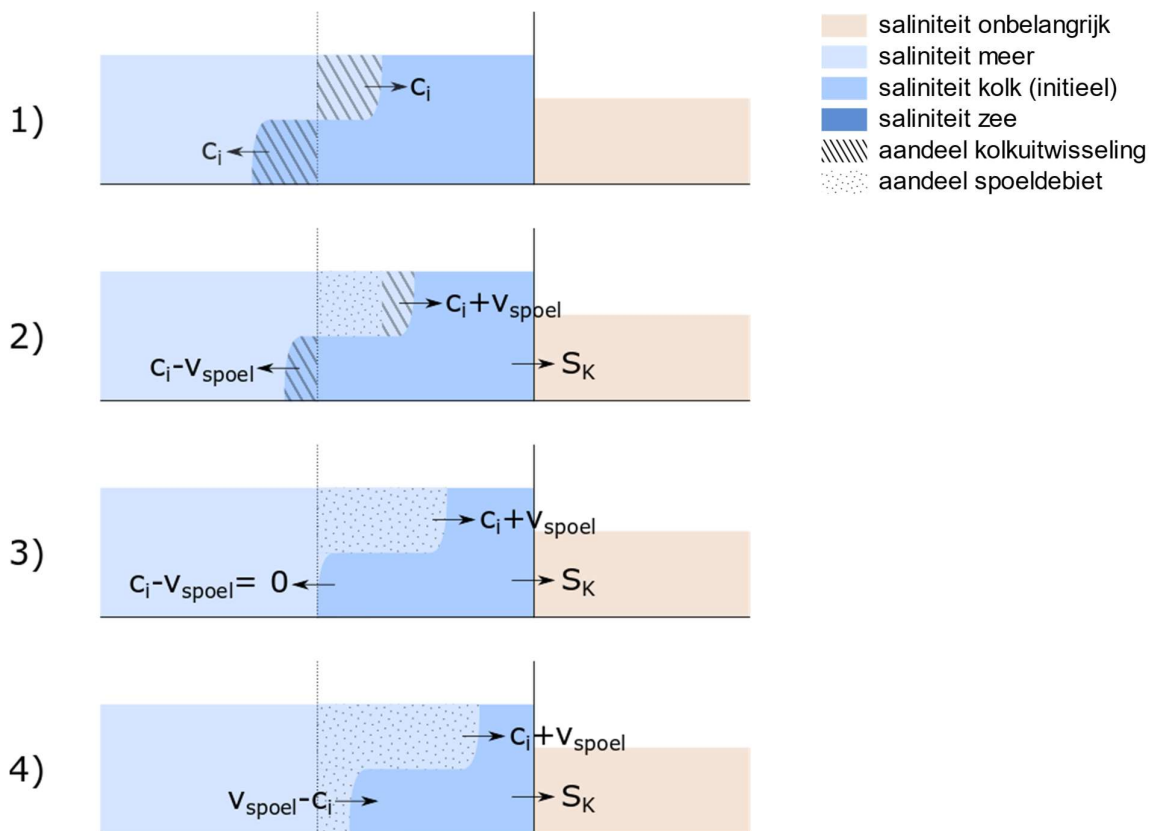
- 1 Geen spoeldebiet
- 2 Snelheid van spoeldebiet lager dan die van de dichtheidsgolf: $v_{\text{spoel}} = 0.5 \cdot c_i$
- 3 Snelheid van spoeldebiet is gelijk aan die van de dichtheidsgolf: $v_{\text{spoel}} = c_i$
- 4 Snelheid van spoeldebiet hoger dan die van de dichtheidsgolf: $v_{\text{spoel}} = 1.5 \cdot c_i$

Voor elk scenario beschouwen we de ingaande golf, de gereflecteerde golf, en de eindsituatie bij oneindig lange deur-opentijd.

Omdat de interactie tussen spoeldebiet en dichtheidsgolf anders is voor Meerzijde en Zeezijde worden ze apart behandeld.

2.6.1 Spoeldebiet Meerzijde

Ingaande golf



Figuur 2.2 Schematisch overzicht van ingaande dichtheidsgolf als functie van het spoeldebiet

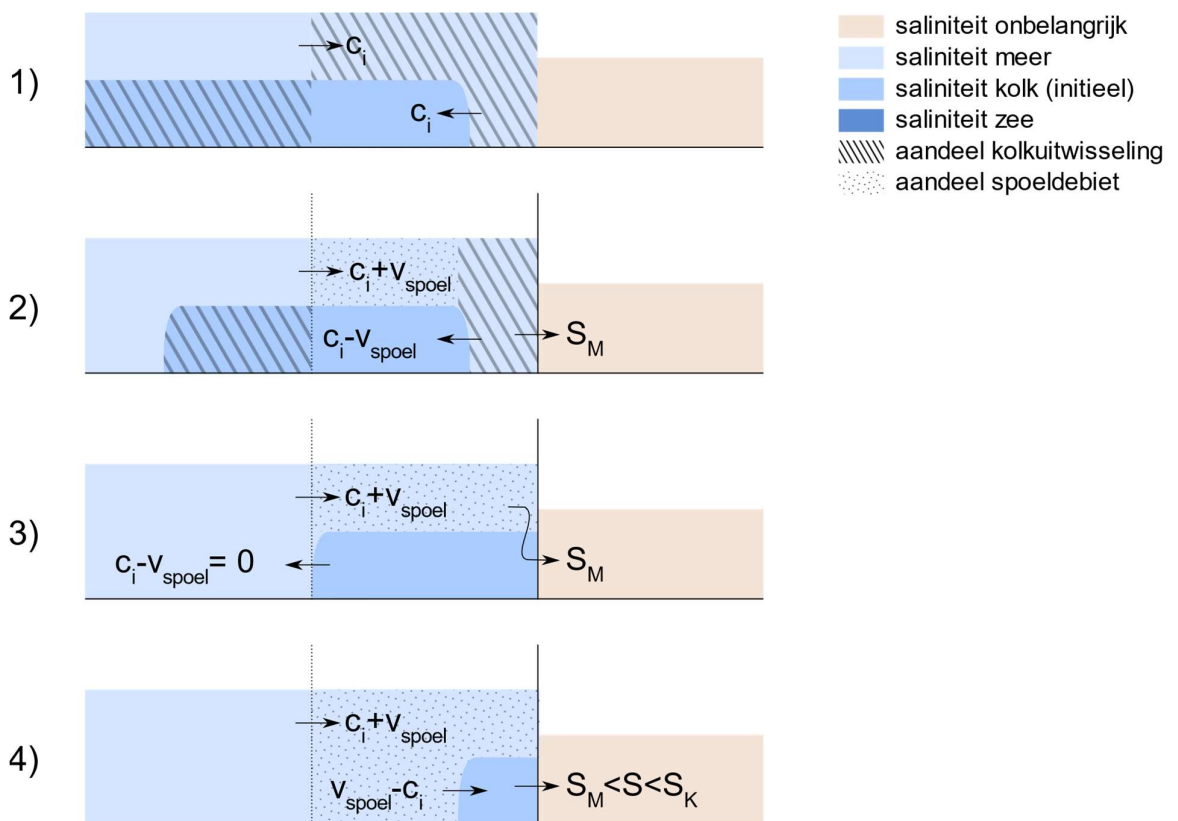
In Scenario 1 is kolkuitwisseling weergegeven zonder spoeldebiet, zoals beschreven in Paragraaf 2.5.2. Het water dat wordt uitgewisseld tussen kolk en zoete voorhavens is volledig toe te schrijven aan de dichtheidsgolf, die met snelheid c_i loopt.

In Scenario 2 is te zien wat er gebeurt als er wordt gespoeld met een snelheid lager dan die van de dichtheidsgolf. Het kolkwater dat over het grensvlak van de deur naar Meerzijde gaat kan daar enkel komen door de **kolkuitwisseling**. Een even grote bijdrage van de kolkuitwisseling is er in de kolk, maar een ander deel van de verzoeting in de kolk komt door

het spoeldebiet. In het geval van een spoelsnelheid van $0.5 c_i$ is de verhouding 2/3 spoeldebiet, en 1/3 kolkuitwisseling.

In Scenario 3 en 4 is te zien water er gebeurt als de snelheid van het spoeldebiet de snelheid van de dichtheidsgolf evenaart en overstijgt. De dichtheidsgolf krijgt in dit geval geen kans om de kolk uit te lopen, en dus zeggen we dat er geen kolkuitwisseling heeft plaatsgevonden. De verzoeting van de kolk is dan volledig toe te schrijven aan het spoeldebiet.

Gereflecteerde golf



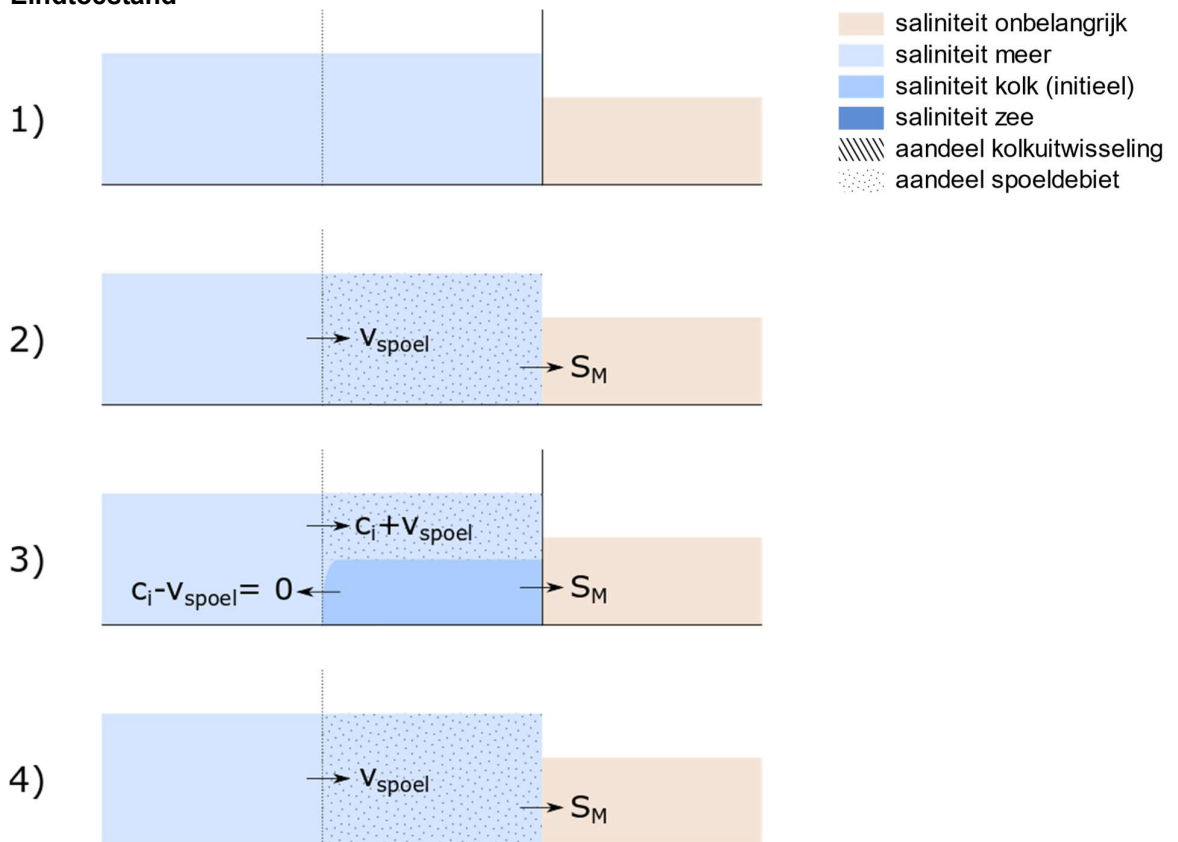
Figuur 2.3 Schematisch overzicht van reflecterende dichtheidsgolf als functie van het spoeldebiet

Als er geen sprake is van een spoeldebiet zoals in Scenario 1, is het tempo van de verzoeting van de kolk na reflectie gelijk aan die bij een ingaande golf. Dit geldt als we uitgaan van de snelheden zoals beschreven in bovenstaande figuur. In Paragraaf 2.5.2 is de aanpak met een tangens hyperbolicus beschreven, wat impliceert dat deze snelheid langzaam (maar continu) steeds lager wordt.

In Scenario 2 is te zien wat er gebeurt als er een spoeldebiet zou zijn. Waarbij er bij een ingaande golf nog water met saliniteit S_K de kolk uitgaat richting Zeezijde, is dat nu water met saliniteit S_M geworden. Dit betekent dat de verzoeting in de kolk in deze fase enkel schaalt met de snelheid van de uittredende (geremde) dichtheidsgolf, want al het inkomende spoeldebiet met saliniteit S_M gaat er ook weer bij Zeezijde uit. In tegenstelling tot Scenario 1 is er, als we uitgaan van de geschetste situatie, dus een abrupte overgang in het tempo waarmee de kolk verzoet. Na reflectie verzoet de kolk in Scenario 2 langzamer dan bij ingaande golf.

Voor Scenario 3 geldt vanuit continuïteit dat het debiet dat de kolk uitgaat richting Zeezijde de saliniteit heeft van het meer. Voor Scenario 4 gaat er een mengsel van kolkwater en meerwater naar buiten, en ligt de saliniteit van dit water dus ergens tussen deze twee waarden.

Eindtoestand



Figuur 2.4 Schematisch overzicht van eindsituatie als functie van het spoeldebiet

In het hypothetische geval dat de deur zeer lang openstaat is de eindtoestand in de meeste gevallen een volledig zoete kolk. Enkel voor Scenario 3 is er nog steeds sprake van een zoute onderlaag. Op basis van enkel superpositie van snelheden blijft deze onderlaag namelijk stilstaan. In de werkelijkheid zal menging op de grenslaag ervoor zorgen dat deze laag langzaam erodeert, dusdanig dat ook in dit geval een volledig zoete kolk zou ontstaan.

Vereenvoudiging en formulering

In voorgaande secties is besproken hoe de ingaande en reflecterende golf zich gedragen als we uitgaan van superpositie van snelheden. In Paragraaf 2.5.2 is de kolkuitwisseling zonder spoeldebiet (scenario 1) al uitgewerkt in formules. Waar alle scenario's voor ingaande golf nog duidelijk op dezelfde wijze beschreven zouden kunnen worden, is dit niet meer zo makkelijk voor een terugkerende golf of de eindsituatie. Er zou een abrupte overgang zijn in de snelheid waarmee de kolk verzoet, evenals dat de saliniteit van het spoelwater naar Zeezijde plots

verandert naar een nog onbekende waarde. Daarnaast is in de bovenstaande bespreking erosie/menging niet meegenomen, die in werkelijkheid wel degelijk zullen optreden.

Ten behoeve van een eenvoudige formulering doen we dan de volgende aannames:

- De eindsituatie is altijd een volledig zoete kolk (zoals in Scenario 1, 2 en 4). Hiermee liggen we dichterbij de werkelijkheid dan dat de consequentie zou zijn van enkel het (theoretische) principe van superpositie.
- De aanvankelijke snelheid van kolkuitwisseling (bij ingaande golf) schaaft met de verhouding tot het spoeldebiet. Dit tempo houden we vast, en laten we met een tangens hyperbolicus net als in Paragraaf 2.5.2 langzaam naar nul lopen.
- De snelheid van verzoeting door spoeldebiet is constant. Met andere woorden, het water dat de kolk ingaat door spoeldebiet heeft de saliniteit van het meer, en de saliniteit van het spoelwater dat naar Zeezijde gaat heeft de saliniteit van de kolk bij deur openen. Zodra de kolk volledig zoet is, is de verzoeting door spoeldebiet nul, en schakelt de saliniteit richting Zeezijde naar die van het Meer (gelijk aan de kolk op dat moment).

Als we dit vangen in formules, dan zien we dat de fractie kolkuitwisseling in Scenario 2 lineair schaaft met de verhouding van het spoelsnelheid tot de snelheid van de dichtheidsgolf, tot de situatie van Scenario 3 wordt bereikt:

$$f_{LE, Spoel} = \max\left(\frac{c_i - v_{spoel}}{c_i}, 0\right) \quad (19)$$

Dit leidt dan tot de volgende nieuwe vergelijking voor het uitgewisselde volume door kolkuitwisseling (met V_U zoals bepaald in Paragraaf 2.5.2) :

$$V_{U,M} = f_{LE, Spoel} V_U \quad (20)$$

Met deze versimpelingen wordt de kolk sneller zoet dan in werkelijkheid, maar er gaat ook minder zout naar de zoete zijde. Hoe conservatief of optimistisch de formulering daarmee is in de bepaling van de zoutlast (en zoetlast), is niet bekend. Dit wordt ook benoemd als aandachtspunt in Hoofdstuk 7.

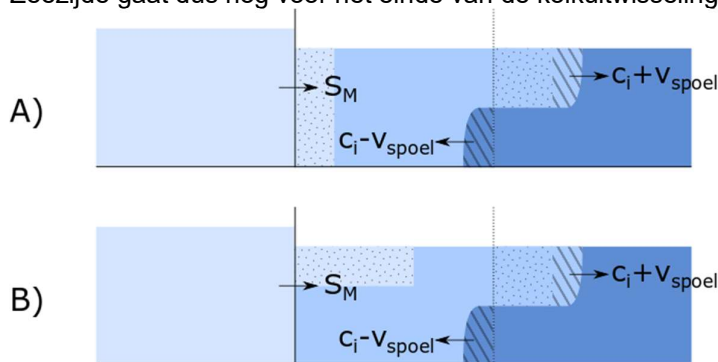
Voor Scenario 2 t/m 4 geldt tevens dat het spoeldebiet het volgende volume verplaatst

$$V_{Spoel} = Q_{Spoel} T_{Open,M} \quad (21)$$

De saliniteit van dit spoeldebiet is altijd S_M over het grensvlak tussen Meerzijde en kolk. Over het grensvlak tussen kolk en Zeezijde is de saliniteit aanvankelijk S_K , overschakelend naar S_M , zodra de kolk volledig zoet is. In Scenario 3 en 4, waar er in tegenstelling tot Scenario 1 en 2 geen verzoeting van de kolk optreedt door kolkuitwisseling, is deze omschakeling dus zodra V_{spoel} gelijk is aan V_K .

2.6.2 Spoeldebiet Zeezijde

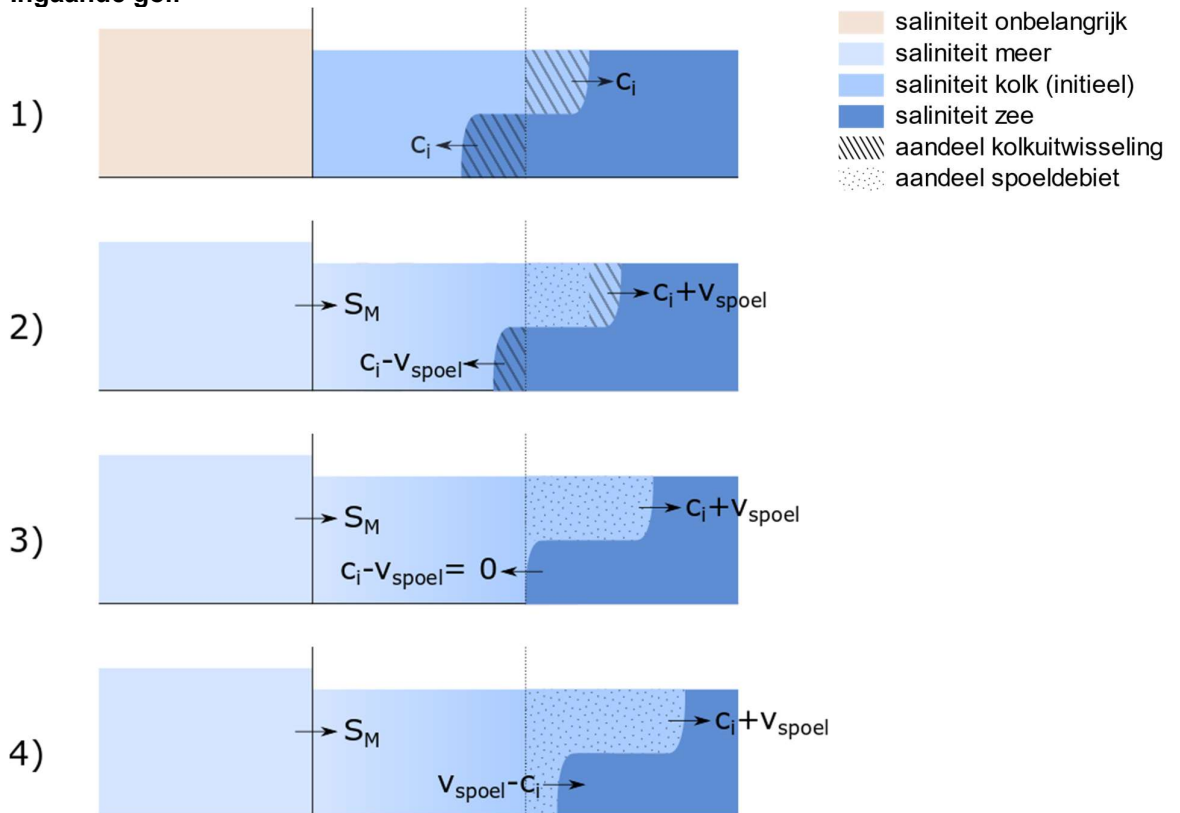
Bij spoelen met de deur naar Zeezijde open komt er zoet water de kolk binnen. Twee extremen van deze situatie zijn weergegeven in onderstaande figuur. In werkelijkheid zal de verdeling van het zoete spoelwater ergens tussen deze twee extremen in liggen, en zal de grens met het kolkwater ook minder scherp zijn door menging. In werkelijkheid zal het kolkwater dat naar Zeezijde gaat dus nog voor het einde van de kolkuitwisseling al zoeter worden.



