Deltares

Enabling Delta Life

Zoutindringing IJmuiden

Fase 3: Verdere uitwerking mogelijke bronmaatregelen

Deltares

Zoutindringing IJmuiden

Fase 3: Verdere uitwerking mogelijke bronmaatregelen
Eindrapport

Arnout Bijlsma
Otto Weiler

1220309-000

© Deltares, 2016, B

Deltares

Titel
Zoutindringing IJmuiden

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
RWS	1220309-000	1220309-000-HYE-0045	114

Trefwoorden
Zoutindringing, sluizen, IJmuiden, Noordzeekanaal, Amsterdam-Rijnkanaal

Samenvatting
De bouw van een nieuwe zeesluis bij IJmuiden zal leiden tot een toename van de zoutindringing en daarmee tot een verhoging van het zoutgehalte op het Noordzeekanaal. Omdat dit ongewenst kan zijn voor gebruikers van het water uit het Noordzeekanaal zijn maatregelen nodig. Bronmaatregelen proberen te voorkomen dat het Noordzeekanaal zouter wordt. Lokale maatregelen proberen de effecten voor lokale gebruikers van het water te mitigeren. In vervolg op eerdere verkenningen van de zoutindringing en mogelijke maatregelen heeft Rijkswaterstaat aan Deltares gevraagd om een aantal van de mogelijke bronmaatregelen verder uit te werken. Gevraagd is de volgende producten uit te werken:

1) Een advies over de te verwachten bijdrage van een vaste drempel in het binnenhoofd aan de bestrijding van de zoutindringing en de daarbij te verwachten operationele beperkingen.
2) Een verkenning van de reëel te verwachten operatie van de zeesluis, met daarbij te beschouwen de deur-opentijden en het aantal schuttingen per dag.
3) Een advies over een voorlopig hydraulisch ontwerp van een selectieve onttrekking.
4) Een review en een update van het in voorgaande studies gebruikte hydrodynamische model van het Noordzeekanaal (NZK) en het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK).
5) Een advies over de effectiviteit van selectieve onttrekking bij het sluizencomplex van IJmuiden, inclusief de effecten op systeem niveau.

Om tot het uiteindelijke advies te komen zijn de Delft3D-modellen zoals gebruik voor de MER voorzien van een sterk verbeterde beschrijving van de zoutlast vanuit de sluizen. Deze is met behulp van WANDA-Locks afgeleid uit de verkeerssimulaties door PMSS voor de verschillende scenario's van ladingsstroom en sluisafmetingen. Hierbij zijn, voor het eerst, variaties in zowel het schutbedrijf als de mate van kolkuitwisseling meegenomen.

De uiteindelijke berekeningen laten zien dat verwacht mag worden dat het toepassen van een Selectieve Onttrekking een goede maatregel is die in de meeste situaties afdoende zal zijn voor het beperken van de zoutindringing op het NZK en ARK zoals beoogd.

Referenties
Offerteaanvraag "Verdiepen bronmaatregelen beperking zout", 13-7-2015; Offerte 1220309-000-HYE-0008 van 24-7-2015 en Opdracht met zaaknr. 31107934 van 24-8-2015.
Offerte 1220309-000-HYE-0035 "Meerwerk verdiepen bronmaatregelen beperking zout" van 1-3-2016 en Opdracht met zaaknr. 31107934.0001 van 7-3-2016.
Offerteaanvraag "Selectieve onttrekking afronden verkenningsfase", van 10-5-2016; Offerte 1220309-000-HYE-0042 van 25-5-2016 en Opdracht met zaaknr. 31118686 van 30-5-2016.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0	sep. 2016	Arnout Bijlsma, Otto Weiler		Klaas Jan Bos		Wiel Tilmans	
1	okt. 2016	Arnout Bijlsma, Otto Weiler		Klaas Jan Bos		Wiel Tilmans	

Status
definitief

Deltares

Titel
Zoutindringing IJmuiden

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
RWS	1220309-000	1220309-000-HYE-0045	114

Inhoud

1 Inleiding 1
1.1 Algemeen 1
1.2 Selectie van te beschouwen bronmaatregelen 1
1.3 Vraagstelling en producten 2
1.4 Opdrachtverlening en verloop van de studie 3
1.5 Dit rapport 4

2 Aanpak 5
2.1 Verkenning van de nautische operatie van de sluis 5
2.2 Advies inzake drempel in het binnenhoofd 5
2.3 Voorlopig hydraulisch ontwerp van de selectieve onttrekking 5
2.4 Eerste verkenning van selectieve onttrekking met Delft3D 6
2.5 Effecten van variaties in deur-opentijden en schutfrequenties op zoutlek 6
2.6 Onderzoek prestaties selectieve onttrekking met Delft3D 7

3 Operationele overwegingen 9
3.1 Algemeen 9
3.2 Resultaten verkennend overleg 25 juni 2015 9
3.2.1 Huidige en toekomstige schutcyclus 10
3.2.2 Mogelijkheid om de deur-opentijd te beperken 11
3.2.3 Mogelijkheid om het aantal schuttingen per dag te beperken 11
3.2.4 Conclusies uit het overleg 12
3.3 Resultaten uit scheepvaartsimulaties PMSS 13
3.3.1 Referentie zoals gehanteerd in de MER: 95 MTPA met de Noordersluis 14
3.3.2 Overgangssituatie bij oplevering van de nieuw sluis van 70m breed 14
3.3.3 Projectalternatief: 125 MTPA door de nieuwe sluis van 70m breed 15
3.3.4 Simulaties met aanpassingen in beheer en afmetingen 16
3.3.5 Conclusies uit simulaties PMSS 18
3.3.6 Correctie op eerdere berekeningen; consequentie voor deur-opentijden 19
3.4 Registraties van schuttingen in PONTIS 19
3.5 Operationele ervaring met bellenschermen 22
3.6 Conclusies betreffende de operationele aspecten 22

4 Drempel aan het binnenhoofd 25
4.1 Operationele aspecten 25
4.2 Bijdragen van een drempel aan het beperken van de zoutindringing 26
4.3 Hydrodynamische belastingen op de drempel 27
4.4 Conclusies betreffende het aanbrengen van een drempel 27

5 Ontwerp / dimensionering selectieve onttrekking 29
5.1 Het nu voorliggende schetsontwerp 29
5.1.1 Afmetingen 29
5.1.2 Inpassing in het complex 29
5.1.3 Passeerbaarheid voor scheepvaart 30
5.1.4 Bewegingen van de schuiven 30
5.1.5 Bodemligging 31
5.1.6 Belastingen op de constructie 31

5.2 Opgave aan selectieve onttrekking 31
5.2.1 Maatgevende debieten 32
5.2.2 Schatting van de totale zoutlek door de scheepvaartsluizen 33
5.2.3 Opgave aan selectieve onttrekking 36
5.3 Eerste beoordeling van de prestaties van het schetsontwerp 36
5.3.1 Verkennende empirische berekeningen van een zoutscherm 37
5.3.2 Eerste onderzoek selectieve onttrekking middels CFD 41
5.3.3 Onderzoek efficiency selectieve onttrekking met CFD 42
5.4 Conclusies dimensionering schetsontwerp 46

6 Eerste verkenning van selectieve onttrekking met Delft3D 49
6.1 Algemeen 49
6.2 Het effect van selectieve onttrekking op de zoutverdeling in het Noordzeekanaal 50
6.3 Conclusies verkenning selectieve onttrekking in Delft3D 53

7 Effecten van variaties in deur-opentijden en schutfrequenties op zoutlek 55
7.1 Algemeen 55
7.2 Eerste analyse schutfrequentie en deur-opentijden 56
7.3 Opzet Wanda-Locks model en verificatie voor 2005 58
7.4 WANDA-Locks analyse van zoutlek overige 3 toestanden 61
7.5 Effecten van maatregelen waaronder bellenschermen 62
7.5.1 Beperken van de deur-opentijden 62
7.5.2 De inzet van bellenschermen 63
7.5.3 Bellenschermen in combinatie met het beperken van de deur-opentijden 63
7.5.4 Eerste verkenning inzet selectieve onttrekking 64

8 Onderzoek prestaties selectieve onttrekking met Delft3D 67
8.1 Algemeen 67
8.2 Weergave selectieve onttrekking in Delft3D 67
8.3 Scenario’s uit de MER-rapportage 69
8.4 Berekeningen met verbeterd NZK en ARK model 71
8.5 Conclusies prestaties selectieve onttrekking 81

9 Samenvatting en conclusies 83

Bijlage(n)

Referenties 1

A Bespreekverslag 25 juni 2015, operationele aspecten A-1

B Reductie van de zoutindringing middels een drempel in het binnenhoofd B-1

C Analyse van de prestaties van een selectieve onttrekking o.b.v. empirische relaties C-1

D Verkenning effect selectieve onttrekking met behulp van Delft3D D-1

E Memo CFD-Validatie E-1

F Tekening voorlopige inpassing Selectieve Onttrekking F-1

G Geregistreerd sluisbedijf 2013 en 2014 G-1

H Afvoerdebieten van het Noordzeekanaal en het Amsterdam Rijnkanaal H-1

I Correcties op Verkenning maatregelen beperken zoutlek Nieuwe Zeesluis IJmuidenI-1

J Onderzoek werking selectieve onttrekking J-1

K Berekening zoutindringing IJmuiden met WANDA-Locks K-1

L Berekening effectiviteit selectieve onttrekking met behulp van Delft3D L-1

1 Inleiding

1.1 Algemeen

De bouw van een nieuwe zeesluis bij IJmuiden zal leiden tot een toename van de zoutindringing en daarmee tot een verhoging van het zoutgehalte op het Noordzeekanaal. Omdat dit ongewenst kan zijn voor gebruikers van het water uit het Noordzeekanaal zijn maatregelen nodig. Bronmaatregelen proberen te voorkomen dat het Noordzeekanaal zouter wordt. Lokale maatregelen proberen de effecten voor lokale gebruikers van het water te mitigeren.

Een eerste verkenning van de zoutindringing en mogelijke maatregelen is uitgevoerd als Fase 1 van het onderzoek [1]. Vervolgens is een eerste verkenning gedaan naar lokale maatregelen om zoutindringing in Zijkanaal C te beperken [2]. In Fase 2 zijn de opgave, mogelijkheden, en vraagstukken betreffende de beperking van de zoutindringing verder in kaart gebracht [4]. In dat rapport wordt een zeer breed pallet aan denkbare maatregelen gepresenteerd, die met elkaar worden vergeleken op een reeks aan aspecten, waaronder de te verwachten kosten en effectiviteit. Parallel daaraan, en vooruitlopend op een eventueel besluit tot het toepassen van een bellenscherm bij de nieuw te bouwen sluis is voor een dergelijk systeem een voorlopige productomschrijving opgesteld; dit om tijdig de ruimtereserveringen te laten opnemen in het ontwerp van de sluis [3].

Aansluitend op de aanbevelingen in het rapport over Fase 2 heeft Rijkswaterstaat aan Deltares gevraagd om een aantal van de mogelijke bronmaatregelen verder uit te werken. Deze vraag is te beschouwen als Fase 3 van het onderzoek.

1.2 Selectie van te beschouwen bronmaatregelen

Als eerste prioriteit is aan Deltares gevraagd om op korte termijn in kaart te brengen wat de mogelijke bijdrage kan zijn van het aanbrengen van een drempel in het binnenhoofd van de nieuwe sluis (aan de kanaal-zijde van de deuren) aan het beperken van de zoutindringing. Daarnaast te bekijken wat de operationele implicaties hiervan zijn. Dit was op korte termijn nodig omdat een besluit hiertoe moet worden meegenomen in het DBFM-contract voor de nieuwe sluis. (Het aanbrengen van een bellenschermen zal buiten het DBFM-contract vallen; dit wordt een ‘directie-levering’ van RWS aan de opdrachtnemer.)

Verder is voor RWS van belang dat de maatregelen robuust zijn. Tegen deze achtergrond volgden uit Fase 2 [4] de volgende voorkeuren voor de te nemen bronmaatregelen:

1. Als voorkeur bij aanvang van de studie geldt het realiseren van een selectieve onttrekking waarmee per afgevoerde kubieke meter water zo veel mogelijk kilogram zout worden afgevoerd uit het Noordzeekanaal (NZK) terug naar zee. Deze oplossing kan afdoende zijn zolang er voldoende afvoer over het kanaal plaatsvindt. Als de afvoer terugloopt (in tijden van droogte) zal het zoutgehalte in het NZK, en later ook in het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK), weer oplopen; afhankelijk van hoe snel dit zoutgehalte oploopt zal de zoutindringing dan moeten worden beperkt door aanvullende maatregelen.
2. Als eerste aanvullende maatregel (maar ook als mogelijk alternatief voor een selectieve onttrekking) wordt gedacht aan het aanbrengen van bellenschermen in beide

sluishoofden. Deze vragen van de operatie mogelijk wel het beperken van de deur-opentijden; het is van belang de operationele haalbaarheid hiervan in kaart te brengen. Voordelen van het aanbrengen van bellenschermen is dat:

– hiermee ook een maatregel beschikbaar is voor het geval de selectieve onttrekking tijdelijk niet beschikbaar is of als hij niet op tijd gereed zou zijn (bij oplevering van de sluis, eind 2019);

– dat bellenschermen ook bijdragen aan het reduceren van de (grote) krachten op de schepen door de dichtheidsstroming die optreedt bij het openen van de sluisdeur.

3 Als laatste maatregel zou overwogen kunnen worden om, in tijden van droogte, een beperking op te leggen aan het maximaal aantal schuttingen per dag om hiermee de zoutindringing te beperken. Met de grote afmetingen van de nieuwe sluiskolk zou dit vragen om het goed plannen en indelen van de sluis met meerdere schepen per schutting, zodat (met een beperkte vertraging) toch alle schepen geschut worden.

Uit bovenstaande blijkt dat primair wordt ingezet op het realiseren van een selectieve onttrekking. Een belangrijk voordeel hiervan is dat deze maatregel *geen* implicaties heeft voor de operatie van de nieuwe sluis. Maar de kans bestaat dat die maatregel alleen niet voldoende zal zijn, zodat ook andere maatregelen moeten worden genomen die wel implicaties hebben voor de operatie.

1.3 Vraagstelling en producten

In de formulering van Rijkswaterstaat betreft de vraag het nader uitwerken van de mogelijkheden en de effectiviteit van de volgende maatregelen:

a) het aanbrengen van een drempel in het sluishoofd aan de binnenzijde (deze drempel te voorzien aan de kanaalzijde van de oostelijke sluisdeur);

b) het realiseren van een selectieve onttrekking, waarmee het debiet dat via het spuikanaal wordt afgevoerd onder uit de binnenvoorhaven wordt onttrokken, om daarmee zoveel mogelijk zout per kubieke meter water af te voeren,

c) voor wat betreft het aanbrengen van bellenschermen in beide sluishoofden: de mogelijkheid om in de operatie de deur-opentijden in voldoende mate te beperken (eerste berekeningen aan de effectiviteit zijn uitgevoerd in Fase 1; de resultaten zijn gebaseerd op aannamen t.a.v. de deur-opentijd);

d) een eerste verkenning van de mogelijkheid tot het opleggen van beperkingen aan het maximaal aantal schuttingen per dag.

De opdracht diende te worden uitgewerkt in de volgende producten:

1) Een advies omtrent de te verwachten bijdrage van een vaste drempel in het binnenhoofd aan de bestrijding van de zoutindringing en de daarbij te verwachten operationele beperkingen.

2) Een verkenning van de reëel te verwachten (nautische) operatie van de zeesluis, met daarbij te beschouwen de deur-opentijden en het aantal schuttingen per dag.

3) Een advies inhoudende een voorlopig hydraulisch ontwerp van de selectieve onttrekking.

4) Een review en een update van het in voorgaande studies gebruikte hydrodynamische model van het Noordzeekanaal (NZK) en het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK).
5) Een advies inzake de te verwachten prestaties van de selectieve onttrekking.

De opdracht resulteerde o.a. in een voorlopig hydraulisch ontwerp van de selectieve onttrekking op basis van expert judgement.

Dit heeft geleidt tot de volgende aanvullende vraag van Rijkswaterstaat:

e) Gevraagd wordt het alternatief van selectieve onttrekking bij het sluizencomplex van IJmuiden verder uit te werken om definitieve uitspraken over de effectiviteit van selectieve onttrekking te kunnen doen, inclusief de effecten op systeem niveau.

Deze vraag diende te worden uitgewerkt in de volgende producten:

6) De bepaling van het effect van de variaties in deur-opentijden en schutfrequentie op de zoutlek op basis van gedetailleerde informatie uit simulaties van PMSS (Port and Maritime Systems Simulation).
7) De uitbreiding van het in voorgaande studies gebruikte hydrodynamische model van het Noordzeekanaal (NZK) en het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK) met een model voor de zoutbelasting door de scheepvaartsluizen en een (onderbouwde) subgrid schematisering van selectieve onttrekking om de effecten daarvan op systeem niveau te kunnen onderzoeken.
8) De verdere onderbouwing van de effectiviteit van selectieve onttrekking, inclusief de effecten op het niveau van het watersysteem NZK en ARK, en een advies over de hoofdafmetingen in relatie tot de te verwachten prestaties van de selectieve onttrekking.

1.4 Opdrachtverlening en verloop van de studie

Na oplevering van het rapport over Fase 2 [4] en overleg hierover tussen RWS en de betrokken partijen in de omgeving, is overleg gestart over de volgende stappen. Dit heeft geleid tot een offerteaanvraag op 13 juli 2015, een offerte d.d. 24 juli 2015 en bevestiging van de opdracht op 24 augustus 2015. Over de voortgang van de werkzaamheden is regelmatig overleg gepleegd. Tevens is op 19 augustus 2015 een presentatie gehouden van de voorgenomen werkzaamheden voor de betrokken partijen uit de omgeving: de waterschappen rond het Noordzeekanaal en de Provincie Noord-Holland. Op 18 september 2015 is een interim rapport uitgebracht (Kenmerk 1220309-000-HYE-0019-v1-r), dat zicht gaf op de resultaten betreffende de eerste drie producten zoals hierboven genoemd: de drempel, de operatie en een voorlopig hydraulisch ontwerp van de selectieve onttrekking.

Vervolgens is veel inspanning gestoken in het herzien van de ‘opgave’ aan selectieve onttrekking op basis van de laatste inzichten over de waterbalans en de zoutbalans van het NZK en ARK. Verder is de effectiviteit van selectieve onttrekking nader onderzocht, zodat een expert judgement over het hydraulisch ontwerp van de selectieve onttrekking kon worden gegeven, zie het 2^{e} interim rapport (Kenmerk 1220309-000-HYE-0028-v1-r) van 7 januari 2016. De resultaten zijn op 23 november 2015 gepresenteerd in een Werksessie verzilting ZTY met de waterbeheerders.

Intussen was gebleken dat meer inzicht in de operatie van de sluis noodzakelijk is om realistische, onderbouwde zoutlekrandvoorwaarden te kunnen formuleren voor de numerieke modellering van de ontwikkeling van het zoutgehalte in het NZK en het ARK. Deze informatie kwam eind januari 2016 ter beschikking, nadat PMSS hiervoor de simulaties opnieuw had gedraaid (zie meerwerk offerte van 1 maart 2017 en opdracht van 7 maart 2016).

Na oplevering van het 2^{e} interim rapport is overleg gevoerd over het afronden van de verkenningsfase met een advies over de verwachte prestaties van selectieve onttrekking inclusief de effecten op systeem niveau. Dit heeft geleid tot een offerteaanvraag op 10 mei 2016, een offerte d.d. 25 mei 2016 en bevestiging van de opdracht op 30 mei 2016. Naast regelmatig overleg over de voorgang zijn de actuele resultaten gepresenteerd in Werksessies met de waterbeheerders (12 juli en 13 september 2016).

Met het voorliggende eindrapport wordt de verkenningsfase naar bronmaatregelen tegen de toename van de zoutindringing ten gevolge van de nieuwe zeesluis bij IJmuiden afgesloten. Het rapport onderbouwt op basis van het verbeterde hydrodynamische model van het NZK en ARK de prestaties van een selectieve onttrekking met de globale dimensies van het eerste schetsontwerp.

1.5 Dit rapport

Dit eindrapport bouwt voort op het 2^{e} interim rapport van 7 januari 2016, dat zicht gaf op de resultaten betreffende de eerste drie producten: de drempel, de operatie en een voorlopig hydraulisch ontwerp van de selectieve onttrekking.

De belangrijkste aanvullingen treft men aan in de volgende hoofdstukken en paragrafen:

- Hoofdstuk 5: in par. 5.3.3 zijn ter verduidelijking de resultaten van berekeningen zonder zoutscherm toegevoegd aan de beoordeling van de prestaties van het schetsontwerp. De conclusies in par 5.4 veranderen hierdoor echter niet.
- Hoofdstuk 7: hierin wordt een eerste analyse van de nieuwe gegevens uit de PMSS scheepvaartsimulaties gegeven, en de opzet en validatie van het WANDA-Locks model voor de zoutlek bij IJmuiden besproken. Hiermee is de zoutlek door de scheepvaartsluizen en de zoutflux naar het NZK onderzocht ten gevolge van de nieuwe zeesluis met en zonder selectieve onttrekking of bellenschermen.
- Hoofdstuk 8: hierin worden de prestaties van selectieve onttrekking onderzocht op basis van het hydrodynamische model van het NZK en ARK dat daarvoor is voorzien van verbeterde zoutlekrandvoorwaarden berekend met WANDA-Locks op basis van de simulatiegegevens van PMSS.
- Hoofdstuk **Error! Reference source not found.**: de samenvatting en conclusies is aangevuld vanaf punt 15.

Ter ondersteuning van de bovenstaande aanvullingen is Bijlage J over het 2DV onderzoek van de werking van selectieve onttrekking geüpdate, en zijn nieuwe Bijlagen K en L toegevoegd, resp. over de berekening van de zoutindringing bij IJmuiden met WANDA-Locks en PMSS data, en de berekening van de effecten van selectieve onttrekking met behulp van Delft3D.

2 Aanpak

Om tot de gevraagde producten te komen is de volgende aanpak gehanteerd.

2.1 Verkenning van de nautische operatie van de sluis

Op 25 juni 2015 is een verkennend overleg gehouden met een aantal mensen die bekend zijn met en betrokkenen zijn bij de operatie van het huidige sluizencomplex waar het de scheepvaart betreft. In dit overleg zijn operationele aspecten besproken betreffende het aanbrengen van een drempel, het beperken van de deur-opentijden en het evt. beperken van het aantal schuttingen. De resultaten zijn vastgelegd in een memo (Bijlage A) en worden besproken in Hoofdstuk 3.

Vervolgens is gekeken naar de capaciteitsstudies zoals uitgevoerd door PMSS (R. Groenveld) en DHV [8] en [9]. Hierbij is o.a. gekeken naar het in die studies gehanteerde aantal schutting per dag voor verschillende sluisvarianten en ladingsstromen in miljoen ton per jaar (MTPA).

(Er is nog niet gekeken naar de operationele ervaringen met bellenschermen op zeesluizen, gericht op de hinder ervaren door de scheepvaart. Het betreft hierbij met name de zeesluizen van Terneuzen (daar zijn de bellenschermen nog gedeeltelijk actief) en IJmuiden, waar in het verleden bellenschermen actief waren.)

2.2 Advies inzake drempel in het binnenhoofd

Uit het gesprek over de operationele aspecten is gebleken welke diepteligging van de drempel aanvaardbaar is. De bijdrage van een drempel aan het beperken van de zoutindringing is verkend door middel van CFD-berekeningen. Voor de constructieve uitwerking en de kostenraming (door Ingenieursbureau Rotterdam) zal een inschatting worden gemaakt van de te verwachten belastingen op een drempel. Met een beeld van de kosten en de effecten kan RWS dan een besluit nemen om al of niet een drempel toe te passen. De resultaten van de CFD berekeningen zijn vastgelegd in een memo (Bijlage B) en worden besproken in Hoofdstuk 4.

2.3 Voorlopig hydraulisch ontwerp van de selectieve onttrekking

Als eerste schatting is op basis van in het verleden uitgevoerd schaalmodelonderzoek voor selectieve onttrekking (een van de figuren uit [5], overgenomen in [7]) gekozen voor drie openingen met elk een breedte van 40 m, af te sluiten met schuiven met een opening onder de schuif van 4 m, en een bodemdiepte onder de schuiven van NAP - 20m. Deze voorlopige keuze behoeft echter nadere onderbouwing en eventueel een correctie.

Om de afmetingen van de selectieve onttrekking te kunnen bepalen is het van belang om te weten hoe het zoutgehalte van het onttrokken water wordt bepaald door de afmetingen van de selectieve onttrekking in relatie tot het af te voeren debiet en de verdeling van het zout over de verticaal in de binnenvoorhaven. Hiertoe is gekeken naar de resultaten van schaalmodelonderzoek zoals uitgevoerd in het verleden [5] en [6].

Om specifieke aspecten van de situatie in IJmuiden te kunnen onderzoeken is tevens gebruik gemaakt van verkennende CFD-berekeningen. Hiertoe is de modellering in CFD eerst getoetst aan de resultaten van genoemde schaalmodelonderzoeken, zie Bijlage E.

Op basis van de resultaten uit de literatuur studie en de CFD-berekeningen en op basis van de inzichten omtrent de zoutverticaal zoals volgt uit de Delft3D-berekeningen zijn de gekozen dimensies (3 openingen van 40 m breed en 4 m hoog) beoordeeld.

Al deze aspecten worden besproken in Hoofdstuk 5.

2.4 Eerste verkenning van selectieve onttrekking met Delft3D

Om de effecten van selectieve onttrekking te onderzoeken is gebruik gemaakt van Delft3D-FLOW. Uitgangspunt vormden de 3D modeldefinities en scenario's uit eerder onderzoek voor het NZK en ARK, zie [13] en [15], die in de loop van het onderzoek door RWS ter beschikking zijn gesteld.

Najaar 2015 is begonnen uit de beschikbare gegevens een model samen te stelen dat de huidige toestand met Noordersluis beschrijft voor de periode van januari – maart 2013. Dit model is gebruikt voor een eerste verkenning naar het effect van een selectieve onttrekking op het zoutgehalte in het NZK. Daarvoor is de selectieve onttrekking aan de binnenvoorhaven (Velserkom) op eenvoudig en schematische wijze ingebracht met dimensies die aansluiten bij het voorlopige ontwerp.

De berekeningen voor de huidige situatie en de huidige situatie met selectieve onttrekking geven een eerste ruwe indicatie van de mogelijke effectiviteit van een selectieve onttrekking, en geven inzicht in hoe de zoutverticaal zich zal ontwikkelen op enige afstand van de selectieve onttrekking. De resultaten zijn vastgelegd in een memo (Bijlage D) en worden besproken in Hoofdstuk 6.

2.5 Effecten van variaties in deur-opentijden en schutfrequenties op zoutlek

De zoutbelasting van de sluizen in IJmuiden is afhankelijk van de zoutgehalten en waterstanden aan beide zijden van de sluizen in combinatie met de schutfrequentie, de waterverplaatsing van de schepen in de kolken en de deur-opentijden van de diverse sluizen. Het eenvoudigste simulatiemodel voor zoutlek dat deze parameters beschouwd voor de individuele schuttingen is het 1D model WANDA-Locks. Een WANDA-Locks model van het sluizencomplex te IJmuiden, gecombineerd met de gedetailleerde informatie uit scheepvaartsimulaties van PMSS (Port and Maritime Systems Simulation) als input, is gebruikt om de effecten van de variatie in deur-opentijden en de schutfrequentie op de zoutlast te beoordelen.

Om dit mogelijk te maken heeft PMSS voor 4 toestanden, namelijk 2005 (Noordersluis, ladingstroom 57 MTPA), Autonome Ontwikkeling (Noordersluis, 95 MTPA), Inbedrijfstelling (Nieuwe sluis, 95 MTPA), en Projectalternatief (Nieuwe sluis, 125 MTPA) simulaties opnieuw gedraaid om aanvullende uitvoer te genereren.

Het WANDA-Locks model is geverifieerd voor 2005, het enige jaar waarvoor zowel gegevens over het schutbedrijf beschikbaar zijn (de simulaties door PMSS) als gegevens over de zoutlek (geschat uit de afvoerdebieten van IJmuiden en het gemeten zoutgehalte in het Binnenspuikanaal).

Vervolgens is een WANDA-Locks analyse gemaakt van de zoutlek voor de overige 3 toestanden: Autonome Ontwikkeling, Inbedrijfstelling, en Projectalternatief, en vergeleken met eerdere schattingen. De berekeningen leverden in zicht in de effecten van de variatie van deur-opentijden en schutfrequenties. Ook wordt inzicht verkregen in mate waarin de zoutbelasting toeneemt bij inbedrijfstelling van de nieuwe sluis.

Tenslotte is met het WANDA-Locks model gekeken wat de effectiviteit is van de beschouwde maatregelen voor een zoutlekreductie zoals bijv. het beperken van deur-opentijden, bellenschermen, en selectieve onttrekking.

De resultaten zijn vastgelegd in een deelrapport (Bijlage K) en worden besproken in Hoofdstuk 7.

2.6 Onderzoek prestaties selectieve onttrekking met Delft3D

Het onderzoek uit Paragraaf 2.4 naar de prestaties van de selectieve onttrekking en de effecten van selectieve onttrekking op het zouttransport in het watersysteem NZK en ARK is voortgezet voor geselecteerde representatieve scenario's.

Eerst is de in Paragraaf 2.4 gebruikte schematisering van de selectieve onttrekking (de 'hydraulic structure' optie '3D Gates' van Delft3D-FLOW) nader getoetst om te laten zien dat deze wijze van schematiseren adequaat is voor de berekeningen met het far-field model van het NZK en ARK. Dit is gebeurd door Delft3D berekeningen met sigma-lagen (als het NZK en ARK model) te vergelijken met CFD berekeningen voor een vereenvoudigde tweedimensionaal verticale (2DV) geometrie, zie Bijlage J.

Omdat de berekeningen met het huidige model van het NZK en het ARK ten grondslag liggen aan de MER, is als eerste stap het effect van selectieve onttrekking onderzocht met het bestaande model van het NZK en ARK, inclusief de bestaande zoutlekrandvoorwaarden, voor de toestand van het Projectalternatief en de scenario's die zijn gebruikt in het MER rapport [15]. Deze leverden echter maar beperkt inzicht op in de werking van selectieve onttrekking.

Voor een beter inzicht zijn vervolgens meer realistische afvoerscenario's gekozen, en zijn de zoutlekrandvoorwaarden bij de scheepvaartsluizen verbeterd door het zoutlekmodel WANDA-Locks te koppelen aan Delft3D. Door WANDA-Locks aan te sturen met uitvoer uit de verkeerssimulaties van PMSS is de invloed van de variatie in deur-opentijden en schutfrequenties in de zoutlek randvoorwaarden meegenomen. De nieuwe zoutlekrandvoorwaarden zijn zo geïmplementeerd dat het lock-exchange proces per individuele schutting dichter wordt benaderd dan tot dusver het geval was om daarmee de zoutdynamiek in de Velserkom, dicht bij de geplande selectieve onttrekking, te verbeteren.

Met de resultaten van deze berekeningen is het mogelijk de prestaties van selectieve onttrekking te onderzoeken, en de effecten op het niveau van het watersysteem NZK en ARK weer te geven. De resultaten zijn vastgelegd in een memo (Bijlage L) en worden besproken in Hoofdstuk 8.

3 Operationele overwegingen

3.1 Algemeen

De verwachte toename van de zoutindringing is direct gerelateerd aan de grotere afmetingen van de sluis. Maar de afmetingen alleen zorgen niet voor zoutindringing; die wordt bepaald door de operatie van de sluis ten behoeve van de scheepvaart. De belangrijkste parameters daarvan zijn het aantal schuttingen per dag, en de deur-opentijden. Deze deur-opentijden bepalen in hoeverre de inhoud van de kolk uitwisselt als gevolg van het dichtheidsverschil, waarmee de kolk zoutwater naar binnen transporteert. De deur-opentijden zijn vooral (maar niet alleen) van belang bij het toepassen van bellenschermen. In dit hoofdstuk wordt daarom aandacht besteed aan deze beide parameters.

Het aantal schuttingen en de deur-opentijden zullen, met de afmetingen van de sluis, bepalend zijn voor de zoutindringing, en die zal correct moeten worden opgelegd als randvoorwaarde voor onder meer de berekeningen met Delft3D.

In eerste instantie is langs twee wegen informatie verzameld over de operationele aspecten:
- er is een gesprek gevoerd op 25 juni 2015 met betrokkenen bij de huidige operatie van het sluiscomplex, o.a. de loodsen (zie paragraaf 3.2);
- er is gekeken naar verkeers-simulaties voor de toekomstige situaties zoals uitgevoerd door PMSS (simulaties betreffende de afhandeling van het scheepvaartverkeer middels schuttingen) (zie paragraaf 3.3).

Vervolgens is in meer detail gekeken naar registraties uit PONTIS (zie paragraaf 3.4).

Het is van belang op te merken dat tijdens het overleg op 25 juni er uitgegaan werd van 10,4 schutcycli per dag, zowel voor de huidige situatie met de Noordersluis, als in de toekomstige situatie met de Nieuwe Sluis. Dit sluit aan op de aannamen in [1], die zijn ontleend aan een rapport van Arcadis [14] dat zich baseert op registraties in PONTIS uit de periode dec. 2009 – nov. 2010. Echter, zoals beschreven in Paragraaf 3.3, het aantal van 10,4 schutcycli per dag is wel een correct uitgangspunt voor de huidige situatie, maar dit zou, zoals blijkt uit de rapportage over de verkeerssimulaties [9], in de referentie situatie van 95 MTPA door de Noordersluis, oplopen naar een aantal van 13,9 cycli per dag, en datzelfde aantal wordt ook verwacht voor de toekomstige situatie met de Nieuwe Sluis met 125 MTPA.

Deze correctie is niet verwerkt in de weergave en de conclusies van het gesprek op 25 juni 2015. Consequenties hiervan worden besproken in Paragrafen 3.3.5 en 3.3.6.

3.2 Resultaten verkennend overleg 25 juni 2015

Op 25 juni 2015 is een verkennend overleg gehouden met een aantal mensen die bekend zijn met en betrokkenen zijn bij de operatie van het huidige sluizencomplex. In dit overleg zijn operationele aspecten besproken betreffende het aanbrengen van een drempel, het beperken van de deur-opentijden en het evt. beperken van het aantal schuttingen. De resultaten zijn vastgelegd in een memo (Bijlage A). De belangrijkste bevindingen worden besproken in deze paragraaf.

Als eerste is er gesproken over de mogelijkheid om een drempel aan te brengen in het binnenhoofd van de nieuwe sluis. Dit wordt besproken in Hoofdstuk 4, samen met de andere aspecten van een dergelijke drempel.

3.2.1 Huidige en toekomstige schutcyclus

Vervolgens is er gesproken over de huidige operatie in termen van het aantal schuttingen per dag en de deur-opentijden. Dit zijn, naast de kolkafmetingen, essentiële parameters voor de zoutindringing. In [1] is uitgegaan van een regelmatige cyclus van 10,4 cycli per dag (10,4 schuttingen naar binnen en 10,4 schuttingen naar buiten) en deur-opentijden van 50 minuten. Met deze deur-opentijd wordt de tijdsduur voor 10,4 schutcycli nagenoeg precies 24 uur.

Dit schema wordt door de deelnemers aan het overleg als niet realistisch beschouwd. Het gemiddelde aantal van 10,4 kan correct zijn, maar in het weekend zijn er minder schuttingen, en door de week zijn het er meer. Bovendien zijn er overdag meer schuttingen dan 's nachts. Daarnaast is er een duidelijk weekritme, met veel opvaart (aankomst in Amsterdam) op zondagavond, en veel afvaart (vertrek) op vrijdagavond.

Dat betekent dat, op drukke momenten, de deur-opentijden veel korter moeten zijn dan 50 minuten. Een tijdsduur van 50 minuten lijkt realistisch als twee grote schepen elkaar moeten passeren (een opvarend en een afvarend). Alle andere combinaties zullen tot een kortere deur-opentijd leiden, en zeker bij leeg-omschutten zal de deur korter open staan. (N.B. Deze leeg-omschuttingen zijn begrepen in het gemiddelde aantal cycli van 10,4 per dag.)

De grote variatie in het aanbod van schepen over de dag en de week en de vele verschillende combinaties van afmetingen en de operatie met sleepboten maken dat een 'gemiddeld ritme' moeilijk te definiëren is. Daarbij zegt een gemiddelde niet veel over de te verwachten zoutindringing. <u>Toch lijkt de volgende conclusie gerechtvaardigd: met 10,4 schuttingen per dag met steeds 50 minuten deur-opentijd wordt, voor de (huidige) situatie *zonder* bellenschermen, de maximale zoutindringing berekend. In de werkelijkheid zal die minder zijn, met name door de leeg-omschuttingen waarbij de kolk niet de tijd krijgt volledig uit te wisselen.</u>

Voor de toekomstige situatie van de Nieuwe Sluis zijn in [1] berekeningen gedaan voor de zoutindringing met en zonder bellenschermen. Daarbij is eveneens uitgegaan van een regelmatige cyclus van 10,4 cycli per dag (10,4 schuttingen naar binnen en 10,4 schuttingen naar buiten) en deur-opentijden van 50 minuten.

Voor deze toekomstige situatie (met of zonder bellenschermen) is nog geen uitspraak te doen over hoe de operatie zal verlopen. Uit het bovenstaande volgt dat de deur-opentijd meestal korter zal zijn dan 50 minuten, maar deze tijd zal af en toe worden overschreden door het schutten met meerdere schepen, bij een schutting met de grootste schepen, of door de operatie met sleepboten. Het effect hiervan op de zoutindringing zoals berekend in [1] lijkt beperkt.

Voor de zoutindringing in de situatie met bellenschermen betekent dit dat, bij kortere deur-opentijd, de zoutindringing vaak kleiner zal zijn dan berekend in [1]. Echter, als de deur (veel) langer open staat dan 50 minuten zal de dichtheid in de kolk meer weglopen van de gemiddelde waarde, waardoor de zoutindringing gedurende een aantal schuttingen groter zal

zijn dan berekend in [1]. Over de balans tussen deze twee aspecten is vooraf geen uitspraak te doen. In een vervolg zal dit in meer detail uitgewerkt worden, zie Hoofdstuk 7.

3.2.2 Mogelijkheid om de deur-opentijd te beperken

In het normale bedrijf is er geen reden om de deur van de sluis te sluiten als er, na het uitvaren van schepen, niet direct ander verkeer is dat geschut moet worden. Voor het beperken van de zoutindringing, zeker in de situatie met bellenschermen, is dit wel van belang: als het scheepvaartverkeer het toestaat, moet de deur steeds zoveel mogelijk gesloten gehouden worden.

Voor een toepassing in de praktijk moet dit streven worden vertaald in een ‘voorschrift’ aan de sluismeesters. Voor de zeeschepen die in IJmuiden de sluis aanlopen geldt het volgende: als de deur, om wat voor reden dan ook, niet op tijd open staat moet de aanloopmanoeuvre worden afgebroken. Voor zeeschepen, ook met sleepbootassistentie, vraagt het (eventueel) moeten afbreken van de aanloop om voldoende ruimte om het schip weer onder controle te krijgen. Vandaar dat de deur tijdig open moet staan. De marge (in tijd of afstand) zal afhankelijk zijn van de afmetingen van de schepen en de plaatsen in de lay-out van het sluiscomplex waar dergelijke ruimte beschikbaar is.

Tijdens het overleg is een voorstel voor een criterium gepresenteerd en besproken. Daarbij is het van belang dat, met de bellenschermen, er geen sprake meer is van een kolkuitwisseling: het tijdig openen van de deur is alleen noodzakelijk om de zekerheid te hebben dat de deur open staat, en dat de aanloopmanoeuvre niet hoeft te worden afgebroken.

Op basis hiervan, in combinatie met de opmerkingen voor de aangenomen deur-opentijd van 50 minuten, lijkt de conclusie gerechtvaardigd dat het beperken van de deur-opentijden in de meeste gevallen goed mogelijk moet zijn, waarmee het toepassen van bellenschermen een realistische optie is. Bij harde wind met zeer grote schepen moet de deur eerder open staan en zal de deur-open tijd mogelijk langer zijn. De grootste onzekerheid is de deur-opentijd als meerdere schepen in dezelfde schutting meegaan. Daarover moet meer informatie op tafel komen.

3.2.3 Mogelijkheid om het aantal schuttingen per dag te beperken

In rapport [4] wordt geconstateerd dat, door het grotere oppervlak van de kolk, er meer schepen per schutting mee moeten kunnen, waardoor dezelfde capaciteit wordt bereikt bij een kleiner aantal schuttingen. In het overleg is verkend wat hier concreet van te verwachten is.

Van belang is daarbij het volgende: het beperken van het aantal schuttingen moet los gezien worden van de inzet van bellenschermen. Het is eigenlijk het een of het ander:

- als je uitgaat van de situatie *met* bellenschermen, moet primair de deur-opentijd beperkt blijven; als er voor het invaren van meerdere schepen in dezelfde schutting onevenredig veel tijd nodig is, zou het wel eens efficiënter kunnen zijn om meer schuttingen te doen, met steeds maar een schip in de kolk;
- als je uitgaat van de situatie *zonder* bellenschermen, ga je uit van een volledige uitwisseling van de kolk, en is de deur-opentijd niet meer van belang; door minder schuttingen te doen, met meer schepen per schutting, is het dus geen bezwaar als voor in- en uitvaren van die schepen de deur dus lang open staat.

De concrete vraag op tafel bij het overleg was dus: wat voor impact heeft het reduceren van het aantal schuttingen per dag op de operatie: op wachttijden, passagetijden, capaciteit, en uiteindelijk de operatie van de haven etc..

Daarbij is ook aangegeven dat het beperken van het aantal schuttingen samen kan gaan met het schutten op vaste tijden, waardoor de scheepvaart weet waar zij aan toe is. Uit het overleg kwam naar voren dat het reduceren van het aantal schuttingen per dag in twee varianten kan worden beschouwd:

- een ‘incidentele’ reductie op het moment dat door lage afvoer van water over het Noordzeekanaal de zoutindringing te hoog wordt;
- een ‘reguliere’ reductie, die wordt toegepast door het jaar heen: hiermee wordt bereikt dat, in de zomermaanden als de afvoer kleiner wordt, het zoutgehalte op het Noordzeekanaal langzamer op zal lopen, waardoor een ‘incidentele’ ingreep langer kan worden uitgesteld; het toepassen van een drempel zou hetzelfde effect hebben.

Een gereduceerd aantal zou bijvoorbeeld 8 schuttingen per etmaal kunnen zijn, in plaats van de genoemde 10,4. (Dat wil zeggen: 8 maal naar binnen en 8 maal naar buiten schutten). In combinatie met het schutten van meerdere schepen tegelijkertijd, lijkt dit bespreekbaar. (Zie ook Paragraaf 3.3.6.)

De planning van de schuttingen zal terdege rekening moeten houden met aankomst en vertrek van cruise-schepen: deze varen op een zeer strakke planning en zijn van groot commercieel belang voor Amsterdam. Het betreft ca. 140 schepen die de stad in de zomermaanden aan doen.

Ook zal er rekening moeten worden gehouden met de drukte in het opvarende verkeer op zondagavond en het afvarende verkeer op vrijdagavond. Voor die situaties is te onderzoeken hoe de zoutindringing uitpakt voor achtereenvolgende schuttingen dezelfde kant op. Het uitvaren is snel gebeurd en de kolk krijgt dan niet de kans volledig uit te wisselen, waarmee, als er weer wordt ingevaren, een kleiner zouttransport optreedt. Bij achter elkaar afvarend verkeer blijft de kolk relatief zoet, en bij achter elkaar opvarend verkeer blijft de kolk relatief zout.

3.2.4 Conclusies uit het overleg

Uit de bespreking kan geconcludeerd worden dat, gegeven dat een toename van de zoutindringing voorkomen zal moeten worden, geen van de hierboven behandelde maatregelen bij voorbaat wordt afgewezen: over alle maatregelen is in redelijkheid te praten.

Als er, vanuit nautisch operationeel oogpunt, gekozen zou mogen worden tussen de twee belangrijkste maatregelen is er een duidelijke voorkeur voor de selectieve onttrekking boven de bellenschermen. Dit omdat de selectieve onttrekking geen impact heeft op de operatie.

Het toepassen van een selectieve onttrekking kan samengaan met de logische combinatie van het uitvoeren van schuttingen met meerdere schepen in een kolk en een kleiner aantal schuttingen per etmaal. Met de grotere afmetingen van de nieuwe kolk lijkt dit een ontwikkeling die zich voor een deel vanzelf zal voordoen.

Om het oplopen van het zoutgehalte op het Noordzeekanaal te voorkomen, en daarmee een ingreep in het schutbedrijf zo lang mogelijk uit te stellen, zijn bij de toepassing van selectieve

onttrekking ‘ondersteunende’ maatregelen van waarde. Een daarvan is de drempel. (Andere maatregelen van deze categorie, die op dit moment buiten de scope van het project vallen, zijn het beperken van de kolklengte tot 500 m tussen de deuren en het toepassen van een tussenhoofd.)

Een andere ondersteunende maatregel is de inzet van bellenschermen. Ook als deze niet in staat zouden zijn om zelfstandig de zoutindringing in voldoende mate te beperken, kunnen ze een waardevolle aanvulling zijn in tijden van droogte of bij een deel van de schuttingen (die schuttingen waarbij de deur-opentijd beperkt kan blijven). Het beperken van de deur-opentijden tot waarden onder de (tot op heden aangenomen) 50 minuten zal in het algemeen, met één schip in de kolk, zeer goed mogelijk zijn. Voor schuttingen met meerdere schepen in de kolk zal de deur-opentijd langer worden; hoe veel langer is nog moeilijk te zeggen, en de impact ervan op de effectiviteit van het bellenscherm is daarom ook nog niet in te schatten.

Het inbouwen van bellenschermen is ook om andere redenen een waardevolle maatregel (te weten: het beperken van de krachten op de schepen t.g.v. de dichtheidsstroming die optreed bij het openen van de deur). Als om die reden gekozen zou worden voor het aanbrengen van bellenschermen ligt het voor de hand om deze ook in te zetten voor het beperken van de zoutindringing: door het jaar heen, of alleen in tijden van lage afvoer. De inzet zal bepalend zijn voor de jaarlijkse energiekosten.

Daarnaast, al of niet in combinatie met bellenschermen, kan geprobeerd worden in tijden van droogte het aantal schuttingen te beperken en daarmee het aantal schepen per schutting te vergroten. Het verdelen van de schuttingen over de dag en de afstemming met de scheepvaart moet er daarbij voor zorgen dat de verschuiving in de tijd van aankomst of vertrek (zo mogelijk) beperkt kan blijven tot maximaal ongeveer een uur.

Om de zoutindringing goed in beeld te krijgen, zowel zonder maatregelen als bij de inzet van verschillende (combinaties van) maatregelen, moet de variatie in de schuttingen met het aanbod van de scheepvaart goed worden beschouwd. Dit vraagt om gedetailleerde uitvoer van simulaties van de afhandeling van het verkeer bij de sluizen. De simulaties door PMSS zijn hiervoor een mogelijke bron, maar uitvoer van de gewenste gegevens is niet beschikbaar. Daarvoor is aanvullend werk nodig, zie verder Par. 7.2.

3.3 Resultaten uit scheepvaartsimulaties PMSS

De operatie van de nieuwe sluis is eerder onderzocht middels simulaties zoals uitgevoerd door PMSS, deels via DHV [8] en [9]. In de rapportages hierover wordt vooral gekeken naar de invloed van de afmetingen van de sluis op de capaciteit: de bezettingsgraad en de wachttijden voor de scheepvaart. Van de uitvoer uit de simulaties wordt ook het aantal schuttingen gerapporteerd en het aantal schepen per schutting, maar er is geen informatie over de deur-opentijden. De simulaties betreffen de schepen groter dan 35 m. Schepen met verwaarloosbare invloed op de capaciteit, dus bijv sleepboten en recreatievaart, zijn niet meegenomen [8]. Om dezelfde reden is de Kleine Sluis niet meegenomen in de beschouwing. In de uiteindelijke simulaties is wel nog een vloot met sleepboten korter dan 35 m toegevoegd, die vanwege de diepgang door de Middensluis en de Zuidersluis wordt geschut en een niet te verwaarlozen belasting vormt voor deze sluizen, zie [19] en [9].

Er worden in het rapport een groot aantal situaties onderzocht; een paar daarvan worden hier kort behandeld.

3.3.1 Referentie zoals gehanteerd in de MER: 95 MTPA met de Noordersluis

De Referentie Situatie zoals gehanteerd in de MER is die van een doorgroei van de ladingstroom naar 95 MTPA door de Noordersluis. Deze situatie is ook beschouwd in [9].
In dat rapport wordt (strikt genomen) gekeken naar het vervangen van de huidige sluis door een sluis met identieke afmetingen. We nemen nu aan dat de uitkomsten ook geldig zijn voor de huidige Noordersluis (verschillen zouden kunnen ontstaan door verschillen in de tijd voor de deur-beweging of voor het nivelleren). De resultaten van de simulatie voor die toestand is weergegeven in de onderstaande tabel.

Tabel 3.1 Sluisbedrijf voor de Referentie Situatie: 95 MTPA bij (vervanging) Noordersluis (Tabel 7-15 uit [9])

	Zuidersluis		Middensluis		Noordersluis		Nieuwe Sluis (kopie NS)	
Schepen	Gem. over 10 runs							
per schutting	oostg.	westg.	oostg.	westg.	oostg.	westg.	oostg.	westg.
0	2919	2650	1757	2071	nvt	nvt	981	789
1	5984	6052	3920	3624	nvt	nvt	2663	3002
2	895	1142	1099	1062	nvt	nvt	1021	958
3	198	164	258	290	nvt	nvt	274	225
4	27	15	110	120	nvt	nvt	90	69
5	1	0	60	47	nvt	nvt	35	23
6	0	0	17	8	nvt	nvt	15	10
7	0	0	2	1	nvt	nvt	4	4
8	0	0	0	0	nvt	nvt	1	2
9	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
10	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
11	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
12	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
13	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
Totaal schuttingen	10024	10024	7222	7223	nvt	nvt	5084	5083
Schepen per schutting	1.19	1.21	1.42	1.43	nvt	nvt	1.51	1.42
Bezetting sluis	0.505		0.721		nvt		0.84	

Voor deze situatie worden voor de (vervanging) Noordersluis 5084 schutcycli berekend, ofwel 13,9 per dag. Het aantal schepen per schutting is 1,51 (opvarend) resp. 1,42 (afvarend).

3.3.2 Overgangssituatie bij oplevering van de nieuw sluis van 70m breed

Indien bij oplevering van de nieuwe sluis de ladingsstroom gelijk zou zijn aan de ladingstroom van de Referentie Situatie, wordt dus dezelfde ladingstroom behandeld door een grotere sluis. Dit leidt tot de volgende getallen:

Tabel 3.2 Sluisbedrijf met 95 MTPA bij Nieuwe sluis, 70 m breed (Tabel 7-3 uit [9])

	Zuidersluis		Middensluis		Noordersluis		Nieuwe Sluis	
Schepen	Gem. over 10 runs							
per schutting	oostg.	westg.	oostg.	westg.	oostg.	westg.	oostg.	westg.
0	2884	2745	1808	2189	nvt	nvt	1418	1230
1	6045	6016	4009	3667	nvt	nvt	2843	2984
2	870	1105	1038	1018	nvt	nvt	850	894
3	183	132	231	239	nvt	nvt	316	320
4	27	12	98	100	nvt	nvt	145	137
5	1	0	52	36	nvt	nvt	55	60
6	0	0	15	7	nvt	nvt	10	12
7	0	0	3	0	nvt	nvt	1	2
8	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
9	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
10	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
11	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
12	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
13	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
Totaal schuttingen	10009	10009	7255	7256	nvt	nvt	5639	5639
Schepen per schutting	1.19	1.19	1.39	1.39	nvt	nvt	1.52	1.51
Bezetting sluis	0.493		0.70		nvt		0.87	

De cijfers laten iets opmerkelijks zien: het aantal schutcycli neemt toe van 5084 naar 5639 per jaar, ofwel van 13,9 naar 15,4 per dag, met 1,52 / 1,51 schepen per schutting. Bij een zelfde ladingstroom leidt een grotere sluis dus tot meer schuttingen: het aantal schuttingen per dag neemt toe met 10%. Dit is vooral zichtbaar in een toename van het aantal lege schuttingen. Dit is te verklaren uit het feit dat er, door de grotere afmetingen van de sluiskolk, minder vaak een wachtrij zal zijn. Hierdoor zal het vaker voorkomen dat na het uitvaren aan (bijvoorbeeld) de kanaalzijde er daar niet een schip ligt te wachten. Dan kan het dus gebeuren dat het eerst volgende schip dat geschut wil worden zich meldt aan de zeezijde, waarvoor de sluis dan leeg naar de zeezijde wordt geschut.

(N.B.: Uit analyse van de getallen blijkt dat bij de bepaling van het aantal schepen per schutting de lege schuttingen niet worden meegenomen.)

Voor de zoutindringing is dit mogelijk een bedreigende situatie: niet alleen neemt met de grotere sluis de zoutvracht per schutting toe, ook het aantal schuttingen is nu groter dan voor de omschakeling. Deze situatie zal t.z.t. dus ook aandacht moeten krijgen. Het ligt voor de hand om te kijken naar de mogelijkheid om het aantal schuttingen te beperken tot het aantal van de Noordersluis vlak voor de ingebruikname van de nieuwe sluis: dan blijft het niveau van de dienstverlening wat dat betreft gelijk. Dat vraagt echter al wel een instructie aan de sluisbediening, die goed moet worden voorbereid. Een verdere beperking van het aantal schuttingen zal minder makkelijk te realiseren zijn. Maar ook met deze (lichte) beperking van het aantal schuttingen blijft het zo dat direct bij ingebruikstelling van de nieuwe sluis, de zoutindringing toeneemt. Dat gebeurt dus niet geleidelijk met het groeien van het ladingvolume.

3.3.3 Projectalternatief: 125 MTPA door de nieuwe sluis van 70m breed

Dit is de ‘doel situatie’ voor de sluis, en voor die situatie moet dus gekeken worden of, middels maatregelen, de zoutindringing gelijk kan worden gehouden aan de Referentie Situatie.

De simulatie van de verkeersafwikkeling levert de volgende getallen op:

Tabel 3.3 Sluisbedrijf met 125 MTPA bij Nieuwe sluis, 70 m breed (Tabel 7-23 uit [9])

	Zuidersluis		Middensluis		Noordersluis		Nieuwe Sluis	
Schepen	Gem. over 10 runs							
per schutting	oostg.	westg.	oostg.	westg.	oostg.	westg.	oostg.	westg.
0	3479	3217	1601	1951	nvt	nvt	893	785
1	5447	5651	3785	3537	nvt	nvt	2047	2110
2	1070	1318	1174	1094	nvt	nvt	977	989
3	364	263	389	413	nvt	nvt	519	520
4	53	22	221	242	nvt	nvt	385	404
5	2	0	150	106	nvt	nvt	204	207
6	0	0	40	20	nvt	nvt	39	42
7	0	0	5	2	nvt	nvt	4	7
8	0	0	1	0	nvt	nvt	0	0
9	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
10	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
11	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
12	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
13	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
Totaal schuttingen	10415	10470	7364	7365	nvt	nvt	5066	5066
Schepen per schutting	1.28	1.26	1.60	1.59	nvt	nvt	2.01	2.01
Bezetting sluis	0.615		0.81		nvt		0.9515	

Voor deze situatie worden 5066 schutcycli berekend, ofwel 13,9 per dag, evenveel als voor de Referentie Situatie. Het aantal schepen per schutting is nu toegenomen naar 2,01 (was 1,51 opvarend resp. 1,42 afvarend). Het aantal lege schuttingen is ook weer terug naar het niveau van de Referentie Situatie. De sluisbezetting is nu opgelopen naar 95%.

3.3.4 Simulaties met aanpassingen in beheer en afmetingen

Voor het toekomstige scenario met een ladingstroom van 125 MTPA zijn in het rapport een aantal simulaties gedraaid voor het onderzoeken van het mogelijke effect voor een aantal te overwegen maatregelen om de bezettingsgraad en de wachttijden te reduceren. Het rapport schrijft hierover het volgende:

> Voor een ladingstroom van 125 miljoen ton / jaar wordt een verdubbeling van de wachttijd berekend ten opzichte van de 95 miljoen ton /jaar situatie voor de varianten 2, 3 en 4. Afhankelijk van de aannames over vlootsamenstelling leidt dit tot wachttijd voor de grootste schepen van 70 tot 100 minuten; dit is ruim boven de referentiewaarden die zijn opgelegd. Ook de bezettingsgraad van de nieuwe sluis komt op waarden ruim boven de 85%, wat wijst op een te hoge bezetting van de sluis.
>
> Middels een gevoeligheidsanalyse is onderzocht welke maatregelen mogelijk zijn om de bezettingsgraad van de nieuwe sluis en de wachttijd te verminderen. Een langere sluis van 600 m blijkt geen oplossing te zijn. De wachttijden van de schepen neemt nauwelijks af. Ook de bezettingsgraad van de nieuwe sluis wordt niet lager, het aantal schuttingen met 5 of meer schepen in de sluis neemt toe en daarmee de gemiddelde bezetting van de

sluis. Het totaal aantal schuttingen veranderd echter nauwelijks, zodat er geen significante verlaging van bezettingsgraad is of afname van wachttijd.

Het verhogen van de drempel (-15m NAP) met als gevolg het invoeren van een getijvenster voor de grote bulkschepen laat zien dat bezettingsgraden van de Zuidersluis en de Middensluis nauwelijks veranderen (de bezettinsgraad van de Middensluis is met 81% gelijk gebleven en de Zuidersluis met 1% gedaald van 62% naar 61%). De bezettingen van de Nieuwe Sluis is echter met circa 10% afgenomen (van 95% naar 86%). Dit komt omdat door het getijvenster de schuttingen van de Nieuwe Sluis na de aankomst van een getijschip meer geconcentreerd worden. De schepen moeten wachten op de komst van het getijschip en als gevolg hiervan neemt het aantal schepen per schutting toe met ongeveer 10% en daarmee de bezetting met 10% af. De gemiddelde wachttijd neemt voor de grotere schepen met circa 30 minuten toe. Doordat vooral de grotere schepen (ook omdat ze meestal niet mee kunnen met de schutting van het getijschip) veel langer moeten wachten. De wachttijden van de kleinere schepen veranderen nauwelijks.

Het verminderen van het aantal zandschepen door het sluizencomplex heeft wel effect op de bezettingsgraad van de sluizen en de wachttijden van de schepen. Als alle zandschepen naar de fortput worden verwijderd uit de simulatie, dan neemt de gemiddelde wachttijd met 40% af. In de bezetting van de sluizen zie je dat vooral de Middensluis en de Zuidersluis een flinke daling in de bezettingsgraad laten zien. Het totaal aantal schepen door de Nieuwe Sluis neemt ook significant af, maar het aantal schuttingen neemt maar beperkt af. Wel is het gemiddelde aantal schepen dat geschut wordt lager.

Er is gekeken of een striktere toewijzing van schepen aan een sluis effect heeft. In de simulatie is de maximale lengte en breedte voor schepen die door de Middensluis mogen vergroot naar de maximaal toelaatbare dimensies. Tevens is gezegd dat schepen alleen door de Nieuwe Sluis mogen als ze niet door de Middensluis of Zuidersluis kunnen. Dit heeft een groot effect op de bezettingsgraad van de Nieuwe Sluis, deze zakt met ruim 15%. Ook de wachttijd van de grote schepen wordt flink gereduceerd (40 tot 50% vermindering). De keerzijde is dat de bezettingsgraad van de Middensluis en de wachttijd voor schepen door de Middensluis en Zuidersluis flink toeneemt.

Tenslotte is gekeken wat het effect is van een combinatie van de maatregelen schrappen zandvloot en de nieuwe toedeling van sluizen. Ten opzichte van de situatie met zandvaart valt op dat door het weglaten van de zandvaart de wachttijden van de kleinere schepen voor de sluizen sterk dalen tot een aanvaardbaar niveau (tussen de 30 en 50 minuten). De wachttijden van schepen gebonden aan de Nieuwe Sluis liggen evenals bij de situatie met zandvaart op het niveau van de referentie waarden. De sluisbezettingen zijn in overeenstemming met de verwachtingen. De bezettingsgraad van de Nieuwe Sluis (81%) is niet te hoog, de bezettingsgraad van de Zuidersluis is gedaald van 73.5% naar 42% en de Middensluis van 93% naar 83%. Dit komt uiteraard door het wegvallen van de zandvaart.

De resultaten van de gevoeligheidsanalyse laten zien dat met een beperking van het aantal zandschepen door het sluizencomplex en een aanpassing van de toedeling van schepen over de sluizen een flinke beperking van wachttijden en bezettingsgraden van de sluizen gerealiseerd kan worden. De gemiddelde wachttijd van schepen kan hierdoor worden gehalveerd. De bezetting van de sluizen kan met circa 10% worden verlaagd. Met deze maatregelen lijkt het daarom mogelijk om de wachttijden van de schepen te verlagen tot de referentiewaarden voor een ladingsstroom van 125 miljoen ton / jaar.

Dit laat zien dat de operatie van de sluizen (inclusief de Nieuwe Sluis) zal afhangen van de al of niet te nemen maatregelen wat betreft de toedeling van schepen aan de verschillende sluizen en wat betreft het aantal zandschepen. Voor een nadere bepaling van de zoutindringing in het Projectalternatief zullen deze aspecten dus moeten worden meegenomen.

Verder laten de simulaties voor het getijvenster zien wat het effect is van het plannen c.q. spreiden van de passage van de grootste schepen op de bezetting en de wachttijden: het toepassen van een getijvenster is geen onderdeel van het Projectalternatief, maar het effect ervan op bezetting en wachttijden kan waarschijnlijk ook bereikt worden met een andere vorm van planning van deze schuttingen. De getallen voor deze simulatie zijn als volgt:

Tabel 3.4 Sluisbedrijf met 125 MTPA bij Nieuwe sluis, 70 m breed, met een getijvenster voor de grootste schepen (drempel op NAP - 15 m) (Tabel 7-47 uit [9])

	Zuidersluis		Middensluis		Noordersluis		Nieuwe Sluis	
Schepen	Gem. over 10 runs							
per schutting	oostg.	westg.	oostg.	westg.	oostg.	westg.	oostg.	westg.
0	2974	2690	1.589	1.891	nvt	nvt	747	657
1	6258	6365	3.780	3.573	nvt	nvt	1747	1786
2	1204	1513	1.190	1.128	nvt	nvt	861	879
3	417	317	385	404	nvt	nvt	479	487
4	57	27	229	243	nvt	nvt	419	436
5	3	0	149	104	nvt	nvt	187	185
6	0	0	38	20	nvt	nvt	81	78
7	0	0	5	1	nvt	nvt	37	49
8	0	0	1	0	nvt	nvt	4	5
9	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
10	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
11	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
12	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
13	0	0	0	0	nvt	nvt	0	0
Totaal schuttingen	10913	10912	7364	7365	nvt	nvt	4562	4562
Schepen per schutting	1,28	1,27	1,60	1,58	nvt	nvt	2,18	2,18
Bezetting sluis	0,61		0,81		nvt		0,86	

Voor deze situatie worden nu 4562 schutcycli berekend, ofwel 12,5 per dag, 8% minder dan voor de Referentie Situatie. Ook het aantal lege schuttingen is beperkt. Het aantal schepen per schutting is nu toegenomen naar 2,18 (was 2,01) De sluisbezetting is afgenomen van 95% naar 86%. Deze getallen vormen een indicatie van wat er bereikt kan worden met het plannen/spreiden van de sluispassage van de grootste schepen.

3.3.5 Conclusies uit simulaties PMSS

Uit de hierboven besproken simulaties blijkt vooral dat er geen eenvoudige relatie is tussen de ladingstroom en het schutbedrijf. Daaruit volgt dat er dus ook geen eenvoudige relatie bestaat tussen de ladingstroom en de zoutindringing. Om de zoutindringing voor verschillende situaties goed te kunnen kwantificeren zal het noodzakelijk zijn om het schutbedrijf in voldoende mate van detail in beschouwing te nemen. De verkeerssimulaties geven hiervoor een aanknopingspunt.

Zoals aan het begin van dit hoofdstuk al is aangehaald is er op het punt van het aantal schuttingen per dag een mis-match tussen de verkennende berekeningen zoals gerapporteerd in [1] en de eerder uitgevoerde simulaties gerapporteerd in [9]. De laatste komt uit op een groter aantal schuttingen per dag. In paragraaf 3.4 wordt hier verder op in gegaan.

3.3.6 Correctie op eerdere berekeningen; consequentie voor deur-opentijden

Aangezien er maar 24 uur in een dag zitten, zal het grotere aantal schuttingen (13,9 i.p.v. de eerder aangenomen 10,4) samen moeten gaan met een kortere gemiddelde deur-opentijd. Met de hoge sluisbezetting uit het Projectalternatief mogen we aannemen dat de sluis bijna continu bezig is met schutten. Dat zou dan leiden tot een gemiddelde duur van de schutcyclus van ca. 100 minuten (13,9 cycli van 100 minuten komt overeen met 23 uur en 10 minuten). Een cyclus van 100 minuten zou er dan uit kunnen zien als is afgebeeld in Figuur 3.1: de deur staat dan per kant gemiddeld 30 minuten open (35 minuten inclusief de helft van de tijd voor openen en sluiten), aanzienlijk minder dan de eerder aangenomen 50 minuten.

Op voorhand is niet met zekerheid te zeggen wat dit betekent voor de te verwachten zoutindringing in de toekomstige situatie, zowel met als zonder bellenschermen. Daarbij speelt een rol dat, zoals duidelijk werd uit het overleg op 25 juni, de variatie in de operatie groot zal zijn. Als echter de gemiddelde cyclus zo in elkaar zou zitten als hierboven is aangegeven, dan lijkt het toch goed mogelijk om de zoutindringing te beperken met bellenschermen.

Het is mogelijk om de berekeningen uit [1] over te doen met de juiste invoer voor de gemiddelde waarden voor het schutbedrijf. Echter, uiteindelijk zal ook de fluctuatie in het verkeersaanbod in de berekeningen moeten worden betrokken: hoe schuttingen zijn verdeeld over de dag en de week (niet evenredig verdeeld over 365 dagen/jaar en 24 uur/dag). Voor de juiste deur-opentijd is daarbij van belang wat de impact is van meerdere schepen per schutting, de operatie met sleepboten, en voor de grootste schepen zou aansluiting gezocht moeten worden bij het onderzoek door MARIN [10] voor de snelheden bij nadering en invaren.

00:05	10	naderen	open	15
00:10				
00:15	5	invaren		
00:20	5		sluiten	5
00:25	10	nivelleren	dicht	10
00:30				
00:35	5		openen	5
00:40	5	uitvaren	open	30
00:45	5	wegvaren		
00:50	5	passeren		
00:55	10	naderen		
01:00				
01:05	5	invaren		
01:10	5		sluiten	5
01:15	10	nivelleren	dicht	15
01:20				
01:25	5		openen	5
01:30	5	uitvaren	open	15
01:35	5	wegvaren		
01:40	5	passeren		

Figuur 3.1 Mogelijk tijdschema gemiddelde schutcyclus bij ca. 14 schuttingen per etmaal

3.4 Registraties van schuttingen in PONTIS

Om een beter beeld te krijgen van het werkelijke schutbedrijf in de afgelopen jaren zijn gegevens uit het registratiesysteem PONTIS verzameld: dit betreft gegevens uit de beschikbare rapporten en tevens zijn er aanvullende gegevens opgevraagd; zie Bijlage G. Deze gegevens zijn samengebracht in onderstaande tabel, samen met de gegevens uit de simulaties door PMSS.

Tabel 3.5 Kentallen uit verkeerssimulaties PMSS en PONTIS registraties

	Grootste sluis	Lading-stroom MTPA	Schutcycli per dag	Lege schuttingen[1)] %	Schepen/-schutting Op-/Afvaart	bezettings graad
PMSS:						
2005	Noorder-	56	12,74	30	1,20/1,16	0,58
2008 (huidig)	Noorder-	77	14.55	26	1,29/1,23	0,72
PONTIS						
2010	Noorder-	74	10,4	26	-	-
2013	Noorder-	80	11,0	28	1,33/1,31	0,69
2014	Noorder-	80	10,6	26	1,38/1,36	0,66
PMSS:						
Referentie: autonome ontw.	Noorder-	95	13,93	19	1,51/1,42	0,84
Inbedrijfstelling nieuwe sluis	Nieuwe Sluis	95	15,45	25	1,52/1,51	0,87
Projectalternatief	Nieuwe Sluis	125	13,88	18	2,01/2,01	0,95

Bronnen:
- PMSS 2005 (DHV, 2012, tabel 3.6), [9]
- PMSS 2008 (Arcadis, 2011), [14], en (Groenveld, 2011), [20]
- PONTIS 2010 (Arcadis, 2011), [14]
- PONTIS 2013, 2014 (toelevering RWS, verwerking Bijlage G),
- PMSS voor toekomstige toestanden: (DHV 2012), [9]
- gegevens gerealiseerde ladingstromen 2010-2014 (Bron: Havenbedrijf Amsterdam NV (2015), Zeegaand vervoer vóór en achter het Sluizencomplex 2014.xls. Februari 2015. (http://www.portofamsterdam.nl/Ned/statistieken/Recente-statistieken/statistieken-Noordzeekanaalgebied.html, bezocht 15 okt 2015))

Merk op dat in de simulaties aanvankelijk schepen kleiner dan 35 m in lengte niet zijn beschouwd [8]. Om die reden waren ook in de analyses van de PONTIS-data deze kleinere schepen niet meegenomen (zie Bijlage G). Uit gesprekken met Ir. R. Groenveld bleek dat in de uiteindelijke simulaties, zie [9], nog een vloot met sleepboten korter dan 35 m is toegevoegd met oog op de weergave van de capaciteit van de Middensluis en de Zuidersluis. Op de PONTIS getallen voor de Noordersluis in Tabel 3.5 heeft dit weinig invloed, met uitzondering van het aantal schepen per schutting, dat hoger kan worden door het meetellen van begeleidende sleepboten.

[1] *Strikt genomen gelden de gegeven percentages voor de opvaart*

De belangrijkste constatering uit deze tabel is dat PMSS voor een vergelijkbare ladingstroom veel meer schuttingen voor de Noordersluis geeft dan PONTIS (zie gegevens 2008 – 2014). De oorzaak is vermoedelijk gelegen in verschillen tussen de samenstelling van de vloot en de goederenstroom voor PMSS en de realisaties (PONTIS). PMSS is gevalideerd voor de sluisperformance op basis van de verdeling van het aantal schuttingen en het aantal schepen over de sluizen in 2005 [19]. Voor de PMSS simulaties van 2008 en de toekomstige toestanden zijn prognoses gebruikt, die bijvoorbeeld uitgaan van een sterke toename van het containervervoer. De toename van het containervervoer is uitgebleven waardoor de ladingstroom verhoudingsgewijs met minder schepen is te realiseren, wat leidt tot minder schuttingen. Ook de recessie van 2008/2009 zal zijn weerslag hebben gehad op de samenstelling van de goederenstroom en de vloten, en dus op de registraties in PONTIS. Het ligt dus voor de hand om aan het verschil tussen registraties en simulaties nader aandacht te besteden: het aantal schuttingen is immers van grote invloed op de schatting van de zoutlek. Daarbij is ook van belang dat het uitgangspunt voor de vervoersprognoses voor de Autonome Ontwikkeling en het Projectalternatief in de MER het WLO Global Economy (GE) scenario was met een sterke groei van de zeevaart, omdat dit naar verwachting een bovengrens geeft voor de milieueffecten [21]. Andere scenario's met bijbehorende vervoersprognoses, vlootsamenstellingen en verkeers-simulaties zouden mogelijk kunnen leiden tot bijstelling van het aantal schuttingen per dag voor de Noordersluis of de nieuwe sluis voor de Autonome Ontwikkeling en het Projectalternatief..

De gegevens uit PONTIS (2013 en 2014, Bijlage G) geven ook een beeld van de variaties in het aantal schuttingen per dag:

- variatie over de dag: veel westgaande schepen (naar zee) in de middag en avond, de schutfrequentie varieert van ca. 9.5 tot 12 S/d
- variatie over de week: veel westgaande schepen op vrijdag (naar zee), schutfrequentie ~ 9.5 – 12 S/d
- variatie over het jaar: er is een dip in het aantal schuttingen in de zomervakantie en rond de jaarwisseling, schutfrequentie ~8.5 – 11.5 S/d

In PMSS zijn dit soort variaties verdisconteerd door per type vloot de aankomstpatronen vast te leggen in verdelingsfuncties over de dag, de week en het jaar, uitgaande van de beschikbare informatie van 2005, zie [8]. Deze verdelingsfuncties zijn constant gehouden in verdere simulaties.

Deze concentratie van de schuttingen in bepaalde delen van de dag of week leidt tot een groter aantal schepen per schutting, en dat kan leiden tot een kleiner aantal schuttingen per dag. Als er een piek is in het verkeer in een richting leidt dat ook tot een piek in de lege schuttingen: in middag, avond en op vrijdag. Omdat de deur-opentijden bij een lege schutting aanzienlijk korter zijn (vooral aan het begin daarvan, wanneer alleen schepen van de voorgaande schutting hoeven uit te varen) wisselt op dat soort momenten de sluis waarschijnlijk niet volledig uit.

Over de deur-opentijden is in de beschikbare rapportages nog geen informatie aangetroffen. Dit is, naast het aantal schuttingen, wel belangrijke informatie voor het bepalen van de zoutlek: zowel voor de huidige als de toekomstige situaties.

Om al deze invoer mee te kunnen nemen in de berekeningen van de zoutindringing moet dus gedetailleerde invoer beschikbaar komen uit verkeerssimulaties. Het bestaande model van PMSS kan deze invoer leveren. Er zijn daarbij dan twee acties nodig:

- nagaan of het nuttig en wenselijk is andere ontwikkelingsscenario's met bijbehorende vervoersprognoses, vlootsamenstellingen en verkeers-simulaties te beschouwen ter

nuancering van de verwachtingen voor de zoutlek voor de Autonome Ontwikkeling en het Projectalternatief; Vooralsnog wordt van de scenario's van de MER uitgegaan.
- het genereren door PMSS van meer gedetailleerde uitvoer van de schuttingen waarin ook de momenten van deur openen en deur sluiten zijn opgenomen. Dit is opgepakt in Hoofdstuk 7.

3.5 Operationele ervaring met bellenschermen

Als onderdeel van de verkenning van operationele aspecten is het van belang om ervaring met bellenschermen te verzamelen. Het betreft hierbij de ervaringen met bellenschermen in Terneuzen, waar bellenschermen nog (deels) in bedrijf zijn, en ervaringen bij IJmuiden, waar in het verleden ook bellenschermen operationeel waren.

De te onderzoeken aspecten betreffen o.a. evt. hinder bij het manoeuvreren, verlies aan nuttige kolklengte (afhankelijk van de positionering t.o.v. deuren en stopstrepen), problemen voor koelsystemen en voortstuwingsschroeven van de passerende schepen en de sleepboten.

Dit zal nog moeten worden uitgevoerd bij een verdere uitwerking van bellenschermen.

3.6 Conclusies betreffende de operationele aspecten

De in dit hoofdstuk beschreven operationele aspecten betreffen de deur-opentijden en het aantal schuttingen per dag: deze twee parameters bepalen samen de operatie van de nieuwe sluis en zijn daarmee bepalend voor de zoutindringing. Hetgeen daarover met betrokkenen is besproken komt met de correctie op het aantal schuttingen in een ander licht te staan.

De gemiddelde deur-opentijd van, zoals in eerste instantie aangehouden, 50 minuten wordt voor de huidige operatie (10,4 schutcycli per dag) als niet representatief beschouwd; de deur zal vaak (veel) korter open staan, o.a. bij schuttingen 'leeg-om'. De toekomstige situatie met 13,9 cycli per dag, komt neer op een gemiddelde deur-opentijd van ca. 35 minuten. Deze is niet getoetst in de bespreking. Op basis van hetgeen naar voren is gebracht is het echter duidelijk dat deze sterk zal fluctueren met de operatie. Deze kortere gemiddelde deur-opentijd is echter een gunstig startpunt voor de eventuele inzet van bellenschermen.

In de bespreking bleek het heel wel mogelijk om na te denken over het beperken van het aantal schuttingen. De grotere ladingstroom leidt echter al tot een groter aantal schuttingen als 'startpunt'. Toch laten ook de simulaties zien dat het mogelijk is om het aantal schuttingen te beperken door het inplannen en verspreiden in de tijd van de grootste schepen (zie de resultaten in Paragraaf 3.3.4).

Al met al kan geconcludeerd worden dat op er beide aspecten ruimte is (er zijn geen blokkades) en dat deze in een volgende fase verder uitgewerkt kunnen worden wanneer dat aan de orde is. Daarnaast is bevestigd dat, vanuit operationeel oogpunt, het aanleggen van een selectieve onttrekking de voorkeur heeft, omdat die geen invloed heeft op de operatie van de sluis.

Daarnaast is duidelijk geworden dat het voor de kwantificering van de zoutindringing in het vervolg van deze studie noodzakelijk is om gedetailleerde informatie omtrent de

schutoperatie te gebruiken. De verkeers-simulaties zoals uitgevoerd door PMSS zullen hiervoor als uitgangspunt dienen, zie Hoofdstuk 7. Tevens is gebleken dat deze simulaties tot dusver zijn gebaseerd op een ontwikkelingsscenario met een sterke groei van de zeevaart. Een meer gematigd scenario met bijbehorende vervoersprognoses, vlootsamenstellingen en verkeers-simulaties zou mogelijk kunnen leiden tot bijstelling van het aantal schuttingen per dag voor de Noordersluis of de nieuwe sluis voor de Autonome Ontwikkeling en het Projectalternatief.

4 Drempel aan het binnenhoofd

4.1 Operationele aspecten

Voor de diepte op de drempel van de nieuwe sluis is aan beide sluishoofden hetzelfde niveau aangehouden. De reden hiervoor is om de deuren uitwisselbaar te houden, zodat niet voor elke deur een aparte reserve deur nodig is. De diepte van de drempel, in het referentie ontwerp gelijk aan NAP -17,25 m, is gebaseerd op de wens om de schepen met de maximale diepgang van 13,75 m in zoutwater, ca. 14,0 m in zoetwater, onafhankelijk van het getij te kunnen schutten. De Noordersluis heeft een drempeldiepte van NAP -15,0 m, waardoor schepen van deze afmeting de sluis niet kunnen in- of uitvaren rond laagwater.

Aan de kanaalzijde is de waterstand echter niet onderhevig aan het getij, en is de laagste waterstand hoger dan aan de zeezijde. Dit geeft ruimte om aan de kanaalzijde van de sluis (en ook aan de kanaalzijde van de deur in het binnenhoofd) een drempel van beperkte hoogte aan te brengen. Door een dergelijke drempel wordt, bij een schutting naar de kanaalzijde, het onderste deel van het zoute water in de kolk vastgehouden, waardoor de zoutindringing afneemt. In het overleg van 25 juni 2015 (zie Bijlage A) is gesproken over welke hoogte hiervoor acceptabel is.

Voor het vlot en veilig manoeuvreren bij het in- en uitvaren zijn twee parameters van belang. Op de eerste plaats is dat de ‘blockage’: de verhouding tussen de doorsnede over het schip en doorsnede over de sluis. Het blijkt dat, door de grote breedte van de sluis t.o.v. de maximale scheepsafmeting, deze verhouding voor de nieuwe sluis steeds gunstiger is dan bij de Noordersluis. Uit dat oogpunt zou een drempel op NAP -15,0 m mogelijk zijn.

Echter, het tweede te beschouwen aspect is de kielspeling. Omdat de kleinere ‘blockage’ zou kunnen leiden tot hogere invaarsnelheden moet deze extra kritisch worden bekeken.

De kielspeling bij een drempel op NAP -15,0 m is met 0,60 m erg klein. Kennelijk is dit voor de Noordersluis een geaccepteerde situatie, maar voor de nieuwe sluis lijkt dit geen reële optie. Vaak wordt voor zeeschepen een minimum van 1,0 m of 10% van de diepgang gehanteerd (1,40 m).

Bij het bekijken van de kielspeling moeten we ook aandacht besteden aan de waterstand op het kanaal. Het streefpeil bedraagt NAP -0,40 m. Lokaal bij de sluizen is de waterstand soms lager als gevolg van het spuien van water naar zee. Ook kan een westelijke tot noordwestelijke wind leiden tot een lagere waterstand door afwaaiing. Anders dan bij het getij aan de zeezijde, kunnen dit soort waterstandsverlagingen relatief lang duren, en zijn ze minder goed te betrekken in het plannen van een operatie. Er moet daarom uitgegaan worden van een lagere waterstand dan het streefpeil.

Realistische waarden voor de waterstand zijn:

- eens per jaar: NAP -0,58 m (in onderstaande tabel afgerond naar NAP -0,60 m),
- eens per 10 jaar: NAP - 0,74 m (niet afgerond).

Dit leidt tot de volgende waarden voor kielspeling en drempeldiepte:

Tabel 4.1 Diepte van de drempel bij verschillende waterstanden en kielspeling

	Streefpeil	Lage waterstand 1/1e per jaar	Minimale waterstand 1/10e per jaar
Waterstand [m NAP]	-0,40	~ -0,6	-0,74
Diepgang [m]	~14	~14	~14
Kielspeling	Diepte drempel [m NAP]		
0,60 m	-15,0	- 15,2	-15,34
1,0 m	-15,4	-15,6	-15,74
10% = 1,4 m	-15,8	-16,0	- 16,14

In het overleg is over de diepte van de drempel het volgende geconcludeerd:

- Een kielspeling van 1,0 m wordt voor de (zeer) grote schepen als redelijk beschouwd, maar een kielspeling van 10% is wenselijk, omdat dit soms door rederijen wordt vereist.
- Afhankelijk van of die 10% wordt gedefinieerd onder het streefpeil of onder de waterstand die eens per jaar voorkomt, leidt dit tot een diepteligging van de drempel van NAP -15,8 of -16,0 m.

In het overleg is verder nog een aantal aspecten besproken:

- de diepte in de binnenvoorhaven;
- de wegneembaarheid van een drempel i.v.m. de eis om de sluis ‘toekomstbestendig’ te bouwen;
- de mogelijke plaatsing van de drempel in de uitsparingen zoals voorzien voor de bellenschermen; in de uitvoering kan t.z.t de inbouw van bellenschermen worden gecombineerd met de constructie van de drempel.

Zie hiervoor het verslag van de bespreking opgenomen in Bijlage A.

Vooruitlopend op een uitwerking door het Ingenieursbureau Rotterdam is het denkbaar de drempel uit te voeren als wegneembare betonnen elementen, te plaatsen in de uitsparing voor het bellenscherm. Daarmee is de constructie eenvoudig en goedkoop, en kan over de plaatsing ervan later worden besloten.

4.2 Bijdragen van een drempel aan het beperken van de zoutindringing

De mogelijke bijdrage van een drempel aan het beperken van de zoutindringing is onderzocht middels een aantal verkennende CFD-berekeningen zoals beschreven in Bijlage B. In dit werk zijn drempelhoogtes tussen 1,0 m en 2,25 m onderzocht, deels in combinatie met het minder diep uitgraven van de binnenvoorhaven.

Uit de berekeningen blijkt dat de mogelijke bijdrage van een drempel klein is: de bijdrage is direct gerelateerd aan de reductie van de diepte in het sluishoofd, die leidt tot een vertraging van de dichtheidsstroming (de kolkuitwisselling duurt iets langer) en een reductie van het totaal uitgewisselde volume. Wegens de korte breedte van de drempel (de afmeting in de lengterichting van de sluis, dus in de stromingsrichting over de drempel) is het effect nog kleiner. Uit de berekeningen volgt een reductie van ca. 4%.

Naar verwachting echter zal de bijdrage in werkelijkheid nog kleiner zijn. De berekeningen zijn uitgevoerd voor situaties met een uniforme dichtheid aan weerskanten van de sluisdeur. In de werkelijkheid is er aan de kanaalzijde van de sluis sprake van een zekere gelaagdheid met een grotere dichtheid in de onderste meters. Dit betekent dat de drempel geplaats wordt tussen twee soorten water met een relatief klein verschil in dichtheid.

Als gevolg van die gelaagdheid zal, zonder drempel, de kolkuitwisseling langzamer verlopen, en zich in hoofdzaak beperken tot de bovenste meters van de waterkolom, waar het verschil in dichtheid groter is. De bijdrage van een drempel zal daardoor naar verwachting kleiner zijn dan berekend voor de situatie met uniforme dichtheid.

4.3 Hydrodynamische belastingen op de drempel

Een drempel in het binnenhoofd zal belastingen ondervinden door o.a. de schroefwerking van overvarende schepen. Voor deze belastingen zullen schattingen worden gemaakt t.b.v. de constructieve uitwerking. Dit moet nog worden uitgevoerd

4.4 Conclusies betreffende het aanbrengen van een drempel

Al met al kan er over het aanbrengen van een drempel het volgende worden geconcludeerd:

- Uit operationeel oogpunt is het mogelijk een drempel aan te brengen tot een diepte van NAP -15,8 tot NAP -16,0 m; te kiezen hoogte hang af van de keuze of het wenselijk is om een kielspeling van 10% te handhaven, en bij welke waterstand (streefpeil of lager);
- De drempel kan uitgevoerd worden als wegneembare betonnen elementen, te plaatsen in de uitsparing voor het bellenscherm. Daarmee is de constructie eenvoudig en goedkoop, en kan over de plaatsing ervan later worden besloten.
- De bijdrage aan het beperken van de zoutindringing zal klein zijn. Verkennende berekening zoals beschreven in Bijlage B leiden tot een reductie van ca. 4 %, maar door de gelaagdheid in de binnenhaven zal dit in werkelijkheid nog lager uitpakken.

Al met al is het beeld: het doet niet veel, maar het kost ook niet veel. Omdat een drempel later zal kunnen worden ingebouwd, hoeft een besluit nog niet op korte termijn genomen te worden, maar kan dit deel uitmaken van de afwegingen omtrent de andere maatregelen.

5 Ontwerp / dimensionering selectieve onttrekking

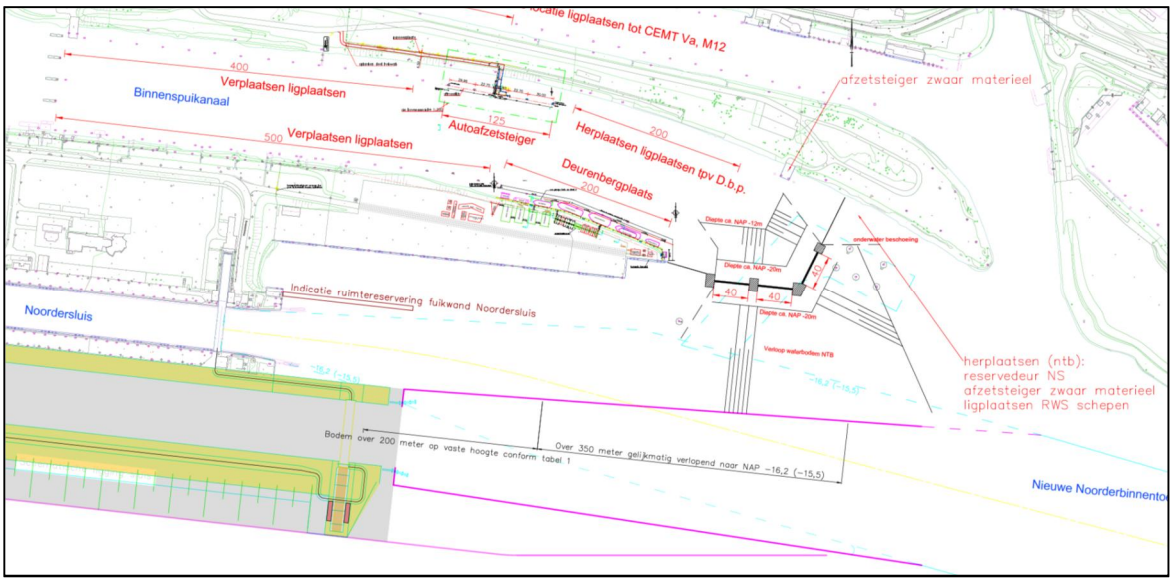
5.1 Het nu voorliggende schetsontwerp

5.1.1 Afmetingen

Ten tijde van het schrijven van de rapportage van Fase 2 is al nagedacht over de vereiste afmetingen van de constructie. Hierbij is ook gebruik gemaakt van de resultaten uit eerder schaalmodelonderzoek, namelijk een van de figuren uit [5], overgenomen in [7]. Op basis van die grafiek is gekozen voor drie openingen met elk een breedte van 40 m, met een hoogte van de openingen van 4 m, en een bodemdiepte van NAP - 20m. Daarbij is er, in overleg met Ingenieursbureau Rotterdam voor gekozen om uit te gaan van verticaal beweegbare schuiven, omdat dit constructief het meest eenvoudig is. Deze keuzes zijn voor Ingenieursbureau Rotterdam startpunt geweest voor het uitwerken van de constructie en de inpassing in de ingang van het spuikanaal t.b.v. de raming.

5.1.2 Inpassing in het complex

Bij het bekijken van de inpassing van een constructie van deze afmetingen moet rekening worden gehouden met de bodemligging aan de ingang van het spuikanaal en met de noodzakelijke flauwe bodemhellingen vanwege de lokale bodemgesteldheid (zeer fijn zand). Verder is er op 2 juni 2015 overleg geweest met RWS-GPO en RWS-WNN over de inpassing i.r.t. de scheepvaartbewegingen van en naar het Spuikanaal, de aan te nemen bodemligging (zoutvang), de mogelijke impact op de maximale afvoercapaciteit van het spui- en gemaalcomplex en de mogelijke impact op vismigratie en de daarvoor te nemen maatregelen. De hier gemaakte keuzes kunnen worden aangeduid als een eerste ‘schetsontwerp’. Dit ontwerp is afgebeeld in Figuur 5.1 hieronder. De hele tekening is opgenomen in Bijlage F.



Figuur 5.1 Voorlopige inpassing Selectieve Onttrekking in ingang Binnenspuikanaal

5.1.3 Passeerbaarheid voor scheepvaart

Het principe van de selectieve onttrekking impliceert dat het bovenste deel van de waterkolom is afgesloten, waardoor scheepvaart tijdens het spuien niet kan passeren. Voor het passeren van de scheepvaart zouden de schuiven kunnen zakken, zodat de spleet onder de schuiven is gesloten, en er een opening boven in de waterkolom zou ontstaan. (Let wel: daarbij moeten alle schuiven naar beneden bewogen worden omdat anders er een dichtheidsstroming op gang zou komen als gevolg van het verschil in dichtheid tussen enerzijds het water in het spuikanaal, achter de selectieve onttrekking (het zoutste water uit de binnenvoorhaven) en anderzijds het water in de binnenvoorhaven.) Dit betekent echter dat schepen alleen kunnen passeren als er niet wordt gespuid. Deze beperking wordt door RWS als zeer ongewenst beschouwd.

Om op elk moment van de dag de constructie te kunnen passeren zou er dan een aparte constructie moeten worden gebouwd: een gewone sluis met deuren in twee sluishoofden. Weliswaar zal het verval over deze sluis altijd zeer klein zijn, toch zou dit relatief hoge kosten met zich meebrengen. Om de kosten hiervoor uit te sparen, heeft RWS met betrokkenen overleg gehad over de verschillende functies en een mogelijke verplaatsing hiervan naar andere locaties in de binnenvoorhaven. Dit heeft ertoe geleid dat het aantal scheepvaart passages zeer sterk is terug gebracht, tot enkele keren per jaar. Voor deze enkele keren per jaar wordt de optie van het laten zakken van de schuiven door RWS als voldoende beschouwd.

Als de kier onder de schuiven 4 m bedraagt, kunnen de schuiven in principe ook 4 m zakken. Als de schuiven tijdens het spuien slechts heel weinig boven het water uitsteken, zal er voor de scheepvaart een vaardiepte van iets minder dan 4 m ontstaan. Dit wordt vooralsnog als voldoende beschouwd.

5.1.4 Bewegingen van de schuiven

Zoals blijkt uit het bovenstaande, hoeft de schuif slechts incidenteel te bewegen voor het laten passeren van scheepvaart. Een andere reden om de schuiven te bewegen is het heffen van de schuiven voor het kunnen doorlaten van heel grote debieten. Ook dit zal incidenteel zijn. Het bewegen van de schuiven t.b.v. de visintrek [2]is door RWS als niet noodzakelijk beoordeeld.

Daarmee ontstaat de mogelijkheid om de schuiven semi-permanent op een vaste hoogte te houden: dit is eenvoudiger voor de bediening, en maakt de constructie eenvoudiger en goedkoper. Dit laatste heeft o.a. te maken met de wenselijkheid om een goede afdichting te realiseren tussen de schuiven en de pilaren, zodat zout water dat zich heeft verzameld in het Binnenspuikanaal niet weer terug kan stromen naar de Binnenvoorhaven. Hiervoor is het noodzakelijk dat de constructie boven de spleet zo goed als waterdicht is.

Bij het analyseren van de prestaties van de selectieve onttrekking is het dus wenselijk om voor een grote range aan debieten (uitgezonderd de extreme afvoeren) te kunnen werken

[2] *In dit rapport is aan de visintrek verder nog geen aandacht besteed. Dit zal in een komende fase nog aandacht moeten krijgen.*

met een vaste positie van de schuif. De hoogte van de spleet van 4 m is een eerste inschatting, maar die kan makkelijk aangepast worden als daar reden toe blijkt.

5.1.5 Bodemligging

Zoals aangeduid in [1] en [4] kan het bouwen van een selectieve onttrekking al of niet gepaard gaan met de aanleg van een zoutvang. Het is een vereiste dat de selectieve onttrekking zich bevindt op het diepste punt van de voorhaven, zodat het zwaarste water zich steeds hier zal verzamelen. Het uitbreiden van dit diepe gedeelte tot een zoutvang is nuttig om het zoutste water te verzamelen tussen perioden van spuien. Uit [1] blijkt echter dat daarvoor al snel een zeer groot deel van de binnenvoorhaven verdiept zou moeten worden, waarmee de aanleg een significante extra investering met zich mee brengt. Daarbij is de vraag in welke mate het Noordzeekanaal zelf niet al een voldoende buffercapaciteit zou kunnen leveren.

Om de raming niet bij voorbaat op te drijven met de kosten voor een zoutvang is ervoor gekozen om eerst een situatie zonder zoutvang te onderzoeken. Met een bodemniveau van NAP -20 m is wel een diepste punt aangebracht aan de ingang van het Spuikanaal, en de bodem moet vanuit de geul naar de nieuwe sluis hiernaartoe aflopen.

5.1.6 Belastingen op de constructie

Als input voor een verdere uitwerking van de raming zijn hydraulische belastingen in de vorm van stroomsnelheden nabij de constructie en drukverschillen op de deuren nodig. Naarmate er meer gedetailleerde informatie ontstaat over de hydraulische condities wordt het beter mogelijk om ook de belastingen te kwantificeren. Als startpunt is een verval-belasting op de deuren van 0,5 m afgegeven. Verdere uitwerking en toelevering van de hydraulische belastingen wordt afgestemd met RWS-GPO en Ingenieursbureau Rotterdam.

5.2 Opgave aan selectieve onttrekking

De vraag is vervolgens of het hiervoor omschreven schetsontwerp voor een selectieve onttrekking de extra zoutlast ten gevolge van het Projectalternatief (nieuwe zeesluis en 125 MTPA) ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling (Noordersluis en 95 MTPA) kan mitigeren. Dit is afhankelijk van de zoutlek in de genoemde varianten en van de spui- en maaldebieten (Q_{spui}) waarmee zout naar zee zou kunnen worden afgevoerd. De waarden voor deze grootheden genoemd in [1], respectievelijk 1410 kg zout/s (bij 10,4 S/d) voor de zoutlek en 91 m^3/s voor Q_{spui}, behoeven bijstelling. De zoutlek is mogelijk groter vanwege de hogere schutfrequentie van de varianten in kwestie, terwijl de maatgevende afvoer veel lager zal worden als rekening wordt gehouden met correcties van de waterbalans en het functioneren van selectieve onttrekking in droge perioden. Dit debiet Q_{spui} limiteert de capaciteit van de selectieve onttrekking tot Q_{spui}* S_{max} met S_{max} het maximum zoutgehalte aan de kanaalzijde. Een debietreductie van 91 naar 40 m^3/s bijvoorbeeld, beperkt de zoutafvoer capaciteit van 2093 tot 920 kg zout/s uitgaande van een reële waarde van 23 psu voor S_{max}, Dit is lager dan de geciteerde zoutlek, reden om de opgave aan selectieve onttrekking nader te preciseren.

Voordat het schetsontwerp voor de selectieve onttrekking kan worden beoordeeld, is het nodig dat deze fundamentele aspecten wordt uitgezocht:

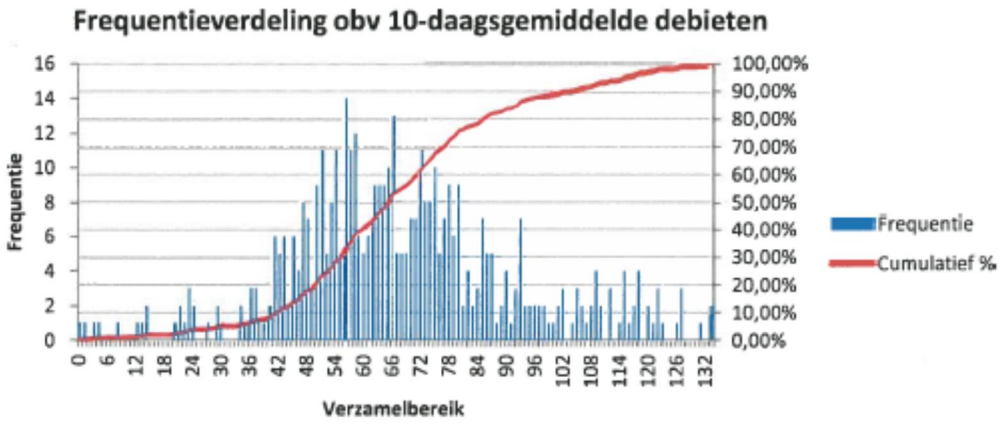
- Hoe groot is de zoutlek van de scheepvaartsluizen bij IJmuiden?
  - Hoeveel schuttingen per dag?
  - Welke deur-opentijden: gemiddelde en spreiding?
- Wat zijn de maatgevende debieten?
  - Q_{spui} van de spuisluizen en het gemaal bij IJmuiden, vanwege de werking van selectieve onttrekking.
  - Invloed van de benodigde correcties op de waterbalans van het NZK en ARK.
  - Streefwaarde voor het zomerdebiet bij IJmuiden.
  - De afvoer in het ARK Q_{ARK} bij Weesp, in verband met zoutindringing van het NZK op het ARK.

In de onderstaande paragrafen wordt hierop nader ingegaan.

5.2.1 Maatgevende debieten

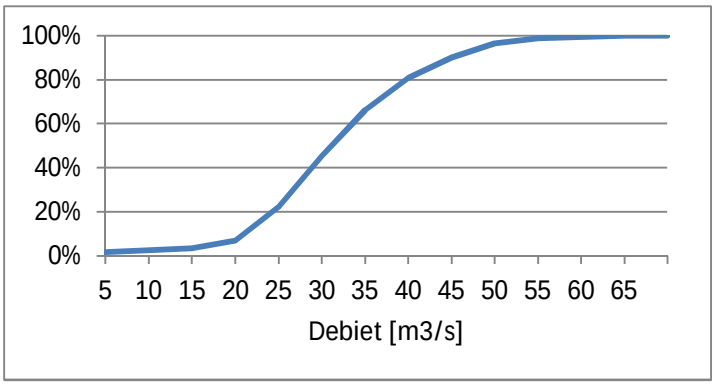
Door RWS is een overzicht van de beschikbare gegevens over de afvoerdebieten van het Noordzeekanaal opgesteld, zie Bijlage H. Een van de problemen met deze gegevens is dat de waterbalans van het NZK een sluitfout vertoont van ca. 20%: volgens de registraties gaat er meer water uit dan er in komt. Door verschillende registraties van de afvoer bij IJmuiden met elkaar te vergelijken, is getracht de sluitfout te verkleinen.
Het gemiddelde debiet over de periode 2003 – 2014 zoals geregistreerd in DONAR is 84 m^3/s, zie Bijlage H. De voor 2014 beschikbare SCADA registraties van de spui- en maalgegevens impliceren een correctiefactor van 0,8 voor de DONAR debieten van IJmuiden. Deze waarde van de correctiefactor is echter niet geheel zonder vraagtekens, want uit later beschikbaar gekomen SCADA registraties voor de periode 2009-2012 volgen factoren van in de range van 140 tot 1,2. Oudere analyses van de waterbalans voor de periode 1998-2003, zie [16] en [17], bevestigen evenwel een gemiddelde sluitfout in de waterbalans van ongeveer 20% (range 15 – 25%, afhankelijk van het jaar). In deze analyses komen meerdere oorzaken voor de sluitfout naar voren, maar verondersteld wordt dat meetfouten in de grote balansposten zoals de spuisluizen en het gemaal bij IJmuiden een voorname rol spelen.

Op grond hiervan houden we voor het langjarig gemiddelde afvoerdebiet bij IJmuiden een range van 84 à 68 m^3/s aan (periode 2003 – 2014, respectievelijk zonder en met correctiefactor 0.8, zie Bijlage H).
Op praktische gronden wordt voorlopig als streefwaarde voor het zomerdebiet of het debiet in droge perioden het 10-percentiel decadegemiddelde debiet genomen van 2003 - 2014, zie ook Figuur 5.2, ontleend aan Bijlage H. De corresponderende debieten zijn 52 à 42 m^3/s, afhankelijk van de correctiefactor van 0,8. Ter illustratie van de variabiliteit van de afvoerdebieten, het jaargemiddeld van 2007 was 49 à 39 m^3/s, en dat is lager dan het 10-percentiel decadegemiddelde debiet!



Figuur 5.2 Frequentieverdeling en cumulatieve verdeling decadegemiddelde debieten van het spui- en maalcomplex bij IJmuiden, geregistreerd in DONAR, periode 2003 - 2014

Gegevens over de debieten in het ARK bij Weesp Q_{ARK} in de periode 2003 - 2014 zijn eveneens opgenomen in Bijlage H. Het langjarig gemiddelde debiet is 32 m^3/s, en het 10-percentiel decadegemiddelde debiet 21 m^3/s, zie Figuur 5.3.



Figuur 5.3 Cumulatieve verdeling decadegemiddelde gemeten debieten van het ARK bij Weesp, periode 2003 - 2014

5.2.2 Schatting van de totale zoutlek door de scheepvaartsluizen

De zoutlek door de scheepvaartsluizen is tot op heden op verschillende manieren geschat of gesimuleerd. Daarbij zijn grote verschillen in uitkomsten geconstateerd.

Met het dynamisch zoutlek model TIMLCK zijn nieuwe simulaties uitgevoerd, analoog aan [1], zie Bijlage I. De gemiddelde schutfrequenties stemmen nu overeen met PMSS [8], en de deur-opentijden zijn aangepast, evenals de afmetingen van de nieuwe sluis. De resultaten voor de huidige situatie (2008, 77 MTPA), de Autonome Ontwikkeling (Noordersluis, 95 MTPA) en het Projectalternatief (Nieuwe sluis, 125 MTPA) zijn opgenomen in Tabel 5.1. Zij zijn liefst 35-45% hoger dan de voorgaande schatting in [1], zie ook Bijlage I.

Arcadis (2011) [14] schatte ook de zoutlast op basis van het aantal schuttingen uit PMSS [8] maar onder aanname van volledige uitwisseling. De zoutlasten voor de huidige toestand, het nulalternatief en 125 MTA Variant 2 uit Tabel 3.6 [14] zijn omgerekend naar kg zout/s en

opgenomen in Tabel 5.1. Ondanks verschillen in methode en uitgangspunten zijn de resultaten van TIMLCK uit Bijlage I en Arcadis (2011) tamelijk vergelijkbaar.

In de MER [15] is het effect van de nieuwe sluis op het zoutgehalte in het NZK en ARK gebaseerd op de numeriek modelberekeningen voor Toestand A, B en C (respectievelijk huidig, Autonome Ontwikkeling en Projectalternatief) voor Scenario's 1, 2 en 3 (Actueel scenario 2013; scenario 2003 met debiet ARK = 10 m3/s; langjarig gemiddeld scenario) gerapporteerd in Arcadis (2014) [13]. Door extra uitvoer te genereren kon uit deze serie modelberekeningen ook de effectieve, gerealiseerde zoutlek over de scheepvaartsluizen worden berekend, zie Tabel 5.1. (Deze extra uitvoer bestond uit raaien voor de sluizen langs waarover het netto transport van zout wordt berekend.) Deze waarden zijn ongeveer 40-50% lager dan beide andere schattingen. Het vertrouwen in de validiteit van deze getallen is gebaseerd op de kalibratie/validatie van het NZK en ARK model voor de huidige toestand op gemeten zoutgehaltes, oa. in het Binnenspuikanaal[3].

Afgezien van de verschillen in de niveaus van de schattingen, geldt wel steeds dat de zoutlek voor de Autonome Ontwikkeling ongeveer gelijk is aan die van de huidige situatie, en dat de zoutlek van het Projectalternatief (ruim) 50% groter is dan die van de Autonome Ontwikkeling.

Tabel 5.1 Simulaties zoutindringing

	Toestand	**MTPA**	**TIMLCK**	**Arcadis (2011)**	**Arcadis (2014)**		
			kg zout/s	**kg zout/s**	Scenario 1 kg zout/s	Scenario 2 kg zout/s	Scenario 3 kg zout/s
A	Huidig	77	1263	1253		777	670
A	2013 (jan-feb)	79			672		
B	Autonome Ontwikkeling	95	1269	1201		774	650
-	In gebruik name	95					
C	Projectalternatief	125	2063	2219		1159	978

Om vast te stellen wat realistische waarden voor de zoutlek in de huidige situatie zijn, is onderzocht hoe de gemiddelde zoutlek uit metingen geschat kan worden. Door afvoergegevens van de spuisluizen en het gemaal van IJmuiden te combineren met de continue zoutmetingen die op 3 niveaus (-1,4 m, -6,4 m en -10,4 m NAP) worden gedaan in het Binnenspuikanaal kan de afgevoerde hoeveelheid zout in een jaar geschat worden. En omdat op jaarbasis de eventuele verandering van het zoutgehalte in het NZK maar weinig bijdraagt aan de zoutbalans (fout < 5%) kan de gemiddelde zoutlek van de scheepvaartsluizen gelijk gesteld worden aan de gemiddelde zoutafvoer via het spui- en

[3] *De eerdere zoutlekschattingen van 2011 zijn overigens door Arcadis in 2014, zie Tabel 2.5 in [13], in overeenstemming met de modelberekeningen gebracht, hoofdzakelijk doordat van andere waarden voor de gemiddelde zoutgehalten aan de zeezijde en de kanaalzijde van de sluizen is uitgegaan. Na omrekening van ton chloride per dag naar kg zout/s zijn de zoutlasten uit Arcadis (2014) voor Toestand A, B en C respectievelijk 730, 723 en 1145 kg zout/s.*

maalcomplex. In deze schatting zijn alle mogelijk effecten van de operatie van de sluis, zoals variaties in deur-opentijden, inbegrepen.

Voor 2014 waren de gegevens van de afvoeren van de spuisluizen en de pompen (afgeleid uit Etmaaloverzichten) en zoutmetingen beide met een 10-minuten interval beschikbaar. (Deze gegevens waren door RWS verzameld om de zoutpieken te analyseren die aan het eind van de spuiperiode kunnen optreden in het onderste zoutmeetpunt. De zoutafvoer-berekening heeft hiervan weinig last, omdat de pieken optreden bij geringe debieten.) De zoutafvoer berekend op basis van de zoutmetingen op halve diepte van het Binnenspuikanaal (698 kg zout/s) verschilt dan ook weinig met de zoutafvoer op basis van de zoutmetingen gewogen met het representatieve deel van de waterkolom (734 kg zout/s), zie Tabel 5.1. Omdat de zoutmetingen gedurende korte perioden ontbreken, kan 750 kg zout/s aanhouden als de bovengrens van de range. Omdat de veronderstelde correctiefactor voor debieten ook in de zoutlekschatting doorwerkt is de ondergrens dan 20% lager, namelijk 600 kg zout/s.

Aanvullend zijn voor de periode 2010 - 2014 de zoutafvoeren geschat op basis van de daggemiddelde afvoerdebieten uit DONAR en de berekende daggemiddelde zoutgehaltes op -6.4 m NAP. De waarde berekend voor 2014 sluitgoed aan bij de waarde berekend op basis van de Etmaaloverzichten. Het verschil tussen 713 en 698 kg zout/s komt volledig voor rekening van het kleine verschil in het gemiddelde debiet. Opvallend is dat de zoutafvoer berekend met DONAR voor 2012 en 2013 afwijkt van de overige jaren, terwijl de ladingstromen en de schutfrequenties van bijvoorbeeld 2013 en 2014 vergelijkbaar zijn (zie Tabel 3.5). De verklaring is waarschijnlijk dat in 2012 en 2013 de jaargemiddelde debieten in DONAR relatief laag zijn, namelijk ca. 85% van de jaargemiddelde debieten uit de Etmaaloverzichten.

Op basis van deze schattingen van de zoutafvoer concluderen we dat voor de huidige situatie de zoutlek ongeveer 750 à 600 kg zout/s bedraagt, afhankelijk van debieten (zoals geregistreerd, of gecorrigeerd met een factor 0,8). Deze zoutlek is veel lager dan de ca. 1260 kg zout/s berekend met TIMLCK of door Arcadis (2011) voor de huidige toestand (2008), maar sluit wel aan bij de zoutlek in de modelberekeningen voor Toestand A, zie Tabel 5.1.

Tabel 5.2 Schattingen van jaargemiddelde zoutlek uit metingen

Jaar	**Bron**	**Gem. afvoer** m^3/s	**Schatting obv $S_{-6.4m\ NAP}$** kg zout/s	**Schatting obv gewogen S** [4] kg zout/s
2010	DONAR	94.7	691	
2011	DONAR	85.3	681	
2012 [5]	DONAR	81.8	609	
2013 [5]	DONAR	78.5	564	
2014	DONAR	82.0	713	
2014 [6]	Etmaal overzichten	80.3	698	734

[4] *Weging: 0.3 S-1.4m + 0.4 S-6.4m + 0.3 S-10.4m*

[5] *DONAR jaargem. afvoeren (en zoutlek) in deze jaren ca 85% van die uit Etmaaloverzichten*

[6] *T.g.v. ontbrekende zoutmetingen onderschatting van 2-4%*

Resumerend, is de totale (jaargemiddelde) zoutlek door de scheepvaartsluizen voor de Autonome Ontwikkeling ongeveer gelijk aan de zoutlek in de huidige situatie, d.w.z. ca. 600 à 750 kg zout/s (dit is inclusief effecten van variaties in deur-opentijden). De zoutlek van het Projectalternatief wordt, op basis van de trends in de beschikbare gegevens, voorlopig geschat op ca. 1.6 maal groter, of 960 à 1200 kg zout/s.

5.2.3 Opgave aan selectieve onttrekking

Op basis van de hiervoor beschreven overwegingen concluderen we dat de volgende getallen op dit moment de best mogelijke beschrijving geven van de opgave aan selectieve onttrekking.

Voor de spui- en maaldebieten Q_{spui} bij IJmuiden hanteren we de volgende bandbreedtes op basis van de registraties en correcties op de waterbalans:
- Jaargemiddelde afvoer: 84 à 68 m^3/s,
- 10-percentiel decadegemiddelde als maat voor de lage afvoer: 52 à 42 m^3/s.

Voor de totale zoutindringing door de scheepvaartsluizen hanteren we de volgende bandbreedtes:
- Autonome Ontwikkeling 95 MTPA (Noordersluis 13,9 S/d): ca. 600 à 750 kg zout/s,
- Projectalternatief 125 MTPA (Nieuwe sluis 13,9 S/d): 60% hoger dan de Autonome Ontwikkeling: ca. 960 à 1200 kg zout/s.

De afvoercapaciteit van selectieve onttrekking voor zout wordt gelimiteerd door $Q_{spui}*S_{max}$ waarbij S_{max} het zoutgehalte is in de onderste waterlaag. Hiervoor wordt aangenomen dat deze zal variëren van 18 - 23 psu, afhankelijk van de condities. Onder deze aanname gelden de volgende waarden voor de afvoer van zout door de selectieve onttrekking:

- Voor de gemiddelde afvoer met 68 of 84 m^3/s * 18 psu: 1200 à 1500 kg/s,
  wat groter is dan de zoutindringing in het Projectalternatief.
- Voor de lagere afvoer (zomer situatie) met 42 of 52 m^3/s * 23 psu: 960 à 1200 kg/s,
  wat even groot is als de zoutindringing in het Projectalternatief.

Deze cijfers geven de indruk dat selectieve onttrekking kan werken, veronderstellend dat 100% selectief onttrekken mogelijk is. In hoeverre dat ook het geval is, komt in de volgende paragraaf aan de orde.

5.3 Eerste beoordeling van de prestaties van het schetsontwerp

Initieel is de werking van selectieve onttrekking onderzocht op basis van experimentele resultaten voor de beoogde Stroomsluis Noordland voor een Oosterscheldedam. Voor de opgave aan de selectieve onttrekking werden daarbij nog wel de cijfers uit [1] gebruikt, zie par. 5.3.1. Par. 5.3.2 beschrijft het eerste CFD onderzoek naar selectieve onttrekking, eveneens op basis van de experimenten voor Stroomsluis Noordland. In par. 5.3.3 is het CFD onderzoek verder uitgebreid, zodat vragen over de effectiviteit van het schetsontwerp voor de selectieve onttrekking uitgaande van de herziene opgave kunnen worden beantwoord.

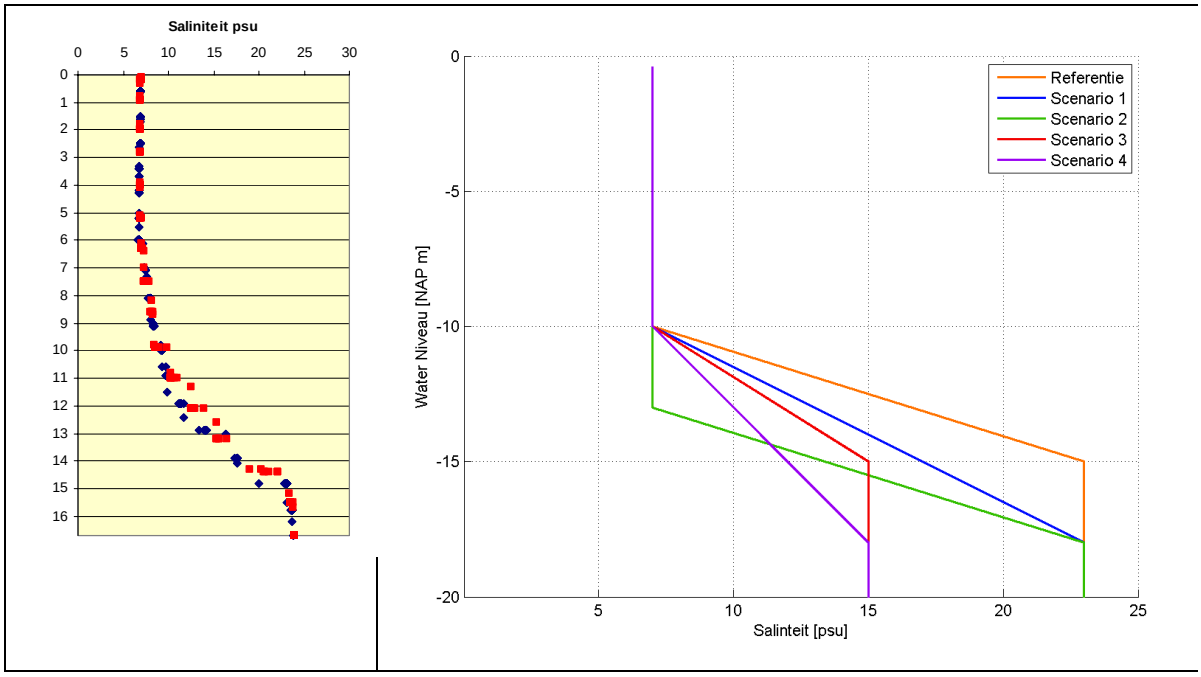
5.3.1 Verkennende empirische berekeningen van een zoutscherm

Het eerder aangehaalde schaalmodelonderzoek [5] blijkt een zeer waardevolle bron van informatie. Op basis van de uitgevoerde experimenten zijn formulering afgeleid die goed toepasbaar zijn op de situatie bij IJmuiden. Het bevat formuleringen voor zogenaamde 'volledig selectieve onttrekking' (er wordt alleen water uit de zoute onderlaag afgevoerd) zowel als voor situaties waarbij er ook water uit de bovenlaag wordt afgevoerd. Bovendien is er een correctiefactor gedefinieerd voor de dikte van de grenslaag. Hiermee is het mogelijk gebleken om de prestaties te toetsen van een selectieve onttrekking met afmetingen zoals gekozen voor het schetsontwerp. Omdat de formuleringen inzage gaven in de optimale spleethoogte is deze daarbij in eerste instantie vrij gelaten, zodat de optimale waarde uit de analyse zou kunnen volgen.

De analyse is beschreven in Bijlage C. In deze paragraaf worden de belangrijkste aannamen en resultaten behandeld.

Naast de afmetingen van de constructie worden de prestaties uiteraard bepaald door het verticale zoutprofiel stroomopwaarts van de constructie. Het is bekend dat deze fluctueert met het aantal schuttingen en het afgevoerde (gespuide) water, maar hoe de samenhang is tussen deze aspecten is niet bekend.

Als startpunt voor deze beoordeling is een gemeten zoutprofiel gekozen afkomstig uit [12]. Ditzelfde profiel wordt ook gehanteerd in [1]. Het is afgebeeld in de linker helft van Figuur 5.4. Door de werking van de selectieve onttrekking zal vooral de onderlaag minder zout gaan worden. Hoe zich dit zal ontwikkelen is nog onbekend. Op basis van het gemeten profiel is een Referentie Profiel opgesteld, en er zijn, op basis van expert judgement, een aantal andere profielen gedefinieerd die de mogelijke ontwikkeling van de onderlaag beschrijft: de onderlaag wordt minder dik en/of minder zout. Deze zijn afgebeeld in de rechter helft van Figuur 5.4. De getalswaarden van de profielen zijn weergegeven in
Tabel 5.3, waarbij h_r de hoogte is vanaf de bodem (NAP -20 m) tot halverwege de grenslaag.



Figuur 5.4 Gemeten zoutprofiel uit [12] en de gedefinieerde schematische profielen

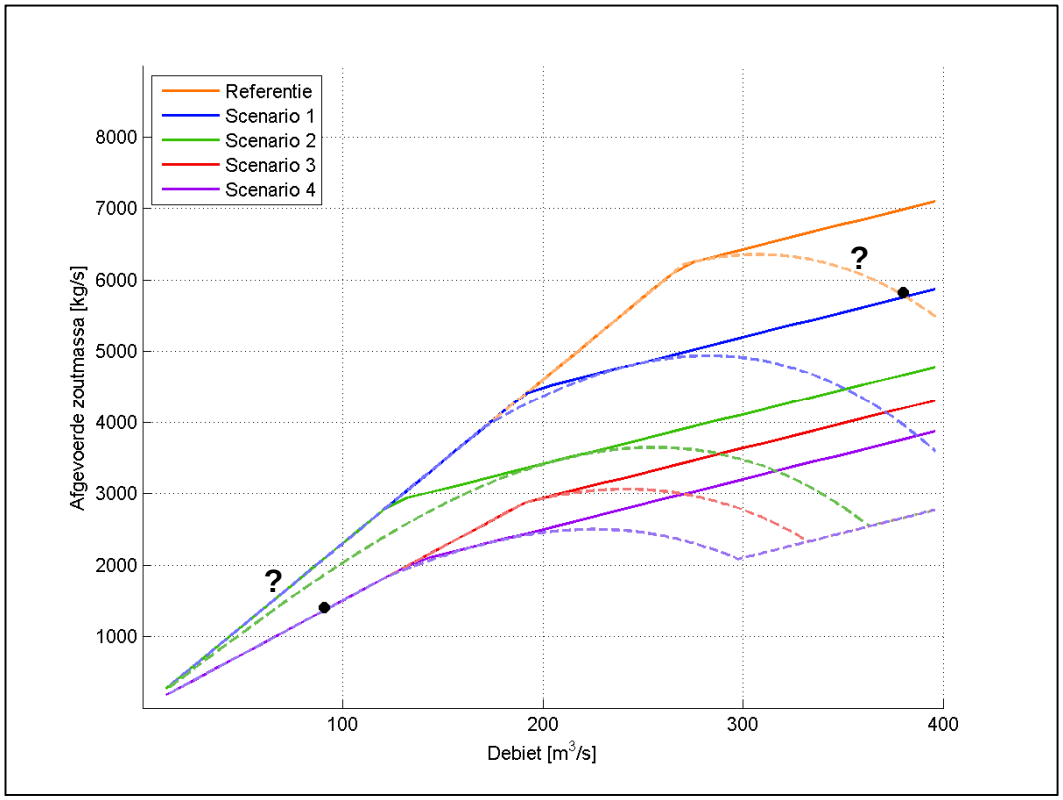
Tabel 5.3 De te beschouwen dichtheidsprofielen

Scenario	h_1 [mNAP]	h_2 [mNAP]	Z_1 [psu]	Z_2 [psu]	h_r [m]
Referentie	-10	-15	7	23	7,5
1	-10	-18	7	23	6,0
2	-13	-18	7	23	4,5
3	-10	-15	7	15	7,5
4	-10	-18	7	15	6,0

Op basis van de formuleringen zoals gegeven in [5] zijn de prestaties bepaald voor de constructie van in totaal 120 m breed (3 x 40 m). Deze prestaties bestaan uit de afgevoerde hoeveelheid zout (kg/s) als functie van het afgevoerde debiet (m^3/s). Dit is gedaan voor twee situaties:

- een situatie waarbij de schuif steeds op de optimale hoogte wordt gezet;
- een situatie waarbij de schuif op een vaste hoogte is gezet.

De vaste hoogte is daarbij bepaald voor het Referentie Profiel, namelijk zodanig dat bij beperkte debieten (tot 270 m3/s) er sprake is van 'volledig selectieve onttrekking', waarbij er alleen water uit de zoute onderlaag wordt onttrokken. Bij grotere debieten zal dan zoeter water uit de menglaag of zelfs de bovenlaag worden meegezogen. Het blijkt dat de beste keuze voor een vaste hoogte dan 5 m boven de bodem is; 1 m hoger dan tot nu toe aangehouden in het schetsontwerp. Deze maat van 5 m is ook aangehouden in het bepalen van de prestaties bij de andere zoutprofielen. De resultaten zijn samengevat in onderstaande Figuur 5.5.



Figuur 5.5 Vergelijking van de scenario's: afgevoerde zoutmassa. Doorgetrokken lijnen zijn van een zoutscherm met optimale spleethoogte, stippellijnen zijn van een zoutscherm met 5m vaste spleethoogte]

De prestaties voor de verschillende profielen zijn weergegeven met overeenkomstige kleuren als in Figuur 5.4. De getrokken lijnen geven de prestaties bij optimale schuifhoogte (d.w.z.: de positie van de schuif wordt steeds aangepast op het debiet voor een zo goed mogelijke prestatie), de stippellijnen geven de prestaties bij een vaste schuifhoogte van 5 m. De curven laten zien dat bij grotere debieten de prestaties bij vaste schuifhoogten afnemen t.o.v. de optimale schuifhoogten: bij de optimale schuifhoogte wordt vanaf dit debiet de schuif steeds iets geheven om de snelheid onder de schuif te beperken. Als dat niet gebeurt (bij een vaste schuifhoogte) wordt er door de hogere snelheid onder de schuif kennelijk meer zoetwater meegenomen dan het geval zou zijn bij een hogere schuifpositie.

Opgemerkt moet worden dat de gebruikte formuleringen niet meer geldig zijn vanaf het punt dat de curves voor de vaste schuifhoogte, de stippellijnen, gaan zakken t.o.v. de getrokken lijnen. Het is duidelijk dat de prestaties vanaf dit punt zullen teruglopen, maar hoe snel en hoeveel kan op basis van het rapport niet worden bepaald.

In de figuur zijn ook twee ‘streefwaarden’ weergegeven, afgeleid uit de beschouwingen het rapport over Fase 1 [1].

- Het lage punt geeft de daarin afgeleide gemiddelde waarde weer: een debiet van 91 m^3/s en een afvoer van zout van 1410 kg/s. Deze laatste waarde is gelijk aan de in hetzelfde rapport becijferde totale zoutlast van alle sluizen; als de zoutindringing en de afvoer van zout even groot zijn is het systeem in evenwicht. (Zoals beschreven in [1]: door de bouw van de nieuwe sluis neemt de zoutindringing toe. Voor een evenwichtssituatie moet het zoutgehalte in het afgevoerde water omhoog van ca. 10 psu naar ca. 15 psu. Deze verhoging zou bereikt kunnen worden door de inzet van de selectieve onttrekking, die alleen/vooral het water uit de onderlaag afvoert.)
- Het tweede punt geeft de waarden weer die horen bij het afvoeren van het gemiddelde debiet gedurende een spuivenster van bijvoorbeeld[7] 3 uur op een getijcyclus van 12 uur en 24 minuten. Als we in die korte tijd evenveel water en evenveel zout willen afvoeren als wanneer de afvoer wordt gespreid over de tijd, dan wordt het debiet gelijk aan 380 m^3/s en de afvoer van zout 5830 kg/s.

N.B.: Bij beide punten staan vraagtekens, omdat de getalswaarden voor beide punten ter discussie staan: enerzijds zou de zoutlast kunnen toenemen met het aantal schuttingen, en anderzijds moet het jaargemiddelde debiet over het Noordzeekanaal waarschijnlijk naar beneden worden bijgesteld op basis van nieuwe inzichten omtrent de waterbalans. Daarmee zouden beide punten naar links en naar boven kunnen opschuiven. Een dergelijke verschuiving kan op dit moment van het project nog niet worden meegenomen in de beschouwingen.

Uit de figuur blijkt dat het lage punt wordt gehaald voor de zoutprofielen van het Referentie Scenario en Scenario’s 1 en 2. Er is in die scenario’s voldoende zout beschikbaar en het scherm presteert goed in die range van debieten. De benodigde afvoer van zout wordt net niet gehaald in Scenario’s 3 en 4 omdat, hoewel het zoutscherm goed presteert (in feite

[7] *Het komt vaak voor dat het getijvenster om te spuien korter is dan 3 uur: bijvoorbeeld rond doodtij en als gevolg van opwaaiing. De tijdsduur hier is slechts een indicatie, ten behoeve van de debieten en zouttransporten die de selectieve onttrekking zou moeten kunnen verwerken. De lengte van de spuivensters zal in het vervolg nader worden beschouwd.*

optimaal), er niet voldoende geconcentreerde zout beschikbaar is in het saliniteitsprofiel om de gevraagde zoutmassa af te voeren.

De doelstelling voor het spuien in een spuivenster van 3 uur wordt alleen gehaald voor het Referentie Scenario. Bij het dichtheidsprofiel van Scenario 1 wordt de doelstelling alleen gehaald bij de optimale schuifpositie. Voor de andere scenario's wordt deze doelstelling niet gehaald en zal dus het spuien moeten worden uitgesmeerd over een langere periode, zodat met een lager debiet kan worden gespuid[8]. Een lager debiet per meter kan ook bereikt worden door een grotere totale breedte van de constructie, dus groter dan de nu aangenomen 120m (drie openingen van 40m).

Het Referentie Scenario is het scenario waar het meeste zout afgevoerd kan worden. In dit scenario is er het meeste zoutwater aanwezig in de onderlaag met een hoge dichtheid. Bij Scenario 1 is de prestatie van het scherm gelijk tot een debiet van ongeveer 170 m3/s. Bij hogere debieten is er niet voldoende zoutwater beschikbaar in de onderlaag om volledig selectief te blijven onttrekken, de onderlaag is in dit scenario enkele meters dunner.

Bij Scenario 2 is zowel de onderlaag als de menglaag dunner waardoor er nog minder zoutwater beschikbaar is. In dit scenario is de prestatie alleen gelijk aan de Referentie Scenario als het scherm optimaal ingesteld kan worden. Met een vast scherm is het nooit gelijk aan de Referentie Scenario omdat de onderlaag maar 4,5m dik is en de vaste spleethoogte 5m is. Scenario 2 is een scenario dat in de loop van tijd theoretisch kan voorkomen als selectief wordt onttrokken beginnend bij het Referentie Scenario. Als de bufferring in het toestroom kanaal niet voldoende groot is en de onderlaag in het Referentie Scenario geleegd wordt zal het dichtheidsprofiel zich ontwikkelen naar Scenario 2. Of zulke tijdsafhankelijke effecten bij IJmuiden voorkomen hangt af van de interactie van het spuien, het schutten, de afvoer van het kanaal en het getij. Dit kan met de formules in deze studie (die vanuit gaan van een steady-state situatie) niet onderzocht worden. Een Delft3D-model van het kanaal kan hier meer inzicht in geven.

De resultaten van Scenario's 3 en 4 tonen aan dat als de dichtheid in de onderlaag lager is, dat het zoutscherm met een vaste spleethoogte bijna optimaal presteert tot een debiet 200m3/s. Er is echter minder zout beschikbaar en het zoutscherm kan een maximum van ongeveer 3000 kg/s afgevoerde zoutmassa bereiken. Dit maximum komt bij een lager debiet dan in de scenario's met een hogere dichtheid in de onderlaag.

De snelheden onder de schuif lopen bij de vaste schuifstand op 5 m op met het debiet. De oplopende snelheid leidt ook tot een verval over de schuif. Dit verval blijft echter relatief beperkt:

- bij een debiet van 90 m3/s is het verval ca. 3 mm;
- bij een debiet van 380 m3/s is het verval ca. 5 cm;
- bij een debiet van 900 m3/s is het verval ca. 27 cm.

Deze vervallen zullen uiteraard (nog) kleiner worden bij een hogere positie van de schuif: de groene curves in Figuur 5.5 laten zien wat we hiervan mogen verwachten voor de prestaties: bij lage debieten zullen de prestaties wat terug lopen, maar voor hogere debieten is een verbetering te verwachten: het 'raakpunt' van de gestippelde lijn aan de getrokken lijn zal optreden bij een groter debiet, waardoor de prestaties langer dicht bij het optimum blijven.

[8] *De operationele implicaties hiervan zullen nader beschouwd moeten worden.*

Al met al zijn deze resultaten bemoedigend te noemen:

- Voor het Referentie profiel wordt de doelstelling (gebaseerd op [1], maar nader te bepalen) gehaald, zelfs voor het spuien in een spuivenster van 3 uur.
- Voor dit profiel is het ook acceptabel om een vaste hoogte van de schuif te hanteren van 5 m.
- Voor het profiel van Scenario 1 wordt de doelstelling alleen nog gehaald voor de optimale schuifstand; bij een vast schuifstand blijven de prestaties achter bij de doelstelling. Voor dit profiel (en de volgende profielen) is het dus van waarde om de schuifstand (evt. stapsgewijs) instelbaar te maken om dit verlies aan prestatie te beperken.
- Voor de andere scenario's zijn de prestaties bijna voldoende bij lagere debieten; dit impliceert dat het spuien over meer tijd moet worden gespreid (meer pompen) of dat de constructie groter moet worden gekozen, zodat het debiet per meter lager wordt.

Uiteraard hangt alles af van hoe de zoutprofielen op het Noordzeekanaal zich zullen ontwikkelen als gevolg van de werking van de selectieve onttrekking. Stromingsberekeningen van dichtheidsstromingen op het kanaal met een Delft3D model zullen hier verdere inzicht in moeten geven (uit te voeren in het vervolg van deze studie).

Bij de resultaten moet daarnaast het volgende worden aangetekend:

- De gebruikte formuleringen zijn niet geldig voor hogere debieten bij de vaste schuifstanden; hier is nader onderzoek nodig.
- De formuleringen zijn gebaseerd op experimenten in stationaire toestand en met een vlakke bodem; hoe de resultaten zullen uitpakken voor de bodemligging voor IJmuiden en bij variaties van het debiet in de tijd moet nog worden bekeken.

Deze beide kanttekeningen zijn reden om de prestaties nader te onderzoeken met behulp van CFD-berekeningen. Zie hiervoor paragraaf 5.4.

5.3.2 Eerste onderzoek selectieve onttrekking middels CFD

Er zijn diverse redenen om CFD (Computational Fluid Dynamics) in te zetten als middel om meer te weten te komen over de te verwachten prestaties van een selectieve onttrekking.

- De empirische relaties geven nog geen beeld van de prestaties als er meer water uit de bovenlaag wordt meegenomen. De informatie uit de proeven moet op dit punt aangevuld worden.
- De prestaties van een zoutscherm met selectieve onttrekking worden in de praktijk ook beïnvloed door de effecten van een variërend debiet in de tijd, een niet-vlakke bodem en een 3D-geometrie. Voor zover relevant zullen deze effecten ook in het Delft3D model van het NZK en ARK moeten worden weergegeven. Delft3D is in deze complexiteit nu niet te toetsen. Een controle zou systematisch kunnen worden opgebouwd door zowel in CFD als in Delft3D delen van deze complexiteit (in stappen) te integreren.

Uiteraard kan dat alleen als we er op mogen vertrouwen dat we de resultaten van de CFD-berekeningen als 'norm' mogen hanteren. Hiertoe is een begin gemaakt met het valideren

van CFD-berekeningen tegen de schaalmodelresultaten uit [5]. Deze werkzaamheden zijn beschreven in Bijlage E.

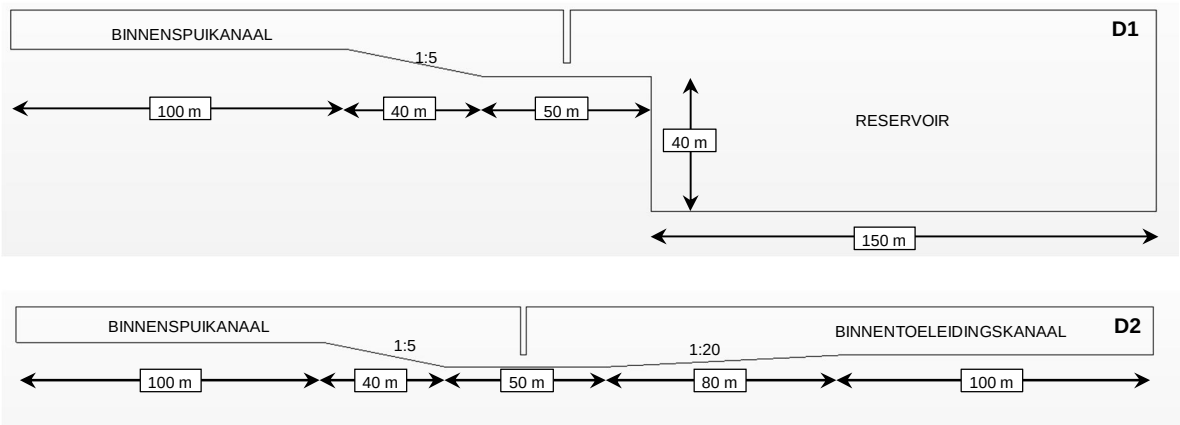
Er wordt geconcludeerd dat voor gegeven afvoer per eenheid van breedte, spleethoogte en relatieve dichtheid de selectieve onttrekking in kwalitatieve zin goed kan worden weergegeven in het 2DV CFD model. In absolute zin wordt de berekende dikte van de zoute onderlaag nog enigszins overschat. Deels komt dit omdat in de experimenten ook 3D-effecten een rol spelen. Deze en andere modelleringsaspecten worden nog nader onderzocht om een meer acceptabele validatie te verkrijgen in onderstaande paragraaf.

5.3.3 Onderzoek efficiency selectieve onttrekking met CFD

In Bijlage J is de modellering van selectieve onttrekking door CFD nader onderzocht voor een tweedimensionale verticale (2DV) geometrie, waarbij complicerende 3D factoren nog buiten beschouwing kunnen blijven. Dit CFD onderzoek is in eerste instantie bedoeld om de CFD modellering van selectieve onttrekking met een zoutscherm verder te valideren, en om de prestaties van het schetsontwerp beter in kaart te brengen. Vervolgens kunnen de schematische CFD berekeningen ook gebruikt worden om de weergave van selectieve onttrekking in Delft3D te verifiëren. Dit komt in een volgend hoofdstuk aan de orde.

Voor de validatie wordt gebruikgemaakt van de literatuurbespreking van selectieve onttrekking door Jirka (1979), zie [18]. Jirka geeft een analyse van de eigenschappen van selectieve onttrekking voor een tweedimensionaal scherm in een gestratificeerde twee-lagen stroming. De theorie wordt vergeleken met experimentele data, waaronder de eerder genoemde experimentele resultaten van de Stroomsluis Noordland. Voor een uitgebreidere bespreking van Jirka (1979), zie Bijlage J.

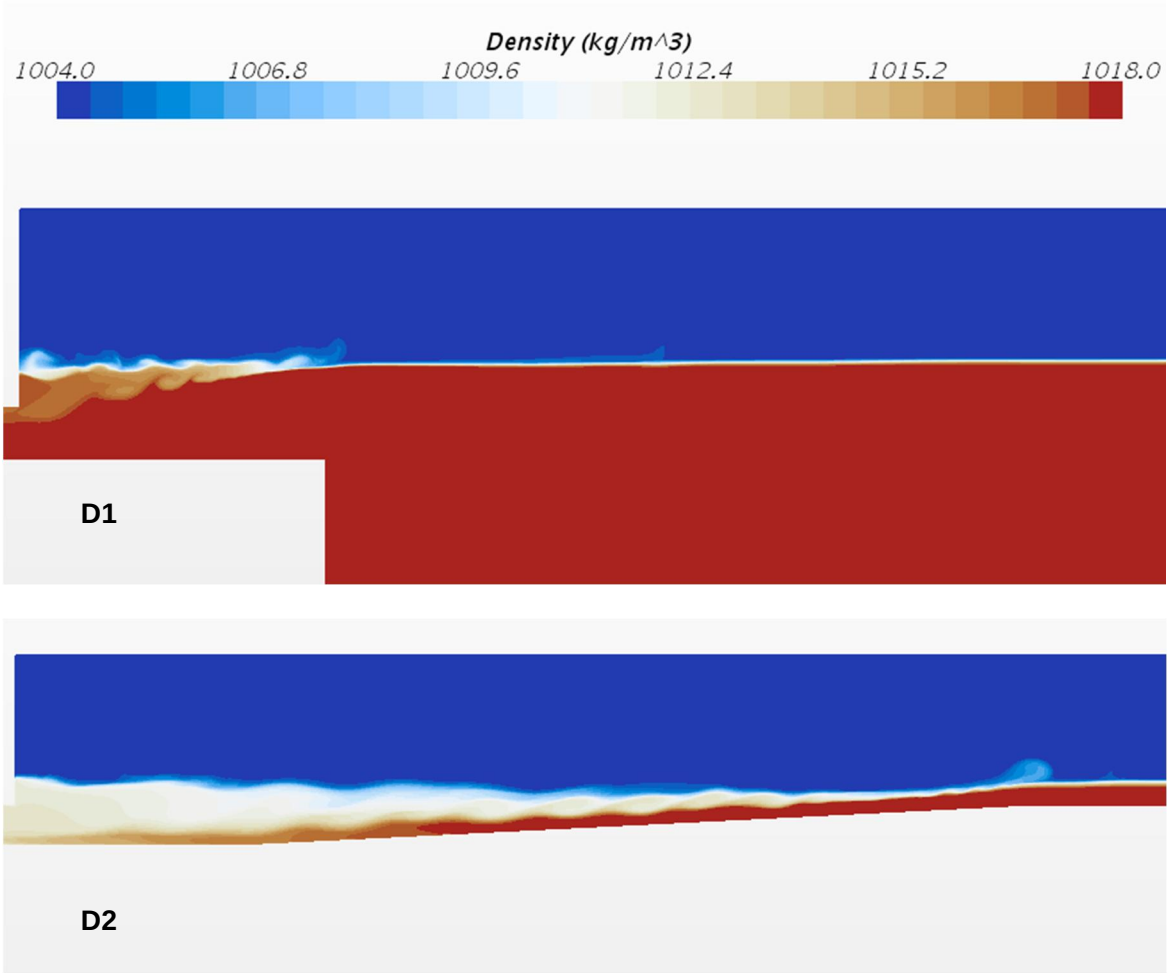
De basis voor de opzet van de CFD modellen is een hypothetische raai haaks op de selectieve onttrekking (schetsontwerp) en langs de as van de aansluitende waterlopen. Het zoutscherm, dat rijkt tot -16 m NAP, is geplaatst in een put met een diepte van -20 m NAP (4 m spleethoogte). Stroomafwaarts van het zoutscherm is de put via een talud van 1:5 verbonden met het Binnenspuikanaal (12 m diep). Stroomopwaarts is de put via een flauw talud verbonden met het Noordzeekanaal (16 m diep), zie geometrie D2 in Figuur 5.6. Om aan te sluiten bij de geometrie gehanteerd in Jirka (1979) is in geometrie D1 de put



Figuur 5.6 2DV model geometrieën voor de CFD berekeningen, Boven: D1, Onder D2

stroomopwaarts verbonden met een 40 m diep reservoir, zie Figuur 5.6. Het zoutscherm is 2 m dik, met een rechthoekige onderzijde. De proeven voor Stroomsluis Noordland laten zien dat de vorm van de onderzijde er toe kan doen, bijv. om de hydraulische verliezen te minimaliseren [5]. Dit aspect is relevant voor het detailontwerp, maar is voor dit moment buiten beschouwing gelaten. Tenslotte is ter referentie geometrie D3 toegevoegd, bestaande uit geometrie D2, maar zonder zoutscherm.

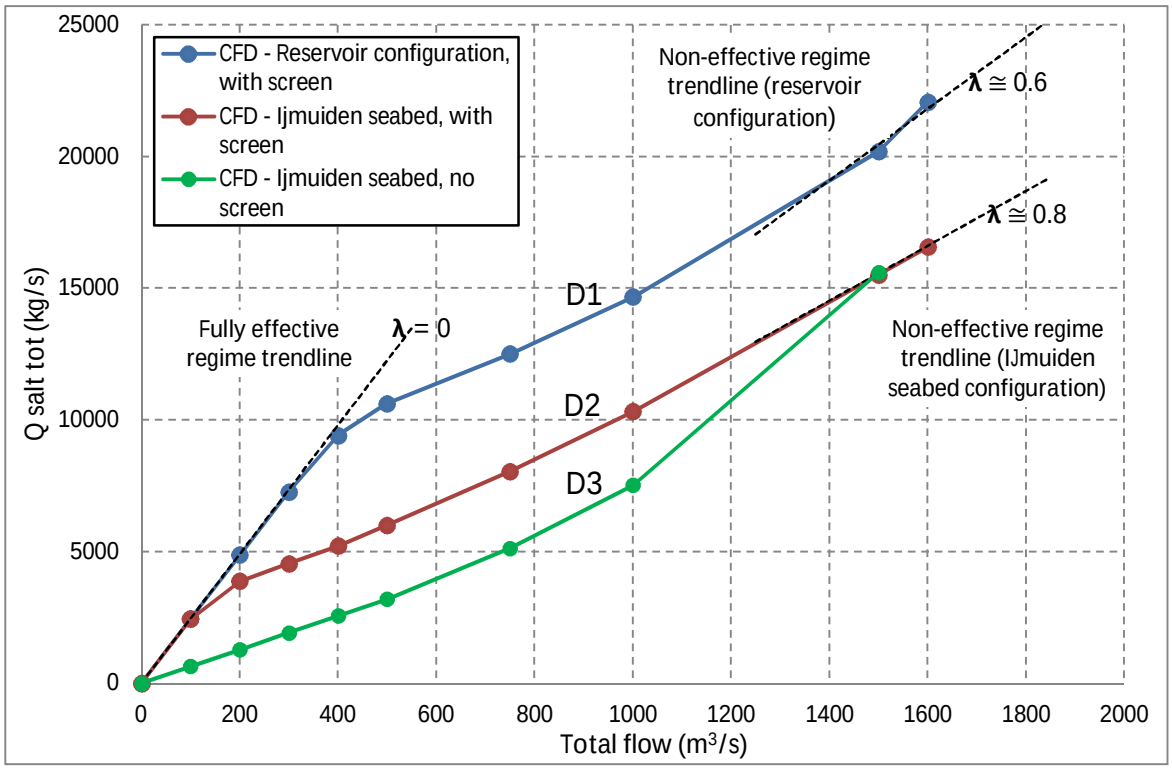
De twee-lagen stroming bestaat uit een oppervlakte laag met dichtheid 1004 kg/m^3 (6,4 psu bij15°C) en een bodemlaag met een dichtheid van 1018 kg/m^3 (24,7 psu bij15°C), met het grensvlak op 7.5 m boven de drempel van het zoutscherm. Voor verder details over de modeldefinitie, zie Bijlage J. Met beide modellen is een reeks aan debieten doorgerekend: van 50 – 1600 m^3/s nominaal (vertaald naar het 120 m brede schetsontwerp). Deze range is groter dan het maximale afvoerdebiet in IJmuiden van 760 m^3/s (960 m^3/s in exceptionele gevallen) om de werking van selectieve onttrekking goed in beeld te kunnen brengen. Een voorbeeld van de ontwikkeling van de grenslaag stroomopwaarts van het zoutscherm voor een debiet van 200 m^3/s voor geometrie D1 en geometrie D2 is gegeven in Figuur 5.7.



Figuur 5.7 Ontwikkeling van de grenslaag stroomopwaarts van het zoutscherm, bij selectieve onttrekking met 200 m^3/s, berekend voor geometrie D1 en D2.

De resultaten van de serie berekeningen voor de drie domeinen worden samengevat in Figuur 5.8 in de vorm van de berekende zoutafvoer als functie van het afvoerdebiet. De blauwe lijn geeft de resultaten voor geometrie D1, die het best aansluit bij de door Jirka gehanteerde theorie. Voor debieten tot ca, 400 m^3/s wordt nauwelijks water aan de bovenlaag onttrokken, d.w.z. dat de lijn raakt aan de lijn met onttrekkingsratio λ = 0 (λ is gedefinieerd als debiet bovenlaag/totale debiet). Bij hoge debieten (>1400 m^3/s) wordt het zoutscherm ineffectief, en benadert de lijn een asymptotische waarde waarbij λ gelijk wordt aan de ratio van de laagdikte aan bovenstroomse kant (λ~0,6, dikte bovenlaag/waterdiepte). Wel bleek de transitie van volledige selectieve onttrekking naar partiële selectieve onttrekking in de CFD berekeningen al bij iets lagere debieten op te treden dan op grond van de theorie verwacht werd, zie Bijlage J.

De rode lijn geeft de resultaten voor geometrie D2, representatief voor het schetsontwerp. Het blijkt dat deze geometrie grote invloed heeft de op capaciteit om zout af te voeren. De transitie van volledige selectieve onttrekking naar partiële selectieve onttrekking vindt nu plaats bij een veel lager debiet (ca 50 m^3/s). Opvallend is ook dat in de niet-effectieve zone de onttrekkingsratio veel lager is (λ ~0,8).
Omdat geometrie D1 als het ware een oneindig grote zoutvang representeert, geeft het verschil in onttrekkingsratio tussen beide curves een indruk van de mogelijke verbetering van de prestaties van het zoutscherm die met een zoutvang zouden kunnen worden bereikt.
De groene lijn geeft de resultaten voor geometrie D3, representatief voor de situatie zonder zoutscherm. De relatief lage capaciteit om zout af te voeren bij lage debieten (<500 m^3/s) komt omdat voornamelijk zoeter oppervlakte water wordt afgevoerd. Bij hogere debieten neemt de capaciteit om zout af te voeren toe tot die van geometrie D2 in the niet-effectieve zone.

