

Balance Island

Numerieke modellering van effecten van Balance Island op
zoutindringing

Definitief

Grontmij Nederland B.V.
De Bilt, 3 december 2013

Verantwoording

Titel : Balance Island

Subtitel : Numerieke modellering van effecten van Balance Island op zoutindringing

Projectnummer : 326772

Referentienummer : GM-0119331

Revisie : D1

Datum : 3 december 2013

Auteur(s) : J. de Kort, S.C. van Rooij MSc

E-mail adres : waterbouw@grontmij.nl

Gecontroleerd door : ir. J. Kollen

Paraaf gecontroleerd :

Goedgekeurd door : drs. N.B.E. van der Schuit

Paraaf goedgekeurd :

Contact : Grontmij Nederland B.V.
De Holle Bilt 22
3732 HM De Bilt
Postbus 203
3730 AE De Bilt
T +31 30 220 74 44
F +31 30 220 02 94
www.grontmij.nl

Inhoudsopgave

1	Inleiding en samenvatting	4
2	Theorie	5
2.1	Classificatie estuaria	5
2.2	Analytisch model voor zoutindringing	6
3	Uitgangspunten	7
4	Aanpak en modelopzet	8
4.1	Beschrijving basisvarianten	8
4.1.1	Box-model	8
4.1.2	Exponentieel toelopend model.....	8
4.1.3	Bathymetrie Casus Haringvliet.....	8
4.2	Input	9
4.2.1	Grid	9
4.2.2	Randvoorwaarden.....	9
5	Modellering en resultaten per variant	10
5.1	Box-model	10
5.1.1	Voordelen Box-model	10
5.1.2	Modelopzet.....	10
5.1.3	Randvoorwaarden.....	11
5.1.4	Plaatsing eiland in het model	11
5.1.5	Modeltijd.....	12
5.1.6	Resultaten	12
5.2	Variant exponentieel toelopend estuarium	13
5.2.1	opzet model in curvilinear grid	13
5.2.2	Modelopzet.....	13
5.2.3	Randvoorwaarden.....	16
5.2.4	Plaatsing eiland in het model	16
5.2.5	Resultaten exponentieel toelopend estuarium.....	19
5.3	Haringvliet variant	23
5.3.1	Modelopzet.....	23
5.3.2	Randvoorwaarden.....	25
5.3.3	Plaatsing Balance Island.....	25
5.3.4	Resultaten Haringvlietmodel	26
6	Conclusie	31
7	Aanbevelingen	32
8	Bronnen.....	33

Bijlage 1: Waterstanden per model

1 Inleiding en samenvatting

Het Haringvliet was van oorsprong een open verbinding tussen de Noordzee en de Biesbosch. Na de aanleg van de Deltawerken is het Haringvliet afgesloten door middel van een dam met spuisluizen waar tijdens laagwater zoet water van de rivier op zee geloosd kan worden. In de huidige situatie heeft het meer een belangrijke functie als brongebied voor landbouw en drinkwater. In het Kierbesluit is volgens internationale afspraken vastgelegd dat de sluizen in de toekomst langer open moeten om de trek van vissen richting de rivier te bevorderen. Dit heeft echter als nadelig gevolg dat ook zout water het nu zoete Haringvliet binnen dringt. Om dit effect tegen te gaan heeft Grontmij in samenwerking met Imares en De Waterarchitect het plan voor Balance Island opgesteld. De uitvoering van Balance Island heeft als primaire doel het terugdringen van de zoutindringing in het Haringvliet door het creëren van een geleidelijk overgang van zout naar zoet water met behoud van het unieke dynamische karakter van de delta. Door het opspuiten van een eiland in de monding van het Haringvliet ontstaat een estuarium waarbij het water gedwongen wordt om door het Slijkgat te stromen. Hierdoor ontstaat een mengbasin waarin het zoute water kan mengen met het zoete gespuide water uit het Haringvliet. Het estuarium reduceert daardoor het zoutgehalte van het water dat het Haringvliet bij opkomende vloed instroomt. Het concept is naar verwachting toepasbaar in andere delta's en daarmee een interessante optie voor het klimaatrobust maken van bestaande delta's. In 2012 won Balance Island de Delta Water Award en de Delta Alliance Young professional Award. Hierin benoemde commissaris van de Deltacommissie Wim Kuijken als voorzitter van de jury van de Delta Water Award Balance Island als veelbelovend potentieel export product. Zowel de jury van de Delta Water Award als de Alliance adviseerde om verder onderzoek te doen naar de Hydro-morfologische effecten van het eiland. De voorliggende rapportage gaat in op de fysieke onderbouwing van het concept.

In deze studie wordt op conceptniveau gekeken of een verlaging van het zoutgehalte kan worden gehaald door middel van eilandbouw en welke factoren hierop van invloed zijn. Door middel van verschillende simulaties met Delft3D is een eerste inzicht verkregen in de effecten van Balance Island op de zoutindringing in estuaria. De casus in het Haringvliet is hierbij uitgangspunt.

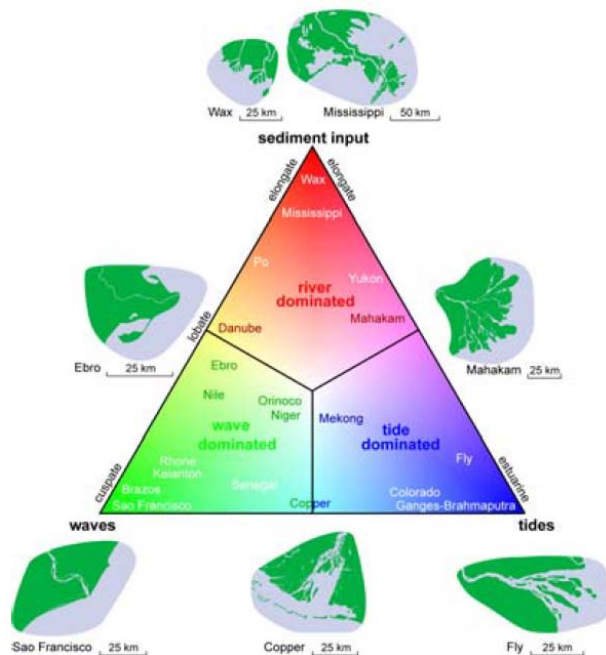
Uit de modelberekeningen blijkt dat bij de plaatsing van Balance Island in de monding van het Haringvliet een reductie van het zoutgehalte in het Haringvliet kan worden verwacht. Deze reductie loopt in de schematisaties op tot ongeveer 30%. Het blijkt hierbij van belang hoe het eiland gepositioneerd is in de monding van het estuarium ten opzichte van het inkomende getij, hoe groot het is en welke vorm het heeft.

2 Theorie

Een van de meest belangrijke kenmerken van estuaria is de gradiënt in Zoutgehalte. Deze gradiënt heeft veel invloed op het voorkomen van verschillende organismes. De monding van het Haringvliet heeft de potentie om een estuarien natuurgebied te worden van hoge kwaliteit. In de huidige situatie is de fluctuatie in zoutgehalte echter te groot om typische brakwatersoorten te kunnen huisvesten. Tijdens het spuien van zoetwater vanaf de Rijn en Maas is de Haringvliet monding overwegend zoet. Dit water stroomt met de ebstroom snel het gebied uit. Zodra de vloed opkomt, gaan de spuisluizen dicht en stroomt er vanaf de Noordzee zout water de Haringvlietmonding binnen. Het concept Balance Island is voorgesteld als casus in het Haringvliet. Hieronder wordt kort ingeleid welke typen estuaria worden onderscheiden en voor welk type estuarium Balance Island potentieel interessant is.

2.1 Classificatie estuaria

De vorm van een delta of estuarium is in grote mate afhankelijk van de lokale processen die optreden zoals de aangevoerde hoeveelheid sediment door de rivier en het kusttransport, het type sediment, de invloed van het getij en het golfklimaat. William Galloway heeft deze typen ingedeeld volgens het driehoekige delta classificatiediagram in verschillende klassen. In Figuur 2-1 zijn deze verder uitgewerkt door Stive (uit Coastal Dynamics 1 (Stive & Bosboom, 2012)).



Figuur 2-1: William Galloway's triangular delta classification diagram (Stive & Bosboom, 2012)

Grofweg kunnen de voor Balance Island interessante situaties in drie categorieën met de volgende eigenschappen ingedeeld worden: sterk tij-gedomineerd, sterk afvoer-gedomineerd en een gemengde vorm.

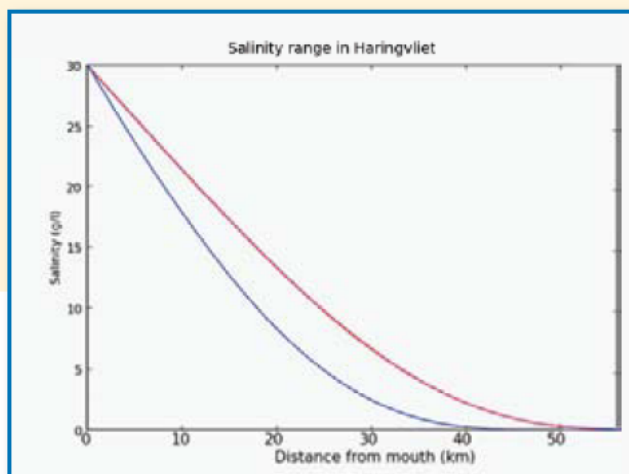
Tabel 2-1: Indeling estuaria, classificatie volgens University of Rhode Island Office of Marine Programs

	Tij gedomineerd ← → Afvoer gedomineerd		
Menging	Goed gemengd	Gedeeltelijk gemengd	Sterk gestratificeerd
Eigenschappen	Breed en ondiep	Diep	Diep
Voorbeeld	Westerschelde, Delaware, Gambia, oorspronkelijk Haringvliet	San Francisco Bay	Mississippi, Hudson, Columbia

2.2 Analytisch model voor zoutindringing

De zoutindringing in een open estuarium kan voorspeld worden met behulp van een analytisch model gebaseerd op een aantal karakteristieke parameters van het estuarium (Savenije, 2012). Alluviale laaglandestuaria hebben een kenmerkende trechtervorm. De trechter wordt landinwaarts, met een exponentiële vorm, smaller. Dit zorgt voor een toename van de getij-amplitude. Tegelijkertijd neemt door de convergerende vorm de wrijving met de oevers toe. De ideale vorm van een estuarium is dusdanig dat de opslingering van het getij gecompenseerd wordt door de toenemende wrijving, zoals wordt benaderd door de exponentiële trechtervorm.

Typische zout curve voor een Estuarium en verwacht effect Balance Island



Getijweg

Rood

Natuurlijk verloop van saliniteit (zoutgehalte) vanaf de monding (links) het Haringvliet in.

Blauw

reductie in een natuurlijk estuarium als gevolg van vernauwen van de monding zoals door Balance Island. Er treden reducties op tot 30% in saliniteit.

3 Uitgangspunten

Het onderzoek richt zich op het bepalen van de effecten van eilandbouw in estuaria op de stroming en zoet-zout water menging. Hiertoe is een model studie uitgevoerd.

Voor dit onderzoek zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Het onderzoek richt zich op de algemene werking van het voorgestelde principe dat door gedeeltelijke afsluiting van een goed mengend estuarium, op een afstand ongeveer gelijk aan de getijdeweg, de menging van uitstromend zoet rivierwater en zout zeewater wordt bevorderd en de verblijftijd van zoet en brak water wordt verlengd.
- Er worden een aantal modellen opgezet als generieke casus; Het Haringvliet is als specifieke casus interessant maar niet leidend binnen dit onderzoek.
- Het onderzoek wordt uitgevoerd met Delft3D, een state of the art mathematisch programma van de TU Delft. dat de volledige Saint-Venant-vergelijkingen voor waterbewegingen oplost.
- Bodemweerstand wordt in het model constant verondersteld.
- De menging van zout en zoet water wordt voldoende geacht om in het model te kunnen rekenen met dieptegemiddelde stroomsnelheden en een enkel-laagse schematisatie.

4 Aanpak en modelopzet

Er is in het kader van deze conceptstudie gekozen voor een systematische aanpak met verschillende schematisaties, waarbij de nadruk ligt op de invloed van Balance Island in sterk vereenvoudigde modellen. Er worden verschillende typen estuaria verkend met daarin de situatie met en zonder een eiland.

4.1 Beschrijving basisvarianten

4.1.1 *Boxmodel*

De meest eenvoudige vorm voor een model is een benadering van een estuarium door een kanaal met constante dimensies. Dit model heeft een constant bodemniveau.