Figuur 2.5 Schematisch overzicht van verzoeting kolk door spoeldebiet bij deur open naar Zeezijde

Bij onderstaande bespreking van de ingaande en reflecterende golf negeren we het effect van het zoeter worden van de kolk op de snelheid van de kolkuitwisseling.

Ingaande golf

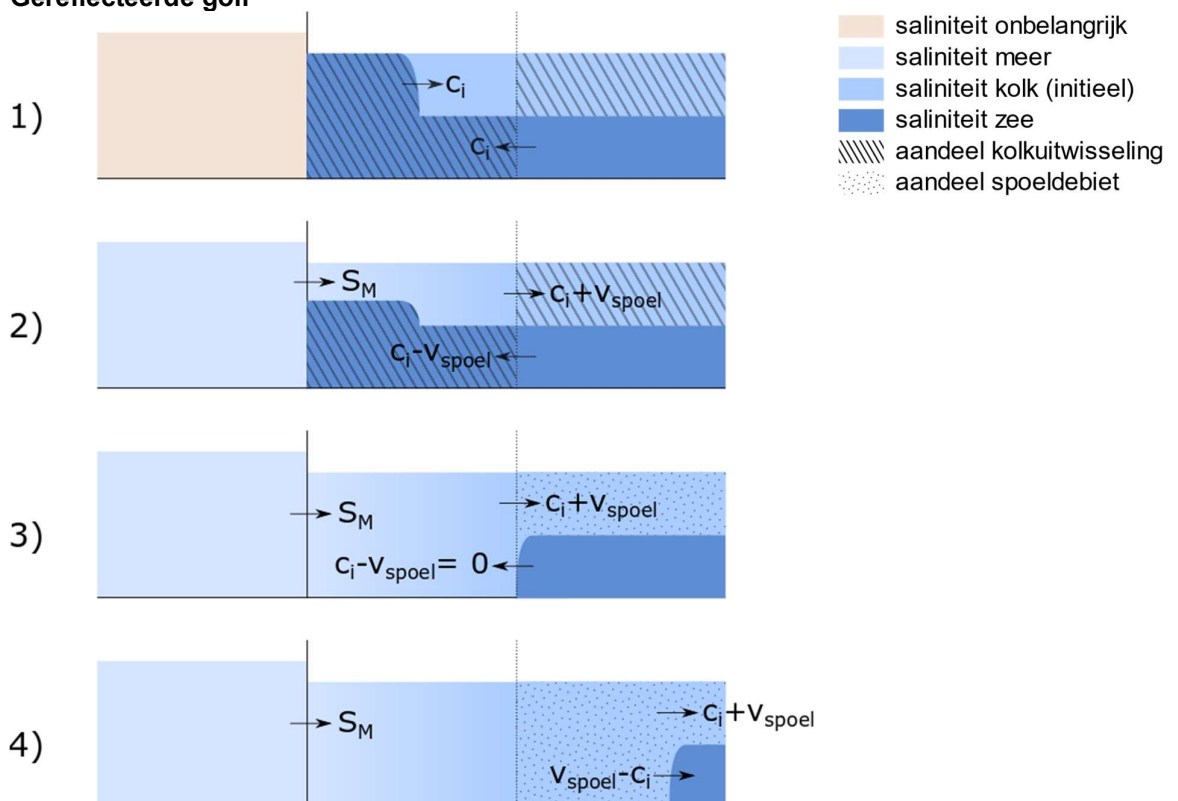


In Scenario 1 is kolkuitwisseling weergegeven zonder spoeldebiet. Het water dat wordt uitgewisseld tussen kolk en zoete voorhaven is volledig toe te schrijven aan de dichtheidsgolf, die met snelheid c_i loopt.

In Scenario 2 is te zien wat er gebeurt als er wordt gespoeld met een snelheid lager dan die van de dichtheidsgolf. Het kolkwater dat over het grensvlak van de deur de kolk ingaat kan enkel daar komen door kolkuitwisseling. Een even grote bijdrage van de kolkuitwisseling is er in de kolk. Het andere deel van kolkwater dat naar Zeezijde gaat komt door het spoeldebiet. Een even groot deel zoet water uit Meerzijde komt de kolk binnen. De kolk is dus zowel zouter aan het worden (aan de Zeezijde) als zoeter (aan de Meerzijde).

In Scenario 3 en 4 is te zien wat er gebeurt als de snelheid van het spoeldebiet de snelheid van de dichtheidsgolf evenaart en overstijgt. De dichtheidsgolf krijgt in dit geval geen kans om de kolk in te lopen, en dus zeggen we dat er geen kolkuitwisseling (tussen kolk en voorhaven) heeft plaatsgevonden. Er is dus een verzoeting van de kolk in dit geval, die volledig is toe te schrijven aan het spoeldebiet.

Gereflecteerde golf

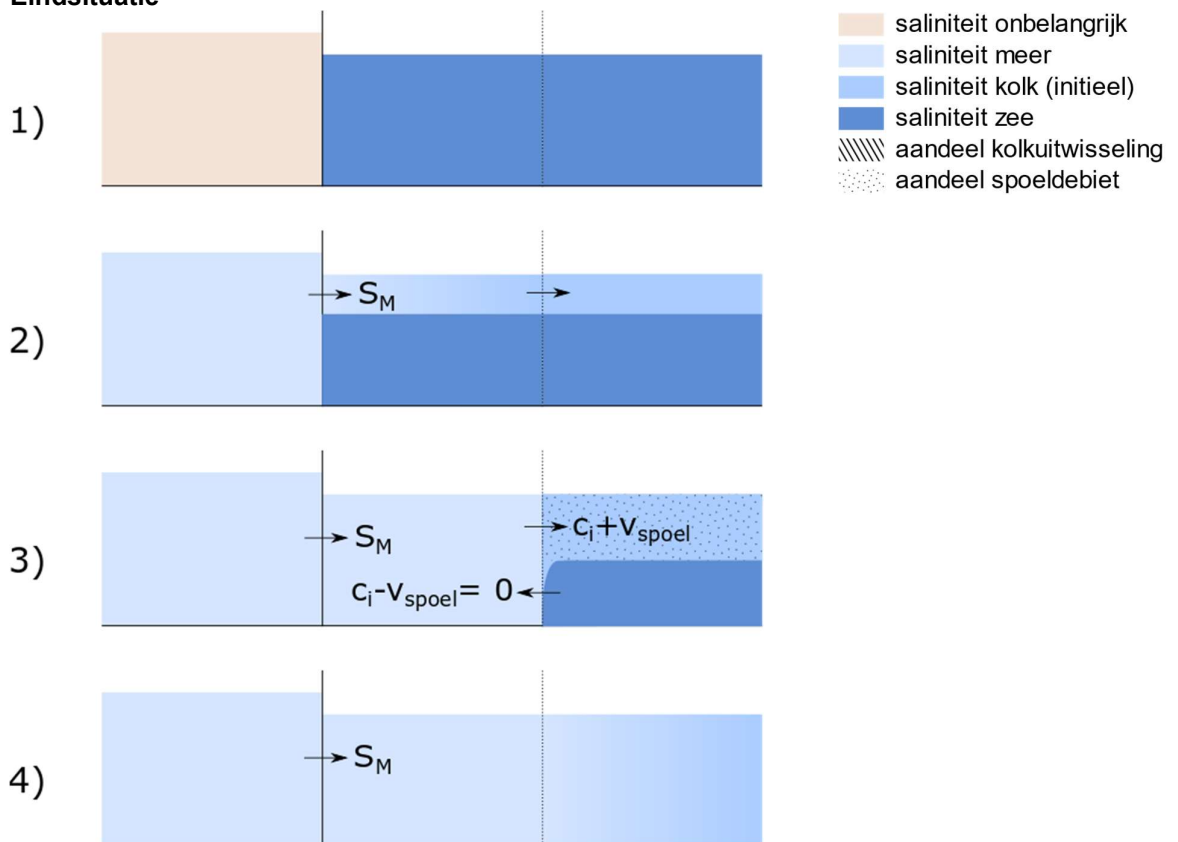


Als er geen sprake is van een spoeldebiet is het tempo van de verzilting van de kolk gelijk aan die bij een ingaande golf, waarbij we uitgaan van de snelheden zoals weergegeven in bovenstaande figuur. In Paragraaf 2.5.2 is de aanpak met een tangens hyperbolicus beschreven, wat zou betekenen dat deze snelheid langzaam (maar continu) steeds lager wordt.

In Scenario 2 is te zien wat er gebeurt als er een spoeldebiet zou zijn. De zoute tong komt nog steeds met dezelfde snelheid de kolk binnen, maar de uitgaande tong zal sneller moeten gaan omdat deze niet de volledige (halve) hoogte kan beslaan.

In Scenario 3 en 4 blijft de dichtheidsgolf nog steeds buiten. In werkelijkheid zal de dichtheidsgolf in Scenario 3 waarschijnlijk langzaam de kolk binnen gaan lopen, omdat de kolk verzoet en daarmee het aandrijvend dichtheidsverschil groter wordt. De saliniteit van het water dat in deze twee scenario's naar buiten gaat ligt waarschijnlijk ergens tussen de aanvankelijke kolksaliniteit en saliniteit van Meerzijde in.

Eindsituatie



Als de deur naar de Zeezijde oneindig lang open staat is, de equilibriumsituatie afhankelijk van de snelheid van het spoeldebiet.

In Scenario 1 wordt de kolk door kolkuitwisseling volledig zout.

In Scenario 2 ontstaat een zekere balans tussen het aandrijvend dichtheidsverschil, en het spoeldebiet dat de kolk uitgaat. Voor het gemak gaan we uit van een scherpe grenslaag tussen zoet en zout water. In werkelijkheid zal er menging optreden en zal de grenslaag minder scherp zijn, en zal dit op zijn beurt de kolkuitwisseling beïnvloeden.

In Scenario 3 en 4 wordt de kolk volledig zoet. De kanttkening hierbij is dat het aandrijvend dichtheidsverschil toeneemt, en daarmee de dichtheidsgolf in werkelijkheid toch de kolk in kan gaan lopen. Dan zou een situatie ontstaan zoals in Scenario 2.

Vereenvoudiging en formulering

In voorgaande secties is besproken hoe de ingaande en reflecterende golf zich gedragen als we uitgaan van superpositie van snelheden, en voorbijgaan aan menging van het spoeldebiet en kolkwater. In Paragraaf 2.5.2 is de kolkuitwisseling zonder spoeldebiet (Scenario 1) al uitgewerkt in formules met een tangens hyperbolicus. In tegenstelling tot Meerzijde is er nu een duidelijk onderscheid in de eindsituatie tussen Scenario 1 en 2 (kolk zout of deels zout), en Scenario 3 en 4 (kolk volledig zoet). De formulering zal hier dus ook onderscheid in moeten kunnen maken.

Net zoals bij de bespreking voor deur open aan Meerzijde is het beschrijven van de overgang van ingaande naar reflecterende golf ingewikkeld. Dit wordt verder bemoeilijkt door de langzame verzoeting van de kolk door spoelwater, waarbij onbekend is hoe deze menging precies plaats vindt (e.g. drijft zoet water snel naar boven, of wordt de kolk door menging langzaam zoet).

Ten behoeve van een eenvoudige formulering doen we dan de volgende aannames:

- De dikte van de bovenlaag die in Scenario 2 ontstaat is een functie van het dichtheidsverschil tussen Zeezijde en Meerzijde en het spoeldebiet. Hoe groter het spoeldebiet hoe dikker de zoete laag. Hoe groter het dichtheidsverschil, hoe dunner deze bovenlaag.
- In Scenario 1 en 2 hanteren we het gedrag besproken in Paragraaf 2.5.2, waarbij de uitwisselingssnelheid continu (volgens de tangens hyperbolicus) afneemt. De aanvankelijke uitwisselingssnelheid in scenario 2 is $c_i - v_{spoel}$, en het maximaal uitwisselbaar volume is niet het volledige kolkvolume zoals besproken in de vorige aanname. Het maximaal uitwisselbaar volume is namelijk $V_K - V_{bovenlaag}$.
- In Scenario 3 en 4 wordt de kolk niet zout. De snelheid van verzoeting door spoeldebiet is constant. Met andere woorden, het water dat de kolk ingaat door spoeldebiet heeft de saliniteit van het meer, en de saliniteit van het spoelwater dat naar Zeezijde gaat heeft de saliniteit van de kolk bij deur openen. Zodra de kolk volledig zoet is, is de verzoeting door spoeldebiet nul, en schakelt de saliniteit richting Zeezijde naar die van Meerzijde (gelijk aan de kolk op dat moment).

Voor Scenario 1 kan daarmee de formulering van Paragraaf 2.5.2 gebruikt worden, of de onderstaande formulering voor Scenario 2 met H_{eq} gelijk aan nul. In formules geldt voor Scenario 2 dat we de dikte van de bovenlaag bepalen door (13) op te lossen voor de hoogte, en c_i gelijk te stellen aan de snelheid in de bovenlaag $v_{bovenlaag}$:

$$H_{eq} = 0.5 \frac{(2 \cdot v_{bovenlaag})^2 \cdot \bar{\rho}_{MZ}}{g \cdot 0.8 (S_Z - S_M)} \quad (22)$$

$$v_{grenslaag} = \frac{Q_{spoel}}{H_{eq} \cdot B_K} \quad (23)$$

Voor het gemak schrijven we de vaste termen even als een constante:

$$C = \frac{\bar{\rho}_{MZ}}{g \cdot 0.8(S_Z - S_M)} \quad (24)$$

Vervolgens kunnen we H_{eq} opschrijven als functie van zichzelf:

$$H_{eq} = 2 \frac{Q_{spoel}^2}{H_{eq}^2 B_K^2} \cdot C \quad (25)$$

Dit is ook expliciet te schrijven als:

$$H_{eq} = \left(2 \cdot \frac{Q_{spoel}^2}{B_K^2} \cdot C \right)^{1/3} \quad (26)$$

Daarmee is de door kolkuitwisseling maximaal uitwisselbare fractie van de kolk:

$$f_{LE, Spoel} = \frac{H_Z - H_{eq}}{H_Z} \quad (27)$$

De tijd T_{LE} die het duurt om dit volume uit te wisselen wordt dan gedefinieerd als volgt:

$$T_{LE,Z} = \frac{2 \cdot f_{LE, Spoel} \cdot L_K}{\eta c_i - v_{spoel}} \quad (28)$$

Dit leidt dan tot de volgende vergelijking voor het uitgewisselde volume door kolkuitwisseling:

$$V_{U,Z} = f_{LE, Spoel} V_{K,Z} \tanh \left(\frac{T_{Open}}{T_{LE,Z}} \right) \quad (29)$$

Voor Scenario 2 t/m 4 geldt dat het spoeldebiet het volgende volume verplaatst

$$V_{Spoel} = Q_{Spoel} T_{Open,Z} \quad (30)$$

Voor Scenario 2 t/m 4 geldt tevens dat het spoeldebiet het volgende volume verplaatst

$$V_{Spoel} = Q_{Spoel} T_{Open,M} \quad (31)$$

De saliniteit van dit spoeldebiet is altijd S_M over het grensvlak tussen Meerzijde en kolk. Over het grensvlak tussen kolk en Zeezijde is de saliniteit aanvankelijk S_K , overschakelend naar S_M , zodra de kolk volledig zoet is. In Scenario 3 en 4, waar er in tegenstelling tot Scenario 1 en 2



Datum
6 augustus 2018

Ons kenmerk
11200741-000-HYE-0004

Pagina
23/45

geen verzouting van de kolk optreedt door kolkuitwisseling, is deze omschakeling zodra V_{spoe} gelijk is aan V_K .

2.7 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 (drukkere 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: $\eta, Q_{Spoel,LW}, Q_{Spoel,HW}$

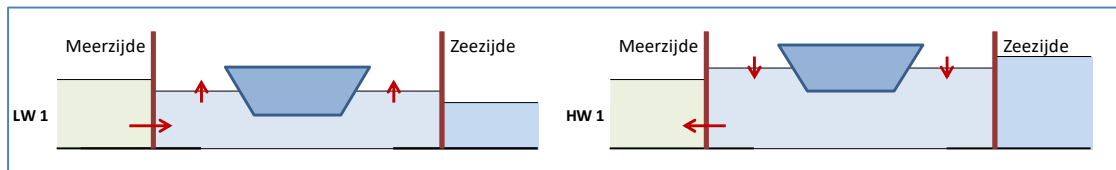
3 Vergelijkingen per schutfase

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:

$$LW: M_{M,LW1} = V_{Niv,LW} S_M \quad (32)$$

Idem bij HW:

$$HW: M_{M,HW1} = -V_{Niv,HW} S_{K,Z} \quad (33)$$

Omdat per definitie (zie vergelijkingen (10) en (11)) óf $V_{Niv,LW} = 0$ óf $V_{Niv,HW} = 0$ kunnen beide vergelijkingen worden opgeteld tot één vergelijking:

$$M_{M,1} = V_{Niv,LW} S_M - V_{Niv,HW} S_{K,Z} \quad (34)$$

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.

$$LW: S_{K,Z,Niv} = \frac{S_{K,Z}(V_{K,Z} - V_{Schip,Opw}) + S_M V_{Niv,LW}}{V_{K,M} - V_{Schip,Opw}} \quad (35)$$

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:

$$HW: S_{K,Z,Niv} = S_{K,Z} \quad (36)$$

Hiermee mogen we vergelijking (34) ook schrijven als:

$$M_{M,1} = V_{Niv,LW} S_M - V_{Niv,HW} S_{K,Z,Niv} \quad (37)$$

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

De fasegemiddelde lozingen en onttrekkingen aan de Meerzijde zijn dan als volgt (er zijn geen onttrekkingen of lozingen aan de Zeezijde):

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

$$V_{M,1}^- = V_{Niv,LW} \quad (38)$$

$$Q_{M,1}^- = \frac{V_{M,1}^-}{T_{Niv}} \quad (39)$$

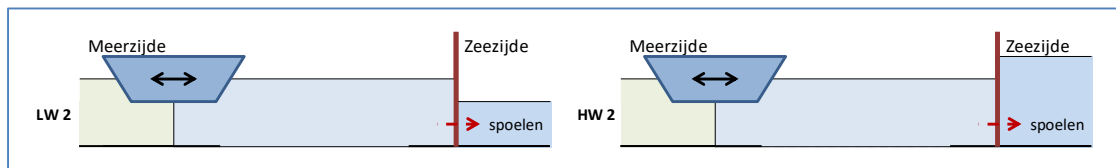
- lozing aan Meerzijde met saliniteit $S_{K,Z}$:

$$V_{M,1}^+ = V_{Niv,HW} \quad (40)$$

$$Q_{M,1}^+ = \frac{V_{M,1}^+}{T_{Niv}} \quad (41)$$

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
2. Zouttransport door kolkuitwisseling (met of zonder spoeldebiet)
3. Zouttransport door invaren schepen

Als deze processen onafhankelijk worden berekend en opgeteld, bestaat de kans op een te grote zoutlast. Er zou dan een saliniteit in de kolk kunnen ontstaan die lager is dan Meerzijde

of hoger dan Zeezijde. Om dit te voorkomen, zijn er binnen deze schutfase drie subfasen overeenkomstig de bovenstaande opsomming, die elk leiden tot een tussentijdse saliniteit van de kolk:

(1): Zouttransport door uitvaren schepen:

$$M_{M,2a} = V_{Schip,Opw} S_M \quad (42)$$

$$S_{K,2a} = \frac{S_{K,Z,Niv} (V_{K,M} - V_{Schip,Opw}) + M_{M,2a}}{V_{K,M}} \quad (43)$$

(2): Zouttransport door kolkuitwisseling (met of zonder spoelen)

Aandeel kolkuitwisseling:

$$M_{M,2b,LE} = V_{U,M} S_M - V_{U,M} S_{K,2a} \quad (44)$$

Met $V_{U,M}$ zoals bepaald in (20).