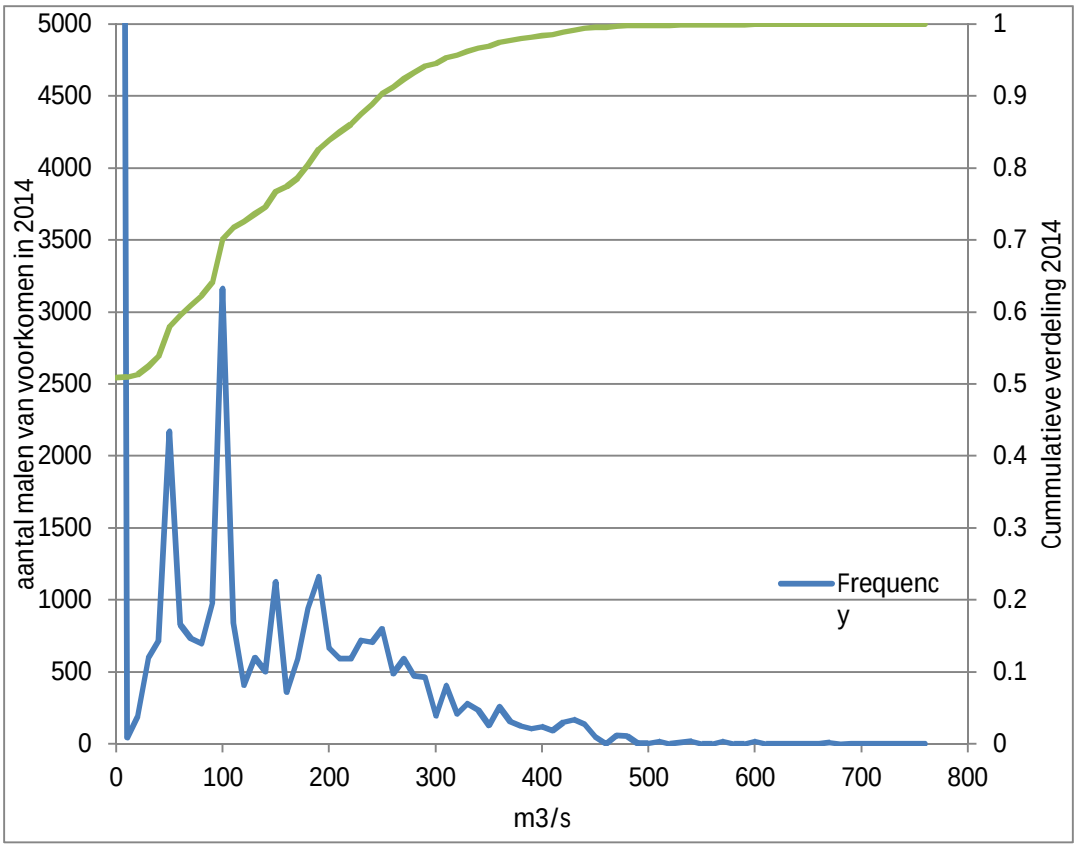


Figuur 5.8 Zouttransport door selectieve onttrekking bij verschillende bodemconfiguraties: D1: met groot reservoir (zoutvang), D2 als in schetsontwerp, zonder zoutvang, D3 als D2 zonder zoutscherm.

Op basis van de curve D2, representatief voor het schetsontwerp (120 m breed, 4 m spleethoogte), kunnen nu conclusies getrokken worden over de effectiviteit van de selectieve onttrekking volgens het huidige schetsontwerp. Daarbij moet bedacht worden dat de grafieken gelden voor de momentane debieten. Bij lage (zomer) afvoeren (gemiddeld 42 a 52 m^3/s) zal de momentane afvoer vermoedelijk meestal lager zijn dan 200 m^3/s. Op basis daarvan schatten we voor het schetsontwerp de zoutafvoer op circa ca. 75 - 80% van de maximale zoutafvoer (λ = 0). Op jaarbasis (gemiddeld 68 a 84 m^3/s) zal de momentane afvoerwaarden van 400-500 m^3/s bereiken. Dit is reden om voor de hogere debieten de zoutafvoer voor het schetsontwerp op ca. 60% van maximale zoutafvoer te schatten.

Wellicht zijn deze schattingen aan de conservatieve kant, zie bijv. Figuur 5.9, waarin een histogram van de 10-minuten waarden van de afvoerdebieten van 2014 zijn gegeven. In de figuur is ook de cumulatieve verdeling gegeven. Het blijkt dat er in 2014 ongeveer de helft van de tijd niet gespuid werd (debiet 0 m^3/s), en dat van de tijd dat er gespuid werd dit voor 80% (cumulatief 90%) gebeurde met debieten kleiner dan 250 m^3/s, Vergeleken daarmee is 400-500 m^3/s conservatief. (NB. De pieken in het histogram corresponderen met pomp debieten.) Vermoedelijk is ook de schatting voor de perioden met lage afvoer conservatief, maar om dit te beoordelen is een apart histogram en cumulatieve verdeling nodig gebaseerd op afvoerendebieten van perioden met lage afvoer.

Daar tegen over staat dat uit indicatieve CDF berekeningen is gebleken dat een dikkere grenslaag tussen de boven- en onderlaag de efficiency weer enigszins verlaagd. Ook 3D effecten en tijdsvariatie kunnen nog effect op de efficiency hebben. Om deze reden houden vooralsnog vast aan de genoemd percentages.



Figuur 5.9 Histogram en cumulatieve verdeling van de 10-minuut afvoerdebieten van 2014 te IJmuiden

5.4 Conclusies dimensionering schetsontwerp

In het kader van het ontwerp en de dimensionering van de selectieve onttrekking is gekeken of het schetsontwerp de gewenste prestaties kan leveren. Daarvoor is eerst de 'opgave' voor selectieve onttrekking beter in beeld gebracht. Vervolgens is de effectiviteit van selectieve onttrekking onder diverse condities nader onderzocht.

Opgave Selectieve Onttrekking
De te beantwoorden vraag is of selectieve onttrekking de extra zoutlast kan mitigeren ten gevolge van de nieuwe zeesluis met 125 MTPA ladingstroom ten opzichte van de Noordersluis met 95 MTPA ladingstroom.

Na overweging van de beschikbare informatie over de afvoeren en de zoutlek bij IJmuiden, worden de volgende waarden aangehouden voor het afgevoerdebiet van de spuisluizen en het gemaal van IJmuiden (Q_{spui}): een representatief jaargemiddeld afvoerdebiet van 68 à 84 m^3/s, en het 10-percentiel decadegemiddelde van 42 à 52 m^3/s als representatief laag afvoerdebiet. Op basis van de trends in de beschikbare gegevens wordt verwacht dat de zoutlek voor de Autonome Ontwikkeling 95 MTPA (13.9 S/d) ongeveer stabiel zal zijn ten opzichte van 2014, ca. 600 à 750 kg zout/s, en voor het Projectalternatief 125 MTPA (13.9 S/d) wordt een toename verwacht van zo'n 60% naar ca. 960 à 1200 kg zout/s.

Limiet aan capaciteit selectieve onttrekking
De afvoercapaciteit van selectieve onttrekking voor zout wordt gelimiteerd door Q_{spui}*S_{max}, waarbij S_{max} het zoutgehalte is in onderste waterlaag. Hiervoor wordt aangenomen dat deze zal varieren van 18 - 23 psu, afhankelijk van de condities. Onder deze aanname gelden de volgende waarden voor de afvoer van zout door de Selectieve onttrekking:

- 68 of 84 m^3/s *18 psu of 1200 à 1500 kg zout/s bij gemiddelde afvoer,
- 42 of 52 m^3/s *23 psu, of 960 à 1200 kg zout/s bij lage (zomer) afvoer.

In praktijk is het niet altijd mogelijk 100% selectief te onttrekken. Op basis van de CFD simulaties word geschat dat uitgaande van de momentane afvoeren:

- Voor de jaargemiddelde afvoer, waarvoor de afvoerpieken relevant zijn, te rekenen op 60% effectiviteit of een zoutafvoer van 720 à 900 kg zout/s.
- Voor lage gemiddelde afvoer. met pieken < 200 m^3/s te rekenen 75% effectiviteit of een zoutafvoer van ca. 720 à 900 kg zout/s.

De conclusie is dat voor de Autonome Ontwikkeling (zoutlek ~600 à 750 kg zout/s) een balans mogelijk is voor de gemiddelde afvoer en de lage afvoer. Voor het Projectalternatief (zoutlek ~960 à 1200 kg zout/s) is met het schetsontwerp van de selectieve onttrekking de balans niet sluitend te krijgen: niet voor de gemiddelde afvoer en ook niet voor de lage afvoer. In beide gevallen is de afvoercapaciteit 25% te laag (ten opzichte van de opgave) en zou de afvoercapacitet dus 33% groter moet zijn dan nu verwacht wordt voor het schetsontwerp.

Hydraulisch ontwerp selectieve onttrekking
Door aanpassing van het schetsontwerp kan de prestatie van selectieve onttrekking worden verbeterd. Opties hier voor zijn (combinaties van):

- Vergroten van de effectiviteit van selectieve onttrekking door:
  - Lagere stroomsnelheden onder het scherm te creëren via een breder zoutscherm, een hogere opening of een diepere drempel, of een langer venster voor spuien en malen, (dwz. eventueel pompen bij hogere buitenwaterstand, en dus meer energiekosten).

  - Een zoutvang toe te voegen aan het ontwerp, als ‘snelle buffer’ voor de opslag zouter water om de periode tussen twee spuivensters te overbruggen (het NZK zelf is een trage buffer). De 2DV CFD berekeningen met een diepe put wijzen op een sterke toename van de effectiviteit. Een diepe zoutvang in de Velserkom betekent ook minder risico op menging van zout en zoet water (hogere S_{max}).

- Naast het verhogen van de effectiviteit kan ook aan andere maatregelen worden gedacht om de afvoer van zout in evenwicht te brengen met de zoutlek:
  - Het verhogen van het minimum beschikbaar debiet in IJmuiden, d.w.z. een groter zoetwater verbruik,
  - en indien dit niet meer beschikbaar is door ingrijpen van de LCW: minder gaan schutten.

Tenslotte kan ook worden besloten het zoutgehalte in het NZK te laten oplopen, d.w.z. de oplossing niet te zoeken in 100% ‘maatregel aan de bron’.

Voorlopige conclusie
Selectieve onttrekking is een serieuze optie bij een bepaalde minimum afvoer bij IJmuiden, mogelijk breder en/of dieper dan in het voorlopig schetsontwerp, met een langer spui/maal venster, of met een zoutvang.
Bij lagere debieten zijn bellenschermen een optie, mits de deur-opentijden voldoende klein zijn of een beperking van de deur-opentijden is te realiseren (ook, of in plaats van selectieve onttrekking), of minder schutten. Zie hiervoor Hoofdstuk 7.

Nog niet verkend is wat de bijdrage aan de effectiviteit is van een mogelijk hoger zoutgehalte in de onderlaag, en welke buffer-capaciteit er in deze onderlaag zit, d.w.z. hoe snel loopt het zoutgehalte op bij lagere afvoer. Daarvoor zijn berekeningen nodig met een hydrodynamisch model van het NZK en ARK, zie Hoofdstukken 6 en 8.

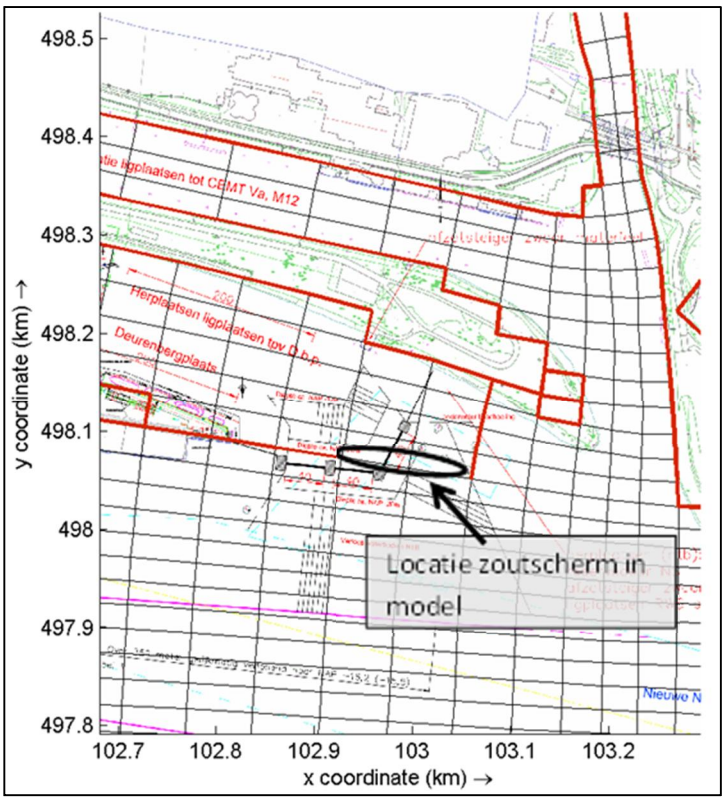
6 Eerste verkenning van selectieve onttrekking met Delft3D

6.1 Algemeen

Met behulp van indicatieve Delft3D berekeningen is een eerste verkenning uitgevoerd van het effect van een selectieve onttrekking op het zoutgehalte in het Noordzeekanaal. Deze berekeningen zijn uitgevoerd met een model van de huidige situatie, met de bestaande Noordersluis, en op basis van het schetsontwerp van de selectieve onttrekking. In deze paragraaf geven we de meest relevante overwegingen en conclusies van deze berekeningen. Voor de uitgebreide rapportage verwijzen we naar Bijlage D.

In dit stadium van het onderzoek kon alleen worden beschikt over een model van de bestaande situatie van het NZK met de Noordersluis en met sluiseiland Zeeburg en drempel in het ARK en een ladingstroom van 75 miljoen ton per jaar. Dit model is opgezet door, Arcadis, zie [13]. Als simulatieperiode is een deel van de validatieperiode gekozen: januari t/m maart 2013. Voor een eerste ruwe indicatie van de mogelijke effectiviteit van een selectieve onttrekking werd dit voldoende geacht.

In deze simulatieperiode is de waterbalans deels via de spui- en maaldebieten bij IJmuiden en deels via de instroming in het ARK bij Maarsen gecorrigeerd. De piekdebieten bij IJmuiden



Figuur 6.1 Locatie van schematisch ingebracht zoutscherm in het model (dichte modelranden en "dunne dammen" zijn in rood weergegeven).

zijn in de orde van 400 – 500 m^3/s. Het debiet bij Maarsen varieert van 15 – 75 m^3/s. Van 17 – 26 januari zijn de afvoeren laag vanwege een vorstperiode.

De selectieve onttrekking in de toegang tot het Binnenspuikanaal is op schematische wijze in het model ingebracht. Om de afmetingen van het zoutscherm in het model zoveel mogelijk te laten aansluiten bij het voorlopige ontwerp, is het zoutscherm gemodelleerd over een breedte van 2 roostercellen waardoor de effectieve breedte ongeveer 130 m is (120 m in het ontwerp), zie Figuur 6.1. Verder is het Binnenspuikanaal afgesloten met “dunne dammen”. De bodem bij het zoutscherm is verdiept naar NAP -20 m.

6.2 Het effect van selectieve onttrekking op de zoutverdeling in het Noordzeekanaal

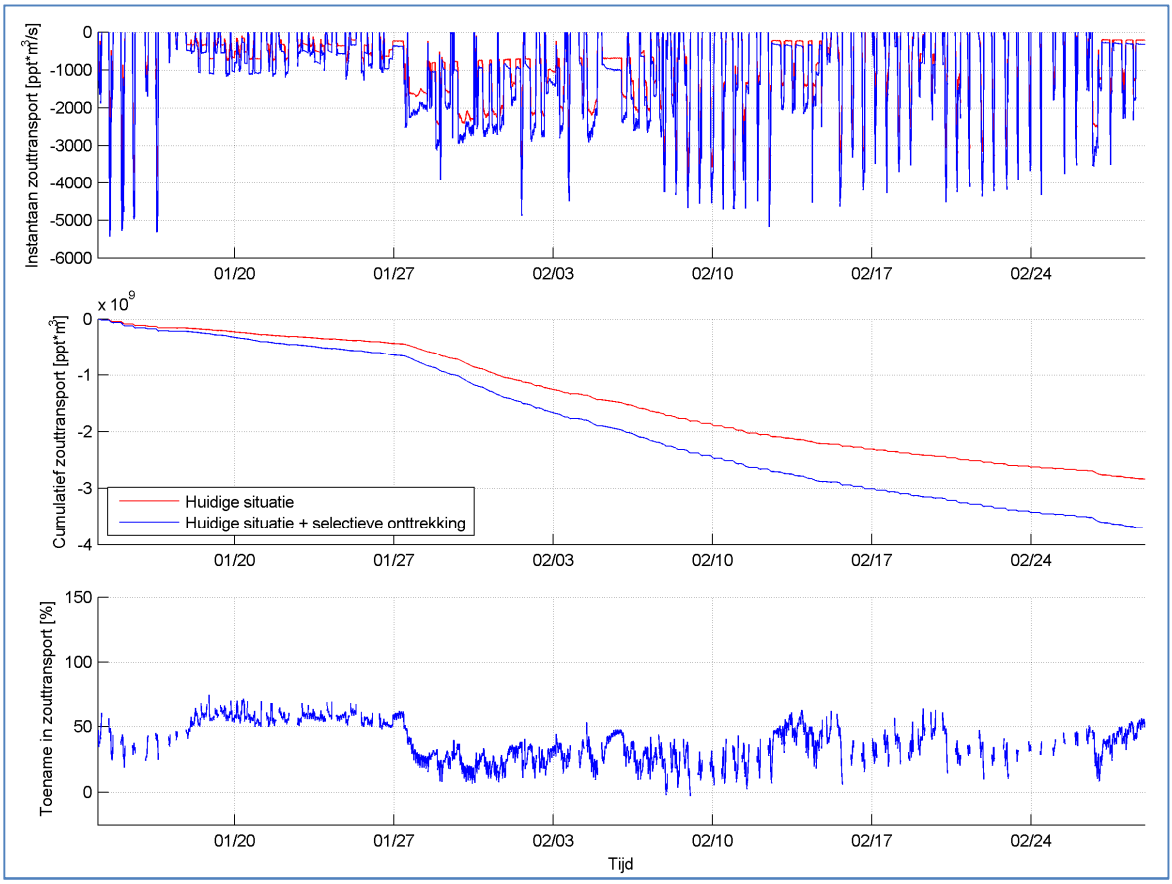
Het effect van het zoutscherm op de water- en zouttransporten is op meerdere manieren gesimuleerd:

- In Configuratie 1 zijn bij het zoutscherm de bovenste 16 (van de 20) lagen dichtgezet met gebruikmaking van de “3Dgate” optie in Delft3D-FLOW. Bij een waterdiepte van ca. 20 m is de hoogte van de spleet ongeveer 4 m, conform het voorlopige ontwerp. Het Binnenspuikanaal en de spui- en maaldebieten blijven ongewijzigd.
- Ter verificatie van Configuratie 1 is in Configuratie 2 de onttrekkingen van het spui- en maalcomplex verplaatst naar de locatie van het zoutscherm. Het totale onttrekkingsdebiet is uniform verdeeld over de onderste 4 lagen (ca. 4 m spleethoogte).
- Om de gevoeligheid van het systeem te onderzoeken is in Configuratie 3 het totale onttrekkingsdebiet uniform verdeeld over de onderste 10 lagen (ca. 10 m spleethoogte).

Bij al deze configuraties is een vaste stand van het zoutscherm verondersteld onder alle afvoercondities, d.w.z. zonder getrokken schuif bij grote spuidebieten, waarin het ontwerp voorziet.

De vergelijking van de berekeningen van Configuratie 1 – 3 met een referentieberekening voor de huidige situatie (dus zonder selectieve onttrekking) levert in eerste instantie het gewenste inzicht in het effect van selectieve onttrekking. De belangrijkste resultaten van de berekeningen worden geïllustreerd door Figuur 6.2 (Bijlage D, Figuur 3.1).

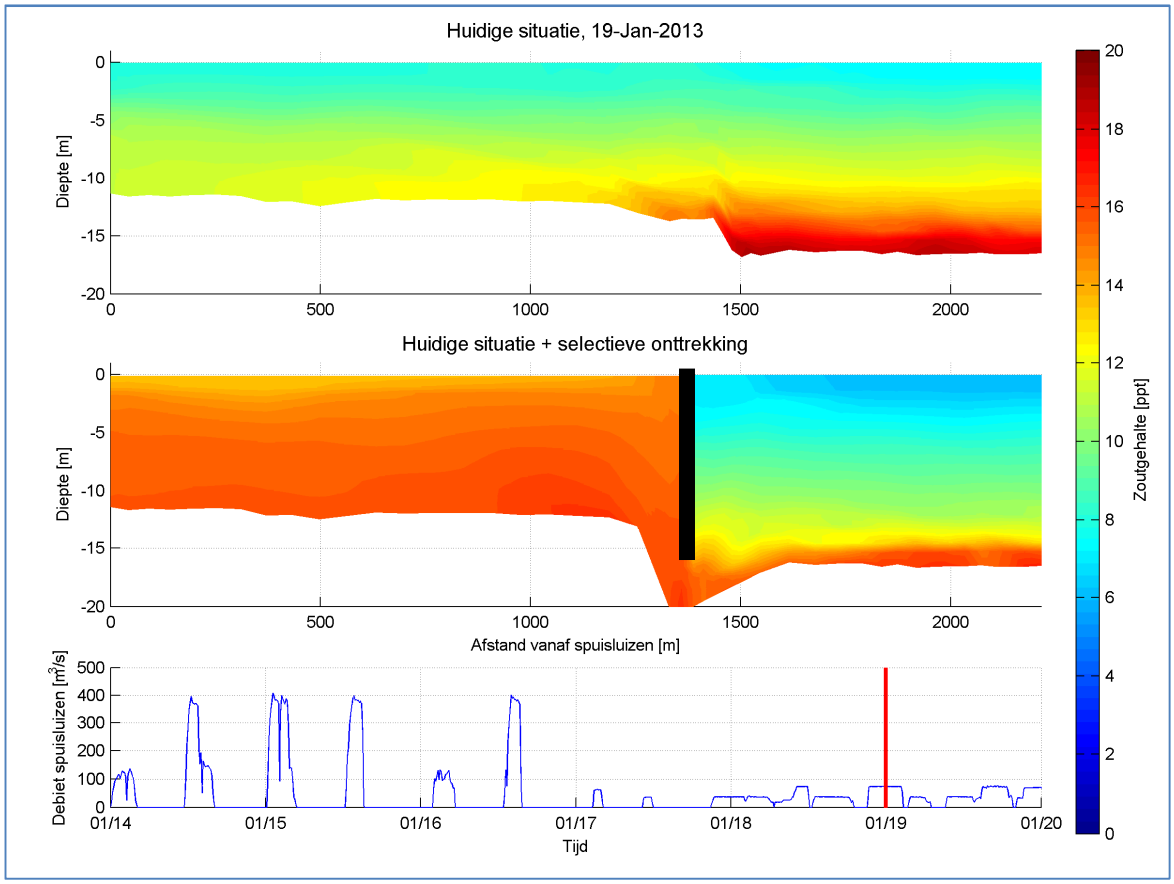
Figuur 6.2 geeft een overzicht van het zouttransport in ppt*m^3/s door de spuisluizen voor de Referentieconfiguratie en Configuratie 1 voor de periode 14 januari 2013 t/m 1 maart 2013. Het momentane zouttransport is sterk gekoppeld aan het debiet door de spuisluizen. In de middelste plot is het cumulatieve zouttransport weergegeven vanaf 14 januari. Daaruit blijkt dat aan het eind van de periode in Configuratie 1 ongeveer 30% meer zout is afgevoerd dan in de Referentieconfiguratie. De onderste plot laat de procentuele toename in het momentane zouttransport zien. Het blijkt dat de efficiëntie van de selectieve onttrekking sterk gerelateerd is aan de debieten door de spuisluis. Tijdens de periode met lage spuidebieten (17 januari t/m 26 januari 2013) is de efficiëntie van de selectieve onttrekking in de orde van 60%. Tijdens periodes met hoge afvoer varieert de efficiëntie tussen de 10% en 40%. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat in de droge periode het zouttransport uiteindelijke toch lager is dan in de periode met hoge afvoeren, zie de gradiënten van het cumulatieve zouttransport. Van belang voor het gedrag van de zoutindringing in het NZK en het ARK is hoe de getoonde cumulatieve krommes voor de Referentieconfiguratie en Configuratie 1 zich verhouden tot de cumulatieve zoutlast van het sluizencomplex. Om het oplopen van het zoutgehalte op het NZK (en ARK) te voorkomen moet de (cumulatieve) afvoer van zout tenminste even groot zijn



Figuur 6.2 Verschil in zouttransport door spuisluizen tussen de Referentieconfiguratie en Configuratie 1. Boven: Instantaan zouttransport, Midden: Cumulatief zouttransport, Onder: Toename in instantaan zouttransport ten gevolge van het zoutscherm.

als de (cumulatieve) zoutindringing door de sluizen. Deze vergelijking moet nog nader uitgewerkt worden.
De berekening voor Configuratie 2 levert qua efficiëntie van de selectieve onttrekking vergelijkbare uitkomsten als voor Configuratie 1, d.w.z. ca. 30% hogere zoutafvoer over de gehele periode dan in de Referentieconfiguratie. Dat deze twee benaderingen tot vergelijkbare resultaten leiden, geeft vertrouwen in de berekende waarden. De berekening voor Configuratie 3 (10 m spleethoogte) blijkt slechts enkele procenten minder effectief, en kan daarom ook een interessante oplossing blijken te zijn, bijv. om het verval over het zoutscherm te reduceren, Een vergelijking met de cumulatieve zoutlast van het sluizencomplex kan aangeven of de capaciteit voldoende is.

De werking van de selectieve onttrekking in een periode met lage afvoer wordt geïllustreerd met de verticale verdeling van het zoutgehalte over een langsdoorsnede door het Binnenspuikanaal, de selectieve onttrekking en de Velserkom, zie Figuur 6.3 (App. D Figuur 3.3). Op het gekozen moment op 19 januari (zie onderste plot) is in het Binnenspuikanaal het gemiddelde zoutgehalte ca. 10 ppt versus ca. 15 ppt voor Configuratie 1, in overeenstemming met een ’efficiency’ (hogere zoutafvoer) van 50% voor Configuratie 1 in vergelijking met de Referentieconfiguratie. Deze figuur laat zien dat, omdat er sprake is van ‘volkomen selectieve onttrekking’ (er wordt alleen water uit de zoute onderlaag afgevoerd) het water in het Binnenspuikanaal geheel bestaat uit water uit de zoute onderlaag. Ook is goed te zien dat het water in de Binnenvoorhaven duidelijke zoeter is dan in de Referentieconfiguratie.



Figuur 6.3 Verticale verdeling van zoutgehalte tijdens periode met lage afvoer door spuisluizen. Boven: dwarsdoorsnede in Referentieconfiguratie, Midden: dwarsdoorsnede voor Configuratie*1.* Onder: Tijdserie van debiet door spuisluizen.

Voor een vergelijkbare figuur voor een situatie met hoge afvoer (14 januari 13:15), zie Figuur 3.4 in Bijlage D.

Uit de indicatieve Delft3D berekeningen blijkt dat de selectieve onttrekking de zoutuitwisseling bij de sluizen kan beïnvloeden. In de huidige berekeningen is de uitwisselingsstroming (lock-exchange) door de scheepvaartsluizen opgelegd door het uitgaande en inkomende debiet bij de sluizen voor te schrijven, inclusief het zoutgehalte van het inkomende debiet. Het zoutgehalte van het uitgaande debiet door de scheepvaartsluizen wordt echter berekend door het model. De introductie van selectieve onttrekking in de berekening resulteerde in lagere zoutgehaltes in de bovenlaag van de Binnenvoorhaven, waardoor minder zout wordt afgevoerd door de scheepvaartsluizen, wat gevolgen heeft voor de netto zoutlast door de scheepvaartsluizen (uitwisselingsdebieten bleven gelijk). Hoe groot dit effect is, wordt geïllustreerd in Tabel 6.1. Hierin is de verandering in de zouttransporten door het spui- en maal complex (de zoutafvoer), door de scheepvaartsluizen (de zoutlek), en door de ingang van het NZK in beeld gebracht als gevolg van de invoering van de selectieve onttrekking. Globaal vormen de drie genoemde posten de zoutbalans van de Velserkom. Zoals gezegd, is zoutafvoer door het spui- en maalcomplex door selectieve onttrekking gemiddeld ruim 30% hoger over de simulatieperiode. De zoutlast is door de selectieve onttrekking ook toegenomen, zoals boven omschreven, maar slechts met 14%. Door selectieve onttrekking

wordt in dit voorbeeld het verschil tussen zoutlast en zoutafvoer groter, zodat de verzoeting van het NZK in deze periode met bijna een factor 3 kan toenemen.
De invloed van de selectieve onttrekking via lagere zoutgehaltes in de bovenlaag van de Binnenvoorhaven op de schematisering van de uitwissellingsstromen bij de sluizen is nog niet meegenomen. Verwacht wordt dat door het grotere dichtheidsverschil deze uitwissellingsstromen tussen sluiskolken en Noordzeekanaal zullen toenemen, met in potentie een verdere toename van de zoutlast vanuit de sluizen tot gevolg. Hoe groot dit effect is moet nader onderzocht worden.

Tabel 6.1 Verandering zouttransport (kg zout/s) door invoering Selectieve Onttrekking (SO-IJ) in Delft3D berekening jan-feb 2013

	Scheepvaartsluizen zoutlast (in)	**Spui- en maalcomplex zoutafvoer (uit)**	**Ingang NZK (Velserkom in)**
Zonder SO-IJ, Ref. config.	672	748	75
Met SO-IJ , Configuratie 1	769	997	220
Toename door SO-IJ	14%	33%	293%

De geplande nieuwe zeesluis te IJmuiden is groter en dieper dan de hier onderzochte Noordersluis en heeft in het Projectalternatief bovendien een grotere ladingstroom. Daarom zal de zoutbelasting vanuit de nieuwe sluis groter zijn dan in de huidige situatie. In dat geval zullen de zoutgehaltes toenemen en de verticale stratificatie iets groter worden volgens [13]. Hoe groter het relatieve dichtheidsverschil, des te gemakkelijker water vanuit het onderste deel van de waterkolom aangezogen kan worden onder het zoutscherm door. Echter, de beschikbare informatie wijst er niet op dat de relatieve dichtheid significant veranderd. Door de toename van het zoutgehalte in de situatie met de nieuwe zeesluis zal wel meer zout worden afgevoerd.

6.3 Conclusies verkenning selectieve onttrekking in Delft3D

In het vervolg zal worden gekeken of de implementatie van selectieve onttrekking in Delft3D kan worden verbeterd, en gevalideerd. Dit zal gedaan worden door vergelijking met de beschikbare informatie van schaalmodel proeven en door vergelijking met hiertoe uit te voeren CFD berekeningen voor nader te definiëren testsituaties, zie Hoofdstuk 8..

Vervolgens wordt in Hoofdstuk 8 gekeken naar wat selectieve onttrekking in de Projectvariant met de Nieuwe Zeesluis met een ladingstroom van 125 miljoen ton per jaar betekent voor de zouthuishouding in het Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal. Het streven is erop gericht om door de toevoeging van de selectieve onttrekking aan het Projectalternatief de zoutgehaltes weer terug te brengen naar het niveau van de Autonome Ontwikkeling (Noordersluis met ladingstroom 95 miljoen ton per jaar). Bij deze berekeningen zal ook een verbetering van de zoutlast door het sluizencomplex worden meegenomen.

7 Effecten van variaties in deur-opentijden en schutfrequenties op zoutlek

7.1 Algemeen

De schattingen tot nu toe van de zoutindringing door de sluizen zijn gebaseerd op schattingen en vereenvoudigde aannamen. Het gaat daarbij om schattingen van het aantal schuttingen per dag en van de gemiddelde deur-opentijden, en de aanname van volledige kolkuitwisseling bij elke schutting. In verschillende studies zijn hiervoor verschillende waarden aangenomen of afgeleid (zie Paragraaf 5.2.2). De mate van kolk-uitwisseling (de zoutvracht per schutting) kan sterk variëren met de deur-opentijd. Een gedeeltelijke kolkuitwisseling in een schutting beperkt ook de kolkuitwisseling in daaropvolgende schuttingen. Omdat de effecten dus langer doorwerken is ook de variatie in de deur-opentijd relevant. Tenslotte is het zo dat, door het schutproces, de zoutgehaltes aan weerskanten van de sluis ook worden beïnvloed: de zoute kant wordt zoeter, en de zoete kant wordt zouter. Ook dit is van invloed op de zoutindringing. Ook de variatie in de schutfrequentie speelt hierbij een rol.

Om deze aspecten in meer detail te kunnen beschouwen zijn berekeningen uitgevoerd met WANDA-Locks: een model waarin individuele schuttingen kunnen worden beschouwd en waarbij de kolkuitwisseling per schutting wordt berekend op basis van de momentane zoutgehaltes in de beide voorhavens. De hydrodynamica is hierbij vereenvoudigd: de schutkolk(-en) en (delen van) de voorhavens worden beschreven met een uniforme dichtheid en transporten tussen deze deelgebieden worden berekend op basis van deze dichtheden. Op de buitenranden van het beschreven gebied worden daarbij constante zoutgehaltes voorgeschreven.

Als invoer voor de berekeningen met WANDA-Locks wordt gebruik gemaakt van de simulaties zoals eerder uitgevoerd door PMSS, zie [19] en [20]. Hiertoe is door PMSS een aantal simulaties opnieuw gedraaid om aanvullende uitvoer te genereren. De uitvoer van de berekeningen met WANDA-Locks geeft een nieuwe schatting voor de zoutindringing, waarbij in detail rekening is gehouden met de te verwachten operatie van de sluis.

De uitvoer van de WANDA-Locks berekeningen is even gedetailleerd als de invoer en geeft (o.a.) voor elke schutting het debiet van zout water vanuit de schutkolk richting het Noodzeekanaal. Deze debieten zijn vervolgens bruikbaar als gedetailleerde invoer voor de berekeningen met Delft3D voor de verspreiding van het zout in het Noordzeekanaal en richting het Amsterdam-Rijnkanaal.

Een volledige beschrijving van de werkzaamheden is opgenomen in Bijlage K. In dit hoofdstuk worden de hoofdlijnen toegelicht. In Paragraaf 7.2 wordt de uitvoer van de simulaties door PMSS kort geanalyseerd, alvorens ze worden gebruikt in berekeningen met WANDA-Locks. In Paragraaf 7.3 wordt het WANDA-Locks model beschreven en wordt de validatie ervan behandeld. Vervolgens worden in Paragraaf 7.4 de resultaten (zoutindringing) voor de verschillende situaties behandeld en vergeleken met eerdere schattingen.

Het model WANDA-Locks is ontwikkeld in het kader van projecten gericht op het beperken van de zoutindringing door sluizen. Als de modellen eenmaal zijn opgezet is een beperkte inspanning voldoende om de effectiviteit van maatregelen zoals bijv. bellenschermen te verkennen. Hetzelfde geldt voor operationele maatregelen in de zin van het beperken van de

deur-opentijden. Dit wordt gepresenteerd in Paragraaf 7.5. In die paragraaf is ook een eerste verkenning opgenomen naar het effect van de selectieve onttrekking op het zouttransport richting het Noordzeekanaal.

In de berekeningen worden (opnieuw) de volgende toestanden beschouwd:
- een validatie-case,
- de Autonome Ontwikkeling,
- de Inbedrijfstelling van de nieuwe sluis, met een aangenomen ladingstroom gelijk aan die van de Autonome Ontwikkeling,
- het Projectalternatief.

Voor de validatiecase is het jaar 2005 gekozen: hetzelfde jaar als waarvoor PMSS eerder haar simulaties heeft gevalideerd. Voor datzelfde jaar zijn ook de (daggemiddelde) afvoeren beschikbaar.

7.2 Eerste analyse schutfrequentie en deur-opentijden

De gemiddelde schutfrequenties in de verschillende toestanden zijn weergegeven in de Tabel 7.1 (Tabel 3.3 uit bijlage K). Deze schutfrequenties sluiten goed aan op de getallen zoals genoemd in Hoofdstuk 3 van dit rapport. De kleine verschillen zijn te wijten aan het feit dat nu een enkel jaar is gesimuleerd, terwijl in het voorgaande werk het gemiddelde van 10 berekeningen is gepresenteerd: per case zijn toen 10 simulaties zijn gedaan, met verschillende random-trekkingen voor het genereren van het scheepsaanbod.

Tabel 7.1 Lege schuttingen voor de Noordersluis of de Nieuwe Zeesluis voor de verschillende toestanden.

Noordersluis / Nieuwe Zeesluis	Schutfrequentie (S/d)	Lege schuttingen oostgaand (%)	Lege schuttingen westgaand (%)
2005 (57 MTPA)	12,71	29	27
Autonome Ontwikkeling (95 MTPA)	14,14	19	16
Inbedrijfstelling (95 MTPA)	15,58	26	22
Projectalternatief (125 MTPA)	13,82	18	16

In dezelfde tabel zijn ook de aantallen lege schuttingen gepresenteerd. De aantallen voor 2005 blijken zeer goed aan te sluiten bij recente registraties uit Pontis (zie voor details hierover Tabel 3.5).

Tabel 7.1 laat zien dat, als de bezetting op een bepaalde sluis toeneemt, het aantal lege schuttingen afneemt. Dat is begrijpelijk: er liggen vaker schepen te wachten aan de kant waar de sluis open gaat om een schip te laten uitvaren. Voor de schutfrequentie en de deur-opentijd is het verband iets minder eenvoudig. De getallen zijn weergegeven in de tabel hieronder.

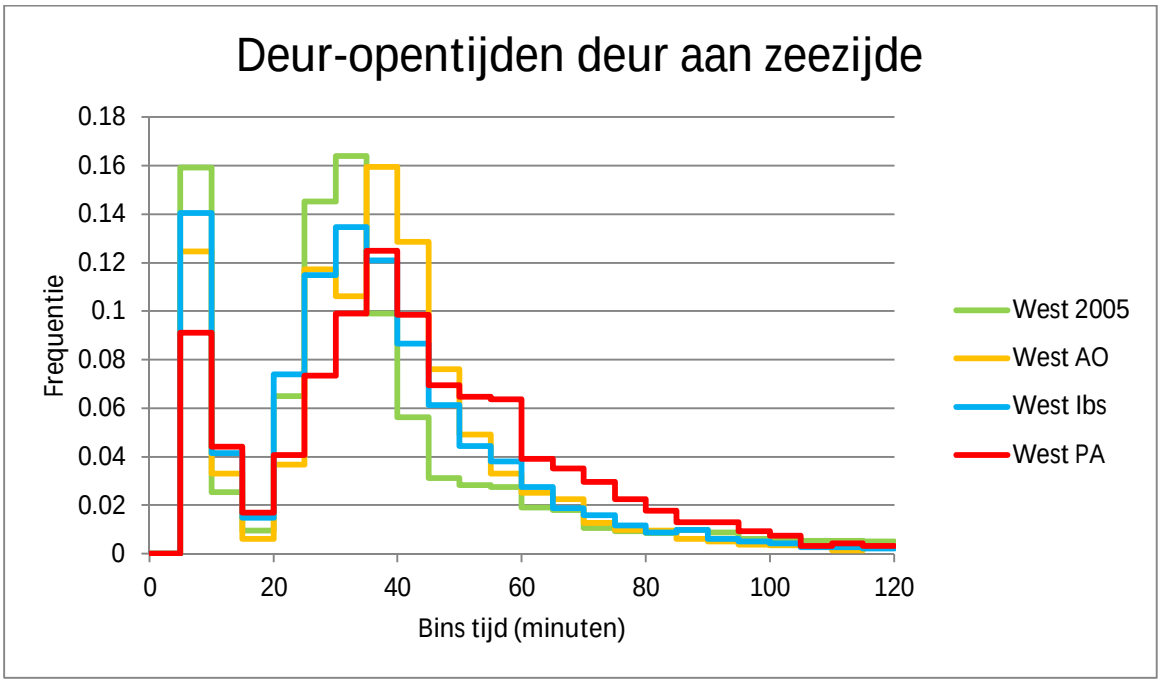
Tabel 7.2 Gemiddelde deur-opentijden in minuten

Sluis	2005	Autonome ontwikkeling	Inbedrijfstelling	Projectalternatief
Nieuwe Zeesluis			30,2	36,1
Noordersluis	40,6	34,9		
Middensluis	30,4	26,7	26,3	25,0
Zuidersluis	24,3	20,4	20,2	19,1

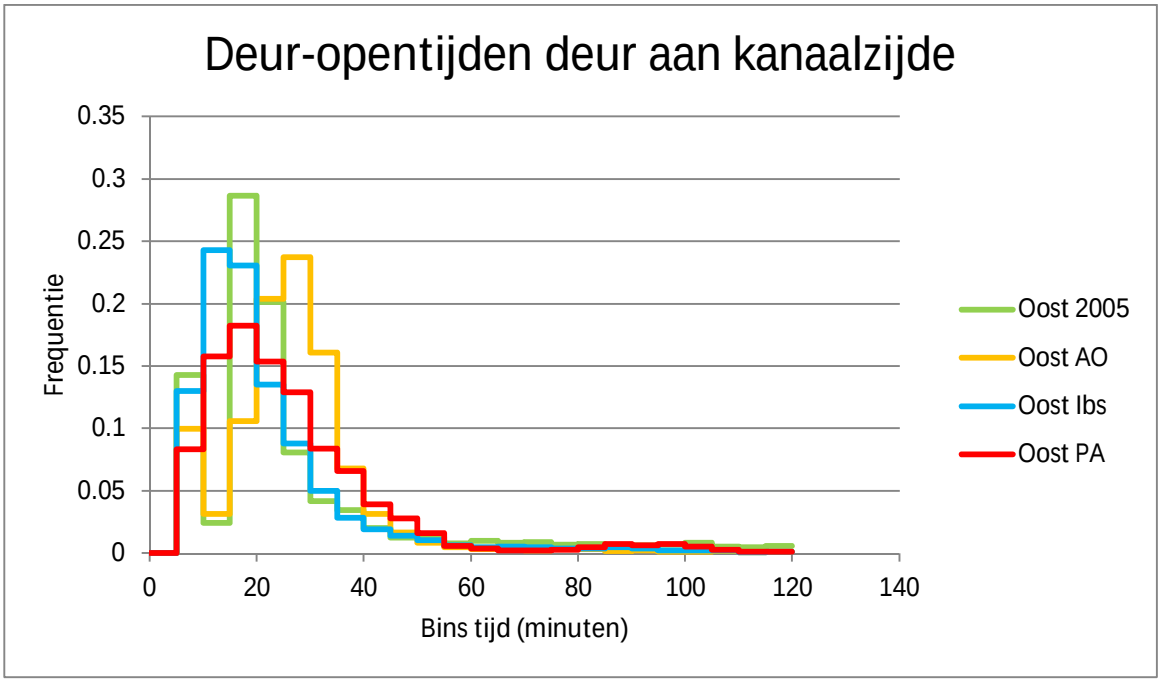
- Voor de Nieuwe Zeesluis geldt dat met het toenemen van de ladingstroom (van 95 MTPA bij Inbedrijfstelling naar 125 MTPA volgens het Projectalternatief) de schutfrequentie daalt en de deur-opentijd toeneemt. Dit hangt samen met een toename van het aantal schepen per schutting (zie Bijlage K), waardoor het invaren langer duurt.
- Voor de Noordersluis geldt dat met het toenemen van de ladingstroom (van 57 MTPA in 2005 naar 95 MTPA in de Autonome Ontwikkeling) de schutfrequentie toeneemt en de deur-opentijd afneemt. Kennelijk is de sluis in 2005 nog niet voortdurend in bedrijf en staat zo nu en dan de deur langer open dan nodig is voor in- en uitvaren.

De gemiddelde deur-opentijd voor het Projectalternatief, 36,1 minuut, komt weer goed overeen met de waarde die is geschat in Hoofdstuk 3 van dit rapport.

Nadere analyse van de deur-opentijden laat zien dat de gemiddelde waarden niet gelijk zijn voor beide sluishoofden. We kunnen nog verder inzoomen op deze data door de verdeling van de deur-opentijden te plotten. Deze zijn weergegeven in onderstaande figuren.



Figuur 7.1 Verdeling van de deur-opentijden aan de zeezijde van de Noordersluis of Nieuwe Zeesluis voor de verschillende toestanden (de breedte van de klassen is 5 minuten, de hoogte is als deel van het totaal).



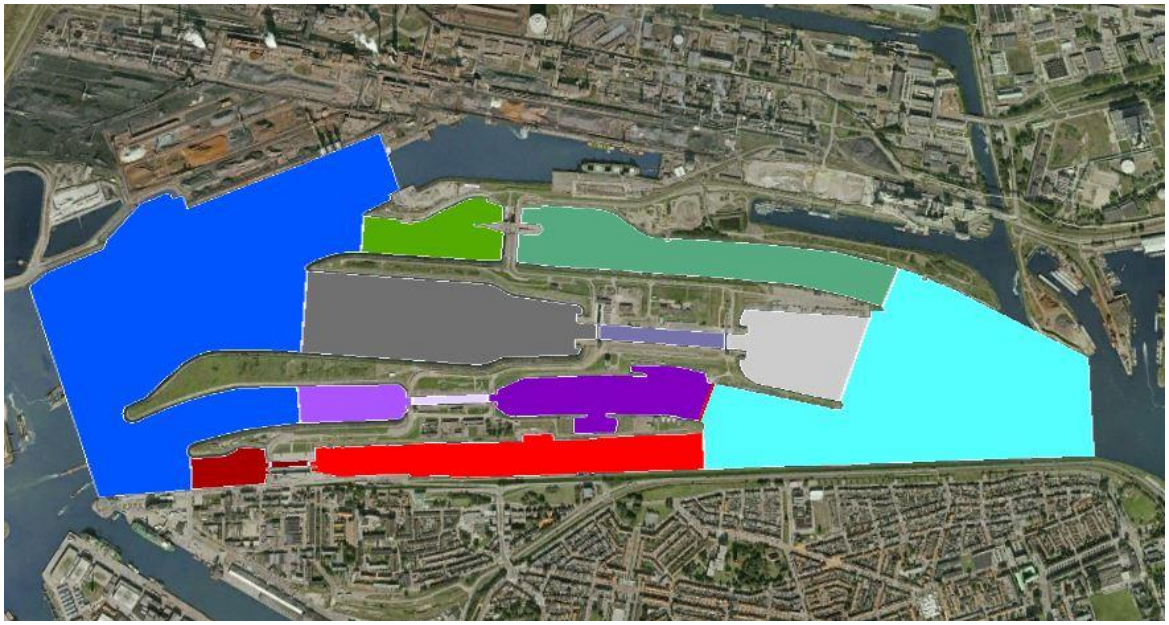
Figuur 7.2 Histogram van de deur-opentijden aan de kanaalzijde van de Noordersluis of Nieuwe Zeesluis voor de verschillende toestanden (de breedte van de klassen is 5 minuten, de hoogte is als deel van het totaal).

Aan de zeezijde is te zien dat er in alle situaties sprake is van een significant aantal schuttingen met een zeer korte deur-opentijd van schepen die vanaf de wachtplaatsen vertrekken. Voor schepen die van zee komen zijn de deur-opentijden aanzienlijk langer. Aan de kanaalzijde is er voor 2005 en de Autonome Ontwikkeling (toestanden met de huidige Noordersluis) wel sprake van twee pieken, maar voor de Nieuwe Zeesluis verdwijnt dit. Deze veranderingen kunnen (deels) worden toegeschreven aan de veranderde situaties aan de binnenzijde wat betreft wachtplaatsen in de modellering van de verkeersafwikkeling.

De precieze oorzaak van deze verschillen in de verdelingen is niet nader onderzocht. Er wordt van uitgegaan dat de modellering van de verkeersafwikkeling dit goed beschrijft. Relevant voor de zoutindringing is dat de verdelingen aangeven dat er sprake is van een grote spreiding in de deur-opentijden rondom de gemiddelde waarden, en dat deze anders is voor beide sluishoofden. Voor een significant deel van de schuttingen is de deur-opentijd bovendien veel korter dan de benodigde tijd voor een volledige kolk-uitwisseling. Dit alles bevestigt dat voor een juiste bepaling van de zoutindringing het gewenst is met deze variaties rekening te houden.

7.3 Opzet Wanda-Locks model en verificatie voor 2005

De schematisatie van het gebied dat wordt beschreven door WANDA-Locks is weergegeven in onderstaande Figuur 7.3.



Figuur 7.3 Schematisatie WANDA-Locks voor situatie 2005

De figuur toont de verschillende deelgebieden:

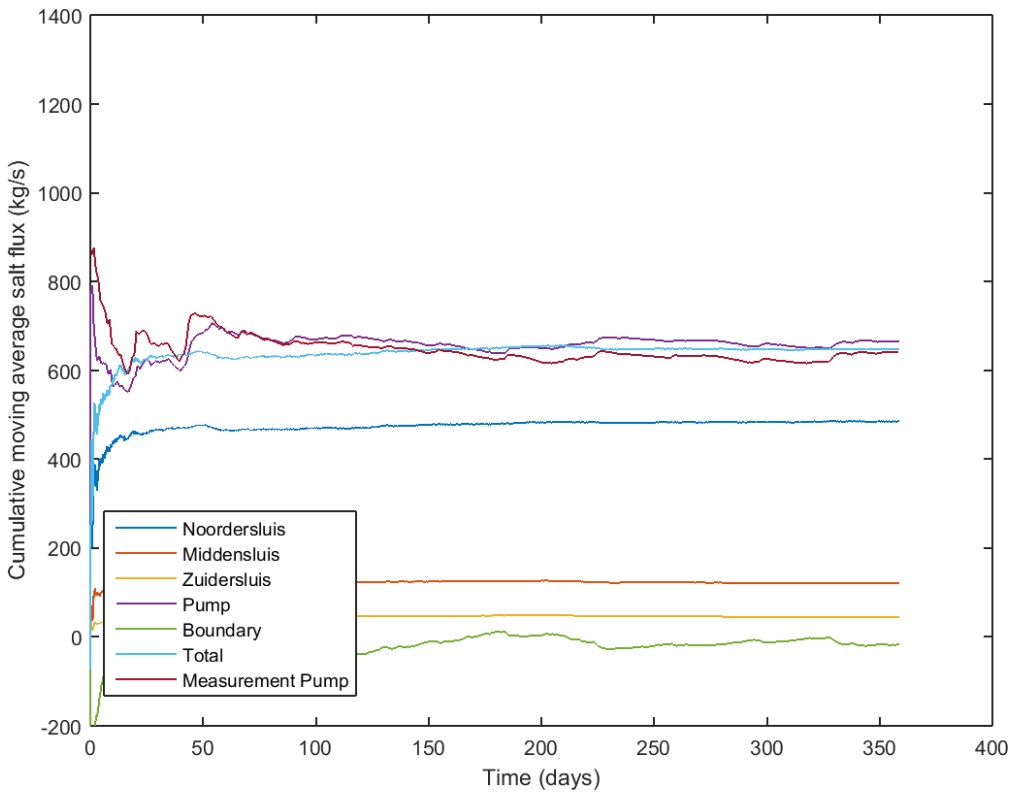
- in het midden van het gebied de verschillende sluizen (de Kleine Sluis is daarbij niet beschouwd omdat de bijdrage aan de zoutindringing verwaarloosbaar is);
- iedere sluis heeft aan weerskanten een eigen voorhaven;
- aan weerskanten zijn de verschillende voorhavens verbonden aan een gezamenlijk domein; deze vormen een overgang naar het gebied buiten het modelgebied waar (constante) zoutrandvoorwaarden zijn voorgeschreven

Merk op dat de indeling in deel-domeinen is gekozen om zoveel mogelijk rekening te houden met veranderingen in geometrie die optreden bij de overgangen tussen de verschillende toestanden. (Zie hiervoor de figuren in hoofdstuk 4 van Bijlage K).

Het model wordt aangestuurd met de volgende randvoorwaarden:

- voor de saliniteit buiten het beschreven gebied wordt uitgegaan van een constante waarde van 27 psu aan de zeezijde (nabij het Forteiland) en 7 psu aan de kanaalzijde (nabij de pont); deze waarden zijn afgeleid uit eerdere studies op dit punt [12];
- voor de waterstanden is aan de zeezijde gebruik gemaakt van een meting in de Buitenhaven. Aan de kanaalzijde is de waterstand constant gehouden op de streefwaarde van NAP -0,4 m;
- voor de spui- en pompdebieten zijn de daggemiddelde waarden gebruikt zoals die zijn bepaald uit metingen ter plaatse, gereduceerd met 80% conform de laatste inzichten (zie Bijlage H); omdat alleen de daggemiddelde waarden beschikbaar zijn, zijn deze debieten ook constant gedurende de dag opgelegd, en dus niet afhankelijk gemaakt van het getij; een controle-berekening heeft aangetoond dat dit toelaatbaar is;
- de operatie van de verschillende sluizen (het openen en sluiten van de deuren) is aangestuurd uit de simulaties door PMSS; WANDA-Locks brengt daarbij ook de debieten samenhangend met het nivelleren in rekening, en ook het volume van de schepen aanwezig in de kolk per schutting.

De resultaten van de berekening met WANDA-Locks voor 2005 zijn weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 7.4 Cumulatief voortschrijdend gemiddelde zoutflux voor case c008 voor 2005, randvoorwaarde zeezijde 27 psu en kanaalzijde 7 psu en het afvoerdebiet op 80% van de DONAR registratie (paars: gemodelleerde zoutflux t.g.v. afvoerdebiet; groen: zoutflux naar NZK; bruin: gemeten zoutflux t.g.v. afvoerdebiet).

Figuur 7.4 toont de cumulatief gemiddelde waarden van de verschillende zouttransporten. Hiermee worden variaties die het gevolg zijn van fluctuaties in schuttingen en afgevoerde debieten uitgesmeerd.

De zoutindringing door de drie sluizen is weergegeven in resp. geel, rood en donkerblauw, het totaal van deze drie in lichtblauw. Voor een evenwicht, aansluitend bij de aangenomen zoutgehaltes op de randen van het model, moet het zout dat binnenkomt, gemiddeld in de tijd, ook weer worden afgevoerd. De berekende afvoer van zout is weergegeven met een paarse lijn. Deze komt goed overeen met de gemeten afvoer van zout, bepaald uit de gemeten debieten en de gemeten zoutgehaltes in het Binnenspuikanaal, vergelijk Paragraaf 5.2.2.

Het saldo van de zoutindringing via de schutsluizen en de afvoer via het Spuikanaal wordt weergegeven in de groene lijn: deze beschrijft de zoutflux over de oostelijke modelrand: soms is er sprake van en netto zouttransport naar het kanaal door het dichtheidsverschil over deze rand, en soms is het netto transport de andere kant op door de afvoer van water van het kanaal richting zee. Gemiddeld genomen ligt deze kromme ongeveer op ‘nul’, waarmee de zoutbalans dus sluit bij de aangenomen zoutgehalten buiten het modelgebied.

We mogen dus concluderen dat de resultaten van WANDA-Locks zeer goed aansluiten bij de beschikbare gegevens. Dit geeft vertrouwen in de berekeningen voor de overige toestanden.

7.4 WANDA-Locks analyse van zoutlek overige 3 toestanden

Voor de drie te beschouwen toekomstige toestanden is de afvoer via het spuikanaal uit 2013 aangehouden. Daarmee sluiten deze berekeningen met WANDA-Locks aan op de te maken berekeningen met het Delft3D-model van het binnengebied.

Tabel 7.3 hieronder toont het overzicht van de berekende zoutfluxen voor de verschillende toestanden: de zoutindringing door de sluizen, de afvoer via het Spuikanaal en de netto zoutflux richting het Noordzeekanaal. Zoals in de vorige paragraaf al beschreven is in 2005 de netto zoutflux bijna gelijk aan nul, waarmee het systeem in evenwicht is. Voor de overige toestanden worden grotere waarden van deze netto zoutflux berekend.

Tabel 7.3 Zoutfluxen voor de verschillende toestanden.

Scenario	Zoutflux 2005 (kg/s)	Zoutflux AO (kg/s)	Zoutflux IBS (kg/s)	Zoutflux PA (kg/s)
Sluizen	648	728	1147	1121
Spuikanaal	665	548	582	584
Noordzeekanaal	-18	180	565	538

Een deel van deze toename wordt veroorzaakt door een kleinere afvoer van zout over het spuikanaal: dit geldt voor alle toekomstige toestanden ten opzichte van de berekening voor 2005. Dit moet worden toegeschreven aan het feit dat de afvoer in 2013 kleiner is dan in 2005 (2005 gemiddeld 77 m^3/s en in 2013 gemiddeld 63 m^3/s, na 20% reductie). In Hoofdstuk 5 is vastgesteld dat een afvoer van 68 m^3/s als ‘gemiddeld’ mag worden beschouwd. Kennelijk was de afvoer in 2005 groter dan gemiddeld en 2013 iets kleiner dan gemiddeld. Dit roept de vraag op of de validatie van WANDA-Locks voor 2005 ook stand houdt voor 2013. Dit kunnen we echter niet controleren: we hebben geen verkeersstroom voor 2013 (simulaties door PMSS), en ook geen aparte analyse van de zoutgehaltes voor de randvoorwaarden voor WANDA-Locks. Blijft over dat we de resultaten van WANDA-Locks voor de verschillende toestanden vooral onderling moeten vergelijken. Daarbij moeten we ook in het achterhoofd houden dat de berekeningen met WANDA-Locks als belangrijk doel hebben om uitvoer te genereren voor de Delft3D-berekeningen, en deze laatste moeten het uiteindelijke antwoord geven op de vragen van dit onderzoek.

Voor de toenamen van de zoutindringing door de schutsluizen laten de verschillende toestanden het volgende zien.

- Voor de Autonome Ontwikkeling neemt de ladingstroom toe van 57 MTPA naar 95 MTPA bij gelijk blijvende afmetingen van de sluis. Zoals eerder is vastgesteld neemt de schutfrequentie toe en neemt de deur-opentijd af. De berekening laat zien dat het effect van de grotere schutfrequentie domineert: de zoutindringing neemt toe.
- Bij de Inbedrijfstelling veranderen de afmetingen van de sluis, maar de ladingstroom blijft dezelfde. Ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling neemt de schutfrequentie nog verder toe, maar nemen de deur-opentijden iets af. In de verandering van de zoutindringing spelen de grotere afmetingen van de sluis een dominante rol: de zoutindringing neemt duidelijk toe.
- Bij de overgang naar het Projectalternatief neemt de ladingstroom toe van 95 MTPA naar 125 MTPA. De schutfrequentie neemt daardoor af en de deur-opentijd neemt toe, maar het netto effect daarvan is heel klein: de zoutindringing blijft nagenoeg gelijk.

In hun ordes van grootte sluiten deze uitkomsten goed aan bij de schattingen zoals afgeleid in Hoofdstuk 5, Paragraaf 5.2.2. Ook de toename van Autonome Ontwikkeling naar

Projectalternatief vertoont een goede overeenkomst. Waar er in Hoofdstuk 5 nog een aantal vragen bestonden over de uiteenlopende schattingen voor de zoutindringing, geeft WANDA-Locks nu een aantal antwoorden. In Bijlage K worden hiertoe een aantal aparte berekeningen gepresenteerd.

Er zijn aparte berekeningen gedaan waarin een volledige kolkuitwisseling wordt aangenomen. Dit leidt tot aanzienlijk hogere waarden voor de zoutindringing. Daaruit volgt dat het nauwkeurig bijhouden van de mate van kolk-uitwisseling, zoals dit gebeurt in WANDA-Locks, van waarde is voor een juiste schatting van de zoutindringing. Ook zijn er berekeningen gedaan met een continu gemiddeld schutbedrijf, dus ontdaan van alle variaties. Ook deze berekeningen leiden tot een hogere berekende waarde voor de zoutindringing dan wanneer de variaties wel worden meegenomen. Dit wordt toegeschreven aan de schuttingen met een korte deur-opentijd, die zorgen voor een beperkte kolk-uitwisseling wat doorwerkt in de schuttingen daarna. Deze beiden invloeden werden vooraf verwacht, en zijn nu aangetoond.

Naast deze twee aspecten blijkt nog iets anders van grote invloed, namelijk dat direct over de sluizen het dichtheidsverschil tussen kanaal- en zeezijde veel kleiner is dan het verschil dat volgt uit de aangenomen saliniteiten van 27 en 7 psu op de randen van het model. De gemiddelde waarden van de saliniteiten in de voorhavens aan beide kanten van Noordersluis c.q. Nieuwe Zeesluis zijn als volgt:

- 2005: 24,0 psu - 10,1 psu
- AO: 24,1 psu - 10,3 psu
- IBS: 23,2 psu - 11,2 psu
- PA: 23,2 psu - 11,1 psu

Dit verloop van de saliniteiten van het buitengebied naar de sluishoofden toe is reëel te verwachten, maar niet eerder concreet beschouwd. Het speelt wel een grote rol in de zoutindringing. Het ruimtelijke verloop van de saliniteit aan de kanaalzijde, van grote invloed op de balans tussen de zoutindringing door de sluizen en de afvoer via het spuikanaal, zal in Delft3D nauwkeuriger worden berekend.

7.5 Effecten van maatregelen waaronder bellenschermen

7.5.1 Beperken van de deur-opentijden

Als eerste is gekeken naar het te verwachten effect van het verkorten van de deur-opentijden. Om te bezien wat er potentieel aan winst gehaald kan worden is een (in operationele zin) vrij extreme situatie beschouwd, en wel als volgt: in situaties waarbij er tussen het uitvaren van de schepen en het invaren van het eerste schip veel tijd zit gaat de sluisdeur kort na het uitvaren tussentijds dicht. Kort voor het invaren (1 minuut, niet realistisch voor zeeschepen) is de deur dan weer helemaal open voor het invaren.

De hiermee te behalen beperking in de zoutflux door de sluizen en richting het kanaal blijkt meestal in de orde van 10 tot 20% te liggen, afhankelijk van de toestand en afhankelijk van welke fluxen je vergelijkt. De grootste reductie wordt gevonden voor de Inbedrijfstelling waarbij de netto zoutflux richting het kanaal afneemt van 565 kg/s naar 413 kg/s; een reductie met ca. 27%.

7.5.2 De inzet van bellenschermen

De inzet van bellenschermen is eerder onderzocht in Fase 1, zie [1]. De werking is gebaseerd op het vertragen van de kolkuitwisseling. De effectiviteit van een bellenscherm wordt uitgedrukt in een doorlaatfractie: een factor die de reductie aangeeft van de zoutflux in de kolkuitwisseling; de zoutflux in de situatie met bellenscherm ten opzichte van de situatie zonder bellenscherm. Deze factor hangt o.a. af van de hoeveelheid lucht die wordt gebruikt, en die hoeveelheid lucht bepaalt de compressor-capaciteit en opgenomen elektrisch vermogen en dus ook het energieverbruik.

In [1] is een eerste verkenning gedaan van deze mogelijkheid. Daarbij bleek toen dat een doorlaatfractie van 0,5 voldoende zou kunnen zijn om de verwachtte toename in zoutindringing teniet te doen. In de huidige studie zijn berekeningen gedaan voor zowel een doorlaatfractie van 0,5 als voor 0,25. Deze lage waarde is, naar de huidige inzichten, de laagst haalbare waarde voor de doorlaatfractie van bellenschermen. De resultaten worden getoond in onderstaande tabel.

Tabel 7.4 Zoutfluxen voor de verschillende toestanden bij inzet bellenschermen.

	Zoutflux IBS doorlaat-fractie 0,25 (kg/s)	**Zoutflux IBS doorlaat-fractie 0,5 (kg/s)**	**Zoutflux PA doorlaat-fractie 0,25 (kg/s)**	**Zoutflux PA doorlaat-fractie 0,5 (kg/s)**
Sluizen	517	795	543	833
Spuikanaal	518	548	521	552
Noordzeekanaal	-1,5	247	22	281

Uit de tabel blijkt dat met een lage doorlaatfractie (0,25) de toename van de zoutflux naar het Noordzeekanaal geheel kan worden teruggedrongen, waarmee de situatie met de Nieuwe Zeesluis even goed is als de situatie in 2005 (nog afgezien van een verschil in afvoer). Bij een hogere doorlaatfractie van 0,5 is er nog wel sprake van een zoutflux naar het Noordzeekanaal. Deze is weliswaar kleiner dan zonder de bellenschermen, maar toch nog groter dan de zoutflux in de Autonome Ontwikkeling, waarvoor 180 kg/s is berekend. De berekeningen bevestigen dus dat de inzet van bellenschermen een oplossing kan zijn voor het voorkomen van een toename van de zoutindringing. De doorlaatfractie moet daarbij tussen 0,5 en 0,25 in zitten. De eerder afgegeven schatting [1] van het te installeren vermogen en energieverbruik (resp. 1,1 MW en 5,5 miljoen kWh per jaar) was gebaseerd op een doorlaatfractie van 0,5. Een lagere doorlaatfractie zal het energieverbruik laten stijgen, maar hier tegenover staan kortere deur-opentijden. Op basis van de gemiddelde compressorvermogens gegeven in Bijlage K is het energieverbruik naar verwachting ongeveer 4 – 6 miljoen kWh per jaar.

Het is daarbij van belang om op te merken dat er voor een sluis met deze afmetingen, met name de waterdiepte, slechts beperkte informatie is over de relatie tussen het luchtdebiet en de doorlaatfractie. Bij het uitwerken van een dergelijke installatie zal dit nader aandacht behoeven om te komen tot een effectieve en (in relatieve zin) energiezuinige oplossing.

7.5.3 Bellenschermen in combinatie met het beperken van de deur-opentijden

Zoals gezegd, een bellenscherm vertraagt de kolk-uitwisseling. Het verkorten van de deur-opentijd kan daarmee extra effectief worden. (Tevens zorgt dit voor een beperking van het energiegebruik: als de deuren dicht zijn, hoeven de compressoren niet te draaien.) Er zijn

daarom ook berekeningen gedaan voor de combinatie van de inzet van bellenschermen en het verkorten van de deur-opentijden. Dit laatste is op dezelfde manier toegepast als beschreven in paragraaf 7.5.1.

Tabel 7.5 Zoutfluxen voor de verschillende toestanden bij inzet bellenschermen en verkorten deur-opentijden.

	Zoutflux IBS doorlaat-fractie 0,25 (kg/s)	**Zoutflux IBS doorlaat-fractie 0,5 (kg/s)**	**Zoutflux PA doorlaat-fractie 0,25 (kg/s)**	**Zoutflux PA doorlaat-fractie 0,5 (kg/s)**
Sluizen	415	618	448	670
Spuikanaal	506	529	510	535
Noordzeekanaal	-91	88	-62	135

Uit de tabel blijkt dat door het combineren van maatregelen de zoutflux significant verder wordt gereduceerd. Ook bij een doorlaatfractie van 0,5 zijn de zoutfluxen richting het kanaal nu kleiner dan bij de Autonome ontwikkeling, zijnde 180 kg/s. Dit geeft aan dat de (nader uit te werken) reëel haalbare beperking van de deur-opentijden (hier is deze voor zeeschepen te scherp ingestoken) mede bepaalt welke doorlaatfractie nodig is, welk vermogen moet worden geïnstalleerd, en welk jaarlijks energieverbruik mag worden verwacht.

7.5.4 Eerste verkenning inzet selectieve onttrekking

Tenslotte is een verkennende berekening gedaan waarin rekening is gehouden met een selectieve onttrekking. De werking van de selectieve onttrekking is gebaseerd op het feit dat in de binnenvoorhaven er in de diepere lagen een hoger zoutgehalte aanwezig is dan in de hogere lagen en middels de selectieve onttrekking wordt geprobeerd zoveel mogelijk dit hogere zoutgehalte af te voeren. WANDA-Locks werkt alleen met uniforme saliniteiten / dichtheden, dus heeft geen inzicht in deze gelaagdheid. Voor de verkennende berekening is daarom een vereenvoudigde aanname gedaan, namelijk dat middels de selectieve onttrekking een factor 1,5 meer zout wordt afgevoerd dan volgt uit de concentratie in het meest oostelijke deeldomein van de schematisatie in WANDA-Locks: de saliniteit in het spuikanaal wordt daarmee (gemiddeld over de berekening) 13,1 psu, in plaats van 8,75 in 2005, 8,84 bij de Autonome Ontwikkeling, 9,39 bij de Inbedrijfstelling en 9,34 in het Projectalternatief. (Nogmaals: deze zoutgehaltes zijn mede bepaald door de randvooraarde van 7 psu die is voorgeschreven net buiten het modelgebied.) De resultaten van deze berekening staan in onderstaande tabel.

Tabel 7.6 Zoutflux door de sluizen en het spuikanaal zonder en met selectieve onttrekking.

	Schuttingen per jaar	**WANDA zoutflux (kg/s)**	**WANDA zoutflux met selectieve onttrekking (kg/s)**
Nieuwe Zeesluis	5684	952	989
Middensluis	7253	124	129
Zuidersluis	10234	47	48
Totaal		1123	1166
Afvoer spuikanaal		580	830
Noordzeekanaal		542	336

De tabel laat zien dat de netto zoutflux afneemt, maar nog onvoldoende om te komen op het niveau van 180 kg/s zoals bepaald voor de Autonome Ontwikkeling. Wat ook blijkt is dat de zoutflux door de sluizen toeneemt. Dit heeft er mee te maken dat de saliniteiten aan de kanaalzijde iets lager wordt, waarmee de kolkuitwisseling sterker wordt.
Voor alle situaties is de verspreiding van het zout afkomstig uit de sluizen van groot belang. Dit geldt zowel voor de horizontale dimensies (hoe snel trekt het zout richting het kanaal) als voor de verticale dimensies (hoe ziet de gelaagdheid er uit). Dit laatste is weer van groot belang voor het zoutgehalte in het water dat wordt afgevoerd door de Selectieve Onttrekking. Om dit goed in rekening te brengen is, zeker voor de Selectieve Ontrekking, een berekening met Delft3D noodzakelijk.

8 Onderzoek prestaties selectieve onttrekking met Delft3D

8.1 Algemeen

De prestaties van een selectieve onttrekking bij IJmuiden zijn mede afhankelijk van de effecten van selectieve onttrekking op de zoutdynamica in het systeem van het NZK en het ARK. Om de prestaties van selectieve onttrekking en effecten op het NZK en het ARK te onderzoeken is gebruik gemaakt van Delft3D-FLOW. Daarbij is uitgegaan van de modeldefinities en scenario's die Arcadis in het verleden heeft opgesteld bij het onderzoek naar de zoutindringing ten gevolge van de Nieuwe Sluis voor o.a. de MER.

Op basis van het schetsontwerp voor de selectieve onttrekking in de toegang tot het Binnenspuikanaal (Bijlage F) is de selectieve onttrekking eerder al op schematische wijze in het Delft3D model ingebracht, zie Paragraaf 6.2. De bruikbaarheid van deze schematisatie voor de nieuwe berekeningen is verder onderzocht aan de hand van tweedimensionale verticale (2DV) berekeningen voor geschematiseerde geometrieën en condities in Delft3D en CFD.

Vervolgens is als een eerste stap de selectieve onttrekking geïntroduceerd in de bestaande Delft3D berekeningen voor het Projectalternatief zoals gebruikt in de MER-rapportage [15]. Het betreft twee scenario's, een extreem droge zomerperiode van 2 weken en een periode van 3 maanden met meer gemiddelde afvoeren. Voornamelijk vanwege de cyclische schematisatie van de zoutlek en (in Scenario 3) van de afvoerdebieten leverden deze simulaties slechts een beperkt inzicht op in de prestaties van de selectieve onttrekking.

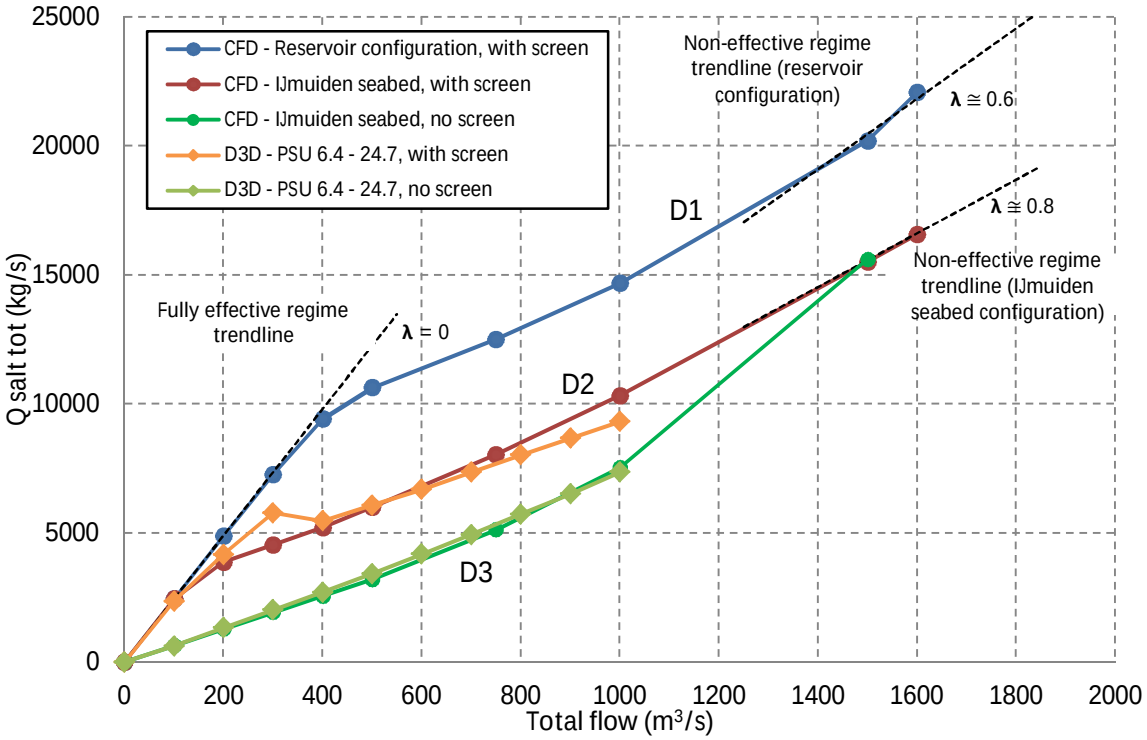
Voor een beter inzicht zijn meer realistische scenario's met een in de tijd variërende afvoer en zoutlek gehanteerd. Het betreft de periode van januari t/m juni 2013 met gemiddelde afvoeren, aangevuld met twee droge zomerperioden van 2 weken met relatief lage afvoeren in het ARK en bij IJmuiden. De berekeningen voor deze scenario's worden aangestuurd met verbeterde zoutlekrandvoorwaarden bij IJmuiden op basis van WANDA-Locks en variabele schutfrequenties en deur-opentijden uit de nieuwe PMSS scheepvaartsimulaties. Uitgaande van de aard van de scenario's en de onzekerheid in de modellering van de selectieve onttrekking in Delft3D zijn tenslotte meer generieke conclusies aan de berekeningsresultaten van de scenario's verbonden.

8.2 Weergave selectieve onttrekking in Delft3D

In de eerste verkenning van de modellering van selectieve onttrekking in Delft3D-FLOW, zie Par. 6.2, is uitgaande van het voorlopige schetsontwerp (Bijlage F), de selectieve onttrekking gemodelleerd als een opening (spleet) met een breedte van 2 roostercellen en een vrijwel vaste hoogte van 4 sigma-lagen (veranderingen in het waterpeil zijn klein). Aangezien het model 20 equidistante lagen heeft en ter plaatse van de selectieve onttrekking 20 m diep is, zijn de afmetingen van de selectieve onttrekking in het Delft3D model ongeveer 130 m x 4 m (breedte maal hoogte van de spleet). Dit is ca. 8% breder dan het schetsontwerp. Op deze opening na is het Binnenspuikanaal verder afgesloten met 'dunne dammen'. Het 'trekken' van het zoutscherm (maximaal open zetten van de selectieve onttrekking) bij zeer hoge afvoeren is nog niet gemodelleerd. Voor de huidige berekeningen lijkt dat geen bezwaar, want de afvoerdebieten in de beschikbare scenario's zijn voldoende laag (< 500 m^3/s) hoewel een echte grenswaarde voor het trekken nog niet bekend is.

De werking van deze zoutschermschematisatie is voor een eenvoudig 2DV domein met vereenvoudigde zoutrandvoorwaarden onderbouwd door sigma-lagen berekeningen met Delft3D-FLOW te vergelijken met meer gedetailleerde CFD berekeningen, zie Bijlage J. De vergelijking is in Figuur 8.1 (Bijlage J, Figuur 5.1) weergegeven door de berekende zoutafvoer van beide modellen tegen elkaar uit te zetten voor de geometrie met zoutscherm (D2) en zonder zoutscherm (D3) als functie van het afvoerdebiet bij IJmuiden. Deze afvoerdebieten zijn bij IJmuiden meestal kleiner dan 500 m^3/s (maximum 760 m^3/s en 960 m^3/s in uitzonderlijke omstandigheden). De toename in zouttransport door selectieve onttrekking (D2 - D3) berekend door Delft3D sluit over het algemeen goed aan bij de CFD resultaten. Het grootste verschil bedraagt ca. 30% bij 300 m^3/s. De invloed van deze afwijking op het totale resultaat is beperkt omdat in meer dan 80% van de tijd de afvoer kleiner dan 200 m^3/s is. Hieruit volgt dat een dergelijke implementatie van een zoutscherm in een far-field Delft3D model bruikbaar is voor het onderzoek van de prestaties van selectieve onttrekking.

De weergave van het zouttransport door selectieve onttrekking is hier mee geverifieerd in het 2DV domein, maar 3D effecten zijn nog buiten beschouwing gebleven. Gegeven de vrij grove schematisering (2 cellen in de horizontaal) wordt daarom rekening gehouden met een nauwkeurigheidsmarge van 20% op het totale effect van de selectieve onttrekking. Voor een nauwkeuriger resultaat is o.a. meer horizontale resolutie nodig en dus ook een kleinere tijdstap. Dit is lastig te verenigen met de wens het hele systeem te kunnen doorrekenen. Daarom is de schematisatie van de selectieve onttrekking uit Paragraaf 6.2 gehandhaafd.



Figuur 8.1 Zouttransport berekend met CFD en Delft3D-FLOW (sigma-lagen) voor 2DV configuraties: D1: selectieve onttrekking met zoutvang (alleen CFD); D2: als in het schetsontwerp (zonder zoutvang); en D3: als D2 zonder zoutscherm.

De schematisatie van selectieve onttrekking is nog niet geverifieerd voor de weergave van stromingsverliezen (het verval over de selectieve onttrekking). Uit de simulatie in Paragraaf

6.2 volgt dat het berekende verval over de selectieve onttrekking in het algemeen kleiner is dan 0,1 m. Deze orde van grootte sluit goed aan bij de waarden genoemd in Paragraaf 5.3.1. Omdat de huidige simulaties vooral gericht zijn op de weergave van de effecten van selectieve onttrekking op het zouttransport, is dit aspect voorlopig verwaarloosd. Voor andere vraagstukken, bijv. het effect van de selectieve onttrekking op de spui- en maalcapaciteit, is een betere schatting van het verval nodig. Dit zal in een later stadium moeten worden bekeken.

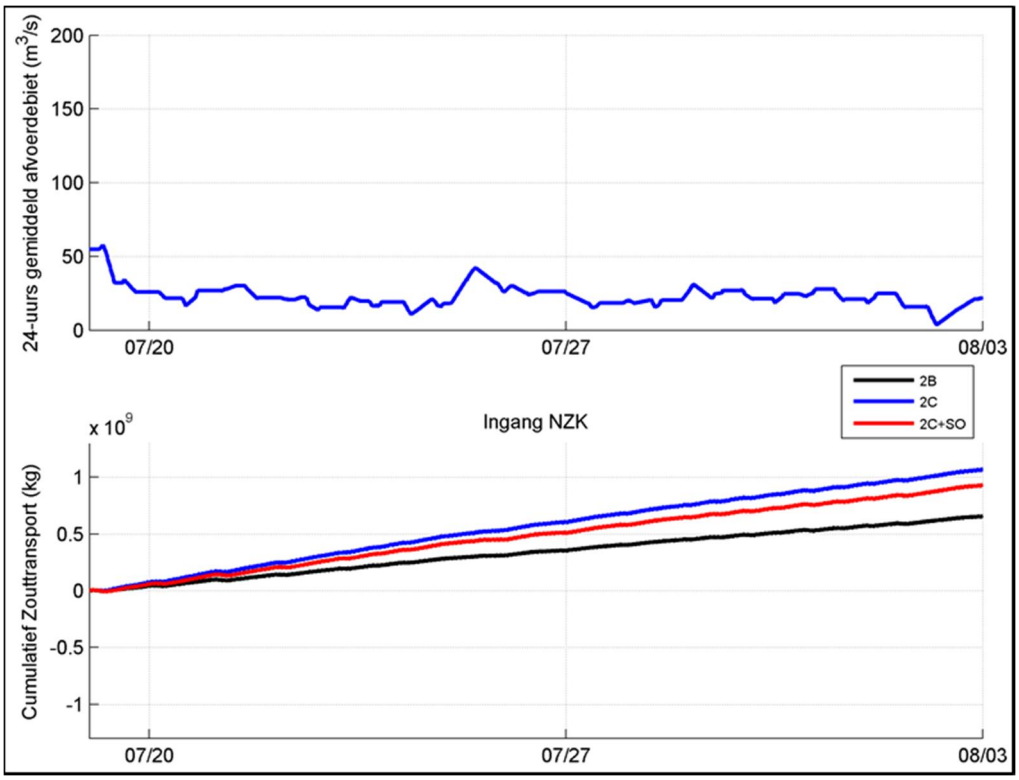
8.3 Scenario's uit de MER-rapportage

Vervolgens is de selectieve onttrekking geïntroduceerd in de Delft3D berekeningen voor het Projectalternatief die zijn gerapporteerd in de MER [15]. Deze berekeningen zijn gedaan voor twee scenario's: aangeduid met "Scenario 2" en "Scenario 3" in [13], zie ook Tabel 8.1. Scenario 2 bestaat uit een extreem droge zomerperiode van 2 weken met realistische debieten bij IJmuiden (gemiddeld 23 m^3/s) en een constant extreem laag debiet van 10 m^3/s bij Maarssen. Scenario 3 bestaat uit een periode van 3 maanden met gemiddelde afvoeren (IJmuiden 60 m^3/s, Maarssen 24,5 m^3/s). De afvoer bij IJmuiden bestaat uit afwisselend spuien en pompen in een cyclus van 12 uur. 3 uur spuien met 107 m^3/s wordt gevolgd door 9 uur pompen met 35 m^3/s, inclusief een correctie voor lek bij de spuisluizen. De randvoorwaarden voor de zoutlek bij de scheepvaartsluizen zijn door Arcadis schematisch opgezet op basis van de gemiddelde schutfrequentie per sluis en volledige uitwisseling per schutting. De uitwisseling vindt plaats via een dieptegemiddelde lozing van zout kolkwater op de Binnenvoorhaven, direct gevolgd door een dieptegemiddelde onttrekking. De duur van lozing en onttrekking is 30 minuten voor de Noordersluis cq. Nieuwe Sluis en 15 minuten voor de Middensluis en Zuidersluis. Het zoutgehalte van het kolkwater is constant aangenomen: 25 psu voor de Nieuwe Sluis/Noordersluis, 24.25 psu voor de Middensluis en 23.25 psu voor de Zuidersluis, zie [13]. In de berekeningen voor de toestand van het Projectalternatief en Selectieve Onttrekking zijn dezelfde initiële condities gebruikt als voor de toestanden van Autonome Ontwikkeling en het Projectalternatief.

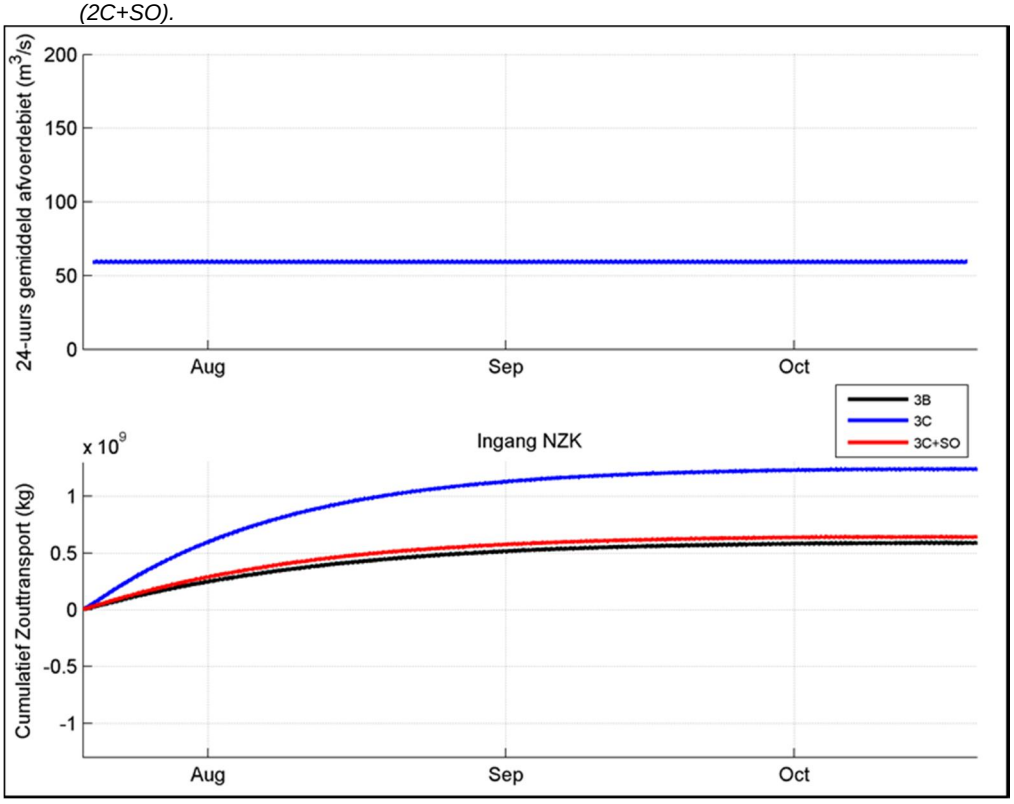
Tabel 8.1 Scenario's voor het onderzoek van de selectieve onttrekking uit de MER-rapportage [15].

Scenario	Periode	Gemiddeld Debiet IJmuiden (m^3/s)	Gemiddeld Debiet Maarssen (m^3/s)	[13] Tabel 1-1
Gemiddeld	19 jul-20 oct 2003	60	24,5	Scenario 3
Extreem droog	19 jul-3 aug 2003	23	10	Scenario 2

De verandering in de tijd van de hoeveelheid zout in het systeem van het NZK en ARK, exclusief de Velserkom, wordt weergegeven door het verloop van het cumulatieve zouttransport in de mond van het NZK (op ca. 3 km vanaf de Zuidersluis). Dit is het netto effect van de grote in- en uitvoerposten voor zout door de scheepvaartsluizen en het spui- en maalcomplex, inclusief eventueel selectieve onttrekking, waarbij transport richting het NZK positief is gedefinieerd. De effecten van de selectieve onttrekking op het systeem van het NZK en ARK zijn nu te bepalen door per scenario de berekende cumulatieve zouttransporten in de mond van het NZK van de verschillende toestanden te vergelijken, zie Figuur 8.2 voor Scenario 2 en Figuur 8.3Figuur 8.6 voor Scenario 3 (Bijlage L, Figuur 2.6, en 2.7 resp.).



Figuur 8.2 Scenario 2, daggemiddeld afvoerdebiet (boven) en cumulatief zouttransport richting NZK (onder) voor Autonome Ontwikkeling (2B), Projectalternatief (2C) en Projectalternatief met selectieve onttrekking (2C+SO).



Figuur 8.3 Scenario 3, daggemiddeld afvoerdebiet (boven) en cumulatief zouttransport richting NZK (onder) voor Autonome Ontwikkeling (3B), Projectalternatief (3C) en Projectalternatief met selectieve onttrekking (3C+SO).

Figuur 8.2 geeft voor het Scenario 2 een overzicht van het verloop in de tijd van het afvoerdebiet in IJmuiden en het cumulatieve zouttransport in de mond van het NZK voor de drie beschouwde toestanden: Autonome Ontwikkeling, Projectalternatief en Projectalternatief met Selectieve Onttrekking. Op 19 juli starten de berekeningen met dezelfde initiële conditie, d.w.z. met dezelfde hoeveelheid zout in het model. Gedurende de simulatie van 2 weken neemt voor alle toestanden het cumulatieve zouttransport toe, het sterkst voor het Projectalternatief. Voor de gegeven condities van zeer lage afvoeren (IJmuiden gemiddeld 23 m^3/s) reduceert de selectieve onttrekking het verschil met de Autonome Ontwikkeling met ongeveer een derde. Door de korte duur van de berekening wordt geen evenwicht bereikt.

Startend van een gelijke initiële conditie wordt in de langere simulatie met hogere afvoer van Scenario 3 na ca. anderhalve maand wel een evenwicht bereikt, zie Figuur 8.3. Gedurende de simulatie neemt voor alle toestanden het cumulatieve zouttransport toe, het sterkst voor het Projectalternatief. Bij een afvoer van 60 m^3/s bij IJmuiden is de selectieve onttrekking in staat om vrijwel de gehele extra zoutlast van het Projectalternatief te mitigeren.

Samenvattend, reduceert de selectieve onttrekking in Scenario 2 het extra zouttransport naar het NZK in het Projectalternatief ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling bij extreem lage afvoeren (23 m^3/s bij IJmuiden) slechts met ongeveer een derde en zorgt de selectieve onttrekking in Scenario 3 bij een afvoer van 60 m^3/s bij IJmuiden voor een forse daling van de zoutlast naar het NZK, zodat deze slechts een fractie hoger is dan bij de Autonome Ontwikkeling. Met name dit laatste is een bemoedigend resultaat.

Deze berekeningen kennen echter wel een aantal serieuze beperkingen. Zo worden de uitwisselingsstromen bij de scheepvaartsluizen niet realistisch weergeven, wat van invloed kan zijn op de werking van de selectieve onttrekking die voor de Nieuwe Sluis op ongeveer 500 m van deze randvoorwaarden ligt.

Ook is er voor de beoordeling van de effectiviteit van selectieve onttrekking behoefte aan een meer realistische variatie van de zoutlast (t.g.v. variabele deur-opentijden en schutfrequenties) en realistisch variërende afvoerdebieten over een wat langere periode om te kunnen beoordelen hoe selectieve onttrekking in de praktijk uitwerkt, zoals de veronderstelde bufferende werking van het NZK voor het zout. De berekeningen in de volgende paragraaf met verbeterde zoutlekrandvoorwaarden en scenario's met een meer realistische variatie van de afvoerdebieten bij IJmuiden voorzien hierin.

Verder bleek dat met name bij de korte simulatie de invloed van de initiële condities erg groot is. Door van dezelfde initiële conditie uit te gaan is in feite verondersteld dat bij aanvang van de simulaties de zoutgehaltes gelijk zijn, wat niet realistisch is. Ook hieraan zal aandacht worden besteed in de volgende paragraaf.

8.4 Berekeningen met verbeterd NZK en ARK model

Als meer realistische scenario's met in de tijd variërende afvoeren zijn het Scenario januari t/m juni 2013 en de Scenario's 4 en 5 geselecteerd uit [13], zie Tabel 8.2. Het Scenario januari t/m juni 2013 wordt gekenmerkt door gemiddelde afvoercondities (70 m^3/s bij IJmuiden en 40 m^3/s bij Maarssen). De scenario's 4 en 5 representeren relatief droge perioden van 2 weken met gemiddeld resp. 35 en 29 m^3/s bij IJmuiden en 22 en 16 m^3/s bij Maarssen (equivalent aan het 10-precentiel en 2-percentiel weekgemiddelde debiet bij Weesp [13]). In de berekeningen voor Scenario januari t/m juni 2013 zijn dezelfde initiële condities gebruikt voor alle toestanden, omdat hiermee in een lange berekening kan worden

volstaan. Voor de berekeningen voor de Scenario's 4 en 5 is er voor gekozen de initiële condities te ontlenen aan de resultaten van de berekeningen van het Scenario januari t/m juni 2013. In dit geval verschilt de initiële conditie per toestand.

Tabel 8.2 Scenario's voor het onderzoek van de selectieve onttrekking, gedefinieerd in het overleg van 24 feb 2016.

Scenario	Periode	Gemiddeld Debiet IJmuiden (m^3/s)	Gemiddeld Debiet Maarssen (m^3/s)	[13] Tabel 1-1
Gemiddeld	1 jan-1 juli 2013	70	40	Validatie scenario
Droog	19 jul-3 aug 2003	35	22	Scenario 4
Extra droog	19 jul-3 aug 2003	29	16	Scenario 5

De zoutlekrandvoorwaarden bij de scheepvaartsluizen van IJmuiden zijn in het hydrodynamische model van het NZK en het ARK verbeterd door WANDA-Locks offline of online te koppelen met Delft3D-FLOW. De offline koppeling houdt in dat WANDA-Locks voorafgaand aan de Delft3D simulaties gedraaid is met de afvoerdebieten uit de Delft3D berekeningen, met de PMSS gegevens van de corresponderende periode (1e halfjaar, cq. 19 juli - 3 augustus voor de 2 weken van Scenario's 4 en 5) en met de zoutrandvoorwaarden van 7 en 27 psu voor resp. kanaalzijde en zeezijde uit de WANDA-Locks validatie. Op basis van de WANDA-Locks resultaten zijn de uitwisselingsdebieten in onder- en bovenlaag (simultaan) opgelegd aan het Delft3D model, met inbegrip van het inkomende zoutgehalte berekend door WANDA-Locks. De selectieve onttrekking is in WANDA-Locks geschematiseerd door aan te nemen dat daarmee 1,5x het zoutgehalte van de voorhaven wordt afgevoerd. Simulaties waarin andere keuzes zijn gemaakt voor de schematisatie van de selectieve onttrekking in WANDA-Locks toonden aan dat de netto zoutlast in Delft3D niet gevoelig is voor deze keuze. Verdere iteraties met WANDA-Locks op basis van het berekende zoutgehalte in het NZK bleken niet nodig in de offline aanpak.
Bij de online koppeling, die speciaal is opgezet voor deze studie, wordt het door Delft3D berekende zoutgehalte in de (binnen-) voorhavens wel gebruikt door WANDA-Locks om de zoutlasten voor de volgende tijdstap te berekenen. De resultaten van de berekeningen met de online koppeling kwamen echter pas in een laat stadium ter beschikking. Zij bevestigen de resultaten van de berekeningen met offline koppeling, zie Bijlage L.

Hoe de nieuwe zoutlekrandvoorwaarden zich verhouden tot de oude in termen van zoutlasten naar het NZK is lastig te bepalen. Van de PMSS validatieperiode (2005) is geen Delft3D Scenario beschikbaar, en van de Delft3D validatieperiode (januari - juli 2013) is geen PMSS simulatie beschikbaar. De enige mogelijkheid voor een vergelijking zijn de Scenario's 4 en 5 met de oorspronkelijke initiële condities zoals gehanteerd in [13]. Voor deze korte droge scenario's is het verschil dat de Autonome Ontwikkeling met WANDA-Locks zoutrandvoorwaarden een 16% lagere zoutlast door de scheepvaartsluizen berekend, en een 20% lagere zoutflux in de mond van het NZK, terwijl de sluisoperatie tijdens de simulatieperiode niet wezenlijk verschilt van het volledige jaar (gemiddelde schutfrequenties en gemiddelde deur-opentijden Noordersluis vrijwel gelijk). De verbetering van de zoutlekrandvoorwaarden tendeert in de korte berekeningen naar iets lagere zoutlasten. Voor het relatieve effect van selectieve onttrekking speelt dit overigens geen rol.

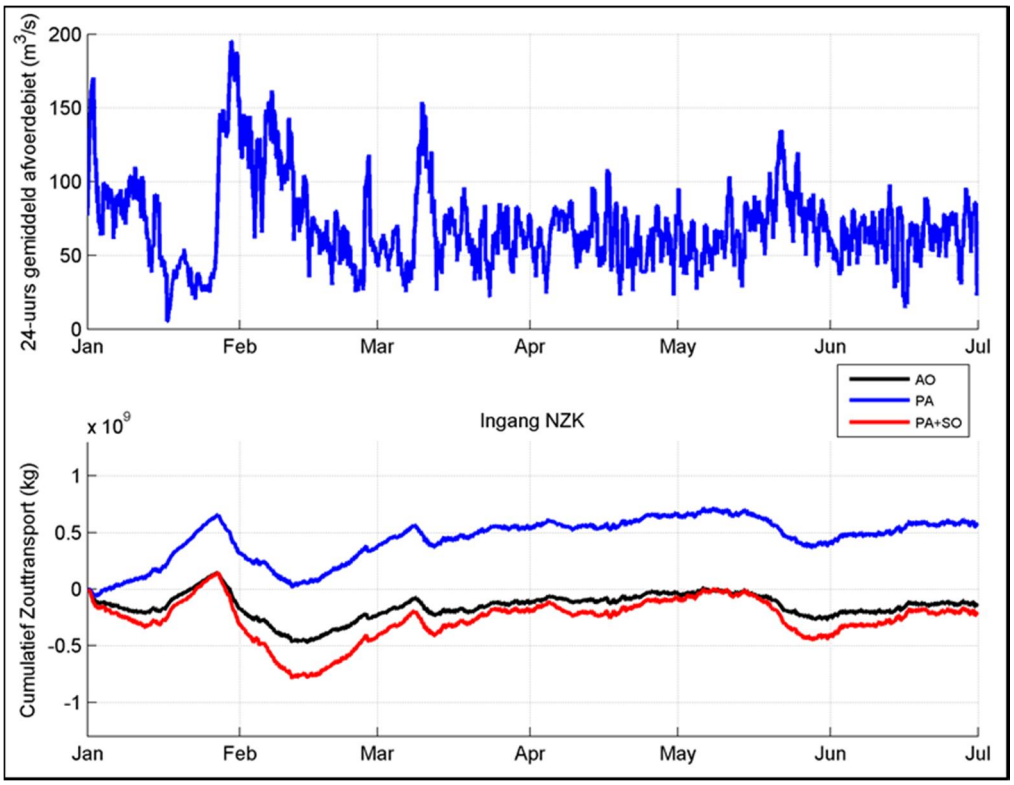
Voor de huidige berekeningen zijn de modeldefinities uit [13] gebruikt. Voor de weergave van de Nieuwe Zeesluis en de selectieve onttrekking is de modelschematisatie lokaal bij IJmuiden aangepast. De bodemgeometie in het overige deel van het model bleef ongewijzigd.

Opgemerkt wordt dat in [13] voor de simulaties van Autonome Ontwikkeling en Projectalternatief de drempel en het sluiseiland bij Zeeburg zijn verwijderd en de slibputten opgevuld. Dit is het geval in de Scenario's 4 en 5, maar niet in Scenario januari – juni 2013 Dat heeft met name gevolgen voor de (absolutie) zoutwaarden berekend in het ARK. Omdat het onderzoek van de selectieve onttrekking vooral gericht is op het relatieve effect van het Projectalternatief met selectieve onttrekking ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling is dit nu minder van belang.

In het volgende worden eerst de resultaten voor de Autonome Ontwikkeling (Noordersluis, lading stroom 95 MTPA), het Projectalternatief (Nieuwe Zeesluis, 125 MTPA) en het Projectalternatief met selectieve onttrekking besproken. Daarna komt de toestand van Ingebruikstelling (Nieuwe Zeesluis, 95 MTPA) en Ingebruikstelling met selectieve onttrekking aan de orde.

De vergelijking van de resultaten van de berekeningen voor het Projectalternatief met selectieve onttrekking, de Autonome Ontwikkeling en het Projectalternatief zonder selectieve onttrekking geeft inzicht in de effecten van de selectieve onttrekking op de zoutdynamica van het systeem van het NZK en het ARK. Het belangrijkste resultaat voor de beschouwde scenario's is het cumulatieve zouttransport in de mond van het NZK, zie Figuur 8.4, Figuur 8.5 en Figuur 8.6 (Bijlage L, Figuur 4.6, 4.9 en 4.10). Aanvullend is voor het Scenario januari – juni 2013 het verloop van het zoutgehalte bij de bodem in de monding van Zijkanaal C en bij Diemen in het ARK weergegeven, zie Figuur 8.7 en Figuur 8.8 (Bijlage L, Figuur 4.11 en 4.12). De verdeling van het zoutgehalte in langsrichting van het systeem is geïllustreerd in Figuur 8.9 en Figuur 8.10 (Bijlage L, Figuur 4.7 en 4.8).

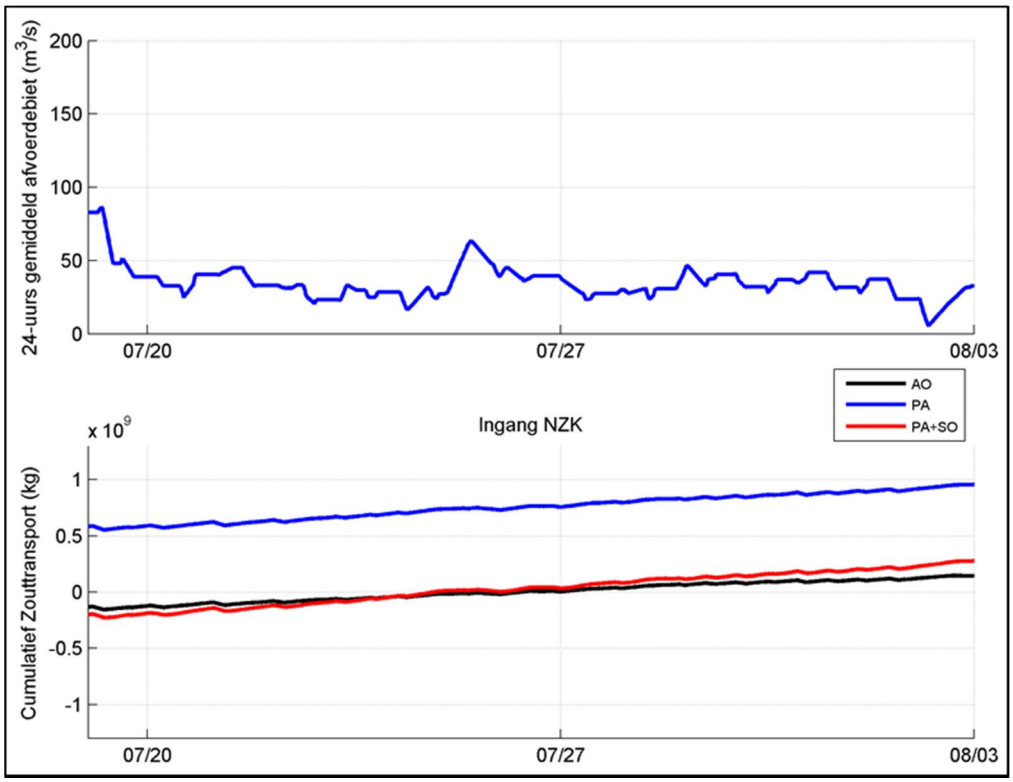
Figuur 8.4 geeft voor het Scenario januari – juni 2013 een overzicht van het verloop in de tijd van het afvoerdebiet in IJmuiden en het cumulatieve zouttransport in de mond van het NZK, voor de drie beschouwde toestanden. Op 1 januari zijn alle drie berekeningen met dezelfde initiële conditie gestart, d.w.z. met dezelfde hoeveelheid zout in het model. Uit het verloop van de cumulatieve zouttransporten in de mond van het NZK blijkt dat in de loop van 2 – 3 maanden elke berekening zijn eigen (dynamische) evenwicht vindt. Voor het Projectalternatief laat het oplopende cumulatieve zouttransport zien dat daarbij het zoutgehalte in het systeem toeneemt om evenwicht te kunnen bieden aan de (aanvankelijk) grotere zoutlek ten gevolge van de nieuwe zeesluis. Het cumulatieve zouttransport voor het Projectalternatief met selectieve onttrekking komt uit op een beduidend lager niveau dan het Projectalternatief zonder selectieve onttrekking, en gemiddeld zelfs lager dan de Autonome Ontwikkeling. De dynamica van het cumulatieve zouttransport lijkt voor het Projectalternatief met selectieve onttrekking iets groter dan bij de Autonome Ontwikkeling en het Projectalternatief zonder selectieve onttrekking. In de simulatieperiode komt het cumulatieve zouttransport van het Projectalternatief met selectieve onttrekking bij lage afvoer niet boven dat van de Autonome Ontwikkeling uit. De reden daarvoor is dat er in de voorafgaande perioden met hoge afvoer een buffer voor zout is opgebouwd. Voor andere periodes kan niet worden uitgesloten dat het cumulatieve zouttransport van het Projectalternatief met selectieve onttrekking wel boven dat van de Autonome Ontwikkeling uitkomt, bijvoorbeeld in de relatieve droge periode die aansluitend op deze simulatie volgt. Uit een nadere analyse van de resultaten voor het Projectalternatief met selectieve onttrekking volgt dat het cumulatieve zouttransport afneemt bij hoge debieten (> 65 +/-14 m^3/s), d.w.z. dat het NKZ en ARK verzoet, en dat bij lage debieten (< 65 +/-14 m^3/s) het cumulatieve zouttransport toeneemt, wat resulteert in een verzilting van het NZK en ARK. Het afvoerdebiet is in dat geval niet groot genoeg om via de selectieve onttrekking de extra zoutlast van het Projectalternatief ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling volledig af te voeren.



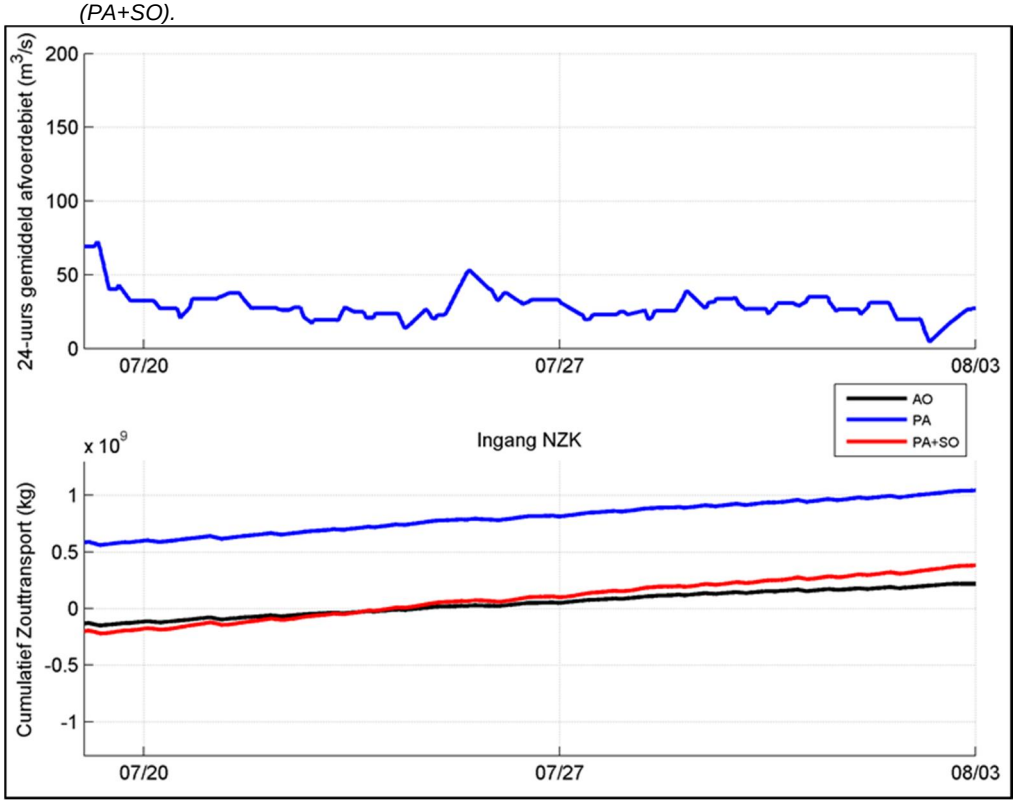
Figuur 8.4 Scenario januari-juni 2013, daggemiddeld afvoerdebiet (boven) en cumulatief zouttransport richting NZK (onder) voor Autonome Ontwikkeling (AO), Projectalternatief (PA) en Projectalternatief met selectieve onttrekking (PA+SO).

De bufferwerking zou kunnen worden benut door in perioden met voldoende water via het ARK een hoger debiet door het NZK te lozen. Uit het inspeelgedrag van het systeem voor zout (2-3 maanden inspeeltijd) kan worden afgeleid dat een aldus gecreëerde buffer een beperkte levensduur zal hebben.

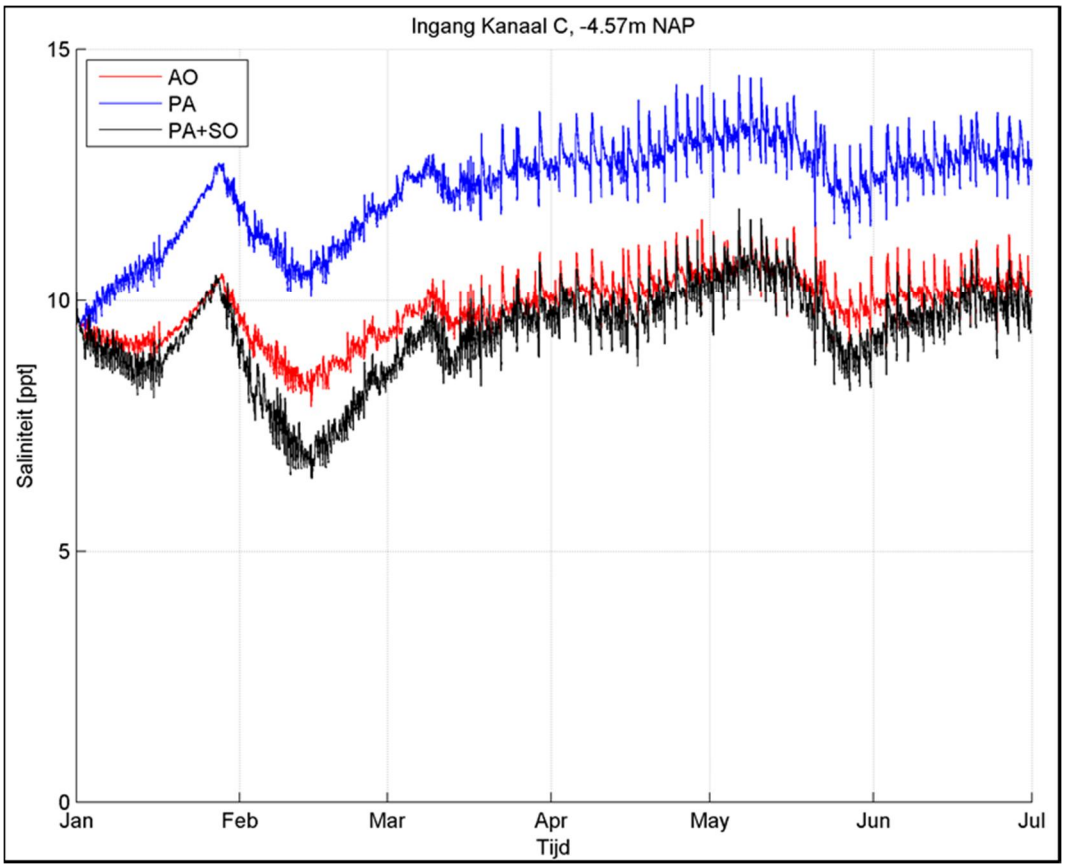
Figuur 8.5 en Figuur 8.6 geven eenzelfde overzicht voor de kortere series berekeningen behorende bij de Scenario's 4 en 5. In plaats van de oorspronkelijke tamelijk droge (zoute) en uniforme initiële conditie zijn deze berekeningen geïnitieerd met de meer gemiddelde initiële condities van 1 juli 2013 berekend in het Scenario januari – juni 2013. Het betreft dus voor elke toestand een ingespeelde initiële conditie, met verschillende hoeveelheiden zout in het systeem. Daarmee is ook rekening gehouden door het cumulatieve zouttransport te initialiseren op de waarde van 1 juli 2013. Hiermee wordt gesimuleerd wat er gebeurd als de periode van 1 januari –1 juli 2013 wordt opgevolgd met een droge periode van 2 weken. Bij aanvang van de simulatie is de zoutbuffer van het Projectalternatief met selectieve onttrekking echter bescheiden, vergeleken met bijvoorbeeld een maand eerder, zie Figuur 8.4. Uit de figuren voor Scenario's 4 en 5 blijkt wederom dat het cumulatieve zouttransport voor het Projectalternatief met selectieve onttrekking op een beduidend lager niveau uitkomt dan het Projectalternatief. Wel wordt ten gevolge van de extreem lage afvoeren van 35 en 29 m^3/s bij IJmuiden na resp. 6 tot 5 dagen het niveau van de Autonome Ontwikkeling enigszins overschreden. Figuur 8.4 laat zien dat een piek in het cumulatieve zouttransport gewoonlijk tijdelijk van aard is, en in een volgende nattere periode verdwijnt. Deze resultaten laten zien dat ook in relatief droge perioden selectieve onttrekking een goede bijdrage aan de zoutbeheersing kan leveren, meer dan op basis van het resultaat van Scenario 2 in Paragraaf 8.3 was vermoed.



Figuur 8.5 Scenario 4, daggemiddeld afvoerdebiet (boven) en cumulatief zouttransport richting NZK (onder) voor Autonome Ontwikkeling (AO), Projectalternatief (PA) en Projectalternatief met selectieve onttrekking (PA+SO).



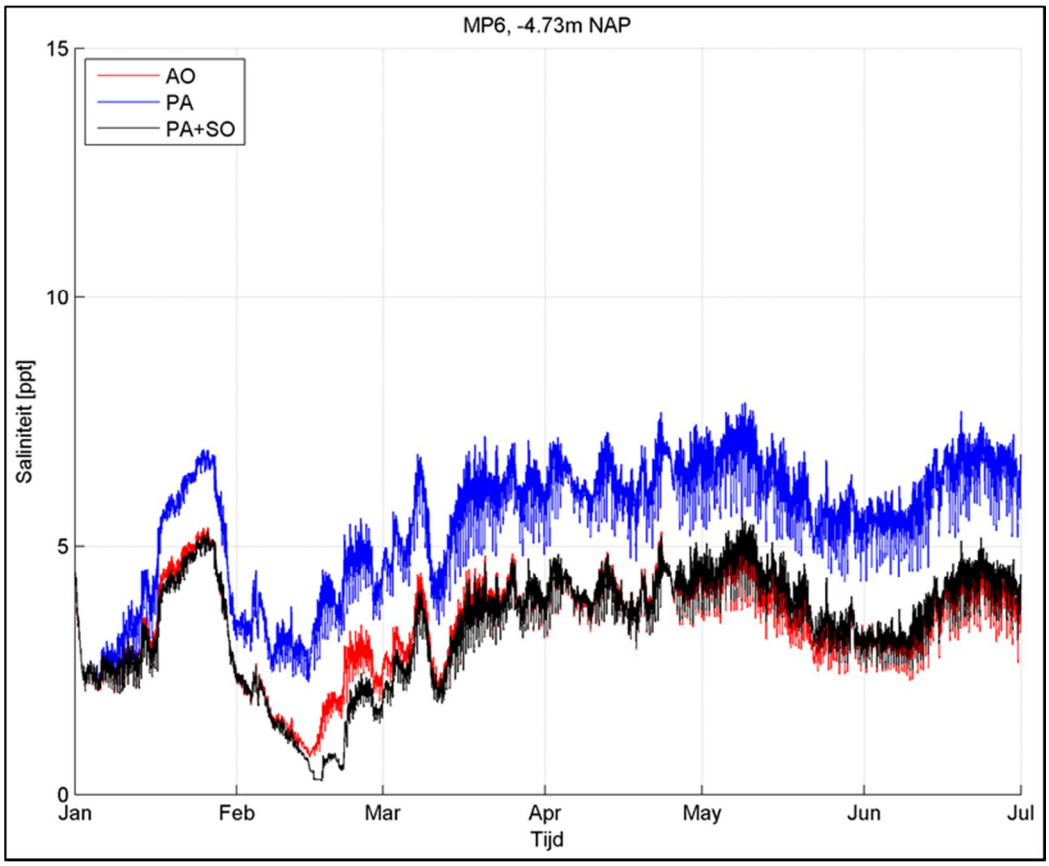
Figuur 8.6 Scenario 5, daggemiddeld afvoerdebiet (boven) en cumulatief zouttransport richting NZK (onder) voor Autonome Ontwikkeling (AO), Projectalternatief (PA) en Projectalternatief met selectieve onttrekking (PA+SO).



Figuur 8.7 Scenario januari-juni 2013, Zoutgehalte op NAP-4,57 m in station MP1 bij de bodem van de ingang van Zijkanaal C voor Autonome Ontwikkeling (AO), Projectalternatief (PA) en Projectalternatief met selectieve onttrekking (PA+SO).

Vervolgens is de vraag hoe de bovenstaande gunstige resultaten zich vertalen naar de meest kritieke locaties: de monding van Zijkanaal C (station MP1) en de mond van het ARK (station MP6 bij Diemen). Op deze locaties is het optredende zoutgehalte nabij de bodem het meest van belang. Het verloop van deze zoutgehaltes gedurende het Scenario januari-juni 2013 zijn weergegeven in Figuur 8.7 en Figuur 8.8. De grafieken vertonen dezelfde tendensen als die van de cumulatieve zouttransporten in de mond van het NZK. Opvallende aspecten zijn de fluctuaties in het zoutgehalte bij Zijkanaal C, waarschijnlijk veroorzaakt door de operatie van de scheepvaartsluizen, de spuisluizen en het gemaal, en de begrenzing van het minimum zoutgehalte bij Diemen tot 0,3 psu conform de zoutrandvoorwaarde in het ARK bij Maarssen.
Het verloop van het zoutgehalte voor de Autonome Ontwikkeling aan de bodem in Zijkanaal C is redelijk in overeenstemming met resultaat van de validatieberekening en de metingen gerapporteerd voor meetpunt MP1 op NAP-4,57m in [13]. De maximale waarde is ca. 11 psu voor de Autonome Ontwikkeling ten opzichte van bijna 10 psu in de validatieberekening en maximaal ca. 8 psu in de meting in [13].
Het zoutgehalte voor de Autonome Ontwikkeling aan de bodem in de mond van het ARK is over het algemeen hoger dan in de validatieberekening en de metingen voor meetpunt MP6 op NAP-4,73 m. [13]. De maximale waarde tussen 19 februari en 14 mei is ca. 5 psu voor de Autonome Ontwikkeling ten opzichte van 2 psu in de validatieberekening[9] en een enkel piekje

[9] *Het overdraaien van het toegeleverde model voor de validatieperiode leverde een maximum zoutgehalte van 3,8 psu in plaats van de gerapporteerde 2 psu.*

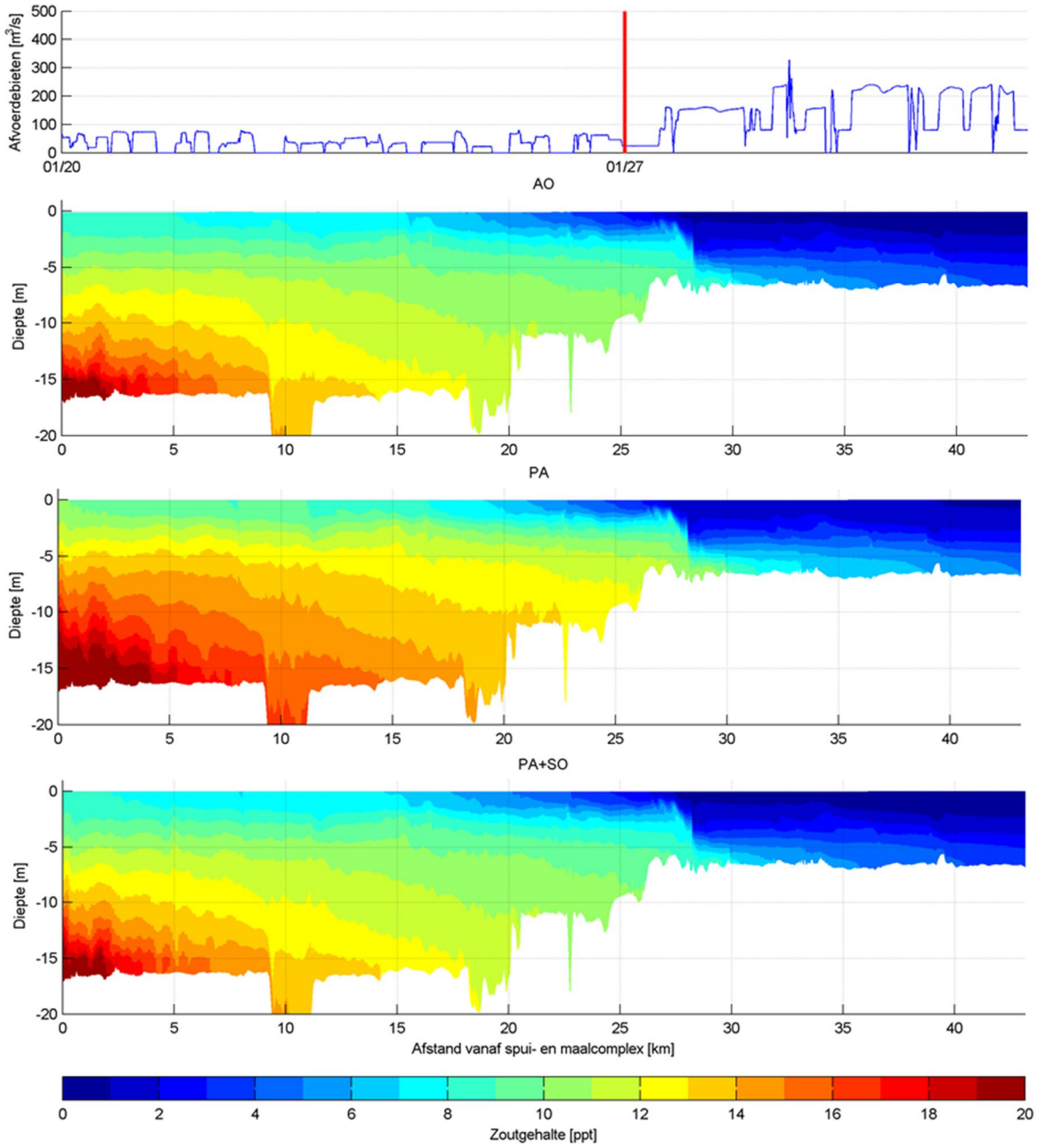


Figuur 8.8 Scenario januari-juni 2013, Zoutgehalte op NAP-4,73 in station MP6, bij de bodem nabij Diemen voor Autonome Ontwikkeling (AO), Projectalternatief (PA) en Projectalternatief met selectieve onttrekking (PA+SO)

van ca 2 psu in de meting, zie [13]. Dit is opvallend omdat in de huidige berekeningen de drempel en het sluiseiland Zeeburg de zoutindringing naar verwachting zouden beperken. Een mogelijke reden is de relatief hoge waterstand in het model (voorvloeiend uit de initiële conditie), waardoor de stroomsnelheden in het ARK vermoedelijk ongeveer 7% lager zijn en de zoutindringing minder wordt tegen gegaan.

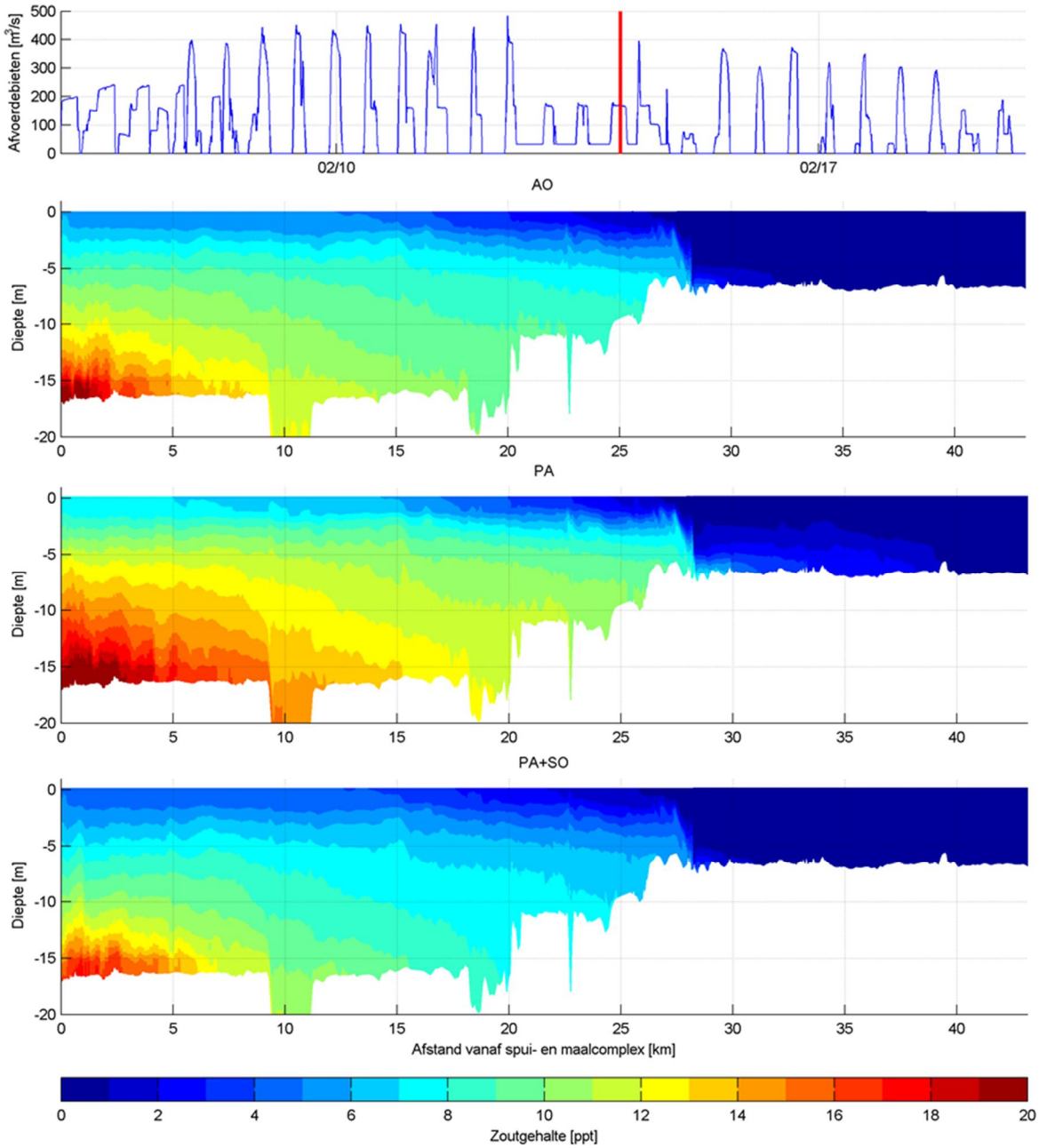
Figuur 8.9 en Figuur 8.10 laten de zoutverdeling zie over een langsraai door het model, van het midden van de Velserkom (0 km) tot ongeveer halverwege het ARK (43 km) voor de Autonome Ontwikkeling, het Projectalternatief en het Projectalternatief met selectieve onttrekking. Figuur 8.9 geeft de zoutverdeling op 27 januari 2013 00:00 op een moment van maximale zoutindringing aan het einde van een droge periode. Opvallend is de grote overeenkomst in ruimtelijke zoutverdeling tussen de Autonome Ontwikkeling en het Projectalternatief met selectieve onttrekking. Figuur 8.10 geeft de zoutverdeling op 14 februari 2013 03:00 als de zoutindringing een minimum vertoont na een periode met hoge afvoeren. Hier valt op dat het zoutgehalte bij het Projectalternatief met selectieve onttrekking over het hele domein lager is dan de Autonome Ontwikkeling, ook in de mond van het ARK.

Om te verkennen hoe de zoutlast naar het NZK zich ontwikkeld bij de ingebruikname van de Nieuwe Zeesluis, als de capaciteit daarvan niet volledig wordt benut, is gebruik gemaakt van gegevens van PMSS simulaties voor de nieuwe sluis met een ladingstroom van 95 MTPA.



Figuur 8.9 Scenario januari-juni 2013, Afvoerdebiet IJmuiden en Zoutgehalte in langsdoorsnede door NZK en ARK op 27 januari 2013 00:00 voor Autonome Ontwikkeling (AO), Projectalternatief (PA) en Projectalternatief met selectieve onttrekking (PA+SO).

Vermoedelijk wordt deze ladingstroom in 2019 nog niet gehaald, maar de resultaten voor deze toestand van Ingebruikstelling zullen een goede indicatie geven. Bijlage L geeft aan dat de berekende zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen tijdens de Ingebruiksstelling zeer vergelijkbaar is met het Projectalternatief. Dat het verschil in zoutlast relatief klein is in tegenstelling tot het verschil in ladingstroom kan verklaard worden door het feit dat tijdens de Ingebruiksstellingsfase minder schepen gebruik maken van de Nieuwe Sluis, maar dat hiervoor meer schuttingen nodig zijn dan in het Projectalternatief, zie Paragraaf 3.3. Omdat de gemiddelde deur-opentijd kleiner is (gemiddeld minder schepen per schutting) is de



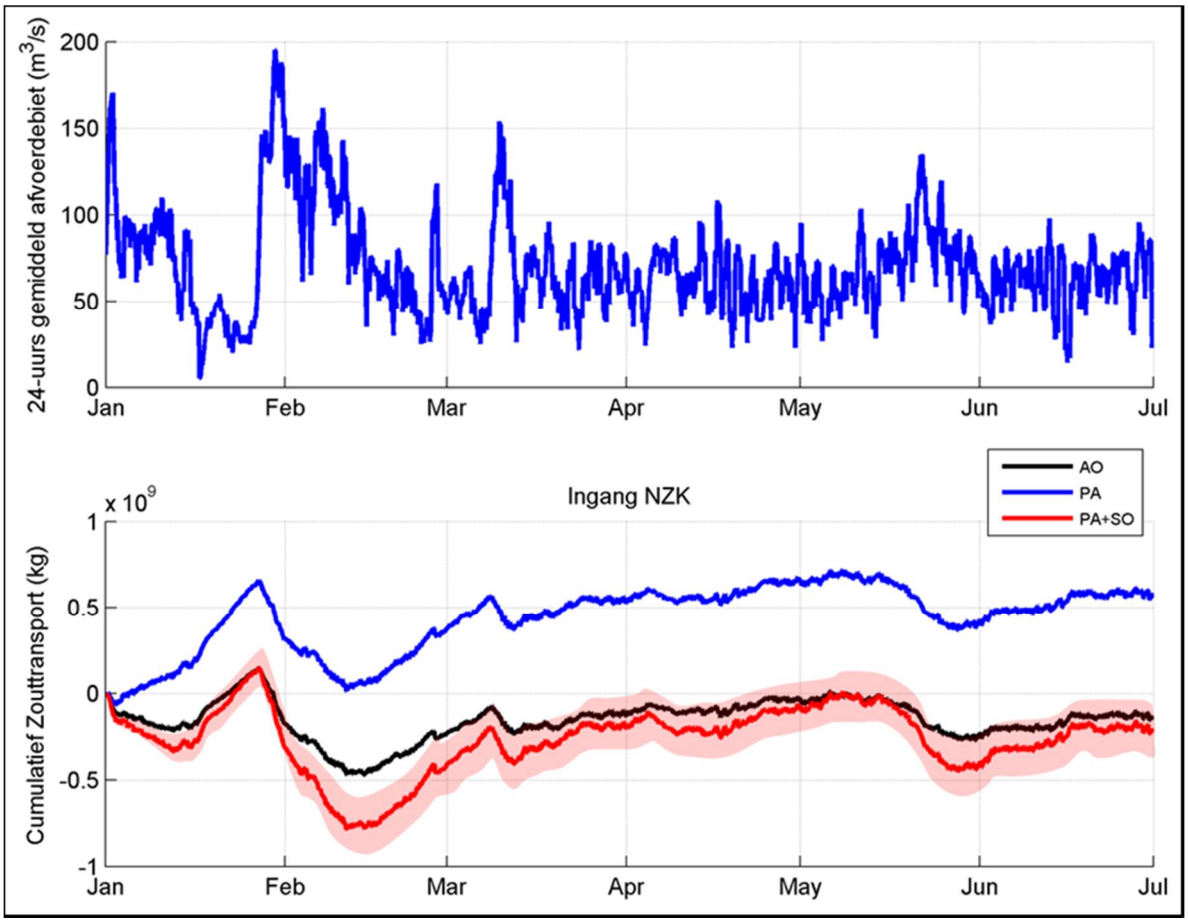
Figuur 8.10 Scenario januari-juni 2013, Afvoerdebiet IJmuiden en Zoutgehalte in langsdoorsnede door NZK en ARK op 14 februari 2013 03:00 voor Autonome Ontwikkeling (AO), Projectalternatief (PA) en Projectalternatief met selectieve onttrekking (PA+SO).

resulterende zoutlast bij Ingebruiksstelling van de nieuwe sluis uiteindelijk nauwelijks groter dan bij het Projectalternatief. De resultaten voor het Projectalternatief zijn daarom ook representatief voor de Ingebruikstelling.

Voor de interpretatie van deze resultaten is het van belang om de invloed van modelonzekerheden in te schatten. Veel modelonzekerheden gelden in gelijke mate voor alle gemodelleerde toestanden en hebben dus maar geringe invloed op de relatieve verschillen tussen de resultaten van het Projectalternatief met selectieve onttrekking en de Autonome Ontwikkeling, waaraan het effect van de selectieve onttrekking wordt afgemeten. Een

voorbeeld hiervan is de onzekerheid in de voorspelling van de zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen. Veronderstellingen die ten grondslag liggen aan de WANDA-Locks simulaties en die voor alle toestanden gelijk zijn, zullen geen grote invloed hebben op de relatieve verschillen. De grootste onzekerheid in de relatieve verschillen zit in de weergave van de selectieve onttrekking in het Delft3D model. Deze is geschat op ca. 20% van het effect van de selectieve onttrekking, zie Paragraaf 8.2. Ter illustratie is er een 20% onzekerheidsband rondom het resultaat voor het Projectalternatief met selectieve onttrekking weergegeven in Figuur 8.11. Indien het effect van de selectieve onttrekking in werkelijkheid 20% kleiner is dan berekend, dan zal de curve van het cumulatieve zouttransport van het Projectalternatief met selectieve onttrekking naar de bovenzijde van de bandbreedte opschuiven, en daar door vaker hoger zijn dan tijdens de Autonome Ontwikkeling. Echter, ook in dit geval blijft het verschil tussen het cumulatieve zouttransport van het Projectalternatief en het Projectalternatief met selectieve onttrekking significant.

Het Scenario januari – juni 2013 is op basis van gemiddelde afvoeren en de duur en intensiteit van droge en natte perioden globaal te duiden als een gemiddeld scenario. In de berekening is bijvoorbeeld het gemiddelde afvoerdebiet bij IJmuiden over het 1e halfjaar van 2013 met 70 m^3/s slechts 3% hoger dan het gecorrigeerde gemiddelde debiet over 2003 –



Figuur 8.11 Scenario januari-juni 2013, daggemiddeld afvoerdebiet (boven) en cumulatief zouttransport richting NZK inclusief 20% onzekerheidsband (onder) voor Autonome Ontwikkeling (AO), Projectalternatief (PA) en Projectalternatief met selectieve onttrekking (PA+SO).

2014 (68 m^3/s, zie Par. 5.2.1). De duur en intensiteit van droge en natte perioden in het 1e halfjaar van 2013 is op basis van de onderschrijding van het 10-percentiel decadegemiddelde debiet van 42 m^3/s bij IJmuiden en de overschrijding van het 90-percentiel decadegemiddelde debiet van 100 m^3/s globaal als gemiddeld te karakteriseren. Omdat de selectieve onttrekking met de aangegeven dimensies goed voldoet voor de gemiddeld condities van de simulatieperiode, is de verwachting dat selectieve onttrekking voor veel condities goed zal voldoen. Geprobeerd is om op basis van de resultaten van de berekeningen voor het Scenario januari – juni 2013 een verband af te leiden tussen de afvoerdebieten bij IJmuiden en de reductie van het zouttransport richting het NZK door selectieve onttrekking, om daarmee een lange reeks van jaren te kunnen analyseren. Dit is nog niet gelukt, zodat momenteel niet meer zekerheid kan worden geboden dat de werking van selectieve onttrekking onder àlle afvoercondities net zo goed is als in de beschouwde periode.

8.5 Conclusies prestaties selectieve onttrekking

De belangrijkste inzichten zijn verkregen uit de lange simulaties van Scenario januari - juni 2013. Uit het verloop van het cumulatieve zouttransport in de mond van het NZK, het bodemzoutgehalte in monding van Zijkanaal C en het bodemzoutgehalte in het ARK bij Diemen blijkt dat de selectieve onttrekking de extra zoutlast van het Projectalternatief in ruime mate mitigeert. Het cumulatieve zouttransport van het Projectalternatief met selectieve onttrekking komt nergens boven het niveau van de Autonome Ontwikkeling. Gemiddeld ligt de hoeveelheid zout zelfs lager dan bij de Autonome Ontwikkeling. Het verloop van de zoutgehaltes bij Zijkanaal C en bij Diemen zijn daarmee in overeenstemming. Ten opzichte van de verkennende MER-berekeningen met selectieve onttrekking geven deze berekeningen een meer betrouwbaar èn positiever beeld van het effect van selectieve onttrekking op de zoutdynamica. Voor de Ingebruikstelling levert de selectieve onttrekking vergelijkbare resultaten op als voor het Projectalternatief.

Op basis van het gemiddelde debiet, de onderschrijding van het 10-percentiel en de overschrijding van het 90-percentiel decadegemiddelde debiet is de simulatie van het 1e halfjaar van 2013 te karakteriseren als een tamelijk gemiddelde conditie. Op grond hiervan concluderen we dat selectieve onttrekking een goede basismaatregel is die voor veel condities goed zal voldoen. Zekerheid dat de werking onder àlle afvoercondities net zo goed is als in de beschouwde periode, kan echter niet worden geboden.

Verder dient nog rekening gehouden te worden met een onzekerheidsband vanwege de vrij grove weergave van de selectieve onttrekking in Delft3D. Initieel wordt deze geschat op +/- 20% van het berekende effect van de selectieve onttrekking. In Figuur 8.11 is deze onzekerheidsband toegevoegd aan het berekende cumulatieve zouttransport voor het Projectalternatief met selectieve onttrekking. De gedachte is dat fouten in de berekening van het effect van selectieve onttrekking primair zullen leiden tot een dynamisch evenwicht op een iets ander niveau in de figuur, d.w.z. een verticale verschuiving van de curve voor het cumulatieve zouttransport. Het is aannemelijk dat, indien nodig, er compensatie kan worden gevonden binnen de speelruimte van de dimensionering van de selectieve onttrekking Anderzijds, kan een verhoging van het debiet door het ARK in natte perioden helpen om samen met de selectieve onttrekking het systeem te verzoeten en daarmee buffercapaciteit te creëren. Voor deze buffercapaciteit is speciaal de zoetwaterafvoer van de natte periode direct voorafgaand aan de droge periode relevant. Uit het inspeelgedrag van het systeem voor zout (2-3 maanden inspeeltijd) kan worden afgeleid dat een aldus gecreëerde buffer een beperkte levensduur zal hebben

Op basis van de bovenstaande resultaten kan worden geadviseerd dat selectieve onttrekking met afmetingen gebaseerd op het schetsontwerp een goede maatregel is die voor veel condities goed zal voldoet, zowel voor het Projectalternatief als voor de veel vroegere fase van Ingebruikstelling van de nieuwe sluis. Zekerheid dat de werking onder àlle voorkomende omstandigheden voldoet, is echter niet te bieden.
Wel zijn er nog diverse opties om op toekomstige ontwikkelingen in te kunnen spelen. De zoutafvoercapaciteit van de selectieve onttrekking kan worden uitgebreid door een bredere, diepere, en/of hogere opening te creëren, door het spuivenster te verlengen of door een zoutvang toe te voegen, zie Paragraaf 5.4. Een andere mogelijkheid is de buffercapaciteit voor zout te vergroten door in perioden met voldoende water via het ARK een hoger debiet door het NZK te lozen (Paragraaf 8.4), of tijdens extreme droogte het aantal schuttingen te beperken (Paragraaf 3.2). Daarnaast kan de aanvullende installatie van bellenschermen worden overwogen, zie Paragraaf 7.5.
Op basis van monitoring van het zoutgehalte in het NZK en ARK kunnen dan de eventueel benodigde aanvullende maatregelen worden genomen.

9 Samenvatting en conclusies

De verdere uitwerking van mogelijke bronmaatregelen tegen de toename van de zoutindringing ten gevolge van de nieuwe zeesluis bij IJmuiden heeft geleid tot een reeks 'bevindingen'. Bevindingen 1 t/m 14 komen overeen met die van het 2e interim rapport (begin januari 2016); bevindingen 15 t/m 30 komen voort uit de afronding van de verkenningsfase, uitgevoerd tussen januari en september 2016.

1 Ten aanzien van het aanbrengen van een **drempel in het binnenhoofd** is komen vast te staan dat een drempel van beperkte hoogte niet op operationele bezwaren stuit. Anderzijds zal een dergelijke drempel slechts een kleine bijdrage leveren aan het verkleinen van de zoutindringing. Een besluit over het aanbrengen van een dergelijke drempel kan worden uitgesteld tot een later moment aangezien deze zou kunnen worden aangebracht in de uitsparingen in het binnenhoofd zoals voorzien voor het eventueel plaatsen van bellenschermen. In het geval er ook bellenschermen zouden komen moeten de drempel en het bellenscherm in samenhang worden uitgewerkt.

2 Vanuit de nautische operatie wordt de **voorkeur voor een selectieve onttrekking** als primaire maatregel tegen de zoutindringing onderschreven. De andere besproken maatregelen zouden slechts ondersteunend moeten zijn in het geval van een zeer lage afvoer over het Noordzeekanaal, namelijk de inzet van bellenschermen en het beperken van het aantal schuttingen.

3 De toepassing van **bellenschermen** is nog steeds een reële optie aangezien de deur-opentijden in de regel klein genoeg zullen zijn. Wel zal de variatie in deur-opentijden groot zijn. Om de invloed van de deur-opentijden op de zoutindringing in beeld te brengen moet deze variatie in beschouwing genomen worden, bijvoorbeeld op basis van de simulaties zoals uitgevoerd door PMSS via DHV [8] en [9]. Dit is in de afrondende fase gebeurd en de invloed is beschreven vanaf bevinding 15. Voor de laatste inzichten ten aanzien van de bellenschermoptie zie bevindingen 19 t/m 22.

4 In geval van een zeer lage afvoer over het Noordzeekanaal is het **beperken van het aantal schuttingen** eveneens een optie. Hierbij zou de impact beperkt blijft tot een verschuiving van de geplande tijd van aankomst of vertrek van ca. een uur.

5 Op het punt van het aantal schuttingen per dag blijkt een correctie noodzakelijk ten aanzien van de aannamen zoals gehanteerd in [1].

- In [1] is uitgegaan van een gemiddeld aantal van 10,4 schutcycli per dag. Dit aantal hoort bij de huidige situatie met een ladingstroom van ca. 74 MTPA. De referentie-situatie is voor het project echter gebaseerd op een ladingstroom van 95 MTPA, bij gebruik van de Noordersluis. Voor deze conditie wordt door PMSS en DHV [9] een aantal van 13,9 schutcycli per dag berekend. In het Project Alternatief, inclusief de nieuwe sluis, is dit aantal eveneens 13,9 schutcycli per dag, bij een ladingstroom van 125 MTPA.

6 Tevens is gebleken dat deze simulaties zijn gebaseerd op een ontwikkelingsscenario met een sterke groei van de zeevaart. Een meer gematigd scenario met bijbehorende vervoersprognoses, vlootsamenstellingen en verkeers-simulaties zou mogelijk kunnen leiden tot bijstelling van het aantal schutcycli.

7 Dit grotere aantal schuttingen zal in principe leiden tot een grotere zoutindringing, maar deze toename is afhankelijk van de spreiding in deur-opentijden. Daarnaast is het zo

dat de in [1] gebruikte getallen voor de afgevoerde debieten gecorrigeerd moeten worden o.b.v. nieuwe inzichten over de waterbalans. Deze beide getallen, de zoutindringing en het af te voeren debiet, definiëren de opgave aan de selectieve onttrekking. Naar verwachting zal de correctie in de waterbalans leiden tot een kleiner gemiddeld debiet en zal een toename van het aantal schuttingen leiden tot een grotere zoutindringing en dus een groter af te voeren zoutgehalte. De opgave aan de selectieve onttrekking wordt hiermee groter (de twee punten zoals geplot in Figuur 5.5. schuiven daarmee naar links en naar boven).

8 In het kader van het ontwerp en de dimensionering van de selectieve onttrekking is een inschatting gemaakt of het schetsontwerp (opening 120 m breed, 4 m hoog, drempel op NAP-20 m) en tevens voorlopig hydraulisch ontwerp de gewenste prestaties zou kunnen leveren. Daarvoor is eerst de 'opgave' voor selectieve onttrekking beter in beeld gebracht. Vervolgens is de effectiviteit van selectieve onttrekking onder diverse condities nader onderzocht.

9 Na overweging van de beschikbare informatie over de afvoeren en de zoutlek bij IJmuiden worden de volgende waarden aangehouden voor het afvoerdebiet van de spuisluizen en het gemaal van IJmuiden (Q_{spui}): een jaargemiddeld afvoerdebiet van 68 à 84 m^3/s, en het 10-percentiel decadegemiddelde van 42 à 52 m^3/s als representatief laag afvoerdebiet. Op basis van de trends in de beschikbare gegevens wordt verwacht dat de zoutlek voor de Autonome Ontwikkeling 95 MTPA (13.9 S/d) ongeveer stabiel zal zijn ten opzichte van 2014, ca. 600 à 750 kg zout/s, en voor het Projectalternatief 125 MTPA (13.9 S/d) wordt een toename verwacht van zo'n 60% naar ca. 960 à 1200 kg zout/s.

10 De afvoercapaciteit van **selectieve onttrekking** voor zout wordt gelimiteerd door Q_{spui}*S_{max}, waarbij S_{max} het zoutgehalte is in de onderste waterlaag. Hiervoor wordt aangenomen dat deze zal variëren van 18 - 23 psu, afhankelijk van de condities. Onder deze aanname gelden de volgende waarden voor de afvoer van zout door de Selectieve onttrekking:

- 68 of 84 m^3/s *18 psu of 1200 à 1500 kg zout/s bij gemiddelde afvoer
- 42 of 52 m^3/s *23 psu, of 960 à 1200 kg zout/s bij lage (zomer) afvoer.

11 In de praktijk is het niet altijd mogelijk 100% selectief te onttrekken. Op basis van de CFD simulaties word geschat dat uitgaande van de momentane afvoeren moet worden gerekend op 60% effectiviteit voor de jaargemiddelde afvoer (afvoerpieken relevant), hetgeen leidt tot een zoutafvoer van 720 à 900 kg zout/s. Voor lage gemiddelde afvoer met pieken < 200 m^3/s is rekening te houden 75% effectiviteit hetgeen leidt tot een zoutafvoer van ca. 720 à 900 kg zout/s.

12 Hieruit volgt dat voor de Autonome Ontwikkeling (zoutlek ~600 à 750 kg zout/s) een balans mogelijk is voor zowel de gemiddelde afvoer als de lage afvoer omdat de geschatte afvoercapaciteit (~720 à 900 kg zout/s) in principe groter is dan de geschatte zoutlek. Voor het Projectalternatief (zoutlek ~960 à 1200 kg zout/s) is met het schetsontwerp van de selectieve onttrekking de balans niet sluitend te maken: niet voor de gemiddelde afvoer en ook niet voor de lage afvoer omdat de geschatte afvoercapaciteit (~720 à 900 kg zout/s) ca. 25% kleiner is dan de geschatte zoutlek. Mogelijk is deze schatting te conservatief als de effectiviteit van de selectieve onttrekking te conservatief is ingeschat, en/of als door de veronderstelde bufferende werking van het NZK met een lagere afvoercapaciteit van zout kan worden volstaan.

13 Door aanpassing van het schetsontwerp kan de prestatie van selectieve onttrekking worden verbeterd. Dit is mogelijk door (combinaties van) de volgende opties. (1) Het

vergroten van de effectiviteit van selectieve onttrekking door lagere stroomsnelheden onder het scherm te creëren via een breder zoutscherm, een hogere opening of een diepere drempel, of een langer venster voor spuien en malen (dwz. eventueel pompen bij hogere buitenwaterstand, en dus meer energiekosten). (2) Het toevoegen van een zoutvang aan het ontwerp, als 'snelle buffer' voor de opslag van zouter water om de periode tussen twee spuivensters te overbruggen (het NZK zelf is een trage buffer). De 2DV CFD berekeningen met een diepe put wijzen op een sterke toename van de effectiviteit in zo'n geval. Een diepe zoutvang in de Velserkom betekent ook minder risico op menging van zout en zoet water (hogere S_{max}). (3) Het verhogen van het minimum beschikbaar debiet in IJmuiden, d.w.z. een groter zoetwater verbruik, en indien dit niet meer beschikbaar is door ingrijpen van de LCW: minder gaan schutten. (4) Tenslotte kan ook worden besloten het zoutgehalte in het NZK te laten oplopen, d.w.z. de oplossing niet te zoeken in 100% 'maatregel aan de bron'', maar bijvoorbeeld aanvullend te zoeken naar lokale maatregelen.

14 De gevolgen van selectieve onttrekking voor het systeem van het NZK en het ARK, waaronder een mogelijke bufferende werking, kunnen worden onderzocht door de numerieke modellering voor het NZK en het ARK verder uit te werken rekening houdend met de te definiëren opgave voor het gemiddelde debiet, het taakstellende debiet en de zoutindringing. Onderwerpen die daarbij nog speciale aandacht behoeven zijn de weergave van selectieve onttrekking in Delft3D en de modellering van de zoutlek op basis van WANDA-Locks en details van de schuttingen zoals berekend door PMSS.

