

# Onderzoek naar nauwkeurigheid voor zoutindringing met D-HYDRO

Modelsimulaties in 3D op verschillende roosters

Meinard Tiessen  
Erik de Goede  
Julien Groenenboom  
Firmijn Zijl  
Gundula Winter  
Wouter Kranenburg

11202219-006



**Titel**

Onderzoek naar nauwkeurigheid voor zoutindringing met D-HYDRO

**Project**

11202219-006

**Kenmerk**

11202219-006-DSC-0008

**Pagina's**

67

**Trefwoorden**

D-HYDRO, 3D modellering, hydrodynamica, nauwkeurigheid, roosteronderzoek

**Samenvatting**

In dit project is onderzoek uitgevoerd naar de nauwkeurigheid van driehoekige en vierhoekige roosterzellen voor modellering van zoutindringing in 3D met de D-HYDRO Suite. Hierbij is het hydrodynamische module D-Flow Flexible Mesh toegepast. Voor een aantal schematische toepassingen en een aantal praktijktoepassingen van Rijkswaterstaat is het effect van driehoekige en vierhoekige roosterzellen op de nauwkeurigheid van de zoutindringing gekwantificeerd. De praktijktoepassingen zijn de Noordzee, het Haringvliet en de Grevelingen.

De conclusie is dat er in het algemeen kleine verschillen zijn tussen de modelresultaten voor regelmatige driehoekige en vierhoekige roosters voor zoutindringing in 3D D-Flow FM modellen. Het is daarmee mogelijk om naast kromlijnige en regelmatige (gelijkzijdige) vierhoekige roosters gebruik te maken van regelmatige driehoekige roosters voor 3D berekeningen van stoftransport van zout.

**Referenties**

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	31-10-2018	Meinard Tiessen Erik de Goede en anderen		Anke Becker		Frank Hoozemans	
1.1	14-12-2018	Meinard Tiessen Erik de Goede en anderen	<i>MT</i> <i>Edg</i>	Jan van Kester <i>Jvk</i>		Frank Hoozemans	<i>b.c.</i>

**Status**

definitief



## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Achtergrond	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Afbakening	1
1.4	Leeswijzer	1
1.5	Projectteam	1
<b>2</b>	<b>Opzet van het project</b>	<b>2</b>
2.1	Schematische testen	2
2.1.1	Testen met vlakke bodem en met niet uniforme bodem	3
2.2	Praktijktesten	3
2.2.1	Noordzee	3
2.2.2	Grevelingen	4
2.2.3	Haringvliet	4
2.2.4	De Nieuwe Waterweg	5
<b>3</b>	<b>Vorbereiding voor D-HYDRO simulaties</b>	<b>6</b>
3.1	Projectinstellingen voor 3D modellering met D-HYDRO	6
3.2	Gebruikte softwareversies	6
3.2.1	GUI-versie	6
3.2.2	Linux versie	7
3.3	Opzet van modellen	7
<b>4</b>	<b>Schematische testcases</b>	<b>8</b>
4.1	Getijgoot	9
4.2	Lock exchange model	1
4.3	Splitterplaat	5
4.4	Getijgoot opgeschaald naar werkelijke schaal en met niet-uniforme bodem	7
4.5	Lock exchange opgeschaald naar werkelijke schaal en met niet-uniforme bodem	12
4.6	Conclusies voor de schematische testen	15
4.7	Aanbevelingen bij de schematische testen	15
<b>5</b>	<b>Noordzee</b>	<b>17</b>
5.1	Modelopzet	17
5.1.1	Netwerk	17
5.1.2	Bathymetrie	17
5.1.3	Randvoorwaarden op de open randen en rivieren	18
5.1.4	Meteorologische forcering	18
5.1.5	Modelinstellingen	19
5.2	Toegepaste roosters	19
5.3	Modelresultaten	20
5.3.1	Waterstanden	20
5.3.2	Zoutgehalte Noordwijkraai	21
5.3.3	Snapshots zoutgehalte (oppervlakte)	23
5.4	Discussie Noordzee	25
5.5	Conclusies voor de Noordzee	25

<b>6 Grevelingen</b>	<b>26</b>
6.1 Modelopzet	26
6.1.1 Inleiding	26
6.1.2 Conversie van het Delft3D-model naar D-HYDRO	26
6.1.3 Randvoorwaarden	26
6.1.4 Laagverdeling	27
6.1.5 Simulatieperiode	27
6.1.6 Observatiepunten	27
6.1.7 Overzichtsfiguur	27
6.2 Toegepaste roosters	27
6.3 Verificatie D-HYDRO-model	30
6.4 Modelresultaten	32
6.4.1 Waterstand	32
6.4.2 Saliniteit – tijdseries	34
6.4.3 Saliniteit – Diepte,tijd-plots	36
6.5 Discussie Grevelingen	37
6.6 Conclusie Grevelingen	38
<b>7 Haringvliet</b>	<b>39</b>
7.1 Modelopzet	39
7.1.1 Schematisatie	39
7.1.2 Testcase	40
7.2 Toegepaste roosters	40
7.3 Modelresultaten	43
7.3.1 Ruimtelijk beeld	43
7.3.2 Ontwikkeling in de tijd	46
7.4 Effect van gebruik z-lagen	48
7.5 Discussie Haringvliet	50
7.5.1 Driehoeken versus vierhoeken	50
7.5.2 Relatie met het 'OSR+ Haringvliet' model	50
7.6 Conclusie Haringvliet	52
<b>8 Conclusies, discussie en aanbevelingen</b>	<b>53</b>
8.1 Conclusies	53
8.2 Discussie	53
8.3 Aanbevelingen	54
<b>9 Referenties</b>	<b>55</b>
<b>A Modelinstellingen voor verschillende tests</b>	<b>56</b>
<b>B Noordzee: Vergelijking oppervlakte temperatuur</b>	<b>57</b>
<b>C Noordzee: Vergelijking roosterresolutie vierhoekige roosters</b>	<b>59</b>
<b>D Haringvliet: Vergelijking met metingen</b>	<b>61</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

In dit project is onderzoek uitgevoerd naar de nauwkeurigheid van driehoekige en vierhoekige roostercellen voor modellering van zoutindringing in 3D met D-HYDRO (D-Flow Flexible Mesh). Er is een lijst van testen opgesteld om het effect van driehoekige en vierhoekige roostercellen op de nauwkeurigheid van de zoutindringing te kwantificeren. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen testen voor schematische toepassingen en in praktische (RWS relevante) toepassingen. Voor de praktische toepassingen zijn de Noordzee, het Haringvliet en de Grevelingen gekozen.

## 1.2 Doelstelling

Dit onderzoek richt zich op het effect m.b.t. de nauwkeurigheid van een driehoekig of vierhoekig rooster op de zoutverspreiding bij (RWS relevante) praktijktoepassingen. Het doel is te kwantificeren wat de verschillen zijn in zoutindringing voor 3D modelsimulaties met D-Flow Flexible Mesh.

## 1.3 Afbakening

Er komen geen gebiedsspecifieke aanbevelingen voor het type van rooster dat bij modellering van zoutindringing in 3D met de D-HYDRO (Flexible Mesh) Suite gebruikt zou moeten worden. Dit hangt sterk af van de toepassing en is afhankelijk van veel aspecten. Een van die aspecten is de nauwkeurigheid. Hiervoor worden in dit project wel conclusies getrokken, die vervolgens bij de afweging naar het te gebruiken rooster meegewogen kunnen worden.

We merken op dat in dit project alleen naar zoutmodellering gekeken zal worden en niet naar temperatuurmodellering. Transport van zout is vooral een horizontaal proces, terwijl temperatuurmodellering vooral een verticaal proces is. Daarom is het voldoende om alleen het zouttransport te beschouwen. Eerdere ervaringen met 3D modellering met D-Flow FM zijn gerapporteerd in (Kernkamp, 2015).

## 1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 bevat de opzet van het project. Voorbereidende activiteiten, zoals het vaststellen van invoerparameters, zijn beschreven in Hoofdstuk 3. De schematische testen zijn beschreven in hoofdstuk 4. In de drie daaropvolgende hoofdstukken zijn de praktijkmodellen beschreven: Noordzee (Hst. 5), Grevelingen (Hst. 6) en Haringvliet (Hst. 7). Hoofdstuk 8 bevat de conclusies en aanbevelingen.

## 1.5 Projectteam

Het projectteam bestaat uit Meinard Tiessen (projectleider), Erik de Goede (projectleider), Firmijn Zijl (Noordzee) Julien Groenenboom (Grevelingen en Noordzee), Remco Plieger (Haringvliet), Dick Verploegh (schematische testen), Wouter Kranenburg (Haringvliet), Gundula Winter (Grevelingen), Herman Kernkamp (ondersteuning bij roostergeneratie en bepaling van numerieke parameterinstellingen) en Anke Becker (review). Het projectteam is groot van omvang omdat tijdens de projectuitvoering een aantal wisselingen heeft plaatsgevonden.

## 2 Opzet van het project

### 2.1 Schematische testen

De volgende schematische testcases worden voorgesteld:

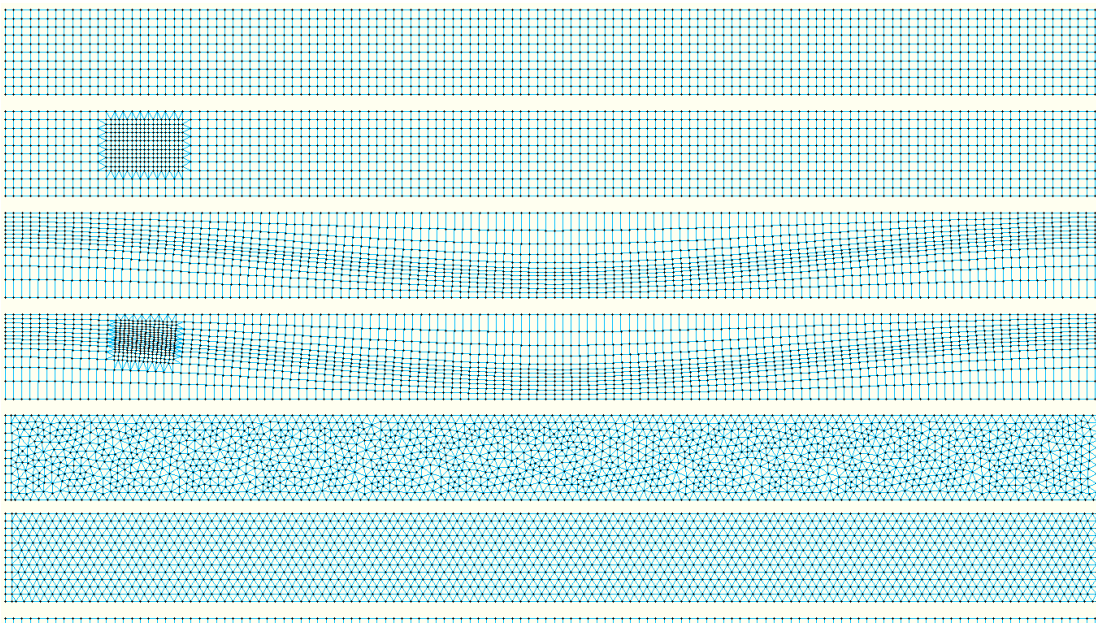
- 1 Getijgoot
- 2 Lock exchange model
- 3 Splitterplaat
- 4 Getijgoot opgeschaald naar werkelijke schaal en met niet-uniforme bodem
- 5 Lock exchange opgeschaald naar werkelijke schaal en met niet-uniforme bodem

Van de eerste drie testcases zijn metingen en D-HYDRO modellen beschikbaar. Hiermee zijn al validatiecases uitgevoerd via 2DV modellen; zie (Nabi, 2017a, 2017b en 2017c). Hierbij is echter geen roosteronderzoek (denk aan driehoeken versus vierhoeken) uitgevoerd. In het voorliggende project is dat wel gedaan.

De testmodellen zijn uitgebreid zodat per simulatie tegelijkertijd een aantal roosters getest konden worden. Het model is rechthoekig. "Uitgelijnd met de goot" betekent dat de roosterlijnen ook recht lopen, en dus evenwijdig aan de zijwanden. Voor de niet-uitgelijnde roosters volgen de roosterlijnen de geul, die in een aantal testmodellen is opgenomen.

De volgende typen van roosters zijn toegepast; zie Figuur 2.1 van boven naar beneden:

- A. Vierhoekig (rechthoekig) uitgelijnd met goot
- B. Vierhoekig (rechthoekig) uitgelijnd met goot met lokale verfijning met vierhoeken
- C. Vierhoekig (rechthoekig) niet uitgelijnd met goot
- D. Vierhoekig (rechthoekig) niet uitgelijnd met goot met lokale verfijning met vierhoeken
- E. regelmatige driehoekig, uitgelijnd met goot
- F. onregelmatig driehoekig
- G. 2DV-rooster (i.e. één cel breed), zijnde het oorspronkelijke en gevalideerde model



Figuur 2.1: Illustraties van roosters



Voor de simulaties met de schematische modellen zijn de zeven roosters in één model gezet, zoals in Figuur 2.1 geïllustreerd is. Het onderste rooster is alleen bedoeld voor een vergelijking van de 2DV modelresultaten met de 3D modelresultaten.

#### 2.1.1 Testen met vlakke bodem en met niet uniforme bodem

De eerste drie in de vorige sectie beschreven testcases hebben een vlakke bodem en zijn op kleine (laboratorium) schaal. Daarom worden er ook twee schematische testen op werkelijke schaal (bijv. de schaal van de Nieuwe Waterweg) en met een niet-uniforme bodem uitgevoerd. In dat laatste geval loopt er een geul op een sinusvormige wijze door het modelgebied. Dit komt overeen met roosters C en D in Figuur 2.1. De geul ligt op de plaats waar de roosterlijnen verdicht zijn.

## 2.2 Praktijktesten

Dit deel van het onderzoek richt zich op het effect van een driehoekig of vierhoekig rooster op de beschrijving van zoutverspreiding in praktijk (RWS relevante) toepassingen. In dit kader worden hierbij verschillende relevante praktijktesten aangedragen. Belangrijk is dat er voor deze modelschematisaties al vergelijkingen met bestaande (niet D-HYDRO) modellen ten dele beschikbaar zijn. Deze bestaande schematisaties zijn overgezet naar D-HYDRO. Voor driehoekige D-HYDRO roosters is over het algemeen gebruik gemaakt van regelmatige driehoekige roosters, zoals nu ook voorgesteld worden voor de zesde-generatie modellen van de Oosterschelde en het Haringvliet. Dit is voorgesteld omdat uit onderzoek (Groenenboom en Tiessen, 2018) is gebleken dat onregelmatigheden in het rooster kunnen leiden tot tijdstapbeperkingen, waardoor rekentijden fors zouden kunnen toenemen.

Er wordt in dit project alleen gekeken naar zoutverspreiding in het far-field gebied. Processen op en nabij keringen en sluizen ("near field") blijven in dit onderzoeksvoorstel buiten beschouwing. Bovendien is de near-field functionaliteit niet beschikbaar in D-HYDRO, en overigens ook niet in Simona.

In 2017 is een projectvoorstel opgesteld (zie Zijl en Van Dam, 2017), waarin vier acceptatiemodellen (Noordzee, Grevelingen, Singapore en Zee van Marmara) getest zouden worden. De voor RWS relevante gebieden (Noordzee en Grevelingen) worden uit dit voorstel overgenomen. Daarnaast is het Haringvliet als aanvullende testcase aangemerkt. De Nieuwe Waterweg is niet opgenomen in de hierboven genoemde reeks. De reden hiervoor wordt hieronder beschreven.

In de onderstaande opsomming worden de acceptatiemodellen beschreven, waarbij getracht is zoveel mogelijk het volledige toepassingsgebied van RWS te bestrijken en daarmee in te zetten op een brede inzetbaarheid van D-HYDRO-FM (vergelijkbaar met Delft3D en Simona). De in deze memo voorgestelde acceptatietesten zijn complementair aan de in 2015 voor RWS al uitgevoerde acceptatietesten. We merken op dat bij het testen voor RWS in 2015 lag de nadruk op 2D modellering van waterstanden en vergelijking met WAQUA (Simona).

#### 2.2.1 Noordzee

De Noordzee is een hoog-dynamisch systeem met zowel zout- als temperatuurstratificatie. In de afgelopen jaren is een fijnmazig 2D en 3D model in D-HYDRO ontwikkeld van de Noordzee. Dit model omvat ook de diepe delen buiten het continentaal plat en maakt gebruik

van een vierhoekig rooster in bolcoördinaten. De modelresultaten zijn voor verschillende jaren (2006-2012) vergeleken met metingen van temperatuur en zoutgehalte op verschillende locaties in de Noordzee.

In het voorliggende project is een deel van het modeldomein dat de Nederlandse kustzone beschrijft omgezet naar een regelmatig driehoekig rooster, en zijn de verschillen in de beschrijving van zout over de diepte bekeken tussen beide schematisaties en in relatie tot gemeten waardes.

## 2.2.2 Grevelingen

De Grevelingen is een zwak-dynamisch systeem waarin zowel zout- als temperatuurstratificatie optreedt. Voor dit gebied is een z-lagen model beschikbaar (Delft3D) waarvoor veel validatiegegevens beschikbaar zijn (TSO en vaste meetpunten). Hiervoor was nog geen D-HYDRO modelschematisatie ontwikkeld. Het doel van deze test is een vergelijking tussen de Delft3D-sommen, metingen en verschillende D-HYDRO roosters: een directe overzetting van het Delft3D rooster, een regelmatig driehoekig rooster en enkele regelmatige vierhoekige roosters (met gelijke celoppervlaktes of riblengtes als het driehoekige rooster).

## 2.2.3 Haringvliet

In voorbereiding op de implementatie van het Kierbesluit zijn verschillende proeven uitgevoerd waarbij gedurende een korte periode zout is ingelaten in dit laag-dynamische systeem. De verspreiding (en aansluitend terugdringing) van dit ingelaten zout is voor een enkele proef (1997) gereproduceerd met behulp van het OSR-NSC-Fijn model (sigma-lagen, TRIWAQ). Dit model is uitgebreid om het Haringvliet en het gedeelte aan zeezijde van de Haringvlietssluisen te beschrijven. Een D-HYDRO model met regelmatig driehoekig rooster wordt op dit moment ontwikkeld in het kader van de 6<sup>e</sup> generatie modelschematisatie voor RMM. Een werkende 2D versie daarvan is beschikbaar bij aanvang van dit onderzoek. Voor deze praktijktest wordt een uitsnede van het uitgebreide OSR model (kromlijinig) vergeleken met het voorgestelde 6<sup>e</sup> generatie rooster (grotendeels regelmatige driehoeken) en regelmatige vierhoekige roosters (met gelijke celoppervlaktes en riblengtes als het driehoekige rooster).

De verschillende eigenschappen van de te toetsen gebieden staan beschreven in onderstaande tabel.

Gebied	Toepassing	Bestaande modellen en schematisaties	Functionaliteit / opmerkingen
Noordzee	Hoogdynamisch, temperatuur en zoutstratificatie	D-HYDRO (3D sigma-lagen, vierhoekig)	Gebaseerd op DCSM-FM model. Groot model, omvat ook diepe delen buiten continentaal plaat
Grevelingen	Laagdynamisch, temperatuur en zoutstratificatie	Delft3D (3D z-lagen, curvilinear), geen D-HYDRO	Z-lagen model, uitgebreid heat-flux model inclusief evaporatie, veel validatiegegevens
Haringvliet	Laagdynamisch, zoutstratificatie	TRIWAQ (3D sigma-lagen, curvilinear), 2D D-HYDRO driehoekig (voorlopig)	Reproductie zoutverspreiding tijdens inlaatproef 1997

#### 2.2.4 De Nieuwe Waterweg

De Nieuwe Waterweg is niet opgenomen in de hierboven genoemde reeks. Nog meer dan voor de hierboven beschreven gebieden geldt dat voor een nauwkeurige beschrijving van de transportprocessen in de Nieuwe Waterweg een gedetailleerde modelschematisatie vereist is. Op dit moment wordt gewerkt aan een voornamelijk kromlijng rooster voor toepassing in het zesde generatie RMM model. Voor dit gebied is nu nog geen adequaat driehoekig rooster beschikbaar. Dit gebied lijkt minder geschikt voor het gebruik van een volledig regelmatig driehoekig rooster – voor de vergelijking met een kromlijng rooster is waarschijnlijk een geulen volgend driehoekig rooster gewenst. Om binnen dit beperkte project een eerste en voorlopig beeld te krijgen van de implicaties van driehoekige en vierhoekige roosters voor de Nieuwe Waterweg, zijn de ‘schematische’ modelsimulaties van de “Getijgootproeven” opgeschaald naar de werkelijke situatie, zoals beschreven staat in Hoofdstuk 4.

### 3 Voorbereiding voor D-HYDRO simulaties

#### 3.1 Projectinstellingen voor 3D modellering met D-HYDRO

Het D-HYDRO rekenhart voor 3D modellering bevat momenteel de nodige numerieke opties voor 3D modellering waarvoor nog geen keuze gemaakt is met betrekking tot de default setting (of defaultwaarde). Een aantal hiervan zijn van toepassing op het stoftransport. Deze defaultopties dienen vastgelegd te worden in Appendix A van de D-HYDRO manual (Deltares, 2018) en in Appendix C met richtlijnen voor de zesde-generatie modellering (Spruyt et al., 2017).

Op basis van expert judgement door Herman Kernkamp zijn voor dit project keuzes vastgelegd voor een aantal numerieke instellingen voor 3D modellering. In de onderstaande tabel worden deze keuzes opgesomd. Deze instellingen zijn voorlopig. Op dit moment worden deze keuzes als het beste beschouwd, maar ook is duidelijk dat de software-implementatie op een aantal onderdelen nog verbeterd moet worden. Dit zal te zijner tijd leiden tot softwareaanpassingen en mogelijk ook tot aanpassingen in een aantal numerieke instellingen.

Numerieke instellingen	
CFLMax	0.7
AdvecType	33
TimeStepType	2
Limtyphu	0
Limtypmom	4
Limtypsa	4
TransportMethod	1
TransportTimestepping	1
Vertadvtypmom	3
Vertadvtypsal	6
Vertadvtypstem	6
Turbulencemodel	3
Turbulenceadvection	3
Instellingen m.b.t. fysica	
Vicoww	0.00005 m <sup>2</sup> /s
Dicoww	0.00005 m <sup>2</sup> /s

Als er is afgeweken van deze standaardinstellingen, dan betreft dit een al bestaande testcase. In Bijlage A wordt een overzicht gegeven van de aanpassingen aan de defaultwaarden per testcase.

#### 3.2 Gebruikte softwareversies

##### 3.2.1 GUI-versie

Voor de DeltaShell GUI is gebruik gemaakt van versie "Delft3D FM Suite 2018.03". Voor de installatie hiervan dient de file "Delft3D FM Suite 2018.03 HMWQ (1.4.6.40270).msi" gebruikt te worden. Deze GUI-versie is alleen gebruikt voor de opzet van modellen en niet voor het rekenen met de modellen.

### 3.2.2 Linux versie

Op Linux is D-Flow FM versie **1.1.294.57252, Aug 7 2018** gebruikt. Deze versie heeft hetzelfde rekenhart als de eerdergenoemde GUI-versie.

### 3.3 Opzet van modellen

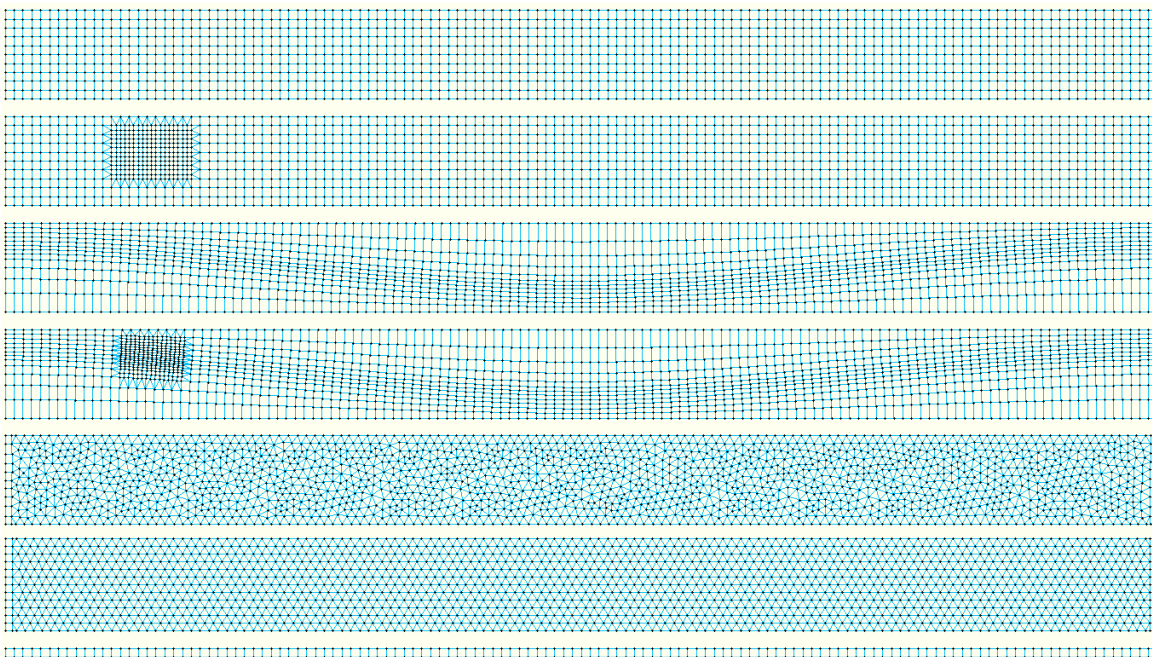
Voor het opzetten van de modelschematisaties is het GUI van de hierboven genoemde DeltaShell-versie gebruikt. Dit betekent dat de D-Flow FM invoer gebruik maakt van randvoorwaarden in het nieuwe formaat. In eerste instantie is er een model opgezet voor 2D modellering. Dit moet volledig kunnen in het GUI. Het GUI heeft nog nauwelijks functionaliteit voor 3D. Daarom is voor 3D modellering de invoerfile handmatig aangepast. Dit betekent dat de numerieke instellingen uit de tabel in Paragraaf 3.1 handmatig zijn aangebracht. Tevens is voor bepaalde taken gebruik gemaakt van de D-Flow FM Interacter versie als dit met de GUI niet mogelijk was. Dit betreft met name de roostergeneratie. Modelsimulaties zijn voornamelijk uitgevoerd op het Linux rekencluster, en maken gebruik van de hierboven genoemde D-FLOW FM Linux versie

## 4 Schematische testcases

Voor de eerste drie schematische testen zijn dezelfde roosters toegepast. Dit betreft schematische testen voor de getijgoot (zie Paragraaf 4.1), de lock exchange (zie Paragraaf 4.2) en de splitterplaat (zie Paragraaf 4.3). In alle testen zijn twintig equidistante sigma-lagen toegepast (laag 1 is nabij de bodem, laag 20 beschrijft het wateroppervlakte). Er is voor sigma-lagen gekozen, omdat hiermee meer gevalideerd is dan met z-lagen. Er is één model gemaakt met zeven verschillende roosters; zie Figuur 4.1. Het modelgebied is 130 m bij 10 m, met van boven naar beneden de volgende roosters:

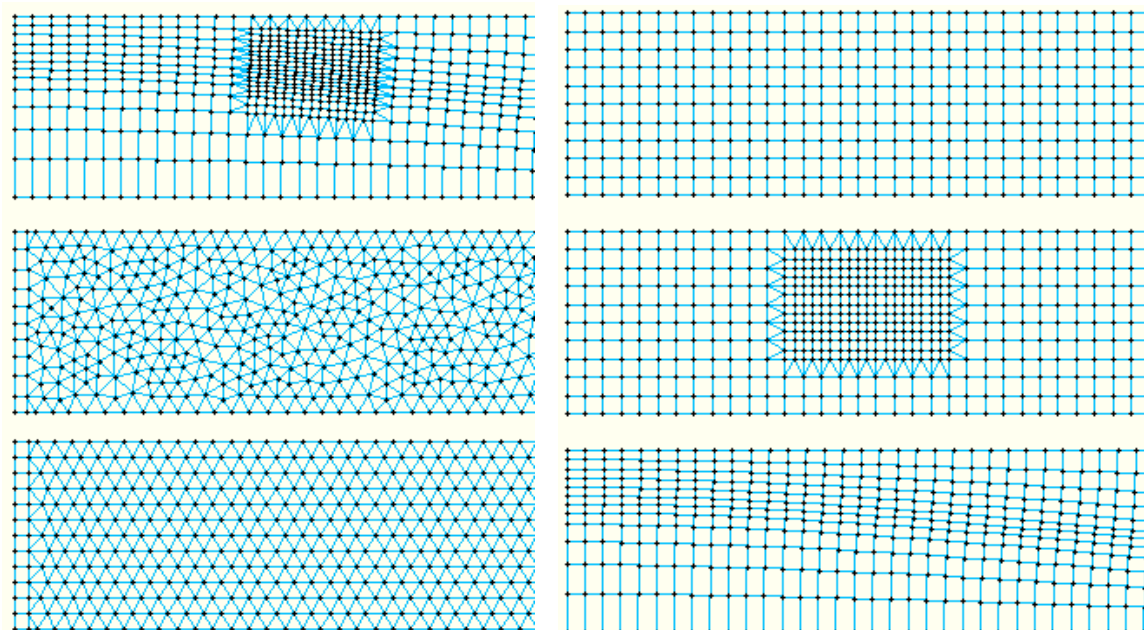
- 1 Rechthoekig
- 2 Rechthoekig met lokale verfijning<sup>1</sup>
- 3 Kromlijinig en niet uitgelijnd met goot
- 4 Kromlijinig en niet uitgelijnd met goot met lokale verfijning
- 5 Onregelmatig driehoekig
- 6 Regelmatig driehoekig
- 7 2DV model (met één cel breed, zijnde het oorspronkelijke model)

In Paragrafen 4.4 en 4.5 worden schematische testen beschouwd die zijn opgeschaald naar een realistische schaal.



Figuur 4.1: Toegepaste roosters voor schematische modellen met vlakke bodem

<sup>1</sup> De Casulli-refinement is niet gebruikt, maar de optie *CellsandFaces2* is toegepast



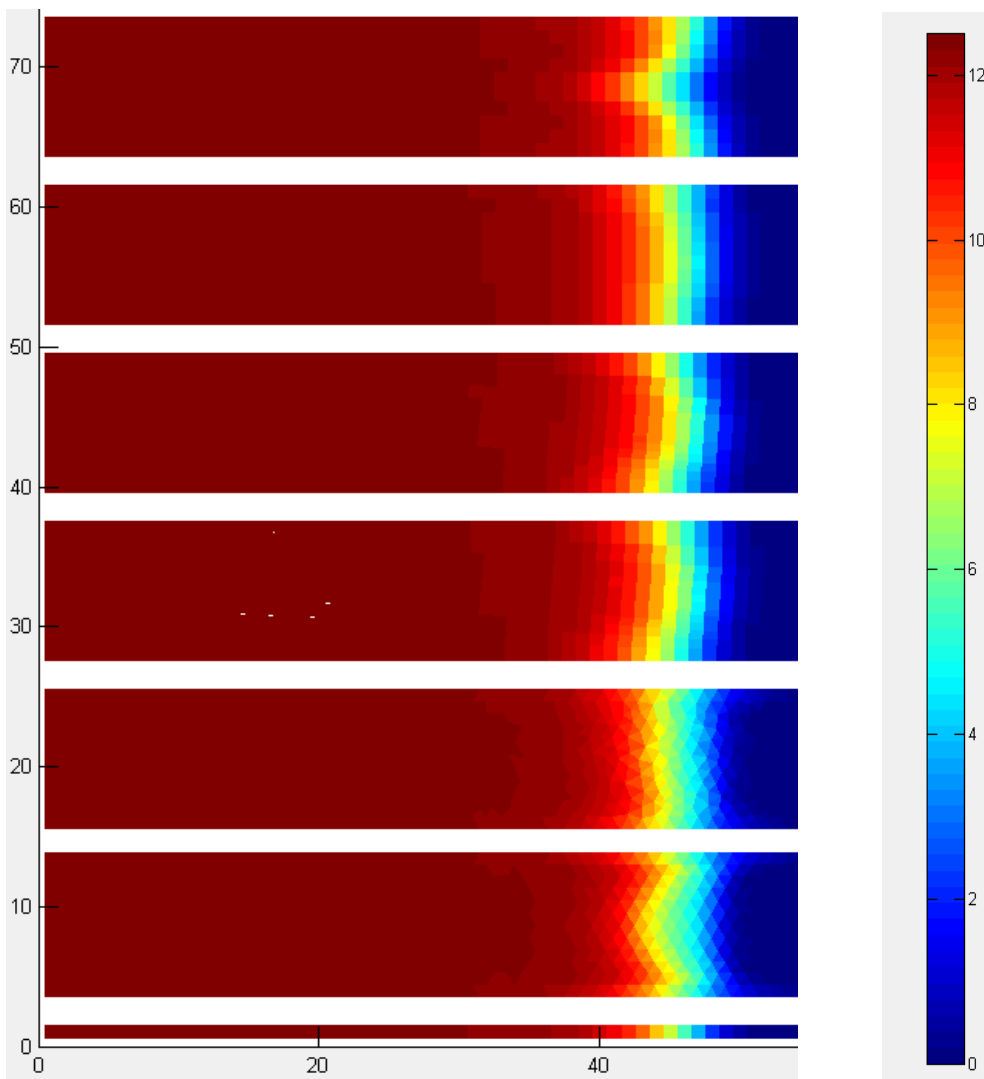
Figuur 4.2: Toegepaste roosters voor schematische modellen met vlakke bodem (ingezoomd)

Er waren de volgende bevindingen bij de roosteropzet:

- Bij de (twee) roosters met driehoeken moesten vierhoekige roostercellen toegevoegd worden bij de open rand om nauwkeurigheidproblemen te voorkomen.
- De roostergeneratie kon niet volledig met RGFRID worden uitgevoerd.
- Daarom is ook de Interacter-GUI gebruikt.
- Voor het opzetten van modelroosters is geen handleiding beschikbaar, waardoor assistentie van een expert vereist is voor het genereren van de rekenroosters. Bovendien gelden er tal van vuistregels voor de generatie. Deze vuistregels staan in het Nederlandstalige rapport (Spruyt et al., 2017), maar nog niet in de user manual.

#### 4.1 Getijgoot

De getijgoot is een model waarbij via het getij zout water (met 12.5 ppt als open randvoorwaarde) aan de linkerkant het model in- en uitgaat met een periode van 10 minuten. Aan de rechterkant is er een open rand, waar een relatief klein debiet het model instroomt, wat als een instromend rivierdebiet beschouwd kan worden. Dit is een schematische beschrijving van een estuarium. De simulatieperiode is 100 minuten, waarin tien volledige getijperioden doorgerekend worden. In elke periode is er instroom van een zouttong die vervolgens ook weer in zijn geheel uitstroomt. Voor de getijgoot met D-Flow FM is door Nabi (2017b) een validatie uitgevoerd.