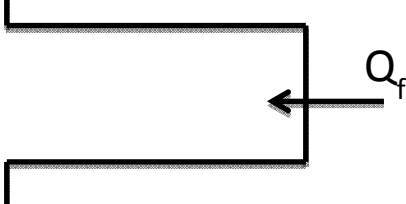
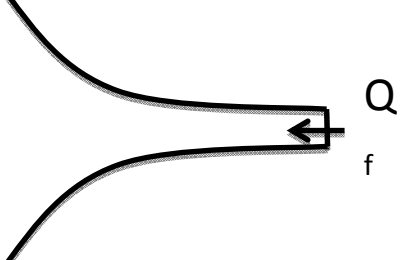
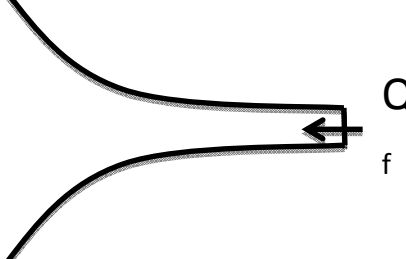
4.1.2 *Exponentieel toelopend model*

In de meeste estuaria neemt het natte dwarsoppervlak exponentieel af (Savenije, 2012). Deze vorm is nauwkeuriger te volgen met behulp van een curvilinear grid. Dit is een grid waarin de grootte van de rekencellen kan verschillen.

4.1.3 *Bathymetrie Casus Haringvliet*

Als laatste variant zal er een model opgezet worden waarin de casus van het Haringvliet zelf als voorbeeld van een exponentieel toelopend estuarium gekoppeld wordt aan een bathymetrie op basis van dieptemetingen. In deze schematisatie is het sluisbeheer van de Haringvlietdam niet meegenomen en wordt uitgegaan van een gedeeltelijk geopende dam. samengevat komt dit neer op het onderstaande overzicht:

Tabel 4-1: Overzicht varianten

	Getij-ge domineerd		Rivier-ge domineerd
	Goed gemengd	Gedeeltelijk ge- mengd	Gestratificeerd
Modeltype	2D-h	3D/meerlaags	3D/meerlaags
Box			
Exponentieel			
Bathymetrie Haringvliet			

Voor alle varianten uit Tabel 4-1 worden scenario's met twee verschillende randvoorwaarden beoordeeld: met een getij dat recht naar binnen loopt (oost - west) en een getij dat in de richting noord - zuid beweegt en meer representatief is voor de Nederlandse kust. Om het effect van een Balance Island goed duidelijk te krijgen moet voor elke situatie een referentiescenario gemaakt worden en een scenario met daarin Balance Island gelegen voor de monding.

Om zowel de rekentijd als het aantal scenario's te beperken wordt in deze studie enkel gekeken naar enkellaagse modellen (dus geen verticale zoutgradiënten). Dit is mogelijk bij goed mengende estuaria. Het richardsongetal geeft hiervoor de mate van menging aan waarbij geldt dat een richardsongetal onder 0,08 een goede menging geeft en boven 0,8 gestratificeerd.

4.2 Input

4.2.1 Grid

De basis voor elke berekening in Delft3D vormt het ontworpen rekengrid. Door cellen te kiezen met een grote waarde voor dx en dy kan een grotere tijdstap genomen worden zonder dat de stabiliteit van het model in gevaar komt. Dit gaat echter altijd ten koste van het detailniveau en de nauwkeurigheid van het model, en hierin moet dus een balans gevonden worden. Verder op zee zijn de rekencellen groter, in de monding is het aantal cellen groter.

4.2.2 Randvoorwaarden

De belangrijkste input voor het model zit in het correct vaststellen van de randvoorwaarden op zee. Het aanmaken van de randvoorwaarden wordt uitgevoerd via Delft Dashboard, (tool voor opzetten van Delft3D-schematisaties en randvoorwaarden met astronomisch getij). De randvoorwaarden aan de gesloten zijde van het bekken worden automatisch vastgelegd. Het is van belang dat de afstand van de randvoorwaarden tot het te berekenen gebied voldoende groot is zodat eventuele verstoringen uitgedempt zijn en het model niet beïnvloeden. Het grid loopt daarom enkele tientallen kilometers door op zee en in het achterland.

5 Modelling en resultaten per variant

5.1 Boxmodel

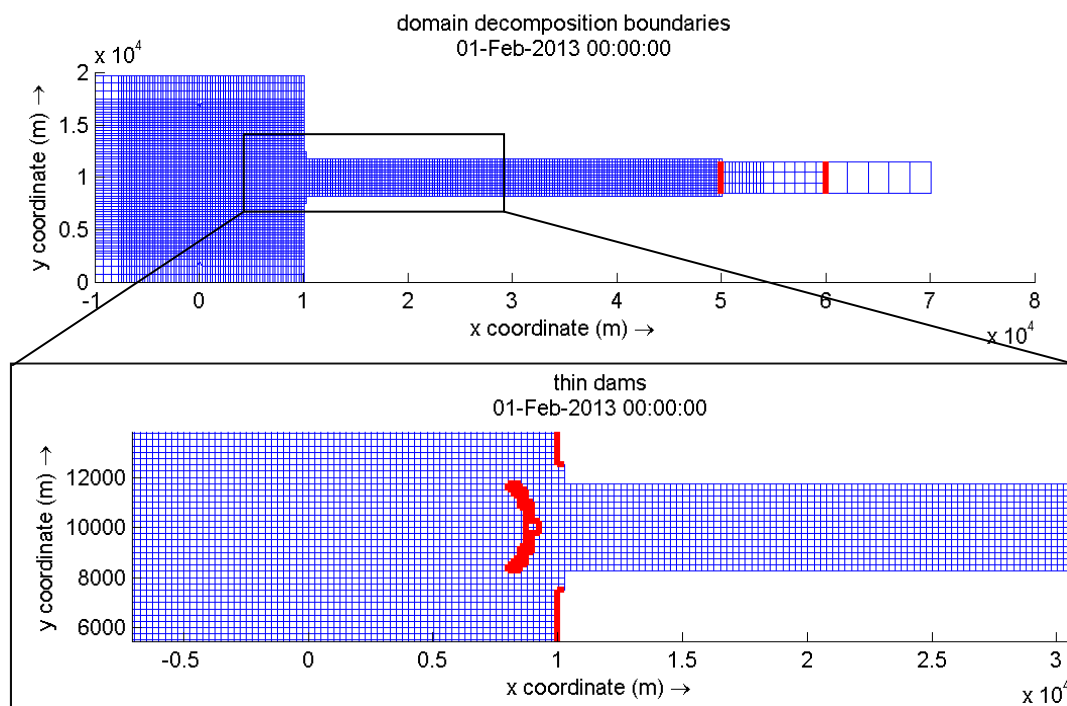
5.1.1 Voordelen Boxmodel

Een boxmodel is een model waarbij het volledige grid is opgebouwd uit vierkanten. Het is het eenvoudigste grid om te creëren. Door het model zo eenvoudig mogelijk te houden zijn de processen die doorspelen in het model gemakkelijk te volgen en is het dus goed duidelijk welke effecten welke oorzaak hebben.

5.1.2 Modelopzet

Het grid kan grofweg onderverdeeld worden in 4 delen, verdeeld over 3 domeinen.

Domein 1: zee 20*20km
rivier 40 km
Domein 2: rivier 10 km
Domein 3: rivier 10 km



Figuur 5-1: Box-grid met plaatsing Balance Island

De diepte over de rivier is overal gelijk gehouden op 8 meter met een geleidelijke overgang naar een diepte van 20 meter op de rand.

5.1.3 Randvoorwaarden

In dit model zijn 4 randvoorwaarden opgelegd. Drie aan de zeezijde (noord, west en zuid) en een aan het gesloten uiteinde van de rivier.

Naam	Soort	Transportconditie	Waarde	Locatie
Noord	Neumann-voorwaarde	Zout=31ppt	$du/dt=0$	Noordzijde zee
West	Harmonisch getij	Zout=31ppt	amplitude=1,5 m	Westrand model
Zuid	Neumann-voorwaarde	Zout=31ppt	$du/dt=0$	Zuidzijde zee
Rivier	Debiet	Zout=0ppt	600 [m ³ /s]	$x=7 \times 10^4$ m

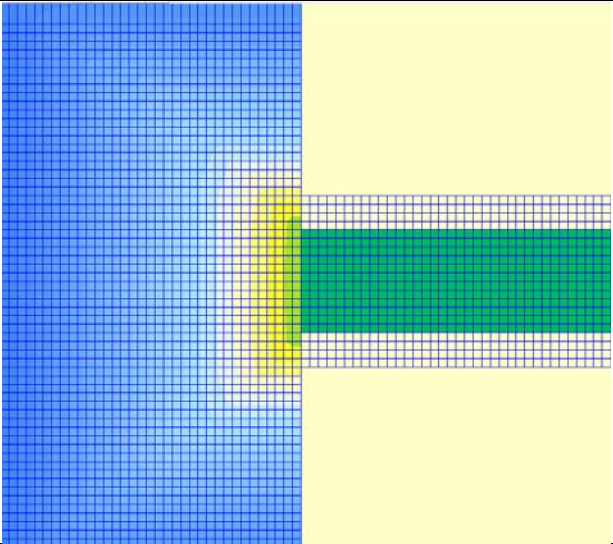
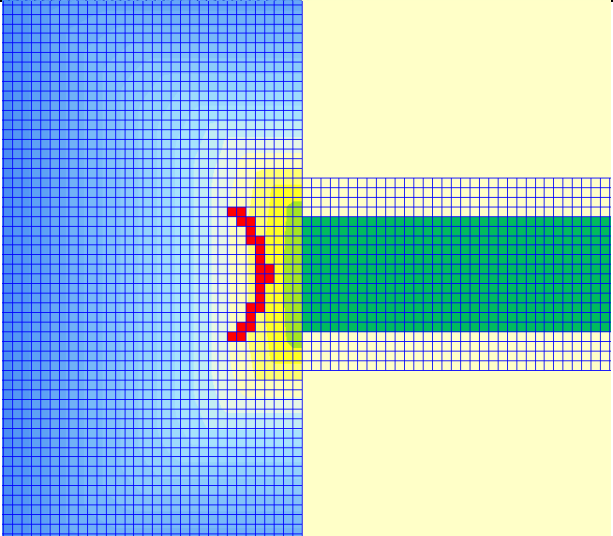
Door aan de noord- en zuidrand een Neumann-voorwaarde op te leggen, wordt de flux hier gelijk gehouden aan 0. Dit houdt in dat het hele systeem volledig zal reageren op het getij dat in het westen is opgelegd, en de interactie met het debiet van de rivier.

Ter plaatse van het gesloten uiteinde is gekozen voor een rivierafvoer met een constant debiet met een grootte van 600 m³/s. Met dit debiet ligt de zoutgradiënt in de monding van het gebied en zijn de effecten het best zichtbaar.

5.1.4 Plaatsing eiland in het model

Voor het boxmodel is naast het referentiemodel zonder Balance Island een simulatie gemaakt waarbij een eiland voor de monding van de rivier is geplaatst.

Tabel 5-1: Plaatsing Balance Island

Nulvariant		
Balance Island		

Balance Island is in dit model op 1 km uit de monding van de rivier geplaatst en heeft een lengte gelijk aan de monding.

5.1.5 Modeltijd

Na enige testruns is besloten om een periode van 4 maanden te modelleren, dit blijkt in de praktijk voldoende om tot een evenwichtssituatie in het model te komen.