De volgende bevindingen komen voort uit de afronding van de verkenningsfase.

15 Om het **effect** te bepalen van de **variaties in deur-opentijden en schutfrequentie** op de zoutlek zijn PMSS scheepvaartsimulaties opnieuw gedraaid om aanvullende uitvoer te genereren, namelijk de tijden van openen en sluiten van deuren en het aantal en de type schepen, beiden per kolk en per schutting. Naast de condities beschouwd in de MER, te weten de Autonome Ontwikkeling (Noordersluis, ladingstroom 95 MTPA) en het Projectalternatief (Nieuwe sluis, 125 MTPA), zijn ook de PMSS validatieperiode 2005 (Noordersluis, 57 MTPA) en de Ingebruikstelling (Nieuwe sluis, 95 MTPA) gesimuleerd. Deze laatste conditie is toegevoegd om na te gaan wat de directe gevolgen zijn voor de zoutlek van de omschakeling van de Noordersluis naar de veel grotere Nieuwe Sluis.

16 Uit een eerste analyse voor de Noordersluis c.q. de Nieuwe Sluis bleek dat de gemiddelde deur-opentijden goed aansluiten op de gemiddelde waarde zoals afgeleid voor het (gecorrigeerde) gemiddelde aantal schuttingen, namelijk ca. 35 minuten (zie Par 3.3.6). Ook blijkt de gemiddelde deur-opentijd aan de kanaalzijde korter dan aan de zeezijde. Aan beide kanten treedt ook een aanzienlijke variatie op in de deur-opentijden en deze variatie is zodanig dat de deur-opentijden voor een aanzienlijk deel van de schuttingen significant korter zijn dan de tijd nodig voor (bijna) volledige uitwisseling. Dit toont aan dat de aanname van een volledige kolkuitwisseling bij iedere schutting niet juist is. Een goede bepaling van de zoutlek moet rekening houden met de werkelijk te verwachten deur-opentijden en met de variatie daarin.

17 De gedetailleerde uitvoer uit de PMSS simulaties zijn vervolgens gebruikt als invoer voor het dynamisch zoutlekmodel WANDA-Locks (opvolger van TIMLCK). Het WANDA-Locks model is gevalideerd op basis van de zoutlek afgeleid uit waterstanden, debiet- en zoutmetingen voor 2005, met 7 en 27 psu als zoutrandvoorwaarden voor resp. kanaalzijde en zeezijde. Deze zoutrandvoorwaarden zijn vervolgens ook in de overige berekeningen gehanteerd terwijl de debieten en waterstanden van 2013 zijn gehanteerd

met het oog op latere Delft3D berekeningen. Voor de Autonome Ontwikkeling, de Ingebruikstelling en het Projectalternatief worden zoutlekken berekend van afgerond resp. 730, 1150 en 1120 kg zout/s, juist binnen de bandbreedte van de eerdere verwachting, zie Bevinding 9. Merk op dat de zoutlek bij Ingebruikstelling en het Projectalternatief praktisch gelijk zijn, en ca. *anderhalf* maal de zoutlek bij de Autonome Ontwikkeling.

18 Uit de WANDA-Locks simulaties bleek ook dat, meer nog dan de zoutlek door de scheepvaartsluizen, de zoutflux naar het NZK (het verschil tussen de zoutlek door de sluizen en de zoutafvoer door het Binnenspuikanaal) een belangrijke indicator is voor de zoutindringing naar het kanaal. Bij de gekozen zoutrandvoorwaarden (7 en 27 psu) is deze zoutflux in 2005 (validatie) nagenoeg gelijk aan nul: het systeem is dan in evenwicht. In de Autonome Ontwikkeling groeit dit, bij gelijk gehouden randvoorwaarden in het model, naar 180 kg/s. Voor de Ingebruiksstelling wordt 570 kg/s berekend en voor het Projectalternatief 540 kg/s. Deze waarden geven aan dat zonder aanvullende maatregelen het zoutgehalte op het NZK zal toenemen tot een nieuw evenwicht is bereikt.

19 WANDA-Locks simulaties voor de Ingebruikstelling en het Projectalternatief, aangestuurd met PMSS gegevens over schepen en deur-opentijden, zijn tevens gebruikt om de mogelijkheden van **bellenschermen** nader te onderzoeken. De berekeningen bevestigen de resultaten van 2014 (Fase 1, zie [1]), namelijk dat met bellenschermen in beide sluishoofden de toename van de zoutindringing is te voorkomen. Het beperken van de deur-opentijden ten opzichte van de verwachte normale operatie blijkt daarbij minder effectief (en daarmee ook minder noodzakelijk) dan gedacht omdat de deur-opentijden in de meeste gevallen al (veel) korter zijn dan eerder aangenomen. Tevens blijkt het dichtheidsverschil over de sluis (veel) kleiner dan dat tussen de buitenhaven en het kanaal.

20 Voordelen van bellenschermen zijn de (veel) kleinere initiële investering dan bij selectieve onttrekking, en de bijkomende beperking van de krachten op schepen door dichtheidsstroming bij het openen van de sluisdeuren. Daar tegenover staan ook nadelen: de operationele kosten (energie) van bellenschermen zijn met een geschat verbruik van ca. 4 – 6 miljoen kWh per jaar relatief hoog, de schermen vormen een barrière voor vismigratie, het onderhoud heeft mogelijk impact op de beschikbaarheid van de sluis (afhankelijk van uitwerking van het systeem) en de sluisoperatie wordt complexer (sluismeester wordt ook zoutmeester).

21 Diverse aspecten van bellenschermen behoeven nog nader onderzoek, waaronder operationele aspecten zoals hinder voor gecontroleerd in- en uitvaren, problemen voor installaties en (sleep-) boten (schroeven, koelwater). De ervaringen met de Noordersluis in IJmuiden en de Zeesluis (Westsluis) in Terneuzen (Par 3.5) kunnen hiervoor als input dienen. Ook moet nog worden nagegaan hoe dit systeem te dimensioneren, wat de relatie luchtdebiet – doorlaatfractie is voor deze waterdiepte, en hoe de optimale configuratie van de ‘strengen’ er uit ziet voor dit grote luchtdebiet. Dit vraagt nog wel enig onderzoek.

22 Om de effecten van een **selectieve onttrekking** op het systeem van het NZK en het ARK te onderzoeken is gebruik gemaakt van Delft3D. Daarbij is uitgegaan van de modeldefinities en scenario’s die Arcadis in het verleden heeft opgesteld bij het onderzoek naar de zoutindringing ten gevolge van de Nieuwe Sluis voor o.a. de MER. Op basis van het schetsontwerp voor de selectieve onttrekking in de toegang tot het Binnenspuikanaal (Bijlage F) is deze op schematische wijze in het Delft3D model ingebracht. De werking van dit schematische zoutscherm is voor geschematiseerde

geometrieën en condities onderbouwd in 2DV-berekeningen met Delft3D en CFD (Bijlage J). Vanwege roosterrestricties zijn de afmetingen van de selectieve onttrekking in het model ongeveer 130 m x 4 m (breedte maal hoogte van de spleet), d.w.z. 8% breder dan het schetsontwerp. Op deze opening na is het Binnenspuikanaal afgesloten. Ter plaatse van de selectieve onttrekking is de bodem verdiept naar NAP -20 m. Het trekken van het zoutscherm (maximaal open zetten van de selectieve onttrekking) bij zeer hoge afvoeren is nog niet gemodelleerd.

23 Als een eerste stap is de selectieve onttrekking geïntroduceerd in de Delft3D berekeningen voor het Projectalternatief zoals gebruikt in de MER-rapportage [15]. Het betreft twee scenario's. "Scenario 2" dat bestaat uit een zeer droge zomerperiode van 2 weken met realistische debieten bij IJmuiden (gemiddeld 23 m^3/s) en een constant extreem laag debiet van 10 m^3/s bij Maarssen. "Scenario 3" dat bestaat uit een periode van 3 maanden met gemiddelde afvoeren (IJmuiden 60 m^3/s, Maarssen 24,5 m^3/s). De afvoer bij IJmuiden bestaat uit afwisselend spuien en pompen in een cyclus van 12 uur en de zoutlek bij de scheepvaartsluizen is eveneens sterk geschematiseerd.

24 In Scenario 2 reduceert de selectieve onttrekking het extra zouttransport naar het NZK in het Projectalternatief ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling slechts met ongeveer een derde. Het resultaat voor Scenario 3 is positiever: de selectieve onttrekking zorgt voor een forse daling van de zoutlast naar het NZK, zodat deze slechts een fractie hoger is dan bij de Autonome Ontwikkeling. Deze berekeningen kennen echter wel een aantal serieuze beperkingen. Zo worden de uitwisselingsstromen bij de scheepvaartsluizen niet realistisch weergeven, wat mogelijk van invloed is op de werking van de selectieve onttrekking die op vrij korte afstand van deze randvoorwaarden ligt. Ook is er voor de beoordeling van de effectiviteit van selectieve onttrekking behoefte aan een meer realistische variatie van de zoutlast (t.g.v. variabele deur-opentijden en schutfrequenties) en de afvoerdebieten. Verder blijkt dat met name bij de korte simulaties de invloed van de initiële condities erg groot is.

25 Als meer realistische scenario's met in de tijd variërende afvoeren zijn het Scenario januari t/m juni 2013 en de Scenario's 4 en 5 geselecteerd. Het Scenario januari t/m juni 2013 wordt gekenmerkt door gemiddelde afvoercondities (70 m^3/s bij IJmuiden en 40 m^3/s bij Maarssen). De scenario's 4 en 5 representeren relatief droge perioden van 2 weken met gemiddeld resp. 35 en 29 m^3/s bij IJmuiden en 22 en 16 m^3/s bij Maarssen (voor Maarssen ongeveer het 10-precentiel en 5-percentiel decadegemiddelde debiet).

26 De verbeterde zoutlekrandvoorwaarden bij IJmuiden zijn gebaseerd op een offline koppeling, of een (ad-hoc) online koppeling tussen WANDA-Locks en Delft3D. De offline koppeling houdt in dat WANDA-Locks voorafgaand aan de Delft3D simulaties gedraaid is met de afvoerdebieten uit de Delft3D berekeningen, met de PMSS gegevens van de corresponderende periode (1^e halfjaar, cq. 19 juli - 3 augustus voor de 2 weken van Scenario's 4 en 5) en met aangenomen zoutrandvoorwaarden van 7 en 27 psu voor resp. kanaalzijde en zeezijde. Op basis van de WANDA-Locks resultaten zijn de uitwisselingsdebieten (simultaan in onder- en bovenlaag) en de inkomende zoutgehaltes aan het Delft3D model opgelegd. In WANDA-Locks is de selectieve onttrekking geschematiseerd door aan te nemen dat daarmee 1,5x het zoutgehalte van de voorhaven wordt afgevoerd. Verdere iteraties in de offline aanpak bleken niet nodig. Bij de online koppeling wordt het door Delft3D berekende zoutgehalte in de (binnen-) voorhavens weer gebruikt door WANDA-Locks om de zoutlasten voor de volgende tijdstap te berekenen. De resultaten van de berekeningen met de online koppeling, die in een laat stadium beschikbaar kwamen, bevestigen de onderstaande conclusies die uit berekeningen met offline koppeling zijn getrokken.

27 De belangrijkste resultaten zijn verkregen voor de simulatieperiode van januari - juni 2013. Uit het verloop van het cumulatieve zouttransport in de mond van het NZK, het bodemzoutgehalte in monding van Zijkanaal C en het bodemzoutgehalte in het ARK bij Diemen blijkt dat deze selectieve onttrekking de extra zoutlast van het Projectalternatief in ruime mate mitigeert. In de beschouwde periode ligt het cumulatieve zouttransport nergens boven het niveau van de Autonome Ontwikkeling. Gemiddeld ligt de hoeveelheid zout bij het Projectalternatief met selectieve onttrekking zelfs lager dan bij de Autonome Ontwikkeling. Het verloop van de zoutgehaltes bij Zijkanaal C en bij Diemen zijn daarmee in overeenstemming. Ten opzichte van de verkennende MER-berekeningen met selectieve onttrekking geven deze berekeningen een meer betrouwbaar èn positiever beeld van het effect van selectieve onttrekking op de zoutdynamica. Voor de Ingebruikstelling levert de selectieve onttrekking vergelijkbare resultaten op als voor het Projectalternatief.

28 Op basis van het gemiddelde debiet en de onderschrijding van het 10-percentiel en de overschrijding van het 90-percentiel decadegemiddelde debiet is de simulatie van het 1e halfjaar van 2013 te karakteriseren als een gemiddelde conditie. Op grond hiervan concluderen we dat selectieve onttrekking een goede basismaatregel is die voor veel condities goed zal voldoen. Zekerheid dat de werking onder àlle afvoercondities net zo goed is als in de beschouwde periode, kan echter niet worden geboden.

29 Verder dient nog rekening gehouden te worden met een onzekerheidsband vanwege de vrij grove weergave van de selectieve onttrekking in Delft3D, die initieel geschat wordt op +/- 20% rond het berekende effect van de selectieve onttrekking. Het is aannemelijk dat, indien nodig, er compensatie kan worden gevonden binnen de speelruimte van de dimensionering van de selectieve onttrekking (zie bevinding 13). Anderzijds, kan een verhoging van het debiet door het ARK in natte perioden helpen om samen met de selectieve onttrekking het systeem te verzoeten en daarmee buffercapaciteit te creëren. Voor deze buffercapaciteit is speciaal de zoetwaterafvoer van de natte periode direct voorafgaand aan de droge periode relevant. Uit het inspeelgedrag van het systeem voor zout (2-3 maanden inspeeltijd) kan worden afgeleid dat een aldus gecreëerde buffer een beperkte levensduur zal hebben.

Met dit eindrapport wordt de verkenningsfase naar bronmaatregelen tegen de toename van de zoutindringing ten gevolge van de nieuwe zeesluis bij IJmuiden afgesloten. Op basis van de bovenstaande resultaten kan worden geadviseerd dat selectieve onttrekking met afmetingen gebaseerd op het schetsontwerp een goede basismaatregel is die voor veel condities goed voldoet voor zowel het Projectalternatief, als voor de veel vroegere fase van Ingebruikstelling. Zekerheid dat de werking onder àlle omstandigheden voldoet, is echter niet te bieden.
Er zijn nog diverse opties om op toekomstige ontwikkelingen in te kunnen spelen, waaronder uitbreiding van de selectieve onttrekking en de installatie van bellenschermen. Op basis van monitoring zijn dan eventueel deze aanvullende maatregelen te treffen.

Referenties

[1] “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

[2] “Eindrapport Beperking zoutindringing Zijkanaal C -Spaarndam”, Geert Prinsen, Rob Uittenbogaard, 1209873-000, augustus 2014

[3] “Bellenschermsysteem nieuwe sluis IJmuiden, Voorlopige productomschrijving”, Otto Weiler, John Cornelisse, 1210752-000, Deltares, juli 2015

[4] “Zoutindringing IJmuiden, Opgave, mogelijkheden, vraagstukken”, Otto Weiler, Arnout Bijlsma, 1220309-000, Deltares, juli 2015

[5] “Stroomsluis Noordland in de Oosterschelde dam, selectief afzuigen, twee - dimensionaal onderzoek”, M1204, Waterloopkundig Laboratorium, juli 1973

[6] “Stroomsluis Noordland in de Oosterschelde dam, selectief afzuigen, drie - dimensionaal onderzoek”, M1209, Waterloopkundig Laboratorium, december 1973.

[7] “Water quality control at ship locks, prevention of alts and fresh water exchange”, Kerstma et al., ISBN 905410.142.3, A.A. Balkema, Rotterdam, 1994

[8] “Simulatiestudie Capaciteit Zeetoegang Amsterdam-Noordzeekanaalgebied, Modelbeschrijving en resultaten”, ir. R. Groenveld, januari 2008

[9] “Zeetoegang IJmond, Planstudie Nieuwe zeesluis fase 1, Probleemanalyse & uitgangspunten, Milieutoets & MKBA, Rapport actualisatie vlootsamenstelling en capaciteitsmodel”, BA3334-106-105, DHV, maart 2012

[10] “Real-Time Simulaties Nieuwe Zeesluis IJmuiden, Eindrapport”, 27418-1-MSCN-rev.1, MARIN, februari 2014

[11] “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

[12] “Zeetoegang IJmond, Nieuwe Zeesluis, Dichtheidsverschillen over de sluis, notitie t.b.v. voorbereiding Programma van Eisen”, T. Jongeling, RWS- Dienst Infrastructuur, Versie 1, 18 juli 2013

[13] “Verfijning onderzoek chloride indringing Noordzeekanaal (ZTIJ)”, Rapport A3026R1r3. Arcadis, februari 2014

[14] “Zoutindringing sluizen IJmuiden, effect nieuwe sluis op Noordzeekanaal”. Rapport C03041.002769.001, Arcadis, 2011

[15] “MER Zeetoegang IJmond, Deelrapport water”. Royal Haskoning DHV, 17 januari 2014, versie 1.0, MD-AF20140077/PO

[16] “Waterbalans Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal 1998-2000”. RWS, ANW Nota 03.12, 2003

[17] “Waterbalans Noordzeekanaal/Amsterdam-Rijnkanaal 2001-2003”. HKV, 2005

[18] “Supercritical withdrawal from two-layered fluid systems – Part 1: Two-dimensional skimmer wall”, Jirka, G.H., 1979, Journal of Hydraulic Research, 17:1, pp. 43-51, DOI: 10.1080/00221687909499599.

[19] “Wijzigingen simulatiemodel voor Planstudie; Modelwijzigingen en simulatieresultaten voor validatie”. ir. R. Groenveld, april 2009.

[20] “Interim rapportage 1, simulatie runs 2008”, ir. R. Groenveld, mei 2011.

[21] “MER Zeetoegang IJmond; Deelrapport Verkeer & Vervoer”. Royal Haskoning DHV, 17 januari 2014, versie 1.0, MD-AF20140066/PO

A Bespreekverslag 25 juni 2015, operationele aspecten

Memo

Aan
Wim Kortlever - RWS-GPO, deelnemers overleg

Datum	**Kenmerk**	**Aantal pagina's**
6 september 2015	1220309-000-HYE-0017	15
Van	**Doorkiesnummer**	**E-mail**
Otto Weiler	+31(0)88335 8358	otto.weiler@deltares.nl

Onderwerp
IJmuiden, Zoutindringing, operationele aspecten, uitwerking bespreking 25 juni 2015

Dit memo

Dit memo is in eerste instantie opgesteld ter voorbereiding op de bijeenkomst op 25 juni 2015, waarin met betrokkenen is overlegd over de maatregelen ter beperking van de zoutindringing op het Noordzeekanaal en de mogelijke implicaties hiervan voor de nautische operatie. Bij dat overleg waren de volgende mensen aanwezig:

- Wim Kortlever, RWS-GPO
- Herman Anker, CNB
- Gijs de Boer, Loodswezen
- Rene van Essen, Loodswezen
- Frans de Haan, adviseur RWS
- Tony Kroon, adviseur RWS
- Arnout Bijlsma, Deltares
- Otto Weiler, Deltares

De bevindingen uit het overleg zijn in dit memo toegevoegd en gemarkeerd met een streep in de kantlijn. Verder zijn op basis van het commentaar vanuit de groep hier en daar teksten aangepast of aangevuld. Aan het eind zijn de conclusies uit het overleg verzameld.

Inleiding

Het feit dat de nieuwe sluis aanzienlijk groter is dan de Noordersluis, leidt bij een gelijk aantal schuttingen per dag tot een toename van de zoutindringing op het Noordzeekanaal, en daarmee tot een toename van het zoutgehalte op het Noordzeekanaal [1]. Een dergelijke verhoging is, uiteindelijk, voor de omgeving niet acceptabel gebleken. Daarmee heeft de sluis er een hoofdfunctie bij gekregen: naast o.a. de functies ‘Waterkeren’ en ‘Laten passeren scheepvaart’ komt er bij ‘zout en zoet scheiden’. Het project zal deze functie nu moeten invullen door het treffen van een aantal maatregelen. Het is zeer waarschijnlijk dat een deel van deze maatregelen ook implicaties zal hebben voor de operatie op de sluis.

De te onderzoeken maatregelen

In [4] is een verkenning gedaan naar mogelijke maatregelen die een toename van het zoutgehalte op het Noordzeekanaal kunnen voorkomen. In dat onderzoek is gepoogd een zo breed mogelijke variatie aan opties op een systematische manier ‘uit te kammen’ en (ruw) te beoordelen op een aantal aspecten. Hieruit is een aantal opties als meest kansrijk naar voren gekomen.

Op basis hiervan, en in lijn met de aanbevelingen in het rapport worden in de komende tijd een aantal opties verder uitgewerkt [5]:

> *Als eerste prioriteit op korte termijn in kaart te brengen wat de mogelijke bijdrage kan zijn van het aanbrengen van een drempel in het binnenhoofd (aan de kanaal-zijde van de deuren) aan het beperken van de zoutindringing. Daarnaast te bekijken wat de operationele implicaties hiervan zijn. Dit is op korte termijn nodig omdat een besluit hiertoe moet worden meegenomen in het DBFM-contract. (Het aanbrengen van een bellenschermen zal buiten het DBFM-contract vallen; dit wordt een 'directie-levering' van RWS aan de opdrachtnemer.)*
>
> *Vanuit het projectmanagement IJmuiden zien de voorkeuren voor de daarnaast te nemen maatregelen er nu als volgt uit:*
>
> 1. *Als voorkeur op dit moment geldt het realiseren van een selectieve onttrekking waarmee per afgevoerde m^3 water zo veel mogelijk kg'n zout worden afgevoerd uit het Noordzeekanaal (NZK) terug naar zee. Deze oplossing kan afdoende zijn zolang er voldoende afvoer over het kanaal plaatsvindt. Als de afvoer terugloopt (in tijden van droogte) zal het zoutgehalte in het NZK, en later ook in het Amsterdam Rijnkanaal (ARK), weer oplopen; afhankelijk van hoe snel dit zoutgehalte oploopt zal de zoutindringing dan moeten worden beperkt door aanvullende maatregelen.*
> 2. *Als eerste aanvullende maatregel (maar ook als mogelijk alternatief voor een selectieve onttrekking) wordt gedacht aan het aanbrengen van bellenschermen in beide sluishoofden. Deze vragen van de operatie wel het beperken van de deur-opentijden; het is daarvan van belang de operationele haalbaarheid hiervan in kaart te brengen. Voordelen van het aanbrengen van bellenschermen is dat:*
> - *hiermee ook een maatregel beschikbaar is voor het geval de selectieve onttrekking tijdelijk niet beschikbaar is of als hij niet op tijd gereed zou zijn (bij oplevering van de sluis, eind 2019);*
> - *dat bellenschermen ook bijdragen aan het reduceren van de (grote) krachten op de schepen door de dichtheidsstroming die optreedt bij het openen van de sluisdeur.*
> 3. *Als laatste maatregel zou overwogen kunnen worden om, in tijden van droogte, een beperking op te leggen aan het maximaal aantal schuttingen per dag om hiermee de zoutindringing te beperken. Met de grote afmetingen van de nieuwe sluiskolk zou dit vragen om het goed plannen en indelen van de sluis met meerdere schepen per schutting, zodat (met een beperkte vertraging) toch alle schepen geschut worden.*

Uit bovenstaande blijkt dat primair wordt ingezet op het realiseren van een selectieve onttrekking. Een belangrijk voordeel hiervan is dat deze maatregel *geen* implicaties heeft voor de operatie. Maar de kans is groot dat die maatregel alleen niet voldoende zal zijn, zodat ook andere maatregelen moeten worden genomen die wel implicaties hebben voor de operatie.

Die implicaties voor de operatie zijn het onderwerp van deze memo. Het betreft achtereenvolgens:

1. Operationele implicaties van een drempel in het binnenhoofd
2. Voor toepassing van bellenschermen: het beperkt houden van de deur-opentijden
3. Het beperken van het aantal schuttingen per dag

1. Operationele implicaties van een drempel in het binnenhoofd

In het huidige ontwerp is de drempel in het binnenhoofd even diep als de drempel in het buitenhoofd, namelijk NAP -17,25 m, terwijl de laagste waterstand op het kanaal toch hoger is dan de laagste waterstand aan de zee-zijde. De maatgevende waterstanden zijn [6]:

- Minimum schutpeil zeezijde: NAP - 1,65 m (Slotgemiddelde 2011, waterstand met een onderschrijdingsfrequentie van één keer per jaar.)
- Minimum waterstand Kanaalzijde: NAP - 0,74 m (onderschrijdingsfrequentie 1/10 per jaar)

Voor een drempel in het binnenhoofd zijn twee ‘extreme’ drempeldiepten denkbaar:
- zo diep mogelijk: een drempel op NAP -16,25 m: dus 1,0 m ondieper samenhangend met het verschil in maatgevende waterstand binnen en buiten van ongeveer 1 meter;
- zo ondiep mogelijk: een drempel op NAP 15,0 m conform Noordersluis:

Uiteraard is het voor de operatie prettig om de drempel zo diep mogelijk te hebben, omdat in- en uitvaren dan vlotter gaan. Omdat de sluis zo breed is, zal een beperking in de kielspeling echter vooral (of: alleen) een rol spelen voor de allergrootste schepen, de schepen die wel door de nieuwe sluis kunnen, maar niet door de Noordersluis.

Bepalend voor de hinder bij het in- en uitvaren als gevolg van de drempel is de ‘blockage’: de verhouding tussen het grootspantoppervlak van het schip (B x T) en het doorsnede oppervlak in het sluishoofd boven de drempel. In onderstaande tabel is die verhouding voor een paar combinaties van schepen en sluizen uitgezet. Voor de Noordersluis is daarbij een scheepsbreedte van 42 m aangehouden, voor de nieuwe sluis een breedte van 52 m. Naast deze ‘blockage’ is ook de kielspeling gepresenteerd. De scheepsdiepgang, aan de kanaalzijde, is op 14 m aangenomen en de waterstand in het kanaal is op streefpeil (NAP-0,40 m).

	Noordersluis	nieuwe sluis, drempel NAP -16.25 m	nieuwe sluis, drempel NAP -15 m
Schip			
breedte [m]	42	52	52
diepgang [m]	~14	~14	~14
oppervlak A_m [m^2]	588	728	728
Sluis			
breedte [m]	50	70	70
vaardiepte [m]	14,6	15,85	14,6
oppervlak A_c [m^2]	730	1110	1022
Blockage: A_m / A_c	0,81	0,66	0,71
Kielspeling [m]	0,60	1,85	0,60

Tabel 1: Blockage en kielspeling bij verschillende dieptes van de drempel

De tabel laat zien dat, voor de nieuwe sluis, bij een drempeldiepte van NAP-16,25 m, de blockage flink lager uitkomt. Ook bij een drempeldiepte van NAP -15,0 m is de blockage in de

nieuwe sluis nog steeds flink kleiner dat bij de Noordersluis. Dat betekent dat het in- en uitvaren van de maatgevende schepen bij de nieuwe sluis makkelijker zal zijn dan nu het geval is, ook bij een drempeldiepte van NAP -15,0 m. De blockage lijkt dus geen reden te geven om af te zien van een drempel op NAP -15,0 m. Wel is de mogelijk hogere invaarsnelheid reden om extra kritisch te kijken naar de kielspeling.

De kielspeling bij een drempel op NAP -15,0 m is met 0,60 m erg klein. Kennelijk is dit voor de Noordersluis een geaccepteerde situatie, maar voor de nieuwe sluis lijkt dit geen reële optie. Vaak wordt voor zeeschepen een minimum van 1,0 m of 10% van de diepgang gehanteerd als minimum (1,40 m).

Bij het bekijken van de kielspeling moeten we ook aandacht besteden aan de waterstand op het kanaal. Het streefpeil bedraagt NAP -0,40 m. Lokaal bij de sluizen is de waterstand soms lager als gevolg van het spuien van water naar zee. Ook kan een westelijke tot noordwestelijke wind leiden tot een lagere waterstand door afwaaiing. Anders dan bij het getij aan de zeezijde, kunnen dit soort waterstandsverlagingen relatief lang duren, en zijn ze minder goed te betrekken in het plannen van een operatie. Er moet daarom uitgegaan worden van een lagere waterstand dan het streefpeil. Realistische waarden zijn:

- eens per jaar: NAP -0,58 m (in dit memo afgerond naar NAP -0,60 m)
- eens per 10 jaar: NAP - 0,74 m (niet afgerond)

Dit leidt tot de volgende waarden voor kielspeling en drempeldiepte:

	Streefpeil	Lage waterstand 1/1^{e} per jaar	Minimale waterstand 1/10^{e} per jaar
Waterstand [m NAP]	-0,40	~ -0,6	-0,74
Diepgang [m]	~14	~14	~14
Kielspeling	Diepte drempel [m NAP]		
0,60 m	-15,0	- 15,2	-15,34
1,0 m	-15,4	-15,6	-15,74
10%	-15,8	-16,0	- 16,14

Tabel 2: Diepte van de drempel bij verschillende waterstanden en kielspeling

Bij het nadenken over de drempeldiepte aan het binnenhoofd kan ook het volgende een rol spelen: de grootste schepen zullen in het algemeen geladen het kanaal opvaren en in ballast het kanaal weer afvaren. De kielspeling zoals hierboven besproken geldt dus vooral bij het *uitvaren* van de sluis naar het kanaal; die manoeuvre is relatief eenvoudig. Bij het invaren van de sluis, een minder eenvoudige manoeuvre, is de kielspeling vaak (maar niet altijd) dus (aanzienlijk) groter.

Resultaat van het overleg:

Wat betreft de diepte van de drempel:

- Een kielspeling van 1,0 m wordt voor de (zeer) grote schepen als redelijk beschouwd, maar een kielspeling van 10% is wenselijk, omdat dit soms door rederijen wordt vereist.
- Dit leidt tot een diepteligging van de drempel van NAP -15,8 of -16,0 m.

Er is ook gesproken over de diepte in de binnenvoorhaven: met het aanleggen van de drempel is het ook denkbaar om de voorhaven minder diep uit te baggeren. Dit zou kunnen bijdragen aan het beperken van de zoutindringing (de berekeningen geven hierover nog geen duidelijkheid), en mogelijk tot een reductie van de baggerkosten. Het verschil tussen de diepte van de drempel en de diepte van de binnenvoorhaven moet tenminste 1,0 m bedragen, conform het huidige referentieontwerp.

Verder is opgemerkt dat de drempel 'wegneembaar' moet worden uitgevoerd; dit omdat een van de eisen aan het project is om alle constructies 'toekomstvast' uit te voeren, rekening houdend met een mogelijke verdieping van de binnenvoorhaven tot een niveau van NAP -18,0 m.

De drempel zou geplaatst kunnen worden in de uitsparing die bedacht is voor het meest oostelijke bellenscherm: als er ook bellenschermen worden geplaatst kunnen deze in de uitwerking worden gecombineerd met de drempel.

2. Voor toepassing van bellenschermen: het beperkt houden van de deur-opentijden

a. Normale cyclus, huidig bedrijf

In [1] is uitgerekend dat door het toepassen van bellenschermen de zoutindringing met de nieuwe sluis gelijk gehouden kan worden aan de huidige situatie. Bij deze berekeningen is uitgegaan van regelmatige reeks van 10,4 complete schutcycli per dag (een complete cyclus is een schutting naar binnen + een schutting naar buiten), met een gemiddelde deur-opentijd van 50 minuten. Het aantal schutcycli per dag en de deur-opentijd is cruciaal voor het berekende resultaat.

Er worden voor deze parameter echter zeer uiteenlopende waarden genoemd, en er is behoefte aan een beter begrip hiervan. Eerst een kleine analyse van de getallen zoals hierboven genoemd:

- totale tijd deur-open: 2 x 50 x 10,4 = 1040 minuten;
- totaal per dag:1440 minuten;
- %-age deur-open: 72% van de tijd.

Het aantal schutcycli van 10,4 per dag komt neer op een cyclus tijd van ca. 2:20 per cyclus. Dit is uitgewerkt in de figuur op de volgende bladzijde, de linker kolom, waarbij is aangenomen dat er per cyclus steeds (ten minste) een schip mee naar binnen wordt geschut en (tenminste) een schip weer naar buiten. Zoals onderaan de tabel is aangegeven is de cyclus tijd als volgt verdeeld:

• tijd met een deur geopend:	1:30
• tijd met deur gesloten:	0:30
• tijd tijdens openen en sluiten:	0:20
• totale cyclustijd	2:20

Voor de berekening van de zoutindringing nemen we de tijd van openen/sluiten voor de helft mee, waardoor de deur-opentijd in deze berekening uitkomt op 1:40 van de 2:20 = 71%.

Dit is het schema van schuttingen zoals aangenomen in de voorlopige berekeningen van de zoutlek en de benodigde capaciteit van de bellenschermen. Om te komen tot een uitspraak te

doen over het realiteitsgehalte van deze berekeningen, en iets algemener: over de haalbaarheid van de inzet van bellenschermen, zijn antwoorden nodig op de volgende vragen:

- Is dit een reëel schema?
- Is het representatief voor het ‘gemiddelde’?

Als het antwoord op bovenstaande vaag ‘ja’ is, wordt daarmee bevestigd dat de initiële berekeningen realistisch zijn. Dat zou een belangrijk resultaat zijn.

(Uitwerking van de rechter kolom volgt.)

Schematische schutcyclus, deur-open tijden

	NU				Met bellenscherm en beperkte deur-opentijden		
00:00							
00:05							
00:10	15	naderen	open	20	naderen	open	20
00:15							
00:20	5	invaren			invaren		
00:25	5		sluiten	5		sluiten	5
00:30							
00:35	15	nivelleren	dicht	15	nivelleren	dicht	15
00:40							
00:45	5		openen	5		openen	5
00:50	5	uitvaren			uitvaren	open	5
00:55						sluiten	5
01:00	15	wegvaren			wegvaren	dicht	10
01:05							
01:10	5	passeren	open	45	passeren	openen	5
01:15							
01:20	15	naderen			naderen	open	20
01:25							
01:30	5	invaren			invaren		
01:35	5		sluiten	5		sluiten	5
01:40							
01:45	15	nivelleren	dicht	15	nivelleren	dicht	15
01:50							
01:55	5		openen	5		openen	5
02:00	5	uitvaren			uitvaren	open	5
02:05						sluiten	5
02:10	15	wegvaren	open	25	wegvaren	dicht	10
02:15							
02:20	5	passeren			passeren	openen	5

Totalen						
	18	open	01:30	10	open	00:50
	6	dicht	00:30	10	dicht	00:50
	4	op'n/sl'n	00:20	8	op'n/sl'n	00:40

Totalen 'open' + helft van openen en sluiten:

%-age open	71%	50%
langste deur-opentijd	00:50	00:25
gem. deur-opentijd	00:50	00:12:30
aantal perioden open per cyclus	2	4

Tabel 3: Schematische weergave schutcyclus

Resultaat van het overleg:

Het schema van regelmatige schuttingen, 10,4 schuttingen per dag met een deur-opentijd van 50 min wordt, op basis van de ervaring in de huidige situatie, als niet-realistisch beschouwd.

Wat betreft het gemiddelde: het aantal van 10,4 kan correct zijn, maar in het weekend zijn er minder schuttingen, en door de week zijn het er meer. Bovendien zijn er overdag meer schuttingen dan 's nachts. Daarnaast is er een duidelijk weekritme, met veel opvaart (aankomst in Amsterdam) op zondagavond, en veel afvaart (vertrek) op vrijdagavond.

Dat betekent dat, op drukke momenten, de deur-opentijden veel korter moeten zijn dan 50 minuten. Een tijdsduur van 50 minuten lijkt realistisch als twee grote schepen elkaar moeten passeren (een opvarend en een afvarend). Alle andere combinaties zullen tot een kortere deur-opentijd leiden, en zeker bij leeg-omschutten zal de deur korter open staan.

Ten tijde van het bestuderen van de inpassing van de sluis in de buitenvoorhaven is erover gesproken dat, voordat een groot schip invaart, het de kolk-uitwisseling zal willen afwachten, om krachten t.g.v. de uitwisselingsstroming te voorkomen. Voor kleinere schepen speelt dit veel minder: die zullen die uitwisseling niet afwachten en kunnen veilig invaren door goed het midden te houden. Dit bekent dat bij twee schuttingen achter elkaar in dezelfde richting, er inderdaad een beperkte deur-opentijd gerealiseerd kan worden (aanzienlijk korter dan 50 minuten).

Als er meerdere schepen tegelijk worden geschut dan loopt de deur-opentijd wel snel op. Dit heeft te maken met het afmeren, operaties met sleepboten etc.. Een operatie met meerdere schepen per schutting betekent echter ook dat het aantal schuttingen terugloopt. Met de grote afmetingen van de nieuwe sluis is het wel te verwachten dat er vaker met meerdere schepen tegelijk geschut zal worden.

Andere belangrijke parameters zijn de tijdsduur voor het naderen en het invaren. Simulaties uitgevoerd bij het MARIN geven aan dat voor het maatgevende schip de tijdsduur van zowel naderen als invaren aanzienlijk langer zal zijn dan hier weergegeven als mogelijk waarde voor het gemiddelde. Ook speelt de operatie met sleepboten een rol: als de sleepboten niet meegaan in de schutting moet het schip eerst zijn afgemeerd, dan kunnen de sleepboten de sluis uit, en dan kan de deur worden gesloten.

De grote variatie in het aanbod van schepen over de dag en de week en de vele verschillende combinaties van afmetingen en de operatie met sleepboten maken dat een 'gemiddeld ritme' moeilijk te definiëren is. Daarbij zegt een gemiddelde niet veel over de te verwachten zoutindringing. <u>Toch lijkt de volgende conclusie gerechtvaardigd: met 10,4 schuttingen per dag met steeds 50 minuten deur-opentijd wordt, voor de situatie *zonder* bellenschermen, de maximale zoutindringing berekend. In de werkelijkheid zal die minder zijn, met name door de leeg-omschuttingen waarbij de kolk niet de tijd krijgt volledig uit te wisselen.</u>

Voor de situatie *met* bellenschermen is nog geen uitspraak te doen. In de berekeningen tot nu toe is uitgegaan van regelmatige schuttingen met een deur-opentijd van 50 minuten. Uit het bovenstaande volgt dat de deur-opentijd meestal korter zal zijn dan 50 minuten, maar als deze tijd af en toe (door het schutten met meerdere schepen of de grootste schepen, of door de operatie met sleepboten) wordt overschreden heeft dat negatieve consequenties voor een aantal schuttingen daarna. Over de balans tussen deze twee aspecten is vooraf geen uitspraak te doen. In een vervolg zal dit in meer detail uitgewerkt moeten worden.

Vervolg a: Normale cyclus, huidig bedrijf

Om tot een betere onderbouwing te komen of het schema een ‘representatief gemiddelde’ is, is het van belang uit te werken hoe de benodigde tijden van naderen / invaren / uitvaren / wegvaren / passeren variëren met o.a. de afmetingen van de schepen. Om de vraag wat te structuren is een tabel opgezet (Tabel 4). Deze tijdens de bijeenkomst samen in te vullen. Een andere belangrijke vraag voor de vertaling van de operatie naar representatieve cyclus tijden is: hoe vaak wordt er ‘leeg’ geschut?

Hieronder de voorgestelde tabel, samen in te vullen gedurende de vergadering.

	Tabel	Coaster	<Panamax	Panamax	>Panamax	new IJmuiden max
Lengte [m]				180 - 225		
Breedte [m]				32		52
Diepgang [m]				12	13,75	13,75
Tijdsduur						
Naderen (waarbij deur open moet staan)	15					
Invaren (tot deur dicht kan)	5					
Uitvaren (tot deur dicht kan)	5					
Wegvaren (tot locatie passeren)	15					
Passeren	5					

Tabel 4: Cyclustijden als functie van scheepsafmetingen (in te vullen)

Ter referentie: hieronder een tabel met scheepvaart klassen volgens de AVV, genomen uit een document t.b.v. sluis Terneuzen (ik ben nog op zoek naar de bron hiervan).

AVV-klasse	Lengte	Breedte	Diepgang	Draagvermogen
Z1	<90			<6000 t
Z2	90-130 m			6000-10000 t
Z3	130-180 m			10000-30000 t
Z3b	130-180 m		>10 m	20000-40000 t
Z4		<26 m		20000-40000 t
Z5		>26 m		20000-60000 t
Z5CC	180-225 m	>26 m		
Z6	>225 m	<32 m		60000-80000 t
Z7	237 m	39.7 m	13.5 m	80000-120000 t
Z8	271 m	43.2 m	17.0 m	120000-160000 t
Z9	289 m	45.3 m	17.8 m	160000-200000 t
Z10				>200000 t

Tabel 5: Indeling zeevaart volgens AVV

Resultaat van het overleg:

Zoals hierboven al aangeduid: de tijdsduur voor naderen, invaren, uitvaren, wegvaren en passeren wordt niet alleen bepaald door het schip zelf, maar ook door de scheepvaart op tegenkoers. De afmetingen van beide schepen bepalen de locaties waar de schepen elkaar zouden kunnen ontmoeten, maar de plaats waar ze elkaar ontmoeten hangt ook af van hun eigen vaarschema: de timing van de opvarende en afvarende schepen is niet volledig afgestemd op het schutritme van de sluis.

Al met al was het niet mogelijk c.q. niet zinvol te proberen deze tabel in te vullen. Een goede beschrijving van de operatie zal rekening moeten houden met de vele variaties in het scheepvaartverkeer en zal daarom moeten gebeuren op basis van simulaties van de verkeersafwikkeling bij de sluizen.

b. Aangepaste cyclus, bedrijf met gereduceerde deur-opentijden

Zoals al gesteld: de door bellenschermen geleverde reductie van de zoutindringing wordt bepaald door de deur-opentijden. In onze werkzaamheden voor de toepassing van bellenschermen op de Krammersluizen bleek dat sluiten tussen uit- en invaren cruciaal was. Het is voor de effectiviteit van het systeem van belang dat de dichtheid in de kolk op een waarde blijft tussen zout (buiten) en zoet (binnen) in: daardoor is het dichtheidsverschil tussen kolk en voorhaven kleiner, en daarmee is de prestatie van het bellenscherm groter. Als, op momenten van weinig aanbod van schepen, de deur lang open blijft staan verloopt de dichtheid van de kolk naar een van beide extremen, en daarmee is het systeem ‘uit balans’. Het duurt dan een aantal schuttingen voordat die balans is hersteld, waardoor de zoutindringing weer op het beoogde lage niveau is.

Om het effect van dit ‘tussentijds sluiten’ te illustreren is het toegepast binnen het schema van Tabel 3, zie de rechter kolom. Essentieel in dit schema is het sluiten van de deur direct na het

uitvaren, en het weer openen van de deur voorafgaand aan het naderen van het invarende schip. Deze werkwijze leidt tot de volgende totalen:

- tijd met een deur geopend: 0:50
- tijd met deur gesloten: 0:50
- tijd tijdens openen en sluiten: 0:40
- totale cyclustijd 2:20

Voor de berekening van de zoutindringing nemen we weer de tijd van openen/sluiten voor de helft mee, waardoor de deur-opentijd in deze berekening uitkomt op 1:10 van de 2:20 = 50%. Deze reductie van de deur-opentijd van 1:40 naar 1:10 komt neer op een reductie van 30%. Dat is een significant verschil, terwijl alle cyclustijden voor de scheepvaart (in deze schematische weergave) worden gerespecteerd.

Voor een toepassing in de praktijk moet dit schema worden vertaald in een ‘voorschrift’ aan de sluismeesters. Voor de simulaties voor de Krammersluizen is dit als volgt geformuleerd:

- indien, na het uitvaren van het laatste schip uit de kolk, het ten minste 15 minuten duurt tot het eerste schip de kolk zal invaren, moet de deur tussentijds worden gesloten.

De tijdsduur van 15 minuten komt er bij de Krammersluizen op neer dat het naderende schip nog (ver) buiten de voorhaven is, waardoor er in de communicatie tussen sluismeester en schipper geen bezwaar is de sluisdeur te sluiten. Binnen die 15 minuten wordt de deur dan eerst gesloten en ook weer geopend. Omdat binnenvaartschepen goed manoeuvreerbaar zijn, is er in die simulaties ook uitgegaan van een (korte) tijdsduur van slechts 1 minuut tussen het geheel geopend zijn van de sluisdeur en het begin van het invaren. Om dit mogelijk te maken heb ik voorgesteld om op het sluishoofd een ‘aftelklok’ te plaatsen die weergeeft hoeveel tijd het duurt tot de deur geheel geopend is. Voor IJmuiden is de tijd van ‘naderen’ in de tabel opgenomen, uit te werken naar scheepsafmetingen.

Voor de nieuwe sluis IJmuiden is nu de vraag of er een vergelijkbaar criterium kan worden geformuleerd, in afstand en/of in tijd. Dit criterium in de vergadering te formuleren.

Resultaat van het overleg:

Tijdens het overleg is een voorstel voor een criterium gepresenteerd en besproken. Daarbij is het van belang dat, met de bellenschermen, er geen sprake meer is van een kolkuitwisseling: het tijdig openen van de deur is alleen noodzakelijk om de zekerheid te hebben dat de deur open staat, en dat de aanloopmanoeuvre niet hoeft te worden afgebroken.

Het criterium voor sluiten na uitvaren en weer openen voor invaren zou als volgt geformuleerd kunnen worden (nader uit te werken):

- in geval van leeg terugschutten:
  - direct na uitvaren de deur sluiten
- indien de naderende scheepvaart verder weg is dan … (nog in te vullen):
  - direct na uitvaren de deur sluiten;

  de sluisdeur moet weer open staan als een naderend schip zich bevind:
  - in de binnenhaven: ter hoogte van de pont (de overgang van het Noordzeekanaal naar de Velserkom): ca. 1250 m van het oostelijke sluishoofd;
  - in de buitenhaven: afhankelijk van de scheepsafmetingen:

— voor een groot deel van de schepen: ter hoogte van het verbindingskanaal (d.w.z.: oostelijk van het Forteiland, maar nog niet in het Binnentoeleidingskanaal): eveneens ca. 1500 m van het westelijke sluishoofd.
— voor de grootste schepen, en afhankelijk van de windconditie: tussen de oude havenhoofden en het Forteiland, ca. 3000 m van het westelijke sluishoofd.

Op basis van het bovenstaande, in combinatie met de opmerkingen voor de aangenomen deur-opentijd van 50 minuten, lijkt de conclusie gerechtvaardigd dat het beperken van de deur-opentijden in de meeste gevallen goed mogelijk moet zijn, waarmee het toepassen van bellenschermen een realistische optie is. Bij harde wind met zeer grote schepen zal de deur-open tijd mogelijk langer zijn. De grootste onzekerheid is de deur-opentijd als meerdere schepen in dezelfde schutting meegaan. Daarover moet meer informatie op tafel komen.

Wat betreft het toepassen van bellenschermen zijn nog de volgende aspecten besproken:

- bellenschermen hebben als extra voordelen dat, door het beperken van de uitwisselingsstroming, de krachten op de schepen in de kolk bij het openen van de deur sterk gereduceerd worden;
- als er bellenschermen beschikbaar zijn *naast* een selectieve onttrekking, dan zou dat betekenen dat:
  - bij voldoende afvoer over het kanaal de bellenschermen alleen aan gaan ter reductie van de krachten op een schip in de kolk; als het vertrekkende schip is begonnen uit te varen mag het bellenscherm weer uit;
  - bij lage afvoer kunnen de bellenschermen worden ingezet ter beperking van de zoutindringing en moet het schutbedrijf worden gericht op het beperken van de deur-opentijden;
  - met een beperkte inzet van de bellenschermen zullen ook de energiekosten kleiner zijn dan bij inzet voor zoutbestrijding gedurende het hele jaar;
  - bellenschermen kunnen ook een oplossing zijn voor de situatie dat de selectieve onttrekking niet op tijd klaar zou zijn (bij oplevering van de nieuwe sluis);
- voor de constructie van de bellenschermen zal RVS <u>geen</u> goed materiaal zijn: ervaring in de sluiskolk leert dat RVS 316 na een jaar al zeer zwaar beschadigd is; gewoon staal met anodes houdt het langer vol; als alternatief kan gedacht worden aan kunststof of aan zeer exclusieve (en kostbare) RVS-soorten.

3. Het beperken van het aantal schuttingen per dag

Een opmerkelijke constatering in het meest recente rapport [4] wordt beschreven in paragraaf 3.3.3 van dat rapport. Kort samengevat komt die op het volgende neer:

> De verhoging van de zoutindringing is, bij gelijkblijvend aantal schuttingen, evenredig met de toename van het volume van de sluis. De toename van het volume wordt gedomineerd door de toename van het oppervlak, ongeveer met een factor twee. Om de zoutindringing niet te laten toenemen, kan ook het aantal schuttingen worden beperkt, ook ongeveer met een factor twee. Omdat het oppervlak ongeveer twee keer zo groot is, kunnen er per schutting ook meer schepen mee, dus het reduceren van het aantal schuttingen leidt niet evenredig tot een reductie van de capaciteit.

Het project IJmuiden heeft deze optie als laatste in de volgorde van voorkeur geplaatst, omdat zij ervan uitgaat dat dit veel weerstand bij partijen zal oproepen. Op basis van het bovenstaande is het echter de moeite waarde te bekijken benieuwd welke beperking goed haalbaar is, en wanneer het werkelijk tot problemen zou leiden.

Het beperken van het aantal schuttingen moet los gezien worden van de inzet van bellenschermen. Het is eigenlijk het een of het ander:

- als je uitgaat van de situatie *met* bellenschermen, moet primair de deur-opentijd beperkt blijven; als er voor het invaren van meerdere schepen in dezelfde schutting onevenredig veel tijd nodig is, zou het wel eens efficiënter kunnen zijn om meer schuttingen te doen, met steeds maar een schip in de kolk;
- als je uitgaat van de situatie *zonder* bellenschermen, ga je uit van een volledige uitwisseling van de kolk, en is de deur-opentijd niet meer van belang; door minder schuttingen te doen, met meer schepen per schutting, is het dus geen bezwaar als voor in- en uitvaren van die schepen de deur dus lang open staat.

De concrete vraag is dus: wat voor impact heeft het reduceren van het aantal schuttingen per dag op de operatie: op wachttijden, passagetijden, capaciteit, en uiteindelijk de operatie van de haven etc.. Daarbij speelt ook een rol dat, het beperken van het aantal schuttingen samen kan gaan met het schutten op vaste tijden, waardoor de scheepvaart weet waar het aan toe is, zich kan aanmelden voor een bepaalde schutting, de sluisleiding kan bekijken welke schepen er samen geschut kunnen worden, en de schepen zich op het juiste moment op de juiste positie bevinden voor een vlotte operatie. Hiermee kunnen ook kleine ‘konvooien’ ontstaat, waardoor met name grote schepen elkaar niet in de weg zitten in het kanaal of in de toegangsgeul vanaf zee.

Resultaat van het overleg:

Het reduceren van het aantal schuttingen per dag kan in twee varianten worden beschouwd:

- een ‘incidentele’ reductie op het moment dat door lage afvoer van water over het Noordzeekanaal de zoutindringing te hoog wordt;
- een ‘reguliere’ reductie, die wordt toegepast door het jaar heen: hiermee wordt bereikt dat, in de zomermaanden als de afvoer kleiner wordt, het zoutgehalte op het Noordzeekanaal langzamer op zal lopen, waardoor een ‘incidentele’ ingreep langer kan worden uitgesteld; het toepassen van een drempel zou hetzelfde effect hebben.

Een gereduceerd aantal zou bijvoorbeeld 8 schuttingen per etmaal kunnen zijn, in plaats van de genoemde 10,4. (Dat wil zeggen: 8 maal naar binnen en 8 maal naar buiten schutten). In combinatie met het schutten van meerdere schepen tegelijkertijd, lijkt dit bespreekbaar.

Een dergelijke reductie van het aantal schuttingen per dag, in combinatie met een planning van de schuttingen vooraf, zal in het begin wel weerstand oproepen bij de bedrijven in het havengebied, maar er zal uiteindelijk ook gewenning zijn. De impact moet beperkt blijven tot een verschuiving in de tijd van aankomst of vertrek van maximaal ongeveer een uur. Als de schepen vooraf weten wanneer ze hun schutting kunnen verwachten is een beperkte vertraging naar verwachting acceptabel.

De planning van de schuttingen zal terdege rekening moeten houden met aankomst en vertrek van cruise-schepen: deze varen op een zeer strakke planning en zijn van groot commercieel belang voor Amsterdam. Het betreft ca. 140 schepen die de stad in de zomermaanden aan doen.

Ook zal er rekening moeten worden gehouden met de drukte in het opvarende verkeer op zondagavond en het afvarende verkeer op vrijdagavond. Voor die situaties is te onderzoeken hoe de zoutindringing uitpakt voor achtereenvolgende schuttingen dezelfde kant op: het

uitvaren is snel gebeurd en de kolk krijgt dan niet de kans volledig uit te wisselen, waarmee, als er weer wordt ingevaren, een kleiner zouttransport optreedt: bij achter elkaar afvarend verkeer blijft de kolk relatief zoet, en bij achter elkaar opvarend verkeer blijft de kolk relatief zout.

4. Conclusies

Uit de bespreking kan geconcludeerd worden dat, gegeven dat een toename van de zoutindringing voorkomen zal moeten worden, geen van de hierboven behandelde maatregelen bij voorbaat wordt afgewezen: over alle maatregelen is in redelijkheid te praten.

Een drempel in het binnenhoofd kan een hoogte hebben van NAP -15,8 tot NAP -16,0 m om steeds voldoende kielspeling te hebben.

Als er, vanuit nautisch operationeel oogpunt, gekozen zou mogen worden tussen de twee belangrijkste maatregelen is er een duidelijke voorkeur voor de selectieve onttrekking boven de bellenschermen. Dit omdat de selectieve onttrekking geen impact heeft op de operatie.

Het toepassen van een selectieve onttrekking kan samengaan met de logische combinatie van het uitvoeren van schuttingen met meerdere schepen in een kolk en een kleiner aantal schuttingen per etmaal. Met de grotere afmetingen van de nieuwe kolk lijkt dit een ontwikkeling die zich voor een deel vanzelf zal voordoen.

Om een te hoog zoutgehalte te voorkomen, en daarmee een ingreep in het schutbedrijf zo lang mogelijk uit te stellen, zijn bij de toepassing van selectieve onttrekking ‘ondersteunende’ maatregelen van waarde. Een daarvan is de drempel. (Andere maatregelen van deze categorie, die op dit moment buiten de scope van het project vallen, zijn het beperken van de kolklengte tot 500 m tussen de deuren en het toepassen van een tussenhoofd.)

Een andere ondersteunende maatregel is de inzet van bellenschermen . Ook als deze niet in staat zouden zijn om zelfstandig de zoutindringing in voldoende mate te beperken, kunnen ze een waardevolle aanvulling zijn in tijden van droogte of bij een deel van de schuttingen (die schuttingen waarbij de deur-opentijd beperkt kan blijven). Het beperken van de deur-opentijden tot waarden onder de (top op heden aangenomen) 50 minuten zal in het algemeen, met één schip in de kolk, zeer goed mogelijk zijn. Voor schuttingen met meerdere schepen in de kolk zal de deur-opentijd langer worden; hoe veel langer is nog moeilijk te zeggen, en de impact ervan op de effectiviteit van het bellenscherm is daarom ook nog niet in te schatten.

Het inbouwen van bellenschermen is ook om andere redenen een waardevolle maatregel (zie aan het einde van Sectie 2.b: het beperken van de krachten op de schepen t.g.v. de dichtheidsstroming die optreed bij het openen van de deur). Als om die reden gekozen zou worden voor het aanbrengen van bellenschermen ligt het voor de hand om deze ook in te zetten voor het beperken van de zoutindringing: door het jaar heen, of alleen in tijden van lage afvoer. De inzet zal bepalend zijn voor de jaarlijkse energiekosten.

Daarnaast, al of niet in combinatie met bellenschermen, kan geprobeerd worden in tijden van droogte het aantal schuttingen te beperken en daarmee het aantal schepen per schutting te vergroten. Het verdelen van de schuttingen over de dag en de afstemming met de scheepvaart moet er daarbij voor zorgen dat de verschuiving in de tijd van aankomst of vertrek (zo mogelijk) beperkt kan blijven tot maximaal ongeveer een uur.

Om de zoutindringing goed in beeld te krijgen, zowel zonder maatregelen als bij de inzet van verschillende (combinaties van) maatregelen , moet de variatie in de schuttingen met het aanbod van de scheepvaart goed worden beschouwd. Dit vraagt om gedetailleerde uitvoer van simulaties van de afhandeling van het verkeer bij de sluizen. De simulaties door PMSS moeten hiertoe nog worden bestudeerd. Mogelijk is aanvullend werk nodig.

Referenties

[1] “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

[2] “Eindrapport Beperking zoutindringing Zijkanaal C -Spaarndam”, Geert Prinsen, Rob Uittenbogaard, 1209873-000, augustus 2014

[3] “Bellenschermsysteem nieuwe sluis IJmuiden, Voorlopige productomschrijving”, Otto Weiler, John Cornelisse, 1210752-000, Deltares, november 2014, Concept

[4] “Zoutindringing IJmuiden, Opgave, mogelijkheden, vraagstukken”, Otto Weiler, Arnout Bijlsma, 1220309-000, Deltares, maart 2015, Concept

[5] “Zoutindringing IJmuiden, Mogelijke Scope Fase 3”, Otto Weiler, 1220309-000-HYE-0006, mei 2014, Memo

[6] “Nieuwe Zeesluis IJmuiden, Hydraulisch onderzoek nivelleersysteem, Overzicht en stand van zaken oktober 2014”, Otto Weiler, 1209289-000, Deltares, november 2014

Kopie aan

deelnemers overleg:, Herman Anker, CNB, Frans de Haan, Haven Amsterdam, Tony Kroon, Haven Amsterdam, Gijs de Boer, Loodswezen, Rene van Essen, Loodswezen, Arnout Bijlsma, Deltares, Tom O'Mahoney, Deltares

B Reductie van de zoutindringing middels een drempel in het binnenhoofd

Memo

To
Otto Weiler

Date
11 September 2015

Number of pages
14

From
Annika Blom
Tom O'Mahoney

E-mail
annika.blom@deltares.nl
tom.omahoney@deltares.nl

Subject
Numerical simulations of a Lock exchange flow at the New Sea Lock of IJmuiden - investigation of sill effectiveness

---

1 Introduction

1.1 Background to the study

Deltares has been involved as an advisor of Rijkswaterstaat on the development of the New Sea Lock in IJmuiden. This involvement has included research on the hydraulic functioning of the levelling system and the consequences of the new lock for salt intrusion into the North Sea Canal.

After the start of operations at the new sea lock at IJmuiden the salt intrusion will increase. Measures can be taken in order to prevent or mitigate this salt intrusion. Rijkswaterstaat requires an overview of possible measures and advice on their relative effectiveness and cost effectiveness. In the context of this, Deltares has been asked to assess the effectiveness of one such measure, namely a salt intrusion sill at the lock head of the new sea lock. This memo reports some numerical simulations of lock exchange flow over salt intrusion sills. The lock exchange process is the most important salt intrusion mechanism at lock gates.

1.2 Principle of lock exchange flow

The principle of a lock exchange flow – a form of a density current – is straightforward. In the initial state two fluids of differing density are separated by a vertical barrier, in our case a lock gate. As the barrier is removed, that is to say the lock gate is opened, an exchange process begins owing to the differing hydrostatic pressure profiles on either side of the barrier. The denser fluid, salt water in our case, flows under the influence of gravity in the horizontal direction along the bottom of the canal or channel as an internal density wave. The less dense fluid flows in the opposite direction along the top of the channel, namely the water surface. This type of flow has been studied and described numerously in the scientific literature and is well understood [1-3]. A visualisation of the phenomenon is given in Figure 1.1.

A so –called Boussinesq density current occurs when the density difference between the two fluids is small (less than 10%). Situations in which saltwater and freshwater are being exchanged are clearly therefore a Boussinesq current. In this type of flow the propagation velocity of the density wave, the salt or fresh wedge, are theoretically identical. In a practical application it is clear that the resistance or friction at the top of a channel and at the bottom is

different. The free surface of the channel is well approximated by a slip boundary condition whereas at the channel bed a no-slip condition will be present and may have a significant roughness, causing bed friction. The fresh wedge in a lock exchange flow therefore travels quicker than the salt wedge. Experimental and analytical work shows that the velocity of the wedge, u_f, is directly correlated with the square root of the water depth, H, and the specific density, $g' = g\,\Delta\rho/\rho$, a function of the density difference between the two fluids. The constant of proportionality, c_1, is given in [2] and [3] as being well approximated by 0.5.

$$u_f \propto \sqrt{g'H}$$

Similarly, in [3] the depth of the density current is also proportional to the height, with a proportionality constant, c_2, varying experimentally from 0.35-0.5.

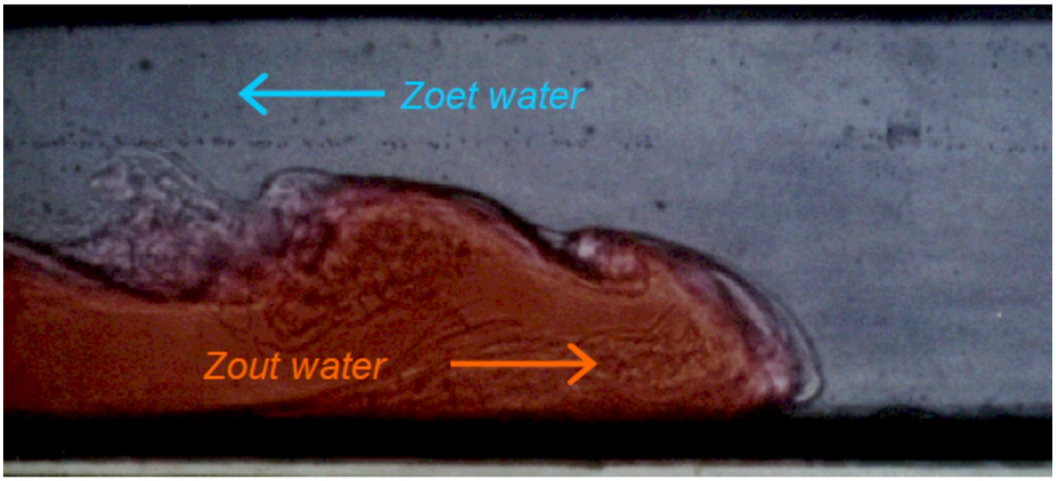


Figure 1.1 Propagation of the (red) denser fluid to the right over the bed, less visible is the return flow of the less dense fluid to the left over the salt wedge, caused by the open of the 'lock gate' at the left of the picture. (Laboratory setup)

Numerical simulations of the lock exchange flow are also numerous in the literature. The most detailed simulations have been made with Direct Numerical Simulation (DNS) where, in principle, all scales of turbulent eddies in the flow are explicitly resolved [4-6]. Such simulations are computationally very expensive and as such have been limited to small Reynolds number flows. In the current work the aim is to use a more practical approach, namely Reynolds Averaged Navier Stokes turbulence modelling where the mean field is sought and the effect of the turbulent fluctuation or eddies on the mean field is modelled. This approach has been shown to give an accurate prediction of the salt wedge front speed and therefore the global quantities of salt intrusion in time, even with a 2 dimensional vertical (2DV) simulation. A more detailed analysis of the turbulent structures in the flow is therefore not necessary.

1.3 Aim of the study

The aim of this study is to investigate with Computational Fluid Dynamics the effectiveness of different sill dimensions and approach harbour depths in reducing salt intrusion at a lock exchange by the New Sea Lock in IJmuiden. These simulations can form the basis of advice on the dimensioning of a proposed sill at the lock head.

1.4 Approach of the study

CFD simulations have been performed of lock exchange flows at a schematised lock head in IJmuiden. These simulations can provide quantitative comparisons of the salt intrusion for different lock head configurations but the models do not take into account other factors which are necessary to quantify the amount of salt intrusion during operation of the lock. The simulations can therefore be used to suggest which configuration is more effective and by how much but not to predict the eventual salt intrusion.

2 Setup of the model

The following section gives an overview of the design of the computational domain, the mesh, the physical models and boundary conditions used for the numerical simulation of the lock exchange flow as well as a summary of the selected cases.

For the modelling of the lock exchange flow the CFD package Star-CCM+ is used (version 10.02.010). Star CCM+ is an engineering software package for solving problems involving flow, heat transfer and stress. Different flows can be calculated, depending on the selected physical models and boundary conditions.

2.1 Geometry

As known from previous studies using a 2D simulation does not significantly affect the velocity of the salt tongue or the average of salt transport [4-6]. Thus for simulating the lock exchange the flow variation over the width of the domain can be neglected and a two-dimensional model can be used.

The geometry of the lock is based on the new sea lock in IJmuiden. The domain consists of an outer sill, a lock chamber, a raised area on the lock head (inner sill), and a part of the approach harbour. In some simulations a salt intrusion sill is placed on top of the fresh water side of the inner sill and the water level is constant over the whole domain. Figure 2.1 shows an overview of the computational domain.

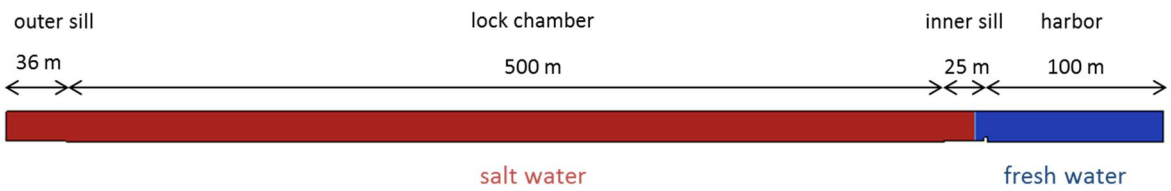


Figure 2.1 Overview of the geometry in Star CCM+. The left side of the domain displays the lock chamber filled with salt water (red) and the right side displays the approach harbour filled with fresh water (blue)

In Table 2.1 the heights in NAP [m] of the different geometry parts are given. The height of the salt intrusion sill as well as the depth of the approach is depending on the different cases.

Table 2.1 Heights in NAP [m] of the different geometry parts of the domain

Geometry parts	NAP [m]
Water level	-0.40
Outer sill	-17.25
Lock chamber	-17.75
Inner sill	-17.25
Salt intrusion sill	High variant: -16.25 Low variant: -15.00
Approach harbour	Current bottom level: -16.50 New bottom level: -18.00

The boundary between the fresh and salt water is situated at the downstream side of the lock gate. This assumes that the door would be filled with saltwater. Figure 2.2 shows an extract of the domain including the inner sill, the boundary of fresh and salt water and the salt intrusion sill.

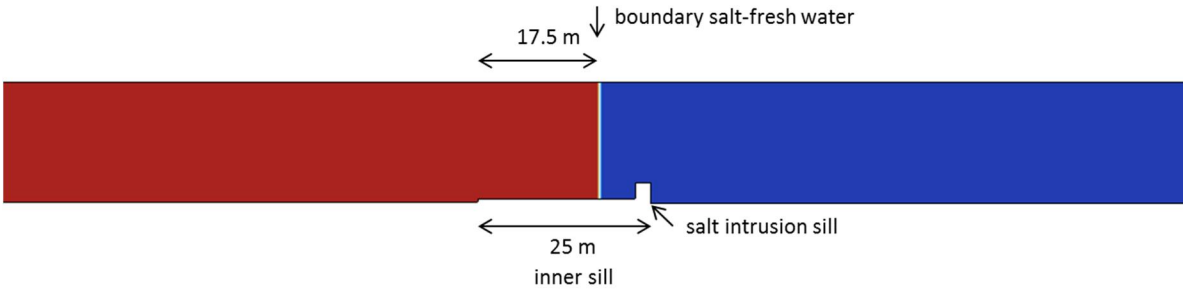


Figure 2.2 Extract of the domain which shows the inner sill, the boundary of fresh and salt water and the salt intrusion sill here with a height of 2.25 m

2.2 Mesh

The mesh was generated using the cell-splitting algorithm of the Star-CCM+ trimmer meshes. This gives a 2D mesh of square cells. The resulting grid consists of 171,193 cells ranging in size from 0.3 m to 0.1 m in the refinement regions. The refinement region is situated over the inner sill. That gives an amount of approximately 31 cells over the height of the sill (2.25m). Figure 2.3 shows an extract of the inner sill of the discretized representation of the computational domain.

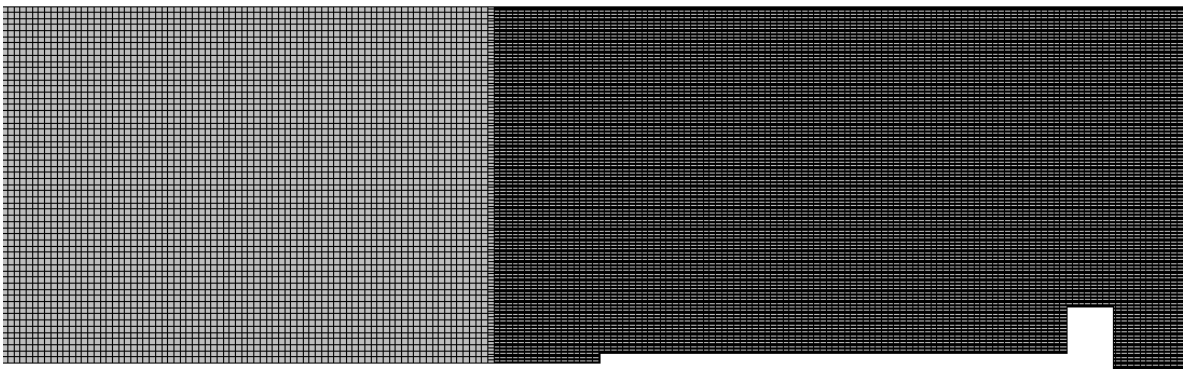


Figure 2.3 Extract of the discretized representation of the computational domain with a salt intrusion sill height of 2.25 m. Detail view near the inner sill

Simulations with different cell sizes of the mesh close to the approach harbour bottom were performed for several simulations and show between them an effect on the results of the propagation speed of the density current of approximately 1%. This feeds linearly into the results of the salt intrusion for times t < 1 hour. Subsequently the absolute values of the efficiency of the salt intrusion sills have an accuracy of 1%, that is to say an efficiency reported below of 4% implies a range 3-5%. At larger times the salt intrusion is not so dependent on the front speed and the accuracy of the results improves. More accurate simulations are possible but require a larger model with more mesh resolution.

2.3 Modelling saltwater and turbulence

For modelling the transport of salinity a scalar transport equation for salt concentration is used. The density p of the water is modelled as a function of salt content and depends on the concentration c_s of the scalar in that section. For modelling the initial fraction of salt and fresh water a field function for the salt scalar, that defines the fraction of salt water with a constant density on the left side of the lock gate and the fresh water on the right sight of the lock gate, is used. The applied state equation (no temperature variations) assumes that the density varies linearly:

$$p = 1007 + c_s \times 20 \;\; for \; 0 \leq c_s \; \leq I$$

Due to the fact that we are dealing with a gravity driven flow, the gravity is selected in the physical models and is set to -9.81m/s^2 in y direction. Owing to the presence of density differences a buoyancy term, proportional to the difference in density is added to the momentum equation at each cell.

For modelling the turbulence the “Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)” approach is used. The phenomenon of a lock exchange flow is unsteady (transient) so the unsteady formulation of the RANS equations is used. This gives time accurate information of the development of the flow. Within the RANS formulation the unsteady turbulent fluctuations are modelled as having an effect on the mean flow and not explicitly resolved. The specific model used for this purpose is a choice of the modeller. For this simulation the “Realizable K-Epsilon Two-Layer” turbulence model is selected. This has been shown to give good results for the front speed in 2D simulations [7]. It is a two-equation turbulence model in which transport equations are solved for the kinetic energy k and its dissipation rate ϵ.

2.4 Boundary conditions

The left wall and the bottom of the domain have a no-slip wall boundary condition so the fluid velocity at the wall equals zero. To represent the free surface on the upper side of the domain a slip boundary condition is used so there is no flow component perpendicular to the wall and no friction parallel to the wall. This is a good approximation of a free surface that is relatively stationary. To represent the free outflow condition a pressure outlet is set on the right side of the domain. This allows the flow to leave and enter the domain. To maintain the specified pressure at the outlet a hydrostatic pressure profile is specified. The scalar of salt concentration is set to be consistent with the pressure profile. Figure 2.4 shows the boundary conditions of the computational domain.

Figure 2.4 Boundary conditions of the computational domain in STAR-CCM+ Selection of cases

For obtaining a measure of the efficiency of the sill several more or less daily conditions are tested with and without a sill and different sill heights. The different cases are shown in the table below (Table 2.2). Initially, the density in the lock chamber is a uniform density with 1027 kg/m3 (36 psu) and the density in the approach harbour a uniform density with 1007 kg/m3 (10 psu).

The different sill heights result from the minimum depth below the keel (under-keel clearance). The draft of the design vessel (Bulk carrier) is 14.05 m in fresh water of 1000 kg/m3. This corresponds to a keel clearance of approximately 0.55 m for a salt intrusion sill with a height of 2.25 m, a keel clearance of 1.8 m for a salt intrusion sill with a height of 1m and a keel clearance of 1.55 m for a salt intrusion sill with a height of 1.25 m.

Table 2.2 Overview of the different runs for the simulation in STAR-CCM+

Run#	Sill height [m]	Level salt intrusion sill NAP [m]	Density profile	Level approach harbour NAP [m]
1	0	-17.25	Uniform	-18.00
2	1.00	-16.25	Uniform	-18.00
3	2.25	-15.00	Uniform	-18.00
4	2.25	-15.00	Uniform	-16.00
5	1.25	-16.00	Uniform	-17.00

3 Results

This section contains the results of the lock exchange simulations of the different cases. First the results are presented as contour plots of the salt front during the simulation. Thereafter the mass flow of salt in time is compared for the different cases and from this the efficiency of the sill is calculated with respect to the simulations without the salt intrusion sill. Thereafter the effective sill height depending on the mass flow out of the lock is estimated for the different cases.

3.1 Comparison of the different cases

In the figures below the results of the lock exchange simulations are shown. The figures show the density distribution of the simulation displayed at different moments in time. The comparison of salt intrusion between cases is made at t=50 min after starting the lock exchange (Table 3.1). The total simulation time is t=90 min. The development of salt intrusion in time is also plotted for each case.

Figure 3.1 shows Run1 the case without a sill, a uniform density in the approach harbour and the level of the approach harbour at NAP -18m. The solution at 80s shows the density current entering the approach harbour. The interface between fresh water (blue) and salt water (red)

shows the Kelvin-Helmholtz billows characteristic of shear mixing layers. At high Reynolds numbers the size of these billows is exaggerated by the 2D simulations. In 3D these vortices are more quickly dissipated by vortices that develop in the third dimension. However this does not significantly affect the speed of the front or the average salt transport across the front.

After 50 minutes the lock chamber is largely empty of salt with a layer of salt water close to the bed approximately of a depth equal to the inner sill height. The water in the lock is not at rest however. The lock exchange process has brought the entire volume of water in the lock chamber into movement which continues for some time. After 90 minutes there is even less salt water in the lock as the final layer of salt water at the bottom of the lock chamber is advected over the sill by the continued movement of the water after the lock exchange process.

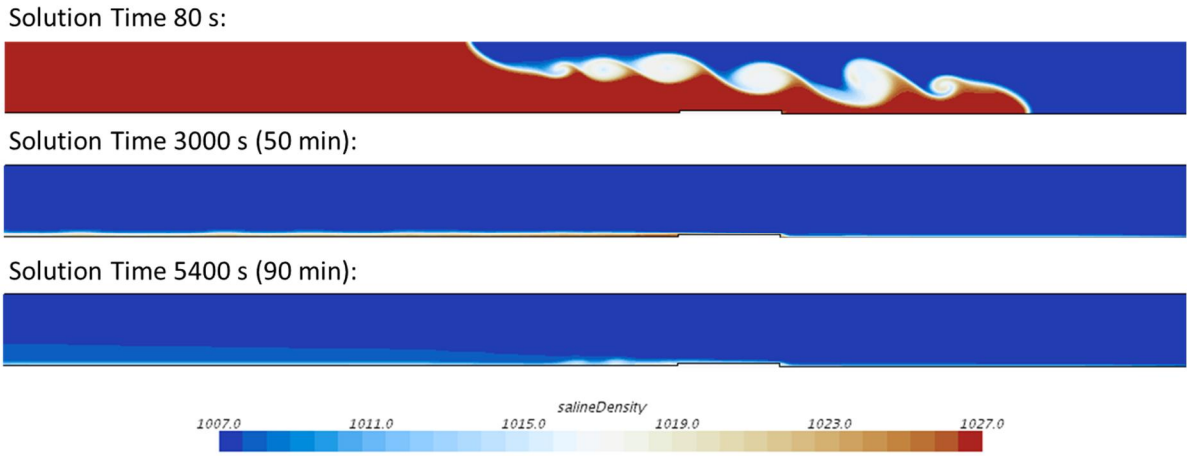


Figure 3.1 Density distribution without the salt intrusion sill and the level of the approach harbour at NAP -18 m (run1) at solution time t=80 s, 3000 s, 5400 s. The density in the lock chamber is 1027 kg/m3 and the density in the approach harbour is 1007 kg/m3.

Figure 3.2 shows Run3 the case with the highest sill height of 2.25 m, a uniform density in the approach harbour and the level of the approach harbour at NAP -18 m. At time 80 s the salt front is entering the lock but has not penetrated as far as in the case without the additional salt intrusion sill.

After 90 minutes there is still a significant layer of salt water in the lock chamber (not present in the case without a salt intrusion sill). The effect of the sill is therefore not only to slow down the salt front as seen in Figure 3.3 but also to reduce the capacity of the residual flow movements to carry the final layer of salt water out of the lock.

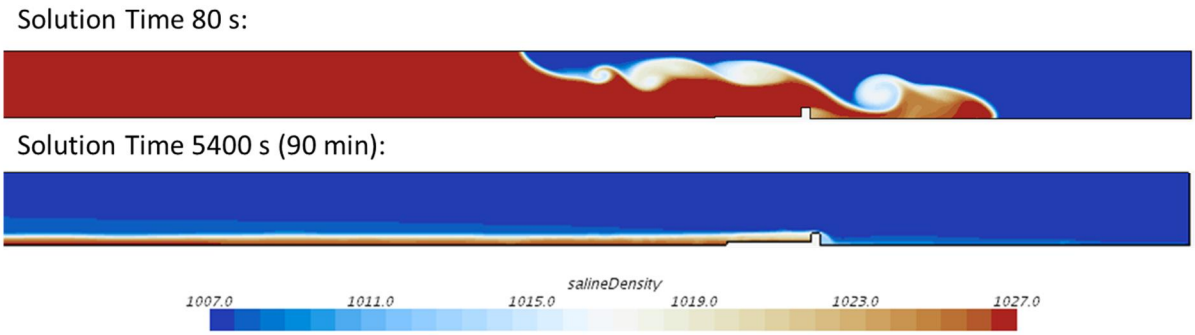


Figure 3.2 Density distribution with the salt intrusion sill with a height of 2.25 m and the level of the approach harbour at NAP -18 m (run3) in Star CCM+ at solution time t=80 s, 5400 s. The density in the lock chamber is 1027 kg/m3 and the density in the approach harbour is 1007 kg/m3.

Figure 3.3 shows Run1, Run2 and Run3 at 80s. This comparison shows the effect of the sill on the front speed of the salt tongue. On the one hand the salt tongue moves faster without the salt intrusion sill which can clearly be seen in the pictures. On the other hand the impact of the sill on the fresh water tongue along the free surface is less pronounced.

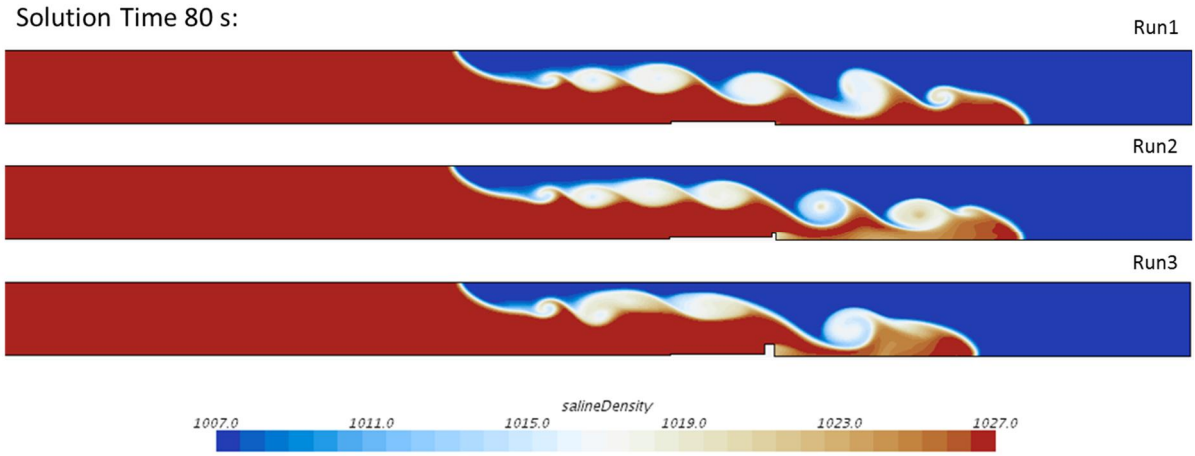


Figure 3.3 Density distribution with the level approach harbour at NAP -18 m for Run1, Run2 ,Run3 at solution time t=80 s. The density in the lock chamber is 1027 kg/m3 and the density in the approach harbour is 1007 kg/m3.

The efficiency of the sill is measured by monitoring the mass of salt in the lock chamber during the duration of the calculation. Initially the lock is filled with salt water. Using a surface integral over the lock chamber gives the total density in kg per meter width over solution time wherein the kg per meter width relates to the 2D simulation. Figure 3.4 shows the density in kg/m of Run1-Run5 in the lock chamber displayed against solution time.

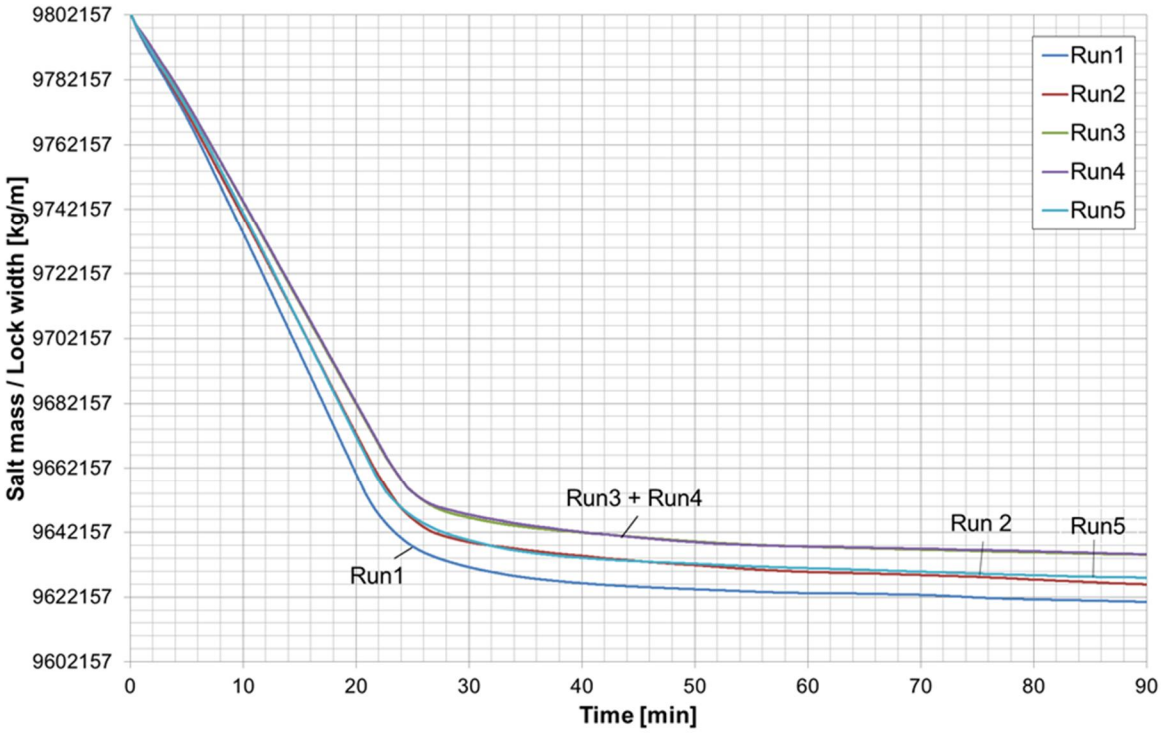


Figure 3.4 Mass per meter width [kg/m] in the lock chamber as a function over time of Run1, Run2, Run3, Run4, Run5

As can be seen from the graph the decrease in salt mass slows down from the smallest to the highest sill with the same bottom level of the approach harbour (Run1, 2, 3). Comparing Run3 with a bottom level of NAP-18 m to Run4 with a bottom level of NAP-16 m but with the same sill height there is almost no difference in the curves of the density. Because of that you would expect the density change of Run5 to be smaller than the density change of Run2. Comparing the results it can be seen, that there is only a small difference of the density change up to 50 min but it can also be seen, that at 90 min the curves behave like expected. There the density change is smaller with the sill height of 1.25 m compared to the sill height of 1 m.

Until Time=20-25 min depending on the Run the density decreases linearly with time, that is to say the front speed is constant. At this point the fresh water wedge has reflected off the end of the lock (at the left boundary of the domain, not shown in the figures) and has travelled back to the inner sill. The reflected flow forms a bore which travels towards the original lock head. The rate of salt transport out of the lock after this bore has crossed the inner sill is much lower (the gradient of the curve is less steep in this regime after approximately 25 min). The bore can be seen to approach the inner sill in Figure 3.5, Figure 3.6 and Figure 3.7. The decrease of the density depends on the amount of salt water which is flowing out of the lock chamber and the amount of fresh water which flows in to the lock chamber to replace the salt water.

Run1

Figure 3.5 Run1 salt water leaving the lock chamber at solution time t=1230 s (20.5 min)

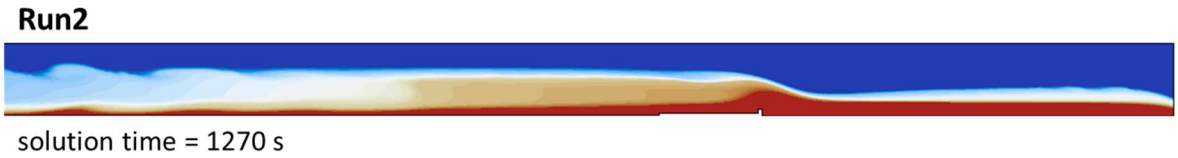


Figure 3.6 Run2 salt water leaving the lock chamber at solution time t=1270 s (21.17 min)

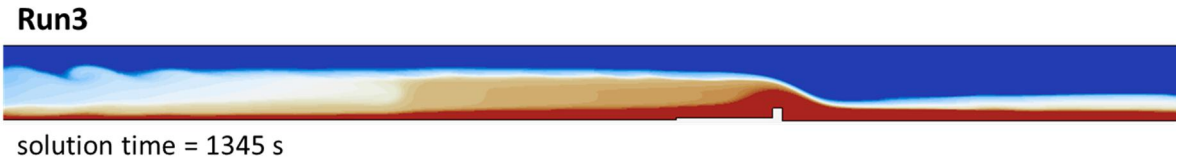


Figure 3.7 Run3 salt water leaving the lock chamber at solution time t=1345 s (22.42 min)

Figure 3.8 shows the salt intrusion into the approach harbour in tons as a function over time. This is derived from the loss of salt in the lock chamber. As seen in Figure 3.4 the amount of salt intrusion decreases from the smallest to the highest sill. That means that less change in density in the lock chamber results in less salt intrusion into the approach harbour. So the amount of salt that enters the harbour is the smallest with the tallest height of the salt intrusion sill of 2.25 m.

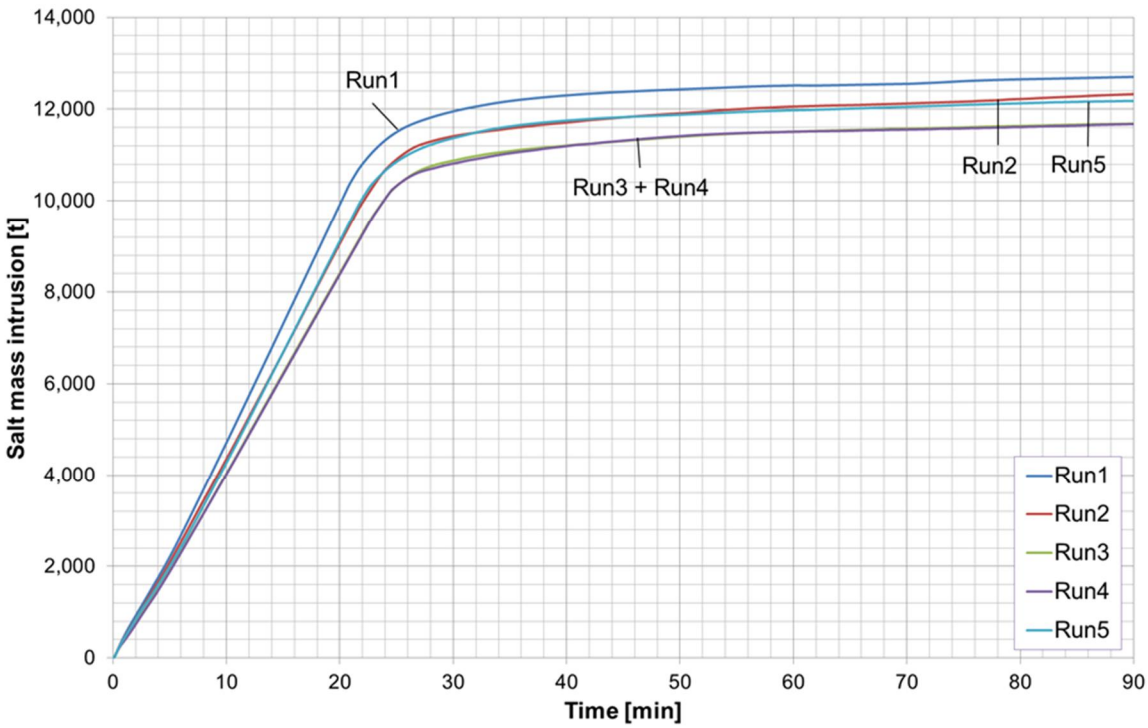


Figure 3.8 Salt intrusion in t per m lock width into the approach harbour as a function over time of Run1, Run2, Run3, Run4, Run5

A summary of the results, the amount of salt intrusion at t=50 min after the start of the lock exchange and the efficiency at t=50 min and t=90 min of the different cases are shown in Table 3.1. The efficiency is calculated in comparison with the simulation without a sill (Run1). As described above it can be seen that the efficiency of the 1.25 m sill (Run5) is not as high as expected compared to Run2 at t=50 min but keeping in account the efficiencies of Run2 and Run5 at t=90 min Run5 is 1.16% more efficient than Run2. Generally it can be seen that the efficiency is more stable over time with a higher salt intrusion sill.

Table 3.1 Comparison of the different cases and efficiency of the sill compared to Run1

Run#	Sill height [m]	Density Profile	Approach harbour NAP [m]	Change of Mass [kg/m] at t=50 min	Salt intrusion [t/m] at t= 50 min	Efficiency compared to run1 [%] at t=50 [min]	Efficiency compared to run1 [%] at t=90 [min]
1	0	Uniform	-18	177,604	12,432	0.0	0.0
2	1.00	Uniform	-18	170,134	11,910	4.2	3.0
3	2.25	Uniform	-18	162,853	11,400	8.3	8.0
4	2.25	Uniform	-16	163,055	11,414	8.2	8.1
5	1.25	Uniform	-17	169,704	11,879	4.4	4.1

Because of the unexpected similarity of the results of Run5 and Run2 at t=50 min the simulations were extended by another Run: Run6. Run6 has the same settings as Run2 but with a level of the approach harbour at NAP -17 m. This was deemed necessary to understand why Run5 does not give a greater reduction in salt intrusion than Run2 (the differences are instead small). Based on these results of this additional run the impact of the levelling of the approach harbour for smaller sills can be assessed. Figure 3.9 shows the salt intrusion of Run2, Run5 and the additional Run, Run6, into the approach harbour in tons as a function over time. It can be seen that the salt intrusion is the highest with the smallest sill and the approach harbour level at NAP-17 m. Comparing Run2 and Run6 it can be seen that the impact of the approach harbour level decreases with time.

A summary of the results of Run2, Run5 and Run6 are shown in Table 3.2. The efficiency is calculated in comparison with the simulation without a sill (Run1). As mentioned above it can be seen that Run5 has the most impact on the salt intrusion. When comparing the two simulations, Run2 and Run6, with a 1m sill the efficiencies at t=50 min differ by approximately 1.2 %. This can only be due to the difference in the level of the approach harbour. Even though for the higher sill the approach harbour had little to no effect (see Run3 and Run4 where the efficiency difference was 0.1%) for the smaller sills the approach harbour seems to have a small effect for the first hour. Later in the exchange process, at t=90 min, it can be seen that the effect of the levelling of the approach harbour decreases to 0.4 %.

Finally, a comparison can be made between Run5 and Run6 both with the same approach harbour depth of NAP -17m but with different sill heights. The 0.25m higher sill is 1.4 % more efficient at t= 50 min and 1.5 % more efficient at t = 90 min.

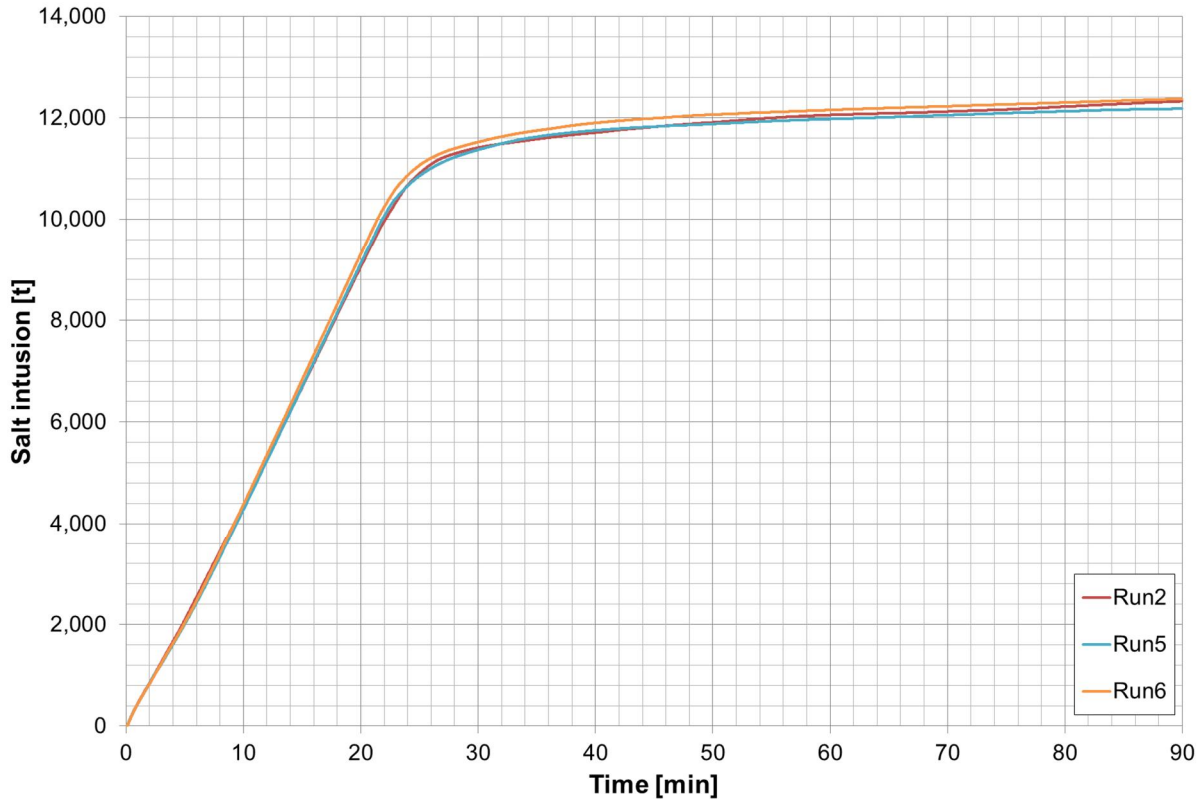


Figure 3.9 Salt intrusion in t per m lock width into the approach harbour as a function over time of Run2, Run5, Run6

Table 3.2 Comparison of Run2, Run5 and Run6 and efficiency of the sill compared to Run1

Run#	Sill height [m]	Density Profile	Approach harbour NAP [m]	Change of mass [kg/m] at t=50 min	Salt intrusion [t/m] at t= 50 min	Efficiency compared to run1 [%] at t=50 [min]	Efficiency compared to run1 [%] at t=90 [min]
2	1.00	Uniform	-18	170,147	11,910	4.2	3.0
5	1.25	Uniform	-17	169,704	11,879	4.4	4.1
6	1.00	Uniform	-17	172,338	12,063	3.0	2.6

3.2 Effective height of the salt intrusion sill

In section 1.2 the principle of the lock exchange flow was described. In that section the speed and height of the salt tongue were said to depend on the water depth, the shallower the channel the slower, shallower the salt tongue and consequently the less the salt intrusion occurs. The effect of the sill is to reduce the channel depth. However, in practice [8], the equivalent depth of the water is not reduced by the full height of the sill. The effectiveness of the salt intrusion sill can be calculated with reference to an effective sill height, that is to say the reduction in height/depth of the channel necessary to achieve the same reduction in salt intrusion. The assumption is made that the salt tongue with or without a sill is ‘similar’; the proportionality constants for front speed and height are identical. These constants can be

calculated from the specific mass flow figures already presented, and given that the mass flow can be expressed in terms of the salt tongue height h and its speed u_f gives

$$\dot{m} = \Delta p h u_f = c_3 \Delta p H_{eff}^{3/2} \sqrt{g'}$$

With $g' = g\Delta p/p$ and $c_3 = c_1 \times c_2$ with c_1 and c_2 defined as in section 1.2. Clearly in the case without a salt intrusion sill $H_{eff} = H$. From this case the constant c_3 can be determined and applied to the cases with a sill to give an H_{eff}. Table 3.3 shows the effectiveness of the sill height depending on the mass flow of the different cases.

The mass flow in kg per ms is calculated from the initial slope of the mass in the lock [kg/m] up to 1600 s (Figure 3.4). The effectiveness of the sill is calculated by comparing the actual sill height with the effective sill height.

The results show, that the sill with a height of 1 m (Run2) has an effectiveness of almost 100%, whereas the sills with the height of 2.25 m (Run3, Run4) have an effectiveness of approximately 80% and the sill with a height of 1.25m (Run5) has an effectiveness of approximately 75%, but still as shown in Table 3.3 the amount of salt intrusion decreases with a higher sill height even if the effectiveness of the sill is not as strong as with the 1 m sill.

Table 3.3 Effectiveness of the sill height [%] depending on the mass flow

Run#	Sill height [m]	Mass flow [kg/ms]	C3 [kg/m^3]	H_{eff} [m]	H [m]	Effective sill height [m]	Effectiveness [%]
1	0	118.13	0.2	16.85	16.85	0	0
2	1.00	107.84	0.2	15.86	15.85	0.99	99.4
3	2.25	100.17	0.2	15.10	14.60	1.75	78.0
4	2.25	99.84	0.2	15.06	14.60	1.79	79.5
5	1.25	108.52	0.2	15.92	15.60	0.93	74.16

4 Conclusions

In the current report the effectiveness of different sill dimensions and approach harbour depths in reducing salt intrusion at a lock exchange by the New Sea Lock in IJmuiden are estimated on the basis of 2D CFD simulations of lock exchange flows at a schematised lock head. From these simulations the following conclusions can be drawn:

1. The amount of salt intrusion is reduced by the presence of the salt intrusion sill. The higher the sill the greater the reduction, with a 1 m sill giving a reduction of approximately 4% over 50 minutes and the 2.25 m sill giving a reduction of 8% over the same period.
2. The level of the approach harbour, as long as it is beneath the inner sill height, has little to no effect on the reduction in salt intrusion as caused by the salt intrusion sill.
3. Although the effect of the sill is to reduce the effective water depth and therefore the depth over which the lock exchange process can occur the sill does not reduce the depth by the full sill height. With a 1 m sill the effectiveness is 100% and the water depth is

effectively reduced by 1 m. By a sill height of 2.25 m the effectiveness is 80% and the water depth is effectively reduced by 1.8 m.

4 The effect of the stratification of the density profile in the approach harbour has not been studied in these simulations but is expected to make the salt intrusion sills less effective. For this reason, and because other important factors are not taken into account in these simulations, the reduction in salt intrusion as presented here is meant for a comparison of the options and not as a prediction of the actual reduction in salt intrusion in the operational lock.

5 Simulations with different cell sizes of the mesh close to the approach harbour bottom were performed for several simulations and show between them an effect on the results of the propagation speed of the density current of approximately 1%. This feeds linearly into the results of the salt intrusion for times t< 1 hour. Subsequently the absolute values of the efficiency of the salt intrusion sills have an accuracy of 1%. At larger times the salt intrusion is not so dependent on the front speed and the accuracy of the results improves.

5 Literature

1 Lowe, R.J., Rottman, J. W., Linden, P. F., *The non-Boussinesq lock-exchange problem. Part 1. Theory and experiments.* Journal of Fluid Mechanics, 2005. **537**: p. 101-124.

2 Benjamin, T., J.,, *Gravity currents and related phenomenon.* Journal of Fluid Mechanics, 1968. **31**(02): p. 209-248.

3 Shin, J.O., S.B. Dalziel, and P.F. Linden, *Gravity currents produced by lock exchange.* Journal of Fluid Mechanics, 2004. **521**: p. 1-34.

4 Haertel, C., Meiburg, E., Necker, F., *Analysis and direct numerical simultion of the flow at a gravity-current head. Part 1. Flow topology and front speed for slip and no-slip boundaries.* Journal of Fluid Mechanics, 2000. **418**: p. 189-212.

5 Necker, F., Haertel, C., Kleiser, L., Meiburg, E., *High-resolution simulations of particle-driven gravity currents.* Internartional Journal of Multiphase Flow, 2002. **28**: p. 279-300.

6 Cantero, M.I., Lee, J. R., Balachandar, S., Garcia, M. H., *On the front-velocity of gravity currents.* Journal of Fluid Mechanics, 2007. **586**: p. 1-39.

7 Oldenziel, G., O'Mahoney, T. S. D.,*3D berekeningen van het schutproces*, Deltares rapport, 2015, 1209289-002-HYE-0001 (in Dutch)

8 Uittenbogaard, R. E., Cornelisse, J. M., *Ontwerpstudie en praktijkproef zoutlekbeperking Volkeraksluizen: beschrijving en resultaten praktijkproef Stevinsluis en evaluatie maatregelen Stevinsluis*, 2011, 1201226-005-ZKS-0007 (in Dutch)

Version	Date	Author	Initials	Review	Initials	Approval	Initials
1	Sep. 2015	A. Blom & T.S.D. O'Mahoney	6/2	R.E. Uittenbogaard		O.M. Weiler	

C Analyse van de prestaties van een selectieve onttrekking o.b.v. empirische relaties

Memo

Aan
Arnout Bijlsma, Otto Weiler

Datum	**Kenmerk**	**Aantal pagina's**
11 september 2015	1220309-000-HYE-0012	29
Van	**Doorkiesnummer**	**E-mail**
Tom O'Mahoney	+31(0)88335 7206	tom.omahoney@deltares.nl

Onderwerp
Verkennende empirische berekeningen van een zoutscherm - Nieuwe Zeesluis IJmuiden

---

1 Inleiding

Deltares is door Rijkswaterstaat gevraagd om adviezen te geven betreffende zoutindringing bij de nieuwe zeesluis IJmuiden. Dit memo bevat een analyse van de te verwachten prestaties van een zoutscherm aan de ingang van het Binnenspuikanaal als maatregel tegen zoutindringing op het Noordzeekanaal.

1.1 Achtergrond

De nieuwe zeesluis IJmuiden wordt aanzienlijk groter dan de huidige Noordersluis, wat leidt bij een gelijk aantal schuttingen per dag tot een toename van de zoutindringing op het Noordzeekanaal, en daarmee tot een toename van het zoutgehalte op het Noordzeekanaal. Het uitgangspunt van de stakeholders van het project is dat er geen verhoging in het zoutgehalte zou moeten plaatsvinden, daarom moeten er zoutlek beperkende maatregelen bij de sluis worden getroffen. Deltares heeft al een brede inventarisatie van de zoutproblematiek en mogelijke maatregelen gemaakt waarin een eerste selectie van kansrijke opties gemaakt is [1 en 4]. In dit project worden de verschillende kansrijke maatregelen verder uitgezocht.

De conclusies van berekeningen van een zoutlek model in [4] waren dat na het bouwen van de nieuwe sluis in IJmuiden en zonder het inzetten van extra zoutlek beperkende maatregelen de totale zoutlek met ongeveer 50% zal stijgen (van 940kg/s naar 1410kg/s). Ook in dat rapport werd een eerste schatting gemaakt van wat een zoutscherm zou moeten presteren om selectief onttrekking de gehele toename in ingedrongen zout volledig te laten doen terugdringen. Uitgerekend was dat met het aangenomen zoutprofiel op het kanaal in dat rapport, en met een jaargemiddeld debiet van 91m3/s de dichtheid van het afgevoerd water van 10,2 psu naar 15 psu zou moeten stijgen.

Als alleen bij laagwater gespuid wordt worden de getallen anders. Stel een spuivenster van 3 uur op een getijcyclus van 12 uur 24 minuten. Om in totaal evenveel water en zout af te voeren moet in die kortere tijd een 4,13 keer zo groot debiet worden afgevoerd, ca. 380 m^3/s, met 4,13 keer zoveel zout, ca. 5820 kg/s.

1.2 Samenvatting van maatregelen

Mogelijke maatregelen (genoemd in [4]) om het zoutgehalte op het Noordzeekanaal niet te laten stijgen zijn als volgt:

- Het terugvoeren van het zout
  - Door inzet van meer water, of
  - Door het verhogen van het zoutgehalte in het gespuide water:
    - Door selectief onttrekking, of
    - Door opmenging middels een bellenpluim

  Beiden in combinatie met een zoutvang
- Het beperken van zoutlek door maatregelen op de sluis te nemen, door bellenscherm of minder schuttingen

1.3 Doelstelling van dit memo

Het doel van dit memo is om op basis van de beschikbare literatuur over selectieve onttrekking, de prestatie van het huidige schets ontwerp te onderzoeken. De maatstaf van de prestatie zijn de hierboven al genoemde doelen:

- Doel 1: afgevoerde zoutmassa van 1410 kg/s met het jaargemiddeld debiet van 91 m3/s
- Doel 2: afgevoerde zoutmassa van 5820 kg/s alleen bij spuien met 380 m3/s over een spuivenster van 3 uur.

2 Hydraulica van een zoutscherm

2.1 Principe van een zoutscherm ten behoeve van selectieve onttrekking

Waar er sprake is van verzilting in een meer of kanaal kan een zoet-zoutgelaagheid optreden als gevolg van het dichtheidsverschil tussen zoetwater en zoutwater. In deze situatie is het mogelijk om het zoetwater en zoutwater van elkaar te scheiden met behulp van een zoutscherm; een verticale wand in het water met aan de bodem een spleetvormige opening. De spleet bevindt zich in de onderlaag waar, onder bepaalde condities, het zwaardere zoutwater afgezogen kan worden terwijl de bovenlaag van zoetwater achterblijft. Dit proces wordt ‘selectieve onttrekking’ genoemd.

Als een zoutscherm ontworpen moet worden zijn de volgende belangrijke aandachtspunten:

- Wat is het maximale af te zuigen debiet waarbij alleen het zoutwater in de onderlaag afgezogen wordt?
- Bij hogere debieten, hoeveel zoetwater wordt er meegezogen?

De dimensionering van een zoutscherm is afhankelijk van de totaal gewenst af te voeren zoutmassa bij bepaalde afzuigdebieten.

2.2 Schaalmodelonderzoek Stroomsluis Noordland

Een zoutscherm ten behoeve van het selectief onttrekken van zoutwater is in het verleden door het Waterloopkundig Laboratorium onderzocht. Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van de ontzilting van het “Zeeuwse Meer” dat zou ontstaan door afsluiting van de Oosterschelde volgens het oorspronkelijke Deltaplan. In een zogenoemd tweedimensionaal schaalmodelonderzoek [2] werden theoretische relaties, gebaseerd op Bernoulli’s vergelijking, getoetst voor een eenvoudige geometrie met zoutscherm. Na het toevoegen van een correctie factor kwamen de empirische relaties goed overeen met de theorie. Vervolgens werd een zogenoemd driedimensionaal onderzoek verricht om de prestatie van het zoutscherm te bepalen inclusief de invloed van het voorgestelde toestroomkanaal bij de stroomsluis.

De relaties die uit het eerste twee-dimensionele onderzoek komen kunnen ook bij andere toepassingen gebruikt worden. Die relaties betreffen het maximale af te zuigen debiet horende bij een gegeven spleethoogte van het zoutscherm, waarbij geen zoetwater afgevoerd wordt.

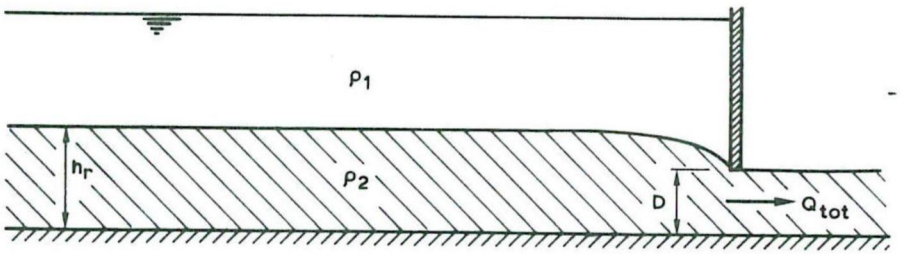
De relaties voor een gelaagd systeem (een zeer scherpe overgang tussen zout en zoet water) zijn als volgt (de relaties komen uit de samenvatting van [2] herschreven om de functie van debiet te geven):

$$q_c = \frac{D}{\gamma}\sqrt{2\varepsilon g(h_r - D)} \qquad \text{als } D > \frac{2}{3}h_r$$

$$q_c = \frac{2}{3\gamma}\sqrt{\frac{2\varepsilon g}{3}}\,h_r^{\frac{3}{2}} \qquad \text{als } D < \frac{2}{3}h_r$$ [1]

Waarbij:

q_c = het maximaal selectief af te zuigen debiet per m. breedte, [m^2/s]
D = de spleethoogte onder het zoutscherm, [m]
h_r = de hoogte van de zoutwaterlaag in het toestroomkanaal, [m]
ρ_2 = de dichtheid van de onderlaag, [kg/m^3]
ρ_1 = de dichtheid van de bovenlaag, [kg/m^3]
$\varepsilon = \Delta\rho/\rho_2 = (\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$, [-]
γ = is de correctie factor, [-]
g = zwaartekracht versnelling [m/s^2]



Figuur 2.1 Schematische weergave van de variabelen

Indien het meezuigen van zoetwater toegestaan wordt zodat er een percentage (n x 100%) zoetwater afgevoerd wordt mee het zoutwater worden de relaties aangepast als volgt:

$$q_c = \frac{D}{\gamma}\sqrt{2\varepsilon g(h_r - (1-n)D)} \qquad \text{als } D > \frac{2}{3}h_r\frac{1}{1-n}$$

$$q_c = \frac{2}{3\gamma(1-n)}\sqrt{\frac{2\varepsilon g}{3}}\,h_r^{\frac{3}{2}} \qquad \text{als } D < \frac{2}{3}h_r\frac{1}{1-n}$$

[1] Opmerkelijk is dat voor kleine spleethoogtes het af te zuigen debiet onafhankelijk is van D. In een bijgevoegde toelichting van het rapport [2] wordt in dit geval gewezen naar ander onderzoek door Prof. Schönfeld (zonder referentie) waarin de spleethoogte niet verwaarloosd wordt in deze gevallen, namelijk

$$q_c = \frac{2}{\gamma}\sqrt{2\varepsilon g}\left(\frac{1}{3}(h_r - D) + \frac{D}{3}\right)^{\frac{2}{3}} \qquad \text{als } D < \frac{2}{3}h_r$$

Ook wordt gemeld in de bijgevoegde toelichting dat de tweede relatie betere resultaten geeft.

Deze relaties kunnen gebruikt worden om de dimensies van het schetsontwerp voor IJmuiden te toetsen. Waarschijnlijk zullen de formules met een hogere D het meest van toepassing zijn, omdat gepoogd wordt om zo klein mogelijk verval over en belasting op de constructie te krijgen, waarvoor de snelheden onder het scherm beperkt moeten worden.

Voor het optimaal scherm wordt een D gezocht, bij elk gegeven debiet, waarbij de n minimaal is. Voor een vaste spleethoogte, D, kunne de relaties herschreven worden om expliciet de daaruit volgende n te geven.

In het rapport wordt een correctie factor van 1,25 aanbevolen. Voor het geval er sprake is van een meer geleidelijke overgang tussen de zoute onderlaag en de zoete bovenlaag worden de formules met een grotere correctie factor, γ_2, gecorrigeerd. De correctie factor in de vergelijkingen boven wordt in dit geval $\gamma = \gamma_0\gamma_2$, met γ_0 de oorspronkelijke factor van 1,25 en γ_2 de factor om voor de menglaag te corrigeren.

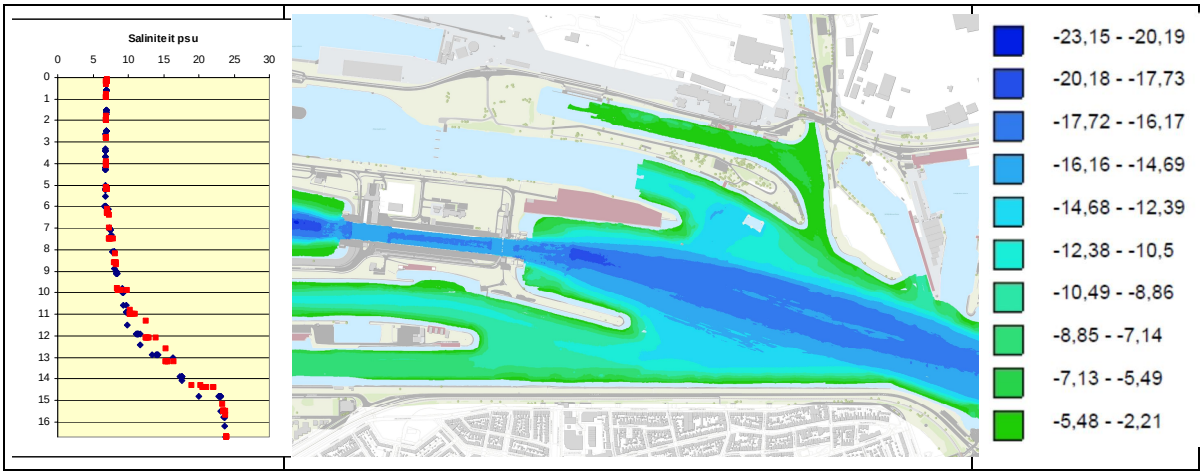
In het onderzoek van [2] wordt vanuit gegaan van een scherpe scheiding tussen bovenlaag en onderlaag. Toch ontstaat er in een aantal proeven, als gevolg van de stroming, een menglaag tussen de twee lagen. In die situaties moesten de formules aangepast worden om de empirische relatie te kunnen handhaven. De hoogte van de onderlaag, h_r, wordt verhoogd naar het niveau halverwege de menglaag, en de correctie factor wordt verhoogd. Een dikkere menglaag heeft tot gevolg dat het water boven de onderlaag makkelijker onder het scherm meegezogen wordt waarbij het maximale af te zuigen debiet kleiner wordt. In Tabel 3.1 wordt ook de toegepaste h_r in elk scenario gegeven. In elk geval is de correctie factor γ_2 zet op 1,4. Dit overeenkomt met een halvering van het dichtheidsverschil tussen menglaag en onderlaag (zie [2]).

3 Het zoutscherm bij het spuikanaal te IJmuiden

3.1 Het verticale saliniteitsprofiel: de referentie situatie voor IJmuiden

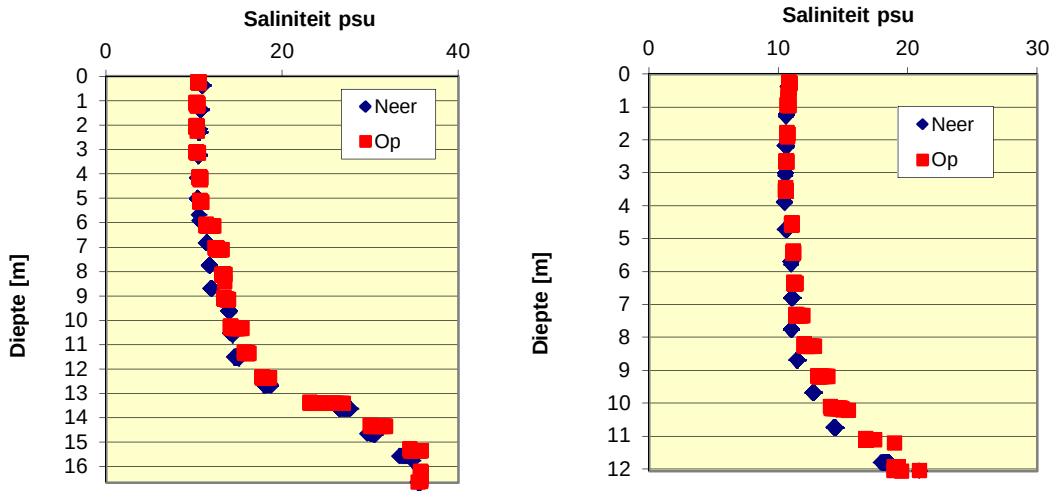
De metingen van zoutgehalte die in de eerste fasen van dit project zijn gehanteerd als representatief zijn metingen bij de Noordersluis, opgenomen in September 2011 (zie Figuur 3.1). In dit profiel is de saliniteit 7 psu tot een diepte van ca. 10 m (het kanaal peil is op -0,4m NAP). Vervolgens is er een menglaag van ongeveer 5 m tot een diepte van 15 m waarover de saliniteit oploopt tot 23psu. In de onderlaag is de saliniteit weer redelijk constant op 23 psu.

Deze situatie wordt in dit memo gebruikt als het Referentie Scenario, omdat de berekeningen in [4] van zoutlek en benodigde terugvoer van zout gedaan zijn met dit profiel als aanname.



Figuur 3.1 Links: zoutprofiel in binnenvoorhaven van de Noordersluis, september 2011, uit [3]; het dieptegemiddelde zoutgehalte van dit profiel bedraagt ca. 10,8 psu en loopt van ca. 7 psu naar ca. 23 psu. Midden en rechts: bodemligging binnen-voorhaven, [m] onder NAP (Bron: http://rws-noordholland.rwsgeoweb.nl/GeoWeb41/)

Andere dichtheidsprofielen zijn in recentere metingen verzameld. In December 2013 zijn dichtheidsprofielen bij IJmuiden ter hoogte van de Velserkom en bij de Noordersluis opgenomen. Het tweede profiel is van een meting die tot een diepte van 17,5 m is gemaakt. De profielen hebben een hoger zoutgehalte in de bovenlaag dan de eerdere uitgevoerde metingen (10 psu tegenover 7 psu). Ook bij de Noordersluis is het zoutgehalte in de onderlaag aanzienlijk hoger (35 psu tegenover 23 psu).

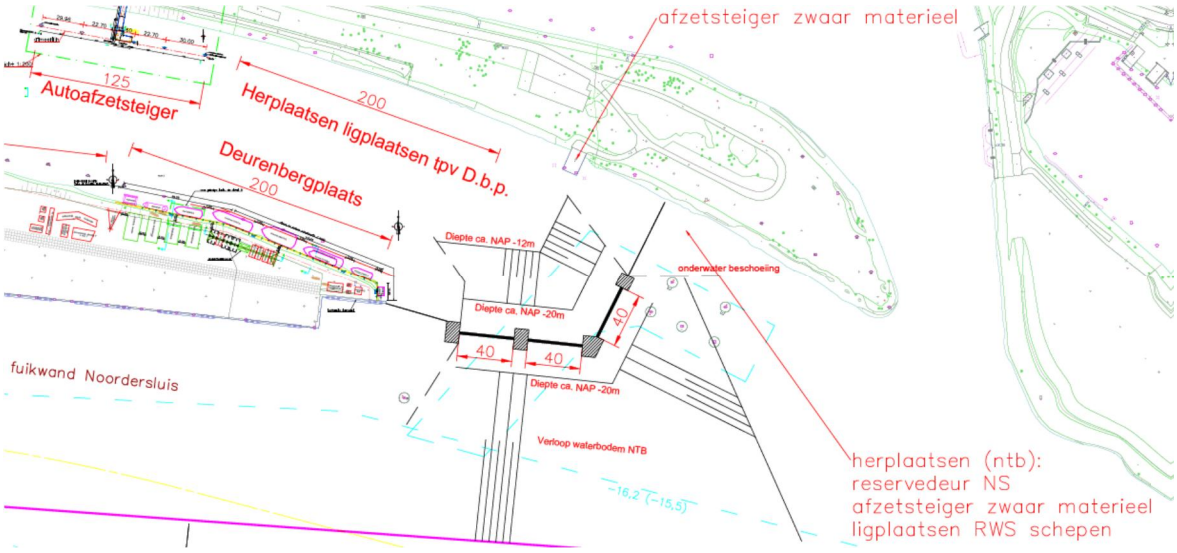


Figuur 3.2 Links: zoutprofiel in IJmuiden ter hoogte van de Velserkom, december 2013, het profiel loopt van 10 psu naar circa 35 psu; Rechts: zoutprofiel in binnenvoorhaven van de Noordersluis vlakbij de sluis, december 2013, het profiel loopt van ca. 10 psu naar ca. 20 psu.

3.2 Schematisatie van de toekomstige situatie te IJmuiden

Hier wordt de schematisatie van de situatie na aanleg van de Nieuwe Zeesluis IJmuiden met zoutscherm zoals hier aangenomen toegelicht. Door Deltares is een eerste schatting afgegeven van de benodigde afmetingen voor de selectieve onttrekking, namelijk 3 openingen van 40 m breed op een bodemdiepte van -20 m NAP en een spleethoogte van 4 m. Deze

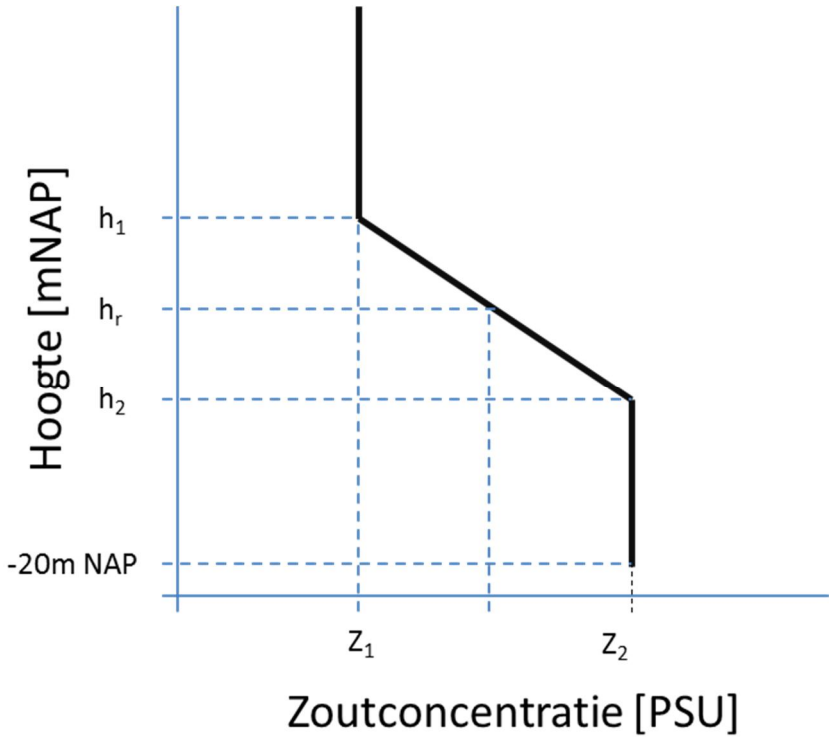
constructie is, in opdracht van RWS, door Ingenieursbureau Rotterdam ingetekend op een overzichtstekening van het sluiscomplex (zie Figuur 3.3).



Figuur 3.3 Schets van de locatie van een mogelijk zoutscherm bij de ingang tot het spuikanaal aan de kanaalzijde op het sluis complex in IJmuiden. De totale breedte is 120m in een verdieping tot -20m NAP (bron: Tekening ZTIJ-2015-SO-01 Selectieve onttrekking 2015-06-03)

Het zoutscherm is in een lokale verdieping voor het spuikanaal geplaatst. De kanaalbodem op dit punt is -20 m NAP. Stroomafwaarts in het spuikanaal is de bodem op -12 m NAP. Stroomopwaarts van het zoutscherm loopt de bodem op tot de toekomstige diepte van het kanaal en navigatiegeul bij het invaarkanaal van het sluiscomplex.

Op basis van dit ontwerp kan het dichtheidsprofiel op het toestroomkanaal van het zoutscherm zoals in Figuur 3.4 geschematiseerd worden. De referentie situatie van [4] en Figuur 3.1 betreft een bovenlaag van constante dichtheid tot een hoogte boven de bodem van h_1; een menglaag waar de dichtheid oploopt tot de dichtheid in de onderlaag bij een hoogte boven de bodem van h_2; en, een onderlaag met een constante dichtheid tot aan de bodem. In de aangenomen schematisatie ligt de bodem op -20m NAP zoals in het schetsontwerp (Figuur 3.3).

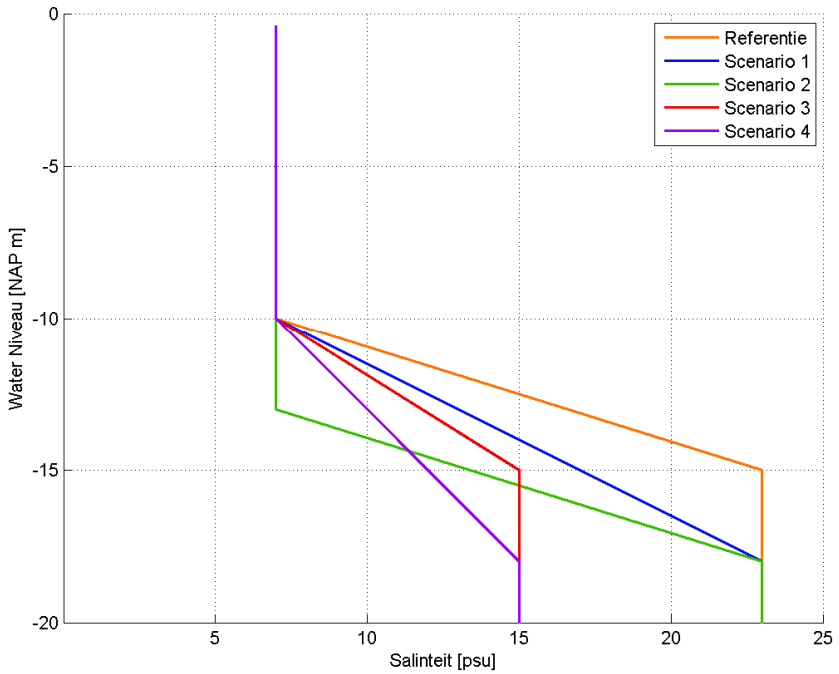


Figuur 3.4 Schematisatie van een dichtheidsprofiel met menglaag zoals op het kanaal in IJmuiden

Zowel het Referentie Scenario als andere mogelijke scenario's worden bekeken, deze laatste om in kaart te brengen wat voor mogelijk verlies in prestatie te verwachten is als de situatie op het kanaal verandert als gevolg van de operatie van het zoutscherm of door oorzaken daarbuiten. De Scenario's 1 en 2 zijn bedoeld om een situatie waarbij minder zoutwater beschikbaar is na te bootsen, dat wil zeggen dat de dichtheid in de onderlaag dezelfde blijft maar de hoogte van de onderlaag kleiner wordt. In Scenario 2 wordt zowel de hoogte van de onderlaag als de bovenlaag verkleind. Deze scenario's zouden kunnen optreden nadat bij het Referentie Scenario onttrokken wordt als de toevoer van zoutwater beperkt is. Scenario's 3 en 4 zijn bedoeld om een verkenning te maken van de prestatie van een zoutscherm als er minder zout zit in de onderlaag (bijvoorbeeld omdat de verzilting op het hele kanaal teruggedrongen wordt).

Tabel 3.1 De te beschouwen scenario's van verschillende dichtheidsprofielen die kunnen optreden bij veranderende omstandigheden op het kanaal

Scenario	h_1 [mNAP]	h_2 [mNAP]	Z_1 [psu]	Z_2 [psu]	h_r [m]
Referentie	-10	-15	7	23	7,5
1	-10	-18	7	23	6,0
2	-13	-18	7	23	4,5
3	-10	-15	7	15	7,5
4	-10	-18	7	15	6,0



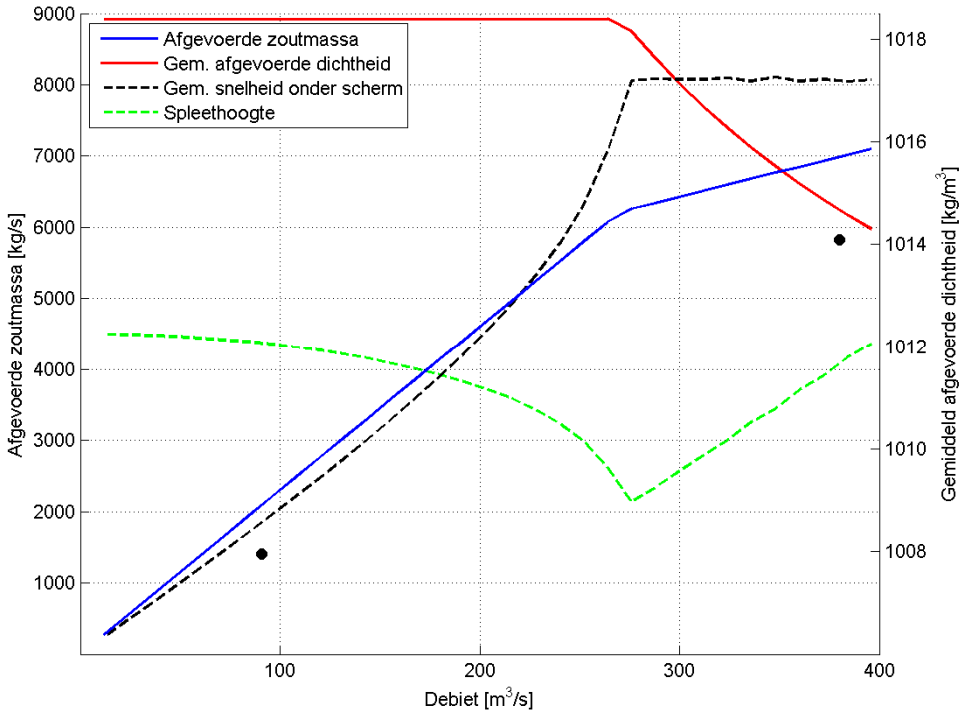
Figuur 3.5 Schematische weergave van de dichtheidsprofielen voor de verschillende scenario's

In Tabel 3.1 worden de parameters van de dichtheidsprofielen van de te beschouwen scenario's weergegeven.

3.3 Resultaten met een instelbaar zoutscherm

In de komende sectie worden de empirische relaties van [2] toegepast op de geschematiseerde situatie bij IJmuiden zoals hierboven beschreven. De volgende aannames worden gebruikt:

- In eerste instantie wordt uit gegaan van een zoutscherm dat instelbaar is naar de optimale hoogte, zodat bij elk debiet de maximale hoeveelheid zout afgevoerd kan worden.
- Waar meerdere waardes voor de spleethoogte leiden tot hetzelfde resultaat wordt daarvan de grootste spleethoogte toegepast om de belasting op het scherm en het verval over het scherm te beperken. Deze formules gelden volgens [2] alleen bij $D > \frac{2}{3} h_r \frac{1}{1-n}$



Figuur 3.6 Prestatie plot van een optimaal zoutscherm. Linker as: de totale afgevoerde zoutmassa; rechter as: de gemiddelde dichtheid van de stroming onder het scherm. De zwarte cirkels zijn Doel 1 en Doel 2 voor de zoutmassa

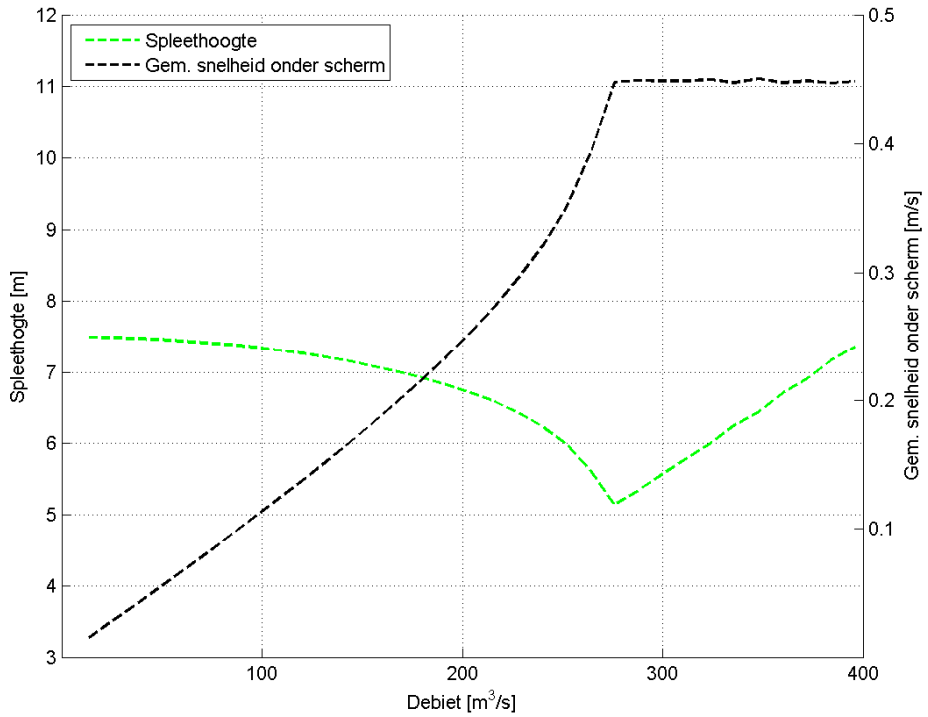
De resultaten in Figuur 3.6 gelden voor het saliniteitsprofiel van het Referentie Scenario en de afmetingen van het schetsontwerp (120m breed op een diepte van -20 m NAP). Bij verschillende debieten zijn de formules voor een grote spleethoogte toegepast. De doorgetrokken lijnen zijn de curven van afgevoerde zoutmassa en gemiddelde dichtheid van het afgezogen water. De stippellijnen zijn de curven van spleethoogte en gemiddelde snelheid onder het scherm. Er zijn voor de stippellijnen geen assen weergegeven; die assen zijn in Figuur 3.7 te zien.

Figuur 3.6 laat zien dat de optimale schuifhoogte varieert met het debiet tussen ca. 7,5 m en 5,1 m. De snelheid loopt hierbij op naar ca. 0,45 m/s. Figuur 3.5 laat zien dat bij deze optimale schuifhoogte de afgevoerde zoutmassa blijft stijgen met het debiet. Met het aangenomen dichtheidsprofiel van het Referentie Scenario kan tot een debiet van ongeveer 270 m3/s volledig selectief onttrokken worden. De gemiddelde dichtheid van het afgevoerd water is dan gelijk aan de dichtheid van de onderlaag.

Bij hogere debieten wordt zoetwater, in toenemende proportie, meegezogen, waardoor de gemiddelde dichtheid afneemt. Omdat het water in de bovenlaag nog steeds brak is, blijft de afgevoerde zoutmassa toenemen met toenemend debiet. Er zijn dus duidelijk twee regimes in de plot. In de eerste regime met lagere debieten kan er volledig selectief worden onttrokken mits de spleet van het scherm geknepen wordt bij hogere debieten. In het tweede regime moet de schuif worden opgetild met een toenemend debiet om de snelheid onder de schuif beperkt te houden.

Duidelijk is dat bij dit saliniteitsprofiel het doel van een afgevoerde saliniteit van minstens 15 psu, (of een dichtheid van 1012 kg/m3 of een zouttransport van 1410 kg/s) bij een jaargemiddeld debiet van 91 kg/s (zoals uitgerekend in [4]) haalbaar is met de dimensies (afmetingen van de openingen) zoals nu aangenomen. Die dichtheid of hoger wordt in dit scenario gehaald tot een debiet van minstens 400 m3/s.

Als alleen bij laagwater gespuid wordt worden de getallen anders. Stel een spuivenster van 3 uur op een getijcyclus van 12 uur 24 minuten. Om in totaal evenveel water en zout af te voeren moet in die kortere tijd een 4,13 keer zo groot debiet worden afgevoerd, ca. 380 m^3/s, met 4,13 keer zoveel zout, ca. 5820 kg/s. Ook dit punt ligt onder de blauwe curve. Ook bij dit hogere debiet wordt dus voldoende zout afgevoerd, aangenomen dat het dichtheidsprofiel onveranderd blijft.



Figuur 3.7 Stromingseigenschappen van een optimaal zoutscherm. Linker as: de optimale spleethoogte; rechter as de gemiddelde snelheid van het afgezogen water onder het scherm

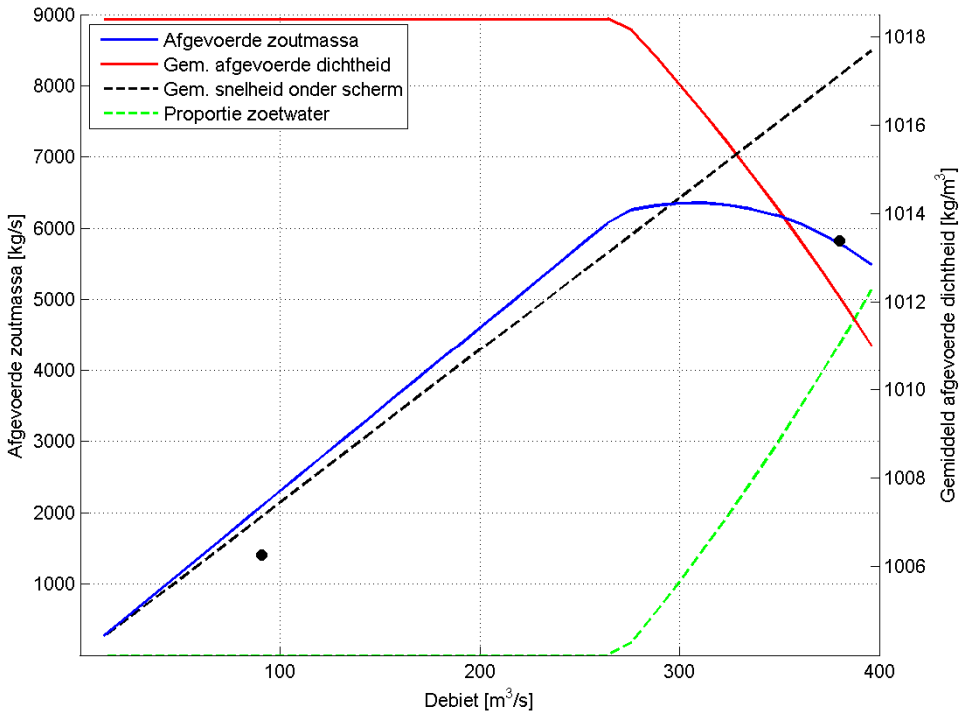
Plotjes van de resultaten voor Scenario's 1 t/m 4 zijn in de appendix. Later in deze sectie wordt een vergelijking gemaakt tussen alle scenario's.

3.4 Resultaten met een vast zoutscherm

Om de constructie en de bediening van de schuiven eenvoudig te houden zou het gunstig zijn om te werken met een vaste schuifhoogte. In deze sectie wordt uitgewerkt in welke mate de prestaties daardoor zouden verslechteren.

De volgende aannames worden gebruikt:

- Er wordt vanuit gegaan van een zoutscherm met een spleet van 5m hoogte. Deze hoogte is gekozen om bij de Referentie Scenario altijd een voldoende kleine spleet te geven om tenminste bij lagere debieten volledig selectief te kunnen onttrekken. De werking van het scherm zal dus niet optimaal worden bij hogere debieten.
- Een grote spleethoogte wordt toegepast om de belasting op het scherm en verval over het scherm te beperken. Deze formules gelden volgens [2] alleen bij $D > \frac{2}{3} h_r \frac{1}{1-n}$



Figuur 3.8 Prestatie plot van een zoutscherm met 5m vaste spleethoogte. Linker as: de totale afgevoerde zoutmassa; rechter as: de gemiddelde dichtheid van de stroming onder het scherm.

De resultaten in Figuur 3.8 zijn voor het Referentie Scenario. Bij verschillende debieten zijn de formules voor een grote spleethoogte toegepast. De doorgetrokken lijnen zijn de curven van afgevoerde zoutmassa en gemiddelde dichtheid van het afgezogen water. De stippellijnen zijn de curven van porportie afgevoerd zoutwater en gemiddelde snelheid onder het scherm; deze curven zijn ook afgebeeld in Figuur 3.9. Figuur 3.8 laat zien dat de snelheid lineair toeneemt met het debiet. Door deze grotere snelheid neemt, vanaf een bepaalde grenswaarde, het meegenomen zoetwater vrij snel toe, en daarmee neemt de afgevoerde zoutmassa af.

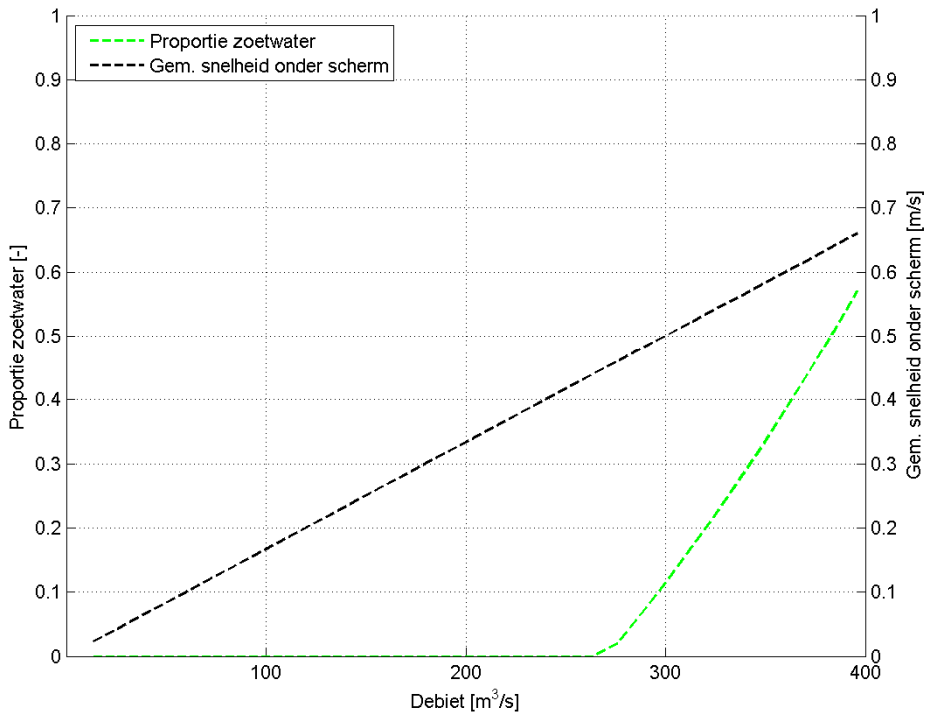
Plotjes van de resultaten voor Scenario's 1 t/m 4 zijn opgenomen in de appendix. Later in deze sectie wordt een vergelijking gemaakt tussen alle scenario's.

De eerste opmerking is gericht op de geldigheid van deze aanpak in het geval van een vaste spleethoogte. De formules voor een grote spleethoogte zijn geldig in de range $D > \frac{2}{3} h_r \frac{1}{1-n}$. Als de debiet stijgt wordt het niet mogelijk, net zoals bij een optimaal zoutscherm, volledig selectief te onttrekken en er wordt zoetwater meegezogen. De proportie zoetwater, n, stijgt, waardoor de benodigde spleethoogte voor de relatie zoals hier gebruikt te gelden ook stijgt. Afhankelijk

van het scenario, zal de formules zoals hier gebruikt niet meer geldig zijn bij hogere n. In enkele scenario's wordt een situatie bereikt bij een debiet lager dan 400m3/s waardoor de proportie meegezogen zoetwater 100% bedraagt. Voor de formules geldig te zijn moet dan een oneindig hoge spleet toegepast worden.

De formules blijven geldig in elk geval zolang volledig selectief mag worden onttrokken. In dit geval is de gemiddelde afgevoerde dichtheid gelijk aan de dichtheid in de onderlaag. Als zoetwater meegezogen wordt daalt de gemiddelde afgevoerde dichtheid. Bij een niet optimaal scherm is de daling zodanig groot dat de totaal afgevoerde zoutmassa ook daalt. Dit is niet het geval bij een optimaal scherm waar vanwege het brak zoutgehalte in de bovenlaag de afgevoerde zoutmassa blijft stijgen met stijgend debiet. Als het zoutscherm niet optimaal is kan een verhoogd debiet leiden tot een afname in de totale afgevoerde zoutmassa omdat proportionele meer zoutwater meegezogen wordt.

Toch blijft de prestatie van een zoutscherm hoog, in vergelijking tot de benodigde zoutafvoer uit [4]. Volledig selectief onttrekking wordt weer tot een debiet van 270 m3/s bereikt. De afname met toenemend debiet is sterker in dit geval dan in het optimaal geval maar de afgevoerde dichtheid blijft boven het benodigde niveau tot bijna 400 m3/s. Geconcludeerd kan worden dat, voor het Referentie Scenario, een vaste scherm geen onacceptabel verlies in prestatie zal opleveren.



Figuur 3.9 Stromingseigenschappen van een zoutscherm met 5m vaste spleethoogte. Linker as: de zoetwater dat meegezogen wordt; rechter as de gemiddelde snelheid van het afgezogen water onder het scherm

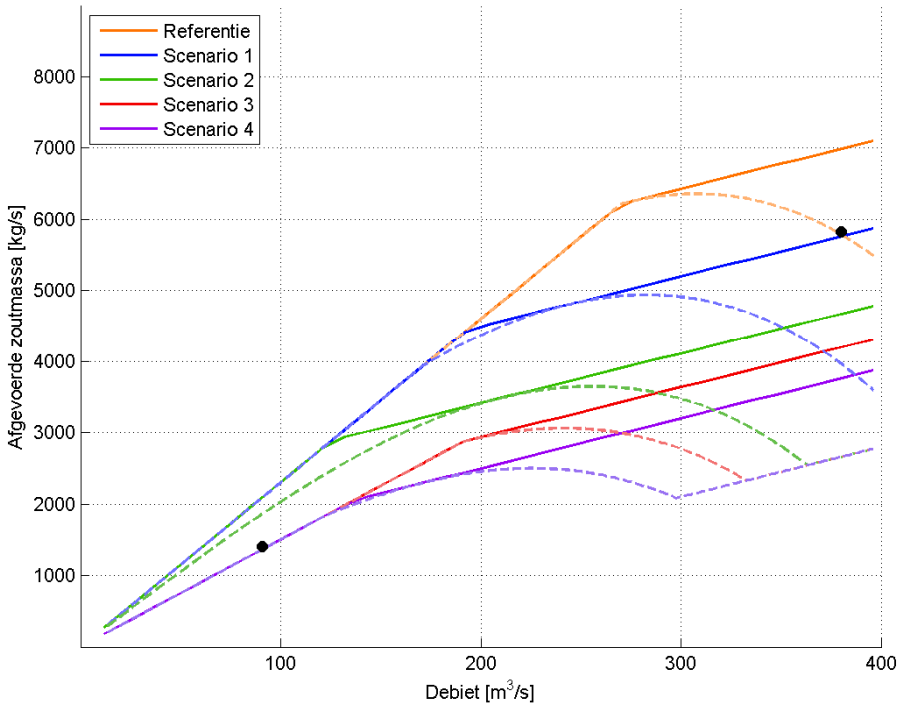
3.5 Vergelijking van de verschillende scenario's

In de komende sectie worden de resultaten van de verschillende scenario's met elkaar vergeleken. Het verlies in prestatie van het zoutscherm bij een vaste positie van het scherm wordt ook gepresenteerd.

3.5.1 Afgevoerde zoutmassa

In Figuur 3.10 wordt de afgevoerde zoutmassa uitgezet tegen debiet. Zowel het geval met een optimale spleethoogte per debiet (doorgetrokken lijnen) en het geval met een vaste spleethoogte van 5,0 m (stippellijnen) zijn weergegeven.