Aandeel spoelen over hoofd meerzijde:

$$V_{Spoelen} = Q_{Spoel} T_{Open,M} \quad (45)$$

$$M_{M,2b,Spoelen} = V_{Spoelen} S_M \quad (46)$$

Aandeel spoelen over hoofd zeezijde. Bij lang spoelen wordt de kolk volledig zoet, en verandert de saliniteit van spoeldebiet richting zeezijde:

$$V_{Spoelen,Max} = V_{K,M} - V_{U,M} \quad (47)$$

$$M_{Z,2b,Spoelen} = \min(V_{Spoelen}, V_{Spoelen,Max}) S_{K,2a} + \max(V_{Spoelen} - V_{Spoelen,Max}, 0) S_M \quad (48)$$

Nieuwe saliniteit:

$$S_{K,2b} = \frac{S_{K,2a} V_{K,M} + M_{M,2b,LE} + M_{M,2b,Spoelen} - M_{Z,2b,Spoelen}}{V_{K,M}} \quad (49)$$

(3): Zouttransport door invaren schepen:

$$M_{M,2c} = -V_{Schip,Afv} S_{K,2b} \quad (50)$$

3.3 Totale transporten en zoutgehaltenes aan het einde van fase LW 2 / HW 2

Het totale zouttransport over het sluishoofd Meerzijde tijdens deze schutfase volgt uit de som van componenten:

$$M_{M,2} = M_{M,2a} + M_{M,2b,Spoelen} + M_{M,2b,LE} + M_{M,2c} \quad (51)$$

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

$$M_{Z,2} = M_{Z,2b,Spoelen} \quad (52)$$

Het uiteindelijke zoutgehalte in de kolk is dan

$$S_{K,M} = \frac{S_{K,Z,Niv} (V_{K,M} - V_{Schip,Opw}) + M_{M,2} - M_{Z,2}}{(V_{K,M} - V_{Schip,Afw})} \quad (53)$$

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

De fasegemiddelde lozingen en onttrekkingen van en naar Meerzijde en Zeezijde zijn dan als volgt:

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

$$V_{M,2}^- = V_{Schip,Opw} + V_{U,M} + V_{Spoelen} \quad (54)$$

$$Q_{M,2}^- = \frac{V_{M,2}^-}{T_{Open,M}} \quad (55)$$

- lozing aan Meerzijde met een gemiddelde saliniteit $S_{M,2}^+$:

$$V_{M,2}^+ = V_{Schip,Afw} + V_{U,M} \quad (56)$$

$$Q_{M,2}^+ = \frac{V_{M,2}^+}{T_{Open,M}} \quad (57)$$

$$S_{M,2}^+ = - \frac{M_{M,2} - V_{M,2}^- \cdot S_M}{V_{M,2}^+} \quad (58)$$

- er is geen onttrekking aan de Zeezijde in deze schutfase

- lozing aan Zeezijde met een gemiddelde saliniteit S^+_z :

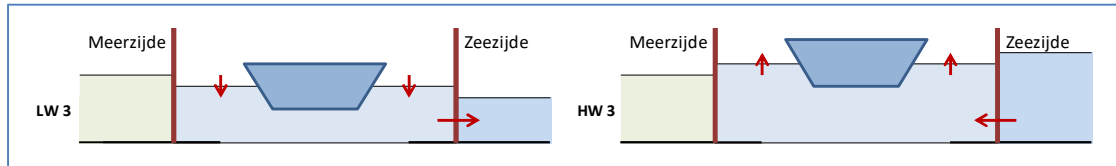
$$V_{Z,2}^+ = Q_{Spoel} T_{Open,M} \quad (59)$$

$$Q_{Z,2}^+ = Q_{Spoel} \quad (60)$$

$$S_{Z,2}^+ = \frac{M_{Z,2}}{V_{Z,2}^+} \quad (61)$$

3.4 LW 3 / HW 3: Nivelleren Zeezijde, debiet van kolk 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:

$$M_{Z,3} = V_{Niv,LW} S_{K,M} - V_{Niv,HW} S_Z \quad (62)$$

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:

$$LW: S_{K,M,Niv} = S_{K,M} \quad (63)$$

Hiermee mogen we vergelijking (62) ook schrijven als:

$$M_{Z,3} = V_{Niv,LW} S_{K,M,Niv} - V_{Niv,HW} S_Z \quad (64)$$

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.

$$HW: S_{K,M,Niv} = \frac{S_{K,M}(V_{K,M} - V_{Schip,Afw}) + S_Z V_{Niv,HW}}{V_{K,Z} - V_{Schip,Afw}} \quad (65)$$

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

De fasegemiddelde lozingen en onttrekkingen aan de Zeezijde zijn dan als volgt (er zijn geen onttrekkingen of lozingen aan de Meerzijde):

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

$$V_{Z,3}^- = V_{Niv,HW} \quad (66)$$

$$Q_{Z,3}^- = \frac{V_{Z,3}^-}{T_{Niv}} \quad (67)$$

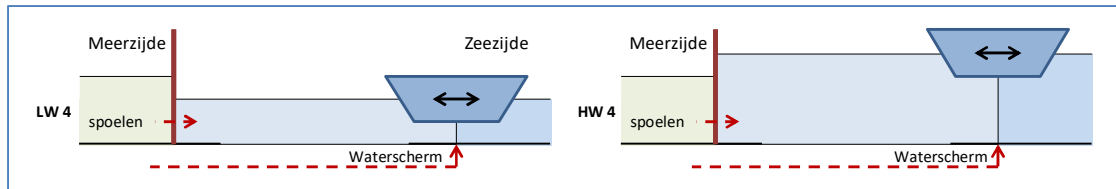
- lozing aan Zeezijde met saliniteit $S_{K,M}$:

$$V_{Z,3}^+ = V_{Niv,LW} \quad (68)$$

$$Q_{Z,3}^+ = \frac{V_{Z,3}^+}{T_{Niv}} \quad (69)$$

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 over het sluishoofd aan de Zeezijde. Deze zijn:

1. Zouttransport door uitvaren schepen
2. Zouttransport door kolkuitwisseling (met of zonder spoeldebiet)
3. Zouttransport door invaren schepen

Als deze processen onafhankelijk worden berekend en opgeteld, bestaat de kans op een te grote zoutlast. Er zou dan een saliniteit in de kolk kunnen ontstaan die lager is dan Meerzijde of hoger dan Zeezijde. Om dit te voorkomen, zijn er binnen deze schutfase drie subfasen, overeenkomstig de bovenstaande opsomming, die elk leiden tot een tussentijdse saliniteit van de kolk:

- (1): Zouttransport door uitvaren schepen:

$$M_{Z,4a} = -V_{Schip,Afw} S_Z \quad (70)$$

$$S_{K,4a} = \frac{S_{K,M,Niv} (V_{K,Z} - V_{Schip,Afw}) + M_{Z,4a}}{V_{K,Z}} \quad (71)$$

(2): Zouttransport door kolkuitwisseling (met of zonder spoelen)

Aandeel kolkuitwisseling:

$$M_{Z,4b,LE} = V_{U,Z} S_{K,2a} - V_{U,Z} S_Z \quad (72)$$

Met $V_{U,Z}$ zoals bepaald in (29).

Aandeel spoelen over hoofd meerzijde:

$$V_{Spoelen} = Q_{Spoel} T_{Open,M} \quad (73)$$

$$M_{M,4b,Spoelen} = V_{Spoelen} S_M \quad (74)$$

Aandeel spoelen over hoofd zeezijde. Bij lang spoelen ontstaat een equilibriumsituatie zoals beschreven in Paragraaf 2.6.2. Ook verandert de saliniteit van het spoeldebiet richting Zeezijde van die van de kolk naar die van de Meerzijde.

$$V_{Spoelen,Max} = V_{K,Z} - V_{U,Z} \quad (75)$$

$$M_{Z,4b,Spoelen} = \min(V_{Spoelen}, V_{Spoelen,Max}) S_{K,4a} + \max(V_{Spoelen} - V_{Spoelen,Max}, 0) S_M \quad (76)$$

Nieuwe saliniteit:

$$S_{K,4b} = \frac{S_{K,4a} V_{K,M} - M_{Z,4b,LE} + M_{M,4b,Spoelen} - M_{Z,4b,Spoelen}}{V_{K,Z}} \quad (77)$$

(3): Zouttransport door invaren schepen:

$$M_{Z,4c} = V_{Schip,Opw} S_{K,4b} \quad (78)$$

3.6 Totale transporten en zoutgehaltenes aan het einde van fase LW 4 / HW 4

Het totale zouttransport over het sluishoofd Zeezijde tijdens deze schutfase volgt uit de som van componenten:

$$M_{Z,4} = M_{Z,4a} + M_{Z,4b,Spoelen} + M_{Z,4b,LE} + M_{Z,4c} \quad (79)$$

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

$$M_{M,4} = M_{M,4b,Spoelen} \quad (80)$$

Het uiteindelijke zoutgehalte in de kolk is dan

$$S_{K,Z} = \frac{S_{K,M,Niv} (V_{K,Z} - V_{Schip,Afw}) + M_{M,4} - M_{Z,4}}{(V_{K,Z} - V_{Schip,Opw})} \quad (81)$$

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

De fasegemiddelde lozingen en onttrekkingen van en naar Meerzijde en Zeezijde zijn dan als volgt:

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

$$V_{Z,4}^- = V_{Schip,Afw} + V_{U,Z} \quad (82)$$

$$Q_{Z,4}^- = \frac{V_{Z,4}^-}{T_{Open,Z}} \quad (83)$$

- lozing aan Zeezijde met een gemiddelde saliniteit S_Z^+ :

$$V_{Z,4}^+ = V_{Schip,Opw} + V_{U,Z} + V_{Spoel} \quad (84)$$

$$Q_{Z,4}^+ = \frac{V_{Z,4}^+}{T_{Open,Z}} \quad (85)$$

$$S_{Z,4}^+ = \frac{M_{Z,4} - V_{Z,4}^- \cdot S_Z}{V_{Z,4}^+} \quad (86)$$

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

$$V_{M,4}^- = Q_{Spoel} T_{Open,Z} \quad (87)$$

$$Q_{M,4}^- = Q_{Spoel} \quad (88)$$

- er is geen lozing aan de Meerzijde

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:

$$M_M = M_{M,1} + M_{M,2} + M_{M,4} \quad (89)$$

Daarnaast hebben we informatie over het volume dat aan het meer wordt onttrokken

$$V_M^- = V_{Niv,LW} + V_{Schip,Opw} + V_{U,M} + Q_{spoel} \cdot 2 \cdot T_{open} \quad (90)$$

en het volume dat op het meer wordt geloosd

$$V_M^+ = V_{Niv,HW} + V_{U,M} + V_{Schip,Afw} \quad (91)$$

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 :

$$Q_M^- = \frac{V_M^-}{T_{Cyclus}} \quad (92)$$

- lozing aan Meerzijde met een door de formulering te bepalen gemiddelde saliniteit:

$$Q_M^+ = \frac{V_M^+}{T_{Cyclus}}; S = S_M^+ \quad (93)$$

De gemiddelde saliniteit voor het geloosde water naar Meerzijde wordt bepaald uit de massatransporten en volumetransporten:

$$S_M^+ = - \frac{(M_M - V_M^- S_M)}{V_M^+} \quad (94)$$

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 te delen door de tijd voor een complete schutcyclus:

$$\dot{M}_M = \frac{M_M}{T_{Cyclus}} \quad (95)$$

4.2 Zeezijde

De gecombineerde vergelijking voor de Zeezijde is:

$$M_Z = M_{Z,2} + M_{Z,3} + M_{Z,4} \quad (96)$$

Wederom kunnen we de volumes die van en naar Zeezijde gaan opschrijven. Voor de onttrekking is dat:

$$V_Z^- = V_{Niv,HW} + V_{Schip,Afw} + V_{U,Z,Spoelen} \quad (97)$$

en het volume dat op de zee wordt geloosd

$$V_Z^+ = V_{Niv,LW} + V_{U,Z,Spoelen} + V_{Schip,Opw} + Q_{spoel} \cdot 2 \cdot T_{open} \quad (98)$$

Door beide volumes te delen door de tijd voor een complete schutcyclus zijn weer 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 Zeezijde, met de daar geldende saliniteit S_Z :

$$Q_Z^- = \frac{V_Z^-}{T_{Cyclus}} \quad (99)$$

- lozing aan Zeezijde met een door de formulering te bepalen gemiddelde saliniteit:

$$Q_Z^+ = \frac{V_Z^+}{T_{Cyclus}}; S = S_Z^+ \quad (100)$$

De gemiddelde saliniteit voor het geloosde water naar Zeezijde wordt bepaald uit de massatransporten en volumetransporten:

$$S_Z^+ = \frac{(M_Z + V_Z^- S_Z)}{V_Z^+} \quad (101)$$

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 te delen door de tijd voor een complete schutcyclus:

$$\dot{M}_Z = \frac{M_Z}{T_{Cyclus}} \quad (102)$$

Bij een evenwichtstoestand geldt vanzelfsprekend dat

$$\dot{M}_Z = \dot{M}_M \quad (103)$$

5 Rekenkundige aanpak cyclus-gemiddelde waarden

De beschrijving in Hoofdstuk 3 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 cyclus-gemiddelde 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 3 en 4 kunnen de essentiële vergelijkingen worden geselecteerd, die samen een stelsel van vergelijkingen met 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. Deze waarden ontstaan in de schutcyclus, zoals beschreven in Hoofdstuk 3.

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 de onbekenden, gevolgd door de directe berekening van de lozingen, Q^+_M met S^+_M en Q^+_Z met S^+_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.) Niet alle vergelijkingen zijn lineair, dus zal herhaaldelijk een stelsel van gelineariseerde vergelijkingen opgelost moeten worden tot de waarden voor de onbekenden zijn geconvergeerd. In de praktijk biedt deze manier van oplossen weinig tot geen

voordeel boven iteratief doorrekenen zoals beschreven in Paragraaf 5.1, en daarmee laten we een verdere uitwerking hier achterwege. Ter illustratie van hoe een stelsel van vergelijkingen toch opgesteld zou kunnen worden verwijzen we naar de formulering beschreven in [1], waarvan de zeesluisformulering in dit rapport een doorontwikkeling is.

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:

$$M_M, \dot{M}_M, Q_M^+, Q_M^-, S_M^+, M_Z, \dot{M}_Z, Q_Z^+, Q_Z^-, S_Z^+, S_Z^-.$$

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 sluis, of operationele parameters zoals deur-opentijden. Ook kunnen de cyclus-gemiddelde 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 schutcyclus gebruiken we de parameter $Z_{fractie}$, gedefinieerd als een factor op het kolkvolume maal het verschil in zoutgehalte aan beide kanten.

$$M = Z_{fractie} V_K \cdot \Delta S \quad (1.104)$$

Daarmee geeft $Z_{fractie}$, aan welk deel (factor) van de kolk, in het regelmatige schutproces, 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 $Z_{fractie}$:

$$Z_{fractie} = \frac{\bar{M}}{V_K \cdot (S_Z - S_M)} = \frac{0,5 \cdot (M_M + M_Z)}{0,5 \cdot (V_{K,M} + V_{K,Z}) \cdot (S_Z - S_M)} \quad (1.105)$$

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 deuropentijd: $T_{LE,MZ} / T_{Open}$

$$c_{i,MZ} = \frac{1}{2} \sqrt{g' \bar{H}} = \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} \bar{H}} \approx \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{0,8(S_Z - S_M)}{\bar{\rho}_{MZ}} \left(\frac{H_M + H_Z}{2} \right)} \quad (106)$$

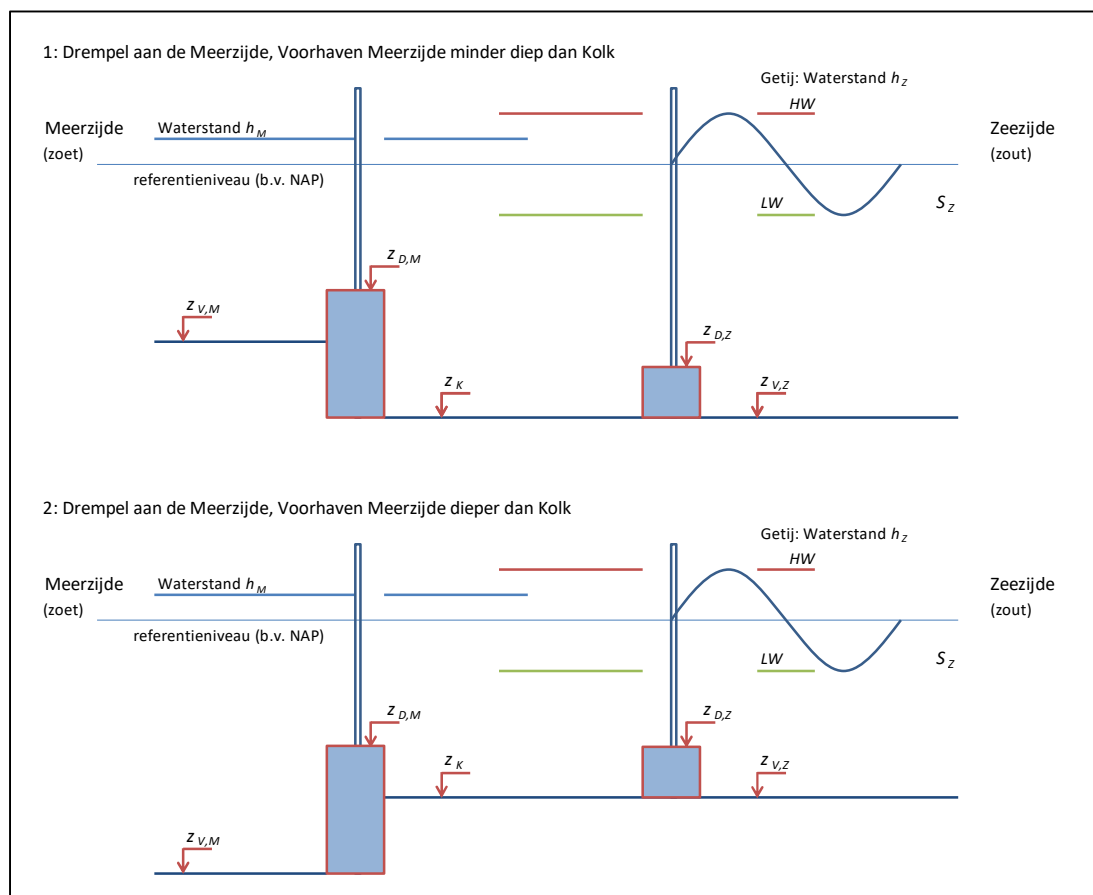
$$T_{LE,MZ} = 2L / c_{i,MZ} \quad (107)$$

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 sluisolk, 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 (14), 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 van de drempel met 20% van de kleinste drempelhoogte:

$$H_{M,eff} = (h_M - z_{D,M}) + 0,2 \min((z_{D,M} - z_{V,M}), (z_{D,M} - z_K)) \quad (108)$$

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

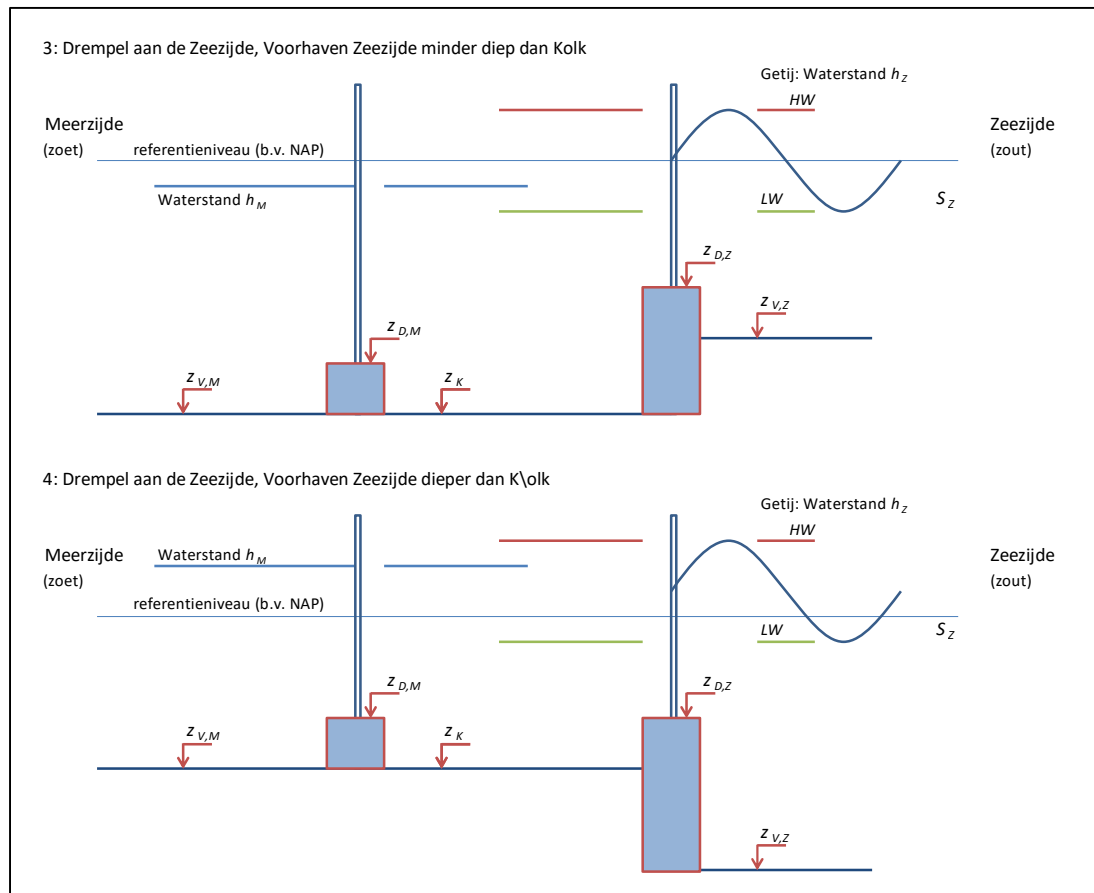
$$V_{K,M,eff} = L_K B_K H_{M,eff} \quad (109)$$

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, (14) en (44), gebruik te maken van bovenstaande vergelijkingen (108) en (109) 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:

$$H_{Z,eff} = (h_Z - z_{D,Z}) + 0,2 \min((z_{D,Z} - z_{V,Z}), (z_{D,Z} - z_K)) \quad (110)$$

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:

$$V_{K,Z,eff} = V_{K,Z} \quad (111)$$

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:

$$L_{K,eff} = L_K \frac{h_Z - z_K}{H_{Z,eff}} \quad (112)$$

Daarmee klopt dus ook het volume van de kolk:

$$V_{K,Z,eff} = L_{K,eff} B_K H_{Z,eff} = L_K \frac{H_Z}{H_{Z,eff}} B_K H_{Z,eff} = L_K B_K H_Z = V_K \quad (113)$$

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 (110) en (111) en (112) in de uitdrukkingen voor de kolkuitwisseling aan de Zeezijde, (29) en (72), 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.