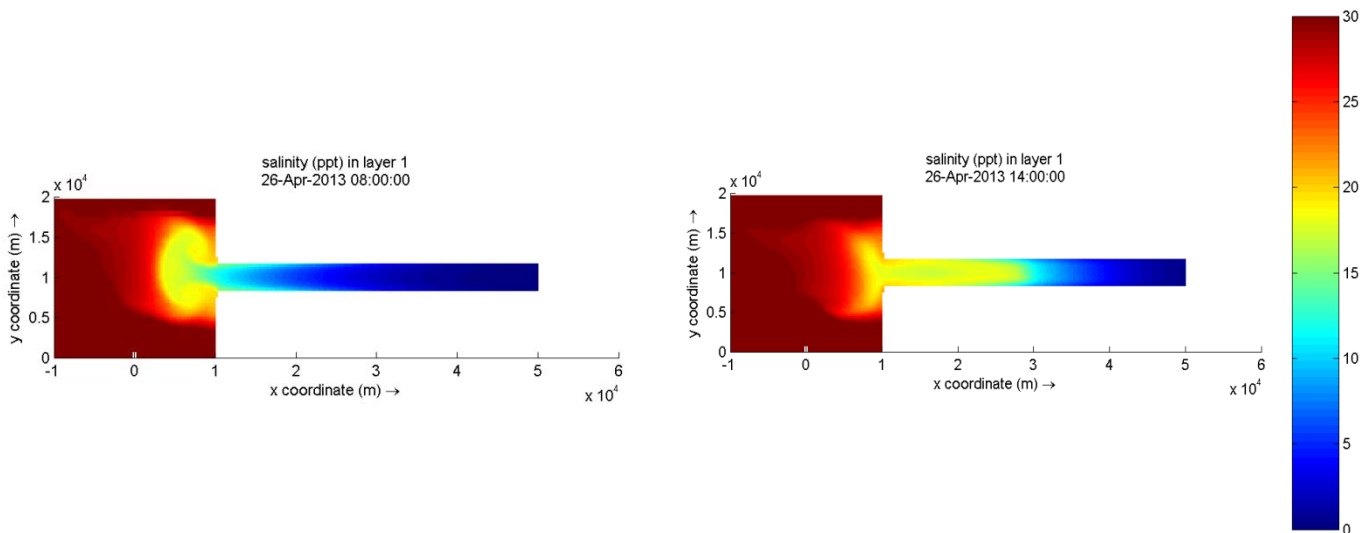
5.1.6 Resultaten

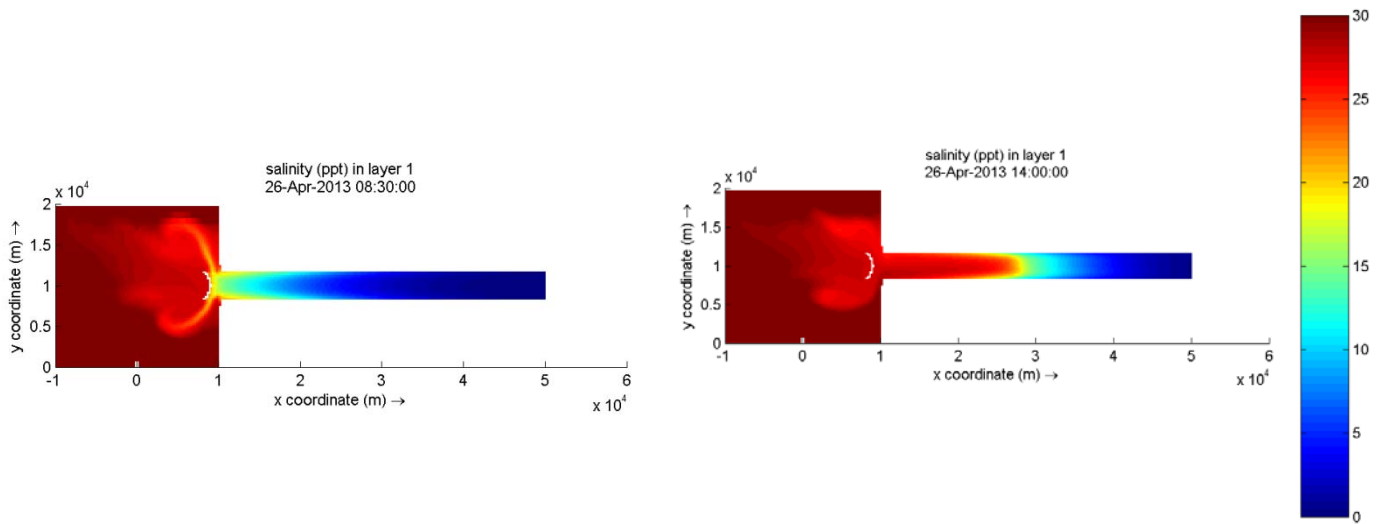
In Figuur 5-2 is de minimale en maximale zoutindringing weergegeven voor het boxmodel. Hierin is duidelijk te zien dat zich in de situatie zonder Balance Island een zoetwaterbel vormt voor de monding van de rivier. Wanneer het water weer opkomt, wordt deze zoetwaterbel door het getij terug het estuarium in geduwd waardoor het als het ware als een buffer tegen het zout fungeert.

Door het plaatsen van een eiland voor de monding wordt het uitstromende water bij eb langs het eiland naar de zijkant geforceerd waardoor de zoetwaterbel geen kans krijgt om te ontstaan.

In Figuur 5-3 is de zoutindringing op de middenlijn van de rivier geplot, waarin duidelijk het effect te zien is van het eiland, geplaatst ter hoogte van x-coördinaat $2,1 \times 10^4$ m. In dit model is een stijging van het zoutgehalte op de rivier ontstaan. Dit wordt veroorzaakt door het effect van het gebruikte eiland op de zoetwaterbel.

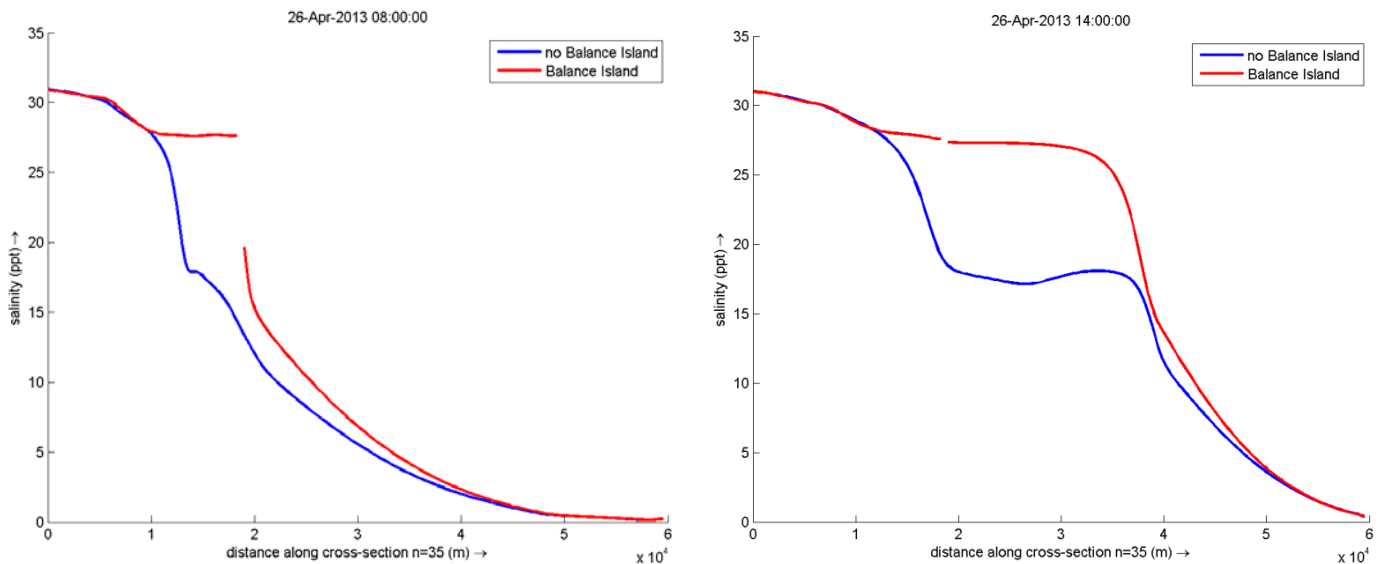
Uit deze schematisatie blijkt dat de exacte plaatsing en dimensionering in relatie tot de getijamplitude en stromingspatroon van een eiland grote invloed heeft op het beoogde effect. Een barrière die te dichtbij ligt en de vorming van een zoetwaterbel tegengaat vergroot de instroom van zout water.





Figuur 5-2

Linksboven:	geen eiland / minimale zoutindringing
Rechtsboven:	geen eiland / maximale zoutindringing
Linksonder:	eiland / minimale zoutindringing
Rechtsonder:	eiland / maximale zoutindringing



Figuur 5-3: Minimale en maximale zoutindringing op middenlijn rivier

5.2 Variant exponentieel toelopend estuarium

5.2.1 Opzet model in curvilinear grid

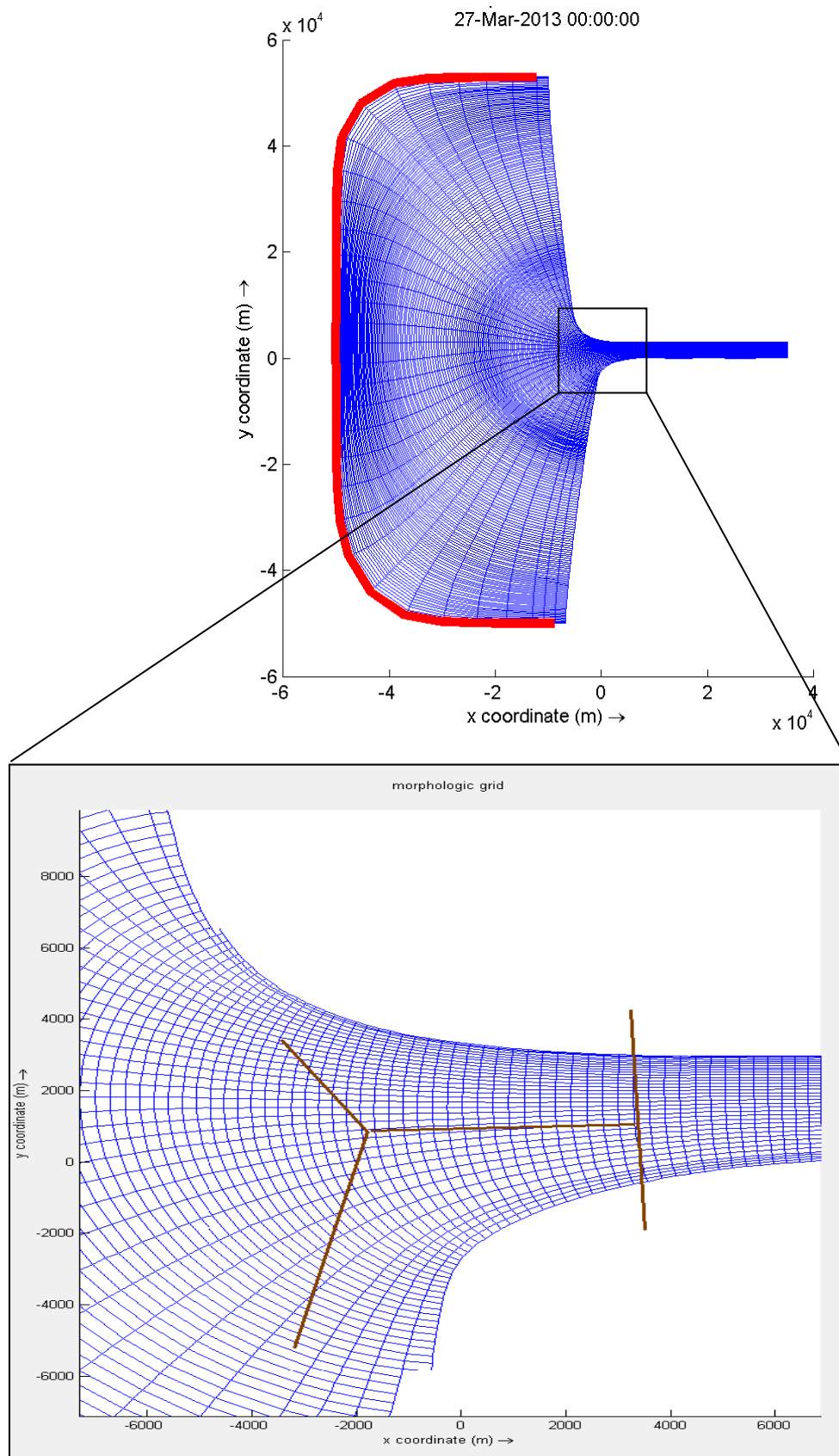
Door een model op te zetten dat gebruik maakt van een curvilinear grid kan een aanzienlijke hoeveelheid rekentijd bespaard worden doordat cellen die meer naar de rand van het model gelegen zijn, groter gemaakt kunnen worden terwijl juist een verfijning van het grid mogelijk is rond het te bestuderen gebied.