Strikt genomen zijn de formules die hiervoor gebruikt zijn tot een range van $D > \frac{2}{3} h_r \frac{1}{1-n}$. Bij een optimaal scherm is de spleet altijd groot genoeg en zijn de formules altijd van toepassing. Bij een vaste spleethoogte, komt er een punt bij hoog debiet waar te veel zoetwater wordt meegezogen. Dit punt is in elke scenario het raakpunt tussen de curven van optimaal scherm en scherm met vaste spleethoogte. Er blijft dus enige onzekerheid in het geval van een vaste spleethoogte over de dalende prestatie bij hogere debieten. In het onderzoek in [2] zijn de formules voor $D < \frac{2}{3} h_r \frac{1}{1-n}$ omstreden (zie 2.2). Inzicht in de prestaties van een vast scherm bij deze omstandigheden kan door middel van Computational Fluid Dynamics simulaties onderzocht worden.



Figuur 3.10 Vergelijking van de scenario's: afgevoerde zoutmassa. Doorgetrokken lijnen zijn van een zoutscherm met optimale spleethoogte, stippellijnen zijn van een zoutscherm met 5m vaste spleethoogte

De benodigde afvoer van zout is weer afgebeeld voor twee punten: een gemiddelde waarde van 1410 kg/s met een jaargemiddeld debiet van 91 m3/s, en de hogere waarde van 5830 kg/s bij een debiet van 380 m3/s voor de situatie dat het zelfde volume wordt afgevoerd in een spuivenster van 3 uur per getijcyclus.

De doelstelling voor het gemiddelde debiet wordt in het Referentie Scenario en Scenario's 1 en 2 gehaald. Er is in die scenario's voldoende zout beschikbaar en het scherm presteert goed in die range van debieten. De benodigde afvoer van zout wordt net niet gehaald in Scenario's 3 en 4 omdat, hoewel het zoutscherm goed presteert (in feit optimaal), er niet voldoende geconcentreerde zout beschikbaar is in het saliniteitsprofiel om de gevraagde zoutmassa af te voeren.

De doelstelling voor het spuien in een spuivenster van 3 uur wordt alleen gehaald voor het Referentie Scenario. Bij het dichtheidsprofiel van Scenario 1 wordt de doelstelling alleen gehaald bij de optimale schuifpositie. Voor de andere scenario's wordt deze doelstelling niet gehaald en zal dus het spuien moeten worden uitgesmeerd over een langere periode, zodat met een lager debiet kan worden gespuid. Een lager debiet per meter kan ook bereikt worden door een grotere totale breedte van de constructie, dus groter dan de nu aangenomen 120m (drie openingen van 40m).

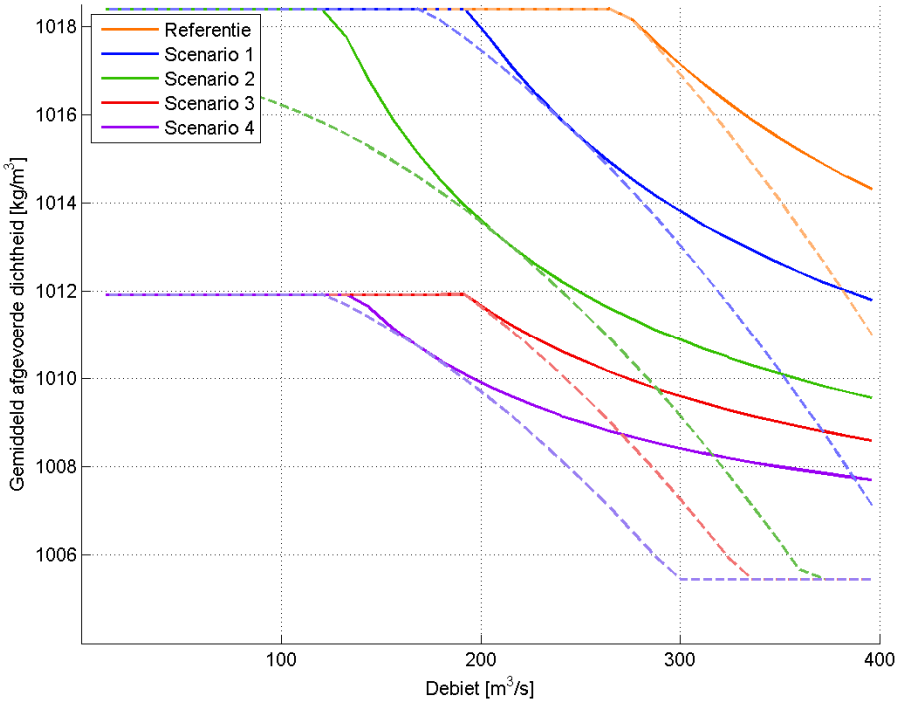
Het Referentie Scenario is het scenario waar het meeste zout afgevoerd kan worden. In dit scenario is er het meeste zoutwater aanwezig in de onderlaag met een hoge dichtheid. Bij Scenario 2 is de prestatie van het scherm gelijk tot een debiet van ongeveer 170 m3/s. Bij hogere debieten is er niet voldoende zoutwater beschikbaar in de onderlaag om volledig selectief te blijven onttrekken, de onderlaag is in dit scenario enkele meters dunner.

Bij Scenario 2 is zowel de onderlaag als de menglaag dunner waardoor er nog minder zoutwater beschikbaar is. In dit scenario is de prestatie gelijk aan de Referentie Scenario mits het scherm optimaal ingesteld kan worden. Met een vast scherm is het nooit gelijk aan de Referentie Scenario omdat de onderlaag maar 4,5 m dik is en de vaste spleethoogte 5m is. Scenario 2 is een scenario dat in de loop van tijd theoretisch kan voorkomen als selectief wordt onttrokken beginnend bij het Referentie Scenario. Als de bufferring in het toestroom kanaal niet voldoende groot is en de onderlaag in het Referentie Scenario geleegd wordt zal het dichtheidsprofiel zich ontwikkelen naar Scenario 2. Of zulke tijdsafhankelijke effecten bij IJmuiden voorkomen hangt af van de interactie van het spuien, het schutten, de afvoer van het kanaal en het getij. Dit kan met de formules in deze studie (die vanuit gaan van een steady-state situatie) niet onderzocht worden. Een Delft 3D model van het kanaal kan hier meer inzicht in geven.

De resultaten van Scenario's 3 en 4 tonen aan dat als de dichtheid in de onderlaag lager is, dat het zoutscherm met een vaste spleethoogte bijna optimaal presteert tot een debiet 200m3/s. Er is echter minder zout beschikbaar en het zoutscherm kan een maximum van ongeveer 3000 kg/s afgevoerde zoutmassa bereiken. Dit maximum komt bij een lager debiet dan in de scenario's met een hogere dichtheid in de onderlaag.

3.5.2 Gemiddeld afgevoerde dichtheid

In Figuur 3.11 wordt de gemiddeld afgevoerde dichtheid uitgezet tegen debiet. Zowel het geval met een optimaal spleethoogte per debiet (doorgetrokken lijnen) en het geval met een vaste spleethoogte (stippellijnen) zijn weergegeven.



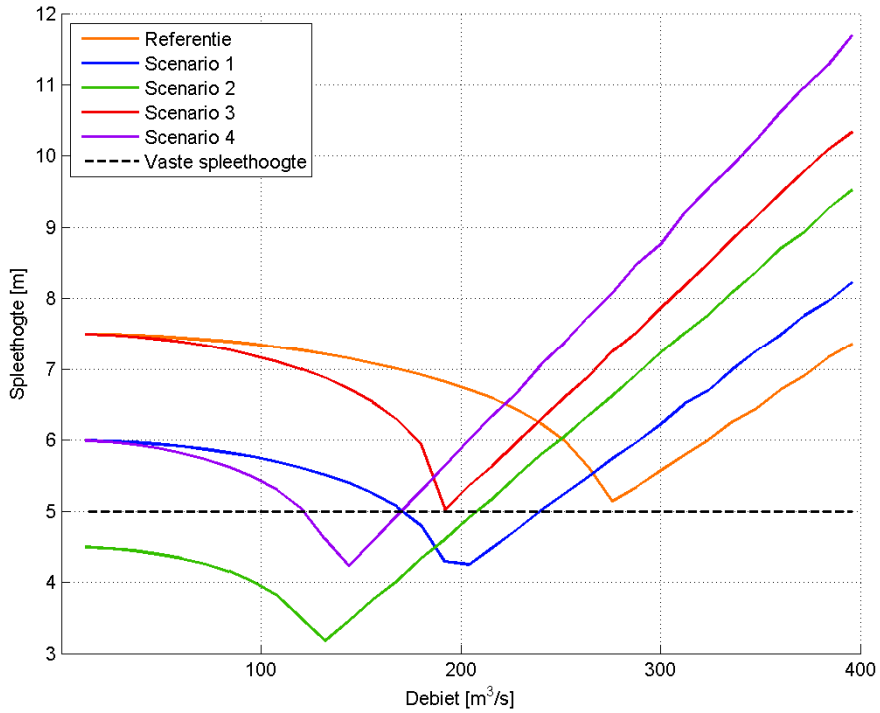
Figuur 3.11 Vergelijking van de scenario's: gemiddelde afgevoerde dichtheid. Doorgetrokken lijnen zijn van een zoutscherm met optimale spleethoogte, stippellijnen zijn van een zoutscherm met 5m vaste spleethoogte

Scenario's 3 en 4 hebben allebei een dichtheid in de onderlaag minder dan 1012 kg/m3 en daarom kunnen nooit de geëiste 1410 kg/s bij 91m 3/s halen.

De gemiddelde dichtheid die afgevoerd wordt neemt snel af naarmate er niet volledig selectief kan worden onttrokken. Bij een niet optimaal zoutscherm komt dat punt bij een lager debiet. Opmerkelijk is dat de afname in gemiddelde dichtheid eerst minder steil is bij een niet optimale schuifhoogte, waardoor er op een hoger debiet een gelijke prestatie is tussen het instelbaar zoutscherm en een scherm met vaste spleethoogte. Bij nog hogere debieten neemt de gemiddelde dichtheid met een vast scherm snel af. Omdat het zoetwater bij IJmuiden nog enigszins brak is blijft de afgevoerde zoutmassa eerst stijgen met hogere debieten (Figuur 3.10) maar daarna, omdat er zoveel extra zoetwater meegezogen wordt zorgt een hoger debiet voor een verlaging van de afgevoerde zoutmassa.

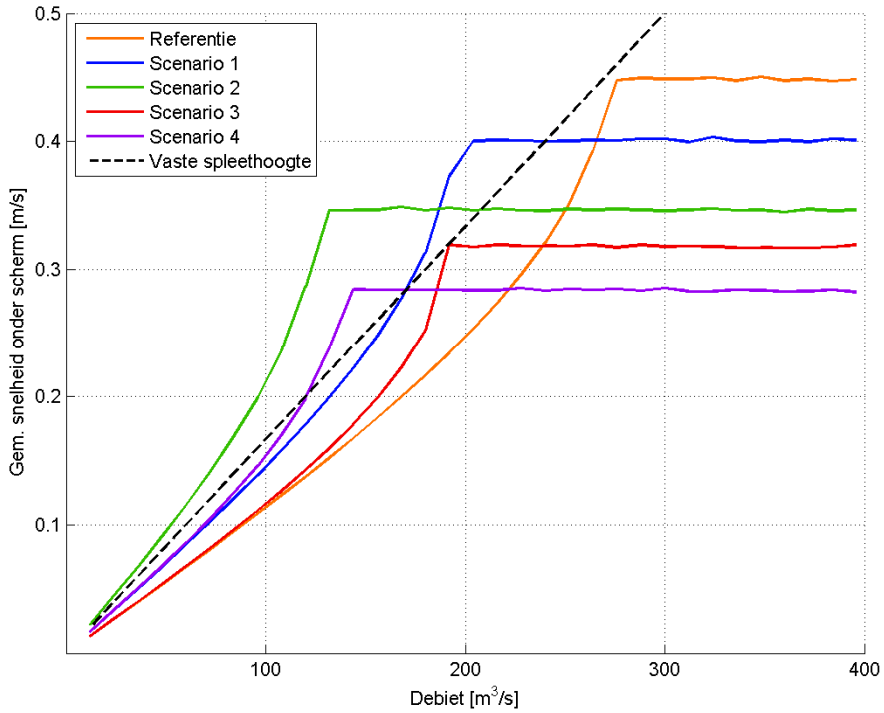
3.5.3 Spleethoogte en snelheid onder scherm

In Figuur 3.12 zijn de spleethoogtes in elke scenario geplot. Voor het optimaal ingestelde zoutscherm variëren de spleethoogtes per debiet. Een grotere spleethoogte is nodig bij hogere debieten om optimaal te werken. Bij de Scenario's 3 en 4 zijn de grootste optimale spleethoogtes te vinden omdat er al bij een kleiner debiet zoetwater meegezogen wordt. Daarna stijgt de benodigde spleethoogte lineair met het debiet.



Figuur 3.12 Vergelijking van de scenario's: optimale spleethoogte. Doorgetrokken lijnen zijn van een zoutscherm met optimale spleethoogte, stippellijn is van een zoutscherm met 5 m vaste spleethoogte

Het niveau van de vaste spleethoogte is ook op de plot aangegeven. Het niveau van 5 m is gekozen om bij het Referentie Scenario bij elk debiet een spleethoogte te hebben dat kleiner is dan het optimum. Bij kleinere debieten wordt er dan altijd selectief onttrokken worden. Er komt dus in die situaties geen vermindering in de afgevoerde zoutmassa. Het nadeel van een vaste spleethoogte is dan dat de snelheden groter zijn dan bij een instelbaar zoutscherm (zie Figuur 3.13) met als gevolg dat het verval over het scherm groter wordt. Als er bij laag water gespuid wordt op het spuicomplex is er dus minder waterstandsverschil beschikbaar om te spuien en zal het debiet lager zijn. Bij een debiet van 400 m3/s is dit verval ca. 5cm. Bij een maximaal debiet van ca. 900 m3/s zou dit oplopen naar 25 tot 30 cm. Hieruit volgt dat het vooral bij grotere debieten wenselijk zal zijn om de schuifhoogte hoger in te kunnen stellen. Bij een schuifhoogte van 7,5 m i.p.v. 5,0 m zou het verval ongeveer halveren.



Figuur 3.13 Vergelijking van de scenario's: gemiddelde snelheid onder het scherm. Doorgetrokken lijnen zijn van een zoutscherm met optimale spleethoogte, stippellijnen zijn van een zoutscherm met 5m vaste spleethoogte

4 Conclusies

De analyse in dit memo is gebaseerd op de volgende uitgangspunten:

1. Het zoutscherm heeft de afmetingen van het schetsontwerp, te weten een totale breedte van 120 m (drie openingen van 40 m) en een diepte ter plaatse van de constructie van -20 m NAP.

2. De gebruikte relaties zijn afkomstig van een 2D-schaalmodelonderzoek waarin stationaire situaties zijn beschouwd met een horizontale bodemligging.

3. De resultaten zijn vergeleken met de benodigde prestaties zoals beschreven in [4], waarin is uitgegaan van een gemiddeld debiet van 91 m3/s en een gemiddelde af te voeren hoeveelheid zout van 1410 kg/s, of wel een saliniteit van ca. 15 psu.

4. Voor het zoutprofiel aan de kanaalzijde van het sluizencomplex is uitgegaan van een gemeten profiel met een saliniteit in de bovenlaag van 7 psu en in de onderlaag van 23 psu.

De belangrijkste conclusies uit dit memo, kunnen samengevat worden als volgt:

5. Een zoutscherm met de dimensies zoals in het schetsontwerp geeft volgens de formules uit eerdere schaalmodel onderzoek de benodigde prestatie in zoutafvoer. Een afgevoerde gemiddelde saliniteit van 23 psu is haalbaar tot een debiet van 270 m3/s in het Referentie Scenario gebaseerd op zoutprofielmetingen bij de noordersluis in IJmuiden.

6. Een vaste spleethoogte geeft voor het Referentie Scenario (gemeten zoutprofiel) geen onacceptabel verlaging in de prestatie van het zoutscherm ten opzichte van als vergeleken met de doelstelling van deze studie.

7. Het nadeel dan van een vaste spleethoogte is dan dat de snelheden groter zijn dan bij een instelbaar zoutscherm met als gevolg dat er een kleiner spuidebiet haalbaar is.

8. De prestatie van het zoutscherm wordt door een verdunning van de bovenlaag benadeeld. De grootste daling in de prestatie van het scherm werd gezien in een scenario waar de dichtheid in de onderlaag relatief laag was. Een kleine laag van hoge dichtheid geeft betere resultaten dan een dikkere laag van lagere dichtheid.

9. De tijdsafhankelijke effecten stroomopwaarts van het zoutscherm kunnen met deze methode niet onderzocht worden. Stromingsberekeningen van dichtheidsstromingen op het kanaal met een Delft3D model kunnen hier verdere inzicht in geven.

10. Selectief onttrekking van zoutwater middels een zoutscherm op het spuikanaal lijkt een kansrijke optie voor het terugvoeren van de extra zoutmassa die bij IJmuiden zal indringen als gevolg van het bedrijven van de nieuwe sluis IJmuiden.

5 Referenties

[1] Weiler, O., Bijlsma, A., 2015, *Zoutindringing IJmuiden; Opgave, Mogelijkheden, vraagstukken*, 1220309-000-HYE-0002

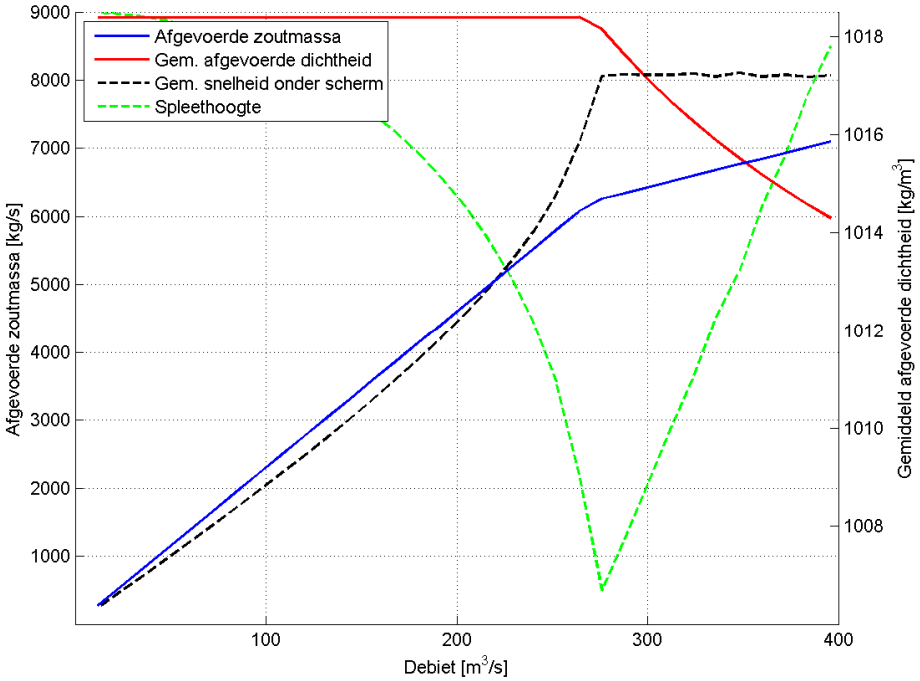
[2] Deltares en van Mazijk, A., 1973, Stroomsluis Noordland in de Oosterscheldedam; selectief afzuigen. Twee-dimensional onderzoek. Verslag modelonderzoek, M1204

[3] Jongeling, T., 2013, *Zeetoegang IJmond, Nieuwe Zeesluis, Dichtheidsverschillen over de sluis, notitie t.b.v. voorbereiding Programma van Eisen*, RWS- Dienst Infrastructuur, Versie 1, 18 Juli 2013

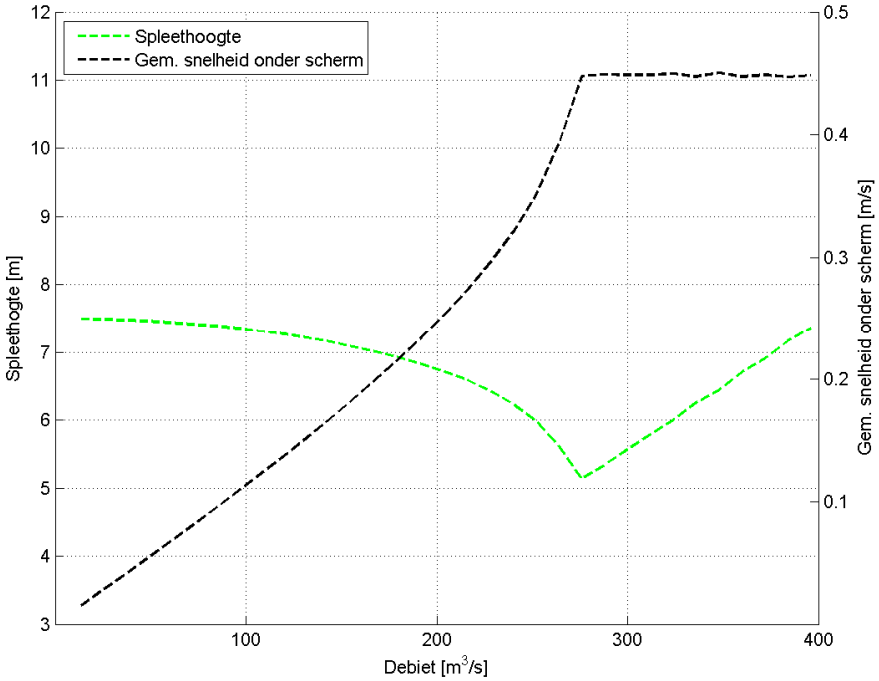
[4] Weiler, O., Uittenbogaard, R., 2014, *Beperking Zoutindringing bij aanleg Nieuwe Sluis IJmuiden, Fase 1: Eerste Verkenning*, 1209034-000-HYE-0002

Version	Date	Author	Initials	Review	Initials	Approval	Initials
1	Sep. 2015	T.S.D. O'Mahoney	b/a	R.E. Uittenbogaard		O.M. Weiler	

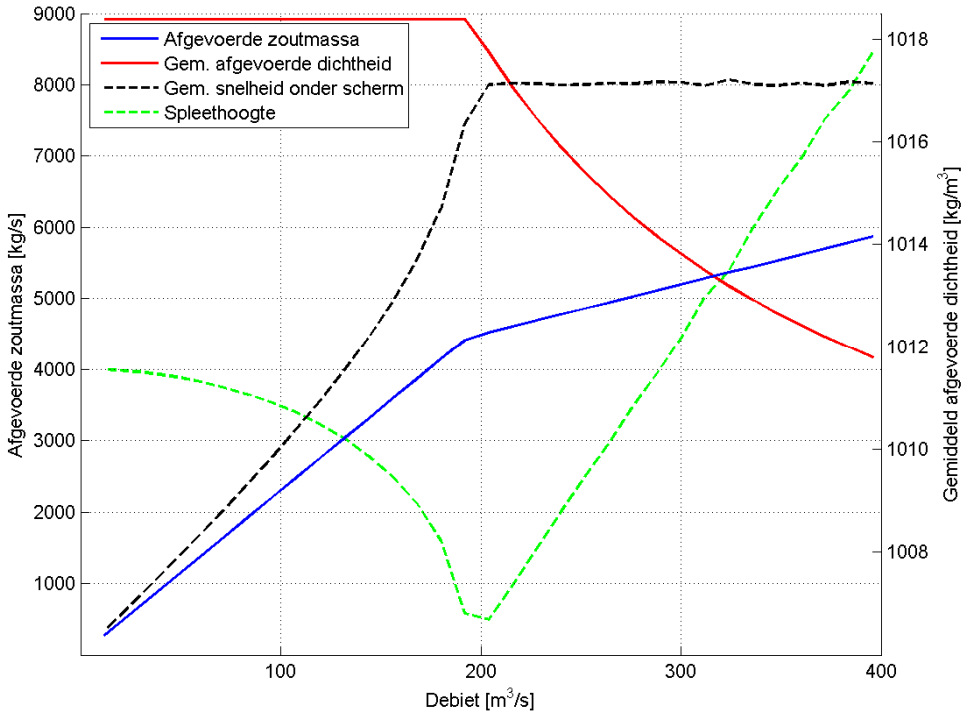
6 Appendix



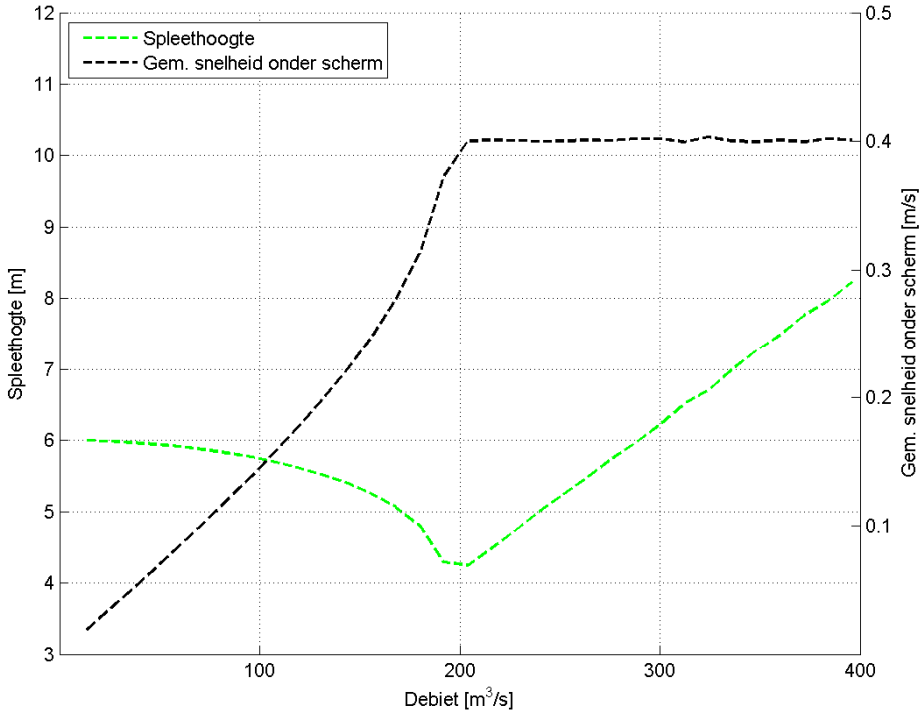
Figuur 6.1 Prestatie van een optimaal zoutscherm van Referentie Scenario



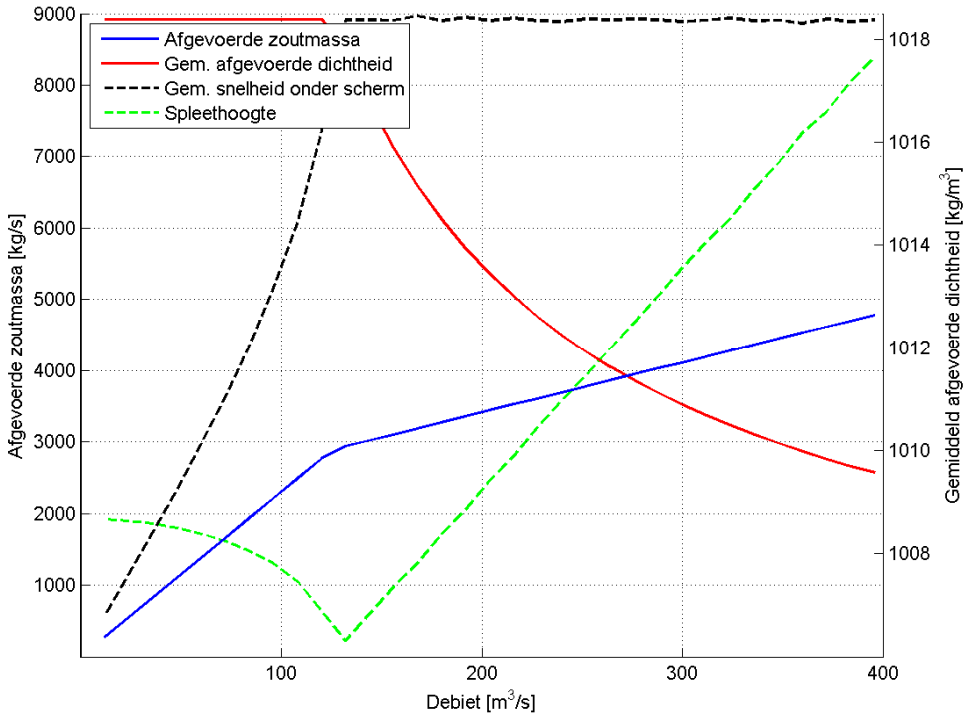
Figuur 6.2 Dimensies van optimaal zoutscherm van Referentie Scenario



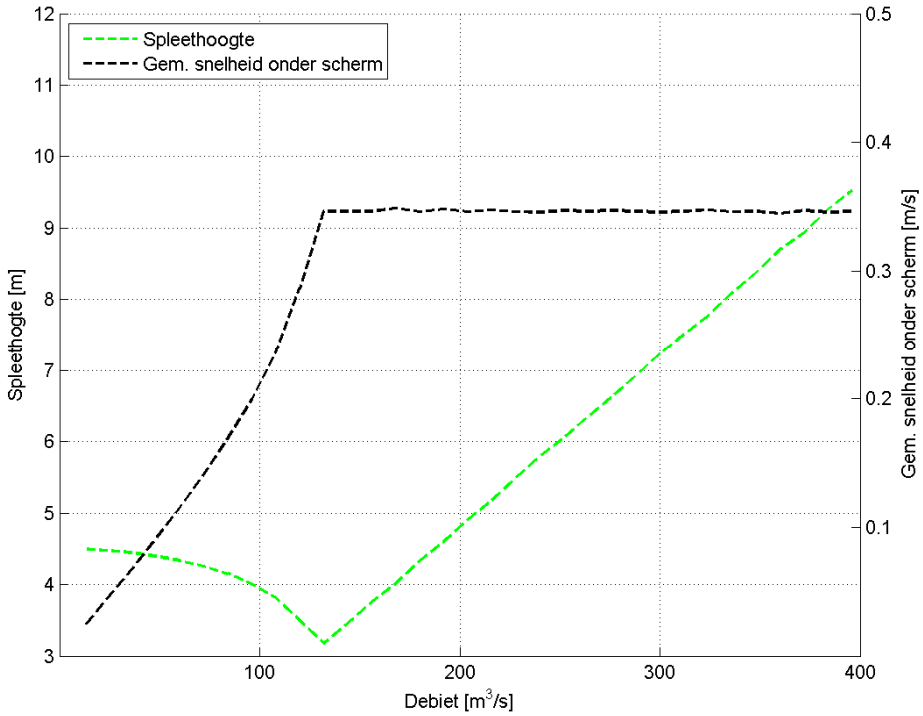
Figuur 6.3 Prestatie van een optimaal zoutscherm van Scenario 1



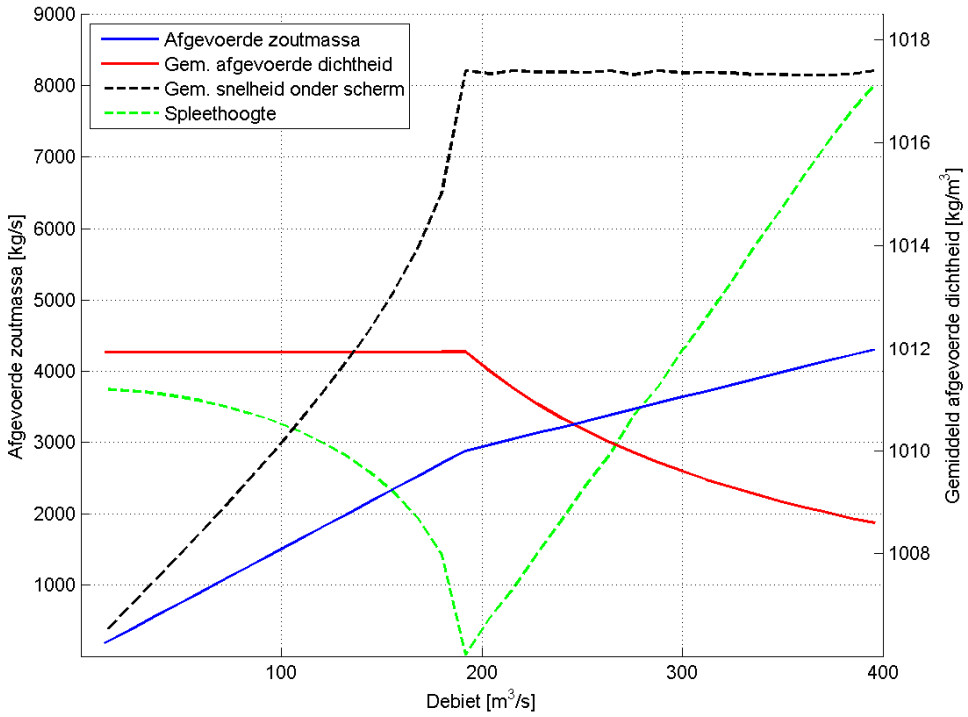
Figuur 6.4 Dimensies van optimaal zoutscherm van Scenario 1



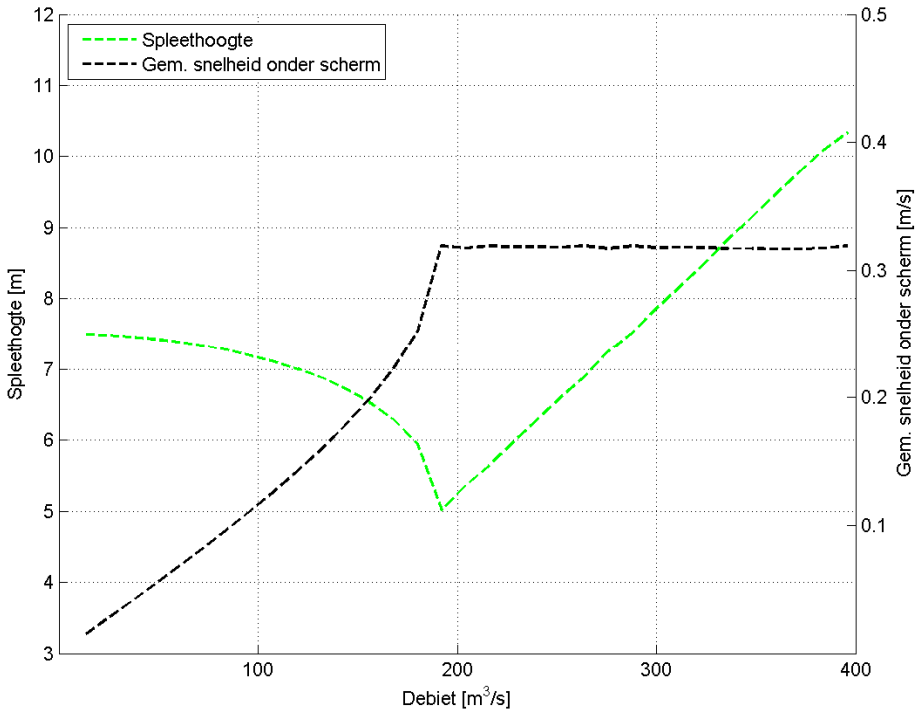
Figuur 6.5 Prestatie van een optimaal zoutscherm van Scenario 2



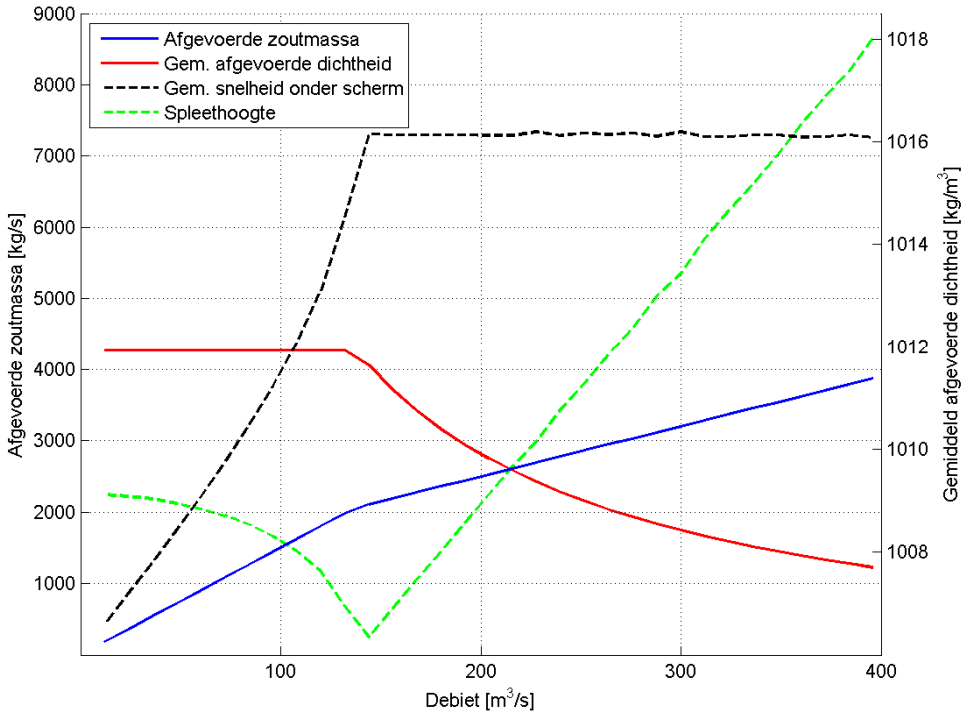
Figuur 6.6 Dimensies van optimaal zoutscherm van Scenario 2



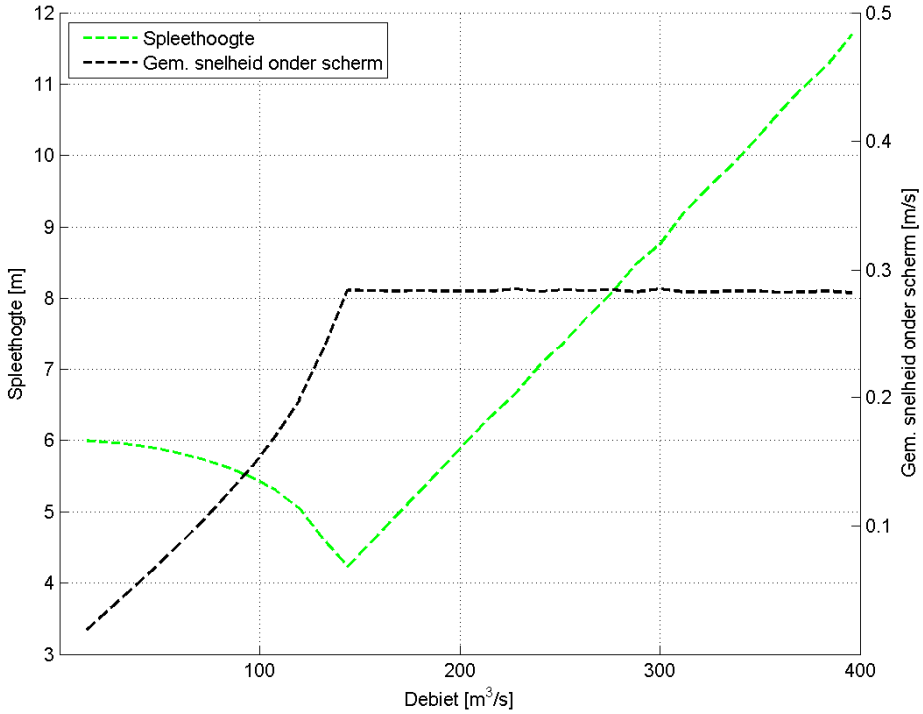
Figuur 6.7 Prestatie van een optimaal zoutscherm van Scenario 3



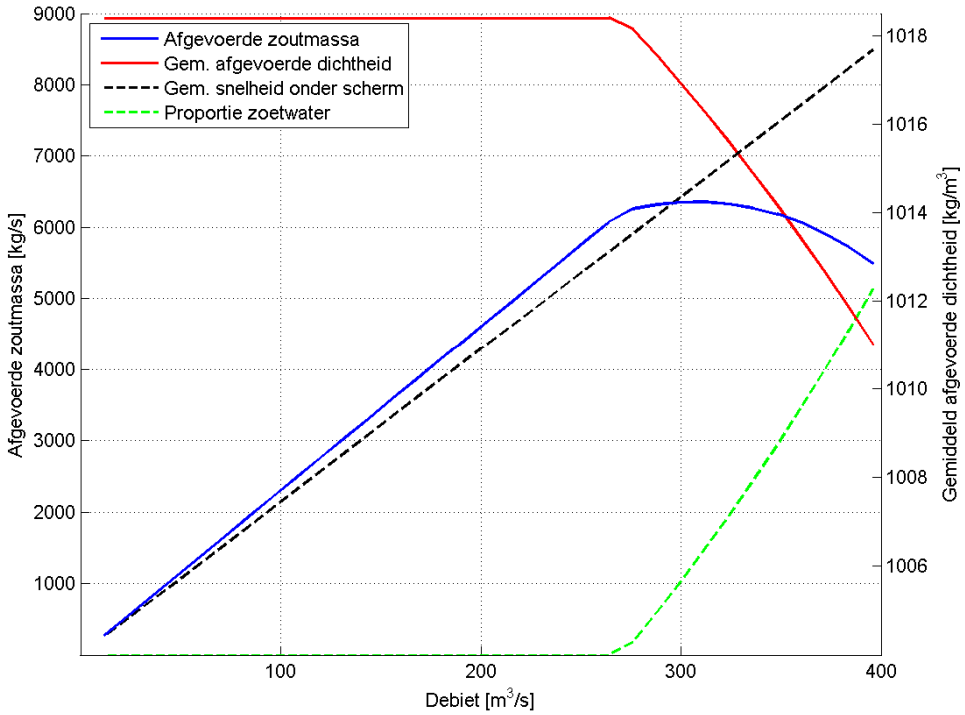
Figuur 6.8 Dimensies van optimaal zoutscherm van Scenario 3



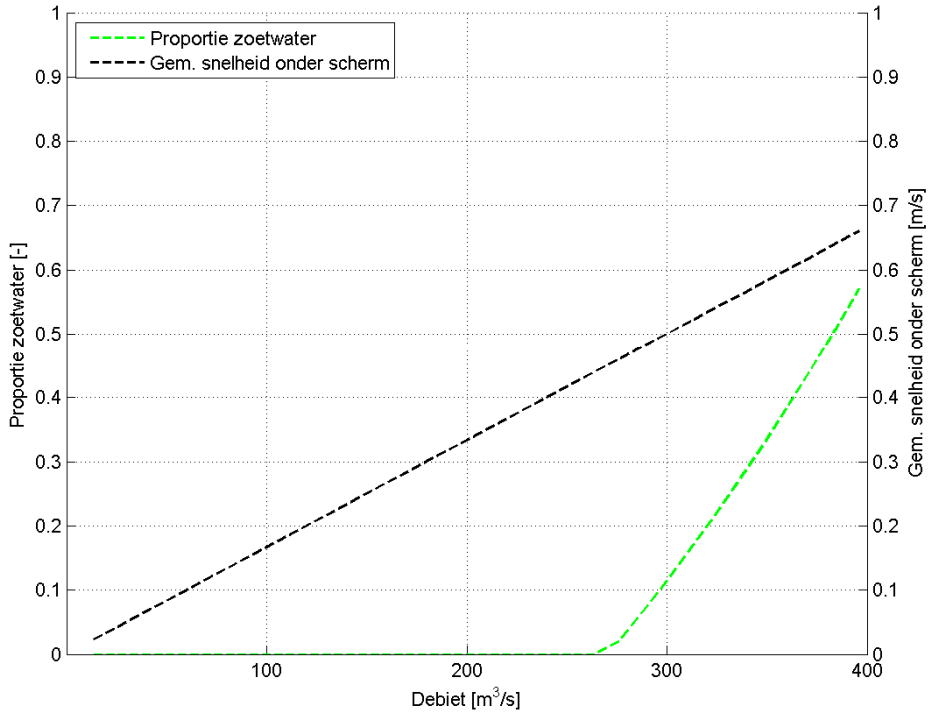
Figuur 6.9 Prestatie van een optimaal zoutscherm van Scenario 4



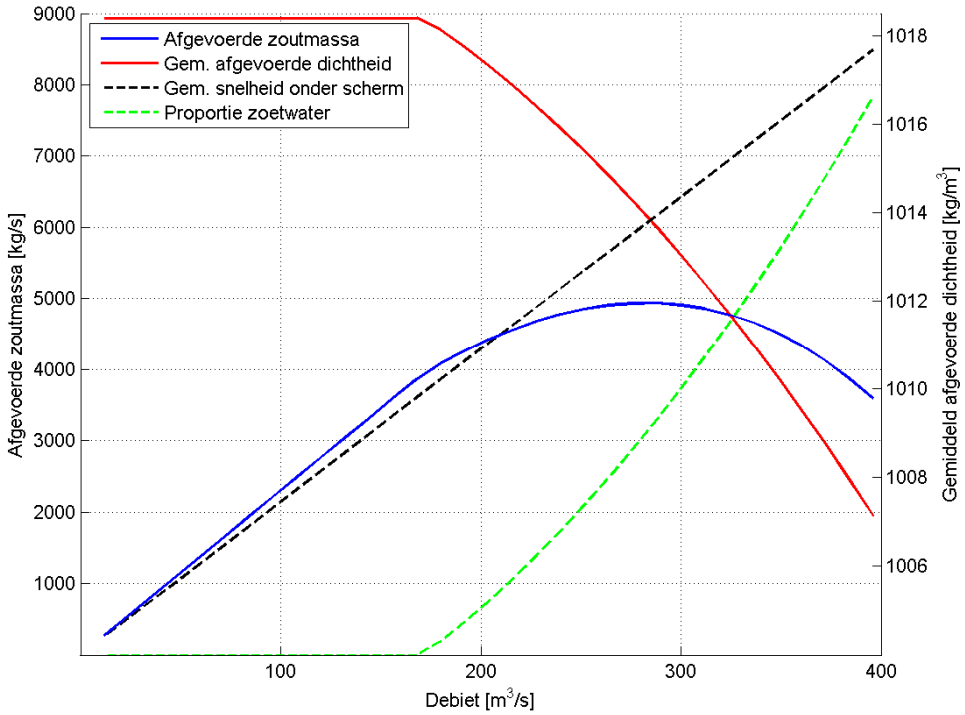
Figuur 6.10 Dimensies van optimaal zoutscherm van Scenario 4



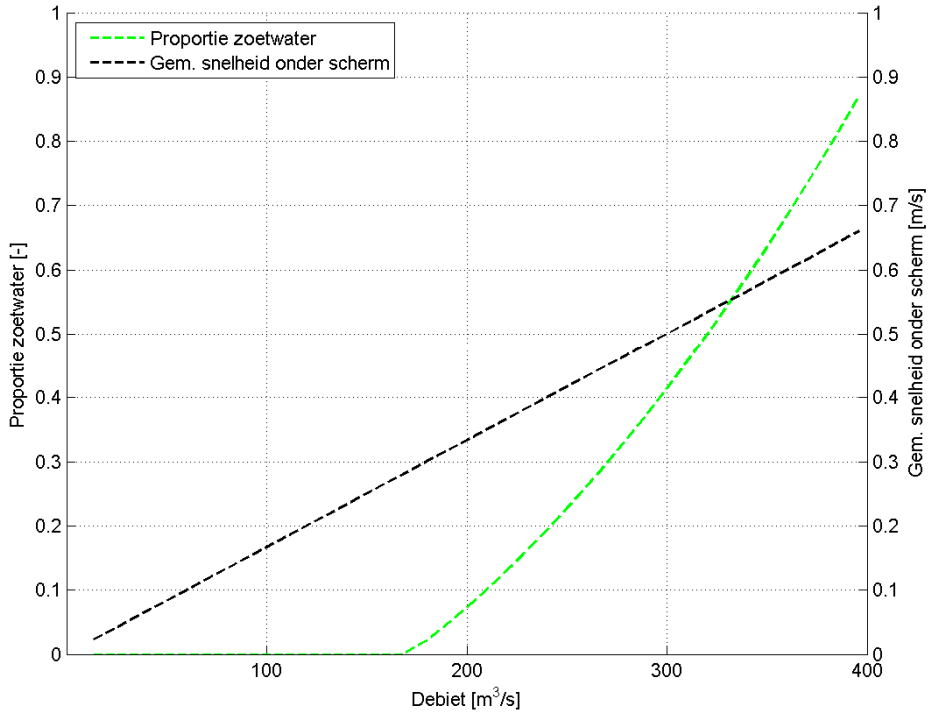
Figuur 6.11 Prestatie van een zoutscherm met vaste spleethoogte (5 m) van Referentie Scenario



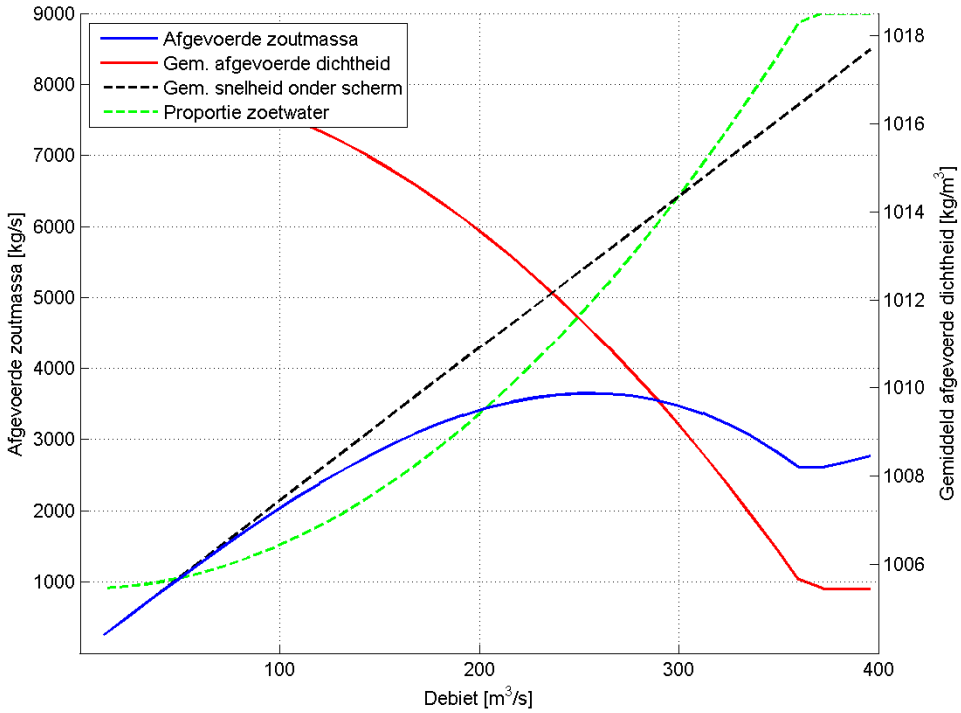
Figuur 6.12 Stromingseigenschappen bij een zoutscherm met vaste spleethoogte (5 m) van Referentie Scenario



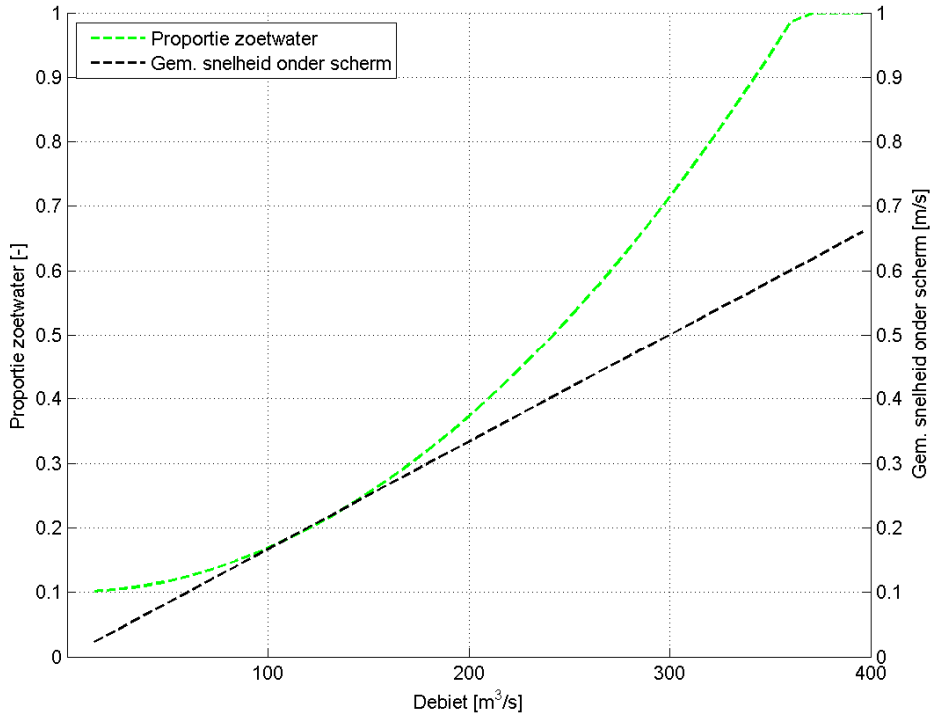
Figuur 6.13 Prestatie van een zoutscherm met vaste spleethoogte (5 m) van Scenario 1



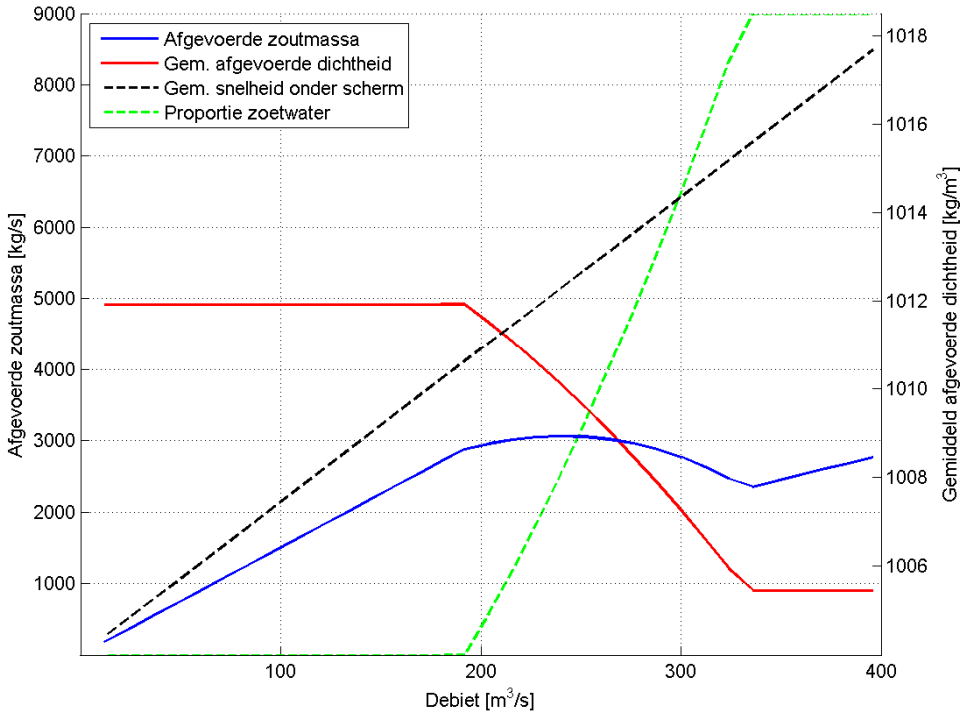
Figuur 6.14 Stromingseigenschappen bij een zoutscherm met vaste spleethoogte (5 m) van Scenario 1



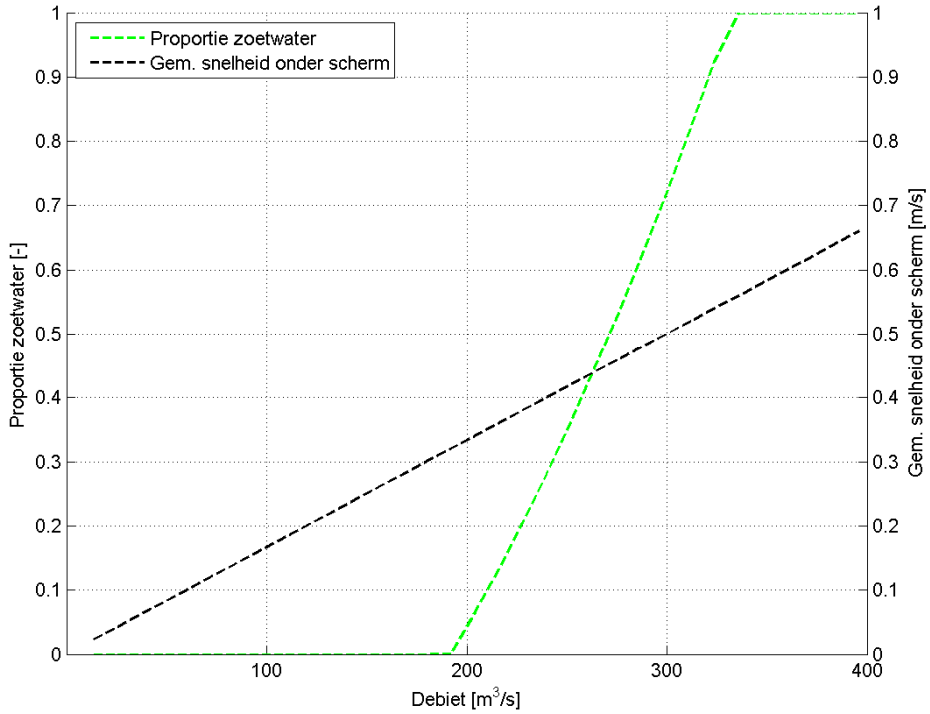
Figuur 6.15 Prestatie van een zoutscherm met vaste spleethoogte (5 m) van Scenario 2



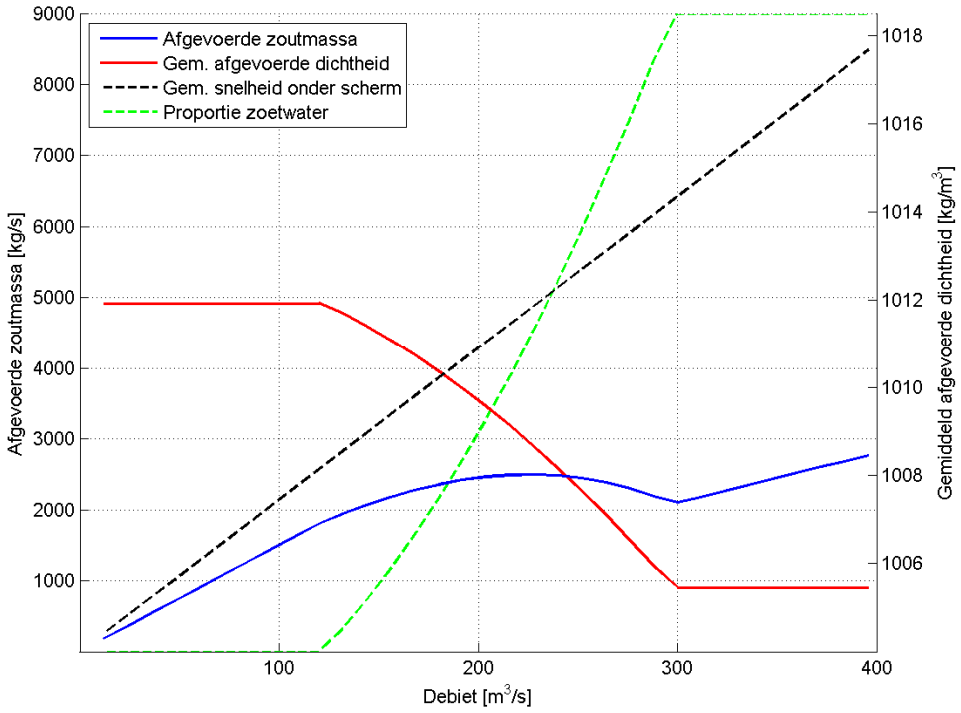
Figuur 6.16 Stromingseigenschappen bij een zoutscherm met vaste spleethoogte (5 m) van Scenario 2



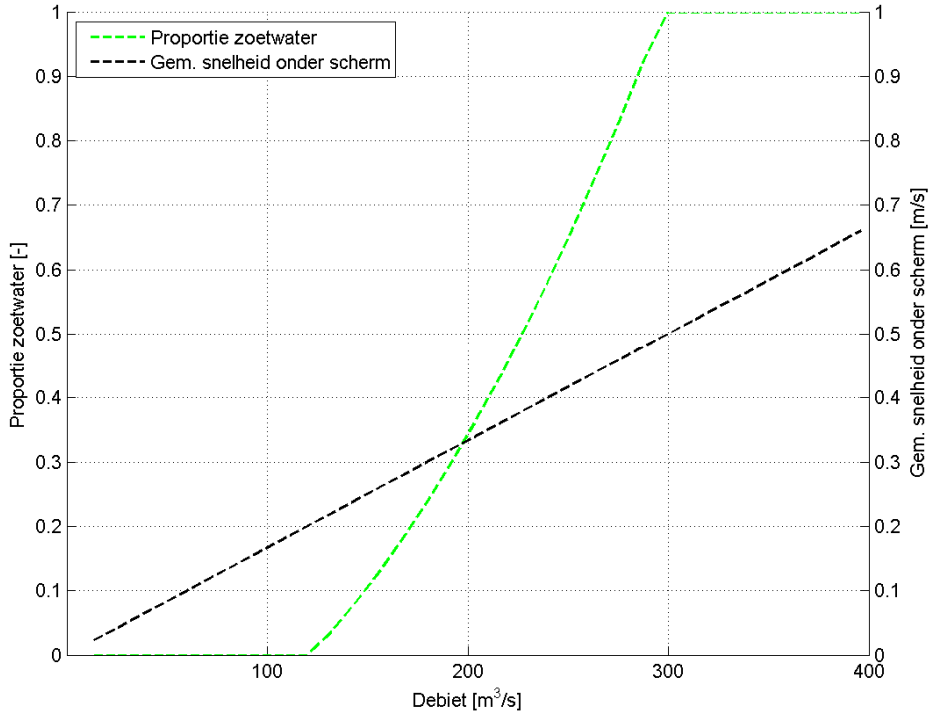
Figuur 6.17 Prestatie van een zoutscherm met vaste spleethoogte (5 m) van Scenario 3



Figuur 6.18 Stromingseigenschappen bij een zoutscherm met vaste spleethoogte (5 m) van Scenario 3



Figuur 6.19 Prestatie van een zoutscherm met vaste spleethoogte (5 m) van Scenario 4



Figuur 6.20 Stromingseigenschappen bij een zoutscherm met vaste spleethoogte (5 m) van Scenario 4

D Verkenning effect selectieve onttrekking met behulp van Delft3D

Memo

Aan
-

Datum	**Kenmerk**	**Aantal pagina's**
11 september 2015	1220309-000-HYE-0018	13

Van	**Doorkiesnummer**	**E-mail**
Wilbert Verbruggen	+31(0)88335 8346	wilbert.verbruggen@deltares.nl

Onderwerp
Verkenning effect selectieve onttrekking met behulp van Delft3D

---

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Ter onderbouwing van het advies over het voorlopig hydraulisch ontwerp van de Selectieve Onttrekking bij IJmuiden (SO-IJ) is naast de verkenning van de stroming en het zouttransport op de schaal van de constructie (near-field) ook een eerste verkenning van de effectiviteit van een dergelijke constructie voor het zouttransport in het systeem van het Noordzeekanaal onderzocht (far-field). Dit memo beschrijft de resultaten van het indicatieve far-field onderzoek met Delft3D.

1.2 Doelstelling van het onderzoek

Doel van dit (deel)onderzoek is een eerste ruwe indicatie van de mogelijke effectiviteit van een selectieve onttrekking te geven op basis van Delft3D berekeningen van het Noordzeekanaal. De berekeningen moeten tevens inzicht geven in hoe de zoutverticaal zich zal ontwikkelen op korte afstand van de selectieve onttrekking.

1.3 Aanpak

De selectieve onttrekking bestaat conform het eerste schetsontwerp van 3 juni 2015 uit een zoutscherm in de ingang van het Binnenspuikanaal, met een effectieve breedte van 120 m en aan de onderzijde een 4 m hoge opening tussen -16 en -20 m NAP.

Het grootschalig water-, zout- en warmtetransport in het Noordzeekanaal en het Amsterdam-Rijnkanaal is gemodelleerd met het numerieke model Delft3D-FLOW. Uitgangspunt is een bestaande modeldefinitie voor de huidige omstandigheden, beschikbaar uit eerder werk van Arcadis. Het betreft de bestaande Noordersluis, met slibputten in het NZK, met het sluiseiland Zeeburg en de drempel in het ARK, en een ladingsstroom van 75 miljoen ton per jaar over het sluiscomplex, zie [1].

De selectieve onttrekking SO-IJ is schematisch ingebracht in dit Delft3D model, enerzijds door gebruik te maken van een zogenoemde “3Dgate” optie om een ‘hydraulic structure’ weer te geven, en anderzijds door het Binnenspuikanaal af te sluiten en spui- en maaldebiet van IJmuiden eenvoudig direct te onttrekken aan de onderste lagen van het rekenmodel ter plaatse van SO-IJ. Ter reductie van de rekentijd is het oorspronkelijke model enigszins vereenvoudigd. De effectiviteit wordt inzichtelijk gemaakt door te kijken naar de toename in het zouttransport bij gelijke afvoer van het spui- en maalcomplex in IJmuiden.

Resultaten worden gepresenteerd voor de volgende berekeningen:

- Referentie berekening met normale afvoer via het spui/maal complex (zonder SO-IJ)
- Configuratie 1: weergave van het zoutscherm door middel van een zogenoemde "3Dgate", waarbij lokaal de 4 onderste van 20 lagen open zijn gelaten (~4 m spleet).
- Configuratie 2: afvoer via het spui/maal complex direct onttrekken in onderste 4 lagen van 20 ter plaatse van SO-IJ (~4 m spleet)
- Configuratie 3: afvoer via het spui/maal complex directe onttrekken in de onderste 10 lagen van 20 ter plaatse van SO-IJ (~10 m spleet)

Op basis van deze berekeningen is een eerste ruwe indicatie van de mogelijke effectiviteit van een selectieve onttrekking te geven, inclusief inzicht in de bijbehorende zoutverdelingen.

2 Model opzet

2.1 Uitgangspunten

Het uitgangspunt van dit onderzoek is een bestaand model van het Noordzeekanaal dat is opgezet door Arcadis, zie [1]. Dit model is door Arcadis gebruikt voor het onderzoek naar het chloride gedrag op het Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal. De randvoorwaarden van het model corresponderen met Scenario 1A uit de Arcadis studie. In dit scenario zijn de randvoorwaarden van het model gebaseerd op metingen in de periode januari 2013 t/m juni 2013[1] en een ladingstroom van 75 MT per jaar door de zeesluizen, wat overeenkomt met het gebruik van de zeesluis in 2008. Dit scenario is destijds gebruikt om het model te valideren.

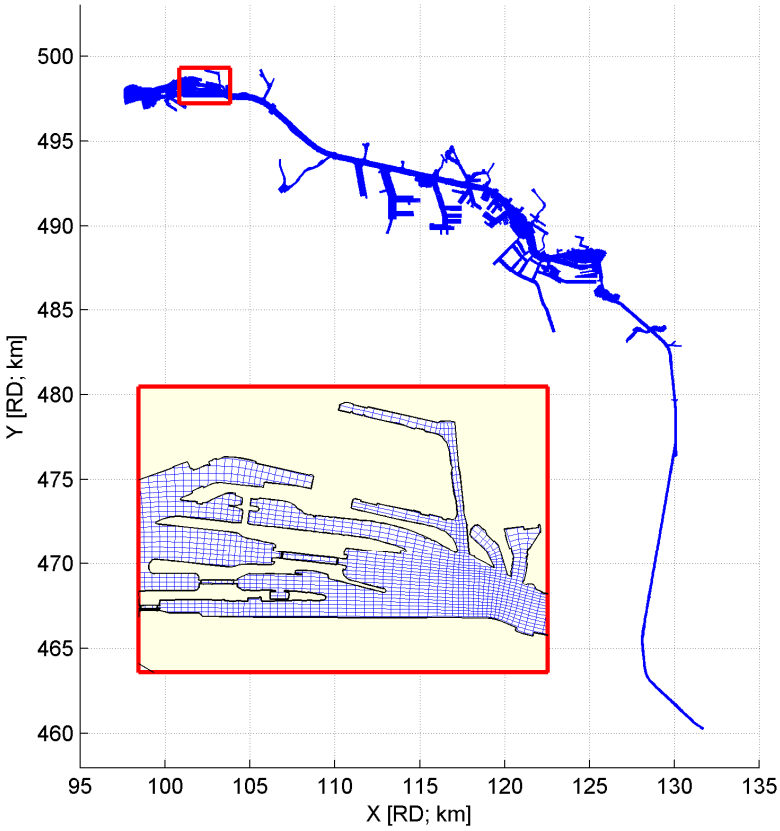
In deze eerste verkenning is de modelopzet zo consistent mogelijk gehouden met het bestaande model. Ten behoeve van de rekentijd is in de huidige studie gebruik gemaakt van een grovere versie van het rekenrooster dat gebruikt is door Arcadis [2]. Ten opzichte van het fijnere rekenrooster is de resolutie tussen de sluizen bij IJmuiden en kanaal C ongewijzigd, alleen ten oosten hiervan is een lagere resolutie aangehouden. Aangezien het interessegebied van de studie zich rond de sluizen bij IJmuiden bevindt, wordt er geen significante invloed verwacht van het verlagen van de resolutie in het oostelijke deel van het model.

Met behulp van dit model zijn vier configuraties doorgerekend. Allereerst is situatie zonder zoutscherm (de Referentieconfiguratie) gesimuleerd. Vervolgens zijn er drie simulaties gedaan waarin het zoutscherm op een schematische manier is ingebracht. In die simulaties is de diepteschematisatie rondom het zoutscherm aangepast en zijn onttrekkingen verplaatst of is er gebruik gemaakt van hydraulische constructies.

2.2 Rekenrooster en diepteschematisatie

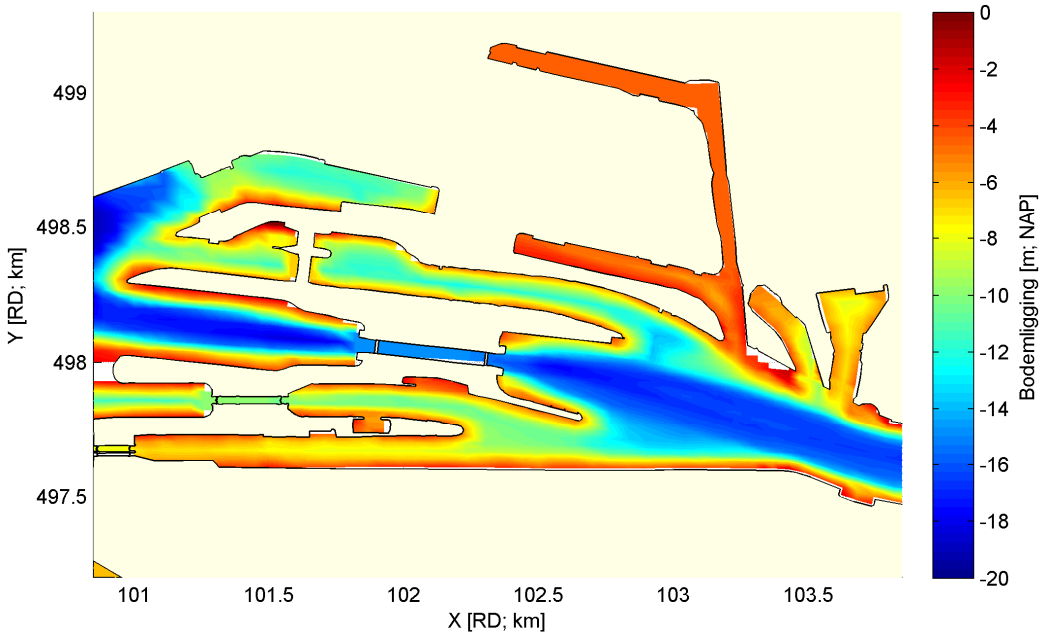
Het Delft3D model beslaat een gebied van de sluizen in IJmuiden tot en met Maarssen langs het Amsterdam-Rijnkanaal. Rondom de sluizen in IJmuiden is de resolutie 30 m tot 60 m. Figuur 2.1 geeft een overzicht van het rekenrooster. In verticale richting is een sigma-coördinaten rooster toegepast met 20 equidistante lagen.

[1] In het model dat beschikbaar is gemaakt voor deze studie besloegen de randvoorwaarden de periode 1 januari 2013 t/m 1 april 2013.

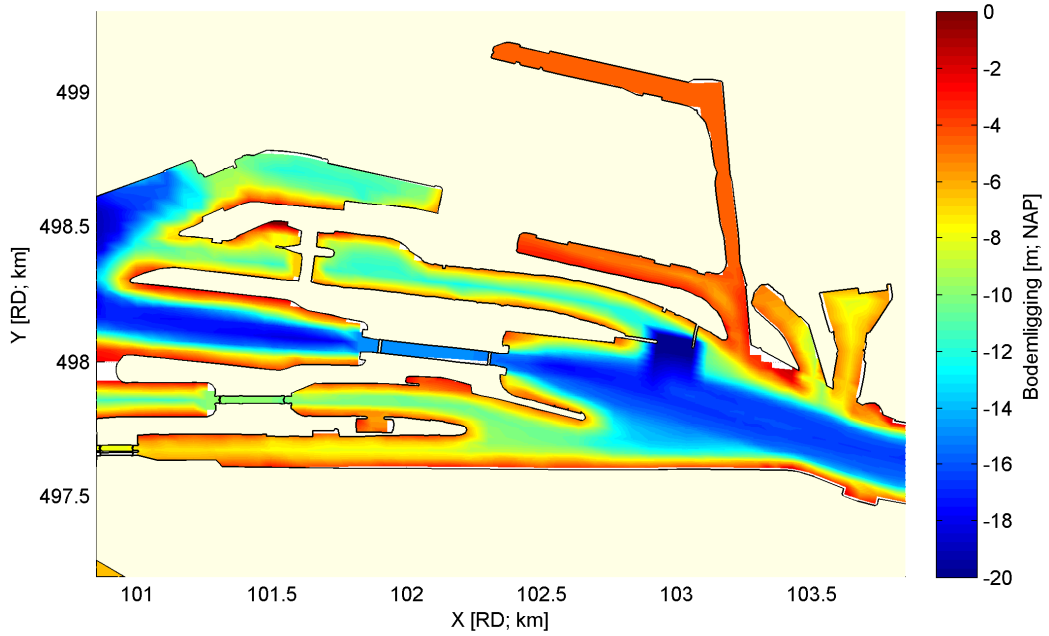


Figuur 2.1 Rekenrooster, inclusief detail rondom sluizen IJmuiden.

De diepteschematisatie rondom IJmuiden is gegeven in Figuur 2.2 voor de Referentieconfiguratie. In de configuraties met zoutscherm is de bodem lokaal rondom het zoutscherm lokaal verdiept tot -20m NAP, zie Figuur 2.3.



Figuur 2.2 Diepteschematisatie bij IJmuiden, Referentieconfiguratie.

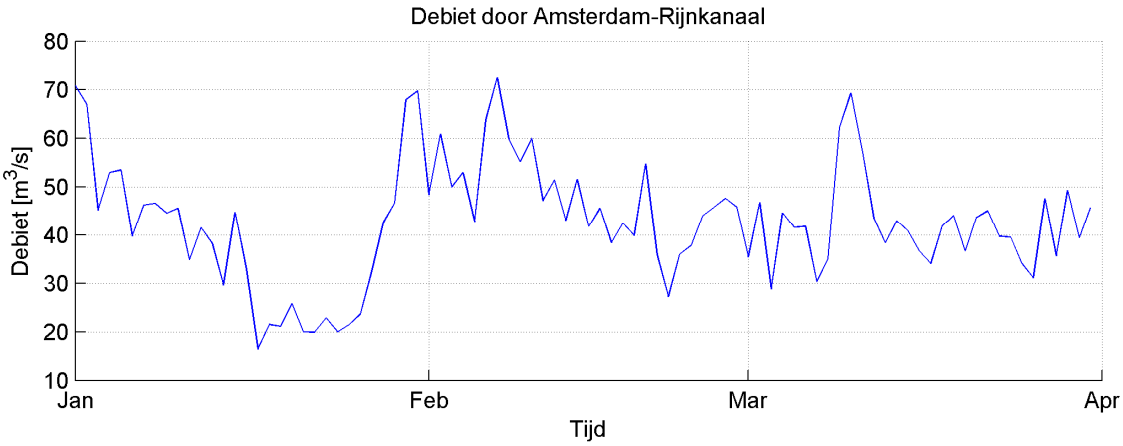


Figuur 2.3 Diepteschematisatie bij IJmuiden, Configuratie 1 – 3.

2.3 Randvoorwaarden

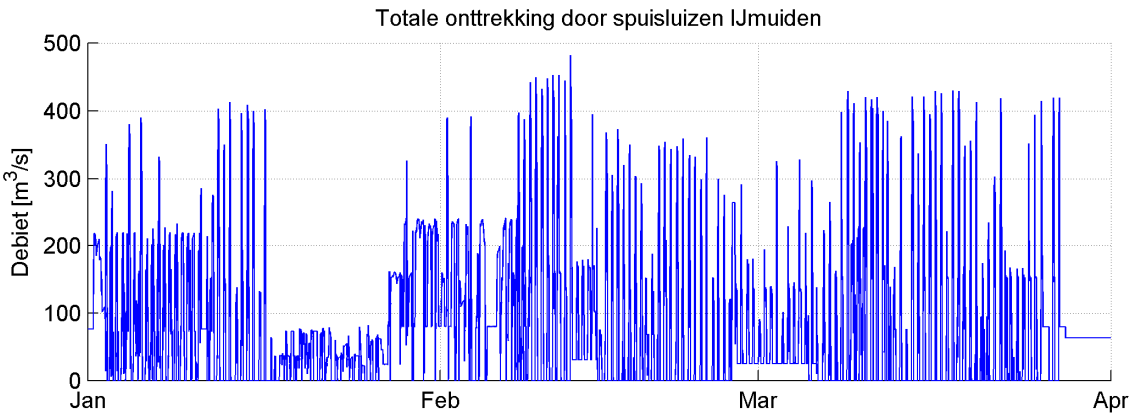
In het model wordt op verschillende plekken zoetwater aangevoerd en worden er verscheidene industriële lozingen en onttrekkingen meegenomen. De karakteristieken van de industriële lozingen zijn gebaseerd op een modelleerstudie door Arcadis uit 2011 [3]. De overige debieten zijn gebaseerd op metingen in 2013. De waterbalans is in de gegeven periode kloppend gemaakt door de spuidebieten bij IJmuiden naar beneden te schalen (variërend tussen -20% en -45%) en de debieten door het Amsterdam-Rijnkanaal op te schalen (variërend tussen +0% en +45%).

De belangrijkste bron van zoet water is de aanvoer vanuit het Amsterdam-Rijkanaal. Het inkomende debiet (na correctie) vanuit het Amsterdam-Rijnkanaal bij Maarssen is weergegeven in Figuur 2.4. In de beschikbare periode van januari 2013 t/m maart 2013 varieerde het debiet tussen de 15 m^3/s en 75 m^3/s.



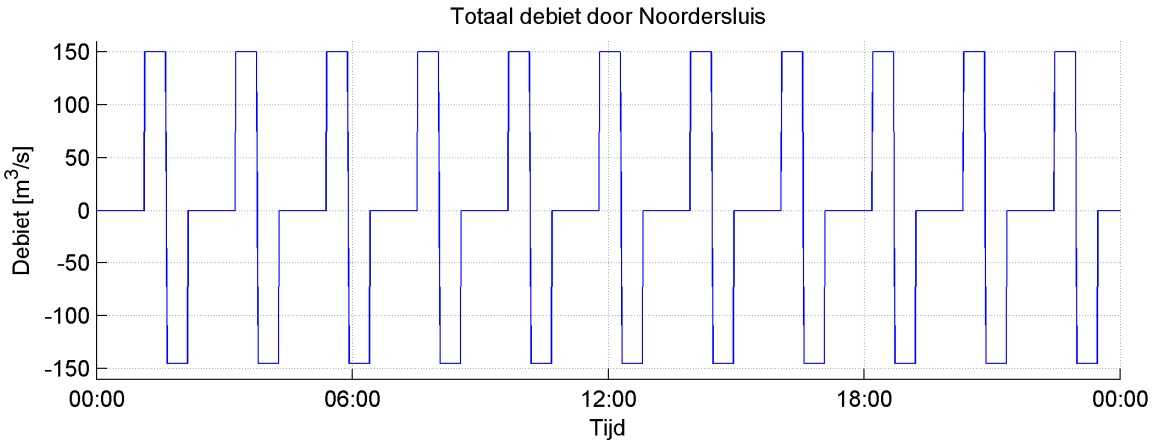
Figuur 2.4 Debiet door Amsterdam-Rijnkanaal.

Het overschot aan water ten gevolge van de instroom van zoet water, wordt geloosd bij de spuisluizen in IJmuiden. Het debiet (na correctie) door de spuisluizen wordt getoond in Figuur 2.5. Duidelijk te zien is dat tijdens de periode met lage afvoer door het Amsterdam-Rijnkanaal (17 januari t/m 26 januari 2013) er ook weinig gespuid wordt door de spuisluizen in IJmuiden. De piekdebieten door de spuisluizen in de periode januari 2013 t/m maart 2013 zijn in de orde van 450-500 m3/s. De debieten zijn aan het model opgelegd en worden niet aangepast op basis van de berekende waterstand in het Noordzeekanaal. Eventuele effecten van het zoutscherm op het verval over de spuisluizen worden dus niet meegenomen in de modellering.



Figuur 2.5 Totale onttrekkingsdebiet door spuisluizen IJmuiden.

In het sluizencomplex bij IJmuiden worden drie sluizen gebruikt voor het schutten van schepen, namelijk de Noordersluis, Middensluis en Zuidersluis. Voor alle sluizen heeft Arcadis [1] een gemiddelde dagelijkse variatie bepaald wat betreft de uitwisselingsdebieten en de zoutindringing in het Noordzeekanaal op basis van de totale laadstroom in 2008 (75 miljoen ton per jaar). In het model wordt de nieuwe geplande zeesluis bij IJmuiden niet meegenomen. De grootste sluis in het complex is de Noordersluis. Figuur 2.6 toont de aan het model opgelegde dagelijkse variatie in uitwisselingsdebieten bij de Noordersluis. Het instromende water heeft een constant zoutgehalte van 25 ppt en een constante temperatuur van 5.5°C. De debieten worden gelijkmatig over de diepte ingebracht of

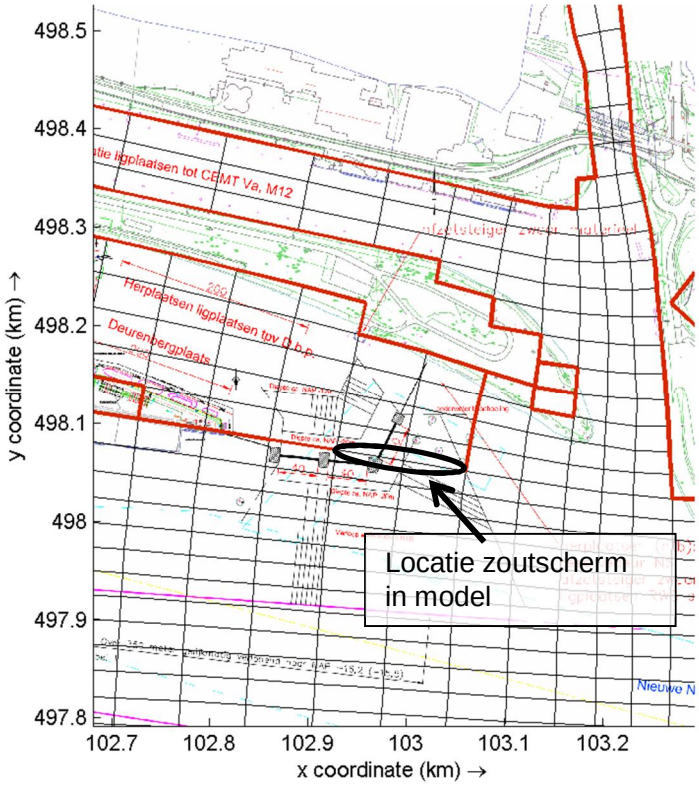


Figuur 2.6 Dagelijkse variatie in debiet door Noordersluis (positief: lozing, negatief: onttrekking).

onttrokken[2]. Eventuele effecten van de selectieve onttrekking op de zoutuitwisseling door de sluizen is niet meegenomen in de modellering.

2.4 Schematisatie selectieve onttrekking

Om het effect van een selectieve onttrekking op het zoutgehalte in het Noordzeekanaal te verkennen is de selectieve onttrekking op verschillende manieren schematisch ingebracht. Om de afmetingen van het zoutscherm aan te laten sluiten bij het voorlopige ontwerp is het zoutscherm gemodelleerd over een breedte van 2 cellen, wat overeenkomt met ongeveer 130 m, zie Figuur 2.7.



Figuur 2.7 Locatie van schematisch ingebracht zoutscherm in het model (dichte modelranden en "dunne dammen" zijn in rood weergegeven).

Het effect van de verticale obstructie door het zoutscherm op de zouttransporten is op drie verschillende manieren gesimuleerd. Bij al deze configuraties is een vaste stand van het zoutscherm verondersteld onder alle afvoercondities (i.e. geen getrokken schuif bij groot spuidebiet).

- Configuratie 1: Ter hoogte van de voorziene locatie voor het zoutscherm zijn de bovenste 16 (van de 20) lagen dichtgezet. Aangezien iedere laag 5% van de lokale waterdiepte representeert is de hoogte van de spleet boven de bodem ongeveer 4 m, wat overeenkomt met het voorlopige ontwerp.
- Configuratie 2: In deze configuratie zijn de onttrekkingen die bij de spuisluizen aan het eind van het Binnenspuikanaal plaatsvinden verplaatst naar de locatie van het

[2] Niet onbelangrijk is dat de uitwissellingsstroming feitelijk gelijktijdig plaatsvindt in de bovenste en onderste helft van de waterkolom boven de sluisdrempel. Dit inzicht zal worden meegenomen in Taak 4

zoutscherm in de toegang tot het Binnenspuikanaal. Het totale onttrekkingsdebiet is uniform verdeeld over de onderste 4 lagen (wat overeenkomt met ongeveer 4 m hoogte).

- Configuratie 3: In deze configuratie zijn de onttrekkingen die bij de spuisluizen plaatsvinden verplaatst naar de locatie van het zoutscherm. Het totale onttrekkingsdebiet is uniform verdeeld over de onderste 10 lagen (wat overeenkomt met ongeveer 10 m hoogte). Deze configuratie is gebruikt om de gevoeligheid te onderzoeken van het aantal lagen waarover de onttrekkingen verdeeld worden in het Delft3D model.

2.5 Simulatieperiode

Aangezien de werking van het zoutscherm sterk afhankelijk is van de stroomsnelheden onder het zoutscherm, is ervoor gekozen om een periode te modelleren die zowel lage als hoge afvoeren door de spuisluizen beslaat. De simulaties zijn gestart op 1 januari 2013 met dezelfde startcondities als in het model uit [1]. De periode van 1 januari 2013 t/m 14 januari 2013 wordt gebruikt om het model te laten inspelen. Vervolgens is de periode van 14 januari 2013 t/m 1 maart 2013 gebruikt om de effecten van de selectieve onttrekking in te schatten.

2.6 Overige modelinstellingen

In deze paragraaf worden alleen de belangrijkste modelinstellingen beschreven. Met uitzondering van de tijdstap zijn alle overige instellingen consistent met de modelinstellingen gebruikt door Arcadis [1].

Tijdstap

In het model is een rekentijdstap van 15 s gebruikt, de helft van deoorspronkelijke waarde. Het Courantgetal in het projectgebied loopt op tot maximaal 20 (striktgenomen is maximaal 5.6 vereist voor goede weergave van vrije oppervlakte golven). Er is een test uitgevoerd met een rekentijdstap van 3.75 s, wat zeer vergelijkbare resultaten opleverde qua zouttransport. Op basis hiervan is een rekentijdstap van 15 s geoorloofd is voor deze verkennende studie.

Viscositeit en diffusiviteit

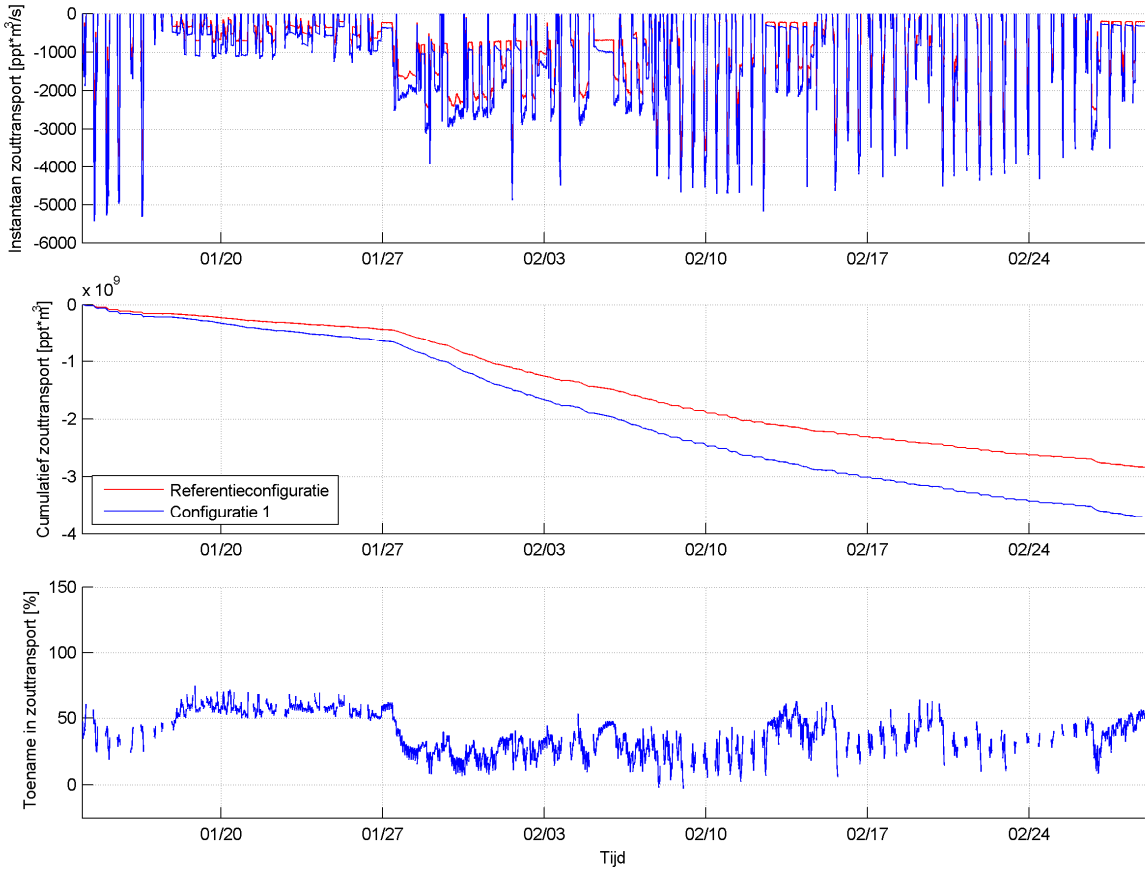
De effecten van turbulentie worden in rekening gebracht met behulp van de viscositeit en diffusiviteit parameters. Deze parameters hebben een grote invloed op het gedrag van de zoutindringing in het systeem. De horizontale viscositeit is gespecificeerd als 1 m^2/s. Voor de horizontale diffusiviteit is een waarde van 0.01 m^2/s gebruikt. In verticale richting wordt het k-ε turbulentiemodel gebruikt, met achtergrondsviscositeit en -diffusiviteit gelijk aan 10^{-5}.

3 Resultaten

3.1 Configuratie 1

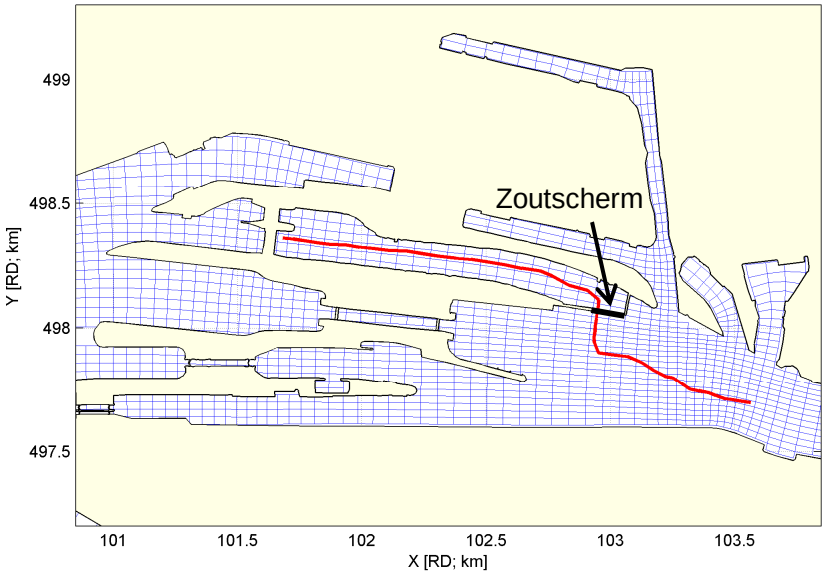
De efficiëntie van de selectieve onttrekking wordt uitgedrukt in het percentage verschil in zouttransport door de spuisluizen in IJmuiden. Figuur 3.1 geeft een overzicht van het zouttransport door de spuisluizen voor de Referentieconfiguratie en Configuratie 1 voor de periode 14 januari 2013 t/m 1 maart 2013. Het momentane zouttransport is sterk gerelateerd aan het debiet door de spuisluizen (vergelijk bijvoorbeeld met Figuur 2.5). De middelste plot geeft het cumulatieve zouttransport weer. Aan het eind van de periode is in Configuratie 1 ongeveer 30% meer zout afgevoerd via de spuisluizen dan in de Referentieconfiguratie. De onderste plot laat het verschil in het momentane zouttransport zien. Deze figuur laat duidelijk zien dat de efficiëntie van de selectieve onttrekking sterk gerelateerd is aan de debieten door

de spuisluis. Tijdens de periode met lage spuidebieten (17 januari t/m 26 januari 2013) is de efficiëntie van de selectieve onttrekking in de orde van 60%. Tijdens periodes met hoge afvoer varieert de efficiëntie tussen de 10% en 40%. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat in de droge periode het zouttransport uiteindelijke toch lager is dan in de periode met hoge afvoeren, zie de gradiënten van het cumulatieve zouttransport.

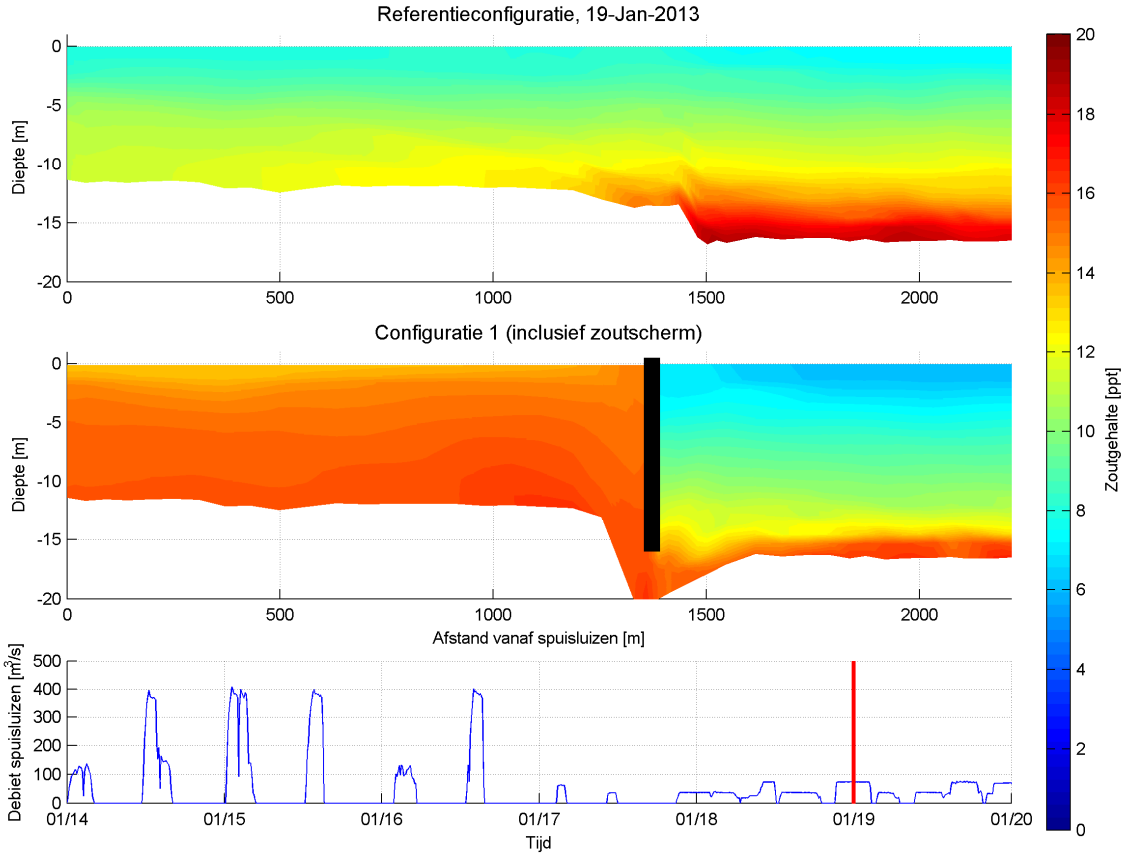


Figuur 3.1 Verschil in zouttransport door spuisluizen tussen de Referentieconfiguratie en Configuratie 1. Boven: Instantaan zouttransport, Midden: Cumulatief zouttransport, Onder: Toename in instantaan zouttransport ten gevolge van het zoutscherm.

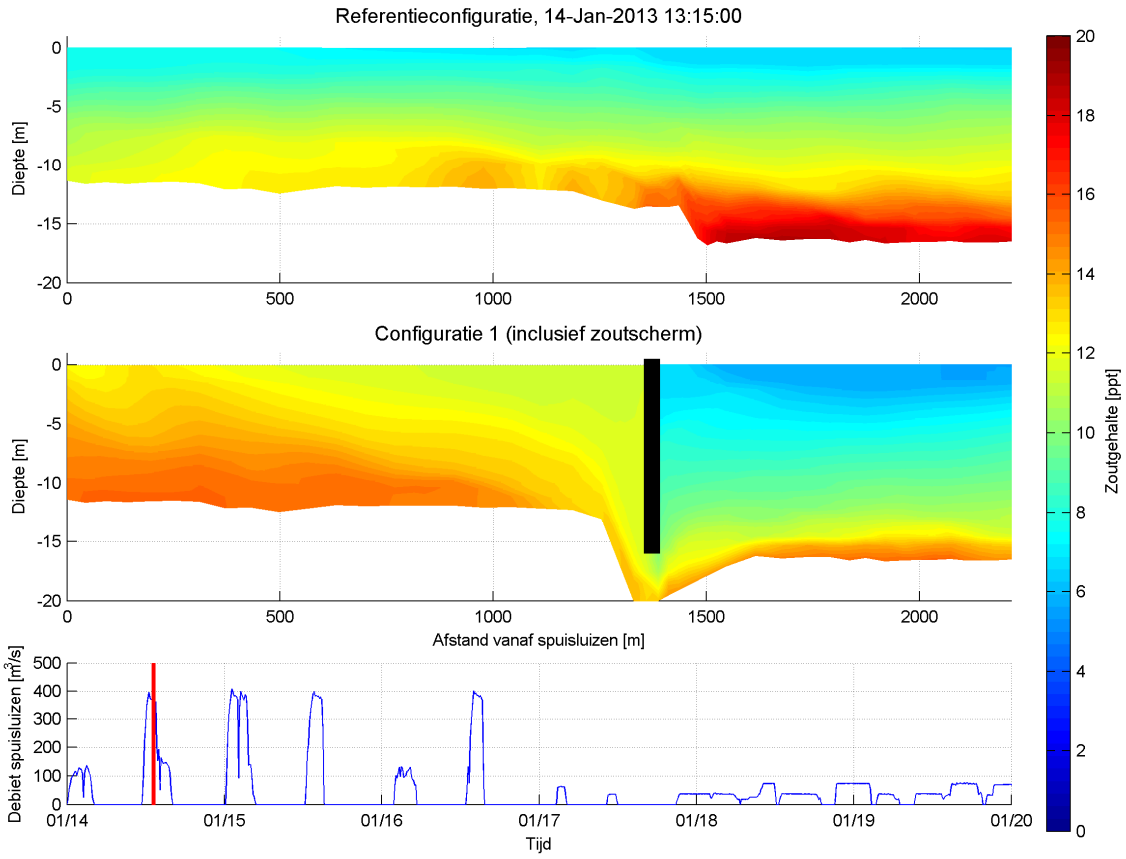
Om de werking van het zoutscherm te illustreren zijn dwarsdoorsnedes van het zoutgehalte in het Noordzeekanaal gegeven tijdens lage afvoer (Figuur 3.3) en hoge afvoer (Figuur 3.4). De figuren laten zien dat tijdens lage spuidebieten, vrijwel alleen het meest zoute water onder het zoutscherm doorstroomd (weinig zoeter water mee getrokken). In dit voorbeeld zien we dat het zoutgehalte in het Binnenspuikanaal door de selectieve onttrekking gestegen is van ca. 10 ppt to ca. 15 ppt. Tijdens hoge afvoer is te zien dat ook een groot gedeelte van het water met een lager zoutgehalte onder het zoutscherm doorstroomd. Het zoutgehalte in het Binnenspuikanaal stijgt nu veel minder: van ca. 10 naar ca. 13 ppt. Ten gevolge van het zoutscherm neemt het zoutgehalte aan de instroomzijde over de gehele waterdiepte af en wordt de zoute bodemlaag dunner.



Figuur 3.2 Locatie van de dwarsdoorsnede zoals gevisualiseerd in Figuur 3.3 en Figuur 3.4.



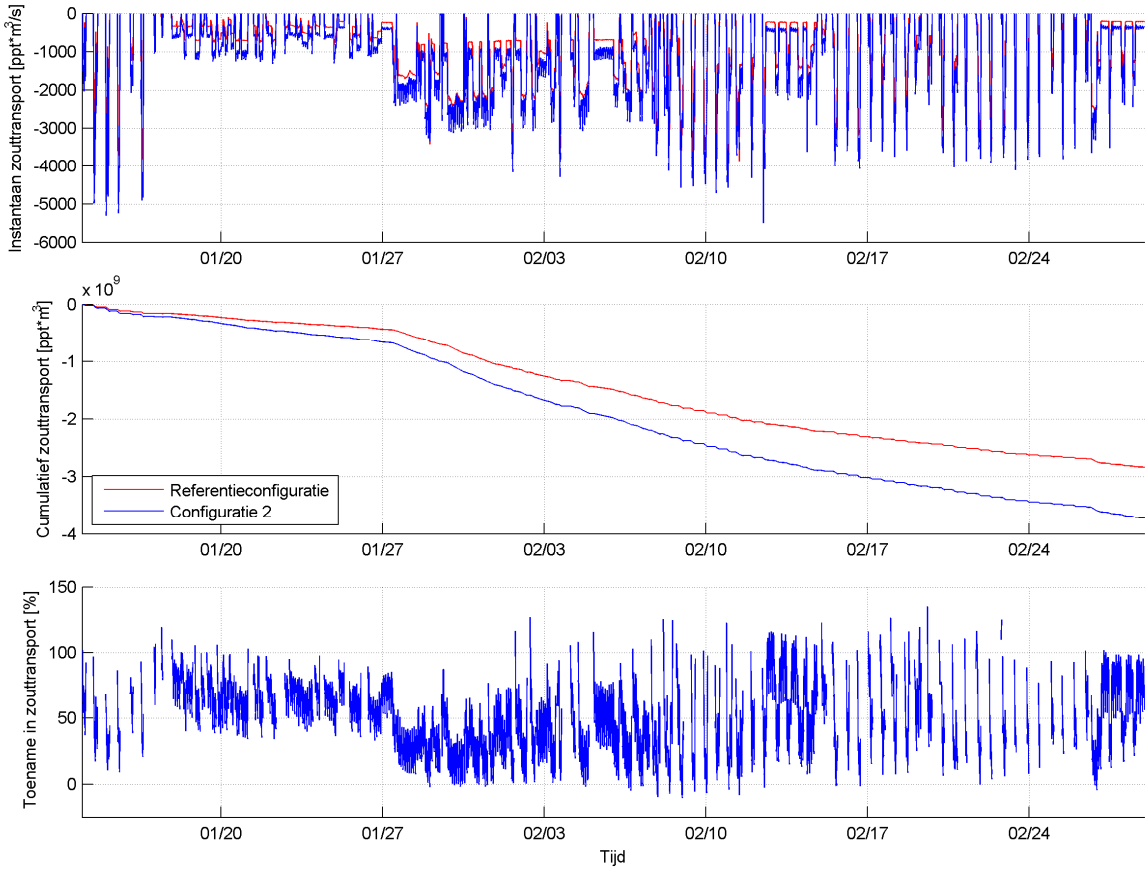
Figuur 3.3 Verticale verdeling van zoutgehalte tijdens periode met lage afvoer door spuisluizen. Boven: dwarsdoorsnede in Referentieconfiguratie, Midden: dwarsdoorsnede voor Configuratie 1, Onder: Tijdserie van debiet door spuisluizen.



Figuur 3.4 Verticale verdeling van zoutgehalte tijdens periode met hoge afvoer door spuisluizen. Boven: dwarsdoorsnede in Referentieconfiguratie, Midden: dwarsdoorsnede voor Configuratie 1, Onder: Tijdserie van debiet door spuisluizen.

3.2 Configuratie 2

Een overzicht van het zouttransport in Configuratie 2 vergeleken met de Referentieconfiguratie is gegeven in Figuur 3.5. De totale hoeveelheid zout dat in deze periode getransporteerd is door de spuisluizen in Configuratie 2 is vergelijkbaar met Configuratie 1. Vergeleken met Configuratie 1 is de variatie in de instantane efficiëntie in Configuratie 2 veel groter. De reden hiervoor is dat in Configuratie 2 de spuidebieten direct zijn opgelegd bij het zoutscherm. Als er wordt begonnen met spuien wordt ook direct water aangezogen naar de spleet onder het zoutscherm, terwijl in Configuratie 1 (en in werkelijkheid) het debiet onder het zoutscherm later reageert en meer uitgesmeerd is dan het spuidebiet.



Figuur 3.5 Verschil in zouttransport door spuisluizen tussen de Referentieconfiguratie en Configuratie 2. Boven: Instantaan zouttransport, Midden: Cumulatief zouttransport, Onder: Toename in instantaan zouttransport ten gevolge van het zoutscherm.

3.3 Configuratie 3

De resultaten voor Configuratie 3 (10 m ‘opening’) zijn zeer vergelijkbaar met Configuratie 2 (4 m ‘opening’). De efficiëntie over de hele periode genomen is iets lager (ongeveer 3%), omdat er relatief meer zoet water hoger in de waterkolom ingenomen wordt. Daarom kan dit toch een interessante oplossing blijken te zijn, bijv. om het verval te over het zoutscherm te reduceren. Een vergelijking met de cumulatieve zoutlast van het sluizencomplex kan aangeven of de capaciteit voldoende is.

4 Discussie

Zouttransport door de selectieve onttrekking

De berekening voor Configuratie 2 levert qua efficiëntie van de selectieve onttrekking vergelijkbare uitkomsten als voor Configuratie 1, d.w.z. ca. 30% hogere zoutafvoer over de gehele periode dan in de Referentieconfiguratie. Dat deze twee benaderingen tot vergelijkbare resultaten leiden, geeft vertrouwen in de berekende waarden. De uiteindelijke wijze van schematiseren van de selectieve onttrekking in Delft3D zal gevalideerd worden op basis van experimenten in een schaalmodel en met de CFD berekeningen.

Verval over het zoutscherm
Ter plaatse van het zoutscherm moet het water onder het scherm door gezogen worden om uiteindelijk gespuid te kunnen worden via de spuisluizen. Bij dit proces vindt energieverlies plaats, waardoor er een verval zal ontstaan over het zoutscherm. Dit zal ten koste gaan van het beschikbare verval bij het spui- en maal complex. Of dit gevolgen heeft voor de operatie (kosten) van de spuisluizen en het gemaal zal moeten blijken uit een nadere studie. Uit de berekening voor Configuratie 1 volgt dat het (ongekalibreerde) verval over het zoutscherm (afhankelijk van het spuidebiet) in de orde van 5 – 15 cm is. Ook het verval zal gevalideerd moeten worden op basis van empirische formules en/of CFD berekeningen.

Effect op zoutuitwisseling bij de sluizen
Voor de huidige situatie is het uitgaande en inkomende debiet bij de sluizen en bijbehorende zoutgehaltes opgelegd aan het model. De invloed van de selectieve onttrekking op de uitwisselstromen bij de sluizen is dus niet meegenomen in de modellering. Door de selectieve onttrekking zal meer zout afgevoerd worden dan in de huidige situatie. Hierdoor neemt het zoutgehalte in de bovenlaag van de binnenvoorhaven af. Verwacht wordt dat de uitwisselstroom tussen de sluiskolken en het Noordzeekanaal hierdoor toe zal nemen, waardoor de zoutbelasting vanuit de sluizen mogelijk groter wordt. Om het kwantitatieve effect op de zoutbelasting te bepalen is nader onderzoek nodig.

Effect nieuwe zeesluis bij IJmuiden
De geplande nieuwe zeesluis te IJmuiden is groter en dieper dan de huidige Noordersluis. Ook met eventuele mitigerende maatregelen op de sluis (bellenscherm, verhoogde drempel) zal de zoutbelasting vanuit de nieuwe sluis groter zijn dan in de huidige situatie. In dat geval zullen de zoutgehaltes ca. 2.7 en 3.2 ppt toenemen en zal de verticale stratificatie ca 0.5 ppt groter worden, afgeleid uit [1]. Hoe groter het relatieve dichtheidsverschil, des te gemakkelijker water vanuit het onderste deel van de waterkolom aangezogen kan worden onder het zoutscherm door. Echter, de beschikbare informatie wijst er niet op dat de relatieve dichtheid significant veranderd. Door de toename van het zoutgehalte in de situatie met de nieuwe zeesluis zal wel meer zout worden afgevoerd.

5 Conclusies

Met behulp van indicatieve Delft3D berekeningen is een eerste verkenning uitgevoerd van het effect van een selectieve onttrekking op het zoutgehalte in het Noordzeekanaal voor de bestaande situatie met Noordersluis. Daarbij is effectiviteit gedefinieerd als de toename in het zouttransport bij gelijke afvoer van het spui- en maalcomplex in IJmuiden. Het zoutscherm is op verschillende schematische wijzen in het model ingebracht. Uit de (niet gevalideerde) indicatieve Delft3D berekeningen kan het volgende geconcludeerd worden:

- Afhankelijk van het debiet bij de spuisluizen is de verwachte effectiviteit van de selectieve onttrekking in de range van 10%-60%. Over de gemodelleerde periode is de gemiddelde effectiviteit ongeveer 30%.
- De efficiëntie van de selectieve onttrekking (toename in zouttransport ten opzichte van de huidige situatie) is het hoogst voor een laag debiet door de spuisluizen, omdat dan effectief het zoute water onder in de water kolom afgezogen wordt. Bij hogere spuidebieten wordt ook een groot deel van het water uit het midden van de waterkolom en hoger afgezogen. Aangezien het zoutgehalte hoger in de water kolom afneemt, zal bij

hogere debieten de efficiëntie van de selectieve onttrekking afnemen. Daarbij moet opgemerkt worden dat in droge perioden het zouttransport uiteindelijke wel lager is dan in de periode met hoge afvoeren.

- Naar verwachting is selectieve onttrekking voor de situatie met de nieuwe zeesluis effectiever dan voor de huidige situatie, omdat door een hoger zoutgehalte in de Velserkom met hetzelfde debiet meer zout zal worden afgevoerd.
- Ten gevolge van de selectieve onttrekking zal de zoute onderlaag aan de instroomkant van het zoutscherm dunner worden en zal over de gehele waterdiepte het zoutgehalte afnemen. Dit heeft mogelijk ook gevolgen voor de zoutuitwisselling bij de schutsluizen.

In het vervolg zal de implementatie van selectieve onttrekking in Delft3D worden verbeterd, en gevalideerd op basis van experimenten in een schaalmodel [4, 5] en de CFD berekeningen. Ook zal gekeken worden naar wat selectieve onttrekking in de Projectvariant met de Nieuwe Zeesluis met ladingstroom 125 miljoen ton per jaar betekent voor de zouthuishouding in het Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal in vergelijking met de autonome ontwikkeling (Noordersluis met ladingstroom 95 miljoen ton per jaar).

Referenties

[1] "Verfijning onderzoek chloride indringing Noordzeekanaal (ZTIJ)", Rapport A3026R1r3. Arcadis, februari 2014

[2] "Vullen database webapplicatie immissietoets havens", rapport A2949R2r2. Arcadis, april 2014

[3] "Temperatuurmodellering Noodzeekanaal 2003", rapport A2831R1r2. Arcadis, 2011

[4] "Stroomsluis Noordland in de Oosterschelde dam, selectief afzuigen, twee - dimensionaal onderzoek", M1204, Waterloopkundig Laboratorium, juli 1973

[5] "Stroomsluis Noordland in de Oosterschelde dam, selectief afzuigen, drie - dimensionaal onderzoek", M1209, Waterloopkundig Laboratorium, december 1973.

Version	Date	Author	Initials	Review	Initials	Approval	Initials
1	Sep. 2015	W. Verbruggen		R.E. Uittenbogaard		O.M. Weiler	
		A.C. Bijlsma					

E Memo CFD-Validatie

Memo

To
Arnout Bijlsma

Date
10 September 2015

Number of pages
16

From
Tommaso Boschetti

Direct line
+31(0)88335 7347

E-mail
tommaso.boschetti@deltares.nl

Subject
CFD validatie van dichtheidstroming onder een zoutscherm

---

1 Introduction

1.1 Background

Deltares is involved as an advisor of Rijkswaterstaat on the development of the New Sea Lock in IJmuiden. This involvement included research on the hydraulic functioning of the levelling system and the consequences of the new lock for salt intrusion into the North Sea Canal.

After the start of operations at the new sea lock at IJmuiden the salt intrusion will increase. Measures can be taken in order to prevent or mitigate this salt intrusion. Rijkswaterstaat requires an overview of possible measures and advice on their relative effectiveness and cost effectiveness.

In the context of this, Deltares has been asked to assess the effectiveness of one such measure, namely a selective withdrawal performed by placing a salt screen in the inner part of the 'Spuikanaal'.

In the report "Waterloopkundig Laboratorium en Mazijk" (1973) [1] formulas have been derived for selective withdrawal and for situations where both salt and fresh water were withdrawn. The formulas, which are based on the Bernoulli equation, are verified with laboratory experiments in the same study.

1.2 Aim of the study

The aim of this study is to demonstrate the capability of Computational Fluid Dynamics (CFD) to simulate the operation of a salt screen. This is achieved by reproducing the experiments carried out in [1] and comparing the scale model results with the numerical ones.

2 Scale model report

In this section the report [1] is briefly summarized; the first subsection focuses on the theoretical formulas describing selective withdrawal while the second one introduces the scale model, with a short description of the layout and of the experimental work. Finally in the third subsection one of the resulting charts is reported and briefly explained.

2.1 Analytical method

First of all, formulas were derived for selective withdrawal and for situations where both salt and fresh water was withdrawn. As previously said the basis of these formulas is Bernoulli's equation. An empirical determined correction factor has been added after the experiments.

The formulas below determine the critical withdrawal rate, below which no fluid will be attained from the upper layer:

$$\beta \cdot F_{i,c} = \frac{2}{3}\frac{h_r}{D}\sqrt{\frac{2}{3}\frac{h_r}{D}} \qquad \text{for} \quad \frac{h_r}{D} > \frac{2}{3} \qquad (1) \qquad \text{eq.(22) in [1]}$$

$$\beta \cdot F_{i,c} = \sqrt{2\left(\frac{h_r}{D} - 1\right)} \qquad \text{for} \quad 1 < \frac{h_r}{D} < \frac{2}{3} \qquad (2) \qquad \text{eq.(21) in [1]}$$

Where:

$F_{i,c} = \frac{Q_c/B \cdot D}{\sqrt{\varepsilon \cdot g \cdot D}}$ = critical internal Froude number (i.e. the Froude number below which no fluid will be attained from the upper layer)

$\varepsilon = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_2}$ = relative density

Q_c = critical flow rate (i.e. the flow rate below which no fluid will be attained from the upper layer)

B = width of withdrawal

D = height of withdrawal

h_r = height of the dense layer

β = correction factor for the non-uniformity of the velocity distribution in the dense layer

If the withdrawal rate is below the critical withdrawal rate as discussed above, no fluid from the upper layer will be withdrawn. If the critical rate is exceeded, the following formulas can be used to determine the percentage of withdrawal from the upper layer:

$$\beta \cdot F_i = \frac{2}{3-3n}\frac{h_r}{D}\sqrt{\frac{2}{3}\frac{h_r}{D}} \qquad \text{for} \quad D < \frac{2h_r}{3}\frac{1}{1-n} \qquad (3) \qquad \text{eq.(53) in [1]}$$

$$\beta \cdot F_i = \sqrt{2\left(\frac{h_r}{D} - 1 + n\right)} \qquad \text{for} \quad D > \frac{2h_r}{3}\frac{1}{1-n} \qquad (4) \qquad \text{eq.(55) in [1]}$$

Where:

$F_{i,c}$ = internal Froude number

n = the percentage of water from the upper layer with respect to the entire discharge

In the experiments the values of n and q were given as inputs and the resulting value h_r measured during the experiment. The formulas can also be rearranged to determine the value of n for a given discharge q and upstream stratification h_r.

2.2 Scale model tests

In this section the scale model outline is presented.
In Figure 2.1 a top and a side view (A-A) of the model are reported.

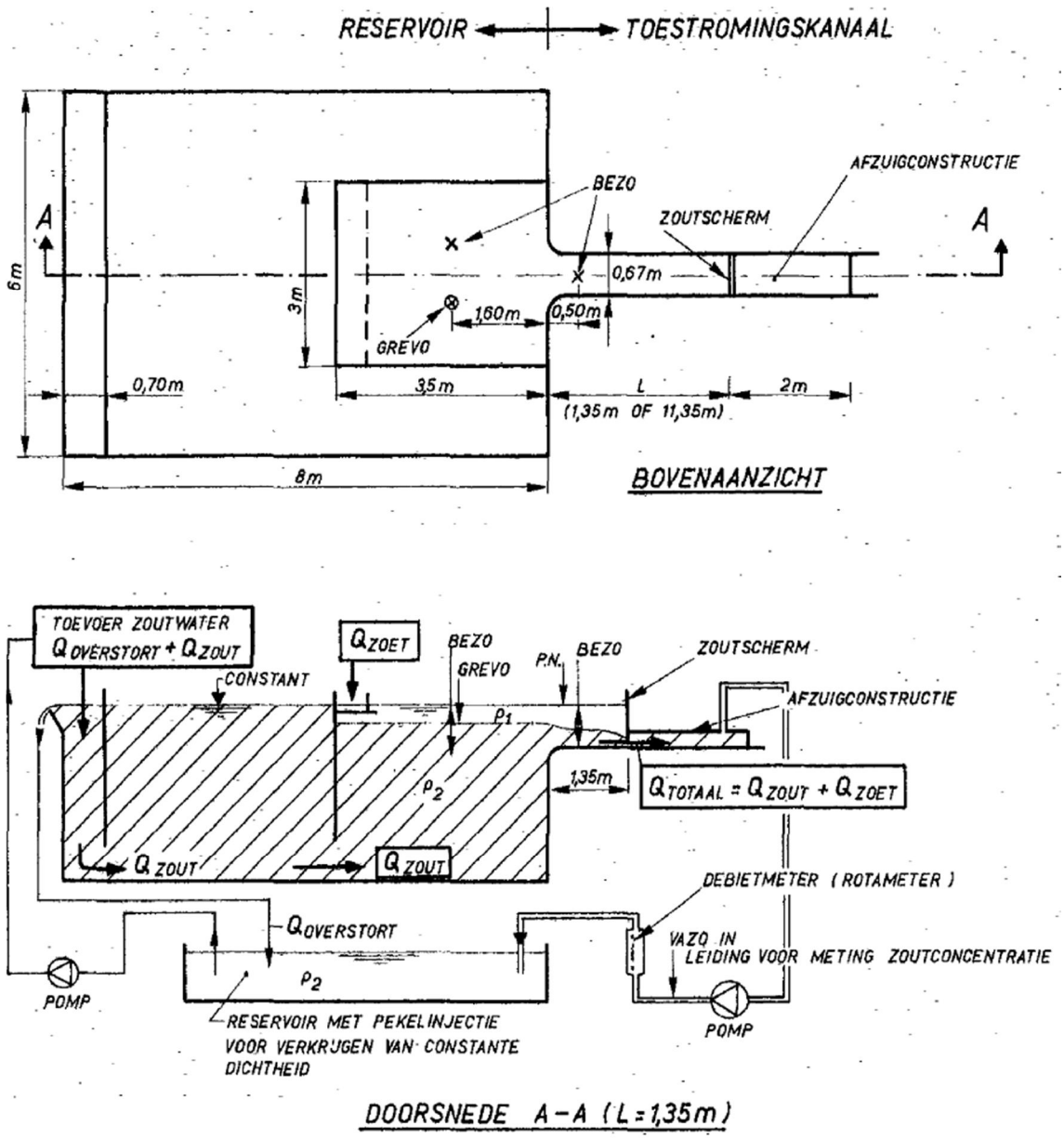


Figure 2.1- Top and side (A-A) view of the scale model

The scale model was composed of two open air reservoirs: an outer one, 6.00m x 8.00m, filled with salt water (bottom left in Figure 2.1 side view), and an internal one, 3.00m x 3.50m, where only fresh water was added (top and centred); the two were connected through an opening on the bottom that allowed salt water to flow to the internal enclosed tank without a free surface. In this way the mixing between fresh and salt water was minimized and the interface was kept as sharp as possible.

The smaller reservoir, which contained a fresh water layer on a salt water one, was connected on top to a 0.67m wide duct (right in Figure 2.1) where the salt screen was placed. Behind the screen the open air duct became a closed pipe; through this part water was extracted from the reservoir thanks to a pump (bottom right in Figure 2.1 side view) and stored in a third tank. The circuit was finally closed as the collected water was later used to re-fill the outer reservoir.

The experimental work followed this scheme:

- a certain ratio (0%, 10%, 20%, 30% or 50%) between the two incoming flows (fresh and salt) was chosen;
- the outflow behind the salt screen was set to be equal to the total inflow allowing, after a proper time period, the realization steady flow situation;
- measurements of the interface position were taken;
- each experiment was plotted on a h_r/D - F_i chart in order to compare the scale model results with the previously introduced theoretical equations (subsection 2.1).

The interface between salt and fresh water is measured in two different points; those points are marked as “bezo” in Figure 2.1. Figure 2.2 highlights these measurements of the interface height, naming them h_r and a_m respectively.

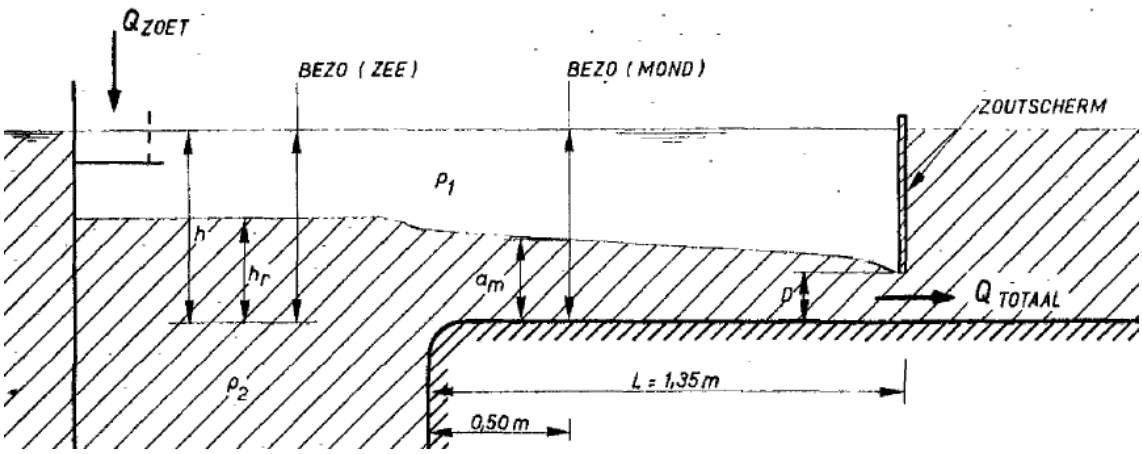


Figure 2.2 - Zoom of side view (A-A) with qualitative interface profile

Different positions of the salt screen were investigated, varying either D (height of withdrawal) and L (distance between the screen and the reservoir). Furthermore, experiments have been

carried out for two distinct density differences (2 kg/m^3 and 20 kg/m^3) and for two different shapes of the salt screen bottom edge.

2.3 Results

Due to the Bernoulli's equation approximations, the measurements complied with the formulas after applying a correction factor.

Figure 2.3 below shows the typical outcome of the previously described analysis.

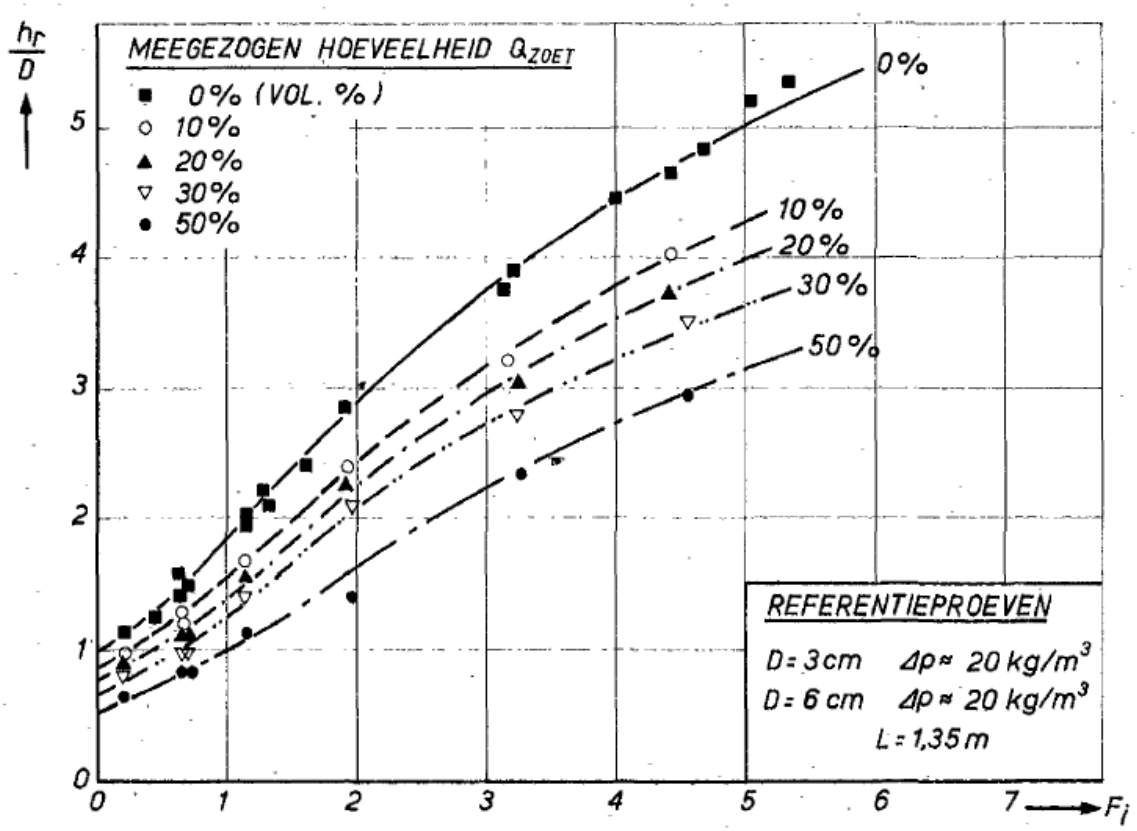


Figure 2.3 - Chart of experimental points and theoretical formulas for Δρ = 20 kg/m^3 and L = 1.35 m

Experiments with two different D and fixed Δρ and L are here plotted together with the empirical formulas. It's important to underline how the experimental measurements match very well with the equations forecasts.

3 CFD model setup

This section gives an overview of the design of the computational domain, the mesh, the physical models and boundary conditions used for the numerical simulation of the operation of a salt screen.

For the modelling of the lock exchange flow the CFD package Star-CCM+ is used (version 10.04.011). Star CCM+ is an engineering software package for solving problems involving flow, heat transfer and stress.

3.1 CFD 2DV geometry

The numerical fluid domain is reduced to only the inner reservoir, as there is no need to model the scale model structure entirely to get the requested physical quantities.

Based on the scale model cross section a 2D geometry is defined for the numerical simulations, represented below in Figure 3.1.

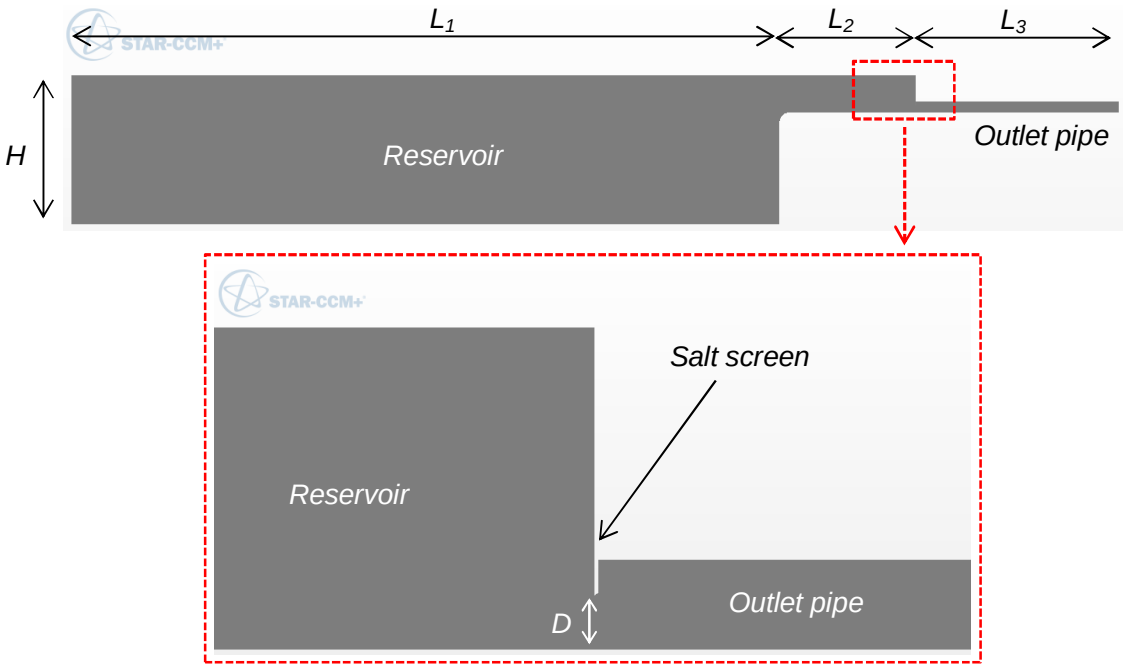


Figure 3.1 - 2D fluid domain for numerical computations

In order to prevent the flow field being affected by the two inflows (fresh and salt water inlets are placed on the left side of the domain), the reservoir length is assumed to be two times the length of the inner tank in the scale model. Assuming L_2 = 1.35m (duct length in front of the screen) and L_3 = 2.00m, the whole domain ($L_1 + L_2 + L_3$) will be 10.35m. The height instead is equal to the scale model (1.46m). Finally the height of withdrawal (D) was assumed to be 0.061m.

2DV implies a constant width of reservoir and canal.

3.2 Mesh

The mesh was generated using the cell-splitting algorithm of the Star-CCM+ trimmer meshes. This gives a 2D mesh of square cells. The resulting grid consists in 365,710 cells ranging from 0.06m to 0.002m in the refinement region. The refinement region is located around the salt screen and along the interface between fresh and salt water, where two measuring points are placed. A first sensor (h_r) is located inside the reservoir, at 1.60m distance from the duct where the screen is placed (s_1 in Figure 3.2); a second sensor (a_m) is installed inside the duct, at 0.50m distance from the reservoir (s_2 in Figure 3.2).

Figure 3.2 shows an extract of the discretized representation of the computational domain, highlighting the position of the sensors used to define the interface position.

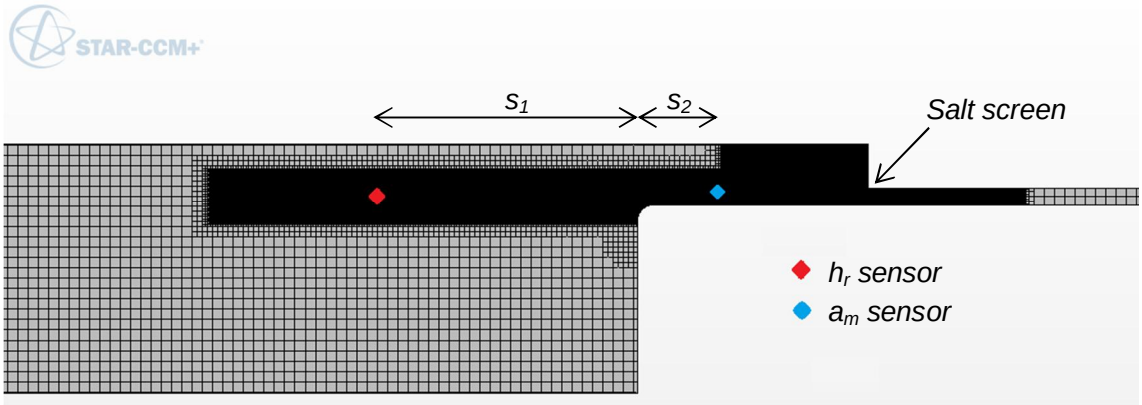


Figure 3.2 - Mesh scene of CFD model with refinement region and measuring points

Particularly important is the mesh size near the salt screen; as previously said the average cell dimension is, in that region, 0.002m. This means that there are more than 30 cells over the withdrawal height D.

Figure 3.3 shows an extract of the discretized representation below the salt screen in the computational domain.

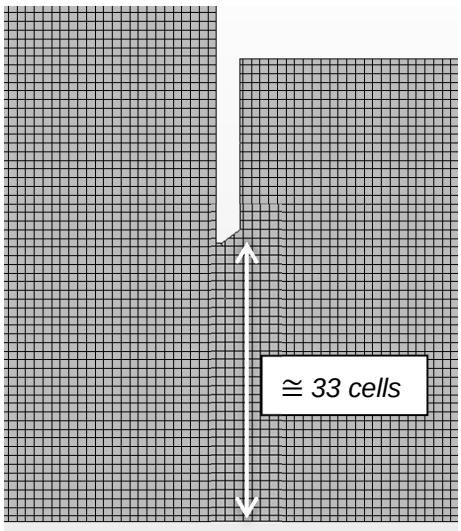


Figure 3.3 - Mesh detail below the salt screen

3.3 Modelling salt water

For modelling the transport of salt, a scalar transport equation for salt concentration is used.
In report [1] only the density difference (Δρ) is given; the values used here refer to a condition similar to the IJmuiden situation.
The density of the water is modelled as a function of salt content and depends on the concentration of the scalar in that section. The used equation assumes that the density varies linearly between the values of 1027 (corresponding to 35 PSU) and 1007 (corresponding to 10 PSU).

For modelling the initial fraction of salt and fresh water a field function for the salt scalar is used: on left side of the salt screen, inside the reservoir, this defines the interface position; on the other side instead, no interface is defined, as the outlet pipe is assumed entirely filled with salt water. Figure 3.4 below shows the initial density distribution over the fluid domain.

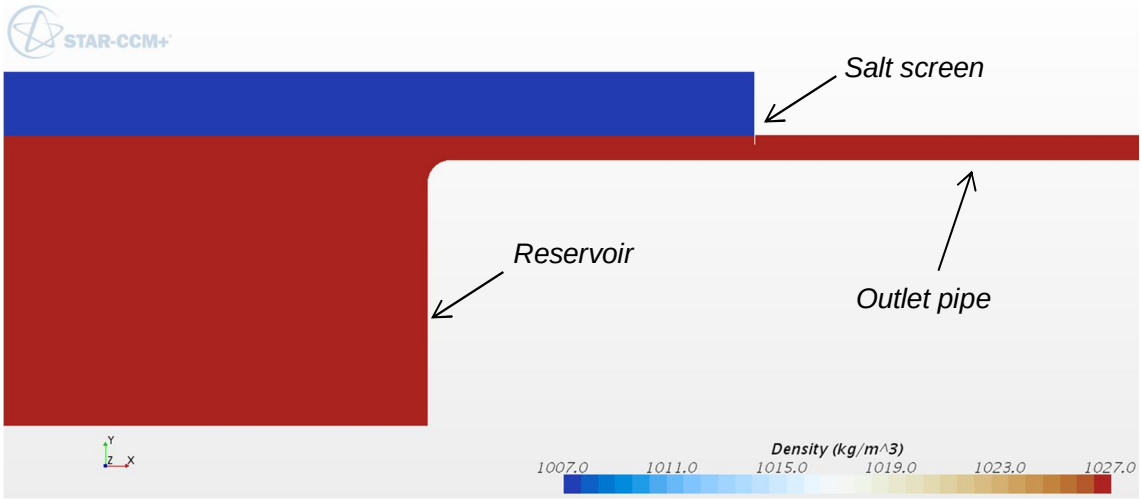


Figure 3.4 - Initial density distribution in the CFD fluid domain

Due to the fact that we are dealing with a gravity driven flow, the gravity is selected in the physical models and is set to -9.81 m/s^2 in the vertical direction (y axis). Owing to the presence of density differences a buoyancy term, proportional to the difference in density, is added to the momentum equation at each cell.

3.4 Turbulence

For modelling the turbulence the “Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)” approach is used. Within the RANS formulation the unsteady turbulent fluctuations are modelled as having an effect on the mean flow and not explicitly resolved. The specific model used for this purpose is a choice of the modeller.

For this simulation the “Realizable K-Epsilon Two-Layer” turbulence model is selected. This is a two-equation turbulence model in which transport equations are solved for the kinetic energy k and its dissipation rate ϵ.

This model has been used previously for density flows at locks (see [2])

3.5 Boundary conditions

A brief schematization of the boundaries in the numerical model domain is given below in Figure 3.5. This schematization is consistent with the scale model experimental setup.

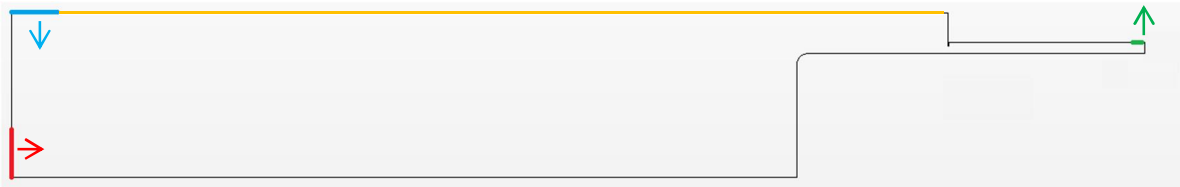


Figure 3.5 - Boundary schematization in numerical model

- ***Fresh water inlet***
- ***Salt water inlet***
- ***Free surface (rigid lid)***
- ***Outlet***
- ***Walls***

In the scale model tests, fresh water and salt water were added with a constant flow rate through the two inlets (left in Figure 3.5); meanwhile the same amount of incoming water was pumped out of the system through the outlet behind the salt screen (right in Figure 3.5). Being the ratio between fresh and salt water fixed, a steady state was reached, where measurements were taken

In order to reproduce the same situation in the numerical model the two inlets are defined as "Mass flow inlets", as also the outlet (a negative mass flow rate has to be assigned here to pump water out of the system).

Solving this kind of boundary condition with a 2D solver forces Star CCM+ to use a third virtual dimension of 1 m. The mass flow rate in the simulations assumes this width and must therefore be adjusted to give the correct velocity in the narrow channel at the salt screen (which was 0.67m wide) and therefore the correct Froude number. This has consequences for the velocity in the wider basin (3m wide in the experiments) where the parameter h_r is measured. For this reason CFD will return higher the velocities in this region.

For G the mass flux and H the section height, the mass flow rate (MFR from now on) used in the CFD model is calculated as:

$$MFR_{CFD\ model} = G * H * 1$$

G can be derived from the same equation referring to the scale model:

$$G = \frac{MFR_{scale\ model}}{B_{sm} * H}$$

Where B_{sm} is the width of the narrow channel in the scale model (0.67m).
Finally, combining the previous two relations:

$$MFR_{CFD\ model} = \frac{3}{2} MFR_{scale\ model}$$

Thus in order to get the same order of magnitude of the velocity, the MFR in CFD has to be 1.5 times higher than the one in the scale model.

All other boundaries in the CFD model are walls; to represent the free surface on the upper side of the domain ('Free surface' in Figure 3.5) a slip boundary condition is used so there is no flow component perpendicular to the wall and no friction parallel to the wall (rigid lid). This is a good approximation of a free surface that is relatively stationary. A no-slip wall boundary condition instead is imposed on all other walls, implying a zero velocity constraint on them.

3.6 Case selection

Numerical computations were carried out for the following settings (left column reports the scale model test number):

Table 1 - Selected cases for CFD with scale model results (h_r, a_m, F_i, h_r/D)

#	D (cm)	ε (-)	Q_{tot} ($10^{-3}m^3/s$)	Q_{fresh} ($10^{-3}m^3/s$)	h_r (cm)	a_m (cm)	F_i (-)	h_r/D (-)
[29]	6.1	0.0019	1.0	0.1	5.75	5.6	0.23	0.94
[36]	6.1	0.0019	3.0	0.3	7.35	5.8	0.66	1.2
[42]	6.1	0.0019	5.0	0.5	9.8	7.2	1.14	1.61

These three cases have the same percentage of withdrawal (10%) from the upper fresh water layer. They have been chosen to give low h_r/D ratios which are deemed more likely to be used at IJmuiden if a selective withdrawal system is installed, because the pressure drop over higher salt screen gaps is less.

These cases were also chosen to be in both the regimes of the empirical relation (see subsection 2.1)

4 Results

This section contains the results of the salt screen simulations for the 3 different cases previously introduced. First the numerical model results are compared with the formulas derived from the scale model research. Thereafter an analysis is presented about the effect of the 2D schematization on the water levels. Finally a contour plot displaying the interface position over the fluid domain is briefly presented and discussed.

4.1 Comparison with theoretical formula

In [1] formulas were derived describing the relation between h_r/D and the Froude number. These relationships also depend on the percentage of withdrawal from the fresh layer. Measurements of the interface position and water velocity below the salt screen were taken in the numerical model, in order to be able to plot each experiment on the same chart with the previously mentioned formula. This allows a quick comparison and evaluation of the capability of CFD to reproduce this kind of problem. In Figure 4.1 below the numerical results are plotted together with the theoretical formulas for different withdrawal rates from the upper layer.

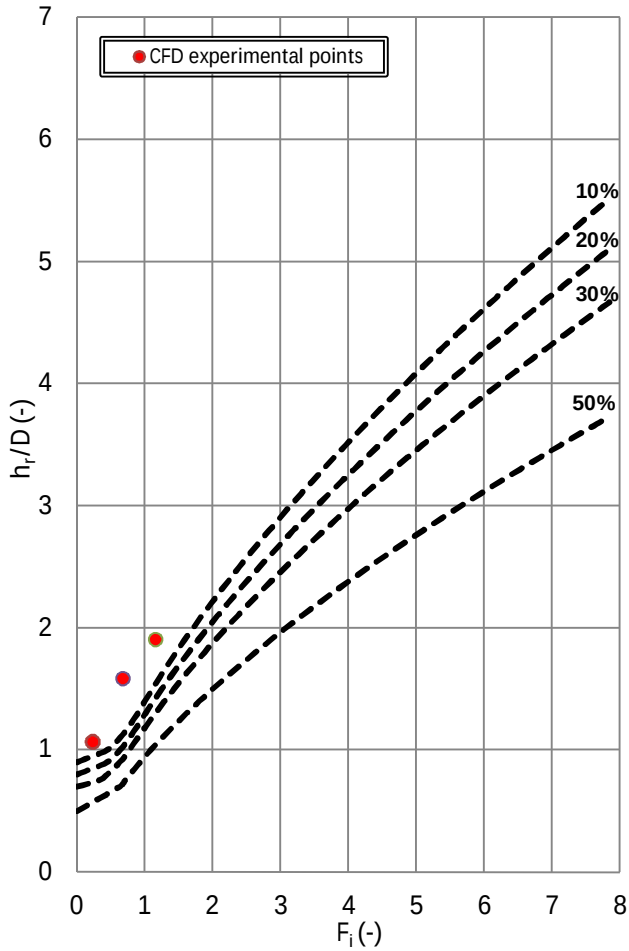


Figure 4.1 - Numerical model results with theoretical curves for different withdrawal rates from the upper layer; no correction factor β is applied to F_i

As the mass flux G is assumed to be constant (subsection 3.5), the Froude number in the numerical model matches for each run the value obtained in the scale model.

Because the error in the estimation of the Froude number is negligible, the difference between the CFD and the experiments can only be as a result of the difference in h_r. The assumption of a 2D domain in the CFD gives different (higher) velocities in the wider basin than in the scale model.

4.2 2DV approach effect on h_r and a_m

Given that the 2DV approach forces the velocities in the basin to be higher, the agreement for a_m, the height of the saltwater layer in the narrow channel in front of the salt screen, showed to be less sensitive to this discrepancy.

The figures below show the CFD and scale model results in terms of h_r/D (Figure 4.2) and in terms of a_m/D (Figure 4.3).

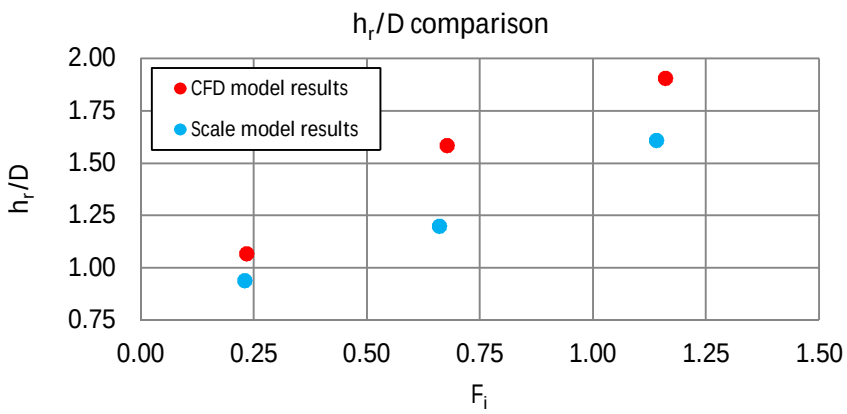


Figure 4.2 - Numerical model results in terms of h_r/D

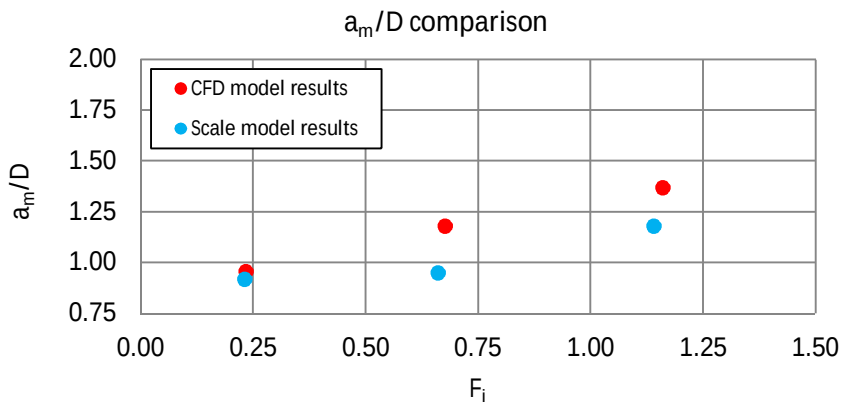


Figure 4.3 - Numerical model results in terms of a_m/D

Figure 4.3 shows that there is an overestimation also in terms of a_m, but less accentuated than for h_r. This is displayed in terms of % in Table 2 below.

Table 2 - Error in % of numerical model results compared to scale model measurements

err %	[29]	[36]	[42]
a_m/D (%)	4.3	24.1	16.1
h_r/D (%)	13.7	32.3	18.5

Table 2 above highlights how the error, in terms of %, made in the measurement of h_r in the numerical model is always higher than the error made in the estimation of a_m.

4.3 Interface position

Figure 4.4 below shows the resulting density distribution over the fluid domain for the numerical run [42] (see subsection 3.6).

