



Kennisprogramma Natte Kunstwerken
Kennisplan 2017

Zoutindringing door schutsluizen

Overzicht projecten en aanzet formulering
t.b.v. netwerkmodellen

Otto Weiler (Deltares)
Roel Burgers (Rijkswaterstaat)

Kenmerk : KpNK 2017-SKW-01c001
Versie : 1.0
Datum publicatie : 11 juni 2018



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

Deltares

MARIN



TNO

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

Meer informatie over het Kennisprogramma Natte Kunstwerken vindt op www.nattekunstwerkenvandetoekomst.nl 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

Roel Burgers - roel.burgers@rws.nl

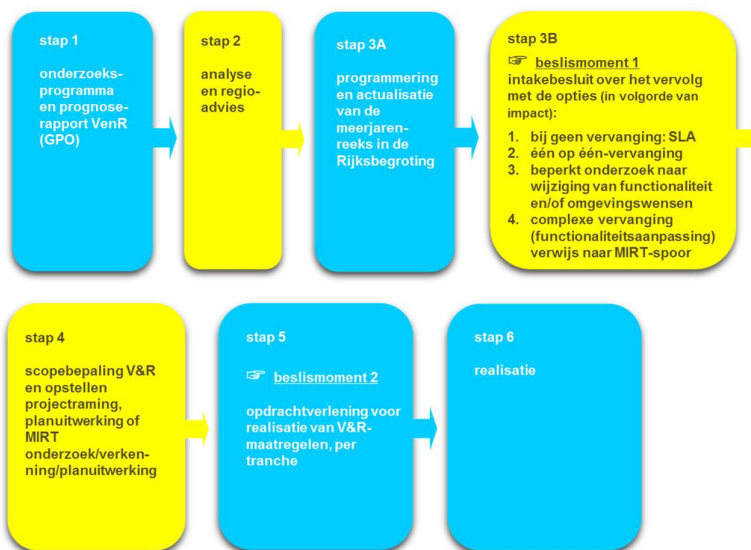
Voor vragen over Kennisprogramma Natte Kunstwerken en Kennisplan 2017 kunt u terecht bij:
Maarten van der Vlist - maarten.vander.vlist@rws.nl



Voorwoord

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

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



Figuur 1. Vernieuwde RWS-werkwijze Vervanging en Renovatie.

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

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

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



Kennisprogramma Natte Kunstwerken *Kennisplan 2017*

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 onderzoeklijn 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 2017 is er binnen het kader van Kennisprogramma Natte Kunstwerken samengewerkt met Lock2Twente en Acotec BV.

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 “Zout-indringing door schutsluizen - Overzicht projecten en aanzet formulering t.b.v. netwerkmodellen”. Dit onderzoek is geleid door Deltares in het kader van het Kennisplan 2017. 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 door schutsluizen

Aanleiding

Aan het zoutgehalte van oppervlaktewater worden eisen gesteld. Deze eisen kunnen niet los worden gezien van de verspreiding van zout binnen het watersysteem via zoutindringing door de kunstwerken die daar deel van uitmaken. Zoutindringing door schutsluizen is een probleem dat zich afspeelt in interactie tussen het kunstwerk en het watersysteem: de zoutindringing speelt zich af ter plaatse van het kunstwerk, maar het is pas een probleem als het verder bovenstrooms, in het watersysteem, leidt tot ongewenste zoutgehaltenes.

De essentiële uitdaging voor 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 schutoperatie, die wordt gekenmerkt door een grote variabiliteit van de schutfrequentie en deur-opentijden.

Onderzoeksvraag en -opzet (WAT)

Er is in de afgelopen jaren veel onderzoek gedaan naar zoutindringing door schutsluizen en naar manieren om dit te reduceren. De hierin opgebouwde kennis ligt opgeslagen in de verschillende rapporten die in het kader van deze projecten zijn geschreven. Het is wenselijk om deze kennis over zoutindringing door schutsluizen voor de hele sector toegankelijk te maken.

In de projecten is een rekenmodel opgebouwd, het zoutlekmodel, later omgezet in WANDA-Locks, waarmee zoutindringing en het effect van maatregelen op de sluis kunnen worden berekend. Voor het beantwoorden van essentiële vragen (zoals: hoe groot is bij deze sluis het zoutindringingsprobleem en hoe kan ik dat oplossen?) blijkt echter meer nodig. Met name een koppeling tussen WANDA-Locks, dat de zoutindringing door de sluis berekent, en een zoutverspreidingsmodel van (een deel van) het watersysteem, dat de verspreiding van dat zout naar relevante locaties (zoals inname locaties van drinkwaterbedrijven en waterschappen) berekent. De uitgevoerde projecten hebben aangetoond dat deze gekoppelde modellen (WANDA-Locks voor de sluis en het zoutverspreidingsmodel voor het watersysteem) samen niet de toegankelijkheid bieden die wenselijk is: de opgedane kennis is daarmee onvoldoende toepasbaar. In dit project wordt daarom een basis gelegd voor een eenvoudiger formulering (een beschrijving in formules) van de zoutindringing door schutsluizen die op te nemen zou moeten zijn in het zoutverspreidingsmodel van het watersysteem. Daarmee zou alles beschreven zijn in één model, en hoeven er geen modellen te worden gekoppeld.



Samenvattend bestaat de onderzoeksvraag uit twee delen:

1. het schrijven van een **overzicht over de projecten** in de afgelopen periode, om daarmee zicht te krijgen op wat er is geleerd en welke kennisvragen er nog open staan;
2. het uitwerken van een **formulering voor zoutindringing** door schutsluizen die opgenomen kan worden in zoutverspreidingsmodellen voor watersystemen; daarbij wordt aandacht besteed aan de beoogde toepassingen en de inbedding in de hydrodynamische software.

Onderzoeksaanpak en -methode (HOE)

Met betrekking tot onderzoeksvraag 1: het maken van een overzicht van de projecten sinds 2010 (o.a. de studies rond de Volkeraksluizen in geval van een zout Volkerak-Zoommeer en rondom de Afsluitdijk), en wat daarin is geleerd.

Met betrekking tot onderzoeksvraag 2: De op te stellen formulering heeft een naam gekregen, namelijk 'zeesluisformulering'. Deze zeesluisformulering moet de zoutvracht uitrekenen op basis van de randvoorwaarden aan beide kanten van de schutsluis (waterstand en zoutgehalte), de afmetingen van de schutsluis en de operatie (aantal schuttingen en deur-opentijden).

In aanloop naar het opstellen hiervan wordt een aantal voorbereidende stappen gezet:

- Op de eerste plaats wordt het belang van de operationele parameters in beeld gebracht: naast de afmetingen van de sluis en het verschil in zoutgehalte over de sluis bepaalt de operatie immers de hoeveelheid zout die uiteindelijk binnenkomt.
- Vervolgens wordt gekeken naar de eisen vanuit de beoogde gebruikers van de formulering.
- Daarna is een verkenning gedaan naar formuleringen met een vergelijkbaar doel en op basis daarvan is gekozen om uit te gaan van het 'stationair zoutlekmodel' zoals opgesteld ten behoeve van de Volkerakstudies.
- Deze formulering is aangepast zodat hij niet alleen voor de Volkeraksluizen, maar ook voor zoveel mogelijk andere sluisen bruikbaar is.
- Tenslotte wordt een verkenning gedaan naar de stappen richting de implementatie ervan in een zoutverspreidingsmodel, in dit geval D-Flow FM.

Onderzoekresultaten en synthese

Met betrekking tot onderzoeksvraag 1:

In het rapport is een overzicht gemaakt van praktisch alle projecten bij Deltares op het gebied van zoutindringing door schutsluizen vanaf 2010. Het overzicht is voorzien van gestructureerde referentielijst van ruim 60 titels. Daarmee is er nu een 'ingang' naar de vele projectrapporten en wat daarin is geleerd. Ook geeft het overzicht een onderbouwing van de wenselijkheid van een eenvoudiger formulering ten behoeve van het doorrekenen van scenario's en maatregelen.



Met betrekking tot onderzoeksvraag 2:

In het project is de basis gelegd voor een eenvoudiger formulering van de zoutindringing door schutsluizen, waarmee ook de op de sluis te nemen maatregelen kunnen worden beschreven. Deze formulering is geschikt om te worden ingebouwd in zoutverspreidingsmodellen van het watersysteem in de hydrodynamische software (D-Flow FM, voor zowel 1D, 2D als 3D), zodat, te zijner tijd, de zoutindringing kan worden berekend met de schematisaties van (delen van) het hoofdwatersysteem zoals die voor RWS worden gemaakt en onderhouden.

Het ontwikkelen van een formulering voor de zoutindringing door kunstwerken is van waarde voor zowel stap 2 als stap 4 van de vernieuwde RWS-werkwijze Vervanging en Renovatie (zie Figuur 1): Stap 2 voor wat betreft de analyse van het watersysteem en de zoutindringing (nu en in de toekomst), en stap 4 voor het definiëren van ontwerpeisen voor een aanpassing op de sluis, en/of voor het opstellen van beheersmaatregelen ten behoeve van zoutindringing (op de sluis of elders in het watersysteem).

Evaluatie en vooruitblik

Binnen het project is gekomen tot een gestructureerd overzicht van de nu beschikbare kennis over zoutindringing. Het ombouwen tot een compacte *inhoudelijke* presentatie van deze kennis, bijvoorbeeld in de vorm van een 'leerboek' of 'collegedictaat', wordt als wenselijk gezien. Het nu gemaakte overzicht biedt daarvoor dan een goed startpunt.

Voor de zeesluisformulering is nu een solide basis gelegd. Hierop kan verder worden gewerkt in de richting van de implementatie in software. Een eerste versie daarvan kan dan gebruikt worden voor het kwantificeren van de operationele parameters, met name de representatieve deuropentijden, en hoe deze getalsmatig kunnen worden afgeleid van registraties op de sluisen.

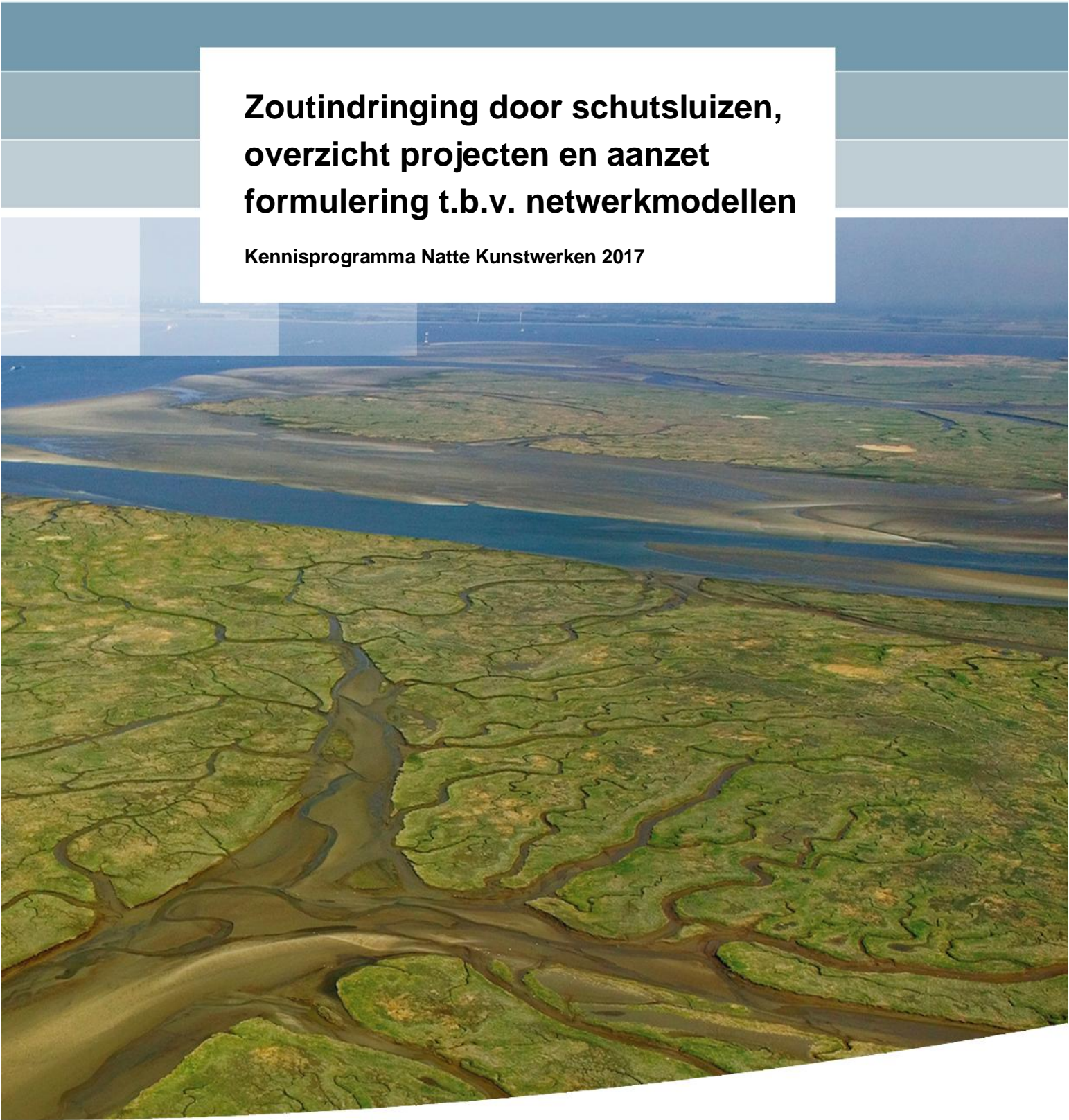
Naast een vervolg op het gebied van zoutindringing bij schutsluizen wordt ook een begin gemaakt worden met een formulering voor de zoutindringing door spuisluizen. De algemene opzet en de voorziene inbedding in D-Flow FM zullen ook voor spuisluizen bruikbaar zijn.



Kennisprogramma Natte Kunstwerken
Kennisplan 2017

**Zoutindringing door schutsluizen,
overzicht projecten en aanzet
formulering t.b.v. netwerkmodellen**

Kennisprogramma Natte Kunstwerken 2017



**Zoutindringing door schutsluizen,
overzicht projecten en aanzet
formulering t.b.v. netwerkmodellen**

Kennisprogramma Natte Kunstwerken 2017

Otto Weiler

11200741-003

Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Algemeen	1
1.2	Probleemstelling	1
1.3	Doelstelling	2
1.4	Essentiële aspecten	2
1.5	Aanpak en leeswijzer	3
1.6	Definities	4
2	Overzicht projecten 2010 - 2016	5
2.1	Ontwikkeling en toepassing van een Afwegingskader	5
2.2	Enkele grote projecten: Volkerak, Krammer, IJmuiden	6
2.2.1	Het project rond de Volkeraksluizen.	6
2.2.2	De Krammersluizen	7
2.2.3	IJmuiden: de Nieuwe Zeesluis en de Selectieve Onttrekking	10
2.3	Overige sluizen in Nederland	13
2.3.1	Scheepvaartsluizen Delfland, waaronder de Parksluizen in Rotterdam	13
2.3.2	Harlingen: bestrijden van de zoutindringing met minder water	14
2.3.3	De Brabantse rivieren in geval van een zout Volkerak-Zoommeer	14
2.3.4	De Grote Sluis te Spaarndam: zoutindringing vanaf het Noordzeekanaal	15
2.4	Projecten in het buitenland	16
2.4.1	Doortocht Brugge	16
2.4.2	Panama: de waterkwaliteit van het Panama Canal en Lake Gatun	16
2.5	Ontwikkeling Zoutlekmodel, WANDA-Locks en koppelingen	17
2.5.1	Het oorspronkelijke Zoutlekmodel	17
2.5.2	WANDA-Locks	18
2.5.3	Koppelingen tussen WANDA-Locks en omgevingsmodellen	19
2.6	Recent en lopend onderzoek	20
2.7	Stand van zaken over de beschikbare kennis	21
2.7.1	Over WANDA-Locks	21
2.7.2	Over zout-zoetscheiding met o.a. bellenschermen	21
2.7.3	Over de gewenste eigenschappen van bellenschermen	22
3	Verkenning invloed schutoperatie op de zoutvracht	23
3.1	Inleiding	23
3.2	De kolkuitwisseling als functie van de deur-opentijd	24
3.3	De zoutvracht over de sluis heen als functie van de deur-opentijd	25
3.4	Het aantal schuttingen per dag	27
3.5	Conclusies	29
4	Formulering voor zoutindringing door schutsluizen: de zeesluisformulering	31
4.1	Algemeen	31
4.2	Wensen vanuit de beoogde toepassing	31
4.2.1	Doorrekenen van scenario's en maatregelen	32
4.2.2	Beleidsanalyse en operationele modellen	32
4.2.3	Tijdstap	33
4.3	Beschikbare formuleringen en keuze	34
4.4	Basis opzet formulering zeesluismodel	34

5	Vorbereiding van de implementatie	39
5.1	Algemeen	39
5.2	Algemene opzet voor de beschrijving van kunstwerken in D-Flow FM	39
5.3	Zoutindringing door kunstwerken binnen deze opzet	40
5.4	Vergelijking zeesluismodel met eerdere koppelingen met WANDA-Locks	41
5.5	Overzicht van het zeesluismodel	42
5.6	Aandachtspunten	43
6	Samenvatting, conclusies en aanbevelingen	45
7	Verkenning van de volgende stappen	47
7.1	Terugblik op Plan van Aanpak 2017	47
7.2	Aandachtspunten	48
7.3	Einddoel inzake schutsluizen en stappen daar naar toe	49
7.4	Spuisluizen	52
7.4.1	Algemene beschouwing	52
7.4.2	Relevante aspecten in 1D en 2D-modellen	52
7.4.3	Aspecten in 3D-modellen	53
8	Literatuur	55
8.1	Inleiding	55
8.2	Afwegingskader	55
8.3	Volkerak	55
8.4	Krammersluizen	56
8.5	IJmuiden	57
8.6	Andere sluizen in Nederland	57
8.7	Projecten in het buitenland	58
8.8	Het zoutlekmodel en WANDA-Locks	58
8.9	Koppelingen tussen WANDA-Locks en gebiedsmodellen, incl. Bijlage A	58
8.10	Stand van zaken	59
8.11	Invloed schutoperatie op zoutvracht	59
8.12	Wensen vanuit de beoogde toepassing	59
8.13	Alternatieve formuleringen, incl. Bijlage C	59
 Bijlage(n)		
A	Projecten waarin gewerkt is met een koppeling tussen WANDA-Locks en een omgevingsmodel	A-1
A.1	Koppeling met Sobek: de Krammersluizen	A-1
A.2	Koppeling met Sobek: de Brabantse Rivieren	A-2
A.3	Koppeling met Delft3D: Tsjerk Hiddessluis (Harlingen)	A-3
A.4	Koppeling met Delft3D: IJmuiden	A-4
A.5	Koppeling naar de zoute kant: lozing van zoetwater op de Oosterschelde	A-6
B	Onderzoek naar bellenschermen sinds 2016 onder de TKI-regeling	B-1
C	Bestaande formuleringen zoutindringing door schutsluizen	C-1
C.1	Formuleringen voor de sluizen in de Afsluitdijk	C-1
C.2	Formulering voor het Kanaal Gent - Terneuzen	C-5
C.3	Formulering volgens Kerstma et al.	C-5

C.4	Het stationair Zoutlekmodel	C-6
D	Uitwerking van de vergelijkingen van de zeesluisformulering	D-1

Voorwoord

Beschreven onderzoek in dit rapport wordt uitgevoerd in het kader van het Kennisplan Natte Kunstwerken 2017.

Het Kennisplan is de praktische concretisering van de NKWK¹-onderzoekslijn 'Toekomstbestendige Natte Kunstwerken'. In deze onderzoekslijn werken momenteel Deltares, TNO, Marin, RWS en NLIingenieurs samen aan onderwerpen op het gebied van natte kunstwerken (stuwen, sluisen, gemalen en stormvloedkeringen).

Een groot deel van deze kunstwerken bereikt komende decennia einde 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 netwerk/systeem/regio.

In het Kennisplan Natte Kunstwerken wordt dan ook de benodigde kennis ontwikkeld langs 3 sporen:

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

Alle 3 de sporen dragen bij aan een effectief en efficiënte vervanging- en renovatieopgave en nieuwbouw van natte kunstwerken.

¹ Nationaal Kennisplatform Water en Klimaat

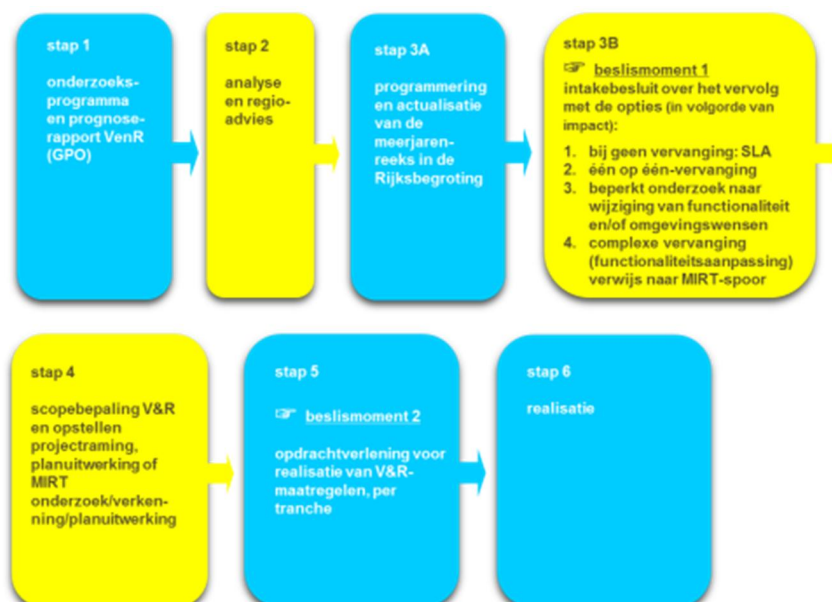
Samenvatting

Aanleiding

Er is in de afgelopen jaren veel onderzoek gedaan naar zoutindringing door schutsluizen en naar manieren om dit te reduceren. De hierin opgebouwde kennis ligt opgeslagen in de verschillende rapporten die in het kader van deze projecten zijn geschreven. Om deze kennis toegankelijk te maken is er behoefte aan een overzicht van de projecten en wat daarin is geleerd.

In de projecten is een rekenmodel opgebouwd, WANDA-Locks, waarmee zoutindringing en het effect van maatregelen op de sluis kunnen worden berekend. Voor het beantwoorden van essentiële vragen, zoals: hoe groot is bij deze sluis het probleem en hoe kan ik dat oplossen, blijkt echter meer nodig, met name een koppeling tussen WANDA-Locks en een gebiedsmodel. De uitgevoerde projecten hebben aangetoond dat deze gekoppelde modellen samen niet de toegankelijkheid bieden die wenselijk is: de opgedane kennis is daarmee onvoldoende toepasbaar.

In het project wordt de basis gelegd voor een eenvoudiger formulering van de zoutindringing door schutsluizen, inclusief de op de sluis te nemen maatregelen. Deze formulering zou ingebouwd moeten kunnen worden in de hydrodynamische software (D-Flow FM, voor zowel 1D, 2D als 3D), zodat, t.z.t., de zoutindringing kan worden berekend met de schematisaties zoals die voor RWS worden gebouwd en onderhouden.



Figuur 1.1 Vernieuwde RWS-werkwijze Vervanging en Renovatie

Het ontwikkelen van een formulering voor de zoutindringing door kunstwerken is van waarde voor zowel Stap 2 als Stap 4 van de vernieuwde RWS-werkwijze Vervanging en Renovatie: Stap 2 voor wat betreft de analyse van het watersysteem en de zoutindringing (nu en in de

toekomst), en Stap 4 voor het definiëren van maatregelen (op de sluis of elders in het watersysteem).

Onderzoeksvraag en -opzet

De onderzoeksvraag betreft twee delen:

- het schrijven van een overzicht over de projecten in de afgelopen periode, sinds 2010 (de studies rond de Volkeraksluizen in geval van een zout Volkerak-Zoommeer), om daarmee zicht te krijgen op wat er is geleerd en welke kennisvragen er nog open staan,
- het uitwerken van een formulering voor zoutindringing door schutsluizen die opgenomen kan worden in gebiedsmodellen; daarbij o.a. aandacht te besteden aan de beoogde toepassingen en de inbedding in de hydrodynamische software.

Onderzoeksresultaten en synthese

Wat betreft het overzicht over de projecten: er bleek veel meer te schrijven dan eerder was voorzien. Het overzicht is op dit moment compleet en is voorzien van gestructureerde referentielijst van ruim 60 titels. Daarmee is er nu een 'ingang' naar de vele projectrapporten en wat daarin is geleerd. Ook geeft het overzicht een onderbouwing van de wenselijkheid van een eenvoudiger formulering ten behoeve van het doorrekenen van scenario's en maatregelen.

In aanloop naar het opstellen van een formulering is een aantal voorbereidende stappen gezet. Op de eerste plaats is het belang van de operationele parameters in beeld gebracht: naast de afmetingen van de sluis en het verschil in zoutgehalte over de sluis bepaalt de operatie immers de hoeveelheid zout die uiteindelijk binnenkomt. Vervolgens is gekeken naar de eisen vanuit de beoogde gebruikers van de formulering. Daarna is een verkenning gedaan naar formuleringen met een vergelijkbaar doel en op basis daarvan is gekozen om uit te gaan van het 'stationair zoutlekmiddel' zoals opgesteld t.b.v. de Volkerakstudies. Deze formulering is omgewerkt om een grotere algemene geldigheid te krijgen. Tenslotte is een verkenning gedaan naar de stappen richting de implementatie ervan in D-Flow FM.

Evaluatie en vooruitblik

Binnen het beschikbare budget was het wel mogelijk om de projecten op een rij te zetten, maar het heeft nog niet geleid tot een compacte *inhoudelijke* presentatie van de nu beschikbare kennis. Het toevoegen daarvan zou leiden tot een 'leerboek' of 'collegedictaat'. Mogelijk wordt dat op enig moment wel als wenselijk gezien. Het nu gemaakte overzicht biedt daarvoor dan een goed startpunt.

Voor de formulering is nu een solide basis gelegd. Hierop kan verder worden gewerkt in de richting van de implementatie. Een eerste versie daarvan kan dan gebruikt worden voor het kwantificeren van de operationele parameters, met name de representatieve deur-opentijden, en hoe deze getalsmatig kunnen worden afgeleid van registraties op de sluisen.

Naast een vervolg op het gebied van schutsluizen kan, afhankelijk van het budget, ook een begin gemaakt worden met een formulering voor de zoutindringing door spuisluizen. De algemene opzet en de voorziene inbedding in D-FLOW FM zullen ook voor spuisluizen bruikbaar zijn.

1 Inleiding

1.1 Algemeen

Het in dit rapport beschreven onderzoek maakt deel uit van het Kennisprogramma Natte Kunstwerken voor 2017 [1]. Het Kennisprogramma is de praktische uitwerking van de NKWK²-onderzoekslijn 'Toekomstbestendige Natte Kunstwerken'. In het kennisprogramma werken momenteel Deltares, TNO, Marin en RWS samen aan onderwerpen op het gebied van natte kunstwerken (stuwen, sluisen, gemalen en stormvloedkeringen).

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

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

1.2 Probleemstelling

In het Kennisprogramma (zie [1], '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 watersysteemmodel, middels het uitvoeren van berekeningen waarin verschillende scenario's (o.a. waterbeschikbaarheid) en verschillende maatregelen (b.v. bellenschermen op de sluis) worden getoetst. Echter, dat is tot op heden niet goed mogelijk: er is geen eenvoudige en tegelijkertijd betrouwbare beschrijving van zoutindringing door kunstwerken beschikbaar, die gemakkelijk gebruikt kan worden in gebiedsmodellen voor de verspreiding van het zout.

² Nationaal Kennisplatform Water en Klimaat

Er is in de afgelopen jaren, zie Hoofdstuk 2, veel werk gedaan in de ontwikkeling en validatie van het model WANDA-Locks waarmee zoutindringing door schutsluizen tamelijk gedetailleerd kan worden berekend. Dit model is ingezet in een aantal belangrijke projecten, waaronder de zout-zoetscheiding op de Krammersluizen en de zoutindringing door de nieuwe sluis te IJmuiden. Het is echter gebleken dat de koppeling van WANDA-Locks met een watersysteemmodel nog veel voeten in de aarde heeft. Zie paragraaf 2.5.3.

Bovendien is de inzet van WANDA-Locks een 'zwaar' instrument voor scenario-berekeningen, en wel op drie punten: het gecombineerde rekenmodel (WANDA-Locks met het watersysteemmodel) wordt erg complex om mee te werken, er is zeer gedetailleerde informatie nodig omtrent de schutoperatie en het doorrekenen van dat schutproces vraagt om een kleine tijdstap van het rekenmodel waarmee de rekentijd sterk oploopt. Hoewel WANDA-Locks dus van zeer grote waarde is voor een specifiek project, is er behoefte aan een eenvoudiger en betrouwbaar model dat geschikt is voor scenario-berekeningen.

1.3 Doelstelling

Het doel van het project is dan ook om stappen te zetten naar een eenvoudige en tegelijkertijd betrouwbare beschrijving van zoutindringing door kunstwerken (waaronder schutsluizen) op te nemen in watersysteemmodellen, zodat het mogelijk wordt om scenario-berekeningen 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 watersysteemmodel kan dan ook (in verkennende zin) gekeken kan worden naar effecten van maatregelen op het kunstwerk ter reductie van de zoutindringing, op basis waarvan realistische eisen aan dat kunstwerk kunnen worden geformuleerd.

1.4 Essentiële aspecten

De op te stellen formulering moet de essentiële elementen van het proces van zoutindringing in zich hebben. Het gaat om de volgende vier elementen:

- het verschil in zoutgehalte over de sluis;
- de afmetingen van de sluiskolk of -kolken;
- het verschil in waterstand over de sluis;
- de schutoperatie;
- maatregelen om de zoutindringing te beperken, zoals de toepassing van bellenschermen.

Onder de schutoperatie valt ook de invloed van de waterverplaatsing van de schepen die de sluis passeren.

De verschillen in zoutgehalte en waterstand over de sluis moeten bepaald worden in het watersysteemmodel. Bij sluisen dicht bij zee zullen zoutgehalte en waterstand op zee worden voorgeschreven in de vorm van (vaste of variabele) randvoorwaarden. De afmetingen van de sluiskolk of -kolken zijn een gegeven (bij een bestaand complex) of zijn ontwerp-parameters (bij een nieuw object). Blijft over de operatie: een beetje wezensvreemd aan het waterbeheer, maar even belangrijk voor de zoutindringing als de andere elementen, immers: als de sluis geen schuttingen uitvoert is er ook geen zoutindringing, en als de deuren maar heel kort open staan, is er maar een zeer beperkte kolk-uitwisseling: het aantal schuttingen en de deur-

opentijden zijn 'eerste orde parameters' in de zoutindringing. (De invloed van de passerende schepen is kleiner omdat in het algemeen de waterverplaatsing van de schepen maar een beperkt percentage van het volume van de kolk is.)

De operatie heeft in de eerste jaren, bij de werkzaamheden rond de Volkeraksluizen, zie Paragraaf 2.2.1, relatief weinig aandacht gehad: de aandacht ging eerst uit naar de hydrodynamica van de kolk-uitwisseling en naar manieren om deze te reduceren. Berekeningen werden daarbij gedaan op basis van gemiddelde waarden van het aantal schuttingsen en de deur-opentijd en variaties hierop bleken, voor die situatie, van beperkt belang. Bij de ontwikkeling van WANDA-Locks werd dit anders, daarin is voor het eerst de operatie, in al haar detail, meegenomen in de berekening van de zoutindringing. Bij de eerste toepassingen van WANDA-Locks begon ook het inzicht te groeien hoe aspecten van de schutoperatie van wezenlijke invloed kunnen zijn op de zoutindringing.

In dit punt zit ook een grote uitdaging voor de gewenste eenvoudige formulering: het vatten van de complexe en variabele schutoperatie in parameters met *representatieve* waarden, dat wil zeggen, waarden die een relatie hebben met de werkelijke operatie en die ook leiden tot de berekening van de juiste zoutindringing. Alleen dan kan er sprake zijn van een eenvoudige en toch betrouwbare bepaling van de zoutindringing door een schutsluis.

1.5 Aanpak en leeswijzer

Om te slagen in de doelstelling, en daarbij tevens de ontwikkelde kennis toegankelijk en toepasbaar te maken, zowel via dit rapport als in de te ontwikkelen formulering, is aandacht besteed aan de volgende onderdelen:

- 1 Op de eerste plaats is een overzicht geschreven van de projecten sinds ca. 2010 op het terrein van zoutindringing door schutsluizen. Deze beschrijving, opgenomen in Hoofdstuk 2, verwijst naar een uitgebreide literatuurlijst, opgenomen aan het eind van dit rapport. Om maximaal profijt te hebben van eerdere ervaringen is ook aandacht besteed aan de projecten waarin gewerkt is aan het koppelen van WANDA-Locks aan een omgevingsmodel. Een beschrijving van deze projecten is opgenomen in Bijlage A.
- 2 Vervolgens is een opzet gemaakt voor de eenvoudige formulering. Eerst worden belangrijke parameters voor het model toegelicht, waarbij wordt ingegaan op het belang van de operatie (Hoofdstuk 3). Vervolgens worden in Hoofdstuk 4 de wensen vanuit het toekomstig gebruik verkend: wat voor soort berekeningen wil men kunnen doen (hoe groot is het beschouwde gebied, hoe lang de te beschouwen periode, en wat voor tijdstap hoort daarbij) en wat wil men kunnen variëren en verkennen. Na een analyse van reeds beschikbare formuleringen, in detail behandeld in Bijlage C, wordt een keuze gemaakt voor een uitgangspunt op basis waarvan de formulering wordt opgezet. Deze opzet (op hoofdlijnen) is onderdeel van Hoofdstuk 4. De volledige uitwerking is opgenomen in Bijlage D.
- 3 Tenslotte wordt vooruitgekeken naar de implementatie van de formulering in software. Hiervoor wordt gekeken naar de huidige ambities om de beschrijving van Kunstwerken, zoals nu opgenomen in SOBEK, generiek te maken voor D-FLOW FM, zodat ze ook in 2D en 3D-modellen opgenomen kunnen worden. Daarbij wordt geconstateerd dat kunstwerken die zout transporteren een aparte categorie zullen vormen. Tenslotte wordt een overzicht gepresenteerd van alle parameters van de formulering: gebruikersinvoer, invoer vanuit het omgevingsmodel, tussen-uitkomsten en de uiteindelijke waarden die worden teruggevoerd naar het omgevingsmodel.

Na deze drie stappen zou de eerstvolgende stap zijn om berekeningen te gaan uitvoeren met het model (of een prototype daarvan) om te onderzoeken in hoeverre de resultaten logisch en consistent zijn, en wat er nodig is om te komen tot betrouwbare voorspellingen: zoals al aangeduid in Paragraaf 1.4 gaat dit met name over het vatten van de complexe en variabele schutoperatie in parameters met *representatieve* waarden. Deze stap, wel opgenomen in het Plan van Aanpak voor dit jaar [2], is nog niet opgepakt omdat het beschikbare budget nodig bleek voor het goed uitwerken van de stappen zoals hierboven omschreven.

1.6 Definities

In dit rapport worden een aantal termen vaak gebruikt. Voor de helderheid worden deze hieronder kort omschreven:

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;

Tenslotte wordt hier het doel van de werkzaamheden van een naam voorzien: de **zeesluisformulering:**

een formulering, op te nemen in een watersysteemmodel (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.

2 Overzicht projecten 2010 - 2016

2.1 Ontwikkeling en toepassing van een Afwegingskader

Hoewel het afwegingskader pas in 2013 is ontwikkeld, is het toch logisch dit overzicht te beginnen met dit onderdeel: de ontwikkeling en toepassing van een afwegingskader voor het al of niet nemen van maatregelen ten behoeve van een (betere) scheiding tussen zout en zoetwater.

In de periode dat dit werd ontwikkeld was Rijkswaterstaat zich meer en meer bewust van het feit dat er in Nederland een groot aantal schut- en spuisluisen zijn op de grens tussen zout en zoetwater, en dat al deze sluisen in potentie een bedreiging vormen voor de beschikbaarheid van zoetwater van voldoende kwaliteit. Ook was er, door de projecten rondom de Volkeraksluisen en de Krammersluisen (zie Paragraaf 2.2), vernieuwde belangstelling voor manieren om zout- en zoetwater gescheiden te houden. Tegen die achtergrond was er behoefte aan een instrument voor een eerste screening van alle bij RWS in beheer zijnde objecten op de grens van zout- en zoet water.

De ontwikkelde methodiek behelst een aantal elementaire stappen, te weten:

- wat zijn de eisen en wensen aan de beperking van de zoutindringing;
- welke maatregelen zijn er mogelijk.

Het eerste van de twee punten lijkt triviaal, maar is essentieel, en bleek (bij toepassing van het afwegingskader) vaak weerbarstig: het is niet zo makkelijk om de eisen en wensen 'smart' geformuleerd te krijgen. Wat betreft de maatregelen wordt een werkwijze gepresenteerd die gaat van 'mogelijke maatregelen' naar 'kansrijke maatregelen' voor de specifieke locatie, bepaald door de kenmerken van het sluiscomplex en het watersysteem. Vervolgens kunnen er pakketten van kansrijke maatregelen worden voorgesteld die getoetst worden aan de eisen en wensen.

