

**Validatierapport WANDA-
Locks, het nieuwe
zoutlekmodel**



Validatierapport WANDA-Locks, het nieuwe zoutlekmodel

Ida de Groot - Wallast
Tjerk Vreeken

1209463-000

Titel

Validatierapport WANDA-Locks, het nieuwe zoutlekmodel

Opdrachtgever

Rijkswaterstaat WVL

Project

1209463-000

Kenmerk

1209463-000-HYE-0002

Pagina's

44

Trefwoorden

Zoutlekmodel, schutsluizen, validatie, Stevinsluizen

Samenvatting

In 2013 is de code van het Zoutlekmodel (2011) geborgd door de rekenkern beschikbaar te maken in een speciale toepassing van WANDA, het zogenaamde WANDA-Locks. De validatie van dit nieuwe WANDA-Locks model heeft in een aantal stappen plaatsgevonden.

Vier stappen van de validatie zijn in dit rapport beschreven, te weten:

- Validatie karakteristieken van het schutproces op basis van theorie.
- Validatie aan de resultaten van het oorspronkelijke Zoutlekmodel.
- Validatie aan de hand van de metingen op de Stevinsluis.
- Validatie aan de hand van de metingen op de Krammerjachtensluis.

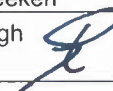
WANDA-Locks modelleert de uitwisseling van zout en zoet water als gevolg van het schutproces op een vergelijkbare manier als het oorspronkelijke Zoutlekmodel. Kleine verschillen zijn het gevolg van de extra mogelijkheden van WANDA-Locks die de werkelijkheid in meer detail kan beschrijven, zoals:

- WANDA-Locks houdt rekening met variërende zoutgehalten tijdens een schutting
- WANDA-Locks houdt rekening met een stijgende/dalende waterstand tijdens een schutting.

Daarnaast is WANDA-Locks ook in staat om rekening te houden met het spoeldebiet en de invloed hiervan op de (gereduceerde) dichtheidsgolf. Het is in staat metingen, waarbij een bellenscherm wordt gebruikt in combinatie met een spoeldebiet, goed te reproduceren.

Aanbevolen wordt de validatie van WANDA-Locks aan te vullen met alle beschikbare metingen van de Stevinsluis en Krammerjachtensluis. Ook zouden verdere (laboratorium)metingen van bepaalde processen tot aanscherpingen in de formuleringen in WANDA-Locks kunnen leiden.

Referenties

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	mrt. 2015	Ida de Groot - Wallast		Tjerk Vreeken		KlaasJan Bos	
	jan. 2016	Ida de Groot - Wallast, Tjerk Vreeken		Erik Ruijgh		KlaasJan Bos	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Doel, definities en opzet rapportage	2
3 Keuze voor WANDA	3
4 Processen in het Zoutlekmodel	4
4.1 Processen	4
4.2 Modelleren zouttransport	4
5 Beknopte toelichting opzet	6
5.1 Introductie	6
5.2 Implementatie	7
5.3 Componenten	7
5.3.1 Zoutlek (control)	7
5.3.2 Lock Chamber	9
5.3.3 BoundHz	9
5.3.4 Valve (klep)	9
5.3.5 Knopen	10
6 Validatieslag 1: Karakteristieken schutproces	11
6.1 Inleiding	11
6.1.1 Deuropeningstijden	11
6.1.2 Waterstanden	13
6.1.3 Debieten	13
6.1.4 Zoutgehaltes	15
6.2 Voorlopige conclusie	16
7 Validatieslag 2: Dynamisch zoutlekmodel	18
7.1 Inleiding	18
7.2 Gegevens	18
7.3 Uitgevoerde validatie	19
7.3.1 Resultaten validatie met constante waterstand aan zeezijde	19
7.3.2 Resultaten validatie met getij op zee	21
7.3.3 Resultaten validatie met getij op zee en bellenscherm	23
7.4 Voorlopige conclusies	23
8 Validatieslag 3: Metingen Stevinsluis	25
8.1 Inleiding	25
8.2 Opzet metingen en beschikbare data	25
8.3 Kenmerken van de metingen	26
8.3.1 Waterstanden	26
8.3.2 Deuropentijden	27
8.3.3 Zoutgehalte in de kolk	27
8.3.4 Zoutgehalte in de voorhavens	28
8.3.5 Zoutlek	28
8.4 Opzet berekeningen WANDA-Locks	29

8.5	Resultaten	29
8.6	Voorlopige conclusies	32
9	Validatieslag 4 – Metingen spoeldebiet Krammerjachtensluis	34
9.1	Inleiding	34
9.2	Opzet metingen en beschikbare data	34
9.3	Varianten modelleren spoeldebiet in WANDA-Locks i.c.m. een bellenscherm	35
9.4	Vergelijking metingen met WANDA-Locks	35
9.5	Resultaten en kanttekeningen	37
9.6	Voorlopige conclusies	38
10	Conclusie en aanbevelingen	39
10.1	Conclusies validatie	39
10.2	Aanbevelingen	39
10.3	Verbeteringen WANDA-Locks	40
 Bijlage(n)		
A	Literatuurlijst	A-1
B	Gebruikte tools validatieslag 3	B-1
C	Figuren Validatie 2 met bellenscherm	C-1

1 Inleiding

In het geval van eventuele verzilting van het Volkerak Zoommeer ontstaat bij de Volkeraksluizen een zout-zoet-overgang. Op deze overgang stelt Rijkswaterstaat een strenge eis aan de toelaatbare indringing van zout. Deltares heeft daarom een studie uitgevoerd naar de mogelijkheden om verzilting door de sluizen ter plaatse van de Volkeraksluizen tegen te gaan. In deze studie is hiervoor het zogenaamde Zoutlekmodel ontwikkeld. Het model is ontwikkeld als projectspecifieke tool en maakte geen deel van de softwarepakketten, die bij Deltares in beheer en onderhoud zijn.

Het ontwikkelde model voorspelt de grootte van de zoutlek. Met het model is het mogelijk om snel meerdere scenario's uit te rekenen en zo een uitspraak te doen over de te nemen zoutlek beperkende maatregelen. Dit model is getoetst aan de hand van de metingen die zijn uitgevoerd in de Stevinsluis begin 2010 [3].

Afgelopen jaren is gebleken dat het model ook een goed instrument is voor advisering in andere projecten. De basis van het model is vrij generiek, maar in het model zijn aanpassingen in de code nodig om het geschikt te maken voor andere projecten.

Gezien de potentiële waarde van dit model is ervoor gekozen het model in een beter onderhoudbare omgeving onder te brengen. In 2013 is het Zoutlekmodel ondergebracht in het bestaande software pakket WANDA om het gebruik te vereenvoudigen, het modelbeheer te faciliteren en te beschikken over een generieker model.

In dit rapport wordt beknopt de opzet van het model, WANDA-Locks genoemd, beschreven. Ook de validatie van dit model is in dit document vastgelegd om vast te stellen dat ook het generieke model de juiste resultaten geeft.

Naast de kern van het zoutlekmodel in WANDA-Locks, die in deze rapportage wordt gevalideerd, is er een nieuwe component ontwikkeld die gekoppeld kan worden aan WANDA-Locks. Dit is de SAD component (Sluismeester en Aansturing Duwvaartsluis). Met deze component wordt op basis van het scheepsaanbod bepaald welke handelingen de sluismeester op welk moment uitvoert om het aanbod af te handelen (Lit. [2]).

Naast dit validatierapport is er een WANDA-Locks manual beschikbaar die de modelopbouw, invoer en uitvoer beschrijft [1].

2 Doel, definities en opzet rapportage

Doel

WANDA-Locks is ontwikkeld om te beschikken over een generiek model, waarmee de zout-zoetuitwisseling tijdens het schutproces door een sluiscomplex wordt gemodelleerd. Er is voor gekozen het oorspronkelijke Zoutlekmodel, ontwikkeld voor de Volkeraksluizen, in de WANDA-omgeving onder te brengen om het gebruik te vereenvoudigen, het modelbeheer te faciliteren en te beschikken over een generieker model.

Het doel van deze rapportage is vast te leggen op welke wijze het WANDA-Locks model gevalideerd is en daarmee vast te stellen of het geschikt is om voor projecten in te zetten als generieke tool.

In dit document is vastgelegd welke validatieslagen zijn uitgevoerd en wat daaruit de conclusies zijn.

Werkwijze

Op verschillende momenten in het project zijn resultaten van oude en nieuwe berekeningen met elkaar vergeleken. Dat heeft enerzijds geleid tot aanpassingen in WANDA-Locks en anderzijds meer inzicht gegeven in de aannames en beperkingen van het oorspronkelijke Zoutlekmodel.

Om uiteindelijk met vertrouwen het nieuwe model te kunnen inzetten is een validatie uitgevoerd voor WANDA-Locks, versie 4.3 (r2191) aan de hand van prototype metingen van de Stevinsluis en Krammerjachtensluis.

Opzet rapportage

In deze rapportage wordt naar het oorspronkelijke zoutlekmodel (Lit [3]) gerefereerd met het Zoutlekmodel (ZLM). Het nieuwe model, ontwikkeld onder WANDA wordt aangeduid als WANDA-Locks.

De rapportage geeft eerst enige achtergrondinformatie over WANDA-Locks teneinde de uitgevoerde validatie in perspectief te kunnen plaatsen. In Hoofdstuk 3 zijn de overwegingen beschreven om te kiezen voor de omgeving van WANDA. Hoofdstuk 4 beschrijft de processen, die in het model worden meegenomen. Dan volgt in Hoofdstuk 5 een beknopte handleiding van WANDA-Locks.

De validatie is in vier stappen uitgevoerd:

- 1 Validatie karakteristieken schutproces (Hoofdstuk 6)
- 2 Validatie dynamisch zoutlekmodel (Hoofdstuk 7)
- 3 Validatie metingen Stevinsluis (Hoofdstuk 8)
- 4 Validatie spoeldebiet a.d.h.v. metingen Krammerjachtensluis (Hoofdstuk 9)

In het laatste hoofdstuk worden de resultaten van de validatie samengevat en worden aanbevelingen voor aanvullende validatie van WANDA-Locks gedaan.

3 Keuze voor WANDA

Om een generieke en eenduidige berekeningsmethode voor de zoutlek bij sluizen te verkrijgen is ervoor gekozen het oorspronkelijke Zoutlekmodel (Lit. [3]) in het bestaande software pakket WANDA in te bouwen. WANDA is een softwarepakket dat al jaren bij Deltares ontwikkeld wordt. Versiebeheer, bestandsstructuur en grafische interface zijn daarmee geregeld. WANDA-Locks kan gebruik maken van deze bestaande structuren.

WANDA is een 1-Dimensionaal programma, waarmee de stroming in pijpleidingen en toebehoren nauwkeurig kan worden uitgerekend. Hoewel de uitwisselingsstroming die de zoutlek bij sluizen veroorzaakt in zichzelf een sterk driedimensionaal karakter heeft, is gekozen voor de eendimensionale programmacode WANDA als basis voor het generieke zoutlekmodel. Op deze manier staat de huidige implementatie dicht bij de oorspronkelijk ontwikkelde versie van het 1- Dimensionale Zoutlekmodel.

Binnen WANDA zijn reeds allerhande hydraulische componenten aanwezig die flexibel zijn in te zetten en nauwkeurig de hydraulica kunnen berekenen. Voor het berekenen van sluizen, voorhavens en dergelijke dienen de afmetingen te worden gevangen met parameters zoals eenduidige oppervlaktes en dieptes. De verschillende onderdelen worden vervolgens middels hydraulische verbindingen aan elkaar gekoppeld.

Voor de ontwikkeling van WANDA-Locks is WANDA-Heat als basis gebruikt. In plaats van warmte wordt zout getransporteerd. WANDA-Locks berekent op basis van de saliniteit de druk in de hydraulische verbindingen. Bij een drukverschil berekent WANDA-Locks de bijbehorende debiet/stroming zodat er steeds drukevenwicht heerst op de hoogte (elevatie) van de hydraulische verbindingen. Een drukevenwicht in een hydraulische verbinding komt echter niet altijd overeen met een gelijke waterstand. Enerzijds omdat deze verbindingen niet aan het wateroppervlak (hoeven te) liggen en anderzijds omdat de saliniteiten in bijbehorende componenten niet gelijk (hoeven te) zijn.

Voor de modellering van de dichtheidsstroming, een driedimensionaal verschijnsel, is een aparte module ontwikkeld die de 3D effecten van de deze stroming in het 1D model WANDA weergeeft.

Van het oorspronkelijke Zoutlekmodel zijn twee varianten beschikbaar: een stationaire en een dynamische variant. Het stationaire zoutlekmodel berekent de zoutlek als de waterstanden aan weerszijde van de kolk constant zijn. In het stationaire zoutlekmodel convergeren de berekeningen naar een evenwichtstoestand. Het dynamische zoutlekmodel berekent de zoutlek over meerdere schuttingen bij een veranderende waterstand (door bijvoorbeeld het getij). Het dynamische zoutlekmodel is getoetst aan de hand van metingen die hebben plaatsgevonden in de Stevinsluis. Deze dynamische versie van het zoutlekmodel is geïmplementeerd in WANDA. De rekenkern van beide modellen is gebaseerd op dezelfde theorie.

4 Processen in het Zoutlekmodel

4.1 Processen

Op een zout-zoetinterface worden zout en zoet water met elkaar uitgewisseld zodra de wateren aan weerszijde van de interface met elkaar in aanraking komen. Deze uitwisseling vindt plaats door zowel barotroop als baroclien transport.

Barotroop transport

Indien de sluisdeuren openen ontstaat als gevolg van het verschil in dichtheid tussen het water in en buiten de kolk een dichtheidsstroming. Deze wordt aangedreven door de dichtheidsverschillen die bestaan tussen het zoute water van de voorhaven en de zoete kolk (of andersom). Doordat zoutwater zwaarder is dan zoetwater ontstaat er een drukverschil dat ervoor zorgt dat, als de deuren opengaan, er een zoute tong over (ongeveer) de halve kolkdiepte vanaf de bodem de kolk in stroomt. Tegelijkertijd ontstaat er een zoetwatertong over de bovenste halve diepte die in tegengestelde richting de kolk uit stroomt. Dit proces wordt ook wel aangeduid als Lock-Exchange en zorgt ervoor dat een kolk die zoet is voor de opening van de sluisdeuren naar een zoute voorhaven, zouter wordt tot de deuren weer zijn gesloten. Als er vervolgens met de zoute kolk weer wordt terug geschut naar de zoete voorhaven treden dezelfde processen op en stroomt zout water (de zouttong) het zoete water in.

Baroclien transport

Naast deze dichtheidsstroming wordt ook zout getransporteerd met de stroming van het water mee. Dit kan zijn via de debieten door de spuisluisen, maar ook door de schuttschijf (nivelleerdebiet) en/of via de waterschermen. Tot slot nemen varende schepen zout of zoet water mee. Dit transport wordt ook wel aangeduid als advectief zouttransport.

4.2 Modelleren zouttransport

Zowel het oorspronkelijke Zoutlekmodel als WANDA-Locks modelleert de zouttransporten van de verschillende genoemde processen en berekent de resulterende zoutlek.

De invloed van zoutlek beperkende middelen is meegenomen in het model evenals de (variërende) waterstanden aan weerszijden van de sluis en het aantal schuttingen.

Het model is in feite een boekhoudkundig model waarbij de totale zoutlek is opgesplitst in verschillende zouttransporten. Deze zouttransporten worden berekend aan de hand van debieten die vermenigvuldigd worden met de saliniteit. Deze debieten zijn:

- Spoeldebiet
- Nivelleerdebiet
- Spuidebiet
- Waterschermdebiet
- Debiet veroorzaakt door scheepsvaart¹
- Lock-Exchange debiet

Van al deze debieten vormt het Lock-Exchange debiet een belangrijk aandeel in de totale zoutlek. Dit debiet wordt bepaald door de waterstanden aan weerszijden van de kolk, de

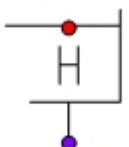
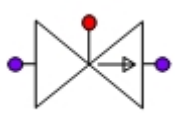
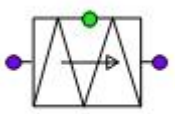
¹ Dit proces is nog niet opgenomen in WANDA-Locks

zoutgehaltes in de voorhavens, de deuropeningstijd en de inzet van zoutlekbeperkende middelen. Deze parameters bepalen de snelheid waarmee de zouttong de sluis inloopt en de deuropentijd bepaalt de afstand die de tong daadwerkelijk ad heeft kunnen leggen en daarmee het getransporteerde zout.