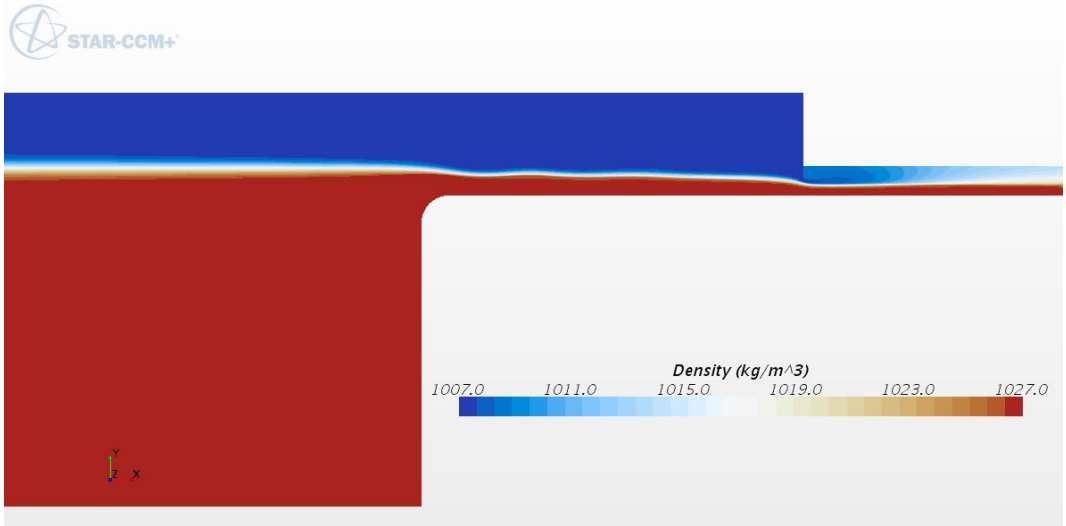


Figure 4.4 - Density scene on fluid domain for experiment [42]

The interface between the two layers appears to be well-defined and sharp along the whole domain and qualitatively matches the profile expected from the scale model test. Figure 4.6 below focus on the interface position near the two sensors.

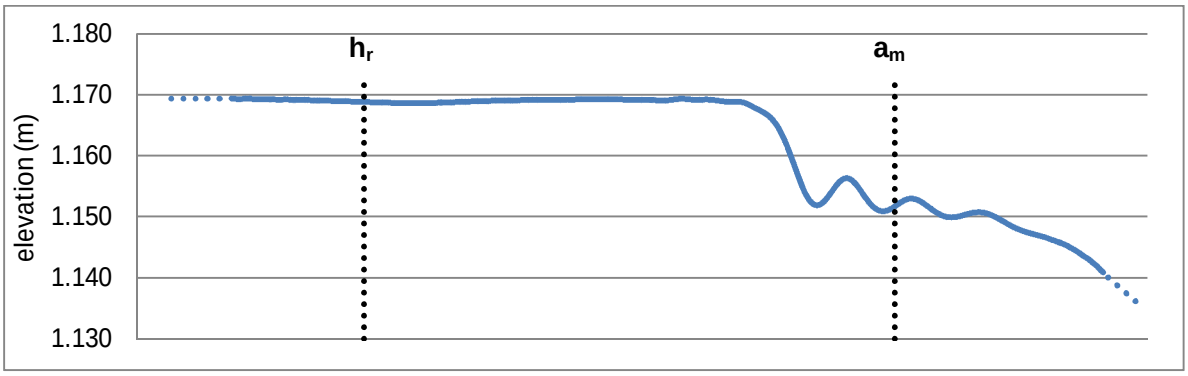


Figure 4.5 – Interface position near sensors

Figure 4.5 above highlights that the h_r sensor is located where the interface is smooth and relatively calm, ensuring an univocal measurement of its position. The same thing isn't true for the a_m sensor, which is placed in a region where the interface fluctuates; this causes an uncertainty in the measurement in the order of ± 0.5cm.

5 Conclusions

In the current report the capability of a 2D CFD model to simulate the operation of a salt screen has been analysed. After the comparison with the scale model results the following conclusions can be drawn:

- For a given discharge per unit width, the height of the withdrawal opening and the relative density, the selective withdrawal can be reproduced well by the 2DV CFD model in a qualitative sense. In absolute sense, the computed height of the dense layer is still slightly overestimated.

- Using a 2DV approach to reproduce a 3D situation implies the need choose the mass flow rate to match the velocities at either the narrow basin or the wide basin. In these simulations we have chosen to match the velocities below in the narrow basin in order to reproduce correctly the velocities below the salt screen.

- A 2DV model isn't able to reproduce the sudden restriction from the reservoir to the narrow channel, and thus gives higher velocities in the wider basin than in the scale model.

- A sensor placed in the narrow channel suffers of a higher uncertainty in the definition of the bottom layer thickness due to fluctuations of the interface in this region.

The results shown in subsection 4.2 underline a sensible discrepancy between CFD and the scale model measurements; this might be an effect of the 2DV schematization of a 3D problem. Other errors are associated with the various models underlying the governing equations (turbulence model…).

An analysis of the pressure distribution in the domain highlighted the presence of a region near the rigid lid characterized by negative pressure values; this is because the rigid lid boundary does not allow the free surface to lower near the start of the narrow channel (this acts like a broad crested weir) as no air can enter the system. This negative pressure causes interface to rise and thus affects the measurements of h_r and a_m.

Future research will focus on the effect of a different boundary condition in the 2D model ("velocity inlets" instead on "mass flow inlets", see subsection 3.5) and will include simulations carried out on a 3D schematization of the scale model.

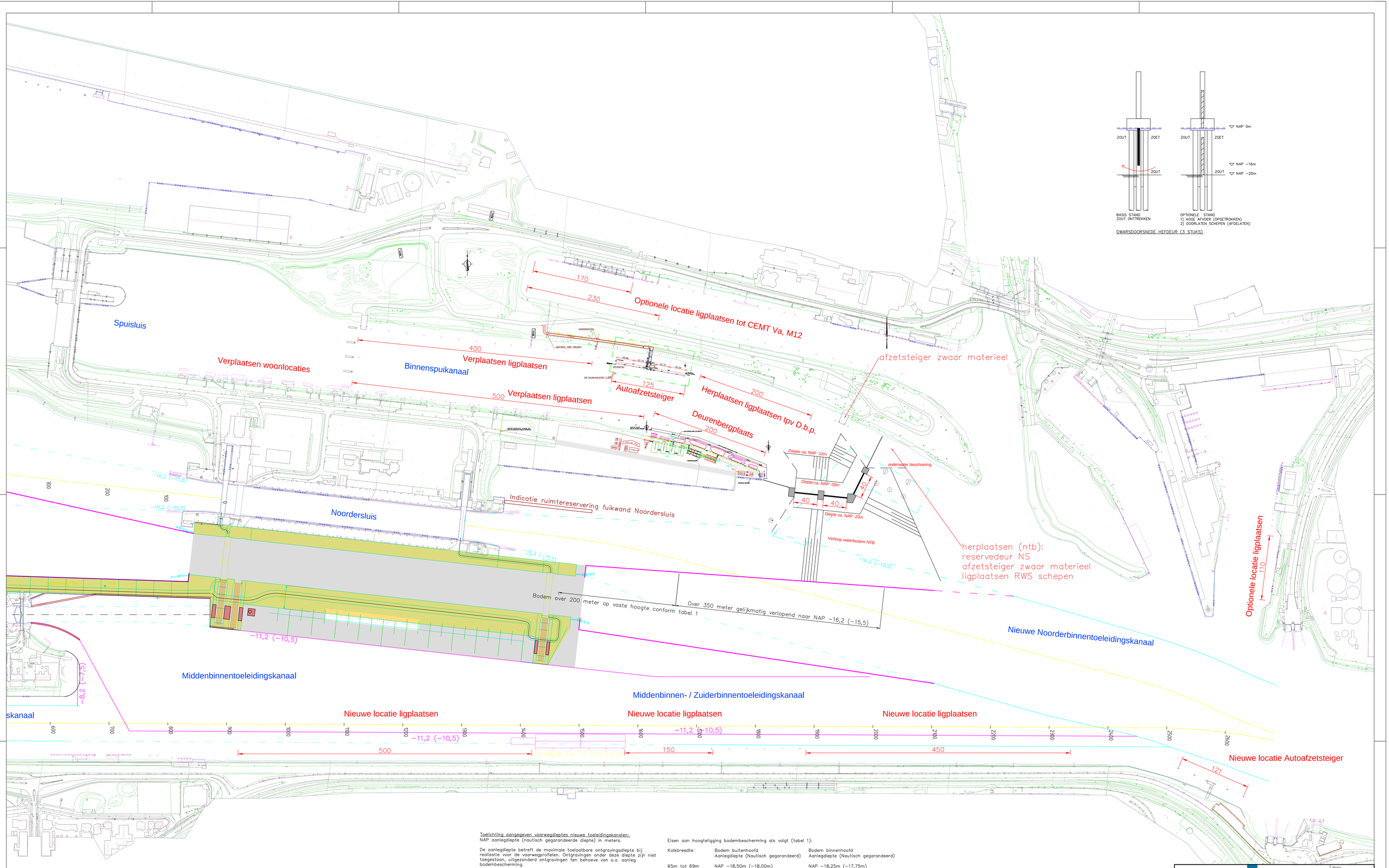
6 Literature

[1] - *Waterloopkundig Laboratorium en Mazijk, A. van. Stroomsluis Noordland in de Oosterscheldedam; selectief afzuigen. Tweedimensionaal onderzoek. Verslag modelonderzoek M 1204, juli 1973*

[2] – Memo: *Numerical simulations of a lock exchange flow at the New Sea Lock of IJmuiden - investigation of sill effectiveness (30/06/2015)*

Version	Date	Author	Initials Review	Initials Approval	Initials
1	Sep. 2015	T. Boschetti	R.E. Uittenbogaard	A.C. Bijlsma	

F Tekening voorlopige inpassing Selectieve Onttrekking



DWARSDOORSNEDE HEFDEUR (3 STUKS)

Toelichting aangegeven vaarwegdieptes nieuwe toeleidingskanalen:
NAP aanlegdiepte (nautisch gegarandeerde diepte) in meters.

De aanlegdiepte betreft de maximale toelaatbare ontgravingsdiepte bij realisatie voor de vaarwegprofielen. Ontgravingen onder deze diepte zijn niet toegestaan, uitgezonderd ontgravingen ten behoeve van o.a. aanleg bodembescherming.

De nautisch gegarandeerde diepte betreft de diepte die ten minste gegarandeerd moet zijn. De nautisch gegarandeerde diepte van de eerste 50m van de vaarwegprofielen binnen Gebied RWS en gerekend vanaf de grens van Gebied RWS niet behoort bij de definitie van het vaarwegprofiel.

Toelichting Noorderbinnentoeleidingskanaal nieuwe zeesluis:
Ligging Geleidewerken en vaarwegprofiel mag over de hartlijn van de nieuwe zeesluis met 30 meter verschuiven conform richting pijl.
Geleidewerken Nieuwe Noorderbinnentoeleidingskanaal dienen symmetrisch ten opzichte van de as van de vaarweg te zijn uitgevoerd.

Toelichting Noorderbuitentoeleidingskanaal nieuwe zeesluis:
Ligging Geleidewerken en vaarwegprofiel mag over de hartlijn van de nieuwe zeesluis met 30 meter verschuiven conform richting pijl.
Geleidewerken Nieuwe Noorderbuitentoeleidingskanaal dienen symmetrisch ten opzichte van de as van de vaarweg te zijn uitgevoerd.

Eisen aan hoogteligging bodembescherming als volgt (tabel 1):

Kolkbreedte	Bodem buitenhoofd Aanlegdiepte (Nautisch gegarandeerd)	Bodem binnenhoofd Aanlegdiepte (Nautisch gegarandeerd)
65m tot 69m	NAP −18,50m (−18,00m)	NAP −18,25m (−17,75m)
70m	NAP −18,25m (−17,75m)	NAP −18,00m (−17,50m)

De hoogste ligging van bodem buitenhoofd danwel bodem binnenhoofd dienen voor kolkbreedtes tussen de 69m en de 70m lineair geïnterpoleerd te worden op basis van de gegeven waarden in tabel 1.

De aanlegdiepte voor bodembescherming betreft de hoogst mogelijke ligging van de bovenkant van de bodembescherming met een tolerantie naar boven van +0,00meter.

Legenda:
- Begrenzing vaarwegprofiel nieuwe noorderbinnen- en buitentoeleidingskanaal
- Begrenzing vaarwegprofiel middenbinnentoeleidingskanaal
- Begrenzing vaarwegprofiel toeleidingskanalen (te behouden)
- Begrenzing vaarwegprofiel toeleidingskanalen (vervallen)

dienst

Zeetoegang IJmond

bureau uitbesteding

verkenning/haalbaarheidsstudie
Optie Selectieve onttrekking
relatie met scheepvaartvoorzieningen
Binnenspuikanaal

akk. RWS
datum
behoort bij
in bladen, bladen.

gerekend	RWS	03-06-2015	projectcode
gecontroleerd			dossiercode
uitgegeven			dienstcode
status Concept		versie A	reg.nr. ZTIJ-2015-S0-01

tekening
formaat A0
schaal 12000

G Geregistreerd sluisbedijf 2013 en 2014

Memo

Aan
-

Datum	Kenmerk	Aantal pagina's
8 december 2015	1220309-000-HYE-0029	17
Van	**Doorkiesnummer**	**E-mail**
Matthijs Rietveld	+31(0)88335 7346	matthijs.rietveld@deltares.nl

Onderwerp
Geregistreerd sluisbedrijf 2013 en 2014

Geregistreerd sluisbedrijf 2013 en 2014 op basis van PONTIS

1 Inleiding

Doel van dit memo is aanvullende informatie te verstrekken over de sluisperformance zoals waargenomen in de praktijk, om inzicht te krijgen in de schutfrequentie, het percentage lege schuttingen, het aantal schepen per schutting en de sluisbezetting en de variatie daarvan over dag, week en jaar. Deze gegevens over de operatie van de sluizen en met name de Noordersluis, spelen een belangrijke rol bij de ontwikkeling van de zoutindringing. De informatie is bovendien geschikt voor vergelijking met de sluisperformance tabellen zoals gehanteerd in de PMSS simulaties [1].

1.1 Ontvangen gegevens

Van Arjen Kikkert (RWS-WNN) zijn op 4 november 2015 de volgende database bestanden ontvangen met de registraties van de scheepspassages bij de scheepvaartsluizen van IJmuiden, zie Tabel 1.

Tabel 1 Ontvangen gegevens

Database scheepspassages	Periode
scheepspassages IJmuiden 2013.accdb	1 jan. t/m 31 dec. 2013
scheepspassages IJmuiden 2014.accdb	1 jan. t/m 31 dec. 2014
scheepspassages IJmuiden 2015 (2).accdb	1 jan. t/m 30 april 2015

Deze gegevens zijn afkomstig uit het havenmanagementsysteem PONTIS. PONTIS bevat aanzienlijk meer gegevens dan voorganger Cesar (in bedrijf tot 12 maart 2007), wat een rol kan spelen bij de validatie van PMSS. Sinds 29 augustus 2015 is HaMIS (Havenmeester Management Informatie Systeem) in gebruik [2].

De jaren 2013 en 2014 zijn compleet. Voor 2015 zijn slechts de eerste vier maanden beschikbaar. Uit de data van 2013 en 2014 blijkt dat de sluisperformance afhankelijk is van de tijd van het jaar. Daarom hoeven de eerste vier maanden van 2015 niet representatief te zijn voor de rest van het jaar. De analyses in dit memo zijn dan ook gebaseerd op 2013 en 2014.

1.2 Inhoud van de bestanden

De database van 2013 en 2014 zijn op dezelfde wijze opgebouwd. Ze bevatten onder andere, welke sluis is bediend (Noorder-, Midden-, Zuider- of Kleine Sluis), wat de schutrichting was (westelijk of oostelijk), of er schepen in de sluis lagen, welke schepen dat waren en wat de scheepslengte was. In 2015 staan de lege schuttingen echter niet genoemd. Wel staat het schutnummer vermeld, zodat het aantal lege schuttingen kan worden afgeleid uit het verschil tussen het schutnummer en het aantal beschreven schuttingen. Op sommige plekken ontbreken er echter meerdere schutnummers achter elkaar. Hierdoor is niet met zekerheid vast te stellen welke handelingen hebben plaatsgevonden.

2 Uitgevoerde analyses

Groenveld [1] neemt de schepen met een lengte kleiner dan 35 m (waar onder recreatievaart, en sleepboten) niet mee in de simulaties. Ook de Kleine Sluis is niet meegenomen in de beschouwing. Voor zoutlek analyses zijn dit geen relevante beperkingen; voor de Noordersluis leidt dit niet tot wijziging van het aantal schuttingen, en de bijdrage van de Kleine Sluis aan de zoutindringing is verwaarloosbaar [3]. In navolging daarvan zijn de analyses van PONTIS 2013 en 2014 in dit rapport gericht op de performance van de Noordersluis, de Middensluis en de Zuidersluis.

Om de sluisperformance in kaart te brengen is de data op verschillende manieren geanalyseerd. Allereerst wordt getoond hoeveel schuttingen er plaatsvinden per sluis. Vervolgens is in kaart gebracht hoeveel schepen er per schutting in de sluis zitten. Tot slot is ook gekeken naar de verdeling van deze schuttingen. Er is zowel gekeken naar de verdeling over de dag, over de week en over het jaar.

De analyses zijn gedaan voor 2013, 2014 en 2015. Maar zoals eerder beschreven hoeft de beperkte data van 2015 geen goede representatie te zijn van het hele jaar. Daarom is alleen de data van 2013 en 2014 gerapporteerd.

In de resultaten wordt de schutfrequentie weergegeven in de eenheid schuttingen per dag (S/d). Gedurende de dag kan de schutfrequentie variëren!

2.1 Resultaten

Het gemiddeld aantal schuttingen per dag is berekend door het aantal schuttingen op een jaar te delen door het aantal dagen. Het resultaat hiervan wordt getoond in Tabel 2. Het aantal schuttingen in de Zuidersluis en de Noordersluis zijn verminderd in 2014 en in de Middensluis vermeerderd. Het is belangrijk om deze gegevens te vergelijken met gegevens van eerdere jaren om een trend te kunnen waarnemen.

Tabel 2 Aantal schuttingen per dag, per sluis en per richting

	Zuidersluis		Middensluis		Noordersluis	
	Oost	West	Oost	West	Oost	West
2013	17,2	17,2	12,4	12,4	11,0	11,0
2014	11,6	11,6	14,2	14,2	10,6	10,6

Deze gegevens kunnen ook vergeleken worden met de simulaties in PMSS. Het aantal schuttingen is belangrijk voor de grootte van het zoutlek.

Het aantal schuttingen is niet alleen afhankelijk van het totale aanbod van schepen, maar ook van de verdeling van het aanbod. Als meerdere schepen tegelijk geschut kunnen worden, hoeven er minder schuttingen plaats te vinden. Dit zorgt voor een kleinere zoutlek. Om dit in kaart te brengen bevinden zich in de bijlage twee tabellen (Tabel 3 en Tabel 4) die weergeven hoeveel schepen er zich per schutting in de sluis bevinden.

Alleen de schepen met een lengte groter dan 35 meter zijn geteld. Dit is gedaan om de gegevens vergelijkbaar te maken met de simulaties van Groeneveld [1]. Onder aan de tabellen wordt de bezettingsgraad gegeven. Deze is berekend door de duur van alle schuttingen van één jaar met schepen groter dan 35 meter bij elkaar op te tellen en te delen door een heel jaar. In enkele gevallen ontbrak de schutduur in de database. In die gevallen is de gemiddelde schutduur genomen voor die schutting. De ontbrekende aantallen zijn niet substantieel ten opzichte van het totaal.

De tabellen laten zien dat de bezettingsgraad voor de Noorder- en Middensluis rond de 70% is. De bezettingsgraad in 2014 is iets lager dan in 2013. Het aantal bezette schuttingen in de Noordersluis is met ruim 1 procent om laag gegaan voor oost- en westgaande schuttingen samen, terwijl de bezettingsgraad ruim 4 procent is afgenomen. Dus hebben de schuttingen in 2014 gemiddeld genomen korter geduurd. In de Middensluis is het aantal bezette schuttingen toegenomen met 14 procent voor oost- en westgaande schuttingen samen, terwijl de bezettingsgraad is afgenomen. Dat betekent dat de schutduur flink is verminderd.

De schuttingen in de Zuidersluis zijn vaak voor kleinere schepen. Hierdoor is de bezettingsgraad voor schepen groter dan 35 meter in de Zuidersluis erg laag.

De overige resultaten hebben alleen betrekking op de Noordersluis, omdat deze het meest relevant is voor de zoutindringing.

In Figuur 1 en Figuur 4 is te zien dat het aantal schuttingen gedurende dag varieert. Er bevindt zich een dal in het aantal schuttingen rond 5 uur ’s ochtends (9-11 S/d) en een piek rond 5 uur ’s middags (11-13 S/d). Figuur 2 en Figuur 5 tonen dat het aantal lege schuttingen richting west een piek kent rond 7 uur ’s ochtends en richting oost rond 8 uur ’s avonds. De bezette schuttingen naar west (Figuur 3 en Figuur 6) variëren mee met deze beweging, terwijl de bezette schuttingen richting oost een vlakker verloop over de dag heeft.

Figuur 7 en Figuur 10 tonen het aantal schuttingen verdeeld over de dagen van de week. Vrijdag is de drukste dag van de week met in 2013 zo’n 12 schuttingen in elke richting per dag en in 2014 zo’n 11,7 S/d in elke richting. In het weekend gaat het aantal schuttingen omlaag. Op zaterdag daalt het ongeveer 1 S/d en op zondag tot ongeveer 9.5 S/d.

Ten slotte toont Figuur 13 de verdeling over de maanden. Hierin is duidelijk te zien dat het jaargetijde invloed heeft op het aantal schuttingen. In de zomerperiode neemt het aantal schuttingen af (ten opzichte van het gemiddelde) tot tussen de 10 en 11 S/d. Aan het eind van het jaar neemt het aantal schuttingen ook af. In december 2013 tot zo'n 10,5 S/d en in december 2014 zelfs tot 8,5 S/d.

3 Conclusies

Voor de belangrijkste sluis voor zoutindringing, de Noordersluis, is de gemiddelde schutfrequentie in 2013 en 2014 respectievelijk 11,0 en 10,6 S/d.

De data van 2013 en 2014 laten verder zien dat de schutfrequentie van deze sluis als volgt varieert in de tijd:

- over de dag: veel westgaande schepen in de middag en avond, schutfrequentie van ongeveer 11-13 S/d.
- over de week: veel westgaande schepen op vrijdag, schutfrequentie van ongeveer 11,5-12 S/d.
- over het jaar: dip in de zomervakantie en rond de jaarwisseling, schutfrequentie van ongeveer 8,5-11 S/d.

De verdeling over het jaar en over de dag tonen qua gemiddeld verloop een vergelijkbaar beeld voor 2013 en 2014. Dat geeft vertrouwen in de data. Rond dit gemiddelde verloop is wel relatief grote variatie met een toevallig karakter (orde 1 S/d).

Referenties

[1] Groenveld (2008). Simulatiestudie Capaciteit Zeetoegang Amsterdam-Noordzeekanaalgebied, Modelbeschrijving en resultaten,
[2] Port of Amsterdam, laatst geraadpleegd: 7 december 2015 http://portofamsterdam.nl/nederlands.net?id=216610
[3] Bijlage I van dit rapport

Version	Date	Author	Initials	Review	Initials	Approval	Initials
0	Dec. 2015	M. Rietveld		A.C. Bijlsma		O.M. Weiler	

Bijlagen

Aantal schepen per schutting in 2013 (voor schepen groter dan 35 meter)

Tabel 3 Schepen per schutting voor de verschillende sluizen in 2013

	Zuidersluis		Middensluis		Noordersluis	
Schepen per schutting	**Oost**	**West**	**Oost**	**West**	**Oost**	**West**
0	3110	3222	1408	1457	1133	1101
1	2722	2586	2645	2614	2097	2208
2	458	480	417	409	653	562
3	3	5	41	38	98	97
4	0	0	19	11	16	26
5	0	0	2	2	4	7
6	0	0	0	0	2	3
7	0	0	0	0	0	1
8	0	0	1	0	0	1
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	1	0
19	0	0	0	0	0	0
Totaal aantal schuttingen	6293	6293	4533	4531	4004	4006
Schepen per bezette schutting	1,15	1,16	1,18	1,17	1,33	1,31
Bezetting sluis	0,42		0,70		0,69	

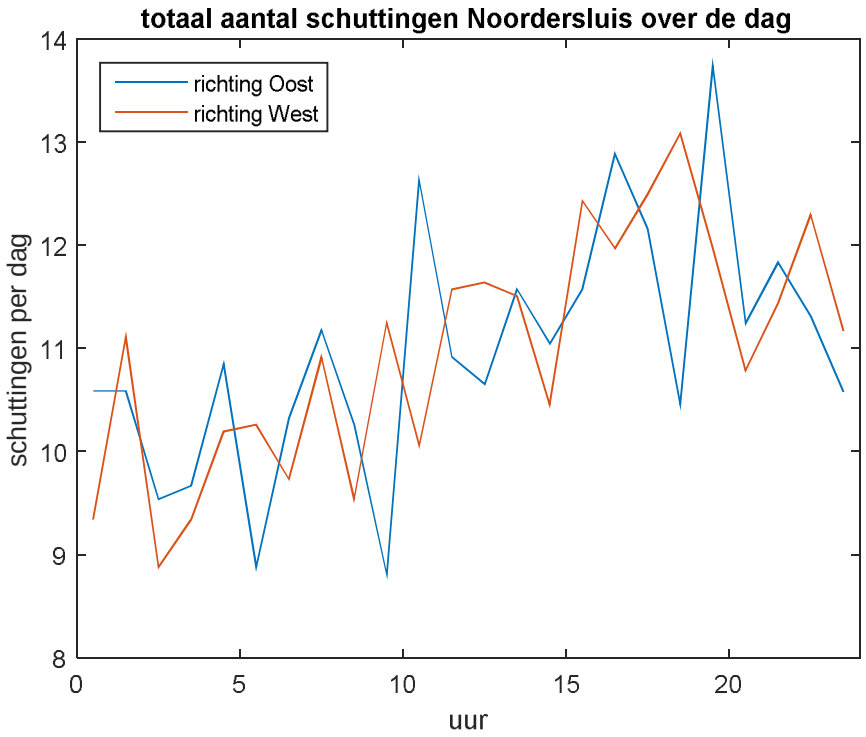
Aantal schepen per schutting in 2014 (voor schepen groter dan 35 meter)

Tabel 4 Schepen per schutting voor de verschillende sluizen in 2014

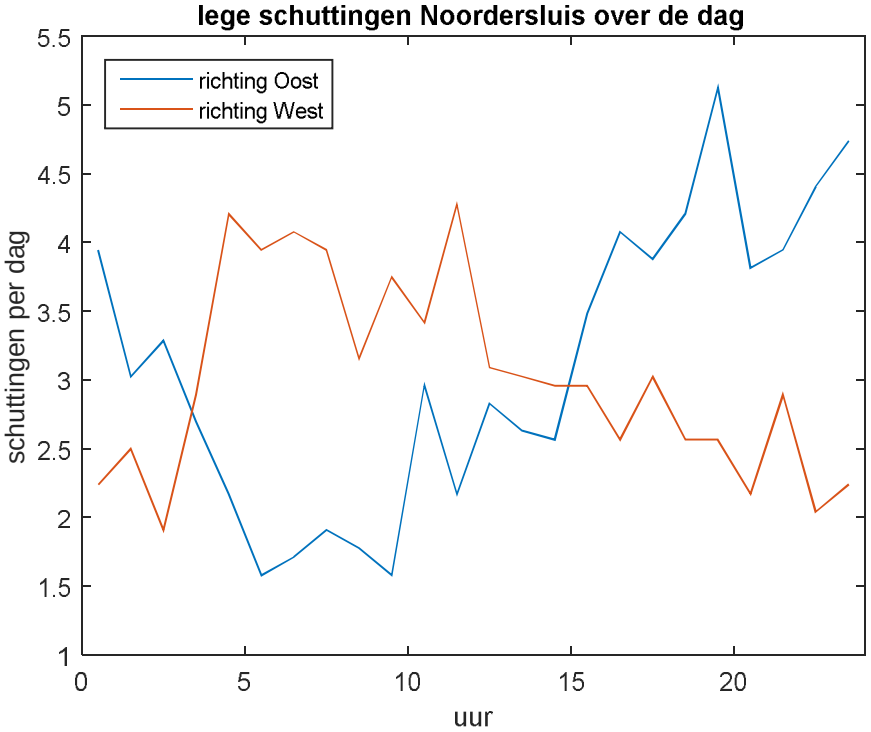
	Zuidersluis		**Middensluis**		**Noordersluis**	
Schepen per schutting	**Oost**	**West**	**Oost**	**West**	**Oost**	**West**
0	2397	2403	1575	1727	1004	1057
1	1594	1568	2657	2654	2032	2037
2	227	240	757	668	671	627
3	1	5	156	113	133	119
4	0	0	40	30	27	33
5	0	0	5	3	13	7
6	0	0	0	0	1	1
7	0	0	0	0	1	1
8	0	0	1	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	1	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
Totaal schuttingen	4219	4216	5191	5195	3883	3882
Schepen per schutting	1,13	1,14	1,34	1,29	1,38	1,36
Bezetting sluis	0,24		0,67		0,66	

Verdeling van de schuttingen over de dag voor de Noordersluis in 2013

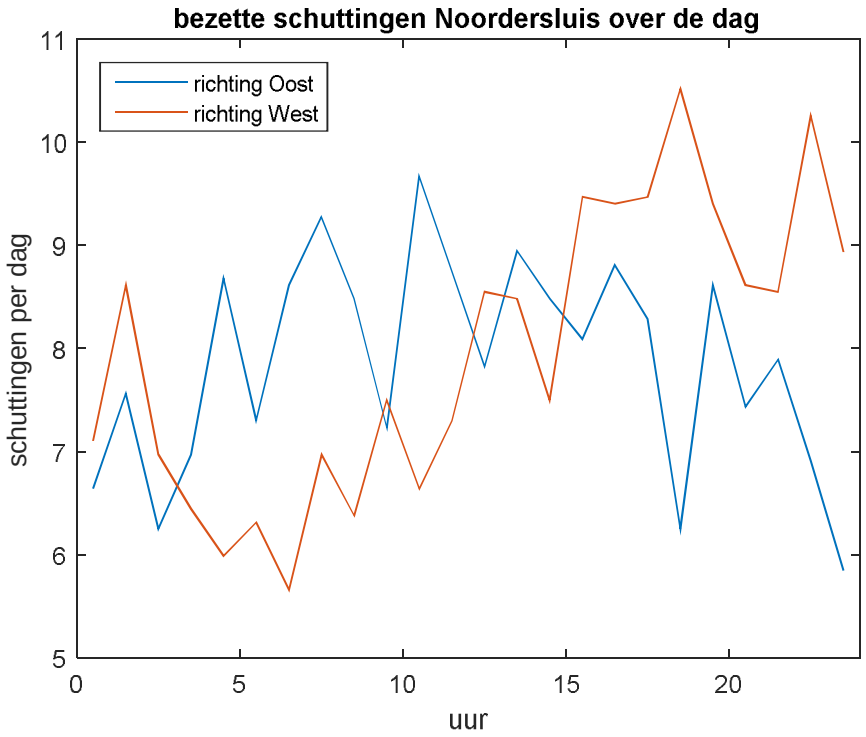
Figuur 1 Het gemiddeld aantal schuttingen in beide richtingen verdeeld over de dag.



Figuur 2 Het gemiddeld aantal lege schuttingen in beide richtingen verdeeld over de dag.

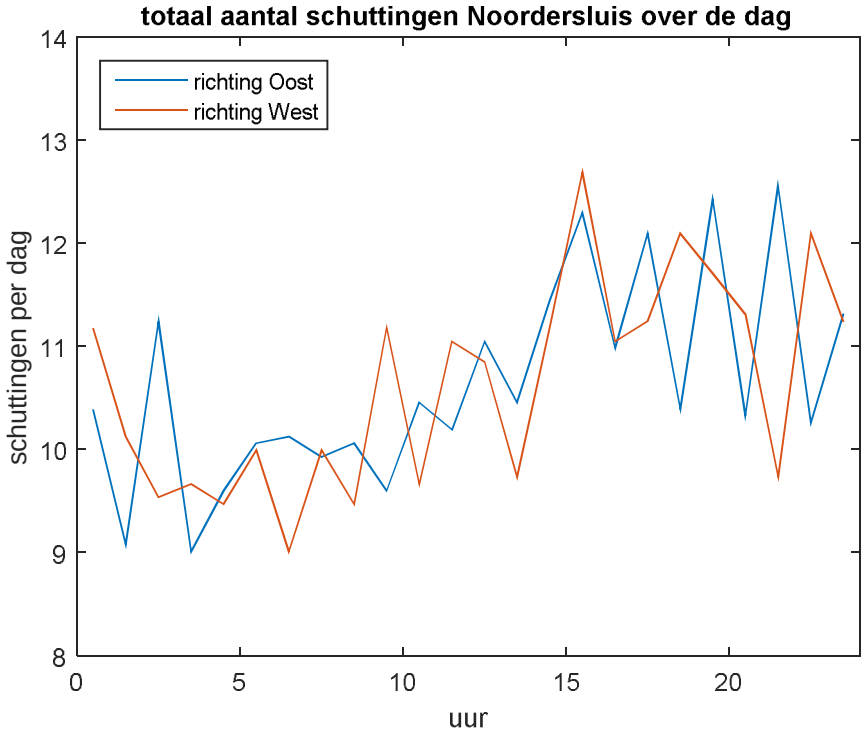


Figuur 3 Het gemiddeld aantal bezette schuttingen in beide richtingen verdeeld over de dag.

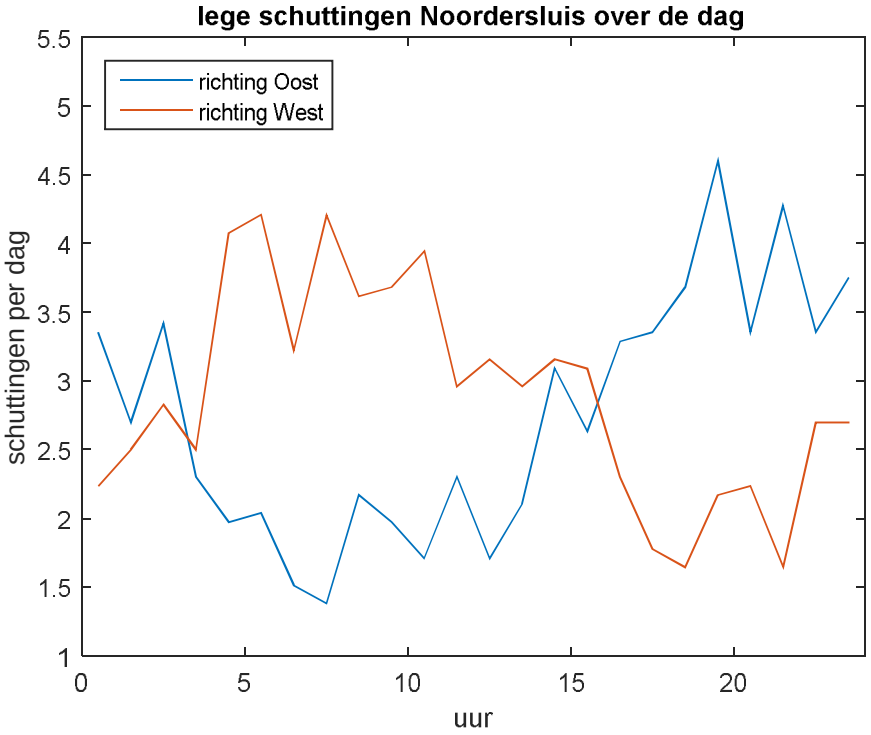


Verdeling van de schuttingen over de dag voor de Noordersluis in 2014

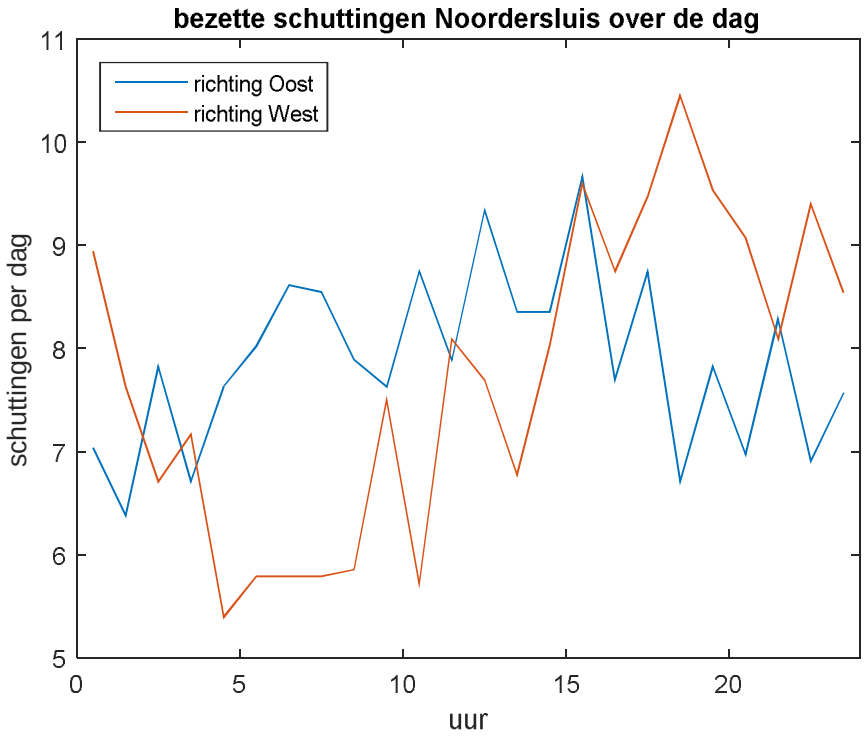
Figuur 4 Het gemiddeld aantal schuttingen in beide richtingen verdeeld over de dag.



Figuur 5 Het gemiddeld aantal lege schuttingen in beide richtingen verdeeld over de dag.

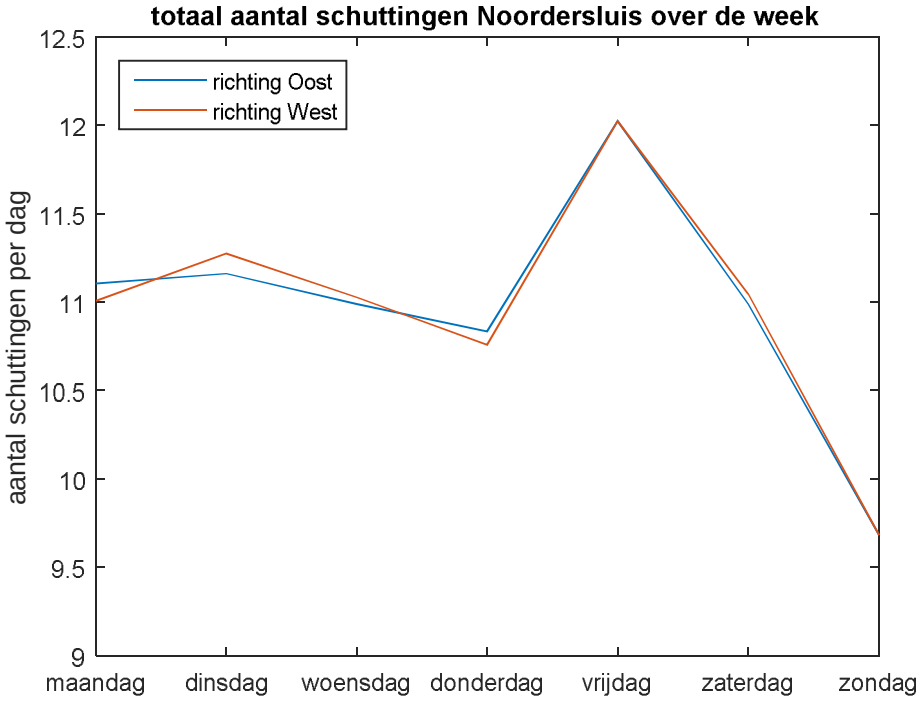


Figuur 6 Het gemiddeld aantal bezette schuttingen in beide richtingen verdeeld over de dag.

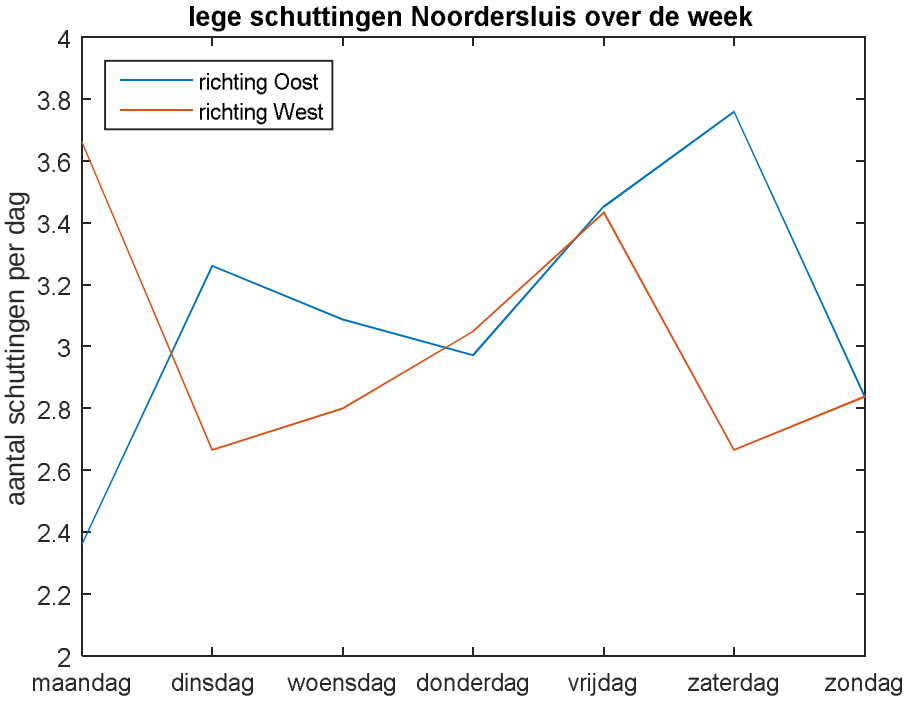


Verdeling van de schuttingen over de week voor de Noordersluis in 2013

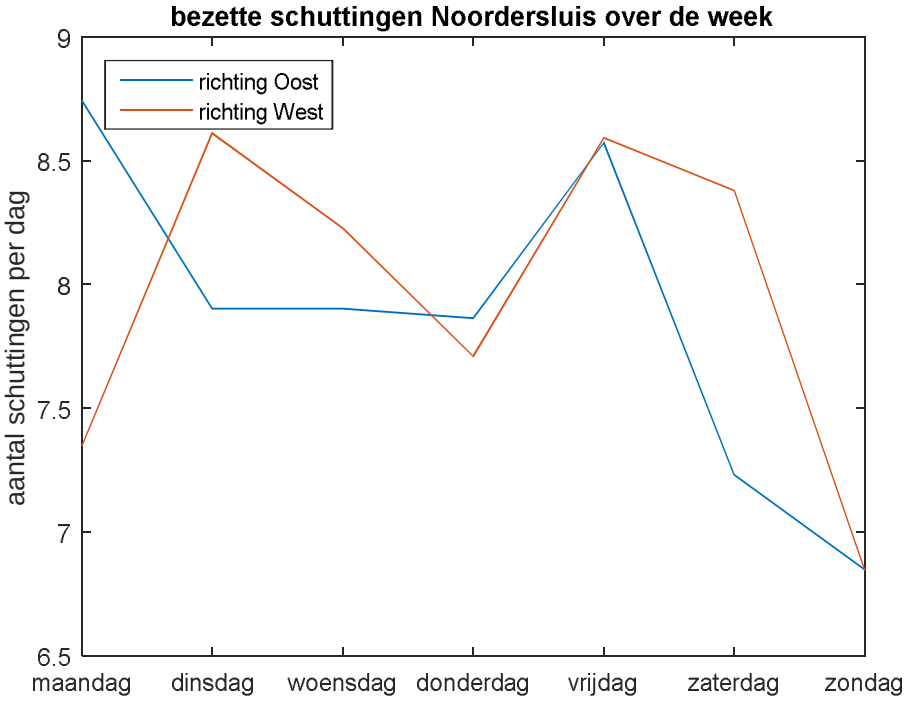
Figuur 7 Het gemiddeld aantal schuttingen in beide richtingen verdeeld over de week.



Figuur 8 Het gemiddeld aantal lege schuttingen in beide richtingen verdeeld over de week.

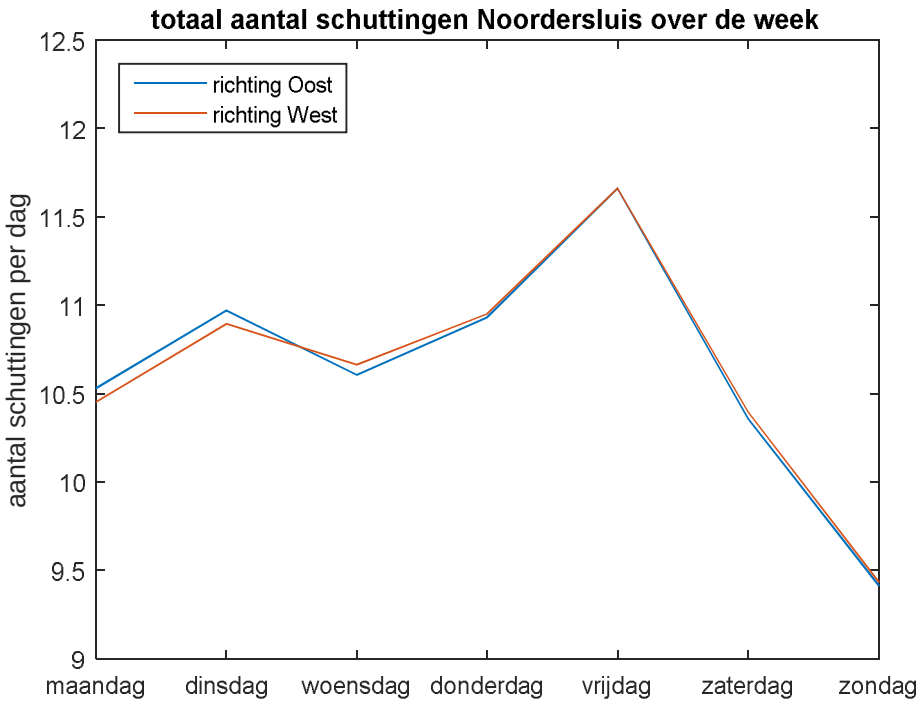


Figuur 9 Het gemiddeld aantal bezette schuttingen in beide richtingen verdeeld over de week.

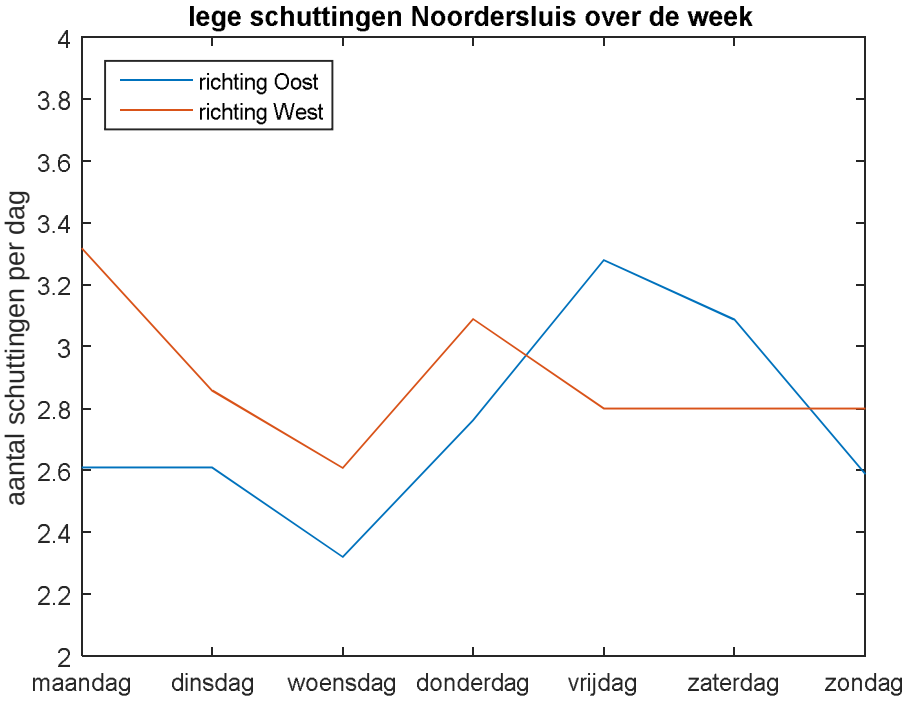


Verdeling van de schuttingen over de week voor de Noordersluis in 2014

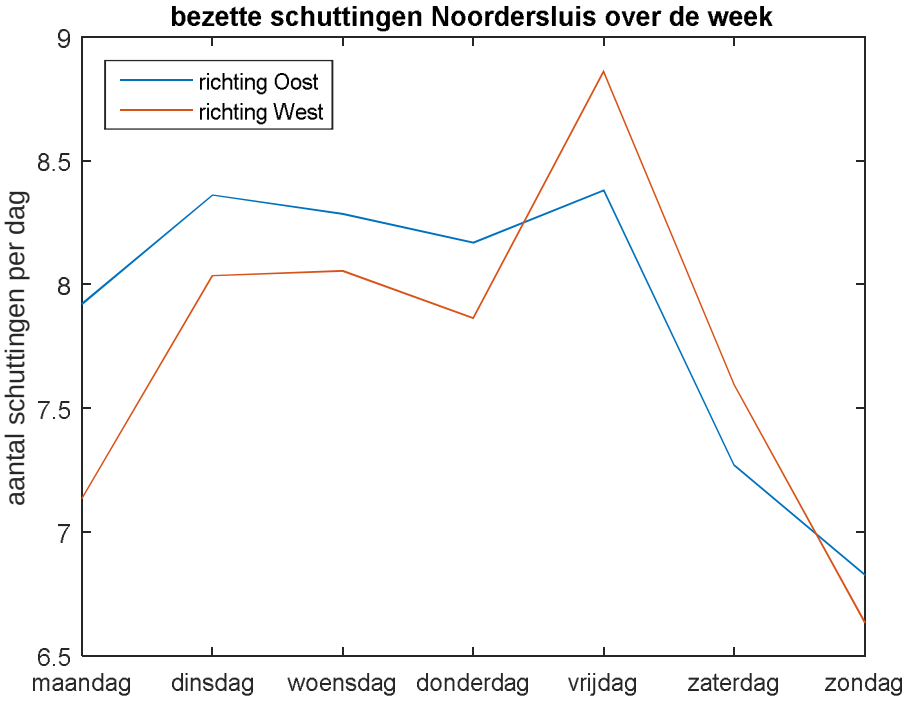
Figuur 10 Het gemiddeld aantal schuttingen in beide richtingen verdeeld over de week.



Figuur 11 Het gemiddeld aantal lege schuttingen in beide richtingen verdeeld over de week.

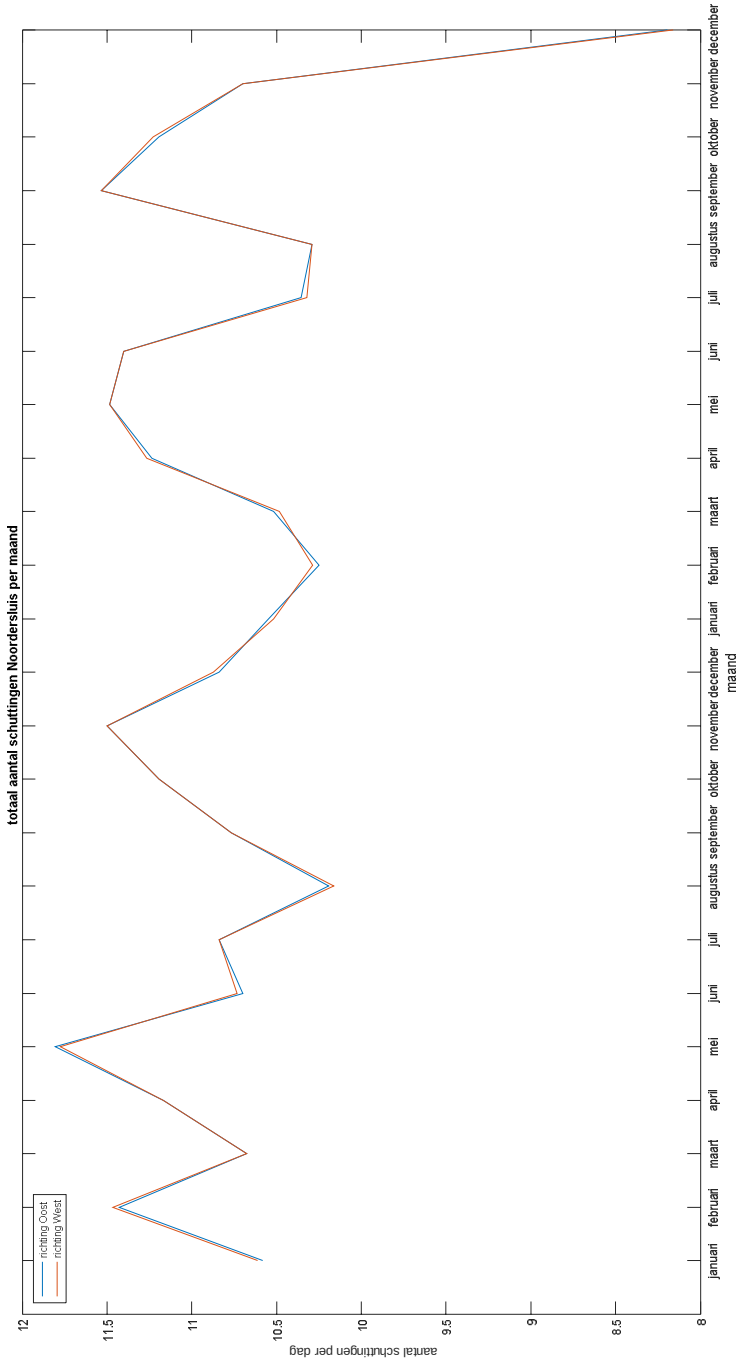


Figuur 12 Het gemiddeld aantal bezette schuttingen in beide richtingen verdeeld over de week.

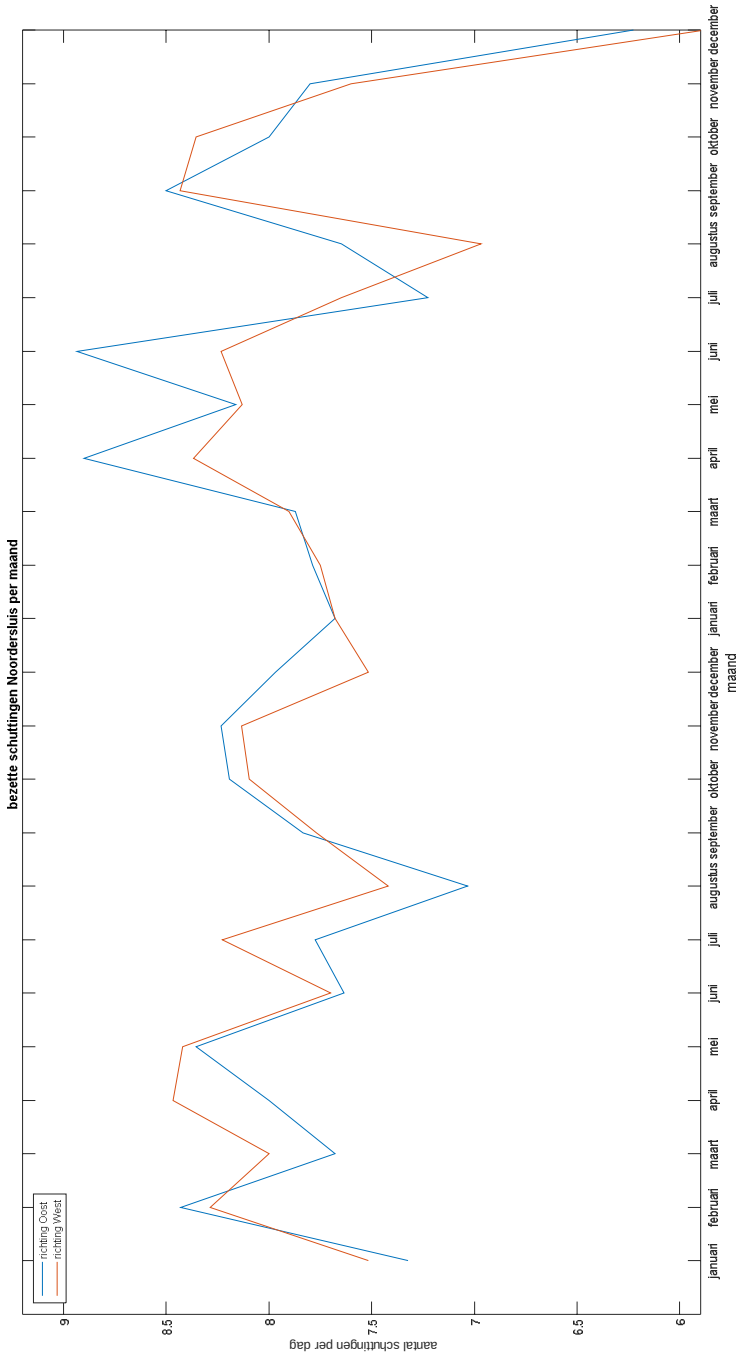


Verdeling van de schuttingen over de maanden gedurende 2013 en 2014

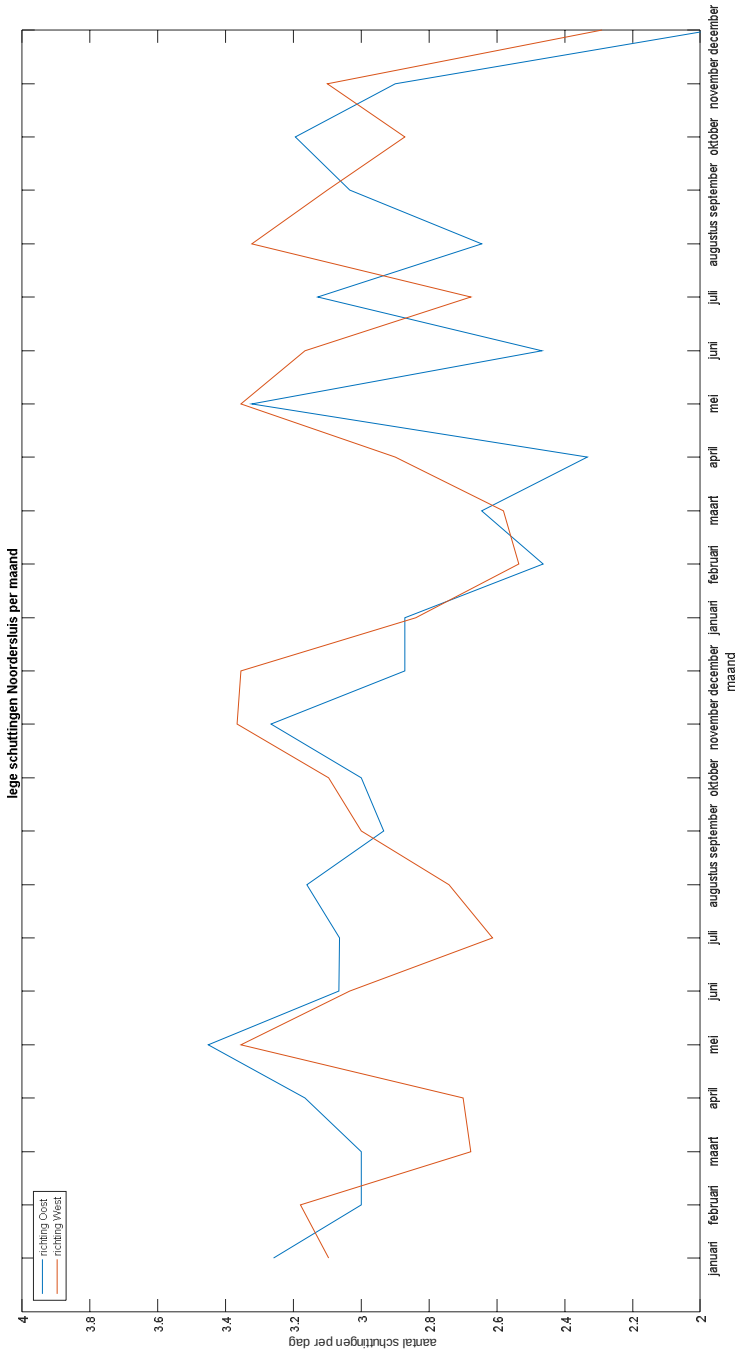
Figuur 13 Het gemiddeld aantal schuttingen in beide richtingen verdeeld over het jaar.



Figuur 14 Het gemiddeld aantal bezette schuttingen in beide richtingen verdeeld over het jaar.



Figuur 15 Het gemiddeld aantal lege schuttingen in beide richtingen verdeeld over het jaar.



H Afvoerdebieten van het Noordzeekanaal en het Amsterdam Rijnkanaal

Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Afvoerdebieten van het Noordzeekanaal

inventarisatie van beschikbare data

Datum: 13 oktober 2015

Colofon

Uitgegeven door	
Informatie	A. Kikkert
Telefoon	06 5267 9017
Fax	
Uitgevoerd door	A. Kikkert
Opmaak	
Datum	
Status	Definitief
Versienummer	1.2

Titel:
Afvoerdebieten van het Noordzeekanaal – inventarisatie van beschikbare data

Project:
Zeetoegang IJmuiden

Trefwoorden:
Zeetoegang IJmuiden, Gemaal, Maal- en spuicomplex, Afvoer, Debiet

Samenvatting:
Voor de berekeningen die plaatsvinden in het kader van de nieuwe zeesluis in IJmuiden is informatie gewenst over het gemiddelde debiet van het water dat via het maal- en spuicomplex naar de Noordzee wordt afgevoerd. Dit debiet zal worden gebruikt als uitgangspunt voor modelberekeningen.

Al jaren is bekend dat de waterbalans van het Noordzeekanaal een sluitfout vertoont van ca 20% (er gaat theoretisch meer water uit het kanaal dan dat er inkomt). Ook is door middel van incidentele metingen aangetoond dat het werkelijke debiet dat via het spui- en maalcomplex in IJmuiden wordt afgevoerd lager ligt dan de geregistreerde waarden. Daarom wordt verwacht dat het werkelijke gemiddeld jaardebiet lager is dan de het debiet van 91 m^3/s dat regulier wordt aangenomen (bijvoorbeeld in de emissietoets ten behoeve van vergunningen).

Om tot een meerjarig gemiddeld debiet te komen, en daarbij inzicht te krijgen in de mate van variatie per tijdsperiode, zijn historische data uit diverse bronnen beschouwd. De kwaliteit van de opgeslagen data blijkt in alle gevallen te wensen over te laten en wanneer gegevens van verschillende bronnen over eenzelfde tijdperiode worden vergeleken, blijken deze aanzienlijke verschillen te vertonen.
Uiteindelijk lijkt de meest realistische waarde 65,5 m^3/s waarbij moet worden opgemerkt dat deze waarde uitsluitend gebaseerd is op in SCADA opgeslagen 10-minuten metingen uit 2014.
Aan de hand van de overige data kan een indruk worden gekregen van de variatie in het debiet in de tijd. Teruggerekend naar het jaardebiet van 65,5 m^3/s zijn de minimale en maximale jaargemiddelde waarde over de periode 2003 t/m 2014 achtereenvolgens 38,6 m^3/s en 75,6 m^3/s. De extremen voor een meerjarig gemiddelde over een periode van 10 dagen bedragen – na terug rekening naar een jaardebiet van 65,5 m^3/s - 52,8 m^3/s en 85,5 m^3/s. De 10-percentielwaarde van het maandgemiddelde over deze periode bedraagt 46 m^3/s en het 10-percentiel van het meerjarig 10-daagsgemiddelde is 42 m^3/s.

Versie Datum	Auteur		Paraaf Review	
13 oktober 2015	A. Kikkert		M. Van Wieringen	

Inhoudsopgave

Inleiding **6**
Achtergrond 6
Vaststellen van het afvoerdebiet 7
Bewerking 11
Aanvullende overwegingen 13
Concluderend 14
Literatuurlijst 15

Inleiding

Voor de berekeningen die plaatsvinden in het kader van de nieuwe zeesluis in IJmuiden is informatie gewenst over het gemiddelde debiet van het water dat via het maal- en spuicomplex naar de Noordzee wordt afgevoerd. Dit debiet zal worden gebruikt als uitgangspunt voor modelberekeningen.

Achtergrond

Om het verband tussen inkomende en uitgaande stromen van een watersysteem te beschrijven, wordt vaak een waterbalans opgesteld. Bij een bestendig watersysteem (constant peil) is de over een bepaalde periode vanuit verschillende bronnen inkomende hoeveelheid water gelijk aan de afvoer in die periode.

Het Noordzeekanaal lijkt een eenvoudig maar is in realiteit een complex watersysteem. Afgezien van het feit dat uit zeer veel verschillende bronnen (ruim 200) water op het systeem wordt geloosd of op andere wijze aan het systeem wordt toegevoegd, vindt in IJmuiden door schutbewegingen en "lekkage" extra instroom plaats van zout water.

Tot voor kort heeft de waterbalans van het Noordzeekanaal nooit veel aandacht gekregen; het peilbeheer was veel belangrijker omdat daarmee de scheepvaart wordt gefaciliteerd en relatief kleine afwijkingen in het peil direct kunnen leiden tot aanzienlijke economische schade. Echter, nu door het verwijderen van het voormalig sluiseiland in de monding van het Amsterdam-Rijnkanaal regelmatig zoutpieken optreden ter hoogte van Diemen, en omdat door de aanleg van de nieuwe zeesluis een extra zoutbelasting kan optreden die tot schade kan leiden, is het belangrijker geworden de zoutbalans te kunnen beheren. Hiervoor is het noodzakelijk meer inzicht te krijgen in de inkomende en uitgaande waterstromen.

Al zeker sinds 1997 is bekend dat de waterbalans van het Noordzeekanaal niet goed sluit; de uitstroom van water is veel groter dan de som van de aanvoer. Het verschil, de sluitfout, is geschat op 20% (HKV 1997). In 1993 is het gemiddelde debiet van het Noordzeekanaal berekend op 86 m^3/s. De gemiddelde afvoercapaciteit van de spuikokers is in 1993 op basis van een 10-jarig gemiddelde vastgesteld op 480 m^3/s. Het maximale debiet zou bij een niet gelimiteerde spui en voldoende verval ca 900 m^3/s kunnen bedragen maar het spuicomplex is afgesteld op een maximaal debiet van 500 m^3/s.

Op jaarbasis wordt in IJmuiden ca 3 miljard kuub water afgevoerd via het gemaal en de spuikokers. 20% van die hoeveelheid is erg veel. Omdat de afvoer in IJmuiden de grootste post is in de waterbalans, is de kans dat de sluitfout van de waterbalans wordt veroorzaakt door een (registratie-)fout in die post het grootst. Immers, wanneer deze hoeveelheid zou ontbreken bij een of enkele bronnen, zou dit direct opvallen. Daarbij is met behulp van verschillende incidentele metingen (o.a. AquaVision, 2006,2008 en 2014) aangetoond dat volume van het aangevoerde water via het Binnenspuikanaal, achter bleef bij de (volgens de registratie) afgevoerde hoeveelheid. Het verschil in volume bedroeg ca 20%.
Ook is geconstateerd dat via de spuikokers regelmatig een zoutwaterstroom optreedt naar het Noordzeekanaal toe (o.a. Kemper, 2007, AquaVision, 2008). Deze aanwijzingen zijn reden geweest om oorzaak van de sluitfout in de waterbalans te zoeken in de (registratie) van de afvoer.

Vaststellen van het afvoerdebiet

De omvang van het afvoerdebiet (en soms het afvoervolume) wordt op verschillende manieren vastgelegd:

1) Het gemaal en de spuikokers worden sinds 2011 dagelijks bediend vanuit Schellingwoude. Daar wordt bijgehouden wanneer welke pompen worden aangezet of welke spuikokers worden geopend, en met welk debiet water wordt afgevoerd. De registratie van deze gegevens wordt sinds 1-1-2009 vastgelegd in **etmaaloverzichten**.

2) Daarnaast worden activiteiten van het besturingssysteem automatisch vastgelegd in **SCADA**. Deze informatie is bedoeld om na te gaan of zich in de recente periode opvallende zaken hebben voorgedaan. De gegevens worden vastgelegd op een harde schijf die aan het eind van de maand automatisch wordt gewist. De data blijven dus maximaal een maand bewaard.

3) Tenslotte zijn afvoergegevens opgenomen in **DONAR** (Data Opslag Natte Rijkswaterstaat). Bij deze gegevens is geen bronvermelding opgenomen.

Ad1) Etmaaloverzichten

Om het afvoerdebiet te bepalen - eventueel via berekening aan de hand van het afgevoerde volume - zijn de etmaaloverzichten vanaf 2010 bestudeerd.
De data zijn moeilijk bewerkbaar omdat het format van de rapporten niet constant is.
Desondanks is het gelukt om op grond van deze gegevens de onderstaande afvoervolumes en bijbehorende gemiddelde debieten te berekenen:

Jaartal	Volume (maal + spui) m^3	Debiet (V/365x24x60x60) m^3/s
2010	2986540000	94,7 m^3/s
2011	2661024000	84,4 m^3/s
2012	3013529000	95,6 m^3/s
2013	2870557000	91,0 m^3/s
2014	2584423000	82,0 m^3/s

De berekende debieten komen goed overeen met de in 1993 vastgestelde waarde. Echter, wanneer de etmaaloverzichten tussen 2010 en 2015 nader worden bestudeerd, blijkt dat in meer dan 10% van de waarden voor het gemaal een debiet van 260 m^3/s wordt overschreden. Het maximum debiet van het gemaal is 260 m^3/s omdat het bestaat uit 4 pompen met een maximumcapaciteit van 40 m^3/s en 2 pompen met een maximumcapaciteit van 50 m^3/s. De geregistreerd waarden kunnen daarom in veel gevallen geen reële weergave van de daadwerkelijke afvoer zijn.

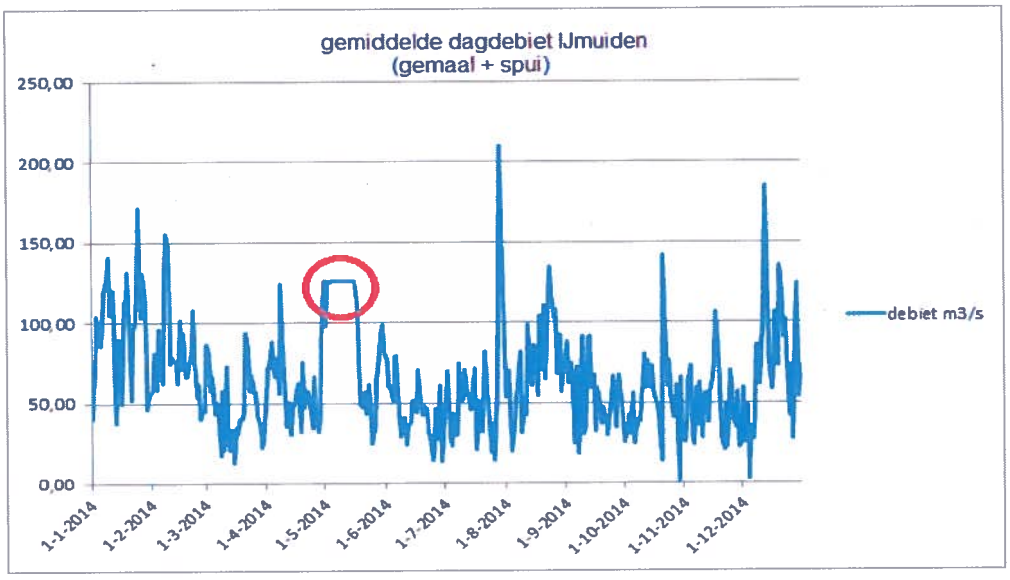
Getracht is aan de hand van de energiegegevens van het gemaal – die worden vastgelegd door het energiebedrijf - na te gaan of er een verband is tussen de inzet van de pompen en het afgevoerde debiet. Het blijkt dat er een redelijke relatie bestaat tussen de afvoergegevens uit de etmaaloverzichten en het energieverbruik. Helaas blijkt dat de tijdstippen waarop volgens de etmaaloverzichten de pompen

zijn ingezet nauwelijks overeenkomen met de tijdstippen waarop de energie is verbruikt en vice versa. Bovendien wordt bij deze relatie opnieuw gebruik gemaakt van de (te) hoge waarden en zal een schatting op basis van de relatie met het energieverbruik dus opnieuw leiden tot een overschatting van het werkelijk afgevoerde volume (en na berekening tot een te hoog gemiddeld debiet). Het verwijderen van hoge debietwaarden op grond van het energieverbruik leverde vanwege de asynchroniteit tussen het energieverbruik en de debieten, een te grote kans op onverantwoorde datamanipulatie.

Ad2) SCADA gegevens

Zoals boven beschreven, worden de SCADA gegevens in principe niet bewaard. Enerzijds vanwege de schijfruimte die dit in beslag zou nemen (indertijd was schijfruimte nog duur), anderzijds omdat de SCADA-gegevens oorspronkelijk niet bedoeld zijn voor historische analyses. Toch zijn de SCADA-gegevens van 2014 bewaard gebleven. Het zijn 10-minutenwaarden van afvoer via het gemaal en via de spuikokers, en er is een bestand wat gegevens van de totale afvoer bevat. Helaas klopt de totale afvoer niet met de gegevens van de afvoer van gemaal en spuikokers. Dat maakt ook de waarde van deze data discutabel hoewel de afzonderlijke debieten van gemaal en spui niet onrealistisch lijken.

In onderstaande grafiek zijn de daggemiddelde waarden van het totale debiet weergegeven. Opvallend is de constante waarde tussen 2 mei en 16 mei. Ook deze waarden lijken niet waarschijnlijk[1]. Echter, wel is duidelijk dat het debiet zeker niet constant is in de tijd en het resulterende jaargemiddelde debiet van 65,5 m^3/s is aanzienlijk lager dan de uit de etmaaloverzichten berekende waarden en veel meer in lijn met de controlemetingen.



[1] De 10-minutenwaarden voor het debiet zijn in deze periode constant 125,7 m^3/s. Ook worden in deze periode fouten aangetroffen in de tijdregistratie. Waarschijnlijk is dus sprake van een storing van het systeem.

Ad3) Data Opslag Natte Rijkswaterstaat (DONAR gegevens)

Ook in DONAR zijn daggemiddelde debieten opgenomen. Bij deze gegevens is geen bron vermeld maar navraag leerde dat ook deze gegevens berekend zijn via de etmaaloverzichten, die (deels) op papier zijn aangeleverd.

De gegevens komen echter slecht overeen met de etmaalgegevens die in Aquadata zijn opgeslagen. De berekeningswijze van de DONAR gegevens is niet bekend[2] en de data zijn ongevalideerd. Het maximale dagdebiet over de periode 2003 – 2015 (volgens de etmaalgegevens uit Aquadata op 29 mei 2011) van 365 m^3/s is niet terug te vinden in, of te herleiden uit de etmaalgegevens in DONAR.

In ieder geval zijn de DONAR gegevens wel het meest compleet. Voor de periode 2003 t/m 2014 is voor iedere dag een daggemiddeld debiet opgenomen. In onderstaande tabel is het gemiddelde debiet per periode van 10 dagen berekend. Hieruit zijn de meerjarige 10-daagse gemiddelden en de jaargemiddelden berekend. De waarden op 29 februari (in schrikkeljaren) zijn buiten beschouwing gebleven.

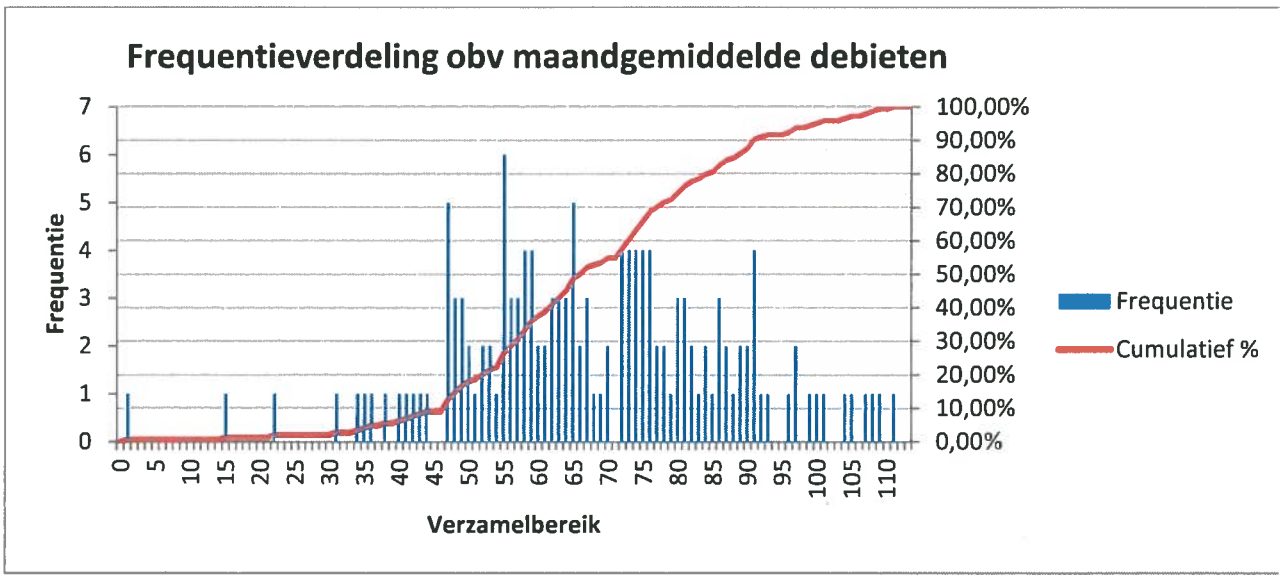
dagnummer	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	gemiddelde
10	144,4	85,5	82,6	91,5	107,9	65,7	57,9	91,1	135,6	152,8	117,6	120,8	104,5
20	100,5	157,3	86,8	64,8	148,3	150,7	80,3	88,6	167,1	88,3	61,6	122,2	109,7
30	114,7	134,0	99,0	61,5	52,3	125,3	118,8	99,0	115,8	88,8	80,1	132,9	101,9
40	126,0	157,2	76,8	59,3	44,5	92,1	79,3	138,2	59,0	37,1	134,7	116,7	93,4
50	105,1	141,2	150,4	114,9	89,9	83,6	114,3	71,5	84,8	62,2	81,2	104,3	100,3
60	55,4	105,1	104,8	104,9	45,7	69,2	78,7	157,3	88,6	54,9	57,1	91,0	84,4
70	64,1	88,7	92,1	120,5	89,3	77,7	75,7	114,9	59,4	58,4	77,2	62,0	81,7
80	62,4	68,8	81,9	92,4	71,0	121,2	67,0	87,1	53,4	53,2	70,4	57,8	73,9
90	67,2	94,5	99,2	117,9	4,8	156,2	87,3	88,1	57,1	49,1	63,0	74,3	79,9
100	95,2	67,0	96,1	111,1	0,0	119,4	69,4	91,6	58,5	70,8	68,8	88,6	78,0
110	64,1	75,0	104,2	96,7	2,7	97,3	66,4	62,5	62,5	76,0	73,3	62,2	70,2
120	80,9	79,0	97,7	105,1	0,2	92,2	75,2	79,4	58,4	69,8	50,3	68,6	71,4
130	80,6	77,8	78,0	91,4	35,7	81,8	58,1	113,3	53,1	86,7	59,5	83,1	74,9
140	96,6	70,8	97,4	80,3	50,8	64,7	106,2	83,4	50,1	70,8	83,9	62,4	76,5
150	104,6	76,8	71,6	108,1	33,1	73,1	83,6	26,4	80,0	64,8	94,8	87,5	75,4
160	69,7	79,9	97,8	90,5	13,7	77,3	61,2	70,8	44,7	73,7	66,1	71,6	68,1
170	69,7	74,0	71,3	78,3	28,4	56,2	76,9	75,5	92,4	68,6	64,6	56,2	67,7
180	63,3	91,6	66,4	70,9	101,1	51,1	61,5	65,3	90,7	72,5	73,9	50,3	71,6
190	80,5	81,1	125,7	65,2	107,4	74,8	78,6	53,6	55,1	62,8	61,8	50,3	74,7
200	68,9	106,5	93,5	55,3	60,6	112,5	71,7	72,4	150,3	134,7	16,9	64,9	84,0
210	46,8	103,1	99,3	59,6	100,9	130,3	87,7	58,0	130,2	74,1	51,0	94,1	86,3
220	53,3	69,0	128,8	96,1	28,1	124,5	66,7	76,5	85,4	92,7	45,4	81,8	79,0
230	61,6	114,4	138,2	133,4	29,2	86,3	66,5	90,5	89,1	66,0	54,6	86,8	84,7
240	55,1	145,5	92,4	138,9	15,4	81,9	35,5	135,8	101,4	68,7	50,8	145,6	88,9
250	77,7	110,1	82,5	104,5	24,9	86,9	80,1	198,4	110,7	72,3	49,6	80,1	89,8
260	69,2	77,7	94,9	66,5	24,7	94,2	61,9	131,7	110,0	57,4	123,1	67,3	81,6
270	67,9	96,2	92,2	63,4	69,9	78,3	42,0	108,5	76,9	84,0	78,5	60,7	76,5
280	69,4	107,8	88,2	130,9	44,5	142,7	61,5	104,3	64,8	98,1	52,8	60,0	85,4
290	81,9	92,6	59,2	81,3	29,4	88,0	71,0	68,1	88,9	102,0	146,3	67,0	81,3
300	57,8	106,9	110,8	106,1	16,8	86,5	47,8	115,1	69,3	82,5	81,3	92,8	81,1
310	69,6	80,7	69,4	77,6	24,9	95,3	51,6	88,6	55,2	97,6	142,2	62,7	76,3
320	51,2	71,9	74,7	96,9	78,0	146,3	85,2	142,4	41,8	91,5	144,9	66,8	91,0
330	88,5	134,9	125,7	134,4	27,4	111,6	79,4	94,7	45,6	67,3	98,2	71,2	89,9
340	71,4	81,7	141,7	99,3	85,6	113,7	148,2	68,4	90,7	101,8	71,2	51,2	93,7
350	86,6	64,1	91,1	143,8	89,8	99,2	115,3	89,8	130,3	118,7	62,8	106,4	99,8
360	95,7	93,7	98,2	70,0	9,5	82,6	98,7	106,8	150,4	162,3	100,6	114,6	98,6
365	73,1	90,7	96,1	96,9	43,2	94,8	76,5	93,6	80,8	81,2	75,9	76,4	81,6
gemiddelde	78,1	96,0	96,1	94,1	49,4	96,9	76,9	94,6	84,8	81,5	78,0	81,4	84,0

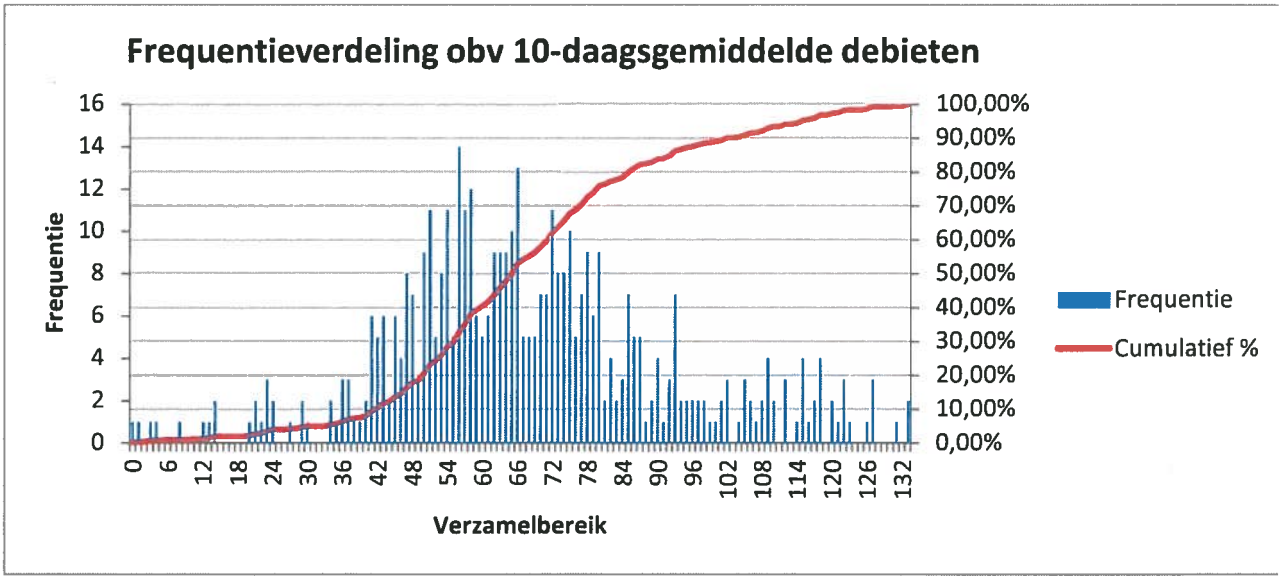
[2] Navraag bij DONAR-helpdesk op 28-9-2015 leverde het inzicht dat aanlevering van de gegevens deels op papier plaatsvond en dat degene die verantwoordelijk was voor de berekening van het debiet, inmiddels met pensioen is.

Uit de tabel blijkt opnieuw dat de afvoer over de verschillende perioden in het jaar en tussen verschillende jaren sterk kan variëren (januari de meeste afvoer en eind juni de laagste afvoer). Een jaargemiddelde waarde geeft dus eigenlijk involdoende informatie voor de toepassing van selectieve onttrekking.

Bewerking

Om een indruk te krijgen van de gevoeligheid van de beschouwde periode waarover het gemiddelde is berekend op de 10-percentiel waarde (een maat voor het voorkomen van de laagste debieten – en dus de grootste zoutindringing) is gekeken naar maandgemiddelde waarden en naar 10-daagsgemiddelde waarden. De keuze van de verschillende periodes is tamelijk willekeurig maar loopt redelijk in de pas met de door Karelse berekende verblijftijd van het doorspoelwater (ca 20 dagen).
De maand- en 10-daagsgemiddelde waarden zijn vermenigvuldigd met een factor 0,79 om terug te rekenen naar een realistisch debiet. De factor 0,79 is bepaald door het uit SCADA berekende (realistische) debiet van 2014 (65,5 m^3/s voor zowel het maandgemiddelde als het 10-daagsgemiddelde in 2014) te delen door het in DONAR gevonden daggemiddelde van 2014 (81,4 m^3/s). Vervolgens is een gecorrigeerde frequentiekromme opgesteld om zo de 10-percentielwaarde te kunnen vaststellen.





De verdeling van de gevonden debieten van het 10-daagsgemiddelde is gelijkmatiger en het resultaat is iets genuanceerder: het 10-percentiel van het meerjarig maandgemiddelde is 46 m^3/s en het 10-percentiel van het meerjarig 10-daagsgemiddelde is 42 m^3/s.

Aanvullende overwegingen

- De DONAR-gegevens die zijn bestudeerd overspannen een periode van 2003 t/m 2014. In 2004 zijn twee pompen aan het gemaal toegevoegd (met ieder een maximaal vermogen van 50 m^3/s). De pompcapaciteit heeft geen invloed op de af te voeren hoeveelheid water en omdat in eerdere (model-) berekeningen de data van 2003 zijn gebruikt voor kalibratie en of validatie, is ervoor gekozen ook de data van 2003 in de berekeningen van deze memo te betrekken.

- De hoeveelheid afgevoerd water wordt niet gemeten maar berekend aan de hand van een afvoerformule (Beuse, Ebbinge, Stor, 2004). Hierin is het drukverval over de spuisluis een belangrijke factor. Het verval wordt bepaald aan de hand van borrelbuizen. Deze borrelbuizen zijn over een periode van in ieder geval 10 jaar, niet gekalibreerd en het zou dus goed kunnen zijn dat door een geringe afwijking in de meetwaarden van het drukverval, grote fouten zijn ontstaan in de berekeningen van de afvoer.

- In geen van bovenstaande debietberekeningen wordt rekening gehouden met een zoutwaterinstroom terwijl bekend is, dat op deze wijze aanzienlijke hoeveelheden zout water het kanaal kunnen binnenstromen (AquaVision, 2014). Dit is feitelijke een in-post voor de waterbalans, maar wanneer de instroming gelijktijdig plaatsvindt met de afvoer van water, heeft dit ook direct invloed op de grootte van de afvoer.

- Verschillende incidentele debietmetingen en berekeningen (HKV, 1997; AquaVision, 2008 en 2014) wijzen erop dat de geregistreerde afvoer een aanzienlijke afwijking vertoont ten opzichte van de werkelijk gemeten afvoer. In 2014 toonde AquaVision aan dat de registratie van afvoer via het gemaal een overschatting van gemiddeld 23% ten opzichte van de meetwaarden bevatte. Voor de spuikokers lag dit percentage veel lager (5,7%) maar ook hierbij zijn de lekstromen (aan het eind van een spuiperiode of bij "gesloten" spuikokers niet meegerekend.

Concluderend

- Via verschillende wegen zijn berekende afvoervolumes en debieten vastgelegd. Deze gegevens zijn over het algemeen moeilijk ontsluitbaar en bovendien slecht van kwaliteit.

- Het jaargemiddelde debiet ligt volgens de geregistreerde waarden tussen de 65,5 (SCADA) en 95,6 m^3/s (Etmaaloverzichten).

- Op grond van het feit dat in de waterbalans van het Noordzeekanaal een sluitfout zit van ca 20% en op grond van verschillende metingen aan het afgevoerde debiet mag worden aangenomen dat de waarde die momenteel als jaargemiddelde wordt gehanteerd (ca 90 m^3/s) een aanzienlijke overschatting is van de werkelijke hoeveelheid. De waarde die is bepaald aan de hand van de ruwe SCADA-gegevens van 2014 (65,5 m^3/s) lijkt een realistischer waarde. Helaas is deze dataset beperkt tot slechts één jaar.

- Niet alleen de variatie tussen jaren maar ook de variatie binnen een jaar kan aanzienlijk zijn. Dat betekent dat voor het gebruik van het afvoerdebiet bij het terugdringen van het zoutbezwaar, de invloed van fluctuaties over kortere tijdsbestekken zeker in beschouwing moeten worden genomen.

- Het 10-percentiel van de gemiddelde debieten bedraagt voor de maandgemiddelden (over 2003 – 2014) 46 m^3/s, en voor 10-daagsgemiddelden 42 m^3/s.

Literatuurlijst

Aqua Vision, 2006. Verwerking van stroom- en zoutmetingen bij de spuisluizen van IJmuiden. Rapport AV_DOC_060205.

Aqua Vision, 2008. Verwerking van stroomsnelheidsmetingen in het Binnenspuikanaal van IJmuiden. AV_DOC_080409.

Aqua Vision, 2013. Lekstroom en capaciteitsmetingen IJmuiden, november 2013. Rapport AV-DOC_130184.

Aqua Vision, 2014. Capaciteitsmetingen maal- en spuicomplex IJmuiden, september november 2014. Rapport AV_DOC_140154a

HKV, 1997. Haalbaarheidsstudie BOS voor de waterbeheersing van het NZK/ARK open watersysteem. Opdrachtgever Rijkswaterstaat directie Noord-Holland, rapport Pr022, 1997.

Jan H. Kemper, 2007. Onderzoek naar vismigratie door de Noordersluis en de vispassage te ijmuiden ,2007. VisAdvies BV, Utrecht. projectnr VA2007_17. 18 pag.

RWS, 1993. De waterbeheersing van het Noordzeekanaal 1983-1992. Nota ANW 93.06, 17 december 1993.

RIZA, 1993. Het Noordzeekanaal. Beschrijving toestand en ontwikkeling 1976-1991. RIZA notanummer 90.017.

Afvoerdebieten van het Amsterdam-Rijnkanaal bij Weesp

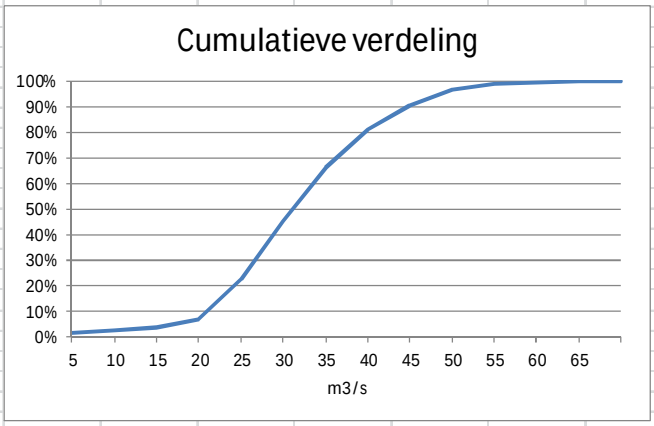
Decade gemiddelde debieten Amsterdam-Rijnkanaal bij Weesp (2003 - 2014)

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
10-Jan	11.03	16.24	37.23	28.20	41.41	26.39	22.45	33.55		60.07	52.10	40.60
20-Jan	19.62	49.26	36.02	24.32	51.19	45.39	28.01	27.86		45.04	31.07	41.64
30-Jan	21.01	42.62	41.93	26.67	36.14	44.29	43.40	35.36		45.85	30.28	43.47
09-Feb	34.29	45.50	33.53	24.17	31.44	33.67	27.82	46.60		25.98	52.98	42.10
19-Feb	23.48	35.26	49.99	35.47	43.86	29.82	45.23	31.22		25.50	40.97	37.92
01-Mar	18.21	24.83	28.62	35.22	46.07	27.70	37.49	51.79		26.82	32.32	32.58
11-Mar	28.63	14.03	25.43	40.07	63.24	30.20	32.48	45.35		31.59	37.71	26.47
21-Mar	30.73	21.51	25.74	38.55	41.93	44.44	34.09	34.39		26.51	36.98	25.60
31-Mar	26.04	26.39	22.48	45.53	37.26	50.07	35.45	34.09	35.13	29.38	35.56	30.49
10-Apr	30.02	20.60	21.33	47.93	28.20	40.62	30.01	33.26	27.52	32.07	32.60	33.38
20-Apr	0.70	24.30	24.13	41.92	23.08	32.75	30.60	29.94	27.30	34.09	35.76	28.22
30-Apr	31.57	25.98	24.23	44.28	25.32	34.46	26.86	25.14	23.47	34.59	35.12	28.19
10-May	21.34	25.29	25.01	34.41	25.43	27.84	24.19	36.43	19.84	38.89	34.94	31.35
20-May	9.73	27.52	25.88	22.72	40.79	29.05	28.27	35.74	21.26	39.14	43.50	30.55
30-May	32.89	23.04	20.89	46.30	32.26	28.65	30.63	25.92	18.17	30.99	44.22	29.06
09-Jun	21.82	11.92	1.24	39.63	28.94	35.35	24.26	30.03	15.57	32.20	43.77	25.20
19-Jun	22.71	31.74	11.68	2.99	35.23	26.42	29.13	28.48	21.16	32.91	38.13	20.81
29-Jun	22.47	31.88	31.08	-1.94	45.05	22.88	24.49	26.91	29.57	37.49	39.25	18.25
09-Jul	28.62	18.86	48.92	-12.89	37.67	23.08	24.24	19.82	23.34	32.55	37.45	22.39
19-Jul	22.79	6.69	33.71	15.39	41.01	33.58	23.97	27.88	47.88	46.98	29.96	31.87
29-Jul	21.29	33.35	38.30	27.36	45.00	40.49	33.57	23.87	47.21	36.33	20.60	36.05
08-Aug	33.02	29.52	43.92	31.49	35.37	35.21	24.47	30.77	37.76	38.13	25.60	37.17
18-Aug	48.71	39.05	48.17	25.98	30.17	32.64	20.31	33.49	37.45	30.71	29.55	36.34
28-Aug	31.94		27.67	31.77	26.93	36.36	15.74	43.46	36.94	32.79	27.55	38.87
07-Sep	38.33		22.96	32.69	29.14	26.74	21.79	51.35	40.87	31.32	26.22	29.64
17-Sep	30.97		30.49	21.12	23.83	33.65		43.78	43.00	27.72	42.91	23.31
27-Sep	27.95		32.57	22.55	20.58	27.59	16.62	40.41	31.37	31.56	39.15	23.59
07-Oct	33.47	36.87	25.90	29.11	28.91	42.36	20.28		27.91	34.57	31.06	24.33
17-Oct	31.38	30.51	21.41	29.81	23.27	32.78	29.78		32.38	40.15	57.82	23.21
27-Oct	27.81	34.36	32.65	30.31	23.14	29.76	22.18		26.60	39.65	35.20	27.93
06-Nov	24.27	31.64	26.79	26.99	25.05	31.62	28.51		22.44	34.00	51.38	20.37
16-Nov	19.51	26.24	25.43	32.55	37.10	39.04	32.01		20.02	38.70	58.87	26.22
26-Nov	28.10	41.81	6.25	39.74	25.17	41.43	36.08		17.81	30.24	37.29	27.80
06-Dec	23.12	28.56	3.35	28.32	43.14	38.82	47.36		35.86	39.93	32.36	20.92
16-Dec	29.55	28.14	4.38	39.91	50.55	34.53	43.63		46.79	47.12	26.54	37.22
26-Dec	24.42	36.43	27.97	24.49	29.59	24.49			52.12	62.22	32.36	48.00
	5.89	40.67	27.47	25.50					47.08	54.39	41.31	40.95

Decade gemiddelde debieten Amsterdam-Rijnkanaal bij Weesp (2003 - 2014)

Verzamelbereik	*Frequentie*	Frequentie	Cumulatief
5	7	2%	2%
10	4	1%	3%
15	4	1%	4%
20	14	3%	7%
25	64	15%	22%
30	96	23%	45%
35	87	21%	66%
40	61	15%	81%
45	39	9%	90%
50	26	6%	96%
55	10	2%	99%
60	2	0%	99%
65	3	1%	100%
Meer	0	0%	100%
	417	100%	

10-percentiel 10-daagsgemiddelde = 21 m3/s



I Correcties op Verkenning maatregelen beperken zoutlek Nieuwe Zeesluis IJmuiden

.

Delft, 7 december, 2015

Correcties op

Verkenning maatregelen beperken zoutlek Nieuwe Zeesluis IJmuiden

Arnout Bijlsma & Rob Uittenbogaard – Deltares

1. Inleiding

In 2013, zie Bijlage B van [1], is een verkenning uitgevoerd naar maatregelen om de zoutlek van de Nieuwe Zeesluis IJmuiden te beperken. Deze verkenning was gebaseerd op simulaties van de zoutlek met het dynamische zoutlekmodel TIMLCK. Aan deze simulaties lagen diverse aannamen ten grondslag, o.a. voor de afmetingen van de nieuwe sluis, voor de waterbalans (gemiddeld debiet bij spuisluizen en gemaal 91 m^3/s), en voor het gemiddeld aantal schuttingen per dag (10,4 S/d voor de Noordersluis in de huidige situatie). Van de laatste werd verondersteld dat deze ook zou gelden voor het Projectalternatief (Nieuwe sluis, 125 MTPA).

Doel van dit memo is een update te geven van de zoutlek simulaties uit 2013, in het bijzonder om het aantal schuttingen in overeenstemming te brengen met de PMSS scenario's voor de genoemde condities, met passende deur-opentijden.

2. Methodiek

Voor de zoutleksimulaties is dezelfde software, TIMLCK, gebruikt als in [1]. Ten opzichte van [1] zijn de volgende invoer parameters van TIMLCK gewijzigd. De schutfrequentie is gelijk gekozen met die van de PMSS simulaties in [2] voor de huidige situatie (2008, ladingstroom 77 MTPA, Noordersluis 14,55 S/d), de Autonome Ontwikkeling (95 MTPA, Noordersluis 13,93 S/d) en het Projectalternatief (125 MTPA, Nieuwe sluis 13,88 S/d). Voor de Noordersluis was het daardoor nodig de deur-opentijd te verlagen van 50 naar 35 min en voor de Zuidersluis van 30 naar 20 minuten.
Verder zijn de laatste bekende afmetingen van de nieuwe sluis in gevoerd: 545 m lang, 70 m breed en 17,25 m diep (boven de drempel van het binnenhoofd). De overige gegevens, waaronder het verschil in zoutgehalte over de sluizen (20 kg zout/m^3, of 27 - 7 psu), zijn niet gewijzigd.

3. Resultaten

De nieuwe simulaties schatten voor de huidige situatie (2008) met ladingstroom 77 MTPA, de Autonome Ontwikkeling (Noordersluis, 95 MTPA) en het Projectalternatief (Nieuwe sluis, 125 MTPA) de totale zoutlast van het scheepvaartsluizencomplex op respectievelijk 1263, 1269 en 2063 kg zout/s, zie Tabel 2 - 4. Figuren 1 en 2 geven een indruk van de simulaties van de schuttingen in de Noordersluis en de nieuwe sluis.

De totale zoutlek van de huidige situatie en van de Autonome Ontwikkeling is ongeveer gelijk; de zoutlek door de Noordersluis neemt weliswaar af door minder schuttingen omdat bij 35 minuten deur-opentijd de kolk vrijwel volledig (80%) wordt uitgewisseld, maar dat wordt gecompenseerd door een toename van de zoutlek van de Middensluis en de Zuidersluis. De zoutlek van de nieuwe sluis in het Projectalternatief is ruim 60% hoger dan dat van de Autonome Ontwikkeling, voornamelijk als gevolg van de grotere sluiskolk bij een vergelijkbaar aantal schuttingen. De nieuwe zoutlekschattingen zijn overigens 35-45% hoger dan de voorgaande (zie Tabel 1).

Voor de jaargemiddelde totale zoutlek over de scheepvaartsluizen werd op basis van afvoergegevens en zoutmetingen in het Binnenspuikanaal voor de periode 2010-2014 een range geschat van 750 à 600 kg zout/s. De gemiddelde afvoer bij de spuisluizen en het gemaal van IJmuiden wordt thans geschat op 84 m^3/s (zoals geregistreerd) à 68 m^3/s (na 20% reductie ter sluiting van de waterbalans), zie ook Bijlage H. De TIMLCK schattingen van de zoutlek zijn daarmee ca. 70-100% hoger dan waargenomen. Voor een deel (ca 30%) wordt dit verklaard door een lagere schutfrequentie van de Noordersluis in de meetperiode in vergelijking met de PMSS data (10,4 à 11 vs 13,9 S/d). Daarnaast spelen het aangenomen zoutgehalteverschil over de sluizen, en de variatie in deur-open tijden (kort bij lege schuttingen, langer bij meer schepen per schutting) een rol. Voor het verschil in zoutgehalte over de sluizen is een gevoeligheidsanalyse gedaan, zie paragraaf 4.

4. Gevoeligheidsanalyse

De invloed van het (verschil in) zoutgehalte op de zoutlek kan als volgt worden benaderd uitgaande van een beoogde zoutlek van 600 kg zout/s voor de huidige situatie (2008/77 MTPA). Met 30, 20 en 30 min. deur-opentijden en 14,55 en 17,8 en 22,68 schuttingen per dag voor resp. de Noorder-, Midden- en Zuidersluis geeft de simulatie bij 15 psu zoutgehalte aan kanaalzijde en 25 psu aan zeezijde een totale zoutlek van 583 kg/s. Schalen kan met het verschil in zoutgehalte tussen zee en kanaal zolang (bijna = 80%) volledige uitwisseling van toepassing is. 600 kg zout/s komt dan overeen met een zoutverschil van 25 psu naar 14,7 psu aan kanaalzijde.
Bij een spuidebiet van 68 m^3/s is 600/68 = 8,8 psu nodig om dezelfde zoutlek weer naar zee af te voeren. Echter, dit (gespuide) zoutgehalte is lager dan wat de schutsluizen (kennelijk) in hun binnenhavens ervaren (want 14,7 psu). Wanneer dus de (jaargemiddelde) 600 kg/s zoutlek van de huidige schutsluizen goed is, en wanneer het spuidebiet van 68 m^3/s goed is, dan passen de zoutgehalten voor onttrekken door spuien en voor de zoutlek van zee naar Noordzeekanaal niet bij elkaar of anders gezegd: er wordt uit een zoeter vaatje getapt voor de terugvoer via spuien van gelekt zout (68 m^3/s met 8,8 psu). Een mogelijkheid is dat bij het huidige spuien toch al selectief de zoetere toplaag worden onttrokken, of dat er een “zoutprop” (van 14.7 psu) aanwezig is voor de sluisdeuren aan kanaalzijde.
De simpele mengverhouding som is nu niet uitvoerbaar immers de 8,8 psu ligt buiten het beoogde interval van 25 – 14,7 psu. Bij mengverhouding alfa=0 vinden we als oplossing 11,5 psu kanaalzijde dat met spuien wordt onttrokken (11,5 psu*68 m^3/s =782 kg/s) en de schutsluizen leveren 783 kg zout/s van bij een verschil van 25 psu naar 11,5 psu over de sluizen).

5. Conclusies

De nieuwe simulaties schatten voor de huidige situatie (2008) met ladingstroom 77 MTPA de zoutlast op 1263 kg zout/s, en voor de Autonome Ontwikkeling (Noordersluis, 95 MTPA) en het Projectalternatief (Nieuwe sluis, 125 MTPA) op respectievelijk 1269 en 2063 kg zout/s. Dit is 35-45% hoger dan de voorgaande schatting in [1].

De schatting is ook veel hoger dan de ‘gemeten’ zoutlek. De oorzaak daarvoor moet gezocht worden in (het verschil) in de representatieve zoutgehaltes aan zeezijden en kanaalzijde van de sluizen, en in de operatie van de sluis (variatie in deur-opentijden).

Referenties

[1] “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

[2] “Simulatiestudie Capaciteit Zeetoegang Amsterdam-Noordzeekanaalgebied, Modelbeschrijving en resultaten”, ir. R. Groenveld, januari 2008

OUDE zoutlek simulaties

Tabel 1. OUD, zie [1] Bijlage B, Schattingen zoutlek met dynamische zoutlekmodel TIMLCK excl. Schepen ; bij 27 psu zee (ca. 26 psu buitenhaven) en 6 psu West-NZK ca. 7 psu binnenhaven) of verschil van 20 kg zout/m³.

Kolk	ID	Opentijd [min]	Lengte [m]	Breedte [m]	Drempel [m]	Volume [10³ m³]	Schutting Zee→NKZ [/dag]	Zoutlast [ton zout/sch]	Zoutlek [kg zout/s]	Uitw.debiet [m³/s]
Noord	N01	50	400	50	15	300	10,4	5651	680	34
Midden	M01	30	225	25	10	56	12,4	1174	168	8,4
Zuid	Z01	30	111	18	8	16	18,4	367	78	3,9
Klein	K01	30	111	11	3,75	4,6	10,7	116	14	0,7
Totaal									940	47
Nieuw	Y01		550	65	18		10	9565	1150	58
Nieuw totaal			550	65	18		10	9565	1420	71

NIEUW Verificatie huidig PMSS 2008 – 77 MTPA – 14,55 S/d

Tabel 2. Schattingen zoutlek met dynamische zoutlekmodel TIMLCK excl. Schepen ; bij 27 psu zee (ca. 26 psu buitenhaven) en 6 psu West-NZK ca. 7 psu binnenhaven) of verschil van 20 kg zout/m³.

Kolk	ID	Opentijd [min]	Lengte [m]	Breedte [m]	Drempel [m]	Volume [10³ m³]	Schutting Zee→NKZ [/dag]	Zoutlast [ton zout/sch]	Zoutlek [kg zout/s]	Uitw.debiet [m³/s]
Noord	N10	35	400	50	15	300	14,55	5528	931	47
Midden	M10	30	225	25	10	56	17,88	1127	233	12
Zuid	Z10	20	111	18	8	16	22,68	327	85	4.3
Klein	K01	30	111	11	3,75	4,6	10,7	116	14	0,7
Totaal									1263	63

NIEUW Autonome ontwikkeling Noordersluis 95 MTPA – 13.93 S/d

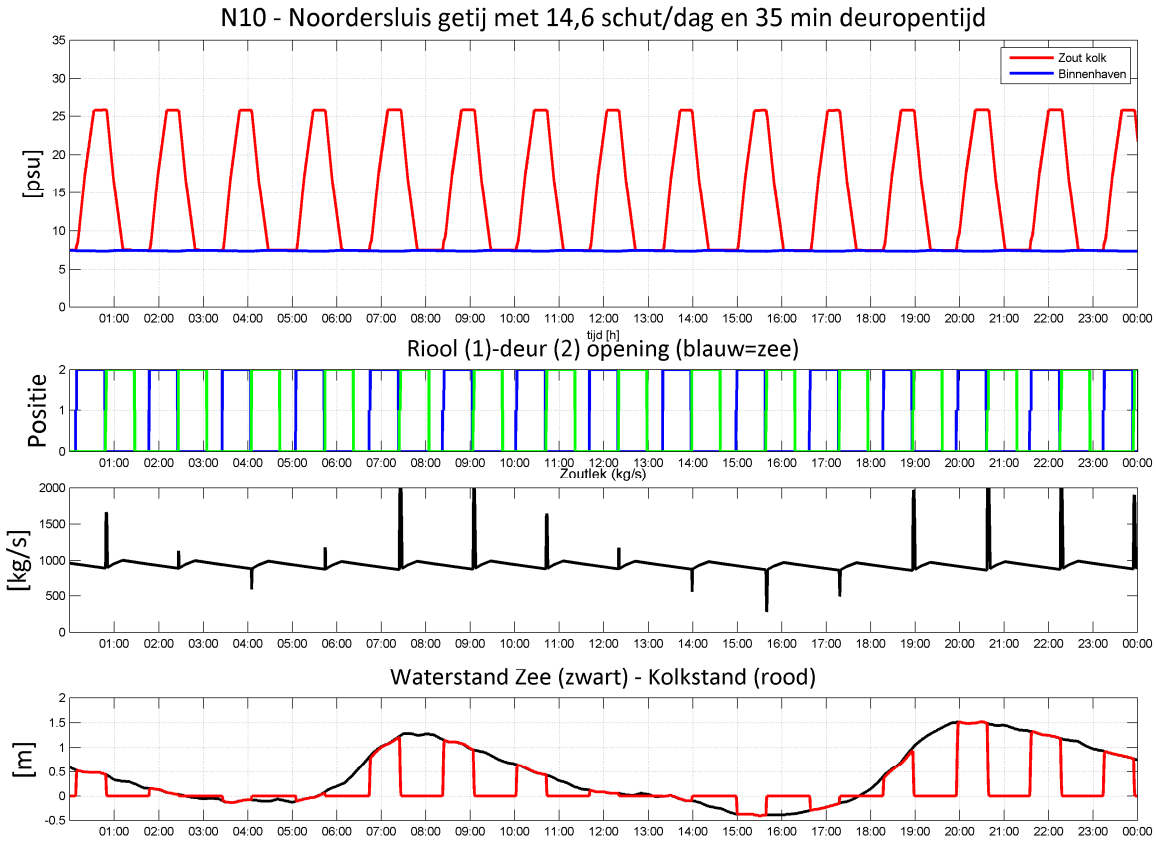
Tabel 3. Schattingen zoutlek met dynamische zoutlekmodel TIMLCK excl. Schepen ; bij 27 psu zee (ca. 26 psu buitenhaven) en 6 psu West-NZK ca. 7 psu binnenhaven) of verschil van 20 kg zout/m³.

Kolk	ID	Opentijd [min]	Lengte [m]	Breedte [m]	Drempel [m]	Volume [10³ m³]	Schutting Zee→NKZ [/dag]	Zoutlast [ton zout/sch]	Zoutlek [kg zout/s]	Uitw.debiet [m³/s]
Noord	N11	35	400	50	15	300	13,93	5528	894	45
Midden	M11	30	225	25	10	56	19,79	1127	257	13
Zuid	Z11	20	111	18	8	16	27,46	327	104	5.2
Klein	K01	30	111	11	3,75	4,6	10,7	116	14	0,7
Totaal									1269	63

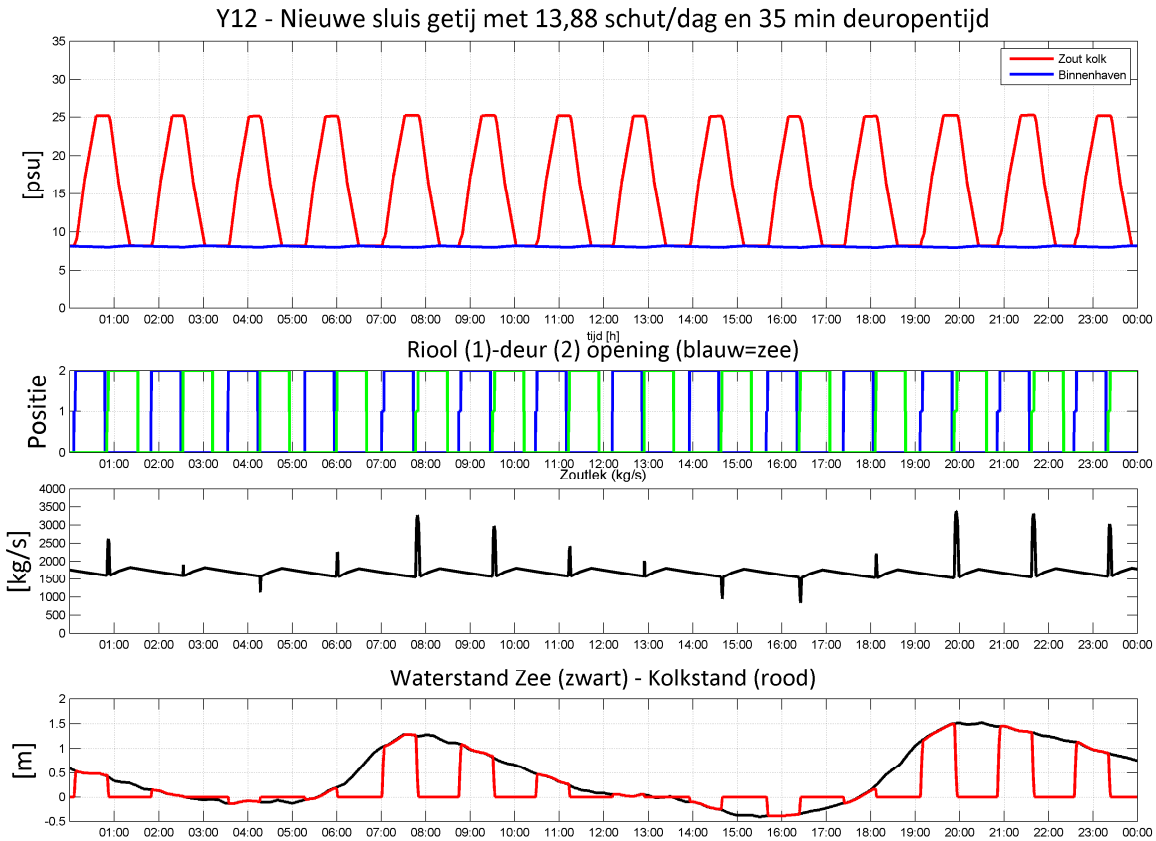
NIEUW Project alternatief Nieuwe sluis 125 MTPA – 13,88 S/d

Tabel 4. Schattingen zoutlek met dynamische zoutlekmodel TIMLCK excl. Schepen ; bij 27 psu zee (ca. 26 psu buitenhaven) en 6 psu West-NZK ca. 7 psu binnenhaven) of verschil van 20 kg zout/m³.

Kolk	ID	Opentijd [min]	Lengte [m]	Breedte [m]	Drempel [m]	Volume [10³ m³]	Schutting Zee→NKZ [/dag]	Zoutlast [ton zout/sch]	Zoutlek [kg zout/s]	Uitw.debiet [m³/s]
Nieuw	Y12	35	545	70	17,25	689	13,88	10.453	1679	84
Midden	M12	30	225	25	10	56	20,18	1127	262	13
Zuid	Z12	20	111	18	8	16	28,53	327	108	5.4
Klein	K01	30	111	11	3,75	4,6	10,7	116	14	0,7
Totaal									2063	103



Figuur 1. Huidige situatie met Noordersluis, 77 MTPA, 14,55 S/d en 35 min deur-opentijd. Voorbeeld van verloop van het zoutgehalte in de kolk en in de Binnenhaven (psu), de zoutlek (kg zout/s), de waterstand op zee en inde kolk (m NAP. De pulsen in de zoutlek grafiek komen door het nivelleren van de kolken bij hoogwater en laagwater.



Figuur 2. Projectalternatief, met nieuwe sluis, 125 MTPA, 13,88 S/d en 35 min deur-opentijd. Voorbeeld van verloop van het zoutgehalte in de kolk en in de Binnenhaven (psu), de zoutlek (kg zout/s), de waterstand op zee en inde kolk (m NAP.

J Onderzoek werking selectieve onttrekking

Memo

To
-

Date	**Reference**	**Number of pages**
2 September 2016	1220309-000-HYE-0026	27
From	**Direct line**	**E-mail**
Tommaso Boschetti	+31(0)88335 7347	tommaso.boschetti@deltares.nl
Bas Reijmerink	+31(0)88335 8396	bas.reijmerink@deltares.nl

Subject
Density flow under a salt screen (IJmuiden layout) for CFD and Delft3D

---

1 Introduction

1.1 Background

Deltares is involved as an advisor of Rijkswaterstaat (RWS) on the development of the New Sea Lock in IJmuiden. This involvement included research on the hydraulic functioning of the levelling system and the consequences of the new lock for salt intrusion into the North Sea Canal.

After the start of operations at the new sea lock at IJmuiden the salt intrusion will increase. Measures can be taken in order to prevent or mitigate this salt intrusion. RWS requires an overview of possible measures and advice on their relative effectiveness and cost effectiveness.

In the context of this, Deltares has been asked to assess the effectiveness of one such measure, namely a selective withdrawal performed by placing a salt screen at the entrance of the 'Spuikanaal' by CFD.

To support the advice on the preliminary hydraulic design of the salt screen in the Binnenspuikanaal of IJmuiden, also a near-field validity check has been performed to see whether Delft3D is the correct tool to model the salt transport underneath a salt screen as a near-field phenomenon in far-field simulations. This memo describes the results of the literature review, Computational Fluid Dynamics simulations and Delft3D simulations performed for this near-field validity check.

1.2 Aim of the study

The first aim of this study is to check whether density flows underneath a salt screen can be modelled correctly with CFD. A first step in this sense was made in [5], by comparing CFD results with scale model tests from the Delft Hydraulics Laboratory [7]. In the present work instead, numerical results are compared with a study by Jirka (1979); in this paper the author derived a theoretical formulation of the operation of a salt screen and later checked it using the data from multiple scale model experiments.

The second aim of the study is then to model the same simulations with Delft3D and to get insight in how well Delft3D performs with respect to the CFD results and theory. This will give more confidence in the performance of the salt screen in the far-field Delft3D simulations.

1.3 Approach

First, a review of Jirka (1979) has been performed to see whether the test results described in that paper were applicable to the IJmuiden situation. If so, these could give a good indication of the expected performance of the preliminary IJmuiden salt screen design. Second, this design has been schematized in a 2DV domain and used in CFD calculations for various flow conditions, ranging from 100-1600 m^3/s. Note that the maximum flow rate at IJmuiden is limited to about 500 m^3/s in normal conditions or 960 m^3/s in exceptional cases. The results of the CFD calculations were checked with theory. As a last step the same tests were performed with a Delft3D-model which reflects the horizontal and vertical resolution of the far-field model of the entire North Sea Canal (gridsize 20-25 m, s0 σ layers). The resulting efficiency values were finally checked with the CFD results.

2 Literature review (Jirka, 1979)

In the paper “Supercritical withdrawal from two-layered fluid systems” [2] an analysis of the selective withdrawal features of a two-dimensional salt screen was developed. The theory predicts the withdrawal ratio as a function of two governing parameters, a densimetric Froude number and a layer depth ratio.

Good qualitative agreement with available experimental data was found, including those of the tests of de Noordlandsluice described in [5]. Finally an effectiveness diagram displaying the fully effective, partially effective and non-effective regimes of skimmer wall operation was developed.

2.1 Theoretical development

The situation analysed in the report is presented below in Figure 2.1.

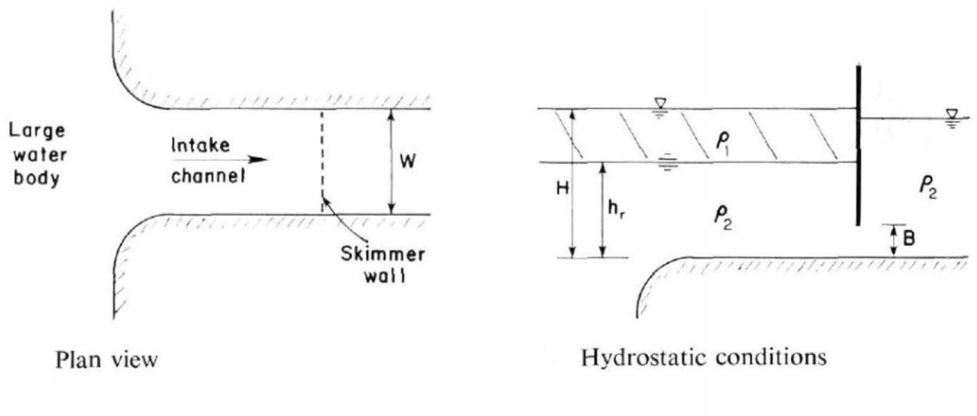


Figure 2.1 Two-dimensional skimmer wall in two-layer flow.

Basically, the salt screen may work in three different regimes: fully effective, partially effective and non-effective. Fully effective means that no fluid from the upper layer is withdrawn. Partially effective means some liquid from the upper layer is withdrawn but the salt screen still prevents some. Non-effective means the ratio of upper layer and lower layer is the same as in a situation without the salt screen.

If a densimetric Froude number based on the fixed interfacial depth h_r is defined as:

$$F_r = \frac{q}{\sqrt{g' h_r^3}} \qquad (1) \quad \textit{eq.(7) in [2]}$$

where:

q	=	flow rate per unit width	[m^2/s]
g'	=	$(\Delta\rho/\rho_2) \cdot g$ = reduced buoyant acceleration	[m/s^2]
h_r	=	fixed interfacial depth	[m]

then the conditions for incipient withdrawal (fully effective regime is below this point) are:

$$F_r = \left[2\left(\frac{B}{h_r}\right)^3\left(\frac{h_r}{B} - 1\right)\right]^{1/2} \quad \text{for} \quad \frac{B}{h_r} > {}^2/_3 \qquad (2) \quad \textit{eq.(8a) in [2]}$$

$$F_r = F_{r_c} = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \qquad \text{for} \quad \frac{B}{h_r} \leq {}^{2}/_{3} \qquad (3)$$ *eq.(8b) in [2]*

where:

B = height of withdrawal

Equation (3) is of primary interest since it provides the maximum intake flow rate per unit width and thus minimizes the wall width for a given flow (this is important for force and cost considerations). The incipient and supercritical withdrawal situations are schematized below in Figure 2.2.

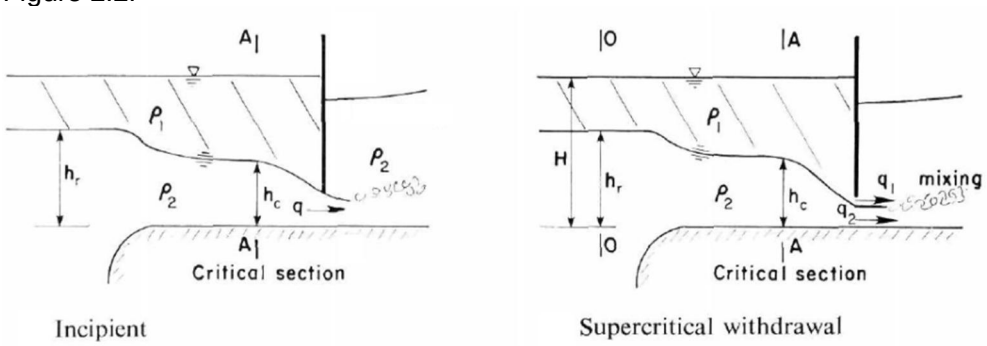


Figure 2.2 Two-dimensional skimmer wall in two-layer flow with design condition B < 2/3 h_r.

The design condition of practical interest is the one described by Eq. (3), thus the theoretical development for the partially effective skimmer wall was restricted to this situation ($\frac{B}{h_r} \leq {}^{2}/_{3}$). As shown on the right in Figure 2.2 both layers are moving during supercritical withdrawal. By the same argument as for the incipient withdrawal case, a “double critical” condition is assumed to exist a short distance in front of the skimmer wall as characterized by the relationship:

$$F_{r_1}^{\,2} + F_{r_2}^{\,2} = 1 \qquad (4)$$ *eq.(9) in [2]*

where F_{r1} and F_{r2} are the densimetric Froude numbers of the upper and lower layer, respectively. Making use of the Boussinesq approximation (free surface Froude numbers are small with respect to densimetric Froude numbers) brings:

$$\frac{q_1^2}{g'(H-h_c)^3} + \frac{q_2^2}{g'h_c^3} = 1 \qquad (5)$$ *eq.(10) in [2]*

Furthermore an energy equation applies over the short channel length:

$$h_r - h_c = \frac{q_2^2}{2g'h_c^2} - \frac{q_1^2}{2g'(H-h_c)^2} \qquad (6)$$ *eq.(11) in [2]*

Where q_1 and q_2 are the discharges per unit width in each layer, satisfying $q = q_1 + q_2$. The above algebraic equation can be solved numerically to find the withdrawal ratio:

$$\lambda = \frac{q_1}{q} = \frac{q_{fresh\ water}}{q_{tot}} \qquad (7)$$ *eq.(13) in [2]*

For large F_r the salt screen becomes totally ineffective and λ approaches an asymptotic value $\hat{\lambda}$, which is simply the ratio of layer depths outside the approach channel.

$$\hat{\lambda} = 1 - \frac{h_r}{H} \qquad (8) \quad \textit{eq.(14) in [2]}$$

The limit of partial selectivity can be found by considering the critical relationship, eq.(5), recasting it into the form:

$$\left[\frac{\left(\frac{q_1}{q_2}\right)^2}{\left(1-\frac{h_c}{H}\right)^3} + \frac{1}{\left(\frac{h_c}{H}\right)^3}\right]\frac{1}{\left(1+\frac{q_1}{q_2}\right)^2} = \frac{1}{F_r^2}\left(\frac{H}{h_r}\right)^3 \qquad (9) \quad \textit{eq.(15) in [2]}$$

For a given q_1/q_2 and H/h_r the maximum value of F_r can be found by taking the derivative of eq.8 with respect to h_c/H which leads with eq.8 to:

$$F_{r_{max}} = \left(\frac{H}{h_r}\right)^{5/2}\left(1 + \sqrt{\frac{H}{h_r} - 1}\right)^{-2} \qquad (10) \quad \textit{eq.(16) in [2]}$$

2.2 Results

The resulting "effectiveness diagram" for a two-dimensional skimmer wall operating in a two-layer fluid system is displayed in Figure 2.3 as function of the densimetric Froude number F_r and lower layer water depth ratio h_r/H.

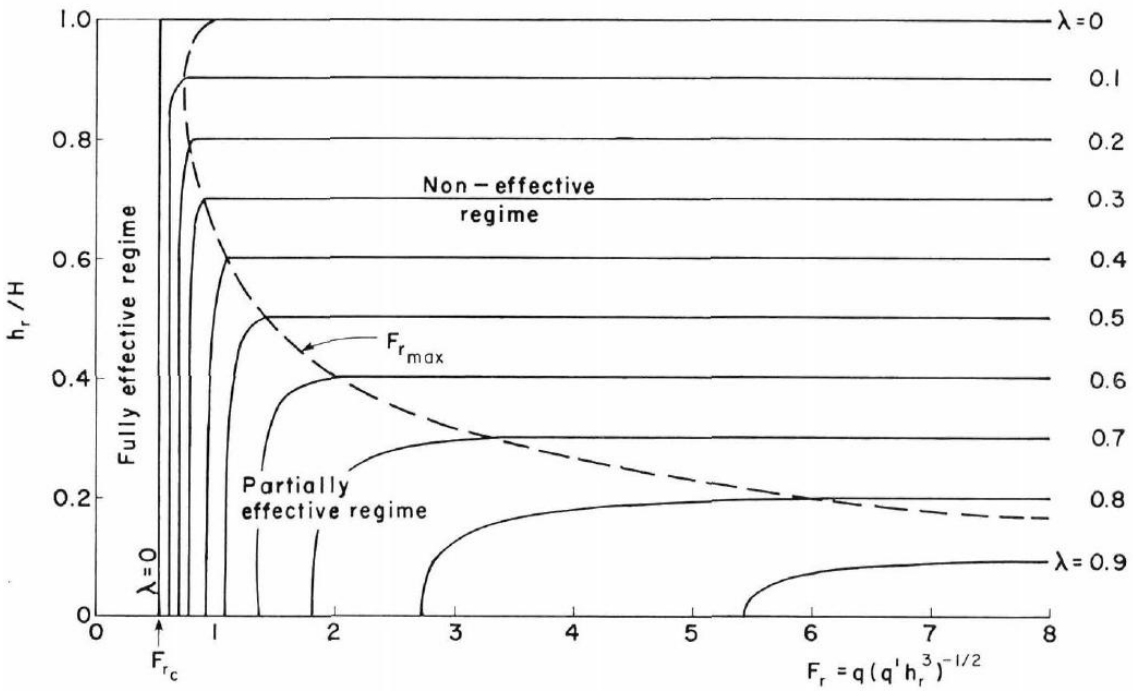


Figure 2.3 Selective withdrawal effectiveness diagram for a two-dimensional skimmer wall.

In summary, withdrawal from the lower layer only takes place in the fully effective regime, $F_r \leq F_{r_c}$, where F_{r_c} is given by equation (3). In the non-effective regime, the ratio of upper layer

withdrawal is equal to the ratio of layer depths for the condition $F_r \geq F_{r_{max}}$, where $F_{r_{max}}$ is given by equation (10). The intermediate case represents the partially effective regime.
Experimental data for short approach channels (negligible friction losses) were finally compared by Jirka with the theoretical results, showing a qualitative agreement with equations (2) - (3). The lack of quantitative accuracy (10 - 20%), according to Jirka, is due to theoretical idealizations, i.e. the neglect of viscous effects on the interface which are particularly severe in the supercritical flow portion in front of the skimmer wall and the assumption of an ideal sharp interface between layers, and experimental features, such as strong flow non-uniformities due to low Reynolds number conditions and lateral boundary layer developments.

3 CFD modelling

This section gives an overview of the design of the computational domain, the mesh, the physical models and boundary conditions used for the numerical simulation of the operation of a salt screen.

As the first aim of this study is to check whether density flows underneath a salt screen can be modelled correctly with CFD, a comparison with the theoretical results from Jirka has to be performed. To do this, first, simulations are carried out on a domain that resembles the one analysed in the aforementioned study; this allows the assessment of the differences between theory and the numerical model.

Simulations are also performed on a domain mimicking the IJmuiden situation, allowing the evaluation of the effect of a different seabed configuration on the density flow under the salt screen.

Finally, in order to assess the effectiveness of the structure, simulations are performed without the presence of the salt screen and then compared with the previous results.

For the modelling of the lock exchange flow the CFD package Star-CCM+ is used (version 10.04.011). Star CCM+ is an engineering software package for solving problems involving flow, heat transfer and stress.

3.1 CFD 2DV geometries

As previously stated two different basic geometries are used in the CFD simulations. Both are based on the real IJmuiden salt screen dimensions; the first one, in order to reproduce the situation analysed by Jirka in [2], has a deeper seabed on the basin side of the salt screen, obtaining a domain that is similar to the one represented in Figure 2.1 and Figure 2.2 (D1). In the second one instead a simplified seabed is set up, representing the current sketch plan (schetsontwerp) of the IJmuiden configuration (D2). Based on the latter a third domain (referred to as D3) is defined, this time without the salt screen; this allows a comparison between the results for D2 and D3 and thus the assessment of the effectiveness of the structure.

Figure 3.1 below shows the two domains used in the CFD simulations.

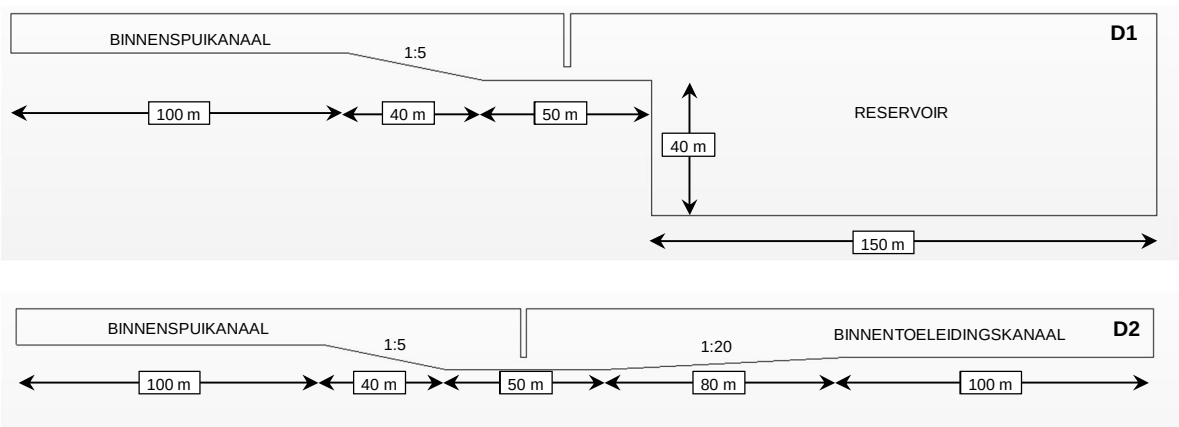


Figure 3.1 2D Fluid domains for CFD computations. Top: D1. Bottom: D2.

Further detail about the salt screen, which is placed in the middle of the 50 m long central pit, is given in Figure 3.2.

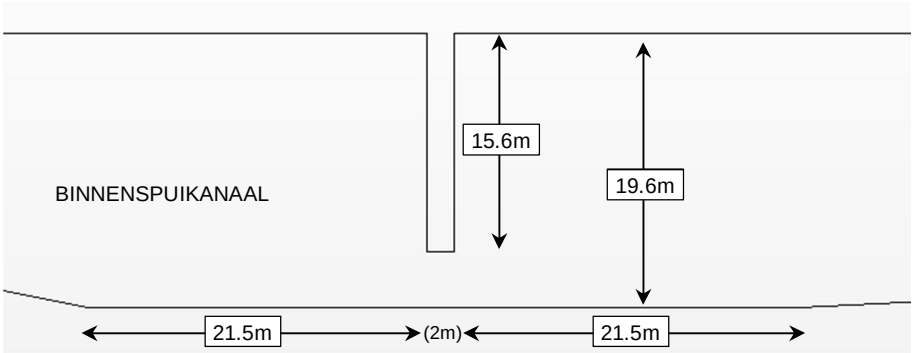


Figure 3.2 Salt screen detail.

The shape of the underside of the salt screen matters (some analysis on this topic can be found in [7]); here a rectangular form with sharp edges was chosen.

3.2 Boundary conditions

A brief schematization of the boundaries in the numerical model domains is given below in Figure 3.3.

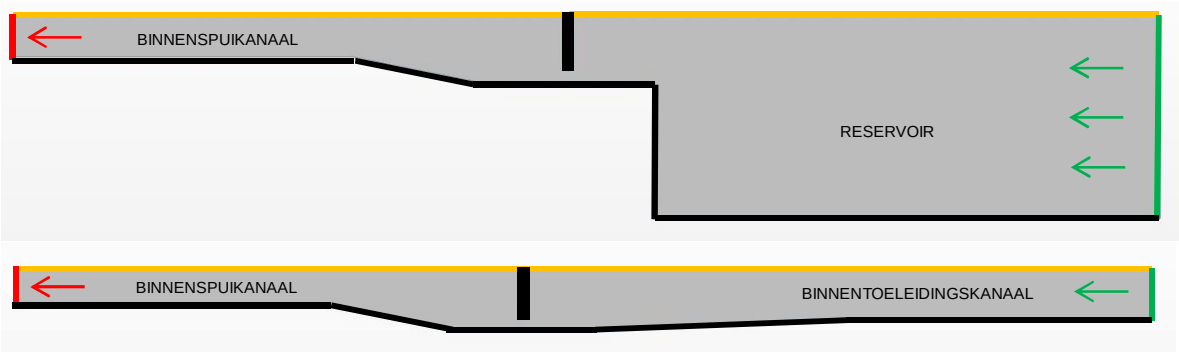


Figure 3.3 Boundary schematization in numerical model domains. Top: D1. Bottom: D2.

- ***Outlet (pumps + discharge sluices)***
- ***Free surface (rigid lid)***
- ***Inlet***
- ***Walls***

The outlet is placed at the Binnenspuikanaal end to simulate the flow rate imposed by discharge sluices or pumping stations. The discharge through the domain is modelled using a “velocity inlet”, thus imposing a velocity on the outlet section. A constant velocity (following the red arrow direction in Figure 3.3) is assumed as boundary condition. On the other side of the domain, the inlet is modelled as a “stagnation inlet”. Here pressure is imposed, accounting for the sudden change in density between the fresh and salt water layer. All other boundaries are walls; to represent the free surface on the upper side of the domains (‘Free surface’ in Figure 3.3) a slip boundary condition is used so there is no flow component perpendicular to the wall and no friction parallel to the wall (rigid lid). This is a good approximation of a relatively stationary free surface. A no-slip wall boundary condition is imposed on the seabed.

3.3 Mesh

The mesh was generated using the cell-splitting algorithm of the Star-CCM+ trimmer meshes. This gives a 2D mesh of square cells. The resulting grid consists in 2,022,767 and 1,225,666 cells, for domain #1 and domain #2 respectively, ranging from 0.1m to 0.05m in the refinement region. The refinement region is located around the salt screen and along the interface between fresh and salt water.

Particularly important is the mesh size near the salt screen; as previously stated the average cell dimension is, in that region, 0.05m. This means that there are more than 80 cells over the withdrawal height B (which is 4m).

Figure 3.4 shows an extract of the discretized representation below the salt screen in the computational domain.

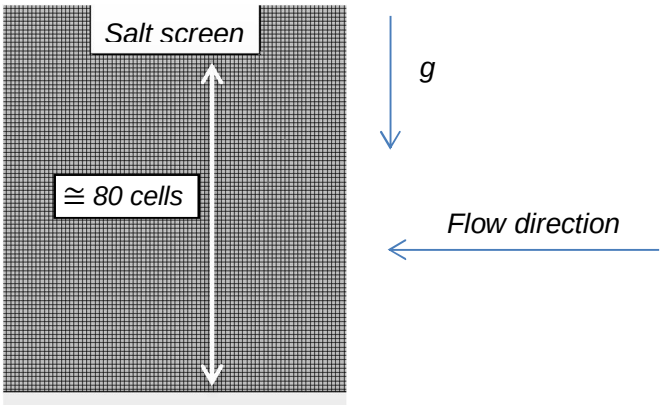


Figure 3.4 Mesh detail below the salt screen.

3.4 Modelling salt water

For modelling the transport of salt, a scalar transport equation for salt concentration is used.
The density of the water is modelled as a function of salt content and depends on the concentration of the scalar in that section. The used equation assumes that the density varies linearly between the values of 1018 (corresponding to 24.7 psu at 15°C) and 1004 (corresponding to 6.4 psu at 15°C); these values are based on the measurements reported in [3] referring to the IJmuiden situation.

3.5 Initial conditions

For modelling the initial fraction of salt and fresh water a field function for the salt scalar is used, defining a constant height interface (h_r) across the whole domain. Figure 3.5 below shows the initial density distribution over the fluid domains previously introduced.

Due to the fact that we are dealing with a gravity driven flow, the gravity is selected in the physical models and is set to -9.81 m/s^2 in the vertical direction (y axis). Owing to the presence of density differences a buoyancy term, proportional to the difference in density, is added to the momentum equation at each cell.

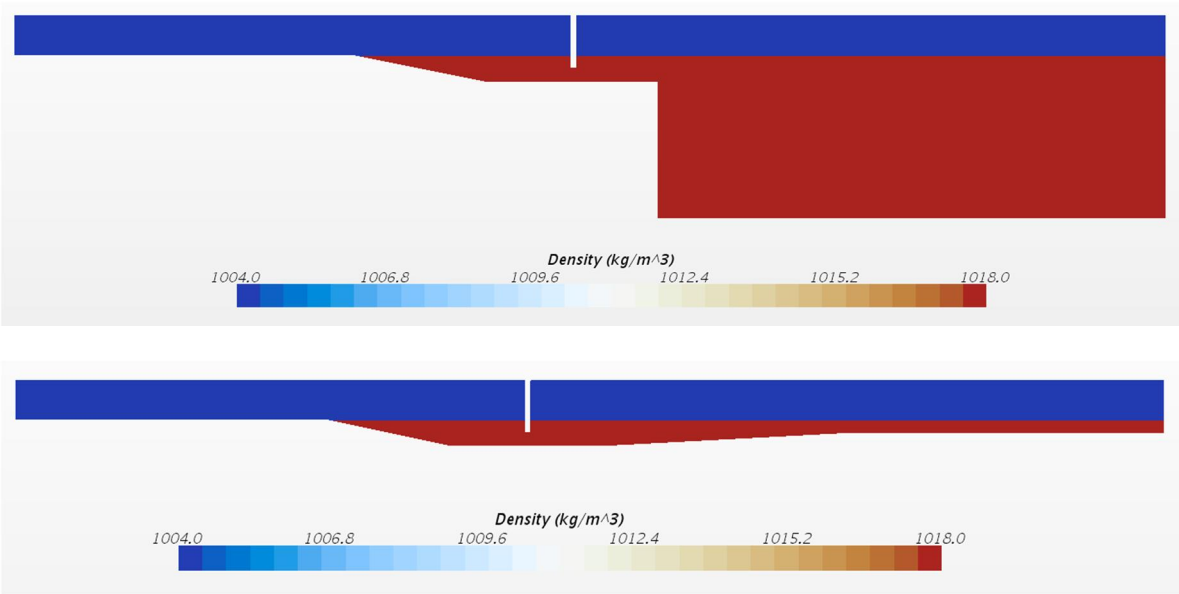


Figure 3.5 Initial density distribution in the CFD fluid domains. Top: D1. Bottom: D2.

3.6 Turbulence

For modelling the turbulence the "Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)" approach is used. Within the RANS formulation the unsteady turbulent fluctuations are modelled as having an effect on the mean flow and not explicitly resolved.

For this simulation the "Realizable K-Epsilon Two-Layer" turbulence model is selected. This is a two-equation turbulence model in which transport equations are solved for the kinetic energy k and its dissipation rate ϵ.

This model has been used previously for density flows at locks (see [4]) and for previous research on a density flow below a salt screen (see [5]).

3.7 Run definitions

Numerical computations, for both the domains previously introduced, were carried out for the following settings (see Table 3.1 below):

Table 3.1 Selected values of ρ_{fresh}, ρ_{salt}, B and h_r.

ρ_{fw} [kg/m^3]	ρ_{salt} [kg/m^3]	B [m]	h_r [m]
1004	1018	4	7.5

Where:
ρ_{fw} = fresh water layer density
ρ_{salt} = salt water layer density
B = height of withdrawal
h_r = fixed interfacial depth

Table 3.2 below shows the different velocities that were imposed through the domain. Those velocities are linked to flow rates which are derived assuming a total length of the salt screen equal to 120 m (initial sketch plan / schetsontwerp).

Table 3.2 Selected velocities and corresponding flow rates for CFD simulations.

Run-id	v [m/s]	q [m^2/s]	Q_{tot} [m^3/s]
1	0.072	0.833	100
2	0.144	1.667	200
3	0.216	2.500	300
4	0.287	3.333	400
5	0.359	4.167	500
6	0.539	6.250	750
7	0.718	8.333	1000
8	1.078	12.500	1500
9	1.149	13.333	1600

The values of h_r (interface height) and D (salt screen bottom opening) were chosen in order to fall under condition described by eq. (3) in Section 2.1. In this way the theoretical intake flow rate per unit width is maximized and a comparison with the published results by Jirka [2] is possible.

In order to investigate all the 3 different regimes highlighted in Section 2.2 a maximum flow rate of 1600 m^3/s was chosen for the numerical simulations; this is quite higher than the expected discharge at IJmuiden which is usually less than 500 m^3/s, with a maximum of 960 m^3/s in exceptional cases.

3.8 Results

This section contains the results of the salt screen simulations for the 9 different cases previously introduced.

The fresh water flow rate through the domain is measured in each simulation, allowing the evaluation of λ, which is defined as q_{fresh}/q_{tot} (see Section 2.1). It is possible, in this way, to evaluate the transition points between the initial fully effective regime (no fresh water pumped), the partially effective and the non-effective one and compare the flow rates at which it happens with the theoretical forecast value.

First, the theoretical results presented in Section 2.2 are compared with the CFD results for domain D1 (reservoir configuration), since this domain matches the geometrical assumptions made in [2].

For the h_r value chosen (reported in Section 3.7) the theoretical critical and maximum value of the Froude number for selective withdrawal, based on eq. (3) - (10), are:

$F_{r_c} \cong 0.544$
$F_{max} \cong 2.166$

Figure 3.6 below shows the CFD results in terms of λ, on the same plot previously reported in Figure 2.3.

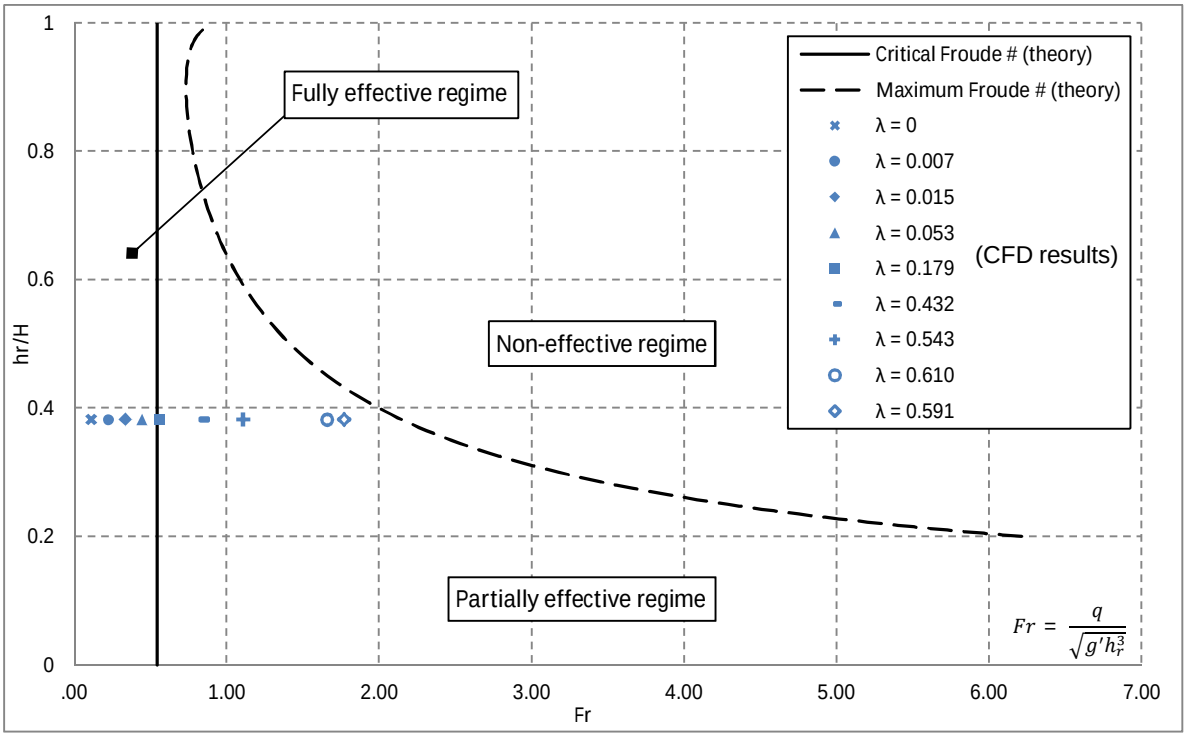


Figure 3.6 Selective withdrawal effectiveness diagram and CFD experimental points for reservoir configuration (D1).

According to Figure 3.6, fresh water entrainment appears to happen for much lower flow rates than expected from the theoretical approach; following the CFD results, in proximity to the theoretical critical Froude number (solid black line in Figure 3.6) the withdrawal ratio is λ = 0.179 (almost 20% of the flow beneath the salt screen consists of fresh water). As the fresh water flow through the domain is measured, it is possible to evaluate the net salt transport under the salt screen; this is plotted against the total discharge below in Figure 3.7.