De methodiek is gerapporteerd in [3]. In het jaar daarna is de methodiek toegepast op een aantal sluisen, te weten:

- de sluisen in Terneuzen [4],
- de Haringvlietsluisen [5],
- de Lorentzsluisen in de Afsluitdijk [6],
- de Stevinsluisen in de Afsluitdijk [7],
- de Bergsediepsluis in de Oesterdam, tussen het Zoommeer en de Oosterschelde [8],
- de Kreekraksluisen, tussen het Zoommeer en de havendokken van Antwerpen [9],
- de Krammersluisen in de Philipsdam, tussen het Volkerak en de Oosterschelde [10]
- de sluisen bij Farmsum (bij Delfzijl) tussen het Eemskanaal en de Eems [11].

Het is gebleken dat het Afwegingskader een zeer goed hulpmiddel is om het denken en praten over maatregelen t.b.v. de zout-zoetscheiding te ondersteunen, met name in de eerste verkennende fase. Het maakt het noodzakelijk om alle benodigde informatie op tafel te krijgen, en daardoor wordt er contact gelegd met alle partijen die erbij betrokken zijn, waaronder de beheerders van het watersysteem en de beheerders van de schutsluisen.

2.2 Enkele grote projecten: Volkerak, Krammer, IJmuiden

2.2.1 Het project rond de Volkeraksluizen.

Tijdens de uitvoering van de Deltawerken, in de jaren 1960, '70 en '80, is er veel werk gedaan was op het gebied van zout-zoetscheiding bij schutsluizen. Na voltooiing van de Krammersluizen en de bouw van de West-sluis in Terneuzen is het relatief stil geworden op dit onderwerp. Daarin kwam verandering toen, naar aanleiding van de slechte waterkwaliteit van het Volkerak-Zoommeer (VZM), de optie voor een zout VZM op tafel kwam te liggen. Daarmee zouden de problemen met de waterkwaliteit worden opgelost, maar zou ook de grens tussen zoutwater en zoetwater opschuiven van (in hoofdzaak) de Krammersluizen naar de Volkeraksluizen.

Rijkswaterstaat stelde toen de vraag om een aanpak te ontwikkelen waarmee het mogelijk zou zijn om de zoutindringing door de Volkeraksluizen te beperken tot een zeer kleine waarde. Immers: het Hollands Diep en het Haringvliet zijn een strategische zoetwatervoorraad voor een belangrijk deel van ZW-Nederland. Zoutindringing door deze sluizen mag de kwaliteit van dit water, ook gebruikt voor drinkwater, niet in gevaar brengen. De eis aan de maximale zoutvracht was in eerste instantie op 60 kg zout/s gesteld.

Het project omvatte een veelheid aan onderdelen. Er werd teruggegrepen op literatuur, er werden schaalmodelproeven gedaan, er werden numerieke detail-berekeningen gedaan, er is een test-installatie ontworpen en gebouwd, en uiteindelijk is daarmee een veldproef gedaan op de schutsluis van de Stevinssluis, in de Afsluitdijk: deze locatie was in veel opzichten vergelijkbaar met de Volkeraksluizen [12].

In het project zijn een aantal maatregelen onderzocht op hun effect op de zoutindringing. Het betreft een verbeterd type luchtbellenschermen, aan de zoute kant aangevuld met een waterscherm (gevoed met water van de zoete kant) en het toepassen van een spoeldebiet (in eerste instantie aangeduid als lekdebiet, of als 'de methode van de lekkende ebdeuren'; het betreft een debiet van de zoete naar de zoute kant om de sluis en de zoute voorhaven te verzoeten). Deze combinatie van maatregelen werd aangeduid als de Innovatieve Zout-Zoetscheiding (IZZS). Hiermee bleek een zeer sterke beperking van de zoutindringing te bereiken (zie ook [16]).

Om de resultaten van de veldproef op de Stevinssluis te vertalen naar de Volkeraksluizen is een rekenmodel gebouwd: het Zoutlekmodel (zie 2.5). Met dit rekenmodel, gevalideerd aan de metingen op de Stevinssluis, is de vraag van RWS, "kan de zoutlek beperkt worden tot 60 kg/s", positief beantwoord [13].

Vervolgens bleek dat de norm voor de toelaatbare zoutlek nog scherper moest worden gesteld, naar 20 kg/s [14]. Er is toen gestudeerd op het toepassen van een (open) zoutvang in de zoete voorhaven, maar dat bleek lastig, o.a. vanwege het zeer lage zoutgehalte van het zoute water dat nog 'lekte' uit de sluizen. Daarop is voorgesteld een zoutafvang toe te passen: het zoute water dat nog uit de sluizen naar de voorhaven lekt direct in het sluishoofd afzuigen en terugvoeren naar de zoute kant [15]. Hoewel nog met onzekerheden omgeven, is geconcludeerd dat het mogelijk zou moeten zijn om de zoutlek tot een waarde van 20 kg/s te beperken.

Op basis van dit resultaat is de voorkeur uitgesproken om het Volkerak-Zoommeer weer zout te maken. Een definitief besluit over de uitvoering hiervan werd echter uitgesteld, in

afwachting van voldoende financiële bijdragen van het rijk en de verschillende regionale partijen.

2.2.2 De Krammersluizen

Met dat uitstel verschoof de aandacht naar de Krammersluizen: anticiperend op het weer zout maken van het Volkerak-Zoommeer was groot onderhoud aan het systeem van zout-zoetscheiding op de Krammersluizen uitgesteld. Dat was nu dringend nodig, maar het zou naar verwachting zeer kostbaar zijn. Daarop ontstond het idee om de nieuwe techniek, de IZZS, toe te passen op de Krammersluizen. Dit zou goedkoper kunnen zijn en bovendien waardevolle ervaring opleveren voor de toepassing ervan (later) op de Volkeraksluizen.

De Pilot op een van de Krammerjachtensluizen

Na enkele verkenningen ([17] en [18]) is besloten tot een proefopstelling van zo'n IZZS-systeem op één van de jachtensluizen van het complex. De ambitie van die pilot was om het systeem een hele zomer lang te laten draaien om zodoende niet alleen resultaten te verzamelen over de effectiviteit van het systeem, maar ook ervaring op te doen in het beheer: de operatie door de sluismeesters, de storingsgevoeligheid etc.. Deze ambitie betekende ook dat de ombouw van de sluis zou worden uitbesteed aan een aannemer. In voorbereiding op die uitbesteding zijn o.a. de hydraulische randvoorwaarden en -specificaties van de systemen opgesteld [19]. Door Royal Haskoning DHV (RHDHV) zijn deze verwerkt in de aanbestedingsdocumenten.

Een bijzonder onderdeel van de installatie van het IZZS is het waterscherm. Na gunning van de ombouw aan een aannemer is door Deltares, ondersteund door CFD-berekeningen en een schaalmodelproef, een hydraulisch ontwerp gemaakt van dit waterscherm: de 'verdeelbak' die het water zoals aangevoerd door twee leidingen gelijk verdeelde naar een spleet over de hele breedte van het sluishoofd, direct naast het bellenscherm [20].

De Krammersluizen zijn om een aantal redenen anders dan de Volkeraksluizen. Op de eerst plaats is er aan de zoute kante van de Krammersluizen een getij met een slag van ca. 3 m. Dit maakt dat de richting van het verval en de waterstanden boven de drempels sterk variëren; iets wat bij de Volkerak nauwelijks het geval zou zijn. Op de tweede plaats zijn deze sluizen gebouwd voor het scheiden van zout en zoet door, terwijl de schepen in de sluis kolk liggen, het water in de kolk te vervangen³. Hiervoor zijn deze sluizen voorzien van riolen, waterbekkens en gemalen, waarmee tevens het nivelleren wordt uitgevoerd: voor de verschillende vervalrichtingen op verschillende manieren. De noodzaak om dit te beschrijven is een van de redenen geweest om een opvolger voor het Zoutlekmodel te bouwen in de vorm van WANDA-Locks (zie 2.5).

Na oplevering van de ombouw van de jachtensluis zijn verschillende systemen doorgemeten en ingeregeld [21]. Door diverse kinderziektes duurde het even voordat alle systemen operationeel waren en er metingen gedaan konden worden aan de effectiviteit. Daardoor is er uiteindelijk een beperkt aantal metingen uitgevoerd ([22] en [23]). Deze zijn nagerekend met

³ Als geschut wordt van zout naar zoet wordt het zoute water in de kolk via de bodem en via riolen afgevoerd terwijl zoetwater via schuiven in de sluiswand (over de lengte van de sluis) wordt ingelaten. Bij een schutting van zoet naar zout wordt, bij de grote sluizen van het complex, dit proces in omgekeerde volgorde doorlopen, voor een deel van het kolkvolume.

WANDA-Locks, waarmee dit model verder is gevalideerd voor toepassing op de situatie van de Krammersluizen. Een overzicht over deze pilot is beschreven in [24].

Ontwikkeling van een installatie voor de duwvaartsluizen

Parallel aan de Pilot op de Krammerjachtensluis is gewerkt aan de definitie van het systeem voor de duwvaartsluizen. Om te komen tot een goed ontwerp zijn een aantal varianten gedefinieerd [25], doorgerekend en geraamd en met elkaar vergeleken [26]. Op basis daarvan is een voorkeursvariant gedefinieerd, uitgewerkt en doorgerekend, waarvan kon worden aangetoond dat deze op vele fronten aantrekkelijker was dan een renovatie van het huidige systeem [27]. Het berekenen van de zoutlast van de verschillende varianten is gedaan met WANDA-Locks [28]. Daarbij liepen de varianten uiteen in het al of niet gebruiken van delen van de huidige systeem (riolen en bekkens) en het al of niet toepassen van elementen van de IZZS (met name het waterscherm).

De uiteindelijke variant zal o.a. gebruik maken van het bestaande Laag Bekken, met name gedurende de periode van Hoog Water aan de zoute kant. In de fase van het neerwaarts nivelleren kan de schutsluis met relatief zout kolkwater daarheen worden afgevoerd, waarmee dit zout niet vrijkomt aan de zoete kant. Ook kan de kolk, als die op het niveau is van de zoete kant, toch worden gespoeld met zoetwater, wat ook bijdraagt aan het beperken van de zoutindringing.

Voor de Volkeraksluizen was al duidelijk geworden dat de zoutlek sterk afhankelijk is van het gebruikte c.q. beschikbare debiet aan zoetwater dat mag worden afgevoerd naar de zoute kant, o.a. gebruikt voor het doorspoelen van de kolk. Dit bleek bij de Krammersluizen nog meer het geval te zijn, aangezien het water in de buurt van de Krammersluizen niet helemaal zoet is, maar een zoutgehalte heeft van bijna 1 kg/m^3 . Dat impliceert dat, naast effecten op de zoutindringing, er met iedere m^3 water een kg zout wordt teruggevoerd naar de zoute kant. Bij hogere debieten was het daarmee ook mogelijk om negatieve zoutlekken te realiseren: meer zout terugvoeren dan er binnenkomt.

Door dit hogere zoutgehalte aan de zoete kant en door de aanwezigheid van riolen en een Laag Bekken was de opgave om te komen tot een aanvaardbare zoutvracht door de Krammersluizen veel makkelijker te realiseren dan bij de Volkeraksluizen. Was bij de Volkeraksluizen het toepassen van een waterscherm nog een essentieel (en zeer innovatief) element, bij de Krammersluizen bleek dit niet nodig, en konden de aan het waterscherm verbonden nadelen (een kostbare installatie met een vrij groot energiegebruik) vermeden worden.

Invloed van de operatie

De overgang naar de nieuwe methode van zout-zoetscheiding betekende ook dat de schutcyclus veel korter zou duren: de fase waarbij het water in de kolk wordt uitgewisseld vervalt immers. Dat betekende dat er meer schuttingen per uur mogelijk zouden zijn, waarmee de scheepvaart beter bediend zou worden. Dat zou ook betekenen dat de huidige gegevens over het aantal schuttingen per dag en de deur-opentijden niet meer gelden voor de toekomstige situatie.

Om zicht te krijgen op de toekomstige operatie zijn simulaties uitgevoerd met het model SIVAK (Simulatiepakket voor VerkeersAfwikkeling bij Kunstwerken), zowel voor de huidige situatie als voor de toekomstige situatie [29]. Deze studie leverde als directe uitkomst inzicht in de besparing op wachttijden voor schepen, waarmee een belangrijke economische

meerwaarde in beeld werd gebracht. Daarnaast is er een aansluiting gemaakt tussen SIVAK en WANDA-Locks: daarmee werd het mogelijk om de variatie in o.a. deur-opentijden en schutfrequentie (zoals berekend met SIVAK), na te rekenen op hun effect op het zouttransport (met WANDA-Locks). De uitvoer uit SIVAK is daarvoor aangevuld met gegevens over de schepen die elke schutting mee gaan. Daarnaast is WANDA-Locks, ook voor meer generiek gebruik, aangevuld met een beschrijving van de sluismeester: het openen en sluiten van deuren en het schutten in reactie op een tijdreeks van schepen die zich melden in de voorhaven (zie Paragraaf 2.5.2).

De gedetailleerde behandeling van de operatie in de berekeningen met WANDA-Locks leverde een onverwacht en belangrijk inzicht op: in rustige uren, als er weinig aanbod van schepen is, kan het voorkomen dat de deuren aan een kant van de sluis lang open blijven staan. Er is dan vanuit de scheepvaart immers geen reden om de deuren tussentijds te sluiten. Door aan te nemen dat, als deze 'wachttijd' groot is (15 minuten of langer), de deur wordt gesloten tussen uitvaren en weer invaren, werd een zeer grote reductie van de zoutindringing bereikt; een reductie die essentieel bleek voor het behalen van de gewenste resultaten [28].

Planuitwerking ombouw Krammersluizen

Op basis van het positieve advies heeft RWS besloten over te gaan tot de volgende stap: de Planuitwerking, dat wil zeggen het voorbereiden van de aanbesteding aan marktpartijen voor de realisatie van de ombouw. In deze fase zijn nog een aantal stappen gezet in de ontwikkeling en toepassing van WANDA-Locks voor dit project:

- het volume van schepen heeft op twee manieren invloed op het transport van zout door de kolk: de aanwezigheid van het schip in de kolk betekent dat er minder water in de kolk zit; dit speelt een rol in het maximale zouttransport en ook tijdens het nivelleren; daarnaast leidt het uit- en invaren tot een retourstroming die zorgt voor extra uitwisseling van water tussen de kolk en de voorhaven; deze effecten zaten nog niet in WANDA-Locks; er is een eerste benadering opgesteld [30] en opgenomen in WANDA-Locks;
- om de scheepvaart zo min mogelijk te hinderen heeft het de voorkeur om de bellenschermen buiten de kolk te plaatsen, op enige afstand van de deuren; als echter de bellenschermen niet direct tegen de deur aan zitten is er sprake van een volume van water tussen de deur en het bellenscherm en dat volume hoort soms bij de kolk en soms niet: soms wordt de scheiding tussen kolk en voorhaven gevormd door de deur, en soms door het bellenscherm; de invloed hiervan op de zoutlek is onderzocht en dit is opgenomen in WANDA-Locks [31];
- het verbeterde type bellenschermen, ontwikkeld tijdens Volkerak-studies, was voorzien van regelaars voor het luchtdebiet, gepatenteerd voor deze toepassing, die zorgden voor een gelijke verdeling van het debiet over de breedte van de kolk; het bleek dat de levensduur van deze regelaars beperkt was; om deze reden, en om niet gebonden te zijn aan de patenthouder, is overgestapt op een ander type debietregelaar; er zijn proeven uitgevoerd die laten zien dat ook hiermee goede prestaties mogen worden verwacht wat betreft het scheiden van zout- en zoetwater [32];
- ten behoeve van de uitvraag zijn de kenmerken van een bellenscherm benodigd voor goede prestaties wat betreft het scheiden van zout- en zoetwater op een rij gezet [33]; dit zijn:

- er moet sprake zijn van een uniforme verdeling van het luchtdebiet over de hele breedte van het sluishoofd;
 - deze uniforme verdeling is nodig vanaf het eerste moment van opstarten van het bellenscherm om een uniforme waterbeweging op te wekken;
 - er moet sprake zijn van een stabiel en dicht scherm, zonder ‘gaten’;
 - de belgrootte ligt tussen 3 en 10 mm (in zoetwater, in zout water worden de bellen kleiner) voor een uniforme stijgsnelheid en daarmee een maximaal effect in het genereren van de gewenste verticale waterbeweging.
- voor de definitieve berekeningen voor deze fase van het project is de buffering van zout in het Volkerak-Zoommeer beschreven door het watersysteem op te nemen als een aantal ‘voorhavens’ in de schematisatie van WANDA-Locks; deze wijze van modelleren is eerst getoetst en gekalibreerd op metingen [34].

Op dit moment wordt gewerkt aan het meet- en monitoringsplan voor de Krammersluizen. Hierin worden o.a. metingen gedefinieerd waarmee de prestatie van de IZZS kan worden gemonitord. Daarnaast worden metingen gedefinieerd die meer zekerheid moeten geven over de uitkomsten van de modelberekeningen die met WANDA-Locks zijn uitgevoerd. Naar verwachting zal dit waardevol materiaal opleveren om te zijner tijd de berekeningen aan de zoutindringing door een schutsluis verder te valideren.

2.2.3 IJmuiden: de Nieuwe Zeesluis en de Selectieve Onttrekking

In de eerste fasen van de planontwikkeling rondom een nieuwe sluis in IJmuiden wordt door PMSS (Port and Maritime Systems Simulation, R. Groenveld) een simulatiemodel gebouwd voor de verkeersafwikkeling door het sluiscomplex ([35], [36] en [37]). Hiermee wordt een basis gelegd voor de afmetingen van de Nieuwe Zeesluis. De gevolgen van de operatie van deze nieuwe sluis op de zoutindringing op het Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal zijn voor het eerst in kaart gebracht door Arcadis in 2011 [38], gevolgd door een verfijning in 2014 [39]. Dit onderzoek is onderdeel geweest van de MER [40]. De berekeningen laten zien dat het zoutgehalte op verschillende locaties in de eindtoestand met de Nieuwe Zeesluis, het Projectalternatief (PA), hoger zal zijn dan in de eindtoestand met alleen de Noordersluis, de zogenaamde Autonome Ontwikkeling (AO). Het project rond de realisatie van de Nieuwe Zeesluis krijgt daarop de opdracht om deze toename van (AO naar PA) te mitigeren.

Eerste verkenning (Fase 1)

In het najaar van 2013 wordt Deltares gevraagd een eerste verkenning te doen naar maatregelen die hiervoor in aanmerking komen [41]. Om de zoutbalans te beschrijven en te kwantificeren wordt een conceptueel model opgesteld. Dit beschrijft het zout dat binnenkomt in de Velserskom, dat in een onderlaag beweegt richting Amsterdam, en over die lengte opmengt naar de bovenlaag, waar het zoete water afkomstig van o.a. het Amsterdam-Rijnkanaal langzaam zouter wordt, en via gemaal en spuisluizen wordt afgevoerd. In een evenwichtssituatie wordt er evenveel zout afgevoerd als er wordt aangevoerd. Het afgevoerde zout is daarbij eenvoudig te kwantificeren middels het debiet en het gemeten zoutgehalte. Het binnenkomende zout wordt berekend met het Zoutlekmodel. Voor een aantal maatregelen worden ruwe schetsontwerpen gemaakt en worden ramingen opgesteld. Het gaat daarbij om bellenschermen op de nieuwe sluis, de bouw van een selectieve onttrekking of de inzet van bellenpluimen. De selectieve onttrekking is erop gericht om het diepste en zoutste water uit de Velserskom af te voeren, om daarmee met de zelfde hoeveelheid water meer zout af te voeren. Met de bellenpluimen wordt hetzelfde doel nagestreefd, maar dan mikkend op het verticaal gemiddelde zoutgehalte in de Velserskom.

Zowel de selectieve onttrekking als de bellenpluimen zouden gecombineerd kunnen worden met een zoutvang.

Terwijl de aanbesteding van de bouw van de nieuwe sluis al loopt moet Rijkswaterstaat een besluit nemen of men de maatregelen voor het beheersen van de zoutindringing wil uitvragen aan de markt, samen met de bouw van de sluis, of dat men de verantwoordelijkheid daarvoor zelf wil houden. Overwogen wordt dat de materie nog erg complex is en een dergelijke eis moeilijk 'smart' te specificeren zou zijn, en nog moeilijker te verifiëren zou zijn. Op basis hiervan wordt uiteindelijk besloten de verantwoordelijkheid hiervoor bij Rijkswaterstaat te houden.

Om, in overleg met de regio, tot een besluit te komen omtrent de te nemen maatregelen wordt Deltares gevraagd een breder overzicht op te stellen van mogelijke maatregelen [42]. Om daarbij de optie voor het plaatsen van bellenschermen op de nieuwe sluis open te houden moeten er ruimte reserveringen worden aangebracht; deze moeten wel worden meegenomen in de uitvraag naar de markt. Als basis hiervoor wordt een voorlopig ontwerp gemaakt van een bellenschermstelsel [43].

Brede inventarisatie van mogelijke maatregelen (Fase 2)

Deze inventarisatie [42] beschouwt als eerste de situatie zoals in beeld gebracht tijdens de MER-studie, en het daarbij gebruikte rekenmodel. Vervolgens wordt ingegaan op de mogelijke maatregelen. Dit betreft maatregelen in het waterbeheer, operationele maatregelen in het schutbedrijf, maatregelen op de sluis en maatregelen bij Zijkanaal C (zie ook Paragraaf 2.3.3 en [55]). Ook wordt er enige aandacht besteed aan de impact op de vismigratie. Vervolgens worden de maatregelen in een "trade-off matrix" beoordeeld op een range aan aspecten en daar komt een voorkeur uit: de aanleg van een selectieve onttrekking, al of niet in combinatie met een zoutvang, scoort het beste. Ook blijven de bellenschermen in beeld. Tenslotte wordt er een voorlopig Plan van Aanpak opgesteld: wat is er nodig voor een verdere uitwerking van de maatregelen. Boven aan de lijst staat het sluitend maken van de waterbalans van het Noordzeekanaal: daarin zit op dat moment een sluitfout van orde 25% van het totale debiet (er wordt, volgens de registraties, bij IJmuiden meer water afgevoerd dan er wordt aangevoerd). Een sluitende waterbalans is een voorwaarde voor het kunnen modelleren van de verspreiding van het zout in het gebied en daarmee ook voor het beoordelen van maatregelen tegen zoutindringing op hun effectiviteit.

Op basis van deze verkenning wordt er door RWS besloten dat de aanleg van een selectieve onttrekking de voorkeur heeft. Dit vanwege de hoge energiekosten van de bellenschermen, het voordeel dat de selectieve onttrekking los staat van de schutoperatie en tenslotte omdat deze maatregel werkt voor alle sluizen, ook als in de toekomst de Noordersluis weer opnieuw in bedrijf zou komen. Daarnaast blijven voor RWS de bellenschermen nog een optie, en moet ook de bijdrage van een drempel aan het binnenhoofd worden verkend.

Uitwerking bronmaatregelen (Fase 3)

Nu er een voorkeur is uitgesproken voor een benadering wordt er een begin gemaakt met het goed in kaart brengen van alle relevante factoren, en de modellering ervan. In de rapportage over deze 'Fase 3' [44] komen de volgende zaken aan bod:

- er wordt aandacht besteed aan de operationele mogelijkheden en beperkingen in het schutbedrijf, waaronder het beperken van de deur-opentijd en het beperken van het aantal schuttingen;

- ook wordt gekeken naar de gegevens uit de verkeerssimulaties van PMSS: hoeveel schuttingen worden er per dag uitgevoerd in de verschillende situaties: de Autonome Ontwikkeling (95 MTPA), het Project Alternatief (125 MTPA), maar ook de situatie met de nieuwe sluis maar een kleinere ladingstroom: de Inbedrijfstelling van de nieuwe sluis met 95 MTPA;
- de bijdrage van een drempel aan het binnenhoofd wordt bepaald: het binnenhoofd is immers aanzienlijk dieper dan het kanaal; toch blijkt de te verwachten bijdrage aan de reductie van de zoutlek slechts klein te zijn;
- er wordt een eerste serieuze poging gedaan om de afmetingen van de selectieve onttrekking vast te stellen (breedte, hoogte, verticale positie) in relatie tot de benodigde effectiviteit;
- het schetsontwerp wordt daarbij getoetst aan de hand van empirische formules en er worden verkennende berekeningen gedaan met CFD (Computational Fluid Dynamics), die worden getoetst aan resultaten uit schaalmodelonderzoek ([45] en [46]);
- er wordt een eerste verkenning gedaan met Delft3D: kan met de bestaande optie in Delft3D ("3D Gate") een selectieve onttrekking worden beschreven;
- om te komen tot de juiste zoutvracht op het kanaal worden enkele simulaties door PMSS opnieuw gedraaid [47], waarbij nu ook details van de schutoperatie worden uitgevoerd, waaronder de momenten dat deuren openen en sluiten;
- deze gegevens worden geanalyseerd en gebruikt als randvoorwaarden voor WANDA-Locks, waarmee de zoutvracht wordt berekend [48]; hierbij wordt ook gekeken naar het effect van variaties in het schutbedrijf op de zoutvracht;
- deze resultaten van WANDA-Locks worden vervolgens gebruikt als randvoorwaarde voor het Delft3D-model, zoals eerder door Arcadis opgezet ([38] en [39]) in het kader van de MER studies; hiermee wordt een periode van ca. een half jaar (eerste helft 2013) doorgerekend voor de scenario's AO, PA en PA met SO;

De resultaten van de berekeningen brengen aan het licht dat de manier waarop in WANDA-Locks (en daarvóór in het Zoutlekmodel) transporten tussen een voorhaven en het buitengebied, dan wel een volgend deel van de voorhaven worden beschreven nadere beschouwing behoeft: in WANDA-Locks heeft ieder domein een eigen uniforme dichtheid/zoutgehalte (dus één gemiddelde waarde voor het hele volume), en ieder volgend domein heeft een iets andere waarde, waarmee het verschil in zoutgehalte over de sluis afneemt met het aantal domeinen dat wordt gespecificeerd tussen de sluis en de plaats waar het zoutgehalte wordt voorgeschreven als randvoorwaarde. De Delft3D-berekeningen daarentegen laten zien dat er een gelaagde situatie is die zich doorzet over de grens tussen domeinen heen. Het verschil in zoutgehalte van domein naar domein zoals berekend door WANDA-Locks is een gevolg van de opzet van WANDA-Locks en dat zal invloed hebben op de berekende zoutvracht. Voor een goede berekening van de zoutvracht door de sluisen is het transport van zout vanaf de sluis richting het binnenland van belang: hoe sneller het zout wegloopt van de sluis, hoe zoeter het water vlak voor de sluis (en omgekeerd aan de zoute kant van de sluis).

Dit is reden om, in de laatste serie berekeningen waarin gebruik gemaakt wordt van een online koppeling tussen WANDA-Locks en Delft3D, de grens tussen beide modellen te leggen op de sluisdeuren van het binnenhoofd van elke sluis: Delft3D maakt een betere berekening van het zouttransport richting Noordzeekanaal dan WANDA-LOCKS. In de koppeling tussen

beide modellen wordt de verticale gelaagdheid in de Velserkom zoals berekend in Delft3D omgerekend naar een verticaal gemiddelde waarde voor WANDA-Locks. Aan de kant van de buitenhaven is geen Delft3D-model gekoppeld; daar blijft de stapsgewijze verandering van dichtheid en zoutgehalte een rol spelen in de uiteindelijke antwoorden.

De kern van de vraagstelling van het project is of, met de Selectieve Onttrekking, de toename van de zoutindringing naar het Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal (van AO naar PA) in voldoende mate wordt gemitigeerd. Dit blijkt het geval te zijn: het cumulatieve zouttransport van de Velserkom naar het Noordzeekanaal, een parameter die aangeeft in elke mate het kanaal zouter wordt of zoeter, blijkt in het scenario 'PA+SO' steeds kleiner of gelijk aan dat in het scenario AO.

Naar een specificatie van de selectieve onttrekking

Op basis van deze resultaten wordt, in overleg met de regio, besloten tot de realisatie van een selectieve onttrekking in IJmuiden. Daarmee begint een nieuwe fase. Nu moet de specificatie van de selectieve onttrekking verder worden uitgewerkt, zodat (uiteindelijk) de realisatie ervan op de markt gezet kan worden.

De functionele eisen aan de selectieve onttrekking zijn in hoofdzaak beperkt tot twee zaken:

- de effectiviteit ervan: het afvoeren van zoveel mogelijk zout per m³ water;
- de weerstand ervan: deze moet minimaal zijn omdat deze weerstand gaat ten koste van de afvoercapaciteit van de spuisluizen en pompen, en dat vertaalt zich in een verhoging van de energiekosten voor het gemaal.

Voor beide aspecten geldt dat zowel het opstellen van de functionele hydraulische eis als het opstellen van een verificatievoorschrift niet eenvoudig zijn. Zeer recent is het eerste deel van deze werkzaamheden afgerond [49]. Op basis van de resultaten zal een ingenieursbureau de uitvraag voor de realisatie gaan voorbereiden.

2.3 Overige sluizen in Nederland

In de jaren sinds 2010 zijn, parallel aan de grote projecten van Rijkswaterstaat genoemd in de voorgaande paragraaf, ook een aantal (kleinere) studies voor de waterschappen uitgevoerd. Deze worden in hieronder kort besproken.

2.3.1 Scheepvaartsluizen Delfland, waaronder de Parksluizen in Rotterdam

Het Hoogheemraadschap van Delfland heeft in de zomer last van zoutindringing via de Parksluizen naar het boezemsysteem. Bij lage afvoer over de Rijn neemt het zoutgehalte in de Parkhaven (tussen de sluizen en de Nieuwe Maas) toe, waardoor de Parksluizen meer zout naar binnen gaan transporteren. Als er bovendien geen of weinig neerslag valt wordt er geen water meer uitgeslagen door het gemaal ter plaatse, en daarmee neemt het zoutgehalte op de Delfshavense Schie toe.

In een droge periode haalt Delfland water uit het Brielse Meer, via een leiding onder de Nieuwe Waterweg. Een deel van dit water wordt doorgeleverd naar het naburige Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard. Hiervoor geldt een grenswaarde voor het zoutgehalte ter plaatse van de Beukelsbrug: een punt halverwege de Parksluizen en de aantakking van het Schie-Schiekanaal: langs dit kanaal moet het water worden

doorgeleverd. In het droge voorjaar 2011 doen zich problemen voor met een te hoog zoutgehalte en wordt Deltares gevraagd te adviseren over te nemen maatregelen [50].

Om tot een goed begrip te komen van de situatie worden verkennende metingen uitgevoerd op een aantal punten tussen de Beukelsbrug en de Parksluizen. Het blijkt dat, op een doordeweekse dag als er beroepsvaart is, het zoutgehalte over de verticaal geheel constant is, waarbij dit zoutgehalte hoger is naarmate de locatie dichterbij de Parksluizen is. Er kan dan dus geen sprake zijn van dichtheidsstroming waarmee het zout vanaf de sluizen naar het meetpunt (of verder) komt. Waarschijnlijk speelt de verspreiding door de scheepvaart dan een grote rol. Ook wordt geconcludeerd dat bij een volledige verticale doormenging er slechts een klein debiet richting de sluizen nodig zou zijn om te voorkomen dat het zout zich naar het noorden verplaatst.

Hoewel de vraagstelling van Delfland, en ook de offerte van Deltares, gericht waren op maatregelen op de sluis, blijkt dat hier maatregelen in het waterbeheer veel effectiever zouden kunnen zijn. Op basis van het inzicht vanuit de metingen wordt geadviseerd om tussen de sluizen en het meetpunt Beukelsbrug nog een aantal meetlocaties in te richten waarmee de ontwikkeling van het zoutgehalte op dat deel van het kanaal kan worden gemonitord; daarmee kan er tijdig worden ingegrepen. Daarvoor zou het nuttig zijn om, naast de grote pomp, ook over een pomp te beschikken met een lage capaciteit, waarmee de verspreiding van zout effectief zou kunnen worden bestreden.

2.3.2 Harlingen: bestrijden van de zoutindringing met minder water

De haven van Harlingen kent een vrij groot baggerbezwaar. Dit wordt gedeeltelijk veroorzaakt door de lozing van zoetwater op de haven vanuit het Van Harinxmakanaal. Deze lozing drijft namelijk een dichtheidsstroming aan in de havenmond waarmee slib de haven in wordt getransporteerd. Om dit baggerbezwaar te reduceren is het wenselijk de lozing van zoetwater vanaf het kanaal te reduceren. Echter, het spuien van kanaalwater is nodig om het zout dat binnenkomt door het schutbedrijf met de Tsjerk Hiddessluizen weer af te voeren. Vandaar dat de vraag luidt of er manieren zijn om met minder water toch de zoutindringing te beperken.

Ook in dit geval wordt er gewerkt met WANDA-Locks, ditmaal gekoppeld aan een 2DV-model in Delft3D (zie voor deze koppeling Paragraaf 2.5.3). Onderzocht worden maatregelen in het schutbedrijf en maatregelen in het waterbeheer. Met name die laatste blijken effectief [51].

Een van de uitdagingen in dit project voor het werken met WANDA-Locks is dat grote sluis is uitgerust met een tussenhoofd, waardoor de lengte van de kolk niet steeds dezelfde is. Voor WANDA-Locks betekent dat de schematisatie niet constant is. Om toch berekeningen te kunnen maken is de dealkolk als een aparte schutkolk beschouwd, parallel aan de andere kolken.

2.3.3 De Brabantse rivieren in geval van een zout Volkerak-Zoommeer

In het toekomstige scenario van een zout Volkerak-Zoommeer kan dit zout een bedreiging vormen voor twee rivieren in West-Brabant die uitmonden in het Volkerak-Zoommeer: de Dintel bij Dintelmond, en de Steenbergsche Vliet bij Beneden Sas. Op beide locaties zijn schutsluizen, maar die staan nu vrijwel altijd open, maar bij een zout VZM zouden die weer moeten gaan schutten: dit vanwege de dan weer variërende waterstand op het VZM en om het zout buiten te houden.

Voor de beheersing van de zoutindringing via deze sluizen zouden maatregelen nodig zijn: maatregelen op de sluizen (b.v. bellenschermen) maar ook voldoende afvoer via deze rivieren. In tijden van weinig neerslag zou extra afvoer gerealiseerd moeten worden door water in te laten vanaf het Hollands Diep bij Geertruidenberg, via het Markkanaal naar de Mark, die overgaat in de Dintel, en via het Markvlietkanaal naar de Steenbergsche Vliet. De gevraagde studie gaat over de benodigde afvoercapaciteit over die route, die o.a. afhangt van de effectiviteit van de zout-zoetscheiding op de sluizen [52].

Daartoe worden met WANDA-Locks berekeningen gedaan voor beide sluizen. Deze berekeningen worden gekoppeld aan een Sobek-model opgezet en gedraaid door Witteveen en Bos (zie voor deze koppeling Paragraaf 2.5.3). Omdat er geen gegevens zijn over het toekomstige schutbedrijf (hoeveel schuttingen, wanneer, en hoe lang staan de deuren open) worden hiervoor aannamen gedaan.

2.3.4 De Grote Sluis te Spaarndam: zoutindringing vanaf het Noordzeekanaal

Al sinds geruime tijd wordt het Noordzeekanaal steeds zouter. Dit is voor het Hoogheemraadschap van Rijnland in toenemende mate een probleem: bij zeer lage Rijnafvoer trekt het zout vanaf zee landinwaarts en de Hollands IJssel op tot in Gouda, dan kan daar geen water meer worden ingenomen en dan kan het boezemsysteem van Rijnland niet meer worden gespoeld. Zout dat binnenkomt via de sluis bij Spaarndam wordt dan ook niet meer afgevoerd en kan een bedreiging vormen voor o.a. de bollenteelt. In 1992 wordt al gekeken naar manieren om de zoutindringing te beperken door aanpassingen aan de sluis [52]. Later, in 2006, wordt bekeken of het zinvol zou zijn om een zoutvang aan te leggen [54].

In het kader van de studies naar de nieuwe zeesluis wordt op een zeker moment bekeken wat de economische schade aan de bollenteelt zou kunnen zijn die het gevolg is van de toenemend zoutgehalte op het Noordzeekanaal [55]. Hiertoe worden berekeningen gedaan met het Zoutlekmodel, en wordt de verspreiding van het zout door het gebied bepaald met behulp van SOBEM. Vervolgens wordt de toename van het zoutgehalte vertaald in mogelijke economische schade. Met het zoutlekmodel worden vervolgens maatregelen op en rond de sluis verkend, waaronder bellenschermen en een beweegbare drempel.

Recent wordt in opdracht van het Hoogheemraadschap van Rijnland een Plan van Aanpak opgesteld voor een monitoringsysteem op de sluis, waarmee Rijnland grip wil krijgen op de zoutindringing [56]. Tijdens het opstellen van het Plan van Aanpak blijken er een paar zaken specifieke aandacht te vragen.