5 Beknopte toelichting opzet

5.1 Introductie

Er is een uitgebreide toelichting op de WANDA-Locks componenten beschikbaar in de WANDA-Locks manual (Lit. [1]). Hier wordt volstaan met een korte beschrijving van de zoutlek componenten en de functionaliteit die momenteel beschikbaar is:

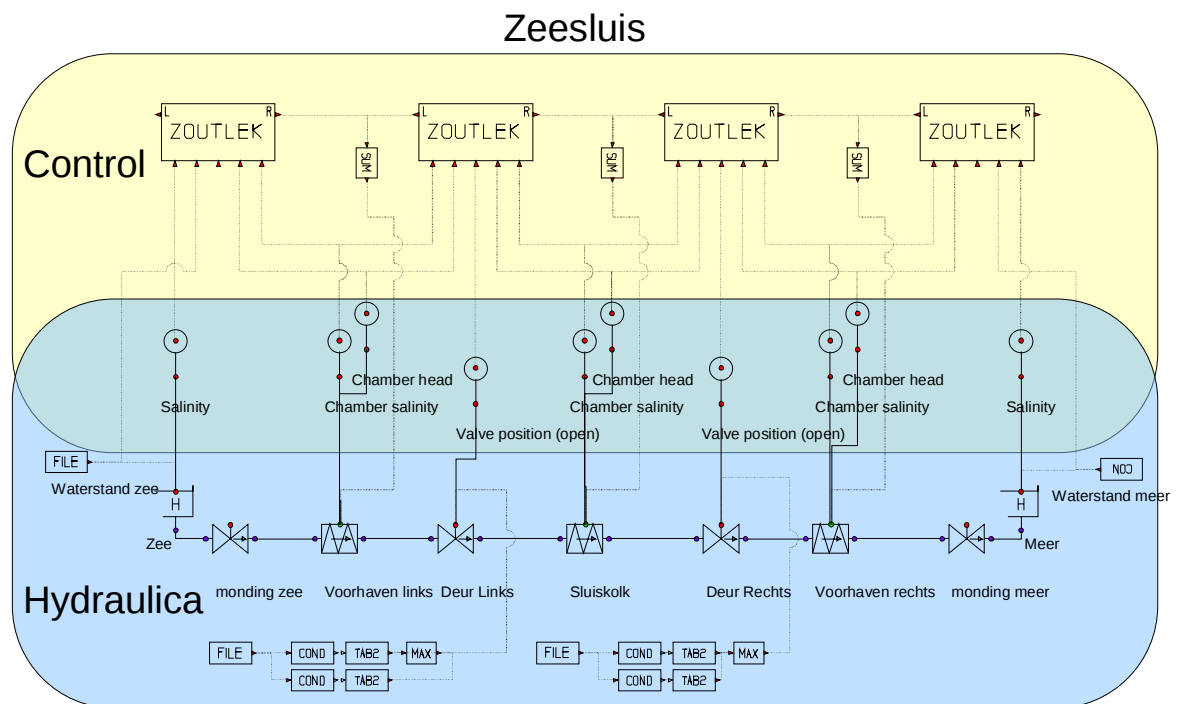
Type	Symbol	Korte beschrijving
Randvoorwaarde		Schrijft waterstand en saliniteit voor
Klep / Deur		Kan worden gebruikt voor modellering van: - Klep in een pijpleiding - Sluisdeur - Monding van een voorhaven
Sluiskolk		Model van de sluiskolk met in de tijd variërende waterstand en saliniteit.
Zoutlek		Control component om het barotroop zouttransport (t.g.v. uitwisselingsstroming zonder netto debiet) te berekenen.

Figuur 4.1 Beschrijving elementen WANDA-Locks

Een typisch WANDA-Locks-model van een zeesluis bevat naast de sluiskolk twee voorhavens (binnen- en buitenvoorhaven) die met dezelfde type component worden gemodelleerd. De voorhavens zijn op hun beurt gekoppeld aan de waterstanden op de zee / het meer met bijbehorende saliniteit. De dichtheidsstroming vindt plaats ter plaatse van de sluisdeuren (tussen kolk en voorhavens) en ter plaatse van de monding van de voorhavens (tussen voorhavens en zee/meer).

Elke zoutlek-component krijgt als input de signalen van saliniteit en waterstand (head) van de componenten links en rechts van de uitwisselings-locatie (zee/meer, voorhaven of sluiskolk). Daarnaast kan het signaal van een klepstand worden ingevoerd zodat de uitwisselingsstroming pas begint wanneer de sluisdeur open gaat. Als uitvoer wordt het zouttransport gegeven, die weer als invoer op de componenten (zee/meer, voorhaven of sluiskolk) dient.

Al met al ziet een zeesluis er in WANDA-Locks mogelijk als volgt uit:



Figuur 4.2 Schematisatie schutcomplex met WANDA-Locks; een voorbeeld

5.2 Implementatie

WANDA-Locks is gebaseerd op WANDA-Heat en rekt daarom in druk en niet in waterstanden (head), zoals WANDA-Liquid. Voor de relatie tussen zoutgehalte (saliniteit) en dichtheid kan gekozen worden voor verschillende conversiemethoden (bijv. Eckard, Unesco).

Voor de berekeningen wordt uitgegaan van een constante (op te geven) temperatuur. WANDA-Locks toont de saliniteit in [psu], maar het rekenhart berekent het zouttransport op basis van $[\text{kg}/\text{m}^3]$.

5.3 Componenten

5.3.1 Zoutlek (control)

De control-component “Zoutlek²” berekent de uitwisselingsstroming van zoet/zoutwater bij geopende sluisdeur (barotroop transport) ten gevolge van de optredende dichtheidsgolf (verschil in dichtheid tussen zoet en zout water). De waarde van deze uitwisselingsstroming hangt af van de initiële toestand op het moment van openen van de sluisdeur:

- Het verschil in zoutgehalte (saliniteit).
- De waterstand boven de drempel of diepte van monding voorhaven.

De waarden voor bovenstaande variabelen worden vastgelegd op een bepaald stroming door de schuiven). De theoretische uitgangspunten hiervoor zijn:

- Het specifiek debiet (per meter breedte sluishoofd): $q = hU [\text{m}^2 / \text{s}]$

² Ten tijde van het opzetten van WANDA-Locks is deze component Zoutlek genoemd. Zie ook Figuur 4.2. In de laatste versie van WANDA-Locks heet deze component Lock Exchange.

- Het interne Froude-getal: $Fr = \frac{U}{\sqrt{g'H}}$; $g' = \frac{\rho_+ - \rho_-}{\frac{1}{2}(\rho_+ + \rho_-)} g$

Dit leidt tot een uitdrukking voor de initiële massaflux van zout volgens:

$$\dot{M}_0 = \eta \left\{ \frac{h}{H} Fr \right\} \phi W . H . \sqrt{g'H} . \Delta S \text{ [kg / s]}$$

Waarin de termen tussen {...} theoretisch bekend zijn, zie bv. (Shin e.a., 2004), afhankelijk van de mate van energiebehoud. De andere variabelen zijn als volgt gedefinieerd:

- η : Efficiëntie-parameter:
 - o 1.0 voor situaties zonder zoutlekbeperkende middelen
 - o 0.25 voor een optimaal luchtbellenscherm
 - o 0.15 voor een optimaal lucht-waterscherm
- ϕ : Effectieve openingsstand van de deur (0.0 bij aanvang uitwisselingsstroming, 1.0 bij volledige opening).
- W : Breedte van het sluishoofd;
- H : Effectieve diepte van het sluishoofd. Dit is de waterstand boven de drempel vermeerderd met 20% van de drempelhoogte (t.o.v. de kolkbodem);
- $\sqrt{g'H}$: Voortplantingssnelheid van de dichtheidsgolf;
- ΔS : Verschil in saliniteit.
- h : hoogte van de zouttong

In WANDA vindt de uitwisseling van de eerste helft van het kolkvolume plaats met volledig energiebehoud ($Fr = 0.5$ en $h/H = 0.5$). Daarna reflecteert de uitwisselingsstroming op de gesloten sluisdeur en wordt de uitwisseling gereduceerd tot een dichtheidsstroming met maximale dissipatie ($Fr = 0.527$ en $h/H = 0.347$). Na terugkeer bij het open sluishoofd stopt de uitwisselingsstroming en vindt enkel nog diffuus transport plaats. De “Zoutlek” component berekent het zouttransport in de vier verschillende stadia als volgt:

- State 0: Deur gesloten, geen massaflux van zout.
- State 1: De dichtheidsgolf heeft andere sluishoofd nog niet bereikt.
- State 2: De dichtheidsgolf is op de terugweg naar open sluishoofd.
- State 3: Diffuus transport.

Voor het diffuse transport (bij de monding voorhaven of bij zeer langdurige opening sluisdeur) geldt dezelfde vergelijking als hierboven voor $\dot{M}_0$ beschreven ($Fr = 0.5$, $h/H = 0.5$), maar nu worden steeds de actuele waarden voor saliniteit en waterstand gehanteerd.

Naast aanwezigheid van een bellenscherm wordt de efficiëntie van de uitwisselingsstroming ook beïnvloed door de eventuele aanwezigheid van een drempel. Dit effect is meegenomen door de hoogte waarover de uitwisselingsstroming plaats vindt (diepte boven de drempel) te vermeerderen met 20% van de hoogte van de drempel boven de kolkbodem. Deze relatie voor de “meewerkende” diepte is afgeleid uit de metingen bij de Stevinluis en is ook geïmplementeerd in het Zoutlekmodel. Deze relatie is geldig voor gangbare drempelhoogtes. Bij grotere drempelhoogtes is de relatie minder geschikt, zie ook Lit [4].

Tot slot leveren in- en uitvarende schepen ook een zekere bijdrage aan de uitwisseling van zoet- en zoutwater. Dit is in de huidige versie niet opgenomen vanwege de relatief gecompliceerde vereisten (variabele eigenschappen scheeptypes en vullingsgraad). Indien voor een project verwacht wordt dat de bijdrage van de scheepvaart aan de zoutlek substantieel is, dan kan deze functionaliteit aan WANDA-Locks worden toegevoegd.

5.3.2 Lock Chamber

Een sluiskolk of voorhaven kan worden gemodelleerd met de component “Lock Chamber”. Deze component heeft twee hydraulische connectiepunten, zodat water dat aan de éne kant instroomt volledig mengt voordat het aan de andere kant uitstroomt (bv voor modellering van spoeldebiet). In deze menging zit in het model geen traagheid.

Bij het startpunt van de simulatie schrijft deze component de waterstand en de saliniteit voor op de connectiepunten. Het is daarom niet mogelijk deze component te koppelen aan andere componenten die waterstand/druk (head/pressure) en/of saliniteit (salinity) voorschrijven.

Een additioneel zouttransport (zoutlek) in [kg/s] kan worden gemodelleerd middels het control-connectiepunt. De meest voor de hand liggende optie is de combinatie met de control-component “Zoutlek”, dat het barocliene transport berekent op basis van initiële condities bij openen van de sluisdeuren (zie paragraaf 5.3.1 “Zoutlek”).

Deze component berekent het zouttransport (salt flux) door beide connectiepunten, maar vanwege berging in de component (variërende waterstand en saliniteit) is dat niet direct te vertalen naar een gemiddeld zouttransport in de tijd. Voor de beschouwing van het gemiddeld zouttransport in de tijd kunnen andere componenten zonder berging, waar het zout ook passeert, zoals de klep en de Hz-rand gebruikt worden.

5.3.3 BoundHz

De “BoundHz” is een randvoorwaarde die de druk en saliniteit voorschrijft. De invoer wordt gegeven als waterstand en saliniteit, dit wordt omgerekend naar heersende druk op het niveau van het connectiepunt. Door middel van een actietabel of een aangesloten control signaal kan de voorgeschreven waarde voor de waterstand variëren in de tijd; ook de waarde voor saliniteit kan worden gevarieerd door middel van een tabel.

5.3.4 Valve (klep)

De sluisdeur wordt in WANDA gemodelleerd middels een klep (valve). Het gebruik van een klep geeft een aantal aandachtspunten bij het modelleren van de deur.

- Bij een horizontale deur is het doorstroomd oppervlak afhankelijk van de waterstand. Dit effect is niet opgenomen in de modellering, omdat er met betrekking tot de Q-H relatie (afvoervergelijking) wordt uitgegaan van een constant doorstroomd oppervlak (onafhankelijk van de waterstand). In het navolgende wordt dit uitgewerkt.

Vanwege de sterke variatie in dichtheden (bij WANDA-Heat is die variatie veelal kleiner en geleidelijker) dient er rekening gehouden te worden met het volgende:

- Voor de berekening van de juiste drukverschillen over de klep dienen beide connectiepunten op dezelfde hoogte te liggen.
- Twee parallelle kleppen zonder tussengelegen (andere) componenten kan leiden tot onvoorspelbare problemen zoals instabiliteit.

Indien geen (klep) karakteristieken bekend zijn, kan een afvoercoëfficiënt van 1.0 worden aangehouden en een K_v waarde worden berekend volgens de afvoervergelijking:

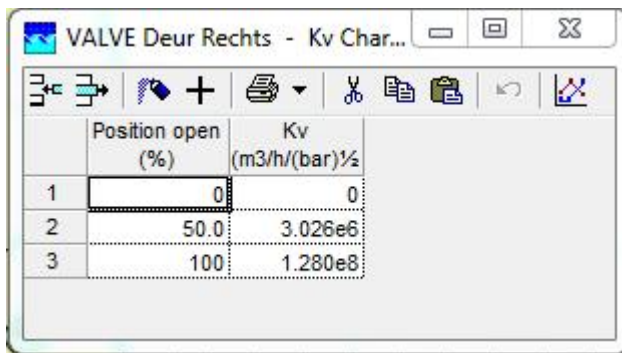
$$K_v = \frac{Q}{\sqrt{\Delta p}} = \frac{\mu A \sqrt{2g\Delta h} \cdot 3600}{\sqrt{\Delta p}} = \mu A \sqrt{\frac{2 \cdot 1000000}{\rho}} \cdot 3600$$

Waarin:

- Q : Debiet in [m³/h]

- Δp : Drukverschil over de klep in [bar]
- μ : Afvoercoëfficiënt (1.0)
- A : Doorstroomd oppervlak (m²)
- g : Gravitatieconstante (m/s²)
- ρ : Dichtheid van het doorstromend medium (kg/m³)

Met bovenstaande formule kan de (stromings)weerstand bij de sluisdeuren en rinketschuiven worden bepaald. Het is als zodanig mogelijk de weerstand van zowel rinketschuiven als sluisdeuren in één klep op te nemen, door bijvoorbeeld de K_v waarde van de volledig geopende rinketschuif overeen te laten komen met een klepstand van 0.5 en K_v waarde van de volledig geopende deur met een klepstand van 1.0 (Zie Figuur 4.3). Voor de deur hangt het doorstroomd oppervlak en daarmee de K_v waarde af van de waterstand.



	Position open (%)	Kv (m3/h/(bar)½)
1	0	0
2	50.0	3.026e6
3	100	1.280e8

Figuur 4.3 Schematisatie deur met rinketschuiven (ca 60 m²) in WANDA-Locks

Ook de monding van de voorhavens kan met een klep worden gemodelleerd, waarbij de klepstand constant op 100% wordt gehouden (overeenkomend met de K_v waarde horende bij de afmetingen van die monding).

Merk op dat er altijd een klep-component tussen een “Lock Chamber” en/of “BoundHz” aanwezig dient te zijn omdat er nooit twee componenten aan elkaar verbonden mogen zijn die beide waterstand/druk voorschrijven. Dit geldt ook met betrekking tot de saliniteit.

5.3.5 Knopen

Middels de knopen worden componenten aan elkaar verbonden. Knopen zorgen ervoor dat water / zout dat de ene component uitstroomt elders als instroom geldt. Er geldt daarom een behoud van (zout)massa en drukevenwicht op elke knoop.

6 Validatieslag 1: Karakteristieke schutproces

6.1 Inleiding

In deze 1^e validatieslag is ingezoomd op een aantal karakteristieke kenmerken van de zout-zoetuitwisseling in het schutproces van de Stevinsluis. Er is een korte simulatie opgezet om te kijken of de orde grootte van deuropentijden, debieten, waterstanden en zoutgehaltes overeen stemmen met de theoretische verwachtingen.