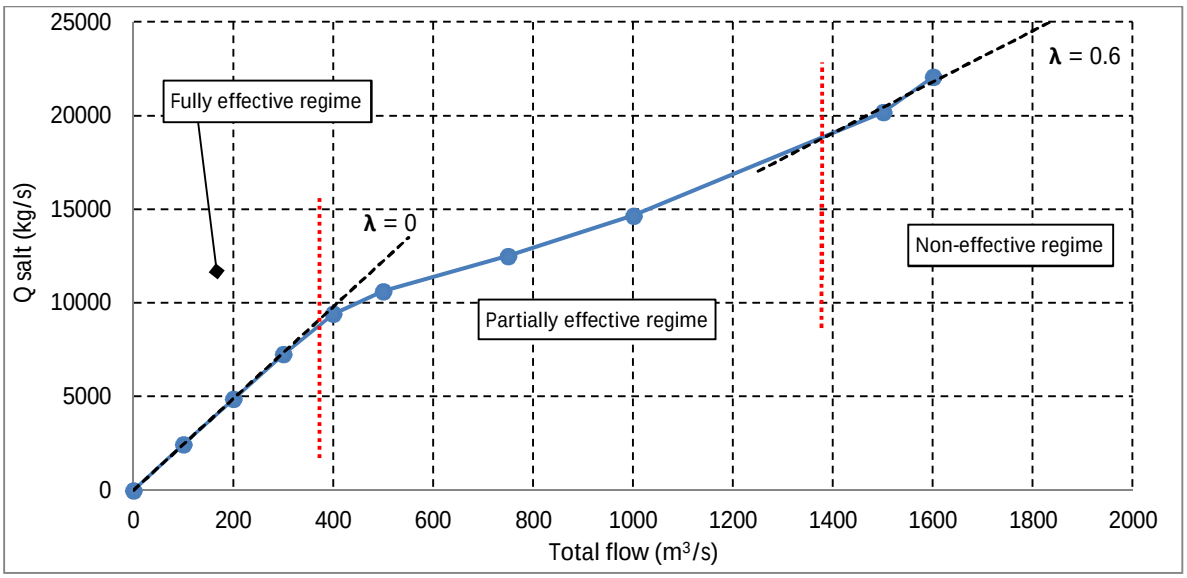


Figure 3.7 Salt mass flow rate plot and regime analysis for reservoir configuration (D1). The dashed red lines are used to qualitatively separate the different regimes.

In the first regime no fresh water is pumped out of the basin, so the withdrawal ratio λ is equal to 0; this means that there is a linear dependence between the total volumetric flow and the salt mass flow rate. This linear trend, representing the "fully effective regime", is correctly reproduced in CFD as shown in Figure 3.7.

The same thing holds for the "non-effective regime": here the ratio of withdrawal λ is equal to the ratio of layer depths and is equal to 1 – h_r/H, which, for the settings described in Table 3.1, returns λ = 0.6.

An assessment of the effect of the salt screen on the overall salt discharge can be obtained by comparing the resulting salt flow in kg/s with and without the structure. The results for the IJmuiden seabed configuration (D2) are shown in Figure 3.8 below.

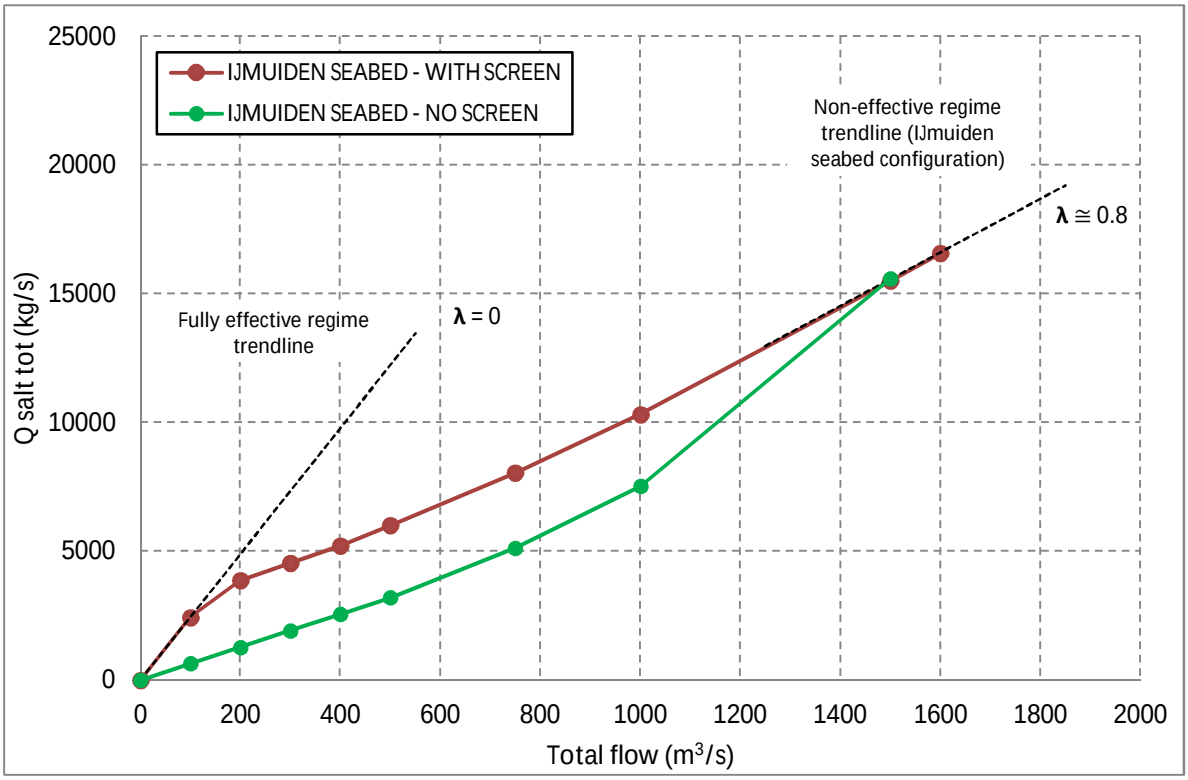


Figure 3.8 Salt mass flow rate with and without salt screen for seabed configuration D2

As expected the presence of the salt screen increases the salt removal from the basin for low flows, while for high flows, in the non-effective regime, the behaviour with or without structure is the same.

As previously stated in the introduction to this chapter, simulations have been performed both on a reservoir seabed configuration as on a IJmuiden schematized seabed; it's in fact interesting to evaluate the effect of a different seabed on the density flow under the salt screen and to understand if the efficiency of the structure is somehow affected.

Results for both the domains here considered are plotted below in Figure 3.9. As the imposed h_r is the same in the two domains, the figure illustrates how the different seabed configuration

affects the critical Froude number (or flow rate) at which there is the transition between the fully and partially effective regimes and also the final withdrawal ratio from the fresh upper layer.

In the second set of simulations (IJmuiden seabed, domain D2) the initial fully effective regime is shortened and the partially effective regime is entered for lower flow rates than for the first configuration analysed (reservoir, domain D1). At the same time the final trend for the non-effective regime is different: in the first case a final withdrawal ratio of 60% was observed while in the second this value increased to 80%. These facts lead to the conclusion that, except for very low flow rates, the salt screen would perform less effectively in the second case.

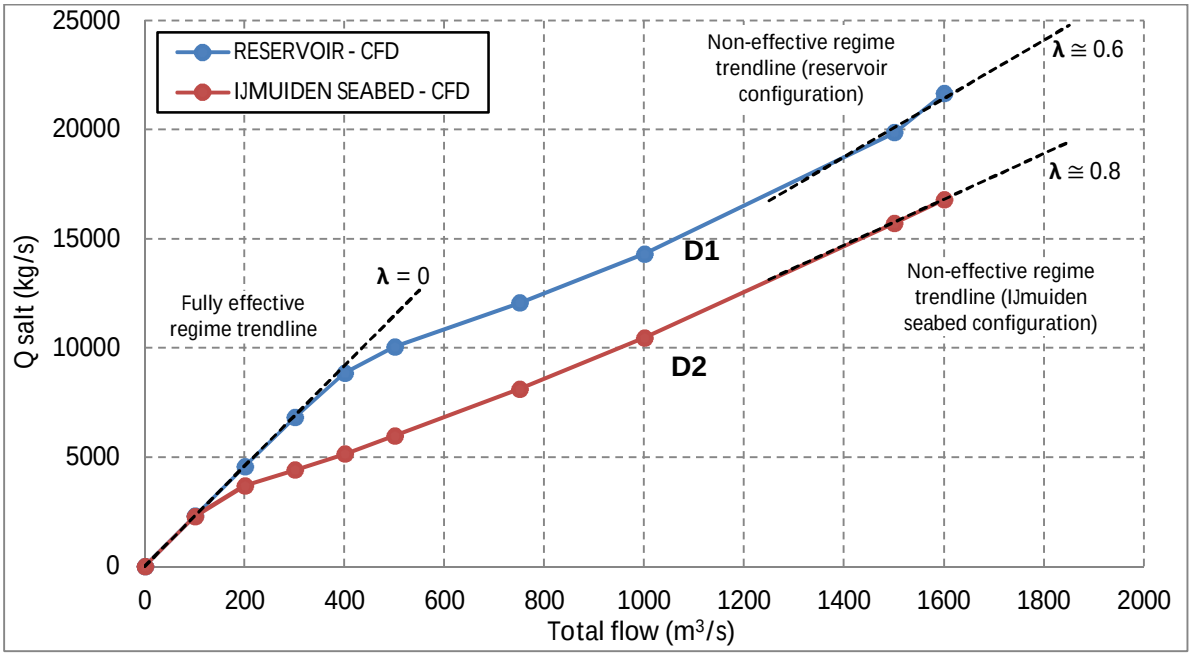


Figure 3.9 Salt mass flow rate comparison between different seabed configurations.

The overall efficiency of the selective withdrawal can be defined as follows:

$$Efficiency = \left(\frac{Q_{salt}}{Q_{salt,max}}\right) \cdot 100$$

Where:

$Q_{salt,max}$ = maximum possible salt flow rate that would be obtained by the total discharge and the maximum salt concentration (24.7 psu)

Figure 3.10 here below reports how selective withdrawal behaves in the three different situations previously mentioned.

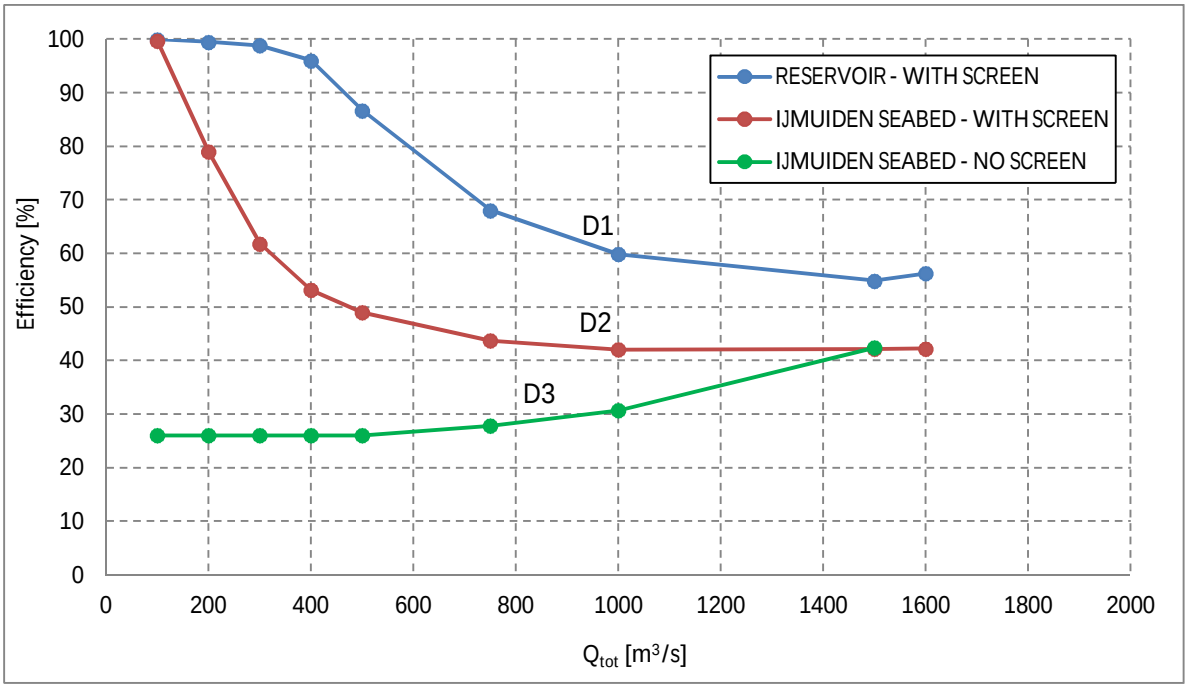


Figure 3.10 Efficiency comparison between different seabed configurations.

Figure 3.10 highlights how the presence of the salt screen enhances the selective withdrawal from the salt water layer.

Without the salt screen (configuration D3) the efficiency remains constant until a flow of ~ 500 m^3/s. For these low discharges only water from the upper layer, which has a constant salinity concentration of 6.4 psu, is pumped out of the basin. For high discharges the efficiency increases to a maximum, which is found in the non-effective region (see Figure 3.8 and Figure 3.9).
For the case D2 with a screen the efficiency decreases with an increasing flow rate. The highest efficiency is found for small flow rates, in the fully effective region, while in the non-effective region the efficiency is the same as for case D3.

The efficiency drop between configuration D1 and D2 is due to the different seabed. The reservoir configuration (D1) ensures enough salt water storage to keep the boundary between the fresh and salt layer at a constant level (h_r) while for configuration D2 (IJmuiden seabed) the salt layer thins, lowering the h_r value and thus lowering also the efficiency of the salt screen.

4 Delft3D modelling

The second goal of the study described in this memo is to check whether Delft3D can be used to model the performance of the salt screen in a far-field model. The results of Section 3 for domain D2 will be used in this section to check the validity of the Delft3D results in the same situation. First the model setup is described shortly in Section 4.1, after which the results are presented in Section 4.2. The Delft3D results are compared to the CFD results in Section 5.

4.1 Model setup

4.1.1 Computational grid and depth schematization

To mimic the CFD simulations the layout and depth schematization of geometry D2 have been used for Delft3D (see Section 3.1). Since the aim of the study to get more confidence in the performance of the salt screen in the far-field Delft3D simulations, a coarse horizontal grid resolution of 20-25 m has been selected which is comparable to the resolution used in [6]. By selecting this resolution for the grid cells the bathymetry can be represented as well as possible. In vertical direction σ-layers were applied with 20 equidistant layers, which is equal to the number of layers used in the far-field Delft3D-model of the entire Noordzeekanaal (NZK). The hydrodynamic grid, including the depth schematization, is presented in Figure 4.1. Note that in view of the coarse grid, the length of the upstream canal was extended with 400 meter, compared to the D2 geometry, to avoid problems with boundary conditions close to the area of interest.

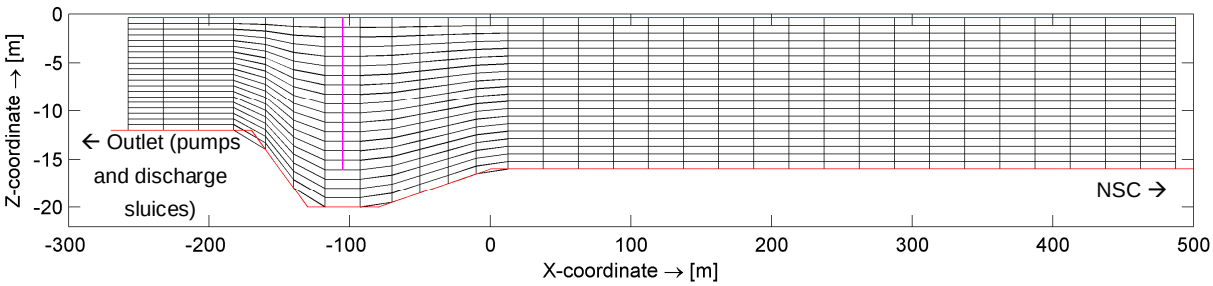


Figure 4.1 Hydrodynamic grid (σ layers) and depth schematization. The approximate location of the salt screen is indicated by the magenta line.

4.1.2 Boundary conditions, initial conditions and schematization salt screen

Outlet side

At the outlet side of the model (x = -270 m) a total discharge boundary is set. The discharges considered in this memo vary between -100 m^3/s and -1000 m^3/s in terms of a 120 m wide salt screen (to the left of the model). The water is withdrawn from the domain uniformly over the depth.

North Sea Canal side

At the North Sea Canal (NSC) side of the model (x = 500 m) a fixed water level is set at NAP -0.4 m which corresponds with the constant water level on the NSC. The salinity transport condition at the NSC side is set as a sharp interface: layers 1 to 15 = 6.4 psu, layer 16 = 15.55 psu and layers 17 to 20 = 24.7 psu. The inflowing water has a constant temperature of 15°C.

Initial condition
For the initial condition of all runs, the velocity in the total domain is set at 0 m/s, the water level at NAP -0.4 m and the salinity distribution of the North Sea Canal boundary has been extended through the whole domain. This initial condition leads to an initial shock in the solution, but this is quickly suppressed by the flow through the domain (especially for the higher flow rates) due to the pump station at the pump station boundary.

Salt screen
The vertical obstruction of the salt screen is modelled in Delft3D by closing the top 16 (of 20) sigma layers (indicated in green in Figure 4.1). Since every layer represents 5% of the local depth, the opening underneath the salt screen is approximately 4 m, which corresponds to the preliminary design.

4.1.3 Other parameters

In this section only the most important model settings are described. With the exception of the time step all other parameter settings are consistent to the settings used in the Arcadis (2014) model.

Time step
For the simulations a time step of 3 s was used, leading to Courant numbers varying between 3.6 and 5.3 over the domain. This is a tenth of the time step used in [1].

Viscosity and diffusivity
The effects of turbulence are accounted for by using the eddy viscosity and diffusivity parameters. The parameters strongly influence the behaviour of the salt transport in the system. The horizontal eddy viscosity is set at 1 m^2/s; the horizontal eddy diffusivity a value of 0.01 m^2/s is used. In vertical direction the k-ε turbulence model is used, with a background vertical eddy viscosity and diffusivity of 10^{-5} m^2/s.

Anti-creeping
Anti-creeping (correction for sigma coordinates) is activated in all runs.

4.1.4 Run definitions

A total of 10 computations have been performed with the Delft3D-model with discharges ranging from 100 m^3/s to 1000 m^3/s. The run definitions are presented in Table 4.1. The third column presents the flow rates per meter which are derived assuming a total length of the salt screen equal to 120 m (according to the initial sketch plan).

Table 4.1 Run definitions of Delft3D simulations

Run-id	Q_{tot} [m^3/s]	q [m^2/s]
1	100	0.833
2	200	1.667
3	300	2.500
4	400	3.333
5	500	4.167
6	600	5.000
7	700	5.833
8	800	6.667
9	900	7.500
10	1000	8.333

Next to the 10 computations described in Table 4.1, an additional 10 computations have been performed excluding the salt screen in the schematization in order to assess the effectiveness of the salt screen on the salt transport through the domain. The latter was also done for the CFD modelling presented in Section 3.

Since the scenarios considered in this memo do not represent a real period, the simulations were run until a steady state solution was reached.

4.2 Results

In this section the results of the 10 runs including and excluding the salt screen are presented. To get a measure of the salt transport through the domain, the cumulative salt transport (in kg) is measured at the inflow boundary. The average momentary salt transport (in kg/s) is determined by dividing the stationary cumulative salt transport over a certain period by the duration of the period. In this way it is not possible to distinguish between salt water (24.7 psu) and fresh water (6.4 psu) and therefore the values for λ (q_{fresh}/q_{tot}) are not available for the separate runs. The results are presented in Figure 4.2. This figure also includes the line for the theoretical value of λ = 0 from Figure 3.8.

When the results of Delft3D including salt screen (blue line) are compared to the theoretical fully effective regime trendline (λ = 0), it can be seen that for the low discharges the withdrawal is very effective. Similar to the theory, the Delft3D results show a transition from an effective regime to a non-effective regime. It should be noted that the trendline through the high discharge data points does not go through zero, which suggests that the non-effective regime of Delft3D has not been reached yet for a discharge of 1000 m^3/s. It is expected that for higher discharges the blue line will run parallel to green line, which indicates the salt transport through the domain when no salt screen is present.

The efficiency of the salt screen in Delft3D is presented in Figure 4.3 (blue line). Refer to Section 3.8 for the definition of the efficiency of the salt screen. This figure supports the expectation that the lines of Figure 4.2 will eventually touch and run parallel to each other. Note that the efficiency of the situation without a salt screen increases somewhat for increasing flow rates. This can be explained by the increase of the mixing intensity between the two layers for increasing flow rates. It is expected that the line for the runs with a salt screen and the line for the runs without a salt screen will eventually touch for even higher discharges and run parallel to each other.

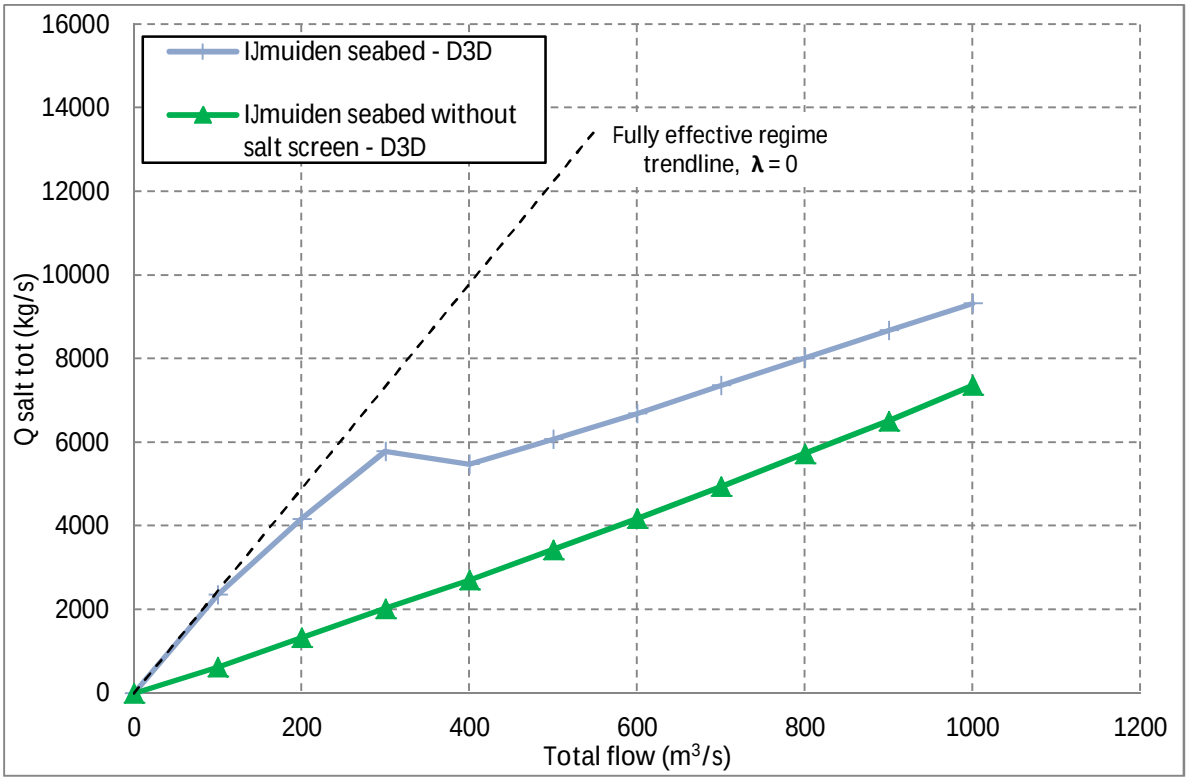


Figure 4.2 Salt mass flow rate plot for the Delft3D simulations.

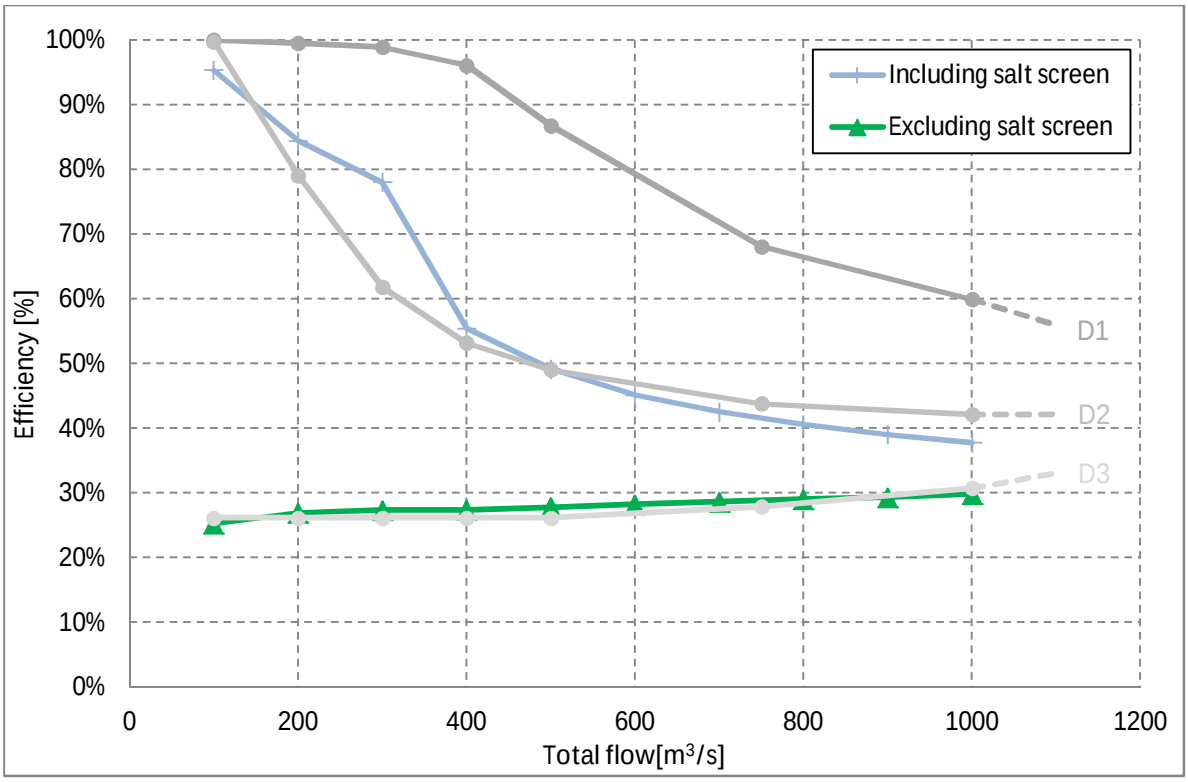


Figure 4.3 Efficiency comparison between simulations including and excluding salt screen (shaded lines from Figure 3.10).

5 Comparison of results and discussion

In this section the results of the CFD modelling and Delft3D are compared (Section 5.1). Based on this comparison, the validity of Delft3D as the main tool to model the salt screen in far-field hydrodynamic models is then discussed (Section 5.2).

5.1 Comparison of results

Figure 5.1 presents the combined results of the CFD and Delft3D modelling. As mentioned in Section 4, Delft3D agrees for low flow rates with the behaviour for the theoretical fully effective regime where only salt water is extracted in a similar way as the CFD model. At a flow rate of 300 m^3/s Delft3D is more effective than the CFD model, but from 400 – 1000 m^3/s both models compare generally well, although the Delft3D results tend to become less effective than CFD for very high flow rates (also compare Figure 3.10 to Figure 4.3). A possible explanation for the deviation is that in Delft3D the flow along the salt screen is not modelled in detail, but computed over relatively coarse cells (both in horizontal and vertical direction).

The same explanation can also be used for the behaviour of Delft3D for the non-effective regime. The CFD results show that a very thin salt layer is present near the salt screen for high discharges. The hydrodynamics in this thin layer cannot be resolved for in high detail in Delft3D, which may lead to an overestimation of the freshwater fraction in the transport ($\lambda > 0.8$).

The computations without a salt screen show fairly comparable results between CFD and Delft3D, though the Delft3D-results show a more linear trend than the CFD-results. The latter can also be ascribed to the lower level of detail of the Delft3D model.

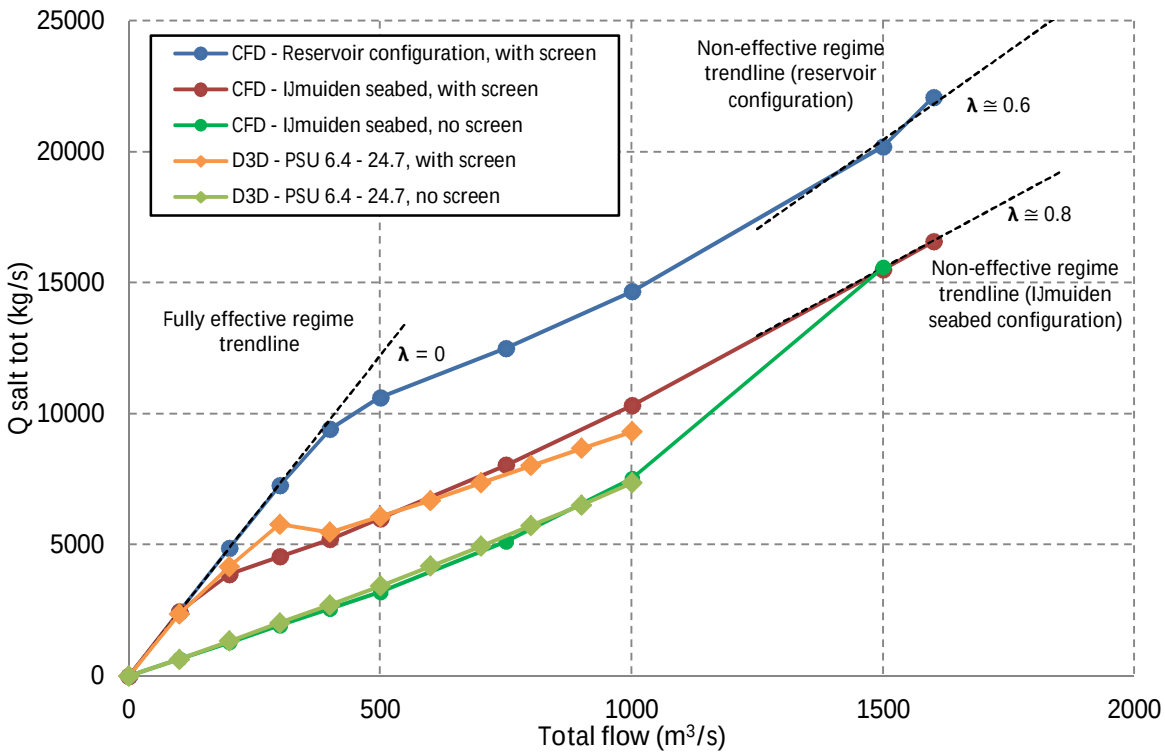


Figure 5.1 Combined salt mass flow rate plot for the CFD and Delft3D simulations.

5.2 Discussion

Within the range of interest (0-500 m^3/s) Delft3D generally shows a similar behaviour in salt transportation as CFD with exception of 300 m^3/s, where the salt flux is overestimated. This is probably due to limitations in modelling the development of turbulence along the downward slope to the salt screen.

Overall it is expected that Delft3D will give an acceptable reproduction of the salt transport below the salt screen when applied in a far-field model with comparable horizontal and vertical grid resolution. Otherwise more advanced sub-grid models of a salt screen need to be implemented and validated.

While the grid resolution used for Delft3D is comparable to the resolution used in the far-field model, it is advised to also perform some more detailed simulations in which both the horizontal and vertical resolution is improved. This will give insight in whether the Delft3D results converge more towards the CFD-results when more detail is added to the simulations. In addition, it is advised to also do some simulation with z-layers instead of sigma-layers.

6 Conclusions and recommendations

CFD was used to model the theoretical case described by Jirka (1979) to see whether it was possible to model salt transport underneath a salt screen. The results showed that this is indeed the case; the CFD results showed a good agreement with the theoretical values although CFD showed a somewhat earlier transition from the fully effective regime towards the partially effective regime.

From the comparison of Delft3D results to the CFD results it can be concluded that the inclusion of a salt screen in the far-field model of Delft3D can be used to get an indication of the performance of selective withdrawal for the discharge ranges that occur at IJmuiden (usually less than 500 m^3/s with a maximum of 760 m3/s; maximum of 960 m^3/s in exceptional cases).

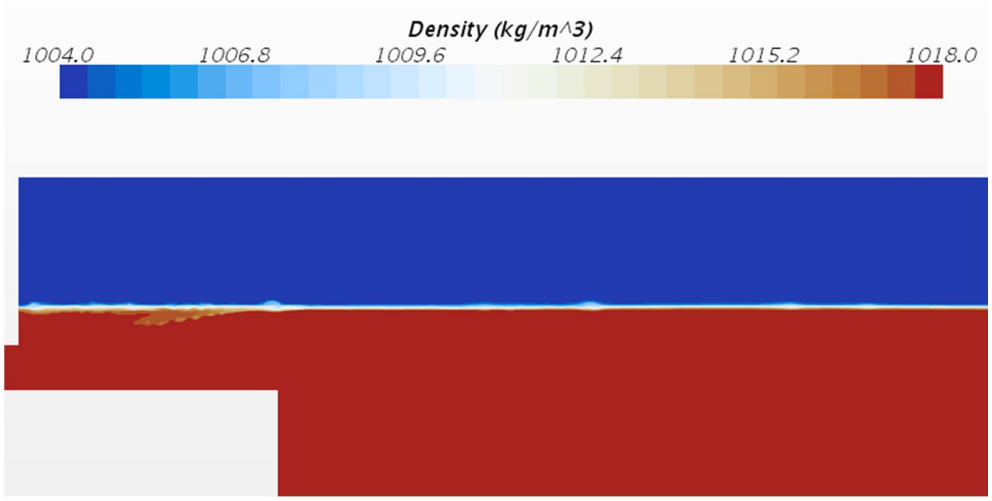
In addition, this report recommends to perform more detailed Delft3D simulations with an improved grid-resolution in both the horizontal and vertical direction and with the z-layers setting instead of σ-layers.

7 Appendix

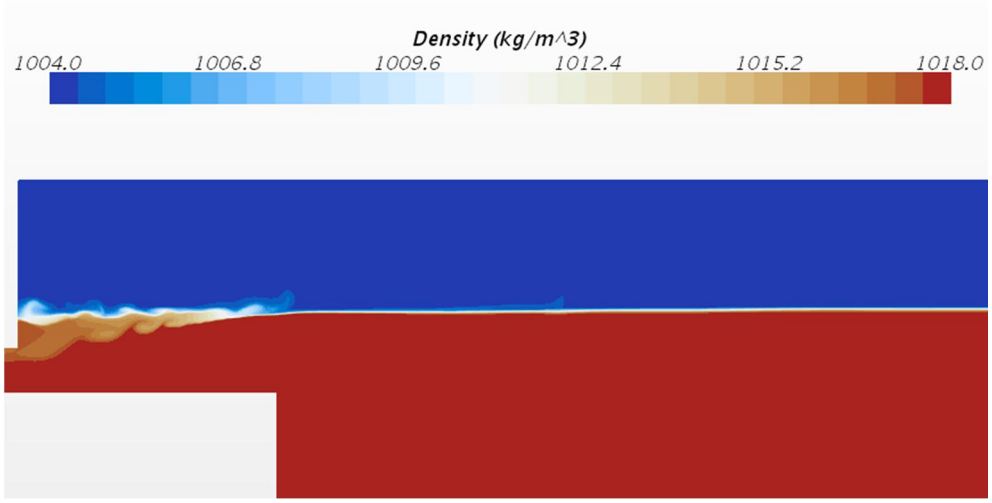
In this part density plots from the CFD calculations are presented, showing the interface development with an increasing flow rate for the two different seabed configurations.

7.1 Reservoir case

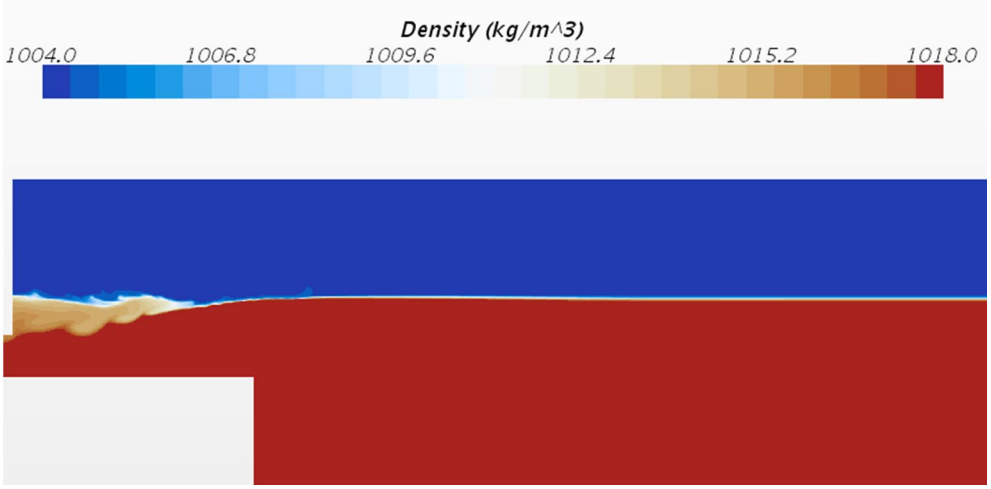
1) Fr = 0.110



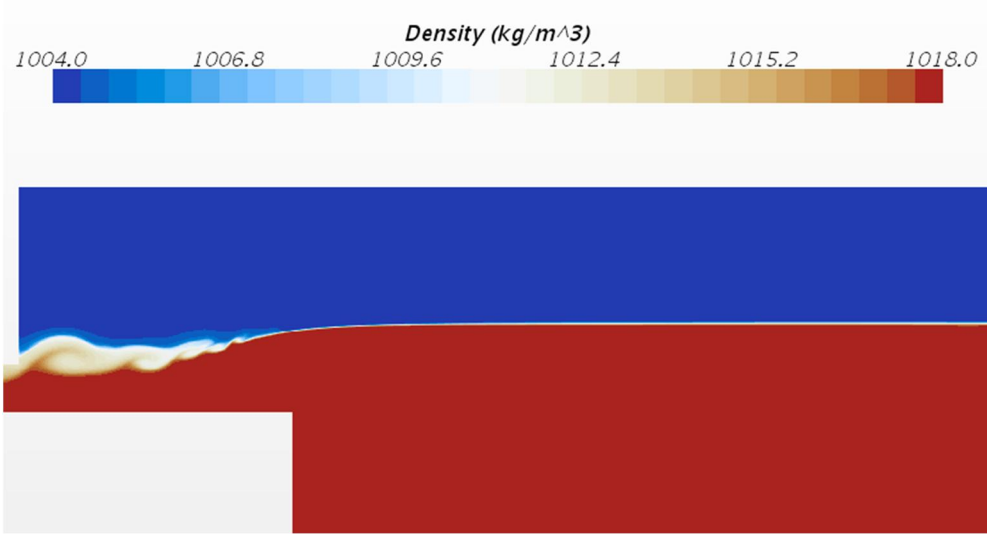
2) Fr = 0.221



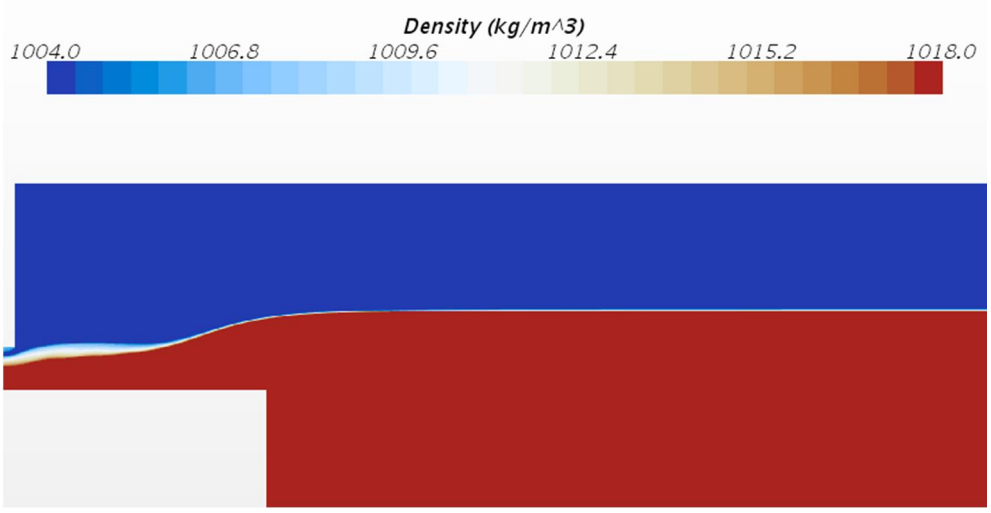
3) Fr = 0.331



4) Fr = 0.442

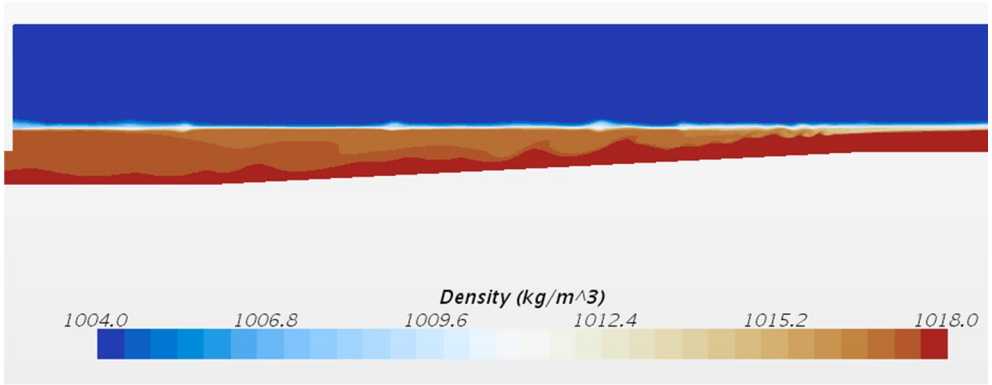


5) Fr = 0.552

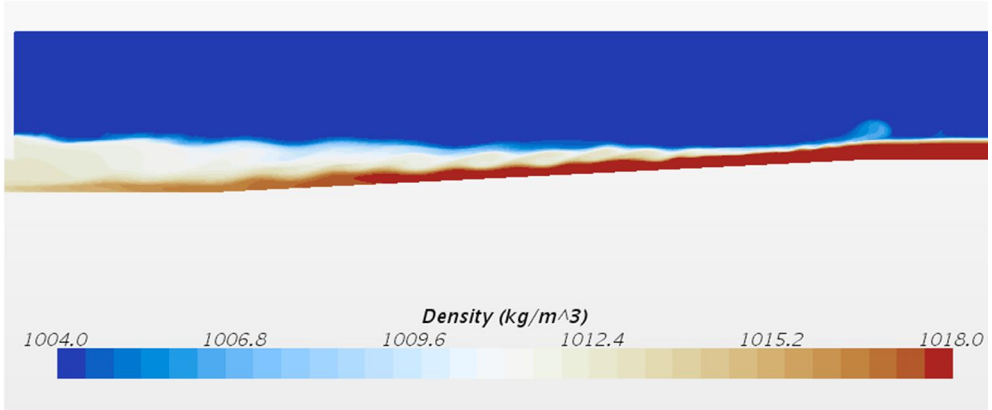


7.2 IJmuiden seabed case

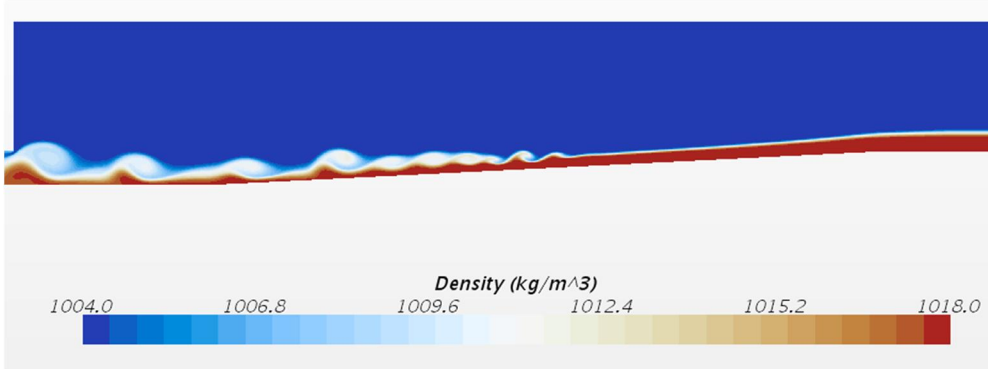
1) Fr = 0.110



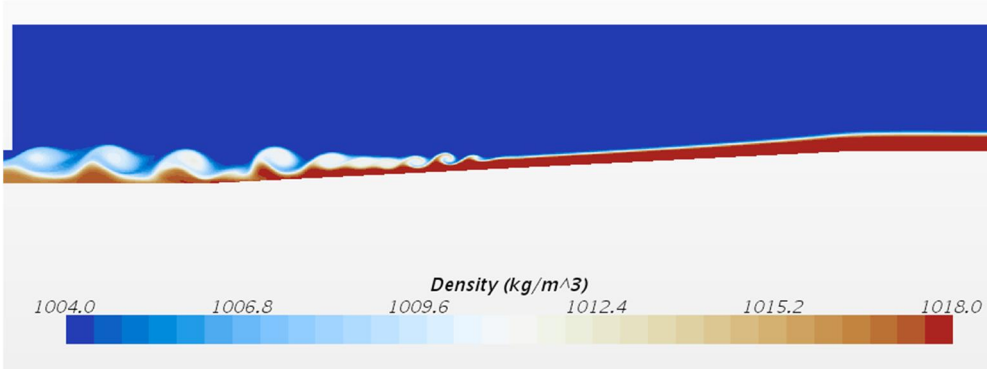
2) Fr = 0.221



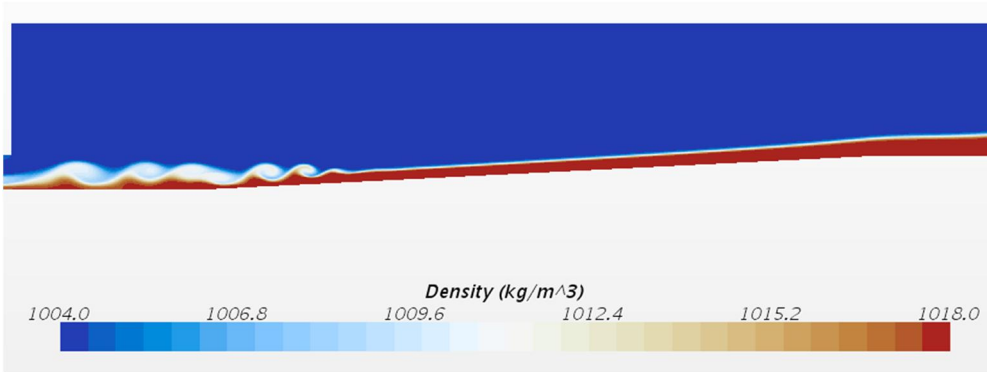
3) Fr = 0.331



4) Fr = 0442



5) Fr = 0.552



References

[1] Arcadis, 2014, Verfijning onderzoek zoutindringing Noordzeekanaal (ZTIJ), Ref: A3026R1r3, February 2014.

[2] Jirka, G.H., 1979, Supercritical withdrawal from two-layered fluid systems – Part 1: Two-dimensional skimmer wall, Journal of Hydraulic Research, 17:1, pp. 43-51, DOI: 10.1080/00221687909499599.

[3] Deltares, 2015a, Zoutindringing IJmuiden - Fase 3: Verdere uitwerking mogelijke bronmaatregelen - interim-rapport (September 2015).

[4] Deltares, 2015b, Numerical simulations of a lock exchange flow at the New Sea Lock of IJmuiden - investigation of sill effectiveness, September 2015, authors: A. Blom & T.S.D. O'Mahoney. Appendix A of [3].

[5] Deltares, 2015c, CFD validation of a density flow below a salt screen, September 2015, author: T. Boschetti. Appendix E of [3].

[6] Deltares, 2015d, Verkenning effect selectieve onttrekking met behulp van Delft3D, Ref: 1220309-000-HYE-0018, September 2015, Author: W. Verbruggen. Appendix D of [3].

[7] Waterloopkundig Laboratorium en Mazijk, A. van. Stroomsluis Noordland in de Oosterscheldedam; selectief afzuigen. Tweedimensionaal onderzoek. Verslag modelonderzoek M 1204, juli 1973

Version	Date	Authors	Initials	Review	Initials	Approval	Initials
1	Dec. '15	T. Boschetti S.P. Reijmerink		R.E. Uittenbogaard		A.C. Bijlsma	
2	Jan. '16	T. Boschetti S.P. Reijmerink		R.E. Uittenbogaard		A.C. Bijlsma	
3	Sep. '16	T. Boschetti S.P. Reijmerink		R.E. Uittenbogaard		A.C. Bijlsma	

K Berekening zoutindringing IJmuiden met WANDA-Locks

Deltares

Enabling Delta Life

Berekening zoutindringing IJmuiden met WANDA Locks

Deltares

Berekening zoutindringing IJmuiden met WANDA Locks

Matthijs Rietveld

1220309-000

© Deltares, 2016, B

Deltares

Titel
Berekening zoutindringing IJmuiden met WANDA Locks

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
RWS	1220309-000	1220309-000-HYE-0038	67

Trefwoorden
IJmuiden, WANDA-Locks, Nieuwe Zeesluis, zoutindringing, PMSS, bellenscherm

Samenvatting
De beoogde veranderingen aan het sluizencomplex te IJmuiden zullen leiden tot een verandering van de zoutlek naar het Noordzeekanaal. De te verwachten toename van de zoutlek zal waarschijnlijk leiden tot een verhoging van het zoutgehalte op het betreffende kanaal.

Voor het sluizencomplex zijn drie toekomstscenario's gedefinieerd, die verschillen in de configuratie van het sluiscomplex en de totale ladingstroom die de sluis passeert. De beschouwde scenario's zijn: de autonome ontwikkeling (AO, 95 MTPA), de inbedrijfstelling (IBS, 95 MTPA) en het projectalternatief (PA, 125 MTPA). Deze scenario's leiden tot verschillende groottes van de zoutlek.

Om de zoutlek door de sluizen voor de verschillende scenario's te bepalen zijn berekeningen uitgevoerd met WANDA-Locks. In dit model kunnen (dynamische) effecten, zoals het waterpeil aan zeezijde, variabele schutfrequentie en deur-opentijd en scheepsvolume worden meegenomen.

De analyses wijzen uit dat ten opzichte van het scenario 2005 de zoutlek met 10% stijgt voor de autonome ontwikkeling. De zoutlek door de sluizen voor de inbedrijfstelling en het projectalternatief stijgt met ruim 50% ten opzichte van de autonome ontwikkeling.

Het doel van het project Zeetoegang IJmond als geheel is om met maatregelen de zoutindringing op het NZK en ARK in het projectalternatief niet groter te laten zijn dan de zoutindringing die zou optreden bij de autonome ontwikkeling. Om voor de extra zoutlek te compenseren zijn daarom verschillende maatregelen getest, namelijk bellenschermen, extra sluiten van de deuren en selectieve onttrekking.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0	sept. 2016	Matthijs Rietveld		Rob Uittenbogaard		KlaasJan Bos	
1	okt. 2016	Matthijs Rietveld		Rob Uittenbogaard		KlaasJan Bos	

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding 3
1.1 Achtergrond 3
1.2 Probleemstelling 3
1.3 Onderzoeksvragen 4
1.4 Aanpak en indeling 4

2 Voorgaand werk 6
2.1 Onderzoeken 6
2.2 Resultaten 6

3 Scheepspassages en schutbewegingen 10

4 Model beschrijving 14
4.1 Algemeen 14
4.2 Geometrie 14
4.3 Randvoorwaarde saliniteit 17
4.4 Randvoorwaarde waterstand 17
4.5 Spui- en pompdebiet 19
4.6 Sluisbedrijf 19

5 Verificatie 21
5.1 Methode 21
5.2 Resultaat 21
5.3 Conclusie 23

6 Resultaten 25
6.1 Zoutflux met scheepsbewegingen uit PMMS 25
6.1.1 Zoutflux scenario 2005 26
6.1.2 Zoutflux scenario autonome ontwikkeling 28
6.1.3 Inbedrijfstelling 30
6.1.4 Projectalternatief 31
6.2 Volledige uitwisseling 33
6.2.1 Scenario 2005 33
6.2.2 Scenario autonome ontwikkeling 34
6.2.3 Inbedrijfstelling 34
6.2.4 Projectalternatief 35
6.3 Continu gemiddeld schutproces 36
6.3.1 Scenario 2005 37
6.3.2 Autonome ontwikkeling 37
6.3.3 Projectalternatief 38
6.4 Effect deur sluiten 38
6.4.1 Autonome ontwikkeling 39
6.4.2 Inbedrijfstelling 39
6.4.3 Projectalternatief 40
6.5 Effect bellenscherm 40
6.5.1 Inbedrijfstelling 41
6.5.2 Projectalternatief 42

6.6 Effect bellenscherm en deur sluiten 43
6.6.1 Inbedrijfstelling 43
6.6.2 Projectalternatief 44
6.7 Selectieve onttrekking 44
6.8 Overzicht 46

7 Conclusies 47
7.1 Verificatie 47
7.2 Zoutlek voor verschillende scenario's 47
7.3 Vergelijking met voorgaand werk 47
7.4 Invloed continu gemiddeld en variabel schutproces 48
7.5 Maatregelen: deur sluiten, bellenschermen en zoutscherm 48

8 Referenties 49

Bijlage(n)

A Simulatie schuttingen PMSS A-1

B Verdeling deur-opentijden B-1

C Geometrische parameters model C-1

D Gevoeligheidsanalyse D-1
D.1 Tijdstapgevoeligheid D-1
D.2 Invloed randvoorwaardes saliniteit D-2
D.3 Invloed spui moment D-6

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De beoogde veranderingen aan het sluizencomplex te IJmuiden zullen leiden tot een verandering van de zoutlek door de sluizen. De te verwachten toename van die zoutlek zal waarschijnlijk leiden tot een verhoging van het zoutgehalte op het betreffende kanaal. Omdat dit tot ongewenste effecten leidt in de beheersgebieden van Rijnland, AGV en in extreme situaties mogelijk ook voor de drinkwaterinname bij Nieuwersluis op het Amsterdam-Rijnkanaal, zoekt het project Zeetoegang IJmond naar de beste manier om de toenemende verzilting te voorkomen of de effecten te beperken.

Voor het sluizencomplex zijn drie toekomst scenario's gedefinieerd, die verschillen in de configuratie van het sluiscomplex en de totale ladingstroom die de sluis passeert. Die ladingstroom is uitgewerkt in het aantal en de typen schepen die de sluizen passeren. De beschouwde scenario's zijn: de autonome ontwikkeling (AO, 95 MTPA), de inbedrijfstelling (IBS, 95 MTPA) en het projectalternatief (PA, 125 MTPA). Alle scenario's bevatten de Zuider- en Middensluis, daarnaast is in de autonome ontwikkeling gebruik gemaakt van een sluis met de afmetingen van de Noordersluis, en in de inbedrijfstelling en het projectalternatief is de Noordersluis gesloten en vervangen door de Nieuwe Zeesluis. Deze scenario's zullen leiden tot verschillende groottes van de zoutlek.

Het doel van het project is om met maatregelen de zoutindringing op het NZK en ARK in het projectalternatief niet groter te laten zijn dan de zoutindringing die zou optreden bij de autonome ontwikkeling.

In een eerder stadium zijn voor de zoutlek door de sluizen zonder maatregelen ruwe schattingen gemaakt door Arcadis [1], vervolgens door Deltares [2], opnieuw door Arcadis [3] en tot slot nogmaals door Deltares [4]. Deze schattingen worden echter als niet afdoende beschouwd, omdat enkele, mogelijk invloedrijke factoren niet worden meegenomen in de berekeningen.

1.2 Probleemstelling

In de eerdere analyses zijn enkele (dynamische) effecten niet meegenomen. Zo is in [1] en [3] een vast tij aangenomen aan zeezijde. In [1] en [3] is niet meegenomen dat het zoutgehalte in de voorhaven fluctueert door de uitwisselingsstromen vanuit de sluizen.

In [1] is geen rekening gehouden met de invloed van de waterverplaatsing van de schepen in de sluis. In de daaropvolgende rapporten is dit wel opgenomen.

In alle vier de genoemde rapporten is geen gebruik gemaakt van dynamische deur-opentijden. In die analyses is voor elke schutting op basis van de destijds beschikbare data een gemiddelde deur-opentijd bepaald. In [1] en [3] heeft men op basis daarvan aangenomen dat er volledige kolkuitwisseling plaatsvindt. In de simulaties in [2] en [4] wordt de mate van uitwisseling berekend op basis van de aangenomen deur-opentijd.

Een belangrijk verschil tussen enerzijds de onderzoeken van Arcadis en anderzijds de onderzoeken van Deltares is het aangenomen dichtheidsverschil over het sluizencomplex. Vanuit onderzoeken als [5] en [6] is een dichtheid van 27 psu aan zeezijde en 7 psu aan

kanaalzijde berekend. Arcadis neemt echter aan dat op de plaats van de sluizen het dichtheidsverschil lager zal zijn.

Vanwege het ontbreken van de genoemde dynamische effecten en de verschillende dichtheidsverschillen in voorgaande onderzoeken, is het nodig om de invloed hiervan te bepalen in een model.

In voorliggend rapport is daarom gebruik gemaakt van het 1D model WANDA-Locks. In dit dynamische model kunnen de hiervoor genoemde factoren geanalyseerd worden. Dit model is de opvolger van het TIMLCK model wat is gebruikt in [2] en [4].

In het model zijn simulaties van scheepsbewegingen en deur-opentijden (PMSS) gebruikt. Daarnaast zijn de dichtheden op enige afstand van het sluizencomplex op 27 en 7 psu gezet.

Met dit model zijn berekeningen gemaakt van de zoutlek in verschillende toekomstige scenario's. Hieruit volgt of en in welke mate maatregelen noodzakelijk zijn om de zoutlek naar het Noordzeekanaal te beperken.

1.3 Onderzoeksvragen

De onderzoeksvragen voor dit rapport zijn de volgende vier:

- Hoe groot is de zoutlek door de sluizen en naar het Noordzeekanaal voor de verschillende toekomstscenario's?
- Wat is het effect van de variabele deur-opentijden en schutfrequenties op de zoutlek?
- In hoeverre wordt de zoutlek beperkt door het sluiten van de deuren tussen uit- en invarende schepen?
- In hoeverre kan de zoutlek worden beperkt met bellenschermen in de Nieuwe Zeesluis?
- Welk effect heeft een geschematiseerd zoutscherm op de zoutlek?

Voor de berekeningen zal gebruik worden gemaakt van het door Deltares ontwikkelde programma WANDA-Locks. Voor een beschrijving van dit model, zie [7].

1.4 Aanpak en indeling

De zoutlek zal berekend worden met het 1D model WANDA-Locks. Dit model zal worden gecombineerd met gedetailleerde PMSS simulatiedata [8] (in dit rapport bijgevoegd als Bijlage A) om de effecten van de variatie in deur-opentijden en de schutfrequentie op de zoutlast te beoordelen.

Het rapport bestaat uit de volgende onderdelen:

- Beoordeling nieuwe PMSS data
  PMSS simulaties voor de vier scenario's (2005 met ladingstroom 57 MTPA, autonome ontwikkeling met 95 MTPA, inbedrijfstelling met 95 MTPA en projectalternatief met 125 MTPA) worden beoordeeld op basis van gemiddelde schutfrequentie, percentage lege schuttingen van de Noordersluis en de Nieuwe Zeesluis (die zorgen voor de grootste zoutbelasting), en histogrammen en cumulatieve verdelingen van de deur-opentijden van deze sluizen. Dit vindt plaats in Hoofdstuk 3.
- Opzet WANDA-Locks model en verificatie voor 2005.
  Het jaar 2005 dient als verificatie van het WANDA-Locks model, omdat dit het enige jaar is waarvoor zowel gegevens over het schutbedrijf beschikbaar zijn (de simulaties door PMSS) als gegevens over de zoutlek. Deze gegevens worden gebruikt om te komen tot

een goede opzet van het model en een inzicht in de waarde van de uitkomsten ervan. De opzet van het model wordt vermeld in Hoofdstuk 4 en de verificatie in Hoofdstuk 5.

- WANDA-Locks analyse van zoutlek voor de drie toekomstscenario's: autonome ontwikkeling, inbedrijfstelling, en projectalternatief. Voor de autonome ontwikkeling en het projectalternatief wordt vergeleken met het gebruik van een gemiddelde schutfrequentie in combinatie met volledige uitwisseling van de sluizen, zoals aangenomen door Arcadis [1, 3]. Deze analyses vinden plaats in Hoofdstuk 6.
- Daarnaast zal worden gekeken wat de deur-opentijden volgens deze simulaties betekenen voor de haalbaarheid van de eventuele inzet van bellenschermen, en voor een eventuele zoutlekreductie op basis van regulering van de sluisoperatie. De resultaten van deze berekeningen worden ook besproken in Hoofdstuk 6.
- Tot slot zal een korte analyse worden gemaakt van de toepassing van een zoutscherm in WANDA-Locks.

In hoofdstuk 2 wordt nog een opsomming gegeven van de resultaten in voorgaande onderzoeken. Hier wordt op teruggekomen in Hoofdstuk 6 met de resultaten.

2 Voorgaand werk

2.1 Onderzoeken

Voor het verschijnen van voorliggend rapport zijn meerdere onderzoeken geweest naar de zoutindringing door het sluizencomplex IJmuiden. In dit hoofdstuk zullen de relevante onderzoeken kort worden toegelicht.

In voorgaand werk door Arcadis [1, 3] en Deltares [2, 4] is onderzoek gedaan naar de zoutlek vanuit de Noordzeezijde naar de kanaalzijde van het sluizencomplex IJmuiden. Hierin zijn voor het eerst verkennende schattingen gemaakt voor de huidige zoutlek en de zoutlek in verschillende toekomstscenario's. Een belangrijke verandering voor de berekening van de zoutlek is de aanleg van de Nieuwe Zeesluis.

Bij elk nieuw onderzoek is getracht meer factoren in rekening te brengen, waardoor de schattingen van de huidige en toekomstige zoutlek realistischer werden. Toch zijn er nog enkele niet meegenomen factoren of verschillen tussen de onderzoeken die beter onderzocht moeten worden.

De berekeningen in genoemde rapporten verschillen onder andere in de mate van uitwisseling van de kolk. Arcadis [1, 3] is uitgegaan van volledige kolkuitwisseling. Deltares [2, 4] heeft op basis van een schatting van de deur-opentijd uitgerekend dat de kolk niet volledig uitwisselt.

Daarnaast verschilt tussen de onderzoeken het aangenomen dichtheidsverschil over het sluizencomplex. De dichtheidsverschil is in rapporten als [5] en [6] onderzocht.

De zoutconcentratie in de voorhavens blijkt een zekere gelaagdheid te bevatten, waarbij de dichtheid aan de bodem significant hoger is dan aan het oppervlak. Om met eenvoudige modellen (zoals die gebruikt zijn in [1-4] en in voorliggend rapport) toch berekeningen te kunnen maken is echter een gemiddelde dichtheid nodig. Op basis van [5] en [6] is deze dichtheid aan zeezijde bepaald op 27 psu en aan kanaalzijde op 7 psu. Dit hoeft echter niet het dichtheidsverschil ter plaatse van de sluis te zijn. Deze zou lokaal kleiner kunnen zijn vanwege de uitwisseling door de sluizen.

Het dichtheidsverschil over de sluizen is dan ook niet gelijk gekozen in de voorgaande onderzoeken. Deltares heeft in [2, 4] gekozen voor een conservatieve aanpak en heeft aan beide zijdes een gemeenschappelijke voorhaven van de sluizen gedefinieerd. Tussen de randvoorwaardes van deze voorhavens heerst een dichtheidsverschil van 20 kg zout/m^3 (ofwel 21 psu). Arcadis heeft geen voorhavens gedefinieerd, maar randvoorwaardes aan de sluizen gekoppeld. In [1]. Is daarbij is een dichtheidsverschil van 14,4 kg zout/m^3 (ofwel 14,6 psu) gebruikt en in [3] zijn op basis van simulaties met het NZK model nog lagere dichtheidsverschillen genomen. Deze verschillen hebben grote consequenties voor de zoutflux door de sluizen.

2.2 Resultaten

Het eerste onderzoek naar de zoutindringing is uitgevoerd door Arcadis [1]. Hierin is geen dynamica meegenomen. Zowel het peil aan kanaal- als aan zeezijde staat vast. Daarnaast wordt de volledige kolk uitgewisseld. Het dichtheidsverschil over het sluizencomplex is vastgesteld op 14,4 kg zout/m^3 in de veronderstelling dat de verspreiding van het zout meer

tijd kost dan er tussen een schutcyclus beschikbaar is, waardoor niet het totale dichtheidsverschil tussen zee en kanaal heerst ter plaatse van de sluizen.
In het daaropvolgende onderzoek van Deltares [2] is een model genaamd TIMLCK gebruikt. Dit programma is een voorloper van het in dit rapport gebruikte programma WANDA-Locks. Hierin konden ook dynamische effecten worden meegenomen.

In dat onderzoek is het peil van het Noordzeekanaal vast gekozen op -0.40 mNAP en het peil van de buitenwaterstand gebaseerd op waterstandsmetingen van 1 januari tot en met 18 oktober 2013. In betreffende periode zijn 2500 schuttingen gesimuleerd. De deur-opentijden tijdens deze schuttingen waren gelijk, maar de schutfrequentie was dynamisch. Hiermee werd de frequentie 's nachts lager dan overdag.

Het dichtheidsverschil tussen de randen van dit model is in deze simulaties vastgesteld op 20 kg zout/m^3. Het aantal schuttingen per dag komt overeen met die van Arcadis [1], maar voornamelijk het grotere dichtheidsverschil zorgt voor een verhoging van de zoutflux.

Arcadis heeft in 2015 [3] nieuwe schattingen gemaakt van de zoutlek. Hierbij zijn verschillende dichtheden aangenomen voor de verschillende sluizen. Dit is gebaseerd op berekeningen met het NZK model, zodat er een beter onderbouwde keus voor het dichtheidsverschil kon plaatsvinden. Er zijn berekeningen gemaakt voor de huidige situatie en voor de situatie met de Nieuwe Zeesluis. Voor de Nieuwe Zeesluis is dezelfde schutfrequentie gebruikt als voor de Noordersluis. De lengte van de Nieuwe Zeesluis is in deze berekening nog gesteld op 500 meter.

In [3] is net als in [1] een niet-dynamisch model gebruikt met volledige uitwisseling. Er is dus geen veranderende waterstand, schutfrequentie of deur-opentijd. De resultaten van deze berekeningen staan in Tabel 2.1 en Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Schattingen van de zoutlek door Arcadis voor de huidige situatie. Tabel 3.2 uit [3].

	Dichtheidsverschil (kg zout/m^3)	**Schuttingen Zee -> NZK [\dag]**	**Zoutlek [kg zout/s]**
Noord	11,1	10,4	418
Midden	12,3	12,4	102
Zuid	11,9	18,4	38
Kleine	11,9	10,7	7
Totaal			**565**

Tabel 2.2 Schattingen van de zoutlek door Arcadis [3] voor de zoutlek bij vervanging van de Noordersluis door de Nieuwe Zeesluis. Tabel 3.2 uit [3].

	Dichtheidsverschil (kg zout/m^3)	**Schuttingen Zee -> NZK [\dag]**	**Zoutlek [kg zout/s]**
Nieuw	10,0	10,4	794
Midden	12,3	12,4	102
Zuid	11,9	18,4	38
Kleine	11,9	10,7	7
Totaal			**941**

In [4] is nader onderzoek door Deltares gedaan naar de zoutlek, in het bijzonder om het aantal schuttingen in overeenstemming te brengen met de PMSS scenario's [8] met passende deur-opentijden.

Het PMSS [8] rapport meldt dat in 2008 vergeleken met het vorige referentie jaar 2005 het aantal schepen is toegenomen met ca. 4 %. Verder is er een sterke verschuiving opgetreden van kleinere naar grotere schepen (schaalvergroting). Dit heeft tot gevolg dat de Noordersluis significant meer wordt belast, de Middensluis licht meer, terwijl de verkeersbelasting van de Zuidersluis licht is afgenomen. Dit leidt tot een verhoging van de zoutlek ten opzichte van de berekening in [2].

Anderzijds zijn de deur-opentijden verkleind, waardoor de kolkuitwisseling wordt beperkt. De resultaten in [4] geven aan dat netto de zoutlek toeneemt door deze wijzigingen [2].

Tabel 2.3 Schattingen van de zoutlek in Bijlage I met TIMLCK bij een dichtheidsverschil van 20 kg/m^3 over het sluizencomplex, gebaseerd op PMSS data [8] voor 2008 (77 MTPA).

Kolk	**Opentijd [min]**	**Schuttingen Zee→NKZ [/dag]**	**Zoutlast [ton zout/sch]**	**Zoutlek [kg zout/s]**
Noord	35	14,55	5528	931
Midden	30	17,88	1127	233
Zuid	20	22,68	327	85
Klein	30	10,7	116	14
Totaal				**1263**

In [8] zijn PMSS scenario's opgesteld voor de huidige situatie (2008, ladingstroom 77 MTPA, Noordersluis 14,55 S/d), de Autonome Ontwikkeling (95 MTPA, Noordersluis 13,93 S/d) en het Projectalternatief (125 MTPA, Nieuwe Zeesluis 13,88 S/d). De gevolgen voor de zoutlek voor de laatste twee scenario's worden getoond in Tabel 2.4 en Tabel 2.5.

Tabel 2.4 Schattingen van de zoutlek in Bijlage I met TIMLCK bij een dichtheidsverschil van 20 kg/m^3 over het sluizencomplex, gebaseerd op PMSS data [8] voor autonome ontwikkeling (95 MTPA).

Kolk	**Opentijd [min]**	**Schuttingen Zee→NKZ [/dag]**	**Zoutlast [ton zout/sch]**	**Zoutlek [kg zout/s]**
Noord	35	13,93	5528	894
Midden	30	19,79	1127	257
Zuid	20	27,46	327	104
Klein	30	10,7	116	14
Totaal				1269

Tabel 2.5 Schattingen van de zoutlek in Bijlage I met TIMLCK bij een dichtheidsverschil van 20 kg/m^3 over het sluizencomplex, gebaseerd op PMSS data [8] voor het projectalternatief (125 MTPA).

Kolk	**Opentijd [min]**	**Schuttingen Zee→NKZ [/dag]**	**Zoutlast [ton zout/sch]**	**Zoutlek [kg zout/s]**
Nieuw	35	13,88	10.453	1679
Midden	30	20,18	1127	262
Zuid	20	28,53	327	108
Klein	30	10,7	116	14
Totaal				2063

In het geval van de autonome ontwikkeling verandert de zoutlek nauwelijks ten opzichte van de huidige situatie van Tabel 2.3. De ladingsstroom neemt toe, maar het aantal schuttingen

verandert niet significant. Door de Nieuwe Zeesluis in het projectalternatief neemt de zoutlek sterk toe.

In [4] wordt nog gemeld over deze uitkomsten dat voor de jaargemiddelde totale zoutlek over de scheepvaartsluizen op basis van afvoergegevens en zoutmetingen in het Binnenspuikanaal voor de periode 2010-2014 een zoutlek werd geschat van 600 à 750 kg zout/s. De TIMLCK schattingen van de zoutlek voor 2008 zijn daarmee bijna een factor twee groter dan waargenomen. Voor een deel (ca 30%) wordt dit verklaard door een lagere schutfrequentie van de Noordersluis in de meetperiode in vergelijking met de PMSS data (10,4 à 11 vs 14,55 S/d). Daarnaast spelen het aangenomen zoutgehalteverschil over de sluizen, en de variatie in deur-opentijden (kort bij lege schuttingen, langer bij meer schepen per schutting) een rol.

Conclusies:
In voorgaand werk bleek een belangrijke parameter voor de zoutflux het dichtheidsverschil over de sluizen te zijn. Hierover bestond echter verschil tussen de verschillende onderzoeken. Dit verschil wordt in voorliggend rapport onderzocht.
De voorgaande rapporten misten enkele dynamische effecten. De invloed hiervan wordt in voorliggend rapport onderzocht.

3 Scheepspassages en schutbewegingen

Om het WANDA-Locks model te verifiëren is gebruik gemaakt van saliniteit en debiet metingen in het spuikanaal uit 2005. Op basis van dit jaar zijn ook de scheepsbewegingen gesimuleerd. Daarom zal 2005 dienen als verificatiejaar. Voor de toekomstscenario's zullen debiet metingen uit 2013 worden gebruikt. Dit wordt gedaan om dat dit een jaar was met een gemiddeld afvoerdebiet. Hiermee wordt het afvoerdebiet niet sterk over- of onderschat.

De simulatie van de scheepsbewegingen door het sluiscomplex is uitgevoerd door PMSS. met een door PMSS ontwikkeld model dat de scheepsbewegingen beschrijft in het gebied vanaf de Noordzee tot en met Amsterdam. In dit model worden individuele schepen gevolgd en wordt ook de interactie tussen schepen beschreven (wat kan er wel of niet op dezelfde plek en hetzelfde moment). Ook het passeren van de sluizen wordt in het model gedetailleerd beschreven. De beschrijving van deze simulaties is bijgevoegd als Appendix A.

Dit hoofdstuk toont enkele karakteristieken van de simulaties waarmee de simulaties beoordeeld kunnen worden. Allereerst toont Tabel 3.1 het gemiddeld aantal schuttingen per dag.

Tabel 3.1 Gemiddelde schutfrequentie volgens PMSS simulatie voor de verschillende scenario's.

Schuttingen per dag	2005 (57 MTPA)	Autonome ontwikkeling (95 MTPA)	Inbedrijfstelling (95 MTPA)	Projectalternatief (125 MTPA)
Nieuw	-	-	15,58	13,82
Noord	12,71	14.14	-	-
Midden	17,81	19,60	19,87	20,59
Zuid	24,17	27,81	28,04	29,25

Niet al deze schuttingen zijn bezet, in sommige gevallen biedt zich alleen een schip aan de andere zijde van de sluis aan. In dit geval vindt een lege schutting plaats. Het aantal lege schuttingen voor de Noordersluis of de Nieuwe Zeesluis wordt getoond in Tabel 3.3.

Ten opzichte van 2005 neemt de ladingsstroom voor de autonome ontwikkeling sterk toe. Daarom vinden er meer schuttingen plaats, maar vinden er ook minder lege schuttingen plaats. Er is immers meer aanbod van schepen.

In het projectalternatief vinden in de Nieuwe Zeesluis juist minder schuttingen plaats dan bij de inbedrijfstelling. Dit komt door een vermindering van het aantal lege schuttingen, maar ook doordat de bezette schuttingen meer schepen bevatten, zoals te zien is in Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Frequentie aantal schepen per schutting voor de Inbedrijfstelling en het projectalternatief voor de Nieuwe Zeesluis.

Aantal schepen	1	2	3	4	5	6	7	8
Projectalternatief (125 MTPA)	4117	1925	997	796	331	195	25	3
Inbedrijfstelling (95 MTPA)	5847	1751	729	330	112	62	12	1

Het totaal aantal geschutte schepen in het projectalternatief neemt toe ten opzichte van de inbedrijfstelling, terwijl het aantal schuttingen afneemt. Ook blijkt dat de gemiddelde lading per schip omhoog gaat in het projectalternatief met ongeveer 20%.

Tabel 3.3 Lege schuttingen voor de Noordersluis of de Nieuwe Zeesluis voor de verschillende scenario's.

Noordersluis / Nieuwe Zeesluis	Schutfrequentie (S/d)	Lege schuttingen oostgaand (%)	Lege schuttingen westgaand (%)
2005 (57 MTPA)	12,71	29	27
Autonome ontwikkeling (95 MTPA)	14,14	19	16
Inbedrijfstelling (95 MTPA)	15,58	26	22
Projectalternatief (125 MTPA)	13,82	18	16

Tabel 3.4 Gegevens vanuit Pontis voor de Noordersluis.

Noordersluis	Schutfrequentie (S/d)	Lege schuttingen oostgaand (%)	Lege schuttingen westgaand (%)
2013	11,0	28	27
2014	10,6	25	26

Het aantal lege schuttingen lijkt goed overeen te komen met velddata. Ter vergelijking worden in Tabel 3.4 de geregistreerde schuttingen getoond voor het jaar 2013 en 2014. Het aantal lege schuttingen in 2013 en 2014 komt behoorlijk overeen met het aantal lege schuttingen in de simulatie voor 2005.

Tabel 3.5 Gemiddelde deur-opentijden

Sluis	2005	Autonome ontwikkeling	Inbedrijfstelling	Projectalternatief
Nieuwe Zeesluis	-	-	30,2	36,1
Noordersluis	40,6	34,9	-	-
Middensluis	30,4	26,7	26,3	25,0
Zuidersluis	24,3	20,4	20,2	19,1

De PMSS simulatie bevat ook de deur-opentijden, deze worden getoond in Tabel 3.5 toont de gemiddelde deur-opentijden. Hieruit zijn duidelijke verschillen waarneembaar per sluis en per scenario. De schutfrequentie en de gemiddelde deur-opentijd zijn niet onafhankelijk van elkaar. De deur wordt namelijk niet gesloten tussen uit- en invaren van schepen. Dit betekent dat de deur-opentijd afneemt wanneer het aantal schuttingen toe neemt.

Aangezien de zoutindringing zowel afhangt van de mate van kolkuitwisseling (welke afhangt van de deur-opentijd) en van het aantal schuttingen, is er geen lineair verband tussen aantal schuttingen en de zoutindringing.

In [4] zijn op basis van gemiddelde deur-opentijden berekeningen gemaakt met TIMLCK voor de zoutlek voor 2008, de autonome ontwikkeling en het projectalternatief. Hierbij is voor de Noordersluis en Nieuwe Zeesluis een 35 minuten, voor de Middensluis 30 minuten en voor de

Zuidersluis 20 minuten aangehouden. De deur-opentijden waren in dat geval niet afhankelijk van het scenario. Ze zijn wel in dezelfde orde grootte als de deur-opentijden vanuit de PMSS simulaties.

Tabel 3.6 en Tabel 3.7 tonen de gemiddelde deur-opentijden opgedeeld naar sluishoofd. Hieruit blijkt dat er behoorlijke verschillen bestaan per sluishoofd. Zo staan de Noordersluis en Nieuwe Zeesluis langer open aan zeezijde dan aan kanaalzijde. Dit kan gevolgen hebben voor de grootte van de zoutlek.

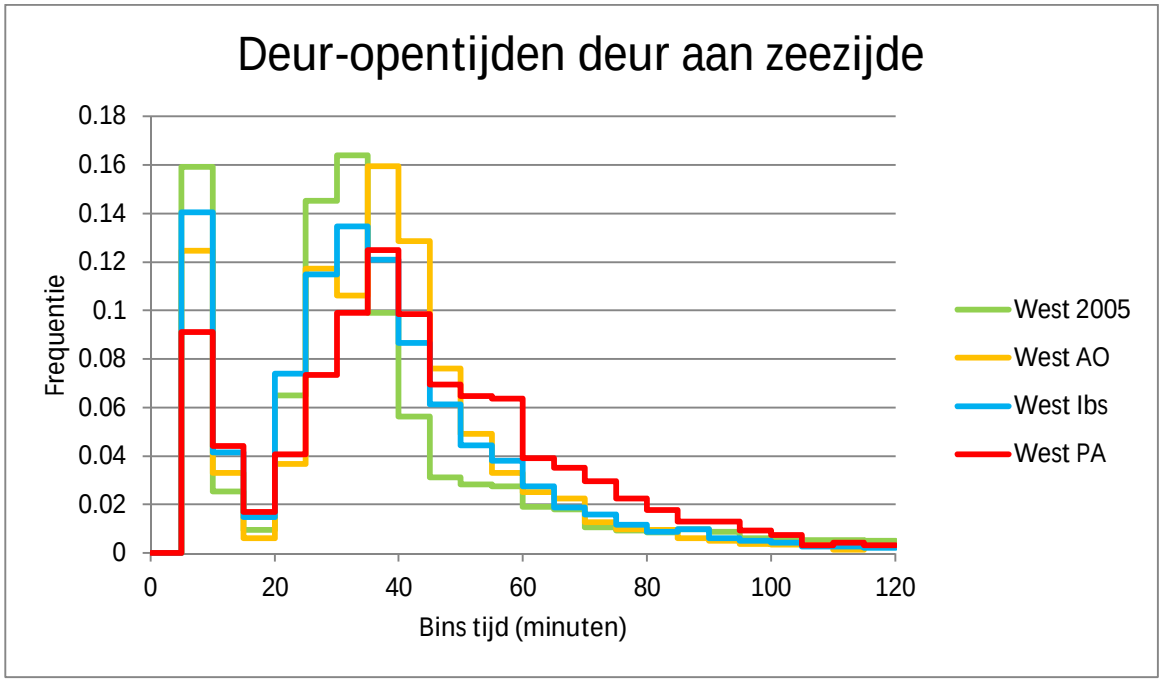
Tabel 3.6 Gemiddelde deur-opentijden aan kanaalzijde

Sluis (deur kanaalzijde)	2005	Autonome ontwikkeling	Inbedrijfstelling	Projectalternatief
Nieuwe Zeesluis	-	-	22,8	27,6
Noordersluis	34,6	28,1	-	-
Middensluis	31,2	26,0	26,1	23,0
Zuidersluis	25,9	22,0	22,0	20,9

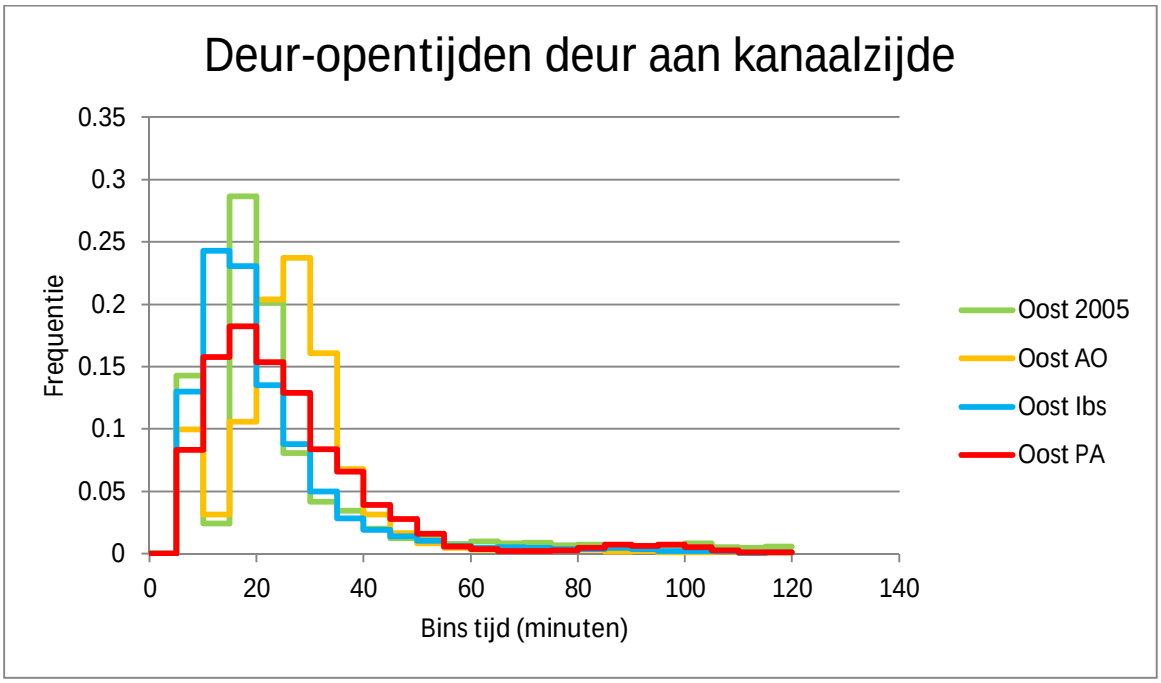
Tabel 3.7 Gemiddelde deur-opentijden aan zeezijde

Sluis (deur zeezijde)	2005	Autonome ontwikkeling	Inbedrijfstelling	Projectalternatief
Nieuwe Zeesluis	-	-	37,6	44,6
Noordersluis	46,6	41,7	-	-
Middensluis	29,5	27,4	26,4	26,9
Zuidersluis	22,7	18,7	18,3	17,3

Figuur 3.1 en Figuur 3.2 tonen de verdeling van de deur-opentijden in histogrammen. Vergelijkbare figuren met ook de cumulatieve verdeling worden getoond in Appendix B



Figuur 3.1 Verdeling van de deur-opentijden deur aan zeezijde Noordersluis of Nieuwe Zeesluis voor de verschillende scenario's (de breedte van de klasses is 5 minuten, de frequentie is gegeven als deel van het totaal aantal schuttingen).



Figuur 3.2 Histogram van de deur-opentijden deur aan kanaalzijde Noordersluis of Nieuwe Zeesluis voor de verschillende scenario's (de breedte van de klasses is 5 minuten, frequentie is gegeven als deel van het totaal aantal schuttingen).

Figuur 3.1 toont dat de deur-opentijden voor de deur aan zeezijde twee maxima heeft. Dit komt (zo bleek uit navraag bij Groenveld) door twee manieren van aanvaren. Het is mogelijk dat een schip op een wachtplaats ligt en moet wachten tot de sluis geopend is (eerste piek). Het is ook mogelijk dat een schip zich al varend op afstand meldt, waardoor de deur langer open staat.

Een vergelijkbare situatie lijkt zich voor te doen in Figuur 3.2 voor de deur aan kanaalzijde in de scenario's 2005 en autonome ontwikkeling. Voor de andere twee scenario's is er echter maar één piek. Dit heeft mogelijk te maken met de veranderde wachtplaatsen voor de schepen bij de Nieuwe Zeesluis.

Belangrijk aan deze figuren is dat hieruit blijkt dat er een significant aantal schuttingen zijn met korte deur-opentijden. De tijd die nodig is om de kolk voor 80% uit te wisselen voor de Noordersluis is ongeveer 18 minuten en voor de Nieuwe Zeesluis ongeveer 25 minuten. Dit betekent dat de aanname van volledige uitwisseling in veel gevallen niet op gaat.

Conclusies:
Uit deze bestudering van de PMSS gegevens komt een logisch beeld naar voren, welke ook aansluit op de daadwerkelijke situatie. Daarnaast zijn de gegevens bruikbaar voor het WANDA-Locks model.
Uit de deur-opentijden blijkt dat er in veel gevallen geen volledige uitwisseling plaatsvindt. Dit pleit voor een dynamisch model (zoals WANDA-Locks) dat gebruik maakt van de deur-opentijd en niet de gemiddelde deur-opentijd.

4 Model beschrijving

4.1 Algemeen

WANDA-Locks is de opvolger van het TIMLCK model. Beide modellen bevatten dezelfde vergelijkingen voor de berekening van de zoutlek.

In deze modellen worden zowel de sluizen als de voorhavens gemodelleerd als reservoirs. Tussen deze reservoirs kan uitwisseling plaatsvinden van zout door dispersief transport en advectief transport. Dispersief transport is transport op basis van dichtheidsverschillen en advectief transport is op basis van stroming (door in dit geval waterstandsverschillen tussen sluiskolk en voorhaven).

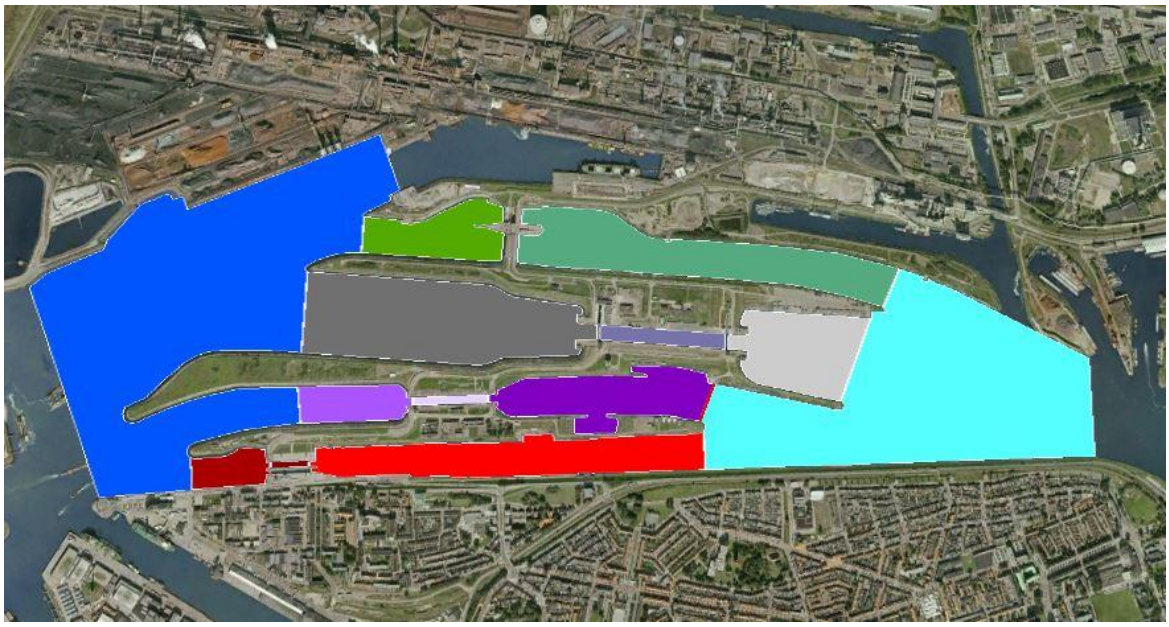
Sluizen werken als afsluiter tussen de reservoirs. Hierdoor kunnen waterstandsverschillen en dichtheidsverschillen ontstaan tussen de reservoirs.

4.2 Geometrie

Het model in WANDA-Locks bestaat uit een aantal reservoirs (de gekleurde vlakken in de onderstaande figuren). Het reservoir aan zeezijde is gekoppeld aan een randvoorwaarde voor de saliniteit en waterstand. Het reservoir dient als connectie tussen de randvoorwaarde en het dynamische systeem. Dit reservoir staat aan de oostelijke zijde parallel gekoppeld aan de vier reservoirs die de voorhavens van de sluizen vormen.

De kanaalzijde is op een vergelijkbare wijze geschematiseerd met weer de voorhavens van de sluizen en een reservoir als verbinding tussen de voorhavens en de randvoorwaarde.

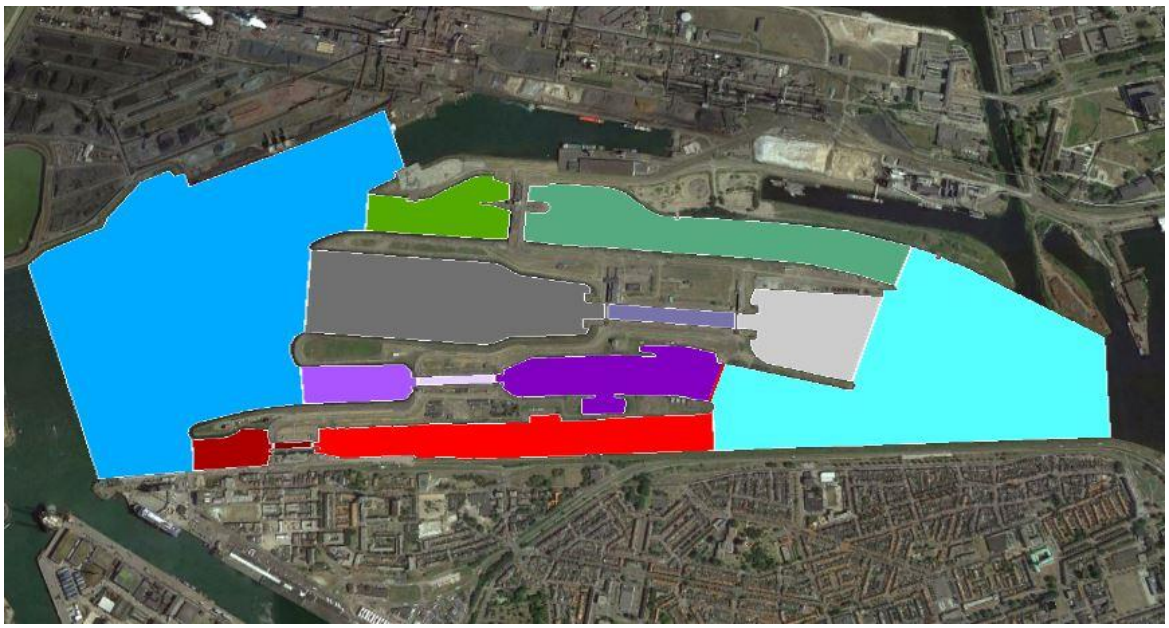
De precieze geometrie is afhankelijk van het scenario. Het verificatie scenario is voor het jaar 2005. De geometrie van destijds is weergegeven in Figuur 4.1.



Figuur 4.1 Geometrie in 2005

De autonome ontwikkeling vindt plaats in de geometrie van 2015, welke is weergegeven in Figuur 4.2. Tussen 2005 en 2015 is een deel van het sluiseiland tussen de Noordersluis en

de Middensluis gesloopt. Dit zorgt voor een wijziging in de grootte van het reservoir aan zeezijde.

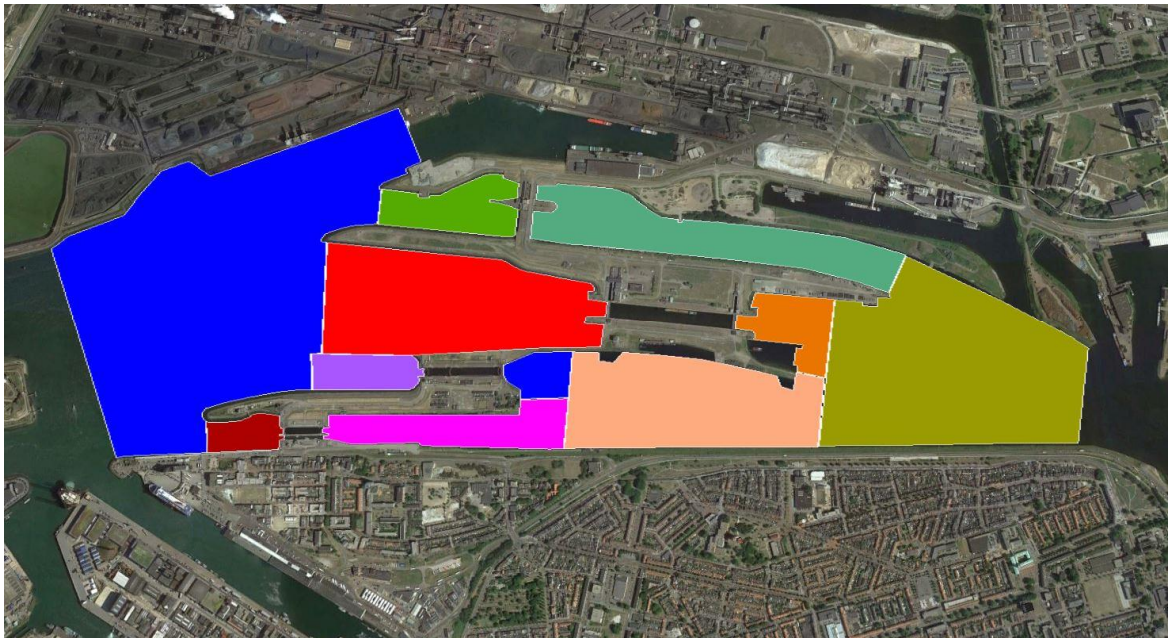


Figuur 4.2 Geometrie in 2015

Na aanleg van de Nieuwe Sluis wijzigt de geometrie opnieuw. Allereerst wordt tussen de Noordersluis en de Middensluis de Nieuwe Sluis aangelegd. Aan de zeezijde komt deze in verbinding te staan met de huidige voorhaven van de Noordersluis. Een deel van het sluiseiland tussen Noordersluis en Middensluis wordt daarom gesloopt. Aan de oostelijke zijde van de Middensluis wordt ruimte ingenomen door de deurkassen van de Nieuwe Zeesluis. Om de Middensluis bereikbaar te houden wordt daarom een deel van het sluiseiland tussen Middensluis en Zuidersluis gesloopt.

Hierdoor komen de reservoirs van de voorhavens van Middensluis en Zuidersluis tegen elkaar aan te liggen. Daarom wijzigen de oppervlaktes van deze reservoirs, zoals getoond in Figuur 4.3.

Met deze wijzigingen liggen een aantal voorhavens met noord/zuid zijde tegen elkaar. Echter, vanwege de stromingsrichting wordt in de schematisatie verondersteld dat de uitwisseling alleen plaatsvindt over oost/west verbindingen. Dit geeft ook een betere aansluiting op de geometrie van 2005 en 2015.



Figuur 4.3 Geometrie na aanleg Nieuwe Zeesluis

De afmetingen van de reservoirs en het verbindende oppervlak is bepaald uit een Delft3D model [7]. De afmetingen van de bestaande sluizen zijn afkomstig uit [9] en voor de Nieuwe Zeesluis uit een tekening geleverd door OpenIJ [10] Een overzicht van de geometrische invoerparameters voor de sluizen is te vinden in Tabel 4.1. De afmetingen van de overige reservoirs wordt weergegeven in de tabellen in Appendix C.

Tabel 4.1 Geometrische invoerparameters sluizen

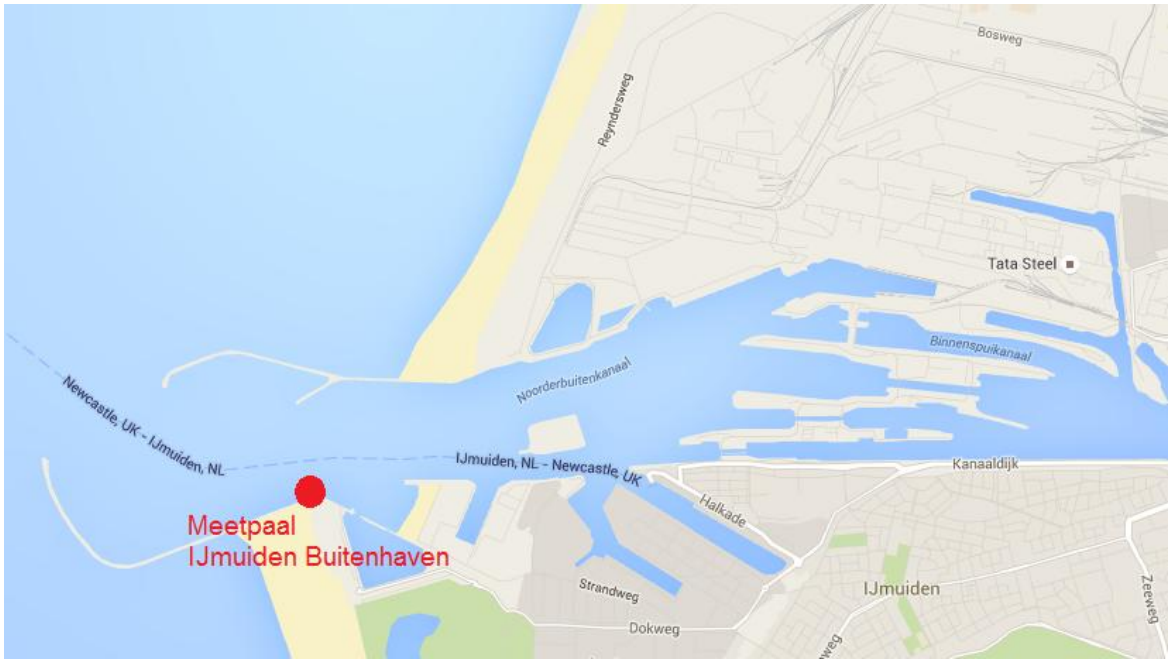
Eigenschap	Eenheid	Waarde	Opmerking
Aantal kolken	-	3	Noordersluis of Nieuwe Zeesluis, Middensluis en Zuidersluis. De Kleine Sluis wordt niet meegenomen vanwege de kleine bijdrage aan de zoutlek.
Nieuwe Zeesluis			
Lengte	m	545	[10] Tussen de deuren
Breedte	m	70	[10]
Bodem	m NAP	-17.85	[10]
Drempeldiepte	m NAP	-17.25	[10]
Noordersluis			
Lengte	m	400	[9] Tussen de deuren
Breedte	m	50	[9]
Bodem	m NAP	-15	[9]
Drempeldiepte	m NAP	-15	[9]
Middensluis			
Lengte	m	238	[9] Tussen de deuren
Breedte	m	25	[9]
Bodem	m NAP	-10.5	[9]
Drempeldiepte	m NAP	-10	[9]
Zuidersluis			
Lengte	m	111	[9] Tussen de deuren
Breedte	m	18	[9]
Bodem	m NAP	-8.7	[9]
Drempeldiepte	m NAP	-7.85	[9]

4.3 Randvoorwaarde saliniteit

Naast de geometrische parameters moeten de randvoorwaarden worden gedefinieerd. Terwijl in de berekeningen van Arcadis het dichtheidsverschil over het sluizencomplex werd gedefinieerd wordt dit in zowel TIMLCK als het WANDA-Locks model bepaald door een randvoorwaarde op te geven voor de saliniteit aan de buitenranden van het modelgebied. In TIMLCK bestaat echter slechts een gemeenschappelijke voorhaven voor alle sluizen, terwijl in WANDA-Locks meerdere voorhavens worden gedefinieerd. In deze voorhavens vormt zich een bepaalde dichtheid, welke leidt tot een dichtheidsverschil over de sluizen. In aansluiting op het voorgaande werk (gebaseerd op veldmetingen beschreven in bijvoorbeeld [5] en [6]) wordt uitgegaan van 27 psu (ofwel 27,5 kg zout/m^3) in de buitenhaven (nabij het Forteiland) en 7 psu (ofwel 7,0 kg zout/m^3) op het kanaal (nabij de pont).

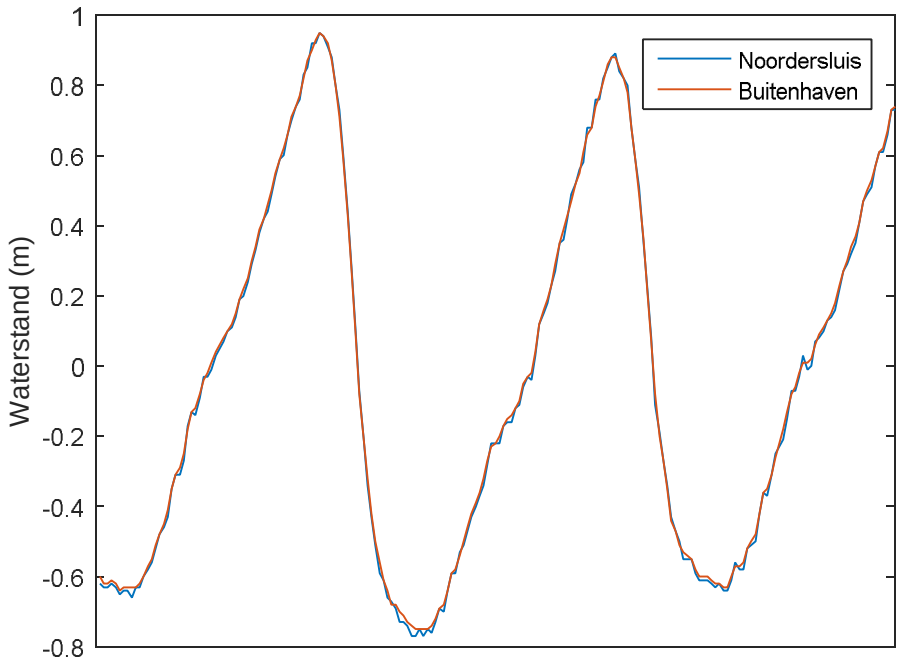
4.4 Randvoorwaarde waterstand

De waterstand van het kanaal wordt gelijk gesteld aan het streefpeil, namelijk -0.4 mNAP. De waterstand van de zeezijde wordt gelijk gesteld aan de waterstand gemeten bij meetpaal IJmuiden Buitenhaven. De locatie van deze meetpaal staat aangegeven in Figuur 4.4.



Figuur 4.4 Locatie van meetpaal IJmuiden Buitenhaven.

Van de waterstand bij de sluis zijn slechts korte meetseries beschikbaar, daarom wordt de waterstand in de Buitenhaven gebruikt. Het verschil in waterstand is echter verwaarloosbaar klein, zoals blijkt uit de vergelijking van een korte meetserie voor de Buitenhaven en in de voorhaven aan zeezijde van de Noordersluis in Figuur 4.5.



Figuur 4.5 Vergelijking waterstanden bij Noordersluis en in de Buitenhaven (18 en 19 juli 2016).

Voor het scenario 2005 worden de waterstanden uit 2005 gebruikt en voor de overige scenario's worden de waterstanden van 2013 gebruikt. Dit laatste in verband met een keuze voor het spui- en pomp debiet (zie paragraaf 4.5).

4.5 Spui- en pompdebiet

Het debiet door het spui en het gemaal wordt gemeten. Deze metingen worden gebruikt als input voor WANDA-Locks. Dit wordt gemodelleerd als het verpompen van water uit het spuikanaal van de kanaalzijde naar zeezijde.

Er is echter bekend dat de waterbalans voor het Noordzeekanaal niet sluitend is. Dit is gebleken uit meerdere onderzoeken. Volgens Kikkert [11] is dit te wijten aan een fout in de metingen van het debiet door het spuikanaal. Hij beargumenteerd dat het werkelijke debiet ongeveer 80% van het gemeten debiet moet zijn. Daarom zal in het WANDA-Locks model deze correctie op de gemeten waardes plaatsvinden.

Net als voor de waterstand, wordt ook voor het afvoerdebiet voor het scenario 2005 de gemeten debieten van 2005 genomen. Voor de overige scenario's moet ook een zeker afvoerdebiet worden gekozen. De keuze is gevallen op de metingen van 2013 vanwege de grootte van het afvoerdebiet. Wanneer verschillende jaren vergeleken worden, blijkt het afvoerdebiet sterk te variëren, om het debiet niet te ver te onder- of overschatten moet daarom gekozen worden voor een jaar met een gemiddeld afvoerdebiet. 2013 was een jaar met een dergelijk gemiddeld afvoerdebiet.

4.6 Sluisbedrijf

Voor het sluisbedrijf is gebruik gemaakt van de aangeleverde PMSS simulaties. Hieruit worden de nivelleertijden en de deur-opentijden gebruikt, zoals besproken in Hoofdstuk 3.

De PMSS simulaties bevatten ook het scheepsaanbod, zowel het aantal schepen als het type schepen. Het volume dat deze schepen innemen in de sluis wordt in WANDA-Locks gebruikt om te corrigeren voor de hoeveelheid getransporteerd zout.

Conclusies:
WANDA-Locks is een dynamisch model waarmee de onderzoeksvragen beantwoord kunnen worden.
De invoerparameters voor het model en verificatiemateriaal zijn beschikbaar.

5 Verificatie

5.1 Methode

In dit hoofdstuk vindt de verificatie van het WANDA-Locks model plaats. Als verificatie wordt het jaar 2005 gebruikt. Op ditzelfde jaar zijn de PMSS simulaties gebaseerd.

In datzelfde jaar zijn metingen uitgevoerd voor de saliniteit in het spuikanaal en de debieten door het spuikanaal. Wanneer deze met elkaar vermenigvuldigd worden kan de zoutflux door het spuikanaal naar zee worden geschat. Dit moet overeenkomen met de zoutflux door het spuikanaal die berekend wordt met WANDA-Locks.

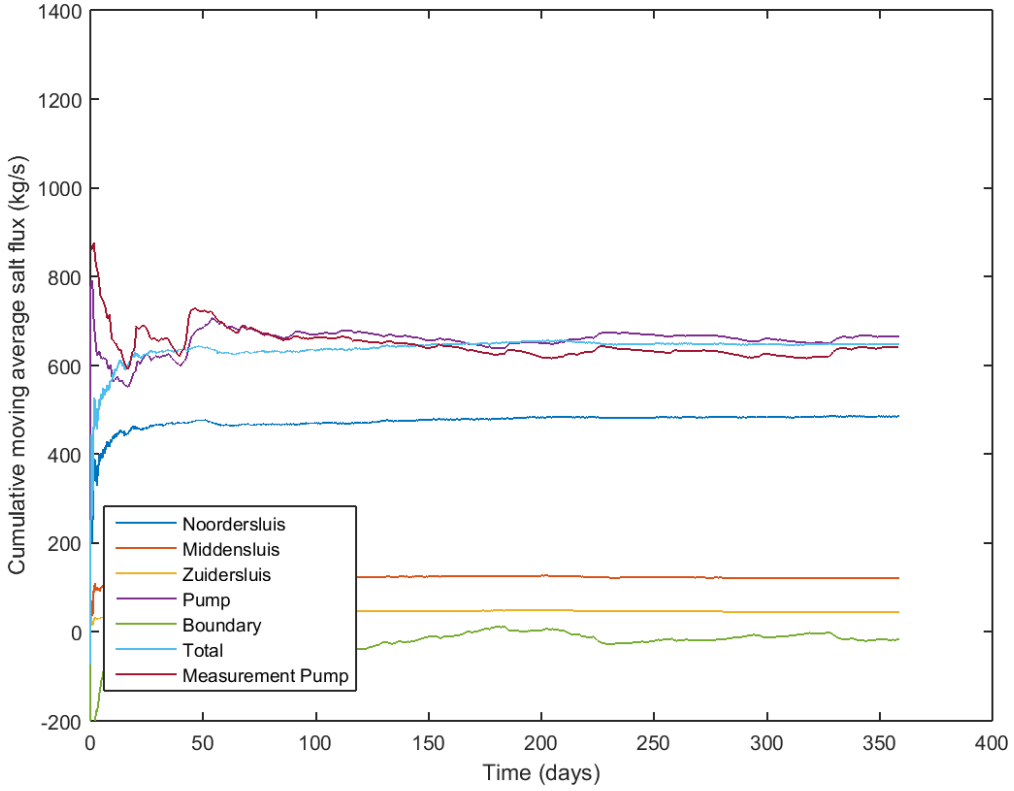
Daarnaast wordt aangenomen dat er gemiddeld over een jaar een vrijwel stationaire toestand is voor de hoeveelheid zout op het Noordzeekanaal. Dat wil zeggen dat de hoeveelheid zout die via de sluizen binnenkomt ongeveer gelijk is aan de hoeveelheid zout die door het spuikanaal teruggebracht wordt naar de zeezijde. Er wordt dus gezocht naar een gesloten zoutbalans.

Het model is dus geverifieerd wanneer WANDA-Locks een zoutflux door de sluizen berekent die gelijk is aan de zoutflux door het spuikanaal, welke weer gelijk is aan de meetwaarden.

5.2 Resultaat

In analyses van de waterbalans door Deltares, Arcadis en Grontmij blijkt telkens dat de waterbalans van het Noordzeekanaal niet sluitend is. Waar het “lek” in het systeem zit is niet bekend. Volgens [11] is dit veroorzaakt door een meetfout in het afvoerdebiet. In dat geval zou dit debiet op ongeveer 80% moeten worden gezet om de balans sluitend te maken.

Figuur 5.1 toont de uitkomst van de berekening. Op de verticale as wordt het cumulatief voortschrijdend gemiddelde van de zoutflux gegeven en op de horizontale as de tijd. De donkerblauwe, rode en gele lijnen geven de zoutfluxen voor de verschillende sluizen aan. De lichtblauwe lijn is de optelling van deze drie sluizen. Deze lichtblauwe lijn ligt aan het eind van het jaar vrijwel over de donkerrode en paarse lijnen. Deze geven respectievelijk de gemeten zoutflux door het spuikanaal en de met WANDA-Locks berekende zoutflux door het spuikanaal aan. Tot slot is er nog een groene lijn. Deze geeft aan hoeveel zout er naar het Noordzeekanaal wordt afgevoerd.

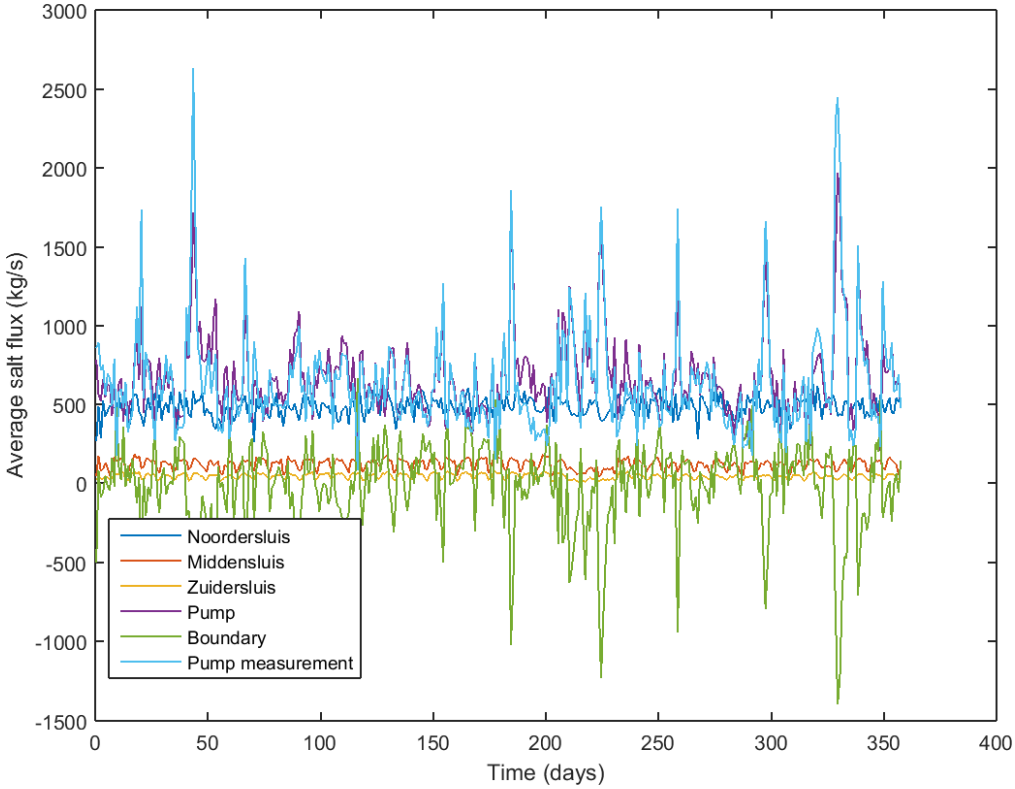


Figuur 5.1 Cumulatief voortschrijdend gemiddelde zoutflux voor case c008 voor 2005, randvoorwaarde zeezijde 27 psu en kanaalzijde 7 psu en afvoerdebiet op 80%.

Aangezien de zoutflux door het spuikanaal vrijwel gelijk is aan de zoutflux door de scheepvaartsluizen is er sprake van een gesloten zoutbalans. Dit blijkt ook uit de groene lijn die na een jaar vrijwel gelijk wordt aan nul. Daarnaast is de berekende zoutflux door het spuikanaal gelijk aan de gemeten zoutflux.

Figuur 5.2 toont de daggemiddelde zoutflux. De lichtblauwe lijn is in dit geval de door het spuikanaal gemeten zoutflux en de paarse lijn de berekende zoutflux. De meeste van de pieken in deze twee lijnen bevinden zich op dezelfde plaats. Dit betekent dat het model zich op een acceptabele manier gedraagt.

Met deze bevindingen kan worden gesteld dat het WANDA-Locks model is geverifieerd op basis van het referentie jaar 2005.



Figuur 5.2 Daggemiddelde zoutflux voor case c008 voor 2005, randvoorwaarde zeezijde 27 psu en kanaalzijde 7 psu en afvoerdebiet op 80%.

5.3 Conclusie

Op grond van paragraaf 5.2 en de in Appendix D uitgevoerde analyses is het WANDA-Locks model geverifieerd voor het referentiejaar 2005. Hierbij is gebruik gemaakt van de volgende voorwaardes voor de simulaties.

- De tijdstap is kleiner of gelijk aan 50 seconden
- Het ingevoerde afvoerdebiet is gelijk aan 80% van het gemeten afvoerdebiet
- De randvoorwaarde van de saliniteit aan zeezijde is 27 psu
- De randvoorwaarde van de saliniteit aan kanaalzijde is 7 psu
- Het afvoerdebiet wordt daggemiddeld ingevoerd

Door de tijdstap niet te klein te kiezen blijft de rekentijd beperkt. Met de keuze voor de randvoorwaardes en de reductie van 20% in het afvoerdebiet wordt aansluiting gevonden op eerder werk. Hiermee wordt er een sluitend model gevonden voor 2005.

In sommige jaren is slechts een daggemiddeld debiet bekend, daarom is het consistenter om in alle gevallen het daggemiddelde debiet te nemen. Daarnaast blijkt uit de analyse in de Appendix dat er weinig verschil zit in de totale zoutflux berekend met 10 minuten en daggemiddelde debieten.

6 Resultaten

Uit de verificatie blijkt dat een sluitende zoutbalans wordt gevonden bij een saliniteit aan zeezijde van 27 psu en aan kanaalzijde 7 psu. Het afvoerdebiet wordt gelijk gesteld aan 80% van het gemeten debiet, op basis van Kikkert [11]. Met deze parameters is het model van 2005 geverifieerd. Dezelfde parameters worden gekozen voor de overige scenario's.

In dit hoofdstuk worden de resultaten voor de verschillende scenario's getoond. Deze worden vergeleken met voorgaande berekeningen uitgevoerd met TIMLCK door Deltares en met berekeningen door Arcadis.

Vervolgens zal een vergelijking worden gemaakt tussen de met WANDA berekende zoutflux en de zoutflux in het geval van volledige kolkuitwisseling.

Daarnaast zal de invloed van een tweetal maatregelen worden geanalyseerd. De eerste maatregel is het sluiten van de sluisdeur in het geval de tijd tussen uitvarende en invarende schepen groot is. Dit is toegepast op alle in het model opgenomen sluizen.

De tweede maatregel is het gebruik van bellenschermen in de Nieuwe Zeesluis. De bellenschermen zijn geplaatst in beide sluishoofden. Ook zijn de twee maatregelen gecombineerd.

Tot slot is de werking van een zoutscherm schematisatie getest in WANDA-Locks.

6.1 Zoutflux met scheepsbewegingen uit PMMS

Tabel 6.1 toont het overzicht van de zoutfluxen voor de verschillende scenario's. In 2005 is de zoutflux door het spuikanaal vrijwel gelijk aan de zoutflux door de sluizen. Dit bleek al eerder in de verificatie van het WANDA-Locks model.

Tabel 6.1 Zoutfluxen voor de verschillende scenario's.

Scenario	Zoutflux 2005 (kg/s)	Zoutflux AO (kg/s)	Zoutflux IBS (kg/s)	Zoutflux PA (kg/s)
Sluizen	648	728	1147	1121
Spuikanaal	665	548	582	584
Noordzeekanaal	-18	180	565	538

In het geval de ladingsstroom toeneemt van 57 MTPA (2005) naar 95 MTPA (autonome ontwikkeling), maar de afmetingen van de Nieuwe Zeesluis gelijk zijn aan die van de Noordersluis, zal de zoutflux door de sluizen toenemen. De zoutflux door het spuikanaal neemt in dat geval af met ongeveer 18 procent. Dit laatste wordt veroorzaakt door het feit dat het debiet door het spuikanaal ook af is genomen met ongeveer 18 procent. Er is namelijk voor het scenario 2005 gebruik gemaakt van het afvoerdebiet van 2005 en voor de overige scenario's van het afvoerdebiet van 2013. Dit laatste vanwege de gemiddelde grootte van het afvoerdebiet in dat jaar.

In het scenario van de inbedrijfstelling neemt de ladingsstroom evenveel toe als in het geval van de autonome ontwikkeling. Voor de inbedrijfstelling neemt het volume van de Nieuwe

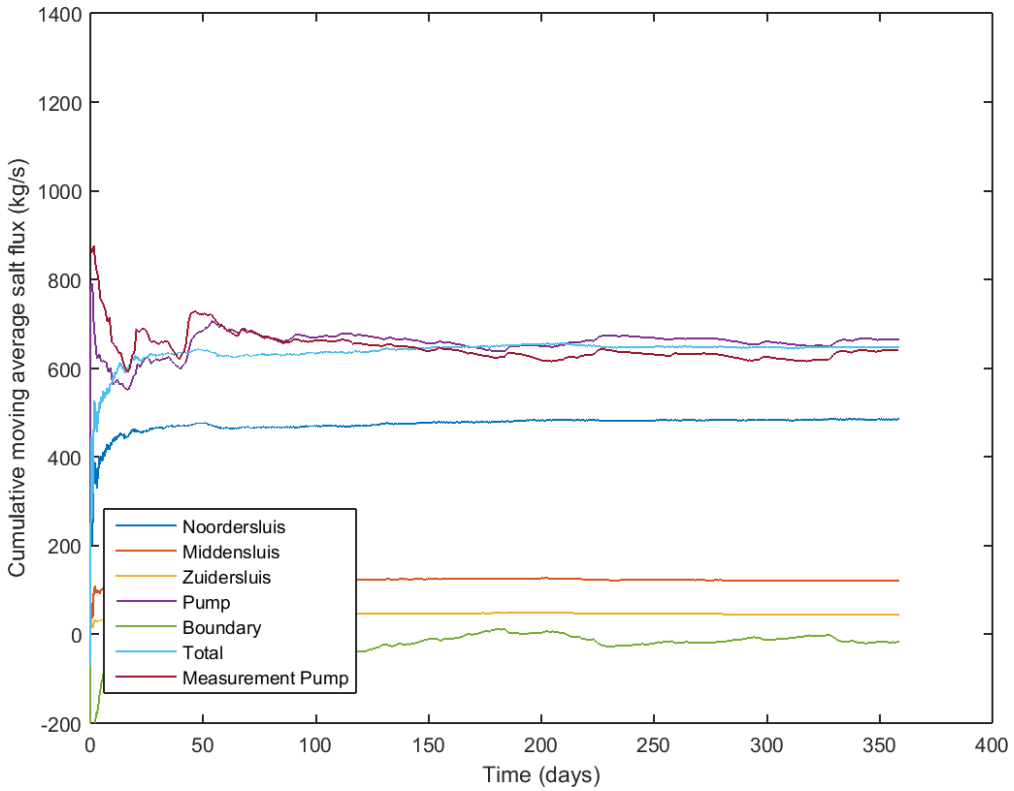
Zeesluis echter sterk toe. Hierdoor wordt de zoutflux door de sluizen veel groter en wordt er meer zout afgevoerd naar het Noordzeekanaal. De zoutflux door het spuikanaal neemt iets toe ten opzichte van de autonome ontwikkeling, doordat de voorhavens aan kanaalzijde zouter worden.

Voor het scenario projectalternatief neemt het aantal schuttingen door de Nieuwe Zeesluis af ten opzichte van de inbedrijfstelling, maar neemt de deur-opentijd toe. Het verminderen van het aantallen schuttingen zorgt voor minder kolkuitwisselingen, terwijl het vermeerderen van de deur-opentijd de mate van kolkuitwisseling vergroot. Deze twee effecten vallen, zo blijkt uit Tabel 6.1 in dit geval voor een groot deel tegen elkaar weg.

Een netto zoutflux naar het Noordzeekanaal zal in praktijk leiden tot een verhoging van het zoutgehalte van op het Noordzeekanaal. Hierdoor zal zich een nieuw evenwicht instellen.

6.1.1 Zoutflux scenario 2005

Figuur 6.1 toont de berekende zoutfluxen in het WANDA-Locks model voor 2005. De berekende en gemeten zoutflux door het spuikanaal is vrijwel aan elkaar gelijk. Daarnaast zijn deze twee ook vrijwel gelijk aan de totale zoutflux door de sluizen. Dat betekent dat dit een evenwichtssituatie is.



Figuur 6.1 Zoutflux voor scenario 2005

Tabel 6.2 toont een overzicht van de zoutfluxen op verschillende plaatsen in het model. De totale zoutflux door het gehele sluiscomplex is ongeveer 650 kg/s. Dit komt overeen met de schatting afgegeven in [4] op basis van de afvoergegevens van 2010 tot en met 2014.

Tabel 6.2 Zoutfluxen voor scenario 2005.

	Schutting Zee→NKZ [/dag]	**Zoutlast [ton zout/sch]**	**Zoutflux [kg zout/s]**
Noordersluis	12,71	3283	483
Middensluis	17,81	582	120
Zuidersluis	24,17	157	44
Totaal			648
Afvoer spuikanaal			665
Afvoer kanaal			-18

Tabel 2.3 toont het overzicht van de zoutfluxen door de sluizen berekend in [4] voor 2008 (en dus niet 2005). De totale zoutflux door de sluizen is 1263 kg/s. Hoewel dit een ander jaar is wordt toch een vergelijking gemaakt, omdat dit het meest vergelijkbare materiaal van voorgaand onderzoek is.

De WANDA-Locks berekening leidt tot een significant lagere zoutflux van bijna 50 procent. Dit is deels toe te schrijven aan het lagere aantal schuttingen voor de Noordersluis (ongeveer 13 procent). Het grootste verschil wordt echter veroorzaakt door het kleinere dichtheidsverschil over de sluizen. De saliniteiten in het WANDA-model zijn weergegeven in Figuur 6.2.

In de TIMLCK sommen is een gemeenschappelijke voorhaven gedefinieerd. Tussen de randvoorwaarden heerst een vergelijkbaar dichtheidsverschil als in WANDA-Locks, maar het dichtheidsverschil over het sluizencomplex werd gemiddeld 18,5 psu. Dit is voor het WANDA-Locks model ongeveer 14 psu. Dit geeft een verschil van ruim 30%.

De grootte van het dichtheidsverschil heeft ook invloed op de snelheid van uitwisselen. Deze snelheid wordt beschreven met de volgende vergelijking:

$$c_i = 0.53\sqrt{\epsilon g H}$$

Waarin ε het relatieve dichtheidsverschil is, g de zwaartekrachtsversnelling en de waterdiepte. Wanneer de zoettong is gereflecteerd aan de andere sluisdeur en terug gekomen is bij de geopende deur is de kolk voor ongeveer 80% uitgewisseld. De benodigde tijd hiervoor kan worden uitgerekend met de volgende vergelijking:

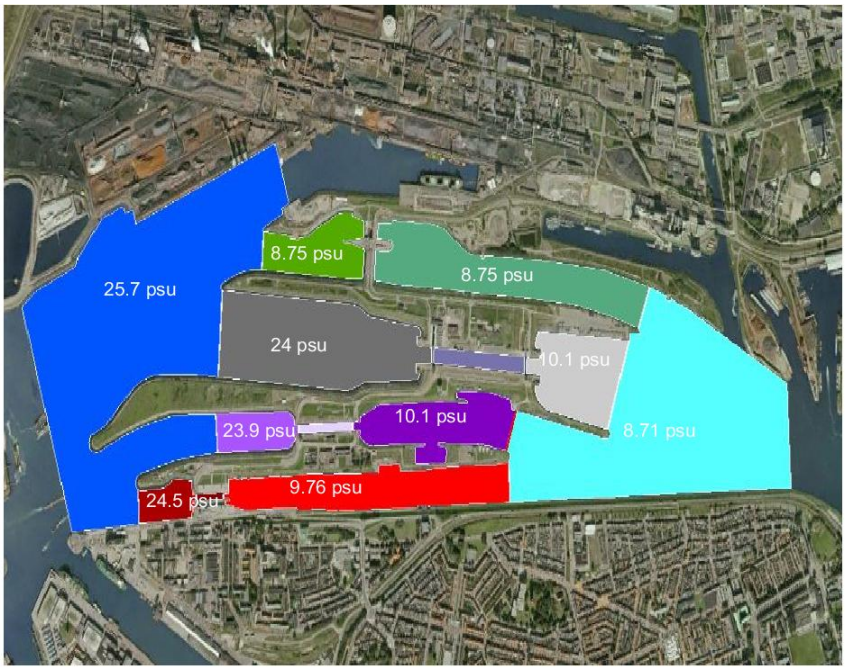
$$t = \frac{2l_k}{c_i}$$

Waarin l_k de lengte van de kolk is. Dit leidt voor de Noordersluis tot een tijd van ongeveer 18 minuten. Dit is het lineaire deel van het uitwisselingsproces. Als de deur-opentijd langer is kan ook (een deel van) de resterende 20% van het kolkvolume worden uitgewisseld. Hierbij neemt de uitwisselingssnelheid exponentieel af.

Het verschil in dichtheid tussen het TIMLCK model en het huidige model heeft via de uitwisselsnelheid tot gevolg dat de mate van uitwisseling in het TIMLCK model groter is dan in WANDA-Locks. In het TIMLCK model is dit 92% en in het WANDA-Locks model is dit gemiddeld 79%.

Anders gezegd, bij een volledig uitwisseling is de zoutflux tot de macht 1,0 afhankelijk van het dichtheidsverschil en bij onvolledige uitwisseling tot de macht 1,5 (door het verschil in loopsnelheid). Het verschil tussen TIMLCK en WANDA-Locks is voor de Noordersluis een factor 1,3. Dat betekent dat het verschil in de dichtheden tot gevolg zou hebben dat in het geval van volledige uitwisseling een verhoging van de zoutflux van 50% en voor onvolledige uitwisseling een verhoging van 30% tot gevolg heeft. Er zijn zowel deur-opentijden die leiden tot volledige als tot onvolledige uitwisseling, dus ligt de werkelijke invloed tussen deze grenzen.

Het is dus belangrijk om een goede waarde voor de dichtheid in de voorhavens van de sluizen te hebben. In het TIMLCK model werd verondersteld dat het dichtheidsverschil tussen de voorhavens aan een zijde van de sluizen verwaarloosbaar zou zijn. In het WANDA-Locks model blijkt echter dat dit niet het geval is. Het zou nuttig zijn om WANDA-Locks aan Delft3D te koppelen om het verloop van de dichtheid in de voorhavens nader te onderzoeken. Veldmetingen zouden hier ook een nuttige bijdrage aan kunnen leveren.



Figuur 6.2 Saliniteiten in de voorhavens voor scenario 2005

Naast de berekening met TIMLCK is er ook een berekening uitgevoerd voor de huidige situatie door Arcadis. Deze zou ook vergeleken kunnen worden met de berekening voor 2005. Het aantal schuttingen wijkt echter wel af. Daarnaast zijn de berekeningen van Arcadis gedaan onder de aanname van volledige uitwisseling.

De schatting van Arcadis voor de zoutlek door de sluizen is 565 kg/s, dit staat weergegeven in Tabel 2.1. De aanname van volledige uitwisseling valt volledig weg tegen het kleinere dichtheidsverschil en het kleinere aantal schuttingen, waardoor WANDA-Locks ongeveer 15% hoger uit komt.

6.1.2 Zoutflux scenario autonome ontwikkeling

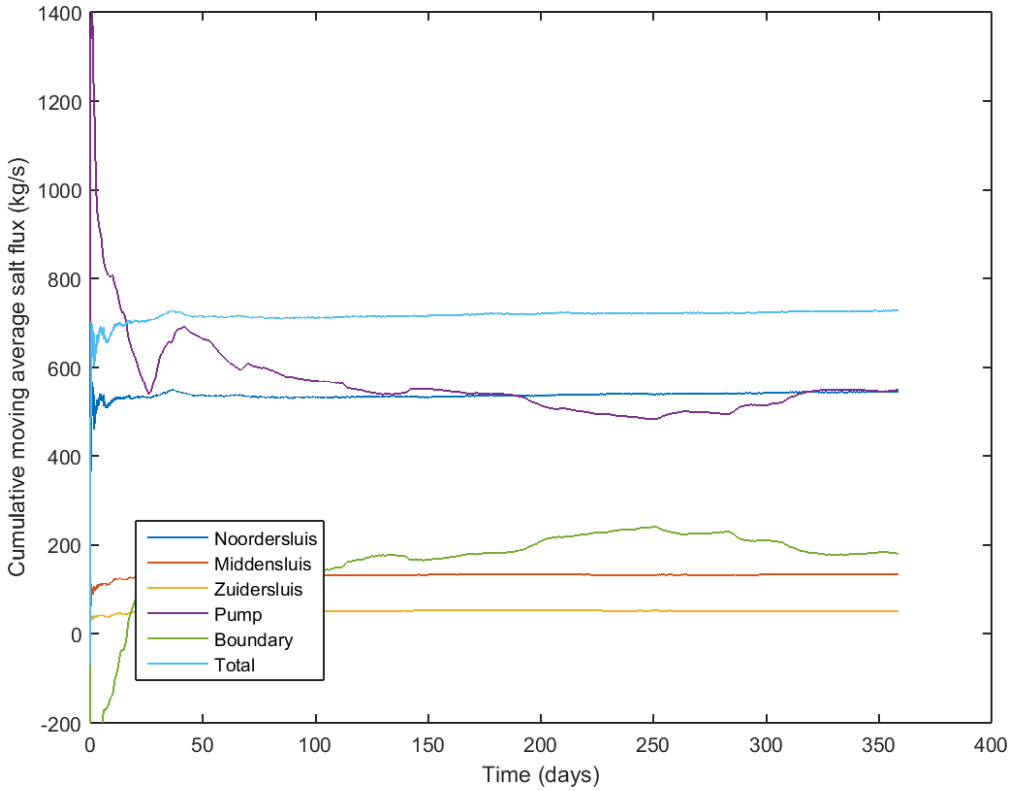
Voor de autonome ontwikkeling neemt de schutfrequentie voor alle sluizen toe ten opzichte van het jaar 2005 (Tabel 3.1). Echter de deur-opentijden nemen af (Tabel 3.6 en Tabel 3.7).

Bij het scenario 2005 waren veel deur-opentijden dusdanig groot dat de dispersie relatie was overgegaan van het lineaire in het exponentiële deel (zie paragraaf 6.1.1). Hierdoor droeg een deel van de deur-opentijd niet sterk meer bij aan het vergroten van de kolkuitwisseling.

Dit zorgt er voor dat het verkorten van de deur-opentijd een minder dan lineair heeft. Maar het vergroten van het aantal schuttingen heeft wel een lineair effect. Daardoor is de zoutflux voor de autonome ontwikkeling groter dan voor het scenario 2005. Dit wordt getoond in Tabel 6.3 en Figuur 6.3.

Tabel 6.3 Zoutfluxen voor scenario autonome ontwikkeling.

Kolk	Schutting Zee→NKZ [/dag]	Zoutlast [ton zout/sch]	Zoutflux [kg zout/s]
Nieuwe Zeesluis	14,14	3318	543
Middensluis	19,60	591	134
Zuidersluis	27,81	158	51
Totaal			728
Afvoer spuikanaal			548
Afvoer kanaal			180



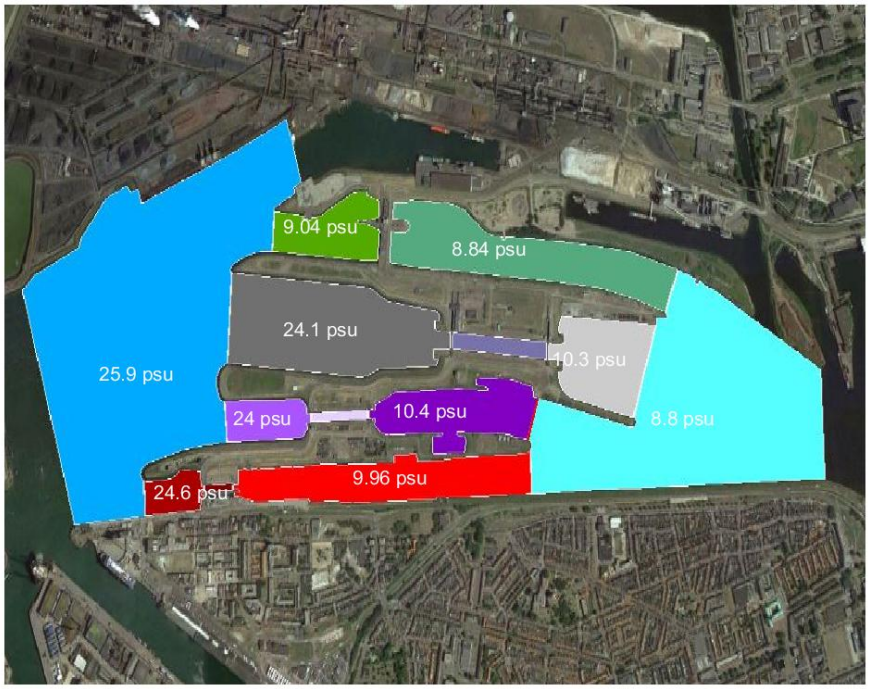
Figuur 6.3 Zoutflux voor scenario autonome ontwikkeling c008.

Met TIMLCK [4] is een zoutlek van 1269 kg/s berekend voor de autonome ontwikkeling, zie Tabel 2.4. WANDA-Locks geeft een 43% lagere zoutflux.

Er zijn kleine verschillen tussen het aantal schuttingen per sluis voor de TIMLCK en de WANDA-Locks simulatie. Dit leidt niet tot significante verschillen. Daarnaast is er een deur-opentijd gekozen in TIMLCK van 35 minuten. Deze is in het huidige model variabel en afhankelijk van de deur aan kanaal- en zeezijde.

Een grote bijdrage aan het verschil is het resulterende dichtheidsverschil over het sluizencomplex en de mate van uitwisseling. Op dezelfde wijze als dit het geval was voor scenario 2005. Zie voor de uitleg dan ook paragraaf 6.1.1.

De mate van uitwisseling voor de Nieuwe Zeesluis in het TIMLCK model is 92%. In het WANDA-Locks model is dit gemiddeld 80%. Waarin dit laatste getal vrijwel gelijk is aan het scenario 2005, terwijl de deur-opentijd korter is. De oorzaak hiervan is dat de deur-opentijden dusdanig groot zijn dat ze zich voor een groot deel in het exponentiële deel van de dispersie relatie bevinden. Hierdoor heeft een verandering van de deur-opentijd niet zulke sterke gevolgen als in het lineaire deel.



Figuur 6.4 Saliniteiten in de voorhavens voor scenario autonome ontwikkeling.

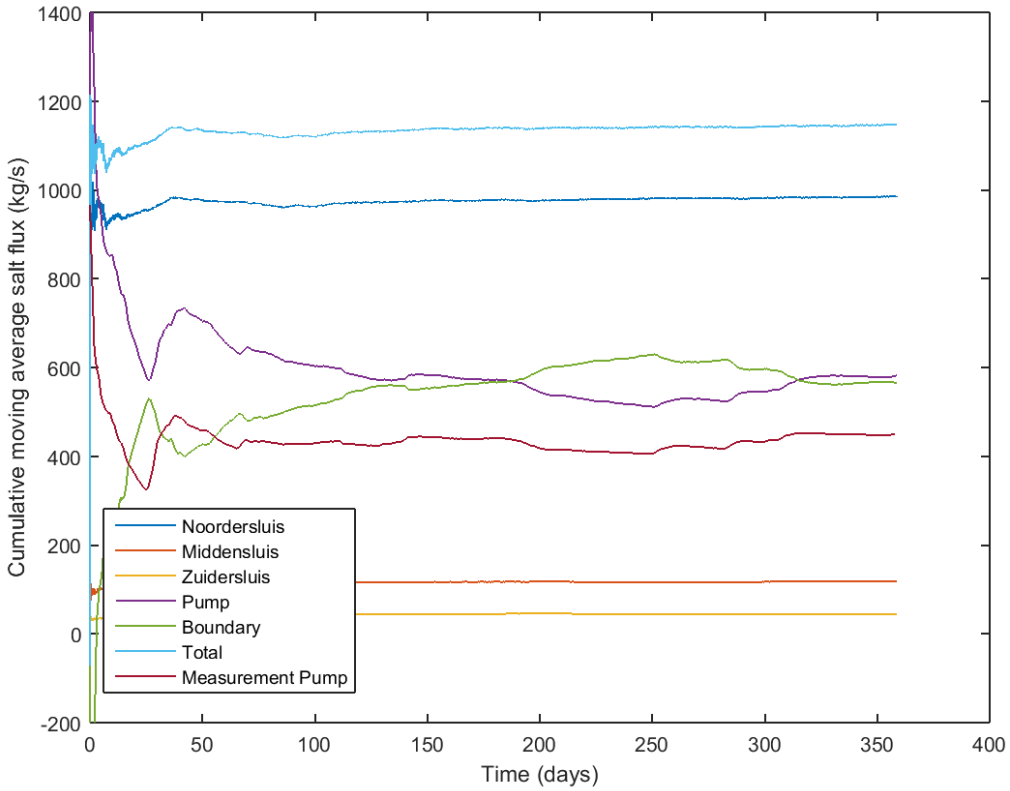
6.1.3 Inbedrijfstelling

Voor het scenario inbedrijfstelling veranderen de afmetingen van de Noordersluis in de Nieuwe Zeesluis. Naast deze toename van kolkvolume neemt de schutfrequentie met ongeveer 10% toe ten opzichte van de autonome ontwikkeling, maar nemen de deur-opentijden af met bijna 15% af, zie Tabel 3.1, Tabel 3.6 en Tabel 3.7.

Tabel 6.4 toont de berekende zoutfluxen voor het scenario inbedrijfstelling. Ten opzichte van het scenario autonome ontwikkeling neemt de totale zoutflux, berekend met WANDA, met 58% toe. Dit betekent dat door de aanleg van de Nieuwe Zeesluis het kanaal zouter zal worden.

Tabel 6.4 Zoutfluxen voor scenario inbedrijfstelling.

	Schutting Zee→NKZ [/dag]	Zoutlast [ton zout/sch]	Zoutflux [kg zout/s]
Nieuwe Zeesluis	15,58	5462	985
Middensluis	19,87	513	118
Zuidersluis	28,04	132	43
Totaal			1147
Afvoer spuikanaal			582
Afvoer Kanaal			565



Figuur 6.5 Zoutflux voor scenario inbedrijfstelling c008.

Figuur 6.5 toont dat er inderdaad zout toegevoegd wordt aan het kanaal, omdat niet al het zout wordt afgevoerd door het spuikanaal. In werkelijkheid zal dit leiden tot een nieuw evenwicht waarbij de saliniteit van het kanaal is toegenomen.

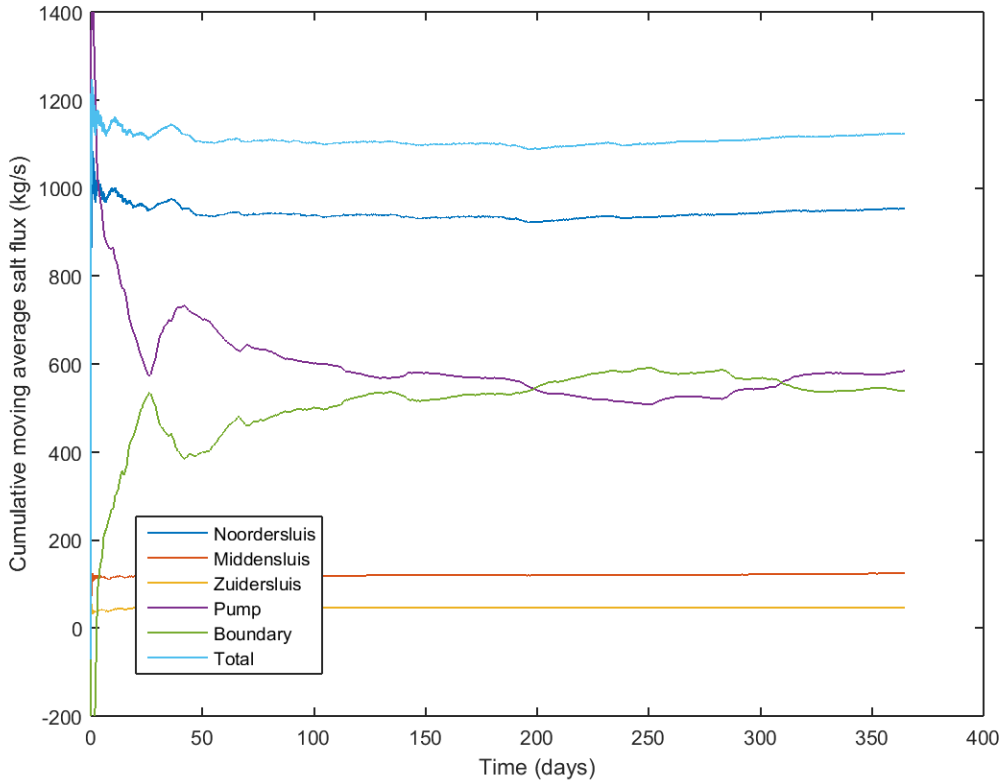
6.1.4 Projectalternatief

Voor het scenario projectalternatief neemt ten opzichte van de inbedrijfstelling het aantal schuttingen door de Nieuwe Zeesluis met 11% af, maar neemt de deur-opentijd toe met 20% (zie Tabel 3.1, Tabel 3.6 en Tabel 3.7)

Tabel 6.5 en Figuur 6.6 tonen de berekende zoutflux door de sluizen. De zoutfluxen zijn vrijwel gelijk aan die voor het scenario inbedrijfstelling, ondanks het afgenomen aantal schuttingen. Dit effect wordt echter tegen gegaan door de afnemende deur-opentijd.

Dit is dus anders dan de verschillen tussen de autonome ontwikkeling en 2005. Daar bleek dat het afnemen van de deur-opentijd en het toenemen van het aantal schuttingen leidde tot een verhoging van de zoutflux. In die gevallen waren de deur-opentijden dusdanig groot dat een verkorting van de deur-opentijd nauwelijks invloed had op de mate van uitwisseling. Dit is zichtbaar aan het minieme verschil in de zoutlast (kg zout per schutting) voor deze scenario's (zie Tabel 6.2 en Tabel 6.3).

De zoutlast voor het scenario inbedrijfstelling en het projectalternatief verschilt wel significant. In deze gevallen zijn de deur-opentijden korter en is de kolk langer. Daarom bevinden veel uitwisselingen zich in het lineaire gedeelte. Het aantal uitwisselingen heeft ook een lineair verband met de zoutflux. Daardoor vallen de twee effecten deels tegen elkaar weg.
Tot slot wordt de zoutflux mogelijk beperkt door het toegenomen scheepsvolume en de daarmee verminderde hoeveelheid water in de sluiskolk.



Figuur 6.6 Zoutflux voor scenario projectalternatief c008.

Tabel 6.5 Zoutfluxen voor scenario projectalternatief.

	Schutting Zee→NKZ [/dag]	Zoutlast [ton zout/sch]	Zoutflux [kg zout/s]
Nieuwe Zeesluis	13,82	5952	951
Middensluis	20,59	520	124
Zuidersluis	29,25	139	46
Totaal			1121
Afvoer Spuikanaal			584
Afvoer kanaal			538

Tabel 2.5 toont de met TIMLCK berekende zoutflux voor ditzelfde scenario, dit leidde tot een zoutlek van 2063 kg/s. Net als in de andere scenario's is de met WANDA-Locks berekende zoutflux significant lager, namelijk 44% lager dan met TIMLCK berekende zoutflux.

Tabel 2.2 toont dat de berekening van Arcadis [3] voor een situatie met de Nieuwe Zeesluis leidt tot een zoutlek van 941 kg/s door de sluizen. De WANDA-Locks uitkomst wijkt hier 19% van af. In deze berekening is echter geen rekening gehouden met de ontwikkelingen in de schutfrequentie. Ook wordt gebruikt gemaakt van volledige uitwisseling. De dichtheidsverschillen over de sluizen zijn over het algemeen ook lager dan in het WANDA-Locks model.

De benoemde verschillen vallen deels tegen elkaar weg, waardoor het verschil beperkt blijft. De WANDA-Locks sommen sluiten echter dichter aan op het werkelijke schutproces.

Conclusies:
Voor de scenario's projectalternatief en inbedrijfstelling neemt de zoutflux met meer dan 50% toe ten opzichte van autonome ontwikkeling.
Het verschil met voorgaand onderzoek met TIMLCK is vooral veroorzaakt door het zoutgehalte verschil over de sluis. Dit is zeer invloedrijk en zou verder onderzocht kunnen worden.

6.2 Volledige uitwisseling

In paragraaf 6.1 is voor de deur-opentijden gebruik gemaakt van de PMMS data. Met WANDA-Locks is vervolgens berekend in welke mate er kolkuitwisseling plaatsvindt. In de studies van Arcadis is echter aangenomen dat de kolk volledig uitwisselt.

Om de invloed van deze aanname te bepalen wordt in deze paragraaf een berekening gemaakt van de zoutflux bij volledige uitwisseling. Voor deze berekening van de zoutflux is het dichtheidsverschil over de sluizen aangenomen, dat berekend is in de gewone sommen (dus met beperkte deur-opentijd). Vervolgens is dit vermenigvuldigd met de schutfrequentie en het schutvolume. In de praktijk zal het dichtheidsverschil echter afnemen vanwege de grotere zoutflux. Deze berekening geeft hiermee een boven limiet aan de zoutflux.

Tabel 6.6 Zoutfluxen voor de verschillende scenario's bij volledige uitwisseling.

Zoutflux	2005	AO 2013	IBS 2013	PA 2013
Sluizen	882	974	1758	1605

6.2.1 Scenario 2005

In Tabel 6.7 staat opgesomd wat de met WANDA-Locks berekende zoutflux door de sluizen is. In dezelfde tabel is ook uitgerekend wat de zoutflux zou zijn bij volledige uitwisseling bij dezelfde dichtheidsverschillen.