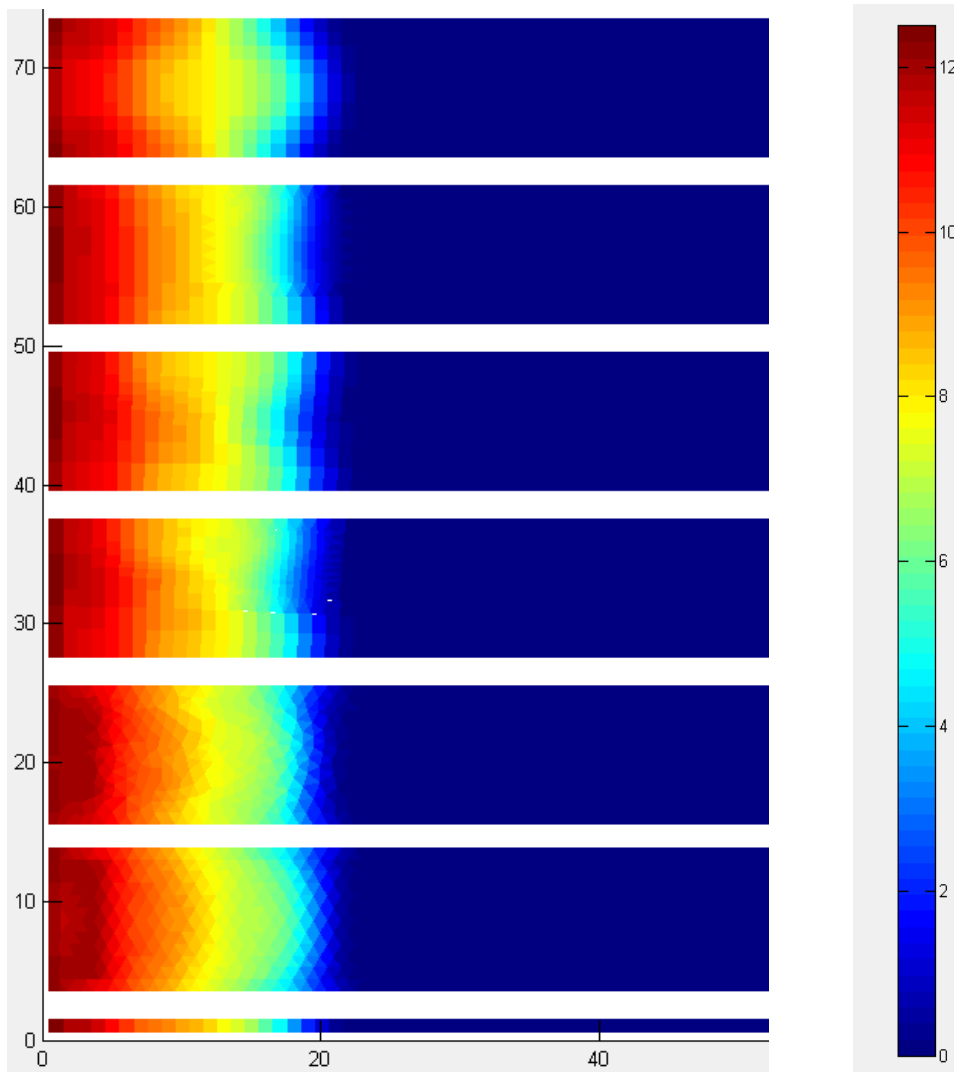


Figuur 4.3: Maximale zoutindringing; bovenaanzicht van de zoutconcentratie in laag 5 op  $T=94$  min.

Uit Figuur 4.3 blijkt op alle roosters een min of meer vergelijkbare zoutindringing berekend.

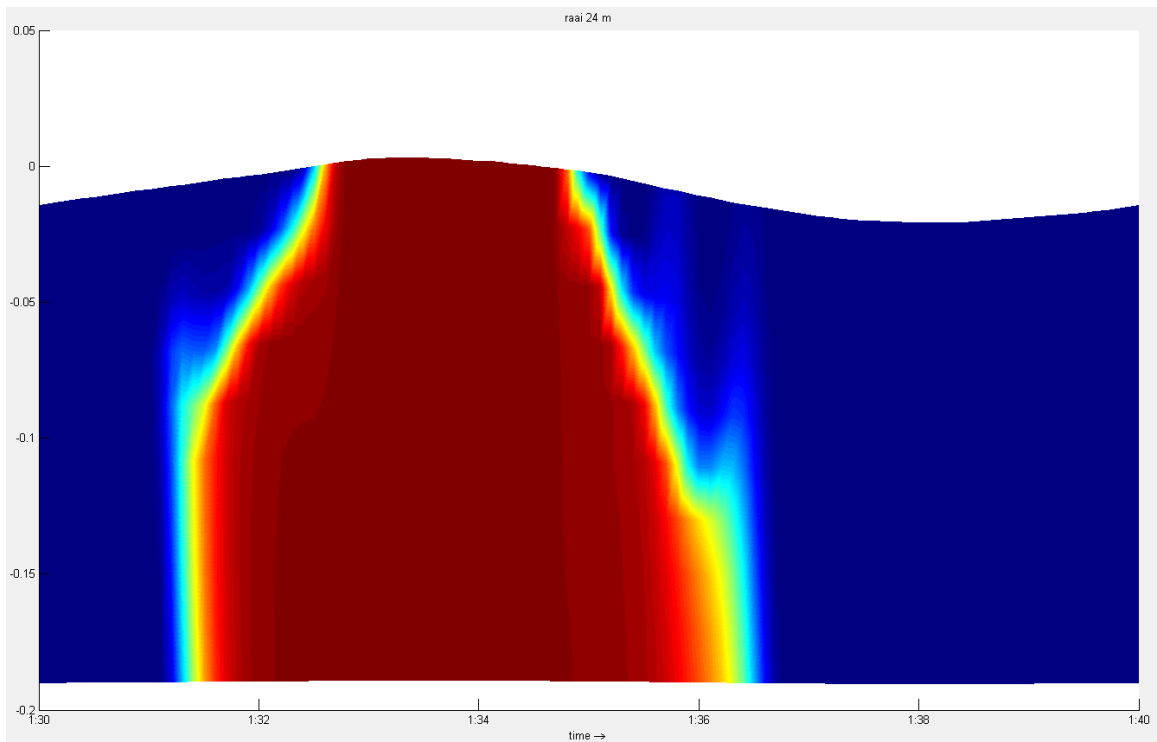
Wel valt op dat op het regelmatig vierhoekige rooster de zoutindringing niet uniform is in  $y$ -richting; zie het bovenste paneel in Figuur 4.3. Dit zou je dat wel verwachten, en is voor TRIWAQ en Delft3D-FLOW en in 2D wel het geval. Dit betekent dat de implementatie van het zouttransport in D-Flow FM op dit onderdeel geanalyseerd en verbeterd dient te worden.



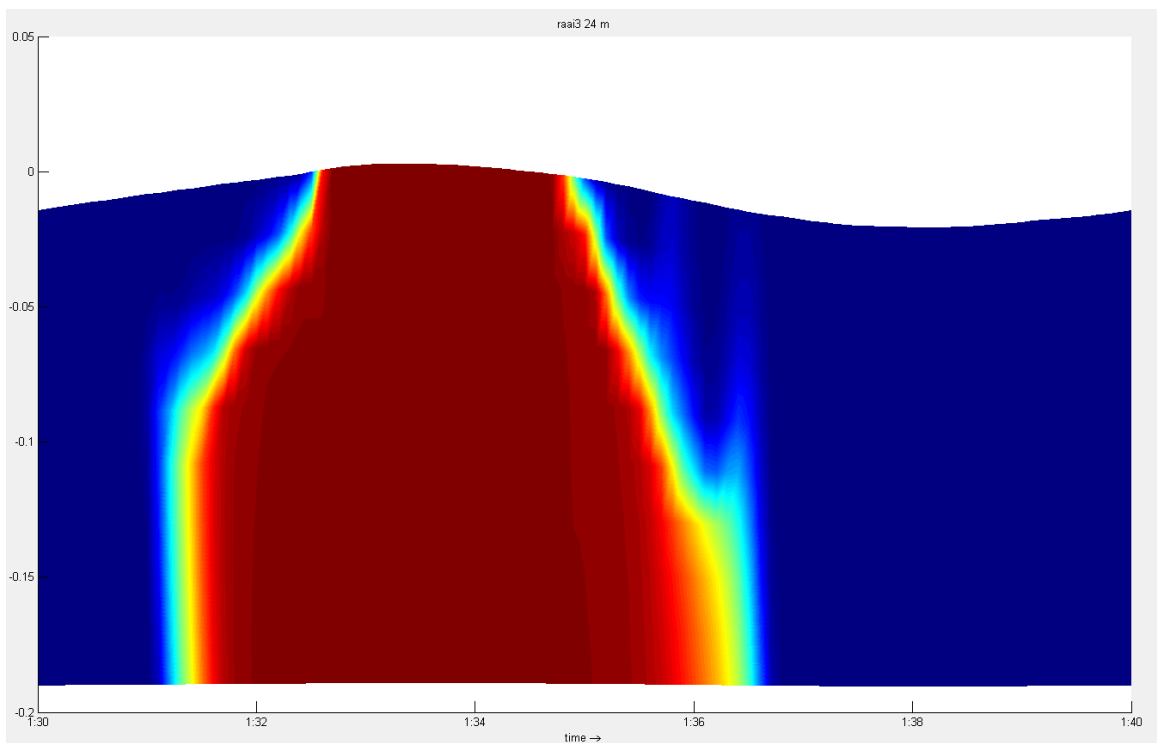


Figuur 4.4: Zoutindringing bij uitstroming: Zoutconcentratie in laag 5 op  $T=97$  min.

Ook als er sprake is van uitstroom (i.e. stroming naar links), wordt voor alle roosters een min of meer vergelijkbare zoutindringing berekend (Figuur 4.4). Zoals verwacht, geldt ook op dit tijdstip dat er op detailniveau verschillen bestaan tussen de verschillende roostervormen. Ook op dit tijdstip geldt dat er variatie in  $y$ -richting is, zelfs op het vierkante rooster.



Figuur 4.5a: Z-T plot van een enkel getij ( $T=90\text{min}$  tot  $100\text{min}$ ) voor raai 24 m van 2DV model



Figuur 4.5b: Z-T plot van een enkel getij ( $T=90\text{min}$  tot  $100\text{min}$ ) voor raai 24 m van onregelmatig driehoekig model

Figuren 4.5a-b zijn Z-t figuren waarin voor één locatie de verticale zoutprofielen in de tijd (zie horizontale as) gevisualiseerd worden. Dezelfde contourschaling als in Figuren 4.3 en 4.4 is genomen, namelijk van 0 tot 12,5 ppt. De locatie “raai 24” is genomen, wat betekent dat een locatie op 24 m van de instroomrand van de goot beschouwd wordt. We merken op dat de

goot 130 m lang is en dat de zoutindringing maximaal iets meer dan 40 m is. In Figuren 4.5a-b zijn de twee roosters genomen die qua opzet 'het verst uit elkaar liggen', namelijk het 2DV model en het rooster met onregelmatige driehoeken. Voor de andere roosters ziet het resultaat er vergelijkbaar uit. Voor alle roosters wordt echter een min of meer vergelijkbare zoutstratificatie berekend.

In Figuur 4.6 zijn Z-T figuren voor de snelheid in de raai op 12 m van de instroomrand weergegeven. Ook hierbij blijkt dat de verschillen klein zijn. Met andere woorden, niet alleen de berekende zoutconcentraties maar ook de snelheden komen goed overeen voor alle horizontale roosters.

**Conclusie voor getijgootmodel:**

- De maximale zoutindringing verschilt weinig voor de verschillende roosters en is iets meer dan 40 m. Wel zijn er verschillen in de vorm van het zoutfront te zien, wat gerelateerd is aan de vorm van het rooster.
- Alhoewel dit nader onderzoek vereist, wordt op basis van de grofstoffelijke overeenkomstigheid tussen alle roosters geconcludeerd dat de roostervorm alleen op detail-niveau leidt tot verschillende resultaten.

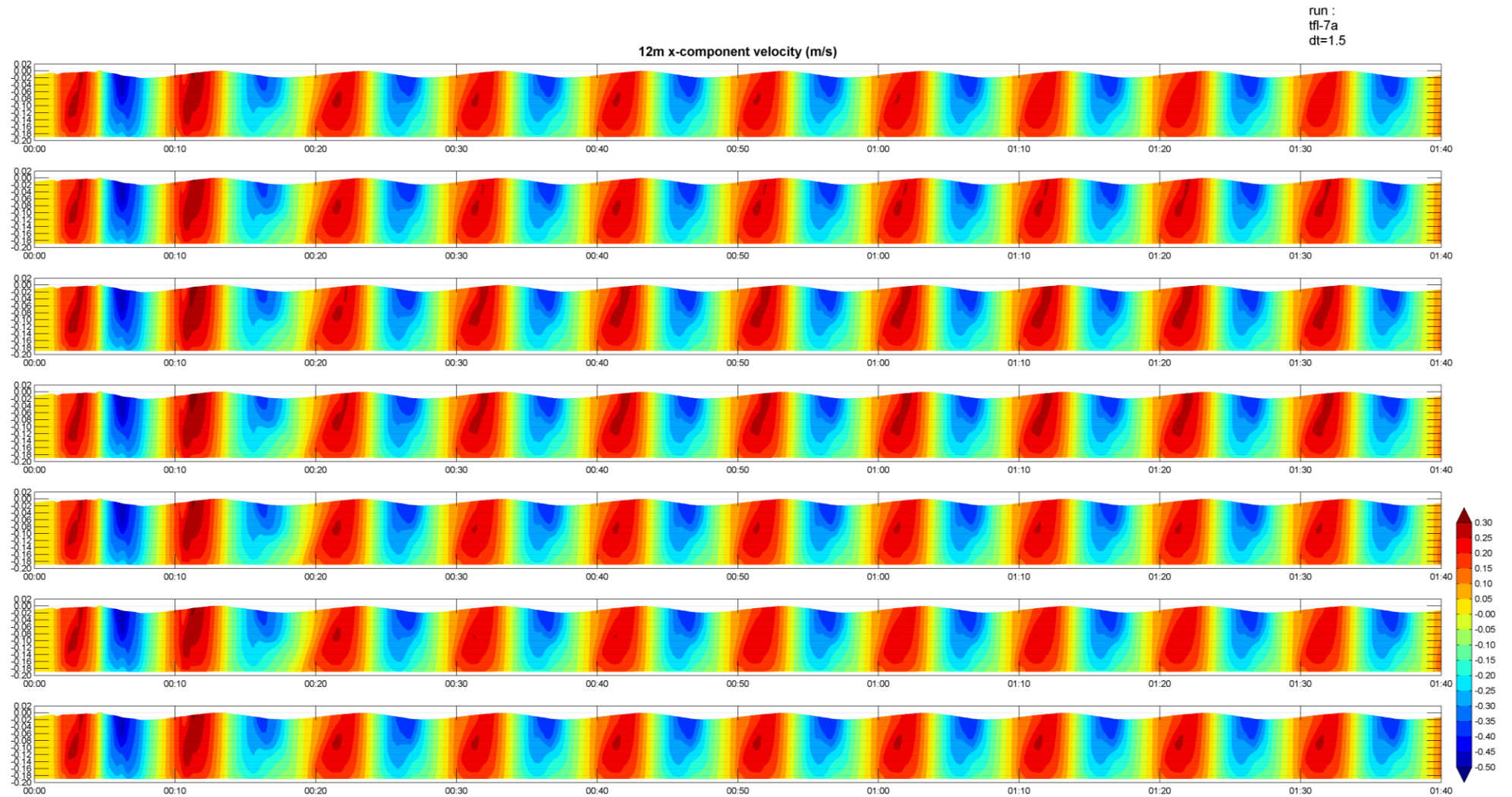
**Aanbevelingen voor getijgootmodel:**

- Bij de open randen was een vierhoekig rooster cruciaal om goede modelresultaten te verkrijgen. Het verdient de aanbeveling om dit te verbeteren.
- De modelresultaten op het rechthoekige rooster zijn niet uniform in y-richting, wat je wel zou verwachten, zoals dat voor Delft3D-FLOW en TRIWAQ het geval is. Dit betekent dat de implementatie van het zouttransport in D-Flow FM op dit onderdeel geanalyseerd en verbeterd dient te worden<sup>3</sup>.
- De documentatie voor stoftransport met D-Flow FM dient toegevoegd te worden, wat nu nog volledig ontbreekt.

---

<sup>3</sup>Inmiddels is een verbeterde software-versie beschikbaar die wel een uniforme instroming berekent op een rechthoekig rooster. Deze verbeterde implementatie was tijdens het project nog niet beschikbaar en is daarom niet voor de andere simulaties toegepast.



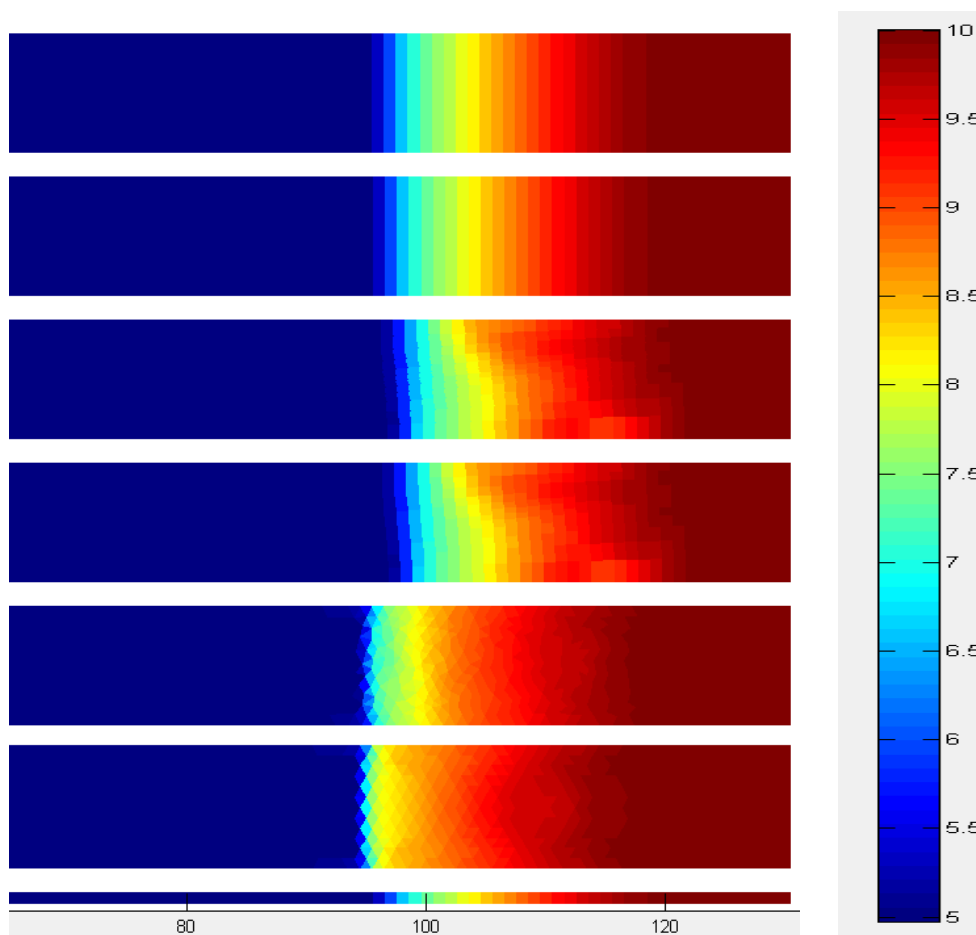


Figuur 4.6: Z-T plot van snelheid voor raai 12 m



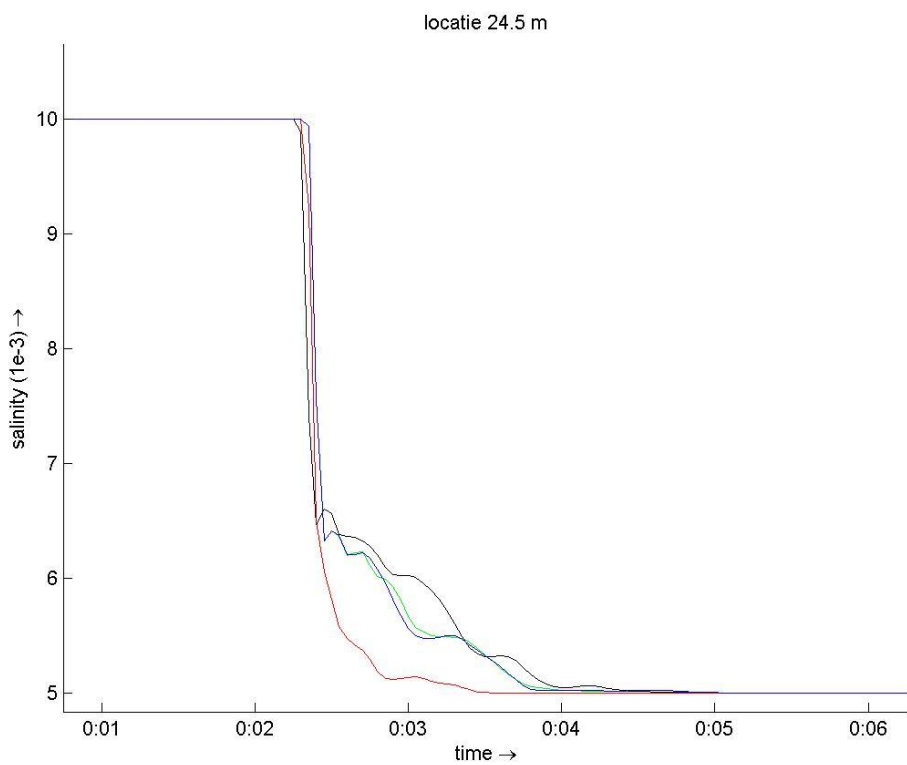
## 4.2 Lock exchange model

Het lock exchange model is een schematisatie met uitwisselingsstroming door alleen dichtheidsverschillen. Dit model heeft alleen dichte randen met twee verschillende zoutconcentraties in beide helften van het modelgebied. In dit lock exchange model met een lengte van 130 m is de linkerhelft (van 65 m) gevuld met zout van 5 ppt en de rechterhelft (van 65 m) met een concentratie van 10 ppt. Dit is via de initiële conditie in het model gebracht. Door dit dichtheidsverschil ontstaat er uitwisselingsstroming in het model. Als het zoutfront begint te bewegen, dan gaat het bij de bodem naar rechts. Met andere woorden, bij de bodem wordt het zoetere water als het ware weggedrukt. Bij het wateroppervlak vindt de omgekeerde beweging plaats en gaat het zoetere water naar links. Het dichtheidsfront beweegt door het model waarbij het op een gegeven moment weerkaatst tegen de wand. Aan Er is een theoretische formule bekend met welke snelheid het front moet bewegen. Voor de lock exchange met D-Flow FM is door Nabi (2017a) een validatie uitgevoerd.

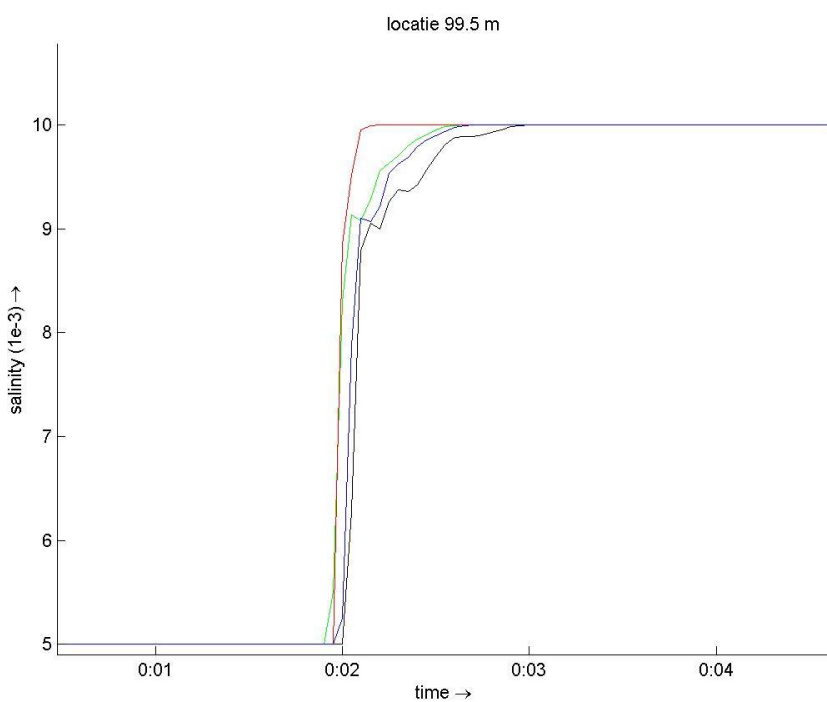


Figuur 4.7: Zoutconcentratie in laag 15 op  $T=5.51$  min.

In Figuur 4.7 wordt voor alle roosters een min of meer vergelijkbare horizontale verplaatsing van het zoutfront berekend. Er is te zien hoe de zouttong (nabij de bodemlaag) na weerkaatsing op de rechter (gesloten) rand, via de bovenlaag terug stroomt. Wel is voor de twee roosters met driehoeken (regelmatig en onregelmatig) een iets kleinere frontsnelheid van het zoutfront te zien; zie het tweede en derde figuur van onderen.



Figuur 4.8a: Tijdreeks van zoutconcentratie in laag 5 op X=99.5 m (34.5 m rechts van het midden).



Figuur 4.8b: Tijdreeks van zoutconcentratie in laag 15 op X=24.5 m (40.5 m links van het midden).

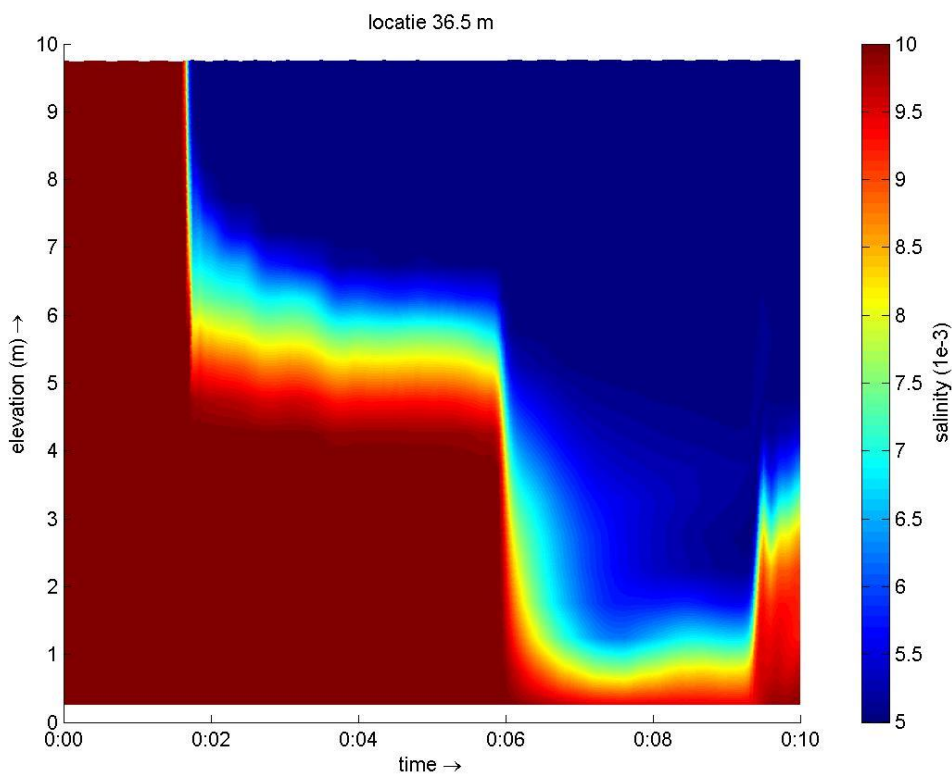


Waar in Figuur 4.8 een bovenaanzicht te zien is, is in Figuren 4.8a-b de zoutconcentratie weergegeven voor twee locaties, namelijk op 34.5 m rechts ( $X=99.5$  m) van het midden en 40.5 m links van het midden ( $X=24.5$  m) voor de volgende vier roosters:

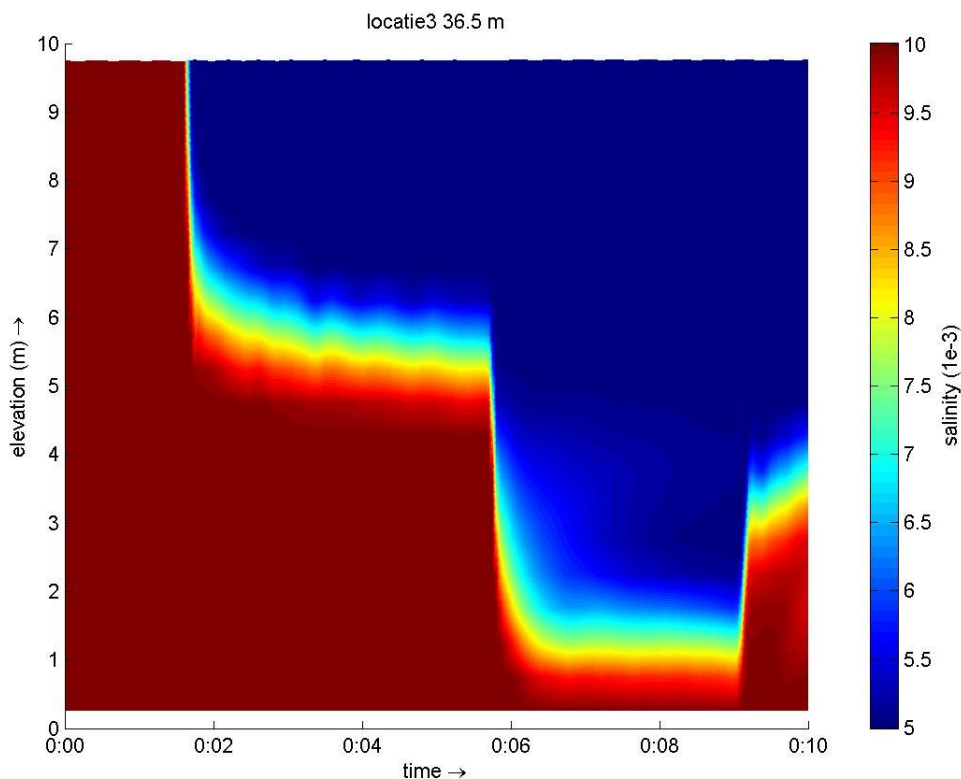
- Rechthoekig en uitgelijnd met goot met lokale verfijning (in groen)
- Rechthoekig en niet uitgelijnd met goot met lokale verfijning (in zwart)
- Regelmatig driehoekig (in rood)
- 2DV model (in blauw)

De locatie in Figuur 4.8a ligt initieel in het zoutere gedeelte (van 10 ppt) en komt er op een gegeven moment het zoetere water langs. Voor Figuur 4.8b geldt het omgekeerde. In de twee figuren is te zien dat alleen de rode lijn iets afwijkt. Dit betreft het regelmatig driehoekige rooster. In het bovenaanzicht van Figuur 4.7 is ook te zien dat de twee roosters met driehoeken – zowel regelmatig als onregelmatig – een iets afwijkende modeloplossing hebben. We merken op dat voor de leesbaarheid van de Figuren 4.8a-b niet voor alle zeven roosters de resultaten zijn gevisualiseerd. De twee roosters met driehoeken geven behoorlijke identieke resultaten te zien, wat ook geldt voor de vijf roosters met vierhoeken.

Uit Figuren 4.8a-b blijkt ook dat alle zeven roosters nagenoeg dezelfde frontsnelheid hebben. Op vrijwel identieke momenten komt er een front met een andere concentratie (hetzij 5 ppt, hetzij 10 ppt) langs. Voor de lock exchange testcase is er een theoretische formule voor de frontsnelheid, die afhangt van het dichtheidsverschil. Voor de testcase in dit project is de frontsnelheid 0.3 m/s. Voor alle roosters blijkt de frontsnelheid in het numerieke model ongeveer 0.28 m/s te zijn, wat goed overeenkomt met de theoretische waarde.



Figuur 4.9a: Z-T plot voor locatie 36.5 m van 2DV model



Figuur 4.9b: Z-T plot voor locatie 36.5 m van onregelmatig driehoekig rooster

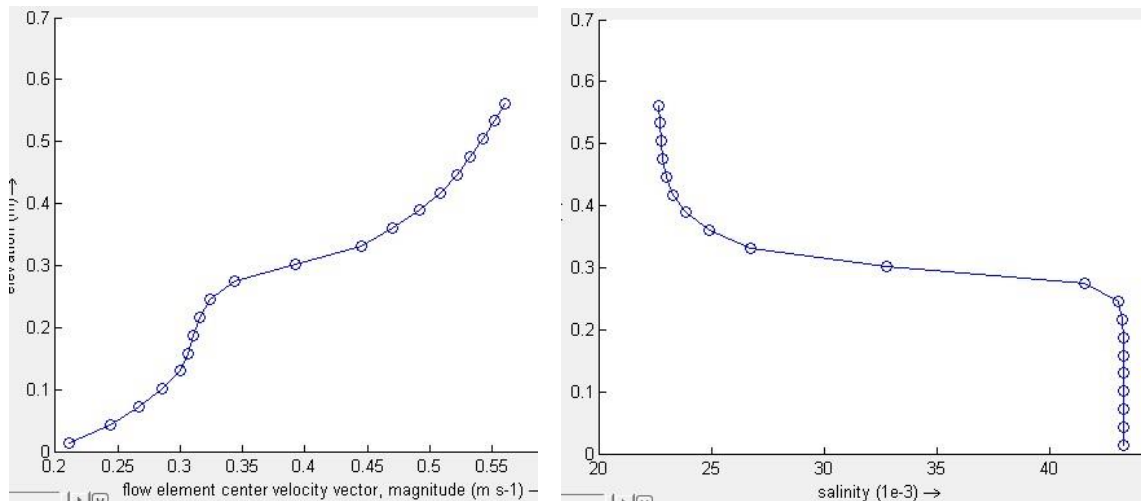
In Figuren 4.9a-b zijn de verticale zoutprofielen op 36.5 m van de linkerrand gevisualiseerd gedurende de gehele simulatie, met op de x-as de tijd. Hierin is te zien dat op deze locatie de hele waterkolom in het begin een zoutconcentratie van 10 ppt heeft. Op een gegeven moment (na 2 min) komt er aan de bovenkant zoeter water langs. Dit kaatst op een gegeven moment tegen de gesloten (linker)rand aan en weerkaatst. Na ongeveer 6 min beginnen op deze locatie ook de diepere delen te verzoeten door het teruggekaatste zoetere water.

Conclusies bij het Lock exchange model:

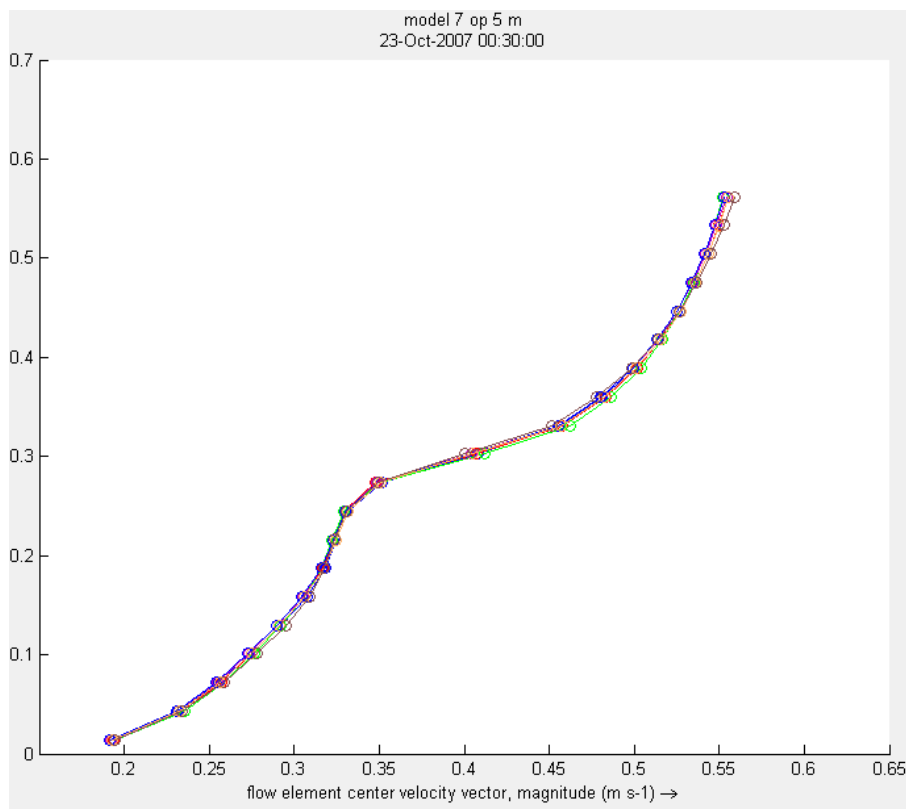
- De modelresultaten laten beperkte verschillen zien voor de verschillende roosters. Zo is het effect van het rooster wel zichtbaar: de twee driehoekige roosters geven vergelijkbare resultaten, idem dito voor de twee kromlijnige roosters en voor de twee rechthoekige roosters.
- De onderlinge verschillen zijn zo beperkt dat er geen voorkeur voor een bepaald rooster is.
- Het omzetten van het 2DV lock exchange model naar een 3Dmodel bleek niet triviaal. Modelaanpassingen m.b.t. de tijdstap en de horizontale viscositeit waren noodzakelijk.
- De keuze van DtMax blijkt cruciaal voor de barocliene drukterm in 3D simulaties. Hiervoor is geen vuistregel voor handen. Dit betekent dat de gebruiker momenteel een gevoeligheidsanalyse voor de tijdstap moet uitvoeren. Het verdient de aanbeveling dat in de rekenkernel een maximale tijdstap voor de barocliene drukterm wordt vastgesteld, zoals dat ook voor advection het geval is.