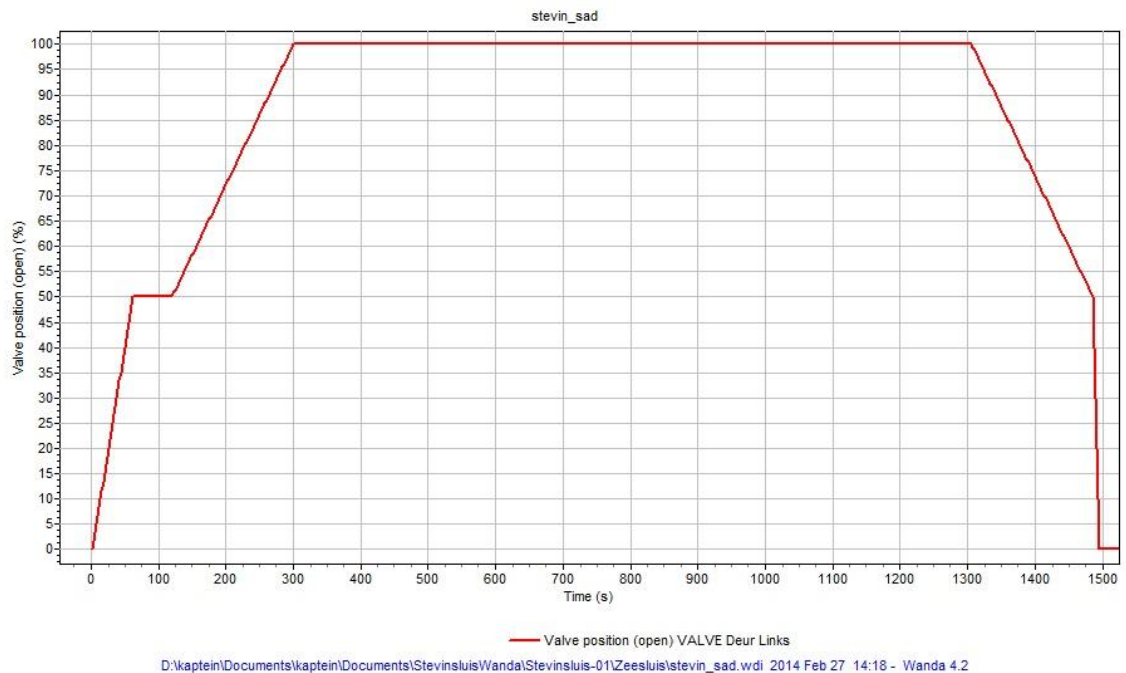
Om een goed beeld te hebben van verschillende stappen van de zout-zoetuitwisseling in de kolk is ervoor gekozen om 4 identieke schuttingen uit te voeren. Deze schuttingen beginnen met het ophalen van een schip aan de zeezijde. Vervolgens wordt er 4 keer achter elkaar gesloten en blijven beide deuren om de beurt 1000 s open. Voor deze testcase is een variërende waterstand als zoute rand opgelegd.

In deze testcase is gebruik gemaakt van de SAD-module, waarmee informatie over de aankomst van schepen en deuropentijden eenvoudig, middels een zogenaamde SIVAK-file, aan de berekening kan worden meegegeven.

6.1.1 Deuropeningstijden

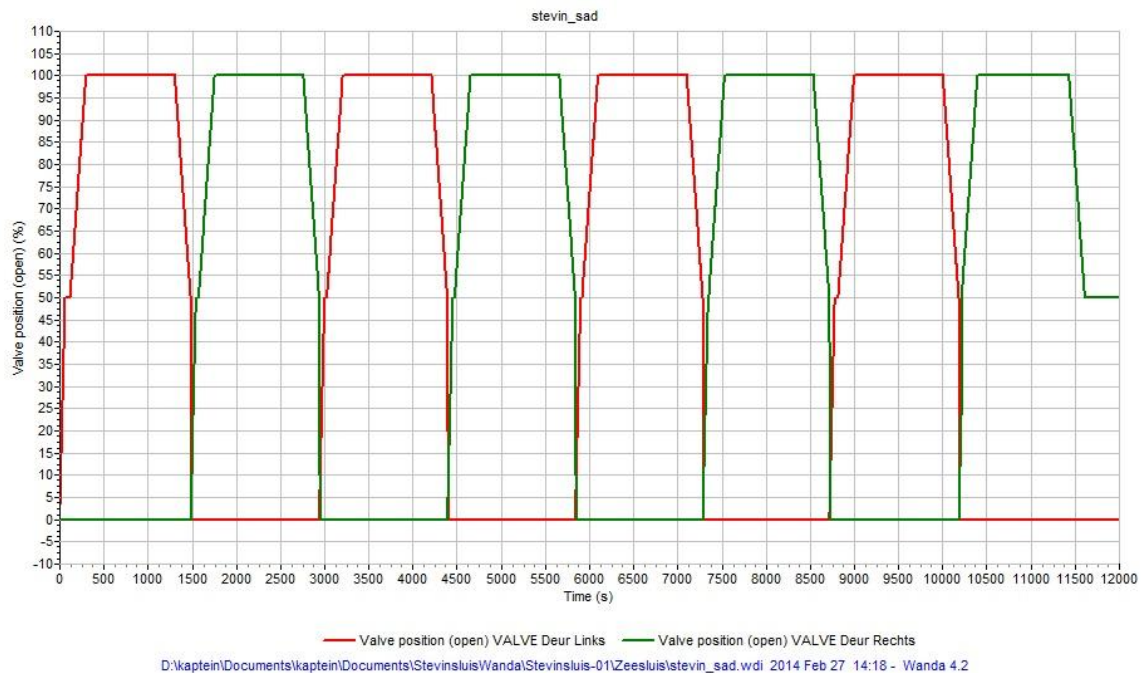
De grootte van het zouttransport dat bij de Stevinsluis plaatsvindt tussen de Waddenzee en het IJsselmeer is sterk afhankelijk van de tijd dat de kolkdeuren openstaan. Deze duur kan worden ingevoerd via de kolommen invaarduur en uitvaarduur in het SIVAK bestand. Daar is de volgende tabel ingevoerd.

#	tijdstip	invaarklaar [s]	richting	displacement [m3]	invaarduur [s]	uitvaarduur [s]
300	1	0	1000	1000		
3200	1	0	1000	1000		
6100	1	0	1000	1000		
9000	1	0	1000	1000		



Figuur 6.1 Klepstanden van de deur aan de zoute zijde

In Figuur 6.1 is te zien hoe de klepstand verandert van 'deur helemaal dicht' (0%), naar 'rinketschuif open' (50%) tot 'deur helemaal open' (100%). Het is goed te zien dat de deur na 300 s helemaal open is en dat deze gedurende 1000 s open blijft.



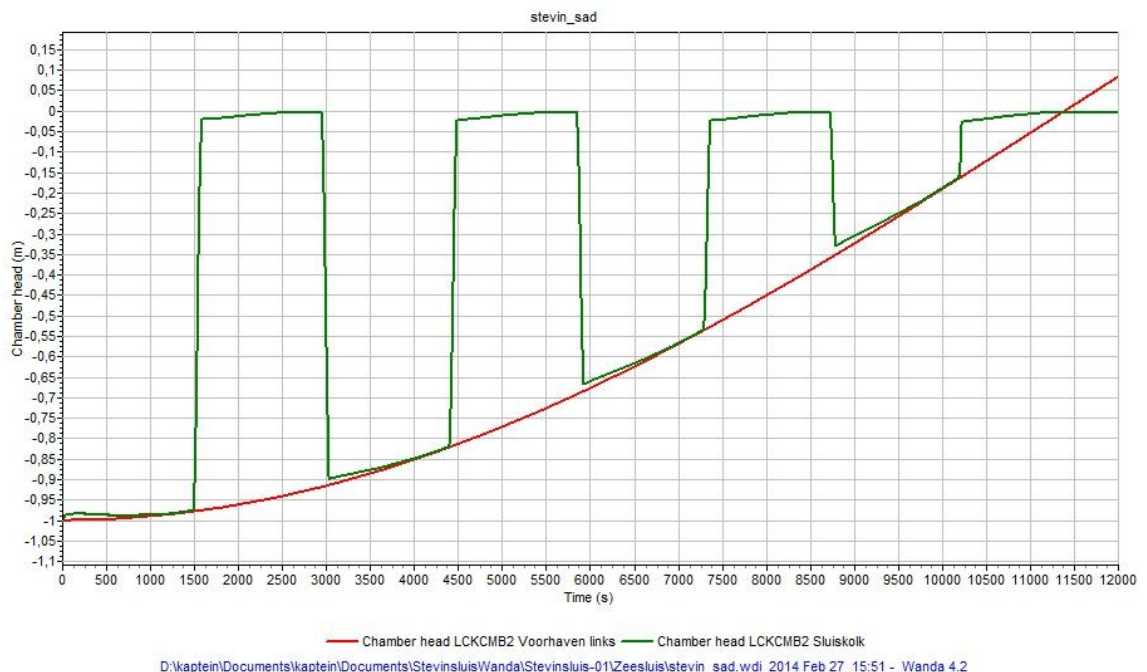
Figuur 6.2 Klepstanden van de deur aan de zoute en zoete zijde

In bovenstaande figuur is te zien hoe de deur naar de Waddenzee (groen) en het IJsselmeer om de beurt voor eenzelfde periode open zijn. Het valt op dat de deur naar de Waddenzee na

300, 3200, 6100 en 9000s helemaal open is. Deze bevindingen komen overeen met het schut protocol dat is ingevoerd in de SIVAK file. Ook is te zien dat het sluiten van de rinketten aan de ene zijde overlapt met het openen van de rinketten aan de andere zijde. Dit is op dit moment de manier waarop de SAD-component de sluis beheert, maar kan in de toekomst nog veranderen als dit tot ongewenst gedrag leidt.

6.1.2 Waterstanden

Om de waterstanden in het IJsselmeer en in de Waddenzee te modelleren is ervoor gekozen om een constante waterstand te nemen in het IJsselmeer (op 0 mNAP) en een sinusoïde functie voor de waterstand in de Waddenzee. Om het getij te simuleren is een cosinus functie gebruikt met amplitude van 1meter en een periode van 12 uur en 40 minuten.



Figuur 6.3 Waterstanden in de kolk en aan de zoute zijde

In Figuur 6.3 is te zien hoe de waterstand van de kolk varieert tussen het getij aan de zeezijde en de constante waterstand van het IJsselmeer (0 mNAP). Verder valt het op dat de periodes gedurende welke de waterstand in de kolk meebeweegt met het getij langer duren dan de deuropeningstijden (ongeveer 1360 s in plaats van ongeveer 1000 s). Dit is uit te leggen door het openingsproces en het sluitingsproces van de deur. Dit proces duurt enkele minuten en gedurende dat proces staat de kolk wel in verbinding met de zee, waardoor de waterstanden gelijk blijven.

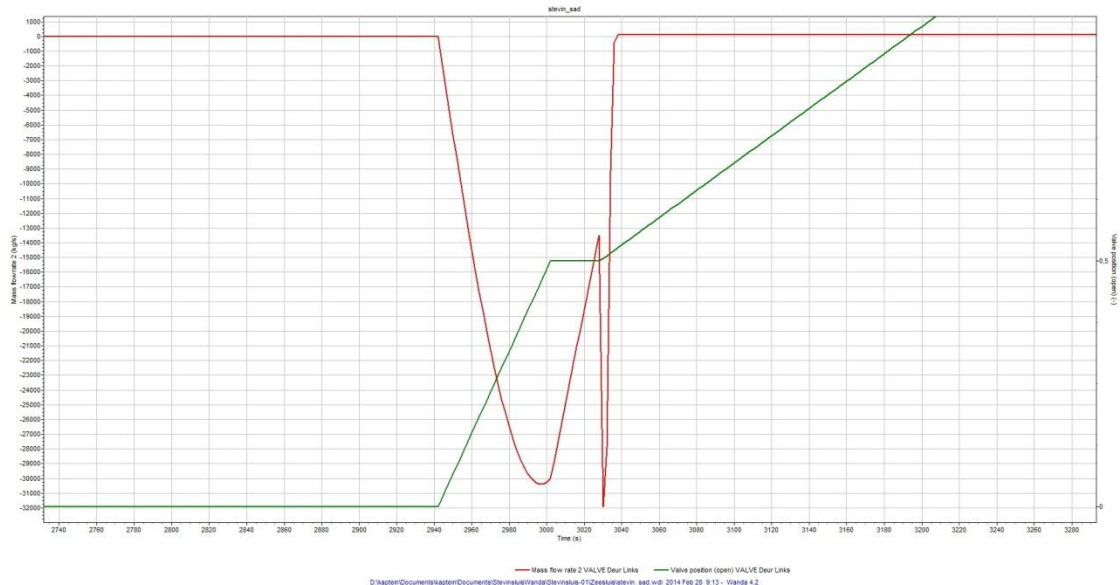
6.1.3 Debieten

Als er genivelleerd wordt en de schuiven in de deuren openstaan, komen er debieten op gang. De orde grootte van deze debieten kan geschat worden aan de hand van het waterstandsverschil Δh en de oppervlakte A van de rinketschuif waarmee genivelleerd wordt. Het debiet Q wordt dan berekend met behulp van de wet van Torricelli:

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

Met $\Delta h=1\text{m}$, $g=9.81\text{m.s}^{-1}$ en $A=20\text{m}^2$ is het debiet:

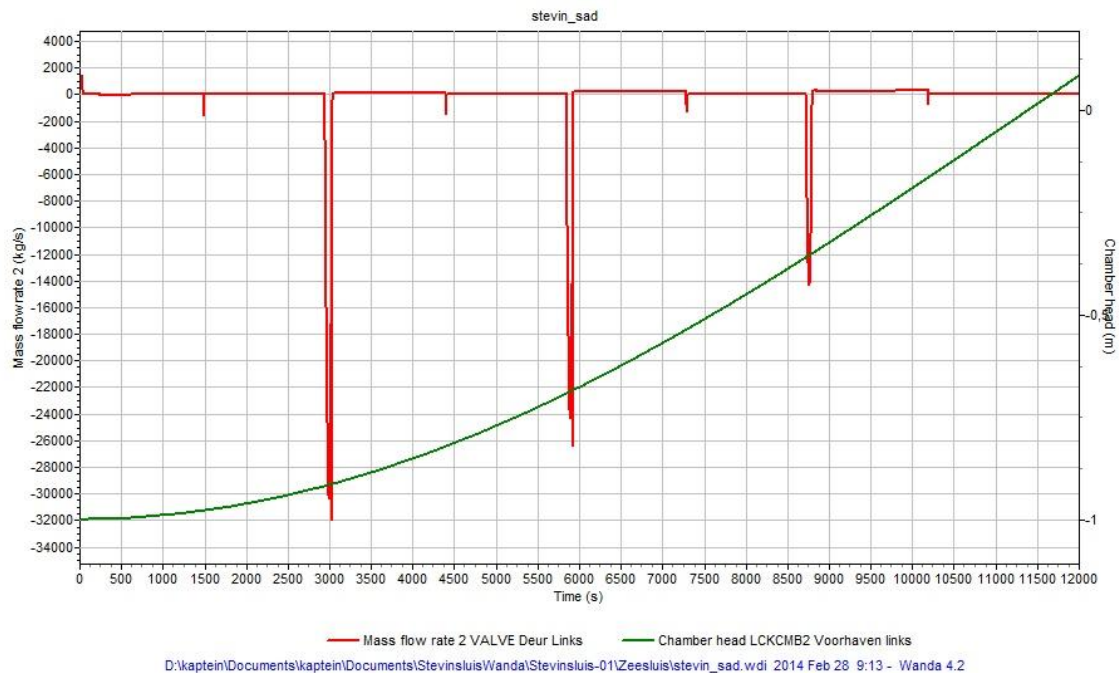
$$Q \approx 88,6\text{m}^3\text{s}^{-1}$$



Figuur 6.4 Debieten versus klepstanden deur (rinketten)

In Figuur 6.4 is te zien hoe het debiet verandert als de sluisdeuren opengaan. Wat opvalt is dat het debiet lager is ($\sim 30\text{m}^3\text{s}^{-1}$), dan werd geschat met Torricelli ($\sim 90\text{m}^3\text{s}^{-1}$). Dit wordt veroorzaakt doordat in de formule van Torricelli met een maximaal peilverschil en een maximale snelheid wordt gerekend. Aangezien het peilverschil al kleiner wordt zodra de klep open gaat treden het maximale peilverschil en de maximale snelheid nooit tegelijk op. De snelheid is namelijk afhankelijk van het peilverschil. In de Figuur is te zien dat het maximale debiet wordt bereikt voordat de schuif voor de helft is geopend. Rond 3000 s is het debiet maximaal ($\sim 30\text{m}^3\text{s}^{-1}$) en heeft de klep een omvang van $(\pi \cdot (D/2)^2 \cdot 0.5 \approx 9.82\text{m}^2)$.

Na 3000 s ontstaat een korte hoge piek in het debiet. Dit gebeurt zodra de klepstand hoger dan 50% is. Dit is het moment dat de deuren openen. Er is dan genivelleerd met twee verschillende zoutgehaltes (dus twee verschillende dichtheden) aan weerszijden van de klep. Het nivelleren stopt zodra de druk aan weerszijde van de klep gelijk is. Dan kan het zijn dat een evenwichtssituatie (in druk) bereikt is terwijl de waterstanden nog niet gelijk zijn. Zie voor meer toelichting Hoofdstuk 7.3.1 en Figuur 7.3. Zodra de deuren opengaan, wordt het drukverschil vereffend. In deze berekening is geen rekening gehouden met restverval, dit zou nog kunnen leiden tot een hogere translatiegolf.