5.2.2 Modelopzet

Voor dit model zijn de afmetingen van de rivier ongeveer gelijk gemaakt aan die van het Haringvliet, met een lengte van 35 km en een gemiddelde breedte van 3 km. Om voldoende afstand te hebben vanaf de randvoorwaarden op zee tot aan de plaats waar Balance Island moet komen, is in zuidelijke, westelijke en noordelijke richting 50 km zee gemodelleerd zoals te zien is in Figuur 5-4. Hierin geeft de rode lijn de locatie van de getij-randvoorwaarden. De bruine lijn

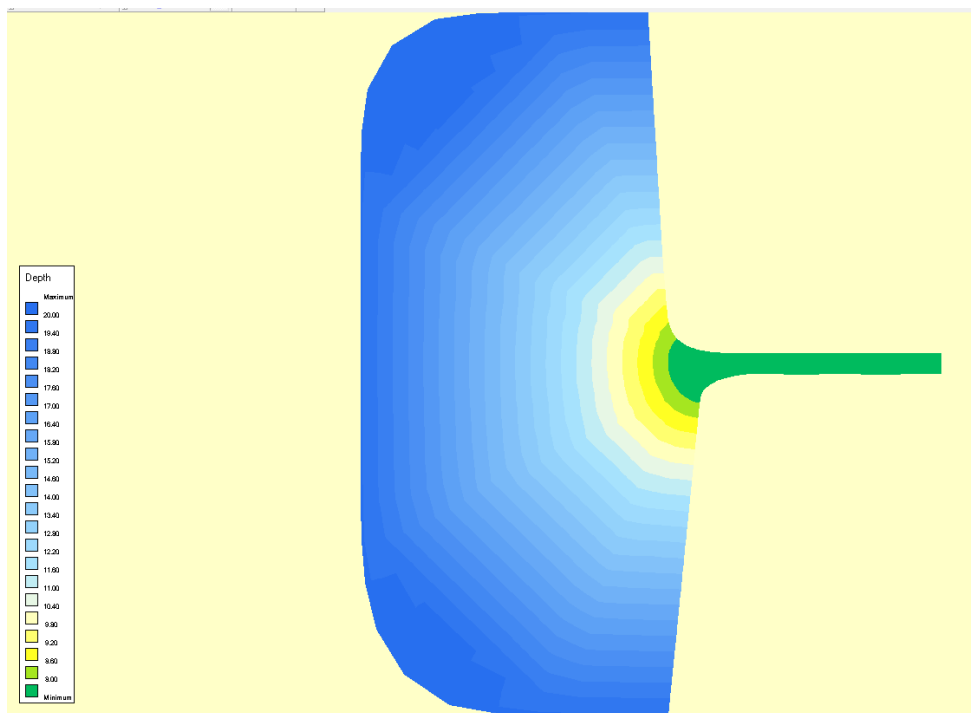
in de uitvergroting geeft de locatie van het eiland (links) en een dam (rechts op $x=3300$ m). In het model wordt het effect van deze structuren zowel apart als gezamenlijk gemodelleerd.

Zoals ook het geval is bij het Haringvliet loopt de noordelijke rand van het estuarium iets verder door dan de zuidelijke rand. De bathymetrie (Figuur 5-5) onder het model is weer sterk vereenvoudigd om stromingen als gevolg van de lokale bodem zoveel mogelijk buiten het model te houden en zo de resultaten niet te beïnvloeden.



Figuur 5-4: Boven: curvilinear grid met randvoorwaarden; onder: links de locatie van Balance Island met rechts een dam in het model

De bodem van de rivier is aangehouden op 8 m diepte en loopt vanaf de monding langzaam op tot 20 meter diepte ter plaatse van de randvoorwaarden.



Figuur 5-5: Bodemligging ten opzichte van 0 m-peil

5.2.3 Randvoorwaarden

In deze opzet is gebruik gemaakt van een astronomisch getij zoals dit voorkomt op de Noord-zee bij het Haringvliet. In Figuur 5-2 zijn de randvoorwaarden gegeven.

Tabel 5-2: Randvoorwaarden curvilinear grid

Curvilinear 1			
Naam	Soort	Transportconditie	Waarde
Getij zee	Astronomisch getij	Zout=31ppt	astronomisch
Rivier	Debiet	Zout=0ppt	600 m ³ /s

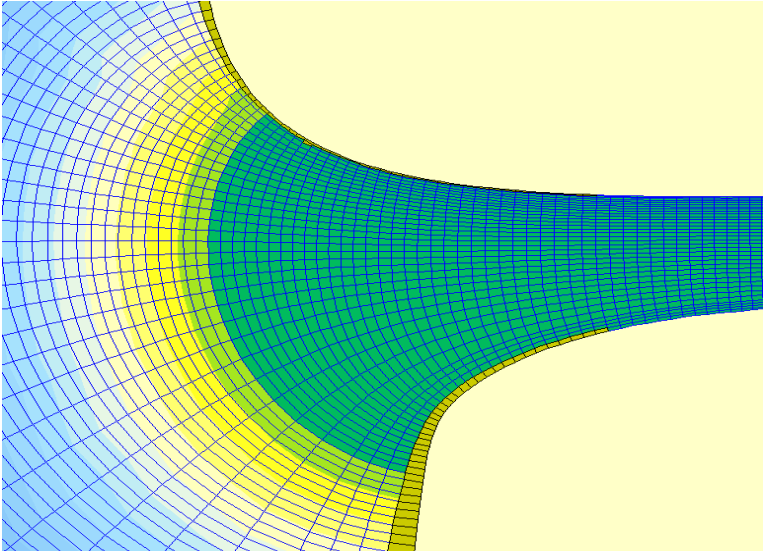
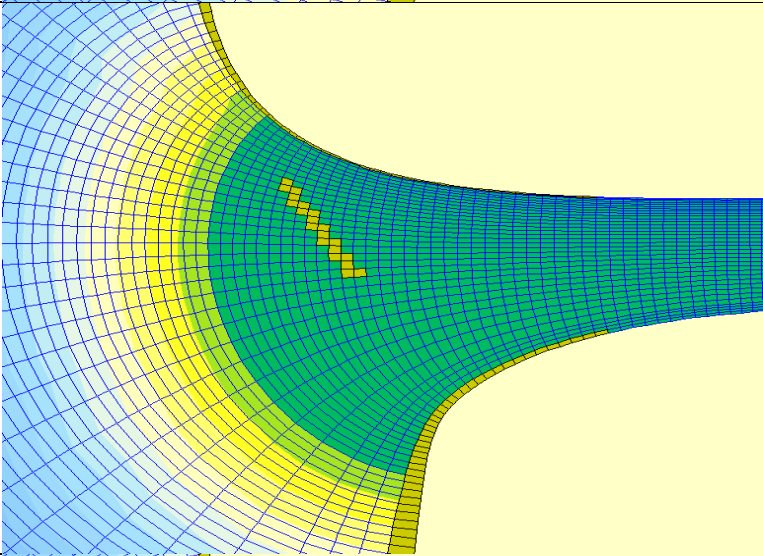
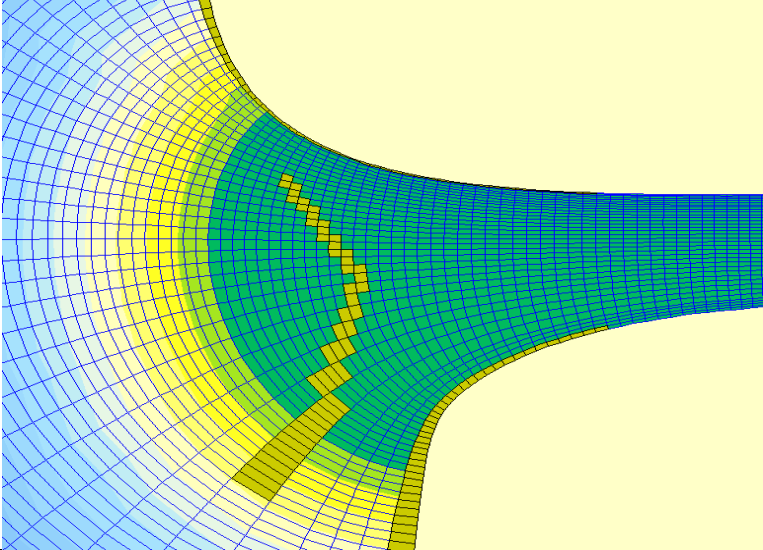
Ter plaatse van het gesloten oostelijke uiteinde is gekozen voor een rivierafvoer met een constant debiet met een grootte van 600 m³/s, gelijk aan de randvoorwaarde uit het boxmodel.

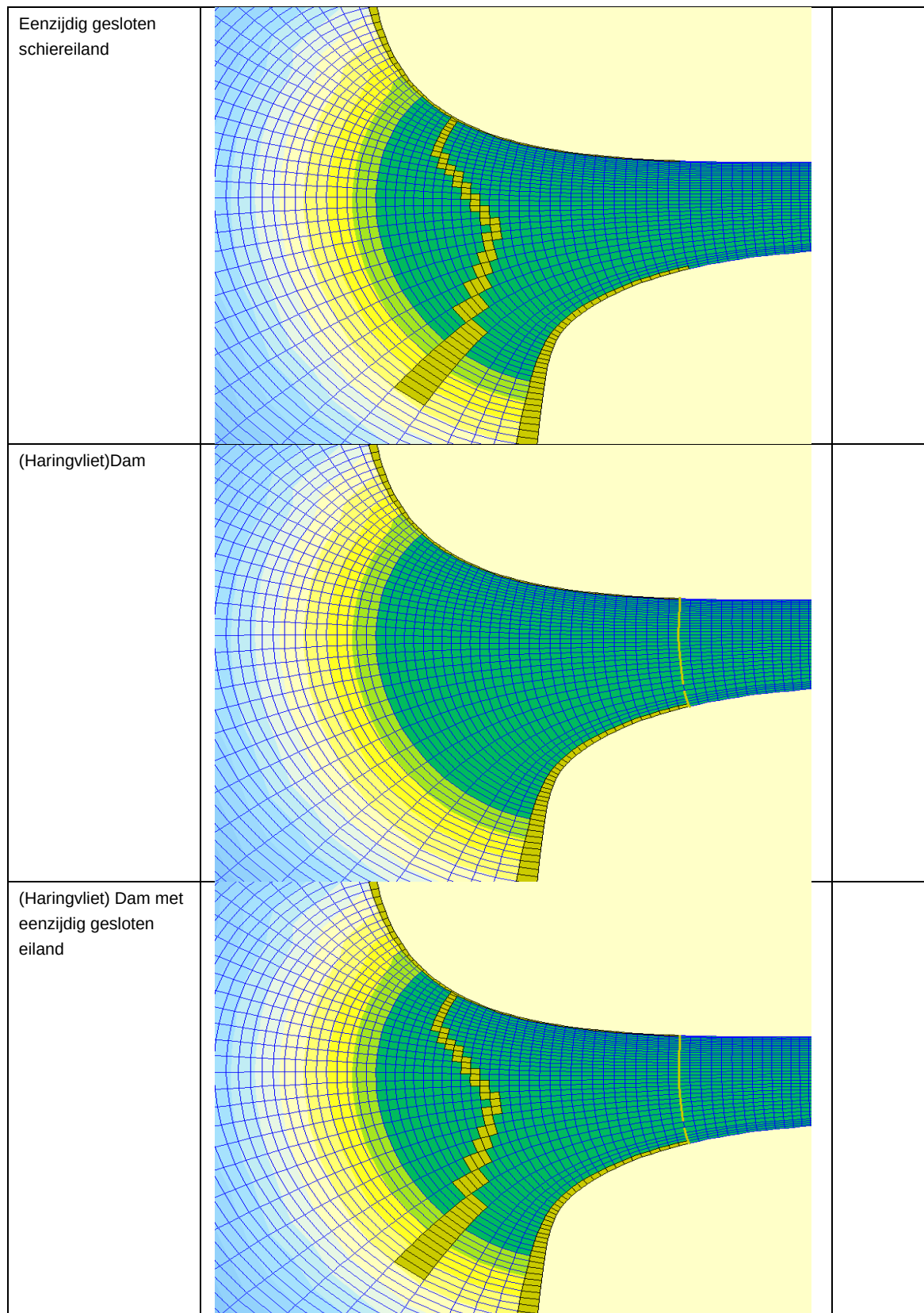
5.2.4 Plaatsing eiland in het model

Aangezien de bathymetrie en vormgeving van het grid geïnspireerd zijn op de situatie rond het Haringvliet is ook voor de toetsing van de werking van Balance Island gekozen om de lay-out zo dicht mogelijk de situatie van het Haringvliet te laten benaderen. Hiervoor zijn zes verschillende scenario's gemodelleerd:

- Geen eiland (nulvariant);
- Bestaande ondiepte Hinderplaat;
- Eiland (BI);
- 'eenzijdig gesloten' schiereiland;
- (Haringvliet) Dam;
- (Haringvliet) Dam en schiereiland.

De keuze om een extra variant met daarin alleen de Hinderplaat te modelleren is gemaakt om meer inzicht te krijgen in de gevoeligheden van waterstromingen en zoutindringing op platen rond de monding van een estuarium.

Nulvariant		
Hinderplaat		
Eiland		



De lengte van het eiland vanaf de punt in zuidwestelijke richting is 6 km. De opening in de dam is constant gehouden op 1.280 m², waar volgens het rapport “Herstel van estuariene dynamiek in de Zuidwestelijke Delta” (Imares, 2008) bij de Kiervariant voor het Haringvliet een constante opening van 1.240 m² wordt aangenomen voor de Haringvlietdam. Dit kleine verschil wordt ver-

oorzaakt door de afmetingen van het gebruikte grid en de daarbij horende constante diepte. De afstand tussen de dam en het eiland bedraagt 5 km. Hiermee geeft de schematisatie een redelijke weergave van het Haringvliet.