- Op de eerste plaats heeft de schutkolk een niet-constante breedte. Dat leidt ertoe dat de formule voor de kolkuitwisseling zoals gehanteerd door WANDA-Locks niet geldig is (een andere beschouwing zoals gepresenteerd in [52] is ook niet meer toereikend sinds een recente verbouwing van de sluis: destijds had de kolk over de hele lengte een constante breedte die alleen groter was dan de breedte in de sluishoofden, na de verbouwing is variatie in breedte complexer geworden).
- Op de tweede plaats is de sluis sinds de verbouwing voorzien van een tussendeur, maar de operatie daarmee loopt niet voorspoedig en er is twijfel over de effectiviteit daarvan.

Na de oplevering van het Plan van Aanpak heeft Rijnland de uitvoering nog in beraad: het opzetten van een monitoringsysteem met de gewenste nauwkeurigheid blijkt complex, kostbaar en tijdrovend.

2.4 Projecten in het buitenland

Op basis van de in Nederland opgedane expertise is er inmiddels ook sprake van enkele buitenlandse projecten.

2.4.1 Doortocht Brugge

De aanleg van het nieuwe kanaal Seine-Nord biedt kansen voor een toename van de scheepvaart vanuit Parijs en omstreken naar de Vlaamse havens. Ook Zeebrugge hoopt te kunnen profiteren en dat zou leiden tot een toename van het scheepvaartverkeer rond de oude stad van Brugge. Deze verbinding zou ook geschikt moeten worden voor een grotere klasse schepen. Om dat mogelijk te maken zou de oude stadsgracht moeten worden aangepast en zou een van de sluizen, de Dampoortsluis aan de oostkant van de stad, moeten worden vervangen, en daarbij mogelijk ook verplaatst.

Er zijn verschillende opties in beeld, en één van de aspecten die beschouwd moet worden is de zoutindringing vanuit de Verbindingsluis aan de noordkant van de stad. Deze verbindt de gracht rond de oude stad met het Boudewijnkanaal, dat de verbinding vormt met Zeebrugge. Dat kanaal is zout vanwege de grote zeeluis te Zeebrugge tussen de buitenhaven (open naar zee) en de binnenhaven, in open verbinding met het Boudewijnkanaal.

In WANDA-Locks wordt een model gemaakt dat wordt vergeleken met lokale registraties van zowel zoutgehalten als schuttingen. Mede dankzij de aard van de lokale situatie (korte afstanden, een ringvaart die zich goed laat schematiseren als een reeks van kleine bassins) zijn de overeenkomsten tussen de metingen en de berekeningen erg goed. Dit geldt o.a. voor de pieken in de zoutgehalten die direct samenhangen met de schuttingen van de Verbindingsluis. Vervolgens worden de verschillende configuraties doorgerekend [57]. Dit levert een heldere weergave op van de effecten van essentiële verschillen tussen de opties.

2.4.2 Panama: de waterkwaliteit van het Panama Canal en Lake Gatun

De nieuwe sluizen van Panama zijn in 2016 in bedrijf genomen. Om het schutbedrijf en het waterbeheer goed op elkaar af te stemmen heeft ACP (Autoridad de Canal de Panama) opdracht gegeven aan Deltares voor een modelstudie met WANDA-Locks en Delft3D. Deze modellen zijn (net als bij IJmuiden is gedaan), aan elkaar gekoppeld met Cosumo. Met dit gekoppelde model is de nieuwe situatie geanalyseerd (na de ingebruikname van de nieuwe sluizen).

Het opbouwen van een schematisatie in WANDA-Locks van de verschillende sluiscomplexen in Panama bleek veel complexer dan oorspronkelijk gedacht. Dit heeft o.a. te maken met de complexe operatie van de 'getrapte' sluizen, voor een deel voorzien van spaarbekkens. Tevens bleek de verwerking van de beschikbare gegevens tot invoer voor WANDA-Locks gecompliceerder dan verwacht.

Inhoudelijk bleek het noodzakelijk om het effect van de waterverplaatsing van schepen op een juiste manier mee te nemen in WANDA-Locks. Eerdere studies voor deze sluizen, o.a. [58], hebben laten zien dat dit een grote rol speelt. Als een schip van de ene kolk opschuift naar de volgende kolk geeft dat een waterverplaatsing in de andere richting. Deze waterverplaatsing treedt op tegelijkertijd, en in combinatie met de kolk-uitwisseling aangedreven door een verschil in dichtheid en zoutgehalte. Het samenspel tussen deze twee processen zit nog niet goed in WANDA-Locks: dit proces was nog niet eerder van zo groot

belang als bij deze sluizen het geval is. In dit project wordt dit afgedekt met een kalibratiefactor, maar verdere ontwikkeling op dit punt zou gewenst zijn.

Het bestaande Delft3D-MODEL van het Panama Canal en Lake Gatun is in het project uitgebreid en aangepast aan de nieuwe situatie. In het gekoppelde model (WANDA-Locks via Cosumo naar Delft3D en terug) blijken de rekentijden erg lang te zijn, en daarom zijn verdere aanpassingen gedaan om de rekentijd zoveel mogelijk te optimaliseren.

Naast de modelstudie heeft ACP ook opdracht gegeven voor de ontwikkeling van een 'pilot' voor een operationeel beheerssysteem (draaiend onder het FEWS-systeem van Deltares). Dit model moet het mogelijk maken om te adviseren over de wijze waarop de schepen worden geschut, bijvoorbeeld met of zonder de inzet van de 'water saving basins'. De huidige pilot biedt de mogelijkheid om meetgegevens over o.a. het zoutgehalte in en rond de sluizen te verzamelen en te presenteren in combinatie met informatie over het schutbedrijf. Daarnaast draait in het systeem WANDA-Locks voor de sluizen en Delft3D voor het Panama Canal en Lake Gatun. Deltares is in overleg met ACP over de verdere ontwikkeling van de pilot tot een volledig operationeel systeem.

2.5 Ontwikkeling Zoutlekmodel, WANDA-Locks en koppelingen

2.5.1 Het oorspronkelijke Zoutlekmodel

Zoals al gesteld is het oorspronkelijke Zoutlekmodel gebouwd om de resultaten van de veldproef op de Stevinsluis te vertalen naar de Volkeraksluizen. Het model doet in essentie de boekhouding van alle transporten van water en zout tussen de voorhavens en de sluiscolk. Deze transporten zijn zowel transporten van water met een bepaald zoutgehalte, b.v. een nivelleerdebiet dat de sluis in of uitstroomt, als de transporten door kolkuitwisseling, waarbij netto geen water wordt verplaatst (het in- en uitgaande debiet is in m^3/s even groot), maar wel zout wordt verplaatst (de beide debieten hebben niet hetzelfde zoutgehalte). Deze kolkuitwisseling wordt aangedreven door het *initiële* dichtheidsverschil tussen colk en voorhaven en loopt door zolang als de deur tussen colk en voorhaven openstaat, of totdat de colk volledig is uitgewisseld. De opbouw van het zoutlekmodel is beschreven in [59].

De essentiële coëfficiënt(-en) in het model is de zogenaamde doorlaatfractie: een factor die aangeeft in welke mate het zouttransport door kolkuitwisseling wordt afgeremd door de aanwezigheid van b.v. een bellenscherm. Deze doorlaatfractie is een functie van het zogenaamde Froude-luchtgetal: een dimensieloze grootheid die de verhouding geeft tussen enerzijds de potentiële energie in het dichtheidsverschil tussen colk en voorhaven en anderzijds de potentiële energie van lucht die wordt losgelaten aan de bodem om te stijgen naar het wateroppervlak.

Deze theorie bestaat al sinds begin jaren 60 van de vorige eeuw [60]. Een recente aanvulling op deze theorie geeft een nauwkeuriger beschrijving van de snelheid van de zouttong in de verschillende fasen van de kolkuitwisseling [61].

Het nieuwe van het Zoutlekmodel is dat het deze theorie gebruikt voor een simulatie van de zouttransporten die optreden tijdens de verschillende fasen van het schutproces, inclusief de effecten van de zoutlekbeperkende maatregelen. Aan de hand van een reeks van proeven op de Stevinsluis zijn, voor verschillende condities, de doorlaatfracties bepaald en geplot op de theoretische krommen. Hiermee is de geldigheid van de theorie in zijn toepassing op een

operationele sluis aangetoond: het transport van zout kan worden berekend uit het verschil in zoutgehalte en dichtheid over de sluis, de afmetingen van de sluis, de operatie van de sluis en de toegepaste zoutlekbeperkende maatregelen.

In een stationaire situatie, dat wil zeggen bij constante randvoorwaarden en een constante operatie (een continue schutproces in een vast ritme met vaste deur-opentijden) zou er een evenwichtssituatie ontstaan, waarbij de zoutlek uiteindelijk een bepaalde (vaste) waarde zou bereiken. Het bleek mogelijk om de vergelijking zo te schrijven dat deze waarde van de zoutlek in een stationaire situatie kan worden berekend door het oplossen van een stelsel vergelijkingen. Deze vorm van het zoutlekmodel heet het Stationaire Zoutlekmodel. In deze vorm is het model het meest ingezet.

Door de inzet van o.a. een spoeldebiet door de sluiskolk en een (zoet-)waterscherm aan de zoute kant is de zoutlek (de zoutvracht die overblijft na inzet van de zoutlekbeperkende maatregelen) een functie van het watergebruik: hoe groter het watergebruik hoe lager de zoutlek. In de toepassing van het zoutlekmodel voor o.a. de Volkeraksluizen worden de resultaten van het model daarom vaak grafisch uitgezet: de zoutlek (in kg/s) als functie van het watergebruik (in m³/s).

2.5.2 WANDA-Locks

Het Zoutlekmodel zoals hierboven beschreven was specifiek gebouwd voor het project rond de Volkeraksluizen. Het was mede gebaseerd op enkele aannames die geldig waren voor dat specifieke complex in de situatie waarin de zoutindringing sterk gereduceerd zou zijn door zoutlekbeperkende maatregelen. Om hierin de Krammersluizen te beschrijven, met riolen, bekken en pompen, zou veel extra werk vragen. Dit was een van de redenen dat is besloten te gaan werken aan een 'generiek zoutlekmodel', waarmee uiteenlopende sluizen te beschrijven zouden zijn, en dat ook beschikbaar zou zijn voor andere gebruikers dan alleen Deltares.

Besloten is het zoutlekmodel op te nemen als een speciale applicatie in WANDA, genaamd WANDA-Locks. WANDA is een modelsysteem gebouwd voor het analyseren van leidingsystemen met daarin allerlei reservoirs, kleppen en pompen, routines voor de besturing daarvan en voorzien van allerlei in- en uitvoer functies. WANDA heeft daarnaast het voordeel een 'officieel' modelsysteem te zijn met een goed georganiseerd versiebeheer, handleidingen, ondersteuning van gebruikers etc.. De ontwikkeling van WANDA-Locks is gedocumenteerd in [62].

De meest essentiële aanvulling in WANDA voor deze toepassing was het maken van een module voor het sluishoofd, waarin de kolkuitwisseling plaatsvindt op basis van de *initiële* dichtheden in de kolk en de voorhaven, uitgesplitst naar drie fasen. Daarnaast deden zich vele softwarematige uitdagingen voor in het beschrijven van de dichtheid en het zoutgehalte in een framework dat daar eigenlijk niet helemaal klaar voor was. Uit de aard van het softwaresysteem WANDA, een simulatiepakket voor de dynamische verschijnselen van leidingsystemen, volgt al dat daarin nooit een stationaire versie van het zoutlekmodel is gebouwd. De ontwikkeling van WANDA-Locks is gepaard gegaan met het schrijven van aanvulling op de handleiding van WANDA [63].

Naast het beschrijven van de fysische processen van het zouttransport bleek een grote uitdaging te bestaan in het beschrijven van de operatie: de bediening van de sluis, bestaande uit een serie van handelingen in reactie op schepen die zich melden, waarbij de combinatie

van handelingen afhangt van het getij, die het momentane verval over de sluis bepaalt [64]. De bestaande mogelijkheden binnen WANDA bleken ontoereikend: zowel in gebruiksgemak als in de aard van de besturingslogica. Om het model aan te sturen is een module 'Sluismeester' ontwikkeld en geïmplementeerd [65]. De kern hiervan bestaat uit een 'functioneel diagram' dat de verschillende toestanden beschrijft waarin de sluis zich kan bevinden en de voorwaarden om over te gaan naar een andere toestand, bijvoorbeeld: eerst nivelleren om de waterstand van de kolk gelijk te maken aan die in de voorhaven, dan pas de deur openen, daarna pas uitvaren en daarna pas weer invaren etc.. Iedere stap kost tijd: hetzij vanwege een (hydraulisch) proces van de sluis hetzij vanwege een proces van de schepen.

Er is tijdens de ontwikkeling van WANDA-Locks ook veel aandacht besteed aan de validatie van het model [62], en wel in vier stappen:

- het goed weergeven van de karakteristieken van het schutproces;
- een vergelijking met de uitkomsten van het Zoutlekmodel (de niet-stationaire versie daarvan);
- een vergelijking met de resultaten van metingen op de Stevinsluis, zoals uitgevoerd in het kader van de studie voor de Volkeraksluizen (zie Paragraaf 2.2.1); deze vergelijking richt zich op metingen met een onbeschermd kolk;
- een vergelijking met de resultaten van metingen van de Pilot Krammerjachtensluis, specifiek die metingen met een spoeldebiet door de kolk, eerder uitgewerkt in [23].

2.5.3 Koppelingen tussen WANDA-Locks en omgevingsmodellen

In de toepassing van WANDA-Locks bleek al snel dat er behoefte was aan verbindingen met modellen die de omgeving beschrijven. Het zoutlekmodel was destijds opgezet voor de Volkeraksluizen, gelegen tussen het Hollands Diep en het Volkerak-Zoommeer: twee bassins van dusdanige vorm en omvang dat deze zich, voor het berekenen van de zoutindringing, goed lieten beschrijven met een constant zoutgehalte. Bij de ontwikkeling van WANDA-Locks, ten tijde van het project rond de Krammersluizen, gold in eerste instantie hetzelfde: een constant zoutgehalte op de randen van het model was voldoende om de prestaties van het zout-zoetscheidingsstelsel goed te beschrijven.

Het eerste project op een andersoortige locatie, de Parksluizen, voor Delfland, wierp hier een ander licht op: het zoutgehalte aan de zoete kant van de sluis was niet vast in de tijd maar variabel als gevolg van de afvoer over het kanaal, de schutoperatie en het zoutgehalte op de rivier. Een constant zoutgehalte op de randen van het model is in zo'n geval niet voldoende: er moet aansluiting worden gevonden op een model dat de variaties in de condities dichtbij de sluis kan beschrijven (met name aan de zoete kant), en die 'koppeling' moet in principe twee kanten op kunnen werken: de zoutindringing door de sluis beïnvloed het zoutgehalte aan de zoete kant, en het zoutgehalte aan de zoete kant bepaald mede de grootte van de zoutvracht.

In de loop van de tijd zijn er een aantal projecten uitgevoerd waarin, steeds op een (iets) andere manier, is geprobeerd een koppeling aan te brengen tussen WANDA-Locks voor de processen op de sluis en een Sobek- of Delft3D-model voor het omringende / achterliggende gebied. Het betreft:

- de Krammersluizen in het Landelijk Sobek-model [66];
- de Tsjerk Hiddessluizen te Harlingen, gekoppeld aan een 2DV-model van het Van Harinxmakanaal [51];

- de sluisen te Dintelmond en BenedenSas aan een toekomstig zout Volkerak-Zoommeer, gekoppeld aan een Sobek-model van de Brabantse Rivieren [52];
- de sluisen bij IJmuiden, gekoppeld aan een Delf3D-model van het Noordzeekanaal en het Amsterdam-Rijnkanaal [44].

Deze vier projecten en de keuzes die gemaakt zijn bij het opzetten van een koppeling zijn beschreven in Bijlage A bij dit rapport.

De ervaringen bij de eerste twee projecten worden ook aangehaald in [67], een memo n.a.v. een expertsessie waarin wordt nagedacht over dit soort koppelingen. Een volgende stap in het nadenken over koppelingen is gezet in [68]. Hierin wordt o.a. het begrip 'koppeling' uitgewerkt naar de zeer verschillende vormen waarin deze tot stand kan worden gebracht: van een enkel getal, b.v. een gemiddelde zoutvracht berekend met WANDA-Locks en opgelegd aan een Delft3D-model, tot aan een automatische 'online' twee-weg koppeling waarin beide modellen naast elkaar rekenen en op vaste intervallen getallen aan elkaar doorgeven.

Het globale beeld van alle projecten waarin een koppeling tot stand is gebracht is als volgt samen te vatten:

- alle gevallen waarin gewerkt wordt met een 'off-line' koppeling (de modellen draaien na elkaar, waarbij de uitvoer van het ene model wordt gebruikt als invoer voor het andere model) hebben als nadeel dat de aanpak niet sluitend is in de zoutvracht; er moet geïtereerd worden om dit te bereiken;
- een 'on-line' koppeling, zoals opgebouwd voor IJmuiden, is complex, bewerkelijk en leidt tot zeer aanzienlijke rekentijden;
- bij een koppeling aan een 2DV of 3D model doet zich bovendien de situatie voor dat de beschrijving van de fysica in WANDA-Locks (deze gaat uit van uniforme dichtheden/zoutgehalten in de kolk en voorhavens) niet meer aansluit op de beschrijving van een gelaagde situatie aan weerskanten van de sluis: de schutoperatie wordt in alle details meegenomen, maar de interactie tussen de kolk en de gelaagde voorhaven wordt enig geweld aan gedaan;
- de manier waarop in WANDA-Locks (en daarvoor in het Zoutlekmodel) transporten tussen een voorhaven en het buitengebied worden beschreven behoeft nadere beschouwing.

2.6 Recent en lopend onderzoek

Gedurende lange tijd zijn de grote projecten, met name rond de Volkerak- en de Krammersluizen, de aanjager geweest voor ontwikkeling van de kennis over bellenschermen. Hoewel daarmee veel kennis is gegenereerd, staan er nog veel vragen open. In de TKI-regeling (Topconsortia voor Kennis en Innovatie) is een nieuwe sponsor gevonden voor dit onderzoek, waarin gebruik gemaakt wordt van studenten om met een beperkt budget toch stappen voorwaarts te kunnen zetten. Een beschrijving van de openstaande vragen en het recente en nog uit te voeren onderzoek is opgenomen in Bijlage B.

Het andere grote project inzake zoutindringing is dat rond de Selectieve Onttrekking voor IJmuiden. Dat project loopt nog en zal nog aanleiding geven tot verdere ontwikkeling van kennis en modellen.

2.7 Stand van zaken over de beschikbare kennis

Op basis van al het werk dat in de afgelopen jaren is gedaan is veel kennis vergaard, die voor een deel is ondergebracht in WANDA-Locks. Dit is hieronder bij kort elkaar gezet. Ondanks deze (huidige) inzichten zijn er nog een aantal vragen over hoe het bellenscherm precies werkt, en wat daarmee de optimale configuratie voor een bellenscherm zou zijn, onder meer voor een heel diepe sluis (zie Bijlage B).

Het overzicht hieronder gaat niet in op wat er is geleerd inzake de Selectieve Onttrekking voor IJmuiden. Dat project loopt nog en het is nog te vroeg om zo'n overzicht te schrijven.

2.7.1 Over WANDA-Locks

- In WANDA-Locks hebben we de beschikking over een rekenmodel dat in staat is om de transporten van zout door schutsluizen te beschrijven zoals die optreden gedurende de schutcyclus. Daarbij is het model in staat om ook complexe sluizen, zoals de Krammersluizen met riolen, gemalen en bekkens, te beschrijven, met zowel de hydraulische eigenschappen als de complexe sturing van deze componenten.
- Voor de aansturing van de schutoperatie is een model voor de 'sluismeester' ontwikkeld. Daarmee kan WANDA-Locks worden aangestuurd middels een lijst van schepen (gegroepeerd per schutting) die zich melden bij de sluis. Deze module stuurt het model dan door alle fases en handelingen die nodig zijn om de schepen te laten passeren naar de andere kant van de sluis.
- Het opzetten van een model in WANDA-Locks is niet eenvoudig: er moeten veel relaties tussen componenten worden gespecificeerd voor zowel de hydraulica als de besturing. Voor een eenvoudige sluis kan uitgegaan worden van een standaard schematisatie [70].
- De fysica zoals beschreven in WANDA-Locks is niet anders dan die in het Zoutlekmodel en is gebaseerd op uniforme dichtheden in de voorhavens en de sluisolk. Effecten van gelaagdheid in kolk of voorhavens worden niet beschouwd.
- De formulering van het transport van zout tussen de voorhaven en het buitengebied behoeft nadere beschouwing. Vooral waar meerdere voorhavens worden gedefinieerd kan de formulering leiden tot een ongewenste reductie van het dichtheidsverschil over de sluis zelf.
- WANDA-Locks kan op dit moment niet overweg met een situatie waarin de sluis kan worden opgesplitst in deel-kolken. Het gebruik daarvan betekent dat de schematisatie zou moeten veranderen: de lengte van de kolk verandert en een deel van de kolk hoort soms bij de voorhaven, en soms weer bij de kolk.
- De kolk-uitwisseling treedt op in dezelfde periode dat schepen uit- en invaren. Deze processen zijn gescheiden: het een kan het ander versterken of juist afremmen. Deze interactie is nog niet goed in kaart gebracht en wordt nog niet in WANDA-Locks beschreven.

2.7.2 Over zout-zoetscheiding met o.a. bellenschermen

In de projecten sinds 2010 is er veel geleerd over zoutindringing en hoe die middels bellenschermen en andere zoutlekbepurende maatregelen kan worden beperkt.

- Met een goed bellenscherm kan een doorlaatfractie van ongeveer 0,25 worden gehaald; bij toepassing van zo'n bellenscherm op beide sluishoofden en afhankelijk van o.a. de deur-opentijden kan daarmee de zoutvracht worden beperkt tot 10-15% van dat van een onbeschermd kolk.
- Bij toepassing van een waterscherm naast het bellenscherm aan de zoute kant kan een doorlaatfractie van ongeveer 0,15 worden gehaald; daarmee kan een nog sterkere reductie van de zoutvracht worden bereikt.
- De haalbare beperking van de zoutvracht is sterk afhankelijk van de hoeveelheid water die door en langs de sluizen kan worden afgevoerd, en van het zoutgehalte aan de zoete kant. Bij Krammersluizen was bij een groot afgevoerd debiet zelfs een negatieve zoutvracht mogelijk, aangezien met het water van de zoete kant enigszins zout was (ca. 1 psu). De zoutvracht middels het afgevoerde water kan daardoor groter worden dan de zoutvracht die door het schutbedrijf naar binnen komt.
- Ook is duidelijk geworden dat details van het schutbedrijf van grote invloed zijn op de zoutvracht. Dit betreft primair het aantal schuttingen en de deur-opentijden.
- Ook is duidelijk geworden dat de zoutvracht niet toeneemt met de ladingstroom: een beperkte ladingstroom kan leiden tot relatief veel schuttingen, met een lage bezetting (aantal schepen per schutting), en lange deur-opentijden.

2.7.3 Over de gewenste eigenschappen van bellenschermen

Voor zover nu bekend zijn de essentiële kenmerken van een goed bellenscherm de volgende.

- er is sprake van een uniforme verdeling van het luchtdebiet over de hele breedte van het sluishoofd;
- deze uniforme verdeling is nodig vanaf het eerste moment van opstarten van het bellenscherm om een uniforme waterbeweging op te wekken;
- er is sprake van een stabiel en dicht scherm, zonder 'gaten';
- de belgrootte ligt tussen 3 en 10 mm voor een uniforme stijgsnelheid en daarmee een maximaal effect in het genereren van de gewenste verticale waterbeweging.

3 Verkenning invloed schutoperatie op de zoutvracht

3.1 Inleiding

Zoals al aangegeven in Paragraaf 1.4 is, bij het zoeken naar manieren om de zoutindringing te beperken, de aandacht in eerste instantie vooral gericht geweest op de hydrodynamica van de kolk-uitwisseling. In de projecten rond de Krammersluizen en de Nieuwe Zeesluis IJmuiden is de schutoperatie in detail doorgerekend. Hieruit is gebleken dat de schutoperatie grote invloed heeft op de zoutindringing. De schutoperatie wordt daarbij bepaald door het aantal schutcycli en de tijd dat de deuren open staan.

Deze laatste parameter, de deur-opentijd, bepaalt in welke mate de kolk uitwisselt als gevolg het dichtheidsverschil tussen kolk en voorhaven. Daarbij is van belang dat een beperkte kolk-uitwisseling doorwerkt naar volgende schuttingen: immers als aan een kant de kolk niet volledig is uitgewisseld met de voorhaven is daarna, aan de andere kant, het dichtheidsverschil tussen kolk en voorhaven kleiner dan het verschil tussen beide voorhavens, en dat laat de kolkuitwisseling aan die kant langzamer verlopen. Zo ontstaat een versterkend effect waarbij de kolk qua zoutgehalte gaat variëren rond een waarde tussen dat van beide voorhavens in. Dit kan zo doorgaan totdat de deur aan een kant een keer heel lang open staat en er bij de eerstvolgende schutting dus weer een maximaal verschil ontstaat tussen kolk en voorhaven. Al met al is de deur-opentijd, en de aard van de variaties daarvan, zeer bepalend voor het uiteindelijke transport van zout door de sluis naar binnen.

Deze inzichten zijn aanleiding geweest tot het definiëren van een afstudeeropdracht waarin dit aspect nader is verkend [71]. Met behulp van een (sterk) vereenvoudigde relatie voor de zoutindringing door schutsluizen is daarin vastgesteld dat, in veel gevallen, bij in de praktijk gebruikelijke deur-opentijden, al sprake is van een beperkte kolk-uitwisseling, hetgeen van significante invloed is op de zoutindringing door de sluis. (De onderzochte sluisen zijn allemaal sluisen in Nederland zonder bellenschermen.) Voor het goed kwantificeren van de zoutvracht is het dus van belang om een juiste waarde voor de deur-opentijden te hanteren.

Bij het opzetten van een eenvoudige formulering om die zoutvracht te bepalen, het doel van de huidige studie, is het daarmee ook belangrijk een goed begrip te hebben van hoe de deur-opentijd, naast het aantal schuttingen, van invloed is op de zoutvracht. Dit wordt in dit hoofdstuk uiteengezet.

Hiervoor maken we gebruik van dezelfde formuleringen als gebruikt in [71]. Deze zijn gebaseerd op formuleringen afkomstig uit de studies rondom de Volkeraksluizen, maar met wat aanpassingen om het geldigheidsgebied ervan uit te breiden naar onbeschermde kolken (geen bellenschermen o.i.d.) zodat ook situaties met een (bijna) volledige kolk-uitwisseling kunnen worden beschreven.

In de studies voor de Volkeraksluizen is in hoofdzaak gerekend met het stationaire Zoutlekmiddel, zoals voor dat project ontwikkeld (zie ook Paragraaf 2.5). Dit model is beschreven in Bijlage B van [59]. Als manier om dat stationaire model te controleren is een nog eenvoudiger formulering opgezet, waarin het transport van zout is uitgedrukt in een 3^e-graads polynoom. Dit is beschreven in Bijlage C bij [59]. Om die vereenvoudiging te kunnen bereiken is daarbij o.a. aangenomen dat er geen verval is over de sluis, zodat er ook geen

sprake is van een schutdebiet. Nu geldt voor veel sluzen dat het schutdebiet slechts een beperkte invloed heeft op de totale zoutvracht. (Dit volgt uit het feit dat het schutdebiet bepaald wordt door het verval over de sluis, en de kolkuitwisseling door de waterdiepte boven de drempel. Deze laatste is vaak veel groter, en daarmee is de kolkuitwisseling meestal veruit de grootste post in de totale zoutvracht.) Dit maakt de compacte formulering, de 3^e-graads polynoom, zeer geschikt om een verkenning te doen naar de invloed van verschillende parameters, waaronder de operationele parameters.

3.2 De kolkuitwisseling als functie van de deur-opentijd

De genoemde 3^e-graads polynoom was gericht op situaties waarin de kolk-uitwisseling sterk was gereduceerd door de inzet van o.a. bellenschermen. Dit maakte het mogelijk om de kolk-uitwisseling lineair te veronderstellen met de deur-opentijd. Dit is weergegeven in onderstaande uitdrukking waarbij U de relatieve kolkuitwisseling is: het uitgewisselde volume gedeeld door het kolkvolume.

$$U = \frac{V_U}{V_{Kolk}} = \frac{T_{Open}}{T_{LE}} \quad (0.1)$$

met

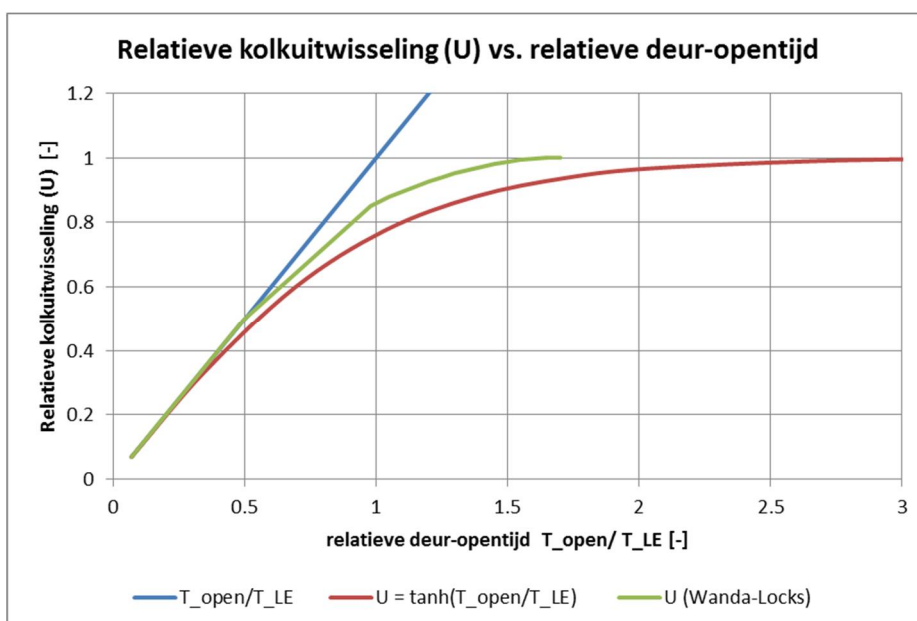
$$T_{LE} = \frac{2L}{c_i} = \frac{2L}{\frac{1}{2}\sqrt{g'H}} = \frac{4L}{\sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} H}} \quad (0.2)$$

De parameter T_{LE} is de theoretische tijd voor een kolk-uitwisseling, gebaseerd op (een benadering voor) de initiële snelheid van de zoute of zoete tong die de sluis inloopt en na reflectie weer terugloopt en zo twee maal de lengte van de kolk aflegt.

We willen nu echter ook kunnen kijken naar situaties waarbij een (bijna) volledige kolkuitwisseling optreedt. De lineaire relatie tussen deur-opentijd en kolkuitwisseling is daarom vervangen door een uitdrukking met een tangens hyperbolicus, zoals voorgesteld in [72] (verwijzend naar [73]), een functie die nadert tot de waarde 1 voor zeer lange deur-opentijden.

$$U = \tanh\left(\frac{T_{Open}}{T_{LE}}\right) \quad (0.3)$$

In de lineaire relatie is U , de relatieve kolkuitwisseling, evenredig met de deur-opentijd T_{Open} , door de tangens hyperbolicus nadert U langzaam naar 1 en kan U niet groter worden dan 1: iets wat uiteraard per definitie niet kan, maar wat niet automatisch wordt verhinderd in de lineaire relatie. Zie de blauwe en de rode curve in onderstaande figuur.



Figuur 3.1 Relatieve kolkuitwisseling vs. relatieve deur-opentijd

In deze figuur is ook een groene lijn getekend: het verloop van de relatieve kolkuitwisseling zoals geïmplementeerd in WANDA-Locks, en eerder gebruikt in het zoutlekmodel. Dit verloop bestaat uit drie fasen, waarvan de eerste twee fasen lineair zijn, namelijk in het gebied waarvoor de relatieve deur-opentijd loopt van 0 tot 0,5 resp. van 0,5 tot 0,85. De hellingen in deze lineaire delen, ontleend aan [61], zijn dus constant. De derde fase is voorgesteld in [59] bij de ontwikkeling van het zoutlekmodel.

Zowel de rode als de groene lijn zijn (mede) gebaseerd op, c.q. gevalideerd aan metingen in de praktijk. Voor de rode lijn is daarvan geen gedetailleerde informatie beschikbaar. Van de groene lijn is validatie o.a. beschreven in [62]. De beschikbare informatie geeft op dit moment geen reden om te stellen dat de ene lijn nauwkeuriger zou zijn dan de andere; dat zou nadere analyse vragen.

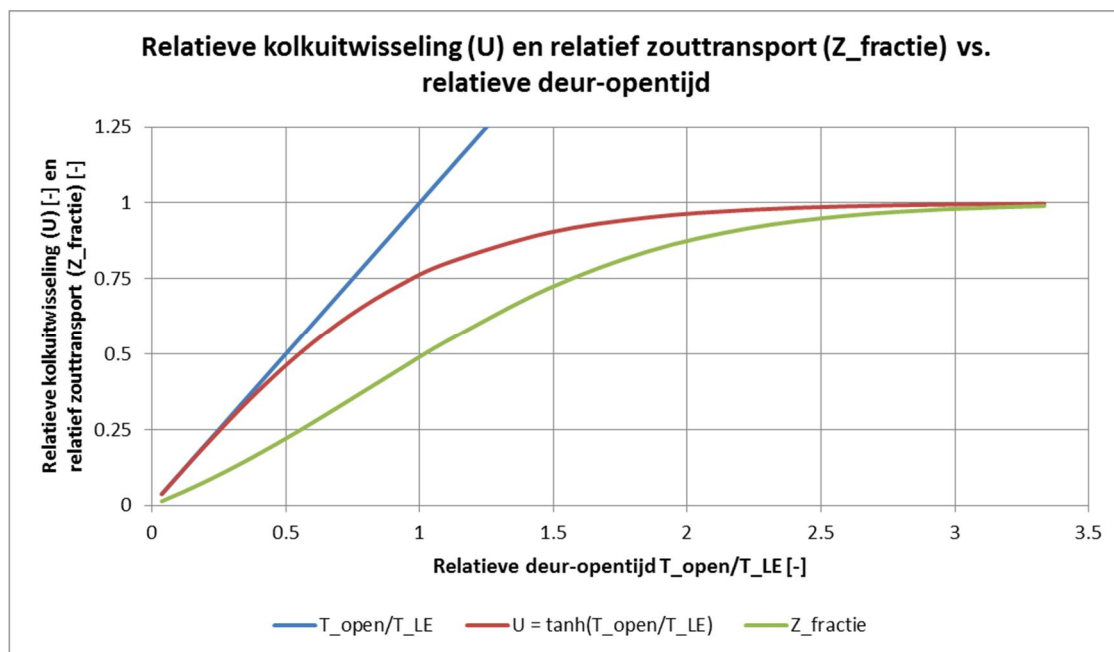
De rode lijn heeft het praktische voordeel dat het hele bereik wordt afgedekt met één continue en relatief eenvoudige functie.

3.3 De zoutvracht over de sluis heen als functie van de deur-opentijd

De relatieve kolkuitwisseling, U , beschrijft de mate waarin de kolk uitwisselt, als functie van de deur-opentijd en de theoretische tijd voor de kolkuitwisseling, T_{LE} . Deze theoretische tijd voor kolkuitwisseling wordt berekend aan de hand van de dichtheden in de kolk en de voorhaven. Maar dat is niet hetzelfde als het verschil in dichtheid over de sluis heen. Bijvoorbeeld: als de kolk aan de zee-zijde door een beperkte deur-opentijd niet volledig uitwisselt, is daarna het verschil in dichtheid aan de meer-zijde tussen kolk en voorhaven dus kleiner dan het dichtheidsverschil over de sluis heen. Het beperkt houden van de deur-opentijd werkt dus door naar volgende schuttingen.

De eerder genoemde 3^e-graads polynoom geeft een beschrijving van de zoutlek door de sluis voor de situatie zonder verval over de sluis, en beschrijft de evenwichtssituatie na een zeer groot aantal schuttingen met steeds dezelfde deur-opentijd (in de behandeling hier wordt die deur-opentijd aan beide sluishoofden gelijk verondersteld). De parameter die wordt berekend

is $Z_{fractie}$: het is een reductiefactor op de zoutvracht zoals die zou volgen uit volledige kolkuitwisseling (aan beide kanten), en die reductie is het gevolg van het beperkt houden van de deur-opentijd. Deze parameter is afgebeeld met de groene lijn in onderstaande figuur.



Figuur 3.2 Relatieve kolkuitwisseling en relatief zouttransport vs. relatieve deur-opentijd

De drie lijnen in de bovenstaande figuur geven een belangrijk signaal af:

- de blauwe lijn zegt dat als de deur-opentijd gelijk is aan T_{LE} , de theoretische tijd voor kolkuitwisseling, dat dan de kolk volledig is uitgewisseld;
- de rode lijn zegt dat de kolk op dat moment nog maar voor ca. 80% is uitgewisseld,
- en de groene lijn zegt dat, *bij een constante reeks van schuttingen*, de zoutvracht over de sluis heen slechts ca. 50% bedraagt van de zoutvracht die je zou uitrekenen op basis van volledige kolkuitwisseling.