Figuur 6.5 Debieten versus waterstanden

In Figuur 6.5 is te zien hoe het maximale debiet afhankelijk is van het getij. Als het verschil in waterstanden tussen de Waddenzee en het IJsselmeer kleiner wordt is het peilverschil ook kleiner en dat heeft weer invloed op de snelheid door de klep en het debiet. Zie ook Figuur 6.3. De kleine pieken tussen de grote pieken volgen uit de kleine overlap tussen het sluiten van de rinketten aan de ene kant, en het openen van de rinketten aan de andere kant zoals eerder besproken in Paragraaf 6.1.1.

6.1.4 Zoutgehaltes

Zoutgehaltes kunnen zowel kwalitatief als kwantitatief beoordeeld worden. Als de deuren tussen een zoete kolk en een zoute voorhaven opengaan is de verwachting dat het zoutgehalte en de zoutmassa in de kolk stijgen, terwijl het daalt in de voorhaven. Andersom, als een zoute kolk met een zoete voorhaven in verbinding komt zal de zoutmassa in de voorhaven toenemen en in de kolk afnemen.

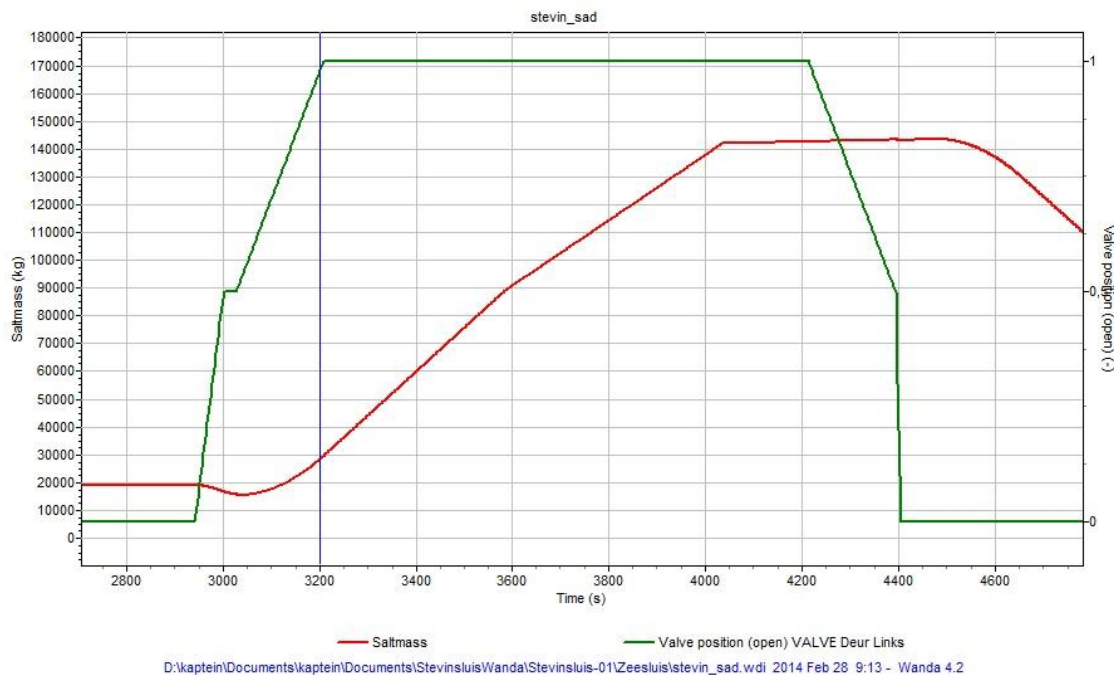
Door de voortplantingssnelheid en de hoogte van de zouttong te berekenen kan er een zoutdebiet worden geschat. Een analytische oplossing (Shin) geeft voor de diepte h en snelheid U van de zouttong:

$$h = \frac{1}{2} H$$

$$U = \frac{1}{2} \sqrt{g \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) H}$$

Met $H = 3,7$ m de kolkdiepte, $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$, $\rho_1 = 998,2 \text{ kg.m}^{-3}$, $\rho_2 = 1013,35 \text{ kg.m}^{-3}$ is de snelheid van de tong ongeveer $0,4 \text{ m.s}^{-1}$. Dit betekent dat, bij een kolk lengte van 148 m, de zouttong er $148/0,37 = 400$ s over doet voordat hij de kolk is doorlopen. Vervolgens

weerklaart en klimt deze tegen de deur omhoog, waarbij er energieverlies optreedt. Dit zorgt ervoor dat de zouttong niet over de volledige diepte en met een iets hogere snelheid de kolk weer uitstroomt. Als de zouttong de kolk eenmaal heeft uitgewisseld blijft er een brakke toplaag achter die via diffusie wordt uitgewisseld.



Figuur 6.6 Zoutmassa in de kolk

In Figuur 6.6 is te zien hoe de zoutmassa in de kolk verandert met de opening van de klep naar de Waddenzee. Zodra de klep begint te openen ($t = 2942$ s) start het nivelleren. Omdat de waterstand op de Waddenzee op dat moment laag is wordt er water (en dus zout) onttrokken aan de kolk. Vervolgens gaan na 3028 s de deuren open en begint de zouttong te lopen. In het begin gaat dat langzaam omdat de deuren nog niet helemaal open zijn. Dit laatste is pas het geval na 3208 s (blauwe lijn). Vanaf dat moment is de toename van de zoutmassa in de kolk constant tot ongeveer 3584 s. Op dat moment is er een lichte knik in de lijn te zien. Daarna neemt de zoutmassa weer lineair toe tot 4000 s. Dan is er een nieuwe knik en neemt de zoutmassa slechts zeer beperkt toe tot de deur naar het IJsselmeer opent.

In het begin is de toename van de zoutmassa het snelst en die periode duurt 376 s. Deze snelheid en tijd komen overeen met wat er verwacht wordt als een ongeremde zouttong de kolk binnenstroomt. Er volgt een periode van 450s waar de zoutmassa met een iets lagere snelheid toeneemt. Dit komt weer overeen met een zouttong die als gevolg van energieverlies iets langzamer de kolk uitstroomt. De laatste fase met een hele trage toename van de zoutmassa is uit te leggen door diffusie. De drie theoretische fases van Lock-exchange lijken goed in het model te zitten omdat ze zowel qua snelheid als qua duur overeen komen met de verwachtingen.

6.2 Voorlopige conclusie

De Stevinluis is gemodelleerd met kleppen en reservoirs die de sluis, de voorhavens, de sluiskolk en de verbindingen weergeven. De afmetingen hiervan zijn conform de realiteit en de debieten die in WANDA-Locks ontstaan zijn in de te verwachten orde grootte.

Ook de invloed van het getij op de uitwisseling bij nivelleren is conform de verwachtingen. De dichtheidsstroming loopt in de simulatie op bij het openen van de deuren. Vervolgens is te zien hoe de kolk in drie fases wordt uitgewisseld conform de theorie: De zouttong loopt met maximale uitwisselingssnelheid de sluis kolk binnen, na weerkaatsing tegen de sluisdeur vertraagt de uitwisseling als gevolg van energieverlies (door wrijving). Uiteindelijk wordt de overblijvende brakke toplaag middels diffusief transport uitgewisseld.

Uit deze eerste validatieslag blijkt dat de karakteristieke kenmerken van het hydrodynamische proces op de juiste manier worden weergegeven in WANDA-Locks.

7 Validatieslag 2: Dynamisch zoutlekmodel

7.1 Inleiding

De validatie in deze tweede slag vindt plaats door een vergelijking uit te voeren met de resultaten van de berekeningen met het bestaande Zoutlekmodel (Lit [3]). Dit zoutlekmodel is ontwikkeld in het kader van experimenten bij de Stevinsluis (ten behoeve van het project Volkeraksluizen) en is aan de hand daarvan uitgebreid getest en gekalibreerd. In principe is een rechtstreekse vergelijking met de metingen ook mogelijk, maar als eerste stap in de validatie is deze indirecte vergelijking uitgevoerd.

Ter herinnering:

In deze rapportage wordt naar het oorspronkelijke Zoutlekmodel (Lit. [3]) gerefereerd met het Zoutlekmodel (of ZLM). Het nieuwe model, ontwikkeld onder WANDA wordt aangeduid als WANDA-Locks.

7.2 Gegevens

De data voor de berekeningen is als volgt:

- Runtijd: van 1 tot 6 mei 2010;
- Timestep: 5 s;
- Geen pompen, geen spoeldebiet, geen erosiediepte.
- Breedte kolk: 14,3 m
- Diepte kolk: 4,7 m;
- Oppervlak: 2125 m²;
- Aantal kolken aan één voorhaven: 1;

		<i>Eenheid</i>	<i>Zeezijde</i>	<i>Meerzijde</i>
Voorhaven	Oppervlak	m ²	80 000	80 000
	Diepte	m	4,7	5,0
	Breedte monding	m	100	100
	Diepte monding	m	3,8	3,8
Rinketschuiven	Oppervlak	m ²	12	12
	Doorlaatcoëfficiënt	-	1	1
	Openingstijd	s	60	60
Deuren	Openingstijd	s	60	180
	Drempeldiepte	m	4,4	4,4
Conditie	Waterstand	m	Getij	0,0
	Saliniteit	psu	20,0	0,0
	Waterstandsverschil bij openen	m	0,08	0,08
	Wachttijd deur dicht -> schuif open	s	180	180
	Max. opentijd deur	s	600	600
Maatregelen	Doorlaatfractie lucht-/waterscherm	-	1	1
	Lekkende ebdeuren (opening)	-	0	0
	Lekdebiet gemaal	m ³ /s	0	0

De waterstand aan de zeezijde is opgegeven via een bestand dat het getij beschrijft op locatie Den Oever. De invloed van scheepvaart op de zout-zoetuitwisseling is niet meegenomen in deze simulaties, uiteraard zijn de deuropentijden wel gebaseerd op de situatie met scheepvaart.

7.3 Uitgevoerde validatie

De resultaten van de WANDA-Locks berekening zijn vergeleken met die van het Zoutlekmodel aan de hand van het verloop in de tijd van:

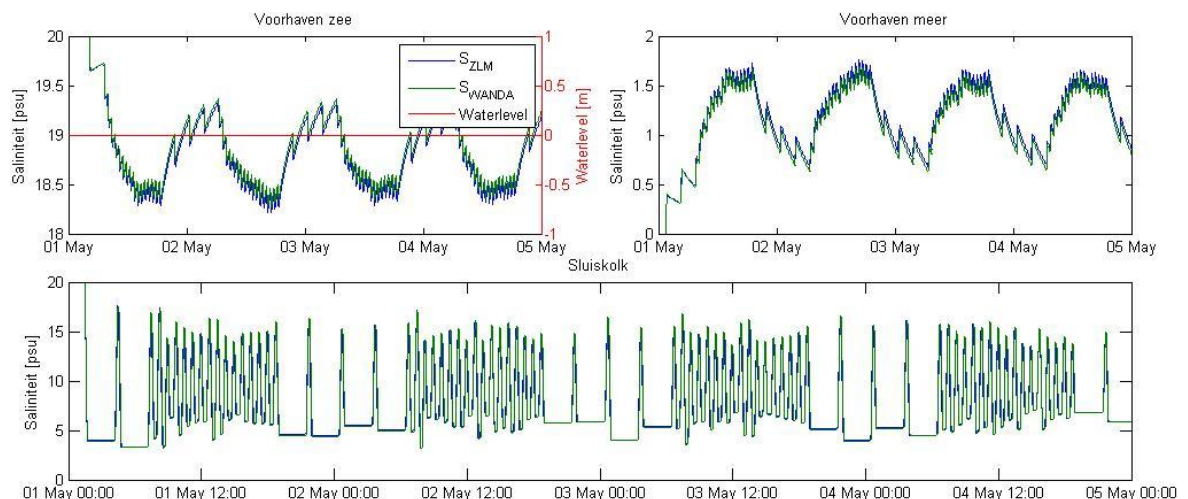
- Zoutgehalte (saliniteit) in voorhavens en sluiskolk;
- Waterstanden in voorhavens en sluiskolk
- Zoutlek tussen voorhavens en sluiskolk
- Luchtdebieten van bellenschermen (bij inzet bellenscherm)

Gekozen is de validatie stap-voor-stap op te bouwen. Daarom is gekeken naar verschillende situaties, te weten:

- Zonder getij op zee, zonder bellenscherm (paragraaf 5.3.2)
- Met getij op zee, zonder bellenscherm (paragraaf 5.3.1)
- Met getij op zee, met bellenscherm (paragraaf 5.3.3)

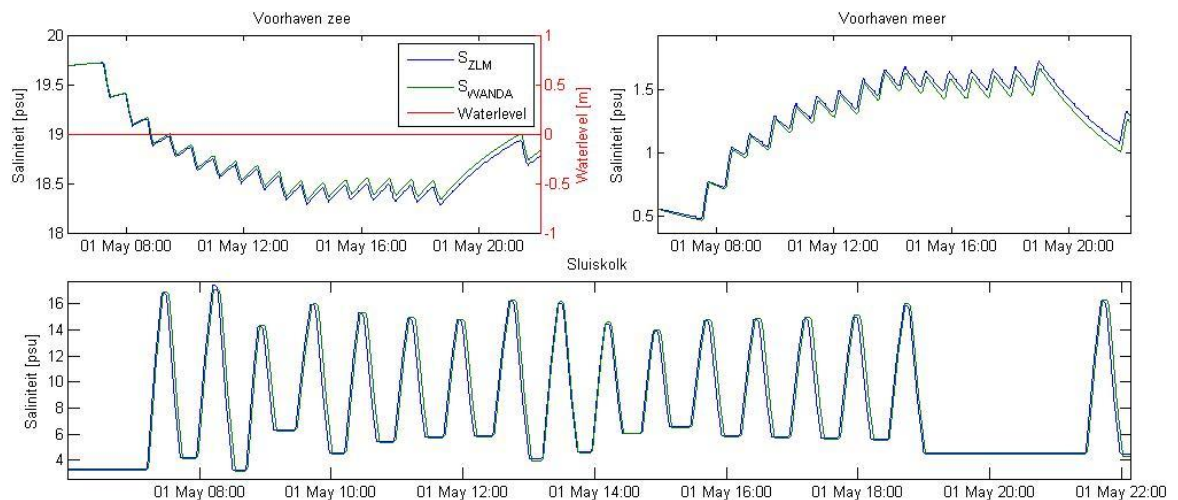
7.3.1 Resultaten validatie met constante waterstand aan zeezijde

In deze eerste vergelijking is er dus geen getij, maar een constante waterstand aan de zeezijde opgelegd.



Figuur 7.1 Zoutgehaltevariëaties in voorhavens en sluiskolk met constante waterstand aan zeezijde

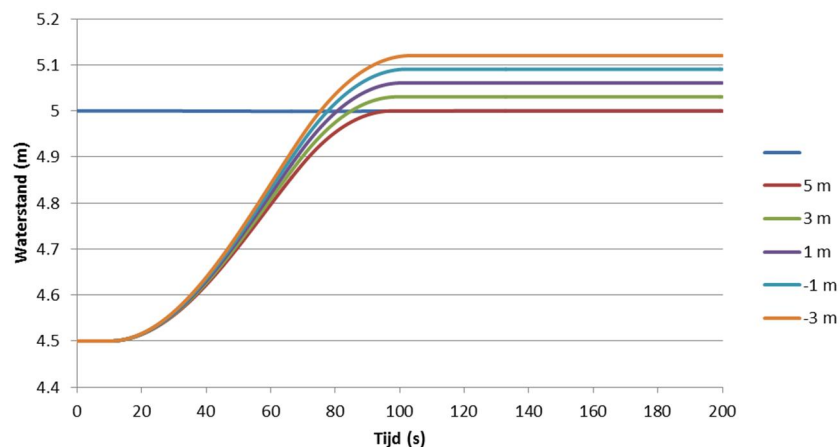
De figuren van 7.1 laten zien dat de lijn in het zouttransport in de tijd als gevolg van de schuttingen vergelijkbaar is voor het Zoutlekmodel en WANDA-Locks. Ook de resulterende zoutgehalten in voorhaven en zee komen goed met elkaar overeen.



Figuur 7.2 Zoutgehaltevariëaties in voorhavens en sluiskolk (detail) met constante waterstand aan zeezijde

Indien wordt ingezoomd op de zoutgehaltes (Figuur 7.2) in beide voorhavens is te zien dat – door de oogharen- de voorhaven aan de zeezijde iets zouter is in WANDA-Locks. In de voorhaven aan de meerzijde lijkt WANDA-Locks iets zoeter.