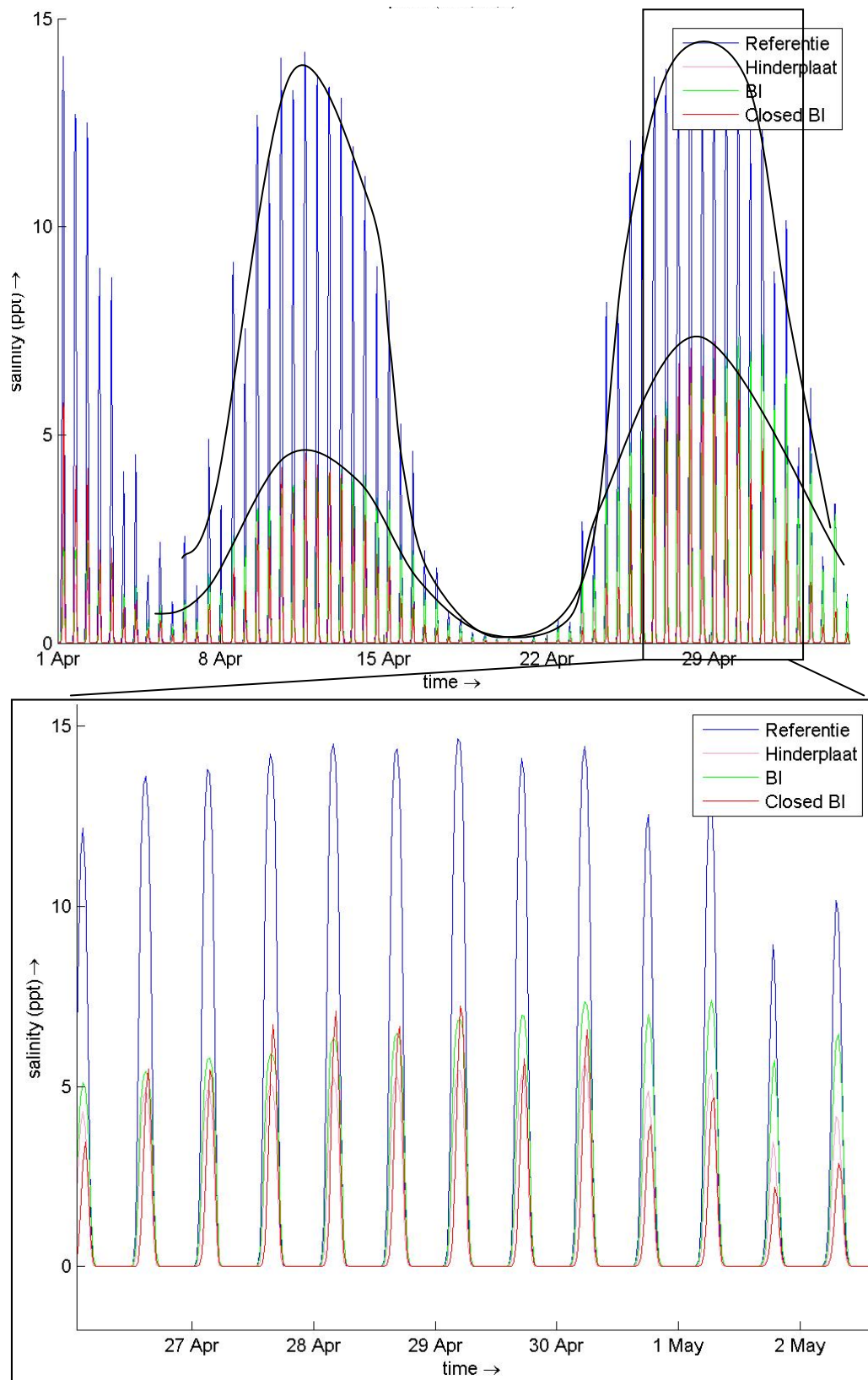
Voor deze lay-outs zijn vervolgens de volgende combinaties met de randvoorwaarden gemaakt:

<i>Curvilinear ; astronomisch getij</i>	
Nulvariant	Astronomisch
Hinderplaat	Astronomisch
Balance Island	Astronomisch
Gesloten Balance Island	Astronomisch
Dam	Astronomisch
Dam met gesloten Balance Island	Astronomisch

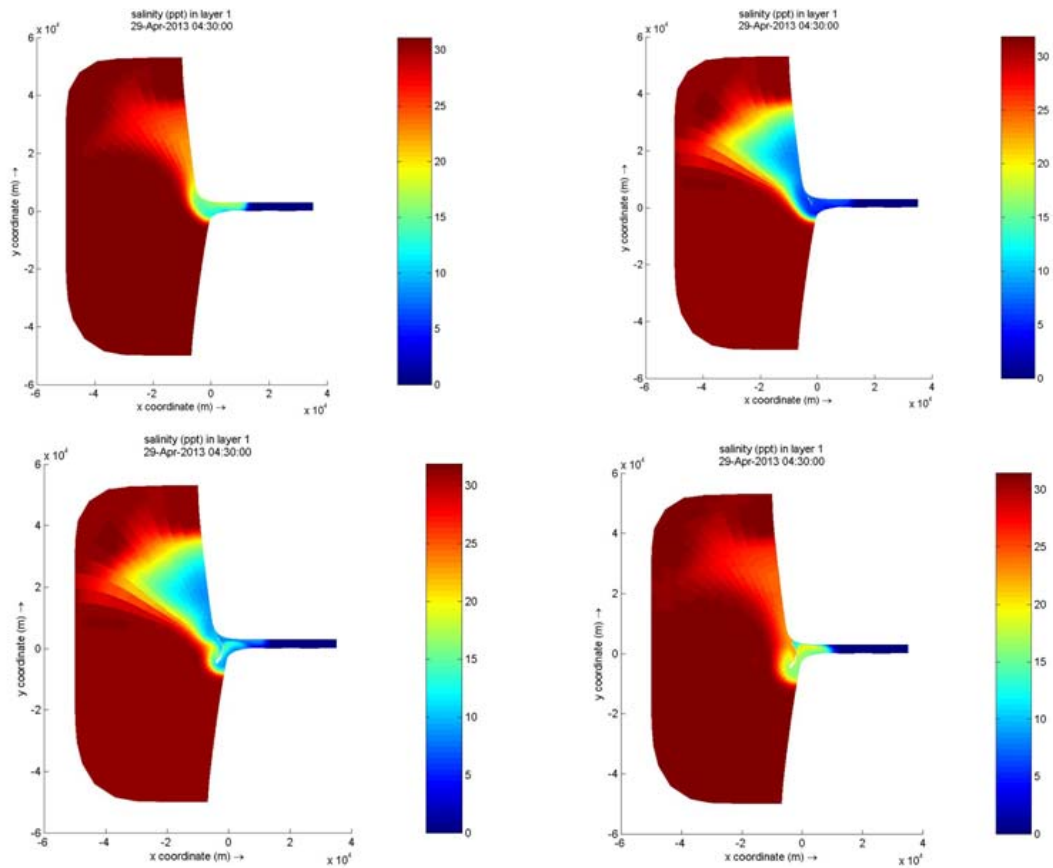
5.2.5 Resultaten exponentieel toelopend estuarium

In Figuur 5-5 is het zoutgehalte weergegeven gedurende het einde van de simulatieperiode op 10 km landinwaarts vanaf de dam in het midden van het kanaal. Vooral bij hoog tij zit er veel verschil in de zouthoeveelheid tussen de verschillende varianten. De reductie door toepassing van een eiland kan in dit punt oplopen tot meer dan 50%.

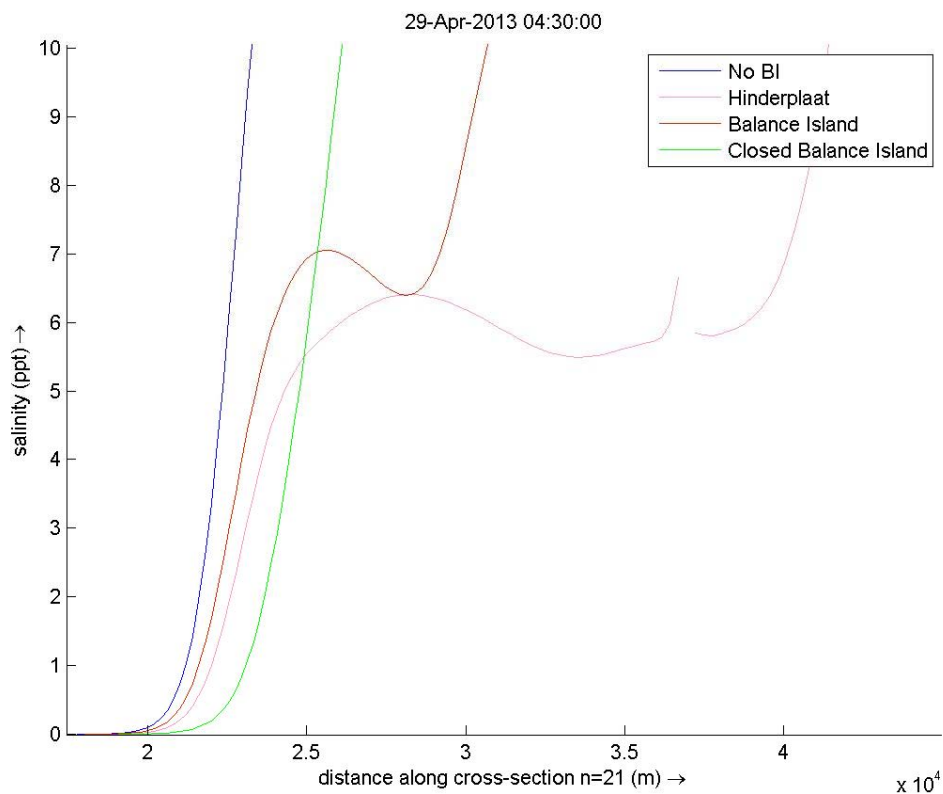
Om een duidelijk overzicht te krijgen van hoe het verloop er nu precies uit ziet is in Figuur 5-6 een overzicht gegeven van de varianten met daarin de saliniteit op het tijdstip van maximale zoutindringing.



Figuur 5-5: Zoutgehalte op 10km van de monding



Figuur 5-6: Met de klok mee: Geen eiland; Hinderplaat; eiland; eenzijdig gesloten schiereiland



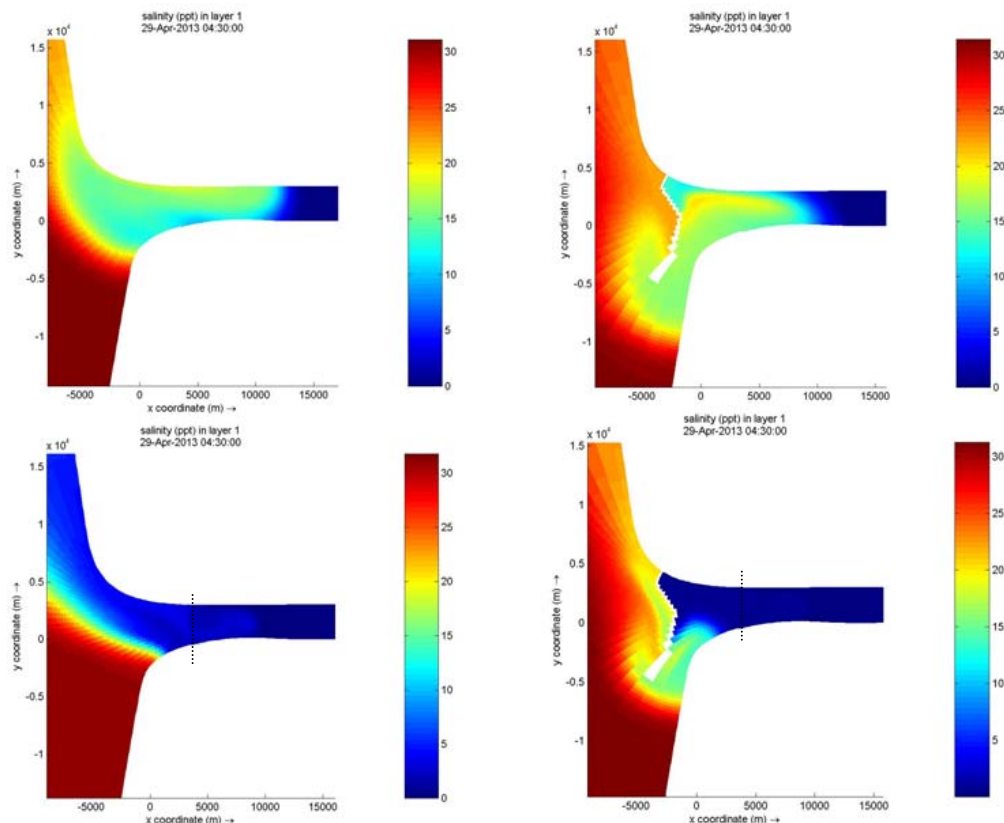
Figuur 5-7: Zoutindringing verschillende modellen, Balance Island ligt op $x=36700$ m

Het gebied dat voor het drinkwaterprobleem het meest interessant is, ligt echter tussen een saliniteit van 0-5. Wanneer het zoutgehalte uitgezet wordt tegen de lengte van het estuarium krijgt men een idee van het verloop van de zoutindringing. Als representatieve plaats is hiervoor het midden van het kanaal gekozen, omdat de zouttong hier gemiddeld gezien het verste door-dringt.