Spoeldebiet, verschil met Wanda-Locks in “fase 2 (van 3)”, terugkerende golf niet stilstaan.

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 sommige processen als opeenvolgend worden aangenomen. Dat is strikt genomen onjuist, omdat de ze zich deels tegelijk afspelen (e.g. schepen varen in/uit terwijl de dichtheidsgolf loopt). De gehanteerde aanpak lijkt op die van WANDA-Locks, maar het is nooit werkelijk onderzocht hoezeer deze aanpak de realiteit benadert.

7.2 Invloed van spoeldebiet op dichtheidsgolf

In Paragraaf 2.6 is al opgemerkt dat er onbekenden zijn over hoe het spoeldebiet in de realiteit interacteert met de dichtheidsstroming. Sommige aannames verschillen ook van die van bijvoorbeeld Wanda-Locks, en daarom is het belangrijk om in dit Hoofdstuk dit nog even te belichten.

Bij spoelen terwijl de deur open staat naar Meerzijde gaan we uit van een simpele superpositie die geldig is zolang de dichtheidsgolf niet reflecteert. Mogelijk zou een extra fase van (omgekeerde) superpositie in snelheden bij terugkerende dichtheidsgolf accurater zijn. Het wordt dan wel belangrijk om ook de erosie van resterende zoute onderlaag mee te nemen. Als dit niet wordt gedaan dan zou, indien de snelheid van het spoeldebiet gelijk is aan die van de dichtheidsgolf, de kolk nooit volledig zoet worden.

Met de huidige aanpak van een enkele superpositie overschatten we aan Meerzijde mogelijk de effectiviteit van een spoeldebiet. Met de aannames die zijn gedaan wordt de kolk waarschijnlijk sneller zoet dan in werkelijkheid, maar er gaat ook minder zout naar de zoete zijde. Hoe conservatief of optimistisch de formulering daarmee is in de bepaling van de zoutlast (en zoetlast), is niet bekend.

Bij spoelen met de deur naar Zeezijde geopend ontstaat vaak, zoals in Paragraaf 2.6.2 al opgemerkt, een situatie waarbij de kolk tegelijk zoeter en zouter wordt. Het is waarschijnlijk dat het zoete spoeldebiet deels zal mengen met het zoute kolkwater, en daarmee de kolkuitwisseling en saliniteit van het uitgaande spoeldebiet beïnvloed. Menging heeft daarnaast ook invloed op de equilibriumsituatie van Scenario 2, waar we nu een duidelijke grenslaag aannemen op een bepaalde hoogte.

7.3 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 uitziet 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 aannemen 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).

$$\dot{M}_{Zouttong} = \Delta S_{Zouttong} Q_{Zouttong} = \Delta S_{Zouttong} c_{i,Zouttong} \frac{1}{2} H B \quad (114)$$

De snelheid van de zouttong is conform vergelijking (13):

$$c_{i,Zouttong} = \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} H} = \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{0,8 \Delta S_{Zouttong}}{\bar{\rho}_{MZ}} H} \quad (115)$$

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.

7.4 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).

7.5 Voorschrijven van doorlaatfractie of luchtdebiet

Paragraaf 2.1.5 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.

7.6 De sluis is minder dan 24 per etmaal in bedrijf

In Paragraaf 2.4.3 is de parameter T_{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 aantal schuttingen per etmaal. De gebruiker moet dan zelf deze tijdreeks aanmaken, zodanig dat de gemiddelde schutfrequentie klopt met het aantal cycli per etmaal.

8 Referenties

- [1] “Voorstudie: Ontwerpstudie en praktijkproef zoutlekbeperving Volkeraksluizen - Model voor Zoutvrachtberekeningen”, Appendix B, R.E. Uittenbogaard, 1201226-011, Deltares, juni 2010
- [2] “Implementatie waterverplaatsing schepen”, T. Vreeken, 1210765-006-HYE-0001, Deltares, april 2016

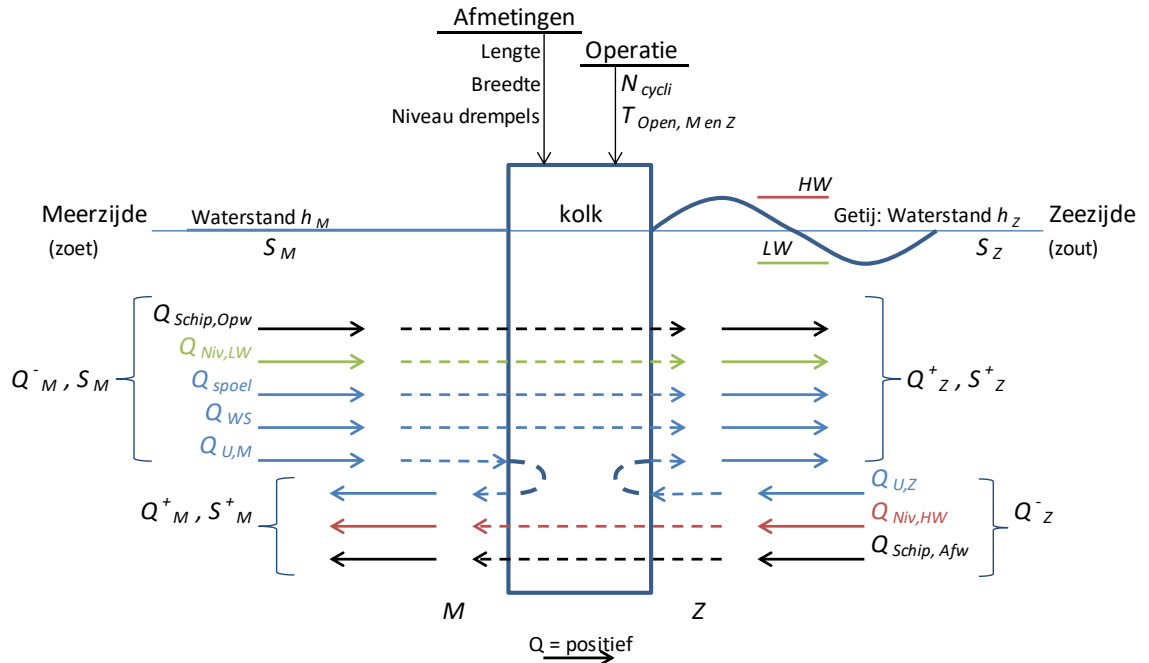
1.2 Aanpak en modelconcept

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.

Indien er registraties beschikbaar zijn van o.a. de deurbewegingen, kan per fase van de schutcyclus worden bepaald wat in die betreffende fase de transporten zijn over beide sluishoofden. Zo kan op basis van historische registraties worden uitgerekend wat de zouttransporten zijn geweest.

Indien geen registraties beschikbaar zijn, dan kan een cyclus-gemiddeld transport worden uitgerekend op basis van enkele kentallen van de sluis(operatie). Door voor elk sluishoofd per richting (in of uit) de volumes van de schutfases bij elkaar op te tellen worden de totale volumes gevonden per schutcyclus, en kunnen ook de bijbehorende saliniteiten worden berekend. 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. 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 weergeven 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 3), 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 3 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 twaalf vergelijkingen met twaalf 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.

1.4 Versies

Hieronder worden de belangrijkste wijzigingen in het implementatiedocument weergegeven t.o.v. voorgaande versies:

Versie 3 (Juni 2019)

- Beschrijving van de berekening van de lozingen en onttrekkingen en de bijbehorende saliniteiten per schutfase.
- Het splitsen van de processen in LW2/HW2 en LW4/HW4 in Hoofdstuk 3. In plaats van één fase met een bijbehorende start en eindsaliniteit, zijn er nu 3 subfases; het uitvaren van schepen, de kolkuitwisseling (met of zonder spoeldebiet), en het invaren van schepen. Met deze aanpak wordt voorkomen dat de saliniteit van de kolk lager wordt dan die van Meerszijde of zouter dan Zeeszijde. Deze subfases aanpak lijkt op de aanpak die gehanteerd wordt in Wanda-Locks, zie ook [2].
- In Hoofdstuk 4 is de uitsplitsing van het totale massatransport in volumes en saliniteiten weggehaald. Met de extra subfases en daarbij behorende saliniteiten is het niet nuttig meer om dit uit te schrijven.
- Beschrijving oplossen d.m.v. stelsel van vergelijkingen in Paragraaf 5.2 gereduceerd, omdat de iteratieve aanpak praktischer is. In plaats daarvan wordt verwezen naar de formulering en oplosmethode van de “voorganger” van de zeeluisformulering in [1].
- De bespreking van het waterscherm is beperkt tot de definitie ervan. Verdere uitwerking is verwijderd, omdat een waterscherm in de praktijk niet wordt overwogen als maatregel.

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 zoetere 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 andere 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. Hetzelfde 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.

In dit document wordt het gebruik van een waterscherm niet verder uitgewerkt, vanwege de beperkte toepassing in de praktijk, en omdat een spoeldebiet de voorkeur heeft als het om inzet van (extra) zoet water gaat.

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.

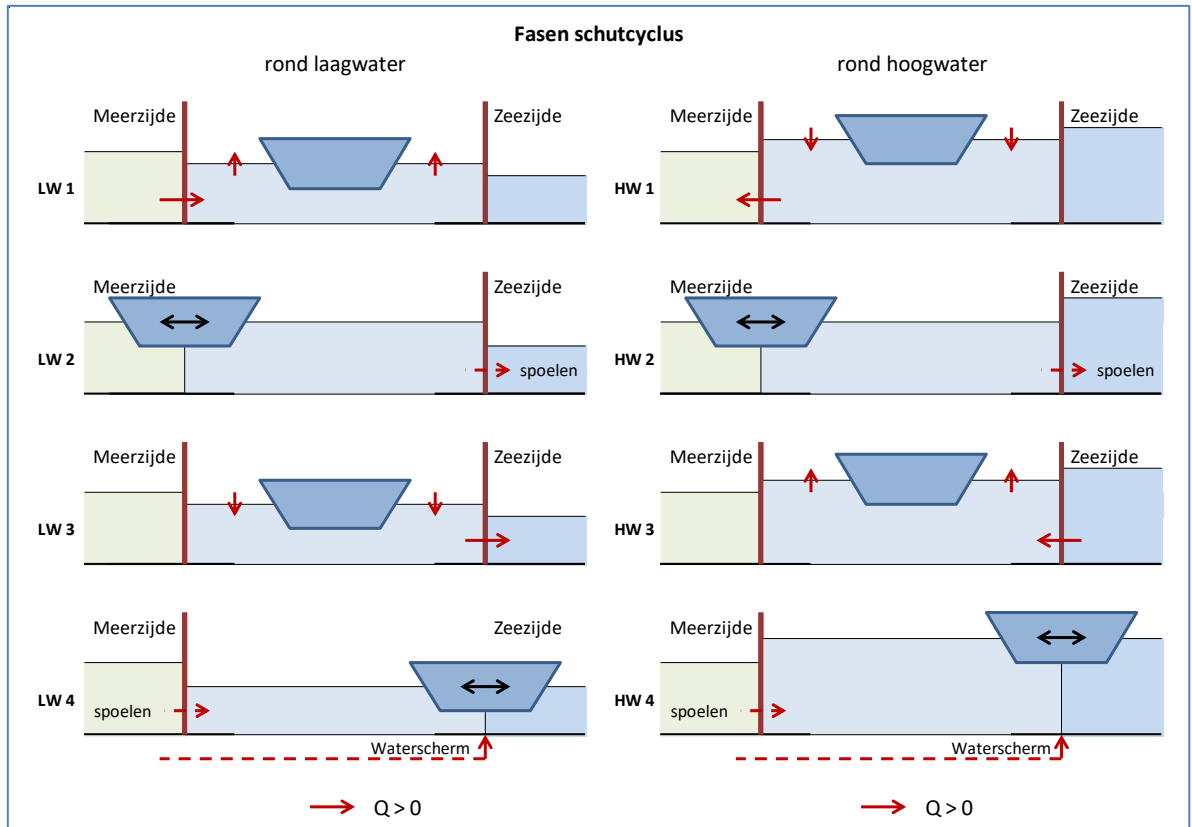
De beide zijden van de sluis zouden (logischerwijs) aan te duiden zijn als de zoute en de zoete zijde. Echter, omdat beide woorden met de letter 'Z' beginnen is dat niet handig. In aansluiting op eerdere studies, waarbij de zoete zijde een meer was, is gekozen voor de benaming 'Zeezijde' en 'Meerzijde'. 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 [kg/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 een sluishoofd in $[\text{kg}/\text{m}^3]$, deze waarden zijn i.h.a. beschikbaar in een netwerkmodel; in de stand-alone versie wordt hiervoor de UNESCO-formulering toegepast;

$\bar{\rho}_{MZ}$: de gemiddelde dichtheid van het water aan de meerzijde en de zeezijde $[\text{kg}/\text{m}^3]$, deze waarden zijn i.h.a. beschikbaar in een netwerkmodel; in de stand-alone versie wordt hiervoor de UNESCO-formulering toegepast;

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 sluisolk, danwel in het sluishoofd in [m], waarbij de waterstand van een van beide kanten geldt:

$$\begin{aligned} H_M &= h_M - z_K \\ H_Z &= h_Z - z_K \end{aligned} \quad (1)$$

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

$$\begin{aligned} V_{K,M} &= L_K B_K H_M \\ V_{K,Z} &= L_K B_K H_Z \end{aligned} \quad (2)$$

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:

$$L_{K,eff} = L_K \quad (3)$$

en:

$$H_{M,eff} = H_M \quad \text{en} \quad H_{Z,eff} = H_Z \quad (4)$$

en:

$$V_{K,M,eff} = V_{K,M} \quad \text{en} \quad V_{K,Z,eff} = V_{K,Z} \quad (5)$$

2.4.3 Operatie

- $T_{Bedrijf}$: 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 7.6;
- N_{Cycli} : schutfrequentie: het aantal schutcycli (heen en weer) per etmaal [-]; default: 12
- T_{Deur} : de tijd nodig voor het bewegen (openen of sluiten) van de sluisdeuren [min] default: 5 min
- T_{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_{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 (9) hieronder; default: 1 (conservatief), range 0 - 2 (grenzen nader te verifiëren)

Hieruit volgen:

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

$$T_{Cyclus} = \frac{T_{Bedrijf} \cdot 60 \cdot 60}{N_{Cycli}} \quad (6)$$

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

$$T_{Open, Gem} = \frac{1}{2} T_{Cyclus} - (T_{Niv} + \frac{2}{2} T_{Deur}) \cdot 60 \quad (7)$$

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 colk-uitwisseling loopt van halverwege de tijd voor het openen van de deur tot halverwege het sluiten van de deur.

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

$$T_{Open} = C_{Dot} T_{Open, Gem} \quad (8)$$

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

$$\begin{aligned} T_{Open, M} &= C_{M/Gem} T_{Open} \\ T_{Open, Z} &= (2 - C_{M/Gem}) T_{Open} \end{aligned} \quad (9)$$

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 formule 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;

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:

$$\text{LW: } V_{Niv,LW} = L_K B_K (h_M - h_Z) , V_{Niv,HW} = 0 \quad (10)$$

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

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.

$$V_U = V_K U = V_K \tanh \left(\frac{T_{Open}}{T_{LE}} \right) \quad (12)$$

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.

$$c_i = \frac{1}{2} \sqrt{g'H} = \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} H} \approx \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{0,8\Delta S}{\bar{\rho}_{MZ}} H} \quad (13)$$

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).

Voor $\bar{\rho}$ zou een waarde afgeleid kunnen worden uit de zoutgehaltenes aan weerskanten van de sluisdeur, gebruikmakend van de UNESCO-formulering. Door een vaste waarde af te leiden uit de randvoorwaarden (het gemiddelde van de zoutgehaltenes aan weerszijden van de sluis $\bar{\rho}_{MZ}$) wordt echter een zeer kleine fout geïntroduceerd.

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

$$T_{LE} = \frac{2L}{c_i} = \frac{4L}{\sqrt{g \frac{0,8\Delta S}{\bar{\rho}_{MZ}} H}} \quad (14)$$

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.

Bellenschermen

De effectiviteit van een bellenscherm wordt uitgedrukt in een **doorlaatfractie** η . 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:

$$V_U = V_K U = V_K \tanh\left(\frac{\eta T_{Open}}{T_{LE}}\right) \quad (15)$$

N.B. 1:

Deze manier om de η 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.

2.6 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 zou hiervoor over het algemeen een pomp nodig zijn, en zal het spoeldebiet in de praktijk daarom 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).

$$\text{LW: } Q_{\text{Spoel}} = Q_{\text{Spoel,LW}} \quad (16)$$

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

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:

$$V_{\text{Spoel}} = Q_{\text{Spoel}} (T_{\text{Open,M}} + T_{\text{Open,Z}}) \quad (18)$$

In de praktijk zal tijdens het invaren van schepen als de deur naar Meerzijde open staat ook niet gespoeld worden om schepen veilig te kunnen laten afmeren. In de Zeesluisformulering kan dit onderscheid niet worden gemaakt, en vindt het spoelen plaats gedurende de gehele deur-opentijd.

Spoeldebiet heeft interactie met de dichtheidsgolf en de schepen. Voor de onderstaande bespreking van het spoeldebiet gaan we uit van een kolk die echter geen schepen meer bevat.

We gaan over het algemeen uit van een simpele superpositie van de snelheid van de dichtheidsgolf en de snelheid van het spoeldebiet, net als Wanda-Locks dat doet. Dit heeft gevolgen voor het maximaal uitwisselbaar volume door de dichtheidsgolf, die hieronder verder worden toegelicht aan de hand van vier verschillende scenario's. Deze scenario's verschillen in de sterkte van het spoeldebiet (in verhouding tot die van de dichtheidsgolf):

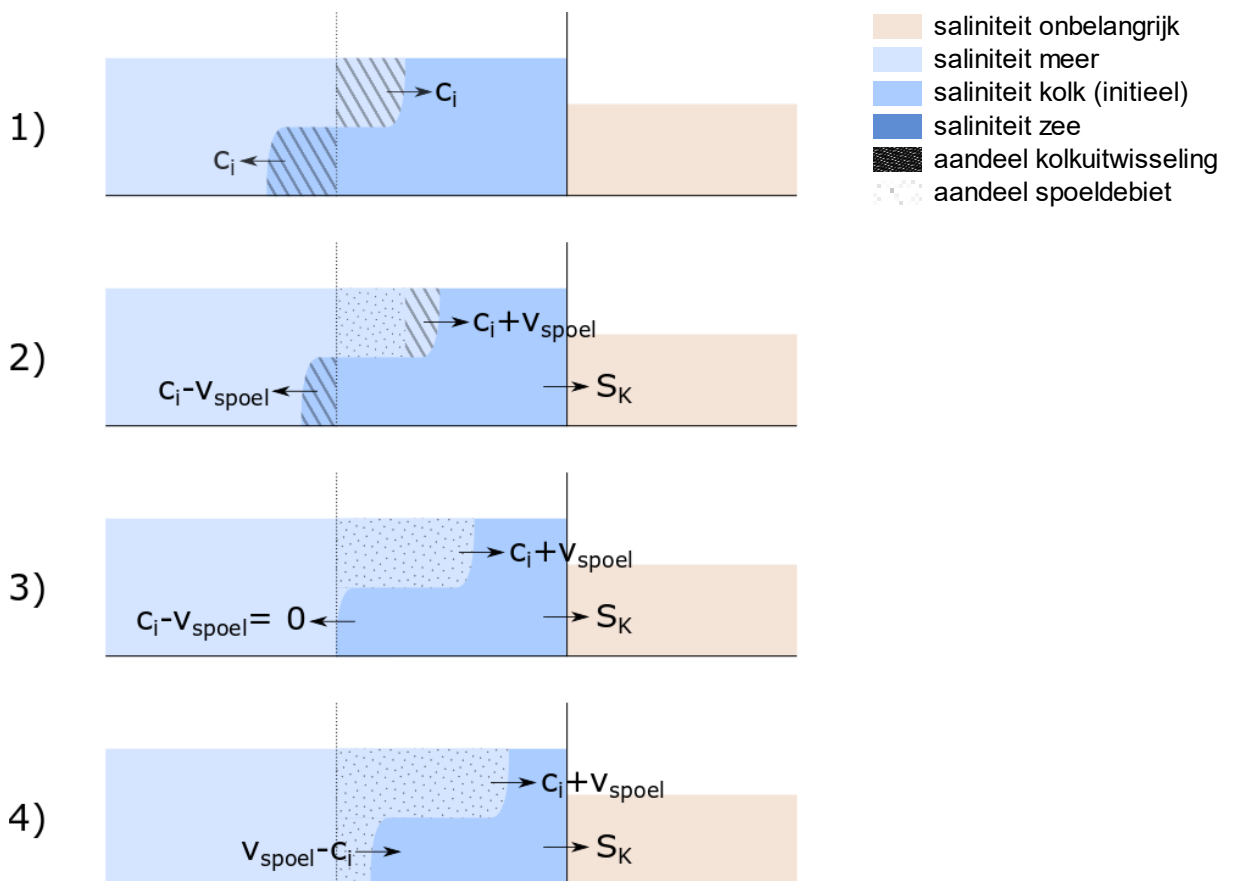
- 1 Geen spoeldebiet
- 2 Snelheid van spoeldebiet lager dan die van de dichtheidsgolf: $v_{\text{spoel}} = 0.5 \cdot c_i$
- 3 Snelheid van spoeldebiet is gelijk aan die van de dichtheidsgolf: $v_{\text{spoel}} = c_i$
- 4 Snelheid van spoeldebiet hoger dan die van de dichtheidsgolf: $v_{\text{spoel}} = 1.5 \cdot c_i$

Voor elk scenario beschouwen we de ingaande golf, de gereflecteerde golf, en de eindsituatie bij oneindig lange deur-opeentijd.