### 4.3 Splitterplaat

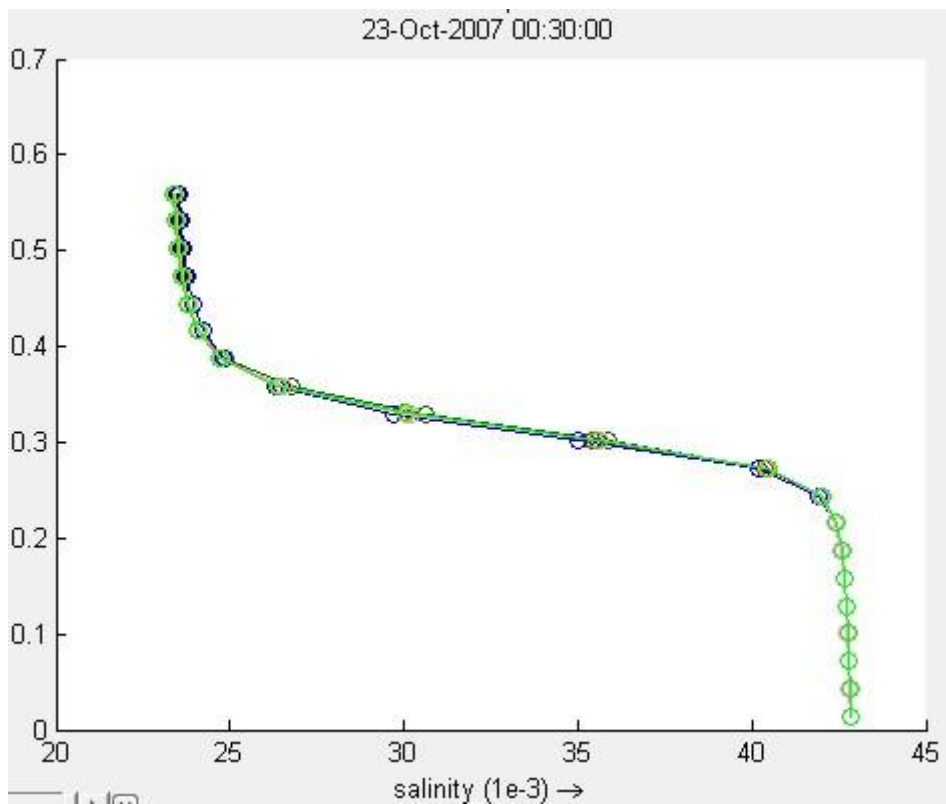
De splitterplaat is een validatiecase waarin de verticale menging en de verticale uitwisseling van impuls getoetst wordt in een stabiel gelaagd systeem. Voor de splitterplaat met D-Flow FM is door Nabi (2017c) een validatie uitgevoerd.



Figuur 4.10a: Snelheidsprofiel op instroomrand (links) en zoutrandvoorwaarde op instroomrand (rechts)



Figuur 4.10b: Horizontaal snelheidsprofiel op 5 m van de splitterplaat voor zeven roosters op  $T=30$  min.



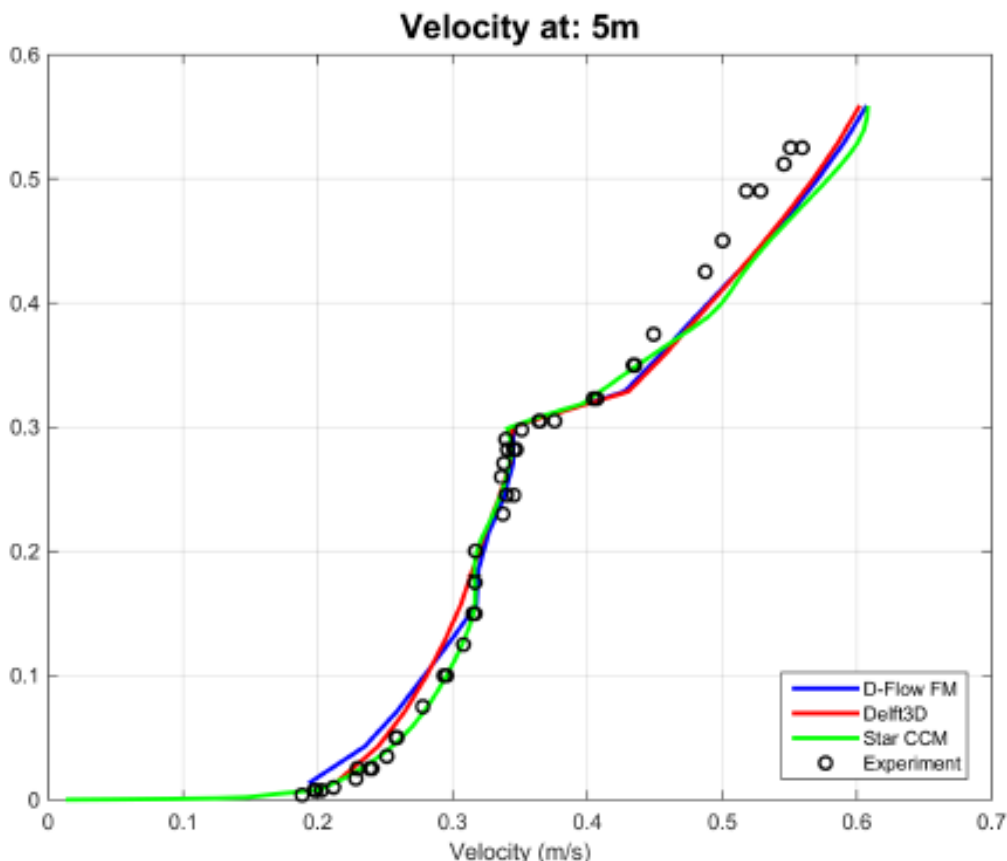
Figuur 4.10c: Horizontaal zoutprofiel op 39 m van de splitterplaat voor zeven roosters op  $T=30$  min.

In de splitterplaat gootproef is er in de verticaal een tweelagensysteem. In het bovenste deel van de waterkolom is er een niet-uniforme instroming van maximaal 0.56 m/s (zie linkerpaneel in Figuur 4.10a) en is er een zoutconcentratie van 22.6 ppt (zie rechterpaneel in Figuur 4.10a). In het onderste deel is er een lagere niet-uniforme instroming met een zoutconcentratie van 43.2 ppt. Door de snelheids- en dichtheidsverschillen ontstaan er wervels bij de overgang tussen deze twee lagen. Dit wordt de splitterplaat genoemd, omdat in deze laboratoriumproef de verschillen in instromende snelheden en zoutconcentratie bereikt zijn door er een glasplaat tussen te plaatsen. Aan het einde van de glasplaat begint het numerieke model. Bij deze splitterplaat gaat het om snelheidsprofielen op enige afstand van het einde van de splitterplaat. Op een afstand van 2 m, 5 m, 10 m en 40 m zijn metingen beschikbaar.

In Figuur 4.10b is het horizontale snelheidsprofiel op 5 m van de splitterplaat (cq. instroomrand) weergegeven voor verschillende roosters op  $T=30$  min. Dit betreft de roosters die in Figuur 4.1 zijn weergegeven. De modelresultaten zijn voor alle roosters zo goed als identiek. Dit geldt ook voor Figuur 4.10c dat op 39 m van de instroomrand de verticale zoutprofielen bevat. De verschillen zijn uiterst klein. De hoofdconclusie van dit schematische testmodel is dat de modelresultaten voor alle roosters vrijwel identiek zijn.

Voor de volledigheid is in Figuur 4.11 een figuur uit (Nabi, 2017) weergegeven, waarin ook de metingen zichtbaar zijn op 5 m van het begin van de splitterplaat. In dat onderzoek zijn verschillende softwaresystemen getest (D-Flow FM, Delft3D-FLOW, StarCCM), die vergelijkbare modelresultaten gaven die allemaal enigszins afwijken van de metingen.

We merken op dat de D-Flow FM resultaten in Figuur 4.11 wijken enigszins af van die in Figuren 4.10b-c, omdat de roosters verschillen. In het voorliggende project hebben we (schematische) roosters gebruikt die ook voor de getijgoot en de lock exchange gebruikt zijn. Toch is er, globaal gezien, een redelijke overeenkomst met de D-Flow FM resultaten van (Nabi, 2017).



Figuur 4.11: Horizontaal snelheidsprofiel op 5 m van de splitterplaat uit D-Flow FM validatierapport

#### Conclusies bij splitterplaat:

- Voor alle zeven roosters liggen de modelresultaten heel dicht bij elkaar.
- De modelresultaten liggen redelijk in de buurt van de metingen, zoals dat ook in de validatietest (Nabi, 2017c) het geval was; zie Figuur 4.10b. (NB. Dat is ook logisch omdat de implementatie in D-Flow FM sinds 2017 nauwelijks gewijzigd is.)

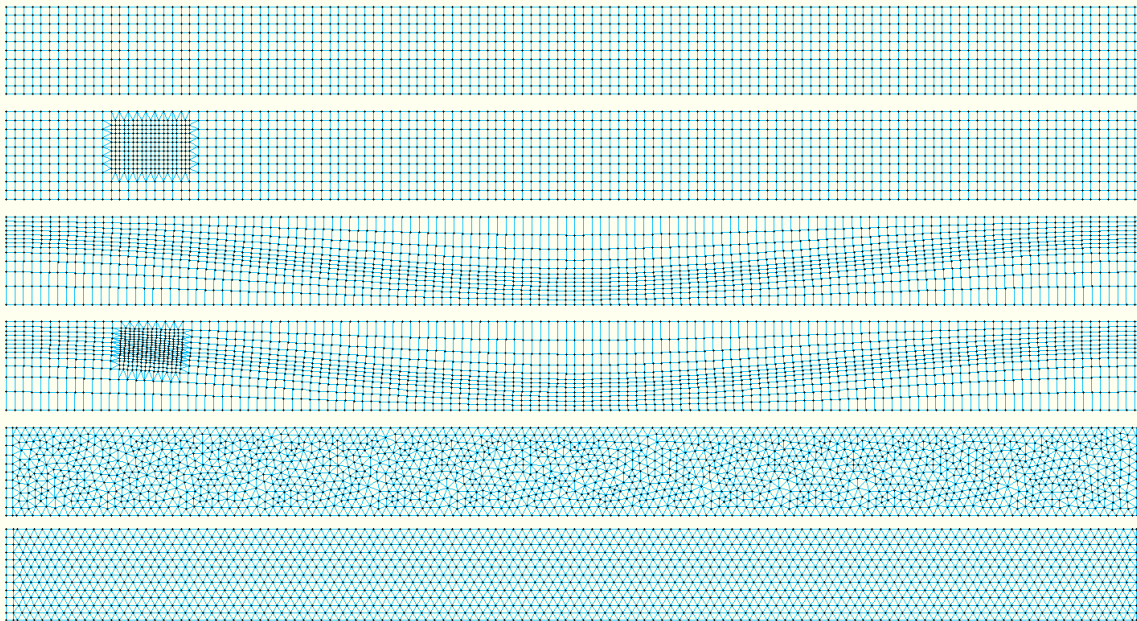
De modelresultaten voor de zoutindringing en de snelheden liggen zo dicht bij elkaar dat er op basis van deze testcase geen voorkeur voor een roostertype is aan te wijzen.

#### 4.4 Getijgoot opgeschaald naar werkelijke schaal en met niet-uniforme bodem

In Paragrafen 4.4 (getijgoot) en 4.5 (lock exchange) worden schematische testen beschreven voor een opgeschaald model. In vergelijking met de eerdere schematische testen is het model met een factor 100 vergroot. Het modelgebied is dus nu 13 km bij 1 km. Het 2DV model is weggelaten, waardoor nu zes verschillende roosters in één model zijn opgenomen; zie Figuur 4.12. De diepte is niet langer uniform, maar er slingert een geul van 20 m diep door het model; zie Figuur 4.13. Het overige deel heeft een diepte van 10 m. In de verticaal zijn tien sigma-lagen toegepast. De standaardaanpak voor bodemdieptes is toegepast

(BedLevType=3), wat betekent dat de dieptes in de hoekpunten van de roostercellen gedefinieerd zijn.

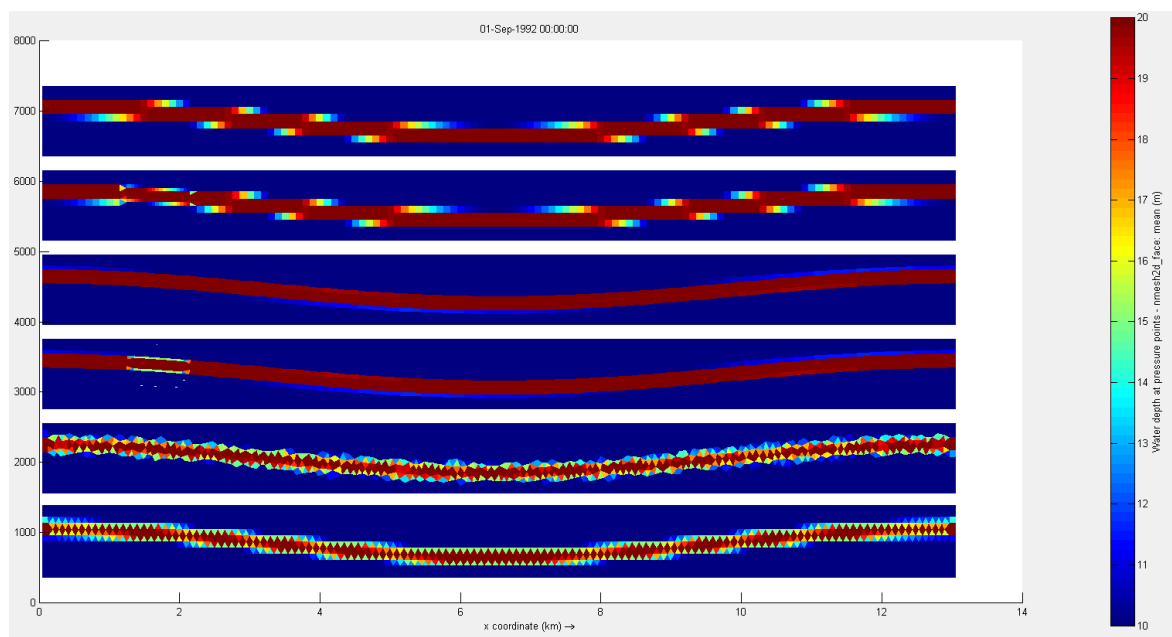
We merken op dat het opgeschaalde model relatief weinig roostercellen in de dwarsrichting heeft. Dit betekent ook dat de geul relatief grof geschematiseerd wordt (dit geldt vooral voor de regelmatige roosters). In praktijkmodellen zal dit niet altijd het geval zijn



Figuur 4.12: Rooster voor opgeschaald schematisch model

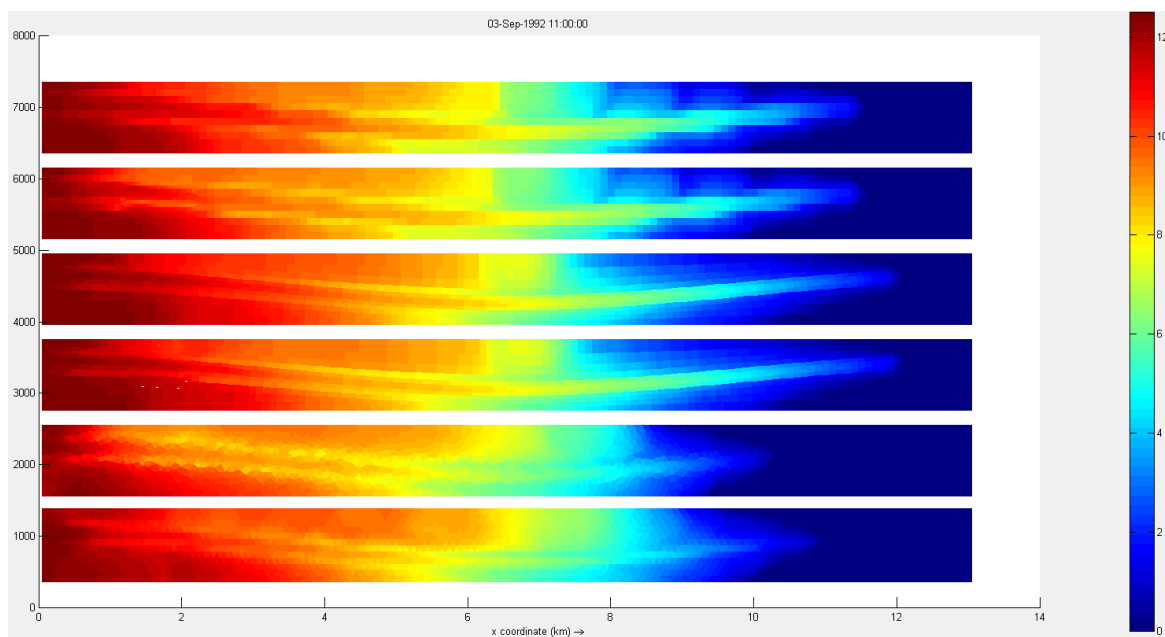
Er is een simulatie van een aantal dagen met een dubbeldaags getij uitgevoerd. Pas na twee dagen komt er zout water binnen (12.5 ppt). De eerste twee dagen is dus als randvoorwaarde 0 ppt toegepast. Dan is de waterbeweging ingespeeld en zijn er niet of nauwelijks nog verstoringen. De zourandvoorwaarden zijn uniform over de vertikaal.

Op een karakteristiek moment is de zoutindringing gevisualiseerd voor een aantal lagen; zie Figuren 4.14a t/m 4.14d. Dit is gevisualiseerd voor laag 1 (bodem), laag 3, laag 5 (in het midden) en laag 8 (in het bovenste deel van de waterkolom). Hiervoor is het tijdstip gekozen dat het zoutfront ongeveer voor 75% door het modelgebied is gegaan. Nadat het zoutfront de modelrand heeft bereikt, wordt een deel van het zout weerkaatst en vindt er enige vertroebeling van de modelresultaten plaats, waardoor een goede vergelijking moeilijker wordt.

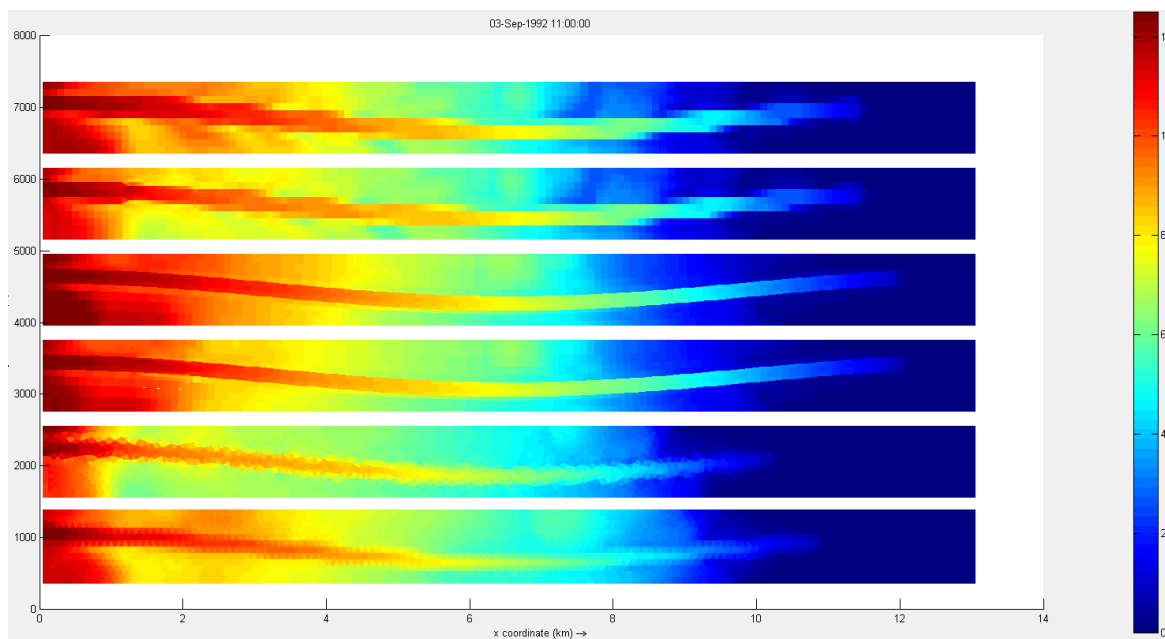


Figuur 4.13: Bovenaanzicht van diepte van opgeschaald schematische model (van 13 bij 1 km)

Naar verwachting is de zoutindringing in de geulen verder dan in de ondiepere delen van het model. Dit is voor alle rooster ook goed te zien. Hoe dieper in de waterkolom, hoe hoger de zoutconcentraties. Zo bevat laag 8 het minste zout; zie Figuur 4.14d. De twee kromlijnige roosters (middelste twee in Figuur 4.13) zijn uitgelijnd met de geul en laten de verste zoutindringing zien, wat ook plausibel is vanwege de meest nauwkeurige bodemrepresentatie. Het valt op dat de zoutindringing voor de twee roosters met rechthoeken behoorlijk overeenkomt met die van de uitgelijnde roosters, terwijl de zoutindringing voor de roosters met driehoeken, en in het bijzonder de onregelmatige driehoeken, behoorlijk achter blijft. Hierbij speelt mee dat de roosters behoorlijk grof zijn en daardoor het verschil in bodemhoogte minder goed beschrijven. Op fijnmazigere roosters zal het verschil naar verwachting kleiner zijn. Het effect op de bodemrepresentatie van de verschillende roosters kan niet los worden gezien van de gebruikte roostervorm, en de hier gebruikte regelmatige roosters bevatten een zeer grove representatie van de geul. Voor (onregelmatige) driehoekige roosters lijkt er daarnaast meer sprake te zijn van (onrealistische) ondieptes die de zoutverspreiding tegen lijken te gaan.

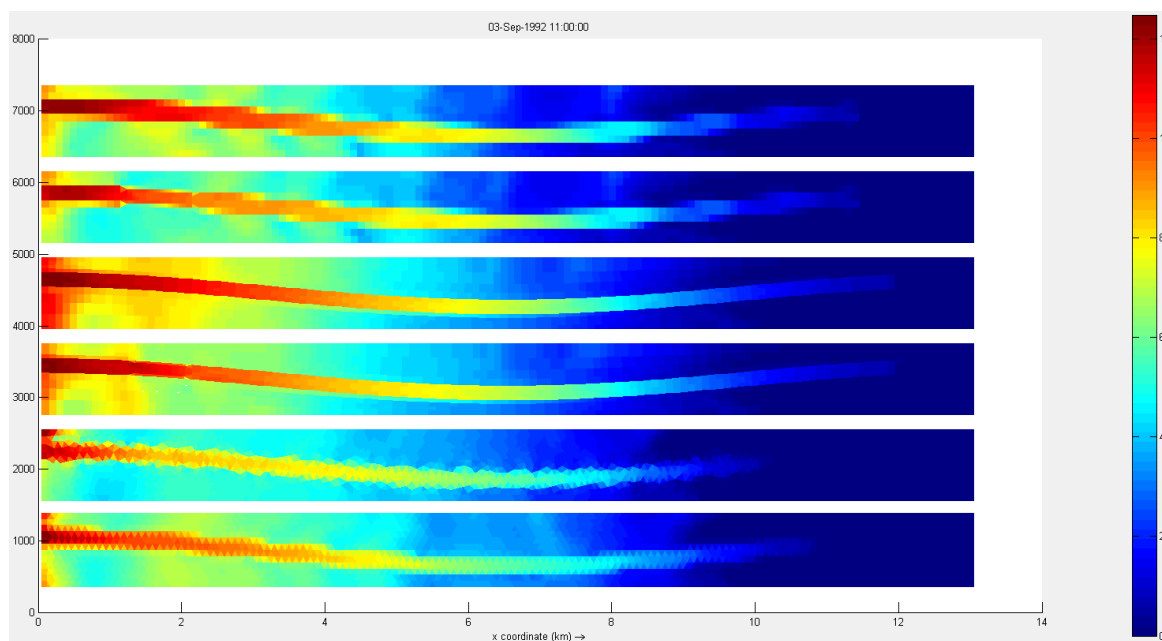


Figuur 4.14a: Zoutconcentraties voor opgeschaald schematisch getijgootmodel met geul voor laag1

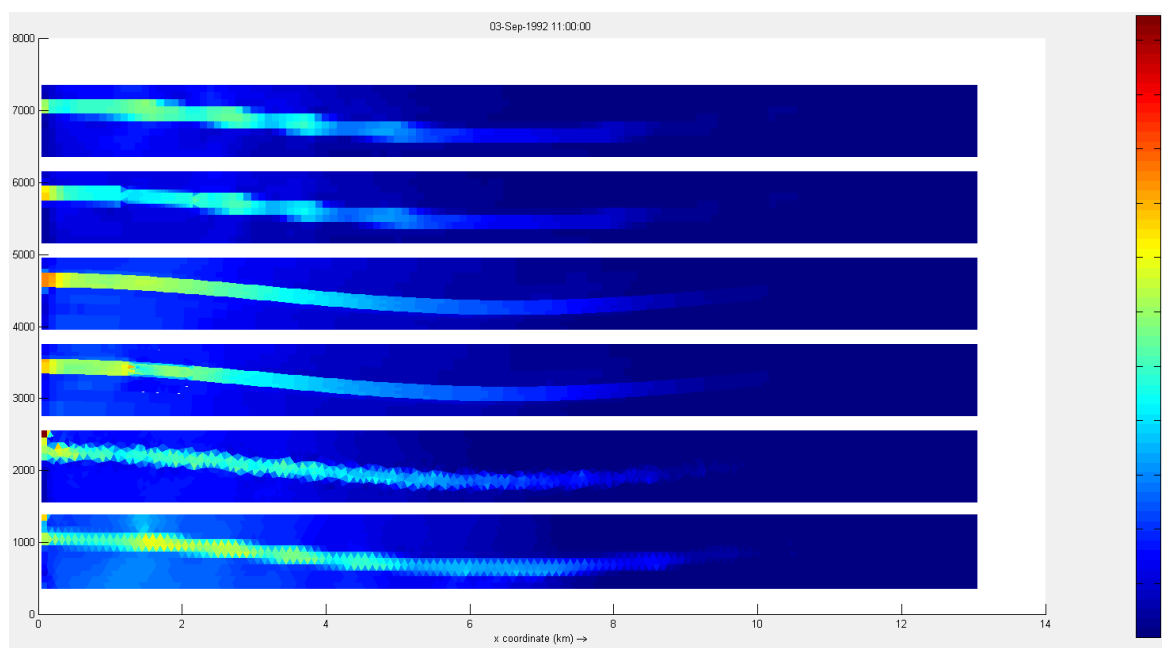


Figuur 4.14b: Zoutconcentraties voor opgeschaald schematisch getijgootmodel met geul voor laag 3





Figuur 4.14c: Zoutconcentraties voor opgeschaald schematisch getijgootmodel met geul voor laag 5



Figuur 4.14d: Zoutconcentraties voor opgeschaald schematisch getijgootmodel met geul voor laag 8

#### Conclusies bij opgeschaalde getijgoot met geul:

- Voor alle zeven roosters liggen de modelresultaten redelijk dicht bij elkaar.
- De roosters met lokale roosterverfijning laten nauwelijks afwijkende resultaten zien, wat suggereert dat roosterovergangen adequaat geïmplementeerd zijn.
- De twee roosters waarin de geul is uitgelijnd (derde en vierde rooster van boven) laten de verste zoutindringing zien. Voor alle niet uitgelijnde roosters is de zoutindringing iets minder ver, omdat de geul iets minder goed gemodelleerd kan worden door de relatief

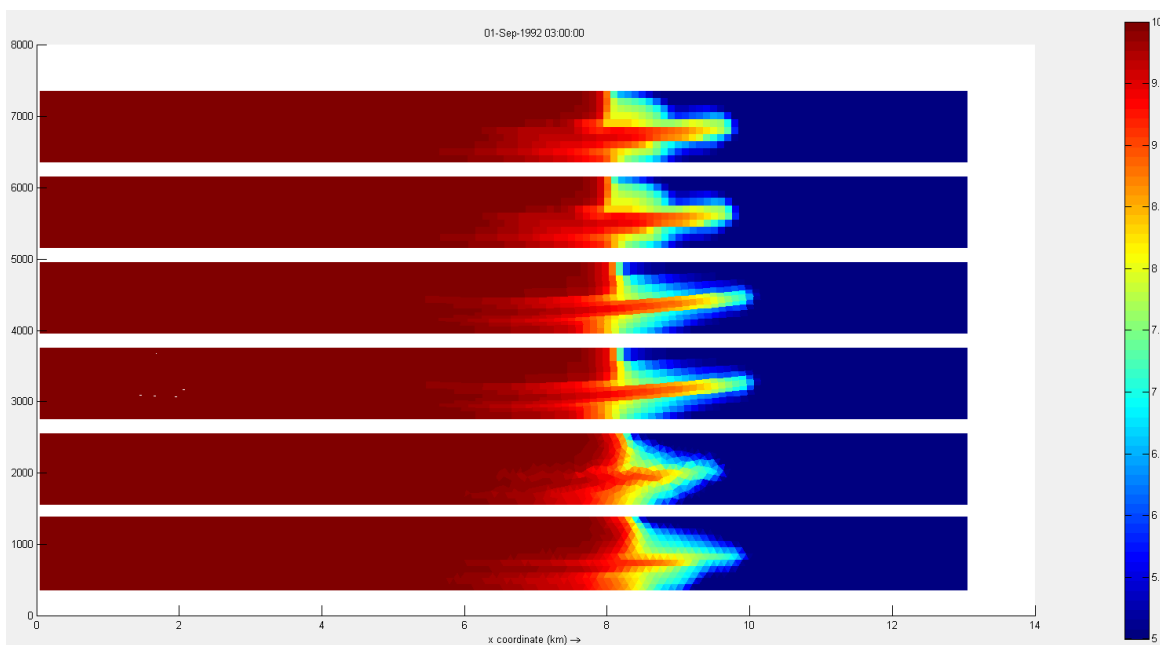
grove roosters. De mate waarin de roostervorm de zoutindringing beïnvloedt, is gerelateerd aan de wijze waarop het rooster de bodem representeert. Wij merken op dat bij praktijkmodellen hiervoor specifiek getest wordt.

- Omdat aan het begin van dit project heel weinig ervaring was opgedaan met transportprocessen (van met name zout) voor D-Flow FM-toepassingen, zijn schematische testen onderdeel van het voorliggende project. Bij de schematische testen zijn relatief grove roosters gebruikt, om eventuele verschillen makkelijker te kunnen analyseren. Echter, zelfs voor deze relatief grove roosters blijken de verschillen in modelresultaten beperkt te zijn.

#### 4.5 Lock exchange opgeschaald naar werkelijke schaal en met niet-uniforme bodem

In deze paragraaf worden de modelresultaten voor het opgeschaalde lock exchange model met een niet-uniforme bodem beschreven. De bodem is hetzelfde als bij het opgeschaalde getijgootmodel. Er slingert een geul van 20 m diep door een gebied van 10 m diep. Vervolgens is op een karakteristiek moment de zoutindringing gevisualiseerd voor een aantal lagen; zie Figuren 4.15a t/m 4.15d. Dit is gedaan voor laag 1 (bodem), laag 3, laag 5 (in het midden) en laag 8 (in het bovenste deel van de waterkolom). In de verticaal zijn tien sigma-lagen toegepast.

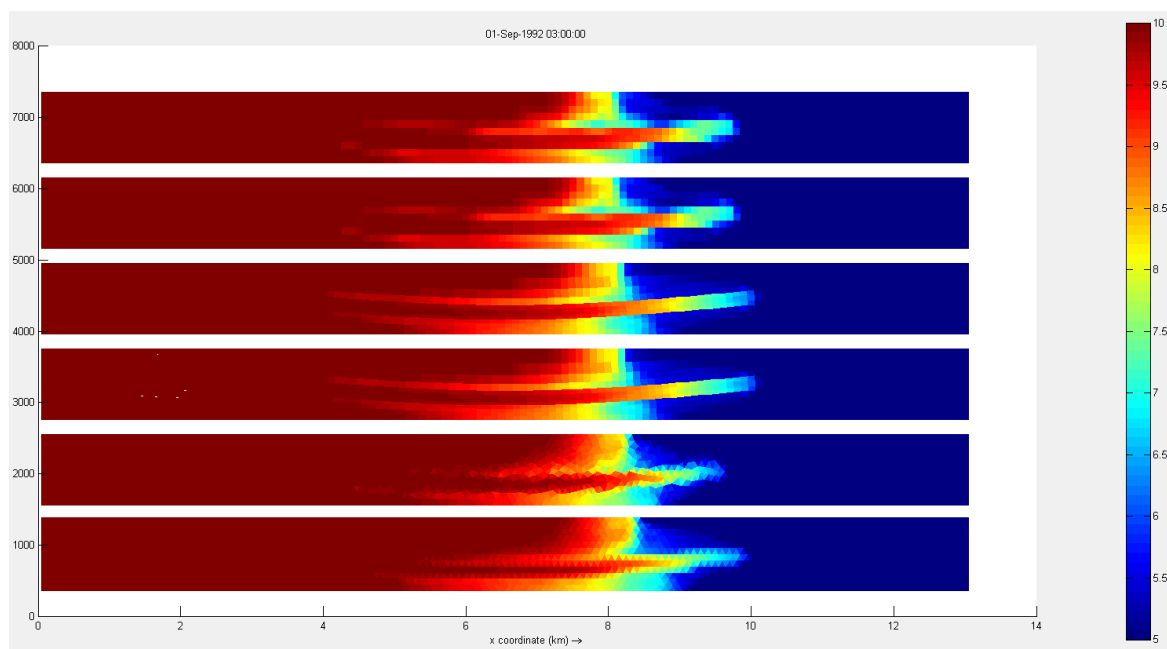
Deze opgeschaalde lock exchange heeft dezelfde opzet als lock exchange op laboratoriumschaal uit Paragraaf 4.2. De linkerhelft is initieel gevuld met water met een dichtheid van 10 ppt en de rechterhelft met water met 5 ppt. Door het dichtheidsverschil gaat er een front lopen. In eerste instantie gaat het front met zouter water bij de bodem naar rechts en gaat het zoetere water bij het wateroppervlak naar links.