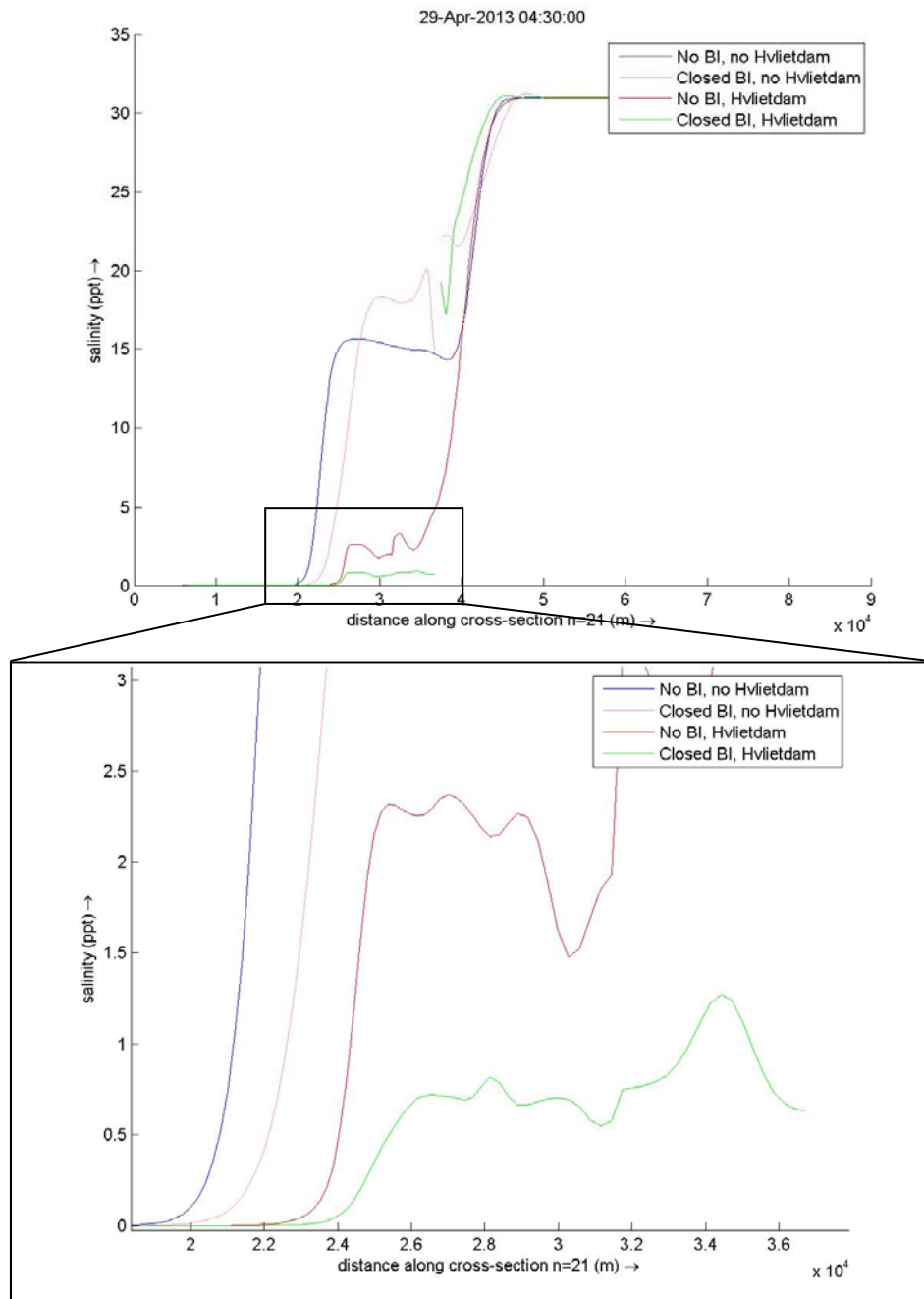
In Figuur 5-7 is te zien dat de gesloten variant van Balance Island het grootste effect heeft op de zoutindringing in het estuarium terwijl de Hinderplaat en de eilandvariant bijna geen verschil hebben op de indringing van zout water met een saliniteit onder de 5 ppt (parts per trillion).

De zoutindringing bij een eenzijdig gesloten schiereiland laat de grootste afname zien. Hierbij wordt ten opzichte van het referentiescenario een verschil in de orde van 2,5 km op de 1 ppt-grens gevonden.

In Figuur 5-8 is te zien dat de aanwezigheid van een dam een zeer grote invloed heeft op de zoutindringing in het model. In de eerste plaats zorgt de dam er voor dat het zoutgehalte van het binnendringende water lager is doordat het water voor de dam al beter gemengd wordt. Daarnaast is goed te zien hoe dit effect versterkt wordt door de plaatsing van een eiland, omdat nu de afstand die de getijgolf af moet leggen tot aan de dam vergroot wordt en er bovendien een zoetwaterbel ontstaat voor de dam die door een eiland als het ware opgesloten wordt die als buffer tegen het zoute water fungeert.



Figuur 5-8: Met de klok mee: geen BI/geen dam; BI/geen dam; geen BI/dam; BI/dam



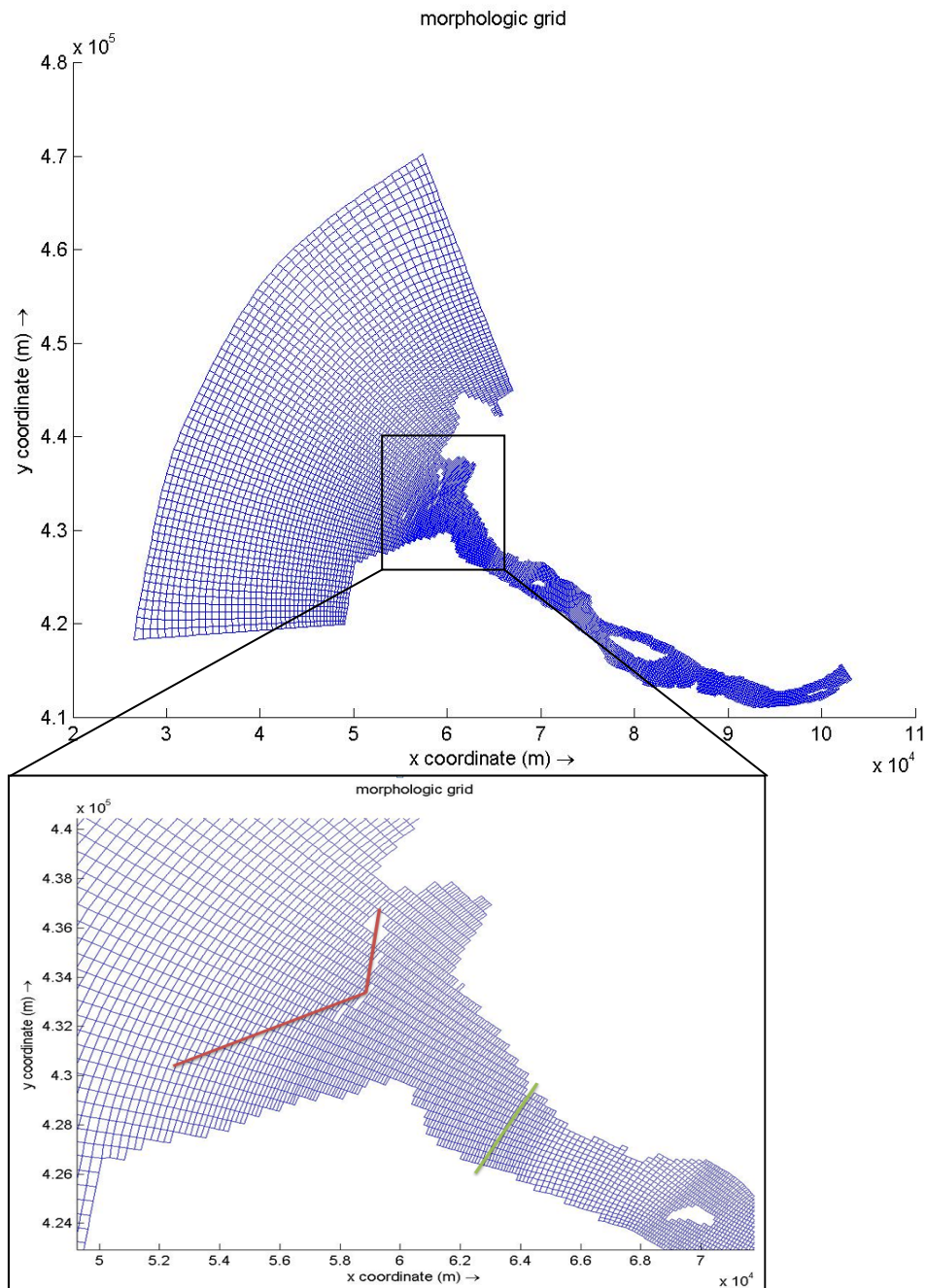
Figuur 5-9: Zoutindringing model met dam ($x=31700$ m) en Balance Island ($x=36700$ m)

Het valt op dat bijna tot aan de gemodelleerde dam concentraties van <5 ppm behaald kunnen worden voor de combinatie van een dam en een Balance Island. Deze waarden zijn niet representatief voor de werkelijke situatie maar geven wel aan dat de combinatie van dam en eiland effectief het zoete water opsluiten en behouden in het gebied.

5.3 Haringvlietvariant

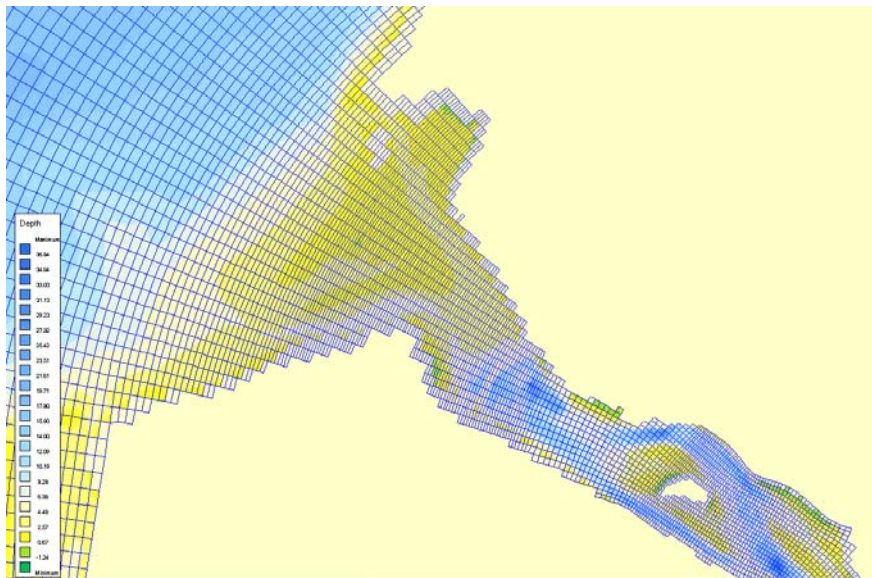
5.3.1 Modelopzet

Voor het model met een bathymetrie zijn vaklodingen van de Noordzee en Haringvliet gebruikt (Bron: RWS).



Figuur 5-10: Grid Haringvlietmodel

Het model is vanaf de monding doorgetrokken tot aan de Moerdijkbrug, wat overeenkomt met een lengte van 50 kilometer. Geschematiseerd is in Figuur 5-10 de ligging van Balance Island en de Haringvlietdam weergegeven. De dam is enkel ter indicatie weergegeven en is in dit model niet meegenomen in de berekeningen; de punt van Balance Island ligt op 53 kilometer afstand van de Moerdijkbrug.