Omdat de interactie tussen spoeldebiet en dichtheidsgolf anders is voor Meerzijde en Zeezijde worden ze apart behandeld.

2.6.1 Spoeldebiet Meerzijde

Ingaande golf



Figuur 2.2 Schematisch overzicht van ingaande dichtheidsgolf als functie van het spoeldebiet

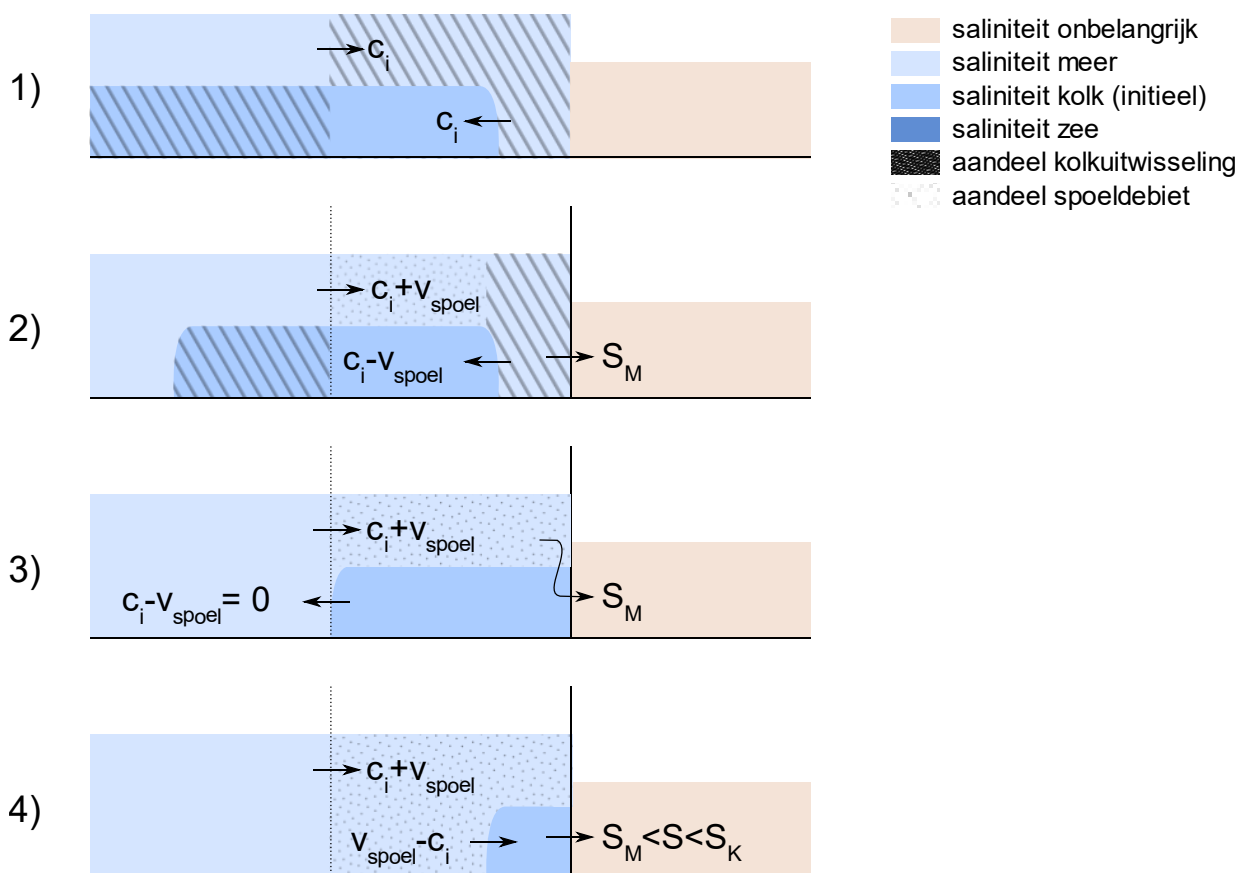
In Scenario 1 is kolkuitwisseling weergegeven zonder spoeldebiet, zoals beschreven in Paragraaf 2.5.2. Het water dat wordt uitgewisseld tussen kolk en zoete voorhaven is volledig toe te schrijven aan de dichtheidsgolf, die met snelheid c_i loopt.

In Scenario 2 is te zien wat er gebeurt als er wordt gespoeld met een snelheid lager dan die van de dichtheidsgolf. Het kolkwater dat over het grensvlak van de deur naar Meerzijde gaat kan daar enkel komen door de **kolkuitwisseling**. Een even grote bijdrage van de kolkuitwisseling is er in de kolk, maar een ander deel van de verzoeting in de kolk komt door

het spoeldebiet. In het geval van een spoelsnelheid van $0.5 c_i$ is de verhouding $2/3$ spoeldebiet, en $1/3$ kolkuitwisseling.

In Scenario 3 en 4 is te zien water er gebeurt als de snelheid van het spoeldebiet de snelheid van de dichtheidsgolf evenaart en overstijgt. De dichtheidsgolf krijgt in dit geval geen kans om de kolk uit te lopen, en dus zeggen we dat er geen kolkuitwisseling heeft plaatsgevonden. De verzoeting van de kolk is dan volledig toe te schrijven aan het spoeldebiet.

Gereflecteerde golf



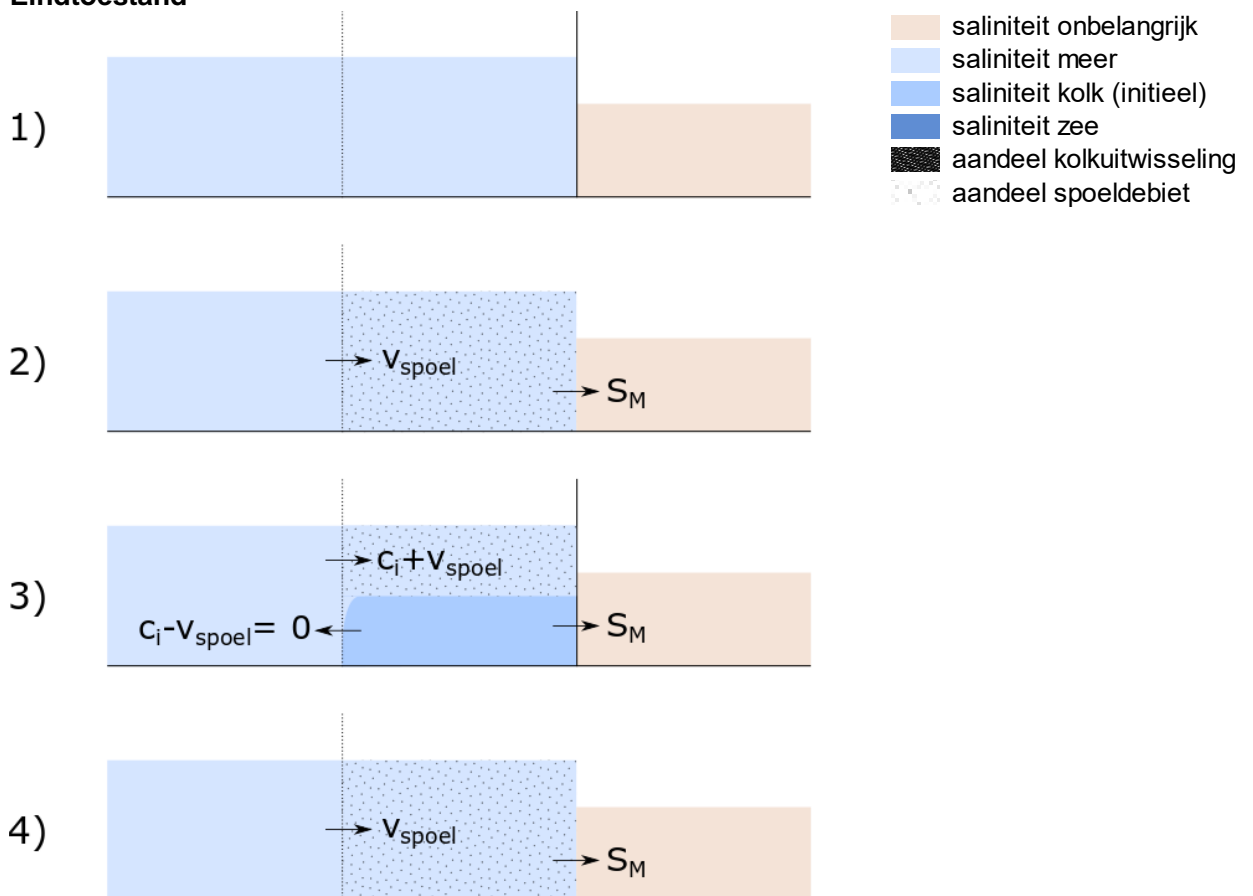
Figuur 2.3 Schematisch overzicht van reflecterende dichtheidsgolf als functie van het spoeldebiet

Als er geen sprake is van een spoeldebiet zoals in Scenario 1, is het tempo van de verzoeting van de kolk na reflectie gelijk aan die bij een ingaande golf. Dit geldt als we uitgaan van de snelheden zoals beschreven in bovenstaande figuur. In Paragraaf 2.5.2 is de aanpak met een tangens hyperbolicus beschreven, wat impliceert dat deze snelheid langzaam (maar continu) steeds lager wordt.

In Scenario 2 is te zien wat er gebeurt als er een spoeldebiet zou zijn. Waarbij er bij een ingaande golf nog water met saliniteit S_K de kolk uitgaat richting Zeezijde, is dat nu water met saliniteit S_M geworden. Dit betekent dat de verzoeting in de kolk in deze fase enkel schaaft met de snelheid van de uittrede (geremde) dichtheidsgolf, want al het inkomende spoeldebiet met saliniteit S_M gaat er ook weer bij Zeezijde uit. In tegenstelling tot Scenario 1 is er, als we uitgaan van de geschetste situatie, dus een abrupte overgang in het tempo waarmee de kolk verzoet. Na reflectie verzoet de kolk in Scenario 2 langzamer dan bij ingaande golf.

Voor Scenario 3 geldt vanuit continuïteit dat het debiet dat de kolk uitgaat richting Zeezijde de saliniteit heeft van het meer. Voor Scenario 4 gaat er een mengsel van kolkwater en meerwater naar buiten, en ligt de saliniteit van dit water dus ergens tussen deze twee waarden.

Eindtoestand



Figuur 2.4 Schematisch overzicht van eindsituatie als functie van het spoeldebiet

In het hypothetische geval dat de deur zeer lang openstaat is de eindtoestand in de meeste gevallen een volledig zoete kolk. Enkel voor Scenario 3 is er nog steeds sprake van een zoute onderlaag. Op basis van enkel superpositie van snelheden blijft deze onderlaag namelijk stilstaan. In de werkelijkheid zal menging op de grenslaag ervoor zorgen dat deze laag langzaam erodeert, dusdanig dat ook in dit geval een volledig zoete kolk zou ontstaan.

Vereenvoudiging en formulering

In voorgaande secties is besproken hoe de ingaande en reflecterende golf zich gedragen als we uitgaan van superpositie van snelheden. In Paragraaf 2.5.2 is de kolkuitwisseling zonder spoeldebiet (scenario 1) al uitgewerkt in formules. Waar alle scenario's voor ingaande golf nog duidelijk op dezelfde wijze beschreven zouden kunnen worden, is dit niet meer zo makkelijk voor een terugkerende golf of de eindsituatie. Er zou een abrupte overgang zijn in de snelheid waarmee de kolk verzoet, evenals dat de saliniteit van het spoelwater naar Zeezijde plots

verandert naar een nog onbekende waarde. Daarnaast is in de bovenstaande bespreking erosie/menging niet meegenomen, die in werkelijkheid wel degelijk zullen optreden.

Ten behoeve van een eenvoudige formulering doen we dan de volgende aannames:

- De eindsituatie is altijd een volledig zoete kolk (zoals in Scenario 1, 2 en 4). Hiermee liggen we dichterbij de werkelijkheid dan dat de consequentie zou zijn van enkel het (theoretische) principe van superpositie.
- De aanvankelijke snelheid van kolkuitwisseling (bij ingaande golf) schaalst met de verhouding tot het spoeldebiet. Dit tempo houden we vast, en laten we met een tangens hyperbolicus net als in Paragraaf 2.5.2 langzaam naar nul lopen.
- De snelheid van verzoeting door spoeldebiet is constant. Met andere woorden, het water dat de kolk ingaat door spoeldebiet heeft de saliniteit van het meer, en de saliniteit van het spoelwater dat naar Zeezijde gaat heeft de saliniteit van de kolk bij deur openen. Zodra de kolk volledig zoet is, is de verzoeting door spoeldebiet nul, en schakelt de saliniteit richting Zeezijde naar die van het Meer (gelijk aan de kolk op dat moment).

Als we dit vangen in formules, dan zien we dat de fractie kolkuitwisseling in Scenario 2 lineair schaalst met de verhouding van het spoelsnelheid tot de snelheid van de dichtheidsgolf, tot de situatie van Scenario 3 wordt bereikt:

$$f_{LE,Spoel} = \max\left(\frac{c_i - v_{spoel}}{c_i}, 0\right) \quad (19)$$

Dit leidt dan tot de volgende nieuwe vergelijking voor het uitgewisselde volume door kolkuitwisseling (met V_U zoals bepaald in Paragraaf 2.5.2) :

$$V_{U,M} = f_{LE,Spoel} V_U \quad (20)$$

Met deze versimpelingen wordt de kolk sneller zoet dan in werkelijkheid, maar er gaat ook minder zout naar de zoete zijde. Hoe conservatief of optimistisch de formulering daarmee is in de bepaling van de zoutlast (en zoetlast), is niet bekend. Dit wordt ook benoemd als aandachtspunt in Hoofdstuk 7.

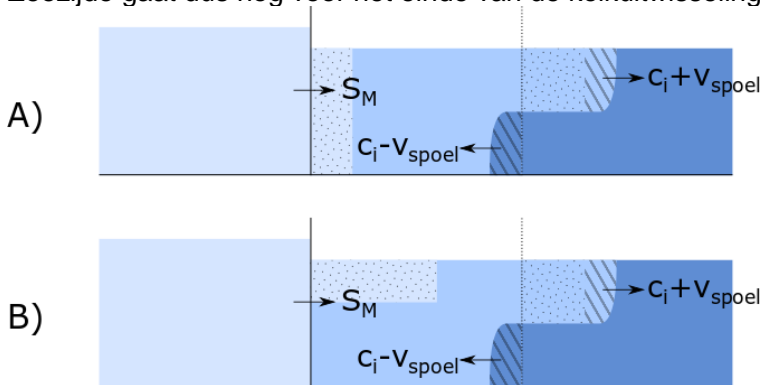
Voor Scenario 2 t/m 4 geldt tevens dat het spoeldebiet het volgende volume verplaatst

$$V_{Spoel} = Q_{Spoel} T_{Open,M} \quad (21)$$

De saliniteit van dit spoeldebiet is altijd S_M over het grensvlak tussen Meerzijde en kolk. Over het grensvlak tussen kolk en Zeezijde is de saliniteit aanvankelijk S_K , overschakelend naar S_M , zodra de kolk volledig zoet is. In Scenario 3 en 4, waar er in tegenstelling tot Scenario 1 en 2 geen verzoeting van de kolk optreedt door kolkuitwisseling, is deze omschakeling dus zodra V_{Spoel} gelijk is aan V_K .

2.6.2 Spoeldebiet Zeezijde

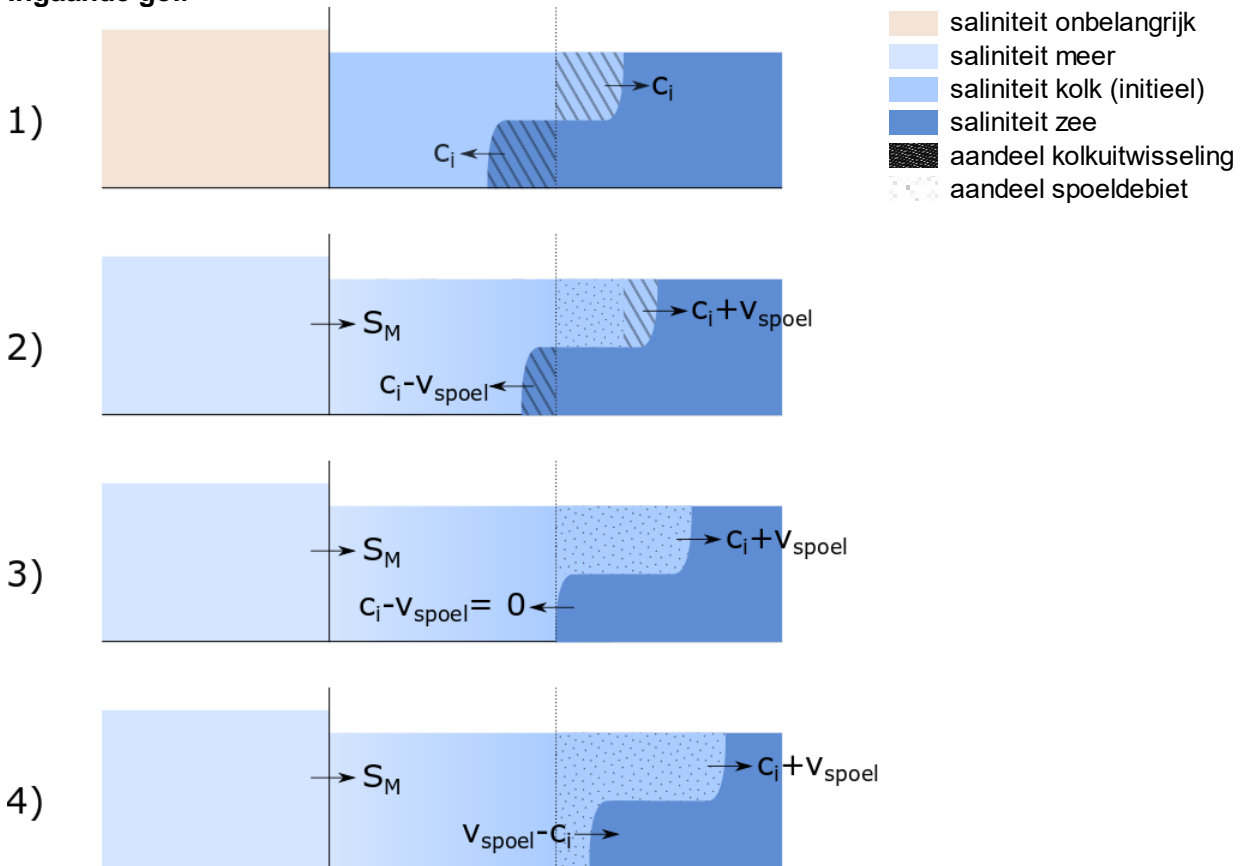
Bij spoelen met de deur naar Zeezijde open komt er zoet water de kolk binnen. Twee extremen van deze situatie zijn weergegeven in onderstaande figuur. In werkelijkheid zal de verdeling van het zoete spoelwater ergens tussen deze twee extremen in liggen, en zal de grens met het kolkwater ook minder scherp zijn door menging. In werkelijkheid zal het kolkwater dat naar Zeezijde gaat dus nog voor het einde van de kolkuitwisseling al zoeter worden.



Figuur 2.5 Schematisch overzicht van verzoeting kolk door spoeldebiet bij deur open naar Zeezijde

Bij onderstaande bespreking van de ingaande en reflecterende golf negeren we het effect van het zoeter worden van de kolk op de snelheid van de kolkuitwisseling.