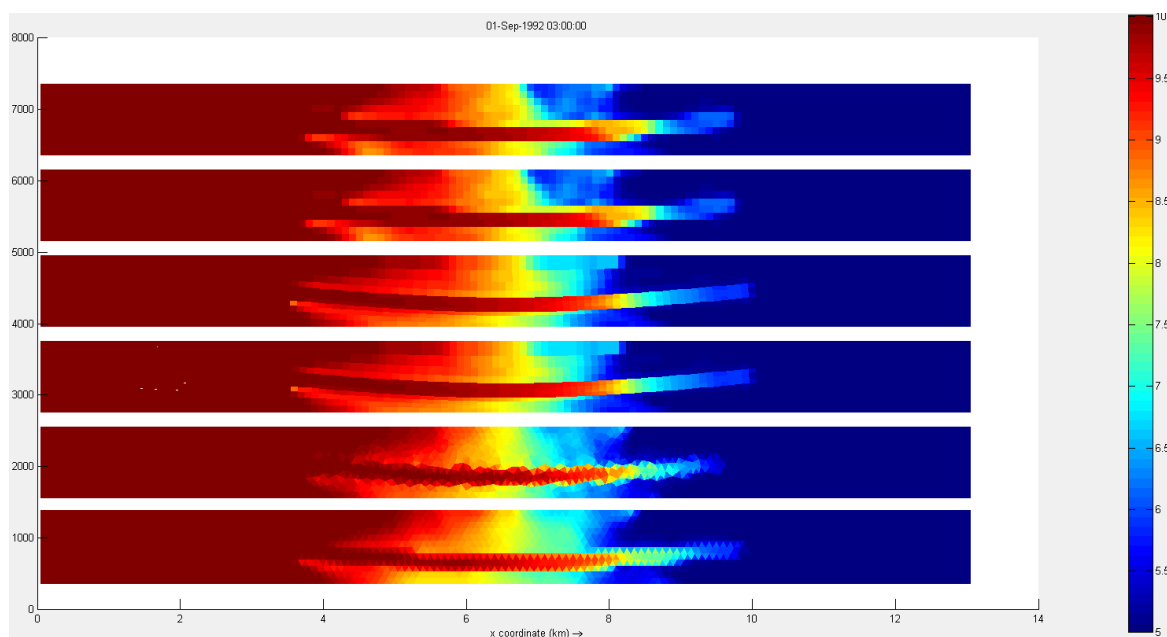
Figuur 4.15a: Zoutconcentraties voor opgeschaald schematisch lock exchange-model met geul voor laag 1 (nabij de bodem)

In dit lock exchange model loopt het zout in de onderste helft van de waterkolom naar rechts en zal het zoetere water aan de bovenkant naar links bewegen. De figuren geven de zoutverspreiding weer na een simulatie duur van 3 uur. Op dit moment loopt de zouttong

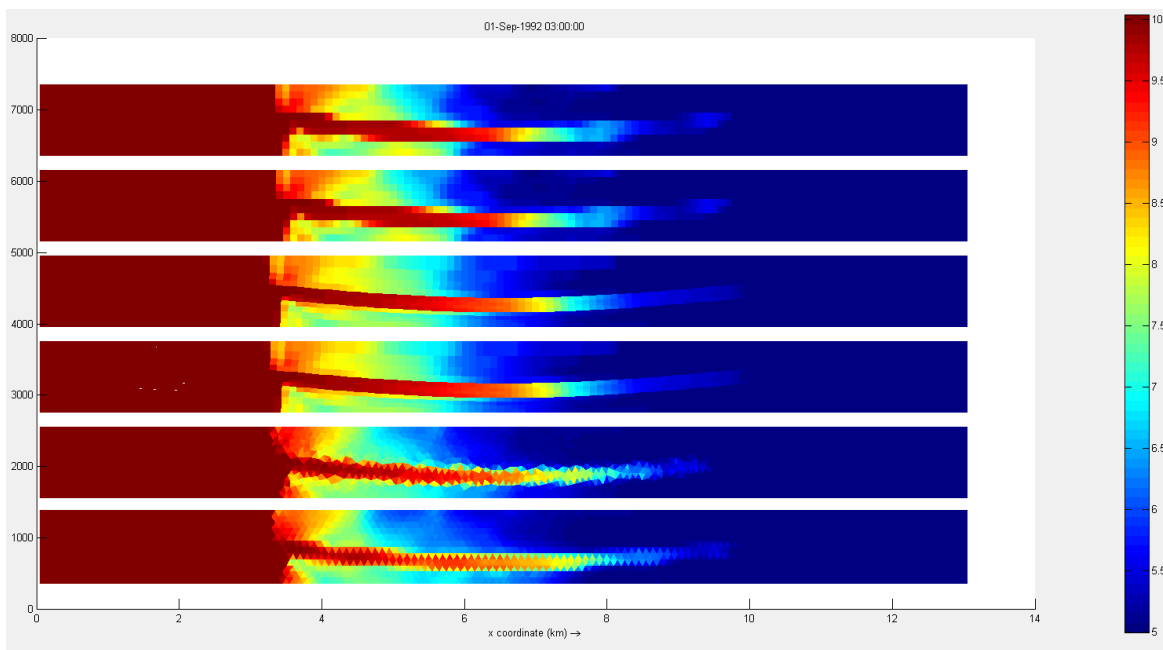
langs de bodem nog naar rechts, terwijl het zoete water aan het oppervlak naar links loopt. Dit figuur beschrijft daarmee een eerder stadium dan weergegeven in Figuur 4.7. Bovendien zal het zouttransport in de geul sneller bewegen, zoals ook in de opgeschaalde getijgoot uit Paragraaf 4.4 het geval was. In de figuren 4.15a t/m 4.15d is dit ook te zien.



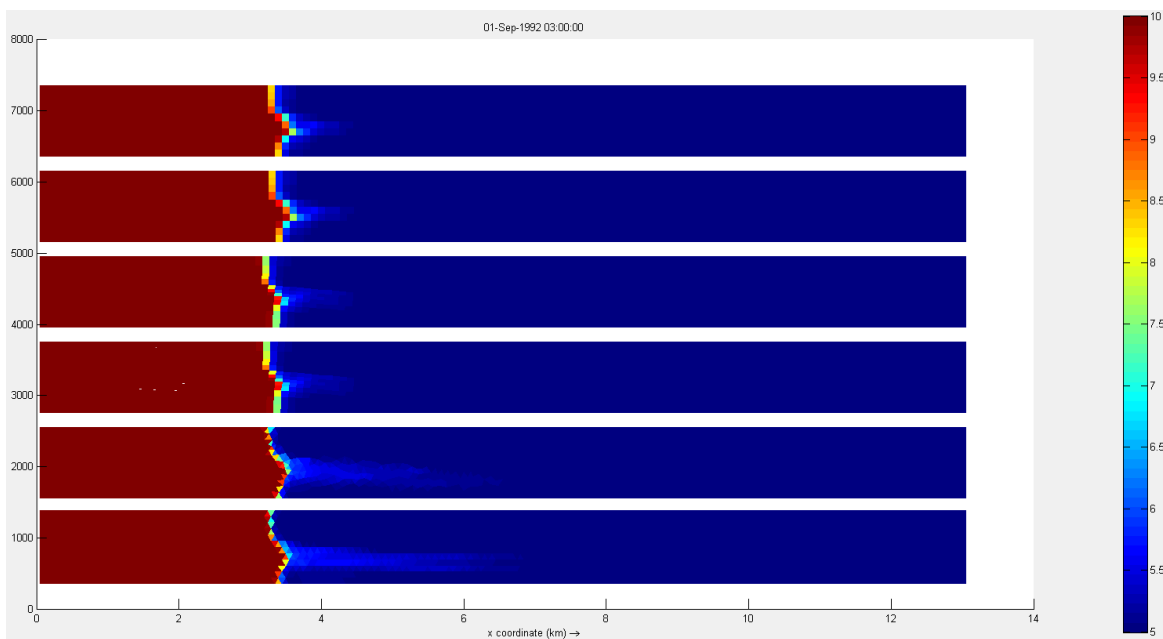
Figuur 4.15b: Zoutconcentraties voor opgeschaald schematisch lock exchange-model met geul voor laag 3



Figuur 4.15c: Zoutconcentraties voor opgeschaald schematisch lock exchange-model met geul voor laag 5



Figuur 4.15d: Zoutconcentraties voor opgeschaald schematisch lock exchange-model met geul voor laag 7



Figuur 4.16e: Zoutconcentraties voor opgeschaald schematisch lock exchange-model met geul voor laag 10 (wateroppervlak)

**Conclusies bij opgeschaalde lock exchange model met geul:**

- Voor alle zes roosters liggen de modelresultaten dicht bij elkaar.
- De twee roosters waarin de geul netjes uitgelijnd is (derde en vierde rooster van boven) geven de beste resultaten en is de verste zoutindringing te zien. Voor alle regelmatige roosters zijn de modelresultaten iets minder goed, omdat de geul minder goed gemodelleerd kan worden door de relatief grove roosters. Wij merken op dat bij praktijkmodellen hiervoor specifiek getest moeten worden. Dit kan ertoe leiden dat een rooster lokaal verfijnd dient te worden
- Alleen een volledig ongestructureerd rooster laat iets afwijkende resultaten in de onderste helft van de waterkolom zien, omdat het zoutfront iets achter blijft. Dit wordt waarschijnlijk deels veroorzaakt door een grove beschrijving van de bodem voor de niet-kromlijnige roosters, welke vooral voor het onregelmatige driehoekige rooster leidt tot afwijkingen in de bodemrepresentatie.

**4.6 Conclusies voor de schematische testen**

Er zijn vijf schematische testen uitgevoerd, waarvan drie op laboratoriumschaal met een vlakke bodem en twee op werkelijke schaal met daarbij een geul in de bodem. Voor deze vijf schematische testen kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

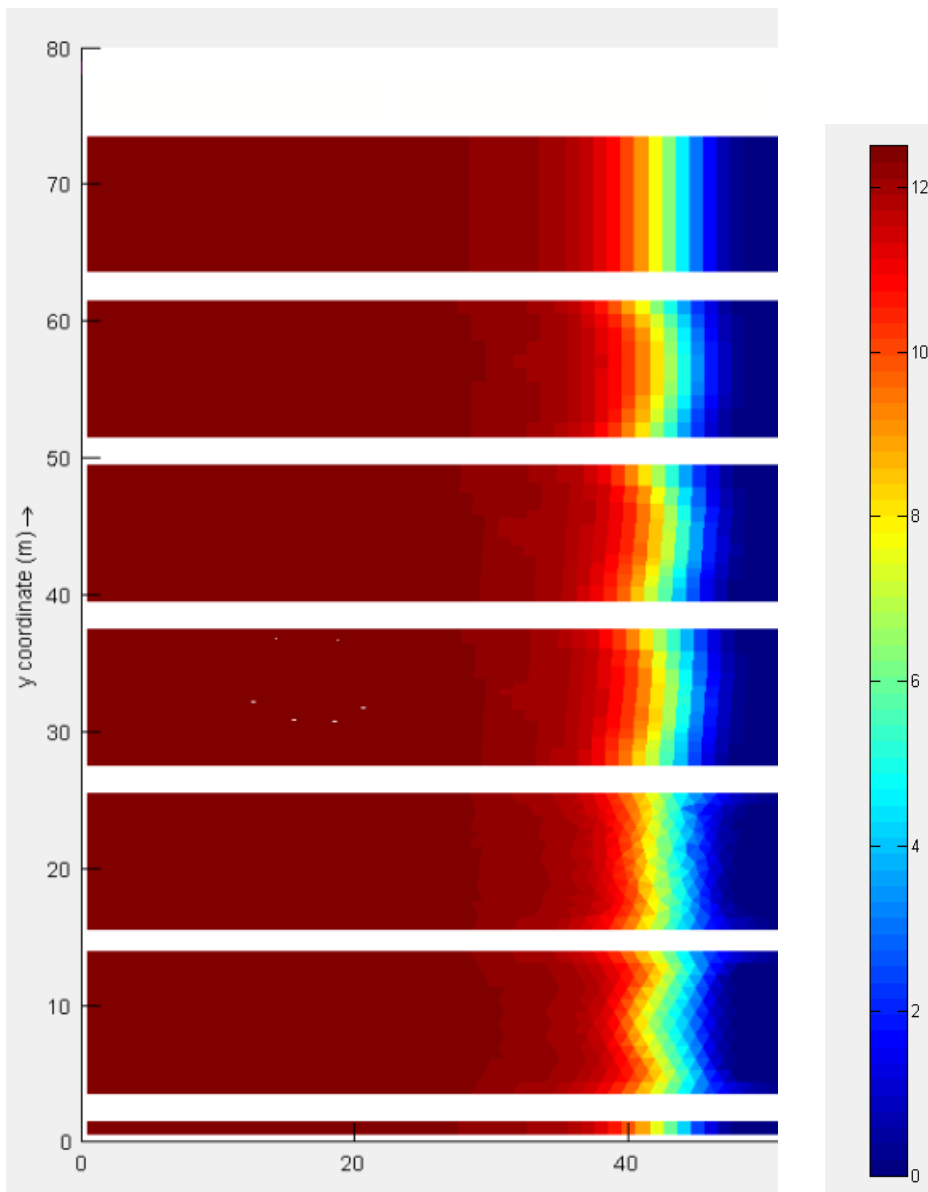
- Voor alle zeven toegepaste roosters liggen de modelresultaten relatief dicht bij elkaar. Dit geldt ook voor de twee roosters met een lokale roosterverfijning.
- Hierdoor is op basis van de schematische testen geen duidelijke voorkeur uit te spreken voor een bepaald type rooster. Aan de andere kant laten de modelresultaten ook zien dat er geen grote verschillen optreden voor de verschillende roosters, wat bemoedigend is.
- Alleen een volledig ongestructureerd rooster laat soms iets minder goede resultaten zien. Hierbij speelt mee dat de roosters relatief grof zijn. Bij een fijnmaziger rooster zijn de verschillen mogelijk kleiner. Daarom kan deze conclusie niet gegeneraliseerd worden naar bijvoorbeeld praktijkmodellen, die meestal wel een hoge resolutie in geulen hebben.
- Daarbij moet worden aangemerkt dat voor proeven met variabele bodemhoogte, het effect van de roostervorm niet los kan worden gezien van het effect van verschillende roosters op de bodemhoogte representatie. Omdat in deze proeven gebruik is gemaakt van relatief grove roosters, is dit effect waarschijnlijk substantieel.
- Voorzichtigheid met het trekken van conclusies is sowieso belangrijk, omdat de D-Flow FM software nog een aantal numerieke artefacten bevat voor 3D modellering .

**4.7 Aanbevelingen bij de schematische testen**

- De combinatie van driehoekige roosters en open randen gaf soms een probleem. Het is bekend dat dit ook bij andere modellen (namelijk voor de zesde-generatie) is opgetreden. Er zijn als work-around rechthoekige cellen toegepast in de eerste rij/kolom naast een open rand om de randvoorwaarde uniform in te laten stromen. Er wordt aanbevolen uit te zoeken waarom dit optreedt en vervolgens de implementatie te verbeteren.
- De modelresultaten zijn niet uniform in y-richting. Op het rechthoekige rooster zou je dat wel verwachten, zoals dat voor Delft3D-FLOW en TRIWAQ het geval is. NB. In 2D is dat wel het geval. Dit betekent dat de implementatie van het zouttransport in D-Flow FM op dit onderdeel geanalyseerd en verbeterd dient te worden.
- De documentatie van het stoftransport in D-Flow FM ontbreekt en dient toegevoegd te worden.

We merken op dat de tweede aanbeveling – op rechthoekig rooster uniforme oplossing in y-richting – inmiddels gerealiseerd is. Deze verbeterde implementatie was tijdens het project nog niet beschikbaar en is daarom niet gebruikt bij de simulaties die gerapporteerd zijn.

In Figuur 4.16f zijn de resultaten voor de getijgoot op laboratoriumschaal weergegeven voor de verbeterde implementatie. Dit figuur dient vergeleken te worden met Figuur 4.3. Dan gaat het om het bovenste model, waarbij met de verbeterde implementatie wel uniforme zoutindringing in y-richting is te zien.



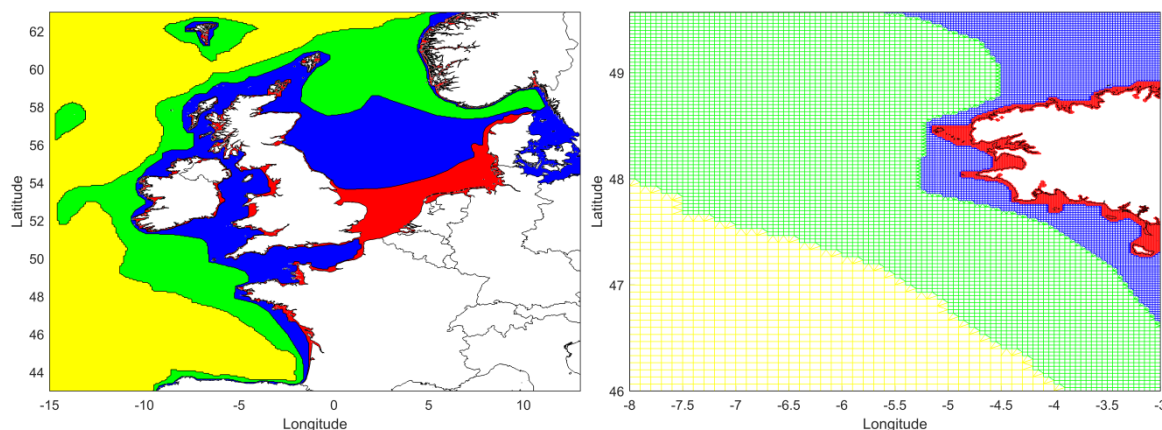
Figuur 4.16f: Maximale zoutindringing; zoutconcentratie in laag 5 op  $T=93$  min.

## 5 Noordzee

### 5.1 Modelopzet

#### 5.1.1 Netwerk

Het rekenrooster van het 3D DCSM-FM model beslaat het noordwestelijke deel van de Europese continentale plaat. Het netwerk wordt getoond in Figuur 5.1 en bestaat uit ca. 630.000 cellen met verschillende resoluties. De grootste rekencellen (aangegeven in geel) hebben een afmeting van  $1/10^\circ$  in longitude-richting en  $1/15^\circ$  in latitude-richting, dit komt overeen met ongeveer 4 bij 4 nautische mijl (nm) of 4,9-8,1 bij 7,4 km, afhankelijk van de latitude. De kleinste cellen (weergegeven in rood) hebben een resolutie van  $2/3'$  in longitude-richting en  $1/2'$  in latitude-richting. Dit correspondeert met ongeveer 0,5 bij 0,5 nm of 840 bij 930 m nabij de Nederlandse kust.



Figuur 5.1 Overzicht (links) en detail (rechts) van het DCSM-FM rekenrooster waarbij de kleuren de resolutie aangeven (geel: ~4 nm; groen: ~2 nm; blauw: ~1 nm; rood: ~0.5 nm).

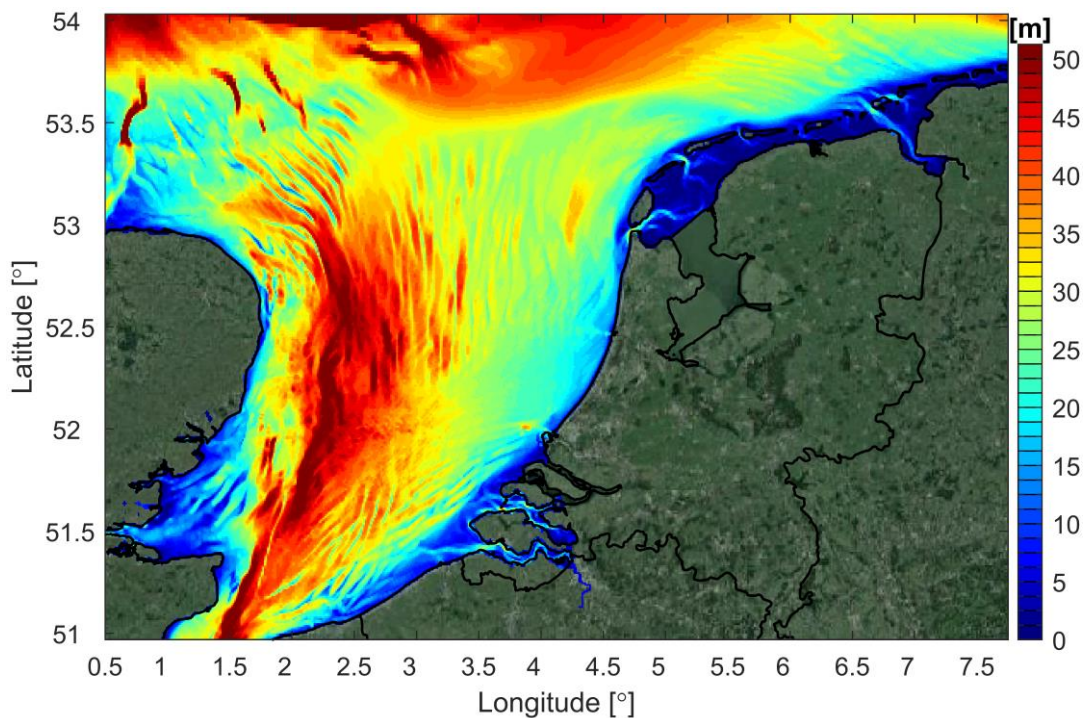
#### Laagverdeling

In het DCSM-FM model worden sigma-lagen gebruikt voor het beschrijven van de verticale laagverdeling. Dit betekent dat de waterkolom opgedeeld is in een vast aantal lagen, onafhankelijk van de lokale waterdiepte. Er wordt een totaal van 20 lagen gebruikt met een uniforme dikte per laag van 5% van de lokale waterdiepte.

#### 5.1.2 Bathymetrie

De modelbodem van het DCSM-FM model is gebaseerd op een vergride bathymetrie dataset van het European Marine Observation and Data Network (EMODnet), een consortium van verschillende organisaties die Europese marine data uit verschillende bronnen verzamelt en vervolgens beschikbaar stelt. Voor grote delen van de Nederlandse wateren zijn er ook bodemgegevens beschikbaar uit Baseline, waar beschikbaar is deze dataset gebruikt.

In Figuur 5.2 is een detail (zuidelijke Noordzee) van de DCSM-FM modelbathymetrie weergegeven. In de zuidelijke Noordzee zijn de dieptes over het algemeen kleiner dan 50 m.



Figuur 5.2 DCSM-FM modelbathymetrie in de zuidelijke Noordzee (diepte in m t.o.v. MSL).

### 5.1.3 Randvoorwaarden op de open randen en rivieren

Op de noordelijke, westelijke en zuidelijke rand van het modeldomein worden waterstandsranden opgelegd. De astronomische waterstanden op deze open randen zijn afgeleid via een harmonische analyse waarbij gebruik is gemaakt van de amplitudes en fases van 33 harmonische componenten. De componenten zijn (op SA na) verkregen via het globale getijmodel FES2012. De stormopzet op de open randen is gemodelleerd door middel van het toevoegen van een inverse barometer correctie (IBC) aan de astronomische waterstanden. Deze correctie is een tijd- en ruimte-afhankelijke functie van de lokale luchtdruk. Temperatuur en saliniteit op de open randen worden beschreven als klimatologische gemiddelde maandelijks waarden, welke afgeleid zijn van World Ocean Atlas 2013 (WOA2013).

Het debiet door het Haringvliet en de Nieuwe Waterweg wordt als puntlozing in de bovenste modellaag opgelegd. De debietgegevens (dagwaarden) zijn afkomstig uit Waterbase. Voor het zoutgehalte wordt een constante waarde van 0.001 psu gebruikt.

### 5.1.4 Meteorologische forcering

Voor de meteorologische oppervlakte forcering van het model worden tijd en ruimtelijk variërende neutrale windsnelheden (op 10 m hoogte), luchtdruk (op MSL) en Charnock coëfficiënt (een maat voor de ruwheid van het zeeoppervlak) gebruikt die afkomstig zijn van ECMWFs ERA5 global atmospheric reanalysis dataset, welke een resolutie heeft van ongeveer 30 km en een tijdsinterval van een uur. Er wordt rekening gehouden met de invloed van de snelheid van het zeewater op de windforcering op het wateroppervlak, via het keyword 'relative wind'.

Een zogeheten 'Composite' surface heat flux model wordt toegepast om de tijd- en ruimtelijk-afhankelijke uitwisseling van warmte tussen lucht en water te berekenen. Hiervoor zijn tijd-



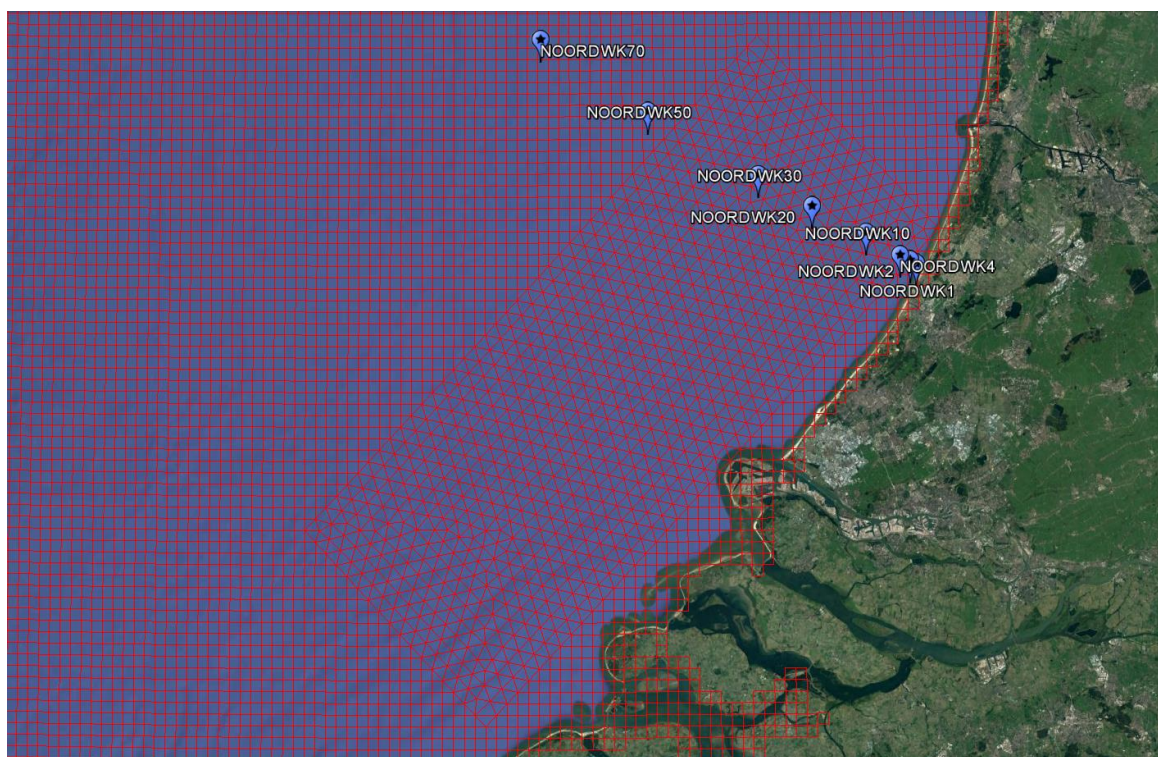
variërende gegevens (van ECMWF ERA5) van luchttemperatuur (op 2 m hoogte), bewolking, dauwpunt (op 2 m hoogte) en windsnelheid en –richting nodig.

### 5.1.5 Modelinstellingen

3D DCSM-FM gebruikt voor de numerieke parameter ‘Vertadvtypmom’ een afwijkende instelling (6 i.p.v. 3) Omdat deze simulaties een lange doorlooptijd hebben en de modelresultaten naar verwachting niet of nauwelijks anders zijn voor deze instelling, zijn deze 3D Noordzeesimulaties niet overgedaan. Ook voor de bovengenoemde instelling voor achtergrondsdiffusiviteit (‘dicoww’) wordt in 3D DCSM-FM een afwijkende waarde gehanteerd ( $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s i.p.v.  $10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s). De gehanteerde waarde is afgeregeld op de mate van temperatuurstratificatie in de centrale Noordzee.

## 5.2 Toegepaste roosters

Voor het uitvoeren van simulaties met verschillende roostertypen (driehoeken en rechthoeken), is een gedeelte van het bestaande rechthoekige netwerk opgevuld met driehoekige rekencellen (zie Figuur 5.3). Het volledig rechthoekige rooster, dat zo goed als vierkante cellen heeft nabij de Nederlandse kust, is hier niet getoond. In onderstaand figuur is te zien dat de modelrand van het modelrooster met driehoekige cellen ter plaatse van de monding van de Nieuwe Waterweg (de zogenoemde ROFI, *region of freshwater influence*) langs de Nederlands kust nog steeds rechthoekig is. Hiervoor is gekozen om zo een gelijke beschrijving van de landgrens te hebben in beide simulaties en dit niet later als mogelijke oorzaak van verschillen in modelresultaten kan worden gezien.



Figuur 5.3 DCSM-FM netwerk waarbij een deel van het rechthoekige rooster (ter plaatse van de ROFI) is vervangen door driehoekige rekencellen. De Noordwijk raai is aangegeven als individuele punten.

In Tabel 5.1 wordt een overzicht van het aantal netwerk nodes (bodempunten), faces (waterstandspunten/rekenpunten) en netwerk links (verbindingen tussen waterstandspunten), maximale tijdstap, gemiddelde tijdstap en rekentijden weergegeven voor beide rekenroosters.

Aangezien de oppervlakte van de driehoekige cellen kleiner is dan de oppervlakte van rechthoekige cellen, neemt het aantal 'faces'/waterstandspunten/celmiddens toe. Doordat driehoekige cellen meer gedeelde bodempunten hebben (meestal 6, soms 5 of 7) dan rechthoekige cellen (4), is het aantal nodes/bodempunten groter dan bij het rechthoekige rooster.

De flow link lengte (afstand tussen de celmiddens) is voor het driehoekige rooster kleiner dan voor het rechthoekige rooster. In combinatie met hoge stroomsnelheden ter plaatse van de driehoeken zou dit kunnen leiden tot tijdstapbeperkingen en uiteindelijk langere rekentijden. Dit is in deze simulatie echter niet het geval, wat terug te zien is in de gelijk gebleven gemiddelde tijdstap.

Tabel 5.1 Overzicht van aantal netwerk nodes, faces, links, maximale tijdstap, gemiddelde tijdstap en rekentijden. De berekeningen zijn uitgevoerd op het Deltares h6 cluster op 5 nodes met elk 4 cores.

Model	cell size (nm)	# nodes	# faces	# links	Maximale tijdstap (s)	Gemiddelde tijdstap (s)	Rekentijd (min/dag)	Rekentijd (uur/jaar)
vierkantjes	4nm-0.5nm	629187	619510	1249078	120	113.3	12.7	77.6
driehoekjes	4nm-0.5nm	626770	620656	1247807	120	113.3	12.5	75.7

## 5.3 Modelresultaten

### 5.3.1 Waterstanden

In Tabel 5.2 is de modelkwaliteit van het getij, opzet, totale waterstand en scheve opzet weergegeven voor beide modelsimulaties. Deze analyse is op 13 locaties langs de Nederlandse kust uitgevoerd voor de jaren 2006 en 2007.

Tabel 5.2 Modelkwaliteit van getij, opzet, totale waterstand en scheve opzet (bepaald over de jaren 2006 tot 2008), op 13 locaties langs de Nederlandse kust.

Station	M2 ampl. fout (cm)		M2 fase fout (°)		RMSE getij (cm)		RMSE opzet (cm)		RMSE waterst. (cm)	
	vierk.	drieh.	vierk.	drieh.	vierk.	drieh.	vierk.	drieh.	vierk.	drieh.
Cadzand	-5.5	-5.5	0.6	0.6	7.6	7.7	4.8	4.9	9.0	9.1
Westkapelle	-6.9	-6.9	-0.5	-0.5	8.1	8.1	4.6	4.7	9.3	9.3
Roompot Buiten	-2.0	-1.9	-1.3	-1.2	6.1	6.1	4.7	4.8	7.7	7.7
Brouwershavense G 8	-1.3	-1.2	1.8	1.9	5.9	6.0	5.5	5.5	8.0	8.1
Haringvliet 10	1.6	1.8	1.6	1.7	5.2	5.3	5.1	5.1	7.3	7.4
Hoek van Holland	3.6	3.6	3.0	3.1	6.6	6.7	5.0	5.0	8.2	8.3
Scheveningen	1.9	1.8	3.0	3.0	5.9	6.0	5.1	5.2	7.8	7.9
Ijmuiden Buitenhaven	1.4	1.5	3.6	3.7	6.1	6.2	5.2	5.2	8.0	8.0
Petten Zuid	2.8	2.8	1.0	1.0	5.3	5.4	5.1	5.1	7.4	7.5
Platform K13a	1.7	1.8	-1.2	-1.2	4.2	4.3	4.1	4.1	5.9	6.0
Terschelling Noordzee	-0.8	-0.8	1.7	1.7	4.6	4.7	4.7	4.7	6.6	6.6

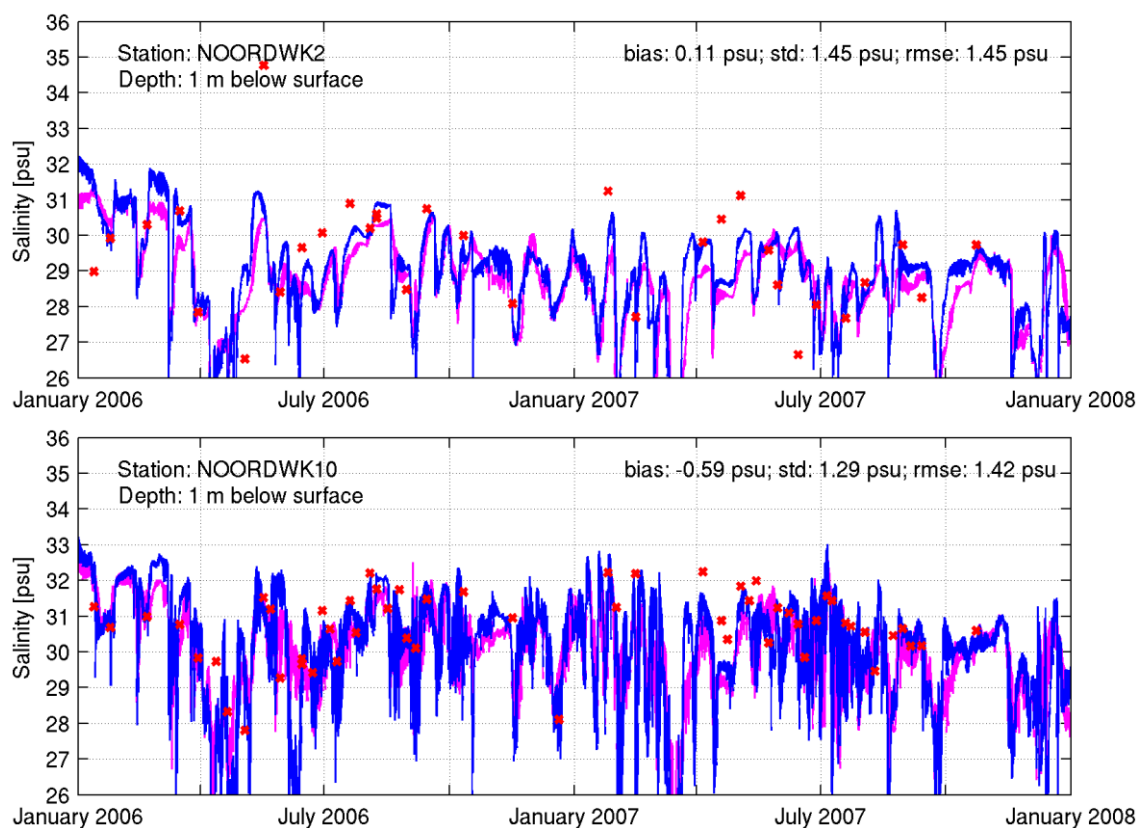
Wierumergronden	-0.7	-0.7	0.9	1.0	4.6	4.7	4.6	4.6	6.5	6.6
Huibertgat	-0.9	-0.9	0.6	0.6	4.7	4.7	4.5	4.5	6.5	6.5
gemiddelde	-0.4	-0.4	1.1	1.2	5.8	5.8	4.8	4.9	7.6	7.6
RMS	3.0	3.0	1.9	1.9	5.9	5.9	4.9	4.9	7.6	7.7

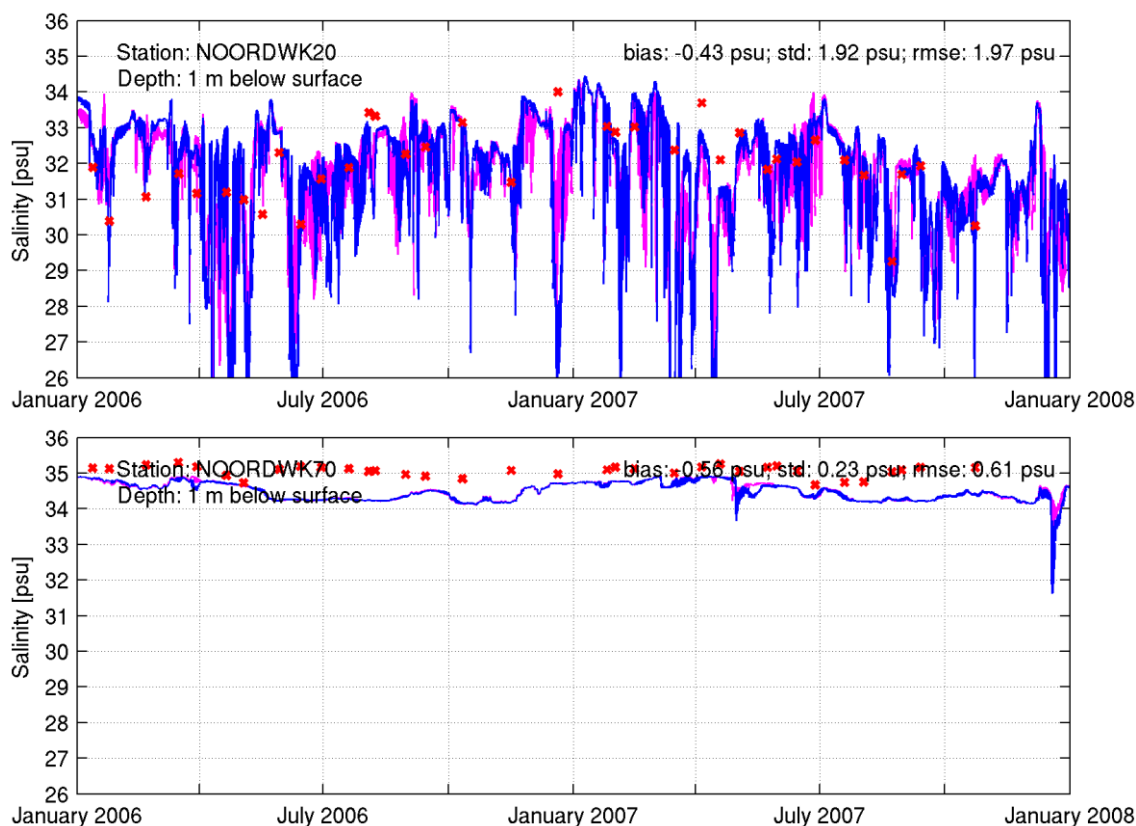
Op basis van deze statistische kentallen kan gesteld worden dat het effect van de gebruikte rekenroosters op de berekende waterstanden zeer klein is. Opvallend is wel dat waar er verschillen zichtbaar zijn, het vierkante rooster meestal iets betere resultaten laat zien.