In een snelle beschouwing van een bepaalde situatie wordt het verschil tussen de blauwe en de rode lijn nog vrij makkelijk genegeerd: als de deur-opentijd bij de betreffende sluis ongeveer overeenkomt met T_{LE} (gebaseerd op het dichtheidsverschil over de sluis!), wordt al snel uitgegaan van volledige kolkuitwisseling. Echter, de groene lijn laat zien dat we de zoutvracht dan zomaar met een factor 2 overschatten.

De zoutvracht volgens de groene lijn veronderstelt daarbij wel dat het niet voorkomt dat de deuren aan een kant heel lang open staan (bijvoorbeeld in de nacht), waardoor de kolk op dat moment toch volledig uitwisselt. Gebeurt dat wel, dan geldt voor de eerstvolgende schutting de rode kromme en wordt pas na een aantal schuttingen de situatie van de groene kromme bereikt.

Toeval of niet: het komt vrij vaak voor dat de deur-opentijd in de buurt zit van T_{LE} (zeg tussen 0,5 en 2 maal T_{LE}). De deur-opentijd is dus een zeer relevante factor als we een goede schatting willen maken van de zoutvracht over een sluis.

3.4 Het aantal schuttingen per dag

Een andere relevante parameter is het aantal schutcycli per dag. En deze hangt samen met deur-opentijden. Immers: als er, per etmaal, vaker heen en weer wordt geschut, staat de deur per keer korter open. Hier blijken direct twee tegenstrijdige effecten: meer schuttingen leidt (op het eerste gezicht) tot meer zoutindringing, maar kortere deur-opentijden tot minder zoutindringing. Wat mogen we nou verwachten?

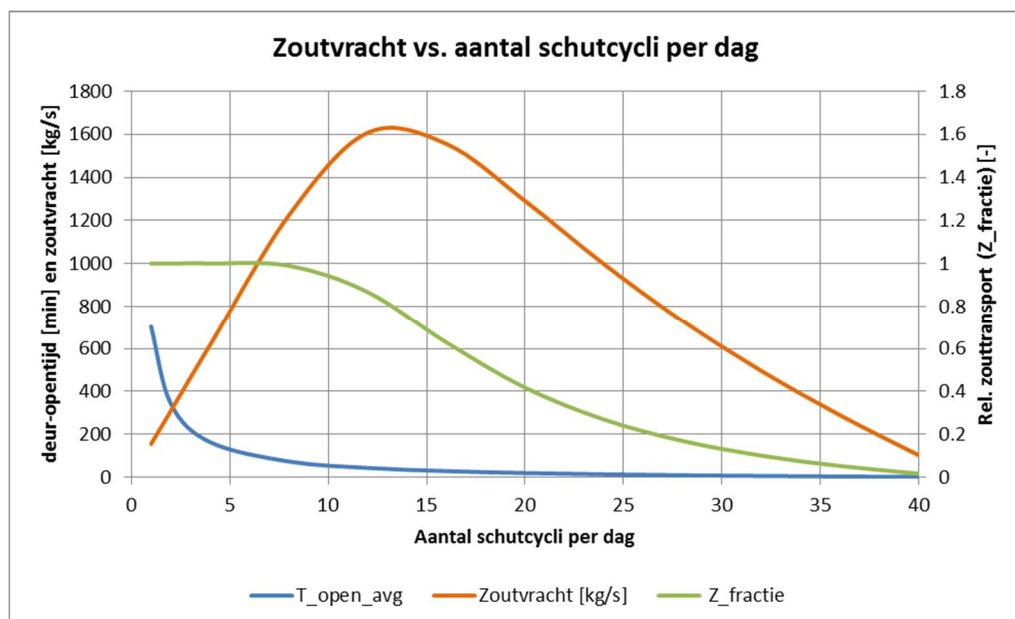
Om dit toe te lichten wordt is een rekenvoorbeeld uitgewerkt, gebaseerd op de Nieuwe Sluis bij IJmuiden. Voor de berekening zijn de volgende waarden aangenomen:

- de sluis is 545 m lang, 70 m breed en de waterstand boven de drempel (aan de binnenkant) is 17,5 m;
- het zoutgehalte aan de zee-zijde wordt gesteld op 27 psu, aan de meer-zijde op 7 psu;
- de sluis wordt 24 uur per dag bediend, de tijd voor het openen of sluiten van de deur bedraagt 7 minuten en het nivelleren bedraagt (gemiddeld) 10 minuten;
- er is sprake van een continue operatie, waarbij de deuren aan beide zijden steeds even lang open staan.

Op basis van het aantal schuttingen per etmaal kan, met de operationele parameters zoals hierboven genoemd, uitgerekend worden hoe lang, gemiddeld, de deur open staat: bereken eerst de gemiddelde tijd voor een complete cyclus (24 uur gedeeld door het aantal schuttingen), daaruit volgt de tijd voor een halve cyclus, en trek daarvan af de tijd voor het bewegen van de deuren en de tijd voor het nivelleren. Blijft over hoe lang de deur open staat. Met deze gegevens kunnen we nu de zoutvracht berekenen als functie van het aantal schuttingen.

De figuur hieronder geeft de uitkomst. In blauw de deur-opentijd, die afneemt met het aantal schuttingen, in groen de parameter $Z_{fractie}$, en in oranje de zoutvracht door de sluis. Aan deze laatste kromme zijn twee aspecten die aandacht verdienen: de vorm van de kromme en de maximale waarde die wordt bereikt.

In de vorm van de kromme zien we terug dat de zoutvracht eerst toeneemt met het aantal schuttingen, maar daarna weer afneemt omdat de deur-opentijd korter wordt. Het aantal schuttingen per dag is dus inderdaad een relevante parameter, maar minder eenduidig dan gedacht.



Figuur 3.3 Gemiddelde deur-opentijd, relatief zouttransport ($Z_{fractie}$) en zoutvracht vs het aantal schutcycli per dag

(Wederom) toevallig of niet: het aantal schutcycli per dag, zoals berekend voor de nieuwe sluis zit dicht bij het maximum van ca. 13 schutcycli per dag [44] (het is ca. 15 bij ingebruikstelling en neemt bij een groter toekomstig verkeersaanbod iets af naar ca. 14; daarover later nog meer). De uitkomst volgens deze benadering zou dus dicht bij de uitkomst moeten zitten van de berekeningen met WANDA-Locks, **maar dat klopt niet**: bij 14 - 15 schutcycli per dag wordt een zoutvracht van ca. 1600 kg/s berekend, maar dat is **veel** groter dan in het project is berekend met WANDA-Locks.

Aan de hand van berekeningen met WANDA-Locks worden in [48], bijlage bij [44], verschillende oorzaken in kaart gebracht. Een ervan is dat in de bovenstaande benadering een gemiddelde waarde van de deur-opentijd wordt gevonden, uitgaande van een evenredige verdeling van de schuttingen over de dag. Daarmee is dit gemiddelde in zekere zin ook een maximale deur-opentijd. In werkelijkheid zijn de schuttingen niet gelijk verdeeld over de dag en is er een relatief groot aantal momenten dat de deur maar heel kort openstaat, namelijk als er alleen een schip hoeft uit te varen, waarna de sluis (leeg) weer naar de andere kant gaat. Zo'n korte deur-opentijd, en de beperkte kolk-uitwisseling in die periode, leidt tot een tragere kolkuitwisseling in de daaropvolgende schuttingen, waardoor de zoutvracht afneemt.

Geconcludeerd moet worden dat, voor het berekenen van de juiste zoutvracht, de operatie nog niet goed genoeg wordt beschreven met het aantal schuttingen en een daaruit af te leiden *gemiddelde* deur-opentijd. Er zal nog een stap gezet moeten worden om te komen van de *gemiddelde* deur-opentijd naar een *representatieve* deur-opentijd. Het bovenstaande voorbeeld geeft aan dat de *representatieve* deur-opentijd korter zal zijn dan de *gemiddelde* deur-opentijd. Hoe groot de toe te passen reductiefactor moet zijn, waar die van afhankelijk is, en hoe deze uit b.v. registraties is te bepalen is, zal nog moeten worden onderzocht als onderdeel van de verdere ontwikkeling van de formulering richting toepassing.

Een ander aspect dat naar voren kwam vanuit het gebruikte voorbeeld, is dat het aantal schuttingen niet lijkt toe te nemen met de ladingstroom. In het geval van IJmuiden is die relatie onderzocht met simulaties van de verkeersafwikkeling zoals gebruikt in capaciteitsstudies. Daar blijkt dat met de toename van de ladingsstroom bijvoorbeeld wel de

wachttijd toeneemt. Voor een situatie waarin het aantal schutcyli niet bekend is (bijvoorbeeld voor een toekomst-scenario) kan er behoefte ontstaan aan inzicht in de relatie tussen ladingstroom, scheepsafmetingen, sluisafmetingen en operatie. Dit valt buiten het kader van het huidige project.

3.5 Conclusies

Uit bovenstaande analyse zijn de volgende conclusies te trekken:

- 1 bij een regelmatige serie van schuttingen met een deur-opentijd gelijk aan de theoretische tijd voor een volledige kolkuitwisseling, T_{LE} , wordt de zoutvracht slechts de helft van de waarde die zou volgen uit volledige kolk-uitwisseling;
- 2 om deze reductie te bereiken is daarbij wel van belang dat voorkomen wordt dat, b.v. 's nachts, de deuren aan een kant heel lang open staan;
- 3 de zoutvracht varieert sterk met de aangenomen deur-opentijd; daar moet dus een goede waarde voor worden bepaald;
- 4 op basis van het aantal schuttingen per dag kan berekend worden wat de bijbehorende *gemiddelde* deur-opentijd is; bij een groter aantal schuttingen per dag zal de gemiddelde deur-opentijden afnemen; dit leidt ertoe dat de zoutvracht door een sluis eerst toeneemt met het aantal schuttingen, maar later weer afneemt door een beperkte kolk-uitwisseling;
- 5 echter, als we de zoutvracht uitrekenen op basis van de gemiddelde deur-opentijden dan wordt de zoutvracht overschat; er is daarom behoefte aan het bepalen van een *representatieve* deur-opentijd;
- 6 om uiteindelijk, met een gebiedsmodel met daarin opgenomen een formulering voor de zoutvracht, een uitspraak te doen over de effecten van een toenemende ladingstroom op de zoutindringing door een schutsluis is er behoefte aan een relatie tussen de ladingstroom en het aantal schuttingen en de deur-opentijden.

4 Formulering voor zoutindringing door schutsluizen: de zeesluisformulering

4.1 Algemeen

Zoals geformuleerd in Hoofdstuk 1.3 is het doel van het project om de nodige stappen te zetten om te gaan voorzien in een eenvoudige en tegelijkertijd betrouwbare beschrijving van zoutindringing door kunstwerken (waaronder schutsluizen) op te nemen in watersysteemmodellen, zodat het mogelijk wordt om scenarioberekeningen te doen. De formulering moet de zoutvracht uitrekenen op basis van de randvoorwaarden aan beide kanten van de sluis (waterstand en zoutgehalte), de afmetingen van de sluis en de operatie (aantal schuttingen en deur-opentijden).

Ten behoeve van de eenvoud in het spreken over deze formulering wordt een naam voorgesteld: de zeesluisformulering.

Gegeven de beoogde toepassing, het uitvoeren van scenarioberekeningen, is de belangstelling gericht op de effect van de zoutindringing door de sluis gemiddeld over langere tijd en op enige afstand van de sluis. Vooruitlopend op een nadere beschouwing hiervan in dit hoofdstuk is leidt dit tot een essentieel verschil tussen de op te bouwen zeesluisformulering en WANDA-Locks, namelijk:

- WANDA-Locks beschouwt elke individuele schutting en beschrijft de processen die optreden gedurende de te onderscheiden *delen* van elke schutcyclus;
- de zeesluisformulering kijkt naar tijd-gemiddelde waarden: de bijdragen van de verschillende onderdelen van de schutcyclus worden bij elkaar opgeteld en vervolgens uitgedrukt in tijdgemiddelde waarden, *gemiddeld over de hele schutcyclus*.

De zeesluisformulering is gebaseerd op (praktisch) dezelfde beschrijving van de hydrodynamica, met dezelfde mogelijkheden (o.a. variatie in waterstanden door het getij) en dezelfde beperkingen (geen gelaagdheid, maar alleen dieptegemiddelde saliniteiten, dichtheden en transporten). Daarin zijn ze 'uitwisselbaar'. De zeesluisformulering is daarbij eenvoudiger in de omschrijving van de operatie: het neemt genoegen met de aanduiding van een *representatieve* operatie (evt. variabel over de dag / week / seizoen). Daardoor is het in staat om te rekenen met grotere tijdstappen.

WANDA-Locks blijft van waarde als het nodig is om effecten te beschrijven die zich voordoen binnen een schutcyclus, bijvoorbeeld translatiegolven door het nivelleerdebiet of een zoute golf die naar binnen loopt na het opengaan van een sluisdeur aan de zoete zijde. Daarnaast kan WANDA-Locks nodig zijn om voor een specifieke sluis het effect van de operatie te analyseren om te komen tot een goede vaststelling van wat (voor de zoutindringing) de representatieve operatie is.

4.2 Wensen vanuit de beoogde toepassing

Om concreet te worden in de wensen vanuit de toepassing, moeten we concreter worden over de aard van de berekeningen die we met de te ontwikkelen formulering, het

zeesluismodel, in te bouwen in een watersysteemmodel of gebiedsmodel, willen kunnen uitvoeren. De doelstelling van het project zoals verwoord in het Plan van Aanpak spreekt hierbij over 'scenario-berekeningen'. Dit begrip wordt hieronder nader uitgewerkt.

4.2.1 Doorrekenen van scenario's en maatregelen

Wat we voor ogen hebben is het kunnen uitvoeren van berekeningen over een groot gebied (tot aan het hele Nederlandse Hoofdwatersysteem) en over een lange tijd (een of meerdere jaren). De berekeningen zouden daarbij nog een acceptabele rekentijd moeten hebben om verschillende scenario's door te rekenen en verschillende (pakketten van) maatregelen te toetsen op hun effectiviteit.

Een scenario betreft een ontwikkeling van buiten het beschouwde watersysteem, zoals klimaatverandering, verandering in watergebruik of, voor schutsluizen, een verandering in het aantal schepen dat bepaalde sluizen moet kunnen passeren. Maatregelen hebben betrekking op wijzigingen in het watersysteem, waaronder aanpassingen aan kunstwerken, en in dit geval zouden dat ook maatregelen ter beperking van de zoutindringing kunnen zijn, zoals het toepassen van bellenschermen.

N.B.: Voor een beschouwing van economische scenario's is er behoefte aan inzicht in de relatie tussen een toename in de ladingsstroom en het aantal schuttingen en de deur-overtijden: dat deze relatie niet een-op-een is werd duidelijk in het project inzake IJmuiden. Het ontwikkelen van een dergelijke relatie valt buiten het bestek van het huidige project, maar is wel nodig om een relatie te kunnen leggen tussen economische ontwikkeling en zoutindringing.

We hebben het hiermee nog steeds over een breed scala van soorten berekeningen, maar we hebben het duidelijk niet meer over effecten die optreden dicht bij de sluis, in directe relatie tot delen van het schutproces (nivelleren apart van kolkuitwisseling). Het gaat over effecten op een grotere afstand gerelateerd aan het schutproces als geheel, gemiddeld over meerdere schuttingen. Dit sluit ook aan op de wens zoals geformuleerd in het Kennisprogramma [1] en zoals uitgewerkt in het Plan van Aanpak [2] om op basis van het model in staat te zijn om eisen aan (de aanpassing van) het kunstwerk te specificeren, om een bepaald doel (een zoutgehalte op een bepaalde locatie) te behalen.

Als, zoals hierboven gesteld, het model niet in staat hoeft te zijn om te kijken naar wat er dichtbij het kunstwerk gebeurt, impliceert dit ook een beperking in het gebruik van het model: een grens aan de toepasbaarheid. Naast het nu te ontwikkelen zeesluismodel blijft er dus ruimte voor een ander model dat in meer detail rekent: een model zoals WANDA-Locks, gecombineerd met een gedetailleerd hydrodynamisch model van de gebied direct rond de sluis.

4.2.2 Beleidsanalyse en operationele modellen

Er zijn ook vragen die zich, ten opzichte van de gedetailleerde modellen zoals hierboven aangeduid, aan het andere extreem bevinden. Voor beleidsanalyse en operationele doelen is er behoefte aan zeer eenvoudige relaties die (bijvoorbeeld) een relatie geven tussen het debiet dat op een kanaal (b.v. het Noordzeekanaal) wordt gezet en het zoutgehalte op een bepaalde locatie langs dat kanaal. Een variant op die vraag zou kunnen zijn wat de invloed is van het beperken van de schut-operatie op datzelfde zoutgehalte langs het kanaal.

Op nationale schaal is dit is het terrein van het Nationaal Watermodel, NWM, voorheen aangeduid als het Deltamodel [74], en het recente model QWAST (Quick Water Allocatie Scan Tool) [75]. In dergelijke modellen worden zeer lange tijdreeksen (tot aan honderd jaar) doorgerekend met een tijdstap van 10 dagen.

Op lokaal operationeel niveau betreft het de ontwikkeling van BOS-systemen (Beslissings Ondersteunend Systeem) voor een aantal locaties in Nederland waar zoutindringing door schutsluizen een rol speelt, te weten het Volkerak-Zoommeer, het Noordzeekanaal - Amsterdam-Rijnkanaal en het Kanaal Gent - Terneuzen. Deze systemen zoeken, op basis van vereenvoudigde relaties, naar een optimale inzet van water om, bij voorbeeld tegen minimale energiekosten (o.a. voor gemalen), te voldoen aan de eisen van waterkwantiteit en -kwaliteit.

Het zeesluismodel dat nu wordt ontwikkeld zou in een deel van deze behoefte kunnen voorzien: het model is beperkt tot de 'bronterm', en zou aangevuld moeten worden met een relatie omtrent de verspreiding van het zout langs het meer of kanaal om de vraag helemaal te beantwoorden. Het is daarbij denkbaar dat de combinatie van het Zeesluismodel en een 1D- of 2DV-schematisatie van het binnenwater (mits beschikbaar en gekalibreerd) wordt gebruikt om de gevraagde relatie te bepalen, die daarna kan worden ingezet voor een nationale beleidsanalyse of voor een operationeel model.

4.2.3 Tijdstap

Tussen de twee extremen zoals hierboven aangeduid (heel gedetailleerde modellering, of toepassing van een eenvoudige relatie) blijft er een breed scala aan toepassingen over. Het zeesluismodel is relevant voor, bijvoorbeeld, een 1D-model van een waterschap, maar ook voor een 3D-model van het IJsselmeergebied. Een typische ondergrens voor de tijdstap die daarbij in beeld komt is in de orde van enkele minuten: een kortere tijdstap staat niet meer in verhouding tot het lage tempo van de verspreiding van zout door een systeem.

De te hanteren tijdstap wordt ook bepaald door de processen die van invloed zijn op de zoutvracht. Twee voorbeelden daarvan:

- 1 Op de eerste plaats varieert de zoutindringing door een schutsluis met de waterstand aan de zee-zijde: rond hoog water is de zoutvracht (naar binnen toe) groter dan rond laagwater. Dit heeft niet alleen te maken met het nivelleerdebiet, maar ook met de grotere waterhoogte boven de drempel, waardoor de kolk-uitwisseling aan de zee-zijde sneller verloopt en de kolk zouter wordt, waardoor ook het zouttransport over het binnenhoofd toeneemt. Als tegelijkertijd het spuien van water van het kanaal naar zee is beperkt tot de periode rond laag water, dan ontstaat er een fluctuatie in de aan- en afvoer van zout die sterk samenhangt met het getij.
- 2 Een tweede voorbeeld is de fluctuatie in het aantal schepen en schuttingen over de tijd. Dit kan betrekking hebben op het verschil tussen dag en nacht, werkdag of weekend, en tussen de winter of de zomer; dat laatste speelt vooral een rol bij de recreatievaart.

Geredeneerd vanuit deze processen zou een bovengrens van de tijdstap in de orde van 30 minuten liggen, aannemende dat dat ook toelaatbaar is in het watersysteemmodel, en het (afhankelijk van de implementatie) niet te zeer afbreuk doet aan de nauwkeurigheid.

Al met al zal de tijdstap waarmee gerekend gaat worden waarschijnlijk liggen tussen enkele minuten en een half uur.

4.3 Beschikbare formuleringen en keuze

In het kader van lopende projecten zijn een paar formuleringen in beeld gekomen die een vergelijkbare doelstelling hebben. Voordat we een nieuwe formulering gaan afleiden is het nuttig om de bruikbaarheid hiervan te bekijken. Het betreft de volgende projecten c.q. formuleringen:

- recent is een nieuwe Delft3D schematisatie gemaakt van het IJsselmeer; de modellering van het IJsselmeergebied [76]; voor de zoutvracht vanaf de schutsluizen in de Afsluitdijk is gebruik gemaakt van een formulering opgenomen in het programma 'BALANS': een programma ter ondersteuning van het opzetten van water- en stoffenbalansen (waaronder een zoutbalans) voor o.a. het IJsselmeergebied [77];
- bij het zoeken naar de achtergronden van de formulering uit het programma 'BALANS' werd een rapport van de Directie Flevoland gevonden [78] waarin ook een formulering voor zouttransport door sluizen is beschreven;
- een formulering opgesteld door Svasek in een studie naar de zoutindringing en verspreiding op het kanaal Gent - Terneuzen [79];
- een formulering volgens Kerstma et.al. [80];
- de formulering van de stationaire versie van het Zoutlekmodel, zoals eerder genoemd in Paragraaf 2.5.1.

Een evaluatie van deze formuleringen is opgenomen in Bijlage C. Hieruit blijkt dat het stationaire zoutlekmodel duidelijk de voorkeur heeft en een goede basis biedt voor het beoogde doel:

- het is een fysisch sluitende formulering, en beschrijft als enige de doorwerking van een gedeeltelijke kolkuitwisseling (afhankelijk van de deur-opentijd) naar de zoutvracht over de sluis;
- de parameters voor zoutlekbeperkende maatregelen (de doorlaatfractie, spoeldebiet etc.) zijn beschikbaar in de formulering, waardoor de inzet van maatregelen met het model beschouwd kunnen worden.

Er zijn ook een paar nadelen aan deze keuze:

- er zijn een aantal aannames zijn gedaan die toelaatbaar zijn voor de Volkeraksluizen in de toekomstige situatie bij een zout Volkerak-Zoommeer; voor een algemene toepasbaarheid zullen aanpassingen moeten worden uitgewerkt;
- de formulering laat zich niet direct uitrekenen: er moet een stelsel van vergelijkingen worden opgelost; dit lijkt echter acceptabel voor een formulering in een hydrodynamisch model.

Ondanks deze nadelen is het stationaire zoutlekmodel gekozen als basis voor de ontwikkeling van de zeesluisformulering.

4.4 Basis opzet formulering zeesluismodel

Hieronder volgt een korte omschrijving van het stationair Zoutlekmodel en hoe dit is gebruikt als basis voor de zeesluisformulering. Een volledige behandeling van de zeesluisformulering (inclusief alle formules) is opgenomen in Bijlage D.

Het stationair zoutlekmodel bestrijkt de sluis en de voorhavens aan beide kanten. De randvoorwaarden worden gevormd door waterstanden en zoutgehaltes buiten de voorhavens. Het model bestaat uit een stelsel van vergelijkingen met een aantal onbekenden. De onbekenden zijn o.a. de zoutgehaltes in de voorhavens en twee waarden voor het zoutgehalte in de kolk, namelijk het zoutgehalte na uitwisseling met de zoute voorhaven (de kolk is dan zouter geworden) en het zoutgehalte na uitwisseling met de zoete voorhaven (de kolk is dan weer zoeter geworden).⁴

Een deel van de vergelijkingen van het Zoutlekmodel beschrijft de zoutflux over een aantal overgangen. Voor het Zoutlekmodel, met voorhavens, zijn dit:

- de zoutflux van het zoute buitengebied naar de zoute voorhaven;
- de zoutflux van de zoute voorhaven naar de kolk;
- de zoutflux van de kolk naar de zoete voorhaven;
- de zoutflux van de zoete voorhaven naar het zoete buitengebied.

In een stationaire toestand moeten al die zoutfluxen aan elkaar gelijk zijn. Deze zoutflux is de belangrijkste onbekende: dit is de zoutvracht of zoutlek die we eigenlijk zoeken.

Voor onze Zeesluisformulering kiezen we de randvoorwaarden direct buiten de kolk: het verschil tussen het zoutgehalte in de voorhaven en een punt verder weg laten we over aan het gebiedsmodel. Hiermee vervallen de voorhavens in onze formulering en reduceren we het aantal vergelijkingen en onbekenden. Dan blijven alleen over de zoutfluxen over beide sluishoofden, die in een stationaire toestand aan elkaar gelijk moet zijn.

Het zoutlekmodel is nu vereenvoudigd: we hebben nog maar drie onbekenden, namelijk de twee waarden die het zoutgehalte in de kolk kan aannemen, en de zoutvracht. We hebben echter nog maar twee vergelijkingen, namelijk de zoutfluxen over beide sluishoofden. Net zoals het zoutlekmodel kunnen we een extra vergelijking opstellen. Kort gezegd stelt deze vergelijking: de zoutflux over een sluishoofd leidt tot, en moet gelijk zijn aan, de verandering van de zoutmassa in de kolk. Daarmee hebben we drie vergelijkingen voor de zoutflux met drie onbekenden. Dit vormt het startpunt voor de ontwikkeling van de Zeesluisformulering.

Er zijn echter twee aspecten aan te wijzen in het stationaire zoutlekmodel dat we graag willen veranderen in de zeesluisformulering.

Destijds gold de aanname dat de kolk-uitwisseling lineair was met de deur-opentijd. Dat was op dat moment toelaatbaar gegeven het feit dat het project, en daarmee het model, gericht was op een situatie van een sterk gereduceerde kolk-uitwisseling door middel van o.a. luchtbellenschermen. Die aanname geeft een grondslag voor deze linearisatie. Het nu op te bouwen model moet gaan gelden voor alle situaties; ook die waarbij een (bijna) volledige kolkuitwisseling optreedt.

Om ook onbeschermd kolken en lange deur-opentijden goed te kunnen beschrijven wordt op het punt van de kolk-uitwisseling een ander uitgangspunt gekozen. De kolkuitwisseling V_{uitw} wordt beschreven met behulp van de uitdrukking voor de relatieve kolkuitwisseling, U , zoals ook gebruikt in Paragraaf 3.2:

⁴ Daarbij is in het zoutlekmodel de kolk nog gesplitst gedacht in twee deelkolken, waarvan (impliciet) is aangenomen dat daarmee getrapt geslut wordt: het niveau verschil tussen de beide voorhavens word overwonnen door in twee stappen te nivelleren, een stap per deelkolk. Dit komt in Nederland praktisch niet voor en dat laten we hier verder buiten beschouwing.

$$V_{uitw} = V_K U = V_K \tanh\left(\frac{T_{Open}}{T_{LE}}\right) \quad (0.4)$$

Door deze vergelijking toe te passen kan het uitgewisselde volume V_{uitw} nooit groter worden dan het kolkvolume V_K .

Deze vergelijking beschrijft echter het volume van de kolkuitwisseling over de periode van de deur-opentijd aan het betreffende sluishoofd, en niet meer de tijd-gemiddelde waarde van het uitwisselingsdebiet zoals gehanteerd in het stationaire zoutlekmodel. In het verlengde hiervan worden ook de andere vergelijkingen voor de zoutflux nu geschreven per schutcyclus (c.q. het relevante deel daarvan) en niet direct in een stationaire waarde. Dat vertaalt zich in vergelijkingen waarin o.a. met volumes wordt gerekend, en niet met debieten.

Een tweede verschil met de formulering voor het stationaire zoutlekmodel is dat daar de invloed van de schuttschijf op het zoutgehalte in de kolk is verwaarloosd. Ook die aanname is begrijpelijk vanuit de context, omdat het verval tussen Hollands Diep en het (weer zoute) Volkerak-Zoommeer vrij constant zou zijn en vrij klein (orde 25 cm). In de huidige opzet willen we die invloed niet verwaarlozen. Daarom brengen we in rekening dat het zoutgehalte in de kolk verandert door de instromende schuttschijf, en ook dat moet worden bepaald als onderdeel van de oplossing.

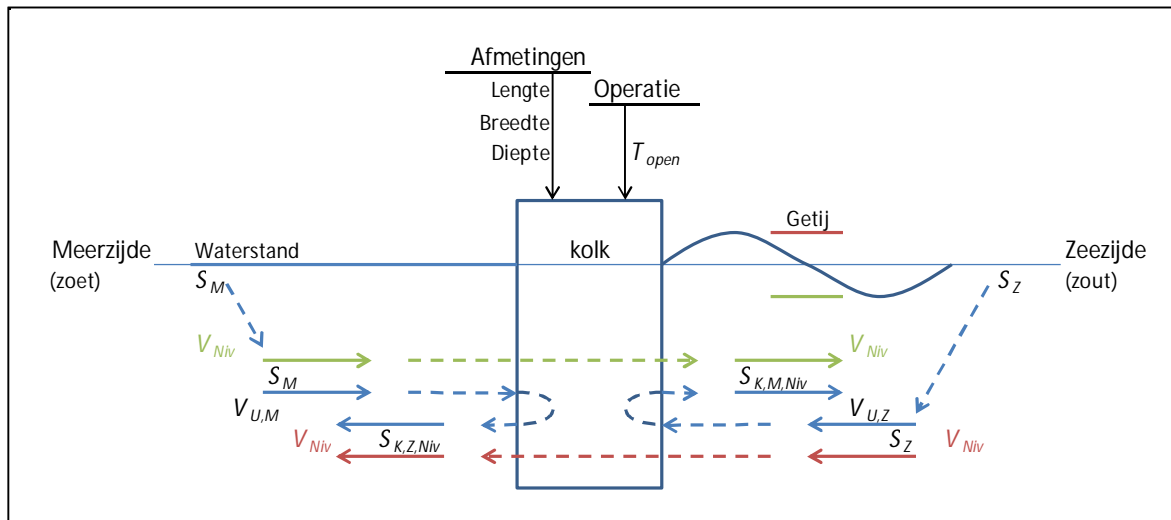
Ook dit leidt tot extra onbekenden en extra vergelijkingen. De extra vergelijkingen voor het nivelleren bevatten echter, naast de op te lossen zoutgehaltenes in de kolk, alleen bekende grootheden, zoals de zoutgehaltenes buiten de kolk, de afmetingen van de kolk en de waterstanden aan beide kanten. Daarmee is het stelsel nog steeds oplosbaar (in een volgende fase zal hiervoor een geschikte numerieke methode moeten worden gekozen).

Deze twee aanpassingen (niet-lineair verloop kolkuitwisseling en meenemen invloed nivelleren op zoutgehalte in de kolk) geven aanleiding om de achtereenvolgende processen per fase van de schutcyclus steeds te beschrijven in termen van het transport van water en zout: steeds een verplaatst volume met een zoutgehalte. De vergelijkingen zijn in Bijlage D uitgewerkt voor alle schutfasen van de cyclus, zowel voor een situatie van 'hoogwater' (de waterstand aan de zoute kant is hoger dan aan de zoete kant) als een situatie van 'laagwater' (de waterstand aan de zoute kant is lager dan aan de zoete kant).

De getransporteerde volumes met hun zoutgehalte zijn weergegeven in Figuur 4.1. Daarin zijn de volgende elementen te zien:

- De waterstand aan de zee-zijde varieert met het getij, en daarmee varieert de richting van de verplaatsing van het nivelleervolume, de schuttschijf, V_{Niv} : rond hoogwater zijn de rode pijlen van toepassing, rond laag water de groene pijlen.
- de zoutgehaltenes aan de buitenkant zijn S_M en S_Z ; de zoutgehaltenes van uit de kolk zijn $S_{K,Z,Niv}$ en $S_{K,M,Niv}$: zoutgehalte in de Kolk, nadat deze heeft opengestaan naar de Zeezijde of de Meerzijde en na Nivelleren.

De vergelijkingen per fase beschrijven een gesloten cyclus. Onder de aanname dat dit stelsel een evenwichtstoestand beschrijft, geldt dat de beginconditie in de kolk (het zoutgehalte aan het begin van de cyclus) gelijk moet zijn aan de conditie aan het eind van de cyclus. Hierdoor ontstaat een stelsel van vergelijkingen dat kan worden opgelost, bijvoorbeeld iteratief, door de cyclus een aantal malen door te rekenen tot het evenwicht is bereikt.



Figuur 4.1 Schematische weergave getransporteerde volumes en zoutgehaltes

Tenslotte moeten de berekende transporten worden uitgedrukt in tijdgemiddelde waarden. Dit is te doen door de transporten te delen door de tijdsduur van een schutcyclus. En deze volgt eenvoudig uit het aantal schuttingen per etmaal gedeeld door het aantal seconden per etmaal. Daarmee is er, vanuit de benadering per schutfase, dus een eenvoudige weg terug naar tijdgemiddelde waarden, gemiddeld over de schutcyclus die een evenwichtstoestand heeft bereikt, passend bij de randvoorwaarden.

N.B.: Merk op dat er gewerkt moet worden met het aantal schutcycli per etmaal: het aantal keren dat de hele cyclus wordt afgewerkt met zowel een afwaartse (naar zee toe) als een opwaartse (naar rivier, kanaal of meer toe) schutting. In registraties kunnen alle afzonderlijke schutting worden geteld, dus per richting, en soms worden lege schuttingen (zonder een schip in de kolk) niet geteld. Hier zit dus een aandachtspunt bij het interpreteren en gebruiken van beschikbare registraties.

De uitvoer van de zeeluisformulering bestaat dus uiteindelijk uit debieten die de kolk in- en uitgaan en de zoutgehaltes in die debieten. De zoutgehaltes die de kolk ingaan worden aangeleverd door het gebiedsmodel; de zoutgehaltes die de kolk uitgaan worden berekend. In bovenstaande figuur zijn de belangrijkste componenten daarin weergegeven: die ten gevolge van het nivelleren en het uitwisselen. Daarnaast zijn er debieten die samenhangen met het spoelen van de kolk, de inzet van een waterscherm en debieten die samenhangen met het in- en uitvaren van schepen. Deze worden allemaal beschreven in Bijlage D.

5 Voorbereiding van de implementatie

5.1 Algemeen

Het ontwikkelen van een nieuw stuk software, in dit geval een formulering voor de zoutindringing door schutsluizen, doorloopt een aantal stappen. De eerste stap is het beschrijven van de fysica in een stelsel van vergelijkingen. Dat is beschreven in dit rapport, specifiek in Bijlage D.

Volgende stappen zullen in een vervolg moeten worden uitgevoerd. Dit betreft o.a. de numerieke implementatie (hoe worden de vergelijkingen opgelost, met welke numerieke methoden) en daarna moet het worden ingebracht in de (bestaande, zich ontwikkelende) software van D-FLOW FM. Daarbij gaat het o.a. over hoe de interactie is met de rest van het model en hoe in- en uitvoer worden afgehandeld. Deze twee stappen maken geen deel uit van dit rapport.

Naast de inbedding van de software in D-FLOW FM is er ook behoefte aan een zelfstandige rekentool ('stand alone'), o.a. in het kader van het toetsen van de formulering en het verkennen van de representatieve deur-opentijden. In dit hoofdstuk wordt echter met name ingegaan op de eerste categorie: de inbedding in D-FLOW FM.

5.2 Algemene opzet voor de beschrijving van kunstwerken in D-Flow FM

In de huidige hydrodynamische software van Deltares is met name D-Flow 1D, als onderdeel van de SOBEK3 Suite, voorzien van opties voor het beschrijven van diverse kunstwerken. Deze opties zijn ruwweg in te delen in diverse constructies die water vasthouden of doorlaten (stuwten, spuisluizen, sifons etc.) en pompen. De kern van alle beschrijvingen is een set aan afvoerformules die een relatie leggen tussen waterstanden en afvoer. Voor de constructies wordt deze relatie onder meer bepaald door de geometrie van de constructie met overgangen in breedte en diepte, inclusief het effect van beweegbare schuiven e.d.. Voor de pompen kan een vast of verval-afhankelijk debiet worden gespecificeerd.

De aansturing van deze kunstwerken (b.v. de hoogte van een schuif in een spuisluis) wordt verzorgd middels de module D-RTC, waarbij RTC staat voor Real Time Control. (Let wel: hiervoor is alleen de FeedBackControl-loop van RTC-Tools nodig; RTC-tools richt zich met name op *optimalisatie* van de aansturing van verschillende kunstwerken om bepaalde doelen in operationeel beheer te bereiken.)

Het is de bedoeling dat in de volgende generatie software, D-Flow FM, wordt voortgebouwd op deze basis: dat er een module komt waarin, door het kiezen van de juiste parameters, een breed palet aan kunstwerken kan worden gedefinieerd. Op dit moment is nog niet vastgelegd hoe dit precies zal worden opgezet en hoe de 1D-relaties zoals nu gebruikt in D-Flow 1D zullen worden uitgebreid naar 2D en 3D. Voor de aansturing van de kunstwerken in D-Flow FM wordt alleen de FeedBackControl-loop van D-RTC gebruikt. Dit onderdeel zal universeel zijn voor zowel de 1D, 2D en 3D toepassingen.