De kleine verschillen in zoutgehaltes ontstaan door een nauwkeuriger beschrijving van de hydrodynamische processen in WANDA-Locks. Enerzijds komt dit doordat WANDA-Locks het advectieve transport berekent op basis van actuele zoutgehaltes (variërend in de tijd), waar het Zoutlekmodel rekent met de initiële waarde (constant in de tijd) voor de zoutgehaltes bij de bepaling van advectieve transporten.

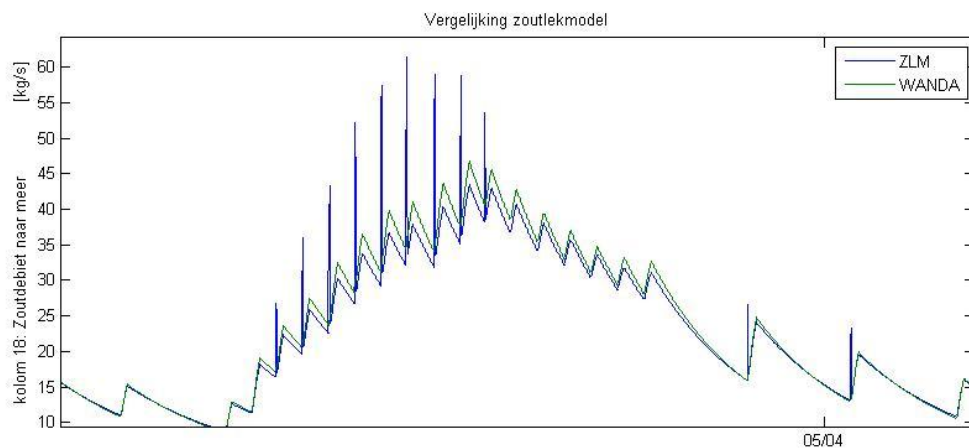


Figuur 7.3 Variatie in waterstanden als gevolg van drukverschillen

Anderzijds wordt in het Zoutlekmodel het advectieve transport bepaald op basis van het waterstandsverschil, terwijl in WANDA-Locks gebruik wordt gemaakt van het daadwerkelijke drukverschil. Bij de bepaling van de druk op een bepaalde hoogte (e.g. rinkelhoogte) speelt de dichtheid een rol. Hoe dit doorwerkt in het nivelleerproces is weergegeven in Figuur 7.3 waarin het verloop van de waterstand in de kolk is weergegeven voor verschillende rinkelhoogtes. Aanvankelijk heeft de voorhaven een saliniteit van 29 psu, en de kolk een saliniteit van 7 psu. De kolk staat een halve meter lager dan de voorhaven, en wordt vanaf $t = 10$ s genivelleerd door het openen van de rinkelten. Hoe lager de rinkelten zijn geplaatst t.o.v. de waterspiegel, hoe groter het uiteindelijke overblijvend niveauverschil. Zeker voor grote en

diepe sluiskolken, waarbij grote saliniteitsverschillen tussen kolk en voorhaven mogelijk zijn, kunnen de waterstandsverschillen in equilibrium 10 tot 15 cm bedragen.

Het resultaat van deze verschillen in zoutgehaltes zijn per saldo een iets groter zouttransport voor WANDA-Locks (Figuur 7.3) in vergelijking met het Zoutlekmodel. Omdat WANDA-Locks de hydrodynamische processen in meer detail weergeeft wordt verwacht dat dit bijdraagt aan een nauwkeuriger voorspelling van de zouttransporten.



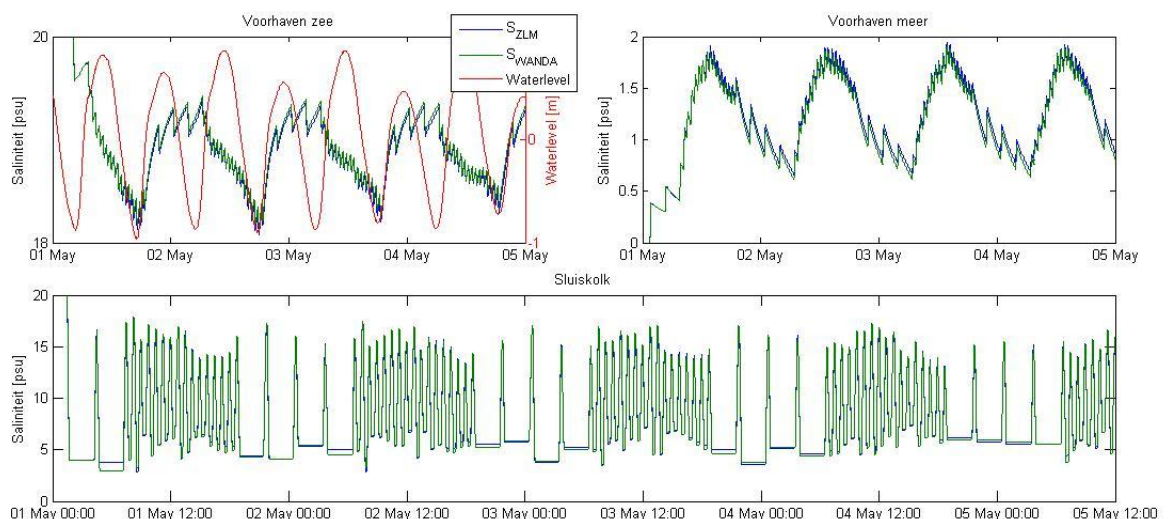
Figuur 7.4 Detail zouttransport naar het meer met constante waterstand aan zeezijde

Indien wordt ingezoomd op de zouttransporten (Figuur 7.4) zijn in het Zoutlekmodel pieken te zien. Dit zijn de niveleerdebiëten. In het Zoutlekmodel vindt nivelleren plaats in 1 tijdstap, terwijl in WANDA-Locks rekening wordt gehouden met de werkelijke nivelleerdur.

Omdat de nivelleerdebiëten geïntegreerd over de tijd in het Zoutlekmodel en WANDA-Locks dezelfde grootte hebben heeft dit verschil in de tijdserie geen gevolgen voor de resulterende zoutgehaltes en zouttransporten.

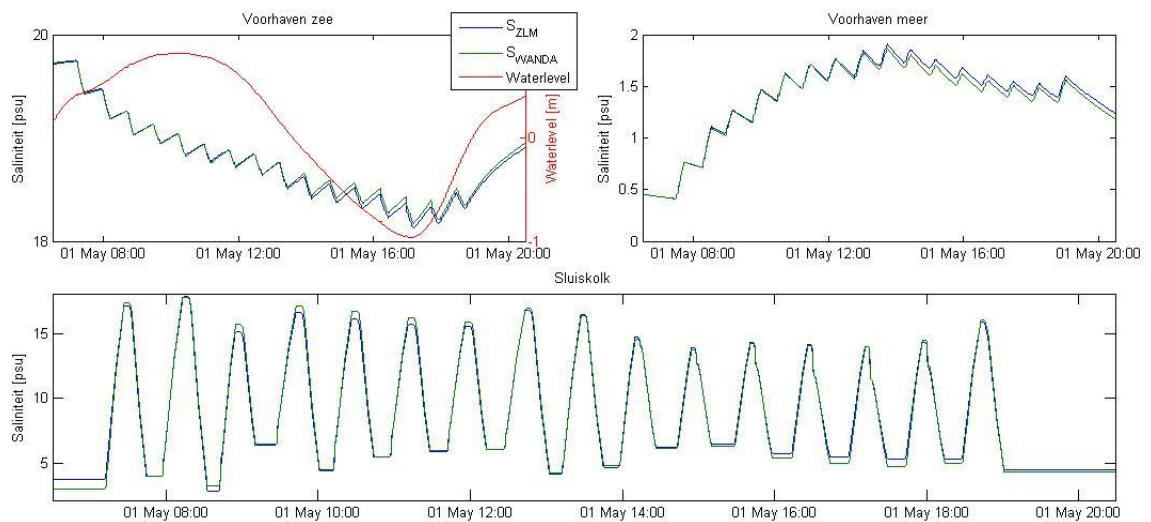
7.3.2 Resultaten validatie met getij op zee

Na de validatie met een contante waterstand aan zeezijde is gekeken of ook bij een variërende waterstand aan zeezijde de juiste zoutgehaltes en transporten worden berekend.



Figuur 7.5 Zoutgehaltevariaties in voorhavens en sluiskolk

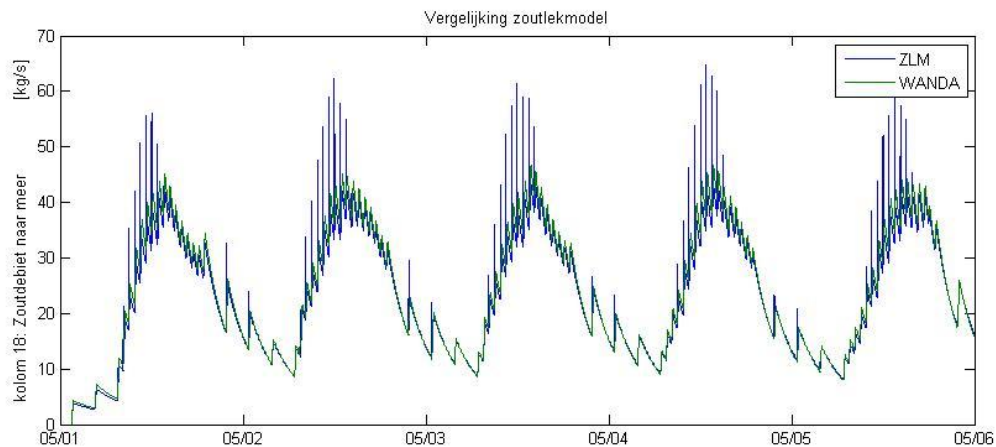
Uit Figuur 7.5 is op te maken dat het proces in WANDA-Locks op dezelfde manier als in het Zoutlekmodel is gemodelleerd. De verschillen zijn vergelijkbaar met de verschillen bij een constante waterstand. Figuur 7.6 laat deels eenzelfde beeld zien als Figuur 7.2. De verschillen in zoutgehaltes in de voorhavens zijn in dezelfde orde grootte, de verschillen in de zoutgehaltes in de kolk zijn zichtbaarder (dan in Figuur 7.2) en daarmee groter dan bij constante waterstand.



Figuur 7.6 Zoutgehaltevariaties in voorhavens en sluiskolk (detail)

De oorzaak is dat WANDA-Locks bij het schutproces rekening houdt met de variërende waterstand. Als gevolg van het getij aan de zeezijde kan de waterstand met oplopend of dalend tij zo'n 12 cm veranderen als de deuren 15 minuten hebben opengestaan. De waterstandsverandering is opgenomen in WANDA-Locks en geeft daarmee meer detail dan het Zoutlekmodel.

Het effect van het meenemen van de variërende waterstand op zee op de zoutlek en de zoutgehaltes is wisselend verhogend en verlagend ten opzichte van het Zoutlekmodel waar dit effect niet wordt meegenomen. Bij hoger water aan zeezijde en een stijgende waterstand geeft dit extra zoutlek, bij dalende waterstand een lagere zoutlek. Bij hoger water aan meerzijde en een stijgende waterstand geeft dit een lagere zoutlek, bij dalende waterstand een extra zoutlek. Met een kolkbreedte van 14,3 m, een lengte van 148 m en een saliniteitsverschil van $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ tussen de voorhaven en de kolk kan het verschil in zoutlek oplopen tot ongeveer 2,5 ton per schutting.



Figuur 7.7 Zouttransport naar het meer met getij op zee

7.3.3 Resultaten validatie met getij op zee en bellenscherm

Hiervoor is de berekening uit 7.3.2 uitgebreid met de inzet van een bellenscherm. Hier is gekozen voor de standaard operatie van het bellenscherm, dat wil zeggen dat het luchtdebiet wordt berekend, dat hoort bij een doorlaatfractie van 0,25. De hoogte van het luchtdebiet hangt samen met de zoutgehalten aan weerszijden van het bellenscherm en de actuele waterdiepte. De resultaten van deze validatie zijn opgenomen in Bijlage C: Figuren Validatie 2 met bellenscherm.

De vergelijking laat hetzelfde beeld zien in zoutgehalten en zouttransporten tussen het Zoutlekmodel en WANDA-Locks.

Opvallend zijn de afwijkingen in het benodigd luchtdebiet. De waarden voor het luchtdebiet liggen enigszins lager dan berekend in het zoutlekmodel. Dit wordt veroorzaakt doordat WANDA-Locks in de berekening van het benodigd luchtdebiet rekening houdt met de actuele zoutgehalten. Het Zoutlekmodel rekent het luchtdebiet uit bij het initiële zoutgehalte. In werkelijkheid is het de vraag of de operatie van het bellenscherm wordt aangepast tijdens een schutting.

De verschillen worden vooral veroorzaakt door de verschillen in de duur van de operatie van het bellenscherm. In het Zoutlekmodel lijken de bellenschermen altijd aan te staan.

In WANDA-Locks wordt het bellenscherm aangezet bij het openen van de deuren en uitgezet na het sluiten van de deur.

7.4 Voorlopige conclusies

De validatie van WANDA-Locks met het Zoutlekmodel geeft aan:

- De implementatie van de processen in WANDA-Locks is geslaagd. De resultaten zijn goed vergelijkbaar met de resultaten van het Zoutlekmodel; de verschillen in zoutgehalten worden veroorzaakt door dat WANDA-Locks de hydrodynamische processen in meer detail beschrijft:
 - o
 - WANDA berekent het advectieve transport op basis van actuele zoutgehalten
 - WANDA neemt alle transporten t.g.v. drukverschillen mee.

- WANDA houdt rekening met de variërende waterstand tijdens het schutproces.
- Het verschil in de berekende luchtdebieten is het gevolg van een verbetering in de modellering, er wordt gerekend op basis van actuele zoutgehaltes aan weerszijden van het scherm en het scherm wordt alleen geactiveerd indien de deuren open staan.

8 Validatieslag 3: Metingen Stevinsluis

8.1 Inleiding

In 2010 hebben er metingen plaatsgevonden rond de Stevinsluis, bij Den Oever in de Afsluitdijk. De metingen worden in deze validatieslag gebruikt voor de vergelijking met de resultaten van WANDA-Locks. In dit hoofdstuk wordt de validatie aan de hand van de 2010 metingen beschreven en komen de volgende onderwerpen aan bod:

- Opzet metingen en beschikbare data
- Kenmerken van de metingen
De kenmerken van de metingen worden ook gebruikt als invoer voor de berekeningen met WANDA-Locks.
- Narekenen met WANDA-Locks
- Vergelijking metingen met resultaten WANDA-Locks

8.2 Opzet metingen en beschikbare data

Opzet van de metingen

De metingen in de Stevinsluis zijn uitgevoerd met ctd-meters in de kolk en in de voorhavens, waarbij iedere tijdstap druk, temperatuur en geleidbaarheid zijn gemeten. Met de data kan per tijdstap de zoutmassa in de kolk berekend worden. Het verschil van zoutmassa in de kolk voor-en-nadat de deur open is gegaan geeft de zoutlek.

Beschikbare data

Er zijn meetdata beschikbaar voor verschillende situaties. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen de schuttingen naar de zeezijde en de schuttingen naar de meerzijde. Voor de schuttingen naar zeezijde zijn de volgende metingen uitgevoerd:

- Onbeschermde kolk
- Beschermde kolk
 - Innovatief bellenscherm met waterscherm
100 NI/s en 1600 I/s
200 NI/s en 900 I/s
200 NI/s en 1600 I/s
450 NI/s en 1600 I/s
 - Innovatief bellenscherm
100 NI/s
200 NI/s
450 NI/s
 - Traditioneel bellenscherm
125 NI/s
250 NI/s
 - Waterscherm
900 I/s
1600 I/s
 - Spoeldebiet

Voor de schuttingen naar meerzijde zijn de volgende metingen (met en zonder verhoogde drempel) beschikbaar:

- Onbeschermde kolk
- Beschermde kolk
 - Traditioneel bellenscherm
 - 125 NI/s
 - 250 NI/s
 - Innovatief bellenscherm
 - 100 NI/s
 - 200 NI/s
 - 450 NI/s (alleen zonder de verhoogde drempel)
 - Spoeldebiet

Bij de eerste verwerking van deze metingen zijn de data die de verschillende zoutmeters hebben opgeleverd op logische wijze gesorteerd. Per dag (met één van de beschreven configuraties) zijn er drie bestanden beschikbaar:

- Een file met de naam *stevin1d.tek* waar per tijdstap de waterstanden, zoutgehaltes en zoutmassa's staan opgeschreven. De waterstanden staan in meters vanaf de bodem. De zoutmassa in de kolk staat in ton en het verschil aan zoutgehalte tussen de kolk en de voorhaven in $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.
- Een file met de naam *stevin2d.tek* waar per tijdstap de zoutgehaltes van alle ctd-meters staan opgeschreven. Deze staan vervolgens per locatie en diepte gesorteerd.
- De file *status.tek* geeft informatie over de stand van de rinketschuiven en de sluisdeuren. Hieruit kan worden opgemaakt wanneer de deuren open zijn gegaan en hoelang de opentijd heeft geduurd.