Ingaande golf

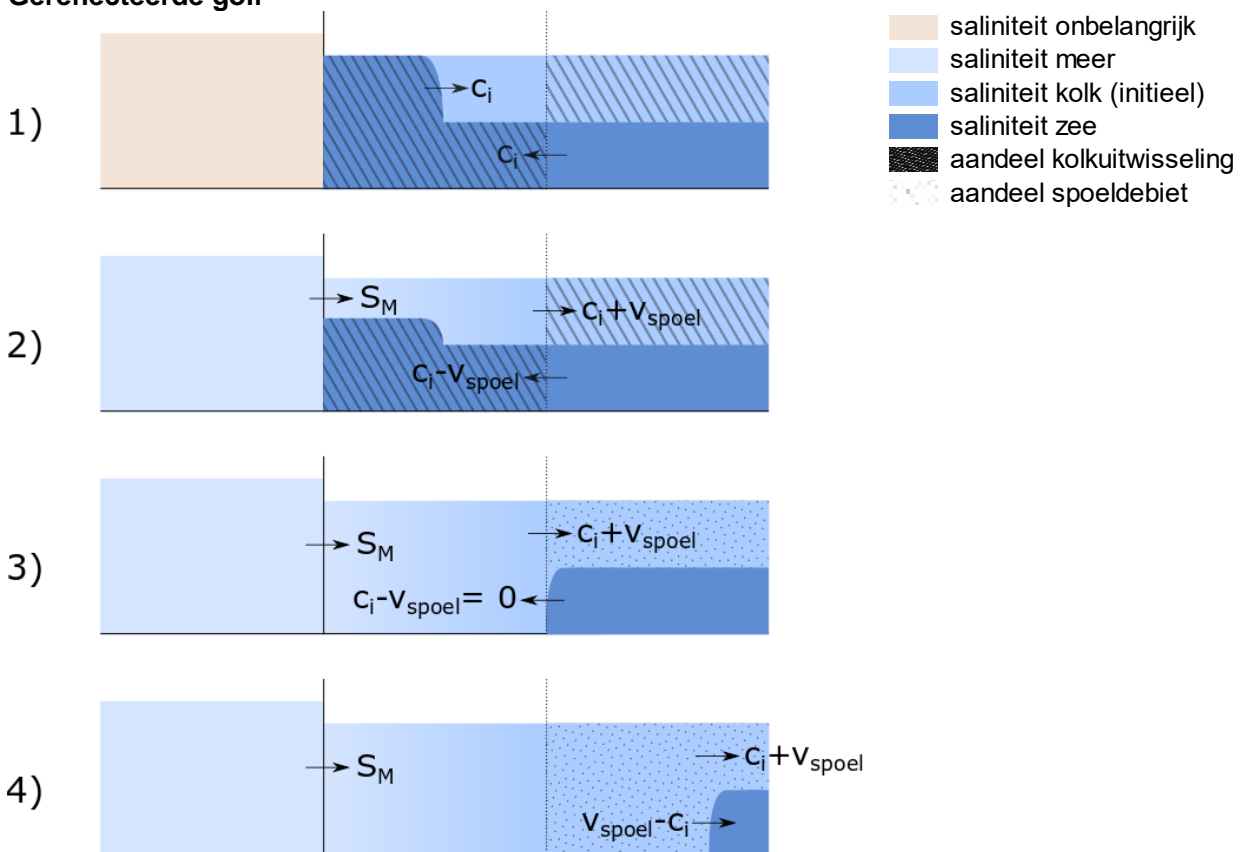


In Scenario 1 is kolkuitwisseling weergegeven zonder spoeldebiet. Het water dat wordt uitgewisseld tussen kolk en zoete voorhaven is volledig toe te schrijven aan de dichtheidsgolf, die met snelheid c_i loopt.

In Scenario 2 is te zien wat er gebeurt als er wordt gespoeld met een snelheid lager dan die van de dichtheidsgolf. Het kolkwater dat over het grensvlak van de deur de kolk ingaat kan enkel daar komen door **kolkuitwisseling**. Een even grote bijdrage van de kolkuitwisseling is er in de kolk. Het andere deel van kolkwater dat naar Zeezijde gaat komt door het spoeldebiet. Een even groot deel zoet water uit Meerzijde komt de kolk binnen. De kolk is dus zowel zouter aan het worden (aan de Zeezijde) als zoeter (aan de Meerzijde).

In Scenario 3 en 4 is te zien wat er gebeurt als de snelheid van het spoeldebiet de snelheid van de dichtheidsgolf evenaart en overstijgt. De dichtheidsgolf krijgt in dit geval geen kans om de kolk in te lopen, en dus zeggen we dat er geen kolkuitwisseling (tussen kolk en voorhaven) heeft plaatsgevonden. Er is dus een **verzouting** van de kolk in dit geval, die volledig is toe te schrijven aan het spoeldebiet.

Gereflecteerde golf

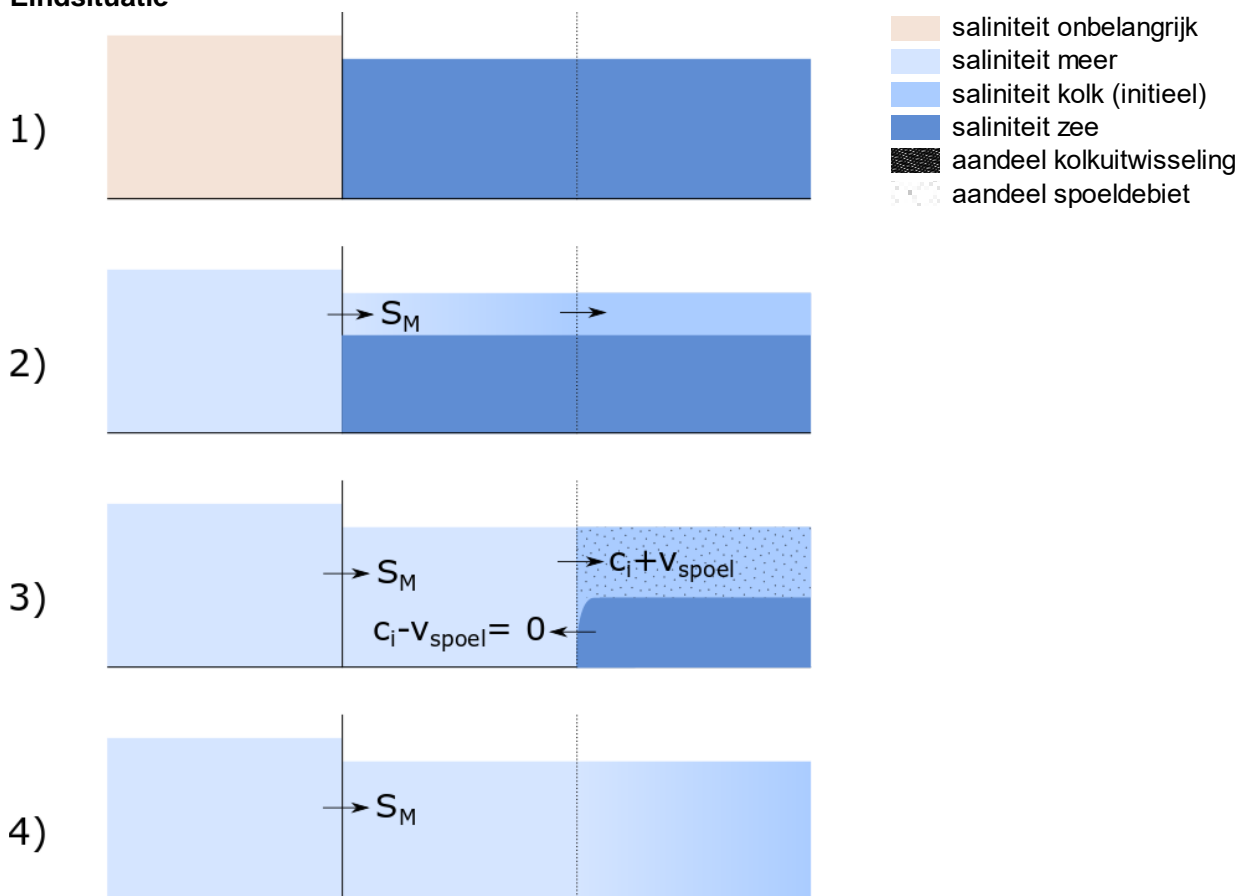


Als er geen sprake is van een spoeldebiet is het tempo van de verzilting van de kolk gelijk aan die bij een ingaande golf, waarbij we uitgaan van de snelheden zoals weergegeven in bovenstaande figuur. In Paragraaf 2.5.2 is de aanpak met een tangens hyperbolicus beschreven, wat zou betekenen dat deze snelheid langzaam (maar continu) steeds lager wordt.

In Scenario 2 is te zien wat er gebeurt als er een spoeldebiet zou zijn. De zoute tong komt nog steeds met dezelfde snelheid de kolk binnen, maar de uitgaande tong zal sneller moeten gaan omdat deze niet de volledige (halve) hoogte kan beslaan.

In Scenario 3 en 4 blijft de dichtheidsgolf nog steeds buiten. In werkelijkheid zal de dichtheidsgolf in Scenario 3 waarschijnlijk langzaam de kolk binnen gaan lopen, omdat de kolk verzoet en daarmee het aandrijvend dichtheidsverschil groter wordt. De saliniteit van het water dat in deze twee scenario's naar buiten gaat ligt waarschijnlijk ergens tussen de aanvankelijke kolk saliniteit en saliniteit van Meerzijde in.

Eindsituatie



Als de deur naar de Zeezijde oneindig lang open staat is, de equilibriumsituatie afhankelijk van de snelheid van het spoeldebiet.

In Scenario 1 wordt de kolk door kolkuitwisseling volledig zout.

In Scenario 2 ontstaat een zekere balans tussen het aandrijvend dichtheidsverschil, en het spoeldebiet dat de kolk uitgaat. Voor het gemak gaan we uit van een scherpe grenslaag tussen zoet en zout water. In werkelijkheid zal er menging optreden en zal de grenslaag minder scherp zijn, en zal dit op zijn beurt de kolkuitwisseling beïnvloeden.

In Scenario 3 en 4 wordt de kolk volledig zoet. De kanttekening hierbij is dat het aandrijvend dichtheidsverschil toeneemt, en daarmee de dichtheidsgolf in werkelijkheid toch de kolk in kan gaan lopen. Dan zou een situatie ontstaan zoals in Scenario 2.

Vereenvoudiging en formulering

In voorgaande secties is besproken hoe de ingaande en reflecterende golf zich gedragen als we uitgaan van superpositie van snelheden, en voorbijgaan aan menging van het spoeldebiet en kolkwater. In Paragraaf 2.5.2 is de kolkuitwisseling zonder spoeldebiet (Scenario 1) al uitgewerkt in formules met een tangens hyperbolicus. In tegenstelling tot Meerzijde is er nu een duidelijk onderscheid in de eindsituatie tussen Scenario 1 en 2 (kolk zout of deels zout), en Scenario 3 en 4 (kolk volledig zoet). De formulering zal hier dus ook onderscheid in moeten kunnen maken.

Net zoals bij de bespreking voor deur open aan Meerzijde is het beschrijven van de overgang van ingaande naar reflecterende golf ingewikkeld. Dit wordt verder bemoeilijkt door de langzame verzoeting van de kolk door spoelwater, waarbij onbekend is hoe deze menging precies plaats vindt (e.g. drijft zoet water snel naar boven, of wordt de kolk door menging langzaam zoet).

Ten behoeve van een eenvoudige formulering doen we dan de volgende aannames:

- De dikte van de bovenlaag die in Scenario 2 ontstaat is een functie van het dichtheidsverschil tussen Zeezijde en Meerzijde en het spoeldebiet. Hoe groter het spoeldebiet hoe dikker de zoete laag. Hoe groter het dichtheidsverschil, hoe dunner deze bovenlaag.
- In Scenario 1 en 2 hanteren we het gedrag besproken in Paragraaf 2.5.2, waarbij de uitwisselingssnelheid continu (volgens de tangens hyperbolicus) afneemt. De aanvankelijke uitwisselingssnelheid in scenario 2 is $c_i - v_{spoel}$, en het maximaal uitwisselbaar volume is niet het volledige kolkvolume zoals besproken in de vorige aanname. Het maximaal uitwisselbaar volume is namelijk $V_K - V_{bovenlaag}$.
- In Scenario 3 en 4 wordt de kolk niet zout. De snelheid van verzoeting door spoeldebiet is constant. Met andere woorden, het water dat de kolk ingaat door spoeldebiet heeft de saliniteit van het meer, en de saliniteit van het spoelwater dat naar Zeezijde gaat heeft de saliniteit van de kolk bij deur openen. Zodra de kolk volledig zoet is, is de verzoeting door spoeldebiet nul, en schakelt de saliniteit richting Zeezijde naar die van Meerzijde (gelijk aan de kolk op dat moment).

Voor Scenario 1 kan daarmee de formulering van Paragraaf 2.5.2 gebruikt worden, of de onderstaande formulering voor Scenario 2 met H_{eq} gelijk aan nul. In formules geldt voor Scenario 2 dat we de dikte van de bovenlaag bepalen door (13) op te lossen voor de hoogte, en c_i gelijk te stellen aan de snelheid in de bovenlaag $v_{bovenlaag}$:

$$H_{eq} = 0.5 \frac{(2 \cdot v_{bovenlaag})^2 \cdot \bar{\rho}_{MZ}}{g \cdot 0.8 (S_Z - S_M)} \quad (22)$$

$$v_{grenslaag} = \frac{Q_{spoel}}{H_{eq} \cdot B_K} \quad (23)$$

Voor het gemak schrijven we de vaste termen even als een constante:

$$C = \frac{\bar{\rho}_{MZ}}{g \cdot 0.8(S_Z - S_M)} \quad (24)$$

Vervolgens kunnen we H_{eq} opschrijven als functie van zichzelf:

$$H_{eq} = 2 \frac{Q_{spoel}^2}{H_{eq}^2 B_K^2} \cdot C \quad (25)$$

Dit is ook expliciet te schrijven als:

$$H_{eq} = \left(2 \cdot \frac{Q_{spoel}^2}{B_K^2} \cdot C \right)^{1/3} \quad (26)$$

Daarmee is de door kolkuitwisseling maximaal uitwisselbare fractie van de kolk:

$$f_{LE,Spoel} = \frac{H_Z - H_{eq}}{H_Z} \quad (27)$$

De tijd T_{LE} die het duurt om dit volume uit te wisselen wordt dan gedefinieerd als volgt:

$$T_{LE,Z} = \frac{2 \cdot f_{LE,Spoel} \cdot L_K}{\eta c_i - v_{spoel}} \quad (28)$$

Dit leidt dan tot de volgende vergelijking voor het uitgewisselde volume door kolkuitwisseling:

$$V_{U,Z} = f_{LE,Spoel} V_{K,Z} \tanh \left(\frac{T_{Open}}{T_{LE,Z}} \right) \quad (29)$$

Voor Scenario 2 t/m 4 geldt dat het spoeldebiet het volgende volume verplaatst

$$V_{Spoel} = Q_{Spoel} T_{Open,Z} \quad (30)$$

Voor Scenario 2 t/m 4 geldt tevens dat het spoeldebiet het volgende volume verplaatst

$$V_{Spoel} = Q_{Spoel} T_{Open,M} \quad (31)$$

De saliniteit van dit spoeldebiet is altijd S_M over het grensvlak tussen Meerzijde en kolk. Over het grensvlak tussen kolk en Zeezijde is de saliniteit aanvankelijk S_K , overschakelend naar S_M , zodra de kolk volledig zoet is. In Scenario 3 en 4, waar er in tegenstelling tot Scenario 1 en 2



Datum
6 augustus 2018

Ons kenmerk
11200741-000-HYE-0004

Pagina
23/45

geen verzouting van de kolk optreedt door kolkuitwisseling, is deze omschakeling zodra V_{spoei} gelijk is aan V_K .

2.7 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: $\eta, Q_{Spoel,LW}, Q_{Spoel,HW}$

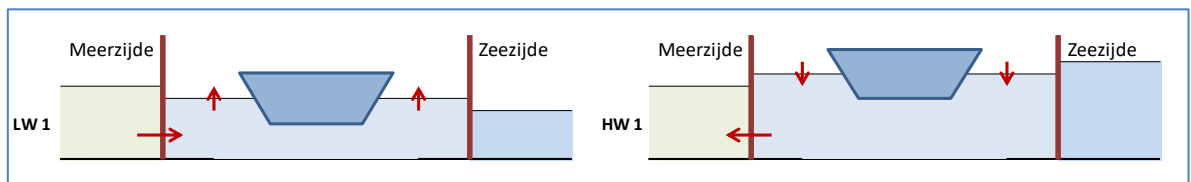
3 Vergelijkingen per schutfase

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:

$$LW : M_{M,LW1} = V_{Niv,LW} S_M \quad (32)$$

Idem bij HW:

$$HW : M_{M,HW1} = -V_{Niv,HW} S_{K,Z} \quad (33)$$

Omdat per definitie (zie vergelijkingen (10) en (11)) óf $V_{Niv,LW} = 0$ óf $V_{Niv,HW} = 0$ kunnen beide vergelijkingen worden opgeteld tot één vergelijking:

$$M_{M,1} = V_{Niv,LW} S_M - V_{Niv,HW} S_{K,Z} \quad (34)$$

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.

$$LW : S_{K,Z,Niv} = \frac{S_{K,Z}(V_{K,Z} - V_{Schip,Opw}) + S_M V_{Niv,LW}}{V_{K,M} - V_{Schip,Opw}} \quad (35)$$

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:

$$HW : S_{K,Z,Niv} = S_{K,Z} \quad (36)$$

Hiermee mogen we vergelijking (34) ook schrijven als:

$$M_{M,1} = V_{Niv,LW} S_M - V_{Niv,HW} S_{K,Z,Niv} \quad (37)$$

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

De fasegemiddelde lozingen en onttrekkingen aan de Meerzijde zijn dan als volgt (er zijn geen onttrekkingen of lozingen aan de Zeezijde):

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

$$V_{M,1}^- = V_{Niv,LW} \quad (38)$$

$$Q_{M,1}^- = \frac{V_{M,1}^-}{T_{Niv}} \quad (39)$$

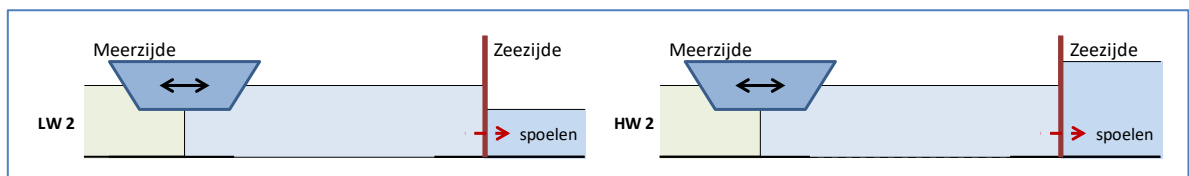
- lozing aan Meerzijde met saliniteit $S_{K,Z}$:

$$V_{M,1}^+ = V_{Niv,HW} \quad (40)$$

$$Q_{M,1}^+ = \frac{V_{M,1}^+}{T_{Niv}} \quad (41)$$

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
2. Zouttransport door kolkuitwisseling (met of zonder spoeldebiet)
3. Zouttransport door invaren schepen

Als deze processen onafhankelijk worden berekend en opgeteld, bestaat de kans op een te grote zoutlast. Er zou dan een saliniteit in de kolk kunnen ontstaan die lager is dan Meerzijde

Datum
6 augustus 2018

Ons kenmerk
11200741-000-HYE-0004

Pagina
27/45

of hoger dan Zeezijde. Om dit te voorkomen, zijn er binnen deze schutfase drie subfasen overeenkomstig de bovenstaande opsomming, die elk leiden tot een tussentijdse saliniteit van de kolk:

(1): Zouttransport door uitvaren schepen:

$$M_{M,2a} = V_{Schip,Opw} S_M \quad (42)$$

$$S_{K,2a} = \frac{S_{K,Z,Niv} (V_{K,M} - V_{Schip,Opw}) + M_{M,2a}}{V_{K,M}} \quad (43)$$

(2): Zouttransport door kolkuitwisseling (met of zonder spoelen)

Aandeel kolkuitwisseling:

$$M_{M,2b,LE} = V_{U,M} S_M - V_{U,M} S_{K,2a} \quad (44)$$

Met $V_{U,M}$ zoals bepaald in (20).