De uitbreiding van de huidige 1D-formuleringen naar 2D (meer specifiek: 2DH) zal in beginsel neerkomen op het beschrijven van relaties tussen aangrenzende rekencellen aan weerszijden van de constructie; het kunstwerk blijft daarin een sub-grid element. Daarbij zal bekeken moeten worden hoe om te gaan met versnelling en vertraging van de stroming en de daarmee gepaard gaande stromingsverliezen die worden gekwantificeerd in coëfficiënten van de sub-gridformulering: effecten in de breedte-richting maakten in eerste instantie deel uit van de in 1D gebruikte (sub-grid) formuleringen en coëfficiënten, maar zullen in 2D voor een deel opgelost worden op het rekenrooster boven- en benedenstrooms van het kunstwerk. Voor zover het rooster deze verliezen niet oplost zal dit onderdeel moeten blijven van de sub-gridformulering. Dat geldt in elk geval voor effecten (in- en uitstroomverliezen) in verticale richting, want deze richting wordt in een 2DH-model niet beschreven.

Bij de uitbreiding naar 3D gaat het in beginsel over het beschrijven van de verschillen in (o.a.) saliniteit, temperatuur en dichtheid over de verticaal. Dat moet in rekening worden gebracht bij het bepalen van het debiet, van de saliniteit, temperatuur en dichtheid van dat debiet, en van de effecten van dat debiet op het gebied benedenstrooms. Bovenstrooms kunnen aspecten van selectieve onttrekking een rol spelen, en benedenstrooms aspecten van turbulentie en menging. De grens tussen, enerzijds, de sub-gridformulering voor het kunstwerk en, anderzijds, de beschrijving van processen op het rekenrooster aan weerszijden van het kunstwerk wordt daarmee dus (weer) anders van karakter dan bij 1D en 2D. In 3D-modellen zal mogelijk de neiging bestaan het kunstwerk helemaal op het rekenrooster te beschrijven, of te veronderstellen dat het 3D-model dat kan, maar dat is niet voor alle typen kunstwerken mogelijk, en misschien niet altijd wenselijk vanwege de resolutie en de tijdstap die daarbij nodig is.

Concluderend: zowel in 2D als in 3D ontstaat er een relatie tussen de waarde van de te gebruiken coëfficiënten in de subgrid-formulering en de resolutie (horizontaal en evt. verticaal) van het rekenrooster. Dit zou kunnen leiden tot eisen aan de resolutie van het rekenmodel. Anderzijds kan per model (gebiedsschematisatie) de juiste waarde van de coëfficiënten worden bepaald door kalibratie.

5.3 Zoutindringing door kunstwerken binnen deze opzet

Bij zoutindringing door kunstwerken, in het bijzonder schutsluizen, speelt een bijzonder fenomeen, namelijk het fenomeen van uitwisselingsstroming aangedreven door een verschil in dichtheid: door een opening van een kunstwerk kan op hetzelfde moment in twee richtingen een debiet lopen. Bij een schutsluis is dit de kolk-uitwisseling waarbij netto (praktisch) geen volume, maar wel zout wordt getransporteerd. In een 3D-model kunnen beide componenten van deze uitwisseling worden beschreven, maar in een dieptegemiddeld model (1D of 2DH) ligt dit minder voor de hand. Daar zou volstaan kunnen worden met het beschrijven van het transport van zout als droge stof.

Hetzelfde fenomeen speelt bij spuisluizen als, bijvoorbeeld ten behoeve van de visintrek, rond kentering de schuiven enige tijd (gedeeltelijk) open staan: de overgang van uitstromend naar instromend (of andersom) gaat via een fase van in- en uitstroming op hetzelfde moment.

In beide gevallen geldt dat, ten behoeve van een eenvoudige formulering voor een dieptegemiddeld model, het transport van debiet en zout niet zomaar kan worden gecombineerd tot een enkel debiet met een bepaald zoutgehalte. Sterker nog: de richting van het transport van zout kan omgekeerd zijn aan de richting van het totale debiet van het water.

Daarmee vormen kunstwerken op de grens van zout(-er) en zoet(-er) water een aparte categorie: de te hanteren beschrijving van dat kunstwerk moet meer kunnen dan het doorvoeren van water met een bepaalde saliniteit, temperatuur en dichtheid, namelijk:

- ofwel: twee debieten tegelijkertijd kunnen doorlaten, elk met hun eigen aparte (bovenstroomse) saliniteit, temperatuur en dichtheid;
- danwel: transport van zout in droge stof kunnen beschrijven, zowel toevoegend als onttrekkend.

Voor de te ontwikkelen formulering van het zeesluismodel en de relatie ervan met een gebiedsmodel sluit de beschrijving in de vorm van de twee aparte debieten goed aan op een 3D-model: deze twee debieten kunnen verdeeld over de verticaal worden opgelegd op de rand van het betreffende (deel-)domein. Voor de 'stand alone'-versie is juist uitvoer in droge stof wenselijk. Voor de aansluiting aan een dieptegemiddeld model kunnen beide benaderingen worden gekozen: om zoveel mogelijk generiek te zijn over 1D, 2D en 3D ligt het dan voor de hand om bij de implementatie t.z.t. ervoor te kiezen om ook voor 1D en 2D uit te gaan van het beschrijven van de zoutvracht in debieten.

Om zoveel mogelijk generiek te zijn wordt er vooralsnog voor gekozen om het zeesluismodel uitvoer in beide vormen te laten produceren. (Merk op dat alle parameters zijn opgenomen in de formulering zoals behandeld in Paragraaf 4.4 en dus beschikbaar zijn).

N.B.: Ook de selectieve onttrekking zoals te bouwen in IJmuiden zou op elk van beide manieren te beschrijven zijn. Deze selectieve onttrekking probeert het diepste ofwel het meest zoute water te onttrekken aan het Noordzeekanaal. Het zoutgehalte van het afgevoerde water is dus hoger dan het dieptegemiddelde zoutgehalte. Dit hogere zouttransport kan worden beschreven middels een extra onttrekking in droge stof (bovenop de onttrekking met het dieptegemiddelde zoutgehalte), danwel met een hoger onttrokken debiet in combinatie met een retour debiet van zoet water. De kant van de lozing, de zeezijde, kan daarbij worden beschreven als een enkelvoudig debiet met het hogere zoutgehalte. Dit geeft aan dat een eventuele keuze voor een van beide opties in de implementatie geen consequenties heeft voor een implementatie voor spuisluizen.

5.4 Vergelijking zeesluismodel met eerdere koppelingen met WANDA-Locks

In Hoofdstuk 2 zijn een aantal eerdere koppelingen of pogingen daartoe beschreven, in Hoofdstuk 4 is afgeleid hoe de formulering van het zeesluismodel is opgebouwd en in de paragrafen hierboven is aangegeven hoe het zeesluismodel deel zou moeten gaan uitmaken van de nieuwe opzet van de (generieke) beschrijving van kunstwerken in DF-Flow FM.

Op basis hiervan is in onderstaand overzicht de nieuwe aanpak gekarakteriseerd en vergeleken met de koppelingen zoals in het verleden tot stand gebracht.

	Nieuw: Zeesluismodel	oud: koppelingen met WANDA-Locks
1	het is een berekening van een evenwichtssituatie, zoals die ontstaat na een reeks van schuttingen bij dezelfde hydraulische en operationele randvoorwaarden: de berekende debieten, zoutgehalten en de resulterende zoutvracht zijn gemiddeld over de schutcyclus in de evenwichtssituatie;	de berekening loopt door alle afzonderlijke fasen van het schutproces heen;
2	translatiegolven die te maken hebben met het nivelleren, of het pulserende karakter van de zoutvracht door kolk-uitwisseling worden niet beschreven;	translatiegolven en pulserende zoutvracht worden wel berekend;
3	de sluis kolk is een sub-grid-element; alles buiten de sluis kolk is beschreven in het gebiedsmodel;	de sluis kolk zit in WANDA-Locks, en soms ook de voorhavens of een deel daarvan; afhankelijk van de aard van de koppeling is er sprake van een overlap tussen het modelgebied van WANDA-Locks en het gebiedsmodel;
4	de aanpak is sluitend in de zoutvracht: dat wat wordt berekend aan zoutvracht wordt ook opgelegd	de aanpak is meestal niet sluitend geweest; het sluitend maken vergde veel (ad-hoc) inspanning en extra rekentijd;
5	de te gebruiken tijdstap wordt begrensd door o.a. de roosterafmetingen in het gebiedsmodel; een voor SOBEK typische tijdstap van 10 minuten is geen probleem;	de tijdstap moet kort genoeg zijn om delen van schutcyclus te beschrijven, orde 0,5 - 1 minuut
6	daarnaast wordt de tijdstap uiteraard begrensd door processen waarvan de gebruiker wil dat de invloed ervan moet worden meegenomen, b.v. de variatie in waterstand door het getij of fluctuaties in de operatie;	de tijdstap is al kort om de schutoperatie te kunnen beschrijven
7	tenslotte wordt de tijdstap begrensd door de gewenste nauwkeurigheid	de modellen (WANDA-Locks en het gebiedsmodel) hadden ieder hun eigen, veelal kleine tijdstap

5.5 Overzicht van het zeesluismodel

Op basis van Hoofdstuk 4 en Bijlage D is hieronder aangegeven welke parameters een rol spelen in de formulering. Hierbij is gebruik gemaakt van suffix 'Z' voor de zeezijde en 'M' voor de meerzijde. Deze lijst van parameters zal worden aangevuld met parameters die de passerende scheepvaart beschrijft en met parameters die verband houden met zoutlekbepurende maatregelen, waaronder bellenschermen.

Invoer voor de formulering:

- Afmetingen van de kolk:
 - lengte en breedte van de sluis en niveau van de drempels aan beide zijden;

- Operatie van de sluis:
 - het aantal schutcycli per etmaal, N
 - de (representatieve) deur-opentijd T_{Open} ; eventueel apart voor de zee- en de meerzijde; deze zouden ook kunnen worden uitgedrukt in de gemiddelde deur-opentijd en een correctie- of kalibratiefactor;
- Randvoorwaarden: uit het gebiedsmodel, of eventueel aan een kant gespecificeerd door de gebruiker:
 - saliniteit, dichtheid en waterstand aan beide kanten van de kolk;

Uitvoer uit de formulering, door oplossen stelsel van vergelijkingen:

- massaflux over de sluis, per schutcyclus,
 - $M_Z = M_M$,
- de uitgewisselde volumes over de sluis per schutcyclus, per kant van de sluis:
 - $V_{U,Z}$, $V_{U,M}$
- de saliniteiten die optreden in de kolk (toe te kennen aan de juiste debieten):
 - $S_{K,Z,Niv}$ en $S_{K,M,Niv}$

Verdere uitvoer o.b.v. bovenstaande:

- massaflux over de sluis,
 - $M_Z = M_M$ om te rekenen naar een cyclusgemiddelde waarde in [kg/s]
- het nivelleerdebiet over de sluis:
 - V_{niv} , om te rekenen naar stationair: Q_{niv}
- de uitwisselingsdebieten over de sluis:
 - $V_{U,Z}$, $V_{U,M}$, om te rekenen naar $Q_{U,Z}$ en $Q_{U,M}$

Een deel van de berekende parameters moet vervolgens worden doorgegeven aan het gebiedsmodel: dit zijn debieten in combinatie met zoutgehalten zoals weergegeven in .

Op basis van de bevindingen tot nu toe zijn er geen redenen om problemen te verwachten wat betreft de implementatie of numerieke stabiliteit.

5.6 Aandachtspunten

Bij de verdere uitwerking moet rekening gehouden met de volgende aandachtspunten, zoals naar voren kwam bij eerdere koppelingen:

- de eenheden van saliniteit, debiet, etc.;
- omrekening van saliniteit naar dichtheid (UNESCO of Eckhardt);
- welke richting is positief;
- massa-behoud van water en zout.

Verder zal bij de implementatie een keuze gemaakt worden voor de numerieke methode voor het oplossen van het stelsel van vergelijking o.b.v. overwegingen van rekentijd en nauwkeurigheid.

6 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

- 1 Er is sinds 2010 een groot aantal projecten uitgevoerd, waarbij de kennis over zoutindringing en zout-zoetscheiding bij schutsluizen steeds verder is gegroeid.
- 2 Het zoutlekmodel zoals oorspronkelijk ontwikkeld voor de studies rond de Volkerak-sluizen is ondergebracht in WANDA, het 1D-modelsysteem van Deltares voor gesloten leidingsystemen, als WANDA-Locks. Hiermee kreeg het model de beschikking over o.a. een user-interface en postprocessing en is er sprake van versiebeheer, ondersteuning etc.
- 3 Aan het eind van Hoofdstuk 2 is een overzicht gegeven van de stand van zaken, zowel wat betreft de kennis opgedaan in de verschillende projecten als wat betreft WANDA-Locks.
- 4 De operatie, en dan met name de deur-opentijden, blijken van grote invloed op de zoutvracht die door een sluis wordt getransporteerd. Een gedeeltelijke kolk-uitwisseling werkt door naar volgende schuttingen en kan leiden tot een sterke reductie van het zouttransport.
- 5 Om de juiste zoutvracht te berekenen is het daarom ook van belang om de *juiste* deur-opentijden te hanteren, aan te duiden als de representatieve deur-opentijden. De gemiddelde deur-opentijd, te bepalen door het aantal schuttingen per dag gelijk te verdelen over de tijd dat de sluis in bedrijf is, kan leiden tot een grote overschatting van de zoutvracht.
- 6 De beoogde toepassingen zijn o.a. het doorrekenen van toekomst scenario's (waaronder zeespiegelstijging) of van maatregelen: op de sluis of elders in het watersysteem. Daarnaast zijn er behoeften vanuit operationele modellen. Deze toepassingen leiden tot een typische tijdstap voor de berekening van enkele minuten tot een half uur.
- 7 Het stationaire zoutlekmodel, zoals ontwikkeld voor de studies rond de Volkerak-sluizen, blijkt een goede basis te vormen voor de ontwikkeling van een formulering. Als enige van de onderzochte formuleringen, wordt daarin uitgerekend hoe een beperkte kolk-uitwisseling, die het gevolg is van beperkte deur-opentijd en/of van maatregelen zoals bellenschermen, doorwerkt naar een reductie van het zouttransport over de hele sluis.
- 8 Het lijkt goed mogelijk om deze formulering op te nemen als een beschrijving van een kunstwerk in D-FLOW FM. Het betreft daarin wel een nieuw type, omdat er sprake is van debieten beide kanten op, tegelijkertijd. Dit is het gevolg van de kolk-uitwisseling. Toch hoeft dit, naar de huidige inzichten, de succesvolle implementatie niet in de weg te staan.
- 9 Een toekomstige uitwerking van zouttransport door spuisluizen zal in dezelfde categorie vallen. Ook daarbij kunnen er debieten twee kanten op gaan.
- 10 Voor de komende periode wordt aanbevolen om door te gaan met de ontwikkeling en implementatie van de beoogde formulering voor schutsluizen. Dit zal o.a. inhouden het ontwikkelen van een eerste versie van de software, o.a. voor het verkennen van de correctie van gemiddelde- naar representatieve deur-opentijden.

- 11 Naast deze ontwikkeling van de formulering zal er, voor het doen van scenario-berekeningen met een toenemende ladingstroom, behoefte zijn aan een relatie tussen deze ladingstroom en het aantal schuttingen en de deur-opentijden, om daarmee het effect op de zoutindringing te kunnen bepalen.
- 12 Verder kan er, in het spoor van de formulering voor schutsluizen, gewerkt gaan worden aan een vergelijkbare formulering voor de zoutindringing door spuisluizen. Hieronder vallen spuisluizen die korte tijd open staan rond kentering, maar ook de spuisluizen van het Haringvliet en de Selectieve Onttrekking te IJmuiden.

7 Verkenning van de volgende stappen

7.1 Terugblik op Plan van Aanpak 2017

Voor de activiteiten van dit jaar is een Plan van Aanpak opgesteld [2]. Voordat we vooruit kijken naar de activiteiten die nog voor ons liggen is het goed om terug te kijken naar wat er van het Plan van Aanpak is gerealiseerd, en op welke punten we de ambitie zoals toen geformuleerd hebben moeten bijstellen. Voor de nummering en volgorde van de taken in het Plan van Aanpak houden we de definities aan van Hoofdstuk 4 van dat PvA.

Taak 1:

Bepaling Scope en opstellen PvA: nu niet meer relevant;

Taak 2:

Inventarisatie recente projecten: uitgevoerd, zie Hoofdstuk 2; de taak bleek groter dan gedacht;

Taak 3:

Uitwerken te gebruiken formulering: uitgevoerd, inclusief een verkenning van de operationele parameters; zie Hoofdstuk 3 en 4;

Taak 4:

Verkennen implementatie: meer dan uitgevoerd: niet alleen is er een verkenning gedaan, ook is de implementatie voorbereid met een uitgebreide beschrijving van de (afleiding van) de vergelijkingen die samen de formulering vormen, zie Hoofdstuk 5 en Bijlage D.

Niet uitgevoerd is Taak 5:

Representatieve deur-opentijden, bestaande uit:

- selecteren beschikbare berekeningen (scenario's) en bijbehorende in- en uitvoer;
- overdraaien betreffende berekeningen met WANDA-Locks;
- analyse van de invoer en berekeningen met nieuwe formulering;
- analyse en rapportage.

Gaande het werk werd duidelijk dat de meest geschikte formulering, een uitwerking van het stationaire zoutleakmodel, rekenkundig complexer werd dan destijds (impliciet) is aangenomen. Door de formuleringen generiek toepasbaar te maken (van relatief lange tot relatief korte deur-opentijden) ontstond een stelsel niet-lineaire vergelijkingen. Voordat hier verkennende berekeningen mee kunnen worden gedaan zal er dus toch eerst een klein beetje software moeten worden geschreven. Het uitvoeren van Taak 5 was daarmee niet meer haalbaar binnen het beschikbare budget. De budget-ruimte die er overbleef is besteed aan een verdere voorbereiding van de implementatie met een uitgebreide beschrijving in Bijlage D van de formules en de daarbij gemaakt keuzes.

Daarmee is in het eerste jaar een stevige basis gelegd voor de verdere ontwikkeling van de zeesluisformulering. De kwantitatieve verkenning (o.a. van de correctie van *gemiddelde* naar *representatieve* deur-opentijden) moet nog gaan gebeuren, en daarvoor zal eerst een werkende versie van de formulering beschikbaar moeten zijn: een stand-alone versie, eventueel met een beperkte functionaliteit (een prototype) of misschien wel direct een versie in SOBEK, als dat qua kosten de meest effectieve benadering zou zijn. Die keuze moet nog gemaakt worden.

In het Plan van Aanpak voor 2017 was ook al een vooruitblik opgenomen naar 2018. Daarin wordt gesproken over

- het bouwen van een prototype van het betreffende stukje software, of een zelfstandig te draaien versie daarvan;
- om daarmee tijdsafhankelijke sommen te kunnen doen ter verdere (*) uitwerking van de manier waarop de operatie moet worden beschreven in parameters;
 - (*) aangenomen was dat er al een eerste verkenning had kunnen plaatsvinden zonder software te schrijven; dat bleek niet het geval;
- naast de dataset van de Krammersluizen kan ook de dataset voor IJmuiden worden ingezet;
- op basis van bevindingen kan een eerste versie van de definitieve code worden gebouwd en opgeleverd;
- en er kan gewerkt worden aan het opstellen van een lijst van de invoerparameters voor alle relevante sluizen in het Hoofdwatersysteem.

Al deze stappen zullen aan bod komen in Paragraaf 7.3.

7.2 Aandachtspunten

Bij het uitvoeren van de taken zijn een aantal aandachtspunten naar voren gekomen waarmee in de volgende stappen, het programmeren van een voorlopige of definitieve versie, rekening gehouden moet worden. Een deel ervan kwam naar voren tijdens pogingen om WANDA-Locks te koppelen aan SOBEK of Delft3D:

- de eenheden van saliniteit, debiet, etc.;
- omrekening van saliniteit naar dichtheid (UNESCO of Eckhardt);
- welke richting "(transport van zout, debiet of snelheid) is positief;
- massa-behoud van water en zout.

In een intern overleg inzake (de verdere voorbereiding op) de implementatie kwamen daarnaast nog de volgende aandachtspunten naar voren:

Over de numerieke oplosmethode:

- voor het oplossen van het stelsel van niet-lineaire vergelijkingen moet een numerieke methode worden gekozen; dit te doen voordat er wordt begonnen aan de werkelijke implementatie in software; de keuze voor een methode kan voor een stand-alone versie en/of een prototype anders uitpakken dan voor de definitieve implementatie; in het laatste geval is rekentijd van belang, in het eerste geval veel minder;
- een van de mogelijke methoden is het uitvoeren van een linearisatie van het stelsel van vergelijkingen op basis van de resultaten uit de voorgaande tijdstap; er ontstaat dan een stelsel lineaire vergelijkingen die kunnen worden toegevoegd aan de overige vergelijkingen van het model (D-Flow FM) die iedere tijdstap worden opgelost; (het uitschrijven van deze linearisatie van het stelsel vergelijkingen te doen voorafgaand aan het programmeren);

Bij toepassing in een 1D-model:

- uit eerdere projecten waarin WANDA-Locks werd gekoppeld aan een SOBEK-model leek het erop alsof er in SOBEK sprake is/was van diffusie over een kunstwerken heen,

dus ook als er geen debiet door het kunstwerk stroomt; als dat inderdaad ook in D-Flow het geval is dan zou dat gecorrigeerd moeten worden;

- er is een relatie met de hydrodynamica van het gebiedsmodel: de waterstand (h) is afhankelijk van de lokale snelheden, bepaald door het debiet (Q): de zeesluisformulering neemt de waterstand over van het gebiedsmodel, en rekent dan een debiet uit; bij SOBEK (of D-Flow 1D) zullen (waarschijnlijk) onttrekkingen worden gedaan op de celgrens (waarbij het zoutgehalte wordt bepaald in SOBEK) en worden lozingen gedaan via lateralen (waarbij het zoutgehalte wordt bepaald door de zeesluisformulering); daarmee staat er op de celgrens dus een bruto debiet, en dat is veel groter dan het netto debiet (waarin de uitwisselingsdebieten tegen elkaar wegvallen); om het effect hiervan op de waterstand beperkt te houden moet dit bruto debiet worden omgezet naar een lage snelheid, en daarom moet er een grote dwarsdoorsnede worden gehanteerd: de kanaaldoorsnede t.p.v. het sluishoofd (ofwel de hele breedte van de voorhaven), niet de breedte van het sluishoofd;
- de voorgestelde implementatie in 1D gaat alleen goed werken als het model in staat is het zout middels diffusie/dispersie af te voeren naar bovenstrooms (en vice versa: het zoete water naar benedenstrooms c.q. de zee), anders leidt de 'kortsluiting' tussen lozing en onttrekking tot een heel hoog zoutgehalte in de zoete voorhaven (en vice versa tot relatief zoet water in de zoute voorhaven);
- een heel hoge dispersie-coëfficiënt in SOBEK, zoals ondervonden bij het opzetten van een 1D-model van het Noordzeekanaal, zou niet vreemd hoeven zijn: de afwezigheid van de getijdendynamiek moet gecompenseerd worden in de coëfficiënt;

3D-modellen:

- het proces van lock-exchange met een zoute en een zoete laag die in tegengestelde richting bewegen leidt in werkelijkheid tot enige menging op het grensvlak; de zeesluisformulering werkt op basis een middeling in de tijd, maar daarmee vervalt een groot deel van deze dynamiek: de snelheden gemiddeld over de tijd zijn veel kleiner, en dus de menging die er het gevolg van is; dit tekort aan menging zou van belang kunnen zijn in een 3D-schematisatie; deze dan te corrigeren middels een lokaal hogere verticale diffusiviteit;

7.3 Einddoel inzake schutsluizen en stappen daar naar toe

Het **einddoel voor de zeesluisformulering**, betreffende de ontwikkeling en implementatie ervan en het gebruik ervan in modelschematisaties zou als volgt omschreven kunnen worden:

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

Alles bij elkaar is dit zeker dit te groot om te ambiëren binnen het Kennisprogramma Natte Kunstwerken. Het **einddoel van het onderzoekstraject binnen dit kennisprogramma** zou kunnen luiden:

- 1 de zeesluisformulering is opgenomen in D-Flow FM (onderzoeksversie?),
- 2 waarbij bekend is hoe een goede schematisatie van een sluiscomplex moet worden opgezet,
- 3 inclusief de manier waarop uit beschikbare informatie (bij RWS) de juiste operationele parameters moeten worden bepaald,
- 4 en waarbij voor een paar typische sluizen de juiste verhouding (kalibratiefactor) tussen de *gemiddelde* - en de *representatieve* deur-opentijden is bepaald.

Daarbij is van punt 1 nog onzeker hoe ver dat gereed kan zijn, o.a. vanwege de afhankelijkheid van de ontwikkelingen rondom het beschrijven van kunstwerken in D-Flow FM (zie Paragraaf 5.2). Om de andere elementen niet afhankelijk te maken van die onzekerheid is het verstandig om, zoals al eerder beschreven, eerst een werkende versie van de formulering beschikbaar te maken: een stand-alone versie, eventueel met een beperkte functionaliteit. Alternatief kan gekozen worden voor een voorlopige versie in SOBEK (D-Flow 1D), als dat qua kosten de meest effectieve benadering zou zijn.

Die keuze moet nog gemaakt worden, en dat is de eerste stap in het **stappenplan**:

- 1 Keuze voor ontwikkeling met een stand-alone versie danwel een voorlopige versie binnen SOBEK (D-Flow 1D); keuze te maken op basis van huidige rapport (o.a. Bijlage D) en a.d.h.v. criteria zoals:
 - welke gebruiksdoelen zijn er voor een stand-alone versie (voor onderstaande stappen in de ontwikkeling van de formulering, maar ook voor toepassing in IWP-systemen, waaronder IJmuiden, Krammer en Kanaal Gent-Terneuzen);
 - welke eisen en wensen zijn er aan in- en uitvoer voor die toepassingen;
 - welke eisen worden er gesteld aan rekentijd;
 - keuze voor de functionaliteit: volledige functionaliteit (b.v. incl. drempels, waterverplaatsing van schepen, spoeldebiet etc.) of alleen een (te definiëren) basis-functionaliteit;
- 2 Delen uit rapportage samenvoegen/aanvullen tot implementatie-document, met daarin:
 - beschrijving processen (achtergrond);
 - beschrijving formules;
 - beschrijving numerieke aanpak;
 - definiëren inputs, incl. format:
 - geometrie (constant);
 - zoutlekbeperkende maatregelen (constant of gestuurd);
 - randvoorwaarden (tijdafhankelijk);
 - operatie (tijdafhankelijk);
 - definiëren outputs incl. format:
 - debieten en zoutgehalten;
 - massaflux zout;
- 3 Implementatie:
 - stand-alone versie of voorlopige versie in SOBEK;

- 4 controle op interne consistentie van resultaten (bij constante operatie):
 - lijst met test-cases opstellen;
 - systematische verandering van allerlei parameters,
 - o.a. zonder of met getij aan zoute kant;
 - uitvoeren, analyse, rapportage
- 5 Constante operatie: vergelijking resultaten met WANDA-Locks:
 - lijst met test-cases opstellen:
 - cases oplopend in complexiteit;
 - uitvoeren, analyse, rapportage
- 6 Variabele operatie: bepaling kalibratiefactor op deur-opentijden:
 - selectie uit beschikbare dataset (waarschijnlijk IJmuiden);
 - evt. aanpassingen aan opzet/input/cases WANDA-Locks;
 - berekeningen met WANDA-Locks (variabele operatie);
 - analyse tijdreeksen operatie naar invoer voor zeesluisformulering:
 - verloop schutfrequentie over dag en week, per richting
 - verloop gemiddelde deur-opentijden over dag en week, per richting
 - berekeningen met zeesluisformulering; vergelijking met WANDA-Locks; onderzoek invloed / gevoeligheid voor kalibratiefactor

Op het eerste gezicht zouden, afhankelijk van het budget, de bovenstaande stappen in 2018 doorlopen moeten kunnen worden. Ook afhankelijk van het budget kunnen daarbij keuzes gemaakt worden omtrent een meer of minder complete functionaliteit van de software en in, samenhang daarmee, de uitgebreidheid van de test-cases en analyses.

Naast deze bovenstaande taken zou het ook goed zijn een begin te maken met het in kaart brengen van bronnen van informatie voor het schematiseren van de sluisen en de operatie:

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

Tenslotte: zoals eerder genoemd (zie Punt 11 in Hoofdstuk 6) zal er, voor het doen van scenario-berekeningen met een toenemende ladingstroom, behoefte zijn aan een relatie tussen deze ladingstroom en het aantal schuttingen en de deur-opentijden, om daarmee het effect op de zoutindringing te kunnen bepalen:

- 8 Verkenning relaties ladingstroom - schutoperatie
- literatuur, deskundigen (RWS, Deltares, MARIN), software (BIVAS).

7.4 Spuisluizen

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

7.4.1 Algemene beschouwing

Belangrijke spuisluizen (in beheer bij RWS) op de grens van zout en zoet water zijn: de spuisluizen in de Afsluitdijk, de spuisluizen bij IJmuiden (zowel in de huidige situatie als met een Selectieve Onttrekking) en de spuisluizen van het Haringvliet.

Er zijn verschillende redenen dat een spuisluis, bedoeld voor het afvoeren van zoetwater, ook zout naar binnen kan laten:

- visvriendelijk spuibehoor: het eerder openen en/of later sluiten van de schuiven t.b.v. vismigratie: dit geeft enige instroom van zout naar zoet voorafgaand en/of na afloop van een spuivenster; timing van de schuifbediening is daarbij cruciaal, samen met hoe het debiet en de zout- c.q. dichtheidsprofielen aan weerskanten zich ontwikkelen in de tijd; details doen er toe, deze te vatten in formuleringen;
- lekkage langs sponningen van de schuiven: afhankelijk van de waterstanden en het dichtheidsprofiel aan weerszijden van de schuiven ontstaan er drukverschillen over de schuif die over de hoogte kunnen variëren; als er sprake is van een kier tussen de schuif en de geleiding kan dit leiden tot enige stroming (in- en/of uitgaand) die ook kan variëren over de hoogte, in zowel snelheid als richting.

Als er, zoals in het Noordzeekanaal, sprake is van een gelaagde toestand aan de zoete zijde zal er, door de hoogte van de spuiopening, sprake zijn van enige vorm van selectieve onttrekking: bij een hoog gelegen spuiopening wordt er relatief zoet water doorgelaten; bij een laag gelegen opening juist relatief zout water. Ook de geometrie van de aanloop naar de spuiopening bepaalt of het doorgevoerde debiet relatief hoog of relatief laag uit de waterkolom wordt onttrokken.

7.4.2 Relevante aspecten in 1D en 2D-modellen

In een 1D- of 2D-schematisatie van een gebied moeten alle bovenstaande processen worden uitgedrukt in diepte-gemiddelde waarden zoals die in de schematisatie beschikbaar zijn. Als de zoutgehalten in het doorgelaten water (in- of uitgaand) afwijkt van de diepte-gemiddelde waarde aan de bovenstroomse kant (bij voorbeeld in het geval van de Selectieve Onttrekking bij IJmuiden) dan moet er, in de formulering, informatie worden toegevoegd die niet beschikbaar is in het gebiedsmodel. Dit geldt dan met name het verticale profiel van de dichtheden c.q. zoutgehalten aan beide kanten van de schuif, afhankelijk van het debiet.

De ontwikkeling van een dergelijke formulering is niet onmogelijk, maar de te hanteren formulering zou erg locatie-specifiek kunnen worden. Dit vraagt om enige verkenning.

7.4.3 Aspecten in 3D-modellen

Van 3D-modellen zou men verwachten dat deze in staat moeten zijn om de processen goed te beschrijven. Echter, dichtbij de spuiopening spelen niet-hydrostatische verschijnselen een rol die i.h.a. niet worden beschreven in de meest gebruikelijke versies van Delft3D (c.q. D-Flow FM in 3D). Ook kan een schuif met een willekeurige verticale positie niet goed worden beschreven op een 3D-rooster: daarvoor zijn benaderingen nodig (en beschikbaar). Het bewegen van een schuif kan nog niet worden beschreven in Delft3D; dit zal in de toekomst wel mogelijk zijn in D-Flow FM.

Al met al lijkt het erop dat een ontwikkeling in D-Flow niet onlogisch is, maar dat er wel grenzen zijn aan de nauwkeurigheid die hiermee gehaald kunnen gaan worden. Dit zou in kaart gebracht kunnen worden.

8 Literatuur

8.1 Inleiding

- [1] “Kennisprogramma Natte Kunstwerken, Voorstel onderzoek 2017”, (auteurs), (organisaties), (referentie), (datum)
- [2] “Zoutindringing door kunstwerken, NKvdT - Plan van Aanpak 2017 - Schutsluizen”, Otto Weiler, 11200741-003, oktober 2017.