8.3 Kenmerken van de metingen

Om met WANDA-Locks de gemeten situatie te kunnen nabootsen moeten verschillende kenmerken van de meting uit de beschikbare data worden gehaald.

De volgende gegevens zijn direct beschikbaar in de data:

- Zoutprofielen in de voorhaven, in kg/m^3 .
Per tijdstap staat de diepte (in meters vanaf de bodem) weergegeven met de bijbehorende saliniteit.
- De waterstanden in het IJsselmeer, het verschil in waterstand tussen het meer en de Waddenzee en het waterstandsverschil tussen het IJsselmeer en de sluiskolk.

Om de kenmerken uit de metingen te halen is gebruik gemaakt van de methode van dataverwerking, zoals deze is opgezet voor de Stevinsluis. In het navolgende worden bijzonderheden, die van belang zijn voor deze validatie, toegelicht.

8.3.1 Waterstanden

De waterstand in het IJsselmeer is opgenomen in de file *stevin1d.tek*, kolom 6. In kolom 4 en kolom 5 staat respectievelijk het verschil in waterstand tussen de Waddenzee en het IJsselmeer en tussen de kolk en het IJsselmeer. Teruggerekend zijn deze waarden:

$$H_{wz} = H_{wz-ijm} + H_{ijm}$$

$$H_{kolk} = H_{kolk-ijm} + H_{ijm}$$

8.3.2 Deuropentijden

De status waarin de deur zich bevindt staat opgeslagen in de file status.tek. Deze ziet er als volgt uit:

```

20100401 092300 0 00 1 10 0 00 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Dicht RK-Meer = Open Ledigen Kolk naar Meer Stevin-meer-schera Vol
20100401 092330 0 00 1 10 0 00 0 89 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Dicht RK-Meer = Open Ledigen Kolk naar Meer Stevin-meer-schera Vol
20100401 092330 0 00 1 10 0 00 0 89 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Dicht RK-Meer = Open Ledigen Kolk naar Meer Stevin-meer-schera Vol
20100401 092400 0 00 1 10 0 00 0 89 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Dicht RK-Meer = Open Ledigen Kolk naar Meer Stevin-meer-schera Vol
20100401 092400 0 00 1 10 0 00 0 89 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Open Stevin-meer-schera Vol
20100401 092430 0 00 2 10 0 00 0 89 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Open Stevin-meer-schera Vol
20100401 092500 0 00 2 10 0 00 0 91 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Open Stevin-meer-schera Vol
20100401 092500 0 00 2 10 0 00 0 91 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Open Stevin-meer-schera Vol
20100401 092530 0 00 2 10 0 00 0 93 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Open Stevin-meer-schera Vol
20100401 092530 0 00 2 10 0 00 0 93 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Open Stevin-meer-schera Vol
20100401 092600 0 00 2 10 0 00 0 89 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Open Stevin-meer-schera Vol
20100401 092600 0 00 2 10 0 00 0 89 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Open Stevin-meer-schera Vol
20100401 092630 0 00 2 10 0 00 0 00 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Open Stevin-meer-schera Vol
20100401 092630 0 00 2 10 0 00 0 00 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Open Stevin-meer-schera Vol
20100401 092700 0 00 2 10 0 00 0 00 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Open Stevin-meer-schera Vol
20100401 092700 0 00 2 10 0 00 0 00 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Open Stevin-meer-schera Vol
20100401 092730 0 00 2 10 0 00 0 00 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Open Stevin-meer-schera Vol
20100401 092730 0 00 2 10 0 00 0 00 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Dicht RK-Meer = Open Ledigen Kolk naar Meer
20100401 092800 0 00 1 10 0 00 0 00 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Dicht RK-Meer = Open Ledigen Kolk naar Meer
20100401 092800 0 00 1 10 0 00 0 00 0 00 0 00 0 00 1 00 1 00 Zee = Dicht RK-Zee = Dicht Meer = Dicht RK-Meer = Open Ledigen Kolk naar Meer

```

Figuur 8.1 Voorbeelduitsnede uit status.tek

Per tijdstap zijn er twee regels uitgeschreven. Deze zijn identiek behalve als er een component (bellenscherm, rinketschuiven, sluisdeuren) van status verandert. In dat geval wordt in de eerste regel de vorige status van de component weggeschreven en in de tweede regel de nieuwe status van de component.

De gebruikte deuropentijden zijn niet direct uit deze file (status.tek) te halen. In de berekende zoutmassa's (stevin1d.tek) is de deuropentijd wel als invoer gebruikt. Uit de waarden is dan ook af te leiden hoe de deuropentijden zijn bepaald:

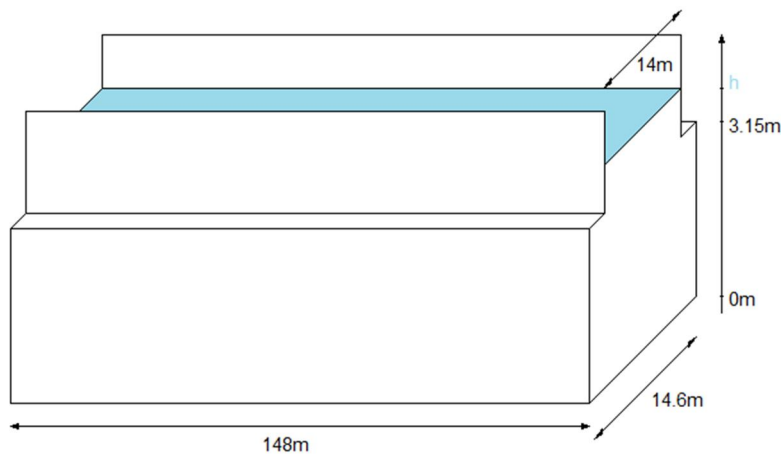
Voor het openen van de sluis wordt de tijd genomen die direct volgt op de tijd wanneer de sluisdeur van status verandert. In het bovenstaande plaatje is dat 092430 (bovenste rode vak).

Voor het dichtgaan van de sluisdeuren lijkt het gekozen moment niet coherent tussen de gemeten zoutlek en de berekende zoutlek. Dit moment is namelijk 092730 (blauwe vak) voor de theoretische schatting en 092800 (onderste rode vak) voor de gemeten zoutlek. Dit betekent dat er een onzekerheid van één tijdstap is voor de openingstijd van de sluisdeuren.

Voor WANDA-Locks wordt de 'langst mogelijke' openingstijd als invoer voor de deuropentijd gebruikt. Deze aanname geeft naar verwachting een kleine overschatting van de zoutlek..

8.3.3 Zoutgehalte in de kolk

Om het zoutgehalte in de kolk te berekenen wordt de zoutmassa M_s op het moment van openen van de deuren uitgelezen. Deze staat weggeschreven in het bestand stevin1d.tek, kolom 7. Vervolgens wordt deze zoutmassa gedeeld door het kolkvolume dat aan de hand van de waterstand in de kolk wordt berekend. Daarbij is rekening gehouden met de specifieke geometrie van de sluiskolk.



Figuur 8.2 3D-beeld van de kolk bij de Stevin sluis

$$V_{kolk} = \min(3,15; h_{kolk}) \cdot 14,6 \cdot 148,0 + \max(0,0; h_{kolk} - 3,15) \cdot 14,0 \cdot 148,0$$

De saliniteit van de kolk wordt berekend, in kg/m^3 , met:

$$S = \frac{M_s}{V_{kolk}}$$

In WANDA-Locks wordt uitgegaan van een profiel met een vaste breedte en diepte. Dat betekent concreet dat wordt gerekend met een (gemiddelde) breedte van de kolk van 14,3 meter. De totale zoutmassa in de kolk wijkt daarmee af van de werkelijke zoutmassa in de kolk, maar de saliniteit is juist. Er is niet voor gekozen te corrigeren voor dit verschil door het zoutgehalte aan te passen, omdat daarmee de aandrijvende kracht van de zoutlek verandert.

8.3.4 Zoutgehalte in de voorhavens

In het bestand stevin1d.tek staat in de 8^{ste} kolom het verschil in zoutgehalte tussen de zeezijde en de kolk en in de 9^{de} het verschil in zoutgehalte tussen de kolk en de meerzijde. Via een simpele optelsom worden de zoutgehaltes in de voorhavens bepaald, in kg.m^{-3} .

$$\begin{aligned} S_{wz} &= S_{wz-kolk} + S_{kolk} \\ S_{ijm} &= S_{kolk} - S_{kolk-ijm} \end{aligned}$$

omrekening volgens UNESCO.

8.3.5 Zoutlek

Voor de vergelijking van de resulterende zoutlek van WANDA-Locks met de gemeten zoutlek kan gebruik worden gemaakt van het eerder berekende resultaat voor:

- De totale zoutmassa in de kolk, in ton.
De totale zoutmassa is berekend op basis van de waarde die de zoutopnemers in de kolk hebben gemeten en met behulp van een numerieke integratie methode.

Voor de bepaling van de zoutlek met WANDA-Locks wordt in WANDA-Locks deze parameter uitgevoerd. De zoutlek is de optelsom van de dichtheidsstroming en de verschillende componenten van de advectieve stroming gedurende een schutting (e.g. nivelleerdebiet).

In de opzet van WANDA-Locks wordt uitgegaan van een kolk met constante breedte. Als gevolg daarvan kunnen kleine verschillen in de resulterende zoutlek worden verwacht. Bij een waterdiepte onder de 3,5 meter is de breedte waarover de uitwisseling plaatsvindt kleiner in WANDA-Locks dan in werkelijkheid (en dus in de metingen), bij waterdiepten boven de 3,5 meter is de uitwisselingsbreedte groter dan in werkelijkheid. Het verschil in deze breedte is maximaal 30 cm op 14,3 meter. Daarmee is de invloed op de uitwisseling maximaal 2%.

De opzet van de berekeningen wordt in paragraaf 8.4 beschreven.

8.4 Opzet berekeningen WANDA-Locks

Om een berekening op te zetten worden uit de datafiles invoerfiles voor WANDA-Locks gegenereerd. Zie voor een beknopte beschrijving van de werkwijze onderstaand kader. De eerste 2 stappen zijn afkomstig van de data-analyse voor de Stevinsluis. De stappen 3-6 zijn specifiek voor deze validatie opgezet.

1. Sorteren data:
 - a. Onbeschermd kolk
 - b. Beschermd kolk
2. Kenmerken uit datafiles halen (stevin1d, stevin2d, final.tek)
3. Aanstuurfiles voor WANDA-Locks met randvoorwaarden maken:
 - a. Waterstanden
 - b. (initiële) Zoutgehalten voorhavens en kolk
 - c. Schuttingen met deuropentijden
4. Per dag, per situatie berekeningen draaien
5. Post-processen om zoutlek te bepalen

Figuur 8.3 Stappen Validatieslag 3, met metingen

In WANDA-Locks is de Stevinsluis gemodelleerd, zoals beschreven in paragraaf 7.2. Iedere schutting is afzonderlijk gemodelleerd. Er is voor gekozen om geen reeks van schuttingen te modelleren omdat in dat geval de modelfouten optellen.

De schutting wordt gesimuleerd vanaf het moment dat de deur opengaat. In WANDA betekent dit dat de deuren in een tijdsbestek van twee tijdstappen van een volledig gesloten situatie naar een volledig open situatie gaan.³ Vervolgens wordt gerekend met de deuropentijd, zoals uit de data volgt (zie paragraaf 8.3.2).

De berekeningen met WANDA-Locks zijn uitgevoerd voor alle schuttingen naar de Waddenzee met een onbeschermd kolk. Nu de methodiek is opgezet is het eenvoudig eenzelfde validatie uit te voeren voor de schuttingen naar het IJsselmeer en voor de schuttingen met zoutlekbeperkende middelen.

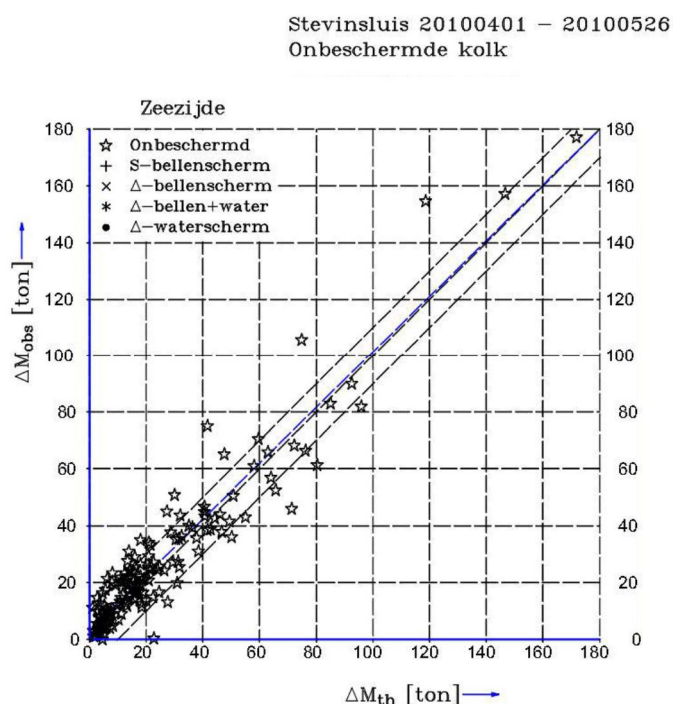
8.5 Resultaten

De resultaten zijn verwerkt door per schutting de gemeten zoutlek als functie van de - met WANDA-Locks - berekende zoutlek uit te zetten. Vervolgens kan er een regressielijn langs al deze punten berekend worden die in het ideale geval een $x=y$ lijn is. Deze figuren zijn ook

³ Er is hiervoor gekozen omdat als de schutting begint met open deuren, het uitwisselingsproces direct naar fase 3 springt.

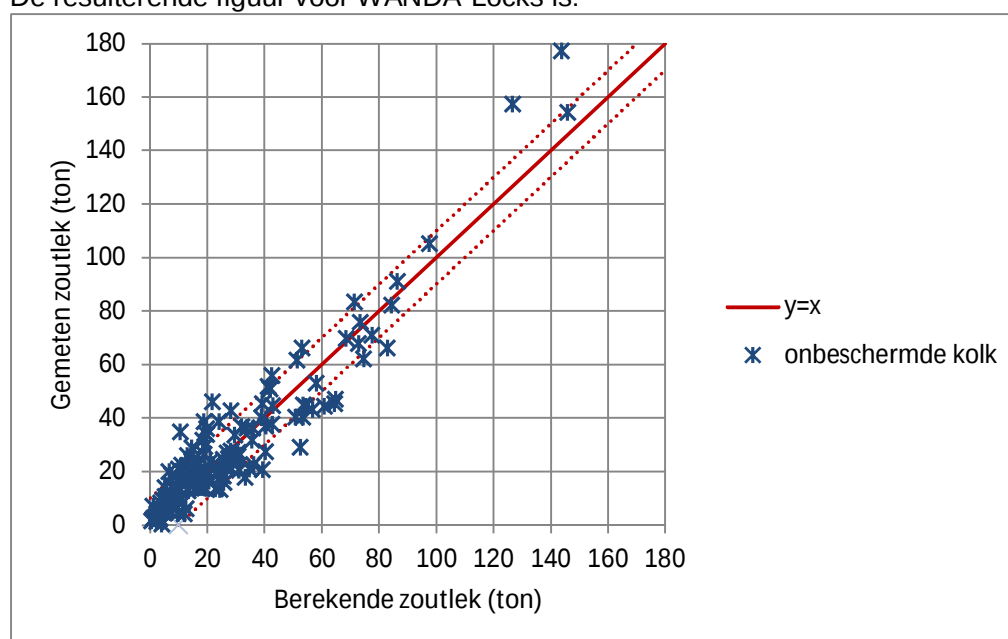
gemaakt in de eerdere studie, waar de gemeten zoutlek is uitgezet tegen de theoretische schatter, die de basis vormde van het Zoutlekmodel. Zie Figuur 8.4.

NB. In de theoretische schatter wordt gerekend met één snelheid van de zouttong. Die snelheid is bepaald op basis van maximaal energieverlies.



