

Modelleren van de hydrodynamica van de haven van Noordpolderzijl

Een vergelijking tussen Delft3D Flow en D-Flow FM



De haven van Noordpolderzijl

By: Walttertje, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2915809>

Eindopdracht Bachelor Civiele Techniek

Joep Rawee

s1590138

Universiteit Twente

Begeleider:

Bas Borsje

Universiteit Twente

Afdeling Water Engineering
and Management (WEM)

Externe Begeleider:

Luitze Perk

WaterProof

**UNIVERSITY
OF TWENTE.**



VOORWOORD

Deze bachelor eindopdracht dient als afronding van de Bachelor Civiele Techniek van de Universiteit Twente. Gedurende 10 weken van april 2017 tot en met juni 2017 heb ik deze eindopdracht uitgevoerd. Tijdens deze periode heb ik een vergelijking gemaakt tussen Delft3D en Delft3D Flexible Mesh door ze toe te passen op de haven van Noorpolderzijl. Het onderzoek heb ik uitgevoerd bij het bedrijf WaterProof.

Ik wil Luitze Perk en Kimberley Koudstaal van WaterProof graag bedanken voor het beantwoorden van mijn vragen, het geven van feedback en het op gang helpen als ik vast liep. Ook andere collega's van WaterProof wil ik bedanken voor de fijne tijd die ik heb gehad bij het bedrijf. Daarnaast wil ik mijn begeleider van de universiteit Twente, Bas Borsje, bedanken voor het geven van feedback en adviezen om het onderzoek en het rapport te verbeteren.

Joep Rawee

Juli 2017

SAMENVATTING

Delft3D is al een lange tijd beschikbaar om stromingen in een watersysteem numeriek te modelleren. In 2016 is een opvolger van Delft3D uitgekomen genaamd Delft3D Flexible Mesh (FM). Het belangrijkste verschil tussen Delft3D en Delft3D FM is het rekenrooster. Delft3D kan slechts gebruik maken van gestructureerde rekenroosters, zoals rechthoekige en curvi lineaire rekenroosters. Delft3D FM kan daarnaast ook gebruik maken van ongestructureerde rekenroosters, zoals driehoekige roosters. Het voordeel van ongestructureerde rekenroosters is dat ze meer flexibiliteit bieden waardoor het modeldomein gemakkelijker beschreven kan worden.

Het doel van dit onderzoek is om een compleet overzicht te geven van de verschillen tussen de stromingsmodules van Delft3D en Delft3D FM. De stromingsmodules van beiden (Delft3D FLOW en D-Flow FM) kunnen gebruikt worden voor het onderzoeken van waterstanden en stroomsnelheden. Om de verschillen tussen Delft3D en Delft3D FM te onderzoeken zijn ze toegepast op de haven van Noordpolderzijl. Dit is een kleine zeehaven in de provincie Groningen die alleen bereikt kan worden door een zeer smalle geul (<20 m) in de Waddenzee.

Met name vanwege het recent introduceren van Delft3D FM is er nog weinig bekend over het toepassen van de software, waardoor er nog geen compleet overzicht is van de verschillen met Delft3D. Door het analyseren van de verschillen tussen Delft3D en Delft3D FM wordt het duidelijk wat mogelijke overwegingen zijn om Delft3D FM wel of niet toe te passen. Er zijn verschillen onderzocht in drie categorieën: Toepasbaarheid, accuraatheid en rekentijd. Het onderzoek is samen te vatten in het volgende onderzoeksdoel:

Het analyseren van de verschillen in accuraatheid, rekentijd en toepasbaarheid tussen Delft3D en Delft3D FM, toegepast in de haven van Noordpolderzijl, waardoor mogelijkheden en eventuele voor en/of nadelen van Delft3D FM in kaart worden gebracht.

Allereerst is een literatuuronderzoek naar de verschillen tussen Delft3D en Delft3D FM gedaan. De belangrijkste uitkomst is dat in Delft3D FM het gebruik van een ongestructureerd rekenrooster een stuk meer flexibiliteit biedt. Hierdoor kan mogelijk de accuraatheid van een model verhoogd worden en, door betere mogelijkheden voor optimalisatie, de rekentijd verlaagd. Wel vereist het gebruik van een ongestructureerd rekenrooster een andere numerieke oplossingsmethode, wat kan resulteren in een verlies in efficiëntie (langere rekentijd) ten opzichte van Delft3D.

Na een inventarisatie van de beschikbare literatuur zijn drie verschillende modellen in Delft3D FM opgesteld die zijn toegepast op de casus. Deze zijn vergeleken met een Delft3D model. De modellen in Delft3D FM zijn voornamelijk gevarieerd in het rekenrooster. Zo is er in de modellen gebruik gemaakt van hetzelfde rekenrooster als in Delft3D, een gedeeltelijk ongestructureerd rekenrooster en van een volledig ongestructureerd (driehoekig) rekenrooster.

De meeste gevonden verschillen in toepasbaarheid zijn gerelateerd aan het rekenrooster. Het flexibele rekenrooster in Delft3D FM biedt veel mogelijkheden om gebieden optimaal te beschrijven. Delft3D biedt een stuk minder flexibiliteit, daarom zijn er in Delft3D minder mogelijkheden om het rekenrooster in complexe gebieden te optimaliseren. Dit maakt het opstellen van een rooster gecompliceerder.

De verschillende modellen in Delft3D en Delft3D FM zijn in accuraatheid vergeleken. Over het algemeen geven de modellen in Delft3D FM vergelijkbare waterstanden en stroomsnelheden als het Delft3D model. Het model met een gedeeltelijk ongestructureerd rekenrooster in Delft3D FM lijkt een verbetering te geven ten opzichte van Delft3D, maar dit ligt waarschijnlijk vooral aan een niet ideale beschrijving van de geul in Delft3D. Het is waarschijnlijk dat Delft3D vergelijkbare resultaten geeft

wanneer het rekenrooster verbeterd wordt. Wat in ieder geval duidelijk wordt uit het resultaat van de casus is dat een (gedeeltelijk) ongestructureerd rekenrooster een vergelijkbare accuraatheid heeft als een gestructureerd rekenrooster in Delft3D.

De rekentijd van twee van de drie modellen in Delft3D FM is lager dan die van Delft3D. Alleen het model in Delft3D FM met een volledig ongestructureerd rekenrooster heeft een beduidend hogere rekentijd dan Delft3D. Het gebruik van een volledig ongestructureerd (driehoekig) rekenrooster blijkt dus niet efficiënt. Verder duiden een aantal eigenschappen (zoals de tijdstap van de numerieke oplossing) van de modellen in Delft3D FM mogelijk op een hogere rekentijd in andere toepassingen. De lagere gevonden rekentijd van Delft3D FM lijkt gedeeltelijk veroorzaakt door eigenschappen van de casus, in andere toepassingen is het verschil in rekentijd wellicht anders.

Wanneer er een overzicht gemaakt wordt van de verschillen in Delft3D en Delft3D FM lijkt vooral de toepasbaarheid verbeterd in FM. In het algemeen is in dit onderzoek gevonden dat de accuraatheid vergelijkbaar is met Delft3D. Verder kan de rekentijd in Delft3D FM lager zijn dan in Delft3D, maar sommige eigenschappen duiden op een mogelijke verhoging in rekentijd in andere toepassingen (buiten de toepassing Noordpolderzijl).

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	ii
Samenvatting.....	iii
1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond, casus en aanleiding	1
1.2 Relevantie van het onderzoek.....	3
1.3 Probleemstelling, onderzoeksdoel en onderzoeksvragen.....	3
1.4 Afbakening van het onderzoek.....	4
1.5 Leeswijzer	4
2 Methodologie	5
2.1 Literatuurstudie.....	5
2.2 Analyse toepasbaarheid, accuraatheid en rekentijd.....	5
2.3 Presenteren van resultaten en mogelijke oorzaken van verschillen	6
2.4 Combineren van verschillen, expertinterview	6
3 Belangrijke concepten voor het opstellen van een model.....	7
3.1 Rekenrooster	7
4 Verschillen tussen Delft3D Flow en D-Flow FM die van invloed zijn op de rekentijd en accuraatheid.....	9
4.1 Rekenrooster	9
4.2 Rekenkern.....	10
4.3 Numerieke oplossingsmethode.....	10
4.4 Conveyance en bodeminstellingen	11
4.5 Parallelle berekening en domein decompositie (DD).....	12
4.6 Samengevat, verwachtingen op basis van literatuuronderzoek	12
5 Methode vergelijking accuraatheid en rekentijd	13
5.1 Modeldomein en overeenkomstige modelinput	13
5.2 Beschrijving van de gebruikte modellen	14
5.3 Methode analyse accuraatheid en rekentijd.....	19
6 Verschillen in toepasbaarheid	22
6.1 Opstellen van rekenroosters	22
6.2 User interface	24
7 Verschillen in accuraatheid	26
7.1 Het effect van het verschil in bodeminstellingen (scenario 1 en 2).....	26
7.2 Vergelijking Delft3D, Delft3D FM en het analytisch model (Scenario 3 en 4).....	28
7.3 Robuustheid van de modellen.....	32

8	Verschillen in rekentijd	33
9	Mogelijke voor- en nadelen van Delft3D FM	35
10	Discussie	36
10.1	Interpretatie van de resultaten	36
10.2	Vergelijking resultaten met de verwachting uit literatuur	37
10.3	Beperkingen van het onderzoek en aanbevelingen voor een vervolgonderzoek	37
11	Conclusie	39
12	Aanbevelingen	41
13	Bibliografie	42
	Bijlagen	44
	A: Voorbeelden verfijning roosters Delft3D FM	45
	B: Algemene informatie over input en Modelonafhankelijke input	46
	C: Samenvatting eerdere onderzoeken Delft3D en Delft3D FM	48
	D: Vergelijkingen, toelichting impliciet/expliciet, parallele berekening	50
	E: Bodeminstellingen	53
	F: Domeinbeschrijving numerieke modellen	55
	G: Alternatieven Model 1	60
	H: Alternatieven Model 2	62
	I: Orthogonaliteit	64
	J: Voorbeelden interface Delft3D FM	68
	K: Gebruikte modelinstellingen algemeen, bodeminstellingen en scenario's	70
	L: Resultaten scenario's	73
	M: Oorzaken van verschillen	82
	N: Robuustheid	88
	O: Interview	89
	P: Analytisch model: Flushin Basin	91

1 INLEIDING

Numerieke modellen zijn belangrijk tools om stromingen in een watersysteem te onderzoeken. In Nederland wordt Delft3D (Lesser et al., 2004), dat ontwikkeld is door Deltares, vaak gebruikt voor dit doeleinde. Recent (2016) is een opvolger van Delft3D uitgekomen genaamd Delft3D Flexible Mesh (Deltares, 2016). Het belangrijkste verschil is dat in Delft3D FM het gebruik een ongestructureerd rekenrooster mogelijk is, wat veel flexibiliteit biedt. In deze eindopdracht zullen de twee versies van de software worden vergeleken door ze toe te passen op de casus van de haven van Noorpolderzijk.

In dit hoofdstuk zal kort achtergrond worden gegeven van Delft3D en Delft3D FM en waarin ze verschillen. Verder zal de casus, de onderzoeksvragen en de opzet en afbakening van het onderzoek worden toegelicht. Er wordt afgesloten met een leeswijzer.

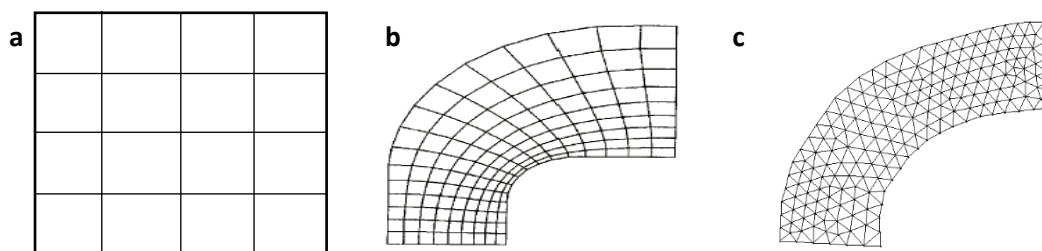
1.1 ACHTERGROND, CASUS EN AANLEIDING

Deze bachelor eindopdracht wordt uitgevoerd bij het bedrijf WaterProof. Het bedrijf maakt frequent gebruik van numerieke modellen om de stromingen in kustgebieden te modelleren. Delft3D (Lesser et al., 2004) is een voorbeeld van een numeriek model dat veel gebruikt wordt door het bedrijf.

Delft3D is ontwikkeld door Deltares en is al een lange tijd beschikbaar. De software bestaat uit verschillende modules, die apart of gecombineerd gebruikt kunnen worden om de waterkwaliteit (WAQ), de morfologie (MOR) en de stromingen (FLOW) in een watersysteem, zoals kusten, rivieren en estuaria, te modelleren.

Om een model op te stellen is belangrijke input het rekenrooster. Het rekenrooster is onderdeel van de numerieke oplossing en wordt gebruikt om de vergelijkingen op te lossen, zoals de ondiep water vergelijkingen voor het beschrijven van stroming.

Er zijn een aantal verschillende rekenroosters die gebruikt worden in numerieke modellen voor het beschrijven van stroming in een watersysteem. Er bestaan drie hoofdgroepen, namelijk: Rechthoekig, curvi lineaire en driehoekige roosters. Voorbeelden van deze roosters zijn te vinden in Figuur 1. De eerste twee rekenroosters worden beschouwd als gestructureerd, terwijl de laatste een ongestructureerd rekenrooster is. Delft3D kan slechts gebruik maken van gestructureerde roosters. Een nadeel van gestructureerde roosters is dat het beschrijven van een complexe geometrie moeilijk kan zijn. Hierdoor wordt mogelijk het modeldomein niet overal evengoed beschreven en/of is het rekenrooster niet efficiënt. Dit kan ten koste gaan van de accuraatheid van het model en kan bovendien de rekentijd verhogen ten opzichte van een efficiënt rooster. Daarnaast kan het opstellen van een gestructureerd rooster gecompliceerd zijn.



Figuur 1: a) Rechthoekig

b) Curvi lineair (Hong, 2000)

c) Driehoekig

Sinds 2016 is Delft3D Flexible Mesh (Deltares, 2016) beschikbaar, eveneens ontwikkeld door Deltares. Delft3D FM is opvolger van Delft3D en heeft dezelfde rekenkern, wat inhoudt dat dezelfde vergelijkingen worden gebruikt (Drakestein, 2014). Verder maakt Delft3D FM gebruik van dezelfde modules als Delft3D. Op dit moment is echter alleen de stromingsmodule uitgebracht genaamd D-Flow FM. De andere modules komen uit in 2018 (Deltares, sd).

Een van de grootste veranderingen ten opzichte van Delft3D is dat er ook gebruik kan worden gemaakt van een ongestructureerd rekenrooster. Hierdoor is het mogelijk een driehoekig rooster op te stellen, maar ook vijfhoekige en zeshoekige cellen kunnen gebruikt worden. Kort omschreven zijn de mogelijke voordelen van ongestructureerde roosters dat ze meer flexibiliteit bieden, wat kan leiden tot accuratere modellen en lagere rekentijden (Verwey, 2011) (Kernkamp et al., 2011). Om gebruik te maken van het ongestructureerde rooster is er echter ook een andere numerieke oplossingsmethode nodig, die mogelijk minder efficiënt is dan de oplossingsmethode van Delft3D (Deltares, 2016) (Hagen, 2014).

1.1.1 Casus Noordpolderzijk

In een van de recente projecten van het bedrijf WaterProof is Delft3D gebruikt om de waterstanden en stroomsnelheden in de haven van Noordpolderzijk te modelleren. In Figuur 2 is de haven en het modeldomein geïllustreerd. In dit project worden de stromingen gemodelleerd waardoor alleen de module Delft3D-FLOW benodigd is. De haven van Noordpolderzijk is een kleine zeehaven in het noordoosten van de provincie Groningen. Om de haven te bereiken wordt gebruik gemaakt van een smalle geul (<20 meter) in de Waddenzee. De geul slibt dicht en om deze open te houden wordt hij regelmatig gebaggerd. In de afgelopen jaren is de haven echter slechter bereikbaar geworden voor schepen. Een mogelijke oplossing voor dit probleem is een spoelmeer. Dit meer wordt gevuld tijdens vloed en loopt automatisch leeg tijdens eb. Door het leeglopen van het meer worden de stroomsnelheden in de geul verhoogd waardoor er mogelijk erosie kan optreden. Het sediment dat wordt aangevoerd tijdens een vloodsituatie zou hierdoor geërodeerd kunnen worden. Het doel van het Delft3D model is dan ook om te onderzoeken of de door het spoelmeer veroorzaakte stroomsnelheden hoog genoeg zijn om het slib te eroderen.