8.2 Afwegingskader

- [3] “Afwegingskader maatregelen tbv zout-zoetscheiding, een handvat voor het proces”, Ida de Groot-Wallast, 1207941, Deltares, december 2013
- [4] “Toepassing afwegingskader zoutlekbeperkende maatregelen, Sluizencomplex Terneuzen (huidige en nieuwe situatie)”, Bas Reijmerink, Judith van Os, 1207941-002, Deltares, juli 2014
- [5] “Toepassing afwegingskader zoutlekbeperkende maatregelen, Haringvlietssluisencomplex”, Bas Reijmerink, Judith van Os, 1207941-002, Deltares, juli 2014
- [6] “Toepassing afwegingskader zoutlekbeperkende maatregelen, Lorentzsluizen”, Bas Reijmerink, Judith van Os, 1207941-002, Deltares, juli 2014
- [7] “Toepassing afwegingskader zoutlekbeperkende maatregelen, Stevinsluizen”, Bas Reijmerink, Judith van Os, 1207941-002, Deltares, juli 2014
- [8] “Toepassing afwegingskader zoutlekbeperkende maatregelen, Bergsediepsluis”, Bas Reijmerink, Judith van Os, 1207941-002, Deltares, juli 2014
- [9] “Toepassing afwegingskader zoutlekbeperkende maatregelen, Kreekraksluizen”, Bas Reijmerink, Judith van Os, 1207941-002, Deltares, juli 2014
- [10] “Toepassing afwegingskader zoutlekbeperkende maatregelen, Krammersluizen”, Bas Reijmerink, Judith van Os, 1207941-002, Deltares, juli 2014
- [11] “Toepassing afwegingskader zoutlekbeperkende maatregelen, Zeesluizen Farmsum”, Ronald Roosjen, 1209463-001, Deltares, december 2014

8.3 Volkerak

- [12] “Ontwerpstudie en praktijkproef zoutlekbeperving Volkeraksluizen : beschrijving en resultaten praktijkproef Stevinsluis en evaluatie maatregelen Stevinsluis”, R.E. Uittenbogaard en J.M. Cornelisse, 1201226-005, Deltares, april 2011
- [13] “Ontwerpstudie en praktijkproef zoutlekbeperving Volkeraksluizen : eindrapport van het onderzoek naar mogelijkheden voor de zoutlekbeperving door de Volkeraksluizen na verzilting van het Volkerak-Zoommeer”, M.T. Villars; R.E. Uittenbogaard; J.M. Cornelisse; A.J. Nolte, 1201226-015, Deltares, april 2011
- [14] “Ontwerpstudie en praktijkproef zoutlekbeperving Volkeraksluizen : scenarioberekeningen verspreiding zoutlek Volkeraksluizen in het benedenrivierengebied”, T. van der Kaaij; R.E. Uittenbogaard, 1201226-009, Deltares, april 2011

- [15] “Zoutlekbeperking Volkeraksluizen : verdere reductie van de zoutlek middels een zoutvang” , O.M. Weiler; R.E. Uittenbogaard; G.H. Keetels; A.C. Bijlsma; J.M. Cornelisse, 1204948, Deltares, maart 2012
- [16] “Water – air bubble screens reducing salt intrusion through shipping locks”, Rob Uittenbogaard, John Cornelisse, Ken O’Hara, 36th IAHR World Congress, June –July, 2015, The Hague, the Netherlands

8.4 Krammersluizen

- [17] “Verkennd onderzoek haalbaarheid innovatief zout/zoet-scheidingsstelsel Krammersluizen”, D. Dillingh, R.E. Uittenbogaard, G.H. Keetels, 1205977, Deltares, augustus 2012
- [18] “Krammer-Jachtensluizen, Haalbaarheidsonderzoek beperking onderhoud, schuttijd en zoutlek, Simulaties met dynamisch zoutlekmodel”, R.E. Uittenbogaard en J.M. Cornelisse, 1205977-000, Deltares, augustus 2012
- [19] “Pilot Krammerjachtensluis, functionele en hydraulische aspecten, Projectvoorbereiding”, O.M. Weiler e.a., 1207406-000, Deltares, mei 2013
- [20] “Hydraulisch ontwerp waterscherm, Pilot Krammerjachtensluis, P.P.D. van der Ven, 1207406-003, Deltares, juli 2014
- [21] “Pilot Krammerjachtensluis, Meet- en Monitoringplan, inclusief Inregelplan”, O.M. Weiler e.a., 1207406-004, Deltares, maart 2014
- [22] “Pilot Krammerjachtensluis, Meet- en monitoringprogramma”, P.P.D. van der Ven, 1207406-004, Deltares, januari 2015
- [23] “Pilot Krammerjachtensluis, Vervolganalyse resultaten Meet- en Monitoringprogramma, Suzanna Zwanenburg, 1220106-001, Deltares, januari 2016
- [24] “Preventing salt intrusion through shipping locks: recent innovations and results from a pilot setup”, Otto Weiler et al., 36th IAHR World Congress, June –July, 2015, The Hague, the Netherlands
- [25] “Uitgangspuntennota, Ontwerp en beoordeling IZZS Krammersluizen”, BB1621, Royal HaskoningDHV, december 2013
- [26] “Variantennota, Zoet-Zout Scheiding Krammersluizen”, BB1621, Royal HaskoningDHV, juni 2014
- [27] “Adviesnota, Zoet-Zout Scheiding Krammersluizen”, BB1621, Royal HaskoningDHV, september 2014
- [28] “Perspectief toepassing IZZS op Krammerduwvaartsluizen, Functionele en hydraulische aspecten, Studie in het kader van de Pilot Krammerjachtensluis”, O.M. Weiler, 1207406-005, Deltares, februari 2015
- [29] “SIVAK-simulatie IZZS Krammersluizen”, TBA, mei 2014
- [30] Memo “Implementatie waterverplaatsing schepen”, Diederik Vreeken, 120765-005-HYE-0001, Deltares, 5 april 2016, opgenomen als Bijlage C in [34]
- [31] Memo “Implementatie afstand deur-bellenscherm”, Diederik Vreeken, 120765-004-HYE-0001, Deltares, 10 juni 2016, opgenomen als Bijlage D in [34]
- [32] Memo “Meetrapport testen aan units en strengen met orifices”, Femke Verhaart, 1210765-018-HYE-0003, Deltares, 27 september 2016

- [33] Memo "Achtergrond bij specificaties bellenscherm", Femke Verhaart, 1210765-016-HYE-0002, Deltares, 17 oktober 2016
- [34] "Prestatie Innovatieve Zout-Zoet Scheiding op de Krammersluizen, Berekeningen met WANDA-Locks" Tjerk Vreeken, Suzanna Zwanenburg, 1210765-009, Deltares, september 2016

8.5 IJmuiden

- [35] "Simulatiestudie Capaciteit Zeetoegang Amsterdam-Noordzeekanaalgebied, Modelbeschrijving en resultaten", ir. R. Groenveld, PMSS, januari 2008
- [36] "Wijzigingen simulatiemodel voor Planstudie; Modelwijzigingen en simulatieresultaten voor validatie". ir. R. Groenveld, PMSS, april 2009.
- [37] "Zeetoegang IJmond, Planstudie Nieuwe zeesluis fase 1, Probleemanalyse & uitgangspunten, Milieutoets & MKBA, Rapport actualisatie vlootsamenstelling en capaciteitsmodel", BA3334-106-105, DHV, maart 2012
- [38] "Zoutindringing sluizen IJmuiden, effect nieuwe sluis op Noordzeekanaal", Rapport C03041.002769.001, Arcadis, 2011
- [39] "Verfijning onderzoek chloride indringing Noordzeekanaal (ZTIJ)", Rapport A3026R1r3, Arcadis, februari 2014
- [40] "MER Zeetoegang IJmond, Deelrapport water", versie 1.0, MD-AF20140077/PO, Royal Haskoning DHV, 17 januari 2014,
- [41] "Beperking Zoutindringing bij aanleg Nieuwe Sluis IJmuiden, Fase 1: Eerste verkenning", O.M. Weiler, R. Uittenbogaard, i.s.m. Royal Haskoning DHV, 1209034-000, Deltares, januari 2014
- [42] "Zoutindringing IJmuiden, Opgave, mogelijkheden, vraagstukken", Otto Weiler, Arnout Bijlsma, 1220309-000, Deltares, juli 2015
- [43] "Bellenschermstelsel nieuwe sluis IJmuiden, Voorlopige productomschrijving", Otto Weiler, John Cornelisse, 1210752-000, Deltares, juli 2015
- [44] "Zoutindringing IJmuiden, Fase 3: Verdere uitwerking mogelijke bronmaatregelen, Eindrapport", Arnout Bijlsma, Otto Weiler, 1220309-000, Deltares, oktober 2016
- [45] "Stroomsluis Noordland in de Oosterschelde dam, selectief afzuigen, twee - dimensionaal onderzoek", M1204, Waterloopkundig Laboratorium, juli 1973
- [46] "Stroomsluis Noordland in de Oosterschelde dam, selectief afzuigen, drie - dimensionaal onderzoek", M1209, Waterloopkundig Laboratorium, december 1973.
- [47] "Schuttingen voor zoutbelasting Noordzeekanaal, ir. R. Groenveld, PMSS, januari 2016, Opgenomen in [48] als Appendix A
- [48] "Berekening zoutindringing IJmuiden met WANDA-Locks", Matthijs Rietveld, 1220309, Deltares, oktober 2016, Opgenomen in [44] als Bijlage K
- [49] "Selectieve Onttrekking IJmuiden, Fase 1 - Studie naar hydraulische eisen en verificatie"; Arnout Bijlsma, Otto Weiler, 11200215-000, Deltares, september 2017

8.6 Andere sluizen in Nederland

- [50] "Zoutlek Scheepvaartsluizen Delfland, Inventarisatie en evaluatie van mogelijke maatregelen", O.M. Weiler, J.M. Cornelisse, 1205395, Deltares, april 2012

- [51] “Beperking zoutindringing met lage spuidebieten, Tsjerk Hiddessluizen en Van Harinxmakanaal”, I. de Groot-Wallast, T. O’Mahoney, G. van Velzen, 1209981-000, Deltares, februari 2015
- [52] “Optimalisatieonderzoek zoutmitigerende maatregelen West-Brabant bij een zout Volkerak-Zoommeer, hoofdrapport”, BR585-6/15-019.153, Witteveen+Bos, november 2015
- [53] “Beperking van de zoutindringing van de schutsluis te Spaarndam”, A. Vrijburcht, Q1490, Waterloopkundig Laboratorium, september 1992
- [54] “Zoutvang grote sluis Spaarndam”, T.H.G. Jongeling en W. Ottevanger, Q4256, Waterloopkundig Laboratorium, oktober 2006
- [55] “Eindrapport Beperking zoutindringing Zijkanaal C -Sparndam”, Geert Prinsen, Rob Uittenbogaard, 1209873-000, augustus 2014
- [56] “Monitoring zoutindringing Grote Sluis te Spaarndam, Plan van Aanpak”, Otto Weiler, 11200430, Deltares, Concept, juni 2017

8.7 Projecten in het buitenland

- [57] “Doortocht Brugge, Effecten alternatieve locaties sluizen op waterhuishouding en zoutinrusie bij Brugge”, Erik Ruijgh, Tom O’Mahoney, Tjerk Vreeken, Carine Wesselius, 1210077-000, Deltares, maart 2017
- [58] “Salt water intrusion analysis Panama Canal locks - existing situation, report A : field data collection, development and validation of simulation model, analysis of salt water intrusion”, T.H.G. Jongeling, Q3039, Delft Hydraulics

8.8 Het zoutlekmodel en WANDA-Locks

- [59] “Voorstudie : ontwerpstudie en praktijkproef zoutlekbepierking Volkeraksluizen : model voor zoutvrachtberekeningen”, R.E. Uittenbogaard, 1201226-011, Deltares, juni 2010
- [60] “Reduction of salt water intrusion through locks by pneumatic barriers”, G. Abraham, P. v.d. Burgh, Delft Hydraulics Laboratory, Publication no. 28, Augustus 1962
- [61] “Gravity currents produced by lock exchange”, J.O. Shin, S.B. Dalziel, P.F. Linden, Journal of Fluid Mechanics, vol. 521, pp. 1-34, 2004
- [62] “Validatierapport WANDA-Locks, het nieuwe zoutlekmodel”, Ida de Groot-Wallast, Tjerk Vreeken, 1209463, Deltares, januari 2016
- [63] “Manual WANDA-Locks, Oplevering bij het KPP-project LT-verzilting, Zoutlekmodel”, Judith van Os, memo 1209463-000-HYE-0007, Deltares, december 2014
- [64] Memo “Opzet procesaansturing generiek zoutlekmodel”, Pepijn van der Ven, 1207941-001-VEB-0001, Deltares, 9 december 2013
- [65] “Simulating Lock Operations in the Generic Salt Intrusion Model WANDA-Locks”, P.P.D. van der Ven, I. de Groot, D.J. Vreeken, O.M. Weiler, PIANC Smart Rivers 2015, Paper 137, september 2015

8.9 Koppelingen tussen WANDA-Locks en gebiedsmodellen, incl. Bijlage A

- [66] “Koppeling WANDA-Locks en SOBEK tbv modellering zoutverspreiding, Ervaringen Krammersluizen”, Ida de Groot-Wallast, 1208272, Deltares, december 2015
- [67] Memo “Ontwikkeling modellen zoutindringing door schutsluizen”, Otto Weiler, 1220106-000-HYE-0003, Deltares, 27 mei 2014

[68] "KPP Verzilting, Koppeling verziltingsmodellen", Tjerk Vreeken, 1230077-002, Deltares, december 2016

[69] "Onderzoek Zoetwaterlast Oosterschelde, Modelstudie naar het effect van het Innovatieve Zoet-Zout Scheidingssysteem in de Krammersluizen op chlorideconcentraties in de Oosterschelde", W.M. Kranenburg et al., 1221409-000, Deltares, september 2016

8.10 Stand van zaken

[70] Memo "Procesbeschrijving Wanda-Locks in het Modelinstrumentarium", Tjerk Vreeken, 1220106-001-HYE-0001, Deltares, 5 mei 2015

8.11 Invloed schutoperatie op zoutvracht

[71] "In welke mate kan optimalisatie van de schutoperatie bijdragen aan het beperken van zoutindringing door schutsluizen?", Afstudeeronderzoek Hogeschool Rotterdam, Laurens de Boer, uitgevoerd bij Deltares, Otto Weiler, juni 2017

[72] "Ontwerp van schutsluizen (Deel 2)", A. Vrijburgt et al., Bouwdienst Rijkswaterstaat, 2000

[73] "Luchtschermen in schutsluizen"; P. van der Burg en P. de Vos, Rijkswaterstaat (Dienst voor de Waterhuishouding Den Haag, Studiedienst IJmuiden) 1962

8.12 Wensen vanuit de beoogde toepassing

[74] "The Delta Model for Fresh Water Policy Analysis in the Netherlands", Geert Prinsen, Frederiek Sperna Weiland, Erik Ruijgh, Water Resources Management, January 2015

[75] "Validatie QWAST-Nederland, Quick Water Allocatie Scan Tool voor inzet in Knelpuntenanalyse 2.0", Corine ten Velden, Peter Gijsbers, 11200588-025, Deltares, voorlopig, juni 2017

8.13 Alternatieve formuleringen, incl. Bijlage C

[76] "Actualisatie 3D zoutverspreidingsmodel IJsselmeer", Menno Genseberger, Arnout Bijlsma, 1230069-000, Deltares, december 2016

[77] "Gebruikershandleiding Balans versie 3.4", P4230-R-2, MX.Systems en Deltares, 7 december 2011

[78] "Chloridebezwaar IJsselmeer via de Afsluitdijk", A.J. Kolvoort, J.S. van Vugt, Rijkswaterstaat Directie Flevoland, 5 juli 1990

[79] "Verkenning maritieme toegankelijkheid Kanaal Gent-Terneuzen, Aanvullend oppervlaktewateronderzoek", 9V4098.A0, Royal Haskoning, Svasek Hydraulics, Concepteindrapport, 14 januari 2010

[80] "Water quality control at ship locks, prevention of salt and fresh water exchange", Kerstma et al., ISBN 905410.142.3, A.A. Balkema, Rotterdam, 1994

A Projecten waarin gewerkt is met een koppeling tussen WANDA-Locks en een omgevingsmodel

A.1 Koppeling met Sobek: de Krammersluizen

Een eerste poging tot het koppelen van WANDA-Locks aan een gebiedsmodel is ondernomen als onderdeel van het project rond de Krammersluizen [66]. Het doel van die koppeling van WANDA-Locks aan SOBEK was tweeledig: Op de eerste plaats werd hiermee beoogd een beeld te krijgen van de verspreiding van het zout over het Volkerak-Zoommeer (VZM) naar de locatie waar het zoutgehalte wordt getoets aan en criterium. Daarnaast zou hiermee een terugkoppeling ontstaan van het zoutgehalte in dat bassin op de (netto) zoutvracht door de Krammersluizen, mede als functie van het debiet (watergebruik, instelbaar) door dat sluiscomplex.

De schutoperatie zoals doorgerekend door het WANDA-Locks model was vooraf bepaald op basis van simulaties van de afwikkeling van het scheepvaartverkeer door de sluisen. Deze simulaties [29] zijn uitgevoerd voor verschillende toekomstige jaren op basis van prognoses voor de economische ontwikkeling en de ontwikkeling in de samenstelling van de vloot (aandeel van grotere en kleinere schepen in het totaal, gegroepeerd naar de door RWS gedefinieerde scheepsklassen). Voor elk van die toekomstige scenario's was daarmee gedetailleerde informatie beschikbaar over de individuele schuttingen, de spreiding daarvan over de dag, over de week en over het jaar, en de deur-opentijden die daarvan het gevolg zijn. Deze informatie is door WANDA-Locks gebruikt om de zoutvracht uit te rekenen [28].

Er is gewerkt aan een 'on-line' koppeling tussen dit WANDA-Locks model en een deel van het 'Landelijk Sobekmodel', opgebouwd in SOBEK 2.13. (De uitsnede betrof de gehele zuidwestelijke delta.) Een 'on-line' koppeling middels OPEN-MI is niet gelukt: er werd tegen een veelheid aan problemen aangelopen [66]. Een van de problemen is dat de aanpak niet massabehoudend was in zout: de totale hoeveelheid zout nam toe.

Er zijn wel resultaten bereikt met een 'off-line' koppeling: een aanpak waarbij de uitvoer van het ene model is gebruikt als invoer voor het andere model.

N.B.: Er is in dat project gestreefd naar een twee-zijdige koppeling, zowel naar het VZM als naar de Oosterschelde; de beschrijving hieronder beperkt zich tot de koppeling naar het VZM. De koppeling naar de Oosterschelde was op dezelfde manier ingericht.

- De scheiding tussen de modellen is op de ingang van de voorhaven: de voorhaven maakt nog onderdeel uit van de beschrijving in WANDA-Locks; het gebied buiten de voorhaven wordt beschreven met SOBEK.
- Een debiet van de sluisen naar het VZM, bijvoorbeeld ten gevolge van het neerwaarts nivelleren, is beschreven middels een lateraal: het instromende debiet krijgt het zoutgehalte van de voorhaven zoals berekend met WANDA-Locks.
- Een debiet van het VZM naar een van de kolken, een onttrekking aan het door SOBEK beschreven gebied, is beschreven met een pomp: het debiet krijgt het zoutgehalte mee zoals dat in SOBEK is berekend; dit zoutgehalte kan afwijken van het in WANDA-Locks aangenomen zoutgehalte op basis waarvan het transport is berekend.
- Tussen de voorhaven en het buitengebied vindt ook uitwisseling plaats door dichtheidsstroming; deze wordt berekend in WANDA-Locks op basis van een constant

aangenomen randvoorwaarde, en aan SOBEK opgelegd als een 'dry load': een lozing van zout als droge stof in kg/s.

Door het ontbreken van een automatische terugkoppeling is de aanpak niet helemaal sluitend in de totale zoutvracht: het transport wordt in eerste instantie in WANDA-Locks berekend op basis van een aangenomen zoutgehalte op het VZM. Vervolgens wordt door het SOBEK-model een zoutgehalte berekend, maar dat kan dus afwijken van de aangenomen randvoorwaarde. Middels correcties en iteraties is hier aandacht aan besteed.

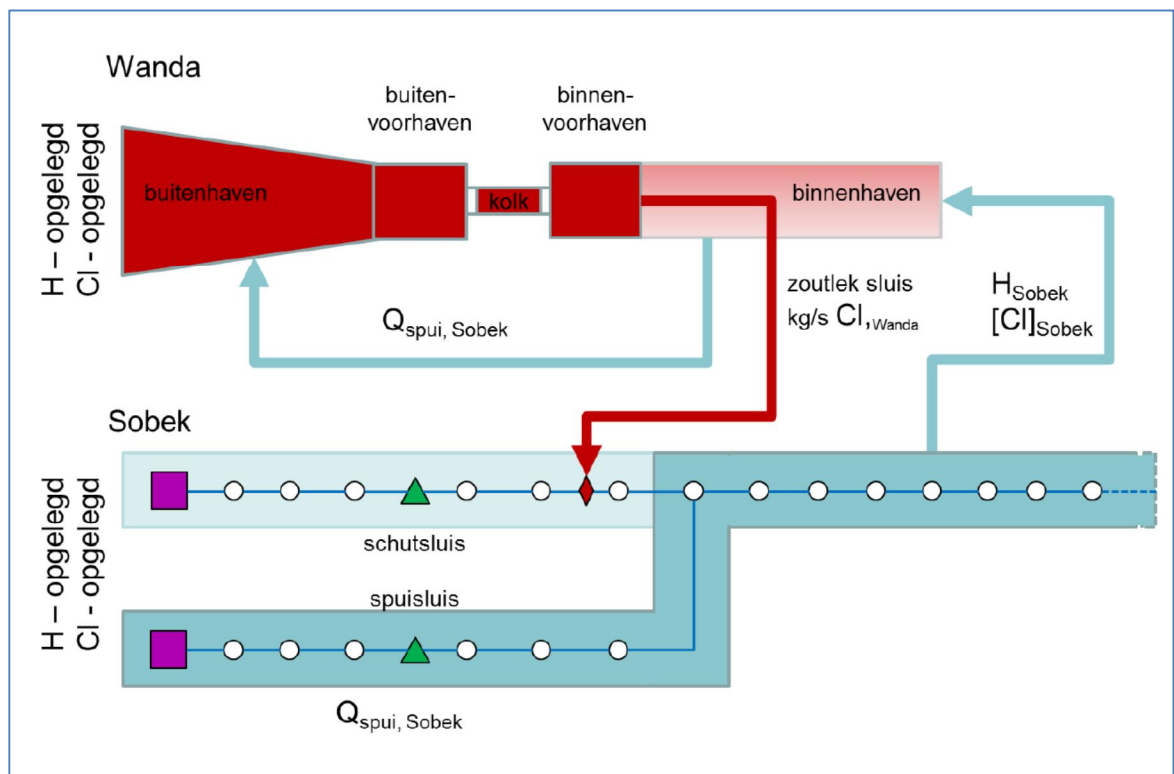
Met deze opzet is het mogelijk gebleken om berekeningen uit te voeren. Helaas moest geconcludeerd worden dat het toen gebruikte SOBEK-model tot vragen leidde aangaande de berekende zoutgehaltenes. Binnen het toen lopende project was er geen ruimte om dit verder uit te zoeken.

A.2 Koppeling met Sobek: de Brabantse Rivieren

Een tweede project waarbij WANDA-Locks en SOBEK zijn gebruikt voor het modelleren van de zoutindringing is beschreven in [52]. Het betreft de zoutindringing door de sluizen bij Dintelsas en Benedensas in een situatie met een zout VZM. In het project werd onderzocht hoeveel water er afgevoerd moest worden door het Mark-Vlietstelsel om op een aantal locaties in dit gebied het zoutgehalte onder bepaalde waarden te houden.

Let wel: hier is gebruik gemaakt van de waterkwaliteitsmodule in SOBEK, SOBEK-WQ, die rekent in post-processing op de hydrodynamische berekening met SOBEK. (Deze keuze impliceert dat aangenomen mag worden dat het zout geen invloed heeft op de hydrodynamica.) Om de juiste verspreiding in het gebied uit te rekenen is in het project speciale aandacht gegeven aan de dispersiecoëfficiënt in SOBEK-WQ die deze verspreiding bepaalt. Hierbij is apart gekeken naar de numerieke dispersie die al een deel van de te verwachten dispersie voor zijn rekening neemt.

Voor de opzet van de koppeling is in dit geval gekozen voor een aanpak waarin er sprake is van een overlap tussen het rekendomein van WANDA-Locks en het rekendomein van SOBEK. De aanpak is schematisch weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 8.1

Aan zowel de bovenstroomse als de benedenstroomse zijde is er in het WANDA-model sprake van twee voorhavens achter elkaar. Het zoutgehalte op de bovenstroomse rand van het WANDA-Locks model komt uit het SOBEK-model, meer specifiek uit SOBEK-WQ. WANDA-Locks berekent het zouttransport op de overgang tussen de twee voorhavens en dit zouttransport wordt als droge stof (in kg/s) opgelegd in SOBEK-WQ op een locatie nabij de schutsluis. De verspreiding van dit zout in stroomopwaartse richting wordt dan in SOBEK-WQ berekent, en dat leidt dan tot het zoutgehalte dat door WANDA-Locks wordt gebruikt.

Het schutdebiet speelde in deze studie een ondergeschikte rol. Het effect van dat schutdebiet op het zouttransport in WANDA-Locks is meegenomen in de waarde (in kg/s) zoals opgelegd aan het SOBEK-WQ model. (Hoe het schutdebiet is meegenomen in de SOBEK-modellering is niet beschreven in het nu beschikbare rapport. Waarschijnlijk maakt het voor de hydrodynamica in SOBEK, en daarmee voor de verspreiding bovenstrooms, weinig uit of het schutdebiet al of niet wordt afgescheiden van de het debiet door de spuisluis.)

Om de twee berekeningen op elkaar te laten aansluiten is er geïtereerd: de resultaten van de ene berekening zijn opgelegd aan de andere berekening, daarna hetzelfde in omgekeerde richting, en dat in een paar slagen.

A.3 Koppeling met Delft3D: Tsjerk Hiddessluis (Harlingen)

De Tsjerk Hiddessluizen verbinden het Van Harinxmakanaal met de haven van Harlingen die in open verbinding staan met de Waddenzee. In het onderzoek werd gekeken naar manieren om de zoutindringing te bestrijden met een minimale afvoer van water over het kanaal. Er werd daarbij gekeken naar perioden waarin geschut werd en er, door kolkuitwisseling,

zoutwater het kanaal op komt, en naar perioden waarin er gespuid werd door de sluis om dit zout weer af te voeren.

De schematisatie in WANDA-Locks strekt zich uit van de zee tot aan een locatie op enkele kilometers van de sluis, daar waar er metingen van het zoutgehalte beschikbaar waren, die opgelegd konden worden als randvoorwaarde. Aan beide kanten was sprake van twee 'voorhavens' tussen de kolk en de randvoorwaarde.

Voor de beschrijving van het kanaal is in deze studie gekozen voor een 2DV schematisatie in Delft3D. In deze weergave wordt de breedte van het kanaal beschreven met een enkele rekencel. Het model is dus vooral gericht op het beschrijven van de processen over de diepte en de lengte van het kanaal. Dit model strekt zich uit van de sluis tot een punt 10 km stroomopwaarts, net voorbij Franeker.

Er is dus een grote overlap tussen WANDA-Locks en D3D. De zoutvracht die het Delft3D-domein ingaat wordt afgeleid uit de resultaten van WANDA-Locks ter plaatse van het binnenhoofd van de sluis. Voor de overdracht van de resultaten van WANDA-Locks naar Delft3D zijn drie opties overwogen:

- 1 beschrijving van beide componenten van de kolkuitwisseling, dus laag in de waterkolom een instromend debiet dat uit de kolk komt, en hoger in de waterkolom een uitgaand debiet dat de kolk in stroomt; het nadeel daarvan is dat je het zoutgehalte in het uitgaande debiet (naar de kolk toe) zoals berekent in Delft3D niet kent, waardoor je niet zeker weet hoe groot de netto zoutvracht (in kg/s) is;
- 2 het alleen opleggen van het intredende debiet met een zoutgehalte dat overeenkomt met de netto zoutvracht; nadeel daarvan is dat er veel water binnenkomt wat tot stroming en translatiegolven in het gebied leidt; beiden zullen van invloed zijn op de verspreiding van het zout over het kanaal;
- 3 het opleggen van een klein intredend debiet met een verhoogd zoutgehalte: nadeel hiervan is dat het instromende debiet dicht bij de sluis tot een hoger zoutgehalte aan de bodem zal leiden dan reëel te verwachten is; door menging en verspreiding zal dit op grotere afstand een minder grote rol spelen.

Er is gekozen voor de laatste optie met een debiet van 1 m³/s. Het model is vervolgens gekalibreerd op gemeten zout-profielen op verschillende locaties langs het kanaal middels variaties in de verticale en horizontale eddy diffusiviteit. Daarmee wordt het bezwaar van deze benadering (een te hoog zoutgehalte aan de bodem dicht bij de sluis) ondervangen.

Merk op dat in de gemaakte keuze het schutdebiet, ingaand of uitgaand afhankelijk van het getij aan de zee-zijde, niet expliciet is beschreven. Een eventueel effect hiervan is middels de kalibratie van het model verdisconteerd.

A.4 Koppeling met Delft3D: IJmuiden

In het kader van de in aanbouw zijnde nieuwe grote zeesluis in IJmuiden is vanaf ca. 2011 onderzoek gedaan naar de indringing en verspreiding van het zout over het Noordzeekanaal (NZK) en het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK). Er is door Arcadis een Delft3D-model gebouwd van dit gebied, dat gekalibreerd is op gemeten zoutgehalten op verschillende plaatsen langs het kanaal. De zoutindringing was in dat model in eerste instantie beschreven op basis van kolkvolumes en aantal schuttingen per dag, met de aanname van volledige kolkuitwisseling. Bij de kalibratie (zo bleek later) is gevarieerd met het zoutgehalte aan de zoute kant: om tot

de juiste zoutgehaltenes binnen te komen is het zoutgehalte buiten op een vrij lage waarde gesteld.

Hieruit bleek dus dat er niet altijd sprake is van volledige kolk-uitwisseling, en dat de operatie van de sluis (ook de nieuwe sluis) dus een belangrijke rol speelt in de zoutvracht. Om met vertrouwen een uitspraak te kunnen doen over de toekomstige situatie met de nieuwe sluis werd het noodzakelijk geacht om dus ook de te verwachten operatie met die sluis mee te nemen in de modellering.

Daarvoor is door Deltares een koppeling opgezet tussen het Delft3D-model en WANDA-Locks. Om de operatie van de verschillende sluizen, zowel de huidige als de toekomstige configuratie, goed mee te nemen is een verbinding gelegd met simulaties van de verkeersafwikkeling door de sluizen zoals uitgevoerd in het kader van capaciteitsstudies. Een deel van deze simulaties zijn opnieuw gedraaid om extra uitvoer weg te schrijven, waaronder de momenten van openen en sluiten van de verschillende sluisdeuren. Met deze tijdreeksen kon WANDA-Locks worden aangestuurd.

Het WANDA-Locks model strekt zich uit van de buitenvoorhaven (net ten oosten van het Forteiland) tot voorbij de Velserkom (net ten westen van de pont). Op basis van metingen zijn er vaste zoutgehaltenes gekozen voor de buitenranden van het modelgebied. De waterstand buiten en de afvoer via het spui-/maalcomplex zijn ook gebaseerd op metingen.

In eerste instantie is uitvoer van de WANDA-Locks berekeningen gebruikt als invoer voor het Delft3D-model: de uitwisselingsstromen door de binnenhoofden van de verschillende sluizen, zoals berekend door WANDA-Locks, zijn opgelegd als debietrandvoorwaarden aan Delft3D: een offline koppeling. Het instromende debiet kreeg het zoutgehalte uit WANDA-Locks en het uitstromende debiet kreeg het zoutgehalte zoals aanwezig in Delft3D. Omdat dit laatste niet helemaal gelijk is aan waar WANDA-Locks van uit gaat komt de influx van zout in het Delft3D-model niet overeen met wat was berekend door WANDA-Locks.

Als tweede stap is er daarom, als onderdeel van het project, een online koppeling opgezet, waarbij het (dieptegemiddelde) zoutgehalte in de binnenvoorhaven op korte afstand van het binnensluishoofd is opgelegd aan WANDA-Locks voor de berekening van de kolkuitwisseling. De uitwisseling van gegevens is gerealiseerd met CoSuMo (acroniem voor COupled SUBgrid MOdel, een alternatief voor OPEN-MI). Naast de kolkuitwisseling zijn ook de andere debieten online uitgewisseld tussen WANDA-Locks en Delft3D: het nivelleerdebiet (ingaaand of uitgaand afhankelijk van het getij) en het debiet afgevoerd door het spuikanaal.

De verschillen tussen beide aanpakken bleken niet heel groot: de berekeningen met de online koppeling bevestigden de inzichten zoals die al waren opgedaan met de offline koppeling.

Door de gekoppelde berekening nam de rekentijd toe: het Delft3D-model alleen had al een rekentijd van meer dan een week voor het doorrekenen van een half jaar. Met de on-line koppeling met WANDA-Locks nam de rekentijd toe naar enkele weken voor dezelfde periode (afhankelijk van het interval van de uitwisseling van data).

Kijkend naar de aanpak als geheel, is er nog een tekortkoming in de modellering dicht bij de sluis. De verspreiding van het zout in de binnenvoorhaven in Delft3D wordt met enige zorg berekend, o.a. omdat deze verspreiding en de gelaagdheid in dit gebied van invloed is op de effectiviteit van de te bouwen Selectieve Onttrekking. Anderzijds wordt de 'bronterm', de

zoutvracht, berekent met WANDA-Locks op basis van uniforme dichtheden. In de koppeling wordt het zoute water dat uit de kolk de binnenvoorhaven in stroomt opgelegd over de onderste helft van de waterkolom, zonder rekening te houden met het feit dat het water dicht aan de bodem in de binnenvoorhaven veel zouter is dan hoger in de waterkolom: in werkelijkheid zal er dicht aan de bodem misschien haast geen sprake zijn van een stroomsnelheid, maar beperkt de kolk-uitwisseling zich tot het hogere deel van de waterkolom. De invloed van gelaagdheid op de zoutindringing, zowel in een voorhaven als in de kolk zelf, is tot op heden niet nog goed in kaart gebracht.

Als onderdeel van de werkzaamheden is ook gekeken naar de zoutgehalten zoals door WANDA-Locks berekend in de buitenvoorhaven (de rekencellen daar) in vergelijking tot beschikbare gemeten zoutprofielen. Deze metingen geven aan dat er sprake is van een sterk gelaagde situatie, waarin een zoete bovenlaag relatief ongestoord afstroomt richting zee, terwijl WANDA-Locks dit probeert te beschrijven in gebieden met een uniforme dichtheid. Dit leidt tot stapjes in saliniteit en dichtheid, die de basis vormen voor het berekenen van het transport tussen de cellen. Geconcludeerd is dat de rekenwijze in WANDA-Locks voor het transport van een voorhaven naar het buitengebied, danwel een volgend bassin, nadere aandacht behoeft.

A.5 Koppeling naar de zoute kant: lozing van zoetwater op de Oosterschelde

Bij het beschouwen van de effecten van een schutsluis op de benedenstroomse, zoute kant is in het verleden primair gekeken naar het geloosde debiet, en dat is opgelegd met een zoutgehalte van de bovenstroomse, zoete kant. Dit debiet bestond in het beschouwde geval o.a. uit het schutdebiet en een spoeldebiet (een beperkt debiet door de schutsluis als bijdrage aan het beperken van de zoutindringing). Daarmee worden, in het 3D-model van het zoute gebied, twee effecten verwaarloosd, die beiden vooral dichtbij de sluis van belang kunnen zijn:

- door de (gedeeltelijke) kolk-uitwisseling is het zoete water al deels opgemengd als het de sluis verlaat; er zal in werkelijkheid (dicht bij de sluis) dus een minder sterk verschil in zoutgehalte, en daarmee een minder sterke stratificatie ontstaan dan volgt uit het model;
- als er sprake is van zoutindringing naar het zoete gebied (bovenstrooms van de sluis en dus buiten het gebiedsmodel), verdwijnt er daarmee dus ook zout uit het zoute systeem; dat wordt met deze aanpak niet beschreven.

In [69] is een koppeling tot stand gebracht tussen WANDA-Locks en een 3D-model van de Oosterschelde. Doel van de studie was om na te gaan in welke mate het gespuide zoetere water een probleem zou kunnen vormen voor de teelt van mossels en oesters in dat deel van de Oosterschelde. Deze vraag was relevant geworden omdat de Krammersluizen, na ombouw naar een andere methodiek voor het scheiden van zout- en zoetwater, meer zoetwater kan gaan gebruiken als onderdeel van de zout-zoetscheiding.

De configuratie en operatie van de Krammersluizen leidt ertoe dat er, behalve kolk-uitwisseling, sprake is van een aantal debieten, te weten: het nivelleerdebiet, een spuidebiet (via een koker tussen beide kolken in) en een spoeldebiet door de sluiskolken. Afhankelijk van te maken keuzes in de operatie komt dit debiet deels uit de rinketschuiven in de deuren van het buitenhoofd, een deels wordt dit opgevangen in het bestaande Laag Bekken dat rond Laag Water wordt geleegd via Slaak, een gebied buiten de voorhaven van de sluisen, maar relevant voor de daar aanwezige mosselteelt.

De geloosde debieten zijn opgelegd aan het Delft3D-model met het zoutgehalte zoals door WANDA-Locks berekend. De uitwisselingsdebieten zijn ook bepaald uit de resultaten van WANDA-Locks, en zijn opgelegd als instromend (vanuit de kolk het gebied in) in de bovenste helft van de waterkolom, en uitstromend (uit het gebied de kolk in) in de onderste helft van de waterkolom.

In dit specifieke geval was de kolk-uitwisseling beperkt door de (toekomstige) aanwezigheid van bellenschermen in de sluishoofden. Deze reductie wordt beschreven door een factor, de zgn. doorlaatfractie, op het zouttransport in kg/s. Wat echter niet bekend is, is in welke mate deze factor ingrijpt op het *debiet* van de kolk-uitwisseling, en in welke mate het ingrijpt op het *zoutgehalte* van dat debiet. Daarbij op te merken dat het debiet dus de netto hoeveelheid water is die uit het bellenscherm komt en er niet weer opnieuw instroomt. In de hier besproken studie is uitgegaan van de halve hoogte in het sluishoofd, van het zoutgehalte in de kolk en daaruit is een horizontale snelheid uitgerekend, gelijk voor beide componenten van de kolkuitwisseling. De werkelijke stromingscondities dichtbij het sluishoofd, inclusief de stroming opgewekt door de bellenschermen, worden daarbij niet beschreven.

B Onderzoek naar bellenschermen sinds 2016 onder de TKI-regeling

Memo

Aan
Geïnteresseerden

Datum 24 oktober 2017	Kenmerk 11201091-009-HYE-0001	Aantal pagina's 8
Van Pepijn van der Ven	Doorkiesnummer +31(0)88 335 8395	E-mail Pepijn.vanderVen@deltares.nl

Onderwerp
Beschrijving TKI bellenschermonderzoek

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	24-10-2017	P.P.D. van der Ven					

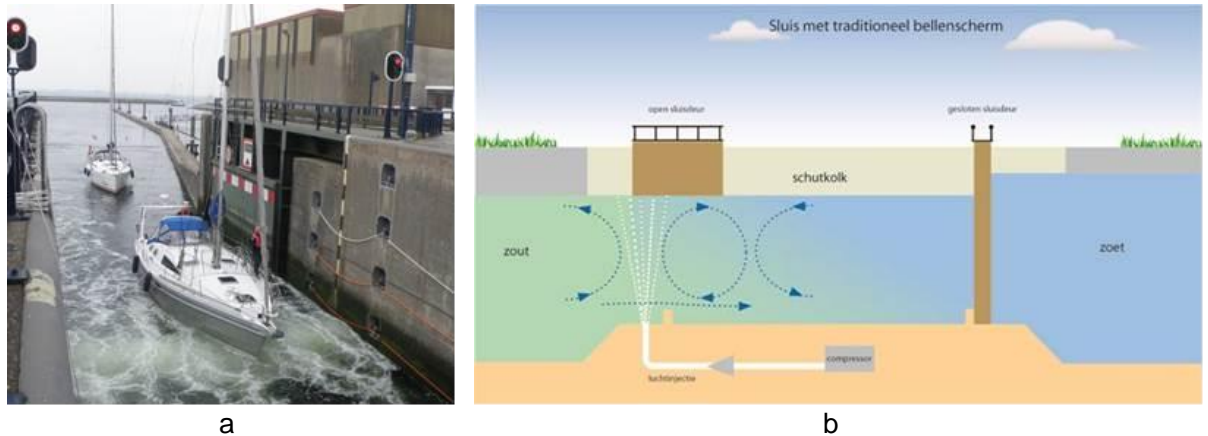
Inhoud van dit memo

Dit document geeft een overzicht van bellenschermonderzoek dat Deltares het afgelopen jaar in TKI-kader heeft uitgevoerd en een vooruitblik naar het vervolgonderzoek. Deltares heeft meer bellenschermerelateerd onderzoek uitgevoerd dan hier gepresenteerd. Bovendien is het gepresenteerde onderzoek niet volledig toegelicht; daarvoor moet worden verwezen naar de rapportage, welke op het moment nog in afronding is ([1], [2] en [3]). Ten slotte moet worden opgemerkt dat ook de gegeven invulling van het vervolgproject (DEL068) momenteel nader wordt uitgewerkt; dit document presenteert dus niet de werkelijke scope en aanpak, maar de vervolgstappen zoals deze in de TKI-aanvraag dd. augustus 2017 zijn geschetst.