Tabel 6.7 Zoutflux voor c008 scenario 2005 en voor volledige uitwisseling.

	Schuttingen per jaar	Dichtheids-verschil (psu)	Zoutflux volledige uitwisseling (kg/s)	WANDA zoutflux (kg/s)
Noordersluis	4639	13,9	625	483
Middensluis	6503	13,8	183	120
Zuidersluis	8823	14,7	74	44
Totaal			882	648

Tabel 6.7 toont aan dat de zoutflux significant hoger is voor volledige uitwisseling dan voor het WANDA-Locks model, namelijk 36%. Dit betekent dat de deur-opentijden klein genoeg zijn om de uitwisseling significant te verlagen. De aanname in de rapporten van Arcadis [1, 3] dat er volledige uitwisseling plaatsvindt, is dus conservatief.

Dit kan verklaard worden uit de tijd die nodig is voor de uitwisseling. Voor de Noordersluis is ongeveer 18 minuten nodig voor een uitwisseling van 80%. Dit is het lineaire deel van het uitwisselingsproces. Als de deur-opentijd langer is kan ook (een deel van) de resterende 20% van het kolkvolume worden uitgewisseld. Hierbij neemt de uitwisselingssnelheid exponentieel af.

Figuur 3.1 en Figuur 3.2 tonen de deur-opentijden. Voor scenario 2005 is een deel van de gevallen de deur-opentijd kleiner dan de genoemde 18 minuten: in die gevallen is de uitwisseling dus minder dan 80%.

6.2.2 Scenario autonome ontwikkeling

In Tabel 6.8 staan voor de autonome ontwikkeling de zoutfluxen bij de aanname van volledige uitwisseling.

Tabel 6.8 Zoutflux voor c008 scenario autonome ontwikkeling en voor volledige uitwisseling.

	Schuttingen per jaar	**Dichtheids-verschil (psu)**	**Zoutflux volledige uitwisseling (kg/s)**	**WANDA zoutflux (kg/s)**
Nieuwe Zeesluis	5160	13,8	691	543
Middensluis	7154	13,6	198	134
Zuidersluis	10199	14,6	85	51
Totaal			974	728

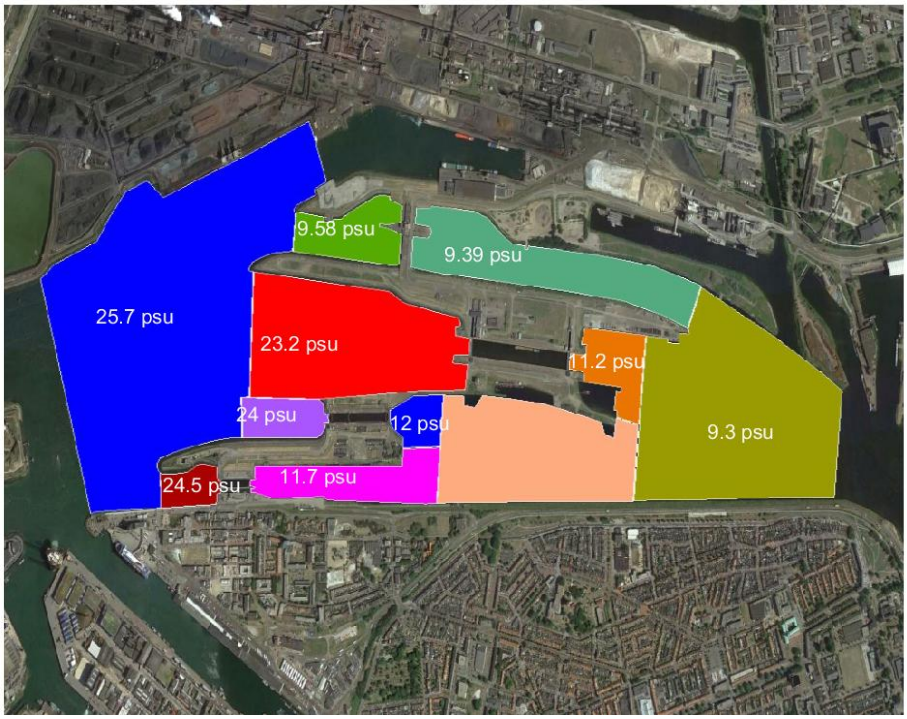
Het verschil tussen volledige en onvolledige uitwisseling is 34%. Dit is iets kleiner dan het verschil voor het scenario 2005. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door de verkleining van de deur-opentijden in combinatie met de vergroting van het scheepsvolume.

6.2.3 Inbedrijfstelling

In Tabel 6.9 staan de resultaten voor de inbedrijfstelling bij de aanname van volledige uitwisseling.

Tabel 6.9 Zoutflux voor c008 scenario inbedrijfstelling en voor volledige uitwisseling.

	Schuttingen per jaar	**Dichtheids-verschil (psu)**	**Zoutflux volledige uitwisseling (kg/s)**	**WANDA zoutflux (kg/s)**
Nieuwe Zeesluis	5684	12,0	1504	985
Middensluis	7253	12,0	179	118
Zuidersluis	10234	12,8	75	43
			1758	1147



Figuur 6.7 Saliniteiten in de voorhavens voor scenario inbedrijfstelling c008

De deur-opentijden zijn dusdanig dat volledige uitwisseling leidt tot een 53% grotere zoutflux dan de met WANDA-Locks berekende zoutflux. Dit is een groter verschil dan voor de voorgaande twee scenario's. Dit is veroorzaakt door het verder afnemen van de deur-opentijden voor de Nieuwe Zeesluis ten opzichte van de Noordersluis. Maar ook doordat voor de Nieuwe Zeesluis de uitwisseltijd toeneemt van ongeveer 18 minuten naar 24 minuten.

Door deze twee effecten wordt de kolkuitwisseling in het WANDA-Locks model verkleind en dus het verschil met volledige uitwisseling vergroot.

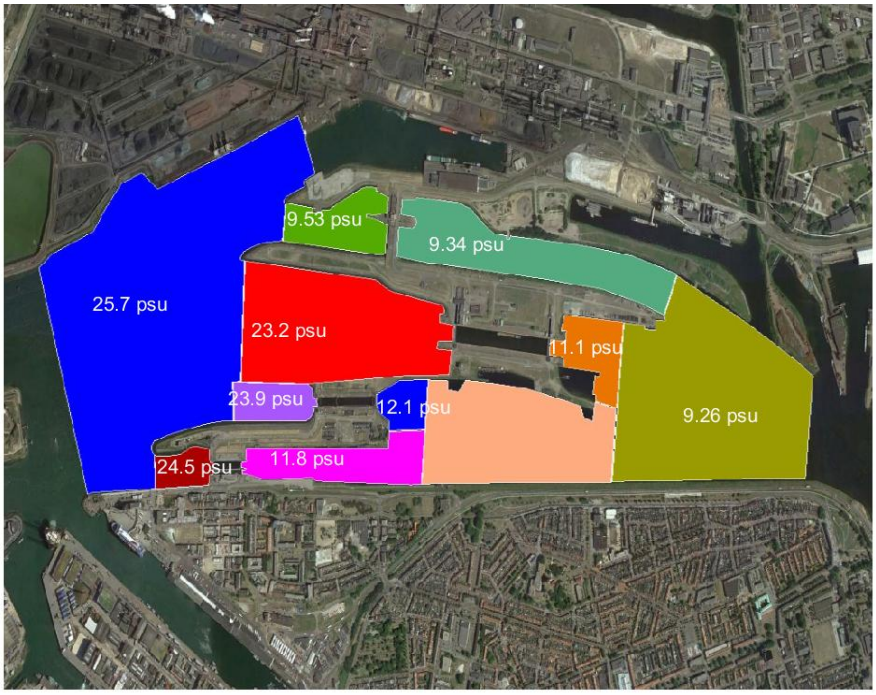
6.2.4 Projectalternatief

Tabel 6.10 toont het verschil voor de met WANDA-Locks berekende zoutflux en voor de zoutflux in het geval van volledige uitwisseling. De zoutflux is 43% hoger dan in WANDA-Locks. Dit is minder groot dan voor het scenario inbedrijfstelling. Dit wordt veroorzaakt door de grotere deur-opentijden in het projectalternatief.

Tabel 6.10 Zoutflux voor c008 scenario projectalternatief en voor volledige uitwisseling.

Project-alternatief	Schuttingen per jaar	Dichtheids-verschil (psu)	Zoutflux volledige uitwisseling (kg/s)	WANDA zoutflux (kg/s)
Nieuwe Zeesluis	5042	12,1	1344	951
Middensluis	7522	11,8	183	124
Zuidersluis	10675	12,7	78	46
			1605	1121

De saliniteiten in de verschillende reservoirs in WANDA-Locks wordt getoond in Figuur 6.8.



Figuur 6.8 Saliniteiten in de voorhavens voor scenario projectalternatief c008.

Conclusies:
De aanname van volledige uitwisseling levert een significant hogere zoutflux op. Dit is met name het geval bij de Nieuwe Zeesluis, omdat deze door haar grote lengte een grote uitwisseltijd heeft en daarom vaak niet geheel uitwisselt.

6.3 Continu gemiddeld schutproces

In paragraaf 6.2 is aangetoond dat zoutindringing met WANDA-Locks en gebruik makend van de gesimuleerde PMSS data significant lager is dan voor volledige uitwisseling. De invloed van deur-opentijden kan verder worden onderzocht door een continu schutproces aan te nemen.

Met een continu schutproces wordt bedoeld dat de deur-opentijd altijd gelijk is aan de gemiddelde deur-opentijd en dat de schutfrequentie volledig constant is.

Deze analyse is uitgevoerd voor drie scenario's, namelijk 2005, autonome ontwikkeling en projectalternatief. De resultaten hiervan worden getoond in Tabel 6.11.

Tabel 6.11 Zoutfluxen voor de verschillende scenario's.

Zoutflux	2005	AO 2013	PA 2013
Sluizen	715	778	1259
Spuikanaal	675	554	591
Noordzeekanaal	39	224	667

6.3.1 Scenario 2005

Tabel 6.12 Zoutflux door de sluizen voor variabel en continu schutproces.

	Schuttingen per jaar	WANDA zoutflux variabele deur-opentijd (kg/s)	WANDA zoutflux continu schutproces (kg/s)
Noordersluis	5160	483	518
Middensluis	7154	120	140
Zuidersluis	10199	44	57
Totaal		648	715
Afvoer spuikanaal		665	675
Afvoer kanaal		-18	39

Tabel 6.12 toont dat er met het continue schutproces een groter zoutlek is dan met een variabel proces. Dit is als volgt te begrijpen. Voor het continue schutpatroon zijn de deur-opentijden groter dan het lineaire deel van het schutproces. In het geval van de variabele deur-opentijden valt een deel van de schuttingen binnen het lineaire deel van het uitwisselingsproces, waardoor de zoutflux relatief sterk kleiner wordt. Een ander deel heeft een langere deur-opentijd dan voor het continue proces. Aangezien deze extra uitwisseltijd valt in het exponentiële deel, neemt de zoutflux relatief weinig toe. Dit leidt in dit geval tot een toename van de zoutflux bij een continu schutproces van ongeveer 10%.

In vorige onderzoeken is een continu schutproces aangenomen, wat leidt tot een conservatievere schatting.

6.3.2 Autonome ontwikkeling

De resultaten voor de autonome ontwikkeling worden getoond in Tabel 6.13.

Tabel 6.13 Zoutflux door de sluizen voor variabel en continu schutproces.

	Schuttingen per jaar	WANDA zoutflux variabele deur-opentijden (kg/s)	WANDA zoutflux continu schutproces (kg/s)
Nieuwe Zeesluis	5160	543	567
Middensluis	7154	134	149
Zuidersluis	10199	51	63
Totaal		728	778
Afvoer spuikanaal		548	554
Afvoer kanaal		180	224

Het verschil in zoutlek tussen het variabele en het continue proces is minder groot dan voor scenario 2005. Dit wordt veroorzaakt doordat de deur-opentijd kleiner is. Figuur 3.1 en Figuur 3.2 tonen relatief meer korte deur openingen voor de autonome ontwikkeling dan voor 2005. Dit betekent dat meer schuttingen plaatsvinden in het lineaire deel van het uitwisselproces. In dat geval compenseren variaties rondom het gemiddelde voor elkaar. Dat is niet het geval in het exponentiële deel.

6.3.3 Projectalternatief

De gemiddelde deur-opentijd is langer dan het lineaire deel van de uitwisseling, maar veel uitwisselingen duren korter dan dat lineaire deel in het geval van het projectalternatief. Hierdoor neemt de zoutflux behoorlijk toe bij een continu schutproces. De resultaten hiervan staan in Tabel 6.14. De zoutflux neemt met het continue proces met 12% toe.

Tabel 6.14 Zoutflux door de sluizen voor variabel en continu schutproces.

	Schuttingen per jaar	**WANDA zoutflux variabele deur-opentijden (kg/s)**	**WANDA zoutflux continu schutproces (kg/s)**
Nieuwe Zeesluis	5160	951	1068
Middensluis	7154	124	136
Zuidersluis	10199	46	56
Totaal		1121	1259
Afvoer spuikanaal		584	591
Afvoer kanaal		542	667

Conclusies:
Een continu gemiddeld schutproces levert een hogere zoutflux op doordat de invloedrijke korte uitwisselingen ontbreken. Voorgaand onderzoek met de gemiddelde deur-opentijd was dus conservatief.

6.4 Effect deur sluiten

Een maatregel om de zoutflux te verkleinen is om de deur-opentijden te verkorten. Dit kan worden gedaan door de deur te sluiten wanneer de tijd tussen het laatste uitvarende schip en het eerste invarende schip groot is.

In case c011 is een dergelijk schutpatroon aangehouden. In het geval de tijd tussen het laatste uitvarende en het eerste invarende schip groter is dan 5 maal de tijd om de deur te open of te sluiten, wordt de deur gesloten. De sluittijd van de deur is voor de Middensluis, Noordersluis en Nieuwe Zeesluis 4 minuten en voor de Zuidersluis 2 minuten.

Een minuut na het laatste uitvarende schip wordt de deur gesloten en een minuut voor het schip invaart is de deur weer volledig geopend. Dit laatste is zeer scherp gekozen en mogelijk te scherp in de praktijk. Dit toont echter wel aan welke ruimte er maximaal is om met de deur-opentijden de zoutflux te reduceren.

Deze maatregel is van belang voor toekomstige scenario's en wordt daarom uitgevoerd voor de autonome ontwikkeling, de inbedrijfstelling en het projectalternatief. De resultaten hiervan worden getoond in Tabel 6.15.

Tabel 6.15 Zoutfluxen voor de verschillende scenario's.

	Zoutflux AO (kg/s)	Zoutflux IBS (kg/s)	Zoutflux PA (kg/s)
Sluizen	669	979	1000
Spuikanaal	541	566	568
Noordzeekanaal	127	829	431

6.4.1 Autonome ontwikkeling

In het geval van de autonome ontwikkeling wordt de deur van de Nieuwe Zeesluis 3588 keer gesloten van de 10320 keer. Het verschil tussen het gewone schutproces en het extra sluiten is slechts 8%. Dit kan worden vergroot door het criterium voor het sluiten van de deur te verkleinen, waardoor de deur vaker dicht gaat.

Tabel 6.16 Zoutflux door de sluizen met en zonder extra sluiten voor scenario autonome ontwikkeling.

	Schuttingen per jaar	WANDA zoutflux (kg/s)	WANDA zoutflux met extra sluiten (kg/s)
Nieuwe Zeesluis	5160	543	500
Middensluis	7154	134	127
Zuidersluis	10199	51	42
Totaal		728	669
Afvoer spuikanaal		548	541
Afvoer Kanaal		180	127

6.4.2 Inbedrijfstelling

De deuren van de Nieuwe Zeesluis worden in dit geval 3973 keer extra gesloten van de in totaal 11368 keer. Uit Tabel 6.17 blijkt dat dit de zoutflux vermindert met bijna 20%. Dat is een sterkere reductie van de zoutflux door het sluiten van de deur dan in het geval van de autonome ontwikkeling.

De sluisdeuren gaan relatief gezien even vaak extra dicht als in het geval van de autonome ontwikkeling. Dit leidt dus niet tot de grotere reductie in zoutflux. De grootste oorzaak hiervan is waarschijnlijk de verlenging van de uitwisseltijd door de grotere sluis. Hierdoor bevindt de grens van het extra sluiten van de deur zich nog in het lineaire deel van de uitwisseling, terwijl dit voor de kleinere Noordersluis niet het geval was.

Tabel 6.17 Zoutflux door de sluizen met en zonder extra sluiten voor scenario inbedrijfstelling.

	Schuttingen per jaar	WANDA zoutflux (kg/s)	WANDA zoutflux met extra sluiten (kg/s)
Nieuwe Zeesluis	5684	985	829
Middensluis	7253	118	112
Zuidersluis	10234	43	38
Totaal		1147	979
Afvoer Spuikanaal		582	566
Afvoer kanaal		565	413

Er is een duidelijk verschil tussen de deur-opentijden van de deur aan kanaalzijde in het geval van de inbedrijfstelling en de autonome ontwikkeling. Figuur 3.2 toont twee pieken in de deur-opentijden voor de inbedrijfstelling en maar een voor de autonome ontwikkeling. Dit geeft samen met de toegenomen uitwisseltijd aanleiding tot het verschil van invloed van het extra sluiten van de deur.

6.4.3 Projectalternatief

Tabel 6.18 toont het verschil in zoutflux tussen het wel en niet extra sluiten van de deur voor het projectalternatief. De zoutflux neemt met deze maatregel ongeveer 13% af. De deuren zijn daarvoor in totaal 3872 keer extra gesloten. Dat zijn relatief gezien meer sluitingen dan voor het scenario inbedrijfstelling. Dit was ook te verwachten aangezien de gemiddelde deur-opentijd groter is (Tabel 3.6 en Tabel 3.7).

Echter, de afname van de zoutflux is minder groot dan in het geval van de inbedrijfstelling. Dit wordt mogelijk veroorzaakt door het feit dat meer cases zich al in het exponentiële deel van de dispersie bevinden.

Tabel 6.18 Zoutflux door de sluizen met en zonder extra sluiten voor scenario projectalternatief.

	Schuttingen per jaar	**WANDA zoutflux (kg/s)**	**WANDA zoutflux met extra sluiten (kg/s)**
Nieuwe Zeesluis	5042	951	840
Middensluis	7522	124	119
Zuidersluis	10675	46	40
Totaal		1121	1000
Afvoer spuikanaal		584	568
Afvoer kanaal		542	431

Conclusies:
Het extra sluiten van de deur volgens een strikt regime levert 10 tot 20 procent reductie in de zoutflux op.

6.5 Effect bellenscherm

Wanneer gebruik wordt gemaakt van een bellenscherm neemt de benodigde tijd voor het uitwisselen toe. In de schematisatie van WANDA-Locks is dit standaard met een factor 4 (oftewel een doorlaatfractie van 0,25). Hierdoor vallen zeer veel deur-opentijden binnen het lineaire deel van het uitwisselingsproces. Er kan ook een andere doorlaatfractie worden gebruikt, bijvoorbeeld 0,50. Dit betekent dat minder compressorvermogen nodig is om de bellen te maken.

Bellenschermen zijn in de praktijk echter niet gebruikt op een diepte die vergelijkbaar is met de Nieuwe Zeesluis. Daarom kan niet met zekerheid worden gesteld dat de vergelijkingen die gelden voor kleinere dieptes en in WANDA-Locks zijn opgenomen, ook gebruikt kunnen worden in deze situatie.

In het model zijn bellenschermen toegevoegd aan beide hoofden van de Nieuwe Zeesluis. Dit leidt tot een sterke reductie in de zoutflux door de Nieuwe Zeesluis. Hierdoor blijft de kanaalzijde zoeter en de zeezijde zouter. Dit leidt tot een kleine verhoging van de zoutflux door de andere sluizen.

Deze berekeningen zijn uitgevoerd voor de inbedrijfstelling en het projectalternatief. De resultaten hiervan worden getoond in Tabel 6.19.

Tabel 6.19 Zoutfluxen voor de verschillende scenario's.

	Zoutflux IBS doorlaat-fractie 0,25 (kg/s)	**Zoutflux IBS doorlaat-fractie 0,5 (kg/s)**	**Zoutflux PA doorlaat-fractie 0,25 (kg/s)**	**Zoutflux PA doorlaat-fractie 0,5 (kg/s)**
Sluizen	517	795	543	833
Spuikanaal	518	548	521	552
Noordzeekanaal	-1,5	247	22	281

Uit de tabel blijkt dat met een lage doorlaatfractie de toename van de zoutflux naar het Noordzeekanaal kan worden terug gedrongen tot ongeveer het niveau van scenario 2005. Bij een hogere doorlaatfractie is de reductie van de zoutflux naar het Noordzeekanaal nog steeds significant, maar het niveau van scenario autonome ontwikkeling wordt nog niet gehaald.

6.5.1 Inbedrijfstelling

De zoutfluxen bij de inbedrijfstelling met een bellenscherm worden getoond in Tabel 6.20. De zoutflux door de sluizen neemt bij een doorlaatfractie van 0,25 met ruim 60% af ten opzichte van de situatie zonder bellenschermen.

Door de vertraging van het uitwisselingsproces bevinden vrijwel alle uitwisselingen plaats in het lineaire deel. Dit verklaart de grote invloed van bellenschermen.

Tabel 6.20 Zoutflux door de sluizen met en zonder bellenscherm met een doorlaatfractie van 0,25.

	Schuttingen per jaar	**WANDA zoutflux (kg/s)**	**WANDA zoutflux met bellenscherm met doorlaatfractie 0,25**	**WANDA zoutflux met bellenscherm met doorlaatfractie 0,5**
Nieuwe Zeesluis	5684	985	339	625
Middensluis	7253	118	130	125
Zuidersluis	10234	43	48	46
Totaal		1147	517	795
Afvoer spuikanaal		582	518	548
Afvoer kanaal		565	-2	247

Het benodigde compressorvermogen om deze reductie te halen is gemiddeld over het jaar 430 kW aan kanaalzijde en 390 kW aan zeezijde. Het benodigde piekvermogen is aan beide zijdes 2,2 MW. Bij lagere vermogens wordt de doorlaatfractie groter.

Bij een doorlaatfractie van 0,5 is het benodigde compressorvermogen kleiner. In dat geval wordt de zoutflux gegeven door de rechterkolom van Tabel 6.20. Het benodigde compressorvermogen neemt hierdoor sterk af. Gemiddeld over het jaar is dit aan kanaalzijde 170 kW en 160 kW aan zeezijde. Het piekvermogen moet respectievelijk 790 en 810 kW zijn.

In [2] is een schatting gedaan voor het benodigde vermogen om tot een doorlaatfractie van 0,5 te komen. Gemiddeld over het jaar is dit aan kanaalzijde 75 kW en 100 kW aan zeezijde. Het piekvermogen zou aan kanaalzijde 730 kW en aan zeezijde 1,1 MW moeten zijn.

De met WANDA-Locks berekende piekvermogens zijn lager dan geschat in [2], maar het gemiddeld vermogen is hoger. Dit laatste wordt deels veroorzaakt door een tekortkoming in de weergave van bellenschermen in WANDA-Locks, waardoor de bellenschermen al aan worden gezet wanneer alleen de nivelleerschuiven openstaan.

6.5.2 Projectalternatief

Tabel 6.21 toont de invloed van bellenschermen in de Nieuwe Zeesluis voor het projectalternatief. De zoutflux door de Nieuwe Zeesluis wordt sterk gereduceerd, vanwege het vertragen van het uitwisselproces. Aangezien dit leidt tot een vergroting van het dichtheidsverschil over het sluizencomplex nemen de zoutfluxen door de andere sluizen toe.

De totale zoutflux door het sluizencomplex neemt met ruim 50% af door het gebruik van bellenschermen met een doorlaatfractie van 0,25. Deze afname is iets minder sterk dan in het scenario inbedrijfstelling. Dit kan mogelijk worden verklaard door de grotere deur-opentijden. Hierdoor bevinden sommige uitwisselingen zich zelfs met bellenschermen nog in het exponentiële deel van het uitwisselingsproces.

Het benodigde compressorvermogen om deze reductie te halen is gemiddeld over het jaar 450 kW aan kanaalzijde en 420 kW aan zeezijde. Het benodigde piekvermogen is aan beide zijdes 2,3 MW. Bij lagere vermogens wordt de doorlaatfractie groter.

Tabel 6.21 Zoutflux door de sluizen met en zonder bellenscherm met een doorlaatfractie van 0,25 en 0,5.

	Schuttingen per jaar	**WANDA zoutflux (kg/s)**	**WANDA zoutflux met bellenscherm met doorlaatfractie 0,25 (kg/s)**	**WANDA zoutflux met bellenscherm met doorlaatfractie 0,5 (kg/s)**
Nieuwe Zeesluis	5684	952	358	655
Middensluis	7253	124	135	129
Zuidersluis	10234	47	51	48
Totaal		1123	543	833
Afvoer spuikanaal		580	521	552
Afvoer kanaal		542	22	281

In het geval bellenschermen worden gebruikt met een doorlaatfractie van 0,5 worden de zoutfluxen door de sluizen groter. Het benodigde compressorvermogen neemt echter af. Aan beide zijdes is dit 170 kW gemiddeld over het jaar. Het maximaal benodigde vermogen is aan zeezijde 860 kW en aan kanaalzijde 870 kW.

Hierbij blijft er nog wel zout naar het kanaal stromen blijkt uit Tabel 6.21.

Conclusies:
Bellenschermen zijn een effectief middel om de zoutflux door de sluizen te verkleinen. De effectiviteit is afhankelijk van het luchtdebiet oftewel van het compressorvermogen.
De eerder afgegeven schatting van 1 MW om voor het projectalternatief de zoutflux te reduceren tot het niveau van de autonome ontwikkeling is in de juiste orde grootte.
Het is echter niet bekend of de gebruikte relaties tussen effectiviteit en luchtdebiet ook geldig zijn voor de diepte van de Nieuwe Zeesluis.

6.6 Effect bellenscherm en deur sluiten

De beide genoemde maatregelen, namelijk bellenschermen en het sluiten van de deur, kunnen ook gecombineerd worden. Aangezien door de bellenschermen de uitwisseltijd wordt verlengd, zijn de meeste uitwisselingen in het lineaire gebied. Hierdoor zal het extra sluiten van de deur altijd plaats vinden in het lineaire gebied. Dit leidt tot een significante vermindering van de zoutflux door de Nieuwe Zeesluis, zoals wordt getoond in Tabel 6.22.

Tabel 6.22 Zoutfluxen voor de verschillende scenario's.

	Zoutflux IBS doorlaat-fractie 0,25 (kg/s)	**Zoutflux IBS doorlaat-fractie 0,5 (kg/s)**	**Zoutflux PA doorlaat-fractie 0,25 (kg/s)**	**Zoutflux PA doorlaat-fractie 0,5 (kg/s)**
Sluizen	415	618	448	670
Spuikanaal	506	529	510	535
Noordzeekanaal	-91	88	-62	135

Uit de tabel blijkt dat door het combineren van maatregelen de reductie van de zoutflux sterk wordt vergroot. Bij een doorlaatfractie van 0,25 is de zoutflux kleiner dan voor scenario 2005 en bij 0,5 is het ongeveer gelijk aan dat van het scenario autonome ontwikkeling.

6.6.1 Inbedrijfstelling

De resultaten van de berekening van de zoutfluxen bij het gebruik van bellenschermen en het extra sluiten van de deur worden voor de inbedrijfstelling gegeven in Tabel 6.23.

Tabel 6.23 Zoutflux door de sluizen zonder maatregelen en met zowel extra sluiten als bellenschermen.

	Schuttingen per jaar	**WANDA zoutflux (kg/s)**	**WANDA zoutflux met bellenscherm met doorlaatfractie 0,25 (kg/s)**	**WANDA zoutflux met bellenscherm met doorlaatfractie 0,5 (kg/s)**
Nieuwe Zeesluis	5684	985	249	457
Middensluis	7253	118	124	120
Zuidersluis	10234	43	43	41
Totaal		1147	415	618
Afvoer spuikanaal		582	506	529
Afvoer kanaal		565	-91	88

De zoutflux door de sluizen neemt voor de lage doorlaatfractie met 20% en voor de hoge doorlaatfractie met 22% af ten opzichte van de situatie waarin alleen bellenschermen worden gebruikt.

Een doorlaatfractie van 0,5 leidt echter nog tot een significante zoutflux richting het Noordzeekanaal. Deze is echter wel significant lager dan voor de autonome ontwikkeling zonder maatregelen.

6.6.2 Projectalternatief

Het resultaat van deze combinatie van maatregelen voor het projectalternatief staat weergegeven in Tabel 6.24.

Tabel 6.24 Zoutflux door de sluizen zonder maatregelen en met zowel extra sluiten als bellenschermen met een doorlaatfractie van 0,25 en 0,5.

	Schuttingen per jaar	**WANDA zoutflux (kg/s)**	**WANDA zoutflux met bellenscherm met doorlaatfractie 0,25 (kg/s)**	**WANDA zoutflux met bellenscherm met doorlaatfractie 0,5 (kg/s)**
Nieuwe Zeesluis	5684	952	273	500
Middensluis	7253	124	131	127
Zuidersluis	10234	47	45	43
Totaal		1123	448	670
Afvoer spuikanaal		580	510	535
Afvoer kanaal		542	-62	135

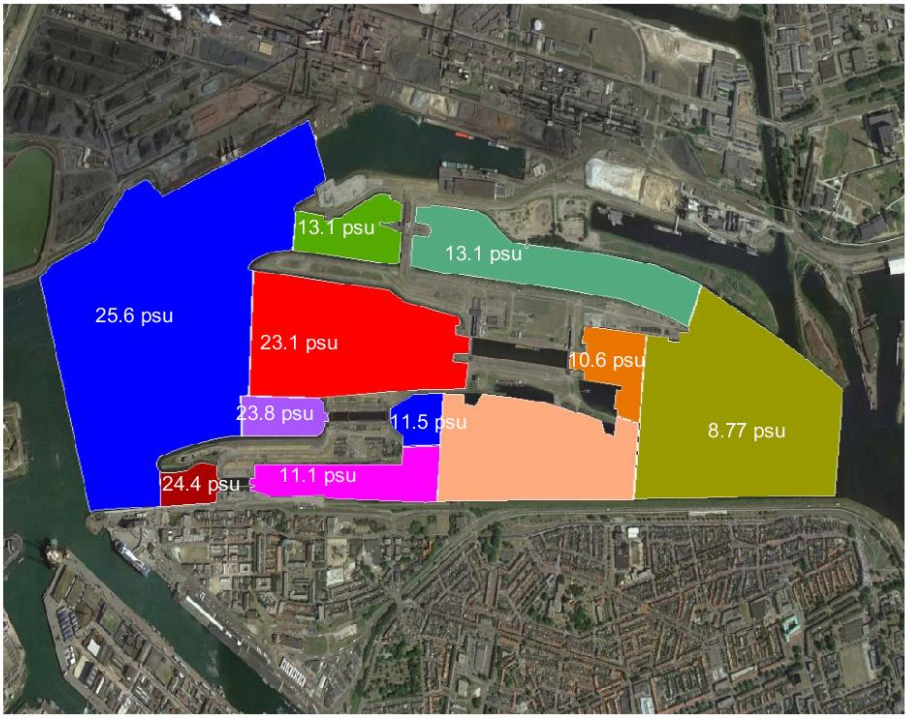
Door naast de bellenschermen de deuren ook vaker te sluiten wordt de zoutflux voor de lage doorlaatfractie met 17% en voor de hoge doorlaatfractie met 20% extra verlaagd.

Een doorlaatfractie van 0,5 leidt echter nog tot een significante zoutflux richting het Noordzeekanaal. Deze is echter wel lager dan voor de autonome ontwikkeling zonder maatregelen.

Conclusies:
Het extra sluiten van de deuren maakt de bellenschermen effectiever met ongeveer 20%.

6.7 Selectieve onttrekking

Door middel van selectieve onttrekking is het mogelijk om de gemiddelde saliniteit in het spuikanaal groter te maken dan in het kanaal. Een dergelijke scheiding zou kunnen worden aangebracht aan de monding van het spuikanaal. In WANDA-Locks is dit als test geschematiseerd als een object die 50% extra zout verplaatst. Deze waarde is gebaseerd op enkele proefberekeningen met Delft3D. Of dit werkelijk behaald kan worden moet worden afgeleid uit meer gedetailleerde berekeningen met Delft3D, CFD of eventueel doormiddel van een schaalmodel. De resulterende saliniteiten staan weergegeven in Figuur 6.9.



Figuur 6.9 Saliniteiten in de voorhavens voor scenario projectalternatief met selectieve onttrekking.

Tabel 6.25 toont de zoutflux door de sluizen en het spuikanaal. De zoutflux door de sluizen neemt toe, doordat de zeezijde zouter en de kanaalzijde minder zout wordt. Het grote verschil zit in de afvoer door het spuikanaal. Deze wordt vergroot met een factor 1,43. Dat dit lager is dan 1,5 komt door de verlaging van de saliniteit aan de kanaalzijde.

Tabel 6.25 Zoutflux door de sluizen en het spuikanaal zonder en met selectieve onttrekking.

	Schuttingen per jaar	**WANDA zoutflux (kg/s)**	**WANDA zoutflux met selectieve onttrekking (kg/s)**
Nieuwe Zeesluis	5684	952	989
Middensluis	7253	124	129
Zuidersluis	10234	47	48
Totaal		1123	1166
Afvoer spuikanaal		580	830
Afvoer kanaal		542	336

Conclusies:
Selectieve onttrekking reduceert niet de zoutflux door de sluizen, maar wel de zoutflux naar het Noordzeekanaal.
Als de effectiviteit bekend is, zou WANDA-Locks kunnen worden gebruikt om selectieve onttrekking te simuleren.

6.8 Overzicht

Zoutflux sluizen	Situatie	2005	AO	IBS	PA
1	PMSS	648	728	1147	1121
2	Volledige uitwisselling	882	974	1758	1605
3	Gem. schutfreq. & d-o.tijd	715	778	-	1259
4	Maximaal sluiten deuren	-	669	979	1000
5	Bellenschermen doorlaatfractie 0,25	-	-	517	543
6	Bellenschermen doorlaatfractie 0,5	-	-	795	833
7	Deur sluiten en bellenschermen doorlaatfractie 0,25	-	-	415	448
8	Deur sluiten en bellenschermen doorlaatfractie 0,5	-	-	618	670
9	Selectieve onttrekking	-	-	-	1166

Zoutflux spuikanaal	Situatie	2005	AO	IBS	PA
1	PMSS	665	548	582	584
2	Volledige uitwisselling	-	-	-	-
3	Gem. schutfreq. & d-o.tijd	675	554	-	591
4	Maximaal sluiten deuren		541	566	568
5	Bellenschermen doorlaatfractie 0,25	-		518	521
6	Bellenschermen doorlaatfractie 0,5	-		548	552
7	Deur sluiten en bellenschermen doorlaatfractie 0,25	-		506	510
8	Deur sluiten en bellenschermen doorlaatfractie 0,5	-		529	535
9	Selectieve onttrekking	-			830

Zoutflux kanaal	Situatie	2005	AO	IBS	PA
1	PMSS	-18	180	565	538
2	Volledige uitwisselling	-	-	-	-
3	Gem. schutfreq. & d-o.tijd	39	224	-	667
4	Maximaal sluiten deuren	-	127	413	431
5	Bellenschermen doorlaatfractie 0,25	-	-	-1.5	22
6	Bellenschermen doorlaatfractie 0,5	-	-	247	281
7	Deur sluiten en bellenschermen doorlaatfractie 0,25	-	-	-91	-62
8	Deur sluiten en bellenschermen doorlaatfractie 0,5	-	-	88	135
9	Selectieve onttrekking	-	-	-	336

7 Conclusies

De onderzoeksvragen voor dit rapport waren:

- Hoe groot is de zoutlek voor de verschillende toekomstscenario's?
- Wat is het effect van de variabele deur-opentijden en schutfrequenties op de zoutlek?
- In hoeverre wordt de zoutlek beperkt door het sluiten van de deuren tussen uit- en invarende schepen?
- In hoeverre kan de zoutlek worden beperkt met bellenschermen in de Nieuwe Zeesluis?
- Welk effect heeft een geschematiseerd zoutscherm op de zoutlek?

De beantwoording van deze vragen volgt hieronder in vijf punten. Allereerst volgen in paragraaf 7.1 conclusies over de verificatie van het model. Vervolgens wordt in paragraaf 7.2 de eerste onderzoeksvraag, betreffende de grootte van de zoutflux in de verschillende scenario's, beantwoord. De berekende zoutlek wordt daarna in paragraaf 7.3 vergeleken met voorgaand werk.

De tweede onderzoeksvraag wordt in paragraaf 7.4 beantwoord met een vergelijking tussen een variabel en continu gemiddeld schutproces. Tot slot worden in paragraaf 7.5 de drie laatste vragen beantwoord. In die paragraaf wordt de effectiviteit van twee zoutflux beperkende maatregelen besproken, namelijk het sluiten van de deur en het gebruik van bellenschermen.

7.1 Verificatie

- De verificatie heeft plaatsgevonden op basis van het jaar 2005. Hiermee kon worden aangesloten op eerder werk door Deltares en Arcadis.
- De verificatie case vormde een sluitend model voor de toevoer en afvoer van zout door het sluizencomplex en het spuikanaal. Daarnaast sloot het aan op meetwaardes uit 2005 voor de debieten en de saliniteiten in het spuikanaal.
- De sluitfout in de waterbalans van het Noordzeekanaal is in de verificatie opgenomen door het afvoerdebiet met 20% te verlagen ten opzichte van de registratie.

7.2 Zoutlek voor verschillende scenario's

- De zoutlek voor 2005 wordt geschat op 650 kg/s, wat aansluit op de afgegeven schatting in [4].
- De zoutlek neemt ruim 10% toe in het scenario autonome ontwikkeling.
- Bij de inbedrijfstelling wordt de Noordersluis vervangen door de Nieuwe Zeesluis. Dit leidt tot een sterke toename van de zoutlek van ongeveer 50% ten opzichte van de autonome ontwikkeling tot ongeveer 1100 kg/s.
- Voor het projectalternatief geldt een vergelijkbare grootte van de zoutlek.

7.3 Vergelijking met voorgaand werk

- De berekeningen met TIMLCK [4] voor 2008 leidden tot een schatting van de zoutlek van 1250 kg/s. De WANDA-Locks berekening voor 2005 is ongeveer 50% lager.
- Voor de autonome ontwikkeling en het projectalternatief zijn de verschillen bijna 45%.
- Het verschil tussen TIMLCK en WANDA-Locks is met name veroorzaakt door het dichtheidsverschil over het sluizencomplex en de mate van kolkuitwisseling. Deze laatste is een gevolg van het dichtheidsverschil, omdat de snelheid van de zoete (en de zoute) tong afhankelijk is van het dichtheidsverschil.

- In de TIMLCK berekening was er van uitgegaan dat het dichtheidsverschil tussen de voorhavens aan een zijde van de sluizen verwaarloosbaar zou zijn. In WANDA-Locks blijkt dat echter niet het geval te zijn. Door een koppeling van Delft3D aan WANDA-Locks zou de opbouw van dichtheid in de voorhavens beter in kaart kunnen worden gebracht. Hiermee kan worden bepaald of de schematisatie in WANDA-Locks met reservoirs voldoende nauwkeurig is. Veldmetingen zouden ook een nuttige bijdrage hieraan kunnen leveren.
- Het verschil met Arcadis [3] voor 2005 is 15% en voor de situatie met de Nieuwe Zeesluis 19%. De aannames zijn echter zeer verschillend. Arcadis gaat namelijk uit van een lagere schutfrequentie en van volledige kolkuitwisseling.
- Het is van belang om de dichtheden aan weerzijden van de sluis correct te schatten, omdat deze een zeer grote invloed hebben op de uitkomst.

7.4 Invloed continu gemiddeld en variabel schutproces

- Een continu gemiddeld schutproces leidt tot hogere zoutfluxen vanwege het ontbreken van korte deur-opentijden, welke meer invloed hebben op de zoutflux dan lange deur-opentijden.
- De aanname van een continu gemiddeld schutproces leidt tot conservatieve schattingen voor de zoutflux.

7.5 Maatregelen: deur sluiten, bellenschermen en zoutscherm

- De zoutflux kan worden beperkt door de deur te sluiten in het geval er voldoende tijd is tussen een uitvarend en een invarend schip. Dit geeft beperkingen tussen de 10 en 20 procent.
- Een zeer effectieve maatregel is het plaatsen van bellenschermen in de Nieuwe Zeesluis. De effectiviteit hiervan hangt af van het luchtdebiet en daardoor van het vermogen.
- Voor het projectalternatief is een piekvermogen van 2,3 MW nodig om een doorlaatfractie van 0,25 te halen en daarmee de zoutflux door het gehele sluizencomplex met meer dan 50% te verlagen. Hierdoor wordt de zoutflux voor de inbedrijfstelling en het projectalternatief met bellenschermen lager dan het geval van 2005 zonder bellenschermen.
- Een piekvermogen van bijna 900 kW is nodig om een doorlaatfractie van 0,5 te halen en daarmee de zoutflux door het gehele complex met ongeveer 25% te verlagen.
- Het gebruik van bellenschermen kan nog effectiever worden door dit te combineren met het sluiten van de deur in het geval dat er veel tijd tussen het laatste uitvarende en eerste invarende schip zit. Dit leidt tot een reductie in de orde van 60% bij een doorlaatfractie van 0,25 en 40% bij een doorlaatfractie van 0,5.
- Een zoutscherm kan in WANDA-Locks worden gemodelleerd wanneer de effectiviteit er van bekend is vanuit bijvoorbeeld berekeningen met Delft3D of CFD, of experimenten in een schaalmodel.
- Een zoutscherm levert geen reductie in de zoutflux door de schutsluizen op, maar een verhoging van de zoutflux door het spuikanaal. Hierdoor wordt de zoutflux naar het Noordzeekanaal verlaagd.

8 Referenties

1. *Zoutindringing Sluizen IJmuiden, effect nieuwe sluis op Noordzeekanaal*. 2011, Arcadis.
2. Weiler, O. and R.E. Uittenbogaard, *Beperking Zoutindringing bij aanleg Nieuwe Sluis IJmuiden, Fase 1: Eerste verkenning*. 2014, Deltares. 1209034-000-HYE-0002.
3. Van Banning, G., *Benodigd Debiet Verzilting ARK*. 2015, Arcadis: Zwolle.
4. Bijlsma, A. and R.E. Uittenbogaard, *Zoutindringing IJmuiden Fase 3 (Deltares ref. 1220309-000-HYE-0045), Bijlage I Correcties op Verkenning maatregelen beperken zoutlek Nieuwe Zeesluis IJmuiden*. 2015, Deltares: Delft.
5. Jongeling, T., *Zeetoegang IJmond, Nieuwe Zeesluis, Dichtheidsverschillen over de sluis, notitie t.b.v. voorbereiding Programma van Eisen (v01)*. 2013, RWS - Dienst Infrastructuur.
6. Kikkert, A., *Chloride in het Noordzeekanaal*. 2011, Rijkswaterstaat, WSA: Haarlem.
7. De Groot-Wallast, I. and D.J. Vreeken, *Validatierapport WANDA-Locks, het nieuwe zoutlekmodel*. 2016, Deltares: Delft. 1209463-000-HYE-0002.
8. Groenveld, R., *Simulatiestudie Capaciteit Zeetoegang Amsterdam-Noordzeekanaalgebied, Modelbeschrijving en resultaten*. 2008.
9. De Groot-Wallast, I., *KPP Verziltingsbestrijding: Inventarisatie schutsluizen RWS m.b.t. zoutindringing*. 2012, Deltares: Delft. 1206069-000-ZKS-0006.
10. OpenIJ, *Layout Nieuwe Zeesluis en kanalen*, N.b.m. Sluis.dwg, Editor. 2016.
11. Kikkert, *Zoutindringing IJmuiden Fase 3 (Deltares ref. 1220309-HYE-0045), Bijlage H Afvoerdebiet van het Noordzeekanaal*. 2015, Rijkswaterstaat West-Nederland Noord.

A Simulatie schuttingen PMSS

Opdrachtgever **Deltares**

Titel Schuttingen voor zoutbelasting Noordzeekanaal

Auteur ir. R. Groenveld

Januari 2016

PMSS

Inhoudsopgave

1 Inleiding *3*
2 Gegevens sluizen *4*
3 Registraties van de individuele schuttingen *5*
4 Simulatieresultaten *9*
4.1 Situatie 2005 9
4.2 Situatie met verkeersbelasting 95 mtpa 9
4.3 Situatie met verkeersbelasting 95 mpta met kopie van de Noordersluis 9
4.4 Situatie met verkeersbelasting 125 mtpa 9
Conclusies *10*

1 Inleiding

In opdracht van Deltares zijn simulaties uitgevoerd ter vaststelling van de toename van de zoutbelasting bij ingebruikname van de Nieuwe Zeesluis in IJmuiden.
Het hiervoor gebruikte model is ontwikkeld in de periode juni 2006 tot april 2009 onder begeleiding van vertegenwoordigers van Haven Amsterdam, Rijkswaterstaat Noord-Holland, Centraal Nautisch Beheer en het Loodswezen. Het uiteindelijke model is op basis van voortschrijdend inzicht betreffende de procesvoering rond het sluizencomplex in april 2009 uitgebreid geverifieerd en gevalideerd.

Ter bepaling van de toename van de zoutbelasting van het Noordzeekanaal zijn de individuele schuttingen geregistreerd gedurende een simulatieduur van 1 jaar.
De volgende scenario's zijn gesimuleerd:

1. Situatie 2005 waarop het model is gevalideerd;
2. Simulatie met 95 mtpa waarbij de Nieuwe Sluis is vervangen door een sluis met de afmetingen van de Noordersluis;
3. Situatie 95 mtpa met afmetingen van de Nieuwe Sluis van 70 m bij 500 m;
4. Situatie met 125 mtpa eveneens met afmetingen van de Nieuwe Sluis van 70 m bij 500 m.

2 Gegevens sluizen

De afmetingen van de sluizen zijn gegeven inTabel 1.

Tabel 1: Afmetingen sluizen

Sluis	Lengte in [m] tussen de deuren	Breedte in [m] tussen de wanden
Nieuwe Sluis	500	70
Noordersluis	400	50
Middensluis	225	25
Zuidersluis	120	18

Operationele tijden van de sluizen zijn:

Noordersluis:

Sluitingstijd deur	4 min.
Openingstijd deur	4 min
Omzettijd	12 min.
Invaarvolgtijd	6.7 min
Uitvaarvolgtijd	6.7 min

Middensluis;

Sluitingstijd deur	4 min.
Openingstijd deur	4 min.
Omzettijd	6 min.
Invaarvolgtijd	2,8 min.
Uitvaarvolgtijd	2,8 min.

Zuidersluis:

Sluitingstijd deur	2 min.
Openingstijd deur	2 min.
Omzettijd	3,5min
Invaarvolgtijd	1,5 min.
Uitvaarvolgtijd	1 min.

Nieuwe Sluis:

Sluitingstijd deur	4 min.
Openingstijd deur	4 min.
Omzettijd	12 min
Maximum invaarvolgtijd	7,7 min. (afhankelijk van afmeting schip)
Maximale uitvaarvolgtijd	7,7 min. (afhankelijk van afmeting schip)

3 Registraties van de individuele schuttingen.

Als voorbeeld zijn in Tabel 2 de eerste 24 schuttingen vermeld van de Noordersluis met de verkeers-belasting van 2005.
Voor alle scenario's zijn de gegevens van de schuttingen overeenkomstig Tabel 2.
De tijden in de tabellen zijn aangegeven in minuten.

In Tabel 1 zijn de volgende registraties vermeld:
Kolom 1:
Volgnummer van de schutting
Kolom 2:
Schutrichting, waarbij 1 staat voor richting Amsterdam (oostwaarts) en 2 richting zee (westwaarts).
Kolom 3:
Tijdstip waarop het eerste schip start vanaf de wachtplaats met vaarrichting sluis. Indien een 0 wordt getoond betekent dit dat dit een leegom schutting is (bv. schutting 4)
Kolom 4:
Tijdstip waaop het eerste schip in de sluis is aangekomen. Indien een 0 wordt getoond betekent dit dat dit een leegom schutting is.
Kolom 5:
Tijdstip waarop het laatste schip in de sluis is aangekomen. Indien een 0 wordt getoond betekent dit dat dit een leegom schutting is.
Kolom 6:
Tijdstip waarop de sluisdeur is gesloten
Kolom 7:
Tijdstip waarop de sluisdeur is geopend
Kolom 8:
Tijdstip waarop het eerste schip zich buiten de sluis bevindt. Indien een 0 wordt getoond betekent dit dat dit een leegom schutting is.
Kolom 9
Tijdstip waarop het laatste schip van de schutting zich buiten de sluis bevindt. Indien een 0 wordt ge-toond betekent dit dat dit een leegom schutting is.

Onder kolom "schip 1" wordt in de eerste kolom het type en in de tweede kolom de DWT van het betrefffende schip aangegeven.
Dus in schutting met volgnummer 11 zijn twee schepen geschut:
schip 1 met scheepstype 12 (tanker) en met een DWT van 40689 en
schip 2 met scheepstype 9 (motorvrachtschepen/duweenheden) en met een DWT van 5064.

Tabel 2: Voorbeeld registratie schuttingen

Noordersluis verkeersbelasting 2005

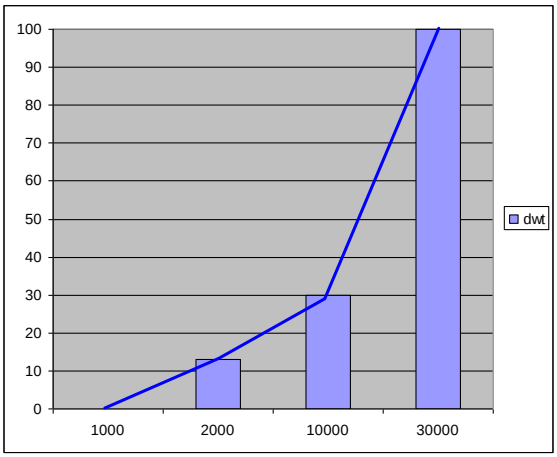
Volgnummer schutting	Schutrichting	Tijdstip eerste schip vaart richting sluis	Tijdstip eerste schip is in sluis	Tijdstip laatste schip is in sluis	Tijdstip sluisdeur is gesloten	Tijstip deur is geopend	Tijdstip eerste schip is buiten de sluis	Tijdstip laatste schip is buiten de sluis	Schepen per schutting met vloottype en dwt											
									schip 1		schip 2		schip 3		schip 4		schip 5		schip 6	
									Vloot	dwt	Vloot	dwt	Vloot	dwt	Vloot	dwt	Vloot	dwt	Vloot	dwt
1	1	238.4	267.6	267.6	271.6	287.6	292.8	292.8	12	58605										
2	2	292.9	304.8	304.8	308.8	324.8	328.0	328.0	9	5064										
3	1	334.0	353.5	353.5	357.5	373.5	377.4	377.4	13	8644										
4	2	0.0	0.0	0.0	456.7	472.7	0.0	0.0												
5	1	473.8	493.3	493.3	497.3	513.3	517.2	517.2	4	8893										
6	2	676.3	688.2	688.2	692.2	708.2	711.4	711.4	9	4090										
7	1	980.0	1000.5	1000.5	1004.5	1020.5	1025.3	1025.3	11	23224										
8	2	0.0	0.0	0.0	1300.7	1316.7	0.0	0.0												
9	1	1318.8	1338.3	1338.3	1342.3	1358.3	1362.2	1362.2	6	9850										
10	2	0.0	0.0	0.0	1365.2	1381.2	0.0	0.0												
11	1	1382.3	1405.9	1413.4	1417.4	1433.4	1438.3	1441.5	12	40689	9	5064								
12	2	0.0	0.0	0.0	1551.7	1567.7	0.0	0.0												
13	1	1569.8	1588.2	1588.2	1592.2	1608.2	1612.0	1612.0	6	8441										
14	2	0.0	0.0	0.0	1715.3	1731.3	0.0	0.0												
15	1	1739.4	1769.2	1769.2	1773.2	1789.2	1795.0	1795.0	5	57713										
16	2	0.0	0.0	0.0	1877.3	1893.3	0.0	0.0												
17	1	1894,3	1923.5	1923.5	1927.5	1943.5	1948.7	1948.7	3	59093										
18	2	1948.8	1960.7	1963.1	1967.1	1983.1	1986.3	1990.2	9	1990	4	8893								
19	1	1990.3	2013.9	2013.9	2017.9	2033.9	2038.8	2038.8	3	42793										
20	2	0.0	0.0	0.0	2041.8	2057.8	0.0	0.0												
21	1	2058.9	2082.7	2082.7	2086.7	2102.7	2107.8	2107.8	3	51154										
22	2	0.0	0.0	0.0	2110.8	2126.8	0.0	0.0												
23	1	2127.9	2146.7	2146.7	2150.7	2166.7	2170.8	2170.8	6	15065										
24	2	0.0	0.0	0.0	2173.8	2189.8	0.0	0.0												

Om het uitwisselingsprocess goed te kunnen beschrijven is informatie over de afmetingen van de schepen per schutting wenselijk.
Hiertoe worden per schutting voor ieder schip het type en de DWT geregistreerd.
Voor de vertaling naar de afmetingen van het schip zijn in
Tabel 4 (deze tabel is ook als Excel file bijgevoegd) per scheepstype de lengte, breedte en diepgang aangegeven voor een reeks van DWT's.
Benadrukt dient te worden dat de tabel (opgesteld door Alkyon in 2007) **de maximale** diepgang geeft. In het model is de actuele diepgang van het schip niet meegenomen.
In het simulatiemodel wordt aan de schepen die de sluizen passeren een sluisklasse toegekend, m.a.w door welke sluizen de schepen mogen worden geschut.
De sluisklasse is afhankelijk van de lengte, breedte en de maximale diepgang; echter de werkelijke diepgang kan en zal in vele gevallen duidelijk afwijken van de maximale diepgang.

Bij het genereren van de schepen wordt gebruik gemaakt van de DWT-verdeling van een scheepstype per bestemming. Indien een bepaald type schip met een bepaalde bestemming wordt gegenereerd wordt een random trekking gedaan uit de DWT-verdeling van dit type met een bepaalde bestemming.
Uit de DWT volgt dan op basis van tabel 2 een lengte en een breedte, door een lineaire interpolatie (zie ook tabel 3 en figuur 1).

Tabel 3: Invoergegevens Autoschepen

1000	0	DWT; cum. perc.
80		lengte
14		breedte
4		diepgang
2000	13	DWT; cum. perc.
100		lengte
18		breedte
5		diepgang
10000	30	DWT; cum. perc.
170		lengte
29		breedte
8.5		diepgang
30000	100	DWT; cum. perc.
220		lengte
32		breedte
10		diepgang



Figuur 1: Cumulatieve verdeling DWT autoschepen

Tabel 4: Afmetingen schepen per DWT

Afmetingen vloten

	vlootnummer										
Autoschepen	1										
		dwt	800	1000	2000	10000	30000	55000	80000	120000	200000	
		lengte [m]	60	80	100	170	220	220	240	260	300	
		breedte [m]	10	14	18	29	32	32	32	42	46	
		max. diepgang [dm]	25	40	50	85	100	131	140	160	190	
Bevoorradingsschepen	2											
		dwt	800	1000	2000	10000	30000	55000	80000	120000	200000	
		lengte [m]	50	60	70	130	180	220	240	260	300	
		breedte [m]	10	13	15	20	26	32	32	42	46	
		max. diepgang [dm]	35	50	5	75	100	131	140	160	190	
Bulkcarriers	3											
		dwt	800	1000	2000	10000	30000	55000	80000	120000	200000	350000
		lengte [m]	60	70	80	120	180	220	240	260	300	375
		breedte [m]	10	12	13	18	26	32	32	42	46	57
		max. diepgang [dm]	25	30	35	80	105	131	140	160	190	230
Chemical Tankers	4											
		dwt	800	1000	2000	10000	30000	55000	80000	120000	200000	
		lengte [m]	50	60	70	130	180	190	240	260	300	
		breedte [m]	8	10	13	20	28	32	32	42	46	
		max. diepgang [dm]	35	40	45	80	105	131	140	160	190	
Containers	5											
		dwt	800	1000	2000	10000	30000	55000	80000	120000	165000	
		lengte [m]	50	70	100	130	190	290	300	300	398	
		breedte [m]	8	10	11	18	30	38	40	42	56.4	
		max. diepgang [dm]	25	30	35	60	105	131	140	150	160	
Conventionele Vrachtschepen	6											
		dwt	800	1000	2000	10000	30000	55000	80000	120000	200000	
		lengte [m]	60	75	90	130	180	210	240	260	300	
		breedte [m]	10	12	13	19	29	32	32	42	46	
		max. diepgang [dm]	25	30	35	80	105	131	140	160	190	
Cruise schepen	7											
		dwt	800	1000	2000	10000	30000	55000	80000	120000	200000	
		lengte [m]	60	120	150	280	290	295	300	300	300	
		breedte [m]	10	15	20	32	32	32	32	42	46	
		max. diepgang [dm]	25	50	60	85	105	131	140	160	190	
Duwbakken wordt niet gebruikt	8											
motorvrachtschepen/ duw eenheden	9											
		dwt	800	1000	2000	3999	4000	5999	6000	10000		
		lengte [m]	35	67	110	135	185	185	185	185		
		breedte [m]	5	8,2	11,4	11,4	11,4	11,4	22,8	22,8		
		max. diepgang [dm]	22	25	30	35	35	35	35	40		
Refrigerated cargo	10											
		dwt	800	1000	2000	10000	30000	55000	80000	120000	200000	
		lengte [m]	50	70	80	150	180	220	240	260	300	
		breedte [m]	8	12	14	22	27	32	32	42	46	
		max. diepgang [dm]	35	45	50	90	120	131	140	160	190	
RoRo of Ferry	11											
		dwt	800	1000	2000	10000	30000	55000	80000	120000	200000	
		lengte [m]	60	65	75	150	200	220	240	260	300	
		breedte [m]	10	12	14	22	32	32	32	42	46	
		max. diepgang [dm]	25	40	50	80	105	131	140	160	190	
Tankers	12											
		dwt	800	1000	2000	10000	30000	55000	80000	120000	200000	
		lengte [m]	60	70	80	120	180	190	240	250	300	
		breedte [m]	10	12	13	20	27	32	32	42	46	
		max. diepgang [dm]	25	30	35	80	105	131	140	160	190	
Zandzuigers	13											
		dwt	800	1000	2000	10000	30000	55000	80000	120000	200000	
		lengte [m]	60	70	80	120	180	220	240	260	300	
		breedte [m]	10	12	13	20	20	32	32	42	46	
		max. diepgang [dm]	25	30	35	80	105	131	140	160	190	
Sleepboten	14											
		dwt	300	308	1000	2000						
		lengte [m]	20	20	28,6	30,3						
		breedte [m]	5,5	5,5	9,2	11,5						
		max. diepgang [dm]	28	30	40	58						
Woodships	15											
		dwt					30000	55000	80000	120000		
		lengte [m]					180	220	240	260		
		breedte [m]					26	32	34	42		
		max. diepgang [dm]					105	131	140	160		

4 Simulatieresultaten

4.1 Situatie 2005

De schuttingen van het jaar 2005 zijn gegeven in de Excel files:

1. Zuidersluis jaar 2005;
2. Middensluis jaar 2005 en
3. Noordersluis jaar 2005.

4.2 Situatie met verkeersbelasting 95 mtpa

De schuttingen met een verkeersbelasting van 95 mtpa, waarbij de Noordersluis buiten werking is, zijn gegeven in de Excel files:

1. Zuidersluis 95 mta;
2. Middensluis 95 mta en
3. Nieuwe Sluis 95 mta.

4.3 Situatie met verkeersbelasting 95 mpta met kopie van de Noordersluis

In deze situatie wordt met een verkeersbelasting van 95 mtpa met de Zuidersluis, de Middensluis en een kopie van de Noordersluis gesimuleerd.
De schutting zijn vermeld in de Excel files:

1. Zuidersluis 95 mta met kopie NS;
2. Middensluis 95 mta met kopie NS en
3. Nieuwe Sluis 95 mta (kopie Noordersluis).

4.4 Situatie met verkeersbelasting 125 mtpa

De schuttingen met een verkeersbelasting van 95 mtpa, waarbij de Noordersluis buiten werking is, zijn gegeven in de Excel files:

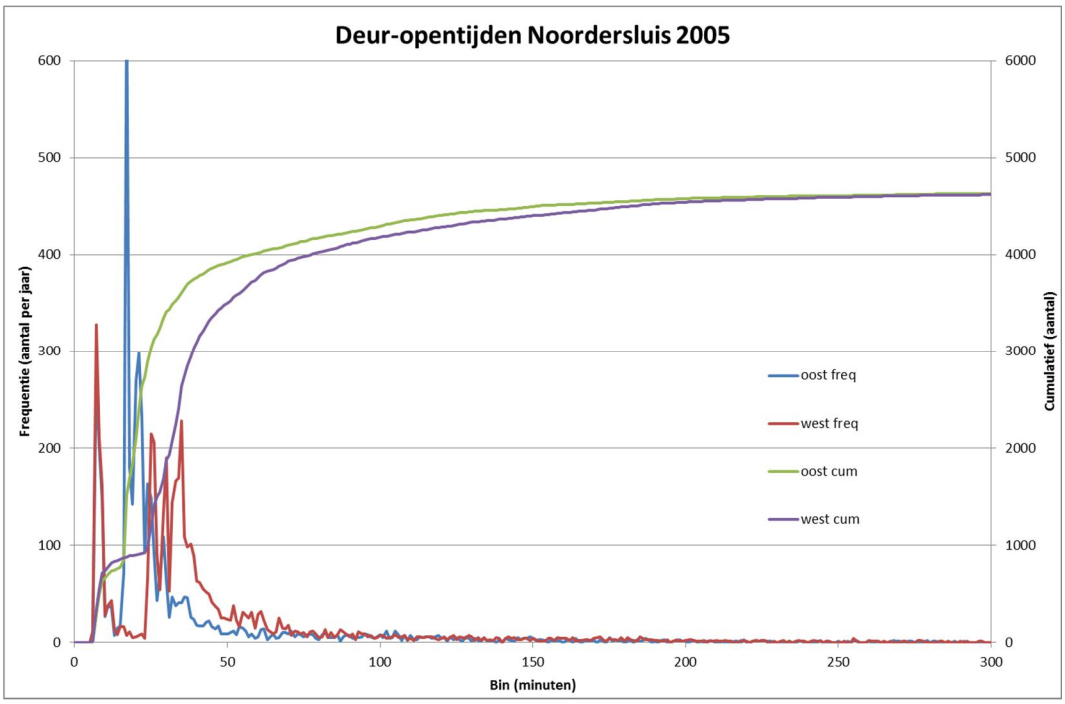
1. Zuidersluis 125 mta;
2. Middensluis 125 mta en
3. Nieuwe Sluis 125 mta.

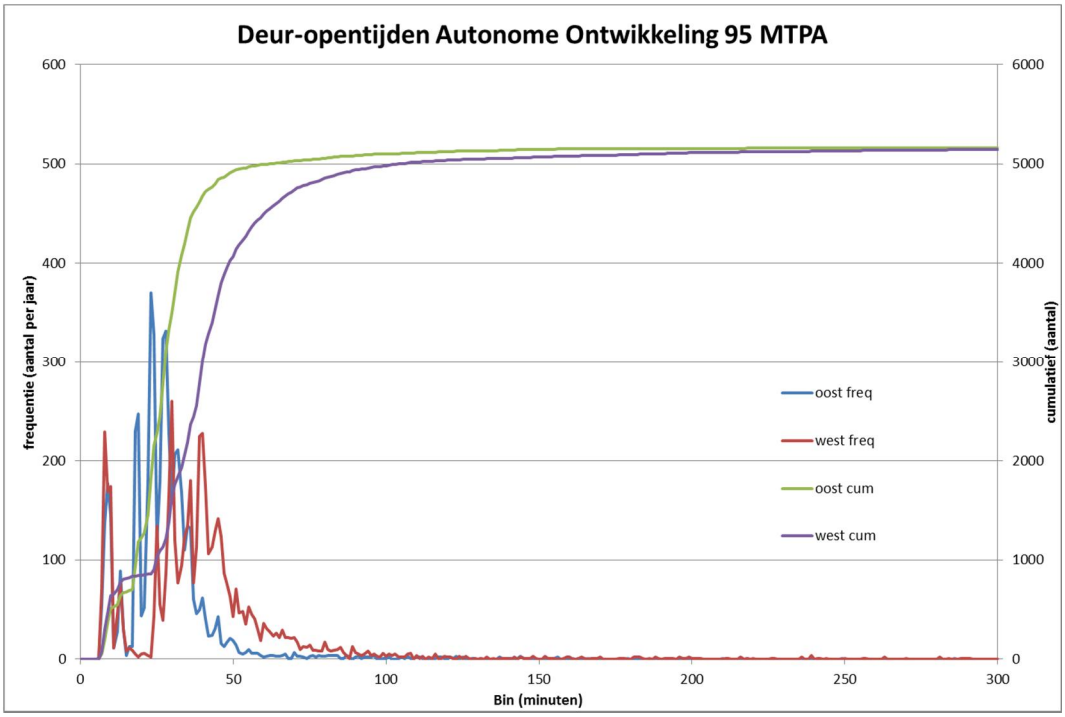
Conclusies

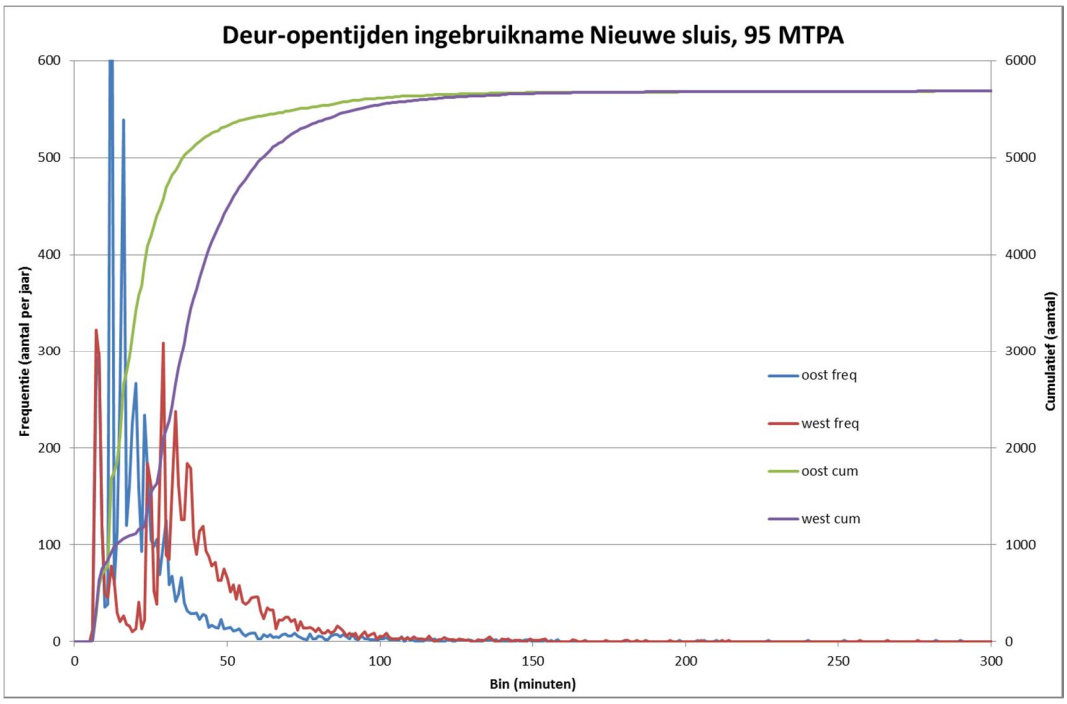
1. De in Tabel 4 vermelde maximale diepgang van de schepen kunnen niet direct worden gebruikt als invoer bij de uitwisselingsberekeningen daar de actuele diepgang veelal zal afwijken van de maximale diepgang.

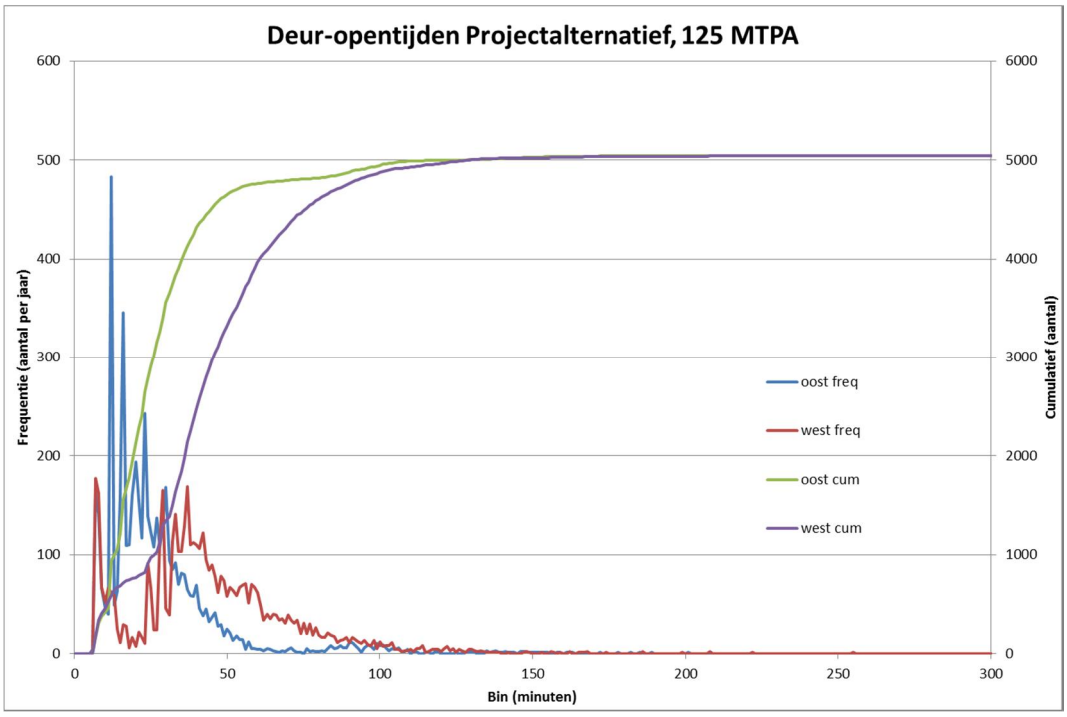
2. Het simulatiemodel van het sluizencomplex IJmuiden is stochastisch van aard. Dit betekent dat de aankomsten van schepen onderhevig zijn aan random fluctuaties. Zoals gesteld zijn de schuttingen geregistreerd voor een simulatieduur van 1 jaar. Indien meerdere jaren worden gesimuleerd met dezefde invoergegevens zullen de schuttingen per jaar verschillen. Echter de variatie van het totaal aantal schuttingen per sluis bedraagt slechts enkele procenten.

B Verdeling deur-opentijden






Deur-opentijden ingebruikname Nieuwe sluis, 95 MTPA
Frequentie (aantal per jaar)
Cumulatief (aantal)
Bin (minuten)
oost freq
west freq
oost cum
west cum
0
100
200
300
400
500
600
1000
2000
3000
4000
5000
6000
0
50
100
150
200
250
300


Deur-opentijden Projectalternatief, 125 MTPA
Frequentie (aantal per jaar)
Cumulatief (aantal)
Bin (minuten)
oost freq
west freq
oost cum
west cum
0
100
200
300
400
500
600
1000
2000
3000
4000
5000
6000
0
50
100
150
200
250
300

C Geometrische parameters model

Tabel 8.1 Geometrische invoerparameters reservoirs 2005

Eigenschap	Eenheid	Waarde	Opmerking
Reservoir zeezijde			
Oppervlakte	m^2	673900	
Bodem	m NAP	-13.08	
Mondingbreedte (met zeezijde)	m	720	
Mondingdiepte	m	-13.08	
Spuikanaal zeezijde			
Oppervlakte	m^2	65440	
Bodem	m NAP	-7.08	
Mondingbreedte (met reservoir zeezijde)	m	87	
Voorhaven Noordersluis zeezijde			
Oppervlakte	m^2	209300	
Bodem	m NAP	-11.43	
Mondingbreedte (met reservoir zeezijde)	m	199	
Mondingdiepte	m	-15.4	
Voorhaven Middensluis zeezijde			
Oppervlakte	m^2	38850	
Bodem	m NAP	-6.75	
Mondingbreedte (met reservoir zeezijde)	m	70	
Mondingdiepte	m	-11	
Voorhaven Zuidersluis zeezijde			
Oppervlakte	m^2	23620	
Bodem	m NAP	-5.58	
Mondingbreedte (met reservoir zeezijde)	m	75	
Mondingdiepte	m	-8	
Spuikanaal kanaalzijde			
Oppervlakte	m^2	171300	
Bodem	m NAP	-7.37	
Mondingbreedte (met reservoir Noordzeekanaal)	m	94	
Voorhaven Noordersluis kanaalzijde			
Oppervlakte	m^2	88930	
Bodem	m NAP	-11.21	
Mondingbreedte (met	m	219	

reservoir Noordzeekanaal)			
Mondingdiepte	m	-15.4	
Voorhaven Middensluis kanaalzijde			
Oppervlakte	m^2	90440	
Bodem	m NAP	-6.05	
Mondingbreedte (met reservoir Noordzeekanaal)	m	93	
Mondingdiepte	m	-10.4	
Voorhaven Zuidersluis kanaalzijde			
Oppervlakte	m^2	127800	
Bodem	m NAP	-5.39	
Mondingbreedte (met reservoir Noordzeekanaal)	m	93	
Mondingdiepte	m	-7.4	
Reservoir Noordzeekanaal			
Oppervlakte	m^2	452800	
Bodem	m NAP	-10.92	
Mondingbreedte (met Noordzeekanaal)	m	311	
Mondingdiepte	m	-10.92	

Tabel 8.2 Geometrische invoerparameters reservoirs autonome ontwikkeling

Eigenschap	Eenheid	Waarde	Opmerking
Reservoir zeezijde			
Oppervlakte	m^2	72900	
Bodem	m NAP	-13.92	
Mondingbreedte (met zeezijde)	m	720	
Mondingdiepte	m	-13.92	
Spuikanaal zeezijde			
Oppervlakte	m^2	65440	
Bodem	m NAP	-7.08	
Mondingbreedte (met reservoir zeezijde)	m	87	
Voorhaven Noordersluis zeezijde			
Oppervlakte	m^2	209300	
Bodem	m NAP	-11.43	
Mondingbreedte (met reservoir zeezijde)	m	199	
Mondingdiepte	m	-15.4	
Voorhaven Middensluis zeezijde			
Oppervlakte	m^2	38850	
Bodem	m NAP	-6.75	
Mondingbreedte (met reservoir zeezijde)	m	70	
Mondingdiepte	m	-11	
Voorhaven Zuidersluis zeezijde			
Oppervlakte	m^2	23620	
Bodem	m NAP	-5.58	
Mondingbreedte (met reservoir zeezijde)	m	75	
Mondingdiepte	m	-8	
Spuikanaal kanaalzijde			
Oppervlakte	m^2	171300	
Bodem	m NAP	-7.37	
Mondingbreedte (met reservoir Noordzeekanaal)	m	94	
Voorhaven Noordersluis kanaalzijde			
Oppervlakte	m^2	88930	
Bodem	m NAP	-11.21	
Mondingbreedte (met reservoir Noordzeekanaal)	m	219	
Mondingdiepte	m	-15.4	
Voorhaven Middensluis kanaalzijde			

Oppervlakte	m^2	90440	
Bodem	m NAP	-6.05	
Mondingbreedte (met reservoir Noordzeekanaal)	m	93	
Mondingdiepte	m	-10.4	
Voorhaven Zuidersluis kanaalzijde			
Oppervlakte	m^2	127800	
Bodem	m NAP	-5.39	
Mondingbreedte (met reservoir Noordzeekanaal)	m	93	
Mondingdiepte	m	-7.4	
Reservoir Noordzeekanaal			
Oppervlakte	m^2	452800	
Bodem	m NAP	-10.92	
Mondingbreedte (met Noordzeekanaal)	m	311	
Mondingdiepte	m	-10.92	

Tabel 8.3 Geometrische invoerparameters reservoirs inbedrijfstelling en projectalternatief

Eigenschap	Eenheid	Waarde	Opmerking
Reservoir zeezijde			
Oppervlakte	m^2	700100	
Bodem	m NAP	-13.96	
Mondingbreedte (met zeezijde)	m	720	
Mondingdiepte	m	-13.96	
Spuikanaal zeezijde			
Oppervlakte	m^2	65440	
Bodem	m NAP	-7.06	
Mondingbreedte (met reservoir zeezijde)	m	87	
Voorhaven Nieuwe Zeesluis zeezijde			
Oppervlakte	m^2	230700	
Bodem	m NAP	-10.22	
Mondingbreedte (met reservoir zeezijde)	m	152	
Mondingdiepte	m	-18.2	
Voorhaven Middensluis zeezijde			
Oppervlakte	m^2	38850	
Bodem	m NAP	-6.74	
Mondingbreedte (met reservoir zeezijde)	m	70	
Mondingdiepte	m	-11	
Voorhaven Zuidersluis zeezijde			
Oppervlakte	m^2	23620	
Bodem	m NAP	-5.59	
Mondingbreedte (met reservoir zeezijde)	m	75	
Mondingdiepte	m	-8	
Spuikanaal kanaalzijde			
Oppervlakte	m^2	171300	
Bodem	m NAP	-8.17	
Mondingbreedte (met reservoir Noordzeekanaal)	m	94	
Voorhaven Nieuwe Zeesluis kanaalzijde			
Oppervlakte	m^2	68970	
Bodem	m NAP	-12.05	
Mondingbreedte (met reservoir Noordzeekanaal)	m	203	
Mondingdiepte	m	-18.2	
Voorhaven Middensluis kanaalzijde			

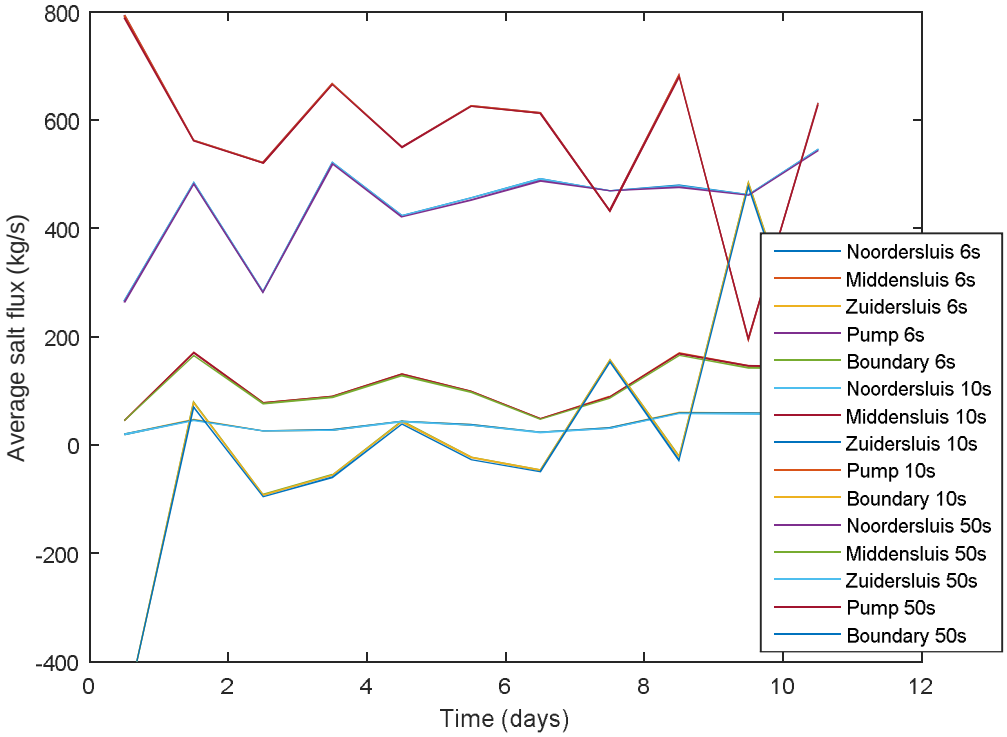
Oppervlakte	m^2	22960	
Bodem	m NAP	-7.45	
Mondingbreedte (met reservoir Zuider- en Noordersluis)	m	89.3	
Mondingdiepte	m	-10.4	
Voorhaven Zuidersluis kanaalzijde			
Oppervlakte	m^2	84840	
Bodem	m NAP	-6.0	
Mondingbreedte (met reservoir Zuider- en Noordersluis)	m	88.1	
Mondingdiepte	m	-7.4	
Voorhaven Zuider- en Middensluis kanaalzijde			
Oppervlakte	m^2	198900	
Bodem	m NAP	-6.82	
Mondingbreedte (met reservoir Noordzeekanaal)	m	146	
Mondingdiepte	m	-10.4	
Reservoir Noordzeekanaal			
Oppervlakte	m^2	377130	
Bodem	m NAP	-12.6	
Mondingbreedte (met Noordzeekanaal)	m	311	
Mondingdiepte	m	-12.6	

D Gevoeligheidsanalyse

D.1 Tijdstapgevoeligheid

Allereerst wordt de tijdstapgevoeligheid van het model getest. Er is een analyse uitgevoerd voor een tijdstap van 6, 10 en 50 seconde. De kleinste tijdstap van 6 seconde is gelijk gekozen aan de kleinste tijdstap van de input data. In Figuur D.1 worden de gemiddelde waarden per dag weergegeven van de verschillende zoutfluxen. Voor de sluizen is de flux positief naar binnen (naar het kanaal toe). 'Pump' staat voor de zoutflux door het spui en het pompstation. Hiervan is de flux positief naar buiten (zeewaarts). 'Boundary' staat voor de hoeveelheid zout die het model gebied verlaat richting het kanaal. Bij een negatieve waarde wordt er dus meer zout onttrokken aan het kanaal dan er naartoe wordt getransporteerd.

Het verschil in zoutflux voor de verschillende tijdstappen is verwaarloosbaar. Daarom kan een tijdstap tot en met 50 seconde gezien worden als aanvaardbaar. Dit is een belangrijk gegeven, want hiermee kan de rekentijd beperkt worden.



Figuur D.1 Case c008, 27 psu tegenover 7 psu met een tijdstap van 6, 10 en 50 seconde

Tabel D.1 Zoutflux bij verschillende tijdstap grotes voor case c008.

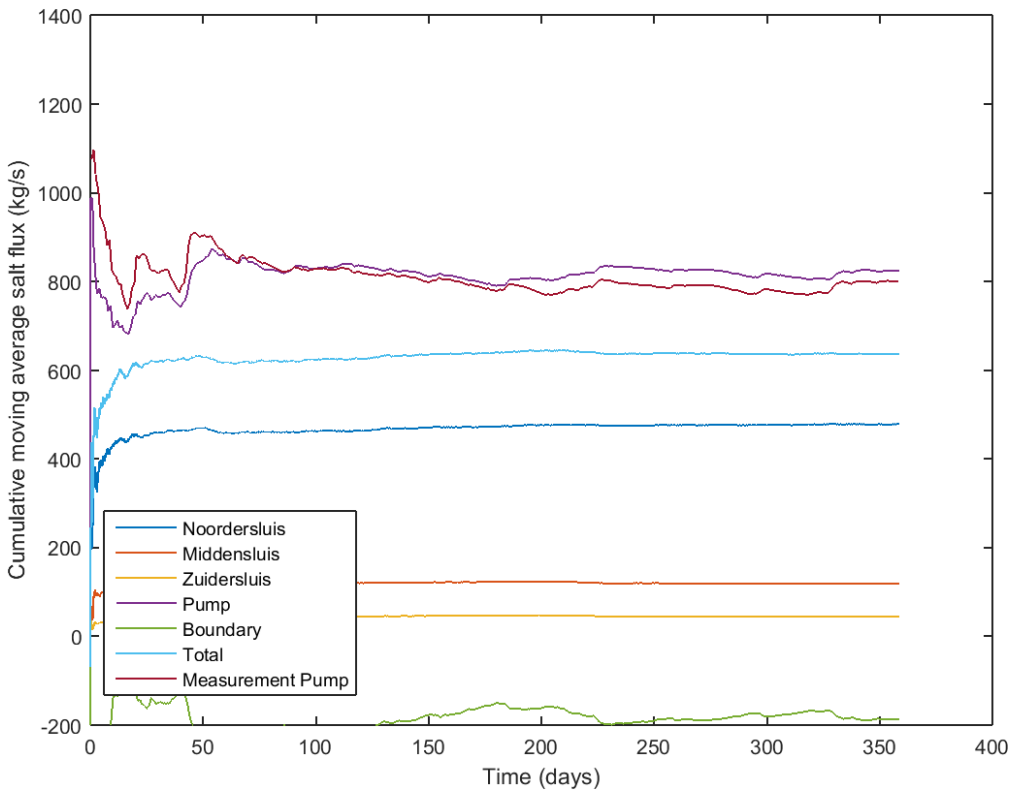
	Zoutflux tijdstap 6s (kg/s)	Zoutflux tijdstap 10s (kg/s)	Zoutflux tijdstap 50s (kg/s)
Noordersluis	444	444	442
Middensluis	111	111	109
Zuidersluis	39.9	39.6	38.8
Totaal sluizen	595	59	589
Spuikanaal	575	575	574
Rand	10.4	9.7	5.26

D.2 Invloed randvoorwaardes saliniteit

Het uitgangspunt voor deze paragraaf is case c001. De vergelijkingen van de verschillende cases vinden allemaal plaats met deze case. c001 heeft aan de zeezijde een randvoorwaarde van de saliniteit van 27 psu en aan de kanaalzijde een randvoorwaarde van 7 psu. Figuur D.2 toont voor deze situatie de cumulatief voortschrijdend gemiddelde zoutflux door de verschillende delen van het sluizencomplex. Een overzicht van de geanalyseerde cases (voor de randvoorwaarde) staat in Tabel D.2

Naam	Saliniteit Zeezijde	Saliniteit Kanaalzijde	Afvoer via spuikanaal (%)
c001	27	7	100
c002	27	5	100
c003	27	9	100
c004	29	7	100
c005	25	7	100
c006	30	5	100
c007	26	7	80
c008	27	7	80
c009	30	6,5	100
c010	30	6	100

Tabel D.2 Overzicht cases voor de randvoorwaarde voor de saliniteit en het debiet van de pomp in WANDA als percentage van de gemeten afvoer via het spuikanaal.



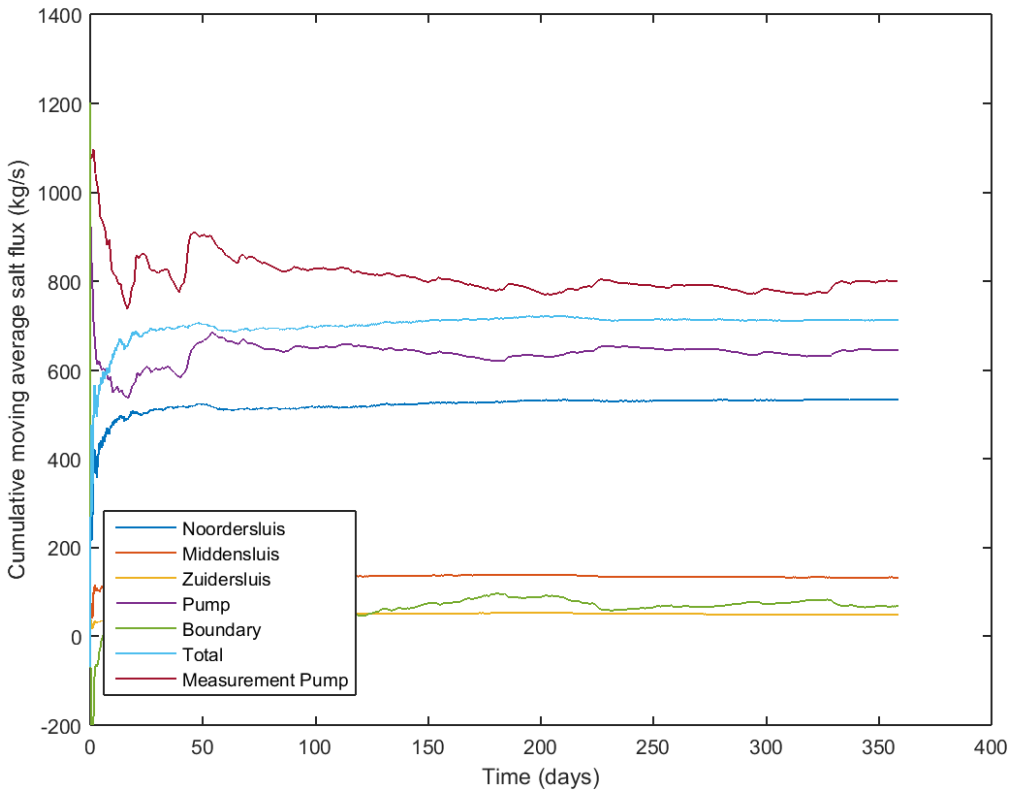
Figuur D.2 Case c001, randvoorwaarde 27 en 7 psu

De groene “Boundary” lijn geeft aan hoeveel zout de rand aan de kanaalzijde uitstroomt. In dit geval stroomt er gemiddeld over een heel jaar zon 190 kg/s vanuit de rand het model in. Dit zou echter ongeveer nul moeten zijn. Dat betekent namelijk dat het kanaal niet zouter of zoeter wordt over de periode van een jaar.

Verder geeft de lichtblauwe “Total” lijn aan hoeveel zout er door de drie gemodelleerde sluizen het kanaal op komt. Dat is in dit geval ongeveer 640 kg/s. Dit is significant minder dan de afgevoerde hoeveelheid zout, welke wordt aangegeven met de paarse “Pump” lijn. Deze lijn geeft aan hoeveel zout er door het spui en het gemaal wordt afgevoerd richting zee. Het verschil wordt aangevuld door de zoutflux vanuit de rand.

In het spuikanaal zijn metingen van de saliniteit verricht in 2005. Daarnaast is het debiet van het spui en het gemaal bepaald. Deze zijn vermenigvuldigd en worden getoond met de donkerrode “Measurement pump” lijn in Figuur D.2. Deze komt in grote mate overeen met de berekende zoutflux door het spuikanaal.

Om de gevoeligheid van het model voor de randvoorwaarde te testen, wordt de randvoorwaarde voor de saliniteit in het model in stappen gewijzigd.



Figuur D.3 Case c002, randvoorwaarde 27 en 5 psu

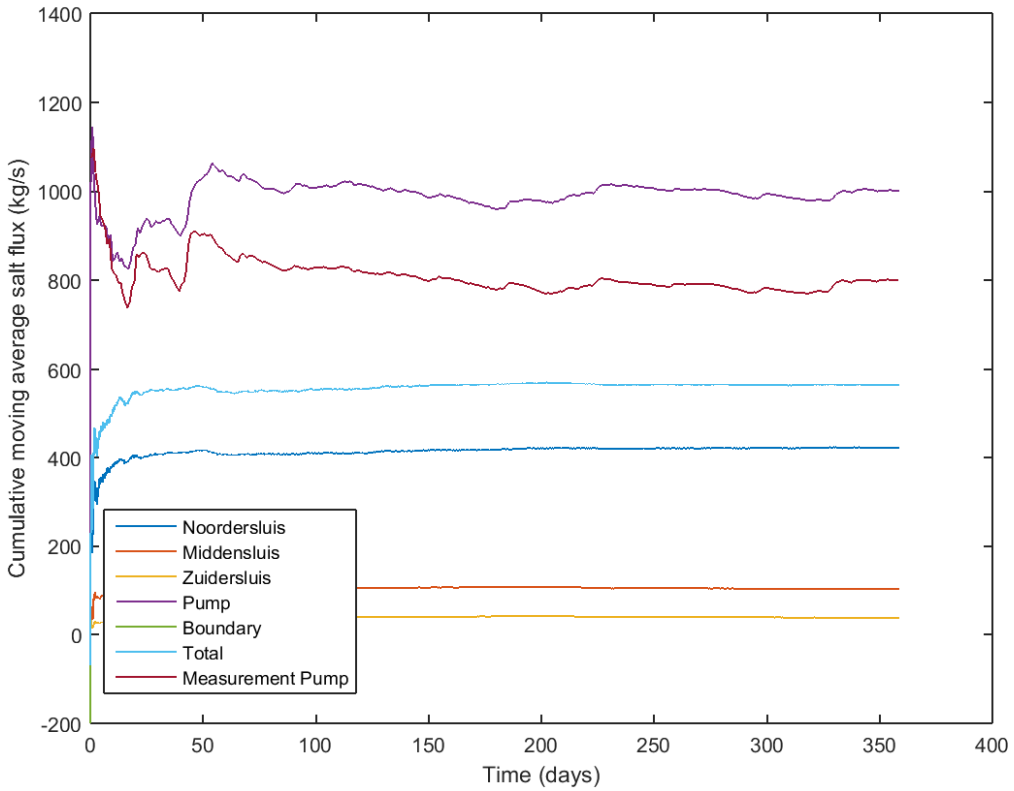
Figuur D.3 toont het verloop van de zoutfluxen wanneer de randvoorwaarde van de saliniteit aan de kanaalzijde wordt verlaagd naar 5 psu. In dat geval neemt het transport door de sluizen toe, maar het transport door het spui neemt af.

De saliniteit in de rechter voorhaven gaat naar een lagere waarde: van 8.5 naar 6.6 psu. Dit komt door de directe verbinding met de verlaagde randvoorwaarde. Dit water met een lage

saliniteit wordt getransporteerd door het spui naar de voorhaven aan de andere zijde. Hierdoor verlaagt de saliniteit in de linkervoorhaven van 24.9 naar 24.7 psu, Het dichtheidsverschil over de sluis is dus sterk toegenomen. Daardoor verhoogt de zoutflux door de sluis. Het transport door de spui is echter alleen afhankelijk van de dichtheid aan de rechterzijde, aangezien die omlaag is gegaan, is ook het zouttransport daar omlaag gegaan.

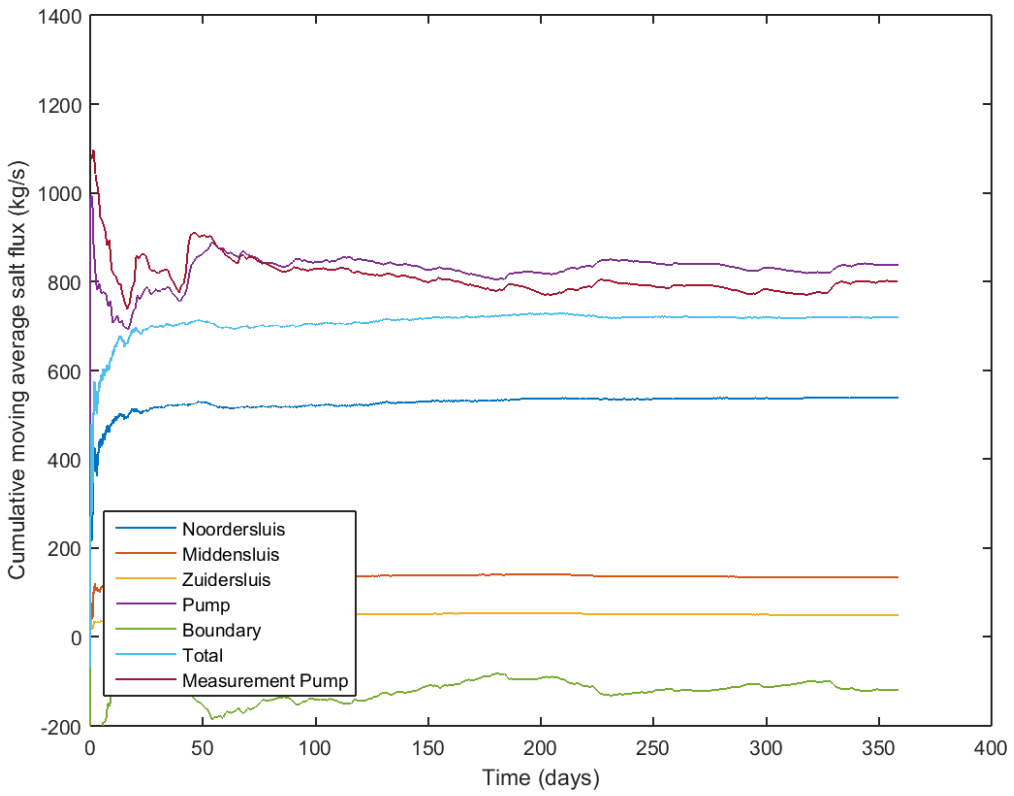
Daarnaast is de zouttransport door de rand toegenomen (deze was negatief en is nu positief), doordat het dichtheidsverschil tussen rechter voorhaven en de rand groter is geworden. Dit zorgt voor een verhoging van de dispersie richting het kanaal. Het totaal van de zoutflux over de rand, de som van de dispersie richting het kanaal de afvoer van zout door het afvoerdebiet, komt hierdoor dichter bij nul.

Figuur D.4 toont dat de omgekeerde redenering ook geldt. Wanneer de dichtheid aan de rechterzijde wordt verhoogd, neemt de zoutflux door de sluizen af en de zoutflux door het spui toe.



Figuur D.4 Case c003, randvoorwaarde zeezijde 27 psu en kanaalzijde 9 psu

Het is ook mogelijk om de saliniteit aan de zeezijde te wijzigen. In Figuur D.5 wordt getoond wat de invloed is van het verhogen van de saliniteit aan de zeezijde.



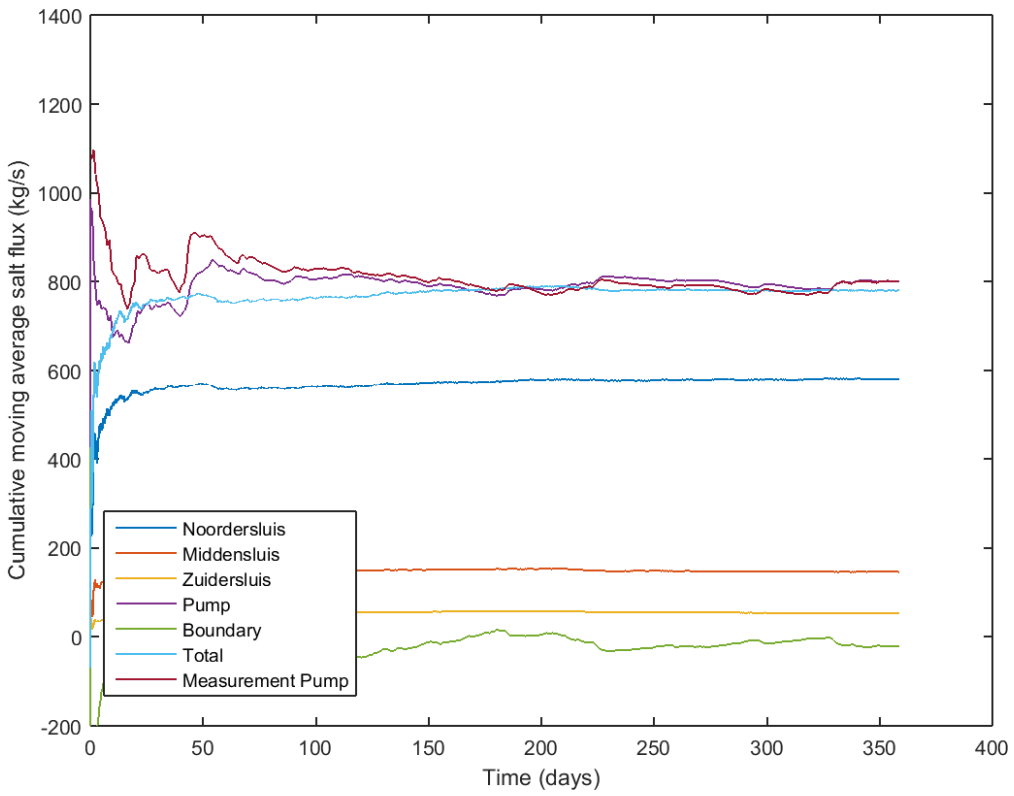
Figuur D.5 Case c004, randvoorwaarde zeezijde 29 psu en kanaalzijde 7 psu

In dit geval neemt de zoutflux door zowel de sluizen als door het spui toe. Dit kan worden verklaard door het feit dat de saliniteit in de linker voorhaven verhoogt van 24.9 naar 26.7 psu. Hierdoor neemt het transport door de sluis toe en wordt de saliniteit in de rechter voorhaven verhoogd van 8.5 naar 8.6 psu. Dit verhoogt de zoutflux door het spui en door de rand in geringe mate.

Uit verdere, niet getoonde analyses blijkt dat wanneer de randvoorwaarde aan de zeezijde verlaagd wordt, de zoutflux door de sluizen toe neemt en door het spui en de rand af.

c001 gaf geen sluitende zoutbalans. De zoutflux door het spui was van de juiste orde grootte, maar de zoutflux door de sluizen was te laag. Op basis van de gevoeligheidsanalyse die hierboven is gemaakt, kan worden bepaald op welke wijze de randvoorwaarden moeten worden aangepast om sluitend model te vormen.

De zoutflux door de sluizen kan worden verhoogd door ofwel de saliniteit aan de linkerzijde te verhogen ofwel de saliniteit aan rechterzijde te verlagen. Wanneer de saliniteit aan de rechterzijde wordt verlaagd zal het transport door de rand ook afnemen. Dit transport is echter al negatief in c001. Daarom moet de saliniteit aan de rechterzijde worden verhoogd.



Figuur D.6 Case c009, randvoorwaarde zeezijde 30 psu en kanaalzijde 6,5 psu

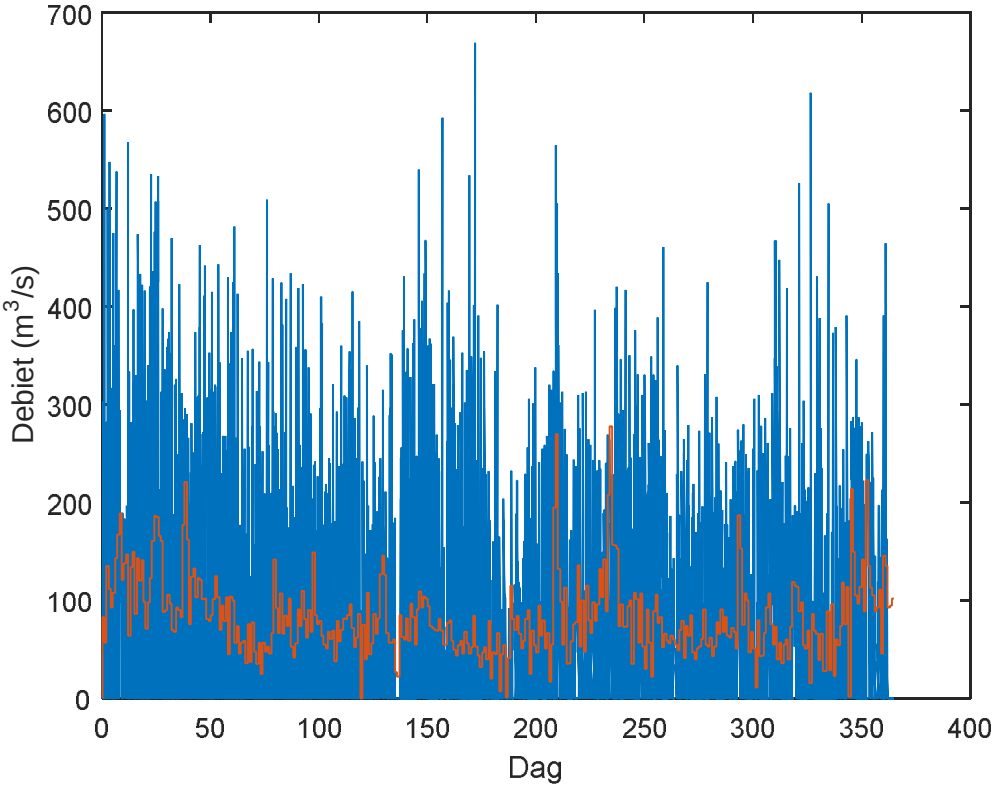
In case c009 is er voor gekozen om de randvoorwaarde aan de zeezijde op 30 psu te zetten en aan de kanaalzijde op 6,5 psu. Het resultaat hiervan wordt getoond in Figuur D.6. Dit leidt tot een sluitende zoutbalans. Een overzicht van de resultaten is te vinden in Tabel D.3

Naam	Zoutflux door de sluizen (kg/s)	Zoutflux door het spui (kg/s)	Zoutflux naar het Noordzeekanaal (kg/s)
c001	637	824	-187
c002	712	646	67
c003	563	1002	-439
c004	719	838	-119
c005	557	809	-252
c006	837	667	171
c007	604	659	-56
c008	648	665	-18
c009	780	800	-21
c010	799	756	43

Tabel D.3 Resultaten van de verschillende cases.

D.3 Invloed spui moment

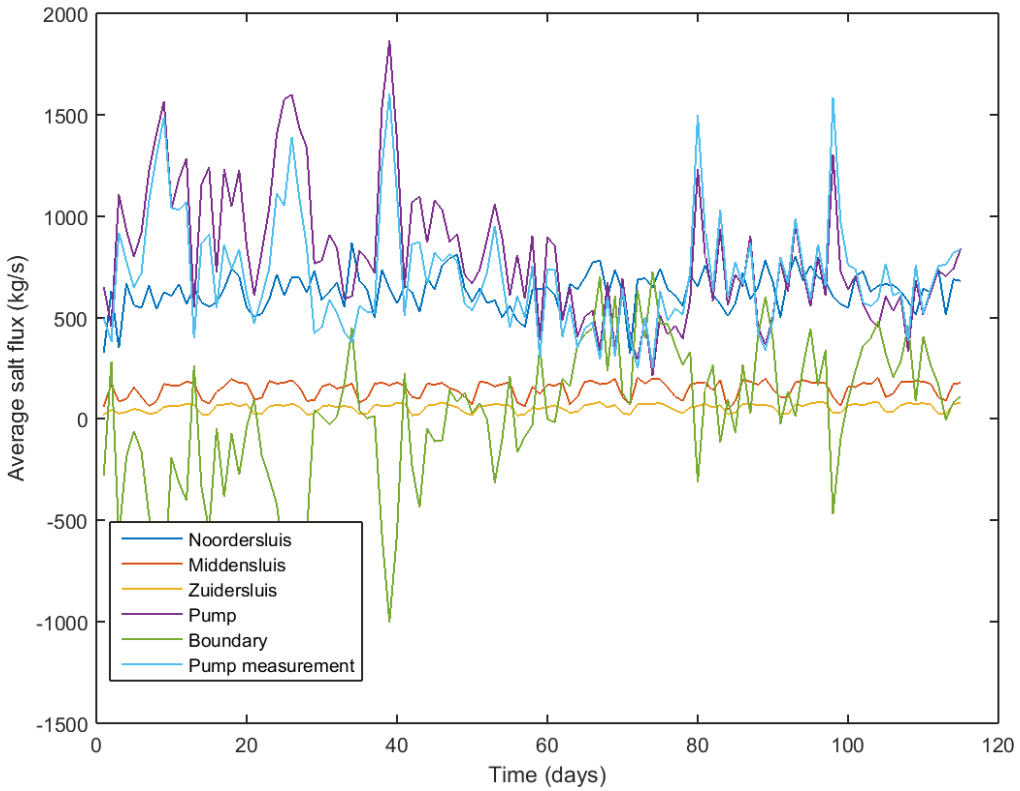
Voor het jaar 2005 zijn alleen de daggemiddelde spui debieten bekend. Van het jaar 2014 is elke tien minuten het debiet bepaald. Het verschil tussen het gemiddelde voor een dag en voor tien minuten wordt getoond in Figuur D.7.



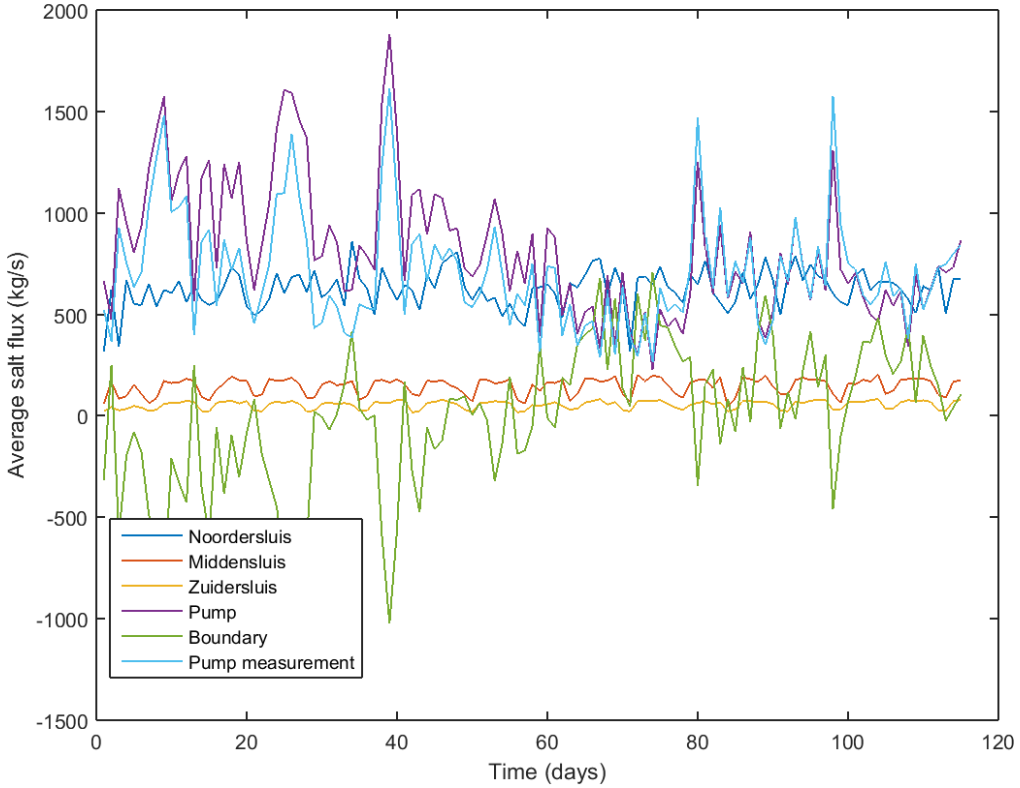
Figuur D.7 Afvoerdebiet in 2014 gemiddeld over een dag (rood) en over tien minuten.

De pieken in het afvoer debiet zijn behoorlijk groot. Enerzijds zou dit kunnen leiden tot een behoorlijke verlaging van de saliniteit aan de kanaalzijde. Hierdoor zou er minder zout worden afgevoerd. Anderzijds kan de saliniteit zich opbouwen in de tijd tussen twee spui momenten. Hierdoor zou het spuien juist effectiever worden.

Figuur D.8 toont de uitkomst voor de input van de 10 minuten data en Figuur D.9 voor de daggemiddelde data.



Figuur D.8 Case q001 afvoerdebiet op basis van metingen in 2014 met een frequentie van 1 per 10 minuten.



Figuur D.9 Case q002 afvoerdebiet op basis van daggemiddelden van metingen in 2014.

Het verschil in zoutflux door het spuikanaal is nog geen 2 procent en daarom verwaarloosbaar. Mogelijk heffen de twee genoemde effecten elkaar voor een groot deel op.

L Berekening effectiviteit selectieve onttrekking met behulp van Delft3D

Memo

Aan

Datum
28 oktober 2016

Aantal pagina's
41

Van
Wilbert Verbruggen

Doorkiesnummer
+31(0)88335 8346

E-mail
wilbert.verbruggen@deltares.nl

Onderwerp
Berekening effectiviteit selectieve onttrekking met behulp van Delft3D

Versie	Datum	Author	Initials	Review	Initials	Approval	Initials
0, Concept	2-9-2016	Wilbert Verbruggen		Erik Ruijgh		Klaas Jan Bos	
1	9-9-2016	Wilbert Verbruggen		Arnout Bijlsma		Klaas Jan Bos	
2, Final	28-10-2016	Wilbert Verbruggen		Arnout Bijlsma		Klaas Jan Bos	

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De beoogde veranderingen aan het sluizencomplex te IJmuiden zullen naar verwachting leiden tot een toename van de zoutlek door de sluizen, en daarmee tot een verhoging van het zoutgehalte op het Noordzeekanaal (NZK) en het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK). Omdat dit tot ongewenste effecten leidt in de beheersgebieden van Rijnland, AGV en in extreme situaties mogelijk ook voor de drinkwaterinname bij Nieuwersluis op het Amsterdam-Rijnkanaal, zoekt het project Zeetoegang IJmond naar de beste manier om de toenemende verzilting te voorkomen of de effecten te beperken.

Voor het sluizencomplex zijn drie toekomst scenario's gedefinieerd, die verschillen in de configuratie van het sluiscomplex en de totale ladingstroom die de sluis passeert. Die ladingstroom is uitgewerkt in het aantal en de typen schepen die de sluizen passeren. De beschouwde toestanden zijn: de autonome ontwikkeling (AO, inclusief Noorderluis, ladingstroom 95 MTPA), de inbedrijfstelling (IBS, Nieuwe sluis i.p.v. Noordersluis, ladingstroom 95 MTPA) en het projectalternatief (PA, Nieuwe sluis i.p.v. Noordersluis, ladingstroom 125 MTPA). Deze toestanden zullen leiden tot verschillende groottes van de zoutlek.

Het doel van het project Zeetoegang IJmond is om met maatregelen de zoutindringing op het NZK en ARK in het projectalternatief niet groter te laten zijn dan de zoutindringing die zou optreden bij de Autonome Ontwikkeling.

1.2 Doelstelling van deze bijlage

In deze bijlage zullen de volgende aspecten besproken worden:

1) Uitbreiden van het in voorgaande studies gebruikte hydrodynamische model van het Noordzeekanaal (NZK) en het Amsterdam-Rijnkanaal (ARK) met verbeterde randvoorwaarden voor de zoutlast door de scheepvaartsluizen en een methode (wijze van schematiseren) om de effecten van selectieve onttrekking op systeem niveau te kunnen onderzoeken.
2) Verdere onderbouwing van de effectiviteit van selectieve onttrekking, inclusief de effecten op het niveau van het watersysteem NZK en ARK en een advies over de hoofdafmetingen in relatie tot de te verwachten prestaties van de selectieve onttrekking.

1.3 Indeling

In Hoofdstuk 2 wordt de werking van de selectieve onttrekking onderzocht voor 2 scenario's die door Arcadis [1] in 2013 zijn opgezet ten behoeve van de MER-rapportage [2]. Voor deze simulaties zijn geen aanpassingen gedaan aan de zoutlast randvoorwaarden bij de scheepvaartsluizen. De enige aanpassing ten opzichte van de Arcadis opzet is het inbrengen van de selectieve onttrekking op een schematische manier. Deze berekeningen dienen als een eerste verkenning van de werking van de selectieve onttrekking en hebben een duidelijk raakvlak met de MER.

Hoofdstuk 3 beschrijft de invloed van de beginconditie van het model op de verwachte werking van de selectieve onttrekking. Het doel van deze analyse was om te onderzoeken of de originele begincondities die door Arcadis opgezet zijn ook gebruikt kunnen worden in het onderzoeken van de effectiviteit van de selectieve onttrekking.

In Hoofdstuk 4 wordt de werking van de selectieve onttrekking en het resulterende gedrag van het systeem beschreven voor simulaties met verbeterde zoutlek randvoorwaarden bij de scheepvaartsluizen en voor enkele scenario's met aangepaste begincondities. De verbeterde zoutlek randvoorwaarden zijn bepaald met behulp van een (offline en online) koppeling met WANDA-Locks.

In hoofdstuk 5 worden de resultaten in een breder perspectief besproken en wordt ingegaan op de onzekerheden van de resultaten en mogelijkheden tot optimalisatie.

De bijlage wordt afgesloten met een samenvatting en de belangrijkste conclusies in Hoofdstuk 6.

2 Werking selectieve onttrekking voor scenario's uit de MER-rapportage

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk onderzoekt de werking van de selectieve onttrekking voor de scenario's die door Arcadis [1] voor de MER Zeetoegang IJmond opgezet zijn [2]. Deze berekeningen dienen als een eerste verkenning van de werking van de selectieve onttrekking voor deze scenario's en hebben een duidelijk raakvlak met de MER. De berekeningen zijn gedaan met het originele model van het Noordzeekanaal en het Amsterdam Rijnkanaal, met de oorspronkelijke zoutlek randvoorwaarden (dus zonder rekening te houden met variaties in deur-opentijden, etc.) zoals opgezet door Arcadis.

2.2 Model opzet

2.2.1 Scenario's

In deze initiële verkenning zijn Scenario 2 en 3 van Arcadis [1] gebruikt, omdat deze scenario's zijn gehanteerd in de MER. Deze scenario's zijn als volgt beschreven in Arcadis [1]:

- Scenario 2: Een extreem droge zomerperiode van 2 weken met realistisch variërende afvoerdebieten bij IJmuiden (gemiddeld 23 m^3/s) en een constant extreem laag debiet van 10 m^3/s bij Maarssen. Voor de overige randvoorwaarden wordt de toestand van 19 juli t/m 3 augustus 2003 gehanteerd.
- Scenario 3: Een scenario waarbij een langjarig gemiddelde situatie (gemiddeld afvoerdebiet IJmuiden 60m^3/s, Maarssen 24,5 m^3/s) voor een lange periode wordt nagebootst. Er is daarbij gebruik gemaakt van een langjarig overzicht van alle balansposten en de balans is sluitend gemaakt door het debiet bij IJmuiden te reduceren. De simulaties zijn voor een periode van 3 maanden doorgezet. Daarbij ontstaat een evenwichtssituatie die in werkelijkheid niet zal optreden.

Deze scenario's zijn gedraaid voor twee toestanden, namelijk de Autonome Ontwikkeling (AO) en het Projectalternatief (PA), die door Arcadis als volgt gedefinieerd zijn:

- Autonome Ontwikkeling (Toestand B in het Arcadis rapport [1]): Ladingstroom van 95 MTA door de Noordersluis
- Projectalternatief (Toestand C in het Arcadis rapport [1]): ladingstroom van 125 MTA door de Nieuwe Zeesluis.

Om de werking van de selectieve onttrekking te analyseren is het Projectalternatief gesimuleerd met en zonder selectieve onttrekking (SO).

2.2.2 Belangrijkste karakteristieken modelopzet Arcadis

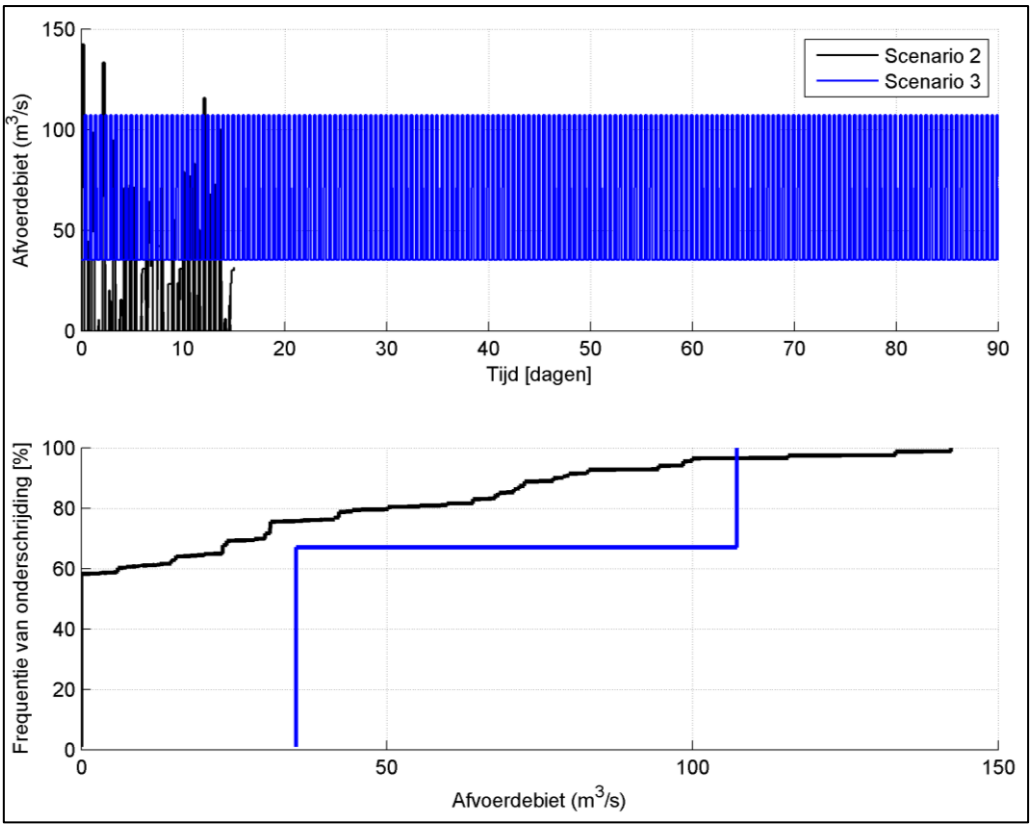
Voor alle simulaties is de modelopzet van Arcadis gebruikt. Zoals beschreven, is de enige aanpassing op de oorspronkelijke schematisatie de selectieve onttrekking. Hieronder volgen een aantal belangrijke karakteristieken van de Arcadis modelopzet.

De debieten bij het spui- en maalcomplex in beide scenario's (voor de Autonome Ontwikkeling) zijn gevisualiseerd in Figuur 2.1. Duidelijk is te zien dat het totale afvoerdebiet voor Scenario 2 is gebaseerd op gemeten tijdseries (gereduceerd met een contante factor om een droog scenario te reproduceren). Voor Scenario 3 is het afvoerdebiet geschematiseerd tot een

gemiddelde situatie, waarbij de afvoer bij IJmuiden bestaat uit afwisselend 3 uur spuien met 107 m^3/s en 9 uur pompen met 35 m^3/s, inclusief een correctie voor lek bij de spuisluizen.

De randvoorwaarden voor de zoutlek bij de scheepvaartsluizen zijn door Arcadis schematisch opgezet op basis van de gemiddelde schutfrequentie per sluis en volledige uitwisseling per schutting. De uitwisseling vindt plaats via een dieptegemiddelde lozing van zout kolkwater op de Binnenvoorhaven, direct gevolgd door een dieptegemiddelde onttrekking. De duur van lozing en onttrekking is 30 minuten voor de Noordersluis cq. Nieuwe sluis en 15 minuten voor de Middensluis en Zuidersluis. Voor iedere sluis is een constant zoutgehalte aangehouden (Nieuwe Sluis/Noordersluis: 25 ppt, Middensluis: 24.25 ppt, Zuidersluis 23.25 ppt).

De berekeningen voor het Projectalternatief met Selectieve Onttrekking gebruiken dezelfde initiële condities als de berekeningen voor de Autonome Ontwikkeling en het Projectalternatief.



Figuur 2.1 Afvoerdebieten het spui- en maalcomplex IJmuiden, Scenario 2 en 3.

2.2.3 Schematisatie selectieve onttrekking

De selectieve onttrekking is geschematiseerd door een ‘3D gate’ te introduceren in het Delft3D model. De verificatie van de werking van de selectieve onttrekking in Delft3D is beschreven in Bijlage J. In de initiële berekeningen is een selectieve onttrekking beschouwd met een breedte van 130 m met een opening in de onderste 4 m. Ter plaatse van de selectieve onttrekking is de bodem verdiept tot 20 m; zie Bijlage D voor een overzicht van de schematisatie van de selectieve onttrekking in het Delft3D model.

2.2.4 Delft3D versie

De simulaties voor dit hoofdstuk zijn uitgevoerd met Delft3D-FLOW versie 6.01.16.5169.

2.3 Resultaten

In deze paragraaf worden de resultaten van de simulaties voor Scenario 2 en 3 beschreven. Om het effect van selectieve onttrekking op het zouttransport richting het Noordzeekanaal te analyseren wordt eerst ingegaan op de berekende zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen en de zoutafvoer bij het spui- en maalcomplex. Vervolgens wordt de werking van de selectieve onttrekking geanalyseerd aan de hand van het cumulatieve zouttransport richting het Noordzeekanaal.

2.3.1 Effect selectieve onttrekking op zoutlast scheepvaartsluizen

In Tabel 2.1 is de berekende netto zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen voor Scenario 2 en Scenario 3 weergegeven. Bij de Autonome ontwikkeling is de berekende netto zoutlast ongeveer 750-800 kg/s. Bij het Projectalternatief berekent het model voor Scenario 2 en Scenario 3 grote verschillen in zoutlast. In Scenario 2 is de zoutlast ongeveer 1200 kg/s en in Scenario 3 ongeveer 1000 kg/s. Het grote verschil komt door de lengte van de simulatieperiode (in combinatie met een gelijke startconditie voor alle toestanden). In Scenario 2 worden maar 2 weken doorgerekend. Deze periode is te kort om het zoutgehalte in Velserkom aan te laten passen aan de verhoogde zoutlasten vanuit de scheepvaartsluizen. Bij het Scenario 3 is wel genoeg tijd om het zoutgehalte in de Velserkom significant te verhogen. Het water dat vervolgens in Scenario 3 bij dichtheidsstroming terug de sluis instroomt bevat meer zout bij het Projectalternatief dan bij de Autonome Ontwikkeling, waardoor de netto zoutlast in Scenario 3 enigszins gereduceerd wordt.

Indien de selectieve onttrekking wordt toegepast neemt de netto zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen toe tot ongeveer 1250 kg/s. Doordat bij de selectieve onttrekking meer zout afgevoerd wordt, neemt het zoutgehalte in de Velserkom ten opzichte van het Projectalternatief (zonder selectieve onttrekking) af. Daardoor gaat er minder zout terug de sluizen in wanneer de sluiskolken gevuld worden met water vanuit de Velserkom. Hierdoor neemt de netto zoutlast toe ten opzichte van het Projectalternatief. Het verschil tussen PA en PA+SO is vooral groot in Scenario 3, omdat dit scenario lang genoeg is om een nieuw evenwicht te ontwikkelen, zie de uitleg in de vorige alinea.

Tabel 2.1 Gemiddelde netto zoutlast scheepvaartsluizen, Scenario 2 en 3.

	Gemiddeld netto zoutlast scheepvaartsluizen [kg/s]	
	Scenario 2	**Scenario 3**
AO	795	756
PA	1191	1019
PA+SO	1236	1240

2.3.2 Effect selectieve onttrekking op zoutafvoer bij het spui- en maalcomplex

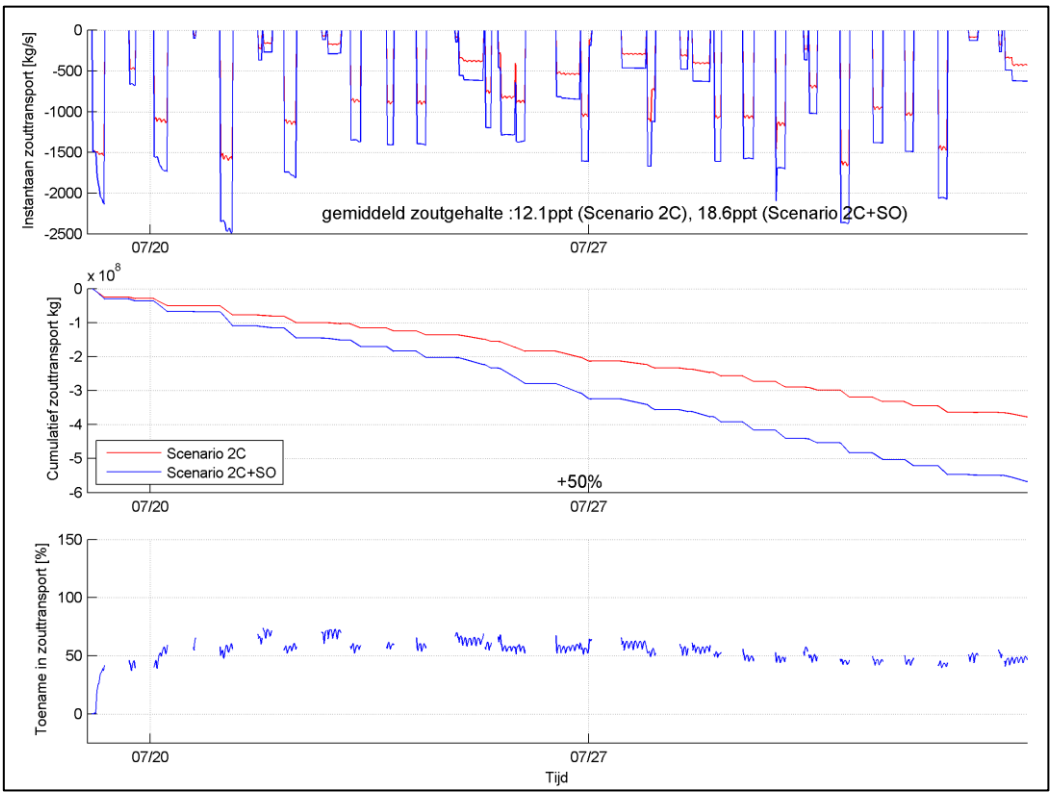
Tabel 2.2 geeft een overzicht van de zoutafvoer door het spui- en maalcomplex voor Scenario 2 en 3. In Scenario 2 is de afvoerde hoeveelheid zout veel lager dan in Scenario 3 vanwege de lage afvoerdebieten. Tijdens het Projectalternatief neemt de afgevoerde hoeveelheid zout toe met ongeveer 15% tot 25%. Indien de selectieve onttrekking wordt toegepast neemt de hoeveelheid afgevoerd zout toe met ongeveer 70%-75% ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling.

Tabel 2.2 Gemiddelde zoutafvoer bij het spui- en maalcomplex, Scenario 2 en 3

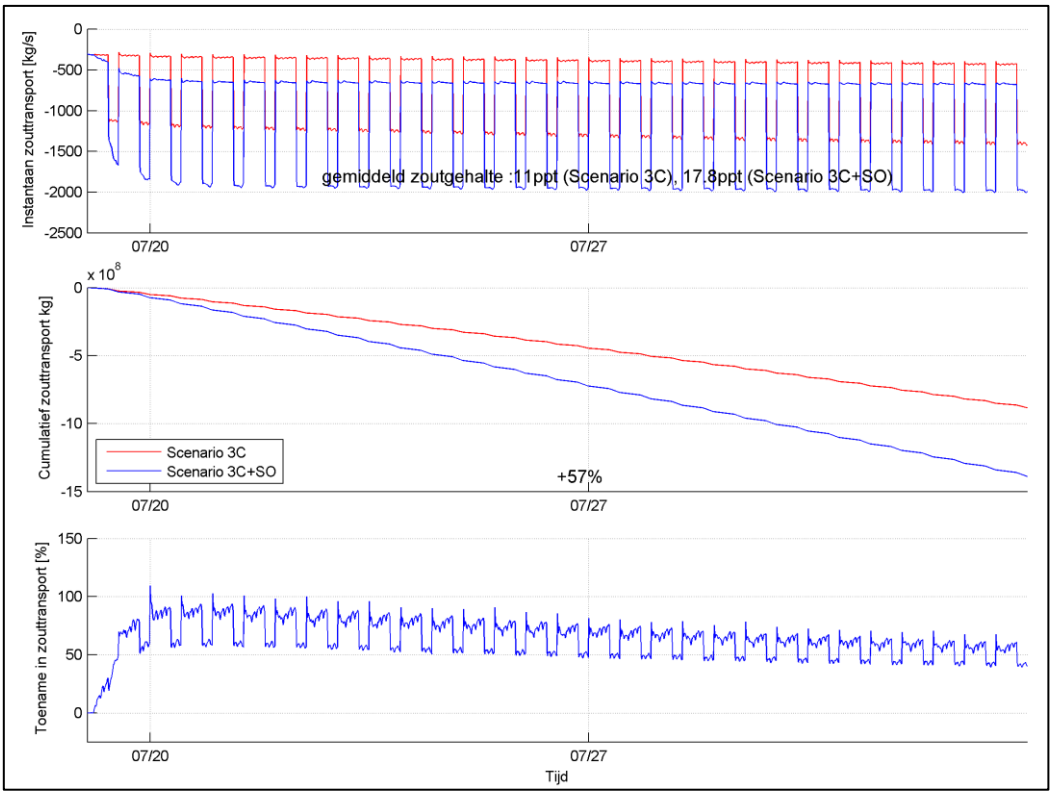
	Gemiddelde zoutafvoer bij het spui- en maalcomplex[kg/s]	
	Scenario 2	**Scenario 3**
AO	251	671
PA	291	842
PA+SO	438	1136

De momentane zoutafvoer is sterk gerelateerd aan het afvoerdebiet, zie Figuur 2.2 en Figuur 2.3, waar het Projectalternatief inclusief selectieve onttrekking is vergeleken met het Projectalternatief (zonder selectieve onttrekking). De middelste plot geeft de cumulatieve zoutafvoer weer. Aan het eind van de periode is ongeveer 50% meer zout afgevoerd via het spui- en maalcomplex indien de selectieve onttrekking meegenomen wordt. De onderste plot laat het verschil in de momentane zoutafvoer zien. Vooral in Figuur 2.3 is duidelijk te zien dat de 'efficiëntie' van de selectieve onttrekking gerelateerd is aan de afvoerdebieten. Tijdens lage afvoerdebieten is de 'efficiëntie' ongeveer 50%-80%, terwijl tijdens hoge spuidebieten de 'efficiëntie' verlaagt naar ongeveer 40%-60%.

De 'efficiëntie' van de selectieve onttrekking is in de huidige initiële berekeningen groter dan de eerdere efficiëntie berekeningen in Bijlage D. Dit kan verklaard worden door de lagere afvoerdebieten in de huidige simulaties. In de simulaties voor Bijlage D waren de afvoerdebieten regelmatig in de orde van 150-300m^3/s, terwijl in de huidige scenario's de afvoerdebieten altijd lager zijn dan 160 m^3/s.



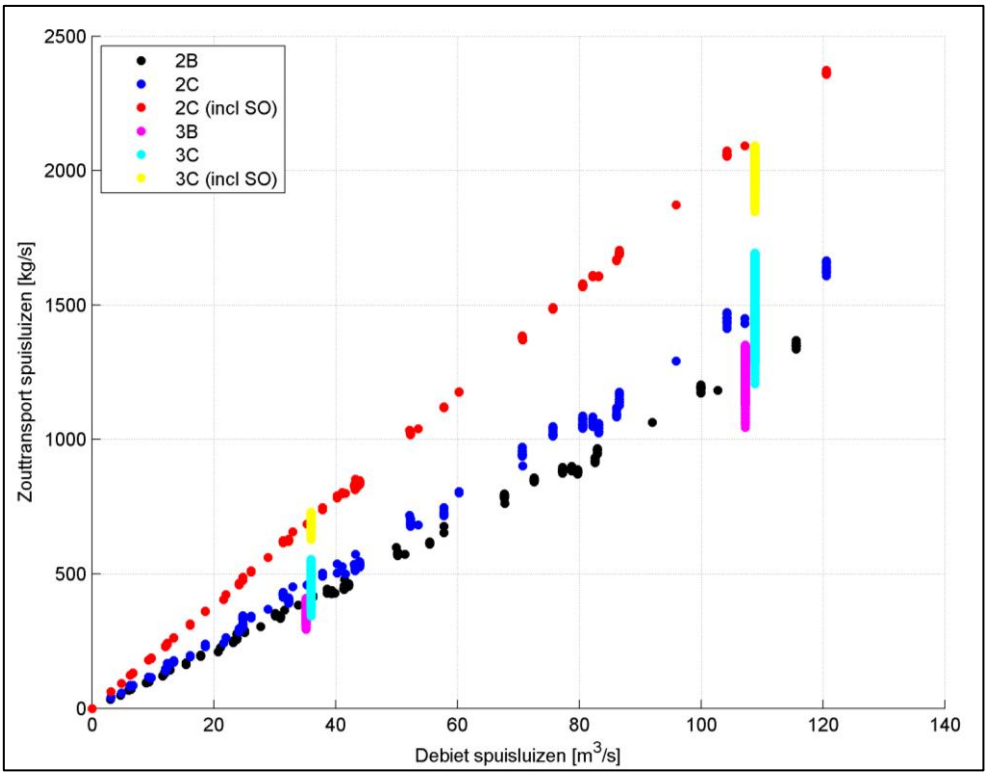
Figuur 2.2 Verschil in zoutafvoer door spui- en maalcomplex voor Scenario 2 PA+SO t.o.v. PA. Boven: Instantane zoutafvoer, Midden: Cumulatieve zoutafvoer, Onder: Toename in instantane zoutafvoer ten gevolge van de selectieve onttrekking.



Figuur 2.3 Verschil in zoutafvoer door spui- en maalcomplex voor Scenario 3 PA+SO t.o.v. PA. Boven: Instantane zoutafvoer, Midden: Cumulatieve zoutafvoer, Onder: Toename in instantane zoutafvoer ten gevolge van de selectieve onttrekking.

2.3.3 Efficiëntie selectieve onttrekking als functie van afvoerdebiet

In Figuur 2.4 is de relatie weergegeven tussen het afvoerdebiet en de zoutafvoer door het spui- en maalcomplex. De sterkste inspeeleffecten zijn verwijderd door de eerste week van de simulaties niet mee te nemen in deze resultaten. De resultaten voor Scenario 3 zijn geconcentreerd op een klein aantal afvoerdebieten, aangezien in dit scenario de afvoerdebieten bestaan uit een herhalende blokfunctie. Daarnaast is de simulatieperiode voor Scenario 3 veel langer dan voor Scenario 2 (resp. 3 maanden en 2 weken), wat leidt tot een grotere spreiding in zoutafvoer (de simulatie gaat steeds meer richting een evenwicht). Vanwege de geringe spreiding in afvoerdebieten is dit scenario niet geschikt om een trendlijn te onderscheiden als het gaat om de relatie tussen debiet en zoutafvoer. De resultaten voor Scenario 2 laten zien dat in deze range van afvoerdebieten de relatie tussen zoutafvoer en spuidebiet vrijwel lineair is. Dit komt overeen met het onderzoek met het 2DV Delft3D model (zie Bijlage J), waarin werd gevonden dat deze relatie gaat afwijken bij afvoerdebieten groter dan ongeveer 150 m^3/s. In de Autonome Ontwikkeling is het afgevoerde zoutgehalte gemiddeld rond de 11.5 ppt, voor het Projectalternatief 13 ppt zonder selectieve onttrekking en 19.5 ppt met selectieve onttrekking.



Figuur 2.4 Relatie tussen afvoerdebiet en zoutafvoer bij het spui- maalcomplex voor Scenario 2 en 3

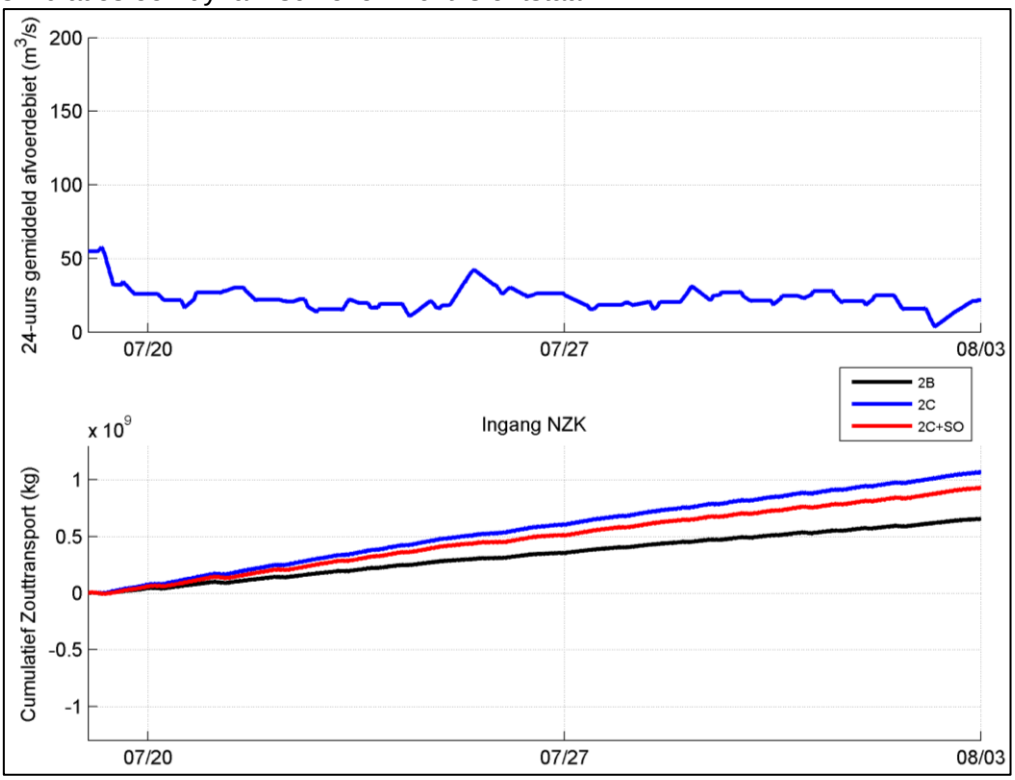
2.3.4 Effect selectieve onttrekking op verzilting NZK

De beoogde doelstelling van de selectieve onttrekking is om de zoutindringing op het NZK in het Projectalternatief (met selectieve onttrekking) niet groter te laten zijn dan de zoutindringing die zou optreden bij de Autonome Ontwikkeling.

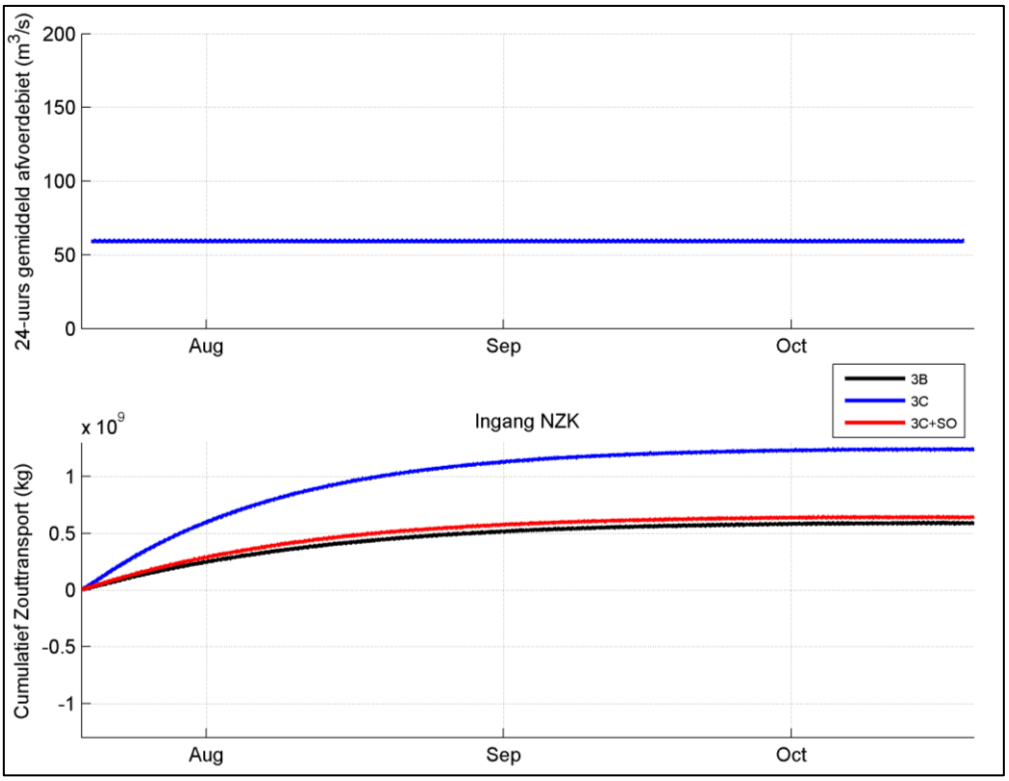
Figuur 2.5 Dwarsdoorsnede waarover het cumulatieve zouttransport richting het NZK geanalyseerd is. (bron: Google Earth)

Figuur 2.6 en Figuur 2.7 tonen het cumulatieve zouttransport richting het Noordzeekanaal (zie Figuur 2.5 voor de exacte locatie) voor Scenario 2 en Scenario 3. Ter interpretatie is in de bovenste plot het 24-uurs gemiddelde afvoerdebiet toegevoegd. De initiële berekeningen voor Scenario 2 laten zien dat tijdens deze twee weken het cumulatieve zouttransport richting het NZK toeneemt. In alle scenario's treedt dus verzilting op, het sterkst voor het Projectalternatief. Voor deze condities van zeer lage afvoeren reduceert de selectieve onttrekking het verschil met de Autonome Ontwikkeling met ongeveer een derde. De selectieve onttrekking zorgt dus voor een verlaging van het zouttransport richting het Noordzeekanaal, maar kan niet al het extra zout vanuit de scheepvaartsluizen mitigeren. Dit kan verklaard worden door de zeer lage afvoerdebieten tijdens dit scenario (gemiddeld rond de 25 m^3/s).

In Scenario 3 is het effect van de selectieve onttrekking op de zoutindringing op het NZK veel groter. Het extra zouttransport tijdens het Projectalternatief wordt met ongeveer 90% gereduceerd door het toepassen van de selectieve onttrekking. Het grote verschil tussen beide scenario's is dat Scenario 2 een drogere periode representeert dan Scenario 3. Door de lagere afvoerdebieten bij Scenario 2 is de toename in zouttransport ten gevolge van de selectieve onttrekking gering. Figuur 2.7 laat duidelijk zien dat na ongeveer anderhalve maand in alle simulaties een dynamisch evenwicht is ontstaan.



Figuur 2.6 Dag gemiddelde afvoerdebiet (boven), cumulatief zouttransport richting NZK (onder). Scenario 2, AO, PA en PA+SO.



Figuur 2.7 Dag gemiddelde afvoerdebiet (boven), cumulatief zouttransport richting NZK (onder). Scenario 3, AO, PA en PA+SO.

2.4 Conclusies

In Scenario 2 reduceert de selectieve onttrekking het extra zouttransport naar het NZK in het Projectalternatief ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling slechts met ongeveer een derde. Het resultaat voor Scenario 3 is positiever: de selectieve onttrekking zorgt voor een forse daling van de zoutlast naar het NZK, zodat deze slechts een fractie hoger is dan bij de Autonome Ontwikkeling.

Deze initiële verkenningen kennen echter wel een aantal serieuze beperkingen. Zo zijn de uitwisselingsstromen bij de scheepvaartsluizen zeer sterk geschematiseerd opgenomen, wat mogelijk van invloed is op de werking van de selectieve onttrekking die op vrij korte afstand van deze randvoorwaarden ligt. Ook is er voor de beoordeling van de effectiviteit van selectieve onttrekking behoefte aan een meer realistische variatie van de zoutlast (t.g.v. variabele deur-opentijden en schutfrequenties) en de afvoerdebieten. Verder blijkt dat met name bij de korte simulaties de invloed van de initiële condities erg groot is.

Ondanks de beperkingen in de modelschematisaties laten deze simulaties duidelijk zien dat de zoutlast richting het Noordzeekanaal fors daalt indien de selectieve onttrekking wordt toegepast.

In hoofdstuk 3 wordt eerst de invloed van de initiële condities op de werking van de selectieve onttrekking in de modellen verder onderzocht. In hoofdstuk 4 worden uiteindelijk simulaties besproken waarin verbeteringen zijn opgenomen in de schematisatie van de zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen en de initiële condities.

3 Verkenning invloed beginconditie model

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de invloed van de beginconditie van het model op het berekende systeemgedrag beschreven. Het doel van deze analyse was om te onderzoeken of de originele begincondities die door Arcadis opgezet zijn voor het lange Scenario januari -juni 2013 [1] ook gebruikt kunnen worden in het onderzoeken van de effectiviteit van de selectieve onttrekking. Dit scenario is door Arcadis gebruikt om het model te valideren en maakt gebruik van realistische forcering. Het scenario wordt in Hoofdstuk 4 gebruikt om de werking van de selectieve onttrekking verder te onderzoeken. Voor een beschrijving van het Scenario januari - juni 2013 wordt verwezen naar paragraaf 4.2.2.