*Een vergelijking tussen de gemeten en gemodelleerde temperatuur midden in de Noordzee vormt geen onderdeel van dit onderzoek, maar is wel (kort) uitgevoerd. Dit staat beschreven in Bijlage B.*


### 5.3.2 Zoutgehalte Noordwijkraai

In deze paragraaf wordt het berekende zoutgehalte nabij het wateroppervlak (op 1 m diepte) vergeleken met de gemeten waarden op de vier locaties in de Noordwijk raai. De resultaten worden als tijdreeksen getoond in Figuur 5.4. Een kwantitatieve vergelijking van de twee modelberekeningen tegen metingen wordt gepresenteerd in Tabel 5.3.





Figuur 5.4 Zoutgehalte nabij het wateroppervlak (1m diepte) langs de Noordwijk raai (2-70 km offshore) (rode kruisjes: metingen; blauw: driehoeken; magenta: vierkanten).

Tabel 5.3 Overzicht van de kwaliteit waarmee de oppervlakesaliniteit langs de Noordwijkraai gerepresenteerd wordt, in termen van bias, standaard deviatie en RMSE. In de rechter kolom (max-min) wordt het verschil tussen het maximale en minimale berekende zoutgehalte getoond.

Station	bias (psu)		std (psu)		RMSE (psu)		max-min (psu)	
	vierkant	driehoek	vierkant	driehoek	vierkant	driehoek	vierkant	driehoek
Noordwijk 2 km	-0.01	0.11	1.50	1.45	1.50	1.45	9.7	11.0
Noordwijk 10 km	-0.59	-0.59	1.05	1.29	1.21	1.42	11.6	13.2
Noordwijk 20 km	-0.39	-0.43	1.70	1.92	1.74	1.97	13.7	14.3
Noordwijk 70 km	-0.56	-0.56	0.24	0.23	0.61	0.61	2.2	3.3
gemiddelde	-0.39	-0.37	1.12	1.22	1.27	1.36	9.3	10.5

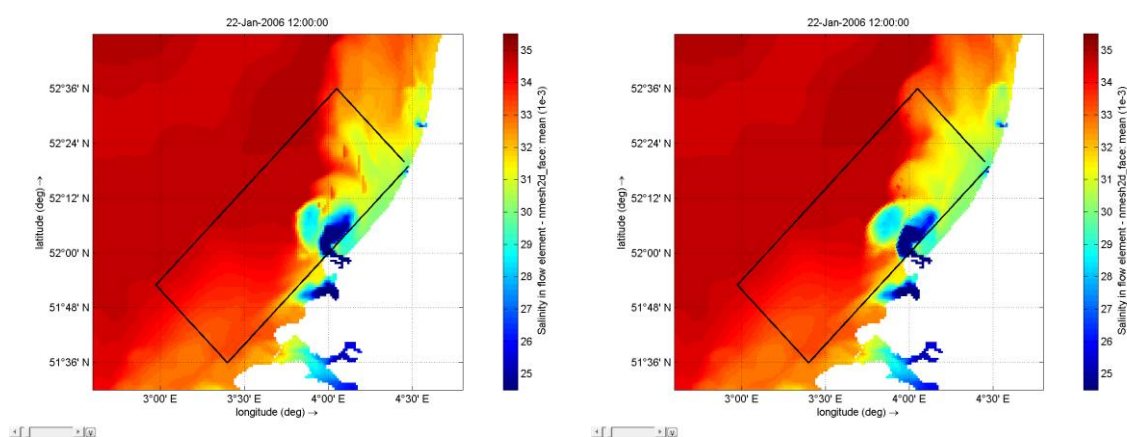
De eerdere vergelijking van watertemperatuur (op een meetstation dat verder weg van de ROFI/roosteraanpassing gelegen is) liet zien dat het driehoekige rooster zeer vergelijkbare resultaten gaf ten opzichte van het vierkante rooster. Het voorspelde zoutgehalte wordt voor de verschillende roosters wel vergeleken in het gebied waar het rooster daadwerkelijk is aangepast. Analyse van deze resultaten laat zien dat er grotere verschillen (toename gemiddelde RMSE met 0.09 ppt) zijn tussen beide roostervormen voor zoutrepresentatie.

De rechterkolom in bovenstaande tabel (max-min) toont aan dat er een grotere temporele variabiliteit in oppervlakte zoutgehalte is in de simulatie met het driehoekige netwerk in vergelijking met de modelversie met rechthoeken in het ROFI gebied.

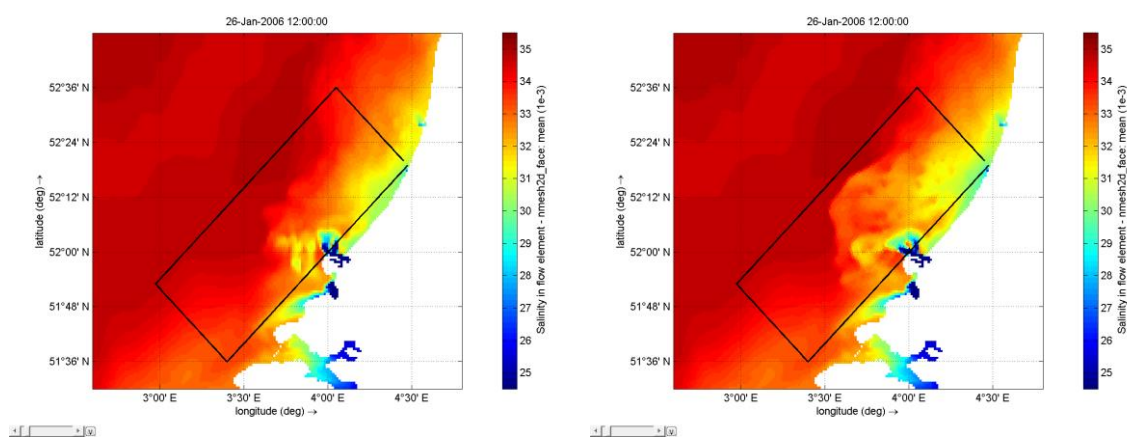
De vergelijking tussen drie- en vierhoekige roosters wordt echter niet alleen beïnvloed door de gebruikte roostervorm, maar ook door de resolutie en mogelijk ook door instabiliteiten (zie paragraaf 5.4).

### 5.3.3 Snapshots zoutgehalte (oppervlakte)

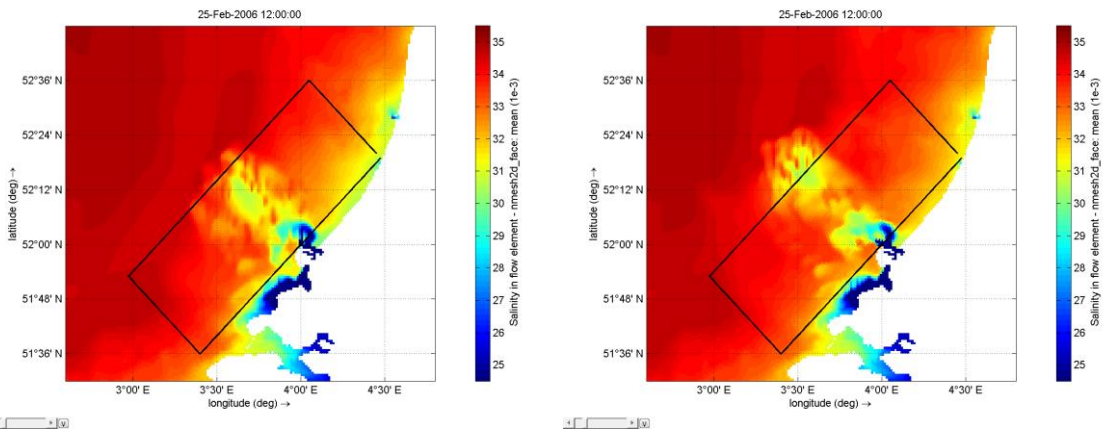
In onderstaande figuren (Figuur 5.5 tot en met Figuur 5.9) wordt de berekende saliniteit aan het oppervlak voor het vierhoekige rooster (linker paneel) en driehoekige rooster (rechter paneel) op verschillende momenten in de tijd weergegeven. De zwarte lijn in deze figuren geeft het gebied aan waarin het netwerk in het rechterfiguur aangepast is naar driehoekige rekencellen.



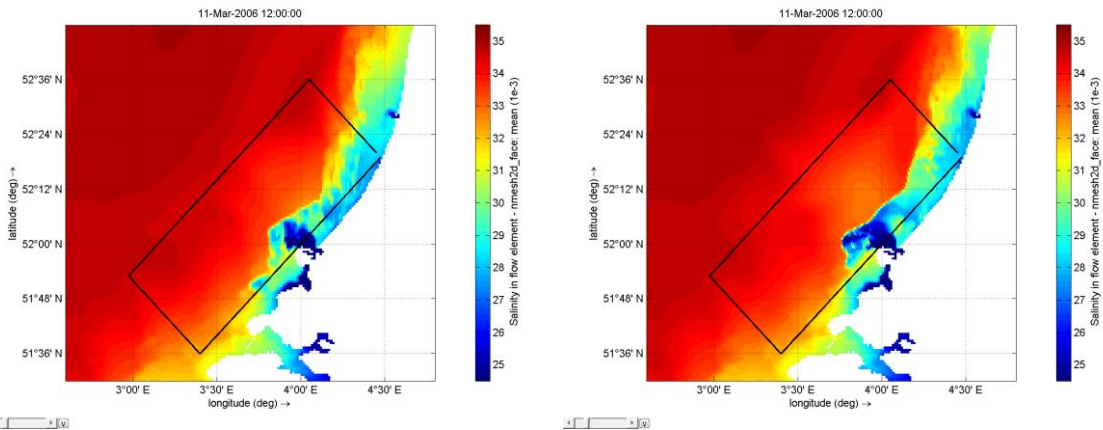
Figuur 5.5 Berekende oppervlakte saliniteit op 22-01-2006 met vierhoeken (links) en driehoeken (rechts) in het gebied aangegeven met de zwarte lijn.



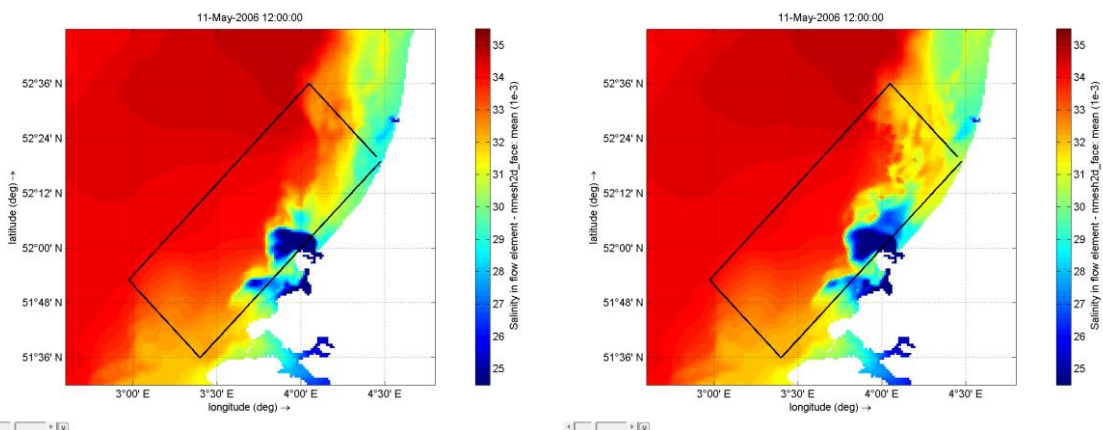
Figuur 5.6 Berekende oppervlakte saliniteit op 26-01-2006 met vierhoeken (links) en driehoeken (rechts) in het gebied aangegeven met de zwarte lijn.



Figuur 5.7 Berekende oppervlakte saliniteit op 25-02-2006 met vierhoeken (links) en driehoeken (rechts) in het gebied aangegeven met de zwarte lijn.



Figuur 5.8 Berekende oppervlakte saliniteit op 11-03-2006 met vierhoeken (links) en driehoeken (rechts) in het gebied aangegeven met de zwarte lijn.



Figuur 5.9 Berekende oppervlakte saliniteit op 11-05-2006 met vierhoeken (links) en driehoeken (rechts) in het gebied aangegeven met de zwarte lijn.

Het gebied dat is aangegeven met de zwarte lijn in bovenstaande figuren is gekozen om de roostervorm te toetsen, omdat in dit gebied de verspreiding van het zoete water uit de Nieuwe Waterweg in de ROFI geanalyseerd kan worden.

Op de verschillende momenten zijn er duidelijk zichtbare verschillen in de gemodelleerde saliniteit aan het oppervlak. De algemene trend (wanneer meerdere tijdsframes bekeken worden) is in beide simulaties vergelijkbaar. Echter, wanneer naar details gekeken wordt zijn er substantiële verschillen tussen beiden. Daarbij moet worden opgemerkt dat dezelfde modelsimulatie met een 2x2 vergroving van het vierhoekige rooster zeer vergelijkbare verschillen laat zien in vergelijking met het oorspronkelijke rooster (zie bijlage B).

#### 5.4 Discussie Noordzee

In de geproduceerde figuren worden regelmatig vreemde strepen in de saliniteit in de oppervlakte laag waargenomen, zie bijvoorbeeld het linker paneel van Figuur 5.5. Deze strepen zijn ook zichtbaar in de oppervlaktesnelheid en zijn hoogstwaarschijnlijk het gevolg van een numerieke instabiliteit in de modelberekening.

Het verdient aandacht om te onderzoeken hoe deze numerieke artefacten optreden en hoe deze in het vervolg voorkomen kunnen worden. Het wordt benadrukt dat de gevonden instabiliteit niet alleen in het driehoekige deel van het rekenrooster, maar ook in het volledig rechthoekige netwerk ontstaat.

In tegenstelling tot de praktijktesten met het Grevelingen- en Haringvlietmodel, speelt het verschil in bodemrepresentatie ten gevolge van het gebruik van driehoeken of vierkanten in deze case een kleinere rol doordat de bodemligging ruimtelijk minder varieert ten opzichte van de resolutie van het rekenrooster.

Naast de hier gepresenteerde berekeningen zijn aanvullende berekeningen op een grover rekenrooster (roostergrootte  $\sim 1\text{nm}$ ) uitgevoerd (zie bijlage B). Hieruit is gebleken dat de resultaten met betrekking tot zoutverspreiding in de ROFI nog niet geconvergeerd zijn. M.a.w. het veranderen van de resolutie (zonder de roostervorm aan te passen) heeft invloed op de resultaten. Dit heeft ook gevolgen voor de interpretatie van de verschillen tussen de hier gepresenteerde driehoekige en vierkante roosters. Naast de roostervorm kan ook het verschil in aantal nodes, faces, links (zie Tabel 5.1) en roosteroriëntatie (een deel van) de verschillen in rekenresultaten verklaren.

#### 5.5 Conclusies voor de Noordzee

Over het algemeen zijn de gevonden verschillen in de modelresultaten met driehoekige cellen en vierkante cellen in de ROFI erg klein. Bij het modelleren van oppervlaktesaliniteit zijn de verschillen in de ROFI wel duidelijker zichtbaar. In beide roosters zijn er numerieke instabiliteiten in de oppervlakte-saliniteit en –snelheidsmagnitude zichtbaar. Het is niet duidelijk wat hiervan de oorzaak is. Zowel door het optreden van instabiliteiten alsmede door het verschil in aantal nodes, faces en links voor verschillende roosters en roostervormen is het niet mogelijk om met zekerheid de verschillen die zichtbaar zijn toe te kennen aan het verschil in roostertype.

## 6 Grevelingen

### 6.1 Modelopzet

#### 6.1.1 Inleiding

Een bestaand Delft3D-model van de Grevelingen (Zijl & Nolte, 2006) is gebruikt voor de praktijktesten van de zoutindringing in modellen met verschillende rekenroosters. Het Grevelingenmeer staat niet in directe verbinding met zee, zeewater bereikt het meer alleen via de Brouwerssluis. Grevelingen is een voorbeeld van een zwak dynamisch systeem.

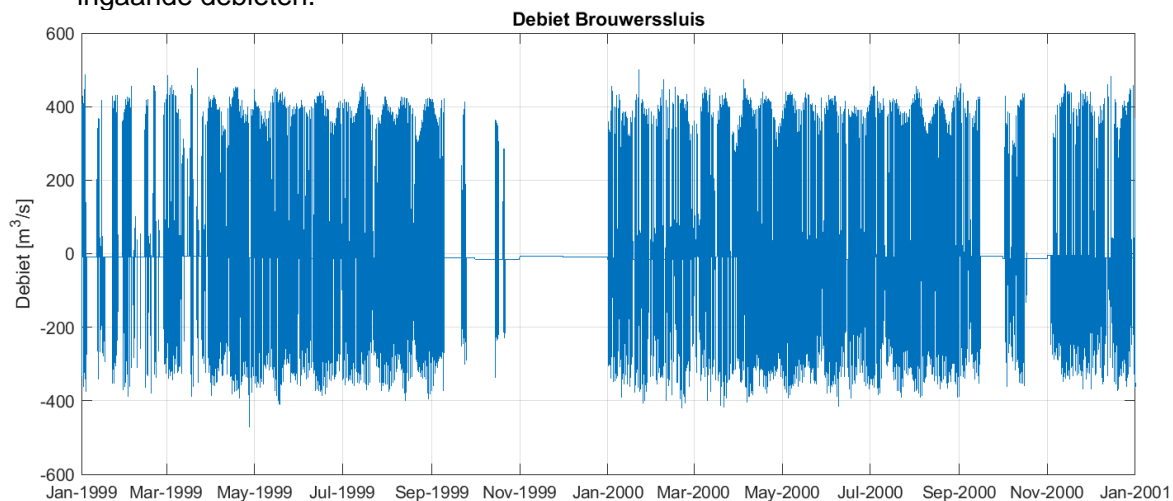
#### 6.1.2 Conversie van het Delft3D-model naar D-HYDRO

Het bestaande Delft3D-model is omgezet naar een D-HYDRO model. Voor de verschillende testen zijn de numerieke instellingen gelijk gehouden aan de waarden als beschreven in Bijlage A. Voor enkele parameters van het model (bijv. eddy viscositeit, eddy diffusiviteit, dry/flood-criterium) zijn de gebruikte waarden van Delft3D toegepast. Hiervoor is gekozen om zo de modelresultaten van Delft3D en D-HYDRO met zowel elkaar als met metingen te kunnen vergelijken.

#### 6.1.3 Randvoorwaarden

Het model wordt aangestuurd door bronnen (ingående debieten) en putten (uitgaande debieten) verspreid over het modeldomein. Er zijn verschillende debietspunten gebruikt om de volgende aspecten te modelleren:

- Brouwerssluis: deze sluis zorgt voor de belangrijkste wateruitwisseling in het modeldomein tussen de Noordzee en het Grevelingenmeer. Het debiet door de Brouwerssluis is afhankelijk van de waterstanden op zee en heeft daardoor een getijkarakter, zie Figuur 6.1.
- Neerslag en verdamping: De neerslag wordt over het hele modeldomein toegepast. De verdamping is via een put-term (d.w.z. lozingen) gemodelleerd. We merken op dat de verdamping tegenwoordig ook over het hele modeldomein toegepast kan worden, zoals regen. De gekozen aanpak komt nog uit de periode dat verdamping in D-Flow FM alleen via lozingen gemodelleerd kon worden.
- Polderdebieten: de afwatering vanuit vijf verschillende polders wordt beschreven via ingaande debieten.



Figuur 6.1 Debiet door de Brouwerssluis in  $m^3/s$  (positief is van de Noordzee naar het Grevelingen) voor de periode januari 1999 tot januari 2001



#### 6.1.4 Laagverdeling

Het verticale rooster wordt beschreven door 28 z-lagen met een equidistante dikte van 1,5 meter. Dit is de enige praktijkproef die gebruikt maakt van z-lagen.

#### 6.1.5 Simulatieperiode

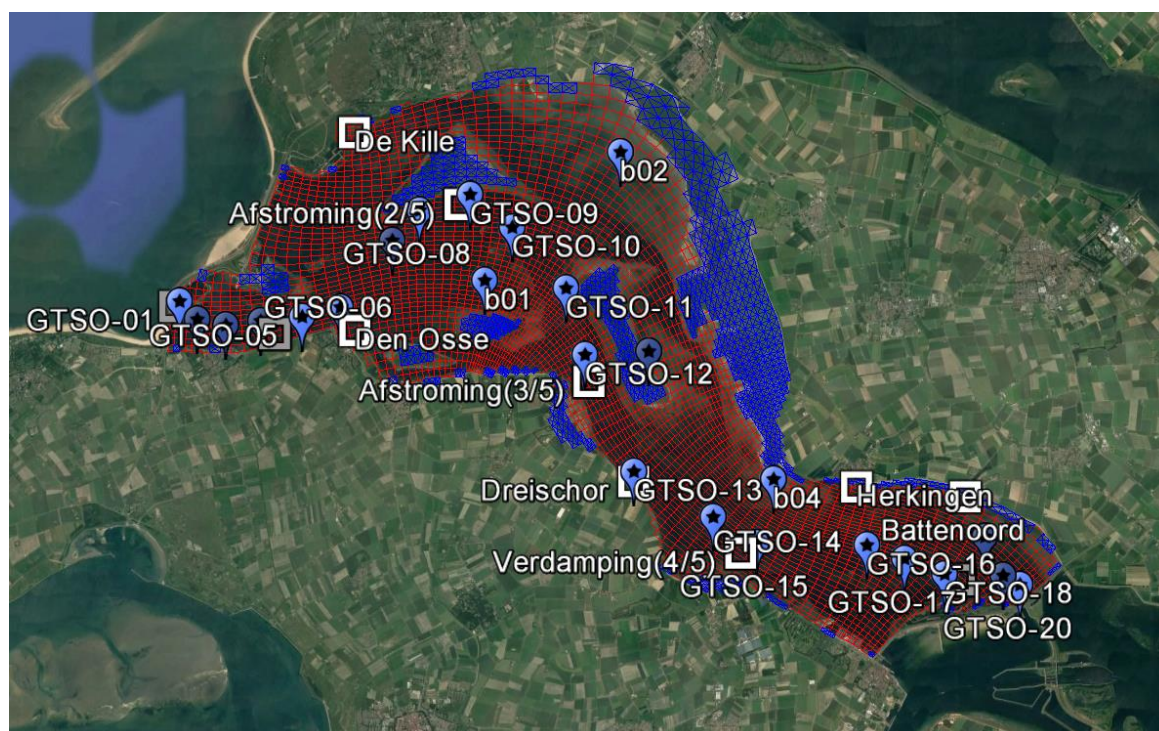
Er wordt een periode van twee jaar gemodelleerd (1 januari 1999 tot 1 januari 2001). Het eerste jaar is de inspeelperiode.

#### 6.1.6 Observatiepunten

Verspreid over het model zijn verschillende observatiepunten geplaatst om de modeluitvoer te kunnen analyseren. De GTSO-punten vallen samen met in de modelperiode uitgevoerde metingen.

#### 6.1.7 Overzichtsfiguur

In Figuur 6.2 wordt het originele curvi-lineaire Delft3D-rooster (rood) getoond met daarin de bronnen en putten (witte vierkanten), inactieve rekencellen/droge punten (blauwe kruizen) en observatiepunten (blauwe placemarkers).



Figuur 6.2 Originele curvi-lineaire Delft3D-rooster met bronnen en putten (witte vierkanten), inactieve rekencellen/droge punten (blauwe kruizen) en observatiepunten (blauwe placemarkers).

## 6.2 Toegepaste roosters

In deze praktijktest zijn vier verschillende horizontale roosters getest: het originele curvi-lineaire Delft3D-rooster (overgezet naar FM), een regelmatig (gelijkzijdig) driehoekig rooster en twee regelmatige rechthoekige (i.e. vierkante) roosters. De toegepaste driehoekige en vierkante roosters zijn ongeveer twee keer fijner dan het originele rooster, dat een gemiddeld celoppervlak van 27200 m<sup>2</sup> heeft. De zijanten van de driehoeken zijn 190 m lang. Het eerste rechthoekige rooster (met zijanten van 110 m) heeft dezelfde flowlink-lengte als het driehoekige rooster. De flowlink-lengte beschrijft de afstand tussen twee celmiddens

(waterstandspunten). Het tweede rechthoekige rooster (met zijanten van 125 m) heeft hetzelfde celoppervlak van circa 15630 m<sup>2</sup> als het driehoekige rooster.

Tabel 6.1 Roostergegevens, rekentijdstep en rekentijd (op 4 partities) voor de vier roosters.

	<b>Aantal nodes</b>	<b>Aantal cellen</b>	<b>Aantal en type lagen</b>	<b>Cel-oppervlak</b>	<b>Gemiddelde tijdstap</b>	<b>Rekentijd (dag/jaar), 4 partities</b>
<i>Kromlijinig</i>	4431	4232	28 z	Variabel, gemiddeld 27201 m <sup>2</sup>	79 s	0,98
<i>Vierhoekig 110m</i>	11828	9687	28 z	12100 m <sup>2</sup>	57 s	3,46
<i>Vierhoekig 125m</i>	9087	7435	28 z	15625 m <sup>2</sup>	58 s	2,69
<i>Driehoekig 190m</i>	4559	4732	28 z	15632 m <sup>2</sup>	56 s	2,35



Figuur 6.3 Originele curvi-lineaire Delft3D-rooster.



Figuur 6.4 Rechthoekige rooster met zijanten van 110 m.



Figuur 6.5 Rechthoekige rooster met zijanten van 125 m.

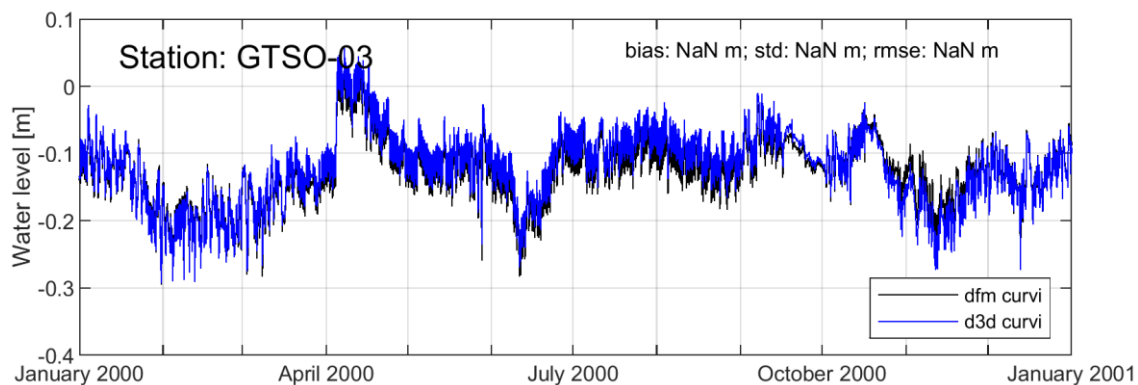


Figuur 6.6 Regelmatig driehoekige rooster met zijanten van 190 m.

### 6.3 Verificatie D-HYDRO-model

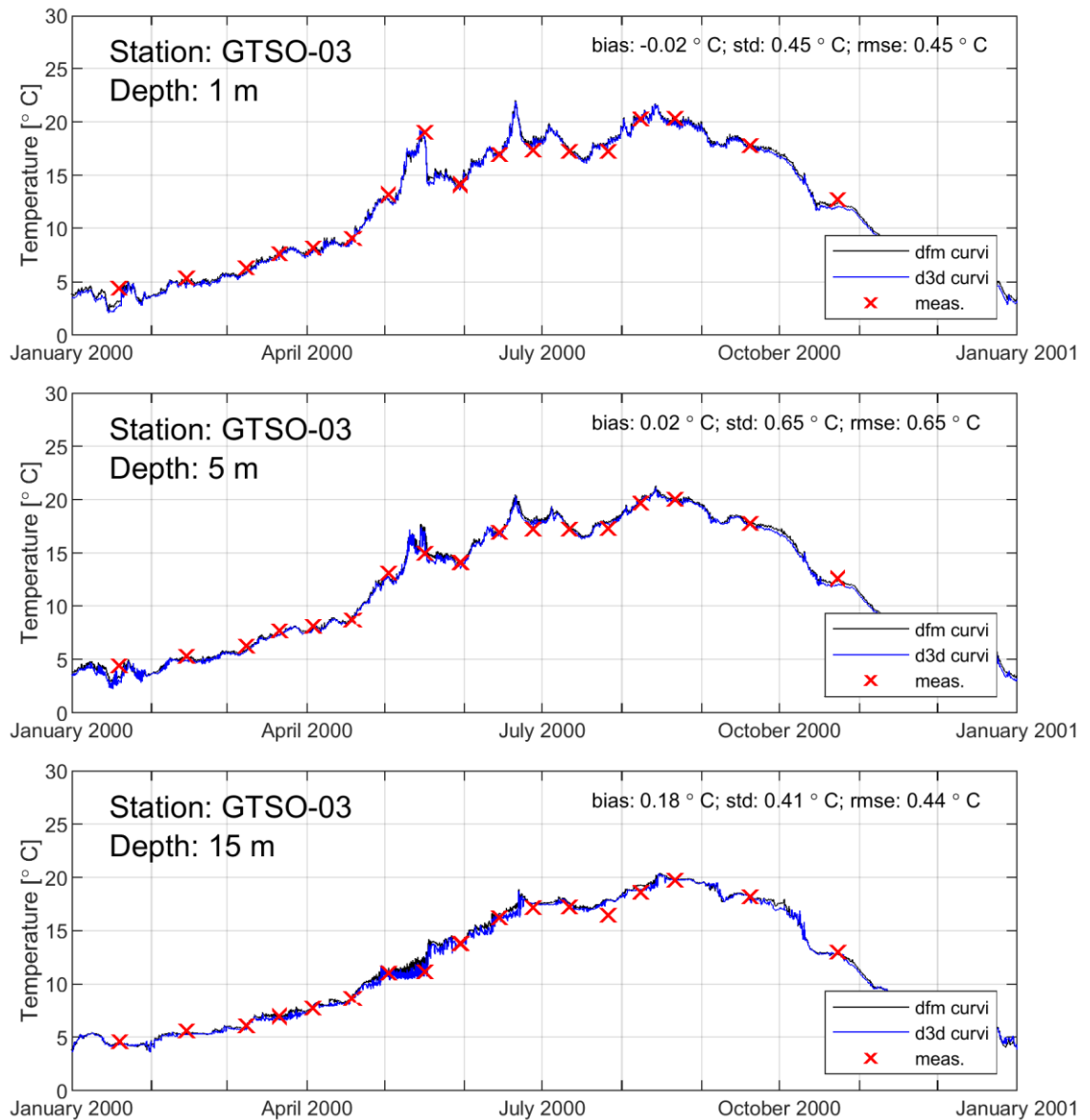
Om te controleren of het modelleren van het Grevelingenmeer in D-HYDRO goed verloopt is er, voor het uitvoeren van de simulaties met verschillende rekenroosters, een vergelijking gemaakt tussen de metingen en Delft3D- en D-HYDRO-modelresultaten.

In onderstaande figuren worden de berekende waterstand (Figuur 6.7), temperatuur (Figuur 6.8) en saliniteit (Figuur 6.9) getoond voor een locatie nabij de Brouwerssluis in het westen van de Grevelingen (GTSO-03). De blauwe lijn komt overeen met de Delft3D-modelresultaten, de zwarte lijn met D-HYDRO en de rode kruizen geven de gemeten waarden weer.