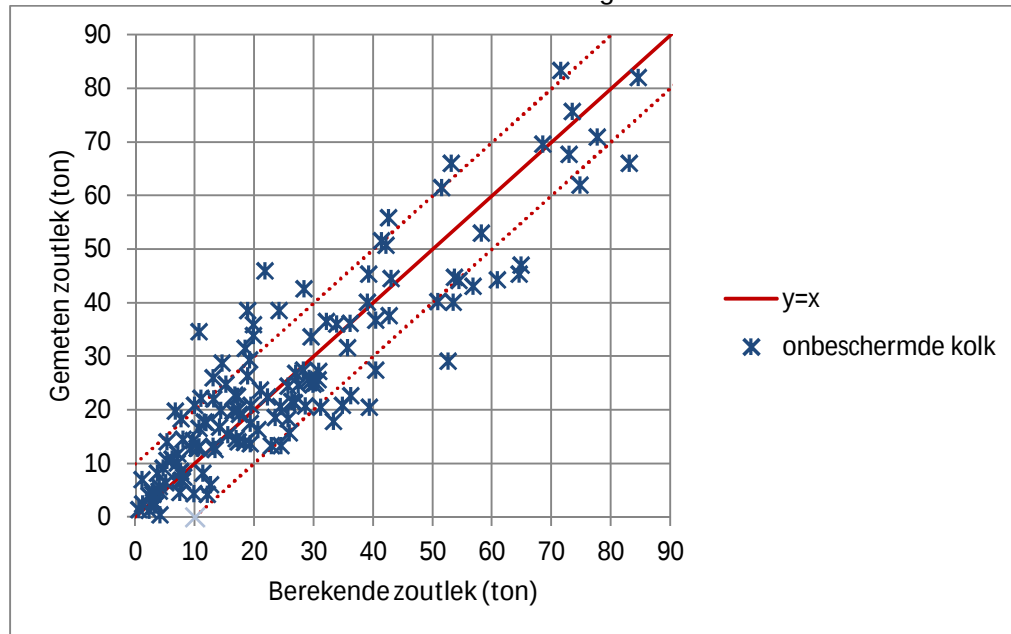
Figuur 8.4 Figuren validatie Zoutlekmodel (ref [3])

De resulterende figuur voor WANDA-Locks is:



Figuur 8.5 Resultaten validatie WANDA-Locks en metingen

Uit Figuur 8.5 is op te maken dat de WANDA-Locks-resultaten een goede inschatting geven van de zoutlek bij een onbeschermd kolk. Nadere analyse van de getoonde resultaten laat zien dat de standaarddeviatie onder de 10 ton ligt.



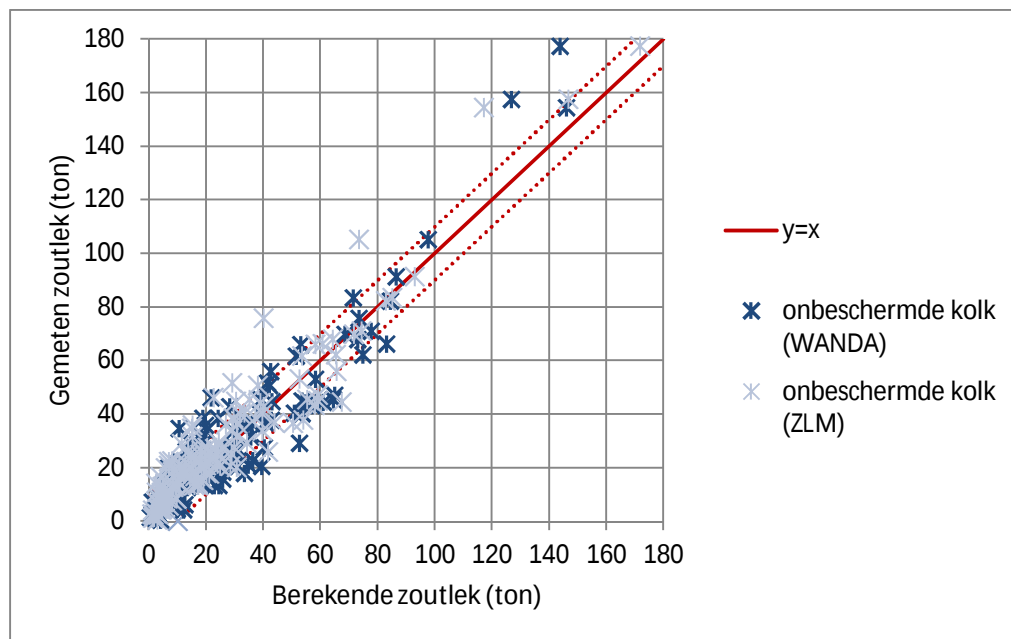
Figuur 8.6 Resultaten validatie WANDA-Locks en metingen; detail

Daarmee geeft het model een goede inschatting van de zoutlek. Daarbij is eerder al opgemerkt dat de berekende waarden, zoals opgenomen in Figuur 8.6 enigszins afwijken van de werkelijkheid als gevolg van de gebruikte:

- Breedte van de kolk
- Deuropentijden

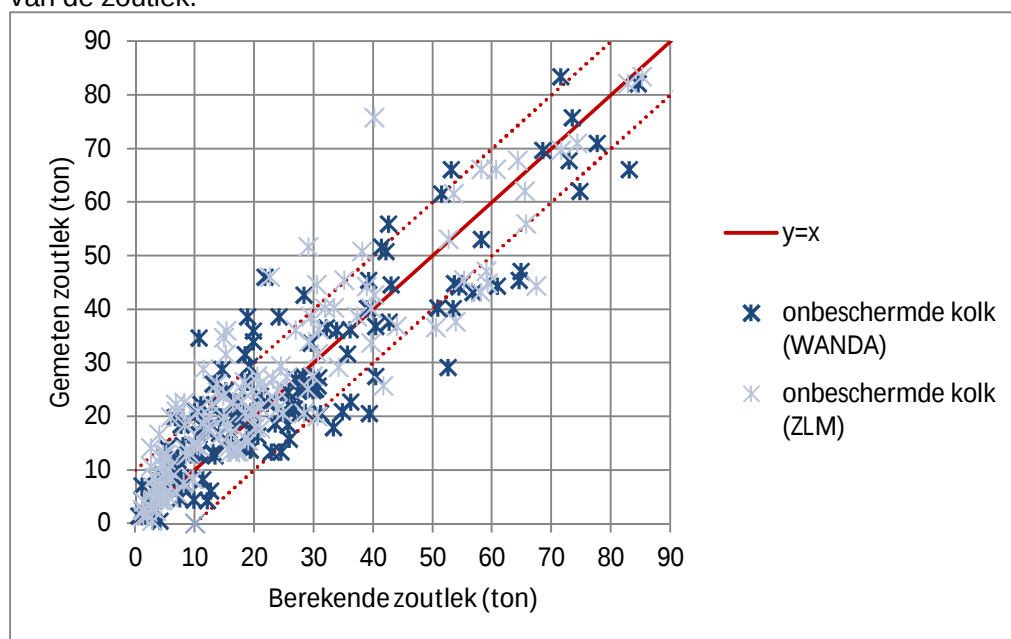
Figuur 8.5 en 8.6 geven hetzelfde beeld als bij de validatie van het Zoutlekmodel.

Om het beeld compleet te maken zijn in Figuur 8.7 de voorspellingen van het Zoutlekmodel en van WANDA-Locks samen met de metingen gepresenteerd. Hier verwachten we niet dat de kleine verschillen, zoals benoemd in validatieslag 2 hier één op één zijn terug te vinden. De initiële zoutgehaltes van de voorhavens worden immers steeds opnieuw bepaald op basis van de metingen. De uitwisseling wordt dus aangedreven door hetzelfde dichtheidsverschil. Ook de variatie van waterstand leidt hier niet tot verschillen met de metingen.



Figuur 8.7 Resultaten validatie WANDA-Locks, Zoutlekmodel en metingen

Alleen de verschillen in het advectieve transport ten gevolge van de veranderende zoutgehalten is in deze vergelijking zichtbaar. Het percentage punten boven de ($x=y$)-lijn is verbeterd van 66% naar 56% (in het ideale geval ligt 50% boven de regressielijn en 50% onder de regressielijn). Tevens is de standaarddeviatie gedaald van 9.0 ton in het Zoutlekmodel naar 8.7 ton in WANDA-Locks. Dit geeft aan dat de nauwkeuriger beschrijving van de hydrodynamische processen in WANDA-Locks leiden tot nauwkeuriger voorspellingen van de zoutlek.



Figuur 8.8 Resultaten validatie WANDA-Locks, Zoutlekmodel en metingen; detail

8.6 Voorlopige conclusies

Deze validatieslag waarin voorspellingen van het model zijn vergeleken met metingen voor een onbeschermdde kolk geeft een goed beeld van de nauwkeurigheid van WANDA-Locks.

Hoewel slechts een beperkt aantal metingen is geanalyseerd komen de resultaten overeen met de verwachtingen zoals die volgden uit de 1^e en 2^e validatieslag.

Om het beeld compleet te maken kan –met de opgezette methode- de validatie uitgebreid worden met de validatie van de overige metingen waaronder die van een beschermde kolk.

9 Validatieslag 4 – Metingen spoeldebiet Krammerjachtensluis

9.1 Inleiding

In de zomer van 2014 hebben metingen plaatsgevonden in de Krammerjachtensluis 2. Deze metingen zijn gericht op het toetsen van de toepasbaarheid van WANDA-Locks voor het Krammersluizencomplex. De metingen zijn uitgewerkt in [5] en [6]. In deze validatieslag worden deze metingen gebruikt voor de validatie van de modellering van het spoeldebiet door de sluisolk in WANDA-Locks. Voor een uitgebreide bespreking van de meetresultaten rond het spoeldebiet wordt verwezen naar Hoofdstuk 5 in [6]. Hier volgt een samenvatting van de relevante resultaten van [6]. Aan bod komen:

- Opzet metingen en beschikbare data
- Varianten modelleren spoeldebiet in WANDA-Locks
 - Variant 1
 - Variant 2
- Vergelijking metingen met resultaten WANDA-Locks
- Resultaten en kanttekeningen bij modellering spoeldebieten

9.2 Opzet metingen en beschikbare data

Opzet van de metingen

De metingen in de Krammerjachtensluis zijn uitgevoerd met 18 ctd-meters in de kolk en 7 ctd-meters in elke voorhaven, waarbij elke 30 seconden de druk, temperatuur en geleidbaarheid zijn gemeten. Met de data kan per tijdstip de zoutmassa in de kolk berekend worden. Het verschil van zoutmassa in de kolk terwijl de deur open staat geeft de zoutlek. De verschillende manieren om de zoutmassa te bepalen zijn beschreven in [6].

Beschikbare data

Er is meetdata beschikbaar voor verschillende situaties. Niet alle metingen zijn uitgewerkt in [5] en [6], vanwege de onzekerheid in de metingen en de toepasbaarheid van de betreffende IZZS in de Krammerduwvaartsluizen. De volgende metingen zijn uitgevoerd, beginnende met de toentertijd beoogde standaardoperatie (i.e. “default”):

Scenario	Waterscherm	Bellenscherm Zijpe	Bellenscherm Zoommeer	Spoeldebiet	Meet-nachten
c2212	Default, tot 1,0 m ³ /s	Default 1 tot 2 strengpaar*	Default Altijd 1 strengpaar	Default 1,0 m ³ /s	02-juni 03-juni
c0212	Uit	Default	Default	Default	04-juni 05-juni
c0112	Uit	Altijd 1	Default	Default	07-juni 08-juni
c0110	Uit	Altijd 1	Default	0,0 m ³ /s	12-juni 26-juni
c2210	Default	Default	Default	0,0 m ³ /s	18-juni 19-juni 01-juli
c2112	Default	Altijd 1	Default	Default	20-juni 21-juni

c2110	Default	Altijd 1	Default	0,0 m ³ /s	23-juni 24-juni
c0210	Uit	Default	Default	0,0 m ³ /s	27-juni 28-juni 29-juni
c3310	Tot 1,4 m ³ /s	1 tot 3	Default	0,0 m ³ /s	02-juli
c2211	Default	Default	Default	0,5 m ³ /s	04-juli
c221g	Default	Default	Default	Spoelen met DLW/GP	07-juli

* bij laagwater (op de Oosterschelde) werd een enkel strengpaar gebruikt, en bij hoogwater twee strengpaar [5].

Tabel 9.1 Gemeten scenario's bij de Krammerjachtensluis 2. De tabel is overgenomen uit Appendix A uit [6]. De in deze validatieslag gebruikte metingen zijn gemarkeerd in het oranje.

Een meetnacht bedraagt ongeveer 14 uur, en is dus net iets langer dan een volledige getijcyclus. In deze validatieslag beschouwen we enkel de situaties met spoeldebiet zonder waterscherm (oranje in Figuur 9.1).

9.3 Varianten modelleren spoeldebiet in WANDA-Locks i.c.m. een bellenscherm

Bij het spoelen van een kolk vindt advectief transport van zout plaats. Een volume zout water uit de kolk wordt per tijdseenheid vervangen door een volume zoet water uit meerzijde.

Een tweede effect dat optreedt, is dat het spoeldebiet de (aan de meerzijde) uittrekkende dichtheidsgolf afremt. Bij het uittrekken van een onbeschermd dichtheidsgolf hoort namelijk een bepaalde snelheid, zie Paragraaf 6.1.4. Dit beschouwende, zou superpositie van de dichtheidsgolf met een spoeldebiet een reductie in de zoutlek naar meerzijde opleveren. Als de snelheid van de onbeschermd dichtheidsgolf bijvoorbeeld 25 cm/s bedraagt, en het spoeldebiet overeenkomt met een doorsnede-gemiddelde snelheid van 10 cm/s, dan is de effectieve zoutlek richting meerzijde een dichtheidsgolf met 15 cm/s. Deze superpositie noemen we "spoelcompensatie".

Bij het gebruik van een bellenscherm zijn er twee varianten:

- Variant 1: Een bellenscherm met een doorlaatfractie η , reduceert in WANDA-Locks de effectieve snelheid van dichtheidsstroming. Met andere woorden, als een onbeschermd zouttong een voortplantingssnelheid U heeft, wordt deze gereduceerd tot een snelheid ηU . Vervolgens wordt deze nieuwe effectieve snelheid gebruikt voor superpositie met het spoeldebiet.

Samenvattend: $U_{\text{effectief}} = \eta \cdot U_{\text{onbeschermd}} - U_{\text{spoeldebiet}}$

- Variant 2: De spoelcompensatie vindt plaats op de snelheid van de onbeschermd tong. Vervolgens wordt deze snelheid gereduceerd met de doorlaatfractie.

Samenvattend: $U_{\text{effectief}} = \eta \cdot (U_{\text{onbeschermd}} - U_{\text{spoeldebiet}})$

Het doel van deze validatieslag is conclusies te trekken over de geschiktheid van de beide modelleringen voor specifieke situaties.

9.4 Vergelijking metingen met WANDA-Locks

In de figuren die volgen is de zoutlek naar meerzijde per schutting uitgezet tegen de waterstand (Oosterschelde) op het moment dat de schutting plaatsvond. Bij hogere waterstanden is de kolk zouter en zal de zoutlek dus relatief hoog zijn. Bij lage waterstanden is de kolk zoet, en is de zoutlek naar meerzijde dus relatief laag. Het verzoeten en verzouten

van de sluiskolk kent enige vertraging. De zoutlek bij uitgaand tij is daarom hoger dan bij opkomend tij. Deze hysteresis wordt verder besproken in [5].

In de figuren is gebruik gemaakt van de meetgegevens verkregen met de handmatige selectie van meetopnemers beschreven in [6]. Deze geven het meest realistische verloop van de zoutlek over een schutcyclus in de metingen.

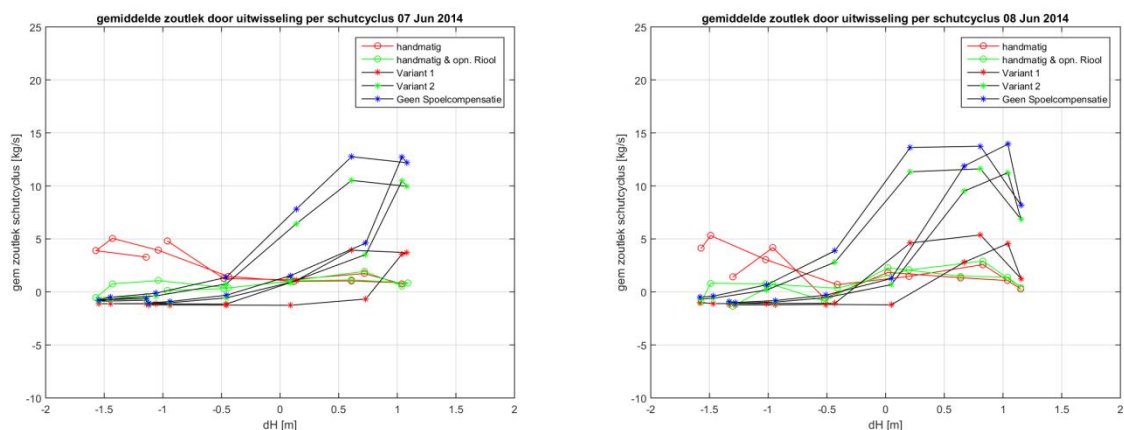
In Figuur 9.1 zijn de resultaten weergegeven voor de nachten van 7 en 8 juni. In deze nachten draaide het bellenscherm bij Zijpe op half vermogen, wat betekent dat de kolk bij hoogwater relatief zout is, wat een hogere zoutlek richting meerzijde met zich meebrengt.