De smalle geul in het modeldomein van Delft3D is een complexe geometrie. Verder is het een bijzondere toepassing door het spoelmeer dat lokaal hoge stroomsnelheden kan veroorzaken. Dit maakt het opstellen van het rekenrooster gecompliceerd.



Figuur 2: Links: de haven van Noordpolderzijk (Waltertje)

Rechts: Gebiedsbeschrijving bodemhoogtes (lage ligging geul)

1.1.2 Aanleiding

Uit de achtergrond van de haven van Noordpolderzijk met de complexe geometrie en de mogelijkheden van Delft3D FM wordt duidelijk dat er wellicht voordelen aan het gebruik van de nieuwe versie van de software zitten. Vanwege het recent introduceren van de software is er echter nog weinig bekend over het toepassen van de Delft3D FM en hoe dit verschilt met Delft3D in de categorieën rekentijd, accuraatheid en toepasbaarheid. Het bedrijf WaterProof is echter wel geïnteresseerd in het gebruik van Delft3D FM, wat de aanleiding van dit onderzoek is. Met behulp van de casus (de haven van Noordpolderzijk) zullen de modellen worden vergeleken. Het bestaande Delft3D model is voor dit onderzoek beschikbaar gesteld door WaterProof.

1.2 RELEVANTIE VAN HET ONDERZOEK

Het is op dit moment niet duidelijk voor het bedrijf WaterProof of ze Delft3D FM willen toepassen. Het aantal publicaties over Delft3D FM blijft beperkt. Verder focussen de beschikbare publicaties zich met name op het effect van het ongestructureerde rooster op de accuraatheid. Hierdoor is er nog geen compleet overzicht van de verschillen tussen Delft3D en Delft3D FM. Dit onderzoek zal dit overzicht geven, waardoor het bedrijf een afweging kan maken. Ook voor andere gebruikers van numerieke modellen die geïnteresseerd zijn in het gebruik van Delft3D FM, zal dit onderzoek een inleiding geven in Delft3D FM. Als laatste zal dit onderzoek relevant zijn in het onderzoek naar Delft3D FM in het algemeen. Vanwege het recent introduceren zijn er nog maar een beperkt aantal toepassingen. Hierdoor is er nog weinig bekend over de accuraatheid van de verschillende roosters Delft3D FM. De toepassing van dit onderzoek is dus aan aanvulling op eerdere toepassingen. Verder is de haven een unieke toepassing, die niet vergelijkbaar is met eerdere toepassingen van Delft3D FM. Mogelijk geeft dit onderzoek hierdoor andere inzichten in het gebruik van Delft3D FM.

1.3 PROBLEEMSTELLING, ONDERZOEKSDOEL EN ONDERZOEKVRAGEN

Het voornaamste probleem is dat het niet duidelijk is voor het bedrijf Waterproof' of ze Delft3D FM willen toepassen, omdat er geen compleet overzicht is van de verschillen. Het doel van dit onderzoek is dan ook om de verschillen tussen Delft3D en Delft3D Flexible Mesh te analyseren, waardoor de mogelijkheden, voordelen en nadelen van het gebruik van Delft3D FM duidelijk worden.

De verschillen zullen voornamelijk worden geanalyseerd voor een toepassing in de haven van Noordpolderzijl. De toepassing van de casus heeft twee doelen. Het belangrijkste doel is om de verschillen tussen Delft3D en Delft3D FM in kaart te brengen. Verder is het gebruikte model Delft3D model niet ideaal en weken de resultaten gedeeltelijk af van de verwachting. Een doel is daarom om te onderzoeken of het mogelijk is met Delft3D FM het huidige model te verbeteren. Ook wordt door de casus duidelijk hoe Delft3D FM toegepast kan worden.

Een verbetering van een model wordt gezien als een verbetering in een of meer van de volgende categorieën: Accuraatheid, rekentijd en toepasbaarheid. De focus zal in dit onderzoek dus liggen op het vinden van verschillen die te maken hebben met de deze categorieën. Het onderzoek is samen te vatten in de het volgende onderzoeksdoel:

Het analyseren van de verschillen in accuraatheid, rekentijd en toepasbaarheid tussen Delft3D en Delft3D FM, toegepast in de haven van Noordpolderzijl, waardoor mogelijkheden en eventuele voor en/of nadelen van Delft3D FM in kaart worden gebracht.

De focus zal vooral liggen op het vinden van verschillen, niet op het beschrijven van voor en nadelen. Vanuit de verschillen kan de lezer zelf beoordelen of het een voor of nadeel is.

Om het onderzoeksdoel te bereiken is het onderzoek opgedeeld in verschillende onderzoeksvragen, die een leidraad vormen voor de hierop volgende hoofdstukken. De onderzoeksvragen zijn opgesomd op de volgende pagina. De eerste twee onderzoeksvragen vormen de theoretische basis van dit onderzoek en zijn benodigd om de methodes van onderzoeksvragen 3 tot met 6 vast te stellen. Na het beantwoorden van onderzoeksvragen 1 en 2 kunnen modellen worden opgesteld in Delft3D FM. De modellen worden vergeleken met het bestaande Delft3D model in de categorieën toepasbaarheid, accuraatheid en rekentijd (onderzoeksvragen 3 tot en met 5). De zesde onderzoeksvraag biedt een overzicht van mogelijke verbeteringen en verslechtingen van Delft3D FM en dient als afsluiting van het onderzoek.

1. Hoe wordt een model opgesteld in Delft3D FM en hoe verschilt dit met Delft3D?
2. Wat zijn de belangrijkste verschillen tussen Delft3D en Delft3D FM die invloed hebben op de rekentijd en accuraatheid en welk effect hebben deze verschillen?
3. Wat zijn de verschillen in toepasbaarheid tussen Delft3D en Delft3D FM?
4. Welke verschillen in accuraatheid (waterstanden en stroomsnelheden in de geul) zijn er tussen Delft3D en Delft3D FM, toegepast in de haven van Noordpolderzijl?
 - a. Welk onregelmatigheden treden op in het resultaat en in hoeverre verschillen deze tussen Delft3D en Delft3D FM
 - b. Wat veroorzaakt deze verschillen?
 - c. Hoe robuust zijn de resultaten van de modellen?
5. Wat zijn de verschillen in reketijden tussen Delft3D en Delft3D FM?
 - a. Wat beïnvloedt de reketijd en wat heeft mogelijk deze verschillen veroorzaakt?
6. In welke mate kunnen de verschillen van Delft3D FM die gevonden zijn in accuraatheid, toepasbaarheid en rekentijd gezien worden als verbetering of verslechtering wanneer de vergelijking wordt gemaakt met Delft3D?

1.4 AFBAKENING VAN HET ONDERZOEK

De belangrijkste afbakening van het onderzoek is dat alleen de stromingsmodules gebruikt zullen worden om de modellen te vergelijken (Delft3D Flow en D-Flow Flexible Mesh). Dit betekent dat er alleen verschillen worden gezocht die gerelateerd zijn aan de stromingsmodule.

Daarnaast zal er in dit onderzoek geen definitief antwoord worden gegeven op de vraag of D-Flow Flexible Mesh een significante verbetering is ten opzichte van Delft3D. Het doel van dit onderzoek is om verschillen te vinden die de lezer kan gebruiken om een inzicht in de mogelijkheden van D-Flow FM te krijgen.

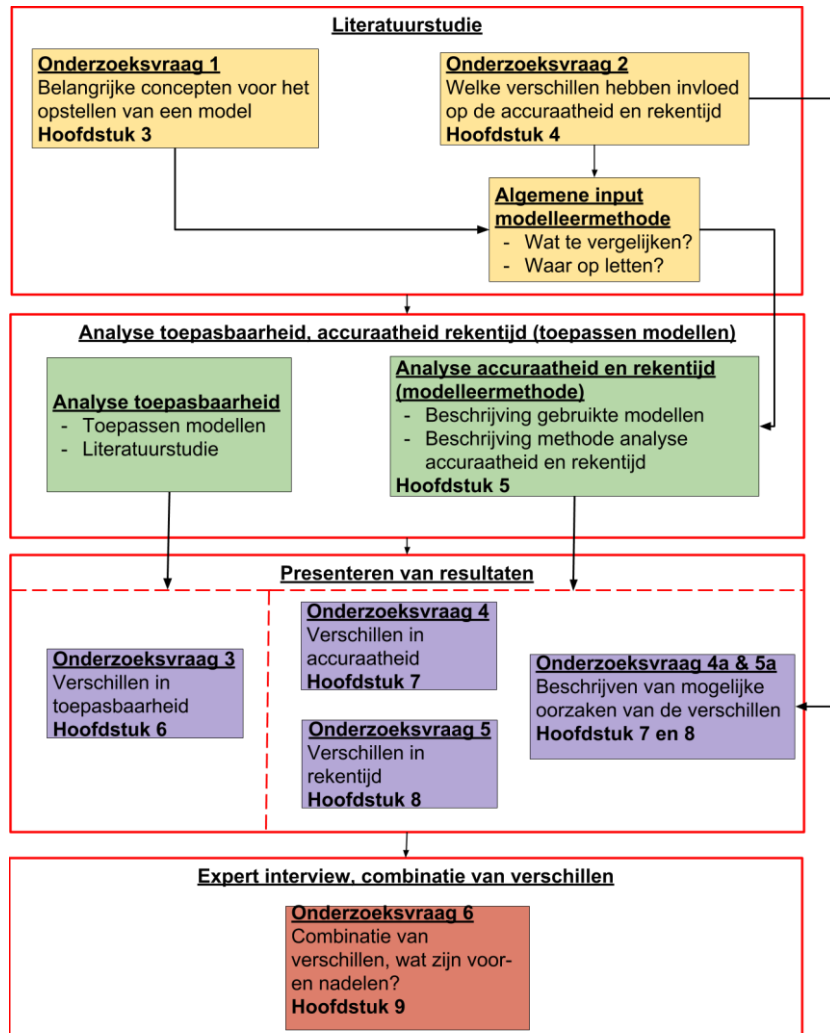
Verder is er geen data beschikbaar om de modellen te valideren. De reden is dat er een situatie wordt gemodelleerd die nog niet in de realiteit aanwezig is. Er zal dan ook geen data worden verzameld voor validatie in dit onderzoek. Voor de accuraatheid zal er voornamelijk worden gekeken naar de robuustheid en onregelmatigheden.

1.5 LEESWIJZER

In hoofdstuk 2 wordt de methode van dit onderzoek beschreven. Hoofdstuk 3 en 4 beschrijven verschillen tussen Delft3D en Delft3D FM die gebaseerd zijn op een literatuuronderzoek. In hoofdstuk 5 volgt een beschrijving van de modelleermethode. In hoofdstuk 6 worden de gevonden verschillen in toepasbaarheid toegelicht. In hoofdstuk 7 worden de verschillen in de accuraatheid toegelicht en in hoofdstuk 8 de verschillen in rekentijd. De verwachte voor- en nadelen van Delft3D FM worden beschreven in hoofdstuk 9. In hoofdstuk 10, 11 en 12 wordt afgesloten met de discussie, conclusie en aanbevelingen.

2 METHODOLOGIE

De methode van dit onderzoek bestaat uit vier fases: Een literatuurstudie, een analyse, het presenteren van de resultaten en afsluitend een expertinterview. De methode is geïllustreerd in Figuur 3. In de volgende secties zullen de verschillende fases uitgebreider worden toegelicht.



Figuur 3: overzicht methodologie

2.1 LITERATUURSTUDIE

Het voornaamste doel van de literatuurstudie is input leveren voor de modelleermethode. Op basis van de literatuurstudie wordt duidelijk waarop gelet moet worden tijdens het toepassen van Delft3D FM. Verder dient het literatuuronderzoek als belangrijke informatiebron voor het achterhalen van oorzaken van verschillen, zoals benodigd in onderzoeksvraag 4a en 5a.

2.2 ANALYSE TOEPASBAARHEID, ACCURAAATHEID EN REKENTIJ

2.2.1 Analyse toepasbaarheid

Op basis van opgedane ervaring tijdens het toepassen van Delft3D en Delft3D FM in de casus zullen de verschillen deels beschreven worden. De beschikbare literatuur, met name de handleidingen van Delft3D en Delft3D FM, biedt achtergrondinformatie. De analyse van de toepasbaarheid staat in principe los van de analyse van de modellen voor de rekentijd en accuraatheid. In Figuur 3 is daarom

de toepasbaarheid apart weergegeven. De methode voor de analyse van de toepasbaarheid zal verder niet worden uitgebreider worden toegelicht in een apart hoofdstuk.

2.2.2 Analyse accuraatheid en rekentijd

Voor de analyse van de rekentijd en de accuraatheid worden er drie verschillende modellen in Delft3D FM vergeleken met het Delft3D model dat is opgesteld door WaterProof. Om veel oorzaken van verschillen in accuraatheid en rekentijd te elimineren zal in de modellen in Delft3D FM dezelfde input data worden gebruikt als in het Delft3D model. Zoals vermeld in de inleiding is het rekenrooster een van de grotere verschillen tussen Delft3D en Delft3D FM. Er worden daarom verschillende rekenroosters gebruikt in Delft3D FM om het effect op de rekentijd en accuraatheid te vinden. Naast de numerieke modellen wordt er gebruik gemaakt van de resultaten van een analytisch model voor de analyse van de accuraatheid. Dit model is eveneens opgesteld door WaterProof. In hoofdstuk 5.1 en 5.2 is een beschrijving van de modellen te vinden.

Analyse accuraatheid

De resultaten die worden vergeleken zijn de waterstanden en stroomsnelheden in de geul van de haven van Noorpolderzijl. Er zal een analyse plaatsvinden voor verschillende scenario's. In de verschillende scenario's worden er veranderingen aangebracht in Delft3D FM. Verder zal de statistische indicator RMSE gebruikt worden voor de analyse. Uit de verschillende scenario's en de statistische analyse worden onregelmatigheden in het resultaat duidelijk. Ook wordt er gebruik gemaakt van de resultaten van een analytisch model om een inschatting te krijgen in onregelmatigheden.

Voor het onderzoek naar mogelijke oorzaken van verschillen in accuraatheid speelt het literatuuronderzoek van de eerste fase een grote rol. Daarnaast worden specifieke eigenschappen van de modellen onderzocht, aangezien deze ertoe kunnen leiden dat er ongewild verschillen ontstaan tussen de modellen die een effect hebben op de accuraatheid.

Vanwege de afwezigheid van data voor validatie wordt de robuustheid van de verschillende modellen onderzocht om een inschatting te maken van de onzekerheid. De robuustheid wordt onderzocht met een gevoeligheidsanalyse, waarin de scenario's een belangrijke rol spelen.

Een uitgebreide beschrijving van de methode die wordt gebruikt voor de analyse van de accuraatheid wordt beschreven in hoofdstuk 5.3.1.

Analyse rekentijd

De rekentijd van de drie modellen in Delft3D FM wordt vergeleken met die van Delft3D. De bepaling van de rekentijd spreekt voor zich. Naast het geven van de reketijden zal er een analyse plaatsvinden om mogelijke oorzaken van verschillen in rekentijd te vinden. Een uitgebreidere beschrijving van de methode is weergegeven in hoofdstuk 5.3.2.

2.3 PRESENTEREN VAN RESULTATEN EN MOGELIJKE OORZAKEN VAN VERSCHILLEN

In hoofdstuk 6, 7 en 8 worden de resultaten gepresenteerd. Daarnaast worden in hoofdstuk 7 en 8 mogelijke oorzaken van de verschillen in rekentijd en accuraatheid gegeven.

2.4 COMBINEREN VAN VERSCHILLEN, EXPERTINTERVIEW

Mogelijke voor en nadelen van Delft3D FM ten opzichte van Delft3D zullen deels duidelijk worden gegeven uit een kort interview met de experts van WaterProof. Er wordt een interview afgenomen om meerdere meningen uit de praktijk te betrekken in het beoordelen van voor-en nadelen. Er zullen open vragen gesteld worden in het interview waarin de resultaten van onderzoeksvraag 1 t/m 5 worden gebruikt. Het resultaat is een voorzichtige conclusie welke onderdelen van Delft3D FM een verslechtering of verbetering zijn ten opzichte van Delft3D.

3 BELANGRIJKE CONCEPTEN VOOR HET OPSTELLEN VAN EEN MODEL

Er zijn een aantal concepten belangrijk voor het opstellen van een model. In dit onderzoek is voor de vergelijking tussen Delft3D en Delft3D FM met name het rekenrooster van belang, omdat dit het grootste verschil is. Andere concepten en inputparameters, zoals de randvoorwaarde, zijn in Bijlage B behandeld.