Context: bellenschermen in schutsluizen

Schutsluizen gelegen tussen zout en zoet water vormen naast een bescherming tegen hoogwater de toegang voor scheepvaart. Bij elke schutting lekken zij echter een volume van zout water de zoete binnenwateren in. Deze binnenwateren dienen als bron voor drinkwater en voor de agrarische sector. Daarnaast heeft de kwaliteit van deze wateren een sterk ecologisch belang. Met de groei van het volume transport over water en met de aanleg van nieuwe, grotere sluizen neemt de zoutindringing door schutsluizen nadrukkelijk toe.

Bellenschermen worden ingezet als methode om de zoutindringing te voorkomen. Verschillende recente onderzoeken beschouwen vernieuwde ontwerpen van bellenschermen, in de Stevinsluis (2010) (zie [4] en verschillende Deltares rapporten) en de Kramer jachtensluis (2014) (zie [5] en Deltares rapporten). Naast bellenschermen beschouwen deze studies ook het toepassen van een spoeldebiet van zoet water door de kolk, en van waterschermen. De studies voeden de keuze tussen het gebruik van zoet water (indien voldoende beschikbaar) of van energie (vooral voor bellenschermen). Het energiegebruik, en de installatiekosten voor grote compressoren, zijn aanleiding voor een gewenste optimalisatie van de bellenschermtoepassing.



Figuur 1 (a) Een bellenscherm in de werkelijkheid: hier in de recreatiesluis van het Kramer sluisencomplex, tussen de Oosterschelde en het Volkerak-Zoommeer. (b) De werking van het bellenscherm en de opgewekte stromingen in de sluis weergegeven in een langsdoorsnede.

Het inzetten van bellenschermen om water van verschillende dichtheden te scheiden beperkt zich niet enkel tot schutsluizen. Een voorbeeld is de toepassing van bellenschermen in de baggerindustrie, waar steeds meer aandacht is voor de environmental impact van de baggerwerkzaamheden. Om gebaggerd materiaal niet in suspensie in de omgeving te brengen, bijvoorbeeld wanneer dit gevoelige koraalgebieden betreft, wordt een tijdelijke haven gebruikt als sedimentafvang. Om te voorkomen het sediment daar uit stroomt wordt het bellenscherm ingezet in de havenmond. Het concept leunt op de kennis die is opgedaan in de toepassing in schutsluizen maar er zijn belangrijke verschillen tussen zout water en water met bagger sediment.

Openstaande vraagstukken

Ten behoeve van een optimalisatie is fundamenteel begrip nodig van de werking van een bellenscherm als scheider. De uitgevoerde studies tonen dat het bellenscherm in een schutsluis werkt als scheider van water van verschillende dichtheden maar onvoldoende h oe. Hiermee is tevens onvoldoende kennis beschikbaar om advies te leveren over de bovenstaand geschetste overige toepassingen van het bellenscherm.

Onderstaand wordt een lijst gegeven van relevante, openstaande vraagstukken.

- Het effect van de belgrootte, en daarmee het ontwerp van de bellenscherm generator op de prestatie als scheider van water met verschillende dichtheden;
- Het effect van een mogelijke stratificatie in de kolk op de prestatie;
- De schaalbaarheid van de toepassing naar diepere kolken, met name gezien de grotere drukverschillen tussen weerszijden van het scherm;
- Het effect van de zoutconcentratie van het water op het gedrag van het bellenscherm;
- De robuustheid van het bellenscherm in relatie tot de deurbeweging, het doorvaren van schepen en andere verstoringen;
- De mate waarin de werking van het scherm leunt op mixen danwel op waterbeweging, en hoe deze processen zijn te sturen ten gunste van een optimaal bellenscherm;

- De inzetbaarheid en nauwkeurigheid van CFD (computational fluid dynamics; numerieke stromingsberekeningen) in het bepalen van de prestatie van bellenschermen;
- De effectiviteit van een bellenscherm in een langs- of dwarsstroming als scheider en als generator van stroomsnelheden aan het oppervlak.
- De inzetbaarheid van een bellenscherm om de verspreiding van deeltjes (sediment of bacteriën) in suspensie uit een bassin te voorkomen.

De vragen rond het bellenscherm zijn generiek en fundamenteel van aard. Tenslotte is het bellenscherm een drijver van transport van water in een gelaagd systeem, waarbij het wordt beïnvloed door de druk aan weerszijden en de zoutconcentratie en dichtheid van het water waarin het zich bevindt. Deze randvoorwaarden maakt het ook anders dan bekende toepassingen van bellenschermen of -pluimen in industrie.

Aanleiding van het onderzoek

Om het bellenscherm toe te kunnen passen in diepere sluisen, of toe te passen op andere gebieden dan schutsluisen, is een begrip nodig van waarom en hoe het bellenscherm als scheider werkt. Maar zelfs om ontwerpvarianten of de invloed van verschillende randvoorwaarden te beschouwen dient te worden vastgesteld wat de representativiteit is van schaalmodel- of numeriek onderzoek. Het ontwikkelen van deze onderzoeksmethodes is het hoofddoel van het voorgestelde onderzoek.

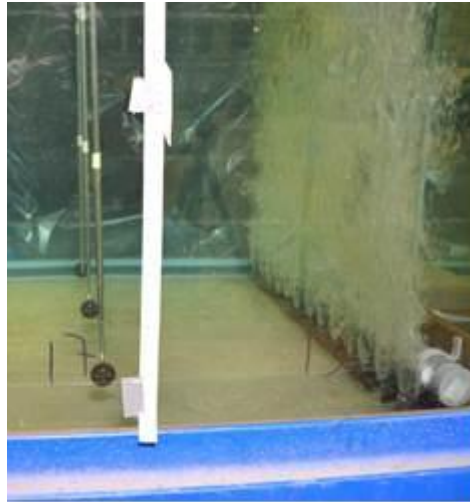
Doel van het project

Het doel van het voorgestelde onderzoek is tweeledig:

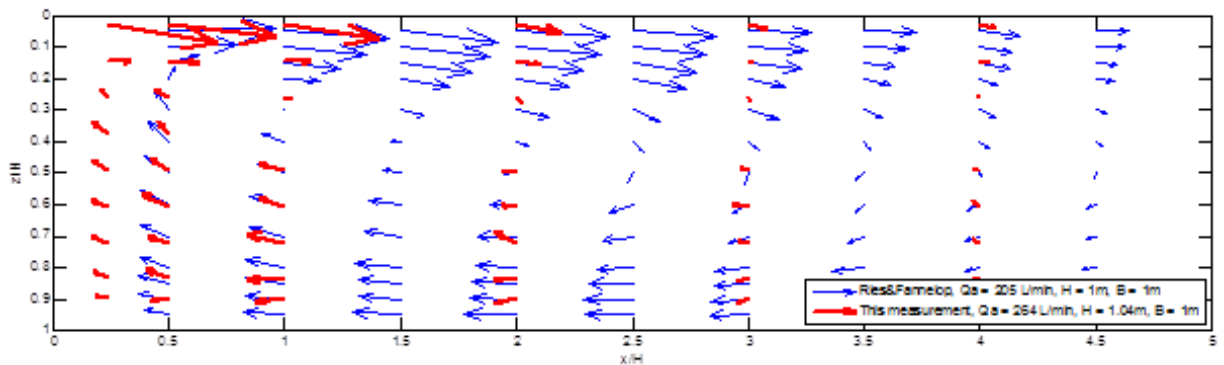
- 1 De kennis van de werking van een bellenscherm vergroten;
- 2 Nieuwe onderzoeksmethodes ontwikkelen en valideren.

Verrichte acties tussen september 2016 en maart 2017 (voorafgaand aan het TKI onderzoek)

Gedurende september t/m december heeft Deltares met een studente van de TUDelft metingen verricht op kleine schaal (zie paper [6] en verslag [7]). Met name betrof het metingen in een goot met waterdiepte ca. 1 m en breedte 1 m. Deze metingen lieten een goede eerste overeenkomst zien met zowel schaalmodel- als in situ metingen uit literatuur. Van de faculteit Technische Natuurwetenschappen (TUDelft) werd een extra meetinstrument aan Deltares uitgeleend om meer inzicht te verkrijgen in de belgrootte en -snelheid.



a



b

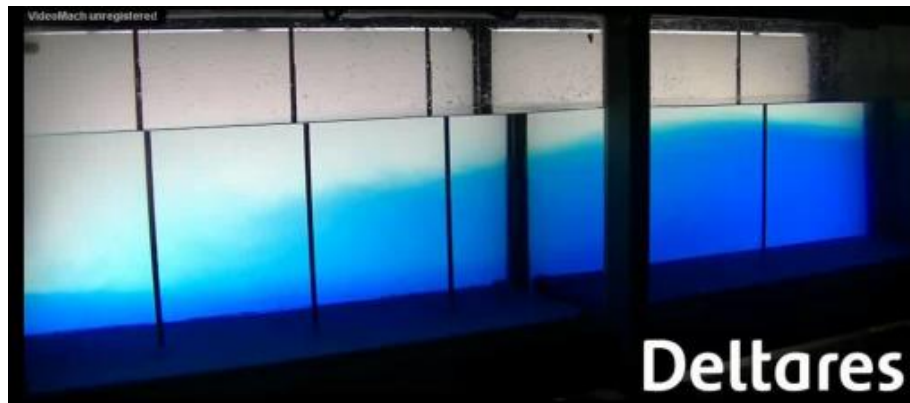
Figuur 2 (a) Schaalmodel van een bellenscherm en (b) de meetresultaten vergeleken met literatuur, [6].

Verrichte acties tussen maart en september 2017 (binnen TKI project DEL062)

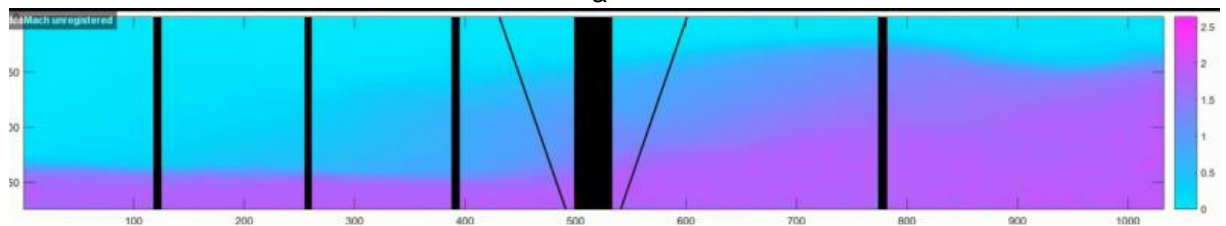
Van februari tot en met juni 2017 is een project uitgevoerd met een vijftal studenten in het kader van hun studie Werktuigbouwkunde (zie [8]). Het project viel onder gezamenlijke begeleiding van Deltares en de vakgroep Fluid Mechanics van de faculteit 3ME (TUDelft). Deze studenten hebben een innovatieve meetmethode toegepast welke de dichtheden aan weerszijden van een bellenscherm vastlegt in tijd en ruimte, op basis van videobeelden van testen waarin het zoute water gekleurd is.

In het kader van het voorgaande TKI onderzoek Effectiviteit van een bellenscherm als scheider van water van verschillende dichtheden hebben deze metingen een vervolg gekregen in de zomermaanden van 2017. In de faciliteiten van Deltares was het mogelijk om de metingen uit te voeren onder gecontroleerde lichtomstandigheden. Hiermee wordt het mogelijk de metingen zodanig te kunnen verwerken dat kwantitatieve en gedetailleerde gegevens worden verkregen. De kwantificering van de meting is benodigd om de (relatief kleine) verschillen tussen verschillende ontwerpen van bellenschermen, of van verschil in inzet (o.a. toegepast debiet)

vast te kunnen stellen. Binnen deze meetserie is ook de belgrootte gevarieerd, welke een belangrijke maar in de beschikbare literatuur ontbrekende parameter is voor de verschaling van bellenschermexperimenten en de effectiviteit van bellenschermen. Zie rapport [2].

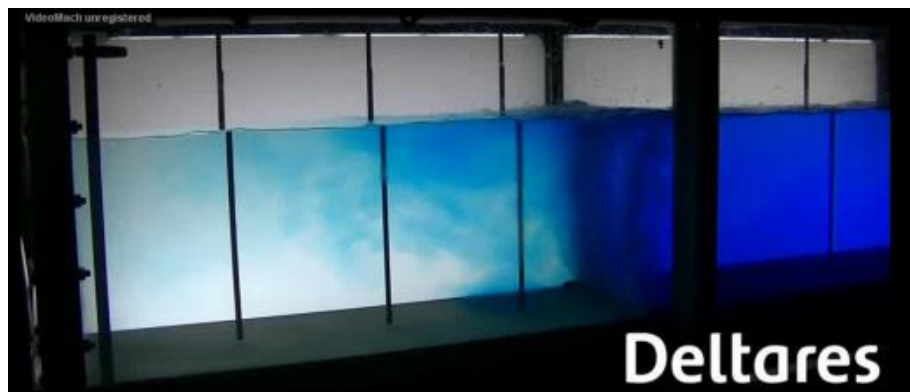


a

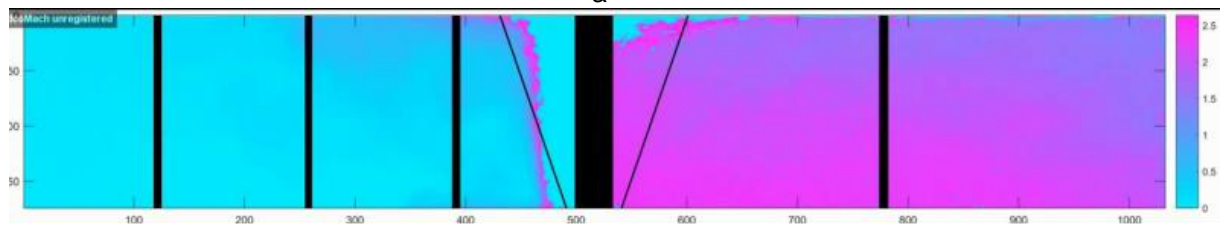


b

Figuur 3 (a) Foto en (b) verwerkte meting van het mixen van zoet en zout water zonder bellenscherm. In de foto's is zout water blauw gekleurd, in de verwerkte figuren is zout felpaars en zoet water lichtblauw gekleurd.



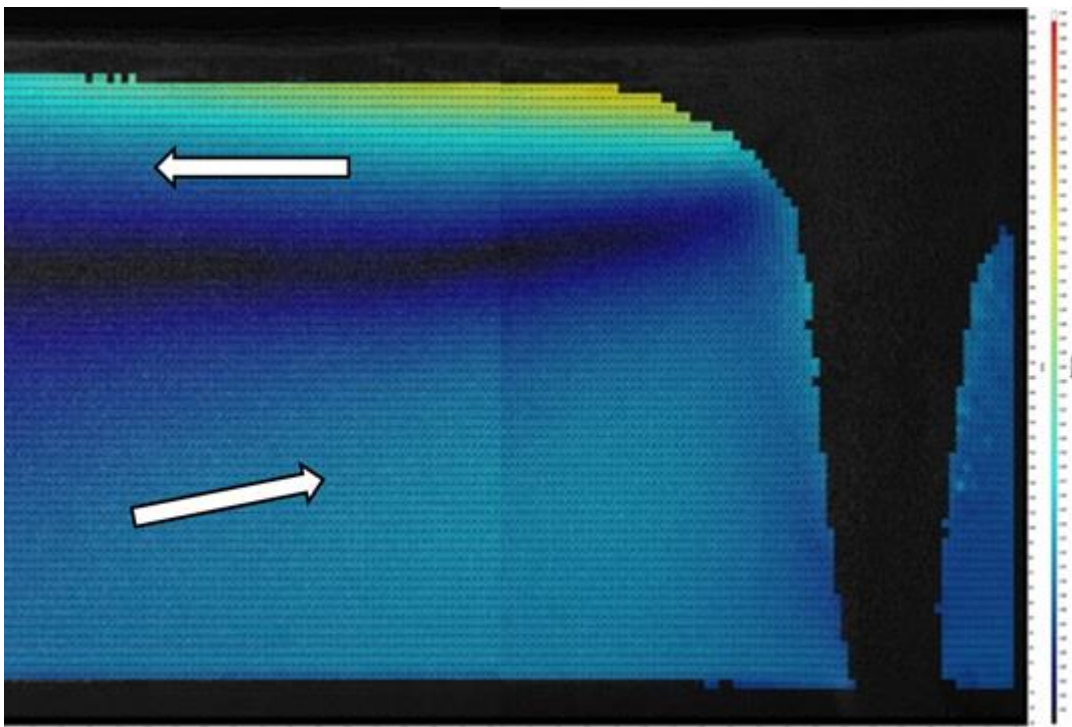
a



b

Figuur 4 (a) Foto en (b) verwerkte meting van het mixen van zoet en zout water zonder met bellenscherm. In de foto's is zout water blauw gekleurd, in de verwerkte figuren is zout felpaars en zoet water lichtblauw gekleurd.

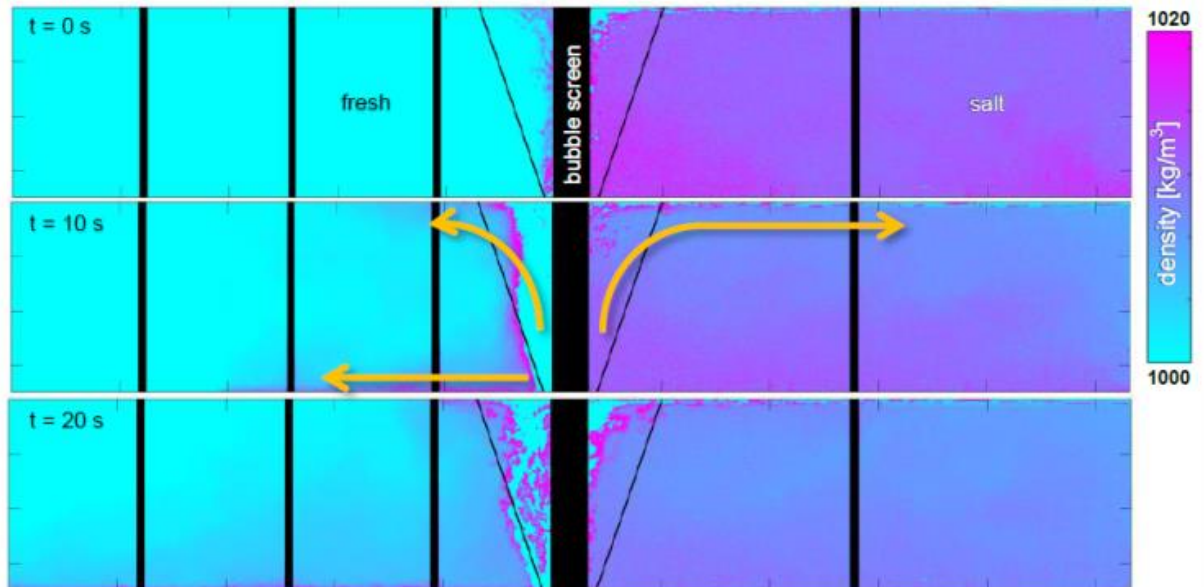
Een tweede type meting dat in juli en augustus 2017 is uitgevoerd is het ruimtelijk meten van de stroomsnelheden van de door het bellenscherm opgewekte waterbeweging met behulp van PIV (particle image velocimetry). Ook deze metingen zijn uitgevoerd in het kader van het voorgaande TKI project. De aanleiding van deze metingen was de conclusie uit metingen dd. september-december 2016 dat het vaststellen van de stroomsnelheden met de meer gangbare elektromagnetische stroommeters onvoldoende nauwkeurig is en tevens een beperkte ruimtelijke resolutie levert. De PIV-metingen zijn uitgevoerd op een identieke opstelling als de bovenstaand beschreven optische metingen, waarmee een veelomvattende dataset kon worden verkregen. Zie rapport [1].



Figuur 5 Eerste resultaten van de PIV-metingen. Op alle punten is een snelheidsvector getekend, voor de duidelijkheid zijn de globale stromingen weergegeven met twee grote pijlen.

De resultaten van de meetonderzoeken van september-december 2016 en februari-juni 2017 zijn gepresenteerd op het International Symposium on Shallow Flows (ISSF) afgelopen juni 2017 op de Technische Universiteit te Eindhoven ([6]). Op het symposium is ook het extended abstract verschenen waarin de metingen zijn toegelicht.

De metingen zijn tussen juli en oktober 2017 nader uitgewerkt door een student van de TUDelft. Deze nadere uitwerking is erop gericht de validiteit en nauwkeurigheid van de metingen te onderschrijven en de verschillen tussen inzet van luchtdebiet en tussen belgroottes te onderzoeken. Zie rapport [3].



Figuur 6 De uitwisselingsmechanismes van het bellenscherm weergegeven door de dichtheid op verschillende momenten in tijd te vergelijken.

Geplande acties september 2017 t/m december 2018 (binnen TKI project DEL068)

- Omdat het doen van schaalmodelmetingen en in het bijzonder van prototype-schaal metingen erg kostbaar is is het belangrijk om numerieke berekeningsmethodes te valideren en toe te passen om kennis te vergaren in de effectiviteit van bellenschermen. Dit kan bijvoorbeeld inhouden dat de schalingswetten van bellenschermonderzoek, of het effect van toenemende (sluis-)diepte wordt gebaseerd op CFD berekeningen (computational fluid dynamics, numerieke stromingsberekeningen). Om de validiteit van deze metingen te bevestigen kunnen de in het voorgaande TKI onderzoek uitgevoerde schaalmodelmetingen dienen als validatiebasis. In het voorgestelde vervolgonderzoek wordt ruimte gereserveerd om numerieke validatie uit te voeren.
- De in het voorgaande TKI onderzoek uitgevoerde metingen geven een gedetailleerd beeld van de menging en scheiding in de tijd met een hoge spatiale resolutie. Verschillende situaties zijn beproefd. Het voorliggende voorstel omvat ruimte om de verschillende scenario's in detail te vergelijken om hiermee het effect van belgrootte en luchtdebiet vast te stellen.
- In bovenstaande analyse en in het vergaren van inzicht in de werking van het bellenscherm is het zeer belangrijk aan te kunnen sluiten op de beschikbare literatuur, bijvoorbeeld van vergelijkbare bellenschermproeven in zoet water (Wen & Torrest, Fanneløp & Riess), prototype-schaal proeven (Bulson, Abraham & van den Burg) en van het effect van dichtheid op het gedrag van het bellenscherm (o.a. Fraga).

Referenties

- [1] *PIV measurements of a bubble screen – TKI bubble screen research*
Deltares
(in afronding)
Kenmerk: 11201091-003-HYE-0001 (rapport)
- [2] *Measuring a bubble screen's mixing using dye – TKI bubble screen research*
Deltares
(in afronding)
Kenmerk: 11201091-004-HYE-0001 (rapport)
- [3] *Post-processing and analysis of measurements on bubble screens to mitigate salt intrusion*
Deltares
(in afronding)
Kenmerk: 11201091-005-HYE-0001 (rapport)
- [4] *Water – Air Bubble Screens Reducing Salt Intrusion through Shipping Locks*
R. Uittenbogaard, J. Cornelisse, J. en K. O'Hara
07-2015
36th IAHR World Congress, 2015
- [5] *Preventing Salt Intrusion through Shipping Locks: Recent Innovations and Results from a Pilot Setup*
O. Weiler, A.J. Van de Kerk, en K.J. Meeuse
07-2015
36th IAHR World Congress, 2015
- [6] *The use of small scale experiments for a shipping lock's bubble screen*
P. van der Ven en V. Wieleman
06-2017
4th International Symposium of Shallow Flows, 2017
- [7] *Scale experiments on the flow field induced by a bubble screen*
V. Wieleman
06-02-2017
Rapport onderzoeksopdracht, TUDelft
- [8] *Density Difference Between Fresh Water and Sea Water Influences the Exchange Mechanisms for Air Bubble Screens*
B. Haitsma Mulier, B. Veenings, G. Verbeeten, G. Wolbert en P. van Zaanen
06-2017
Verslag projectopdracht, TUDelft

C Bestaande formuleringen zoutindringing door schutsluizen

C.1 Formuleringen voor de sluizen in de Afsluitdijk

Het zoutgehalte in het IJsselmeer is al lange tijd een punt van aandacht. Recent is een nieuw 3D-model gebouwd van dat gebied [76] en in dat kader is ook aandacht besteed aan de verschillende bronnen van zout, waaronder de schutsluizen in de Afsluitdijk. Er is gebruik gemaakt van uitvoer uit een programma getiteld 'BALANS' waarin een formule is opgenomen voor de berekening van het zouttransport door de schutsluizen. De herkomst van de formulering is niet bekend.

L = a * 0.001 * { c1*N*rlbs + c2*K } vracht in ton chloride/dag voor de betreffende dag		
C1	5000	Lorentzsluis - klein
C2	986	Lorentzsluis - klein
N	aantal scheepspassages op de betreffende dag (invoerreeks).	
K	aantal kolkomzettingen op de betreffende dag (invoerreeks).	
	(invoerreeks, ook op dagbasis; 0 < reductiefactor < 1; 1 = geen luchtbel scherm)	
rlbs	reductiefactor voor het gebruik van een luchtbel scherm	
a	reductiefactor voor terugspuien bij de eerstvolgende spui	

Figuur 8.2 omschrijving formulering uit 'BALANS', overgenomen uit Bijlage D van [77]

Analyse van de formulering leidt tot het volgende:

- de zoutvracht wordt evenredig gesteld met een combinatie van het aantal schepen en het aantal kolkomzettingen; de laatste zou betrekking kunnen hebben op de schuttschijf, en dan heeft de eerste betrekking op de kolk-uitwisseling, waarin deur-opentijden een rol spelen; dit wordt dan kennelijk gerelateerd aan het aantal schepen; dat is begrijpelijk, maar niet altijd juist;
- in deze interpretatie is het verdedigbaar, hoewel ook niet helemaal juist, om het inzetten van luchtbellenschermen wel invloed te laten hebben via het aantal schepen (de kolkuitwisseling), en niet via de schuttschijf;
- er is een factor 'a' gerelateerd aan het spuien bij het eerstvolgende getij; dit maakt deze formulering erg specifiek voor de locatie, en daarmee omvat de formulering meer dan alleen de zoutvracht door de schutsluizen;
- er is factor 0,001 die niet wordt toegelicht; hier moet o.a. het verschil in zoutgehalte over de sluis heen in verstopt zitten;

De formulering is beperkt tot lineaire verbanden tussen (helaas) onduidelijke parameters. Al met al leidt deze korte analyse op basis van zeer summiere informatie tot de conclusie dat deze formulering geen bruikbare basis vormt voor een generieke formulering voor zoutindringing door schutsluizen.

Er is nog wel gezocht naar achtergronden van deze formulering. Daarbij een rapport van de voormalige Directie Flevoland van Rijkswaterstaat gevonden [78] betreffende de

verschillende bronnen van zout voor het IJsselmeer via de Afsluitdijk. Hierin is ook een formulering gevonden voor de zoutindringing via schutsluizen. Deze formulering is op de volgende pagina's afgebeeld in Figuur 8.3 en Figuur 8.4

Analyse van de formulering leidt tot het volgende:

- de twee termen K_{uitw} en K_{niv} zijn herkenbaar, hoewel in details niet helemaal begrijpelijk: in de uitdrukking voor K_{uitw} komt een factor 'w' voor die niet wordt omschreven; in de uitdrukking voor K_{niv} wordt gerekend met de som van beide zoutconcentraties, i.p.v. het verschil; dit is mogelijk een typfout);
- de uitdrukking voor 'z', een coëfficiënt op de kolkuitwisseling, is deels herkenbaar: hij lijkt op de parameter U , de relatieve kolkuitwisseling zoals weergegeven in formule 3.1 en 3.2; de aanvullende getallen (1,38 en 1000) worden niet verklaard;
- de literatuurverwijzingen bij dit rapport gaan terug naar een rapport van de directie Zuiderzeewerken van 1934; mogelijk dat daarin een nadere verklaring van de formulering te vinden zou zijn.

Wat ook zonder nadere analyse geconcludeerd kan worden is dat de uitwisselingscoëfficiënt, z , betrekking heeft op het verschil in zoutgehalte over de sluis heen, en dat een gedeeltelijke kolkuitwisseling, doorwerkend naar een reductie van de zoutvracht over de sluis heen (de groene curve in Figuur 3.2) niet expliciet wordt beschouwd.

BIJLAGE 2: Berekening chloridelast op het IJsselmeer als gevolg van het gebruik van de schutsluizen in de Afsluitdijk te Kornwerderzand en Den Oever.

1. REDUCTIE CHLORIDELAST SCHUTSLUIZEN IN DE AFSLUITDIJK

Als gevolg van verschillen in de chlorideconcentratie en daarmee in de dichtheid van water aan weerszijden van de sluis, vindt nabij de bodem een zoutwatertransport in de richting van het IJsselmeer plaats en nabij de waterspiegel een zoetwatertransport naar de Waddenzee zodra de deuren in de sluis geopend worden. Ten gevolge van dit uitwisselingsproces kan een hoeveelheid zoutwater in de orde van grootte gelijk aan de inhoud van de schutkolk op het zoete IJsselmeer komen wanneer zowel de deuren van het buiten- als die van het binnenhoofd voldoende lang open staan. Een luchtbellenscherm heeft tot doel om de uitwisselingsstromen tegen te gaan.

De mate van reductie van de chloridelast door het exploiteren van een dergelijk luchtbellenscherm kan voor een bestaande schutsluis worden bepaald door het uitvoeren van prototypemetingen.

Uitgaande van in het verleden verricht onderzoek is via berekeningen de chloridelast voor de situaties met en zonder in bedrijf zijnd luchtbellenscherm bepaald. In het hierna volgende zullen de berekeningsmethode, de ingevoerde sluisgegevens en de rekenresultaten worden gepresenteerd.

1.1. Berekeningsmethode ter bepaling van de chloridelast.

De chloridelast van een schutsluis zoals hier onderzocht is verdeeld in een tweetal componenten te weten:

- 1° de chloridelast als gevolg van de uitwisseling tijdens het openstaan van de deuren, = K_{uitw}
- 2° de chloridelast als gevolg van het nivelleren van de kolk, = K_{niv}

In formulevorm: $K_{sl} = K_{uitw} + K_{niv}$

waarin:

$$K_{uitw} = n \cdot L_f \cdot b \cdot h \cdot w \cdot (C_{bu} - C_{bi}) \cdot z$$

en

$$K_{niv} = n \cdot l \cdot b \cdot (H_{bu} - H_{bi}) \cdot (C_{bu} + C_{bi}) \cdot B$$

Figuur 8.3 1° deel van de formulering zoals aangetroffen in [78]

waarbij:

Ksl = de chloridelast van de sluis

Lf = fictieve lengte van de kolk = kolkvolume/natte doorsnede van het hoofd

Cbu = chlorositeit "zoute" kant van de sluis gemiddeld over de verticaal

Cbi = idem, "zoete" kant van de sluis

Hbu = waterstand "zoute" kant van de sluis

Hbi = idem, "zoete" kant van de sluis

z = uitwisselingscoëfficiënt (≤ 1)

B = coëfficiënt onder meer afhankelijk van de zoutbestrijdingsmaatregel.

n = aantal schutcycli per tijdseenheid

l = lengte van de kolk

b = breedte van de kolk

h = waterdiepte boven de sluisdrempel tijdens de uitwisselingsfase

Voor de berekening van z is de onderstaande uitdrukking gehanteerd

$$z = \frac{a.t.}{4 Lf} \sqrt{\frac{1,38.(Cbu-Cbi).g.h}{1000+1,38 \frac{(Cbu+Cbi)}{2}}}$$

zonder luchtbellenscherm (lbs) : a= 0,5 B = 1

met luchtbellenscherm (lbs) : a= 0,15 B = 0,6

Figuur 8.4 2^o deel van de formulering zoals aangetroffen in [78]

C.2 Formulering voor het Kanaal Gent - Terneuzen

In het kader van de studies naar de nieuwe grote sluis in Terneuzen is door Svasek een formulering opgesteld voor de zoutvracht die door de schutsluizen op het kanaal gezet wordt [79]. In dezelfde studie is de verspreiding van het zout op het kanaal Gent - Terneuzen, tegen de richting van de afvoer in, is vervolgens berekend met SOBEK. Daartoe is, op basis van gemeten zoutgehalten over de lengte van het kanaal, een ruimtelijk variërende dispersiecoëfficiënt bepaald.

De formulering voor de zoutvracht roept een aantal vragen op:

- de formulering is gebaseerd op het dichtheidsverschil over de sluis, zonder rekening te houden met beperkte kolkuitwisseling waardoor er een kleiner dichtheidsverschil kan ontstaan tussen kolk en voorhaven;
- het verschil in zoutgehalte wordt gelijk veronderstelt aan het verschil in dichtheid; dat is niet juist; het verschil komt waarschijnlijk terecht in de kalibratiefactor;
- er wordt gebruik gemaakt van een afwijkende, ogenschijnlijk onjuiste formule voor de loopsnelheid; mogelijk betreft het hier in een typefout in het rapport; anders komt het terecht in de kalibratiefactor;
- voor de kolkuitwisseling in de tijd gebruikt men een exponentieel verloop in plaats van de de tangens hyperbolicus; dit zou ook bruikbaar moeten zijn, maar het kan niet gecontroleerd worden;
- het zouttransport in de tijd wordt uitgedrukt in 'Q(t)' en heeft de eenheid 'kg/s'; daarnaast is er ook een afgeleide 'dQ(t)/dt', met ook als eenheid 'kg/s'; dat kan niet kloppen; ook is niet duidelijk waarom er hier eigenlijk de afgeleide van Q(t) wordt bepaald;
- uiteindelijk is er, op basis van berekeningen met FINEL voor een enkele kolkuitwisseling een kalibratiefactor bepaald voor de zoutlast naar het kanaal; deze varieert van 0,5 - 3,0 met de grootste waarde voor de Westsluis; de brede range aan waarden van deze kalibratiefactor wekt geen vertrouwen;

De formulering, hoewel mogelijk bruikbaar binnen de vraagstelling van het project, heeft geen algemene geldigheid (en pretendeert dat ook niet). Hij roept tal van vragen op die nader onderzocht zouden kunnen worden.

C.3 Formulering volgens Kerstma et al.

Kerstma et al. [80] presenteert een vrij compleet overzicht van de kennis over zoutindringing en de beperking daarvan zoals die ten tijde van het verschijnen van het boekje (1994) beschikbaar was. In Bijlage A van het boekje wordt een formulering gepresenteerd om de zoutvracht door een sluis te berekenen. De gepresenteerde formulering houdt rekening met gedeeltelijke kolk-uitwisseling, maar rekent die niet uit. Deze waarde moet door de gebruiker worden afgeschat o.b.v. diverse informatie zoals in het boekje gepresenteerd. Dit is misschien acceptabel voor gevallen waarin, door maatregelen zoals bellenschermen, de kolkuitwisseling klein wordt, maar zeer onpraktisch voor de huidige doelstelling, waarin we alle soorten van sluizen willen kunnen behandelen, zonder al te veel kennis vooraf. We willen dan juist de gedeeltelijke kolk-uitwisseling laten volgen uit de berekening en deze laten variëren als het gevolg van het inzetten van maatregelen.

C.4 Het stationair Zoutlekmodel

In Bijlage B van [59] wordt de formulering van het stationaire zoutlek model gepresenteerd. In het onderstaande daarvan een paar belangrijke kenmerken.

- de opbouw van de formulering gebeurt op basis van een sluitende beschouwing van de fysische verschijnselen, inclusief de doorwerking van gedeeltelijke kolkuitwisseling naar de zoutvracht over de sluis; het is de enige formulering die dit beschrijft;
- er zitten eigenlijk geen kalibratiefactoren in; de enige factor die als kalibratiefactor gebruikt zou kunnen worden is de doorlaatfractie die samenhangt met de reductie van de kolk-uitwisseling door de inzet van bellenschermen;
- het is een stationaire formulering: alles wordt beschouwd over een reeks van identieke schuttingen heen;
- het effect van nivelleren op de saliniteit in de kolk is verwaarloosd: dit is toelaatbaar voor een situatie met een klein verval, maar niet voor een 'algemeen' geval; dit zou aangepast moeten worden voor een grotere algemene toepasbaarheid;
- het verloop van de kolkuitwisseling in de tijd is gelineariseerd: dit is toelaatbaar voor de situatie met een sterk gereduceerde kolkuitwisseling, bijvoorbeeld door toepassing van bellenschermen; dit zou aangepast moeten worden voor een grotere algemene toepasbaarheid;
- het model bevat termen voor de invloed van zoutlekbeperkende maatregelen (bellenschermen, waterscherm, spoeldebiet); deze termen zijn ook in onze opzet nodig om met de formulering het effect van maatregelen te kunnen bestuderen;
- het model bevat ook termen voor de invloed van scheepsvolume, zowel voor aanwezigheid in de kolk als voor het effect van in- en uitvaren;
- de benadering mondt niet uit in een direct uit te rekenen vergelijking (of samenstel daarvan), maar tot een stelsel van 6 vergelijkingen met 6 onbekenden; dit stelsel moet numeriek worden opgelost om de gezochte getallen te bepalen.

De sluitende fysische benadering, zonder onduidelijke of locatie-specifieke coëfficiënten, maakt het model geschikt voor toepassing op allerlei schutsluizen. De twee aannames gedaan voor de Volkerak-sluizen, namelijk het lineaire verloop van de kolkuitwisseling het verwaarlozen van de invloed van het nivelleren, zouden in de nieuwe uitwerking moeten worden vermeden. Als dat lukt is er een zeer heldere en algemeen bruikbare formulering gevonden. Het nadeel van de iets grotere rekenkundige complexiteit is daarbij acceptabel.