Aandeel spoelen over hoofd meerzijde:

$$V_{Spoelen} = Q_{Spoel} T_{Open,M} \quad (45)$$

$$M_{M,2b,Spoelen} = V_{Spoelen} S_M \quad (46)$$

Aandeel spoelen over hoofd zeezijde. Bij lang spoelen wordt de kolk volledig zoet, en verandert de saliniteit van spoeldebiet richting zeezijde:

$$V_{Spoelen,Max} = V_{K,M} - V_{U,M} \quad (47)$$

$$M_{Z,2b,Spoelen} = \min(V_{Spoelen}, V_{Spoelen,Max}) S_{K,2a} + \max(V_{Spoelen} - V_{Spoelen,Max}, 0) S_M \quad (48)$$

Nieuwe saliniteit:

$$S_{K,2b} = \frac{S_{K,2a} V_{K,M} + M_{M,2b,LE} + M_{M,2b,Spoelen} - M_{Z,2b,Spoelen}}{V_{K,M}} \quad (49)$$

(3): Zouttransport door invaren schepen:

$$M_{M,2c} = -V_{Schip,Afw} S_{K,2b} \quad (50)$$

3.3 Totale transporten en zoutgehalten aan het einde van fase LW 2 / HW 2

Het totale zouttransport over het sluishoofd Meerzijde tijdens deze schutfase volgt uit de som van componenten:

$$M_{M,2} = M_{M,2a} + M_{M,2b,Spoelen} + M_{M,2b,LE} + M_{M,2c} \quad (51)$$

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

$$M_{Z,2} = M_{Z,2b,Spoelen} \quad (52)$$

Het uiteindelijke zoutgehalte in de kolk is dan

$$S_{K,M} = \frac{S_{K,Z,Niv} (V_{K,M} - V_{Schip,Opw}) + M_{M,2} - M_{Z,2}}{(V_{K,M} - V_{Schip,Afw})} \quad (53)$$

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

De fasegemiddelde lozingen en onttrekkingen van en naar Meerzijde en Zeezijde zijn dan als volgt:

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

$$V_{M,2}^- = V_{Schip,Opw} + V_{U,M} + V_{Spoelen} \quad (54)$$

$$Q_{M,2}^- = \frac{V_{M,2}^-}{T_{Open,M}} \quad (55)$$

- lozing aan Meerzijde met een gemiddelde saliniteit $S_{M,2}^+$:

$$V_{M,2}^+ = V_{Schip,Afw} + V_{U,M} \quad (56)$$

$$Q_{M,2}^+ = \frac{V_{M,2}^+}{T_{Open,M}} \quad (57)$$

$$S_{M,2}^+ = -\frac{M_{M,2} - V_{M,2}^- \cdot S_M}{V_{M,2}^+} \quad (58)$$

- er is geen onttrekking aan de Zeezijde in deze schutfase

- lozing aan Zeezijde met een gemiddelde saliniteit S^+_Z :

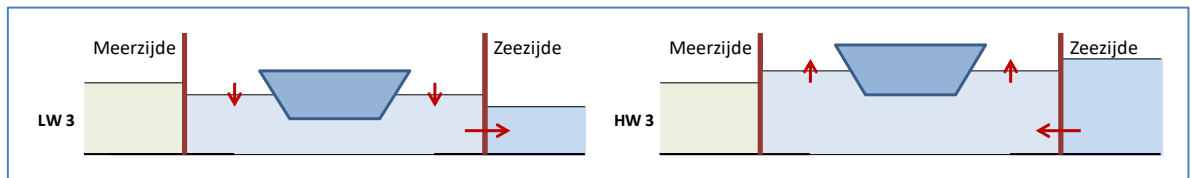
$$V_{Z,2}^+ = Q_{Spoel} T_{Open,M} \quad (59)$$

$$Q_{Z,2}^+ = Q_{Spoel} \quad (60)$$

$$S_{Z,2}^+ = \frac{M_{Z,2}}{V_{Z,2}^+} \quad (61)$$

3.4 LW 3 / HW 3: Nivelleren Zeezijde, debiet van kolk 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:

$$M_{Z,3} = V_{Niv,LW} S_{K,M} - V_{Niv,HW} S_Z \quad (62)$$

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:

$$LW : S_{K,M,Niv} = S_{K,M} \quad (63)$$

Hiermee mogen we vergelijking (62) ook schrijven als:

$$M_{Z,3} = V_{Niv,LW} S_{K,M,Niv} - V_{Niv,HW} S_Z \quad (64)$$

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.

$$HW : S_{K,M,Niv} = \frac{S_{K,M} (V_{K,M} - V_{Schip,Afw}) + S_Z V_{Niv,HW}}{V_{K,Z} - V_{Schip,Afw}} \quad (65)$$

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

De fasegemiddelde lozingen en onttrekkingen aan de Zeezijde zijn dan als volgt (er zijn geen onttrekkingen of lozingen aan de Meerzijde):

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

$$V_{Z,3}^- = V_{Niv,HW} \quad (66)$$

$$Q_{Z,3}^- = \frac{V_{Z,3}^-}{T_{Niv}} \quad (67)$$

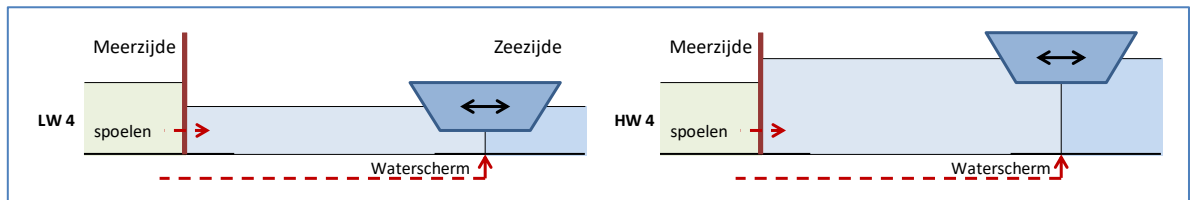
- lozing aan Zeezijde met saliniteit $S_{K,M}$:

$$V_{Z,3}^+ = V_{Niv,LW} \quad (68)$$

$$Q_{Z,3}^+ = \frac{V_{Z,3}^+}{T_{Niv}} \quad (69)$$

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 over het sluishoofd aan de Zeezijde. Deze zijn:

1. Zouttransport door uitvaren schepen
2. Zouttransport door kolkuitwisseling (met of zonder spoeldebiet)
3. Zouttransport door invaren schepen

Als deze processen onafhankelijk worden berekend en opgeteld, bestaat de kans op een te grote zoutlast. Er zou dan een saliniteit in de kolk kunnen ontstaan die lager is dan Meerzijde of hoger dan Zeezijde. Om dit te voorkomen, zijn er binnen deze schutfase drie subfasen, overeenkomstig de bovenstaande opsomming, die elk leiden tot een tussentijdse saliniteit van de kolk:

- (1): Zouttransport door uitvaren schepen:

$$M_{Z,4a} = -V_{Schip,Afw} S_Z \quad (70)$$

$$S_{K,4a} = \frac{S_{K,M,Niv} (V_{K,Z} - V_{Schip,Afw}) + M_{Z,4a}}{V_{K,Z}} \quad (71)$$

(2): Zouttransport door kolkuitwisseling (met of zonder spoelen)

Aandeel kolkuitwisseling:

$$M_{Z,4b,LE} = V_{U,Z} S_{K,2a} - V_{U,Z} S_Z \quad (72)$$

Met $V_{U,Z}$ zoals bepaald in (29).

Aandeel spoelen over hoofd meerzijde:

$$V_{Spoelen} = Q_{Spoel} T_{Open,M} \quad (73)$$

$$M_{M,4b,Spoelen} = V_{Spoelen} S_M \quad (74)$$

Aandeel spoelen over hoofd zeezijde. Bij lang spoelen ontstaat een equilibriumsituatie zoals beschreven in Paragraaf 2.6.2. Ook verandert de saliniteit van het spoeldebiet richting Zeezijde van die van de kolk naar die van de Meerzijde.

$$V_{Spoelen,Max} = V_{K,Z} - V_{U,Z} \quad (75)$$

$$M_{Z,4b,Spoelen} = \min(V_{Spoelen}, V_{Spoelen,Max}) S_{K,4a} + \max(V_{Spoelen} - V_{Spoelen,Max}, 0) S_M \quad (76)$$

Nieuwe saliniteit:

$$S_{K,4b} = \frac{S_{K,4a} V_{K,M} - M_{Z,4b,LE} + M_{M,4b,Spoelen} - M_{Z,4b,Spoelen}}{V_{K,Z}} \quad (77)$$

(3): Zouttransport door invaren schepen:

$$M_{Z,4c} = V_{Schip,Opw} S_{K,4b} \quad (78)$$

3.6 Totale transporten en zoutgehalten aan het einde van fase LW 4 / HW 4

Het totale zouttransport over het sluishoofd Zeezijde tijdens deze schutfase volgt uit de som van componenten:

$$M_{Z,4} = M_{Z,4a} + M_{Z,4b,Spoelen} + M_{Z,4b,LE} + M_{Z,4c} \quad (79)$$

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

$$M_{M,4} = M_{M,4b,Spoelen} \quad (80)$$

Het uiteindelijke zoutgehalte in de kolk is dan

$$S_{K,Z} = \frac{S_{K,M,Niv} (V_{K,Z} - V_{Schip,Afw}) + M_{M,4} - M_{Z,4}}{(V_{K,Z} - V_{Schip,Opw})} \quad (81)$$

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

De fasegemiddelde lozingen en onttrekkingen van en naar Meerzijde en Zeezijde zijn dan als volgt:

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

$$V_{Z,4}^- = V_{Schip,Afw} + V_{U,Z} \quad (82)$$

$$Q_{Z,4}^- = \frac{V_{Z,4}^-}{T_{Open,Z}} \quad (83)$$

- lozing aan Zeezijde met een gemiddelde saliniteit S_Z^+ :

$$V_{Z,4}^+ = V_{Schip,Opw} + V_{U,Z} + V_{Spoel} \quad (84)$$

$$Q_{Z,4}^+ = \frac{V_{Z,4}^+}{T_{Open,Z}} \quad (85)$$

$$S_{Z,4}^+ = \frac{M_{Z,4} - V_{Z,4}^- \cdot S_Z}{V_{Z,4}^+} \quad (86)$$

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

$$V_{M,4}^- = Q_{Spoel} T_{Open,Z} \quad (87)$$

$$Q_{M,4}^- = Q_{Spoel} \quad (88)$$

- er is geen lozing aan de Meerzijde

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:

$$M_M = M_{M,1} + M_{M,2} + M_{M,4} \quad (89)$$

Daarnaast hebben we informatie over het volume dat aan het meer wordt onttrokken

$$V_M^- = V_{Niv,LW} + V_{Schip,Opw} + V_{U,M} + Q_{spoel} \cdot 2 \cdot T_{open} \quad (90)$$

en het volume dat op het meer wordt geloosd

$$V_M^+ = V_{Niv,HW} + V_{U,M} + V_{Schip,Afw} \quad (91)$$

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 :

$$Q_M^- = \frac{V_M^-}{T_{Cyclus}} \quad (92)$$

- lozing aan Meerzijde met een door de formulering te bepalen gemiddelde saliniteit:

$$Q_M^+ = \frac{V_M^+}{T_{Cyclus}}; S = S_M^+ \quad (93)$$

De gemiddelde saliniteit voor het geloosde water naar Meerzijde wordt bepaald uit de massatransporten en volumetransporten:

$$S_M^+ = -\frac{(M_M - V_M^- S_M)}{V_M^+} \quad (94)$$

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 te delen door de tijd voor een complete schutcyclus:

$$\dot{M}_M = \frac{M_M}{T_{Cyclus}} \quad (95)$$

4.2 Zeezijde

De gecombineerde vergelijking voor de Zeezijde is:

$$M_Z = M_{Z,2} + M_{Z,3} + M_{Z,4} \quad (96)$$

Wederom kunnen we de volumes die van en naar Zeezijde gaan opschrijven. Voor de onttrekking is dat:

$$V_Z^- = V_{Niv,HW} + V_{Schip,Afw} + V_{U,Z,Spoelen} \quad (97)$$

en het volume dat op de zee wordt geloosd

$$V_Z^+ = V_{Niv,LW} + V_{U,Z,Spoelen} + V_{Schip,Opw} + Q_{spoel} \cdot 2 \cdot T_{open} \quad (98)$$

Door beide volumes te delen door de tijd voor een complete schutcyclus zijn weer 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 Zeezijde, met de daar geldende saliniteit S_Z :

$$Q_Z^- = \frac{V_Z^-}{T_{Cyclus}} \quad (99)$$

- lozing aan Zeezijde met een door de formulering te bepalen gemiddelde saliniteit:

$$Q_Z^+ = \frac{V_Z^+}{T_{Cyclus}}; S = S_Z^+ \quad (100)$$

De gemiddelde saliniteit voor het geloosde water naar Zeezijde wordt bepaald uit de massatransporten en volumetrasporten:

$$S_Z^+ = \frac{(M_Z + V_Z^- S_Z)}{V_Z^+} \quad (101)$$

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 te delen door de tijd voor een complete schutcyclus:

$$\dot{M}_Z = \frac{M_Z}{T_{Cyclus}} \quad (102)$$

Bij een equilibriumtoestand geldt vanzelfsprekend dat

$$\dot{M}_Z = \dot{M}_M \quad (103)$$

5 Rekenkundige aanpak cyclus-gemiddelde waarden

De beschrijving in Hoofdstuk 3 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 cyclus-gemiddelde 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 3 en 4 kunnen de essentiële vergelijkingen worden geselecteerd, die samen een stelsel van vergelijkingen met 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. Deze waarden ontstaan in de schutcyclus, zoals beschreven in Hoofdstuk 3.

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 de onbekenden, gevolgd door de directe berekening van de lozingen, Q_M^+ met S_M^+ en Q_Z^+ met S_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.) Niet alle vergelijkingen zijn lineair, dus zal herhaaldelijk een stelsel van gelineariseerde vergelijkingen opgelost moeten worden tot de waarden voor de onbekenden zijn geconvergeerd. In de praktijk biedt deze manier van oplossen weinig tot geen

voordeel boven iteratief doorrekenen zoals beschreven in Paragraaf 5.1, en daarmee laten we een verdere uitwerking hier achterwege. Ter illustratie van hoe een stelsel van vergelijkingen toch opgesteld zou kunnen worden verwijzen we naar de formulering beschreven in [1], waarvan de zeesluisformulering in dit rapport een doorontwikkeling is.

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:

$$M_M, \dot{M}_M, Q^-_M, Q^+_M, S^+_M, M_Z, \dot{M}_Z, Q^-_Z, Q^+_Z, S^+_Z.$$

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 sluis, of operationele parameters zoals deur-opentijden. Ook kunnen de cyclus-gemiddelde 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 schutcyclus gebruiken we de parameter $Z_{fractie}$, gedefinieerd als een factor op het kolkvolume maal het verschil in zoutgehalte aan beide kanten.

$$M = Z_{fractie} V_K \cdot \Delta S \quad (1.104)$$

Daarmee geeft $Z_{fractie}$, aan welk deel (factor) van de kolk, in het regelmatige schutproces, 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 $Z_{fractie}$:

$$Z_{fractie} = \frac{\bar{M}}{V_K \cdot (S_Z - S_M)} = \frac{0,5 \cdot (M_M + M_Z)}{0,5 \cdot (V_{K,M} + V_{K,Z}) \cdot (S_Z - S_M)} \quad (1.105)$$

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-oopentijd: $T_{LE,MZ} / T_{Open}$

$$c_{i,MZ} = \frac{1}{2} \sqrt{g' \overline{H}} = \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} \overline{H}} \approx \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{0,8(S_Z - S_M)}{\bar{\rho}_{MZ}} \left(\frac{H_M + H_Z}{2} \right)} \quad (106)$$

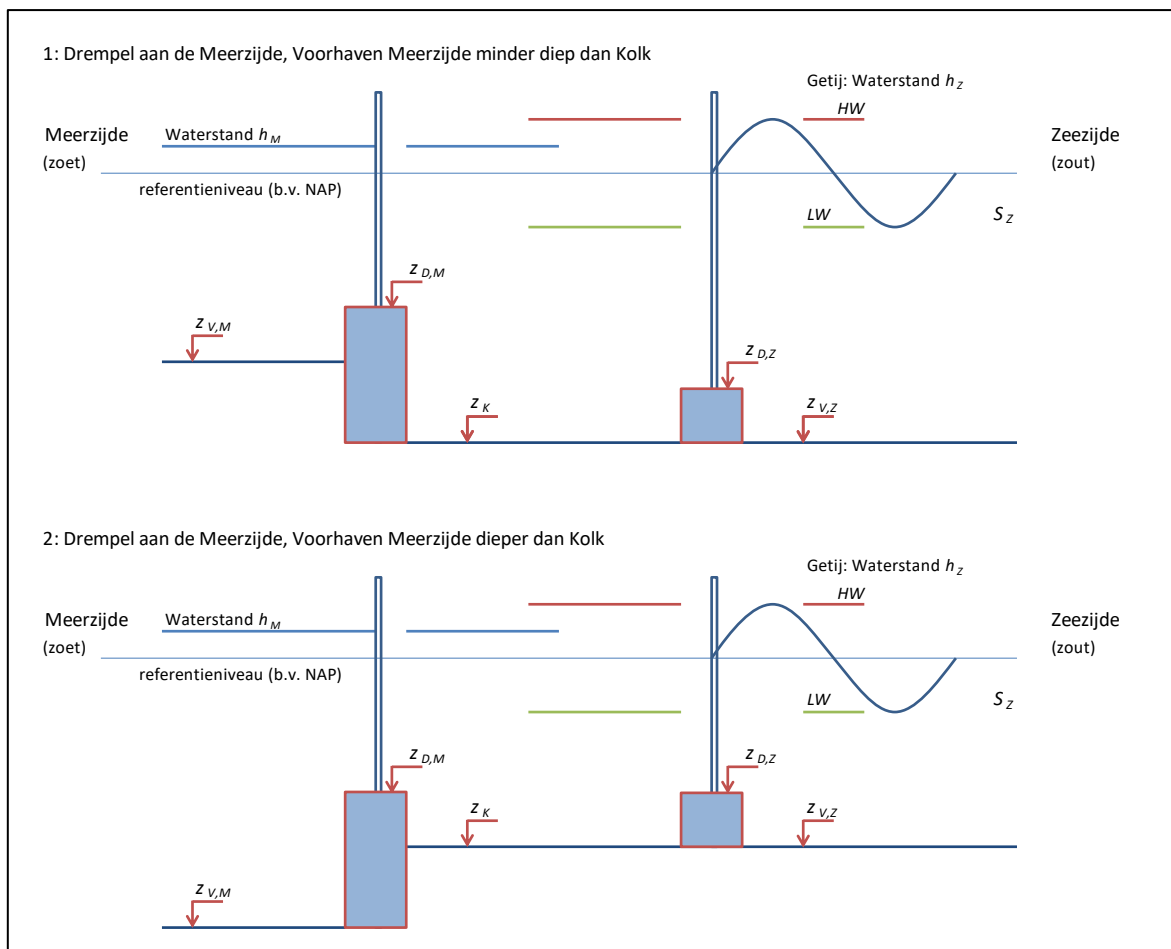
$$T_{LE,MZ} = \frac{2L}{c_{i,MZ}} \quad (107)$$

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 (14), 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:

$$H_{M,eff} = (h_M - z_{D,M}) + 0,2 \min((z_{D,M} - z_{V,M}), (z_{D,M} - z_K)) \quad (108)$$

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

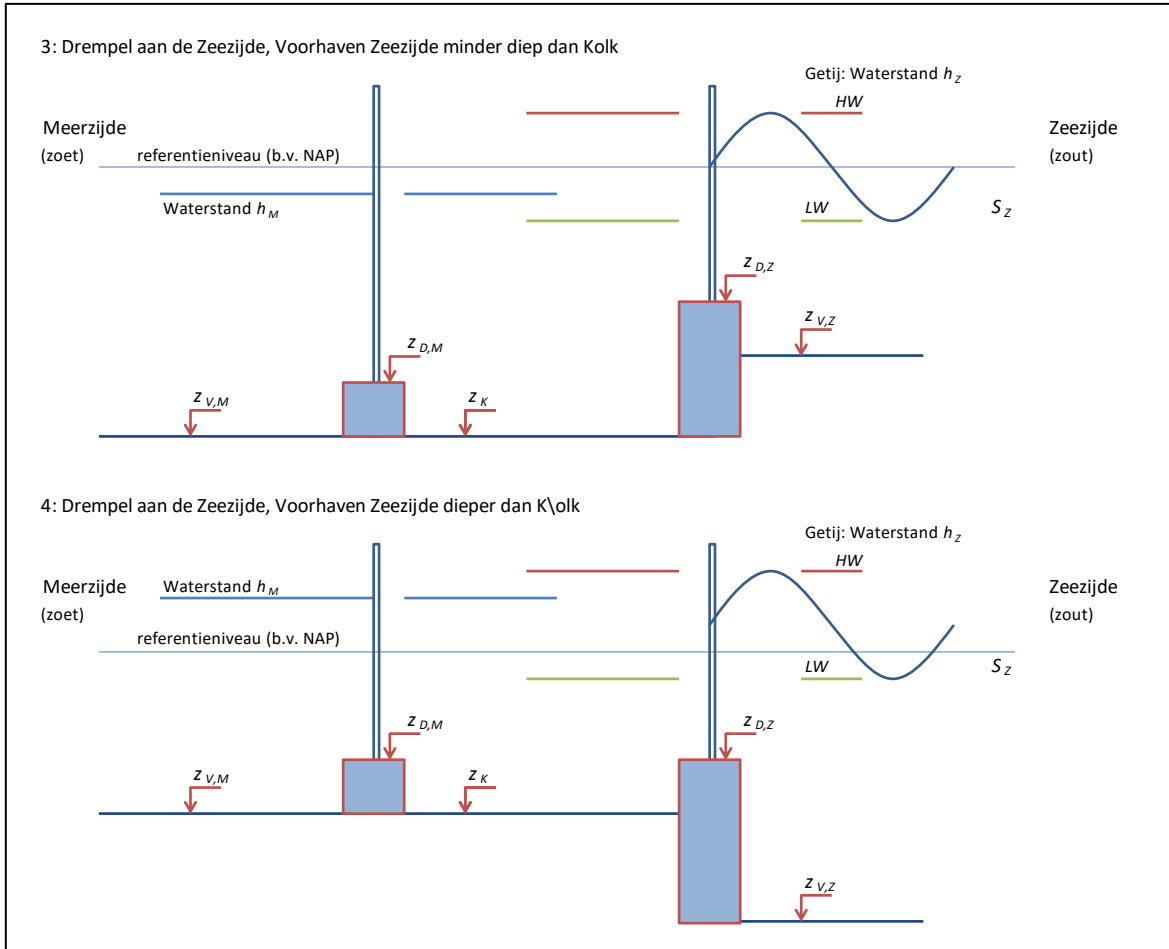
$$V_{K,M,eff} = L_K B_K H_{M,eff} \quad (109)$$

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, (14) en (44), gebruik te maken van bovenstaande vergelijkingen (108) en (109) 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:

$$H_{Z,eff} = (h_Z - z_{D,Z}) + 0,2 \min((z_{D,Z} - z_{V,Z}), (z_{D,Z} - z_K)) \quad (110)$$

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:

$$V_{K,Z,eff} = V_{K,Z} \quad (111)$$

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:

$$L_{K,eff} = L_K \frac{h_Z - z_K}{H_{Z,eff}} \quad (112)$$

Daarmee klopt dus ook het volume van de kolk:

$$V_{K,Z,eff} = L_{K,eff} B_K H_{Z,eff} = L_K \frac{H_Z}{H_{Z,eff}} B_K H_{Z,eff} = L_K B_K H_Z = V_K \quad (113)$$

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 (110) en (111) en (112) in de uitdrukkingen voor de kolkuitwisseling aan de Zeezijde, (29) en (72), 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.

Spoeldebiet, verschil met Wanda-Locks in “fase 2 (van 3)”, terugkerende golf niet stilstaan.