3.1 REKENROOSTER

In de inleiding zijn de verschillende soorten roosters die worden toegepast in Delft3D en Delft3D Flexible Mesh toegelicht. In deze sectie wordt er dieper op het rekenrooster ingegaan.

3.1.1 Eigenschappen van het rekenrooster in Delft3D FM en verschil met Delft3D

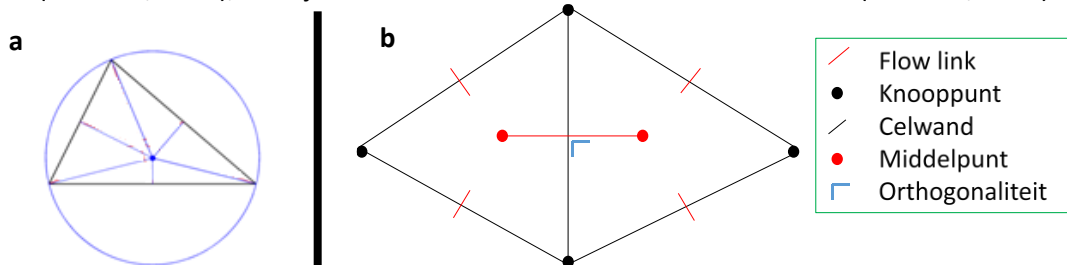
Delft3D FM maakt altijd gebruik van een ongestructureerd rekenrooster waardoor er geen concept van rijen en kolommen is. Ook wanneer er in Delft3D FM gebruik wordt gemaakt van enkel een curvi lineair rooster (wat dus in feite een gestructureerd rooster is) geldt dit. Wel wordt in deze eindopdracht het onderscheid aangehouden tussen gestructureerde roosters en ongestructureerde roosters in Delft3D FM. Wanneer er in Delft3D FM gesproken wordt over het gebruik van een gestructureerd rooster, wordt er dus bedoeld op het gebruik curvi lineaire en rechthoekige roosters ook al worden ze voor het gebruik in Delft3D FM omgezet naar een ongestructureerd rooster.

3.1.2 Orthogonaliteit en smoothness

Tijdens het opstellen van een rooster in Delft3D en Delft3D FM is het belangrijk dat er wordt gelet op de orthogonaliteit en de smoothness van het rekenrooster. In zowel Delft3D als Delft3D FM speelt dit een belangrijke rol en heeft het invloed op de accuraatheid van het model.

Het principe orthogonaliteit heeft te maken met het versprongen rooster (Engels: Staggered grid) wat door zowel Delft3D als Delft3D FM gebruikt wordt. Het versprongen rooster houdt in dat de waterstanden in het midden van de cel worden geformuleerd, terwijl stromingen in het midden van de celwand worden geformuleerd. Het midden van een cel uit rechthoekig of curvi lineair rooster spreekt voor zich. Voor Delft3D FM geldt echter dat er ook gebruik kan worden gemaakt van ongestructureerde cellen, zoals driehoeken. In dat geval wordt er in Delft3D FM gebruik gemaakt van het middelpunt van de omschreven cirkel. Dit is geïllustreerd in Figuur 4.

Het principe van orthogonaliteit verschilt niet tussen de twee versies, het enige verschil is dat in Delft3D FM orthogonaliteit ook voor ongestructureerde cellen een rol speelt. In Figuur 4 is het orthogonaliteitsprincipe geïllustreerd voor driehoekige cellen. Een verbinding (Flow link) tussen beide middelpunten moet loodrecht staan op de gemeenschappelijke celwand. Zowel in Delft3D als Delft3D FM zijn er aanbevolen maximale waarden voor orthogonaliteit. In Delft3D is deze 0.02 (Deltares, 2014), terwijl in Delft3D FM de aanbevolen waarde 0.01 is (Deltares, 2016).



Figuur 4: a: Middelpunt omschreven cirkel (blauw) (Deltares, 2016)

b: Principe van orthogonaliteit

Naast de orthogonaliteit is ook de smoothness belangrijk. Smoothness is geformuleerd als de verhouding in oppervlakte tussen twee aangrenzende cellen. In Delft3D wordt er aangeraden maximaal een waarde tussen de 1.2 en 1.4 aan te houden (Deltares, 2014). In Delft3D FM wordt er tot nu toe niet specifiek vermeld welke waarden worden aangeraden, wel wordt er aangegeven dat het belangrijk is voor de accuraatheid van het rooster om een lage waarde aan te houden.

3.1.3 Het maken van verfijningen in het rekenrooster

Om verschillende resoluties van het rekenrooster toe te passen in Delft3D en Delft3D FM, kunnen verfijningen in het rekenrooster gemaakt worden. Delft3D en Delft3D FM verschillen in mogelijkheden om lokale verfijningen te maken, dus een verfijning in het rooster zonder dat dit effect heeft op het gehele rooster.

Het aanbrengen van een lokale verfijning in het rooster is in Delft3D mogelijk door het gebruik van Domein Decompositie. Het beschikbare Delft3D model maakt gebruik van deze manier van verfijnen. Een model met domein decompositie bestaat uit verschillende domeinen en elk domein heeft zijn eigen rekenrooster. Het voordeel van werken met verschillende domeinen, is dat de roosters van het model verschillende resoluties kunnen hebben. Zo hoeft niet het gehele rooster een hoge resolutie te hebben, wat rekentijd kan besparen.

Delft3D Flexible Mesh maakt geen gebruik meer van domein decompositie. Er wordt gebruikt gemaakt van één rooster waarin verschillende verfijningen gemaakt kunnen. Het opzetten van verschillende domeinen is dus niet meer nodig. Met behulp van driehoekige cellen kan een verfijning worden gemaakt. Voorbeelden van verfijningen zijn te vinden in Bijlage A.

3.1.4 Aanbevelingen voor het toepassen van rekenroosters in Delft3D FM

In de beschikbare literatuur zijn er verschillende adviezen gegeven voor het toepassen van een rekenrooster in Delft3D FM. Alhoewel het gebruik van een volledig ongestructureerd rooster veel flexibiliteit oplevert, wordt in Delft3D FM nog steeds aangeraden om voornamelijk gestructureerde roosters te gebruiken die in lijn staan met de stromingsrichting (Kernkamp et al., 2011). Bijvoorbeeld het gebruiken van een curvi lineair rooster in een geul of rivier. Dit is een efficiënte manier, omdat dit het aantal cellen in de dwarsrichting maximaliseert terwijl het aantal cellen in de lengterichting laag blijft. Complexe gebieden kunnen met behulp van ongestructureerde cellen beschreven worden. Hierdoor wordt de flexibiliteit van het ongestructureerde rekenrooster gecombineerd met de efficiëntie van een gestructureerd rekenrooster.

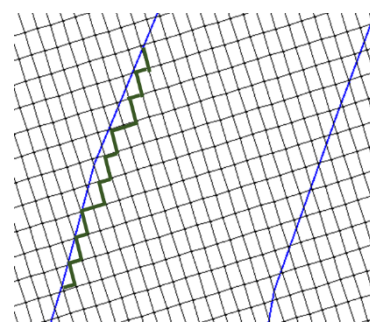
4 VERSCHILLEN TUSSEN DELFT3D FLOW EN D-FLOW FM DIE VAN INVLOED ZIJN OP DE REKENTIJD EN ACCURAATHEID

Er zijn veel concepten die van invloed zijn op de rekentijd en accuraatheid van zowel Delft3D als Delft3D FM. In dit onderzoek wordt er alleen gefocust op de verschillen tussen Delft3D en Delft3D FM. Dit zijn de volgende onderwerpen: Het rekenrooster, de numerieke oplossingsmethode, de bodeminstellingen (conveyance) en parallelle berekening. Deze onderwerpen zullen in de volgende secties behandeld worden. Er wordt afgesloten met een samenvattende tabel van het effect van deze onderwerpen op de accuraatheid en rekentijd.

4.1 REKENROOSTER

4.1.1 Mogelijke voordelen ongestructureerde roosters ten opzichte van gestructureerde roosters

Een ongestructureerd rooster biedt veel flexibiliteit. Met dit rooster kunnen gebieden met een complexe geometrie gemakkelijk beschreven worden. Met gestructureerde roosters is het beschrijven van dit soort gebieden een stuk gecompliceerder. Er kan soms een trapsgewijze vertegenwoordiging van kustlijnen ontstaan (Kernkamp et al., 2011) (Hagen, 2014), zoals te zien in Figuur 5. Deze vertegenwoordiging is nadelig voor de accuraatheid van het model. Dit is met name het geval bij rechthoekige roosters maar ook bij curvi lineaire roosters kan dit optreden, omdat de buiging van de cellen soms is gelimiteerd vanwege de orthogonaliteit.



Figuur 5: Trapsgewijze representatie

Verder biedt een flexibel rooster de mogelijkheden om heel lokaal een verfijning in het rooster te maken. Hierdoor kunnen complexe gebieden beter worden beschreven en kan de accuraatheid worden verhoogd (Hagen, 2014). Daarnaast is het rooster alleen verfijnd in gebieden waar het nodig is, terwijl andere gebieden een lagere resolutie kunnen behouden. Dit kan mogelijk de rekentijd verlagen. Met behulp van Domein decompositie in Delft3D kunnen er echter ook lokaal verfijningen in het rooster gemaakt worden, alhoewel dit minder flexibiliteit biedt (Deltares, 2014). Over het algemeen kan er worden gesteld dat het opstellen van een rooster in Delft3D minder flexibel is. De mogelijkheden van een ongestructureerd rooster bieden een stuk meer flexibiliteit voor de gebruiker, wat kan leiden tot accuratere modellen en lagere rekentijden (Verwey, 2011).

Een nadeel van ongestructureerde (driehoekige) cellen is echter dat ze minder efficiënt zijn. Voor het beschrijven van geul kan het aantal cellen in de dwarsrichting niet worden geoptimaliseerd, zoals dat wel mogelijk is met curvi lineaire rooster. Meer hierover is te lezen in sectie 3.1.4.

4.1.2 Eerder gevonden resultaten gerelateerd aan het rekenrooster

In Bijlage C zijn de resultaten van drie eerdere onderzoeken die Delft3D met Delft3D FM vergeleken samengevat (Maximova, et al., 2013) (Drakestein, 2014) (Kernkamp et al., 2011). Resultaten en rekentijden kunnen vrij specifiek zijn voor een bepaalde toepassing, maar kunnen wel een indicatie geven voor dit onderzoek. Daarom zullen de resultaten wel kort worden behandeld.

Wanneer er in Delft3D en Delft3D FM een vergelijkbaar curvi lineair rooster wordt toegepast lijken de verschillen van de waterstanden minimaal te zijn. In twee van de onderzoeken is er ook een volledig ongestructureerd rooster toegepast die in resolutie is verlaagd. Alhoewel de conclusies verschillend zijn lijkt het resultaat redelijk overeen te komen met Delft3D in beide onderzoeken.

De rekentijden zijn zeer variabel in de verschillende onderzoeken, het is hierdoor moeilijk om een conclusie te trekken. Wel lijkt het er op dat door de flexibiliteit van het aanbrengen van verfijningen in Delft3D FM, het aantal cellen verminderd kan worden. Hierdoor kan mogelijk de rekentijd verbeteren ten opzichte van Delft3D, dit hangt echter sterk af van de toepassing.

4.2 REKENKERN

De rekenkern in Delft3D is hetzelfde als die in Delft3D FM (Drakestein, 2014). Dit betekent dat dezelfde vergelijkingen worden opgelost. De rekenkern is dus geen mogelijke oorzaak van verschillen in accuraatheid en rekentijd. De vergelijkingen zullen slechts kort worden behandeld, in Bijlage D is meer informatie te vinden. De modellen die gebruikt worden in deze eindopdracht modelleren in dieptegemiddelde 2D stroming. In het kort houdt dit in dat er geen verticale stroming wordt meegenomen. Voor het modelleren van stromingen in 2D worden de ondiep water vergelijkingen toegepast in twee dimensies (Smits, 2016). Wanneer de ondiep water vergelijkingen voor 2D stroming worden gecombineerd blijven er drie onbekenden over: De snelheid in de x richting, de snelheid in de y richting en de waterstand (Smits, 2016), deze worden met behulp van de numerieke oplossingsmethode opgelost.

4.3 NUMERIEKE OPLOSSINGSMETHODE

De focus in deze sectie ligt op de numerieke oplossing in de stromingsmodule (ondiep water vergelijkingen). Allereerst kunnen numerieke oplossingsmethodes worden onderscheiden door de manier waarop de tijd wordt geïntegreerd. Een numerieke oplossing kan de tijd impliciet of expliciet integreren. Een voordeel van expliciete oplossingen is dat het minder rekenkracht kost om op te lossen. De tijdstap wordt voor numerieke stabiliteit echter gelimiteerd, waardoor de tijdstap vaak klein is en de rekentijd verhoogd wordt (Vreugdenhil, 1994). Impliciete oplossingen hebben nauwelijks problemen met stabiliteit, waardoor de tijdstap groot kan zijn (Vreugdenhil, 1994). Een impliciete oplossing kan echter wel meer rekenkracht kosten om op te lossen. Meer toelichting op deze principes staat in Bijlage D.

Delft3D maakt gebruik van een Finite Difference Method (FDM). Een FDM gebruikt rechthoekige en curvi lineaire roosters en kan moeilijk omgaan met complexe geometrieën (ongestructureerde roosters) (Peiro & Sherwin, 2005). De tijd wordt in Delft3D geïntegreerd met de Alternating Direction Implicit (ADI) (Deltares, 2014), de tijdsintegratie is dus impliciet waardoor er weinig restricties gelden voor numeriek stabiliteit. De oplossingsmethode is relatief efficiënt omdat de waterstanden en snelheden gekoppeld zijn aan roosterlijnen (Lesser et al., 2004).

In Delft3D, met name de stromingsmodule, wordt de tijdstap geselecteerd op grond van accuraatheid, aangezien stabiliteit in de meeste gevallen geen problemen oplevert (Deltares, 2014). De tijdstap wordt meestal gekozen op basis van het courant criterium, dat is weergegeven in vergelijking 4.1. In uitzonderlijke gevallen kunnen er andere restricties gelden, deze worden hier niet behandeld en kunnen in de handleiding van Delft3D-Flow gevonden worden. Het resultaat van dit criterium is een tijdstap die handmatig wordt ingevoerd en gedurende de gehele simulatie gelijk is. Cellen met een grote diepte en kleine afmetingen vormen een limiet voor de tijdstap. In modellen met domein decompositie geldt dat de tijdstap gelijk moet zijn in elk domein (Deltares, 2014), waardoor vaak het domein met het fijnste rooster limiterend is voor de simulatie.

$$CFL = \frac{\Delta t \sqrt{gH}}{\min\{\Delta x, \Delta y\}} < 10 \quad (4.1)$$

Waarin geldt dat, Δt = de tijdstap, $\sqrt{gH}$ = de golfsnelheid (getijgolf), g = de gravitatieconstante en H = de waterdiepte. $\Delta x / \Delta y$ zijn de lengtes van een cel in x of y richting.

Delft3D Flexible Mesh maakt gebruik de Finite Volume Method (FVM) (Hagen, 2014) (Martyr-Kollera, et al., 2017). Deze methode kan beter omgaan met de complexe geometrie van ongestructureerde roosters dan een FDM (Peiro & Sherwin, 2005). Verder is er door het gebruik van ongestructureerde roosters geen concept van rijen en kolommen meer, waardoor het gebruik van een FDM en ADI, niet meer mogelijk is (Deltares, 2016). De tijdsintegratie van de ondiep water vergelijkingen is grotendeels impliciet. De advectionsterm, die onderdeel is van de momentum vergelijkingen, wordt echter expliciet opgelost (Deltares, 2016). Hierdoor dient de tijdstap gelimiteerd te worden voor numerieke stabiliteit. Dit is een duidelijk verschil met Delft3D.