De rode en groene lijn geven de metingen van die nacht aan, en een mate van spreiding daarin. Bij de groene lijn wordt gebruik gemaakt van de opnemer in het riool om de saliniteit van het teruggespoelde water te bepalen, en bij de rode lijn de dichtstbijzijnde opnemer in de kolk. De werkelijk optredende zoutlek ligt waarschijnlijk dichterbij een van de twee lijnen, afhankelijk van de toestand in de kolk (zie [6]).

De zwarte lijnen geven het effect van spoelcompensatie aan op de zoutlek. De blauwe markers geven de zoutlek aan als er geen enkele spoelcompensatie wordt toegepast, i.e. enkel advectief transport. De zwarte lijn met de rode markers geeft "Variant 1" aan, en de groene markers "Variant 2" (zie Paragraaf 9.3).

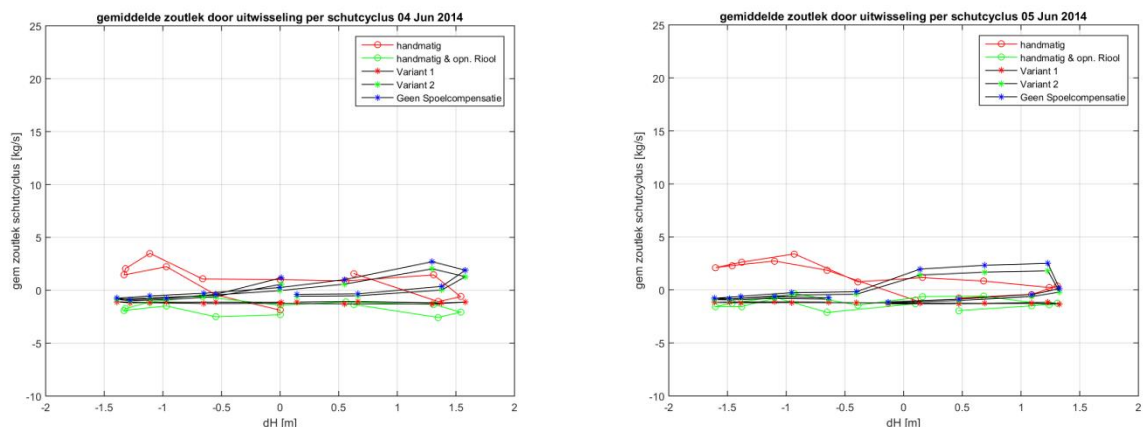
Voor de meetnachten van Figuur 9.1 is volgens [6] de meetopnemer in het riool het realistisch, i.e. groene lijn. We zien dat er bij lage waterstanden op de Oosterschelde er dan nauwelijks verschil is tussen de metingen, en alle varianten van spoelcompensatie. Dit komt omdat er nauwelijks een dichtheidsverschil tussen de kolk en meerzijde is op dit moment, dus is de grootte van een dichtheidsstroming praktisch te verwaarlozen.

Bij hogere waterstanden op de Oosterschelde zien we verschillen ontstaan tussen de varianten voor spoelcompensatie. Allereerst valt op dat de hysteresis sterker zichtbaar is in de WANDA-Locks simulaties dan in de metingen. Verder valt op dat Variant 1 (rode markers) de beste benadering lijkt te geven van de optredende zoutlek. De zoutlek in de simulaties met Variant 2 liggen dichtbij die van de resultaten zonder spoelcompensatie, en beide simulaties liggen ver boven de gemeten waarden. Hieruit valt te concluderen dat de optimistische spoelcompensatie Variant 1 de voorkeur heeft.



Figuur 9.1 Zoutlek als functie van het waterstandsverschil tussen de Oosterschelde en het Volkerak-Zoommeer voor 7 en 8 juni voor zowel de metingen (rode en groene lijn) en de simulaties (zwarte lijnen). Constant luchtdebiet aan beide kanten gedurende hele getij.

De volgende twee meetnachten waarmee het model vergeleken wordt zijn die van 4 en 5 juni. In deze nachten werd er aan de zoute kant extra luchtdebiet gebruikt bij hoogwater. Dientengevolge is de kolk ook bij hoge waterstand relatief zoet. De verwachting uitgesproken in [6] is dat de opnemers in het riool in deze situatie geen goede indicatie meer geven. De groene lijn is daarom minder betrouwbaar dan de rode lijn (voornamelijk bij hoge waterstanden op de Oosterschelde). Kijkend naar Figuur 9.2 zou dit betekenen dat Variant 1 te optimistisch is, en dat Variant 2 een betere benadering geeft van de gemeten zoutlek (rode lijn).



Figuur 9.2 Zoutlek als functie van de waterstandsverschil tussen de Oosterschelde en het Volkerak-Zoommeer voor 4 en 5 juni voor zowel de metingen (rode en groene lijn) en de simulaties (zwarte lijnen). Dubbel luchtdebiet aan zoute kant bij hoge waterstand.

9.5 Resultaten en kanttekeningen

Het is mogelijk om op basis van de beschikbare meetgegevens een gedeeltelijke uitspraak te doen over de juistheid van de formulering van het spoeldebiet in WANDA-Locks, en de effectiviteit van spoelen in combinatie met een bellenscherm. Helaas is vanwege het afwezig zijn van een meting met enkel een spoeldebiet (en dus zonder bellenscherm) niet mogelijk om de validiteit van superpositie te toetsen. De verschillen in de nacht van 7 en 8 juni tussen de varianten uit Paragraaf 9.3 spreken voor het toepassen van Variant 1. Daarentegen blijkt in de resultaten van 4 en 5 juni juist Variant 2 een betere overeenstemming te hebben met de meetwaarden. Omdat bij de meetnachten van 4 en 5 juni de gemeten zoutlekwaarden weinig verschillen tussen hoog en laagwater, verwachten we dat de onzekerheid in de metingen hier een relatief grote rol speelt. Daarom is gekozen om de licht optimistische methode “Variant 1” als standaard te hanteren in WANDA-Locks. Het is niet zondermeer mogelijk om als gebruiker Variant 2 te selecteren.

Zoals besproken in [5] en [6], is de onzekerheid in de metingen groot. Kwalitatief zijn er redelijke uitspraken te doen, maar bij kwantitatieve beoordelingen moet een slag om de arm gehouden worden. De plaatsing en de keuze van de opnemers, de handmatige kalibratie, de schommelingen van de zouttong in de kolk, en andere effecten brengen grote onzekerheden met zich mee.

Als laatst dient de kanttekening geplaatst te worden dat de Krammerjachtensluizen een verdiepte kolk hebben. De effecten hiervan op de locatie van de halocline, en lokale zoete plekken, kan grote invloed hebben op de bepaalde effectiviteit van spoelen. De toepasbaarheid van deze benadering in WANDA-Locks op de Krammerduwvaartsluizen is te onderbouwen (geperforeerde bodem, maar wel diep). Voor andere sluizen, zoals de Stevinsluis, is echter niet bekend of dezelfde optimistische benadering stand houdt.

9.6 Voorlopige conclusies

Deze validatieslag waarin berekeningen van het model zijn vergeleken met metingen in de Krammerjachtensluis geeft een goed beeld van de nauwkeurigheid van de spoelcompensatie in WANDA-Locks. Hoewel slechts een beperkt aantal metingen is geanalyseerd komt naar voren dat Variant 1 het dichtst in de buurt komt van de meetwaarden, ondanks dat deze benadering licht optimistisch is.

Er zit wel een behoorlijke onzekerheid in de metingen. Bovendien is er vanwege de geometrie van de Krammerjachtensluizen (verdiepte kolk) enige behoudendheid vereist bij het toepassen van deze wijze van modelleren van spoeldebieten op sluizen met een platte bodem, totdat ook hiervoor informatie over beschikbaar is.

10 Conclusie en aanbevelingen

10.1 Conclusies validatie

De omzetting van het Zoutlekmodel naar WANDA-Locks is succesvol uitgevoerd. De validatie van WANDA-Locks laat zien dat:

- De processen, die de zout-zoetuitwisseling gedurende een schutproces beschrijven, voor een onbeschermd kolk op de juiste manier in WANDA-Locks zijn geïmplementeerd;
- De resultaten van WANDA-Locks zijn vergelijkbaar met de berekeningen met het Zoutlekmodel. De (kleine) verschillen worden veroorzaakt door verschillen in de modellering. Ten eerste rekent WANDA in drukken, waar het Zoutlekmodel in waterstanden rekent. Verder houdt WANDA-Locks (in tegenstelling tot het Zoutlekmodel) rekening met:
 - o Variërend zoutgehalte tijdens het schutproces
 - o Variërende waterstand tijdens het schutproces
 - o Spoeldebieten en de invloed hiervan op de dichtheidsstroming
- De berekeningen met een bellenscherm komen overeen met de berekeningen met het Zoutlekmodel.
- Het model is in staat om de metingen van de Stevinsluis goed te reproduceren.
- Het model is in staat om de metingen van de Krammersluis goed te reproduceren.

10.2 Aanbevelingen

Aanbevolen wordt om de validatie van WANDA-Locks uit te breiden door gebruik te maken van meer meetgegevens. Van de Stevinsluis is enkel de zoutlek in onbeschermd situatie bekeken, en deze zou dus uitgebreid kunnen worden met metingen voor de beschermde kolk. Van de Krammerjachtensluis is in de validatie enkel de combinatie van spoelen met bellenscherm beschouwd. Ter uitbreiding van de validatie kan gebruik gemaakt worden van de volgende metingen:

- op de Stevinsluis (2010):
 - Bellenscherm
 - Waterscherm
 - Spoeldebieten (aanpassing postprocessing vereist)
- op de Krammerjachtensluis (2014):
 - Bellenscherm
 - Waterscherm

De invloed van de een diepe kolkbodem kan ook onderzocht worden door de resultaten van beide sluizen te vergelijken. Er dient wel opgemerkt te worden dat niet alle metingen van even grote kwaliteit waren, voornamelijk in de meetsessie op de Krammersluizen (2014). Voordat de keuze wordt gemaakt om verdere validatie te doen zal dus eerst gekeken moeten worden naar de bevindingen in [5] en [6] wat betreft de onzekerheid en haalbaarheid hiervan.

Naast het gebruik van meer meetgegevens kan ter validatie ook nog de vergelijking gemaakt worden tussen het ZLM en WANDA-Locks wat betreft de volgende twee elementen:

- Afstand bellenscherm tot deur
- Invloed van scheepverplaatsing op de zoutlek.

10.3 Verbeteringen WANDA-Locks

Het model WANDA-Locks is bruikbaar en modelleert de zout-zoet-uitwisseling gedurende een schutproces op de juiste manier. Verbeteringen aan WANDA-Locks kunnen:

- het modelgebruik vereenvoudigen;
 - Invoer van gegevens;
De invoer van sommige dezelfde gegevens moet op verschillende plekken in de schematisatie. Dat zou beter kunnen worden geregeld door invoervelden te koppelen en eventueel dataoverdracht te faciliteren.
 - Modelleren van schutcomplex;
 - De sluiskolk vereist nu een initiële waterstand en saliniteit, waardoor er een 'klep'/deur tussen voorhaven en zee/meer vereist is. Het zou de modellen verduidelijken wanneer deze klep niet nodig is en de head/saliniteit uit de zee of meer-randvoorwaarde wordt overgenomen;
 - Faciliteren gebruik van een deelskolk.
- het rekenhart verbeteren;
Aanvullende validatie op basis van beschikbare metingen kan leiden tot aanscherping van de bestaande formuleringen, bijvoorbeeld met betrekking tot:
 - een diepe bodem;
 - combinatie bellenscherm en spoeldebiet;
 - Invloed van scheepvaart op het uitwisselingsproces.
 - Invloed afstand bellenscherm tot deur

A Literatuurlijst

- [1] Manual WANDA-Locks, 2014
- [2] Opzet procesaansturing generiek zoutlekmodel (SAD), Memo, PPD van der Ven, 2013
- [3] Ontwerpstudie en praktijkproef zoutlekbepierking Volkeraksluizen: beschrijving en resultaten praktijkproef Stevinsluis en evaluatie maatregelen Stevinsluis, R.E. Uittenbogaard, J.M. Cornelisse, 2011
- [4] Luchtbellenscherm op drempel, Effectiviteit en benodigde luchtdebieten, CFD-berekeningen, I. de Groot-Wallast, T.S.D. o'Mahoney, 2014
- [5] Pilot Krammerjachtensluis – Meet- en monitoringsprogramma, Versie 3, P.P.D. van der Ven, 2014
- [6] Pilot Krammerjachtensluis – Vervolganalyse resultaten Meet- en Monitoringsprogramma, S. Zwanenburg, 2015

B Gebruikte tools validatieslag 3

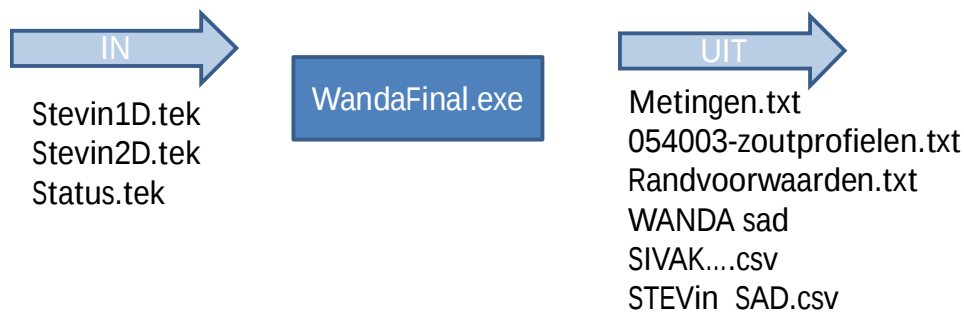
Validatieslag 3 is opgebouwd uit de volgende stappen.

- 1 Kenmerken van de metingen
- 2 De kenmerken van de metingen worden ook gebruikt als invoer voor de berekeningen met WANDA-Locks.
- 3 Narekenen met WANDA-Locks
- 4 Vergelijking metingen met resultaten WANDA-Locks

Voor stap 1 wordt gebruik gemaakt van de dataverwerking, zoals opgezet voor het Zoutlekmodel (Lit. [3]).



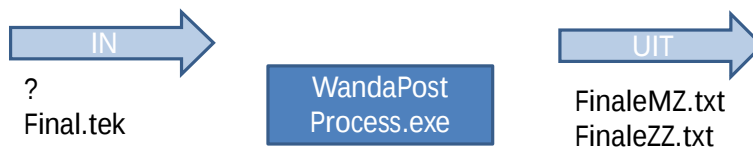
Daarnaast zijn verscheidene programma-onderdelen (Wanda.exe, Wanda2.exe) geschreven en samengevoegd tot één programma (WandaFinal.exe) waarmee kenmerken van de schuttingen worden bepaald en omgezet naar randvoorwaarden voor WANDA-Locks.



Vanuit deze file randvoorwaarden.txt moeten ze vervolgens gekopieerd worden naar de parametersheet die zich in dezelfde map bevindt. Hierna kan WANDA gedraaid worden door op RUN klikken. WANDA genereert dan een aantal uitvoerfiles met de naam TEMPCASE_O***.csv die informatie bevatten over de deurstanden en de zoutmassa in de kolk.



Om van deze uitvoerfiles tot waarden voor de zoutlek te komen is het programma WandaPostProces (roept SAL2PSU aan) geschreven.



Dit programma leest de uitvoerfiles in en schrijft in kolommen de volgende informatie uit:

- Kolom 1: datum van de schutting
- Kolom 2: deuropentijd
- Kolom 3: de laatste fase waarin de uitwisseling zich bevond
- Kolom 4: gemeten zoutlek (uit finale.tek)
- Kolom 5: gemeten zoutlek (uit stevin1d.tek, ter controle)
- Kolom 6: theoretische schatting (uit finale.tek)
- Kolom 7: theoretische schatting (uit stevin1d.tek, ter controle)
- Kolom 8: handberekening theoretisch schatting
- Kolom 9: % fout tussen handberekening en theoretische schatter
- Kolom 10: berekening WANDA
- Kolom 11: handberekening WANDA
- Kolom 12: % fout tussen handberekening en WANDA
- Kolom 13: verschil tussen handberekening en WANDA
- Kolom 14: Saliniteitsverschil kolk-voorhaven

C Figuren Validatie 2 met bellenscherm