Figuur 5-11: Gedetailleerde bathymetrie Haringvliet

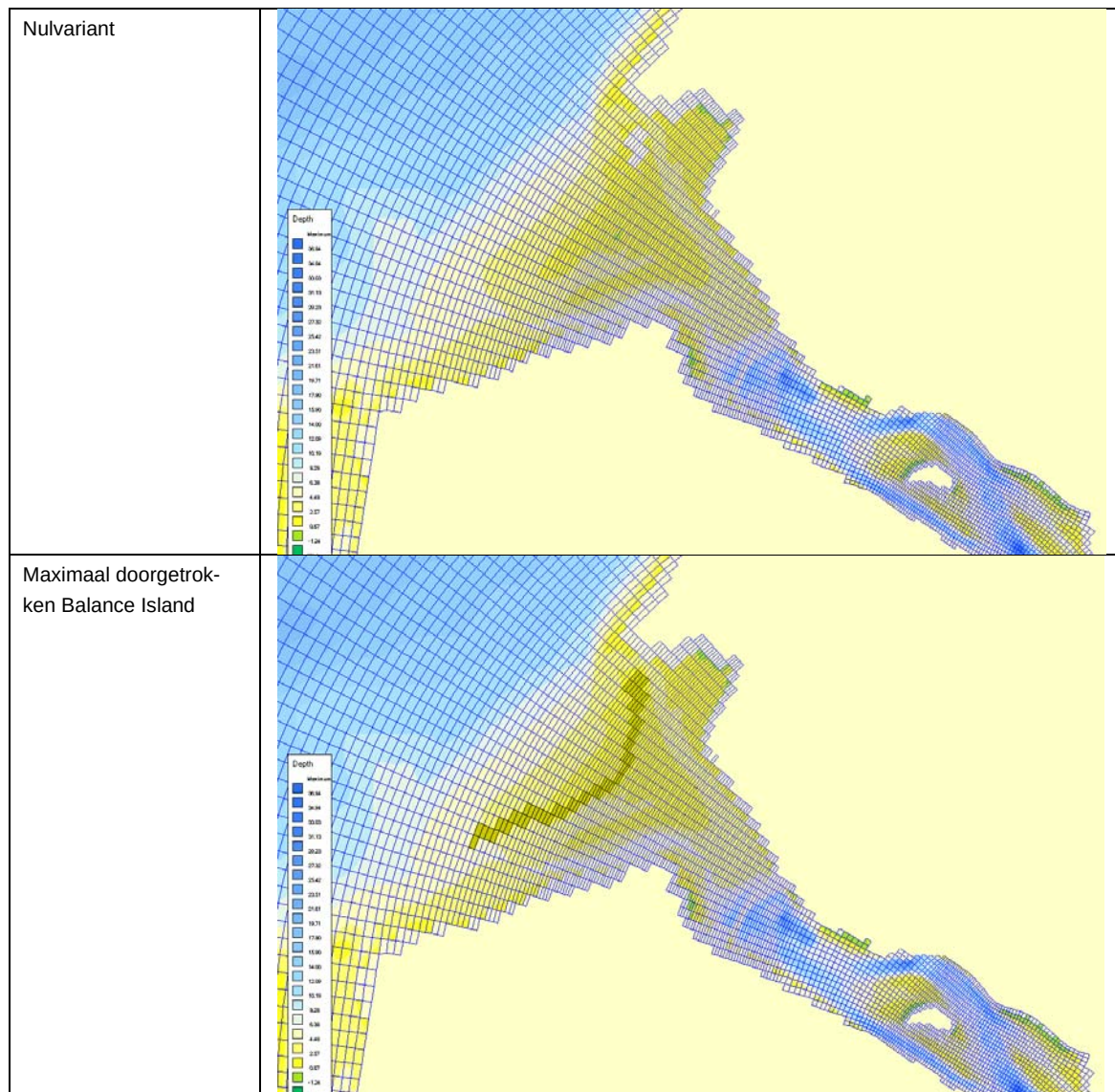
In Figuur 5-11 zijn duidelijk de lokale dieptes en ondieptes te zien die zich in het Haringvliet bevinden.

5.3.2 Randvoorwaarden

Als randvoorwaarden voor dit model geldt het astronomische getij. Om te controleren of het model hiermee goed werkt zijn de waterstanden uit het model vergeleken met de waterstanden die door Rijkswaterstaat voorspeld werden. Er is arbitrair gekozen voor de periode van 10-17 april. De resultaten hiervan zijn te vinden in de bijlage *waterstanden per model*. Voor het open einde van de rivier is wederom een debiet van $600 \text{ m}^3/\text{s}$ aangehouden zoals ook voor de overige modellen het geval is.

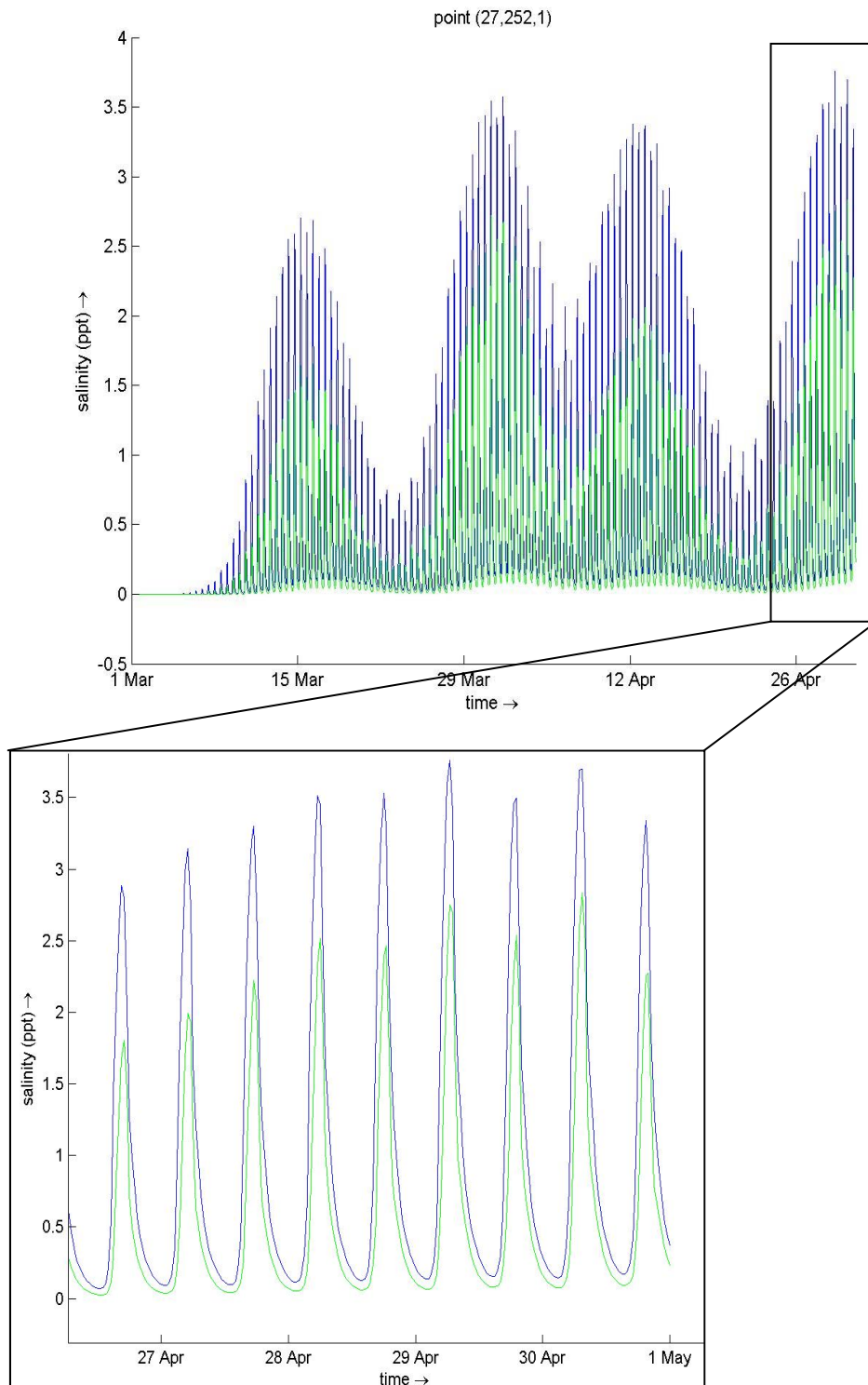
5.3.3 Plaatsing Balance Island

In het Haringvlietmodel zijn twee varianten gemodelleerd, een zonder en een met Balance Island. De plaatsing van Balance Island is in zuidelijke richting doorgetrokken op de manier zoals beschreven is in het rapport Balance Island als Innovatie (Grontmij, Imares, Waterarchitect van Bueren, 2012). Daarbij is het eiland ook gelegd over de al aanwezige platen aan de noordzijde van de monding om een maximum effect van Balance Island te bereiken. Dit is een noordelijke uitbreiding van het originele concept. De totale structuur komt neer op een eilandplaat met een lengte van in totaal 9,5 kilometer.



5.3.4 Resultaten Haringvlietmodel

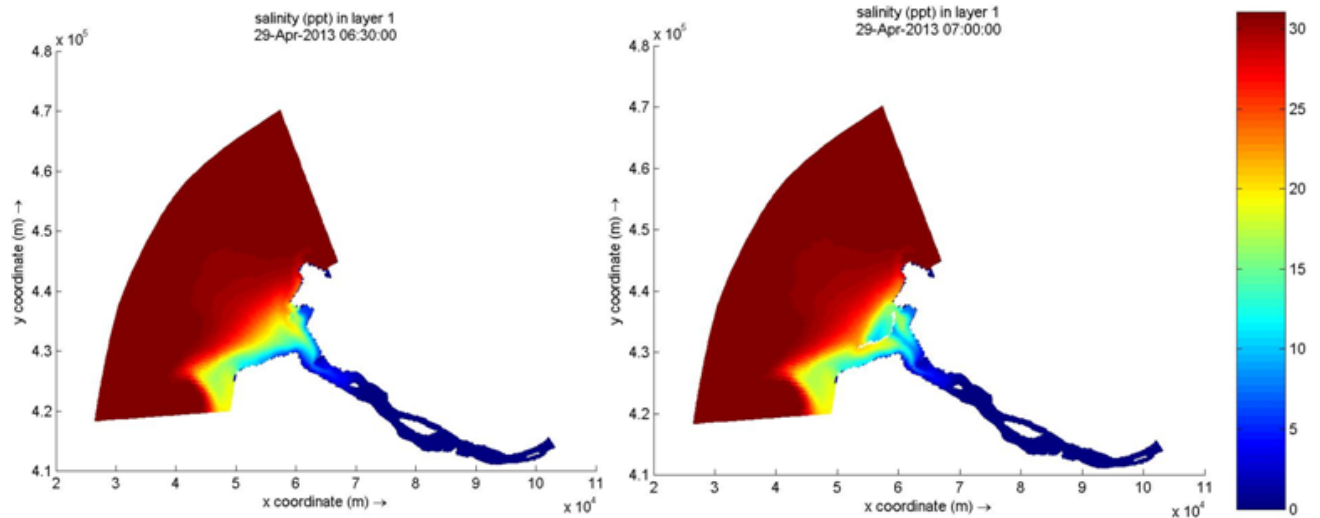
Zoals ook bij de eerdere modellen gedaan is, is eerst nagegaan op welk moment het zoutgehalte op 10 km van de monding het hoogst is. In Figuur 5-12 kunnen we vinden dat dit moment in de ochtend van 29 april plaatsvindt, zoals ook bij de andere modellen het geval is. De reductie op 10 km van de monding (ongeveer 1 km voor Middelharnis) bedraagt bij maximale indringing iets meer dan 25%.