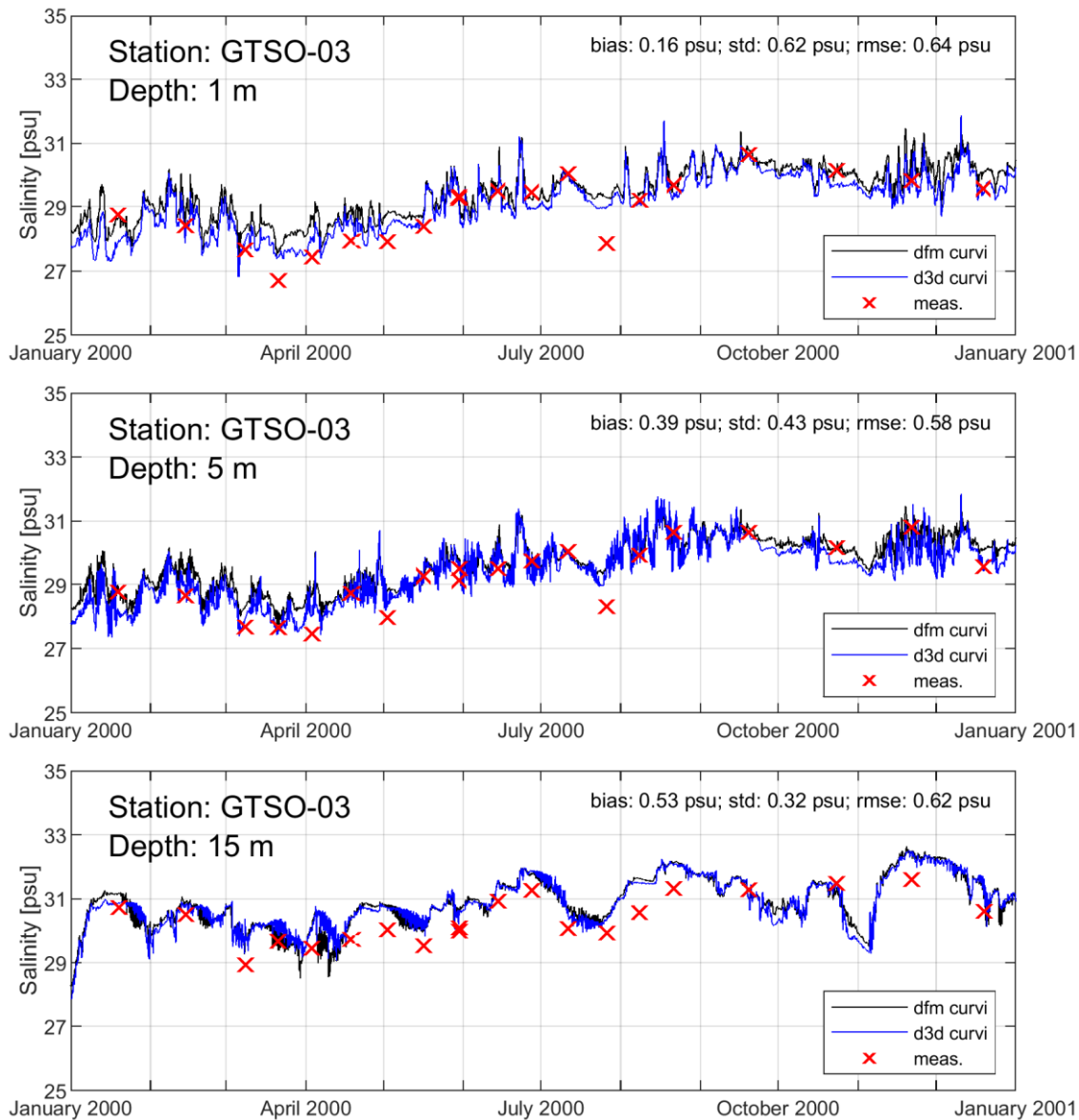


Figuur 6.7 Vergelijking van de waterstanden in meetpunt GTSO-03 in het curvi-lineaire Delft3D en D-HYDRO model

De waterstand in de D-HYDRO en Delft3D simulatie verschillen enkele centimeters in de analyseperiode. Er is nog geen bevredigend antwoord gevonden voor dit (beperkte) verschil.



Figuur 6.8 Vergelijking van de temperatuur in meetpunt GTSO-03 in het curvi-lineaire Delft3D en D-HYDRO model met de metingen op 3 verschillende dieptes.



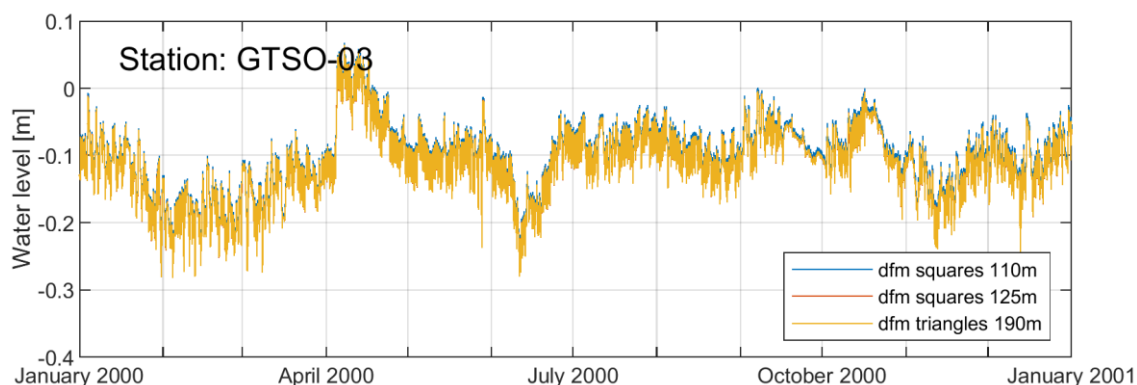
Figuur 6.9 Vergelijking van het zoutgehalte in meetpunt GTSO-03 in het curvi-lineaire Delft3D en D-HYDRO model met de metingen op 3 verschillende dieptes.

Ondanks kleine verschillen in de gemodelleerde temperatuur en saliniteit, komen de modelresultaten van D-HYDRO grofstoffelijk goed overeen met de Delft3D- en meetresultaten. Omdat dit onderzoek zich richt op impact binnen D-HYDRO-berekeningen van verschillende rekenroosters op de berekende zoutindringing is er verder geen aandacht besteed aan het aanpassen/afregelen van het D-HYDRO model.

## 6.4 Modelresultaten

### 6.4.1 Waterstand

Figuur 6.10 toont de berekende waterstand in meetpunt GTSO-03 voor de simulaties met verschillende rekenroosters.

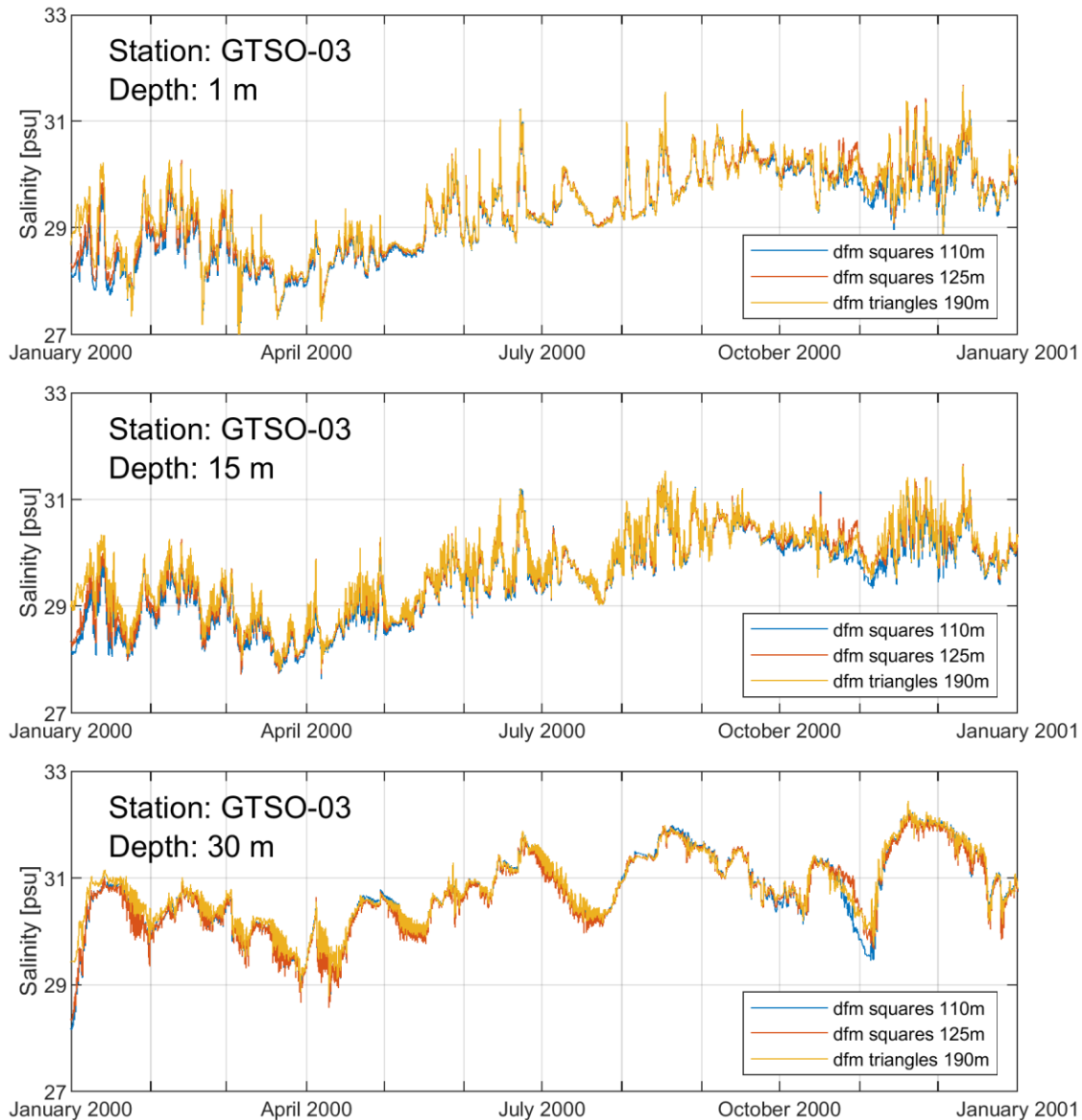


Figuur 6.10 Waterstanden in meetpunt GTSO-03 voor de verschillende rekenroosters.

Over het algemeen zijn de berekende waterstanden zeer vergelijkbaar. De kleine verschillen in waterstand zijn waarschijnlijk het gevolg van een verschillend oppervlak van actieve rekencellen, waardoor er ook een verschil in neerslag in het modeldomein ontstaat.

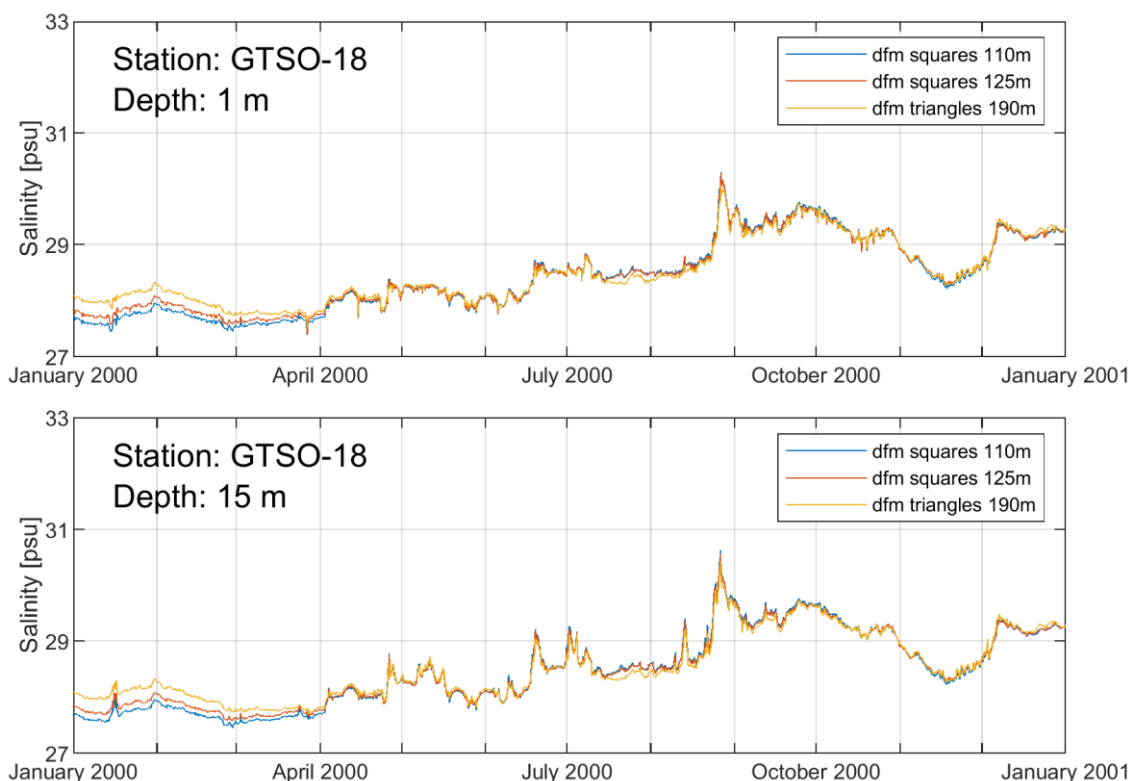
## 6.4.2 Saliniteit – tijdseries

In respectievelijk Figuur 6.11 en Figuur 6.12 worden de berekende zoutgehalten over tijd voor station GTSO-03 (in het westelijke gedeelte van het Grevelingenmeer) en GTSO-18 (in het oostelijke gedeelte van het Grevelingenmeer) getoond. In de verschillende panelen zijn de modelresultaten op verschillende dieptes weergegeven (1m, 15m, 30m).



Figuur 6.11 Zoutgehalte bij meetpunt GTSO-03 in 1m (bovenste paneel), 15m (middelste paneel) en 30m diepte (onderste paneel).



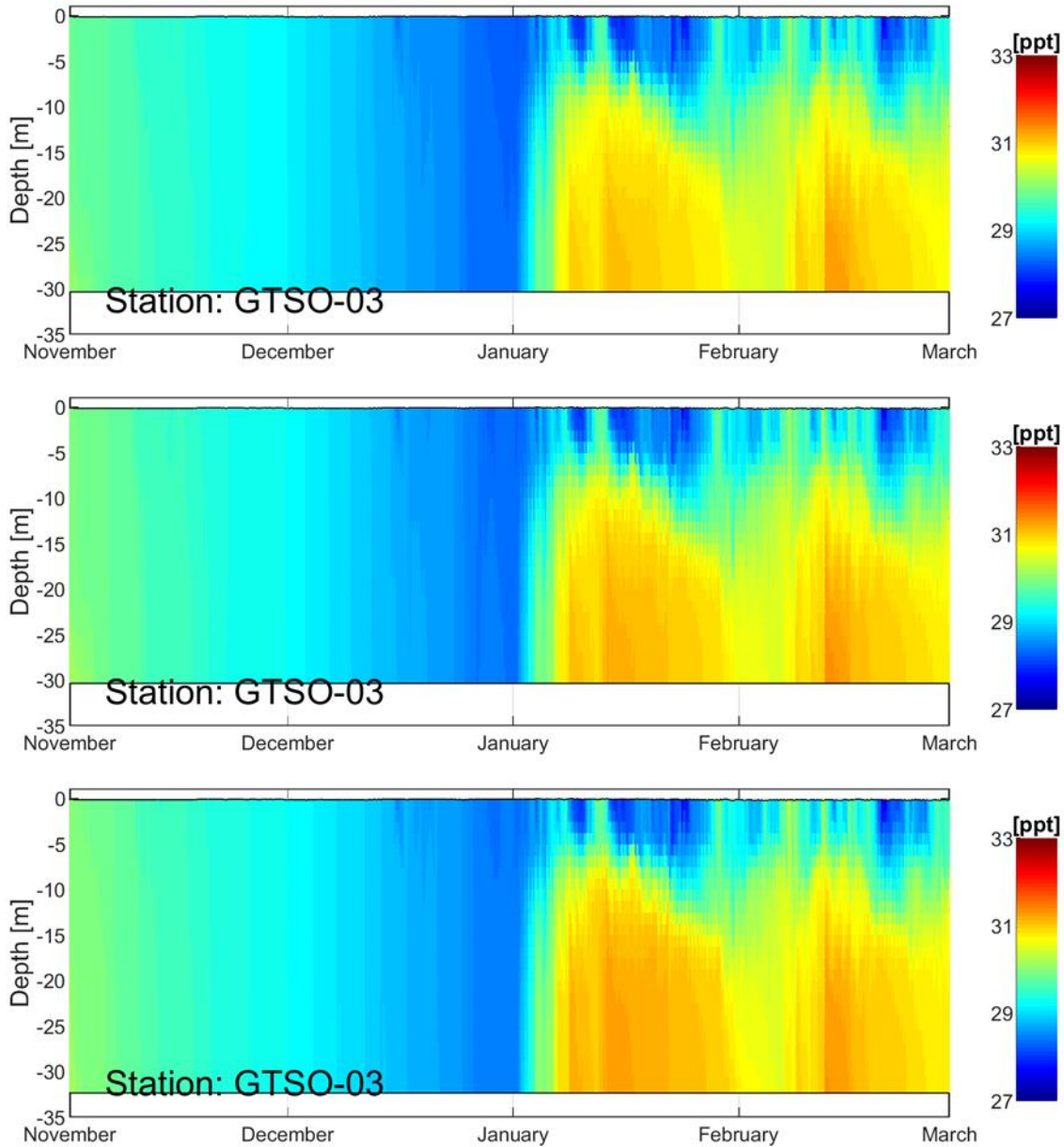


Figuur 6.12 Zoutgehalte bij meetpunt GTSO-18 op 1m (bovenste paneel) en 15m diepte (onderste paneel).

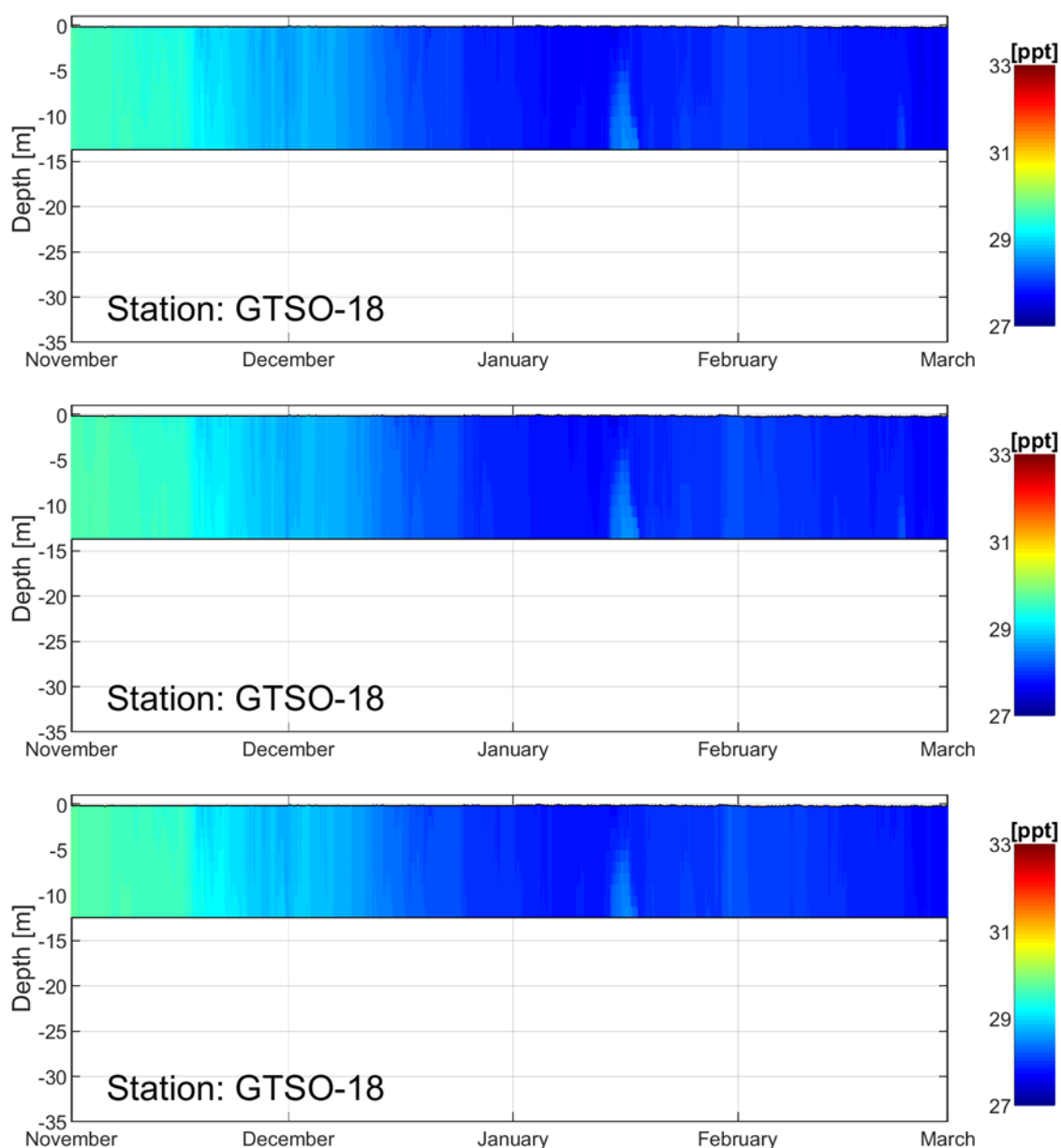
Uit bovenstaande figuren is af te lezen dat de zoutgehalten nabij de Brouwerssluis over het algemeen goed overeenkomen. De verschillen tussen de verschillende simulaties zijn vooral te vinden in perioden waarbij voor een langere tijd geen (zee)water via de Brouwerssluis de Grevelingen in is gekomen (bijv. november tot december 1999 (niet weergegeven in Figuur 6.12, omdat het model toen nog inspeelde) en medio oktober tot november 2000). Een direct aanwijsbare reden voor dit verschil is niet gevonden. Op deze momenten wordt echter het zoutgehalte in GTSO-03 niet direct beïnvloed door het instromende zeewater vanaf de Noordzee. Op grotere afstand van de Brouwerssluis (GTSO-18) is dit effect veel minder sterk aanwezig. Het verschil dat in dit station ontstaat, blijft daardoor wel weer langer bestaan.

### 6.4.3 Saliniteit – Diepte,tijd-plots

Voor dezelfde locaties als in de vorige paragraaf (GTSO-3 en GTSO-18), zijn ook diepte,tijd-plots gemaakt van het zoutgehalte, zie Figuur 6.13 en Figuur 6.14.



Figuur 6.13 Diepte-tijd reeks voor GTSO-03 met het 110m rechthoekige rooster (bovenste paneel), het 125m rechthoekige rooster (middelste paneel) en het 190m driehoekige rooster (onderste paneel).



Figuur 6.14 Diepte-tijd reeks voor GTSO-18 met het 110m rechthoekige rooster (bovenste paneel), het 125m rechthoekige rooster (middelste paneel) en het 190m driehoekige rooster (onderste paneel).

De verschillen in saliniteit in de diepte-tijd reeksen van bovenstaande afbeeldingen zijn zeer beperkt. Gemiddeld genomen zijn de saliniteitswaarden in het driehoekige rooster iets hoger dan in de simulaties met rechthoekige roosters.

## 6.5 Discussie Grevelingen

Tijdens vergelijkingen van de eerste modelsommen viel het op dat er grote verschillen waren in hoeveelheid zout in het modeldomein. Deze verschillen waren te verklaren door de lokale bodemligging nabij de Brouwerssluis (de bron van het zoute water in het model). Doordat er bij bepaalde roosters een lokale verhoging (drempel) in de bodem was ontstaan tussen de lozingslocatie van de Brouwerssluis en de hoofdgeul van het Grevelingenmeer, bleef het zoute water 'vastzitten' in een paar rekencellen.

De bodemligging nabij de Brouwerssluis is niet alleen belangrijk voor de uiteindelijke instroom van het zoute water naar diepere delen van het Grevelingenmeer. De concentratie ter plaatse van dit punt bepaalt ook hoeveel zout er weer uit het modeldomein (van de Grevelingen naar de Noordzee) getransporteerd wordt.

In het bestaande Delft3D-model is terug te zien dat de bodem nabij de Brouwerssluis zo gemodelleerd is dat er een pad/geul aanwezig is van de lozingslocatie van de sluis naar de dieper gelegen hoofdgeul. Deze aanpassing aan de bodem is overgenomen in de D-HYDRO modelschematisaties: Om het effect van de lokale bodemligging nabij de Brouwerssluis op de saliniteit in de Grevelingen te beperken, is ervoor gekozen de diepte rond het lozingspunt constant te maken (een vaste hoogte van -10m NAP). Na deze aanpassing kwamen de berekende saliniteitswaarden in de verschillende simulaties veel beter overeen.

## 6.6 Conclusie Grevelingen

De berekende saliniteit op verschillende locaties zijn voor verschillende rekenroosters met elkaar vergeleken. De gevonden verschillen zijn zeer klein. Aangezien het Grevelingen-model onder de praktijktesten valt, wordt benadrukt dat de verschillen tussen de verschillende modelsommen hoogstwaarschijnlijk kleiner zijn dan de verschillen die zouden ontstaan door bijvoorbeeld keuzes in de modelontwikkeling zoals het aanpassen van de lokale bodemligging en de kalibratie van het model.

De manier waarop de bodemligging nabij de Brouwerssluis in het model gerepresenteerd wordt is deels afhankelijk van de keuze van celtype (driehoekjes vs. rechthoeken), maar is vooral afhankelijk van de resolutie. Het controleren of bepaalde bodemkenmerken (die in dit geval belangrijk zijn voor de hoeveelheid zout dat de hoofdgeul van het Grevelingen bereikt) goed in het rekenrooster zijn opgenomen, is een stap in de modelopzet die onafhankelijk is van het gekozen celtype.

Er zijn geen duidelijke verschillen gevonden in de verspreiding van het zout door het modeldomein t.g.v. de verschillende gebruikte roosters.

## 7 Haringvliet

### 7.1 Modelopzet

#### 7.1.1 Schematisatie

Voor de praktijktesten met betrekking tot het Haringvliet is een model opgezet voor het westelijk deel van het Haringvliet. Het domein beslaat het gebied vanaf de Haringvlietsluizen tot de lijn Spui-Middelharnis (zie Figuur 7.1). In alle sommen heeft het model 10  $\sigma$ -lagen in de verticaal, zoals ook zijn toegepast in het originele OSR+Haringvliet model (TRIWAQ).



Figuur 7.1 Modeldomein praktijkproef Haringvliet (rooster R1 is een uitsnede van het OSR+ rooster)

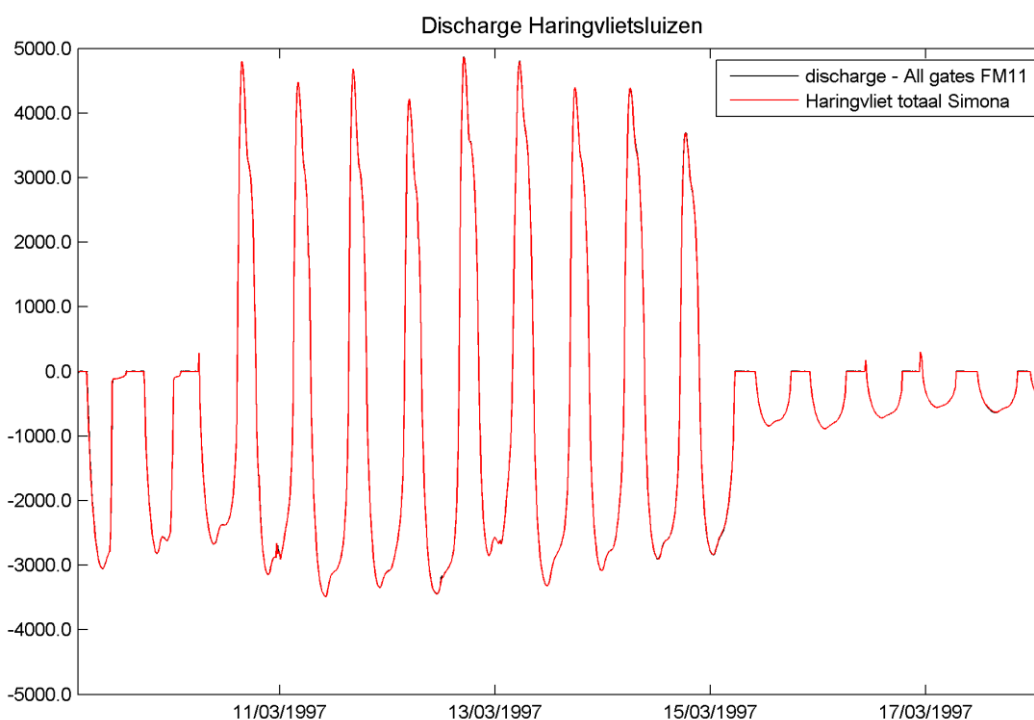
Het model wordt geforceerd met dieptegemiddelde debietrandvoorwaarden bij de Haringvlietsluizen en in het Spui, en waterstandsrandvoorwaarden aan de oostelijke rand. Daarnaast wordt aan het oppervlak een uniforme windschuifspanning opgelegd. De debiet- en waterstandsrandvoorwaarden zijn afkomstig uit een 3D-model met een groter domein (het met het Haringvliet uitgebreide OSR-model, vanaf nu OSR+ genoemd). De windforcering is gebaseerd op windmetingen bij Hoek van Holland.

Aan alle instroomranden worden ook randvoorwaarden opgelegd voor de saliniteit. Deze zijn ook afkomstig uit het grotere 3D-model (OSR+). Hierbij is de waarde in de vijfde laag van het grotere model aan het testmodel opgelegd over de hele diepte, omdat het in D-HYDRO nog niet mogelijk is diepte-afhankelijke randvoorwaarden op te leggen. Merk op dat de zout-randvoorwaarden worden opgelegd bij instroom en er is dus geen sprake van relaxatie vanaf de saliniteitswaarde aan het einde van de uitstroom.

### 7.1.2 Testcase

De in deze test uitgevoerde sommen zijn gebaseerd op de 'inlaatproef 1997'. Normaliter stroomt er door de Haringvlietsluizen alleen water vanuit het Haringvliet naar de zee. Tijdens de inlaatproef is gedurende een aantal dagen ook stroming van zee naar het Haringvliet toegestaan (zie Figuur 7.2). Hierbij is zoutwater het Haringvliet binnengekomen, dat na verloop van tijd weer is uitgespoeld.

Voor een vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde zoutgehalten volgens het OSR+ model zie bijlage D.



*Figuur 7.2* Debiet door de Haringvlietsluizen in de simulaties van de 'inlaatproef 1997', uitgaand debiet is negatief. Ten tijde van de inlaatproef (10-3 – 15-3) is er sprake van inkomende (positieve) debieten.

In de testen wordt een periode van 9 dagen doorgerekend. Hierbij is de saliniteit aan het begin van de testperiode gelijk gesteld aan de achtergrondsaliniteit. Dit wordt zozeer in overeenstemming geacht met wat daadwerkelijk het geval was, dat er geen inspeelperiode nodig is, en de hele simulatieduur gebruikt kan worden voor evaluatie.

## 7.2 Toegepaste roosters

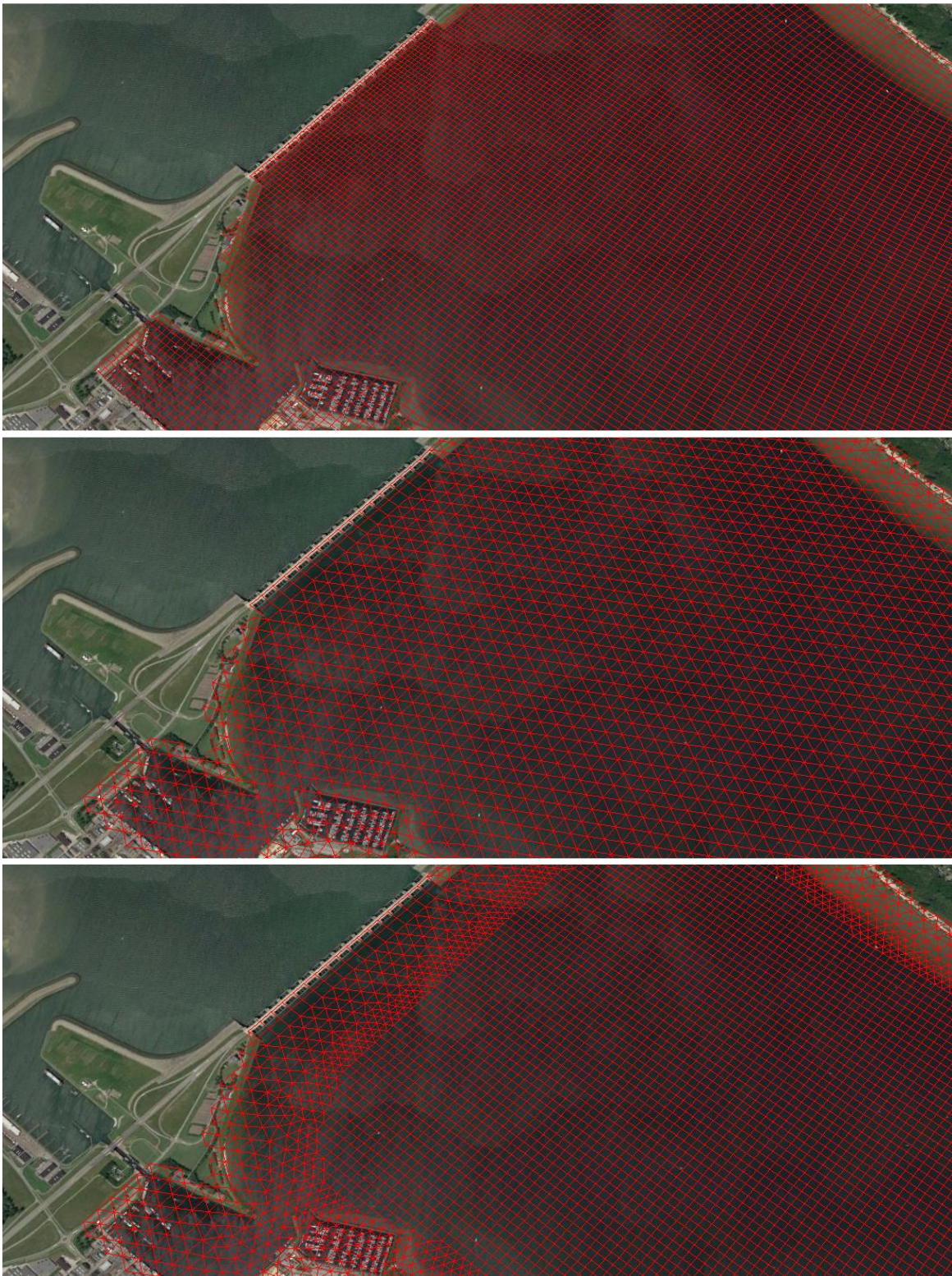
De praktijktesten voor het Haringvliet zijn uitgevoerd met vijf verschillende roosters:

- R1) Curvi-lineair rooster, afkomstig uit het OSR+ model.
- R2) Rooster met hoofdzakelijk gelijkzijdige driehoeken, zijde is 62 m
- R3) Rooster met hoofdzakelijk vierkanten, zijde is 41 m
- R4) Rooster met hoofdzakelijk vierkanten, zijde is 35 m
- R5) Rooster met hoofdzakelijk gelijkzijdige driehoeken, zijde is 40 m

Voor het maken van de roosters met hoofdzakelijk drie- en vierhoeken is als vertrekpunt gebruik gemaakt van (een uitsnede van) een rooster dat reeds was opgezet in het kader van '6<sup>e</sup> generatie modelering RMM'. Dit rooster heeft de volgende kenmerken:

- 1) Een stukje curvi-lineair rooster in de monding van het Spui
- 2) Rechthoekige roosterzellen bij de open randen ter plaatse van de Haringvlietsluizen en aan de kant van het Hollandsch Diep
- 3) Onregelmatige driehoeken bij de gesloten randen
- 4) Voor het overige alleen gelijkzijdige driehoeken

Dit rooster is gebruikt als eerste testrooster met driehoeken (R2). Vervolgens zijn hier twee roosters met hoofdzakelijk vierkanten van afgeleid. Dit is gebeurd door een uitsnede te maken op ongeveer 200 meter van de randen van het domein, en binnen deze uitsnede de driehoeken te vervangen door vierkanten. In het eerste rooster met vierkanten (R3) zijn de maten zo gekozen dat de vierkante cellen een *oppervlak* hebben dat gelijk is aan dat van de driehoeken. In het tweede rooster met vierkanten (R4) is de grootte van de vierkanten zo gekozen dat de lengte van de *flowlinks* gelijk is aan die in het driehoeken-rooster. In beide gevallen is een band met onregelmatige driehoeken nodig aan de rand van de uitsnede voor de overgang van de *passé-partout* naar het middendeel met de vierkanten. Beide roosters met vierhoeken hebben aanzienlijk meer *netnodes* (hoekpunten) en daarmee bodempunten dan het driehoeken-rooster. Om die reden is er voor de vergelijking ook een rooster gemaakt met in de uitsnede kleinere driehoeken, waarbij de maten zo gekozen zijn dat het aantal bodempunten in het rooster tussen dat van de twee vierhoeken-roosters in ligt (R5). Tabel 7.1 geeft een overzicht van de roosterkenmerken.