D Uitwerking van de vergelijkingen van de zeesluisformulering

Memo

Aan
RWS-WVL

Datum
1 juni 2018
Van
Otto Weiler

Kenmerk
11200741-000-HYE-0004
Doorkiesnummer
+31(0)88 335 8358

Aantal pagina's
31
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.

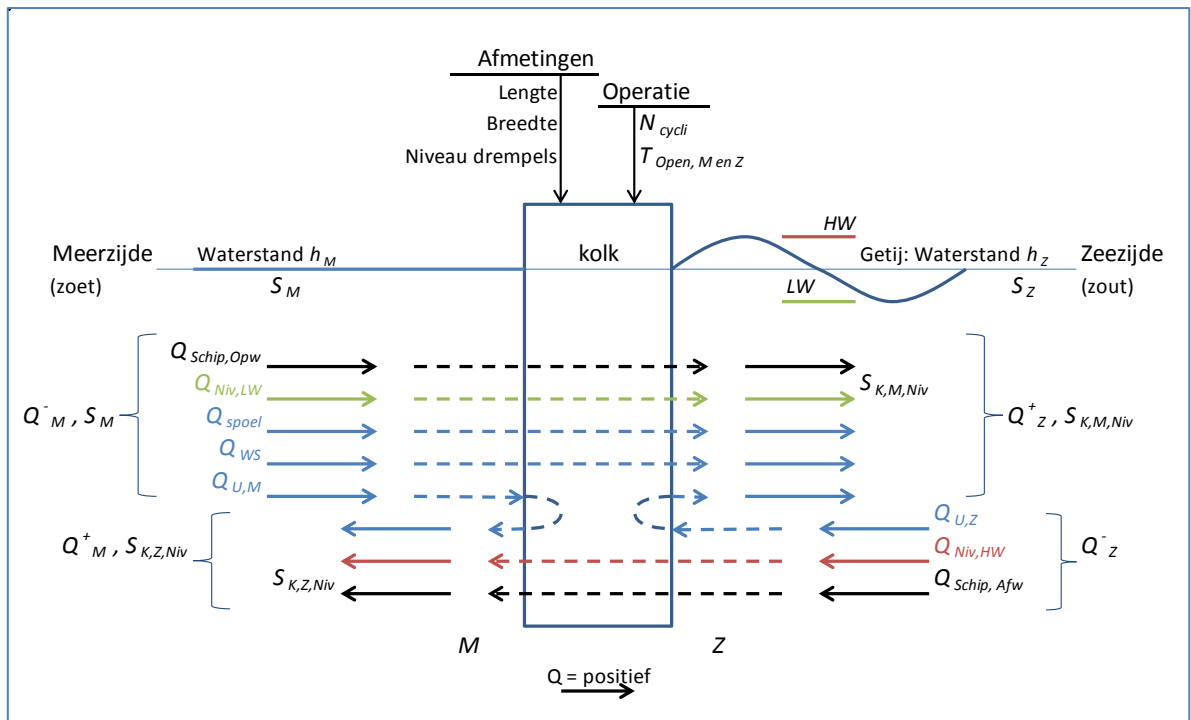
Als fundament voor deze zeesluisformulering beschrijft dit document de afleiding van een set van vergelijkingen die tezamen een complete beschrijving geven van de transporten die optreden door de operatie van een schutsluis. In het bijzonder betreft dit het proces van zoutindringing door een sluis tussen 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.) Door voor elk sluishoofd per richting (in of uit) de volumes bij elkaar op te tellen worden de totale volumes gevonden per schutcyclus, met de bijbehorende saliniteiten. Door deze volumes vervolgens te delen door de tijdsduur van een complete schutcyclus worden 'cyclus-gemiddelde debieten' bepaald, elk met een bijbehorende saliniteit.

Deze debieten vormen de relatie tussen de schutsluis en de omgeving, zoals te beschrijven met een modelschematisatie van het beschouwde gebied.

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



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

1.3 Opbouw van dit document

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

Op basis hiervan worden de vergelijkingen per schutfase opgesteld (Hoofdstuk 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 acht vergelijkingen met acht onbekenden. (Een oplosmethode voor dit stelsel, inclusief niet-lineaire vergelijkingen, wordt niet uitgewerkt.)

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

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

2 Processen en definities

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

2.1 Processen in de schutcyclus

2.1.1 Nivelleren

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

2.1.2 Kolkuitwisseling

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

2.1.3 Schutoperatie

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

2.1.4 Scheepvaart

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

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

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

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

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

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

2.1.5 Maatregelen ter bestrijding van zoutindringing

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

Bellenschermen

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

Spoeldebiet

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

Waterscherm

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

2.2 Conventies

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

Deze conventie is ook aangehouden in de figuren in dit document: een positief debiet gaat van links naar rechts, de bovenstroomse kant is links getekend, de zeezijde rechts. Deze keuze, ontleent aan definitie 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.

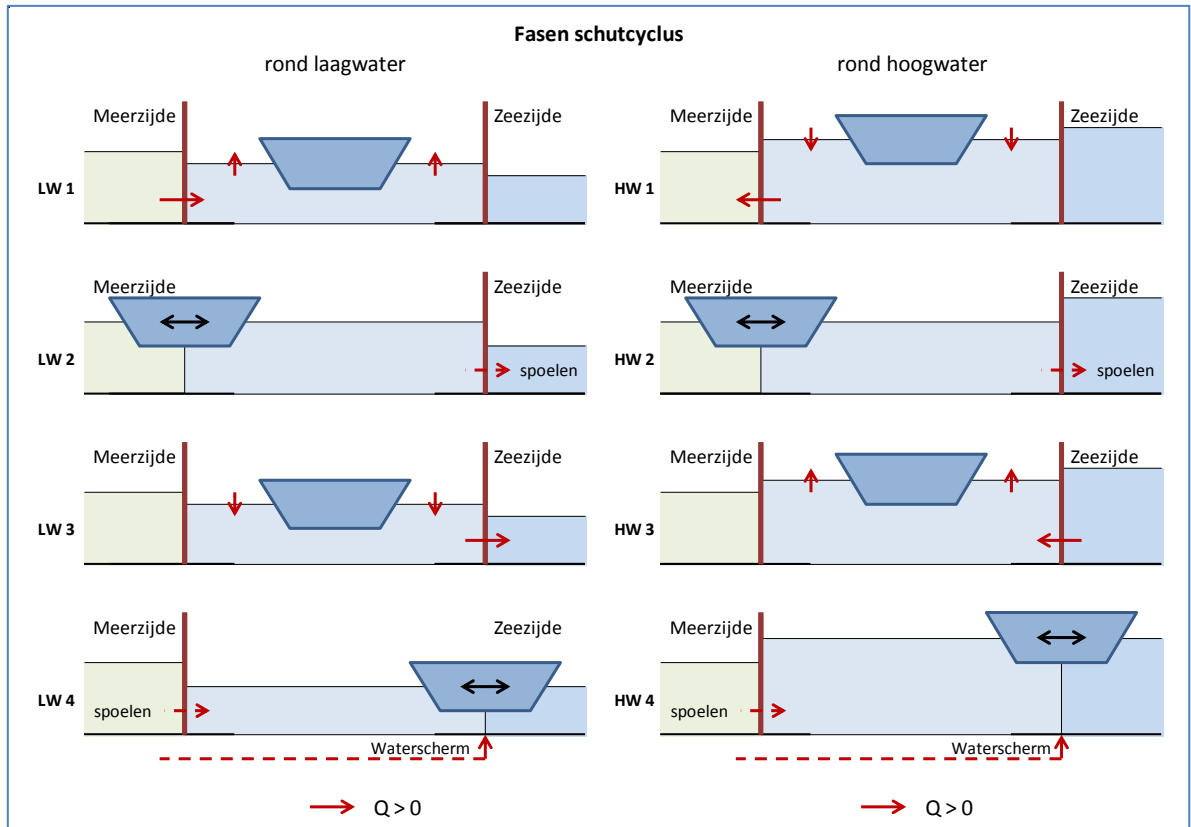
De beide zijden van de sluis zouden (logischerwijs) aan te duiden zijn als de zoute en de zoete zijde. Echter, omdat beide woorden met de letter 'Z' beginnen is dat niet handig. In aansluiting op eerdere studies, waarbij de zoete zijde een meer was, is gekozen voor de benaming 'Zeezijde' en 'Meerzijde'. 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 definitie 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 de sluis in $[\text{kg}/\text{m}^3]$, deze waarden zijn i.h.a. beschikbaar in een netwerkmodel, of anders (in geval van een stand-alone applicatie) te berekenen o.b.v. saliniteit en temperatuur: T_M en T_Z

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 $[\text{m}^3]$, 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];
default: 24 uur (conservatief)

N_{Cycli} : 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 sluiskolk [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]

$$T_{Open, M} = c_{M/Gem} T_{Open} \quad (9)$$

$$T_{Open, Z} = (2 - c_{M/Gem}) T_{Open}$$

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;
Ws : door het waterscherm

2.5 Berekening verplaatste volumes

2.5.1 Nivelleervolume

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

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

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

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

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.

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

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

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

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

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.

2.5.3 Maatregelen ter beperking van de zoutindringing

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:

$$V_U = V_{K,eff} U = V_{K,eff} \tanh\left(\frac{\eta T_{Open}}{T_{LE}}\right) \quad (15)$$

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.

Spoeldebiet

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

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

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

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:

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

Waterscherm

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

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

2.6 Overzicht van de invoer

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

$$h_M, h_Z, S_M, S_Z, \bar{\rho}$$

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):

$$\text{Constant in de tijd: } L_K, B_K, z_K$$

Operatie en scheepvaart

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

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} , $C_{\text{M/Gem}}$, $V_{\text{Schip,Opw}}$ en $V_{\text{Schip,Afw}}$ tijdsafhankelijke parameters moeten zijn.

Maatregelen

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

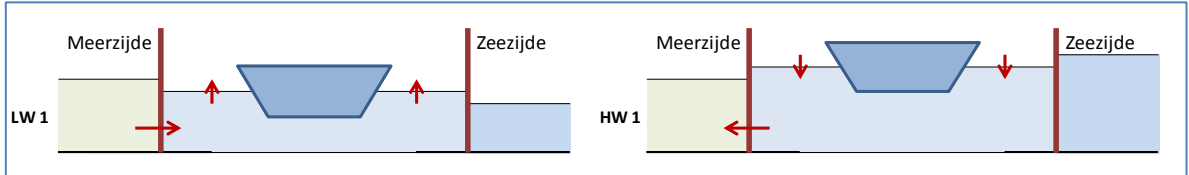
3 Vergelijkingen per schutfase

Hieronder worden per fase van de schutcyclus vergelijkingen opgesteld voor het massatransport 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:

$$LW : M_{M,LW1} = V_{Niv,LW} S_M \quad (20)$$

Idem bij HW:

$$HW : M_{M,HW1} = -V_{Niv,HW} S_{K,Z} \quad (21)$$

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:

$$M_{M,1} = V_{Niv,LW} S_M - V_{Niv,HW} S_{K,Z} \quad (22)$$

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.

$$LW : S_{K,Z,Niv} = \frac{S_{K,Z}(V_{K,Z} - V_{Schip,Opw}) + S_M V_{Niv,LW}}{V_{K,M} - V_{Schip,Opw}} \quad (23)$$

Datum
1 juni 2018

Ons kenmerk
11200741-000-HYE-0004

Pagina
14/31

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:

$$HW : S_{K,Z,Niv} = S_{K,Z} \quad (24)$$

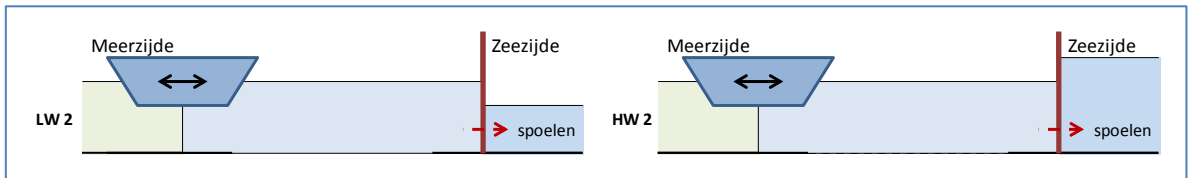
Hiermee mogen we vergelijking (22) ook schrijven als:

$$M_{M,1} = V_{Niv,LW} S_M - V_{Niv,HW} S_{K,Z,Niv} \quad (25)$$

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

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

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



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

(1): Zouttransport door uitvaren schepen:

$$M_{M,2}(1) = V_{Schip,Opw} S_M \quad (26)$$

(2): Zouttransport door kolkuitwisseling:

$$M_{M,2}(2) = V_{U,M} S_M - V_{U,M} S_{K,Z,Niv} \quad (27)$$

(3): Zouttransport door invaren schepen:

$$M_{M,2}(3) = -V_{Schip,Afw} S_{K,Z,Niv} \quad (28)$$

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

$$M_{M,2}(4) = Q_{Spoel} T_{Open,M} S_M \quad (29)$$

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

$$M_{M,2} = (V_{Schip,Opw} + V_{U,M} + Q_{Spoel} T_{Open,M}) S_M - (V_{U,M} + V_{Schip,Afw}) S_{K,Z,Niv} \quad (30)$$

met:

$$V_{U,M} = V_{K,M,eff} \tanh\left(\frac{\eta_M T_{Open,M}}{T_{LE,M}}\right) \quad (31)$$

waarin:

$$T_{LE,M} = \frac{4L_K}{\sqrt{g \frac{0,8(S_{K,Z,Niv} - S_M)}{\bar{\rho}} H_{M,eff}}} \quad (32)$$

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

$$M_{Z,2} = Q_{Spoel} T_{Open,M} S_{K,Z,Niv} \quad (33)$$

N.B.:

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

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

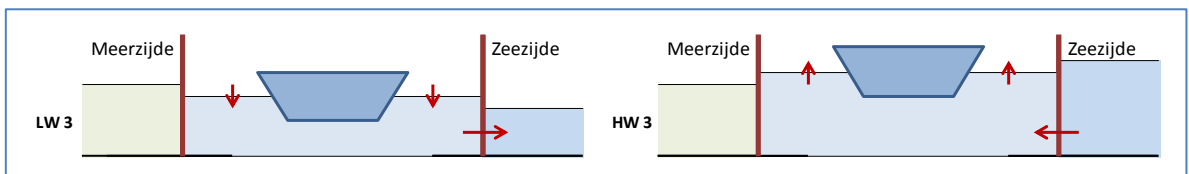
Aan het einde van deze fase is het zoutgehalte in de kolk gelijk aan $S_{K,M}$. In deze fase zijn er een aantal transporten geweest, de kolk in en de kolk uit. Samen met de beginconditie, met een zoutgehalte gelijk aan $S_{K,Z,Niv}$, bepalen die transporten de hoeveelheid zout in de kolk aan het eind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

$$\begin{aligned} S_{K,M}(V_{K,M} - V_{Schip,Afw}) &= S_{K,Z,Niv}(V_{K,M} - V_{Schip,Opw}) + M_{in} - M_{uit} \\ M_{in} = M_{M,2} &= (V_{Schip,Opw} + V_{U,M} + Q_{Spoel} T_{Open,M}) S_M - (V_{U,M} + V_{Schip,Afw}) S_{K,Z,Niv} \\ M_{uit} = M_{Z,2} &= Q_{Spoel} T_{Open,M} S_{K,Z,Niv} \end{aligned} \quad (34)$$

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

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:

$$M_{Z,3} = V_{Niv,LW} S_{K,M} - V_{Niv,HW} S_Z \quad (35)$$

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:

$$LW : S_{K,M,Niv} = S_{K,M} \quad (36)$$

Hiermee mogen we vergelijking (35) ook schrijven als:

$$M_{Z,3} = V_{Niv,LW} S_{K,M,Niv} - V_{Niv,HW} S_Z \quad (37)$$

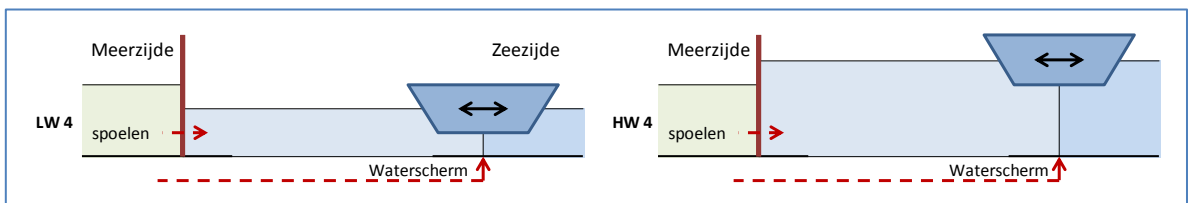
In de fase van HW wordt de saliniteit in de kolk beïnvloed door het instromen van water met een ander (hoger) zoutgehalte. Er ontstaat dus een andere gemiddelde saliniteit in de kolk, en bij het bepalen daarvan kunnen we rekening houden met een in de kolk aanwezig volume aan schepen.

$$HW : S_{K,M,Niv} = \frac{S_{K,M} (V_{K,M} - V_{Schip,Afw}) + S_Z V_{Niv,HW}}{V_{K,Z} - V_{Schip,Afw}} \quad (38)$$

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

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

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



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

(1): Zouttransport door uitvaren schepen:

$$M_{Z,4}(1) = -V_{Schip,Afw} S_Z \quad (39)$$

(2): Zouttransport door kolkuitwisseling:

$$M_{Z,4}(2) = V_{U,Z} S_{K,M,Niv} - V_{U,Z} S_Z \quad (40)$$

(3): Zouttransport door invaren schepen:

$$M_{Z,4}(3) = V_{Schip,Opw} S_{K,M,Niv} \quad (41)$$

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

$$M_{Z,LW4}(4) = Q_{Spoel} T_{Open,Z} S_{K,M,Niv} \quad (42)$$

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

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

$$M_{Z,4}(5) = Q_{Ws} T_{Open,Z} S_{K,M,Niv} \quad (43)$$

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

$$M_{Z,4} = (V_{U,Z} + V_{Schip,Opw} + (Q_{Spoel} + Q_{Ws}) T_{Open,Z}) S_{K,M,Niv} - (V_{Schip,Afw} + V_{U,Z}) S_Z \quad (44)$$

met:

$$V_{U,Z} = V_{K,Z,eff} \tanh\left(\frac{\eta_Z T_{Open,Z}}{T_{LE,Z}}\right) \quad (45)$$

waarin:

$$T_{LE,Z} = \frac{4L_{K,eff}}{\sqrt{g \frac{0,8(S_Z - S_{K,M,Niv})}{\bar{\rho}} H_{Z,eff}}} \quad (46)$$

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

$$M_{M,4} = (Q_{Spoel} + Q_{Ws}) T_{Open,Z} S_M \quad (47)$$

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

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

$$\begin{aligned}
 S_{K,Z}(V_{K,Z} - V_{Schip,Opw}) &= S_{K,M,Niv}(V_{K,Z} - V_{Schip,Afw}) + M_{in} - M_{uit} \\
 M_{in} = M_{M,4} &= (Q_{Spoel} + Q_{Ws})T_{Open,Z}S_M \\
 M_{uit} = M_{Z,4} &= (V_{U,Z} + V_{Schip,Opw} + (Q_{Spoel} + Q_{Ws})T_{Open,Z})S_{K,M,Niv} - (V_{Schip,Afw} + V_{U,Z})S_Z
 \end{aligned}
 \tag{48}$$

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

4 De cyclus-gemiddelde debieten en saliniteiten

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

4.1 Meerzijde

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

$$M_M = M_{M,1} + M_{M,2} + M_{M,4} \quad (49)$$

met

$$M_{M,1} = V_{Niv,LW} S_M - V_{Niv,HW} S_{K,Z,Niv} \quad (50)$$

en

$$M_{M,2} = (V_{Schip,Opw} + V_{U,M} + Q_{Spoel} T_{Open,M}) S_M - (V_{U,M} + V_{Schip,Afw}) S_{K,Z,Niv} \quad (51)$$

en

$$M_{M,4} = (Q_{Spoel} + Q_{Ws}) T_{Open,Z} S_M \quad (52)$$

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

$$M_M = (V_{Niv,LW} + V_{Schip,Opw} + V_{U,M} + V_{Spoel} + V_{Ws}) S_M - (V_{Niv,HW} + V_{U,M} + V_{Schip,Afw}) S_{K,Z,Niv} \quad (53)$$

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

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

Vergelijking (53) drukt het totale transport per schutcyclus uit in twee debieten met elk een zoutgehalte; het zijn de twee termen in de vergelijking:

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

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

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

$$Q_M^- = \frac{(V_{Niv,LW} + V_{Schip,Opw} + V_{U,M} + V_{Spoel} + V_{Ws})}{T_{Cyclus}} \quad (54)$$

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

$$Q_M^+ = \frac{(V_{Niv,HW} + V_{U,M} + V_{Schip,Afw})}{T_{Cyclus}}; S = S_{K,Z,Niv} \quad (55)$$

In het geval van een stand-alone toepassing, maar ook ter vergelijking met andere uitdrukkingen voor het zouttransport, kan het zinnig zijn het zouttransport ook uit te drukken in een netto massa-flux van zout. Deze kan eenvoudig worden bepaald door het transport, formule (53), te delen door de tijd voor een complete schutcyclus:

$$\dot{M}_M = \frac{M_M}{T_{Cyclus}} \quad (56)$$

4.2 Zeezijde

De gecombineerde vergelijking voor de Zeezijde is:

$$M_Z = M_{Z,2} + M_{Z,3} + M_{Z,4} \quad (57)$$

met:

$$M_{Z,2} = Q_{Spoel} T_{Open,M} S_{K,Z,Niv} \quad (58)$$

en:

$$M_{Z,3} = V_{Niv,LW} S_{K,M,Niv} - V_{Niv,HW} S_Z \quad (59)$$

en:

$$M_{Z,4} = (V_{U,Z} + V_{Schip,Opw} + (Q_{Spoel} + Q_{Ws}) T_{Open,Z}) S_{K,M,Niv} - (V_{Schip,Afw} + V_{U,Z}) S_Z \quad (60)$$

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

$$M_Z = (V_{Niv,LW} + V_{U,Z} + V_{Schip,Opw} + V_{Spoel} + V_{Ws}) S_{K,M,Niv} - (V_{Niv,HW} + V_{Schip,Afw} + V_{U,Z}) S_Z \quad (61)$$

Opnieuw worden er een aantal volumes bij elkaar opgeteld die allemaal de kolk uitstromen, maar samen groter zouden kunnen zijn dan het volume van de kolk. Net als beschreven voor vergelijking (53) vormt de combinatie van nivelleren en kolk-uitwisseling geen gevaar. De andere termen, gerelateerd aan het opwaarts varende schip, het spoeldebiet en het debiet van het waterscherm, zouden er wel toe kunnen leiden dat het totale volume dat de kolk uit stroomt groter wordt dan het volume van de kolk. Zoals gezegd, een oplossing hiervoor is niet meteen

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

Vergelijking (61) drukt het totale transport per schutcyclus weer uit in twee debieten met elk een zoutgehalte; het zijn de twee termen in de vergelijking:

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

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

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

$$Q_Z^+ = \frac{(V_{Niv,LW} + V_{U,Z} + V_{Schip,Opw} + V_{Spoel} + V_{Ws})}{T_{Cyclus}}; S = S_{K,M,Niv} \quad (62)$$

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

$$Q_Z^- = \frac{(V_{Niv,HW} + V_{Schip,Afw} + V_{U,Z})}{T_{Cyclus}} \quad (63)$$

De netto massa-flux van zout kan weer eenvoudig worden bepaald door het transport, formule (61), te delen door de tijd voor een complete schutcyclus:

$$\dot{M}_Z = \frac{M_Z}{T_{Cyclus}} \quad (64)$$

5 Rekenkundige aanpak

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 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 acht vergelijkingen met acht onbekenden opleveren. Het oplossen van dit stelsel levert dan de onbekenden die nodig zijn voor het berekenen van de cyclus-gemiddelde debieten en de bijbehorende saliniteiten.

5.1 Iteratief doorrekenen van de schutcyclus

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

5.2 Stelsel van vergelijkingen

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

Datum
1 juni 2018

Ons kenmerk
11200741-000-HYE-0004

Pagina
23/31

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

Meerzijde:

1) voor onbekende M_M : vergelijking (53):

$$M_M = (V_{Niv,LW} + V_{Schip,Opw} + V_{U,M} + V_{Spoel} + V_{Ws})S_M - (V_{Niv,HW} + V_{U,M} + V_{Schip,Afw})S_{K,Z,Niv} \quad (65)$$

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

2) voor $V_{U,M}$: vergelijkingen (31) en (32):

$$V_{U,M} = V_{K,M,eff} \tanh\left(\frac{\eta_M T_{Open,M}}{T_{LE,M}}\right) \quad (66)$$

met:

$$T_{LE,M} = \frac{4L_K}{\sqrt{g \frac{0,8(S_{K,Z,Niv} - S_M)}{\bar{\rho}} H_{M,eff}}} \quad (67)$$

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

3) voor $S_{K,Z,Niv}$: vergelijkingen (23) of (24):

$$LW : S_{K,Z,Niv} = \frac{S_{K,Z}(V_{K,Z} - V_{Schip,Opw}) + S_M V_{Niv,LW}}{V_{K,M} - V_{Schip,Opw}} \quad (68)$$

of:

$$HW : S_{K,Z,Niv} = S_{K,Z} \quad (69)$$

Met onbekenden: $S_{K,Z}$

4) voor $S_{K,Z}$: vergelijking (48):

$$\begin{aligned} S_{K,Z}(V_{K,Z} - V_{Schip,Opw}) &= S_{K,M,Niv}(V_{K,Z} - V_{Schip,Afw}) + M_{in} - M_{uit} \\ M_{in} = M_{M,4} &= (Q_{Spoel} + Q_{Ws})T_{Open,Z}S_M \\ M_{uit} = M_{Z,4} &= (V_{U,Z} + V_{Schip,Opw} + (Q_{Spoel} + Q_{Ws})T_{Open,Z})S_{K,M,Niv} - (V_{Schip,Afw} + V_{U,Z})S_Z \end{aligned} \quad (70)$$

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

De laatste twee onbekenden brengen ons naar de Zeezijde:

5) voor onbekende M_Z : vergelijking (61):

$$M_Z = (V_{Niv,LW} + V_{U,Z} + V_{Schip,Opw} + V_{Spoel} + V_{Ws})S_{K,M,Niv} - (V_{Niv,HW} + V_{Schip,Afw} + V_{U,Z})S_Z \quad (71)$$

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

6) voor $V_{U,Z}$ en $S_{K,M,Niv}$: vergelijking (45) met (46):

$$V_{U,Z} = V_{K,Z,eff} \tanh\left(\frac{\eta_Z T_{Open,Z}}{T_{LE,Z}}\right) \quad (72)$$

met:

$$T_{LE,Z} = \frac{4L_{K,eff}}{\sqrt{g \frac{0,8(S_Z - S_{K,M,Niv})}{\bar{\rho}} H_{Z,eff}}} \quad (73)$$

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

7) voor $S_{K,M,Niv}$: vergelijking (36) of (38):

$$LW : S_{K,M,Niv} = S_{K,M} \quad (74)$$

of:

$$HW : S_{K,M,Niv} = \frac{S_{K,M}(V_{K,M} - V_{Schip,Afw}) + S_Z V_{Niv,HW}}{V_{K,Z} - V_{Schip,Afw}} \quad (75)$$

Met onbekenden: $S_{K,M}$

8) en tenslotte, voor $S_{K,M}$: vergelijking (34):

$$\begin{aligned} S_{K,M}(V_{K,M} - V_{Schip,Afw}) &= S_{K,Z,Niv}(V_{K,M} - V_{Schip,Opw}) + M_{in} - M_{uit} \\ M_{in} = M_{M,2} &= (V_{Schip,Opw} + V_{U,M} + Q_{Spoel} T_{Open,M}) S_M - (V_{U,M} + V_{Schip,Afw}) S_{K,Z,Niv} \\ M_{uit} = M_{Z,2} &= Q_{Spoel} T_{Open,M} S_{K,Z,Niv} \end{aligned} \quad (76)$$

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

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

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

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

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

5.3 Overzicht uitvoer

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

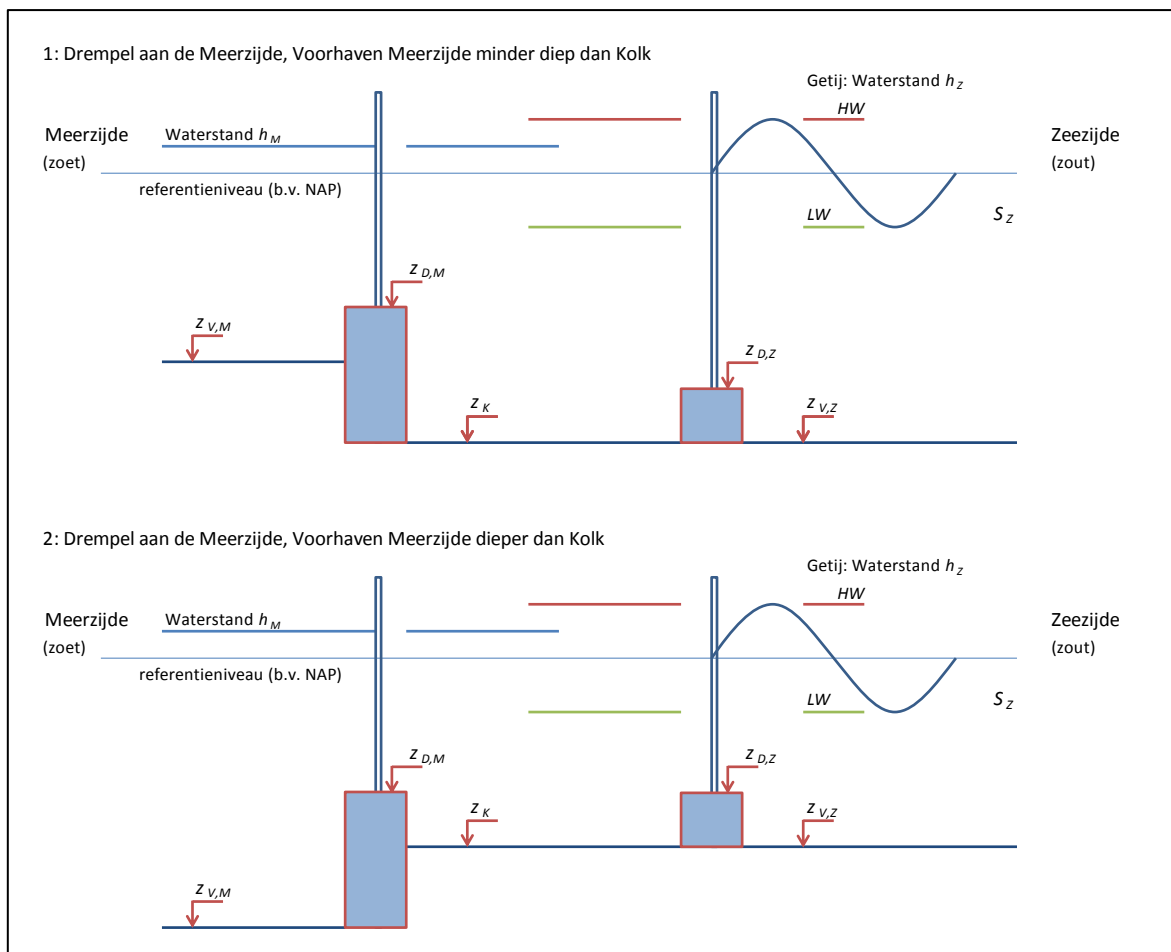
$$M_M, \dot{M}_M, Q_M^-, Q_M^+, S_{K,Z,Niv}, M_Z, \dot{M}_Z, Q_Z^-, Q_Z^+, S_{K,M,Niv}.$$

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 meerszijde 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 meerszijde

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 (32), 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:

$$H_{M,eff} = (h_M - z_{D,M}) + 0,2 \min((z_{D,M} - z_{V,M}), (z_{D,M} - z_K)) \quad (77)$$

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

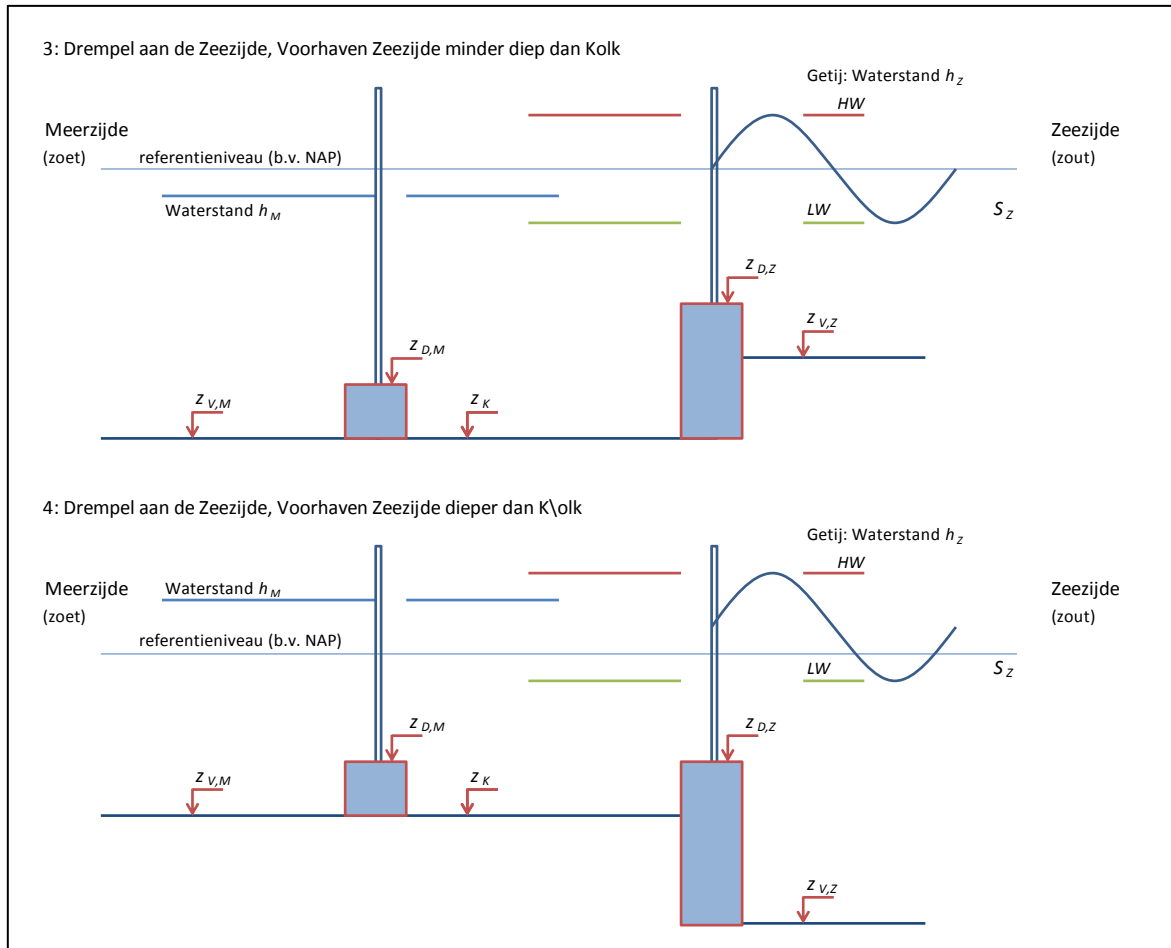
$$V_{K,M,eff} = L_K B_K H_{M,eff} \quad (78)$$

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, (31) en (32), gebruik te maken van bovenstaande vergelijkingen (77) en (78) 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:

$$H_{Z,eff} = (h_Z - z_{D,Z}) + 0,2 \min((z_{D,Z} - z_{V,Z}), (z_{D,Z} - z_K)) \quad (79)$$

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:

$$V_{K,Z,eff} = V_{K,Z} \quad (80)$$

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:

$$L_{K,eff} = L_K \frac{h_Z - z_K}{H_{Z,eff}} \quad (81)$$

Daarmee klopt dus ook het volume van de kolk:

$$V_{K,Z,eff} = L_{K,eff} B_K H_{Z,eff} = L_K \frac{H_Z}{H_{Z,eff}} B_K H_{Z,eff} = L_K B_K H_Z = V_K \quad (82)$$

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 (79) en (80) en (81) in de uitdrukkingen voor de kolkuitwisseling aan de Zeezijde, (45) en (46), wordt rekening gehouden met de invloed van drempels en verschil in bodemligging.

7 Aandachtspunten

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

7.1 Gelijktijdigheid van processen als de deur open staat

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\dot{M}_{Zouttong} = \Delta S_{Zouttong} Q_{Zouttong} = \Delta S_{Zouttong} c_{i,Zouttong} \frac{1}{2} H B \quad (83)$$

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

$$c_{i,Zouttong} = \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\bar{\rho}} H} = \frac{1}{2} \sqrt{g \frac{0,8 \Delta S_{Zouttong}}{\bar{\rho}} H} \quad (84)$$

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

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

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

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

7.3 Lozingen in de voorhaven: pulserend of continu

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

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

7.4 Voorschrijven van doorlaatfractie of luchtdebiet

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

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

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

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