Om deze reden verschilt ook de formulering van het courant criterium in Delft3D FM, dat is weergegeven in vergelijking 4.2. Er geldt dat de tijdstap dynamisch is, deze verandert gedurende de simulatie op basis van actuele stroomsnelheden. De gebruiker selecteert nu alleen een waarde voor het courant criterium, waarna er automatisch een tijdstap wordt geselecteerd. In D-Flow FM staat de waarde standaard op 0.7, die ook is aangehouden in dit onderzoek. Ook in Delft3D FM geldt dat een verfijning van het rooster (kleinere Δx) de tijdstap kan limiteren voor het gehele model.

$$CFL = \frac{u \Delta t}{\min\{\Delta x, \Delta y\}} < 0.7 \quad (4.2)$$

Waarin geldt dat, u = actuele snelheid, Δt = tijdstap, $\{\Delta x, \Delta y\}$ = afmeting van kleinste cel in x of y richting

4.3.1 Effect op rekentijd en accuraatheid

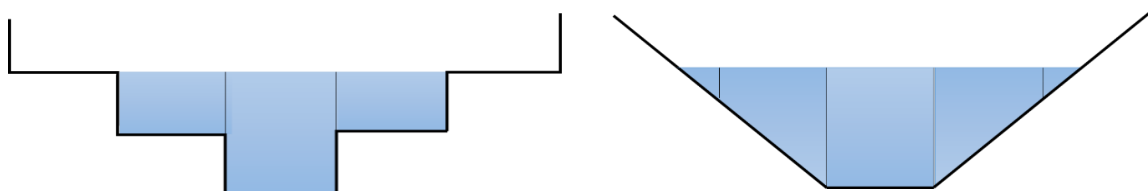
Een nadeel van het gebruik van de FVM is dat het minder efficiënt is dan de FDM, zoals gebruikt in Delft3D (Hagen, 2014). Verder is het zo dat vanwege de expliciete oplossing van de advectieterm de tijdstap meer gelimiteerd kan worden, waardoor de rekentijd mogelijk hoger wordt (Deltares, 2016). Om het verlies in tijd deels tegen te gaan, kan met behulp van het ongestructureerde rooster de resolutie in minder belangrijke gebieden verlaagd worden (optimalisatie rekenrooster).

Over het algemeen is het verschil in accuraatheid van de oplossingsmethodes minimaal en kan er niet direct een beste numerieke oplossingsmethode worden aangewezen (Hagen, 2014). De resultaten in een eerdere studies, zoals (Kernkamp et al., 2011), laten zien dat de verschillen Delft3D-FLOW en D-Flow FM minimaal zijn en dat er niet kan worden aangegeven welke het beste resultaat geeft.

4.4 CONVEYANCE EN BODEMINSTELLINGEN

Gerelateerd aan het versprongen rooster is de manier waarop de bodemdata wordt meegenomen in het model. De bodemdata wordt in zowel Delft3D als Delft3D FM geïnterpoleerd op het rekenrooster. Dit resulteert in dieptes die in de meeste gevallen geformuleerd zijn op de hoekpunten van de cel. Vanuit deze dieptes wordt de bodemdiepte bepaald in zowel de celwand als in het middelpunt van cel, wat nodig is voor het versprongen rooster. Deels verschillen Delft3D en Delft3D FM in de manier waarop dit is geïntegreerd.

Allereerst is er in Delft3D FM een nieuwe instelling, genaamd Conveyance 2D. Wanneer dit wordt ingeschakeld wordt de diepte in de celwand lineair bepaald tussen twee hoekpunten. Het voordeel wat hieruit behaald kan worden heeft vooral te maken met het droog komen te staan en het overstromen van cellen. Met de instelling aan kan de cel gedeeltelijk als nat gezien worden terwijl zonder deze instelling de cel nog droog stond, zoals geïllustreerd in Figuur 6. Hierdoor wordt de dwarsdoorsnede van een geul accurater meegenomen (Deltares, 2016). Er zijn door de instelling relatief minder cellen benodigd voor het beschrijven van een geul om een accuraat resultaat te behalen, wat mogelijk positief is voor de rekentijd. Bij deze instelling geldt verder dat de diepte in het midden van de cel bepaald wordt door het minimum van de hoekpunten te selecteren.



Figuur 6: Links zonder conveyance (Delft3D) rechts met conveyance (Delft3D FM), een gedeelte van de buitenste cel is nat

Delft3D heeft geen instelling voor Conveyance en komt dus meer overeen met de linker illustratie van Figuur 6. In Delft3D FM kan conveyance ook worden uitgeschakeld. Wel is het zo dat er geen exacte

match bestaat van de instellingen van Delft3D (Deltares, 2016). Hoe dit precies zit kan worden gelezen in Bijlage E, het verschil wordt hier uitgelegd aan de hand van een voorbeeld.

In de casus wordt er gewerkt met een zeer smalle geul met een sterke gradiënt ten opzichte van de omgeving buiten de geul (verschil in diepte 1 à 2 meter). Verder wordt de geul door weinig cellen beschreven (6 à 7 cellen). Wanneer er een klein verschil in het meenemen van de bodem is tussen de Delft3D en Delft3D FM kan dit ongewenst tot grote verschillen in resultaten leiden. In de modelleerfase zal er dus onderzocht worden wat het effect is van de verschillende bodeminstellingen op de accuraatheid van het model.

4.5 PARALLELE BEREKENING EN DOMEIN DECOMPOSITIE (DD)

In het Delft3D model wordt gebruik gemaakt van domein decompositie. Een voordeel wat hieruit behaald kan worden is dat er rekentijd kan worden bespaard ten opzichte van een enkel domein in Delft3D (vanwege de mogelijkheid van verfijnen). Verder treedt er geen significant verschil in accuraatheid op tussen domein decompositie en een enkel domein in Delft3D (Deltares, 2014).

Met name voor computers die speciaal zijn ingericht op het uitvoeren van simulaties speelt parallelle berekening een rol om rekentijd te besparen. Een parallelle berekening kan de rekentijd verlagen door het efficiënt opdelen van het rooster over de verschillende rekenkernen van de computer. In Delft3D FM wordt standaard een parallelle berekening uitgevoerd (Deltares, 2016). In het gebruikte model van Delft3D kan er geen parallelle berekening worden uitgevoerd door het gebruik van domein decompositie (Deltares, 2014). Mogelijk ontstaat er een verschil in rekentijd door een verschil in efficiëntie van de berekeningen. Details over parallelle berekening in Delft3D en Delft3D FM staan in Bijlage D.

4.6 SAMENGEVAT, VERWACHTINGEN OP BASIS VAN LITERATUURONDERZOEK

Op basis van de informatie van hoofdstuk 4 en deels uit hoofdstuk 3 (rekenroosters) is in Tabel 1 het effect op de rekentijd en accuraatheid samengevat. In de tabel staan de verbeteringen (+)/verslechtingen (-) van Delft3D FM ten opzichte van Delft3D.

Tabel 1: Samenvatting Delft3D FM t.o.v. Delft3D (+ +/- -)

Onderdeel/Effect	Accuraatheid	Reden	Rekentijd	Reden
Rekenrooster				
Voornamelijk in lijn met stromingsrichting, incidenteel ongestructureerd	+	Flexibiliteit in FM	+	Optimalisatie rekenrooster mogelijk door flexibiliteit (+)
Volledig ongestructureerd	+/-	Geen optimaal rooster	-	Niet efficiënt (zie 3.1.4)
Numeriek				
Oplossing methode	+/-	Weinig verschil met Delft3D	-	Minder efficiënt dan in Delft3D (Beperking numeriek stabiliteit)
Bodeminstellingen				
Conveyance	+	Beter dwarsprofiel	Mogelijk +	Minder cellen nodig beschrijving geulen
Zonder conveyance	+/-	Zelfde als Delft3D	+/-	Geen effect op rekentijd
Parallelle berekening				
Parrallel in Delft3DFM	+/-	Geen effect	+	Mogelijk efficiënter dan DD

5 METHODE VERGELIJKING ACCURAATHEID EN REKENTIJD

In dit hoofdstuk wordt de methode voor de analyse van de accuraatheid en rekentijd beschreven. Allereerst volgt een beschrijving van het modeldomein en gemeenschappelijke input die is gebruikt in de numerieke modellen. Vervolgens worden de eigenschappen van de verschillende modellen beschreven. Als laatste volgt een beschrijving van de methode die gebruikt is voor de analyse van de accuraatheid en de rekentijd.

5.1 MODELDOEIN EN OVEREENKOMSTIGE MODELINPUT

5.1.1 Domein van de modellen

Alle numerieke modellen die zijn gebruikt hebben hetzelfde domein dat geïllustreerd is in Figuur 7. Uitzonderlijk aan het domein zijn de kwelders die helemaal droog vallen tijdens laagwater. Tussen de kwelders bevinden zich kwelderschermen en dammen die stroming voorkomen tussen de gebieden. In de gebruikte modellen worden de dammen weergegeven met thin dams, die zijn weergegeven in het zwart in Figuur 7.

Het modeldomein is daarnaast bijzonder door de lage ligging van de geulen ten opzichte van de rest van het domein. Hierdoor is geul de enige locatie waar water staat tijdens laagwater. Ook tijdens hoogwater is de waterdiepte buiten de geul nabij de kust klein. Via de geulen loopt een groot gedeelte van het water in het domein weg. Met name de stroming in de geulen is hierdoor relevant in de casus. Een indicatie van de waterdieptes en stromingen in het modeldomein is weergegeven in Bijlage F. Verder is hierin een uitgebreidere beschrijving van het modeldomein in te vinden.

De bodemdata is gebaseerd op data van Rijkswaterstaat. Er zijn een aantal aanpassingen gedaan aan de bodemdata. Allereerst is het spoelmeer hierin aangebracht door de bodem te verlagen naar -1.5 NAP. Verder is de geul naar een fictieve uniforme diepte van -0.85 m NAP uitgediept, wat een gebaggerde situatie van de geul is. De bodemhoogtes zijn te vinden in Figuur 7. In deze figuur kan een aantal belangrijke locaties worden herkend. Deze locaties zullen terugkomen in de beschrijvingen van de verschillende modellen in Delft3D en Delft3D FM. Allereerst is er het spoelmeer (locatie 1). Het spoelmeer zal in elk van de gebruikte modellen dezelfde dimensies hebben. Het spoelmeer wordt omringd met dammen waardoor het water alleen via de opening weg loopt. Het spoelmeer staat in open verbinding met de geul (locatie 2). De geul is ongeveer 20 meter breed en loopt richting een grotere geul in de Waddenzee (locatie 3), genaamd Zuid Oost Lauwers. De grote geul is een belangrijk aan en afvoerpunt voor water richting en van de haven van Noordpolderzijl. Als laatste is er de rest van het domein, de omgeving van de geulen. De omgeving zal niet veel aandacht krijgen in de verschillende modellen, omdat er vanwege de hoge ligging weinig stroming op treedt.



Figuur 7: A: Overzicht domein: Blauw contour geul, in zwart de kwelderschermen, in wit contour van het domein
B: Bodemdata en belangrijke locaties (1 t/m 3)

5.1.2 Gemeenschappelijk model input (Data, randvoorwaarde en thin dams)

In de modellen van Delft3D en Delft3D FM is dezelfde data gebruikt om het model op te zetten. Een overzicht van de gebruikte data is te vinden in Bijlage F. Verder zijn de randvoorwaarde en de thin dams (kwelderschermen) belangrijke input.

De randvoorwaarde is opgelegd aan de noordelijke grens van het rooster en is over de gehele lengte hetzelfde. Op de andere randen van het domein wordt geen randvoorwaarde toegepast. De randvoorwaarde zijn waterhoogtes gebaseerd op meetgegevens gedurende 16 januari 2017 tot en met 2 februari 2017. Verder is de randvoorwaarde op dezelfde manier toe te passen in Delft3D en Delft3D FM. De opgelegde randvoorwaarde is te vinden in Bijlage F.

De dammen en kwelderschermen zijn in het Delft3D model weergegeven door thin dams. Deze zullen ook worden gebruikt in Delft3D FM. De coördinaten van de objecten in het Delft3D model zijn gebruikt om de objecten in Delft3D FM te plaatsen. Hierdoor is de ligging van de thin dams bijna identiek aan Delft3D (afhankelijk van het gebruikte rekenrooster). In Bijlage B is toegelicht hoe coördinaten gebruikt kunnen worden in Delft3D FM voor het plaatsen van objecten.

5.2 BESCHRIJVING VAN DE GEBRUIKTE MODELLEN

Als eerste worden de resultaten van een beschikbaar analytisch model gebruikt. Daarnaast wordt gebruik gemaakt van vier numerieke modellen: Het beschikbare Delft3D model en drie modellen in Delft3D FM. Voor de vergelijking van de numerieke modellen is met name het rekenrooster gevarieerd waardoor de focus ligt op het beschrijven van het rekenrooster in de volgende secties.

5.2.1 Analytisch model (Flushing Basin)

WaterProof heeft een analytisch model opgesteld om de resultaten te kunnen vergelijken met Delft3D. Kort beschreven is er in dit model gebruik gemaakt van een spoelbassin in combinatie met een schematisatie van de geul. Het model zelf is niet gebruikt, alleen de gevonden resultaten van WaterProof worden gebruikt om een inzicht te krijgen in de verschillen tussen het analytische model, Delft3D en Delft3D FM. Een uitgebreidere beschrijving van het model is te vinden in Bijlage P.

5.2.2 Bestaand Delft3D Model

Het Delft3D model maakt gebruik van domein decompositie met drie verschillende domeinen. In elk domein wordt gebruik gemaakt van een rechthoekig rooster. De indeling van de domeinen is te zien in Figuur 8. Domein D1N en domein D1Z hebben hetzelfde rooster met een hoge resolutie. In deze domeinen loopt de geul en zijn er kleine aftakkingen van de geul aanwezig.

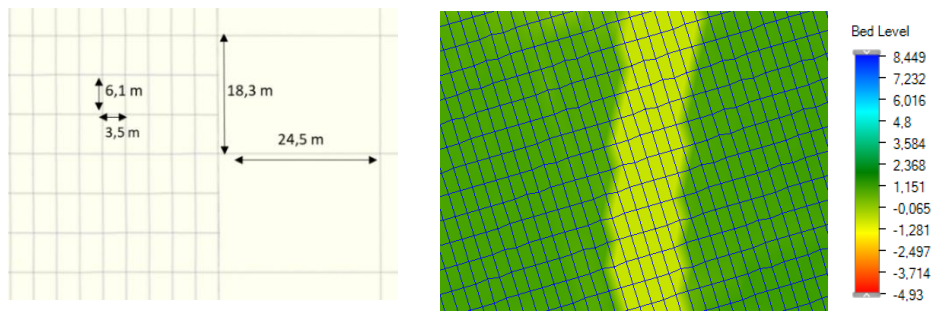


Figuur 8: Domeinen Delft3D, in rood de contour

Rooster algemeen

In domein D1N en D1Z zijn de afmetingen van een cel zijn ongeveer 3.5*6.1 meter, met een kleine variatie over het rooster door een kleine buiging in het rooster. De resolutie leidt ertoe dat er zich 6 a 7 cellen in de breedte richting van de geul bevinden. Het fijne rooster omgeeft de geul vrij breed vanwege de aanwezigheid van zijtakken van de geul.

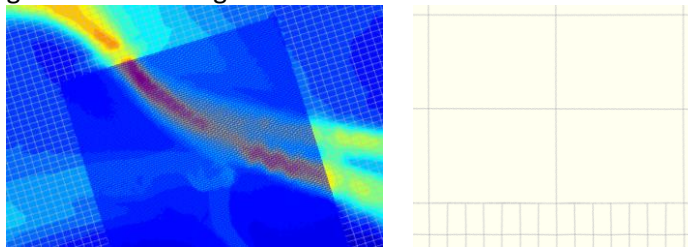
Het derde domein (D2) heeft een lager detailniveau met een rooster van om en nabij 18.3*24.5 meter, wederom met een kleine variatie door de buiging van het rooster. Aan de zijanten van de gemeenschappelijke grens van domeinen D1N en D1Z met D2 passen er dus 3 cellen in de lengterichting (3*6.1m).



Figuur 9: Cellen Domein D1 en D2 en trapsgewijze representatie cellen in bochtige gebieden in de geul

In grote delen van de geul staan de rechthoekige cellen in lijn met de stromingsrichting. In bochtige gebieden van de geul, ontstaat er echter een trapsgewijze representatie van de geul zoals te zien is in Figuur 9. Dit is een nadeel van het rechthoekige rooster dat gebruikt wordt in het beschikbare model. Voornamelijk in model 2 en 3 van Delft3D FM zal het voorkomen van een trapsgewijze presentatie een belangrijke rol spelen.

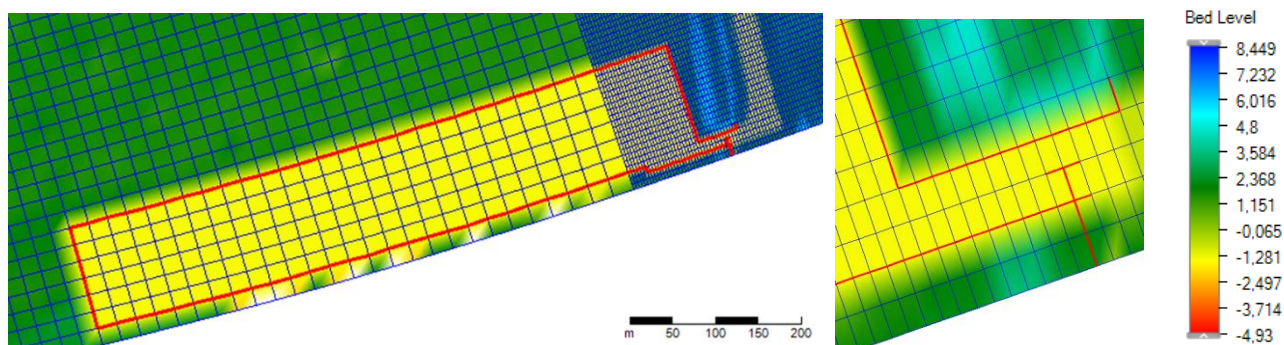
De noordelijke grens van domein D1N ligt voor een gedeelte in de grote geul in de Waddenzee. Bij de noordelijke grens is domein D1N een factor 7 verfijnd ten opzichte van D2 ($7 \times 3.5 = 24.5$), zoals geïllustreerd in Figuur 10.