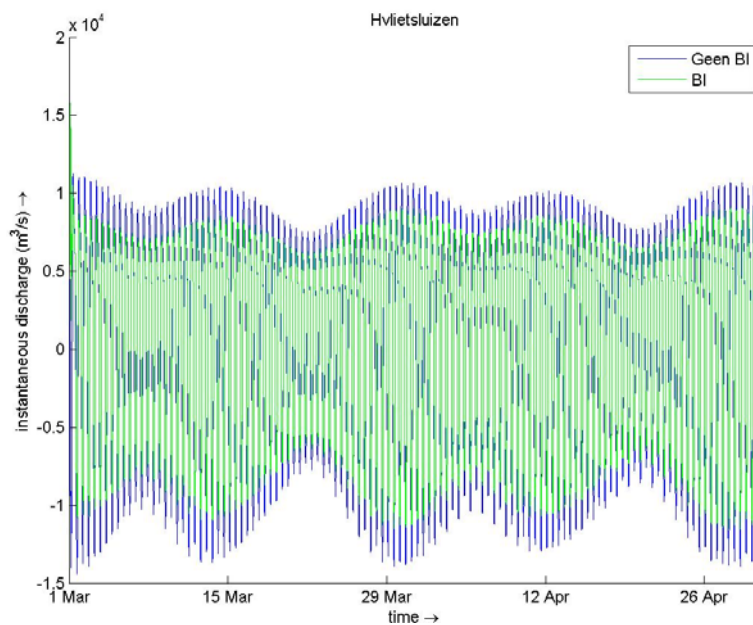
Figuur 5-12: Zoutgehalte zonder (blauw) en met (groen) Balance Island op 10 km van de monding

Wanneer naar de 2D-plot van de zoutindringing in dit model gekeken wordt (Figuur 5-13), is het effect van geulen en platen te zien op de indringing van zout in het Haringvliet. Door de diepe geulen stroomt het zoute water gemakkelijker naar binnen terwijl de platen juist een vertraging opleveren. Balance Island werkt binnen dit systeem dan ook als een kunstmatige plaat die de indringing van het zoute water in de rivier weet te vertragen. Hierdoor is de totale massa aan zeewater die het estuarium binnendringt na aanleg van Balance Island kleiner dan in de situatie

zonder eiland en zal de rivier dus minder verzilt doordat het getijprisma minder overheerst binnen het systeem (Figuur 5-14)

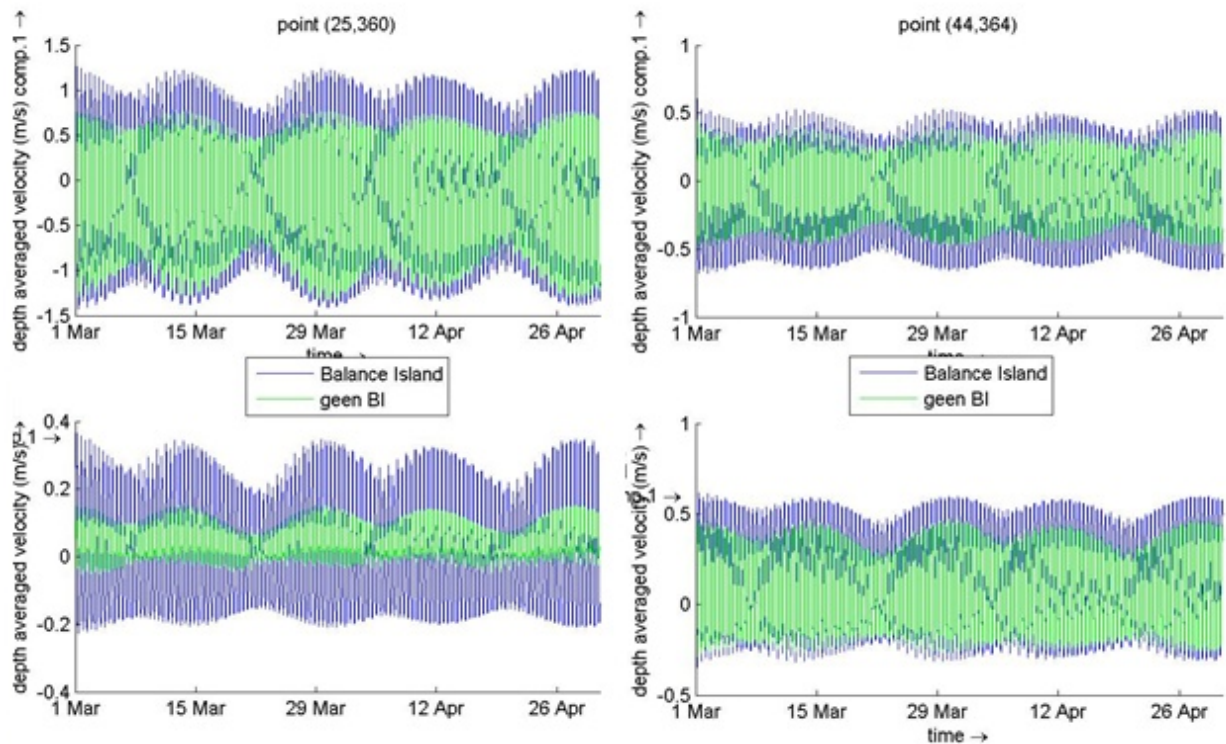


Figuur 5-13: 2D zoutindringing zonder(links) en met (rechts) Balance Island



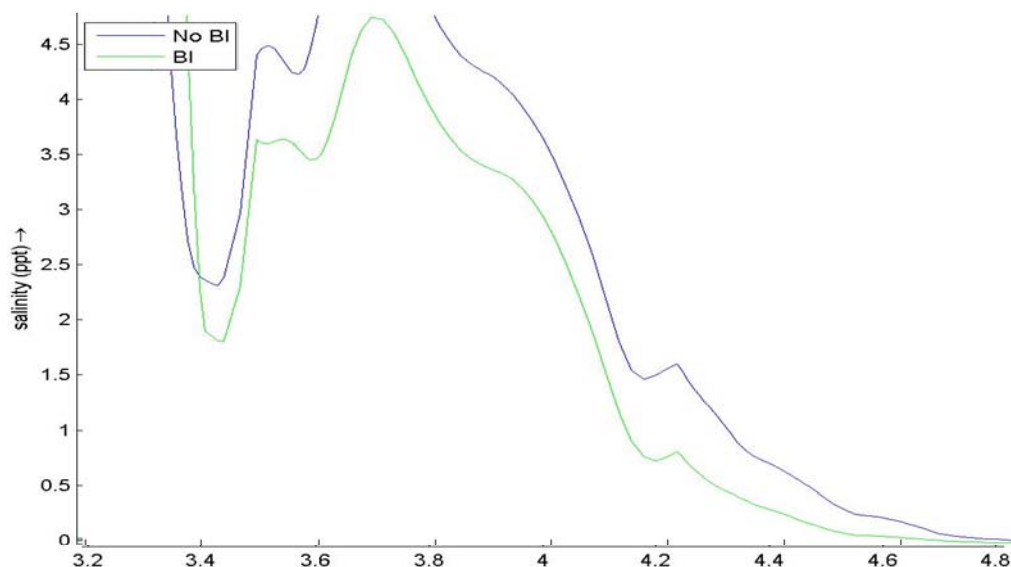
Figuur 5-14: Debiet over Haringvlietsluizen

In de case study naar Balance Island (Grontmij, Imares, Waterarchitect van Bueren, 2012) wordt gesteld dat door de aanleg van Balance Island de stroming door het Slijk gat ten zuiden van Balance Island toe zal nemen waardoor minder baggerwerkzaamheden nodig zouden zijn om de vaargeul op diepte te houden.



Figuur 5-15: Stroomsnelheid door Slijkgat (links) en langs noordzijde van Balance Island (rechts) in x- en y-richting

In Figuur 5-15 is de stroomsnelheid te noorden en zuiden voor en na de aanleg van het eiland weergegeven. Zoals te zien is neemt de stroomsnelheid door het Slijkgat inderdaad toe waardoor een hogere evenwichtsdiepte zal ontstaan in de geul. Dit zou, afhankelijk van andere morfologische processen die in dit rapport buiten beschouwing zijn gelaten, inderdaad tot minder onderhoud aan de vaargeul kunnen leiden.



Figuur 5-16: Zoutindringing zonder (blauw) en met (groen) balance island ($x=53000$ m)

De terugdringing van de zoutcurve op dit model bedraagt voor de 0.5 ppt-grens ongeveer 2 km, eenzelfde orde van grootte als gevonden werd in de eerdere modellen. Daarnaast is duidelijk te zien dat de toevoeging van Balance Island over bijna het hele estuarium een lagere saliniteit geeft.

6 Conclusie

In dit onderzoek is een eerste verkenning gedaan om op conceptniveau aan te tonen of het concept van Balance Island de zoutindringing in estuaria verkleint. Ondanks dat hiervoor aannames gedaan moesten worden tijdens dit onderzoek, geven de modellen resultaten die zeer goed overeenkomen met meetwaarden en blijkt Balance Island te werken in de modellen zoals ze hier gebruikt zijn.

De exacte effecten van een eiland op de zoutindringing zijn erg gevoelig voor de precieze plaatsing en grootte van het eiland. Door een verkeerde plaatsing kan de aanwezige 'bel' van zoet water uit het estuarium gestuwd worden. Er lijkt een duidelijke koppeling te zijn tussen getijweg, transportrichting op zee en getijslag enerzijds en de benodigde plaatsing van een eiland anderzijds.

Zoutgehaltes kunnen binnen de conceptmodellen op een locatie 10 kilometer vanaf de monding tot maximaal 50% afnemen en over het geheel neemt de lengte van de zoutindringing in bijna alle modellen af.

Uit de resultaten met een zeer versimpeld harmonisch getij blijkt dat ook in dit generieke geval de zoutindringing afneemt na aanleg van een eiland ten opzichte van het referentiemodel. Hierdoor is te verwachten dat Balance Island in veel meer situaties toepasbaar is dan alleen in de in dit rapport gepresenteerde modellen. Balance Island zou daarmee ook internationaal een oplossing kunnen bieden voor het beperken van de zoutindringing.

De toevoeging van een dam in het model (bijvoorbeeld de Haringvlietdam), versterkt het zoutreducerende effect van Balance Island.

In de modellen die voor deze studie gemaakt zijn is het nettoresultaat altijd positief en voor de casestudy van het Haringvliet is een reductie van de zoutindringing van 30% gevonden. Wel gaat deze casus uit van een constante aanvoer van $600 \text{ m}^3/\text{s}$ zoet water, wat een belangrijke aanname is. Bij afwezigheid van stromend water worden diffuse processen belangrijker.

In de specifieke situatie van het Haringvliet zal de stroomsnelheid door het Slikgat toenemen, waarbij het aannemelijk is dat hierdoor een grotere evenwichtsdiepte zal ontstaan.

Balance Island is een oplossing die op basis van de hier gepresenteerde resultaten kan werken. Uit deze studie blijkt dat het concept een mogelijke oplossing biedt voor estuaria met verschillende vormen en randvoorwaarden waarin zoutindringing een probleem vormt.

7 Aanbevelingen

- Balance Island is in dit onderzoek gemodelleerd door middel van drypoints. Dit houdt in dat water altijd om BI heen stroomt. Het nadeel hiervan is dat een plotselinge muur ontstaat in het model in plaats van een geleidelijke afname van de diepte zoals bij een echt eiland het geval zou zijn. Dit heeft grote effecten op het verloop van de stroming. Voordat het eiland toegepast kan worden is het aan te raden een model te maken waarbij BI niet door drypoints wordt geprogrammeerd.
- Tot nu toe is altijd uitgegaan van een goed gemengd estuarium. De menging in het estuarium is goed en daarom kan met een enkellaags model worden gerekend. Voor gedetailleerdere berekeningen van de zoutgradiënten is het echter wel van belang ook de verticale zoutgradiënt in de waterkolom te bepalen. Hierin kunnen o.a. beter de effecten van wind, fluctuaties in zoetwateraanvoer en de effecten bij stilstaand water worden bepaald. Dit kan berekend worden met een meerlaags Delft3D-model.
- De grootte van de doorlaat in de dam is nu beperkt tot 1 gridcel. Door de celdichtheid rond dit punt te verhogen, kunnen nauwkeuriger voorspellingen worden gedaan over de effecten.
- De werking van Balance Island is erg gevoelig voor de precieze plaatsing en grootte van het eiland. Er is meer onderzoek nodig om de effecten hiervan beter te kunnen beschrijven.
- Morfologie speelt bij veranderingen langs de kustlijn een grote rol. De aanleg van Balance Island zal mogelijk gevolgen hebben voor het zandtransport langs de kust en tot sedimentatie of erosie van vaarwegen kunnen leiden. Bovendien is dit proces ook van groot belang voor de stabiliteit van het eiland. In dit rapport is morfologie buiten beschouwing gelaten, nader onderzoek naar de morfologische effecten van Balance Island is nog nodig.
- Alle modellen die gemaakt zijn voor dit onderzoek hebben als uitgangspunt het concept van zoutindringing te beschrijven en de mogelijke invloed van een kunstmatig eiland hierop te onderzoeken. Aangezien het in alle gevallen, ook in het Haringvlietmodel, slechts om een concepttoets gaat, zijn er veel vereenvoudigingen en aannames gedaan om rekentijd en programmeertijd te besparen. In concept is in dit rapport bewezen dat het toepassen van een Balance Island de gewenste effecten kan bewerkstelligen maar het is niet aangetoond dat Balance Island in deze specifieke casus de gewenste resultaten oplevert. Voordat het daadwerkelijk toegepast kan worden is het aan te raden een gedetailleerder model te maken en verschillende scenario's van rivierafvoer door te rekenen en rekening te houden met windeffecten en variërende astronomische condities.

8 Bronnen

Grontmij, Imares, Waterarchitect van Bueren. (2012). *Balance Island als innovatie*.

IMARES. (2007). *Herstel van estuariene dynamiek in de zuidwestelijke Delta*.

Savenije, H. (2012). *Salinity and Tides in Alluvial Estuaries*. Delft.

Stive, M., & Bosboom, J. (2012). *Coastal Dynamics 1 TU Delft*.

Bijlage 1

Waterstanden per model

Waterstanden per model