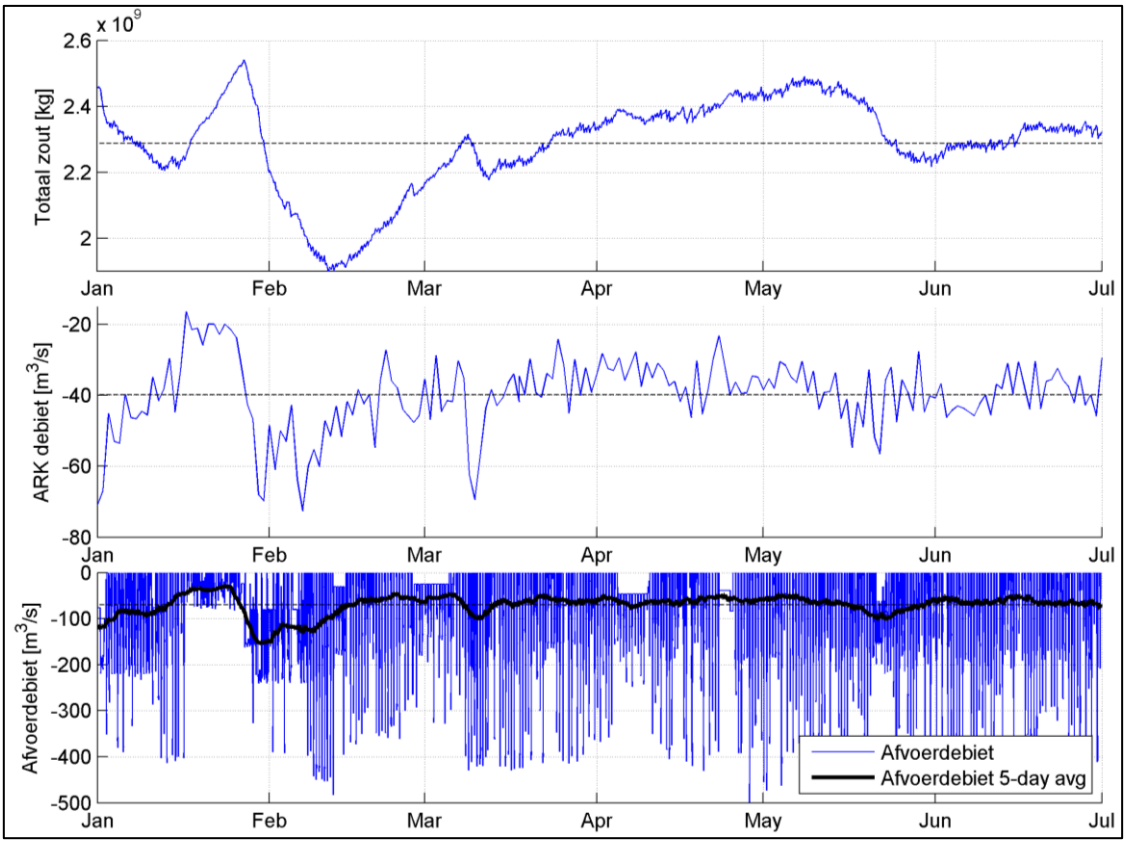
De beginconditie specificeert voor iedere rekencel een waterstand, stroomsnelheid, saliniteit en temperatuur. Aangezien het model geforceerd is met debieten, zal een aanpassing van de initiële waterstand gedurende de gehele simulatie doorwerken (e.g. indien de initiële waterstand met 0.1 m verhoogd wordt, zal de variërende waterstand tijdens de hele simulatie 0.1 m hoger blijven). In het Scenario januari - juni 2013 varieert de waterstand rond de 0m NAP. De waterstand in het model is een overschatting van het gemiddelde peil in het Noordzeekanaal (-0.4 m NAP). Verwacht wordt dat de invloed van dit waterstandsverschil niet groot zal zijn op de werking van de selectieve onttrekking, waardoor besloten is om de initiële waterstandconditie niet verder te beschouwen.

De stroomsnelheden in de initiële conditie hebben alleen een invloed op de eerste paar rekentijdstappen, maar zullen het systeemgedrag niet veranderen over een langere periode.

Temperatuur en saliniteit zijn parameters die typisch een langere tijd nodig hebben om naar een evenwicht te gaan. De saliniteit wordt in Delft3D gemodelleerd als een conservatieve stof (i.e. er vindt geen afbraak plaats of uitwisseling met de atmosfeer). Temperatuur is daarentegen wel afhankelijk van warmte uitwisseling met de atmosfeer en zal sneller naar een evenwicht gaan dan de saliniteit. Om deze redenen is saliniteit het sterkst afhankelijk van de initiële conditie. Aangezien er in deze studie vooral gekeken wordt naar de effectiviteit van de selectieve onttrekking om zout af te voeren, is er in dit hoofdstuk vooral gekeken naar de invloed van de initiële conditie op het gedrag van zout.

3.2 Invloed initiële conditie op saliniteit

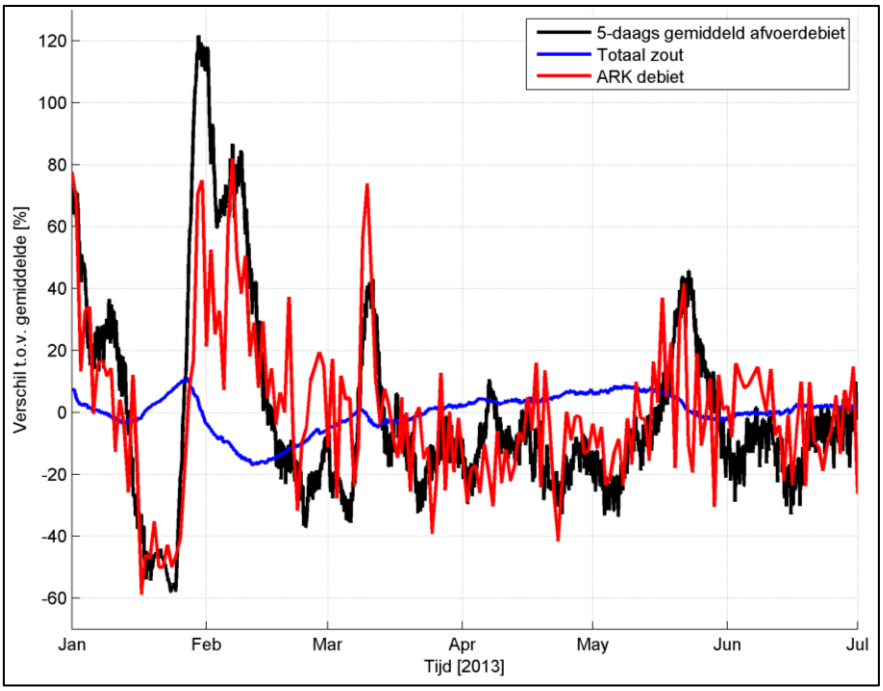
Voor het Scenario januari - juni 2013 (met Arcadis randvoorwaarden en instellingen) is de variatie in de totale hoeveelheid zout berekend, zie Figuur 3.1. Over de periode 1 januari 2013 t/m 1 juli 2013 is de gemiddelde hoeveelheid zout in het model ongeveer $2.3 \cdot 10^9$ kg. Eind januari is de grootste hoeveelheid zout in het model (ongeveer 10% hoger dan het gemiddelde) en mid- februari is de hoeveelheid zout het kleinst (ongeveer 15% lager dan het gemiddelde). Ter interpretatie zijn ook de debieten in het Amsterdam Rijnkanaal (ARK) en de afvoerdebieten bij het spui- en maalcomplex gevisualiseerd. Duidelijk is te zien dat het systeem redelijk snel reageert op een verandering van het debiet bij het Amsterdam Rijnkanaal en het afvoerdebiet bij IJmuiden. Bij lage debieten (bijvoorbeeld tweede helft van januari) wordt er minder zout door het spui- maalcomplex afgevoerd en neemt de totale hoeveel zout in het model toe. Het originele model (zoals opgezet door Arcadis, [1]) begint met een relatief zoute initiële conditie (de hoeveelheid zout is initieel ongeveer 7% meer dan gemiddeld).



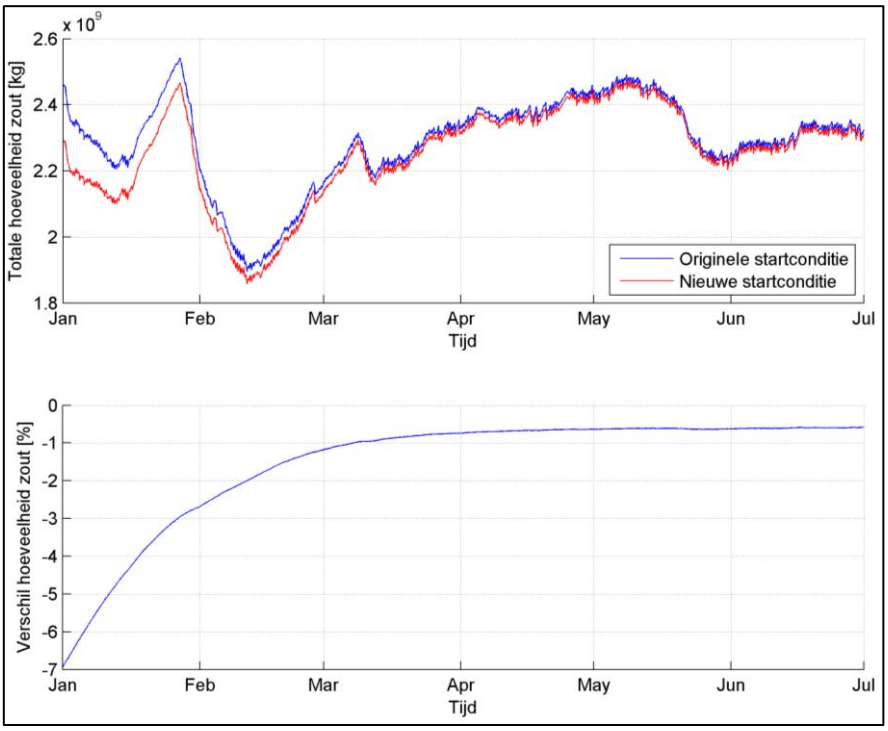
Figuur 3.1 Totale hoeveelheid zout, debiet ARK en debiet spuisluizen voor het Scenario januari - juni 2013

Om de invloed van de initiële conditie te testen is een periode gezocht waarin de hoeveelheid zout in het model gemiddeld is. Vervolgens is de modeluitvoer op dat tijdstip gebruikt als beginconditie in een testsimulatie. Figuur 3.2 toont de variatie in de totale hoeveelheid zout en debieten (spui- maalcomplex en Amsterdam Rijnkanaal) t.o.v. het gemiddelde. De afvoerdebieten bij het spui- maalcomplex hebben een goede correlatie met de debieten op het Amsterdam Rijnkanaal. Op 17 januari 2013 om 18:00 is de hoeveelheid zout in het model en het debiet op het Amsterdam Rijnkanaal gemiddeld. Ook later in het jaar is er op enkele tijdstippen sprake van een gemiddelde hoeveelheid zout en gemiddelde debieten, maar zal dan de watertemperatuur hoger zijn dan verwacht kan worden voor een winter. Daarom is ervoor gekozen om de testsimulatie te starten met de condities op 17 januari 2013 18:00.

Figuur 3.3 laat het verloop zien van de totale hoeveelheid zout in de testsimulatie ten opzichte van de originele simulatie. In eerste instantie is het verschil in totale hoeveelheid zout ongeveer 7%. Na een maand is het verschil gedaald tot ongeveer 2.5%. Na ongeveer 2-3 maanden is het effect van de initiële conditie vrijwel uitgewerkt. Aangezien het inspelen van het zoutgehalte voor alle toestanden (AO, PA en PA+SO) geldt, heeft dit op de relatieve beoordeling van de selectieve onttrekking geen grote invloed.



Figuur 3.2 Variatie in afvoerdebiet, ARK debiet en hoeveelheid zout t.o.v. het gemiddelde, Scenario januari - juni 2013.



Figuur 3.3 Totale hoeveelheid zout in originele 2013 simulatie (blauw) en testsimulatie (rood) met gemiddelde begincondities

3.3 Conclusies

Op basis van deze verkenning kan geconcludeerd worden dat het effect van de initiële conditie op de werking van de selectieve onttrekking over een periode van 6 maanden zeer gering zal zijn. Voor het Scenario januari - juni 2013 dat in het volgende hoofdstuk is uitgewerkt is daarom gekozen om de oorspronkelijke initiële conditie van Arcadis aan te houden. Voor de twee korte scenario's die in het volgende hoofdstuk besproken worden (Scenario 4 en 5) heeft de initiële conditie wel een invloed op het resultaat, aangezien het initiële zoutgehalte dat hoort bij het Projectalternatief zonder selectieve onttrekking veel hoger is dan het initiële zoutgehalte dat hoort bij de Autonome Ontwikkeling of het Projectalternatief met selectieve onttrekking. De twee weken modeltijd is dan niet lang genoeg om de zoutgehaltes aan te passen aan de randvoorwaarden (zie bijvoorbeeld paragraaf 2.3). Daarom is in overleg met RWS besloten om Scenario 4 en 5 te starten met de condities op 1 jul 2013 vanuit de jan-jun 2013 simulaties.

4 Werking selectieve onttrekking bij verbeterde randvoorwaarden

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de werking van de selectieve onttrekking onderzocht voor drie verschillende scenario's die door Arcadis opgezet zijn en zijn afgestemd met Rijkswaterstaat. Het Scenario januari - juni 2013 was gekozen, omdat dit een realistisch scenario is en een lange periode bestrijkt (6 maanden), waardoor de initiële conditie van het model geen significante invloed heeft op het onderzoek van de werking van de selectieve onttrekking. Daarnaast werden Scenario 4 en 5 van de Arcadis studie gekozen, omdat deze scenario's realistische droge periodes representeren. Met behulp van Scenario 4 en 5 kan de werking van de selectieve onttrekking onderzocht worden tijdens droge periodes. Voor deze scenario's zijn verbeterde zoutlast randvoorwaarden afgeleid bij de scheepvaartsluizen met behulp van WANDA-Locks. De gemodelleerde scenario's geven inzicht in de buffermogelijkheden op het Noordzeekanaal voor zout bij het toepassen van selectieve onttrekking. Daarvoor wordt in dit hoofdstuk het Projectalternatief met selectieve onttrekking in detail vergeleken met de Autonome Ontwikkeling.

4.2 Model opzet

4.2.1 Inleiding

Het uitgangspunt van dit onderzoek is het bestaande model van het Noordzeekanaal dat is opgezet door Arcadis, zie [1]. Dit model is door Arcadis gebruikt voor het onderzoek naar het zoutgedrag op het Noordzeekanaal en Amsterdam-Rijnkanaal.

De werking van de selectieve onttrekking is gesimuleerd voor drie scenario's die in 2013 door Arcadis zijn opgezet [1], namelijk het Scenario januari - juni 2013, Scenario 4 en Scenario 5 (zie paragraaf 4.2.2). Vanwege de korte periode voor Scenario 4 en 5 is besloten om deze simulaties te starten met de condities op 1 juli 2013 van de jan-jun 2013 simulaties. In deze studie zijn vijf verschillende toestanden bekeken: Autonome ontwikkeling (zonder selectieve onttrekking), Ingebruikstelling (met en zonder selectieve onttrekking) en het Projectalternatief (met en zonder selectieve onttrekking). Bij de simulaties met selectieve onttrekking is het zoutscherm op een schematische manier ingebracht. Voor een beschrijving van de schematisatie wordt verwezen naar paragraaf 2.2.3 .

Voor het Scenario januari - juni 2013 heeft Arcadis alleen zoutlek randvoorwaarden gemaakt voor de toenmalige situatie (80 MTA). Daarnaast zijn de randvoorwaarden bij de scheepvaartsluizen voor Scenario 4 en 5 zeer schematisch, waardoor er is gekozen om de zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen te modelleren met behulp van een offline koppeling tussen Delft3D en WANDA-Locks. Daarnaast zijn er additionele simulaties uitgevoerd met behulp van een online koppeling die voor deze studie is ontwikkeld, om de offline gekoppelde methode te valideren.

Voor de offline gekoppelde simulaties is Delft3D versie 6.01.16.5169 toegepast. Voor de online gekoppelde simulaties is speciaal voor dit project de volgende branch versie opgezet: 6.02.06.6346.

4.2.2 Gemodelleerde scenario's

In het huidige hoofdstuk wordt de effectiviteit van de selectieve onttrekking geanalyseerd voor drie scenario's:

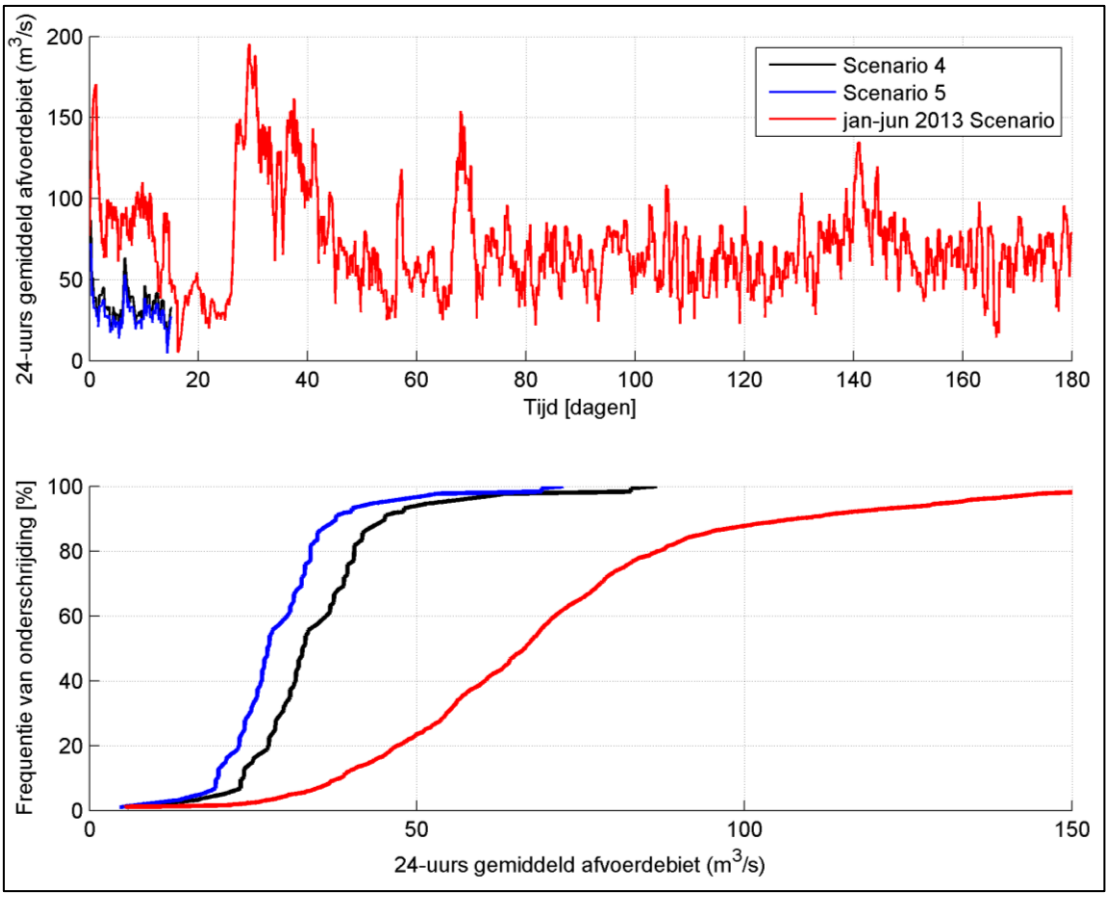
- Scenario januari - juni 2013: Dit scenario dat bestaat uit een realistische forcering voor de periode 1 januari 2013 t/m 1 juli 2013 is door Arcadis gebruikt om het model destijds te valideren.
- Scenario 4: Een droog scenario, waarin een debiet van 22 m^3/s is opgelegd bij het Amsterdam-Rijkanaal.
- Scenario 5: Een extreem droog scenario, waarin een debiet van 16 m^3/s is opgelegd bij het Amsterdam-Rijkanaal.

Voor een complete beschrijving van de scenario's wordt verwezen naar het rapport van Arcadis [1]. In deze paragraaf wordt vooral ingegaan op de belangrijkste verschillen tussen de scenario's die van belang zijn voor de interpretatie van de werking van de selectieve onttrekking.

Figuur 4.1 toont het daggemiddelde afvoerdebiet voor de verschillende scenario's. De bovenste plot laat een tijdserie zien van de afvoerdebieten, waarbij op de horizontale as het aantal dagen na begin van de simulatie is uitgezet. De onderste plot laat de frequentie van onderschrijding zien van de daggemiddelde afvoerdebieten. De belangrijkste verschillen zijn dat de afvoerdebieten in Scenario 4 en 5 veel lager zijn dan voor het Scenario januari - juni 2013. In het Scenario januari - juni 2013 is het gemiddelde afvoerdebiet ongeveer 70 m^3/s, voor Scenario 4 ongeveer 35 m^3/s en Scenario 5 ongeveer 25 m^3/s.

Het volgende grote verschil tussen de scenario's is de lengte van de simulatieperiode. Voor Scenario 4 en 5 wordt een periode van 2 weken doorgerekend, terwijl voor het Scenario januari - juni 2013 een periode van een half jaar wordt doorgerekend.

Om een indicatie te krijgen van de werking van de selectieve onttrekking onder realistisch variërende condities is vooral het Scenario januari - juni 2013 geschikt. Scenario 4 en 5 geven inzicht in de werking van de selectieve onttrekking tijdens korte droge periodes.



Figuur 4.1 Daggemiddelde afvoerdebieten bij het spui- en maalcomplex IJmuiden, Scenario 4, 5 en voor het Scenario januari - juni 2013.

4.2.3 Gemodelleerde toestanden

De beoogde doelstelling van de selectieve onttrekking is om de zoutindringing op het Noordzeekanaal tijdens het gebruik van de nieuwe sluis (met selectieve onttrekking) niet groter te laten zijn dan de zoutindringing die zou optreden bij de Autonome Ontwikkeling. Voor het gebruik van de nieuwe sluis worden twee toestanden beschouwd, de toestand van Ingebruikstelling en het Projectalternatief. Tijdens de toestand van Ingebruikstelling is de ladingstroom gelijk aan de ladingstroom tijdens de Autonome Ontwikkeling (95 MTA), maar is de Noordersluis wel al vervangen door de nieuwe sluis. Tijdens het Projectalternatief is een toename van ruim 30% voorzien in de ladingstroom ten opzichte van de Ingebruikstelling (125 MTA). Voor details van de verschillende toestanden (wat betreft aantal schuttingen, deur open tijden, etc.) wordt gerefereerd naar Bijlage K. Voor de drie verschillende toestanden is de zoutlast bij de sluis gemodelleerd met behulp van een offline en online koppeling tussen Delft3D en WANDA-Locks, zie paragraaf 4.2.4.

4.2.4 Modellering zoutlasten vanuit de scheepvaartsluizen

Voor Scenario 4 en 5 heeft Arcadis sterk geschematiseerde randvoorwaarden opgesteld voor de zoutlasten vanuit de scheepvaartsluizen. Deze randvoorwaarden zijn opgesteld voor de Autonome Ontwikkeling en het Projectalternatief (Toestand B en C) door Arcadis [1]. Destijds heeft Arcadis de Ingebruikstellingsfase niet beschouwd, dus zijn daar geen randvoorwaarden voor beschikbaar vanuit de Arcadis studie. Het Scenario januari - juni 2013 werd door Arcadis

gebruikt als validatieperiode, dus zijn voor die simulatie alleen randvoorwaarden gemaakt voor de ladingsstroom die bij 2013 hoorde (75 MTA). De randvoorwaarden bij de scheepvaartsluizen zijn door Arcadis heel schematisch opgezet. Er is aangenomen dat na iedere schutting volledige uitwisseling plaats vindt, wat een conservatieve aanname is. Daarnaast is de zoutlast dieptegemiddeld geschematiseerd met een tijdsresolutie van 30 min (i.e. 30 min dieptegemiddelde instroming met voorgeschreven (constant) zoutgehalte, gevolgd door 30 min dieptegemiddelde uitstroming). Om de zoutdynamiek in de Velserkom beter te simuleren, en daarmee de werking van de selectieve onttrekking, is het van belang dat de variatie in deur-open tijden en schutfrequentie in de zoutlast randvoorwaarden voor Delft3D meegenomen wordt.

Voor de modellering van de processen in de sluizen en de voorhavens aan de zeezijde is gebruik gemaakt van WANDA-Locks. De simulaties in dit hoofdstuk zijn gebaseerd op een offline koppeling tussen Delft3D en WANDA-Locks. Dit houdt in dat met WANDA-Locks voorafgaand aan de Delft3D simulaties de zoutlast is berekend, die als randvoorwaarden voor Delft3D gebruikt worden. De uitwisselingsdebieten zijn simultaan opgelegd in de onderlaag (instroom) en bovenlaag (uitstroom). Verdere iteraties in de offline aanpak (bijvoorbeeld het variëren van het Noordzeekanaal zoutgehalte in WANDA-Locks) bleken niet nodig. Naast de offline gekoppelde simulaties zijn voor deze studie ook online gekoppelde simulaties uitgevoerd. Aangezien de online gekoppelde simulaties nog niet gereed waren bij het opmaken van deze rapportage is ervoor gekozen om de offline gekoppelde simulaties als basis te gebruiken in dit hoofdstuk. Deze eerste resultaten lieten zien dat de online gekoppelde simulaties vergelijkbare resultaten geven als de offline gekoppelde simulaties. Deze vergelijking wordt verder besproken in Hoofdstuk 5. Bij de online gekoppelde simulaties wordt de werkelijke variatie in zoutgehalte in de voorhavens (berekend in Delft3D op basis van de zoutlasten vanuit WANDA-Locks) weer gebruikt in WANDA-Locks om de zoutlasten voor de volgende tijdstap te berekenen. De online koppeling is gebaseerd op een methode die al meerdere malen is toegepast voor de lozingen van energiecentrales. De specifieke toepassing van het WANDA-Locks model is tijdens deze studie ontwikkeld. De validatie van de WANDA-Locks – Delft3D koppeling is beschreven in de bijgevoegde Appendix A.

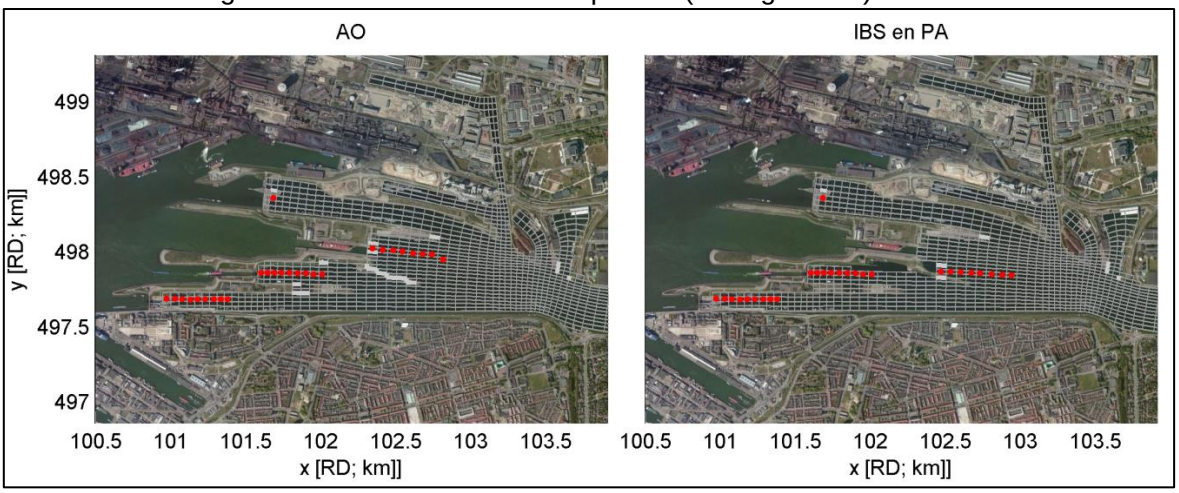
De WANDA-Locks simulaties zijn gedraaid op basis van PMSS gegevens van de corresponderende periode (1^{e} halfjaar voor het Scenario januari - juni 2013 en 19 juli t/m 3 augustus voor Scenario 4 en 5). Om te zorgen dat WANDA-Locks en Delft3D consistent zijn, zijn de afvoerdebieten in de (offline en online) WANDA-Locks simulaties gelijk gesteld aan de afvoerdebieten die Arcadis heeft opgesteld voor de gemodelleerde scenario's (Scenario 4, 5 en jan-jun 2013). In de offline WANDA-Locks simulaties is de selectieve onttrekking ook schematisch meegenomen (voor PA+SO en IBS+SO) door de zoutafvoer bij het spui- en maalcomplex te verhogen met 50%, wat een schatting is op basis van de simulaties die in Hoofdstuk 2 besproken zijn. Gevoeligheidstesten en simulaties met de online koppeling hebben aangetoond dat de zoutlasten vanuit de scheepvaartsluizen niet gevoelig zijn voor de schematisatie (i.e. het gebruikte percentage om de zoutafvoer mee te verhogen) van de selectieve onttrekking in WANDA-Locks.

Uitwisseling gegevens Delft3D en WANDA-Locks in online koppeling
Voor de online gekoppelde simulaties is een koppeltijdstap van 10 minuten gebruikt. Dit houdt in dat iedere 10 minuten informatie uitgewisseld wordt tussen Delft3D en WANDA-Locks. Het gaat hier om een tweezijdige uitwisseling, WANDA-Locks ontvangt informatie van Delft3D, simuleert vervolgens de sluisprocessen van de komende 10 minuten en geeft vervolgens aan Delft3D de zouttransporten door. Iedere sluis wordt als een losse koppeling gezien. Ook voor

het zoutgehalte bij de spuisluizen in WANDA-Locks is gebruik gemaakt van een koppeling (in dit geval dus alleen een eenzijdige koppeling aangezien alleen informatie van Delft3D aan WANDA-Locks wordt doorgegeven). In totaal zijn er voor iedere simulatie dus 4 koppelingen gedefinieerd (Noordersluis/Nieuwe Sluis, Middensluis, Zuidersluis en de Spuisluizen).

De volgende informatie wordt tijdens iedere koppeling vanuit Delft3D doorgeven naar WANDA-Locks:

- Dieptegemiddelde saliniteit (om zoveel mogelijk consistent te blijven met de dieptegemiddelde benadering van Wanda-Locks), gemiddeld over verschillende punten (zie Figuur 4.2)
- Waterstand gemiddeld over verschillende punten (zie Figuur 4.2)



Figuur 4.2 Locaties (rode cirkels) waarover het gemiddelde zoutgehalte en de gemiddelde waterstand zijn bepaald als input voor WANDA-Locks.

De volgende informatie wordt aan het eind van iedere koppeling (behalve in geval van de spuisluizen) vanuit WANDA-Locks doorgegeven naar Delft3D:

- Instromend debiet
- Locatie instromend debiet (in de voorhaven, in de onderste helft van de waterkolom)
- Zoutgehalte instromend debiet
- Uitstromend debiet
- Locatie uitstromend debiet (in de voorhaven, in de bovenste helft van de waterkolom)

4.3 Resultaten

In deze paragraaf worden de resultaten van de simulaties voor het Scenario januari - juni 2013 en Scenario 4 en 5 beschreven. Om het effect van selectieve onttrekking op het zouttransport richting het Noordzeekanaal te analyseren wordt eerst ingegaan op de zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen en de zoutafvoer bij het spui- en maalcomplex. Vervolgens wordt de werking van de selectieve onttrekking geanalyseerd aan de hand van het cumulatieve zouttransport richting het Noordzeekanaal en de zoutgehaltes bij Zijkanaal C en Diemen. Zoals besproken in paragraaf 4.2.4 zijn de resultaten in dit hoofdstuk zijn gebaseerd op de offline gekoppelde simulaties. Voor een vergelijking met de eerste resultaten van de online gekoppelde simulaties wordt verwezen naar Hoofdstuk 5.

4.3.1 Ingebruikstelling versus Projectalternatief

In deze studie is aangenomen dat tijdens de Ingebruikstellingsfase en het Projectalternatief de Noorderluis vervangen is door de Nieuwe Sluis. Tijdens de Ingebruikstellingsfase is de aangenomen ladingstroom 95 MTA, terwijl tijdens het Projectalternatief de ladingstroom 30 MTA hoger is (125 MTA). De berekende zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen is tijdens de Ingebruiksstelling zeer vergelijkbaar met het Projectalternatief. Tijdens de Ingebruiksstelling is de schutfrequentie hoger wat zou leidden tot een hogere zoutlast, maar dit wordt weer gecompenseerd door kortere deur-opentijden. In het vervolg van dit hoofdstuk zal alleen het Projectalternatief besproken worden, omdat dit de meest toekomstige toestand is en omdat dit de mogelijkheid geeft om een vergelijking te maken met de 2013 Arcadis studie [1].

4.3.2 Zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen

De zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen op het Noordzeekanaal hangt af van de sluisoperaties (grootte schip, deur open tijden), schutschijf en zoutgehaltes in de voorhavens aan beide zijden van de sluis. Zoals beschreven in paragraaf 4.2.4 zijn deze afhankelijkheden in de huidige studie meegenomen door WANDA-Locks en Delft3D (offline en online) te koppelen.

Tabel 4.1 toont de gemiddelde zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen voor de verschillende scenario's en toestanden voor de offline gekoppelde simulaties. Tijdens de Autonome Ontwikkeling is de gemodelleerde zoutlast voor alle scenario's in de range van 600 – 700 kg/s. De zoutlasten vanuit de scheepvaartsluizen voor Scenario 4 en 5 zijn wat lager dan voor het Scenario januari - juni 2013, vanwege de lagere afvoerdebieten in Scenario 4 en 5. Het gevolg van deze lage afvoerdebieten is dat er minder zout vanuit de Velserkom richting het spui-maalcomplex wordt getransporteerd, waardoor het zoutgehalte in de Velserkom oploopt. Het water dat vervolgens weer de scheepvaartsluizen instroomt bevat meer zout tijdens het Scenario 4 en 5 als gemiddeld tijdens het Scenario januari - juni 2013, waardoor de netto zoutlast gereduceerd wordt.

Tijdens het Projectalternatief neemt de netto zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen toe t.o.v. de Autonome Ontwikkeling vanwege de grotere sluis (Nieuwe sluis in plaats van de Noordersluis) en de veranderingen in schutfrequentie en deur-opentijden tot ongeveer 800 – 900 kg/s. Scenario 4 en 5 vallen lager uit als het Scenario januari - juni 2013 vanwege dezelfde redenen als beschreven in de vorige alinea.

Indien de selectieve onttrekking wordt toegepast neemt de netto zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen verder toe tot ongeveer 1100 – 1200 kg/s. Doordat bij gebruik van de selectieve onttrekking meer zout afgevoerd wordt, neemt het gemiddelde zoutgehalte in de Velserkom ten opzichte van het Projectalternatief (zonder selectieve onttrekking) af. Daardoor stroomt er minder zout terug de sluizen in wanneer de sluiskolken gevuld worden met water vanuit de Velserkom. Hierdoor neemt de netto zoutlast toe ten opzichte van het Projectalternatief.

Tabel 4.1 Gemiddelde netto zoutlast scheepvaartsluizen, Scenario januari - juni 2013, Scenario 4, Scenario 5.

	Gemiddeld netto zoutlast scheepvaartsluizen [kg/s]		
	Scenario januari - juni 2013	**Scenario 4**	**Scenario 5**
AO	688	612	610

PA	893	795	788
PA+SO	1183	1076	1061

Een vergelijk met de Arcadis randvoorwaarden kan niet gemaakt worden op basis van Tabel 4.1. Het Scenario januari – juni 2013 is door Arcadis namelijk niet gedraaid voor de toestanden die in deze studie bekeken zijn. De enige mogelijk voor een vergelijking zijn de Scenario's 4 en 5 met de oorspronkelijke initiële condities zoals gehanteerd in [1]. Voor deze korte droge scenario's is het verschil dat de Autonome Ontwikkeling met WANDA-Locks zoutrandvoorwaarden een 16% lagere zoutlast door de scheepvaartsluizen berekend, en een 20% lagere zoutflux in de mond van het NZK, terwijl de sluisoperatie tijdens de simulatieperiode niet wezenlijk verschilt van het volledige jaar (gemiddelde schutfrequenties en gemiddelde deur-opentijden Noordersluis vrijwel gelijk).

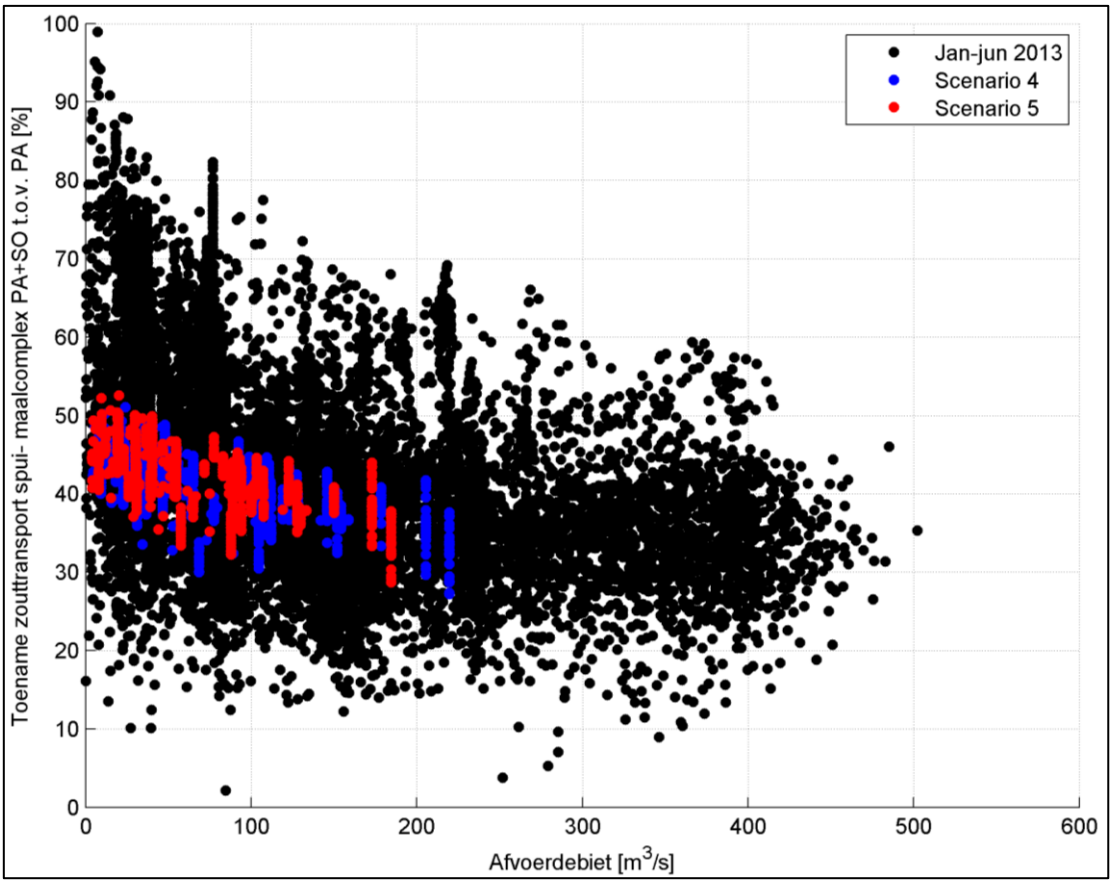
4.3.3 Toename zoutafvoer bij spui- en gemaalcomplex door de selectieve onttrekking

Tabel 4.2 toont de gemiddelde zoutafvoer bij het spui- en gemaalcomplex voor alle scenario's en toestanden voor de offline gekoppelde simulaties. De zoutafvoer bij het spui- en gemaalcomplex is in het Scenario januari - juni 2013 ongeveer 2x zo groot als in Scenario 4 en 5. Dit is gerelateerd aan de zeer lage afvoerdebieten in Scenario 4 en 5, zie paragraaf 4.2.2. Tijdens het Scenario januari - juni 2013 is de zoutafvoer bij het spui- en gemaalcomplex ongeveer even groot is als de zoutlast bij de scheepvaartsluizen. Aangezien er bij het Scenario januari - juni 2013 ongeveer 6 maanden doorgerekend wordt, kan er een dynamisch evenwicht ontstaan, zodat gemiddeld al het inkomende zout ook weer afgevoerd wordt via het spui- en maalcomplex. Bij de korte simulaties (Scenario 4 en 5) is te zien dat er een groot verschil is tussen de aanvoer en afvoer. Het gevolg is dat het resterende zout het Noordzeekanaal op zal stromen (en een klein gedeelte zal in de Velserkom achterblijven). Indien de Scenario 4 en 5 simulaties langer doorgezet zouden worden, zou het zoutgehalte in het Noordzeekanaal sterk oplopen, waardoor het Noordzeekanaal een grotere tegendruk zal geven tegen de dichtheidsstromen vanuit de Velserkom. Het gevolg is dat er op den duur een nieuw dynamisch evenwicht ontstaat.

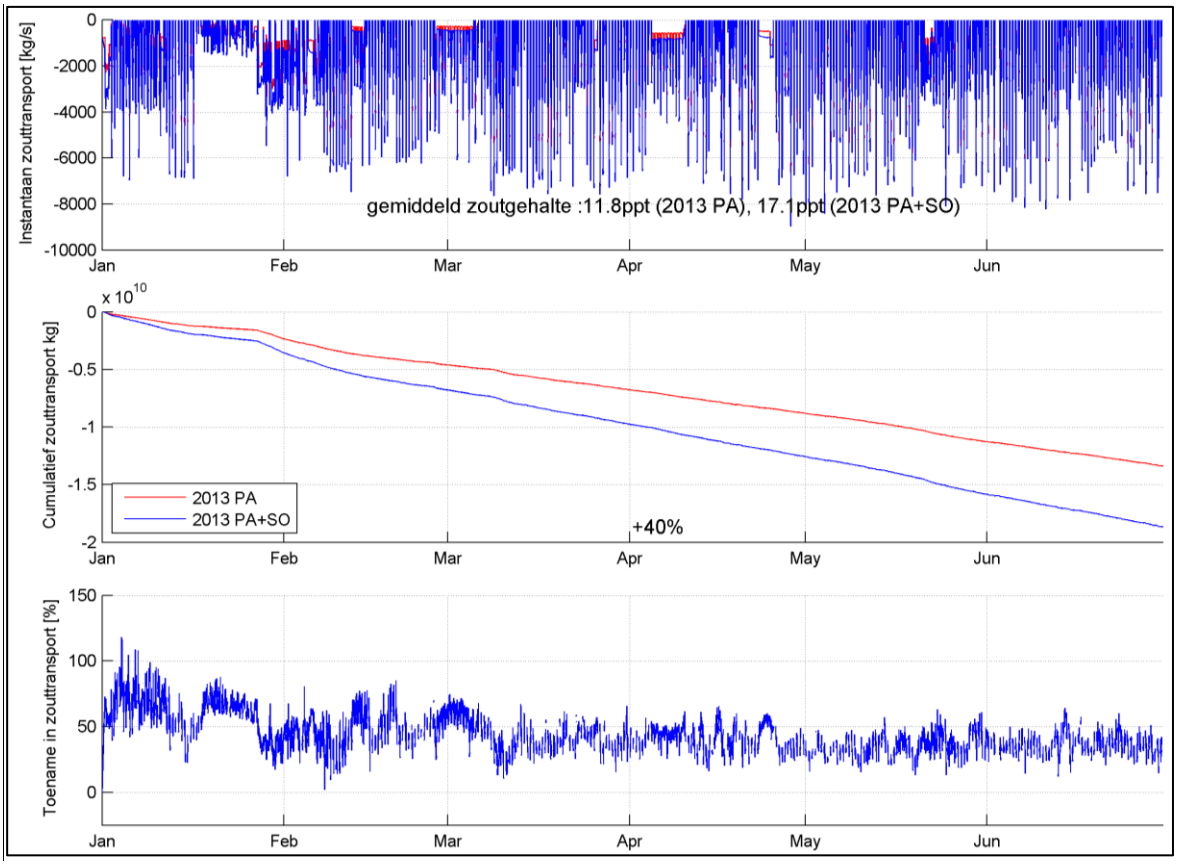
Tabel 4.2 Gemiddelde zoutafvoer bij het spui- en maalcomplex, Scenario januari - juni 2013, Scenario 4, Scenario 5.

	Gemiddelde zoutafvoer bij het spui- en gemaalcomplex[kg/s]		
	Scenario januari - juni 2013	**Scenario 4**	**Scenario 5**
AO	702	389	327
PA	855	486	411
PA+SO	1194	676	577

Figuur 4.3 toont de toename in zoutafvoer bij het spui- maalcomplex van PA+SO ten opzichte van PA (in deze bijlage verder naar gerefereerd als efficiëntie). De gemiddelde toename voor alle scenario's is ongeveer 40%. De 'efficiëntie' van de selectieve onttrekking neemt af bij hogere afvoerdebieten. Bij lage afvoerdebieten wordt heel selectief het zoute water dicht bij de bodem afgezogen, terwijl bij hogere debieten ook het zoute water hoger in de waterkolom afgezogen wordt. De spreiding in het Scenario januari - juni 2013 is groter omdat de simulatie veel langer is en omdat alle jan-jun 2013 simulaties met dezelfde initiële conditie (i.e. niet ingespeeld) beginnen. Figuur 4.4 illustreert de invloed van de tijd op de 'efficiëntie' van de selectieve onttrekking voor het Scenario januari - juni 2013. De onderste grafiek geeft het verloop van de 'efficiëntie' weer en daalt vooral in de twee maanden, waarna een evenwicht bereikt is.



Figuur 4.3 Relatie tussen afvoerdebieten, horizontale as, en 'efficiëntie' van de selectieve onttrekking (PA+SO t.o.v. PA), verticale as. De eerste week is bij alle simulaties niet meegenomen om directe inspeeleffecten niet mee te nemen.



Figuur 4.4 Tijdserie van het instantane zouttransport bij het spui- en gemaalcomplex (boven), cumulatieve zoutafvoer (midden) en 'efficiëntie' van de selectieve onttrekking (onder), voor het Scenario januari - juni 2013, PA en PA+SO.

4.3.4 Effect selectieve onttrekking op verzilting Noordzeekanaal

De beoogde doelstelling van de selectieve onttrekking is om de zoutindringing op het Noordzeekanaal in het Projectalternatief (met selectieve onttrekking) niet groter te laten zijn dan de zoutindringing die zou optreden bij de Autonome Ontwikkeling. In deze paragraaf is het effect op de verzilting gevisualiseerd door het cumulatieve zouttransport te plotten in de richting van het Noordzeekanaal (richting het Noordzeekanaal is positief). Figuur 2.5 toont de gekozen dwarsdoorsnede waarover het cumulatieve zouttransport geanalyseerd is. Het cumulatieve zouttransport geeft aan hoeveel kg zout er sinds het begin van de simulatie netto door de dwarsdoorsnede getransporteerd is. In deze paragraaf betekent een positief cumulatief zouttransport dat er t.o.v. het begin van de simulatie een netto zouttransport richting het Noordzeekanaal is opgetreden. Een negatieve cumulatief zouttransport betekent dat t.o.v. het begin van de simulatie een netto zouttransport richting de Velserkom is opgetreden.

Scenario januari - juni 2013

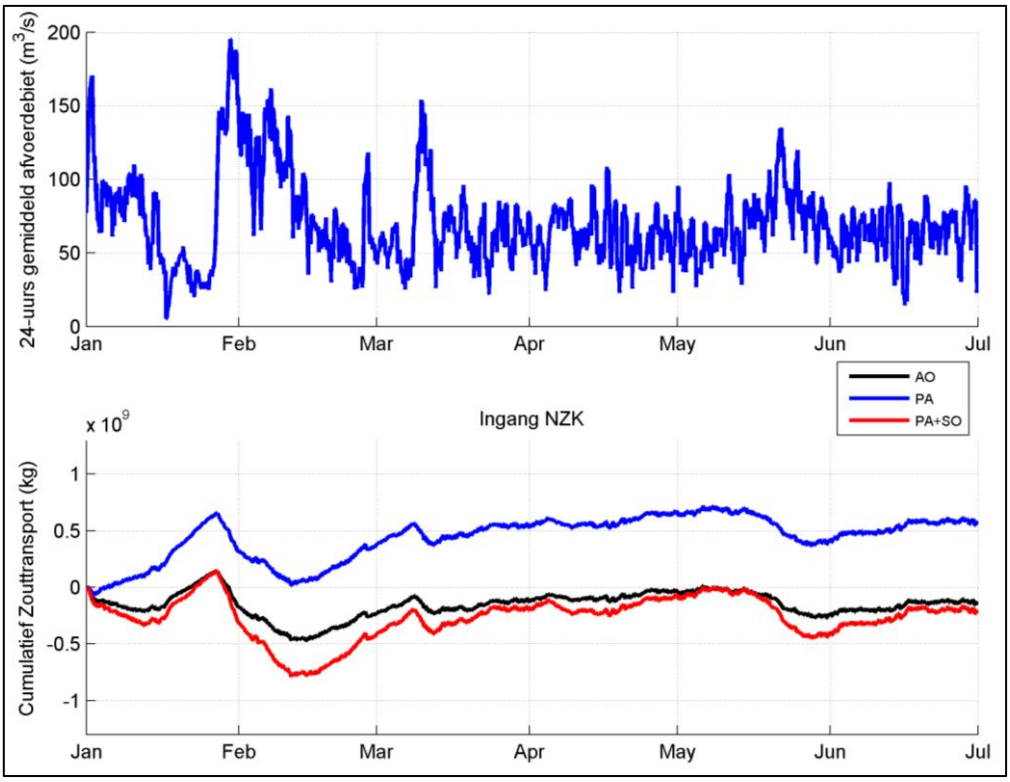
Figuur 4.5 toont een overzicht van het cumulatieve zouttransport richting het Noordzeekanaal voor het Scenario januari - juni 2013 (AO, PA en PA+SO). De bovenste plot toont het daggemiddelde afvoerdebiet wat gebruikt kan worden ter interpretatie van de variatie in het cumulatieve zouttransport. De zwarte lijn toont het cumulatieve zouttransport voor de Autonome Ontwikkeling. Duidelijk is te zien dat het zouttransport (de richtingscoëfficiënt van de cumulatieve grafiek) sterk afhangt van het afvoerdebiet. Bij hoge afvoeren treedt er een

verzoeting op van het Noordzeekanaal, bij lage afvoeren een verzilting. In paragraaf 4.3.3 werd beschreven dat de selectieve onttrekking effectiever zout water afvoert bij lage afvoerdebieten. Dit lijkt tegenstrijdig met de bevinding hierboven, maar dat is niet het geval. Ook al is de selectieve onttrekking effectiever bij lage afvoeren, de totale hoeveelheid zout die afgevoerd wordt bij het spui- en maalcomplex is een functie van de efficiëntie vermenigvuldigd met het afvoerdebiet. Met andere woorden, bij hoge afvoeren zal altijd meer zout afgevoerd worden, ook al daalt het gemiddelde zoutgehalte van het afgevoerde water.

De blauwe lijn visualiseert het cumulatieve zouttransport tijdens het Projectalternatief. Door de toegenomen zouttransporten vanuit de scheepvaartsluizen neemt ook de zoutbelasting op het Noordzeekanaal sterk toe. Na ongeveer 1 maand is er in de simulatie een nieuw evenwicht ontstaan, waarbij er netto ongeveer $5 \cdot 10^8$ kg (500.000 ton) zout richting het Noordzeekanaal is getransporteerd. Dit resulteert in een gemiddelde verhoging van het zoutgehalte van ongeveer 2 psu (aangenomen volume NZK+ARK is $2{,}8 \cdot 10^8$). Door het toenemen van het zoutgehalte in het Noordzeekanaal, nemen de dichtheidsverschillen tussen de Velserkom en het Noordzeekanaal af en daarmee de dichtheidsstromen richting het Noordzeekanaal. Dit verklaard waarom het verschil tussen de blauwe en zwarte lijn redelijk constant is vanaf ongeveer 1 maand na start van de simulatie.

De rode lijn visualiseert het cumulatieve zouttransport tijdens het Projectalternatief indien er gebruik wordt gemaakt van selectieve onttrekking. De grafiek laat hetzelfde gedrag zien als voor de Autonome Ontwikkeling, maar met grotere variaties, vanwege de grotere zout influx bij de scheepvaartsluizen en de grotere zout afvoer bij het spui- en maalcomplex. Gedurende periodes met hoge afvoerdebieten treedt er ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling een verzoeting op van het Noordzeekanaal, terwijl er tijdens droge periodes een verzilting optreedt. Het omslagpunt treedt op rond een dag gemiddelde afvoer van ongeveer 65±14 m^3/s. In de jan-jun 2013 simulatie blijft het cumulatieve zouttransport voor het Projectalternatief inclusief selectieve onttrekking altijd onder die van de Autonome Ontwikkeling. Alleen eind januari (aan het eind van de droge periode) en begin mei (eind van een relatief lange milde periode) is het cumulatieve zouttransport gelijk voor beide condities. De droge periodes in de eerste helft van het Scenario januari - juni 2013 kunnen opgevangen worden dankzij de verzoeting van het Noordzeekanaal gedurende de voorafgaande periode met hogere afvoeren. Indien de droge periodes of lage periodes met lage afvoeren langer duren dan in 2013, kan het voorkomen dat het Noordzeekanaal tijdens het Projectalternatief inclusief selectieve onttrekking voor korte periodes verzilt ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling.

Als beheersmaatregel kan er in de toekomst voor gekozen worden om voorafgaand aan een droge periode extra water in te laten bij het Amsterdam-Rijnkanaal zodat het Noordzeekanaal dusdanig verzoet is en daarmee het extra zout tijdens de (daaropvolgende) droge periode op kan vangen. Figuur 4.5 geeft een indicatie van de zoutbuffer die opgebouwd kan worden door het toepassen van selectieve onttrekking. Tijdens de periode 27 januari t/m 14 februari 2013 (met gemiddelde afvoerdebieten van ongeveer 120 m^3/s) wordt het Noordzeekanaal dusdanig verzoet dat er ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling een buffer van ongeveer 300.000 ton zout ontstaat (er is op dat moment 300.000 ton minder zout aanwezig in het Noordzeekanaal). In de periode van 15 mei t/m 27 mei (gemiddelde afvoerdebieten van ongeveer 90 m^3/s) ontstaat er een buffer van ongeveer 200.000 ton zout ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling.

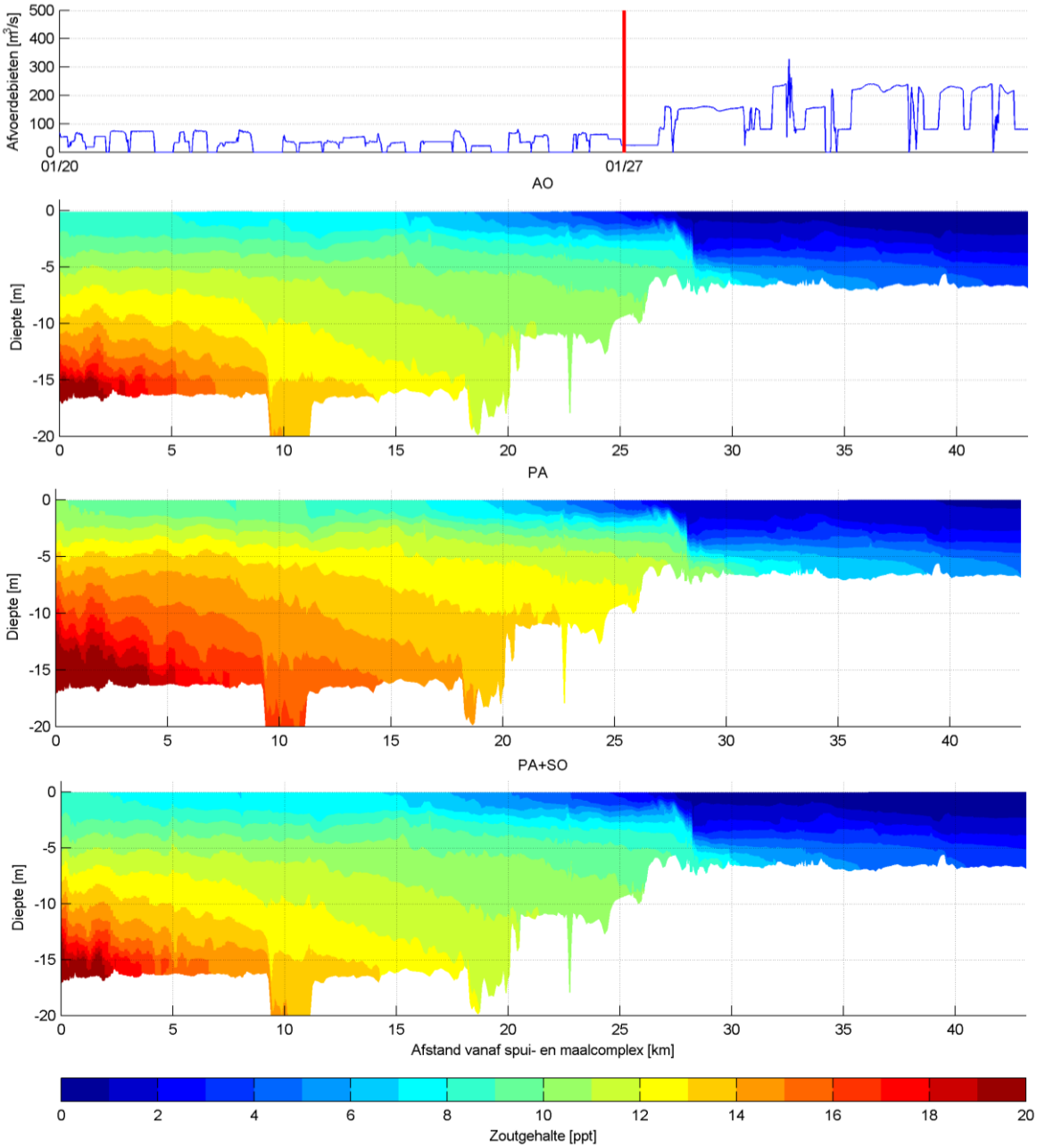


Figuur 4.5 Dag gemiddelde afvoerdebiet (boven), cumulatief zouttransport richting NZK (onder). Scenario januari - juni 2013, AO, PA en PA+SO.

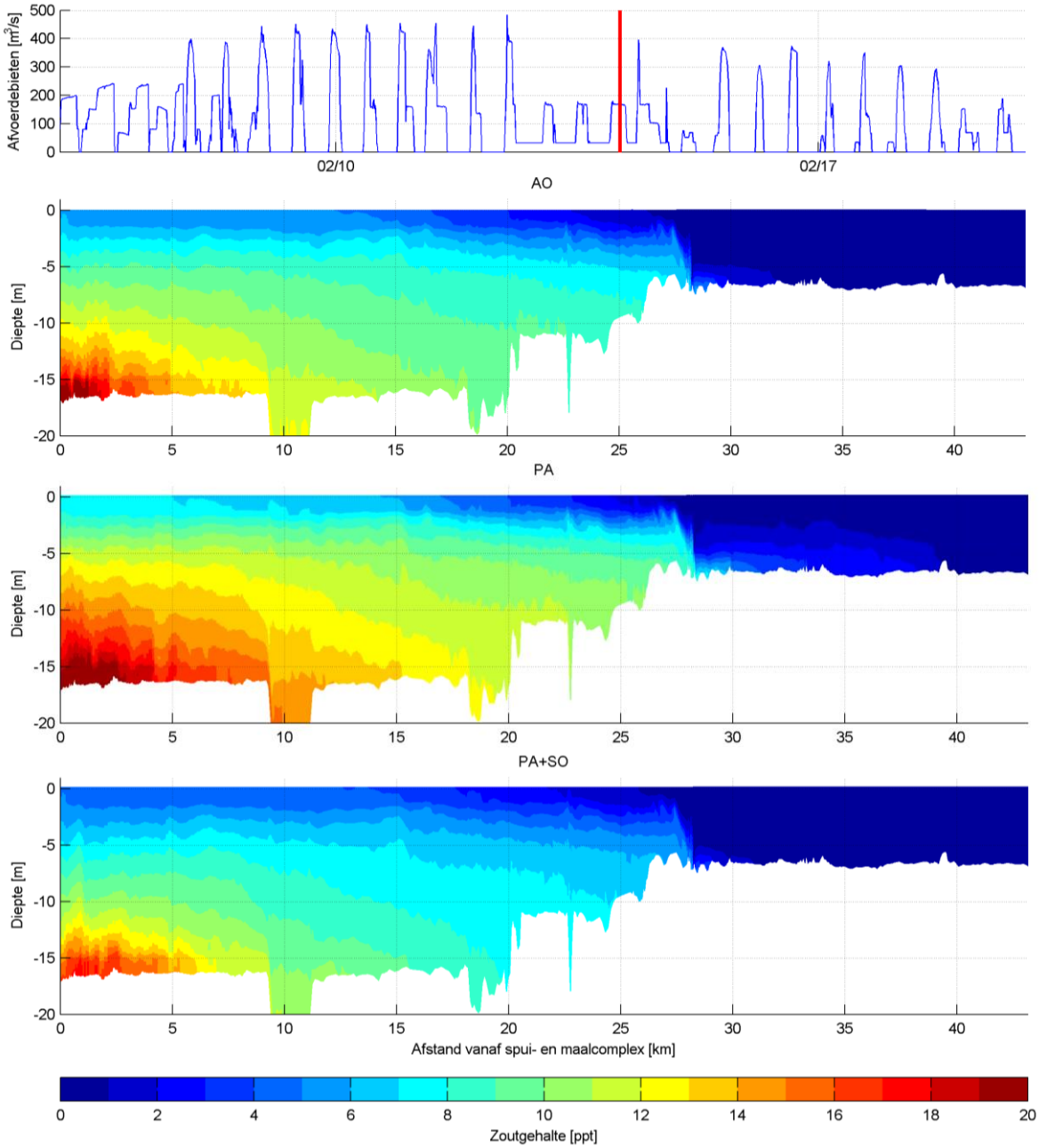
Figuur 4.6 en Figuur 4.7 visualiseren het zoutgehalte op een langsdoorsnede door het Noordzeekanaal en het Amsterdam Rijnkanaal voor 27 januari (einde droge periode) en 14 februari (einde periode met hoge afvoeren). Zoals beschreven in de vorige alinea wordt tijdens deze periode een buffer van 300.000 ton opgebouwd in het Projectalternatief met selectieve onttrekking ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling.

De langsdoorsnede voor 27 januari is zeer vergelijkbaar voor de Autonome Ontwikkeling en het Projectalternatief inclusief selectieve onttrekking. Dit kon ook verwacht worden op basis van de cumulatieve zouttransporten die voor beide scenario's op dat moment gelijk zijn. De zoutgehaltes in het Projectalternatief zijn langs de gehele doorsnede hoger. In alle scenario's is duidelijk te zien dat de zouttong zich onder het zoete water in oostelijke richting wil verplaatsen. In het Amsterdam Rijnkanaal zijn de zoutgehaltes bij de bodem in de orde van 4 ppt voor AO en PA+SO en ongeveer 6 ppt voor PA.

Op 14 februari zijn de zoutgehaltes voor alle scenario's significant lager. Daarnaast is nu ook een duidelijk verschil te zien tussen de Autonome Ontwikkeling en het Projectalternatief inclusief selectieve onttrekking (300.000 ton verschil op basis van Figuur 4.5). Over de gehele waterdiepte zijn de zoutgehaltes lager voor het PA+SO. Tijdens het Projectalternatief is in het Amsterdam Rijnkanaal nog een zouttong aanwezig, met zoutgehaltes van 2-3 ppt bij de bodem.



Figuur 4.6 Zoutgehalte langsdoorsnede door NZK en ARK op 27 januari 00:00 2013, AO, PA en PA+SO, Scenario januari - juni 2013



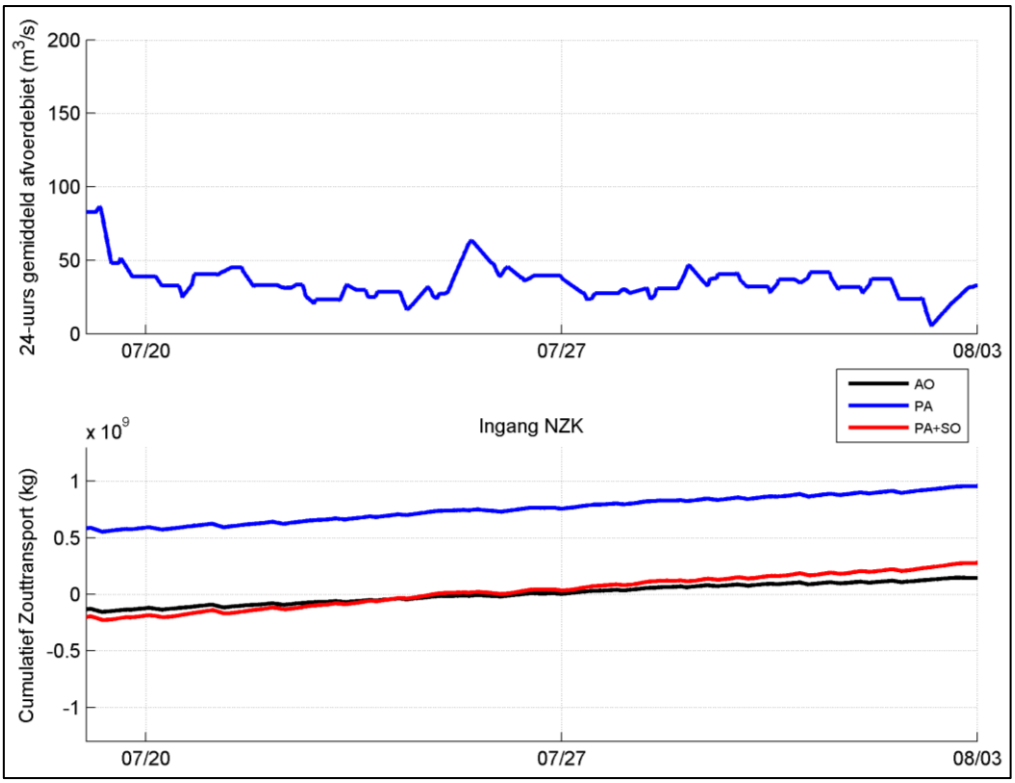
Figuur 4.7 Zoutgehalte langsdoorsnede door NZK en ARK op 14 februari 03:00 2013, AO, PA en PA+SO, Scenario januari - juni 2013

Scenario 4

Figuur 4.8 geeft een overzicht van het cumulatieve zouttransport richting het Noordzeekanaal voor Scenario 4 (AO, PA en PA+SO). Zoals beschreven in 4.2.1 zijn de simulaties voor Scenario 4 gestart met de eindcondities van het Scenario januari - juni 2013. Ter interpretatie is het cumulatieve zouttransport aan het begin van de simulaties dus niet 0 kg, maar gelijk aan het cumulatieve zouttransport aan het eind van de jan-jun 2013 simulaties, zie Figuur 4.5. De afvoerdebieten tijdens dit scenario zijn erg laag (gemiddeld ongeveer 40 m^3/s). Dergelijke afvoerdebieten zijn niet hoog genoeg om het zouttransport vanuit de scheepvaartsluizen te compenseren, dit is in overeenstemming met de resultaten voor het Scenario januari - juni

2013 waaruit bleek dat het Projectalternatief inclusief selectieve onttrekking leidt tot een verzilting ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling bij daggemiddelde afvoerdebieten lager dan ongeveer 65±14 m^3/s.

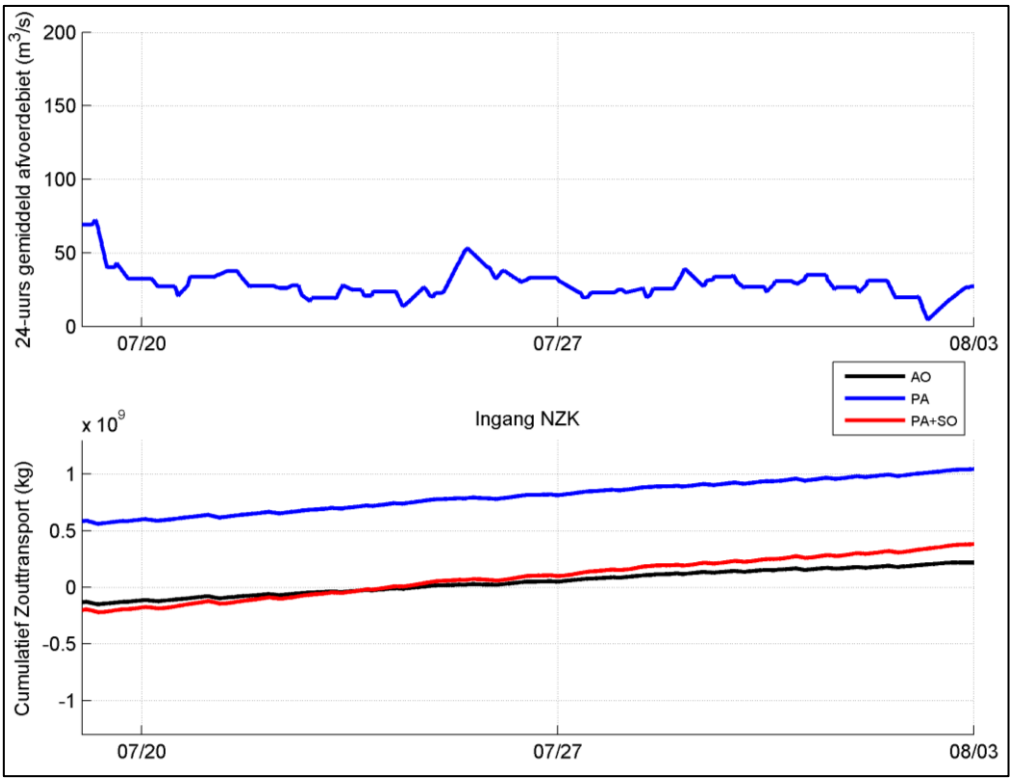
In de Autonome Ontwikkeling treedt er in dit scenario een verzilting op van het Noordzeekanaal. Tijdens het Projectalternatief (met en zonder selectieve onttrekking) neem het zouttransport richting het Noordzeekanaal verder toe en is het cumulatieve zouttransport tijdens het Projectalternatief inclusief selectieve onttrekking (tijdelijk) hoger dan tijdens de Autonome Ontwikkeling. Aan het eind van de simulatie bevat het Noordzeekanaal tijdens het Projectalternatief inclusief selectieve onttrekking ongeveer $1.3 \cdot 10^8$ kg (130.000 ton) meer zout dan tijdens de Autonome Ontwikkeling. Bij de analyse van de jan-jun 2013 simulatie is gebleken dat tijdens periodes met hoge afvoeren, deze hoeveelheid zout typisch weer weggespoeld kan worden met behulp van de selectieve onttrekking.



Figuur 4.8 Dag gemiddelde afvoerdebiet (boven), cumulatief zouttransport richting NZK (onder). Scenario 4, AO, PA en PA+SO.

Scenario 5

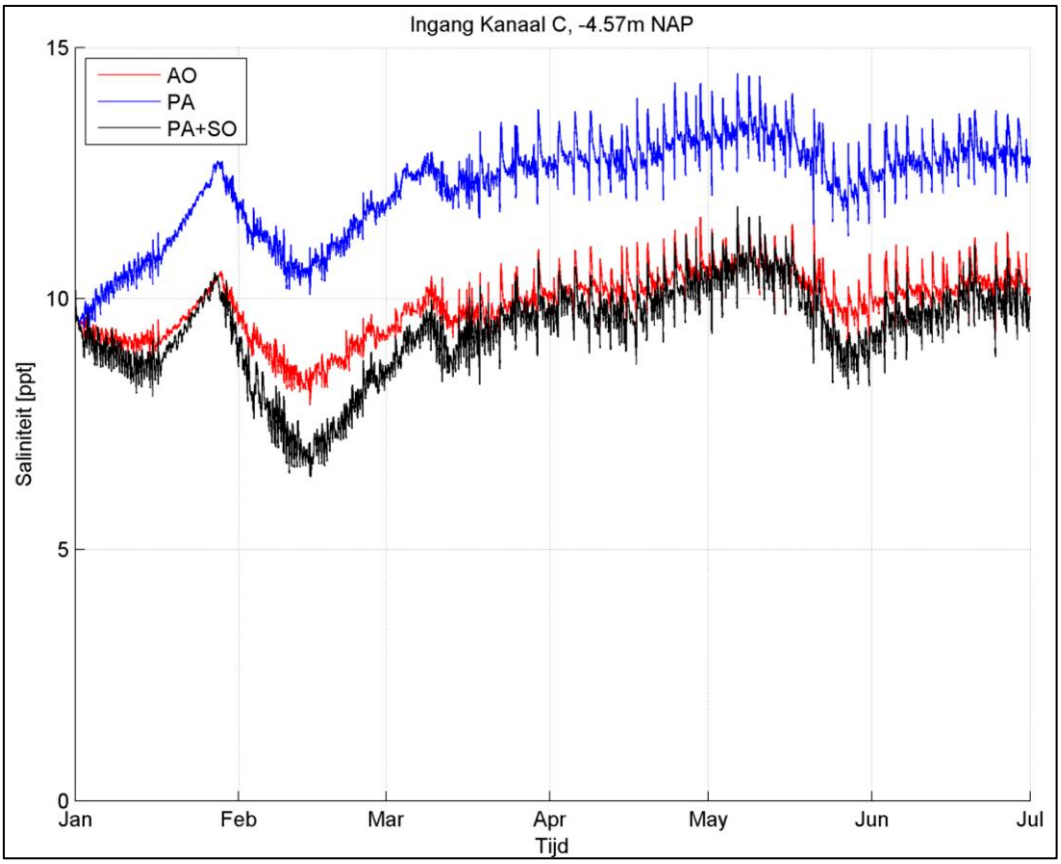
Figuur 4.9 toont een overzicht van het cumulatieve zouttransport richting het Noordzeekanaal voor Scenario 5 (AO, PA en PA+SO). De resultaten zijn zeer vergelijkbaar met die van Scenario 4. Aangezien de afvoerdebieten bij Scenario 5 nog lager zijn dan bij Scenario 4 neemt het verschil tussen het Projectalternatief en de Autonome Ontwikkeling verder toe. Aan het eind van de simulatie bevat het Noordzeekanaal tijdens het Projectalternatief inclusief selectieve onttrekking ongeveer $1.6 \cdot 10^8$ kg (160.000 ton) meer zout dan tijdens de Autonome Ontwikkeling.



Figuur 4.9 Dag gemiddelde afvoerdebiet (boven), cumulatief zouttransport richting NZK (onder). Scenario 5, AO, PA en PA+SO.

4.3.5 Effect selectieve onttrekking op zoutgehalte Zijkanaal C

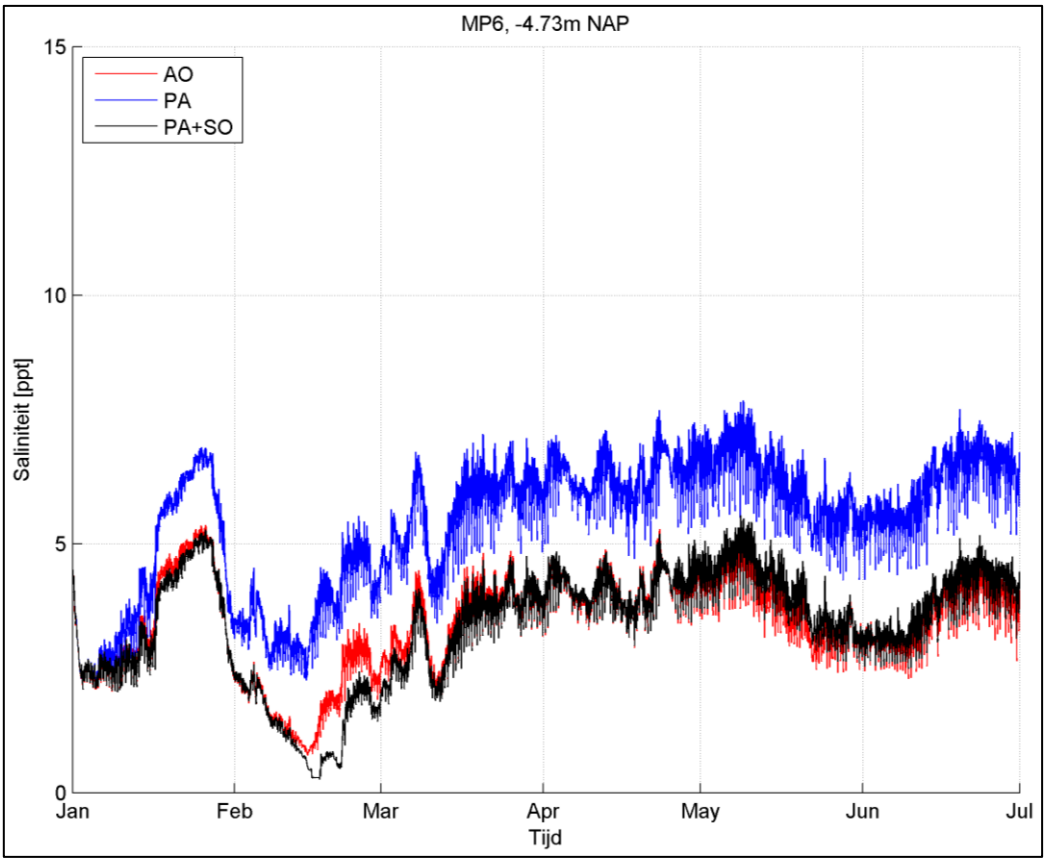
Zoals beschreven in het hoofdrapport is Zijkanaal C een van de focusgebieden van deze studie. Figuur 4.10 toont het zoutgehalte op -4.57 m NAP, nabij de bodem, in Zijkanaal C (nabij monding in Noordzeekanaal) voor het Scenario januari - juni 2013. Deze verticale positie is consistent met het niveau dat Arcadis heeft gebruikt in de 2013 rapportage [1]. Het verloop van het zoutgehalte in Zijkanaal C is sterk gerelateerd aan het netto zouttransport bij de ingang van het Noordzeekanaal, zie paragraaf 4.3.4. Het Projectalternatief inclusief selectieve onttrekking leidt tot een sterke verzoeting van Zijkanaal C tijdens hoge afvoerdebieten (bijvoorbeeld begin februari) en tot een verzilting tijdens lage afvoerdebieten. Indien de selectieve onttrekking niet toegepast wordt neemt het zoutgehalte tijdens het Projectalternatief met ongeveer 2.5 ppt toe ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling. Gedurende de gehele periode is het zoutgehalte tijdens het Projectalternatief inclusief selectieve onttrekking lager dan tijdens de Autonome Ontwikkeling.



Figuur 4.10 Zoutgehalte bij op -4.57 m NAP (nabij bodem) voor ingang Zijkanaal C, jan-jun 2013, AO, PA en PA+SO.

4.3.6 Effect selectieve onttrekking op zoutgehalte MP6 (nabij Diemen)

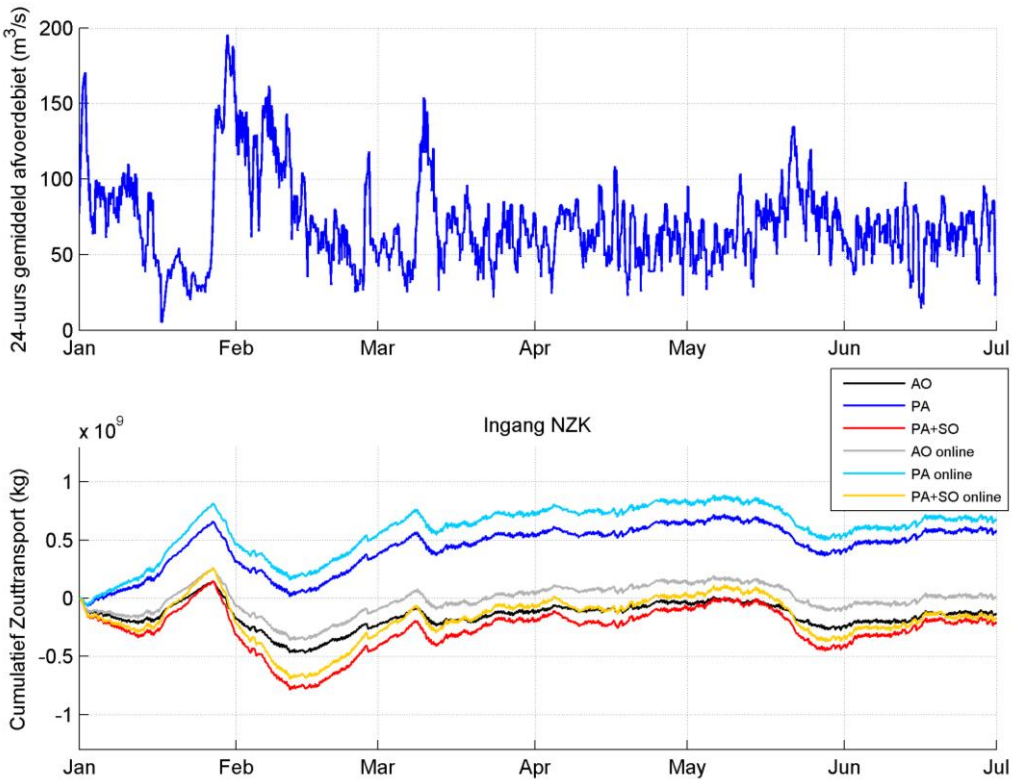
Figuur 4.10 toont het zoutgehalte op -4.73 m NAP op het punt MP6 (nabij Diemen) voor het Scenario januari - juni 2013. Deze verticale positie is consistent met het niveau dat Arcadis heeft gebruikt in de 2013 rapportage [1]. Ook het verloop van het zoutgehalte bij Diemen is sterk gerelateerd aan het netto zouttransport bij de ingang van het Noordzeekanaal. Tijdens het Projectalternatief zijn de zoutgehaltes bij de bodem ongeveer 2 ppt hoger dan tijdens de Autonome Ontwikkeling. Door het aanbrengen van de selectieve onttrekking worden de zoutgehaltes tijdens het Projectalternatief weer terug gebracht tot het niveau van de Autonome Ontwikkeling.



Figuur 4.11 Zoutgehalte bij MP6 (nabij Diemen) op -4.73 m NAP, jan-jun 2013, AO, PA en PA+SO.

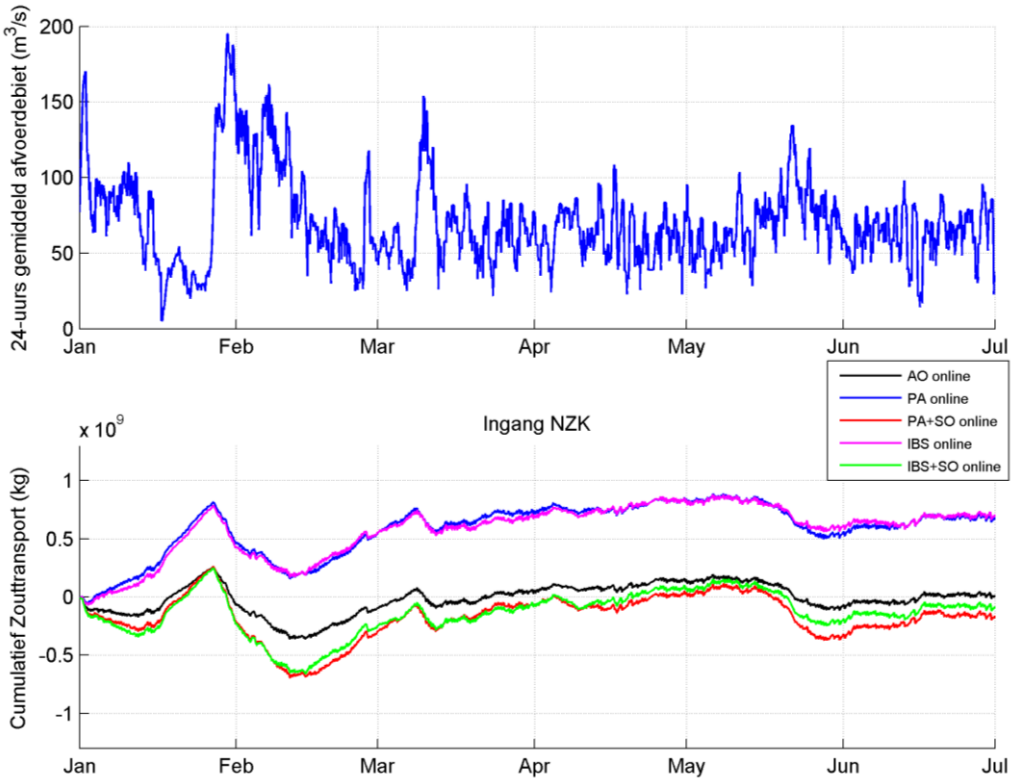
5 Discussie

Offline versus online gekoppelde WANDA-Locks – Delft3D simulaties
In hoofdstuk 4 zijn de resultaten gepresenteerd van de offline gekoppelde WANDA-Locks – Delft3D simulaties. Daarnaast zijn online gekoppelde simulaties uitgevoerd waarin de feedback van Delft3D (zoutgehalte en waterstand in de voorhaven) dynamisch is meegenomen. De dynamiek in het zouttransport bij de voorhavens verandert in de online gekoppelde simulaties in geringe mate ten opzichte van de offline gekoppelde simulaties. Beide aanpakken resulteren echter in vergelijkbare conclusies als het gaat om het effect van de selectieve onttrekking op de zouttransporten richting het Noordzeekanaal. Figuur 5.1 toont het cumulatieve zouttransport richting het Noordzeekanaal voor het Scenario januari - juni 2013 voor de online en offline koppeling. In absolute zin zijn er kleine verschillen tussen de online en offline koppeling, maar in relatieve zin (verschil tussen PA+SO en AO) zijn de resultaten zeer vergelijkbaar. Daarmee kan geconcludeerd worden dat de offline gekoppelde simulaties met voldoende vertrouwen gebruikt kunnen worden in deze studie.



Figuur 5.1 Dag gemiddelde afvoerdebiet (boven), cumulatief zouttransport richting NZK (onder). Scenario januari - juni 2013, AO, PA en PA+SO, offline en online

Ingebruikstelling versus Projectalternatief
Figuur 5.2 toont het cumulatieve zouttransport richting het Noordzeekanaal voor het Scenario januari – juni 2013 voor de Autonome Ontwikkeling, Projectalternatief en Ingebruiksstelling voor de online gekoppelde simulaties. Deze simulaties kwamen na de oplevering van het concept rapport ter beschikking. Deze resultaten bevestigen de eerdere conclusie in paragraaf 4.3.1 dat de zoutlasten tijdens het Projectalternatief zeer vergelijkbaar zijn met de zoutlasten tijdens de Ingebruiksstelling.

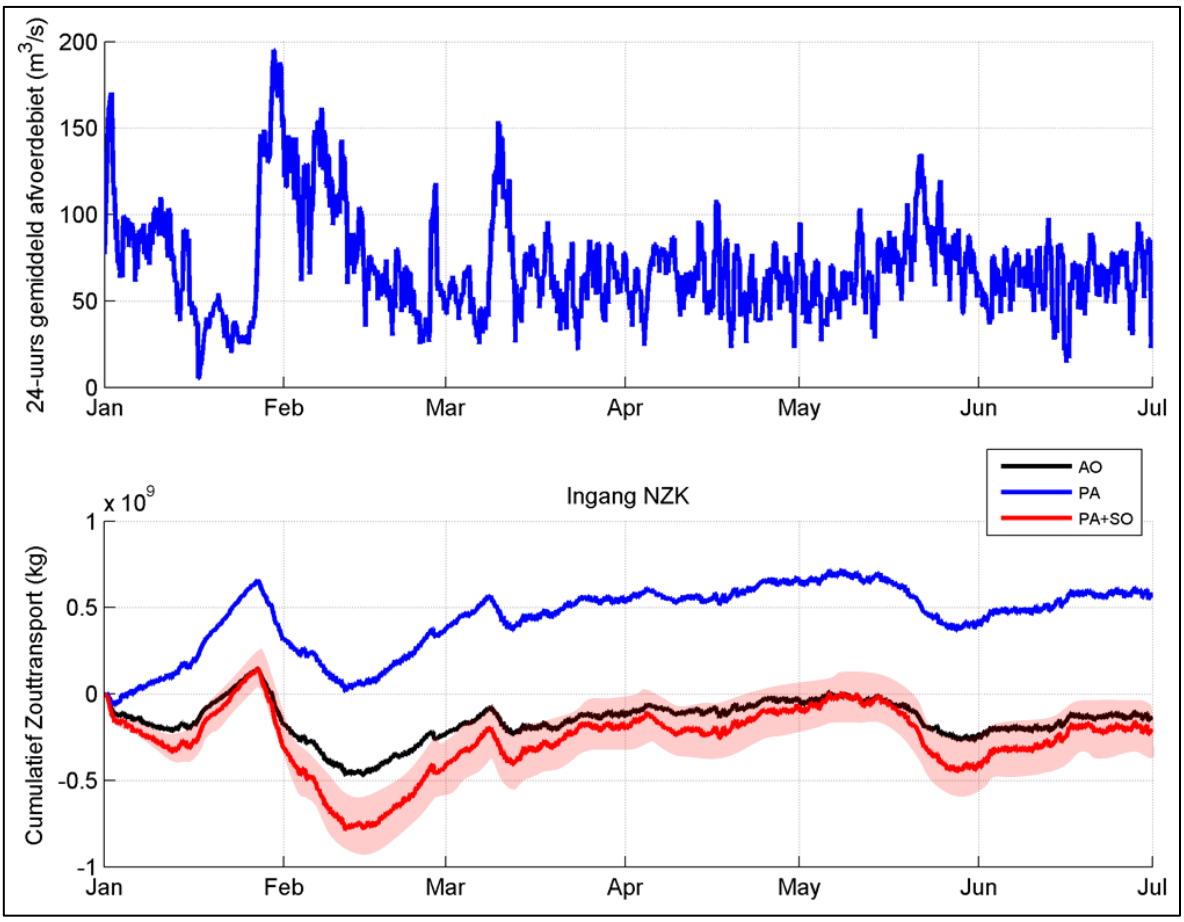


Figuur 5.2 Dag gemiddelde afvoerdebiet (boven), cumulatief zouttransport richting NZK (onder). Scenario januari - juni 2013, AO, PA, PA+SO, IBS en IBS+SO, op basis van de online koppeling tussen Delft3D en WANDA-Locks

Onzekerheden in schematisatie selectieve onttrekking

In paragraaf 4.3.4 is het effect beschreven van de selectieve onttrekking op de zouttransporten richting het Noordzeekanaal. In de jan-jun 2013 simulaties bleef het cumulatieve zouttransport richting het Noordzeekanaal in het Projectalternatief met selectieve onttrekking altijd lager dan tijdens de Autonome Ontwikkeling. Voor de interpretatie van deze resultaten is het van belang om de invloed van modelonzekerheden in te schatten. De meeste onzekerheden in het model gelden voor alle gemodelleerde toestanden (AO, PA, PA+SO) en hebben dus een geringe invloed op het relatieve vergelijk tussen PA+SO en AO. Een voorbeeld hiervan is bijvoorbeeld de onzekerheid in voorspelling van de zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen. Aangezien de aannames in de WANDA-Locks simulaties voor alle toestanden gelijk zijn, zal een eventuele fout in de voorspelling geen grote invloed hebben op de relatieve vergelijkingen in deze studie. De grootste onzekerheden m.b.t. het vergelijk tussen PA+SO en AO zit in de schematisatie van de selectieve onttrekking. In een eerdere fase in deze studie is de werking van de selectieve onttrekking in 2DV Delft3D simulaties vergeleken met CFD simulaties. Daarnaast treden er onzekerheden op met betrekking tot de representatie van 3D stroompatronen rondom de selectieve onttrekking. Op basis van de eerdere 2DV Delft3D vergelijking met CFD en expert judgement is geschat dat de onzekerheden in de zouttransporten onder het zoutscherm in de orde van 20% zijn. Ter illustratie is er een 20% onzekerheidsband rondom het resultaat voor PA+SO getoond in Figuur 5.3. Indien het verschil tussen PA en PA+SO met 20% afneemt zal het cumulatieve zouttransport tijdens PA+SO regelmatig hoger zijn dan

tijdens AO. Opgemerkt wordt dat ook bij een 20% onzekerheid het verschil tussen PA en PA+SO zeer groot blijft.



Figuur 5.3 Dag gemiddelde afvoerdebiet (boven), cumulatief zouttransport richting NZK, inclusief 20% onzekerheidsband (onder). Scenario januari - juni 2013, AO, PA en PA+SO

Karakterisering jan-jun 2013
Op basis van het gemiddelde debiet en de onderschrijding van het 10-percentiel en de overschrijding van het 90-percentiel decadegemiddelde debiet is de simulatie van het 1e halfjaar van 2013 te karakteriseren als een (min of meer) gemiddelde conditie. Op grond hiervan concluderen we dat selectieve onttrekking een goede basismaatregel is die voor veel condities goed zal voldoen. Zekerheid dat de werking onder alle afvoercondities net zo goed is als in de beschouwde periode, kan echter niet worden geboden.

Optimalisatie selectieve onttrekking
In de simulaties voor de huidige studie is de selectieve onttrekking geschematiseerd met een breedte van 130m en een hoogte van 4m. De aangenomen lokale diepte rondom het zoutscherm is 20m. Verwacht wordt dat de effectiviteit van de selectieve onttrekking verder geoptimaliseerd kan worden door de breedte en/of hoogte te vergroten. Dit zal vooral een gunstig effect hebben bij hoge afvoerdebieten, wanneer de stroomsnelheden onder het zoutscherm hoog zijn. Bij lage afvoerdebieten zijn de stroomsnelheden onder het zoutscherm al dusdanig laag dat vooral het zoute water bij de bodem afgezogen wordt. Bij dergelijke afvoeren valt qua hoofdafmetingen (lengte en breedte) van het zoutscherm niet veel winst te

behalen. Daarnaast kan de effectiviteit verhoogd worden door de bodem in de Velserkom te verdiepen, waardoor een zoutvang ontstaat.

Buffermogelijkheden selectieve onttrekking
De simulaties voor het Scenario januari - juni 2013 hebben aangetoond dat tijdens periodes met hoge afvoerdebieten (hoger dan ongeveer 65±14 m3/s), het Noordzeekanaal verzoet kan worden ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling. In de simulaties werd een buffer van ongeveer 300.000 ton zout opgebouwd in de periode 27 januari t/m 14 februari 2013 en ongeveer 200.000 ton in de periode 15 mei t/m 27 mei 2013. Als beheersmaatregel kan er dus in de toekomst voor gekozen worden om voorafgaand aan een droge periode extra te spuien zodat het Noordzeekanaal dusdanig verzoet is en daarmee het extra zout tijdens de (daaropvolgende) droge periode op kan vangen. Met het oog op de responstijd van het systeem (2-3 maanden) heeft een ‘eenmalige’ verzoeting slechts een beperkte houdbaarheidstermijn.

Verschil tussen MER berekeningen en simulatie met verbeterde zoutlek
Zoals beschreven in 4.3.2 zijn de zoutlasten in de Delft3D simulaties die offline gekoppeld zijn met WANDA-Locks ongeveer 10%-15% lager dan de oorspronkelijke Arcadis simulaties. Door de lagere zoutlast neemt het verschil tussen Projectalternatief en Autonome Ontwikkeling in geringe mate af, waardoor de opgave voor de selectieve onttrekking kleiner wordt. Globaal gezien leveren beide aanpakken echter eenzelfde analyse, de relatieve verschillen tussen de verschilllende toestanden (AO, PA en PA+SO) zijn voor beide aanpakken vergelijkbaar.

6 Samenvatting en conclusies

Het doel van deze studie was het inzichtelijk maken van de effectiviteit van de selectieve onttrekking in de monding van het Binnenspuikanaal bij IJmuiden voor het terugdringen of mitigeren van de extra zoutindringing in het Noordzeekanaal ten gevolge van de nieuwe zeesluis bij IJmuiden. Met de selectieve onttrekking wordt beoogd om de zoutindringing op het NZK en ARK in het Projectalternatief niet groter te laten zijn dan de zoutindringing die zou optreden bij de Autonome Ontwikkeling. In deze studie is gebruik gemaakt van hydrodynamische modellen die opgezet zijn door Arcadis [1]. Ter referentie zijn in eerste instantie Scenario 2 en 3 gemodelleerd met en zonder selectieve onttrekking. Deze scenario's zijn door Arcadis in het verleden opgesteld en zijn gebruikt bij het onderzoek naar de zoutindringing ten gevolge van de Nieuwe Sluis voor o.a. de MER. Vervolgens is geconcludeerd dat voor het beschouwen van de effectiviteit van de Selectieve Onttrekking Scenario 4 en 5 en het 2013 scenario beter geschikt zijn, aangezien in deze scenario's gebruik is gemaakt van meer realistische en over de tijd variërende randvoorwaarden. Het 2013 scenario bestrijkt de periode van 1 januari tot 1 juli 2013 en is aangestuurd met realistische (veelal gemeten) randvoorwaarden en is destijds door Arcadis gebruikt om het model te valideren. Scenario 4 en 5 bestrijken beide twee weken en zijn scenario's met zeer lage afvoeren vanuit het Amsterdam-Rijnkanaal (respectievelijk 22 m^3/s en 16 m^3/s) en representeren dus extreem droge periodes. Voor Scenario 4 en 5 is de eindconditie van het Scenario januari - juni 2013 gebruikt als beginconditie. Aangezien voor het 2013 scenario geen randvoorwaarden beschikbaar waren bij de scheepvaartsluizen voor de Autonome Ontwikkeling, Ingebruikstelling en het Projectalternatief en de randvoorwaarden bij de scheepvaartsluizen voor Scenario 4 en 5 zeer schematisch waren, is ervoor gekozen om de zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen te modelleren met behulp van een offline koppeling tussen Delft3D en WANDA-Locks. Daarnaast is een online koppeling opgezet die de feedback van Delft3D naar WANDA-Locks meeneemt. De resultaten van deze online koppeling zijn gebruikt om de offline gekoppelde sommen te interpreteren en te valideren. De online koppeling is ten behoeve van dit project opgezet. Voor al deze scenario's zijn 5 verschillende toestanden beschouwd: Autonome Ontwikkeling (AO), Ingebruikstellingsfase (IBS), Ingebruikstellingsfase inclusief Selectieve Onttrekking (IBS+SO), Projectalternatief (PA) en Projectalternatief inclusief Selectieve Onttrekking (PA+SO). Op basis van deze simulaties kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

Effect op het Noordzeekanaal

- De berekende zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen is tijdens de Ingebruiksstelling zeer vergelijkbaar met het Projectalternatief. Tijdens de Ingebruiksstelling is de schutfrequentie hoger wat zou leidden tot een hogere zoutlast, maar dit wordt weer gecompenseerd door kortere deur-opentijden
- Bij hoge afvoerdebieten is de zoutlast op het Noordzeekanaal tijdens het Projectalternatief inclusief Selectieve Onttrekking (PA+SO) kleiner dan tijdens de Autonome Ontwikkeling (AO). Tijdens die condities is de extra afgevoerde hoeveelheid zout ten gevolge van de Selectieve Onttrekking groter dan de extra hoeveelheid zout dat ten gevolge van het Project Alternatief via de scheepvaartsluizen het systeem binnen dringt. Bij lage afvoerdebieten kan de extra zoutafvoer ten gevolge van de Selectieve Onttrekking dit niet compenseren en is de zoutlast op het Noordzeekanaal tijdens het PA+SO groter dan tijdens de AO. Op basis van de uitgevoerde simulaties voor deze studie volgt dat het omslagpunt ligt rond een daggemiddeld afvoerdebiet van 65±14 m^3/s.

- De simulaties met de 2013 randvoorwaarden laten zien dat door de afwisseling van droge en natte periodes de hoeveelheid zout in het Noordzeekanaal tijdens het PA+SO altijd lager is dan voor de AO. Het verloop van de zoutgehaltes bij Zijkanaal C en bij Diemen zijn daarmee in overeenstemming. Alleen aan het eind van periodes met lage afvoer is de hoeveelheid zout in het PA+SO ongeveer gelijk aan de AO.
- Indien de droge periodes langer duren dan in 2013, kan het voorkomen dat het Noordzeekanaal tijdens het PA+SO voor korte periodes verzilt ten opzichte van de AO. Als beheersmaatregel kan ervoor gekozen worden om voorafgaan aan de droge periode extra water in the laten vanuit het Amsterdam-Rijnkanaal zodat het Noordzeekanaal dusdanig verzoet en dat daarmee het extra zout tijdens de droge periode op kan worden gevangen.
- In de simulaties voor Scenario 4 en Scenario 5 zijn de afvoerdebieten te laag (gemiddeld 35 m^3/s respectievelijk 29 m^3/s) om de extra aangevoerde hoeveelheid zout bij de scheepvaartsluizen af te voeren. Ten opzichte van de AO treedt er dus een verzilting op van het NZK bij het PA+SO. Deze bevindingen zijn in overeenstemming met de bevindingen voor de droge periodes in het 2013 scenario.
- Verder dient nog rekening gehouden te worden met een onzekerheidsband, die initieel geschat wordt op +/- 20% rond het berekende effect van de selectieve onttrekking. Het is aannemelijk dat, indien nodig, er compensatie kan worden gevonden binnen de speelruimte van de dimensionering van de selectieve onttrekking. Anderzijds, kan een verhoging van het debiet door het ARK in natte perioden helpen om samen met de selectieve onttrekking de buffercapaciteit van het systeem te vergroten. Voor deze buffercapaciteit is speciaal de zoetwaterafvoer van de natte periode direct voorafgaand aan de droge periode relevant. Met het oog op de responstijd van het systeem (2-3 maanden) heeft een ‘eenmalige’ verzoeting slechts een beperkte houdbaarheidstermijn.

Extra zoutafvoer ten gevolge van selectieve onttrekking

- Ten gevolge van de Selectieve Onttrekking wordt er meer zout afgevoerd bij het spui- en maalcomplex. De toename in zoutafvoer ten gevolge van de Selectieve Onttrekking hangt af van het afvoerdebiet. Bij lage afvoerdebieten is de procentuele toename (hier gedefinieerd als efficiëntie) in zouttransport ten gevolge van de Selectieve Onttrekking het hoogst, aangezien dan alleen het zoute water dicht bij de bodem het binnenspuikanaal aangezogen wordt. Bij hogere afvoerdebieten wordt meer water van hogere lagen met lager zoutgehalte aangezogen. Opgemerkt wordt dat de totale hoeveelheid extra afgevoerd zout bij hoge afvoerdebieten altijd hoger is dan bij lage afvoerdebieten, aangezien dit een functie is van de ‘efficiëntie’ vermenigvuldigd met het afvoerdebiet.
- Bij alle scenario’s wordt gemiddeld ongeveer 40% meer zout afgevoerd door het spui-maalcomplex wanneer de selectieve onttrekking toegepast wordt t.o.v. het Projectalternatief zonder selectieve onttrekking.
- In het Scenario januari - juni 2013 wordt tijdens het PA gemiddeld 855 kg/s afgevoerd, terwijl dit bij het toepassen van de Selectieve Onttrekking oploopt tot 1194 kg/s.

Zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen

- De netto zoutlast vanuit de scheepvaartsluizen tijdens de Autonome Ontwikkeling is in de orde van 600 kg/s tot 700 kg/s (voor Scenario januari – juni 2013, 4 en 5).
- Tijdens het Projectalternatief (PA) neemt de totale zoutlast toe met ongeveer 30% ten opzichte van de Autonome Ontwikkeling (netto zoutlast in de range van 800 kg/s tot 900 kg/s).
- Indien gebruikt wordt gemaakt van de Selectieve Onttrekking neemt de netto zoutlast door de scheepvaartsluizen verder toe met ongeveer 35% (1050 kg/s tot 1200 kg/s). Dit komt omdat de zoutgehaltes in de Velserkom over de hele waterkolom verlaagd worden door de Selectieve Onttrekking, waardoor tijdens het vullen van de sluis er minder zout water vanuit de Velserkom wordt onttrokken en de dichtheidsstromen tussen de sluis en de Velserkom sterker worden.

Referenties

[1] “Verfijning onderzoek chloride indringing Noordzeekanaal (ZTIJ)”, Rapport A3026R1r3. Arcadis, februari 2014

[2] “MER Zeetoegang IJmond, Deelrapport water”. Royal Haskoning DHV, 17 januari 2014, versie 1.0, MD-AF20140077/PO

Deltares

Appendix A: Validatie WANDA-locks - Delft3D koppeling

© Deltares, 2016, B

Deltares

Titel
Appendix A: Validatie WANDA-locks - Delft3D koppeling

Pagina's
13

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	okt. 2016	Wilbert Verbruggen		Robin Morelissen		Arnout Bijlsma	

Inhoud

1 Inleiding **1**

2 Opzet koppeling **2**
2.1 Inleiding 2
2.2 Koppeling framework 3

3 Validatie **5**
3.1 Online WANDA-Locks model – vs – offline WANDA-Locks model 5
3.2 Zoutfluxen WANDA-Locks – vs – zoutfluxen in NF2FF bestand 6
3.3 Verwerking NF2FF bestand in lozingen Delft3D (1/2) 8
3.4 Verwerking NF2FF bestand in lozingen Delft3D (2/2) 10

4 Discussie **12**

5 Conclusie **13**

1 Inleiding

Voor het onderzoek naar de efficiëntie van de selectieve onttrekking bij IJmuiden is gebruik gemaakt van Delft3D modellen die in 2013 door Arcadis zijn opgezet. De zout- en debiet randvoorwaarden bij de scheepvaartsluizen waren in deze oorspronkelijke modellen zeer schematisch opgezet. Er werd bijvoorbeeld aangenomen dat na iedere verscheping volledige uitwisseling van het water in de kolk plaatsvindt, wat een conservatieve aanname is. Daarnaast werden de zouttransporten vanuit de sluizen dieptegemiddeld geschematiseerd met een tijdsresolutie van 30 min (i.e. 30 min dieptegemiddelde instroming met voorgeschreven (constant) zoutgehalte, gevolgd door 30 min dieptegemiddelde uitstroming voor bijvoorbeeld de Noordersluis). In werkelijkheid is er echter sprake van een veel grotere dynamiek in de zouttransporten bij de sluizen. Tijdens de sluisoperaties zal er gedurende enkele tientallen minuten een grote zoutflux ontstaan, maar in de periodes daartussen zal er geen uitwisseling plaats vinden. Daarnaast vind in werkelijkheid de in- en uitstroom gelijktijdig plaats. Aangezien de werking van de selectieve onttrekking ook sterk afhangt van de dichtheidsstromen vanuit de scheepvaartsluizen is het van belang om deze dynamiek in meer detail manier mee te nemen. Daarom is in deze modelleerstudie de variatie in deur-opentijden en schutfrequentie in de zoutlek randvoorwaarden voor Delft3D meegenomen wordt.

Voor de modellering van de processen in de sluis en de voorhavens aan de zeezijde was gebruik gemaakt van het WANDA-Locks model. Naast de karakteristieken van de sluisoperaties (deur-opentijden, schutfrequentie, scheepsvolumes, etc.) is de uitwisseling ook sterk afhankelijk van het zoutgehalte in de voorhaven. Dichtheidsstromen nemen bijvoorbeeld af bij een hoog zoutgehalte in de voorhaven. Om deze feedback mee te nemen is het essentieel om het Delft3D en WANDA-Locks model met elkaar te laten communiceren tijdens de simulatie. WANDA-Locks heeft informatie nodig vanuit Delft3D met betrekking tot het zoutgehalte en de waterstand. Vervolgens wordt de zoutflux, zoals berekend door WANDA-Locks, opgelegd aan het Delft3D model. Deze uitwisseling van data tijdens de simulatie wordt ook wel een online koppeling genoemd. De traditionele koppeling waarbij eerst het WANDA-Locks model wordt gedraaid met een aangenomen zoutgehalte in de voorhavens, om vervolgens randvoorwaarden te genereren voor het Delft3D model wordt ook wel een offline koppeling genoemd. Ten opzichte van de offline koppeling heeft de online koppeling het voordeel dat de modellen directer worden aangestuurd (dichter bij de werkelijkheid), waardoor er minder aannames gedaan hoeven te worden (bijvoorbeeld zoutgehalte in offline WANDA-Locks model) en dat de uitwisseling van zout bij de scheepvaartsluizen met grotere nauwkeurigheid voorspeld kan worden. Daarnaast is de hoeveelheid handwerk in de online koppeling veel kleiner als in de offline koppeling wat qua gebruiksgemak en kwaliteitscontrole ook een groot voordeel is.

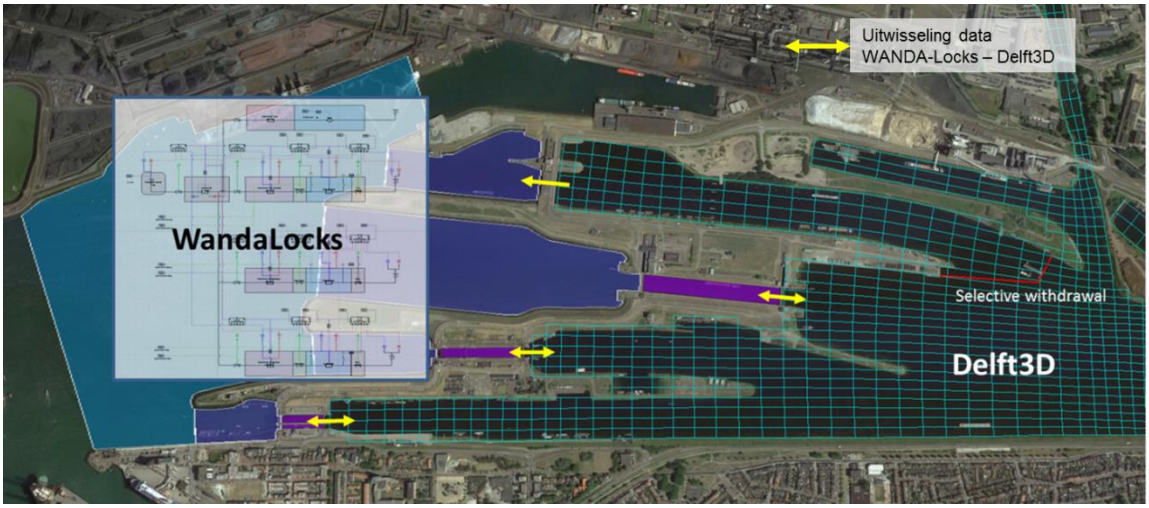
De online koppeling is gebaseerd op een methode die al meerdere malen is toegepast voor de koelwaterlozingen van energiecentrales. De specifieke toepassing van het WANDA-Locks model is tijdens deze studie ontwikkeld. In deze bijlage wordt de validatie van de online koppeling beschreven. Voor de interpretatie is ook de werking van de online koppeling in deze bijlage beknopt beschreven.

2 Opzet koppeling

2.1 Inleiding

Het idee van de online WANDA-Locks – Delft3D koppeling is om de zoutgehaltes en waterstanden vanuit Delft3D te gebruiken als variërende randvoorwaarden voor WANDA-Locks. De door WANDA-Locks berekende zoutfluxen tussen de sluis en de Velserkom worden vervolgens weer aan Delft3D doorgegeven. Het grensvlak van de twee modellen is gevisualiseerd in Figuur 2.1. Aan de zeezijde en ter plaatse van de sluiskolken zijn balansgebieden (de blauwe, paarse en roze gebieden) gedefinieerd die in het WANDA-Locks model meegenomen worden. Deze balansgebieden dienen ervoor om de verspreiding van het zout op een schematische manier te simuleren. Het binnengebied (voorhavens, Velserkom en Noordzeekanaal) wordt meegenomen in het Delft3D model. Op het grensvlak van sluiskolk – voorhaven worden de gegevens (zoutgehaltes en waterstanden vanuit Delft3D en zoutfluxen vanuit WANDA-Locks) uitgewisseld tussen de beide modellen (de gele pijlen).

Het WANDA-Locks model is ten behoeve van de online koppeling aangepast ten opzichte van Bijlage K, door de balansgebieden aan de binnenzijde (voorhaven, Velserkom) te verwijderen. Deze gebieden waren in de offline approach wel nodig om de zoutgehaltes in de voorhavens te berekenen. Nu deze zoutgehaltes direct uit Delft3D gehaald kunnen worden, zijn deze gebieden overbodig geworden. Voor ieder basin en deur zijn elementen gedefinieerd die de werking van de sluizen simuleren. Voor meer informatie over het oorspronkelijke WANDA-Locks model (i.e. inclusief binnengebied) wordt verwezen naar Bijlage K van het hoofdrapport.

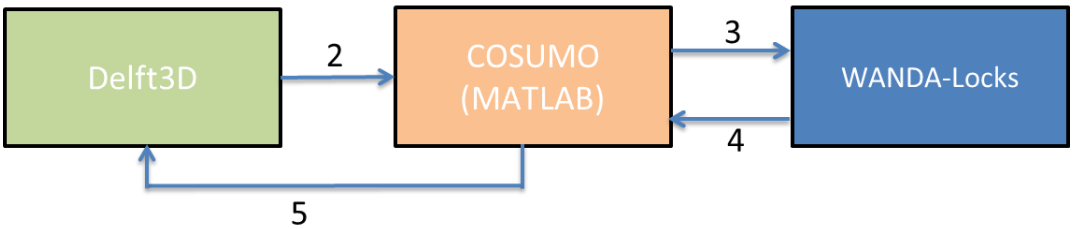


Figuur 2.1 Overzicht WANDA-Locks en Delft3D model voor online koppeling. De blauwe en paarse vlakken visualiseren de balansgebieden in het WANDA-Locks model. Het Delft3D rekenrooster ten westen van de sluizen is in lichtblauw afgebeeld. De gele pijlen geven de locaties aan waar gegevens worden uitgewisseld tussen WANDA-Locks en Delft3D tijdens de online koppeling.

2.2 Koppeling framework

De online koppeling is gebaseerd op een methode die al meerdere malen is toegepast voor de koelwaterlozingen van energiecentrales. Het framework van de koppeling is gevisualiseerd in Figuur 2.2. Tussen de twee modellen (Delft3D en WANDA-Locks) zit een generieke MATLAB schil (het oranje blok) die de communicatie tussen beide modellen verzorgt. De naam van de MATLAB schil is COSUMO, dat staat voor Coupled Subgrid Models. Hieronder wordt de koppeling beknopt per stap beschreven. Stap 1 voert de gebruiker handmatig uit om de gekoppelde simulatie aan te zetten. Stap 2 – 6 worden vervolgens automatisch tijdens iedere koppeling uitgevoerd.

Stap 1 (alleen tijdens initialisatie van simulatie):
De gebruiker specificeert in het Delft3D invoerbestand de frequentie waarmee gekoppeld moet worden en geeft het pad naar een bestand waarin de benodigde instellingen voor de koppeling in gespecificeerd worden (het COSUMOsettings.xml bestand). In dat bestand wordt bijvoorbeeld opgegeven in welke paden de communicatie plaats vindt, vanuit welke locaties in Delft3D de omgevingscondities aan WANDA-Locks doorgegeven moeten worden, welke elementen in het WANDA-Locks model iedere koppeling geupdate moeten worden, etc. Vervolgens start de gebruiker de Delft3D simulatie en COSUMO.



Figuur 2.2 Framework online WANDA-Locks – Delft3D koppeling

Stap 2 (iedere koppeling):
Tijdens ieder koppeltijdstip schrijft Delft3D een FF2NF.xml bestand. Dit bestand bevat de hydrodynamische gegevens (waterstanden, zoutgehaltes, stroomsnelheden, etc.) op de gedefinieerde uitvoerpunten. COSUMO pikt het bestand automatisch op.

Stap 3 (ieder koppeling):
COSUMO verwerkt de hydrodynamische gegevens vanuit Delft3D tot gegevens die het WANDA-Locks model nodig heeft (bijvoorbeeld gemiddeld zoutgehalte en gemiddelde waterstand voorhaven). Vervolgens worden de voorhaven elementen in het WANDA-Locks model geupdate en wordt het WANDA-Locks model gedraaid tot aan de volgende koppelperiode.

Stap 4 (iedere koppeling)
Na het runnen van het WANDA-Locks model worden de berekende zoutfluxen tussen de sluizen en de Velserkom doorgegeven aan COSUMO.

Stap 5 (iedere koppeling)
De gesimuleerde zoutfluxen en debieten door WANDA-Locks worden vertaald naar een over de koppelperiode gemiddelde uitwisselingsstroom en bijbehorende zoutgehaltes voor de verschillende voorhavens. Vervolgens schrijft COSUMO een NF2FF bestand (Near-Field to Far-Field bestand), waarin de lozingen, zoutgehaltes en locaties van de lozingen gespecificeerd worden. Dit bestand wordt direct opgepakt door Delft3D, waarna de Delft3D

simulatie weer gaat draaien tot aan de volgende koppelperiode. Vervolgens herhaalt de routine zich vanaf Stap 2.

Het afhandelen van al deze stappen kost per koppeling ongeveer 6 seconden rekentijd. In deze 6 seconden worden dus 3 scheepvaartsluizen en 1 spui- en gemaalcomplex afgehandeld.

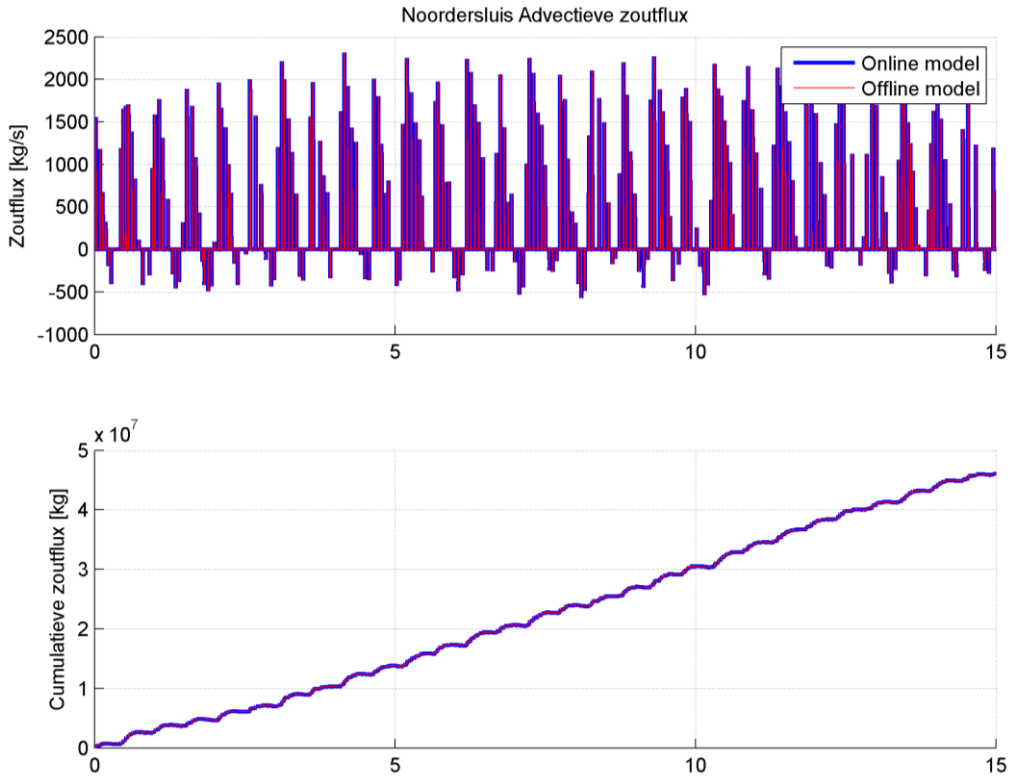
3 Validatie

Voor deze validatie zijn de volgende softwareversies toegepast:
Delft3D: 6.02.06.6346
COSUMO: revision 3888 (22 augustus 2016)

3.1 Online WANDA-Locks model – vs – offline WANDA-Locks model

Doel	Verifiëren of het WANDA-Locks model dat gebruikt is voor de online koppeling dezelfde resultaten voor de zoutflux levert (bij eenzelfde forcering) als het WANDA-Locks model dat gebruikt is voor de offline koppeling.
Aanpak	Het WANDA-Locks model dat voor de offline gekoppelde simulaties is gebruikt beslaat zowel de zeezijde als de Noordzeekanaalzijde. Voor de online koppeling zijn de voorhavens aan de Noordzeekanaalzijde vervangen door randvoorwaarden die direct door op basis van Delft3D gestuurd kunnen worden. Om te checken of het online WANDA-Locks model (bij eenzelfde forcering) dezelfde resultaten levert zijn de waterstanden en zoutgehaltes in de voorhavens van een offline WANDA-Locks model opgelegd aan het online WANDA-Locks model.
Hypothese (gewenste uitkomst)	Beide WANDA-Locks modellen zouden met deze gelijke forcering identieke resultaten moeten leveren
Uitkomst	Succesvol: Het WANDA-Locks model dat voor de online koppeling is gebruikt geeft dezelfde resultaten als het offline WANDA-Locks model mits het online WANDA-Locks met dezelfde input geforceerd wordt.

Figuur 3.1 toont het advectieve deel van de zoutflux voor de Noordersluis voor het online en offline WANDA-Locks model. De bovenste plot geeft de zoutflux, de onderste plot de cumulatieve zoutflux. De resultaten van het online model zijn dikgedrukt in blauw, de resultaten voor het offline model zijn in het dun in rood op de online resultaten geplot. Duidelijk is te zien dat beide modellen dezelfde resultaten geven.



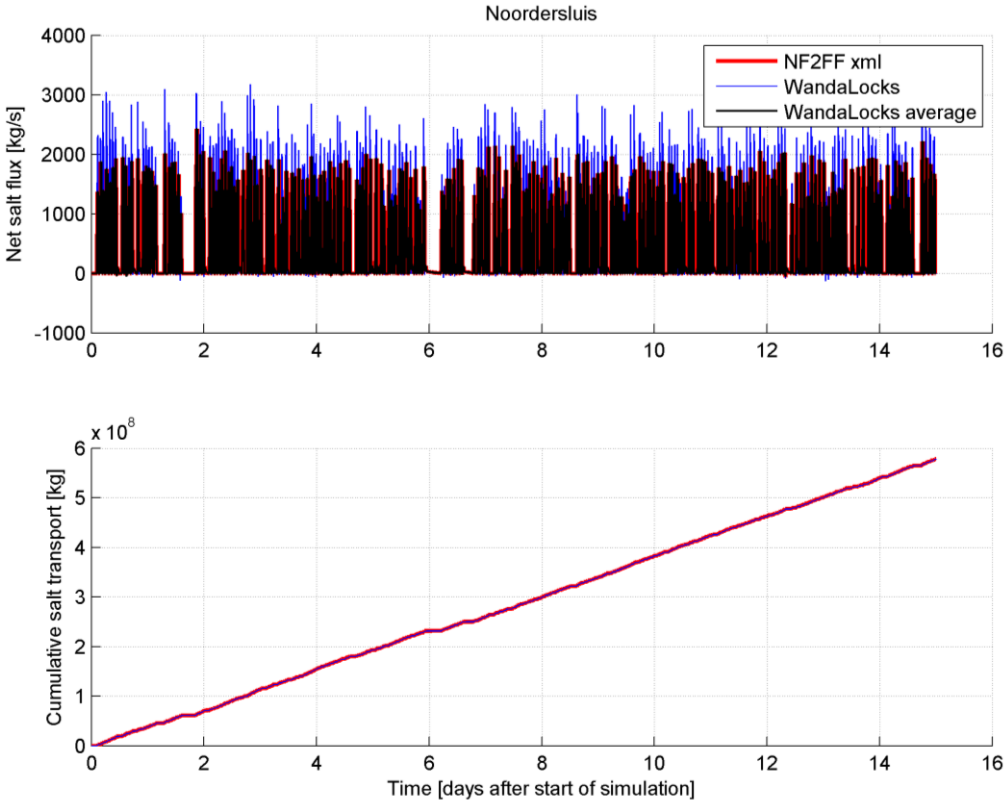
Figuur 3.1 Berekende advectieve zoutflux bij de Noordersluis, offline en online WANDA-Locks model met gelijke forcering

3.2 Zoutfluxen WANDA-Locks – vs – zoutfluxen in NF2FF bestand

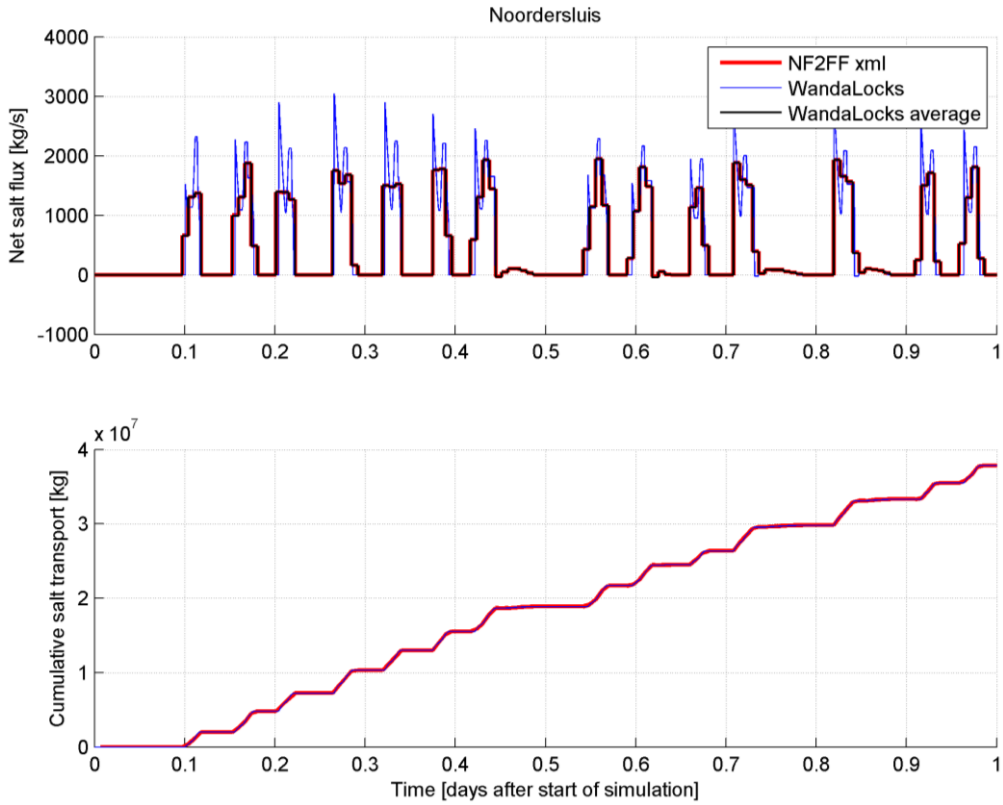
Doel	Bepalen of de totale instromende zoutflux in Delft3D gelijk is aan de instromende zoutflux zoals berekend in WANDA-Locks. Op deze manier wordt geverifieerd of de communicatie van het ene model naar het andere consistent is.
Aanpak	Voor de eerste 15 dagen van de Autonome Ontwikkeling simulatie voor scenario januari – juni 2013 is de output van het WANDA-Locks model vergeleken met de NF2FF bestanden (in- en uitstromingen opgelegd aan Delft3D in de online koppeling).
Hypothese (gewenste uitkomst)	De zoutflux vanuit WANDA-Locks moet identiek zijn aan de zoutflux in Delft3D
Uitkomst	Succesvol: zoutflux opgelegd aan Delft3D is gelijk aan de zoutflux zoals berekend door WANDA-Locks

Figuur 3.2 toont de netto zoutflux bij de Noordersluis voor de eerste 15 dagen van de simulatie voor de Autonome Ontwikkeling voor het scenario januari – juni 2013. Figuur 3.3 toont dezelfde figuur, maar dan ingezoomd op de eerste dag, om de dynamiek van de berekening beter in beeld te brengen. In blauw is de netto zoutflux geplot zoals berekend door het WANDA-Locks model tijdens de online koppeling. Het WANDA-Locks model rekende met een tijdstap van 20 seconden. De koppeltijdstap tijdens deze simulatie was 10 minuten. Over iedere 10 minuten is de berekende netto zoutflux vanuit WANDA-Locks gemiddeld en gevisualiseerd met de zwarte lijn. Dit komt exact overeen met de zoutflux zoals opgelegd aan Delft3D (dikgedrukte rode lijn). Hierbij wordt opgemerkt dat voor het berekenen

van de netto zoutflux zoals opgelegd aan Delft3D het uitstromende (richting de sluiskolk stromende) zoutgehalte gelijk is gesteld aan het uitstromende zoutgehalte in WANDA-Locks. In werkelijkheid wijkt het zoutgehalte van het uitstromende debiet in Delft3D af van het zoutgehalte van het uitstromende debiet in WANDA-Locks (wat gelijk is aan het dieptegemiddele zoutgehalte in de voorhaven). Dit komt omdat in het Delft3D model het zoutgehalte varieert over de diepte, terwijl in WANDA-Locks een dieptegemiddeld zoutgehalte is aangenomen. Het water dat in Delft3D in de bovenste helft van de waterkolom onttrokken wordt heeft in het algemeen een lager zoutgehalte dan het dieptegemiddelde zoutgehalte. Dit heeft tot gevolg dat in Delft3D minder zout onttrokken worden in de bovenste helft van de waterkolom dan aangenomen in WANDA-Locks, waardoor de netto zoutflux bij de scheepvaartsluizen in Delft3D groter is dan in WANDA-Locks (voor de huidige studie zijn verschillen van 5 – 15% geobserveerd). Dit treedt overigens ook op bij de offline koppeling. Hier wordt verder op ingegaan in Hoofdstuk 4.



Figuur 3.2 Netto zoutflux bij de Noordersluis zoals berekend tijdens de online koppeling door het WANDA-Locks model (blauw) en de opgelegd aan Delft3D via het NF2FF bestand (rood, dikgedrukt)



Figuur 3.3 zelfde als Figuur 3.1, maar dan ingezoomd op de eerste dag. Netto zoutflux bij de Noordersluis zoals berekend tijdens de online koppeling door het WANDA-Locks model (blauw) en de opgelegd aan Delft3D via het NF2FF bestand (rood, dikgedrukt)

3.3 Verwerking NF2FF bestand in lozingen Delft3D (1/2)

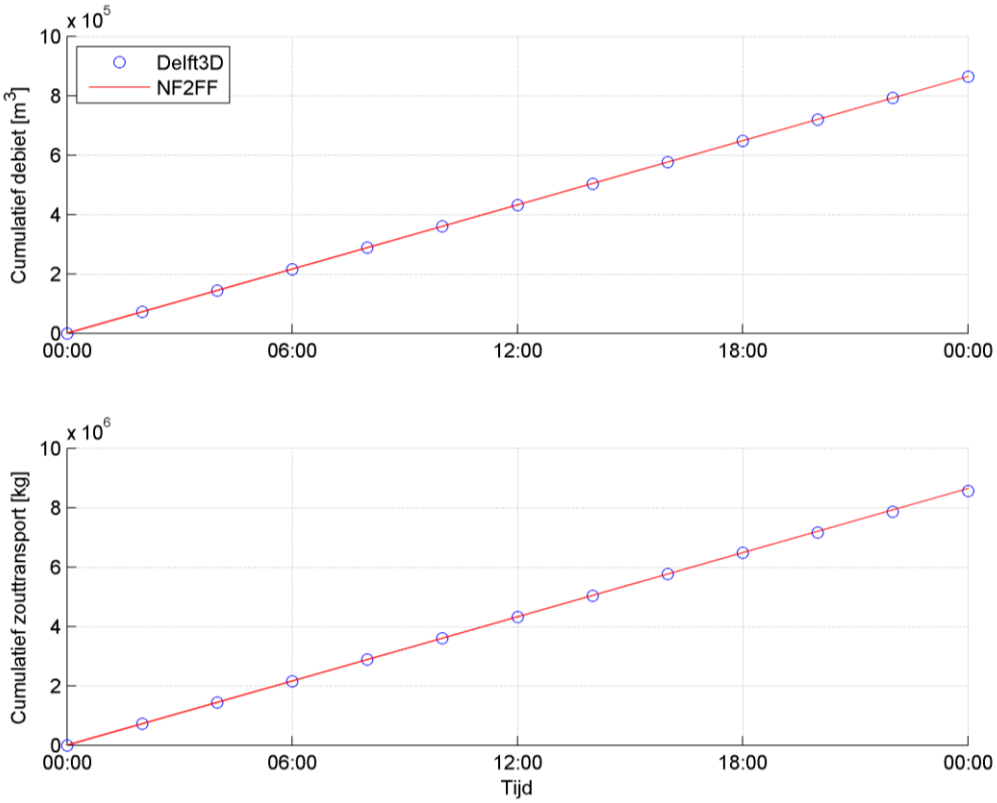
Doel	Paragraaf 3.2 heeft aangetoond dat de opgelegde zoutfluxen aan Delft3D (via de NF2FF bestanden) correct zijn. Het doel van deze validatie is om te analyseren of de informatie uit de NF2FF bestanden correct worden overgenomen door Delft3D. In deze paragraaf worden de volgende vragen beantwoord: • Worden de instromende en uitstromende debieten correct meegenomen in Delft3D? • Wordt het zoutgehalte van het instromende water correct meegenomen in Delft3D?
Aanpak	Om te testen of de data in het NF2FF bestand correct meegenomen worden in Delft3D is een schematisch twee-dimensionaal (2D) model opgezet bestaande uit 10x10 cellen met een afmeting van 100m x 100m en een diepte van 10m. Gedurende een dag is een constant debiet van 10 m^3/s en een zoutgehalte van 10 ppt gespecifieerd voor het instromende water. Door de volumeverandering en verandering in zoutgehalte te monitoren is de implementatie van het NF2FF bestand in Delft3D gecontroleerd (massabehoudstest). Daarnaast is een simulatie gedaan met zowel een instroom en uitstroom debiet. Ook deze simulatie is gecontroleerd door de verandering in waterstand te monitoren.

Hypothese (gewenste uitkomst)	De volumeverandering en verandering in zoutgehalte in het model zou gelijk moeten zijn aan de veranderingen die verwacht mogen worden op basis van de NF2FF invoer.
Uitkomst	Succesvol: De gespecifieerde debieten en zoutgehaltes in het NF2FF bestand worden correct overgenomen in de water- en zoutbalans in Delft3D.

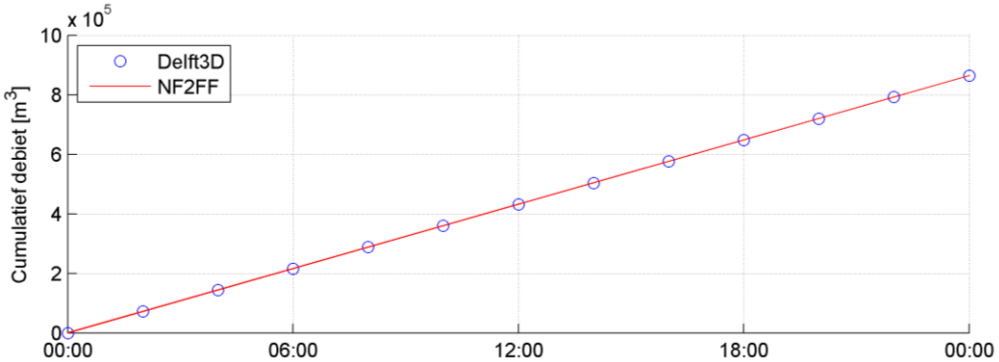
Figuur 3.4 toont de verandering in volume (het cumulatieve debiet) in de bovenste plot en de verandering in zoutgehalte (cumulatief zouttransport) voor een simulatie met Q_{in} = 10 m^3/s, S_{in} = 10 ppt en Q_{uit} = 0 m^3/s. Na een dag is het volume in Delft3D met 864,000 m^3 toegenomen en de hoeveelheid zout met 8,640,000 kg. Dit komt exact overeen met de invoer in het NF2FF bestand.

Figuur 3.5 toont de verandering in volume voor een simulatie met Q_{in} = 20 m^3/s, S_{in} = 10 ppt en Q_{uit} = 10 m^3/s. De figuur laat zien dat in overeenstemming met de NF2FF invoer, het netto instromende debiet in Delft3D gelijk is aan 10 m^3/s.

Bovenstaande testen tonen aan dat de gespecificeerde Q_{in}, S_{in} en Q_{uit} in het NF2FF bestand correct worden meegenomen in de water- en zoutbalans in Delft3D.



Figuur 3.4 Verandering in volume (boven) en totale hoeveelheid zout (onder) in Delft3D model, vergeleken met de invoer vanuit het NF2FF bestand (Q_{in} = 10 m^3/s, S_{in} = 10 ppt, Q_{uit} = 0 m^3/s).



Figuur 3.5 Verandering in volume in Delft3D model, vergeleken met de invoer vanuit het NF2FF bestand (Q_{in} = 20 m^3/s, S_{in} = 10 ppt, Q_{uit} = 10 m^3/s).

3.4 Verwerking NF2FF bestand in lozingen Delft3D (2/2)

Doel	Paragraaf 3.3 heeft aangetoond dat de gespecificeerde debieten en zoutgehaltes in het NF2FF bestand correct worden meegenomen in Delft3D. In deze paragraaf wordt gecontroleerd of de (horizontale en verticale) locatie van de lozingen in Delft3D correct worden meegenomen.
Aanpak	De horizontale en verticale locaties van de lozingen worden gecontroleerd voor de eerste 10 dagen in de simulatie voor het scenario januari – juni 2013, voor de Autonome Ontwikkeling.
Hypothese (gewenste uitkomst)	De lozingen zouden direct ten oosten van de sluizen in het model moeten plaatsvinden. Het instromende debiet zou in de onderste helft van de waterkolom moeten plaatsvinden en het uitstromende debiet in de bovenste helft van de waterkolom.
Uitkomst	Succesvol: de lozingen en onttrekking vinden op de correcte horizontale en vertical locaties plaats, dus de invoer van het NF2FF wordt correct overgenomen door Delft3D.

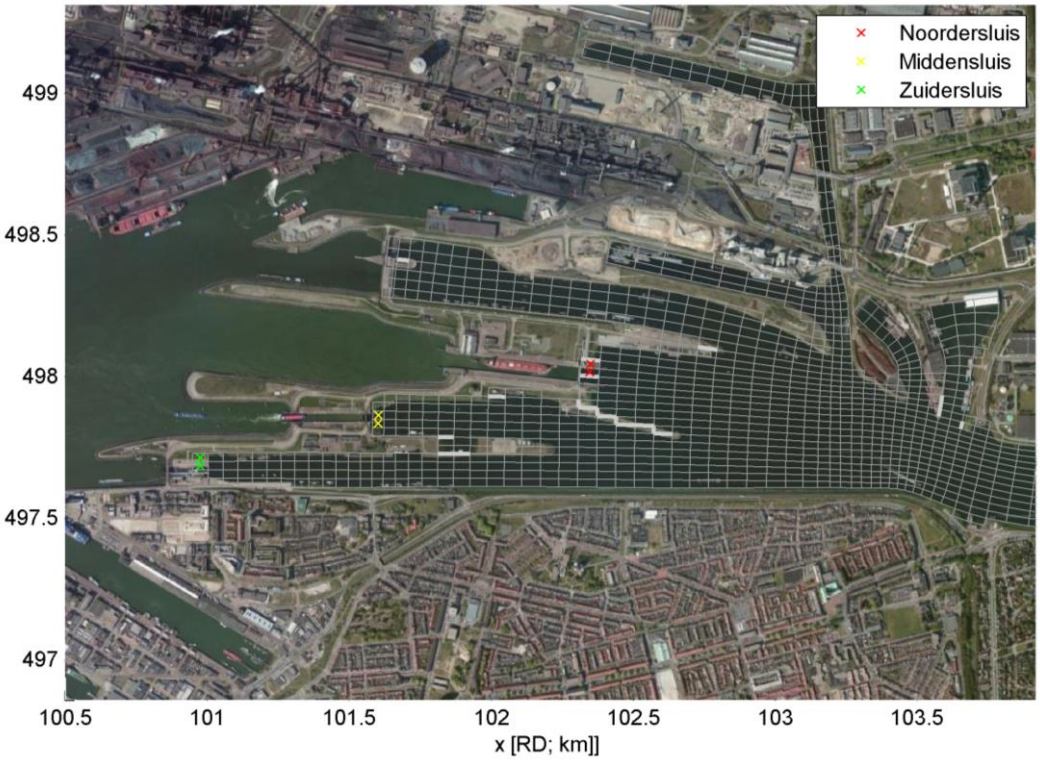
In Figuur 3.6 zijn de horizontale locaties weergegeven van de lozingen en onttrekking per sluiscomplex voor het Scenario januari – juni 2013 (Autonome Ontwikkeling), zoals ze vanuit het NF2FF bestand in Delft3D terechtkomen. Bij alle sluizen (Noordersluis, Middensluis en Zuidersluis) is te zien dat de lozingen en onttrekking plaatsvinden direct naast de sluis. De debieten zijn verdeeld over de breedte van de voorhaven over twee cellen, zoals verwacht.

Figuur 3.7 toont in de bovenste plot het berekende specifieke debiet (debiet per strekkende meter in de breedte) zoals opgelegd aan Delft3D bij de Noordersluis voor de eerste paar dagen in de simulatie. Positief (rood) is gedefinieerd als een instroom, negatief (blauw) is gedefinieerd als een uitstroom. De onderste plot visualiseert de stroomsnelheden in de cel waar gekoppeld wordt (zie Figuur 3.6). Het doel van dit figuur is om een kwalitatieve vergelijking te maken tussen de gespecificeerde lozingen en hoe dit zich vertaald naar uitwisselingsstromen in het model. Opgemerkt wordt dat deze figuur gebaseerd is op modeluitvoer met een tijdstap van 3 uur. Voor iedere 3 uur zijn dus de opgegeven debieten vergeleken met de stroomsnelheden in Delft3D. De koppeltijdstap is 10 minuten, dus 1 op de 18 koppelingen is gevisualiseerd. Op basis van dit figuur kan het volgende geconcludeerd worden:

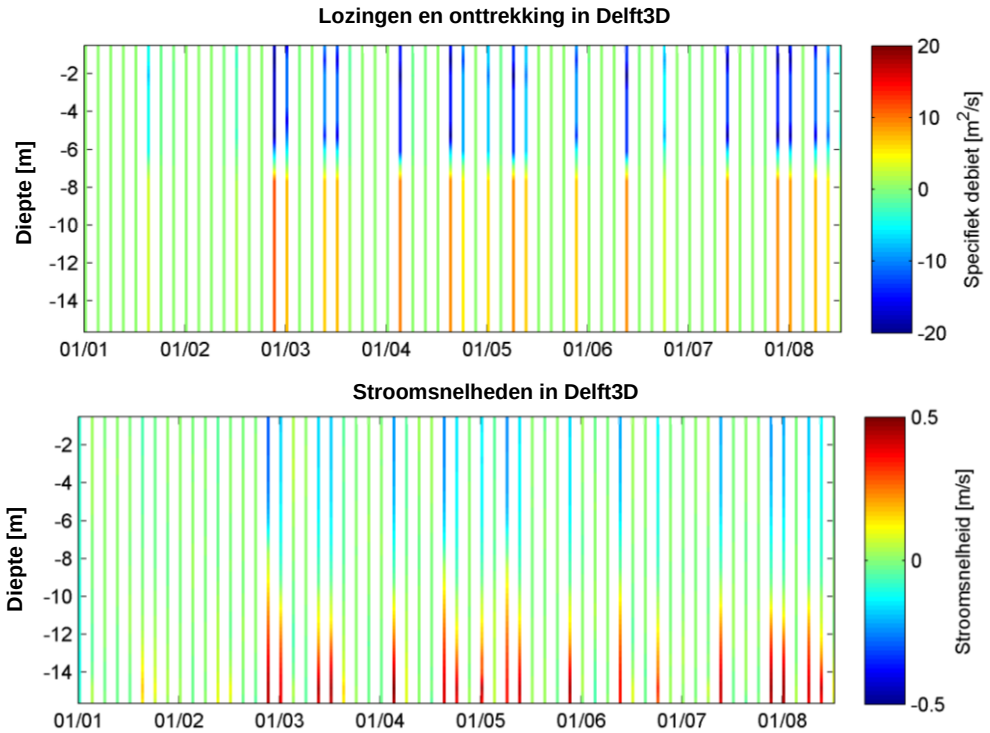
- De onttrekking vinden correct in het bovenste gedeelte van de waterkolom plaats en de lozingen in het onderste gedeelte van de waterkolom.

- De timing van de lozingen is duidelijk terug te zien in de stroomsnelheden wat aantoont dat de gespecificeerde lozingen op het correcte moment en verticale locatie meegenomen worden in het Delft3D model

De verschillen tussen de gespecificeerde lozingen en de stroomsnelheden kunnen verklaard worden door interne menging en door het feit dat het instromende water zwaarder is dan het omgevingswater, waardoor het instromende zoute water direct in de koppelcel naar de bodem zakt.



Figuur 3.6 Locaties van de lozingen in Delft3D, Scenario januari – juni 2013, Autonome Ontwikkeling.



Figuur 3.7 Verdeling instromende (positief) en uitstromende (negatief) debieten zoals doorgegeven aan Delft3D en de stroomsnelheden in Delft3D, Scenario januari – juni 2013, Autonome Ontwikkeling, ter plaatse van de koppeling voor de Noordersluis.

4 Discussie

Zoals opgemerkt in paragraaf 3.2 wijkt de uitstromende zoutflux in Delft3D af van de uitstromende zoutflux in WANDA-Locks, aangezien deze niet opgelegd kan worden in Delft3D. Naast dat het (met de huidige software) niet mogelijk is om het uitstromende zoutgehalte te forceren is het ook niet wenselijk, aangezien Delft3D beter in kan schatten hoe het zoutgehalteprofiel er uitziet dicht bij de sluis. Het gevolg van de verschillen in uitstromende zoutflux tussen Delft3D en WANDA-Locks is dat de zoutbalans tussen beide modellen niet sluitend is. Aanbevolen wordt om in een vervolgfase uit te zoeken wat het effect is van de niet sluitende zoutbalans. Op basis hierv zou onderzocht kunnen worden of het zinvol is om de aan Delft3D opgelegde uitwisselingsstromen en het instromende zoutgehalte dusdanig te tunen dat de netto zoutflux bij de scheepvaartsluizen in Delft3D gelijk is aan de netto zoutflux in WANDA-Locks. Een andere oplossingsrichting is om de voorspelling van de zoutflux in WANDA-Locks beter aan te laten sluiten bij Delft3D door bijvoorbeeld aanpassingen aan de WANDA-Locks formuleringen te maken (door bijvoorbeeld meer 3D effecten in WANDA-Locks mee te nemen).

In de huidige opzet van het online WANDA-Locks – Delft3D modelsysteem voor IJmuiden is de zeezijde van het sluizencomplex in het WANDA-Locks model meegenomen. Om de verspreiding van de zoetwaterpluimen vanuit de scheepvaartsluizen en het spui- en gemaalcomplex aan zeezijde beter te simuleren zou ook aan de zeezijde een Delft3D model gebruikt kunnen worden.

5 Conclusie

In deze bijlage is de opzet en validatie van de online koppeling tussen Delft3D en WANDA-Locks beschreven die is opgezet ten behoeve van de studie naar de effectiviteit van de selectieve onttrekking bij IJmuiden. De online koppeling heeft de volgende voordelen ten opzichte van de bestaande offline koppeling:

- Effect van variaties in zoutgehalte (in Delft3D) kan nu meegenomen worden in de voorspelling van de zoutuitwisseling (WANDA-Locks), waardoor een meer betrouwbare voorspelling van de zoutfluxen vanuit de scheepvaartsluizen gemaakt kan worden.
- In de offline koppeling moet het zoutgehalte aan de open randen van het WANDA-Locks model gekalibreerd worden. In de online koppeling worden de zoutgehaltes direct uit Delft3D gehaald, waardoor een kalibratie in WANDA-Locks niet meer nodig is.
- Bij de offline koppeling is veel handwerk en expertise vereist (runnen WANDA-Locks, randvoorwaarden maken, randvoorwaarden kopiëren naar de juiste Delft3D simulatie, Delft3D aanzetten, etc.) wat tijd kost en foutgevoelig is. Dit speelt bij de online koppeling niet.
- In de online koppeling worden de modellen directer geforceerd (dichter bij de werkelijkheid), waardoor er minder aannames nodig zijn. Dit kan leiden tot minder vragen van de verschillende stakeholders en vertragingen in het proces. Minder aannames vergroot ook de objectiviteit en betrouwbaarheid van de voorspellingen.

Deze bijlage heeft aangetoond dat de online koppeling tussen Delft3D en WANDA-Locks correct opgezet is en dat de communicatie tussen beide modellen sluitend is. Op basis van deze validatie kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Het WANDA-Locks model dat gebruikt is voor de online koppeling is op consistente wijze aangepast ten opzichte van het WANDA-Locks model dat voor de offline simulaties is toegepast.
- De instromende zoutflux in Delft3D is gelijk aan de instromende zoutflux zoals berekend door WANDA-Locks.
- De uitstromende zoutflux in Delft3D is niet geheel gelijk aan de uitstromende zoutflux in WANDA-Locks (zowel bij online als offline koppeling). Dit komt omdat het uitstromende zoutgehalte in Delft3D bepaald wordt op basis van het aanwezige zoutgehalte in de bovenste helft van de water kolom, terwijl bij WANDA-Locks het uitstromende zoutgehalte wordt bepaald op basis van het dieptegemiddelde zoutgehalte in de voorhaven. In het algemeen is de netto zoutflux in Delft3D groter dan in WANDA-Locks. Oplossingen hiervoor zijn te zoeken in het dusdanig aanpassen van de uitgaande zoutflux in Delft3D, zodat deze aansluit bij de voorspelling van WANDA-Locks. Of door de voorspelling van WANDA-Locks aan te passen door bijvoorbeeld meer 3D effecten in de WANDA-Locks formuleringen mee te nemen.
- De waterbalans (netto wateruitwisseling) in Delft3D is gelijk aan de waterbalans in WANDA-Locks
- De invoer aan Delft3D (debieten, zoutgehaltes, horizontale en verticale locaties) wordt op correcte wijze geïmplementeerd in Delft3D.

www.deltares.nl

Deltares