Figuur 10: Bovenkant domein D1N

Rooster spoelmeer

Ook binnen het spoelmeer is er een overgang van de domeinen zoals te zien is in Figuur 11. Verder is het gehele spoelmeer omringd door dammen (Engels: Thin dams) waardoor het ledigen en vullen van het spoelmeer alleen via de opening kan gebeuren. De opening wordt nog verder vernauwd met behulp van dammen, waardoor er zich op het smalste punt een enkele cel in de breedte richting van de opening bevindt (6 m).



Figuur 11: Spoelmeer, rechts de vernauwing van de opening met behulp van thin dams (rood)

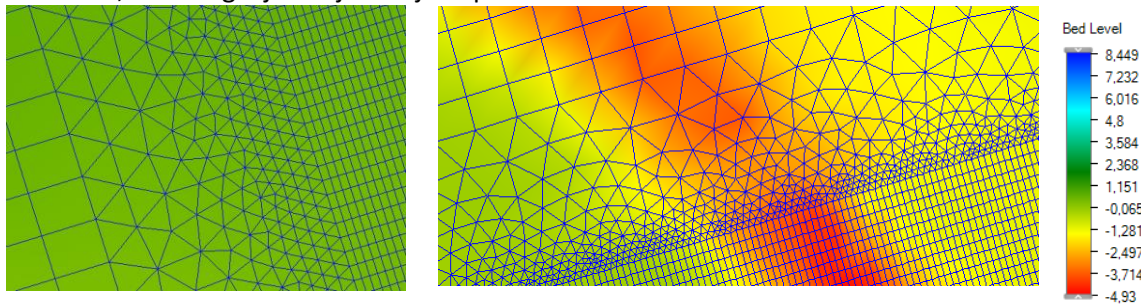
5.2.3 Delft3D FM: Model 1

Model 1 gebruikt voor het grootste deel hetzelfde rooster als het model in Delft3D. Dit model dient om een vergelijking tussen Delft3D en Delft3D FM te maken, terwijl de roosters voor het grootste deel overeenkomstig zijn. Hierdoor kunnen verschillen tussen Delft3D en Delft3D FM eenvoudig worden ontdekt, zoals bijvoorbeeld de rekentijd. De orthogonaliteit van het rooster is te vinden in Bijlage I.

Rooster algemeen

Delft3D FM werkt niet met domein decompositie en gebruikt een enkel rooster. De roosters van de verschillende domeinen (D1N, D1Z en D2) in Delft3D zijn daarom gekoppeld. Er zijn verschillende alternatieven overwogen om de roosters te koppelen. Problemen van en toelichting op de alternatieven is te vinden in Bijlage G.

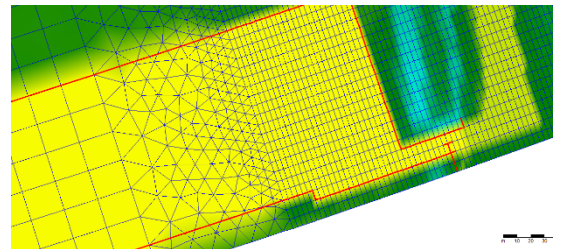
De koppeling van het gekozen alternatief is te vinden in Figuur 12. De verschillende domeinen zijn gekoppeld met driehoekige cellen. Hierdoor is er een kleine afwijking van Delft3D, maar het grootste gedeelte (en het belangrijkste gedeelte: De geul) van het rooster komt overeen met dat van Delft3D. Aan de bovenkant van D1N is de koppeling gemaakt met de 3,5 meter brede cellen. Een nadeel van deze koppeling is dat er zich kleine driehoekige cellen in de geul met hoge snelheden bevinden, wat mogelijk de tijdstap limiteert.



Figuur 12: Koppeling zijkant links, koppeling bovenkant rechts (kleine driehoekige cellen)

Rooster spoelmeer

Een van de grenzen van de domeinen bevindt zich in het spoelmeer, hierdoor is ook hier het rooster gekoppeld zoals te zien in Figuur 13. In de opening van het spoelmeer komt het rooster overeen met dat van Delft3D (zie bijvoorbeeld Figuur 11). Dit is belangrijk aangezien zich hier hoge stroomsnelheden bevinden en afwijkingen van het rooster van Delft3D tot verschillen in resultaten kunnen leiden. Omdat het rooster hier niet verschilt, wordt er geen afwijkingen van het resultaat van Delft3D verwacht.



Figuur 13: Koppeling in spoelmeer, in rood de thin dams

5.2.4 Delft3D FM: Model 2

In dit model worden de mogelijkheden van het flexibele rooster van Delft3D FM benut. Er is voornamelijk gewerkt met gestructureerde cellen die in lijn staan met de stromingsrichting. Dit voldoet aan het advies wat toegelicht is in sectie 3.1.4. Met name in de geul is het mogelijk om de cellen in lijn te laten staan met de stromingsrichting door het toepassen van een curvi lineair rooster. Alleen complexe gedeeltes van het rooster zijn beschreven met ongestructureerde cellen. Het doel van dit model is om te onderzoeken of de mogelijkheden van Delft3D FM kunnen leiden tot een efficiënter en accurater model dan het Delft3D model.

Het rooster is aangepast ten opzichte van Delft3D op drie locaties, de geul en de nabije omgeving, het spoelmeer en de grote geul in de Waddenzee. Deze locaties zullen in de volgende secties behandeld worden. De orthogonaliteit van het gehele rooster is te vinden in Bijlage I

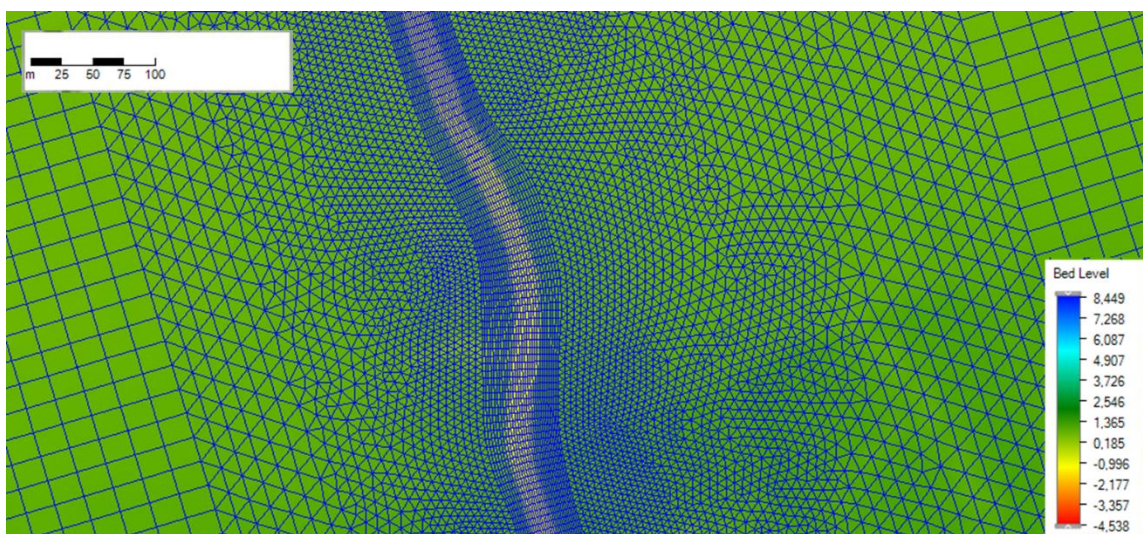
Representatie geul haven van Noordpolderzijl en omgeving

Vanwege het bochtige verloop van de geul is deze gerepresenteerd met een curvi lineair rooster. Het rooster is geïllustreerd in Figuur 14. De trapsgewijze vertegenwoordiging van het Delft3D model wordt hierdoor voorkomen. Daarnaast is er geprobeerd om in de geul minimaal 10 cellen in de breedterichting te plaatsen, wat voldoet aan de richtlijnen van het opstellen van een rooster (Deltares, sd). Dit is tevens hoger dan het aantal cellen van het Delft3D model (6 à 7). De cellen in de geul hebben een variërende breedte tussen de 1.8 en 3 meter, met een lengte tussen de 5 en 7 meter. Het

voorkomen van de trapsgewijze representatie in combinatie met een hogere resolutie in de geul leidt mogelijk tot een accurater model.

Het rooster van het buitenste domein (D2) van het Delft3D model (te vinden in Figuur 8) is aangehouden in dit model. Het rooster is dus aangepast ten opzichte van domein D1N en D1Z in Delft3D. Op deze manier wordt het rooster alleen aangepast in het belangrijkste gebied. Mogelijke afwijkingen van het resultaat van model 2 door een aanpassing van het rooster buiten het belangrijkste gebied worden hierdoor uitgesloten. Dit maakt het achterhalen van oorzaken van afwijkingen in het resultaat overzichtelijk.

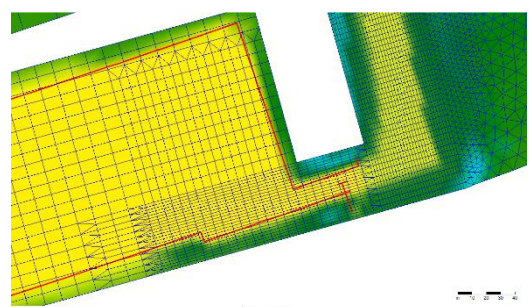
De twee losse roosters (de geul en D2 van het Delft3D model) zijn gekoppeld met driehoekige cellen. Dit is geïllustreerd in Figuur 14. Het resultaat is dat er in de nabije omgeving van de geul een hoge resolutie ontstaat welke langzaam afneemt naarmate de afstand van de geul groter wordt. Hierdoor is de resolutie in het belangrijkste gebied (geul) hoger dan in Delft3D terwijl in de nabije omgeving de resolutie iets lager is dan in Delft3D. Mogelijk wordt hierdoor de accuraatheid verhoogd, terwijl de rekentijd door de afnemende resolutie in de omgeving niet toeneemt.



Figuur 14 koppeling D2 en curvilinear rooster met driehoekige cellen

Rooster spoelmeer

Bij de opening van het spoelmeer is het rekenrooster verfijnd. In het rooster van het Delft3D model wordt de opening beschreven door een enkele cel in de breedterichting. Dit zou een inaccuraat resultaat kunnen veroorzaken, zeker wanneer er een klein verschil tussen meenemen van de bodemdata tussen Delft3D en Delft3D FM zit. In dit model is ervoor gekozen om 3 cellen in de opening (+/-6m) te plaatsen met een breedte van 2 meter. De verfijning is te zien in Figuur 15. Verder is de opening gelijk aan Figuur 11, echter de opening wordt nu beschreven door 3 cellen.



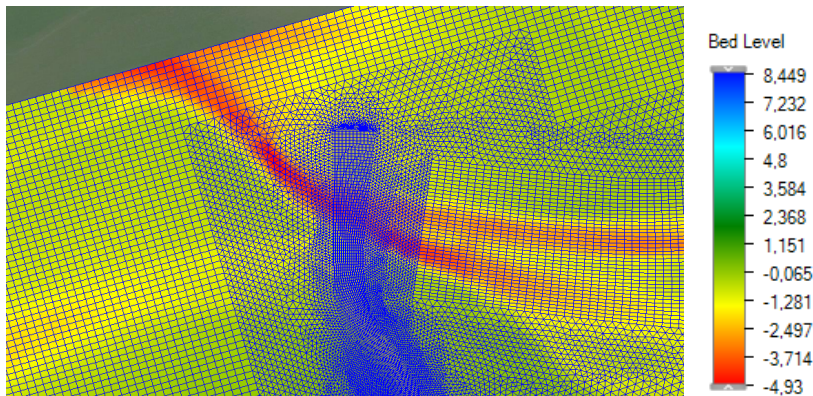
Figuur 15: Spoelmeer, in rood de thin dams

Representatie geul Waddenzee (Zuid Oost Lauwers) en koppeling van verschillende roosters

In het noorden van het domein bevindt zich een grote geul in de Waddenzee, zoals te zien is in Figuur 7. Deze geul wordt beschreven door een curvi lineair rooster dat in lijn staat met de stromingsrichting. De cellen hebben een breedte van ongeveer 9 meter een lengte van 18 meter, wat een verfijning is ten opzichte van het originele rooster in Delft3D (Domein D2 18.3*24.5m).

Er zijn dus nu twee curvi lineaire roosters, de geul richting de haven van Noordpolderzijl en de grote geul in de Waddenzee. De roosters van beide geulen hebben een verschillende richting en

resolutie. Dit maakt het koppelen van beide roosters niet eenvoudig. Om het effect van de manier van koppelen te onderzoeken zijn er meerdere alternatieven voor het koppelen van de roosters uitgeprobeerd. Een uitgebreide beschrijving van de alternatieven en voor en nadelen van de alternatieven is te vinden in Bijlage H. Het gekozen alternatief is weergegeven in Figuur 16. In de figuur is te zien dat de roosters van de grote geul en de kleine geul losstaand zijn en gekoppeld zijn met driehoekige cellen.



Figuur 16: Koppeling drie roosters (D2, en beide geulen) met driehoekige cellen

5.2.5 Delft3D FM: Model 3

Model 3 gebruikt een volledig ongestructureerd rooster. Het gebruik van ongestructureerde cellen in FM wordt afgeraden (zie sectie 3.1.4), omdat het niet efficiënt is. Wel vonden sommige publicaties met een volledig ongestructureerd rooster een acceptabele accuraatheid, en door het rooster grover te maken in sommige gebieden bleef de rekentijd relatief gezien laag (Drakestein, 2014) (Maximova, et al., 2013). Daarnaast biedt het gebruik veel flexibiliteit en hierdoor is het rooster vrij eenvoudig op te stellen. Ook kunnen complexe gebieden gemakkelijk beschreven worden en kan de trapsgewijze representatie die op treedt in het Delft3D model voorkomen worden.

Het doel van dit model is om het effect van een volledig ongestructureerd rekenrooster op de rekentijd en accuraatheid in deze toepassing te onderzoeken. Daarnaast zijn er ook in Model 2 redelijk veel ongestructureerde cellen gebruikt. Hierdoor dient Model 3 ook om een inzicht te krijgen in wat voor effect de ongestructureerde cellen in dit model hebben gehad op de rekentijd en accuraatheid. De orthogonaliteit van het gehele rooster is te vinden in Bijlage I

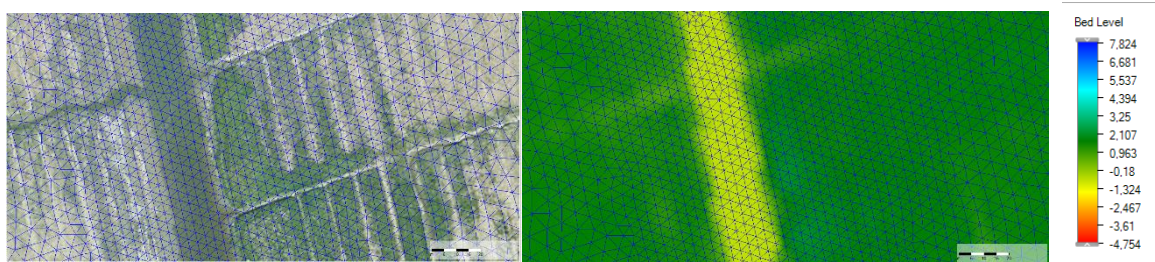
De geul, het spoelmeer en de grote geul (Zuid Oost Lauwers)

Het rooster is opgebouwd uit verschillende delen die elk een andere resolutie hebben. De verschillende onderdelen van het rooster worden uiteindelijk gekoppeld met driehoekige cellen. Een impressie is te zien in Figuur 17 en Figuur 18.