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 Meerszijde zijn dit uitvaren, kolkuitwisseling, invaren en spoelen, en aan de Zeeszijde kan daar nog een debiet door een waterscherm bijkomen. In de beschrijving in formules wordt aangenomen dat sommige processen als opeenvolgend worden aangenomen. Dat is strikt genomen onjuist, omdat de ze zich deels tegelijk afspelen (e.g. schepen varen in/uit terwijl de dichtheidsgolf loopt). De gehanteerde aanpak lijkt op die van WANDA-Locks, maar het is nooit werkelijk onderzocht hoezeer deze aanpak de realiteit benadert.

7.2 Invloed van spoeldebiet op dichtheidsgolf

In Paragraaf 2.6 is al opgemerkt dat er onbekenden zijn over hoe het spoeldebiet in de realiteit interacteert met de dichtheidsstroming. Sommige aannames verschillen ook van die van bijvoorbeeld Wanda-Locks, en daarom is het belangrijk om in dit Hoofdstuk dit nog even te belichten.

Bij spoelen terwijl de deur open staat naar Meerszijde gaan we uit van een simpele superpositie die geldig is zolang de dichtheidsgolf niet reflecteert. Mogelijk zou een extra fase van (omgekeerde) superpositie in snelheden bij terugkerende dichtheidsgolf accurater zijn. Het wordt dan wel belangrijk om ook de erosie van resterende zoute onderlaag mee te nemen. Als dit niet wordt gedaan dan zou, indien de snelheid van het spoeldebiet gelijk is aan die van de dichtheidsgolf, de kolk nooit volledig zoet worden.

Met de huidige aanpak van een enkele superpositie overschatten we aan Meerszijde mogelijk de effectiviteit van een spoeldebiet. Met de aannames die zijn gedaan wordt de kolk waarschijnlijk sneller zoet dan in werkelijkheid, maar er gaat ook minder zout naar de zoete zijde. Hoe conservatief of optimistisch de formulering daarmee is in de bepaling van de zoutlast (en zoetlast), is niet bekend.

Bij spoelen met de deur naar Zeeszijde geopend ontstaat vaak, zoals in Paragraaf 2.6.2 al opgemerkt, een situatie waarbij de kolk tegelijk zoeter en zouter wordt. Het is waarschijnlijk dat het zoete spoeldebiet deels zal mengen met het zoute kolkwater, en daarmee de kolkuitwisseling en saliniteit van het uitgaande spoeldebiet beïnvloed. Menging heeft daarnaast ook invloed op de equilibriumsituatie van Scenario 2, waar we nu een duidelijke grenslaag aannemen op een bepaalde hoogte.

7.3 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 uitziet 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 aannemen 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).

$$\dot{M}_{Zouttong} = \Delta S_{Zouttong} Q_{Zouttong} = \Delta S_{Zouttong} c_{i,Zouttong} \frac{1}{2} H B \quad (114)$$

De snelheid van de zouttong is conform vergelijking (13):

$$c_{i,Zouttong} = \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} H} = \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{0,8 \Delta S_{Zouttong}}{\bar{\rho}_{MZ}} H} \quad (115)$$

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.

7.4 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).

7.5 Voorschrijven van doorlaatfractie of luchtdebiet

Paragraaf 2.1.5 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.

7.6 De sluis is minder dan 24 per etmaal in bedrijf

In Paragraaf 2.4.3 is de parameter T_{Bedrijf} gedefinieerd als constante met als waarde 24 uur. Het is ook mogelijk dat een sluis niet 24 uur per dag wordt bediend, 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 aantal schuttingen per etmaal. De gebruiker moet dan zelf deze tijdreeks aanmaken, zodanig dat de gemiddelde schutfrequentie klopt met het aantal cycli per etmaal.

8 Referenties

- [1] "Vorstudie: Ontwerpstudie en praktijkproef zoutlekbeperving Volkeraksluizen - Model voor Zoutvrachtberekeningen", Appendix B, R.E. Uittenbogaard, 1201226-011, Deltares, juni 2010
- [2] "Implementatie waterverplaatsing schepen", T. Vreeken, 1210765-006-HYE-0001, Deltares, april 2016

C Afleiding analytische oplossing met tangens-hyperbolicus

Derivation of analytical equations for the salt flux across a shipping lock.

Introduction

In a previous study of the theoretical influence of the salt transmissions ratios on the salt flux across a shipping lock, Rob Uittenbogaard derived analytical expressions for the equilibrium salt concentration difference as a function of the salt transmission ratios at the sea and lake side. These were the solutions of a third order polynomial which was derived from the equations for salt flux across each lock head.

The derivation of Rob Uittenbogaard made use of an assumption of a constant density front speed throughout the lock exchange (and no waterlevel difference across the lock). An alternative model of the lock exchange (from Abraham and van der Bergh) claims that the exchange of salt in time follows a hyperbolic tangent. This implies that the salt flux is not constant.

The purpose of this memo is to repeat the derivation of Rob Uittenbogaard but using the tanh model as the theoretical assumption for the lock exchange rather than an assumption of constant density front speed. First the derivation of Rob Uittenbogaard will be repeated to introduce the notation and subsequently the new derivation will be made.

Derivation assuming constant density front velocity

This derivation uses a volume flux (per unit width), q [m²/s] for the water entering the lock as the height of the density front, h [m], multiplied by the velocity of the density front, U [m/s].

$$q = hU$$

These terms, h and U are known empirically or analytically from the work of Benjamin or Shin et al. giving

$$q = \left\{ \frac{h}{H} Fr \right\} H \sqrt{g'H}$$

Where Here g' is the reduced gravity and is dependent on the initial densities on either side of the active lock gate at the start of the lock exchange.

Using this volume flux, which is constant during a lock exchange process, the mass flux of salt [kg salt / s] is presented for the case of the lock exchange at the sea side lock gate by multiplying by the width of the lock, B , and the difference in salt content on either side of the active gate. The direction of mass flux is always positive from sea to lake. This constant mass flux is maintained until the entire lock chamber is exchanged (the time it takes for the front to travel to the end of the lock chamber and back to the active gate), after which the mass flux of salt becomes zero (the lock chamber is fully salt and the flow in from the sea side is salt).

$$\dot{M}_Z = \left\{ \frac{h}{H} Fr \right\} BH(S_Z - S_{K,M})\sqrt{g'_{ZKM}H}$$

Here the notation makes a distinction between the salt content at the seaside, S_Z , assumed constant in time and unaffected by previous lockages, and the salt content in the lock after the previous lockage from the lake side, $S_{K,M}$. Salt content is here given in [kg salt / m³]. Subsequently the reduced gravity is related to the difference in density over this active gate specifically, g'_{ZKM} .

The total exchanged mass of salt in a lock exchange as a function of time can then be given by integrating the mass flux of salt in time. As the mass flux in time is constant this gives simply the above expression, multiplied by the time variable (integration constant is zero).

$$\Delta M_Z = T_Z \left\{ \frac{h}{H} Fr \right\} BH(S_Z - S_{K,M}) \sqrt{g'_{ZKM} H}$$

An analogous process is followed to get the equation for the total exchanged mass of salt at the lock exchange at the lake side, for salt exiting the lock chamber.

$$\Delta M_M = T_M \left\{ \frac{h}{H} Fr \right\} BH(S_{K,Z} - S_M) \sqrt{g'_{MKZ} H}$$

These are the fundamental equations. Rob Uittenbogaard then performs some algebra to rearrange these equations into a form which can be solved analytically. This rearrangement involves first making the substitution

$$g'_{ZKM} = \left(\frac{S_Z - S_{K,M}}{S_Z - S_M} \right) g' \quad ; \quad g'_{MKZ} = \left(\frac{S_{K,Z} - S_M}{S_Z - S_M} \right) g'$$

Note: this substitution is incorrectly reported in the derivation of Rob Uittenbogaard as having a square root around the brackets here. This is incorrect, but the derivation actually uses the above substitution and is further correct.

The derivation then leads to

$$\Delta M_Z = T_Z \left\{ \frac{h}{H} Fr \right\} BH(S_Z - S_{K,M}) \sqrt{\left(\frac{S_Z - S_{K,M}}{S_Z - S_M} \right) g' H}$$

To simplify the notation the following expressions are defined

$$\tau = \left\{ \frac{h}{H} Fr \right\} \frac{T \sqrt{g' H}}{L} \quad ; \quad V_{Kolk} = BHL$$

Which leads to

$$\Delta M_Z = \tau_Z V_{Kolk} \frac{(S_Z - S_{K,M})^{3/2}}{(S_Z - S_M)^{1/2}}$$

Analogously

$$\Delta M_M = \tau_M V_{Kolk} \frac{(S_{K,Z} - S_M)^{3/2}}{(S_Z - S_M)^{1/2}}$$

Thus ends the algebra to rearrange the fundamental equations. This rearrangement only works because the velocity of the density current is assumed to an polynomial expression of the difference in salt concentration. This allows for the final step and that uses the realization that, by definition,

$$\frac{\Delta M_Z}{V_{Kolk}} = S_{K,Z} - S_{K,M} = \tau_Z \frac{(S_Z - S_{K,M})^{3/2}}{(S_Z - S_M)^{1/2}} \quad ; \quad \frac{\Delta M_M}{V_{Kolk}} = S_{K,Z} - S_{K,M} = \tau_M \frac{(S_{K,Z} - S_M)^{3/2}}{(S_Z - S_M)^{1/2}}$$

Which allows the equations above to be equated to each other

$$\tau_Z \frac{(S_Z - S_{K,M})^{3/2}}{(S_Z - S_M)^{1/2}} = \tau_M \frac{(S_{K,Z} - S_M)^{3/2}}{(S_Z - S_M)^{1/2}}$$

We can subsequently eliminate $S_{K,Z}$ by using the equations above to get

$$\tau_Z \frac{(S_Z - S_{K,M})^{3/2}}{(S_Z - S_M)^{1/2}} = \tau_M \frac{(S_{K,M} + \tau_Z \frac{(S_Z - S_{K,M})^{3/2}}{(S_Z - S_M)^{1/2}} - S_M)^{3/2}}{(S_Z - S_M)^{1/2}}$$

Which is an equation for $S_{K,M}$ in terms of known quantities, τ_Z , τ_M , S_Z , S_M . This can be rearranged into cubic form.

Derivation assuming tanh relation for the total exchange

The tanh relation was developed in the 1960s by Abraham, van de Burgh and de Vos after field tests in the number of locks (Ijmuiden and Kornwerderzand). It states that

$$U = \tanh(t)$$

Where U is the normalized exchange of saltwater (between 0, no exchange, and 1 fully exchanged) and t is the normalized time, normalized by the theoretical time for a density flow with constant speed to travel the entire length of the lock, L, and back ($\sqrt{g'H}/4L$).

This allows one to write the equation for the total mass of exchanged salt directly (without deriving first the equation for the mass flux of salt).

$$\Delta M_Z = BHL(S_Z - S_{K,M}) \tanh\left(\frac{T_Z \sqrt{g'_{ZKM} H}}{4L}\right)$$

Analogously we have

$$\Delta M_M = BHL(S_{K,Z} - S_M) \tanh\left(\frac{T_Z \sqrt{g'_{MKZ} H}}{4L}\right)$$

However the substitution used above no longer leads to a nice simplification of these equations where the terms of salinity difference can be collated in a single term. Instead this substitution

$$g'_{ZKM} = \left(\frac{S_Z - S_{K,M}}{S_Z - S_M}\right) g' \quad ; \quad g'_{MKZ} = \left(\frac{S_{K,Z} - S_M}{S_Z - S_M}\right) g'$$

Leads simply to

$$\Delta M_Z = V_{Kolk}(S_Z - S_{K,M}) \tanh\left(\frac{T_Z \sqrt{\left(\frac{S_Z - S_{K,M}}{S_Z - S_M}\right) g' H}}{4L}\right)$$

$$\Delta M_M = V_{Kolk}(S_{K,Z} - S_M) \tanh\left(\frac{T_M \sqrt{\left(\frac{S_{K,Z} - S_M}{S_Z - S_M}\right) g' H}}{4L}\right)$$

We can try and simplify this using $\tau = \frac{T\sqrt{g'H}}{4L}$ to

$$(S_Z - S_{K,M}) \tanh\left(\tau_Z \sqrt{\left(\frac{S_Z - S_{K,M}}{S_Z - S_M}\right)}\right) = (S_{K,Z} - S_M) \tanh\left(\tau_M \sqrt{\left(\frac{S_{K,Z} - S_M}{S_Z - S_M}\right)}\right)$$

And subsequently eliminate $S_{K,Z}$ as above but this will lead to a complicated equation which cannot be solved analytically. We first note as before that

$$S_{K,Z} - S_{K,M} = (S_Z - S_{K,M}) \tanh\left(\tau_Z \sqrt{\left(\frac{S_Z - S_{K,M}}{S_Z - S_M}\right)}\right)$$

Then

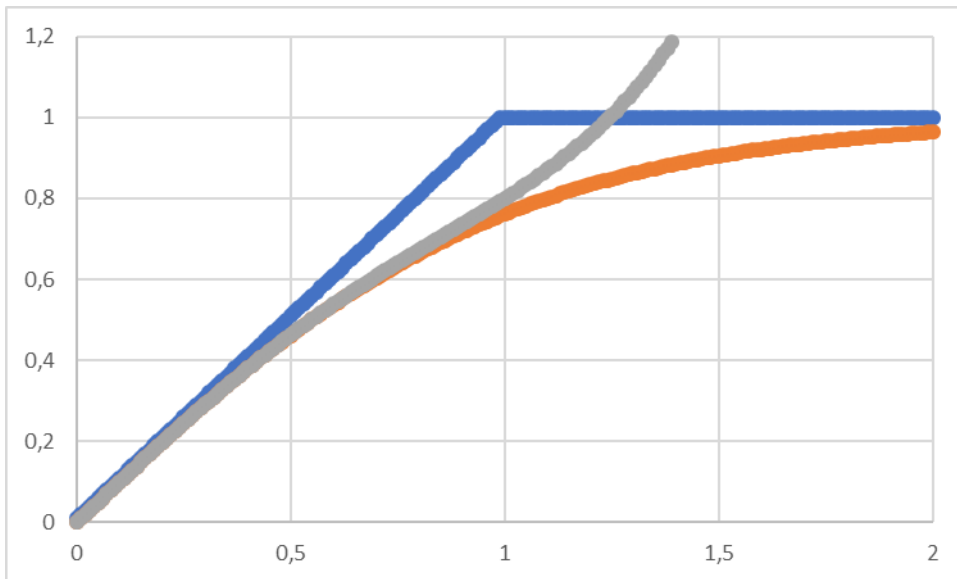
$$\begin{aligned} & (S_Z - S_{K,M}) \tanh\left(\tau_Z \sqrt{\left(\frac{S_Z - S_{K,M}}{S_Z - S_M}\right)}\right) \\ &= \left[S_{K,M} + (S_Z - S_{K,M}) \tanh\left(\tau_Z \sqrt{\left(\frac{S_Z - S_{K,M}}{S_Z - S_M}\right)}\right) \right. \\ & \quad \left. - S_M \right] \tanh\left(\tau_M \sqrt{\left(\frac{S_{K,M} + (S_Z - S_{K,M}) \tanh\left(\tau_Z \sqrt{\left(\frac{S_Z - S_{K,M}}{S_Z - S_M}\right)}\right) - S_M}{S_Z - S_M}\right)}\right) \end{aligned}$$

And we have finally the equation in $S_{K,M}$ only in terms of known quantities, τ_Z, τ_M, S_Z, S_M . I have not tried to simplify this further. It could be solved iteratively. Alternatively, the tanh function could be replaced by its Taylor expansion to give an estimate (in polynomial terms) of the function (note the function itself is only an estimate of the empirical data). This may lead to a polynomial form of the above equation but this would (like the constant velocity case above) only be valid for a finite t.

The Taylor expansion of tanh(t) is

$$\tanh(t) = t - \frac{t^3}{3} + \frac{2t^5}{15} - O(t^6)$$

This gives the grey line in the plot below (ignoring terms of sixth order and above). It shows that the polynomial expansion around 0 gives a reasonable approximation of the $\tanh(t)$ function until $t=1$. So with this polynomial approximation one would have the same range of validity as for the derivation of Rob U with the constant speed assumption. However, the fifth order polynomial would lead to a higher order equation for the underlying variables for which an analytical solution would be difficult (if not impossible) to find.



In conclusion, neither the use of the $\tanh(t)$ function or a polynomial approximation leads to a usable analytical solution to replace the one derived by Rob U with the constant density current speed assumption.

D Conceptmodellering zouttransport door spuisluizen

Concept salt transport model across flushing sluices

In the following a concept for a model for the transport of salt across flushing sluices will be given. This model should include possible leakages through the flushing sluices and try to account for the selective withdrawal of salt from the lower layer of the upstream reservoir which is (partially) stratified. It does not include the salt transport across the shipping locks which is handled with a separate model.

Leakage

For leakage of the flow through the gates of the flushing sluice can be modelled using the discharge relation for submerged flow, namely

$$Q = \mu A \sqrt{2g\Delta h}$$

The area A is the open area for leakage and the discharge coefficient can be estimated from hydraulic manuals (for small openings it is often close to 1 but can range between 0.6 and 1. Note that the discharge coefficient can depend on the location at which the head on either side is calculated or measured. It can be assumed that leakage is sufficiently small to not have a large effect on the location of the interface between salt and fresh water (or the density profile in the upstream reservoir) and that therefore the flow through the gap can be modelled as having the density in the boundary cell at the level of the gap.

Flushing

For flushing, the assumption that the flow does not influence the stratification in the upstream reservoir is likely not valid (definitely so for high flow rates). Although a hydraulic model (such as Delft 3D – DFLOW-FM) will resolve some of the physics of the entrainment of upper or lower layer fluid into the outflow some of this physics will most likely remain “subgrid”. This is certainly true of most practical applications of this models. Therefore, the boundary condition for the extraction of fluid through the flushing sluices should account in some way for this entrainment. The following options have been identified after a literature review of selective withdrawal studies and are based on a method described in Fan (2008). In general: we have a formula for calculating the withdrawal layer thickness for slots and orifices in a generalized linearly stratified system (this is could easily be generalized further to a general stratification profile); and, we have a formula for calculating the withdrawal concentration for slots and orifices in a two-layered system (where a clear interface between layers is known or defined).

Options

1) Ignore selective withdrawal, extract discharge from constant layer

Calculate the discharge based on discharge formula and extract this from a pre-defined layer thickness in the model. The layer thickness does not change for changing discharge. This ignores the physics of selective withdrawal.

2) Determine layer thickness from formula; model determines salt concentration

Firstly, calculated the discharge based on a discharge formula (ignoring density effects as these are of a smaller order).

Use the collated literature results to determine a withdrawal layer thickness (with a fit factor corresponding to the K of the paper within the ranges given). Let the model calculate the concentration extracted from this layer (even distribution of Q over all selected layers).

The formula for withdrawal layer thickness, d , assuming a slot of equal height over the breadth, is as follows:

$$d = \frac{K^{\frac{4}{3}} q^{\frac{2}{3}}}{g'^{\frac{1}{3}}}$$

Where q is the discharge per unit breadth and $g' = g\Delta\rho/\rho$ is the reduced gravity. For a linearly stratified system (as opposed to a two-layer system where $\Delta\rho$ is clearly defined) the $\Delta\rho$ is defined as the density difference between the upper and lower interfaces of the withdrawal layer. The literature (Fan 2008) gives in this instance a range of K based on a review of experiments in the literature between 2-2.5. For an orifice the equation and values for K are given to be slightly different. This could be relevant for implementation of a flushing sluice formulation.

The d is symmetric about the location of the slot, or measured from the bottom if the distance from the bottom to the slot is less than half of the withdrawal thickness.

Note that this formula approaches infinity as the density difference approaches 0. For a more generally applicable formula this should be corrected. It is obvious that the withdrawal thickness cannot be greater than the water depth, so d could be capped to the depth. This leaves a boundary condition of uniform flow over the entire depth for unstratified systems. It is unknown if this is considered good modelling practice in the absence of buoyancy effects.

3) Determine concentration from formula and tune the discharges from the model cells to achieve this

Firstly, calculate the discharge based on a discharge formula (ignoring density effects as these are of a smaller order).

Secondly, as this formula is only valid for a two-layer system, the location of the interface relative to the channel bottom, h_0 , between the two-layers should be determined. The water column is then split into two layers with concentrations c_1 in the upper layer and c_2 in the lower layer.

Calculate the limiting height of aspiration, (the height at which fluid from the upper layer, for a low-lying opening, will begin to be extracting). The formula for this, assuming a slot of equal height over the breadth, is given as:

$$h_L = \frac{Kq^{\frac{2}{3}}}{g'^{\frac{1}{3}}}$$

Where q is the discharge per unit breadth and $g' = g\Delta\rho/\rho$ is the reduced gravity. The literature (Fan 2008) gives in this instance a range of K based on a review of experiments in the literature between 0.6 -0.7. For an orifice the equation and values for K are given to be slightly different.

The concentration of the extracted discharge, c_0 , is given as

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

Where c_2 is the concentration of the lower layer, a and b are constants and $y = P - h_0$ is the distance in height between the location of the slot, P , and the location of the interface, h_0 . The constant a is found to be between 0.5-0.6 and the constant b is found to be between 0.5-0.7.

Again this formula is limited by the available width for withdrawal, so in addition we have

$$c_0 = c_2 \text{ for } y \leq -h_L$$

$$c_0 = c_1 \text{ for } y \geq h_L$$

Finally, given this concentration an appropriate ratio of discharges in each boundary cell to achieve this concentration discharge should be found. Ideally this should be limited to the cells within the withdrawal layer, as defined or calculated as in the previous option. This could be an iterative process without a unique solution.

References

Fan, J., 2008, *Stratified flow through outlets*, Journal of Hydro-environmental Research, 2, pp. 3-18