*Figuur 7.3 Voorbeelden van rooster nabij de Haringvlietsluizen: Top: Curvi-linear rooster R1 (uitsnede van OSR+). Midden: Driehoekig rooster R2 (uitsnede van voorstel 6<sup>e</sup> generatie OSR rooster) Onder: Regelmatig vierhoekig rooster (35m, R4) met driehoekige cellen langs de domeinranden ten behoeve van uitlijning.*



Het curvi-lineaire rooster is een uitsnede uit de grotere modelschematisatie (OSR+Haringvliet) die ook gebruikt is voor het genereren van de randvoorwaarden. Dit is een fijnmazig rooster (3 cellen per sluisdeur ter plaatse van de Haringvlietssluisen, versus 1 in de driehoeken- en vierhoekenroosters), waarvan voor deze test de cellen in de nabijheid van de Haringvlietssluisen enigszins zijn opgerekt in de stroomrichting. Dit is gedaan om rekentijdstap vergelijkbaar te maken, en de reketijden beter vergelijkbaar te maken met de reketijden met de overige roosters.

Tabel 7.1 Overzicht kentallen roosters en reketijden

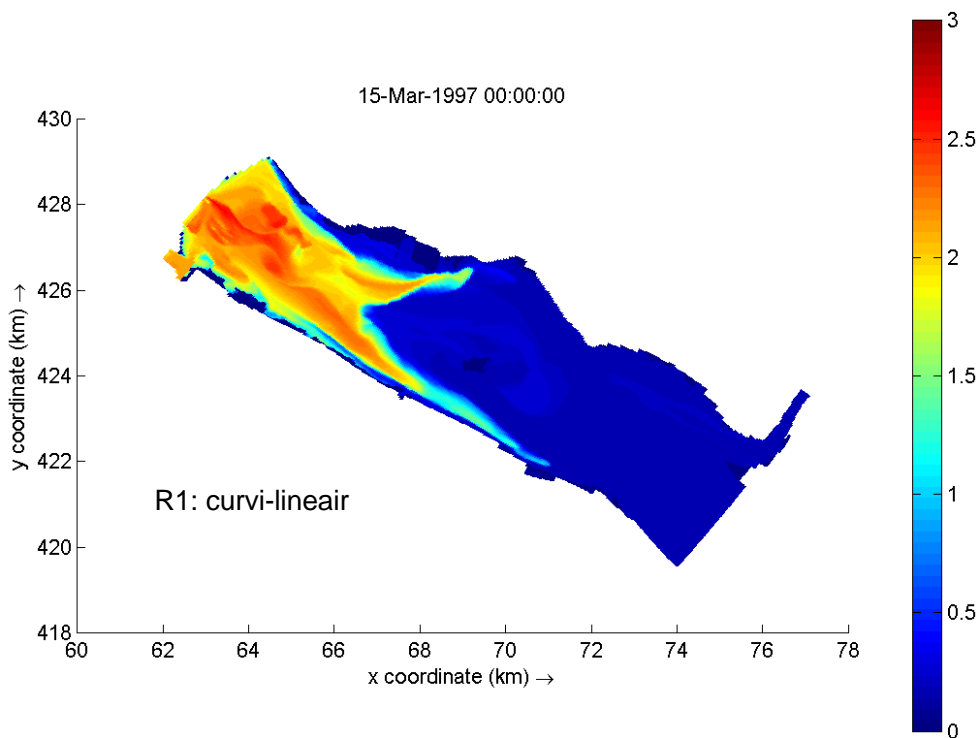
	Netwerk	Lagen	Netnodes	Netlinks	NetElements	Average Timestep [s]	Computation time [s]
R1	Curvi-lineair	10 sigma	41602	82595	40994	15.9	7277
R2	Driehoekig (Z=62m)	10 sigma	15114	43952	28839	13.3	4885
R3	Vierkant(Z=41m)	10 sigma	27063	59312	32250	12.5	6480
R4	Vierkant (Z=36m)	10 sigma	34100	74186	40087	12.5	8344
R5	Driehoekig (Z=40m)	10 sigma	31477	93041	61565	11.5	12222

### 7.3 Modelresultaten

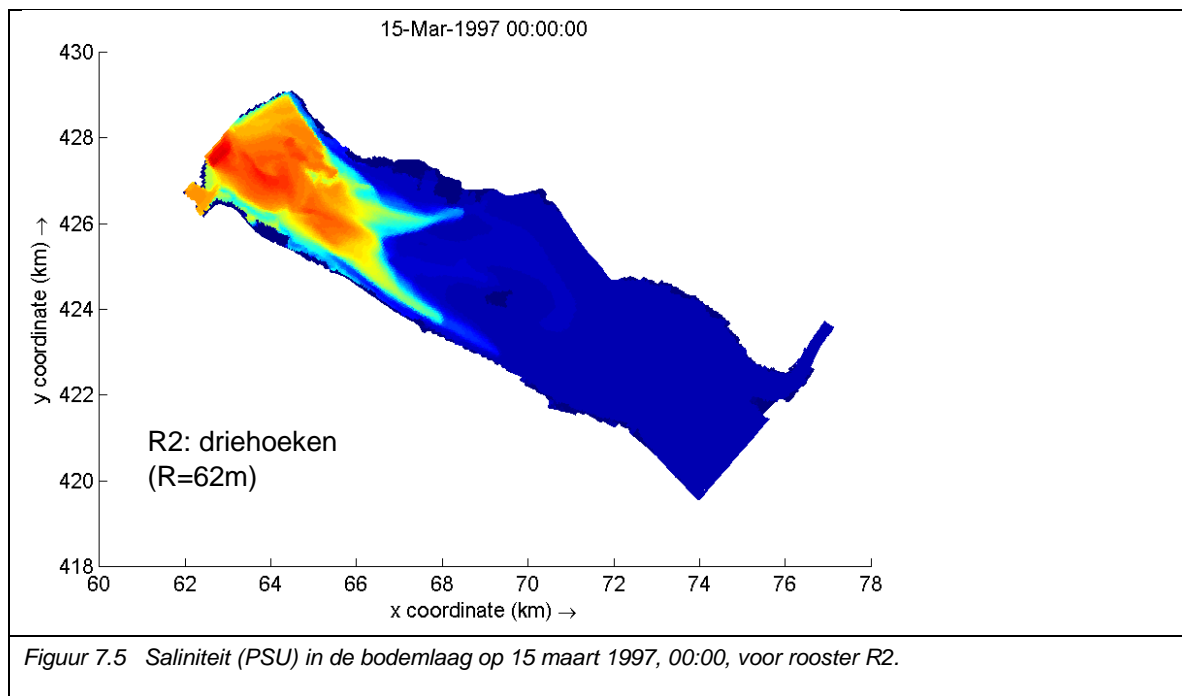
#### 7.3.1 Ruimtelijk beeld

Figuur 7.4 tot en met Figuur 7.8 geven een ruimtelijk beeld van de resultaten voor de saliniteit in de bodemlaag op 15 maart 1997, 00:00 uur. Dit is een moment kort na het einde van de laatste keer dat er tijdens de test bij vloed zout water naar binnen stroomde.

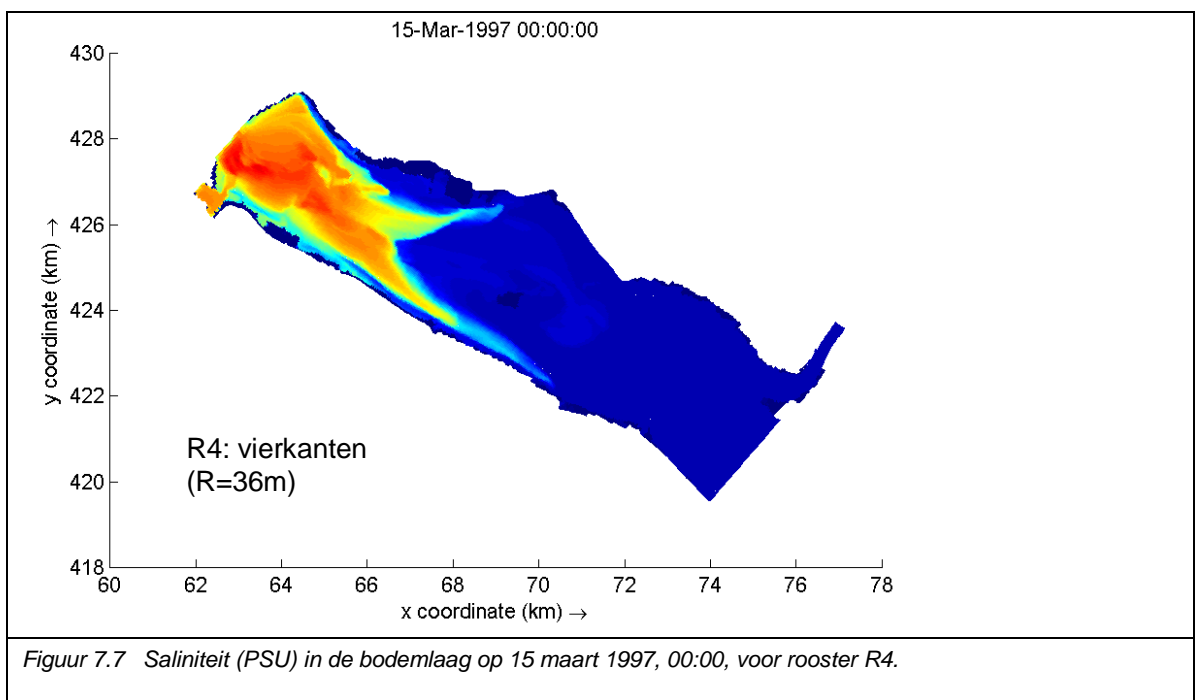
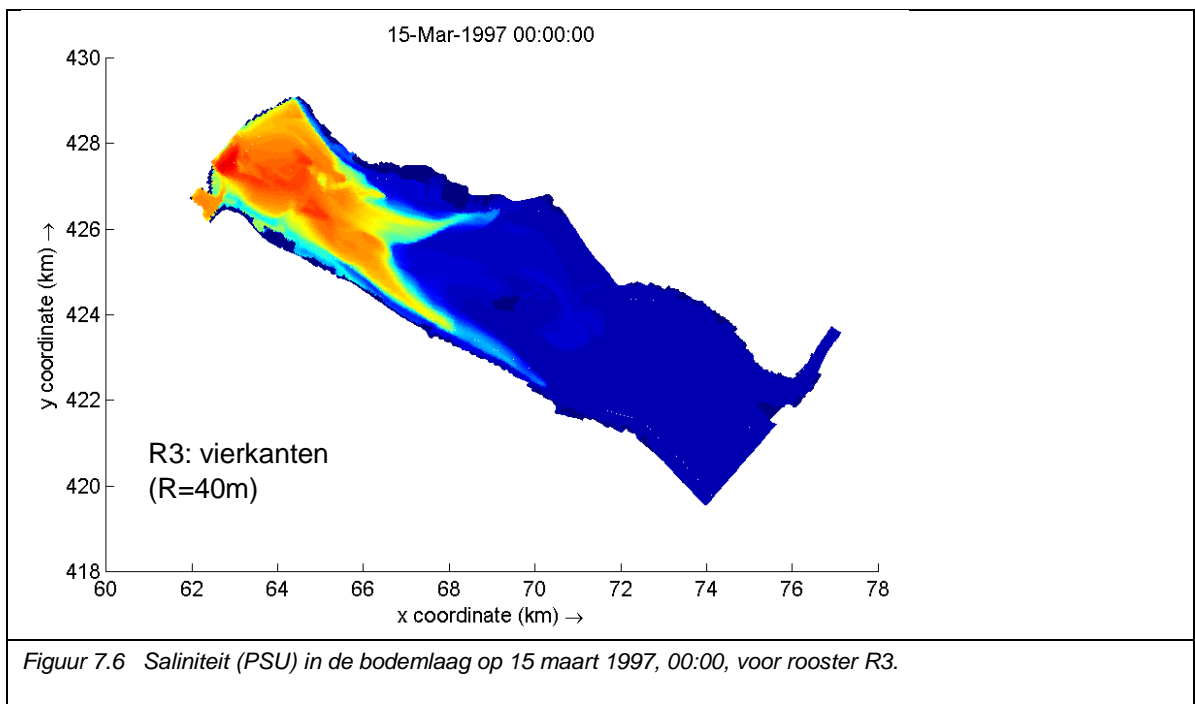
Onderlinge vergelijking van de figuren laat zien dat in schematisatie R2, het driehoekenrooster met zijden van 62 m, het zout op 15 maart 00:00 uur minder ver naar het oosten is doorgedrongen dan in alle andere schematisaties: de 'lobben' in de noordelijke en zuidelijke geul zijn korter en minder geel van kleur. Het zout komt het verst in het curvi-lineaire rooster (R1, Figuur 7.4), gevolgd door de twee vierhoekenroosters (R3 en R4, respectievelijk Figuur 7.6 en Figuur 7.7). De zoutindringing in het driehoekenrooster met kleinere driehoeken (R5, Figuur 7.8) lijkt daarmee ongeveer vergelijkbaar.

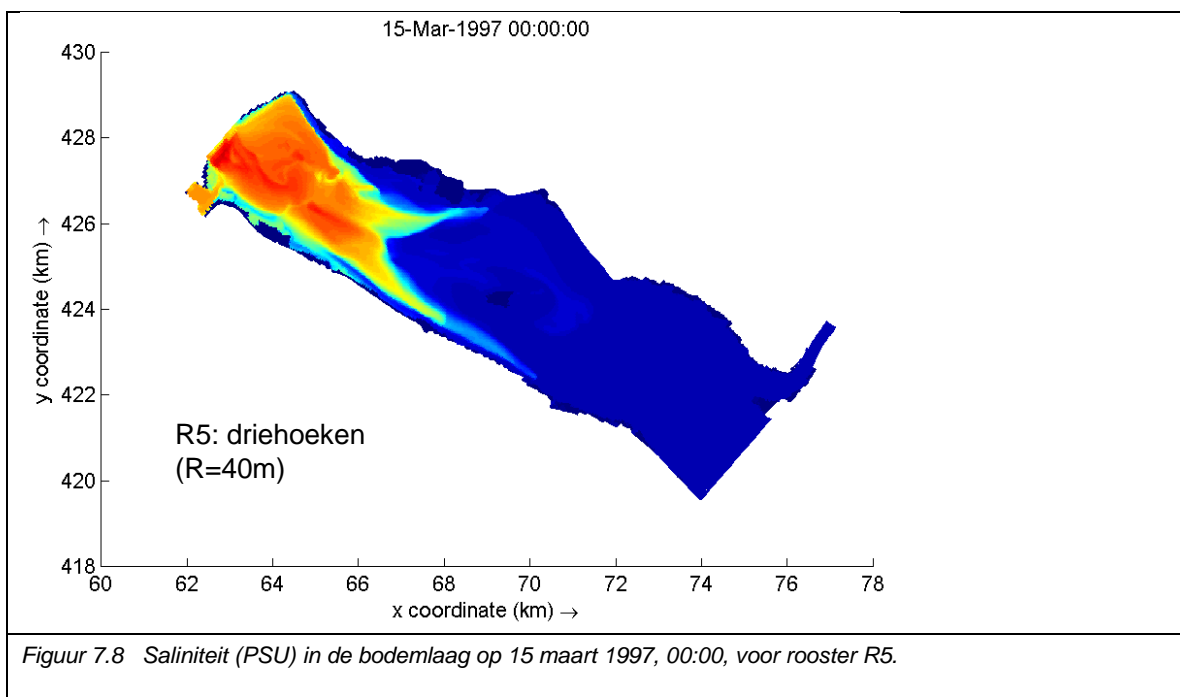


Figuur 7.4 Saliniteit (PSU) in de bodemlaag op 15 maart 1997, 00:00 (kort na het einde van de laatste vloed waarbij zout water werd ingelaten), voor rooster R1.



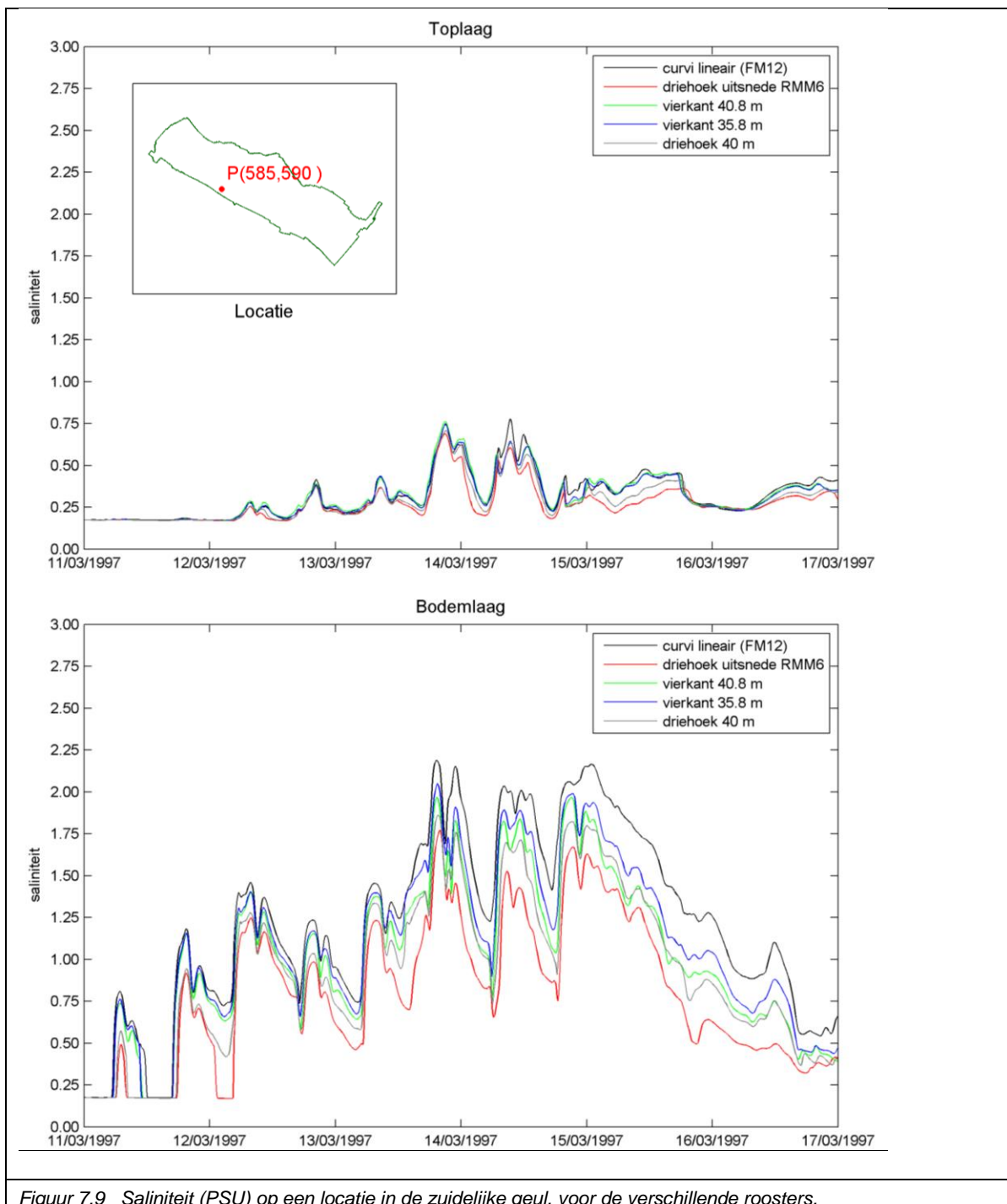
Figuur 7.5 Saliniteit (PSU) in de bodemlaag op 15 maart 1997, 00:00, voor rooster R2.





### 7.3.2 Ontwikkeling in de tijd

Figuur 7.9 geeft een beeld van de ontwikkeling van de saliniteit in de tijd op een vaste locatie in de zuidelijke geul. De figuur toont voor alle vijf de schematisaties de saliniteit in de toplaag en de bodemlaag.



Uit de tijdseries komt naar voren dat de saliniteit voor het driehoekenrooster R2, met zijde 62 m, lager is dan voor alle overige roosters. Voor het fijnmazige curvi-lineaire rooster R1 is de saliniteit het hoogst. De resultaten voor de twee vierhoekenroosters zijn ongeveer aan elkaar gelijk, met iets hogere saliniteitswaarden voor het rooster met de kleinste vierhoeken. Het rooster met de verkleinde driehoeken (R5, zijde 40 m) geeft resultaten die de resultaten van de vierhoekenroosters benaderen, al is met name tijdens de eb-fase op 12 maart de saliniteit nog wel iets duidelijk lager dan die berekend met de vierhoekenroosters.

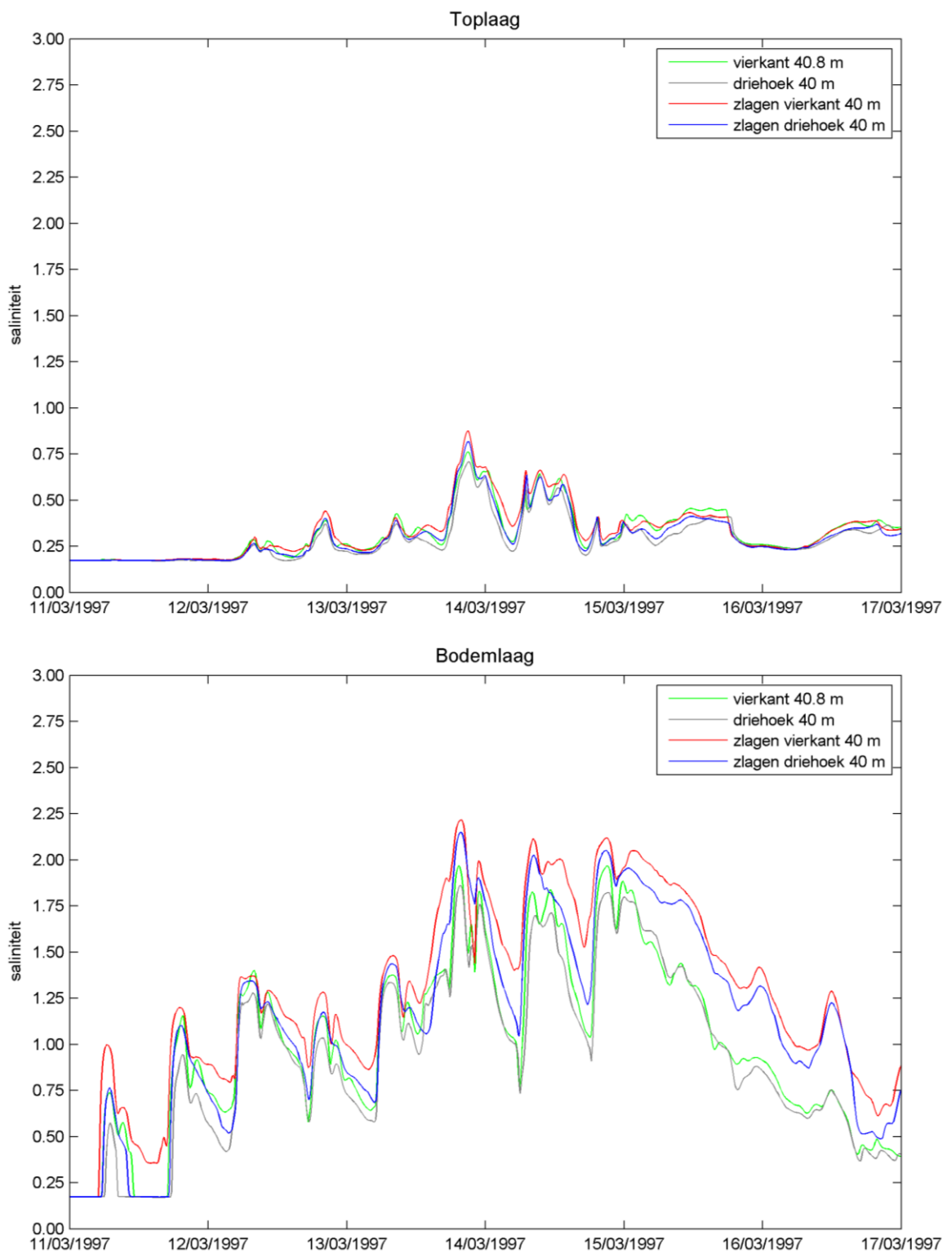
## 7.4 Effect van gebruik z-lagen

In de hierboven beschreven studie is gebruik gemaakt van sigma-lagen over de verticaal. Hierbij wordt voor iedere horizontale cel, de diepte opgedeeld in een gelijk aantal lagen. Bij ondiepe delen zijn daarmee de lagen dunner, dan bij diepere delen. Hiervoor is gekozen omdat het bestaande OSR+ model ook gebruik maakt van sigma-lagen.

Een alternatieve methode om de verschillen over de verticaal te kunnen beschrijven, is het gebruik van z-lagen. Hierbij wordt een vaste laagdikte gebruikt, en varieert bij andere bodemhoogte dus het aantal lagen.

Voor de twee roosters die het meest met elkaar in overeenstemming kwamen bij sigma-lagen (vierkant 40.5m (R3) en driehoekig (40m (R5)) is een model opgezet dat gebruik maakt van z-lagen. De laagdikte is vastgesteld op 1m, en waarvoor alle andere condities en randvoorwaarden gelijk zijn gehouden als voor de sommen met sigma-lagen.

In Figuur 7.10 wordt voor een locatie in de zuidelijke geul het zoutgehalte over tijd nabij de bodem en nabij het oppervlakte weergegeven voor de twee roostervormen, en voor zowel z-lagen als sigma-lagen. Te zien is dat z-lagen leiden tot een lichte verhoging van het zoutgehalte nabij de bodem, maar ook dat het driehoekige en het vierhoekige rooster iets verder uit elkaar gaan lopen, dan bij sigma-lagen.



Figuur 7.10 Saliniteit (PSU) op een locatie in de zuidelijke geul, voor een driehoekig en een vierhoekig rooster, gebruikmakend van ofwel z-lagen of sigma-lagen.

## 7.5 Discussie Haringvliet

### 7.5.1 Driehoeken versus vierhoeken

Een voor toekomstige roosterkeuzes relevante vraag is hoe de gevonden verschillen kunnen worden verklaard. Worden de verschillen veroorzaakt door roostereigenschappen, of spelen numerieke verschillen een rol?

De vergelijking tussen de driehoeken- en vierhoekenroosters laat zien dat gelijke celoppervlakken voor de twee roostersoorten niet zorgen voor gelijke resultaten. In deze testcase vinden we bij gelijk celoppervlak minder zoutindringing voor het driehoekenrooster. Ook bij gelijke lengte van de flowlinks zijn de saliniteitswaarden voor het driehoekenrooster lager. Pas bij vergelijkbaar aantal bodeminformatiepunten (netnodes) beginnen de resultaten van de driehoeken- en vierhoekenroosters goed op elkaar te lijken.

De verschillen en overeenkomsten tussen de resultaten lijken daarmee verklaard te worden door de mate waarin de bodeminformatie wordt meegenomen in de diverse schematisaties. Gezien de grote variaties in diepte in het Haringvliet, is het goed voorstelbaar dat een verschil in detailniveau van bodeminformatie in deze testcase tot verschil in resultaten leidt.

Mits er sprake is dat de roosterresolutie nog niet leidt tot convergente resultaten, kan er van uit worden gegaan dat meenemen van meer informatie nauwkeurigere resultaten geeft. Er kan dus worden gesteld dat voor het verkrijgen van resultaten met vergelijkbare nauwkeurigheid een rooster met driehoeken meer cellen nodig heeft dan een rooster met vierkanten. Ook het aantal netlinks en flowlinks komt daarbij hoger uit voor het driehoekenrooster dan voor het vierkantenrooster. Met name dit laatste leidt tot meer rekenacties per tijdstap voor het driehoekenrooster. Bovendien wordt de flowlinklengte korter, waardoor ook de tijdstap iets kleiner wordt (mits er geen andere delen van het model zijn die de tijdstap nog verder beperken, zoals verwacht in het volledige RMM-model). Om resultaten te verkrijgen met een driehoekenrooster die vergelijkbare nauwkeurigheid hebben als die van een vierkantenrooster, is dus voor het driehoekenrooster meer rekentijd nodig. Of naast verschillen in bodeminformatie ook numerieke verschillen een rol spelen, is met de huidige analyse nog niet vastgesteld of uitgesloten.

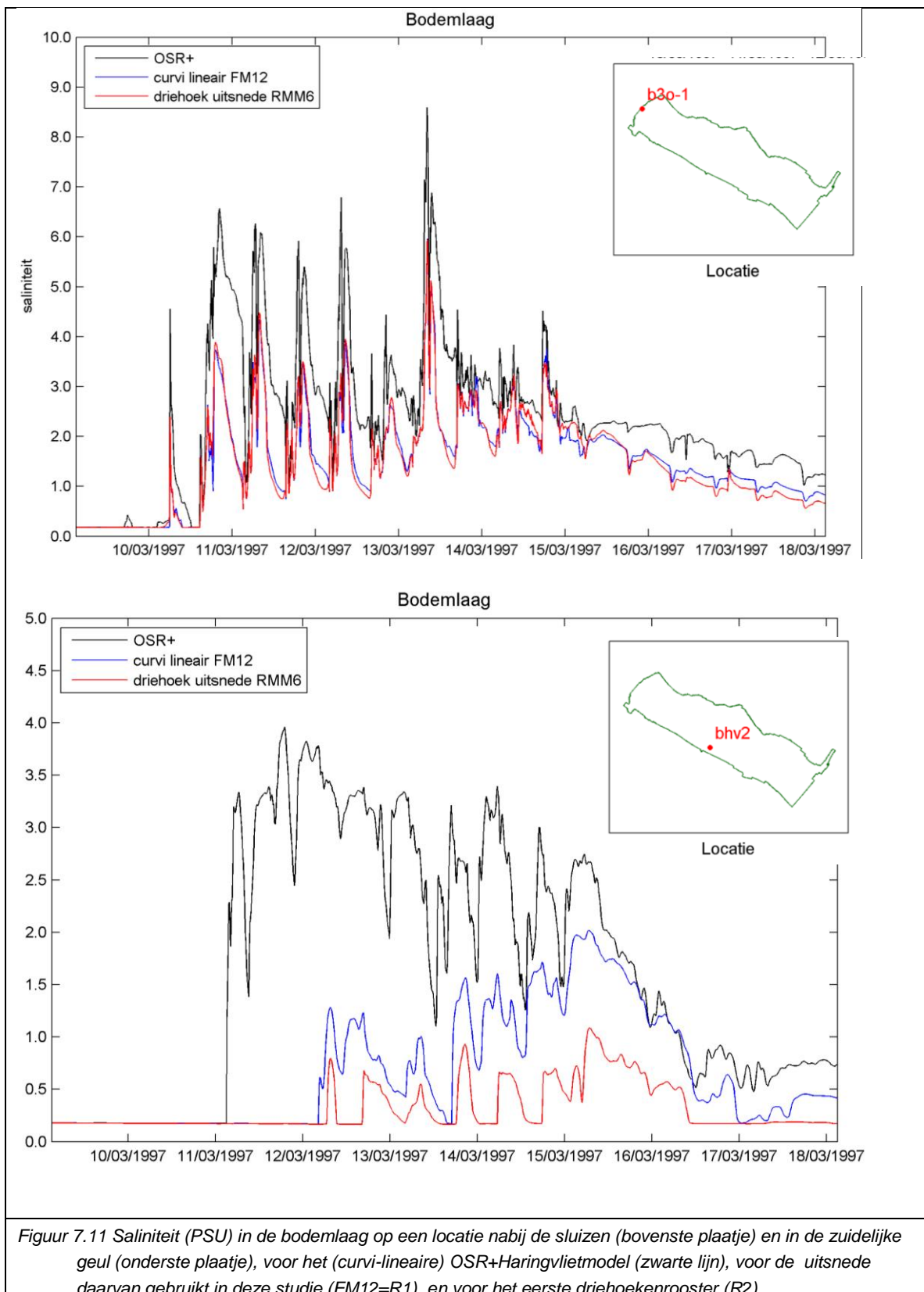
### 7.5.2 Relatie met het 'OSR+ Haringvliet' model

In de huidige studie naar verschillen tussen driehoeken en vierhoekenroosters is geen aandacht besteed aan vergelijking en kalibratie van de diverse modelschematisaties met meetdata. Om toch een idee te krijgen van hoe goed of slecht de diverse schematisaties zich verhouden tot de werkelijkheid, en hoe groot de kloof is die voorafgaand aan praktijktoepassingen met kalibratie en modelaanpassingen overbrugd zou moeten worden, bespreken we hier kort hoe de huidige schematisaties en resultaten zich verhouden tot de schematisatie en resultaten van het OSR+Haringvlietmodel. Dit is het grotere model dat in deze studie is gebruikt voor nesting, en dat eerder vergeleken is met data (gemeten zoutconcentraties en een afgeleide zoutbalans voor het hele Haringvliet).

Resultaten van een vergelijking van het uitgebreide OSR+ model met metingen lieten zien dat (na kalibratie op basis waterstanden van ruwheden en verliescoëfficiënten voor de Haringvlietluizen) de gemodelleerde zoutbalans voor het gehele Haringvliet redelijk overeenkomt met de zoutbalans op basis van gemeten zoutgehalten (Tiessen et al, 2017). Het zoutgehalte op individuele stations laat echter wel aanzienlijke verschillen zien (zie Bijlage D). Het gemodelleerde zoutgehalte is veelal lager dan de gemeten piekwaardes, terwijl daarnaast sprake is van een te grote mate van verticale menging. Het gebruik van z-



lagen (in plaats van sigma-lagen) leidt tot een lichtelijk verbeterde beschrijving van de zoutindringing zoals kort beschreven in paragraaf 7.4.



Figuur 7.11 toont resultaten van het curvi-lineaire rooster (R1) en van het eerste driehoekenrooster (R2) gebruikt in de tests, samen met die van de grotere modelschematisatie OSR+. Het betreft de saliniteit voor een locatie direct oostelijk van de sluizen en de eerder gebruikte locatie in de zuidelijke geul (een vergelijking met gemeten zoutgehalten op deze locatie is gepresenteerd in Bijlage D). Het belangrijkste dat opvalt, is dat de saliniteit in de locatie nabij de sluizen in OSR+ aanzienlijk hoger is dan in de overige schematisaties, en dat het zout de locatie in de zuidelijke geul ook eerder bereikt en aanzienlijk hoger is.

Het verschil tussen OSR+ en het curvi-lineaire rooster R1, dat een uitsnede is uit OSR+, wordt naar verwachting verklaard door de wijze van nesting. Hierbij is de saliniteit uit OSR+ in het midden van de waterkolom (laag 5) in cellen net ten westen van de sluizen gebruikt als randvoorwaarde over de hele diepte voor de testschematisaties. Het debiet door de kering is gelijk aan het OSR+ model, maar de verdeling over de verticaal is niet overgezet naar het R1 uitsnede-model, waardoor de verdeling van de stroming over de verticaal niet overeenkomt met het grote model OSR+. Samen zorgt dit ervoor dat er minder zout in de testmodellen aanwezig is, en dat het zout de locatie in de zuidelijke geul ook pas een dag later bereikt.

Merk op dat van de verschillende testschematisaties de resultaten van het curvi-lineaire rooster R1 het dichtst bij die van OSR+ liggen. Bovenop de afwijking ten gevolge van de randvoorwaarden introduceren de overige testschematisaties dus extra afwijkingen, waarbij die van het driehoekenrooster R2 het grootste zijn.

## 7.6 Conclusie Haringvliet

Deze testcase voor het Haringvliet laat zien dat met driehoekenroosters resultaten gehaald kunnen worden die vergelijkbaar zijn met die van vierhoekenroosters. Daarvoor is het dan wel nodig een vergelijkbare hoeveelheid bodeminformatie mee te nemen. Dat leidt ertoe dat het driehoekenrooster meer en kortere flowlinks zal hebben dan het vierkantenrooster. Dit gaat ten koste van de rekentijd.