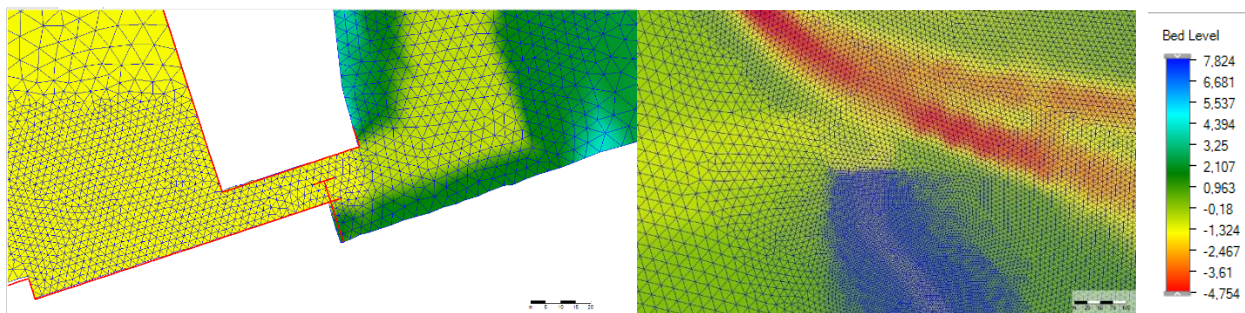
Allereerst heeft het spoelmeer bij de opening cellen van rond de 2.5 breed en hoog. De opening wordt hierdoor beschreven door 3 cellen. De rest van het spoelmeer heeft een lagere resolutie met cellen van rond de 15 meter.

De geul heeft cellen met een breedte van 4 meter, in het grootste gedeelte wordt hierdoor de geul beschreven door 6 à 7 cellen in de breedterichting. In resolutie is het model dus iets verlaagd ten opzichte van model 2 (10 cellen in breedterichting), om mogelijk rekentijd te besparen. De geul is geïllustreerd in Figuur 17, in Figuur 18 is de representatie van de opening van het spoelmeer te vinden.

De grote geul die vanuit de Waddenzee komt, heeft een resolutie van ongeveer 10 meter. Het omliggende gebied, wat in het model in Delft3D beschreven is als D2 heeft driehoekige cellen met een grootte van rond de 25 meter. Dit is grover dan in het Delft3D model.



Figuur 17: Representatie geul



Figuur 18: Spoelmeer (links) en koppeling geul waddenzee en kleine geul (rechts)

5.3 METHODE ANALYSE ACCURAATHEID EN REKENTIJD

De gebruikte methodologie voor de analyse van de accuraatheid en rekentijd zal in deze sectie worden behandeld. In sectie 5.3.1 volgt de methode voor de accuraatheid, en in sectie 5.3.2 de rekentijd.

5.3.1 Analyse accuraatheid

In de numerieke modellen zijn alleen de stromingsmodules gebruikt en er wordt in 2D gemodelleerd. Verder wordt er geen saliniteit, temperatuur, wind en golven meegenomen. Meer informatie over de gemeenschappelijke modelinstellingen van Delft3D en Delft3D FM is te vinden in Bijlage K.

Naast de gemeenschappelijke instellingen tussen Delft3D en Delft3D FM zijn er een aantal modelinstellingen gevarieerd. Er zijn vier scenario's opgesteld waarin onder andere de instellingen worden gevarieerd, in Tabel 2 staat een overzicht van de scenario's. Door de verschillende scenario's wordt het mogelijk om oorzaken van verschillen in resultaten te achterhalen. Daarnaast wordt door het variëren van de instellingen de robuustheid getest.

Scenario 1 en 2 focussen op de bodeminstellingen. Uit hoofdstuk 4 wordt duidelijk dat er een verschil zit tussen de instellingen van Delft3D en Delft3D FM. Uit deze scenario's wordt duidelijk welk effect de bodeminstellingen hebben op de resultaten van Delft3D FM en welke bodeminstellingen het meest overeenkomen met Delft3D. In scenario 1 en 2 worden Model 1 in Delft3D FM en het Delft3D model vergeleken. Op basis van het literatuuronderzoek van hoofdstuk 4, is de verwachting dat het resultaat van beide modellen in grote lijnen overeenkomt door het gelijke rooster. Daarom is het mogelijk om de verschillen in bodeminstellingen te onderzoeken. Er worden twee verschillende bodeminstellingen in Delft3D FM gebruikt. Deze instellingen zijn geselecteerd, omdat ze het meest lijken op de instellingen die gebruikt zijn in Delft3D. Een instelling met conveyance (lineaire bepaling dwarsprofiel, beschreven in hoofdstuk 4) en een instelling zonder conveyance. Voor een exacte beschrijving bodeminstellingen van Delft3D FM en Delft3D kan Bijlage K geraadpleegd worden. In scenario 2 geldt verder dat het spoelmeer is afgesloten. Het spoelmeer is een vrij bijzondere toepassing waar lokaal vrij hoge stroomsnelheden gemeten kunnen worden. Hierdoor is het interessant om het effect van het spoelmeer in de verschillende modellen vast te stellen.

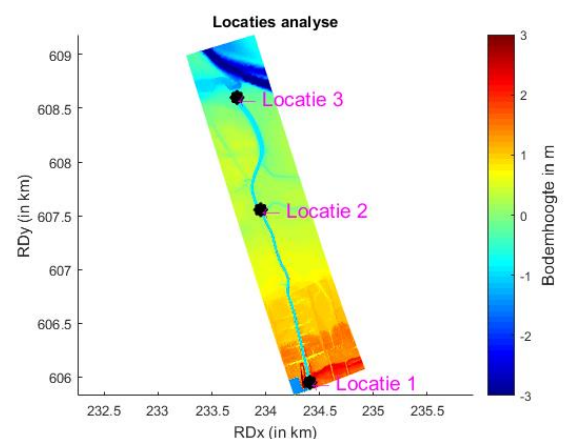
In scenario 3 en 4 worden de drie modellen in Delft3D FM vergeleken met Delft3D. Deze scenario's bieden een overzicht van de verschillen tussen Delft3D en Delft3D FM. Op basis van de resultaten scenario 1 en 2 wordt de bodeminstelling voor scenario 3 en 4 geselecteerd die het meest op de instelling van Delft3D lijkt. Daarnaast zullen in scenario 3 de resultaten van de numerieke modellen worden vergeleken met het analytische model dat is opgesteld door WaterProof. Hieruit wordt duidelijk in hoeverre de resultaten van de verschillende numerieke modellen overeenkomen met het analytisch model. In scenario 4 worden alleen de vier numerieke modellen vergeleken en is het spoelmeer afgesloten om het effect van het spoelmeer in de verschillende modellen te onderzoeken. Een overzicht van de scenario's is te vinden in Tabel 2.

Tabel 2: Overzicht scenario's

Scenario	Modellen	Instellingen	Doel
1	Delft3D FM Model 1 (gelijk rooster)	1: 2 verschillende bodeminstellingen in Delft3D FM (Conveyance, geen conveyance) 2: Spoelmeer	1: Het effect van de verschillende bodeminstellingen vaststellen. 2: Algemene verschillen tussen Delft3D FM en Delft3D
2	Delft3D FM Model 1 (gelijk rooster)	1: 2 verschillende bodeminstellingen in Delft3D FM (Conveyance, geen conveyance) 2: Geen spoelmeer	1: Zelfde als scenario 1 2: Effect van spoelmeer vaststellen
3	Delft3D FM Model 1 t/m 3 Analytisch model	1: Spoelmeer 2: Bodeminstelling wordt bepaald aan de hand van resultaten scenario 1 en 2	1: Verschillen vaststellen modellen in Delft3D FM en Delft3D 2: Overeenkomsten met analytisch model onderzoeken.
4	Delft3D FM Model 1 t/m 3	1: Geen spoelmeer 2: Bodeminstelling wordt bepaald aan de hand van resultaten scenario 1 en 2	1: Vaststellen wat het effect van het spoelmeer is geweest.

Het vergelijken van de resultaten

Voor de casus is met name de stroming in de geul relevant. Daarom zijn er drie observatiepunten in de geul geselecteerd om de resultaten van de verschillende modellen te vergelijken. Deze zijn te vinden in Figuur 19. In de drie observatiepunten worden de stroomsnelheden en de waterstanden vergeleken. Er wordt gemaakt van de absolute stroomsnelheden, omdat in de casus wordt onderzocht of de door het spoelmeer veroorzaakte stroomsnelheden hoog genoeg zijn om het slib te laten eroderen. Locatie 1 is het belangrijkste voor de casus, waardoor de focus in de analyse op deze locatie ligt. De voornaamste reden is dat in dit gebied de meeste aanslibbing op treedt wat de stroomsnelheden in dit gebied belangrijk maakt. Voor het analytisch model, dat wordt gebruikt in scenario 3, zijn alleen de resultaten nabij het spoelmeer gebruikt (rond locatie 1 in figuur).



Figuur 19: Bodemdiepte en locaties (kaart D1N/D1Z)

Om een inzicht te krijgen in de correlatie van de waterstanden en absolute stroomsnelheden tussen Delft3D FM en Delft3D wordt de statistische indicator Root Mean Square Error (RMSE) gebruikt. De uitkomst heeft de eenheid van de input (in dit geval m (waterstand) en m/s (stroomsnelheid)). Er geldt hoe dichter de waarde bij de 0 ligt des te kleiner het verschil is tussen de modellen. De formule is als volgt:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Y_O(t) - Y_E(t))^2}{n}} \quad (7.1)$$

Met n = sample grootte, Y_O de geobserveerde waarde, Y_E de verwachte waarde.

De verwachte waarden zijn de resultaten van het Delft3D model. De geobserveerde waarden zijn de resultaten van de modellen in Delft3D FM. De vergelijking in de verschillende modellen zal dan ook altijd ten opzichte van het huidige Delft3D model zijn.

De modellen zijn uitgevoerd in de periode van 60 uur, van 20-01-2017 04:00 tot en met 22-01-2017 16:00. Voor de figuren van de analyse zijn twee getijden (ongeveer 25 uur) geselecteerd die van '21-Jan-2017 01:00:00' tot '22-Jan-2017 02:00:00' duren. De periode begint en eindigt bij laagwater. Voor de statistische indicator RMSE is bijna de gehele simulatieperiode gebruikt, maar vanwege het opwarmen van het model is de eerste 6 uur niet meegenomen.

5.3.2 Analyse rekentijd

De rekentijd wordt vergeleken voor de drie numerieke modellen in Delft3D FM en het Delft3D model. De modellen worden vergeleken in een situatie met spoelmeer. Op basis van de inzichten van de literatuurstudie van hoofdstuk 4 wordt er gebruik gemaakt van de netwerkgrootte en de gemiddelde tijdstap (benodigd vanwege de dynamische tijdstap van Delft3D FM) om een inzicht te krijgen in oorzaken van verschillen in reketijden. Beide kunnen uit de output van Delft3D en Delft3D FM gehaald worden. Verder wordt er gebruik gemaakt van de prestatie van de simulatie, wat gelijk is aan de rekentijd per tijdstap per cel. Deze wordt berekend met behulp van de volgende vergelijking:

$$Prestatie\ van\ de\ simulatie = \frac{Rekentijd}{At * Ac} \quad (7.2)$$

Waarin geldt:

$Rekentijd$ = Rekentijd in seconden

At = Aantal tijdstappen van de simulatie

Ac = Aantal cellen in het rekenrooster

6 VERSCHILLEN IN TOEPASBAARHEID

De gevonden verschillen in toepasbaarheid worden in dit hoofdstuk beschreven. In sectie 6.1 worden verschillen beschreven die te maken hebben met het rekenrooster. In sectie 6.2 worden meer algemene verschillen die te maken hebben met de userinterface beschreven.

6.1 OPSTELLEN VAN REKENROOSTERS

Om de verschillen beter in kaart te brengen worden eerst de eigenschappen van het opstellen van roosters in beide modellen genoemd. Voor het maken van roosters is in dit onderzoek RGFRID gebruikt, wat standaard bij zowel Delft3D als Delft3D FM wordt geleverd.

6.1.1 Algemene verschillen

Delft3D kan met een curvi lineair rooster redelijk wat flexibiliteit behalen. Zo kunnen rivieren en geulen (zoals in de casus) makkelijk gevolgd worden omdat de cellen enigszins kunnen buigen. Zoals vermeld in Hoofdstuk 4, kan er met gestructureerde roosters in sommige gevallen echter een trapsgewijze representatie ontstaan. Verder is het zo dat een curvi lineair rooster uit een geheel bestaat. Het volgen van een lokale geul zorgt voor een buiging in het gehele rooster. Sommige gebieden kunnen hierdoor een grover rooster dan gewenst krijgen, terwijl andere gebieden een te fijn rooster krijgen. Verder is er een gelimiteerde flexibiliteit, heel erg bochtige gebieden leiden tot een hoge orthogonaliteit. Ook kan het produceren van een curvi lineair rooster veel tijd kosten om te optimaliseren (orthogonaliteit en smoothness). Met name het feit dat lokale eigenschappen een effect hebben op het gehele rooster maakt het gecompliceerd. Daarnaast moet er bij opstellen van het rooster opgelet worden dat de indices van de rijen en kolommen goed zijn gestructureerd.

In Delft3D FM is er een stuk meer flexibiliteit. Het rooster hoeft niet meer uit een geheel te bestaan. Verschillende roosters kunnen bijvoorbeeld met behulp van driehoekige cellen gekoppeld worden. Hierdoor kan het rekenrooster voor elk gebied beter geoptimaliseerd worden, in de gebruikte modellen in dit onderzoek is dit bijvoorbeeld terug te zien in Model 2, beschreven in hoofdstuk 5.2. De lokale eigenschappen (zoals de bochtigheid van de geul) hebben veel minder effect op het gehele rooster. Daarnaast bestaat er in het ongestructureerde rooster geen concept van rijen en kolommen meer, waardoor er niet gelet hoeft te worden op de indices van het rooster.

6.1.2 Verschillen in het maken van verfijningen

In deze sectie wordt het onderscheid gemaakt tussen een lokale verfijning en een globale verfijning. Lokaal wil zeggen dat een verfijning alleen lokaal invloed heeft, terwijl een globale verfijning op het gehele rooster invloed heeft.

Het rooster in Delft3D kan globaal verfijnd worden door een of meerdere kolommen of rijen te verfijnen. Een verfijning van een kolom betekent dat de hele kolom verfijnd is. Naast het verfijnen van een rij of kolom kan het gehele rooster verfijnd worden. Bijvoorbeeld door alle kolommen van het rekenrooster met een factor 2 te verfijnen en alle rijen met een factor 3.

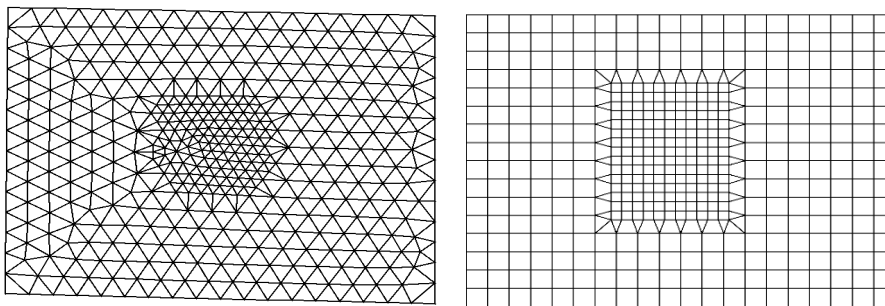
In Delft3D FM zijn dezelfde opties beschikbaar wanneer er met curvi lineaire roosters en rechthoekige roosters gewerkt wordt. Voor driehoekige ongestructureerde roosters, geldt altijd dat er geen rijen en kolommen bestaan. Hierdoor kan het rooster niet meer verfijnd worden op basis van kolommen of rijen. De optie die mogelijk is om dit rooster te verfijnen splitst een driehoekige cel in 4 cellen met een gelijk volume (Deltares, 2017), zoals te zien in Figuur 20.

Een lokale verfijning kan in Delft3D gemaakt worden met domein decompositie. Het gebruik van domein decompositie biedt veel flexibiliteit zonder dat het een significant verschil in accuraatheid oplevert (Deltares, 2014). Wel zijn er enige restricties aan het gebruik van domein decompositie. De roosters moeten gelijke grenzen hebben, wat in principe betekent dat het altijd een verfijning is van een geheel bestaand rooster. Dit betekent dat er dezelfde nadelen spelen als toegelicht in sectie 6.1.1, voornamelijk dat lokale eigenschappen een effect hebben op het gehele rooster. Verder moet een verfijningsfactor van een domein altijd een geheel getal zijn (Deltares, 2014).

In Delft3D FM zijn er in principe geen restricties hoe het rooster verfijnd kan worden. Het rooster kan ook 1.5 x of 2.5 x verfijnd worden. Dit is voornamelijk het geval omdat in Delft3D FM verschillende losstaande roosters kunnen worden opgesteld die uiteindelijk worden gekoppeld met driehoekige cellen. Hierdoor heeft een lokaal gedeelte van het rooster weinig effect op het gehele rooster. Een voorbeeld is model 2, zoals beschreven in hoofdstuk 5.2.

Een nadeel van het hiervoor besproken (1.5 x verfijnen en het koppelen van verschillende roosters) is dat er vrij veel ongestructureerde cellen gebruikt moeten worden om de verschillende roosters te verfijnen (zie bijvoorbeeld Model 1 en 2). In sommige situaties kan dit ongewenst zijn omdat voor accuraatheid en efficiëntie nog steeds wordt aangeraden om zoveel mogelijk gestructureerde cellen te gebruiken (Kernkamp et al., 2011).

Het alternatief van een lokale verfijning aanbrengen is alleen van toepassing wanneer er een rechthoekig rooster of curvi lineair rooster over het gehele domein is geplaatst. Dit is dus niet toe te passen wanneer er verschillende roosters zijn opgesteld die gekoppeld moeten worden. Er kan lokaal een verfijning worden aangebracht met twee functies, *casulli* en *CellsAndFaces2*. Het rooster wordt hierdoor met een factor 2 verfijnd, zowel de rijen als de kolumnen, dit is te zien in Figuur 20. Het is niet mogelijk om alleen de kolumnen te verfijnen of alleen de rijen



Figuur 20: Verfijning in een driehoekig rooster (links) en *Casulli refinement* gestructureerd rooster (rechts)

6.1.3 Orthogonalisatie

Om de orthogonaliteit van het rooster te verbeteren is er in RGFRID de functie “Orthogonalise grid”, die beschikbaar is voor zowel Delft3D als Delft3D FM. In Delft3D FM werkt de functie vergelijkbaar met Delft3D voor gestructureerde roosters. Wanneer er echter verschillende soorten roosters (curvi lineair, rechthoekig, driehoekig) worden gecombineerd, zoals in model 2, is de bruikbaarheid van deze functie gelimiteerd. Het orthogonaliseren van het rooster zoals gebruikt in model 2 kwam dan gedeeltelijk neer op handwerk. Door het met de hand verschuiven van knooppunten van het driehoekige rooster kon de orthogonaliteit verbeterd worden. Dit is vrij gemakkelijk door de flexibiliteit van het rooster, maar wel tijdrovend.

6.1.4 Overzicht van verschillen en voor en nadelen

Samengevat zijn sommige opties die Delft3D FM biedt ook mogelijk in Delft3D. Vooral omdat aangeraden wordt om voor efficiëntie gebruik te maken van gestructureerde cellen in Delft3D FM. Zo kan in Delft3D en Delft3D FM een verfijning in het rooster worden aangebracht en beide kunnen gebruik maken van een curvi lineair rooster wat de accuraatheid kan bevorderen. Het verschil is voornamelijk de flexibiliteit die Delft3D FM biedt in het maken van het rooster. Hierdoor kunnen sommige gebieden beter worden beschreven, zoals onregelmatige gebieden en landsgrenzen. Verder is het opstellen van het rooster gemakkelijker. Een voorbeeld van het gebruiksgemak is het maken van lokale verfijningen in het rooster van Delft3D FM. Een nadeel van het produceren van het rooster in Delft3D FM is dat in complexe situaties het produceren van een rooster relatief veel handwerk kan zijn (bijvoorbeeld het orthogonaliseren van het rooster). De voor en nadelen zijn samengevat in Tabel 3.

Tabel 3: Overzicht mogelijke voor- en nadelen

	Delft3D	Delft3D FM
Voordelen	- Gestructureerde roosters zijn vaak efficiënt voor de numerieke oplossing	- Heel veel flexibiliteit - Landsgrenzen accuraat volgen - Opstellen van het rooster meestal vrij gemakkelijk door de flexibiliteit - Niet nodig om verschillende domeinen op te zetten voor het maken van verfijningen
Nadelen	- Minder flexibiliteit - Minder accuraat volgen van landgrenzen - Complexiteit van het opstellen van een curvi lineair rooster. - Voor het (lokaal) verfijnen van het rooster moeten verschillende domeinen opgezet worden	- Kan soms veel handwerk zijn om te maken, kan erg tijdrovend zijn. - Een gedeelte van de flexibiliteit van ongestructureerde roosters kan niet worden benut omdat het niet efficiënt is.

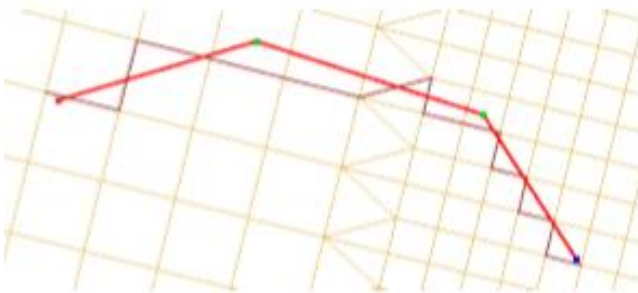
6.2 USER INTERFACE

In de userinterface zijn veel veranderingen toegepast. In het kort zijn in Delft3D FM de verschillende onderdelen van Delft3D geïntegreerd in één interface. In Delft3D gebeurt het produceren van een rooster, het interpoleren van bodemdata en het bekijken van resultaten allemaal in aparte applicaties die los staan van Delft3D. De applicaties die hiervoor gebruikt worden zijn bijvoorbeeld RGFGrid, quickin en quickplot. In Delft3D FM gebeurt dit voornamelijk in het programma zelf. In Bijlage J zijn voorbeelden van de interface van Delft3D FM te vinden.

6.2.1 Verschillen in het opstellen van het model

Er zijn een aantal verschillen tussen het opstellen van een model in Delft3D en Delft3D FM, maar de meeste opties komen overeen. Zoals besproken in sectie 6.1, verschilt het opstellen van een rekenrooster in Delft3D FM met Delft3D. Deze verschillen zullen hier niet herhaald worden.

Daarnaast zijn er verschillen die te maken hebben met de objecten die geplaatst worden in het model, zoals thin dams en observatiepunten. De objecten zelf verschillen niet, alleen methode van het plaatsen van objecten. In Delft3D worden deze objecten geformuleerd in rooster indices. Wanneer het rooster echter veranderd, veranderen ook de indices, waardoor de objecten niet geïmporteerd kunnen worden. In Delft3D FM is alle geometrische input (objecten) geformuleerd in coördinaten (Deltares, 2016). Dit maakt het importeren van de objecten naar verschillende roosters mogelijk. Delft3D FM plaatst het object zelf op de goede plaats (aan de rand van de cel), zoals te zien in Figuur 21. Hierdoor hoeft het model niet opnieuw geformuleerd te worden wanneer het rooster gewisseld wordt.



Figuur 21 : in rood de geplaatste thin dam, in paars de plaatsing (snap) van Delft3D FM (Deltares, 2016)

6.2.2 Verschillen in mogelijkheden visualisatie modellen

Allereerst heeft Delft3D FM een GIS-interface. Hierdoor kunnen verschillende kaartlagen bijvoorbeeld het rooster, de bodemhoogte, de observatiepunten en de output gemakkelijk aan en uitgezet worden. Voorbeelden van de interface zijn te vinden in Bijlage J. In Delft3D kunnen alle objecten, bodemdata en het rooster worden gezien in het visualisatiescherf dat geïntegreerd is of met het externe programma Quickin. Delft3D en Delft3D FM verschillen in principe niet in mogelijkheden om het model te visualiseren, wel is het gebruiksgemak van Delft3D FM groter.

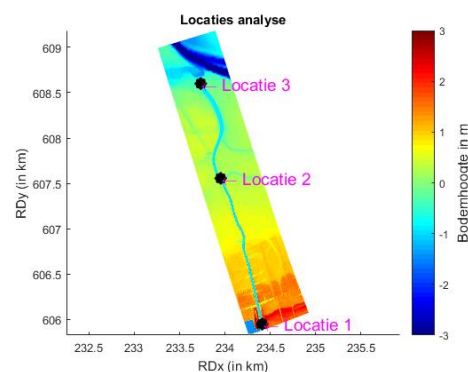
Het grootste verschil is dat de visualisatie van resultaten/ output ook is verwerkt in de interface van Delft3D FM. De resultaten kunnen direct na de simulatie bekeken worden als animatie. Verder kunnen resultaten direct worden geplote door een observatiepunt te selecteren. Een mogelijk voordeel hiervan is dat in Delft3D FM alle informatie direct beschikbaar terwijl de resultaten bekeken worden. In Delft3D is het visualiseren van resultaten alleen extern mogelijk, hiervoor kan bijvoorbeeld Quickplot gebruikt worden.

Er kunnen figuren geëxporteerd worden uit de interface van Delft3D FM, maar er zijn (in de gebruikte versie) weinig mogelijkheden om figuren te exporteren en aan te passen (as, titels, legenda etc.). Voor het maken van figuren en het verder verwerken van resultaten kunnen externe programma's gebruikt worden. Zowel in Delft3D als Delft3D FM is bijvoorbeeld Open Earth Tools (OET) in combinatie met Matlab beschikbaar. OET is een open source database met daarin verschillende functies die worden aangeboden via Deltares. Er is echter geen inzicht gekregen in het gebruik van OET in combinatie met Delft3D FM. De vergelijking tussen Delft3D en Delft3D FM kan dan ook niet gemaakt worden in dit opzicht. De voornaamste reden is dat de functies die beschikbaar waren in OET niet gebruikt konden worden met de gebruikte versie van Delft3D FM in dit onderzoek, omdat er geen bijgewerkte functies beschikbaar waren.

Afsluitend is het grootste voordeel van Delft3D FM dat alle informatie in een interface zit wat een eerste interpretatie van de resultaten gemakkelijk en snel maakt. Daarnaast biedt de GIS-interface in Delft3D FM gebruiksgemak.

7 VERSCHILLEN IN ACCURAATHEID

In dit hoofdstuk zullen de resultaten (waterstanden en absolute stroomsnelheden) van de verschillende modellen worden gepresenteerd. De methode van de analyse is beschreven in Hoofdstuk 5. Allereerst worden de resultaten van de modellen besproken. Met name de resultaten van locatie 1 zullen behandeld worden (zie Figuur 22). In Bijlage L zullen de resultaten van andere locaties beschikbaar zijn. Na het bespreken van de resultaten volgt een analyse van mogelijke oorzaken van verschillen in resultaten tussen de modellen. Er wordt afgesloten met een onderzoek naar de robuustheid van de verschillende modellen.

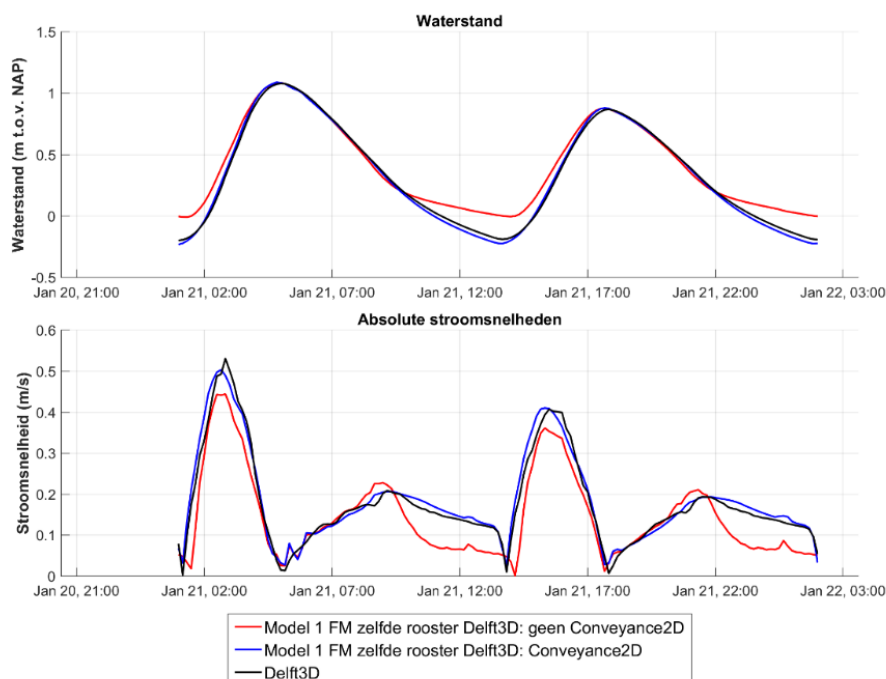


Figuur 22: Ligging locaties

7.1 HET EFFECT VAN HET VERSCHIL IN BODEMINSTELLINGEN (SCENARIO 1 EN 2)

De modellen die worden vergeleken in scenario 1 en 2 zijn Model 1 (gelijk rooster) in Delft3D FM en het Delft3D model. Er zijn twee bodeminstellingen gebruikt voor model 1 in Delft3D FM. Deze worden genoemd Model 1: conveyance en Model 1 geen conveyance. Het concept van conveyance is uitgelegd in hoofdstuk 4, dit heeft te maken met de lineaire bepaling van het dwarsprofiel. De details van de bodeminstellingen worden toegelicht in Bijlage K. In scenario 2 is het spoelmeer afgesloten, maar worden dezelfde bodeminstellingen gebruikt.

Alleen de grafiek in het scenario met spoelmeer op locatie 1 wordt hier weergegeven in Figuur 23. De grafieken voor alle locaties en scenario's zijn weergegeven in Bijlage L. In Tabel 4 en Tabel 5 worden de RMSE-waarden weergegeven voor zowel de waterstanden als de stroomsnelheden voor de drie locaties en de scenario's.



RMSE locatie 1 (t.o.v. D3D)

Waterstand

Model 1 con	0.024
Model 1 geen con	0.10

Stroomsnelheid

Model 1 con	0.019
Model 1 geen con	0.053

Figuur 23: Modellen met spoelmeer (scenario 1) en locatie 1 (bij de opening van het spoelmeer)

Tabel 4 RMSE waterstanden scenario 1 en 2 (t.o.v. Delft3D)

Scenario 1: Met spoelmeer	RMSE Locatie 1	RMSE Locatie 2	RMSE Locatie 3
Model 1 FM: Conveyance	0.024	0.021	0.0058
Model 1 FM: Geen conveyance	0.10	0.046	0.021
Scenario 2: Zonder spoelmeer			
Model 1 FM: Conveyance	0.024	0.024	0.0090
Model 1 FM: Geen conveyance	0.12	0.043	0.012

Tabel 5: RMSE absolute stroomsnelheden scenario 1 en 2 (t.o.v. Delft3D)

Scenario 1: Met spoelmeer	RMSE Locatie 1	RMSE Locatie 2	RMSE Locatie 3
Model 1 FM: Conveyance	0.019	0.037	0.033
Model 1 FM: Geen conveyance	0.053	0.094	0.065
Scenario 2: Zonder spoelmeer			
Model 1 FM: Conveyance	0.0029	0.032	0.032
Model 1 FM: Geen conveyance	0.0093	0.073	0.040

Model 1 met Conveyance2D vergeleken met Delft3D

Model 1 met de instelling voor Conveyance2D komt in situatie met spoelmeer (scenario 1) vrij sterk overeen met het Delft3D model, zoals blijkt uit Figuur 23. De waterstanden van model 1 zijn iets lager tijdens laagwater en de stroomsnelheden iets hoger. Het verschil is echter minimaal. Ook zonder spoelmeer (scenario 2) komt model 1 met conveyance sterk overeen met Delft3D zoals blijkt uit de lage RMSE waarden van Tabel 4 en Tabel 5.

Model 1 zonder Conveyance 2D vergeleken met Delft3D

Model 1 zonder conveyance2D in een situatie met spoelmeer (scenario 1) heeft een grote afwijking ten opzichte van het Delft3D model, zoals duidelijk wordt uit Figuur 23. Er blijft meer water in de geul staan dan in het Delft3D model. In de snelheden in Figuur 23 valt ook te zien dat het water met een minder hoge snelheid weg loopt, wat kan duiden op een kleiner debiet door de geul.

Wanneer het spoelmeer wordt afgesloten (scenario 2) geldt dat er een vergelijkbaar verschil in waterstand optreedt op locatie 1. De RMSE-waarden in Tabel 5 laten zien dat er een grote afwijking is van de stroomsnelheden op locatie 2 en 3 ten opzichte van het Delft3D model. De stroomsnelheden zijn niet relevant voor dit scenario op locatie 1, omdat ze erg laag zijn (<0.05 m/s) vanwege de afwezigheid van een spoelmeer. Als gevolg zijn ook de RMSE-waarden laag voor locatie 1.