## 8 Conclusies, discussie en aanbevelingen

### 8.1 Conclusies

- 1 Er zijn in het algemeen slechts kleine verschillen tussen regelmatige (gelijkzijdige) driehoekige en vierhoekige roosters voor zoutindringing in 3D-modellen met D-Flow FM. Het is daarmee mogelijk om naast kromlijnige en regelmatige vierhoekige rooster ook gebruik te maken van regelmatige driehoekige rooster voor 3D berekeningen van stoftransport (zoals zout).
- 2 Een nadeel van het gebruik van regelmatige driehoekige roosters, en dit geldt ook voor 2D, is dat een driehoekig rooster inherent gebruik maakt van minder bodempunten. Voor een vergelijkbare representatie van de bodem (of aantal bodempunten), zijn de rekencellen kleiner qua oppervlakte en rib-lengte. Kleinere rekencellen in combinatie met een groter aantal rekencellen, leidt tot een toename in de rekentijd. In hoeverre deze daadwerkelijk toeneemt is afhankelijk van de domein-karakteristieken.
- 3 De beschrijving van de zoutindringing is het beste als geulen in het modelgebied door het rooster gevolgd worden. In veel gevallen zijn kromlijnige roosters het beste geschikt om geulen te volgen. Dat hangt echter af van de karakteristieken van het modelgebied, b.v. in het Haringvliet zou het vanwege het complexe geulenpatroon met een puur kromlijnig rooster niet mogelijk zijn om alle geulen goed te volgen. Er zou een combinatie met driehoeken gemaakt moeten worden. Verfijning (eventueel lokaal) van regelmatige roosters leidt tot vergelijkbare resultaten als bij een geulvolgend curvilineair rooster, maar dit gaat ten koste van de rekentijd.
- 4 Tot slot is de ontwikkeling van de software voor 3D-modellering met D-Flow FM nog niet afgerond. De software heeft momenteel de zogeheten alfa- (prototype) status, wat betekent dat een aantal onderdelen verder verbeterd of geïmplementeerd (o.a. kunstwerken) dienen te worden. In het bijzonder betreft dit de soms niet-fysische modelresultaten die optreden in de schaalproeven (niet recht zoutfront) en de ROFI van het Noordzeemodel.

### 8.2 Discussie

- 1 Resultaten voor met name het Haringvlietmodel (Hoofdstuk 5) laten zien dat driehoekige roosters niet alleen een hogere resolutie vereisen om een vergelijkbaar aantal bodempunten te geven (en daarmee meer rekentijd vereisen dan regelmatige driehoekige cellen), maar ook dat (roostervorm onafhankelijk) een verfijning van het rooster leidde tot iets andere zoutindringingspatronen. Dezelfde conclusie geldt ook voor het Noordzeemodel. Voor dit model geldt dat bodemvariatie minder van belang is, mede omdat voor dit gebied het juist gaat om de verspreiding van het zoetere water aan het wateroppervlakte. Daarom is een gevoeligheidsonderzoek van modelresultaten voor de horizontale roosterresolutie van belang voor de zoutindringing.
- 2 Daarnaast lieten de resultaten voor de Grevelingen test (Hoofdstuk 6) en de opgeschaalde schaalproeven (Paragrafen 4.4 en 4.5) zien dat de juiste bodemrepresentatie erg belangrijk is voor een accurate zoutverspreiding in het gebied. Wanneer gebruik wordt gemaakt van een relatief grof rooster is het met betrekking tot zoutverspreiding cruciaal om de modelmatige bodemhoogte (putten en drempels) overeen te laten komen met wat lokaal in werkelijkheid is gemeten.
- 3 De gemodelleerde zoutindringing in het Haringvliet (Hoofdstuk 5) is daarnaast aanzienlijk lager dan was gemeten tijdens de Inlaatproef uit 1997, door het opleggen van vereenvoudigde randvoorwaarden. Dit heeft naar alle waarschijnlijkheid geen invloed gehad op de conclusies, omdat er ook bij vereenvoudigde randvoorwaarden een

- forse hoeveelheid zout het Haringvliet is ingestroomd. De verschillen tussen de verschillende rekenroosters lijken hoofdzakelijk gerelateerd aan de bodemrepresentatie.
- 4 Omdat de software voor 3D modellering nog in een pre-productie fase is, is het mogelijk dat de nauwkeurigheid van de modelresultaten in dit onderzoek wordt beïnvloed door artefacten in de numerieke methode (bijvoorbeeld voor Noordzee, Hoofdstuk 5). De mate waarin modelresultaten worden beïnvloed door het gekozen roostertype kan daarmee iets minder goed beoordeeld worden.
  - 5 Met het oog op het ontwikkelingsstadium van 3D modellering met D-HYDRO / D-FLOW FM, is het van belang de bevindingen zoals die in dit rapport worden genoemd, opnieuw te evalueren wanneer een productieversie van de software beschikbaar is.

### 8.3 Aanbevelingen

- 1 Bij de inventarisatie van het effect van verschillende roostertypen zijn verschillende roostervormen gebruikt. De resultaten laten zien dat ook het gebruik van driehoekige roosters mogelijk is voor het beschrijven van zoutindringing in 3D. De keuze tussen de verschillende roostervormen is daarmee echter niet beperkt, en de afweging voor de getoetste roostervormen is een afweging van verschillende roostereigenschappen:
  - Kromlijinig:
    - Mogelijkheid om (hoofd)geulen te volgen (mits het patroon daarvan niet te complex is)
    - Beperkte mogelijkheden voor uitlijning met kusten of kunstwerken (zonder ook gebruik te maken van veel onregelmatige driehoekige cellen)
  - Regelmatig vierhoekig:
    - Niet geulen volgend (en daardoor meer “trapjeslijnen” in stroming)
    - Geen uitlijning met kusten of kunstwerken (zonder ook gebruik te maken van veel onregelmatige driehoekige cellen)
  - Regelmatig driehoekig:
    - Niet geulen volgend (maar minder scherpe “trapjeslijnen” dan voor regelmatig vierhoekig rooster)
    - Door toepassing van een onregelmatige driehoekige overgangszone uit te lijnen op kusten en kunstwerken minder onregelmatige cellen nodig dan voor vierhoekige rooster
    - Voor vergelijkbare bodemrepresentatie: Noodzaak voor kleinere cellen dan vierhoekige roosters
- 2 Uit de resultaten zoals die in dit rapport zijn beschreven kunnen enkele adviezen worden afgeleid over de gewenste manier om tot een rekenrooster voor een modelschematisatie te komen. Dit zou (ongeveer) de volgende stappen moeten bevatten:
  - Inventarisatie van de functionaliteiten en processen die een modelschematisatie moeten kunnen beschrijven (bijvoorbeeld 3D zoutindringing), als ook de geometrie van het gebied en de stromingscondities.
  - Afweging wensen om tot een principekeuze te komen van de modelroostervorm (dit kan verschillend zijn voor verschillende deelgebieden):
    - Kromlijinig
    - Hoofdzakelijk regelmatig vierhoekig
    - Hoofdzakelijk regelmatig driehoekig
  - Volgend op de hierboven beschreven gefundeerde eerste afweging, is het gewenst om behulp van een aantal convergentie-, kalibratie en validatietesten te onderzoeken of een schematisatie geschikt is voor het beschrijven van

bepaalde processen en in hoeverre de schematisatie voldoet aan de eisen op gebied van reketijden. Dit kan leiden tot aanpassingen in:

- Roosterresolutie
  - Aantal rekencellen
  - Locaties van overgangszones tussen verschillende celtypen (onregelmatige cellen zo veel mogelijk in gebieden met lage stroomsnelheden)
- Definitief maken rekenrooster aan de hand van de testresultaten in combinatie met een afweging van functionaliteits- en proceseisen (zoals reketijden)

Het onderzoeken van de gevoeligheid van modelresultaten van de rekenroosters voor een bepaalde toepassing is gewenst om tot een onderbouwde afweging te komen van de verschillende belangen. Het uitvoeren van enkele nauwkeurigheidstesten waarbij het rooster wordt vergrofd of verfijnd op regelmatige roosters binnen D-HYDRO is relatief eenvoudig uit te voeren.

## 9 Referenties

- Deltares, 2018: D-Flow Flexible Mesh User manual. Version 1.21 SVN revision 55248. 19 mei 2018.
- Groenenboom en Tiessen, 2018: Oosterschelde: Effect van rekenroosters op stroompatronen. Deltares-memo 11202221-008-ZKS-0003, 4 juni 2018.
- Kernkamp, 2015: D-Flow Flexible Mesh computations in Rotterdam using sigma, sigma with anti creep and a Z-layer. Memo 12 December 2015.
- Nabi, 2017a: Validation with D-Flow Flexible Mesh for Lock exchange flow (part of D-Flow FM Validation document). Memo 8 december 2017.
- Nabi, 2017b: Validation with D-Flow Flexible Mesh for the tidal flume (part of D-Flow FM Validation document). Memo 8 December 2017.
- Nabi, 2017c: Validation with D-Flow Flexible Mesh for the vertical mixing layer by splitter plate (part of D-Flow FM Validation document). Memo 13 december 2017.
- Spruyt, Minns, Zijl, Yossef, Van der Kaaij en De Goede, 2017: Ontwikkeling van zesde-generatie modellen met D-HYDRO; Generieke technische en functionele specificaties. Deltares/RWS-rapport 11200569-000-ZWS-0028. September 2017.
- Tiessen, Van der Kaaij en Plieger, 2017: Voortgangsoverleg: Ontwikkeling 3D model Haringvliet zoutindringing. Presentatie 30 november 2017
- Zijl en Nolte, 2006: Effect van ingebruikname Flakkeese spuisluis op de hydrodynamica en waterkwaliteit van het Grevelingenmeer. WL | Delft Hydraulics, projectnummer Z4161
- Zijl en Van Dam, 2017: Projectvoorstel acceptatietesten 3D Delft3D-Flexible Mesh. Memo d.d. 24 augustus 2017.

## A Modelinstellingen voor verschillende tests

In deze bijlage worden de gebruikte numerieke instellingen en een aantal fysische parameters opgesomd. Voor de numerieke instellingen zijn in Paragraaf 3.1 defaultwaarden aangegeven. De fysische parameters kunnen per toepassing verschillen.

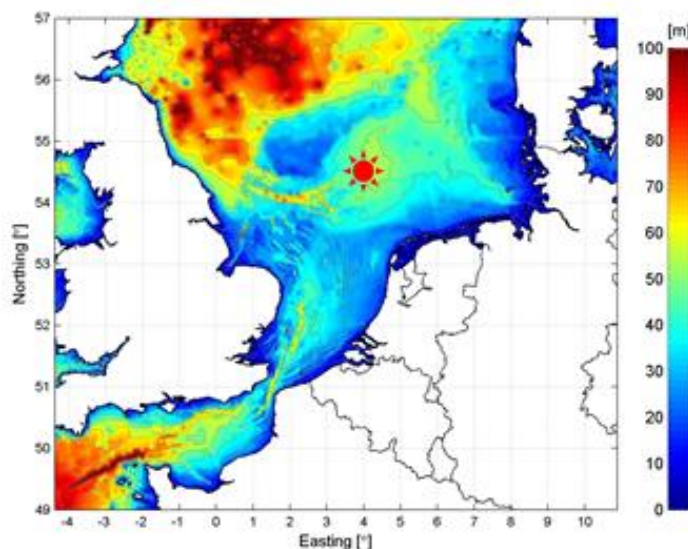
Uit de onderstaande tabel blijkt dat alleen bij het Noordzeemodel een afwijkende keuze op het gebied van numerieke instellingen is toegepast, voor keyword *Vertadvtypmom*. Dit komt omdat er al (rekenintensieve!) simulaties met het Noordzeemodel waren uitgevoerd voordat het voorliggende project begon. Deze afwijkende keuze voor de discretisatie van de verticale advectie in de impulsvergelijking heeft geen invloed op de conclusies, o.a. omdat in alle Noordzeesimulaties dezelfde parameter is toegepast. Voor fysische instellingen is zijn wel verschillende instellingen toegepast voor de verschillende testen, gebaseerd op bestaande modelschematisaties.

Term	Default waarden	Schematische testen		Praktijktesten		
		Getijgoot Lock Exchange Splitterplaat	Noordzee	Haringvliet	Grevelingen	
<b>Numerieke instellingen</b>						
<i>CFLMax</i>	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	
<i>AdvecType</i>	33	33	33	33	33	
<i>TimeStepType</i>	2	2	2	2	2	
<i>Limtyphu</i>	0	0	0	0	0	
<i>Limtypmom</i>	4	4	4	4	4	
<i>Limtypsa</i>	4	4	4	4	4	
<i>TransportMethod</i>	1	1	1	1	1	
<i>TransportTimestepping</i>	1	1	1	1	1	
<i>Vertadvtypmom</i>	3	3	6	3	3	
<i>Vertadvtypsal</i>	6	6	6	6	6	
<i>Vertadvtypem</i>	6	6	6	6	6	
<i>Turbulencemodel</i>	3	3	3	3	3	
<i>Turbulenceadvection</i>	3	3	3	3	3	
<i>AntiCreep</i>	0	0	0	0	0	
<b>Instellingen m.b.t. fysica</b>						
<i>Vicouv</i>	1.0	0.0	0.1	1.0	0.25	
<i>Dicouv</i>	1.0	0.0	0.1	1.0	0.25	
<i>Vicoww</i>	0.00005	0.0	0.0	0.0	0.00	
<i>Dicoww</i>	0.00005	0.0	0.0	0.0	0.00	
<i>Smagorinsky</i>	0.15	0.0	0.2	0.15	0.00	

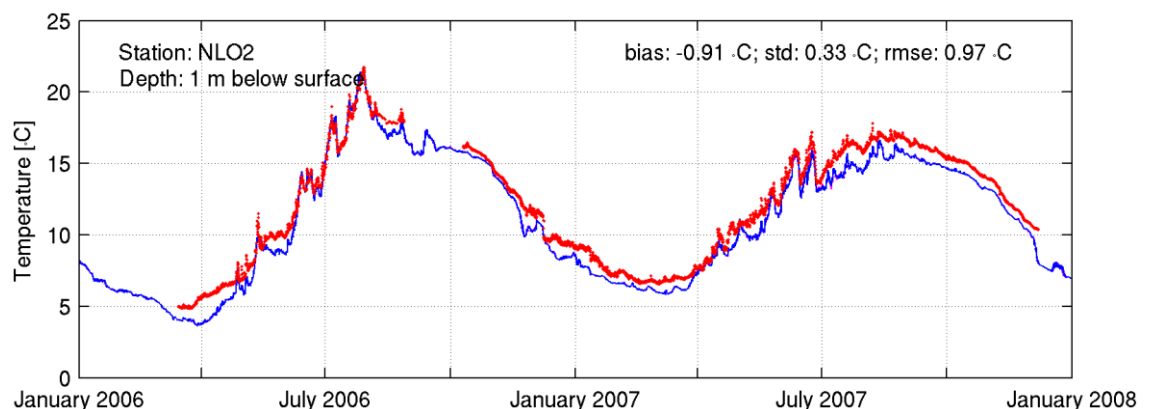
## B Noordzee: Vergelijking oppervlakte temperatuur

In wordt de locatie getoond van een station waar zowel bodem als oppervlakte temperatuur gemeten wordt (op 1m en 35m onder het wateroppervlak). Deze meetlocatie ligt in het midden van de Noordzee, ver ten noorden van het verdriehoekte gebied. Het effect van het verdriehoekte rooster is naar verwachting dan ook zeer beperkt.

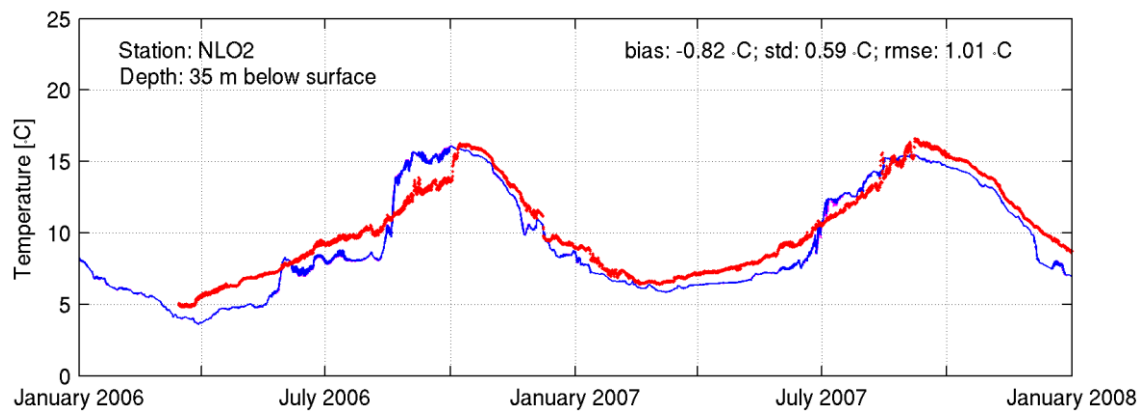
In (1m onder het wateroppervlak) en (35m onder het wateroppervlak) worden deze tijdreeksen geplot en vergeleken met de modelresultaten (blauw: driehoekig rooster; magenta: rechthoekig rooster; rood: metingen).



Figuur 9.1 Locatie van station NL02, waar watertemperatuur gemeten wordt op 1m en 35 m diepte.



Figuur 9.2 Zoutgehalte op 1 m onder het wateroppervlak op station NL02 (rood: metingen; blauw: driehoeken; magenta: vierkanten).



Figuur 9.3 Zoutgehalte op 35 m onder het wateroppervlak op station NL02 (rood: metingen; blauw: driehoeken; magenta: vierkanten).

Omdat de modelresultaten nauwelijks van elkaar verschillen is de magenta lijn (rechthoekig rooster) nauwelijks zichtbaar in bovenstaande figuren. Het vergelijken van de meetresultaten met zowel de modeluitkomsten met een rechthoekig als driehoekig rekenrooster, plaatst het verschil tussen beide modelsommen in deze praktijktest in perspectief.

In wordt de modelkwaliteit van de berekende temperatuurstratificatie in het 3D DCSM-FM model, uitgedrukt in bias, standaarddeviatie (std) en Root-Mean-Square-Error (RMSE) getoond.

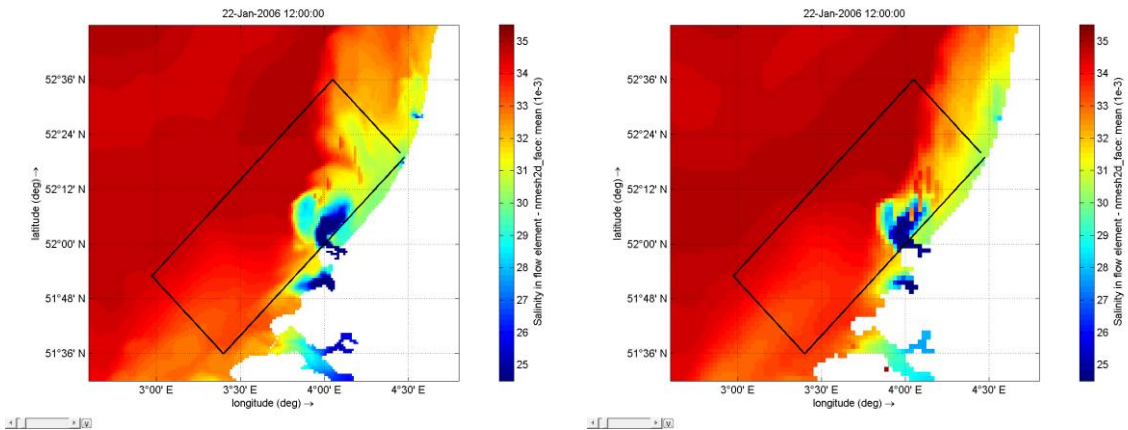
Tabel 9.1 Modelkwaliteit van de berekende temperatuurstratificatie in het 3D DCSM-FM model, uitgedrukt in bias, standaard deviatie (std) en Root-Mean-Square-Error (RMSE).

	bias (°C)		std (°C)		RMSE (°C)	
	vierkanten	driehoeken	vierkanten	driehoeken	vierkanten	driehoeken
Oppervlak (1m)	-0.91	-0.91	0.33	0.33	0.97	0.97
Bodem (35 m)	-0.82	-0.82	0.59	0.59	1.02	1.01
Verschil (O-B)	0.07	0.05	1.38	1.38	1.38	1.38

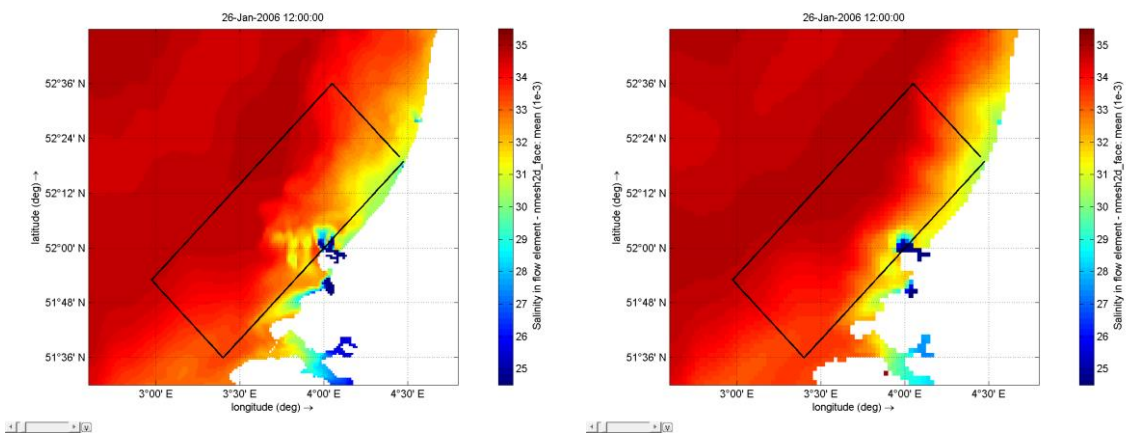
Uit bovenstaande statische kentallen blijkt dat de modelkwaliteit tussen het netwerk met vierkanten en het netwerk met driehoeken zeer vergelijkbaar is. Hierbij wordt opgemerkt dat de beschouwde locatie (bij gebrek aan geschiktere locaties) niet in het gebied ligt waar aanpassingen aan het rooster gedaan zijn en daarom een beperkte waarde heeft.



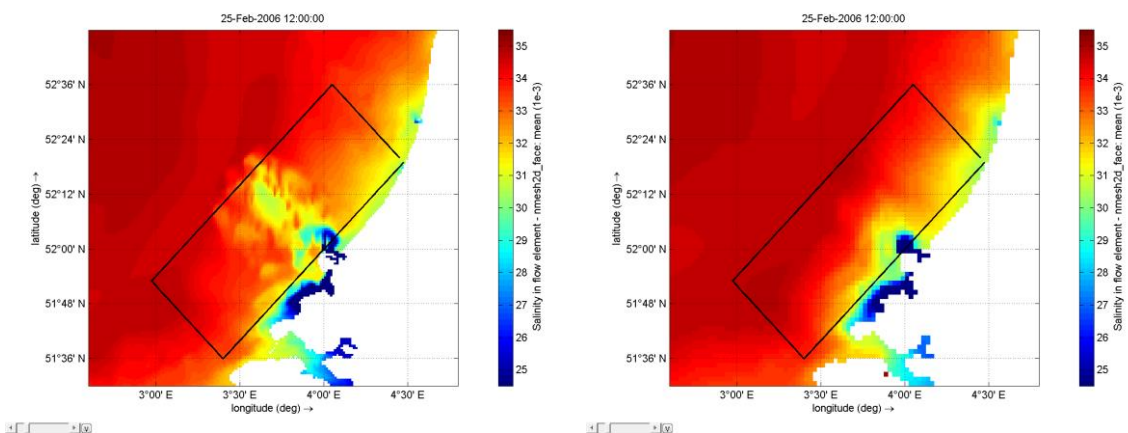
## C Noordzee: Vergelijking roosterresolutie vierhoekige roosters



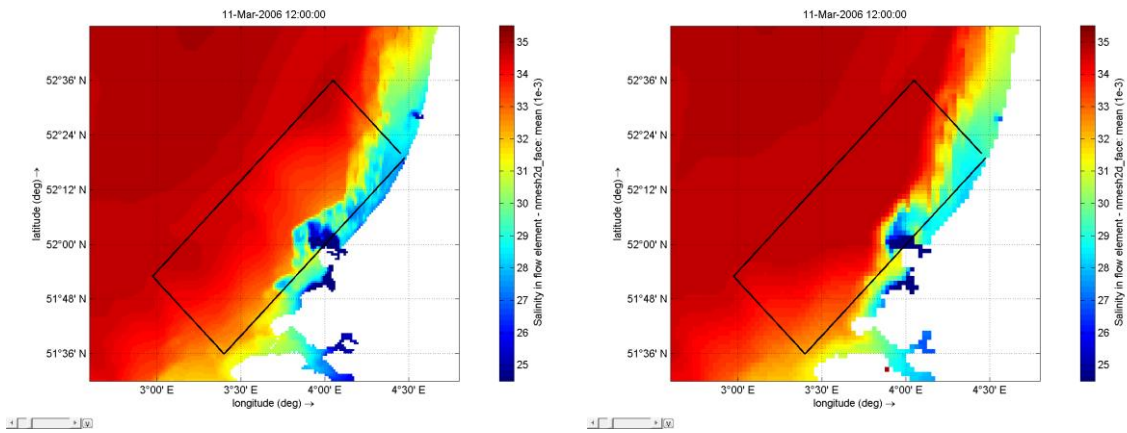
Figuur 9.4 Berekende oppervlakte saliniteit op 22-01-2006 met het originele vierhoeken rooster (links) en het 2x2 vergrofte vierhoeken rooster (rechts).



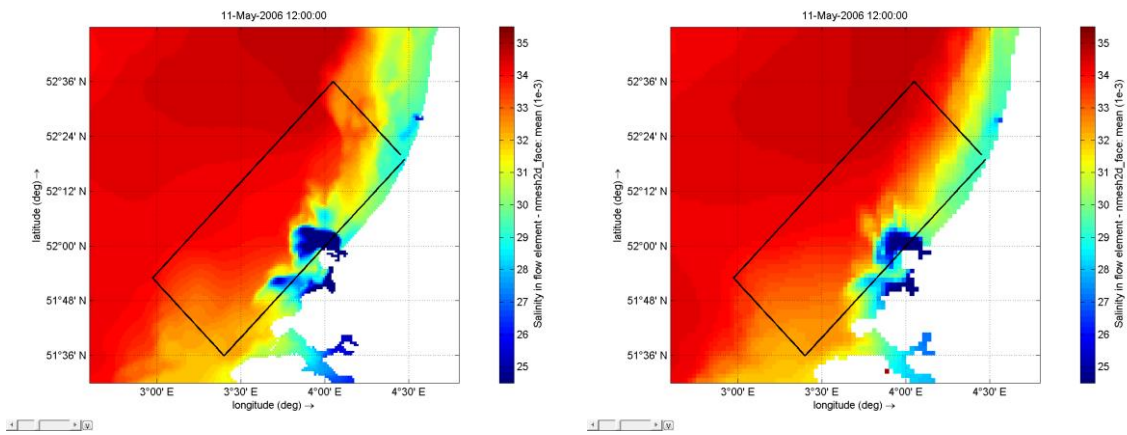
Figuur 9.5 Berekende oppervlakte saliniteit op 26-01-2006 met het originele vierhoeken rooster (links) en het 2x2 vergrofte vierhoeken rooster (rechts).



Figuur 9.6 Berekende oppervlakte saliniteit op 25-02-2006 met het originele vierhoeken rooster (links) en het 2x2 vergrofte vierhoeken rooster (rechts).



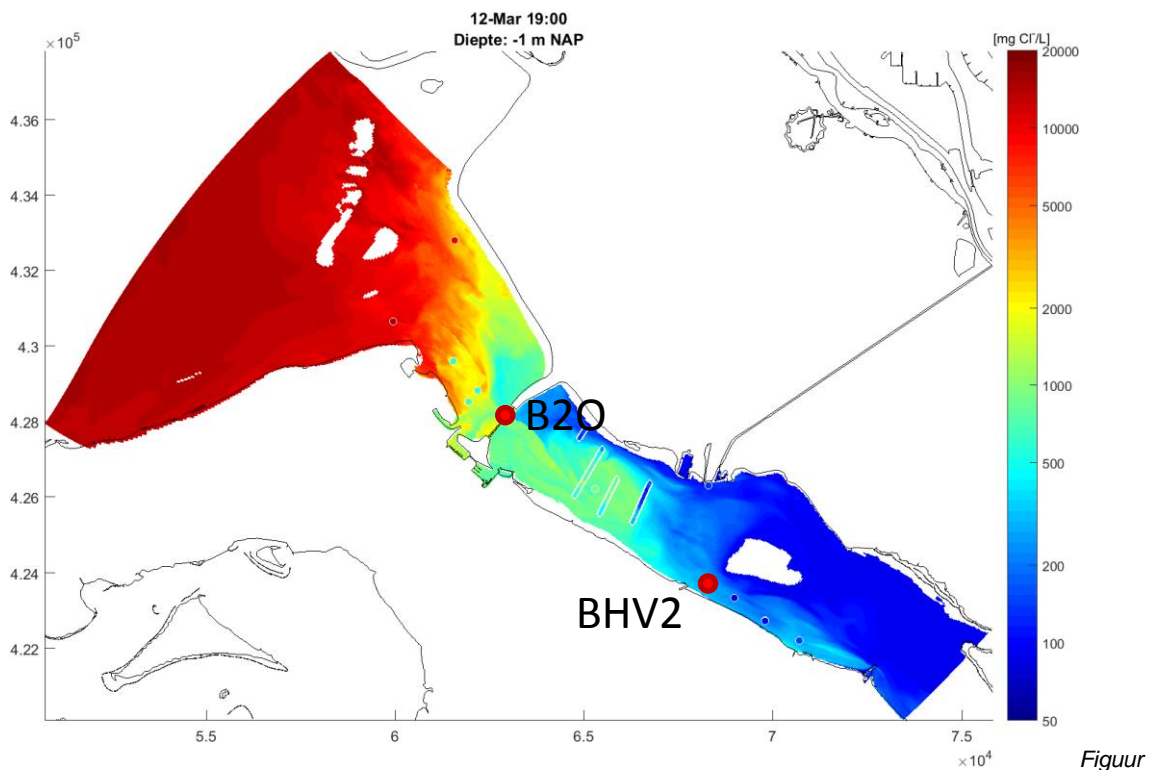
Figuur 9.7 Berekende oppervlakte saliniteit op 11-03-2006 met het originele vierhoeken rooster (links) en het 2x2 vergroefde vierhoeken rooster (rechts).



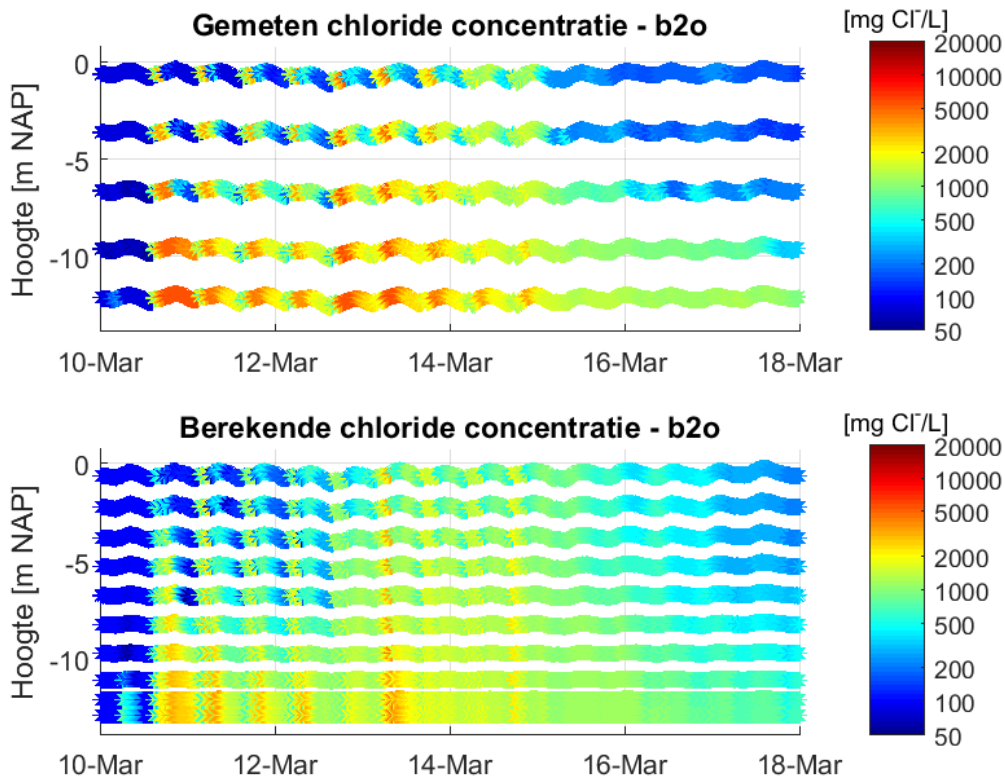
Figuur 9.8 Berekende oppervlakte saliniteit op 11-05-2006 met het originele vierhoeken rooster (links) en het 2x2 vergroefde vierhoeken rooster (rechts).

## D Haringvliet: Vergelijking met metingen

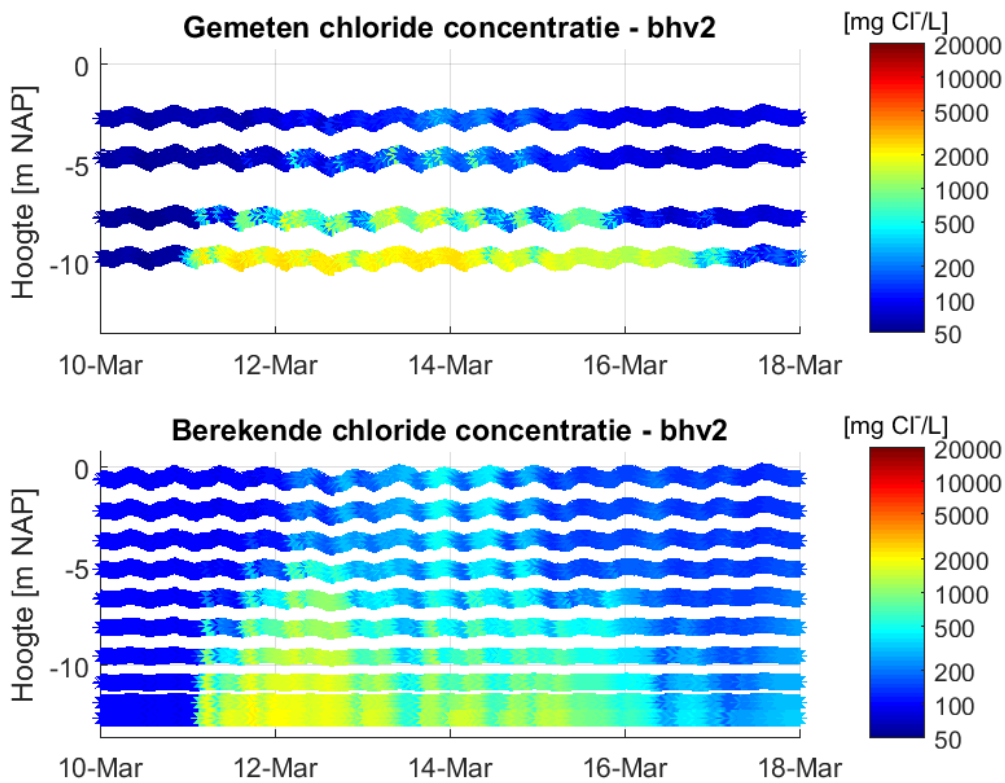
Hieronder is voor een tweetal locaties de zoutverspreiding volgens het grootschalige OSR+ model te zien in vergelijking met metingen. Deze figuren zijn afkomstig uit een eindejaarspresentatie van het project 3D model zout Haringvliet 2017 (11200567). Een uitsnede van het OSR+ model dat het Haringvliet beschrijft is gebruikt voor de roostervergelijking, beschreven in Hoofdstuk 5. Daarnaast zijn de resultaten van het OSR+ model gebruikt als randvoorwaarden voor de roostervergelijking.



9.9 Bestudeerde meetlocaties in het Haringvliet



Figuur 9.10 Vergelijking tussen het gemeten en gemodelleerd (OSR+) zoutgehalte (op logaritmische schaal) voor locatie B20.



Figuur 9.11 Vergelijking tussen het gemeten en gemodelleerd (OSR+) zoutgehalte (op logaritmische schaal) voor locatie BHV2.