Model 1 zonder conveyance heeft dus een grote afwijking ten opzichte Delft3D in een situatie met en een situatie zonder spoelmeer. Zowel de waterstanden als de stroomsnelheden wijken af. Naarmate de afstand van de kust groter wordt, wordt het verschil in waterstand kleiner. Wel blijft er een grote afwijking van de stroomsnelheden op de verschillende locaties.

7.1.1 Oorzaken van verschillen in resultaten model 1 en Delft3D

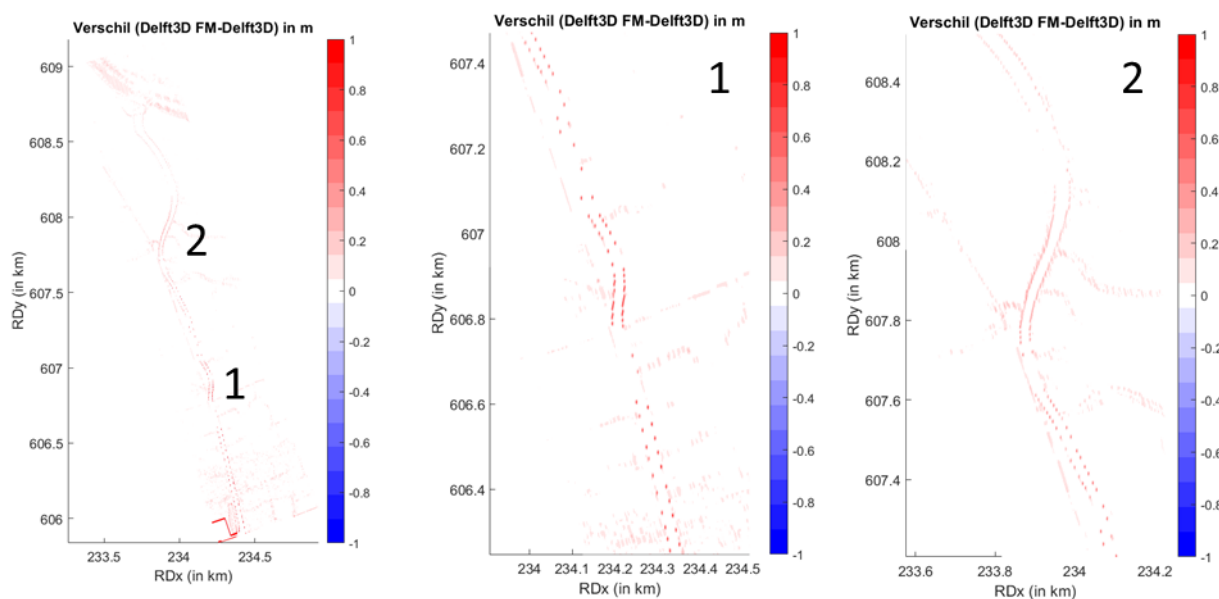
Vanwege de verschillen in bodeminstellingen tussen Delft3D en Delft3D FM is er onzekerheid of de bodemhoogtes van de modellen overeenkomen. Er zijn verschillende oorzaken mogelijk voor het optreden van verschillen in bodemhoogtes, zoals de interpolatie op het rekenrooster en de modelinstellingen (bodemhoogtes voor de numerieke oplossing).

Aangezien dezelfde data is gebruikt in Delft3D en Delft3D FM en bijna hetzelfde rooster, is een verschil in interpolatie niet aannemelijk. Het verschil in interpolatie is dan ook minimaal, waardoor verschillen in bodemhoogtes door interpolatie zijn uitgesloten. In Bijlage M is het kleine verschil in interpolatie weergegeven.

De bodemhoogtes in het midden van de cel van het Delft3D FM model met conveyance verschillen nauwelijks van het Delft3D model. De bodeminstelling conveyance komt dus goed overeen met die van Delft3D. Dit is toegelicht in Bijlage M. Hierdoor is het overeenkomstige resultaat tussen

Delft3D en Delft3D FM goed te verklaren. Daarnaast komt het overeenkomstige resultaat van Delft3D en Delft3D FM overeen met de verwachting uit hoofdstuk 4, omdat er een gelijk rooster is gebruikt. Mogelijk veroorzaakt de numerieke oplossing van Delft3D FM, of de lineaire bepaling van de dwarsdoorsnede van conveyance, het kleine verschil in het resultaat tussen Delft3D en Delft3D FM.

Er zit een vrij groot verschil tussen model 1 zonder conveyance 2D en het Delft3D model. Op basis van het literatuuronderzoek uit hoofdstuk 4, is de verwachting dat bij een gelijk rooster een minimaal verschil in resultaat op treedt. Mogelijk veroorzaakt de bodeminstelling zonder Conveyance het verschil. Het verschil in meegenomen bodemhoogtes tussen Delft3D en Delft3D FM is te zien in Figuur 24. Langs de randen van de geul valt op dat er verschillen optreden. In de bochtige gebieden, zoals locatie 1 en 2 in de figuur treedt er een vrij groot verschil op. Delft3D FM heeft op sommige plekken een tot 80 cm hogere bodem aan beide kanten. Hierdoor is de geul op sommige plekken 1 à 2 cellen smaller (dus 3,5 à 7 meter), terwijl de geul zelf maar 20 meter breed is. Mogelijk loopt het water hierdoor minder makkelijk weg. Dit verklaart waarschijnlijk de lage stroomsnelheden en de hoge waterstanden tijdens laagwater.



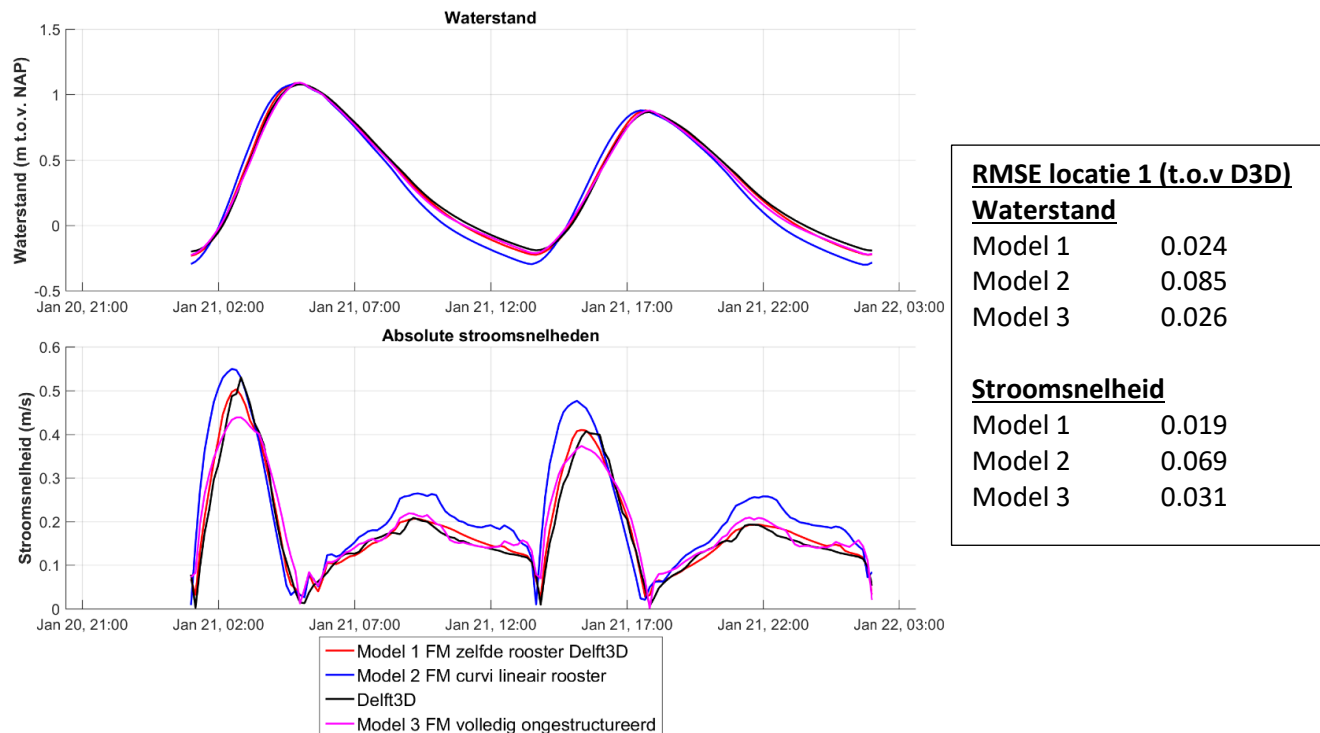
Figuur 24: Verschillen in bodemhoogtes. Links overzicht, midden en rechts zoom op locatie 1 en 2

Er wordt geconcludeerd dat de instelling in Delft3D FM met Conveyance2D het best overeen komt met de gebruikte instellingen van Delft3D. In de volgende scenario's zal daarom deze bodeminstelling worden gebruikt. Verder komt het resultaat van Delft3D en Delft3D FM goed overeen met hetzelfde rooster, mits overeenkomstige bodeminstellingen worden gebruikt

7.2 VERGELIJKING DELFT3D, DELFT3D FM EN HET ANALYTISCH MODEL (SCENARIO 3 EN 4)

In scenario 3 zijn alle numerieke modellen (model 1, model 2, model 3 en Delft3D) vergeleken in een situatie met een spoelmeer. Daarnaast is op basis van resultaten van scenario 1 en 2 gekozen voor de bodeminstelling Conveyance2D in alle modellen van Delft3D FM. In scenario 4 worden dezelfde modellen vergeleken, maar is het spoelmeer afgesloten. Als laatste wordt er in een situatie met spoelmeer (scenario 3) een vergelijking gemaakt met de resultaten van het analytische model. De resultaten van het analytische model zijn echter niet weergegeven en kunnen in Bijlage P gevonden worden.

Alleen de grafiek voor een situatie met spoelmeer op locatie 1 wordt weergegeven in Figuur 25. Voor de grafieken van het scenario zonder spoelmeer en voor de andere locaties kan Bijlage L geraadpleegd worden. In Tabel 6 en Tabel 7 de RMSE waarden voor alle locaties gegeven en scenario's gegeven.



Figuur 25: Scenario 3 (met spoelmeer) locatie 1 (nabij opening spoelmeer), alleen numerieke modellen

Tabel 6 : RMSE waterstanden scenario 3 en 4 (t.o.v. Delft3D)

Scenario 3: Spoelmeer	RMSE Locatie 1	RMSE Locatie 2	RMSE Locatie 3
Model 1 FM: Zelfde rooster	0.024	0.021	0.0058
Model 2 FM: Curvi lineair	0.085	0.064	0.010
Model 3 FM: Volledig ongestructureerd	0.026	0.038	0.0096
Scenario 4: Geen spoelmeer	RMSE Locatie 1	RMSE Locatie 2	RMSE Locatie 3
Model 1 FM: Zelfde rooster	0.024	0.024	0.0090
Model 2 FM: Curvi lineair	0.088	0.065	0.013
Model 3 FM: Volledig ongestructureerd	0.056	0.051	0.011

Tabel 7: RMSE stroomsnelheden scenario 3 en 4 (t.o.v. Delft3D)

Scenario 3: Spoelmeer	RMSE Locatie 1	RMSE Locatie 2	RMSE Locatie 3
Model 1 FM: Zelfde rooster	0.019	0.037	0.033
Model 2 FM: Curvi lineair	0.069	0.11	0.034
Model 3 FM: Volledig ongestructureerd	0.031	0.053	0.028
Scenario 4: Geen spoelmeer	RMSE Locatie 1	RMSE Locatie 2	RMSE Locatie 3
Model 1 FM: Zelfde rooster	0.0029	0.032	0.032
Model 2 FM: Curvi lineair	0.0082	0.074	0.030
Model 3 FM: Volledig ongestructureerd	0.0047	0.046	0.027

Model 1 (gelijk rooster) vergeleken met het Delft3D model

Er zit een minimaal verschil tussen Model 1 en Delft3D. Verder geldt dat Model 1 met conveyance2D al is vergeleken met het Delft3D model in sectie 7.1, hier is een uitgebreidere beschrijving te lezen van de verschillen. Daarnaast zijn de mogelijke oorzaken van de verschillen tussen model 1 en Delft3D te vinden in sectie 7.1.1.

Model 2 (curvi lineair rooster geul) vergeleken met het Delft3D model

In de vergelijking van Model 2 met het Delft3D model valt op dat in model 2 de waterstanden tijdens laagwater niet overeenkomen. In Figuur 25 is te zien dat Model 2 een ongeveer 10 cm lagere waterstand heeft tijdens laagwater dan het Delft3D model. Tijdens hoogwater zijn de verschillen in waterstanden tussen de modellen minimaal. In een situatie zonder spoelmeer treedt een vergelijkbaar verschil in waterstand op (8 cm) tijdens laagwater, zoals te zien in Bijlage L.

Verder zijn de stroomsnelheden tijdens het leeglopen van het spoelmeer hoger dan in het Delft3D model, dit geldt met name voor locatie 1 en 2. In de situatie zonder spoelmeer (scenario 4) valt op dat met name op locatie 2 de verschillen tussen de stroomsnelheden vrij groot zijn, zoals blijkt uit de RMSE waarde in Tabel 7.

Model 3 (volledig ongestructureerd) vergeleken met het Delft3D model

In de vergelijking van Model 3 met het Delft3D Model valt op dat de waterstanden tijdens zowel hoogwater als laagwater redelijk goed overeenkomen in een situatie met spoelmeer (scenario 3), zoals te zien in Figuur 25. Zonder spoelmeer (scenario 4) zijn de verschillen in waterstanden iets groter geworden, maar nog steeds klein.

In scenario 3 komen de stroomsnelheden tijdens laagwater redelijk overeen met het Delft3D model, wat te zien is in Figuur 25. Tijdens hoogwater ligt de piek van de stroomsnelheden lager dan in het Delft3D model. Ook zonder spoelmeer (scenario 4) komen de resultaten redelijk overeen met het Delft3D model.

Vergelijking numerieke modellen met analytisch model

Het analytische model dat is opgesteld door WaterProof laat over het algemeen hogere stroomsnelheden (piek ongeveer 0.5 m/s) tijdens het leeglopen van het spoelmeer zien en lagere waterstanden dan het Delft3D model. Model 1 en model 3 komen redelijk overeen met Delft3D en hebben dus een vergelijkbare afwijking van het analytische model. Model 2 in Delft3D FM laat hogere stroomsnelheden en lagere waterstanden zien, en komt dus beter overeen met de resultaten van het analytische model. Ondanks de afwijking ten opzichte van de andere modellen, is het resultaat van model 2 dus niet direct een onregelmatigheid te noemen. Meer informatie over de vergelijking met het analytische model is te vinden in Bijlage P.

7.2.1 Oorzaken verschillen Model 2 Delft3D FM (Curvi lineair rooster geul) en Delft3D

Model 2 laat lagere waterstanden en hogere stroomsnelheden zien dan de andere modellen, zoals te zien in Figuur 25. Vanwege de aanpassingen in het rekenrooster zou het kunnen dat sommige gebieden beter of slechter worden beschreven dan in het Delft3D model. Op verschillende locaties zijn ongestructureerde cellen gebruikt om de verschillende onderdelen van het rekenrooster te koppelen. Dit zijn onzekerheden, voornamelijk omdat er weinig bekend is over het gebruik van ongestructureerde cellen in combinatie met de accuraatheid. Om te onderzoeken of deze locaties de afwijking in het resultaat hebben veroorzaakt, zijn er drie hypothesen opgesteld. Om de hypothesen te toetsen is het rekenrooster op verschillende plekken aangepast om te onderzoeken wat het verschil in het resultaat is. De beschrijvingen van de drie hypothesen, aanpassingen in het rekenrooster en de resultaten zijn te vinden in Bijlage M.

De veranderingen van het ongestructureerde rekenrooster op de onzekere locaties hebben weinig tot geen invloed op de waterstanden en stroomsnelheden in het model. Het is dus niet aannemelijk dat de ongestructureerde cellen, die gebruikt zijn voor de koppeling van de verschillende onderdelen van het rekenrooster, het verschil in resultaat van model 2 heeft veroorzaakt.

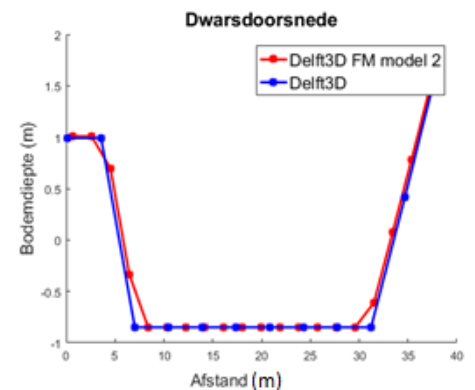
Naast de ongestructureerde cellen is de grootste verandering in model 2 het curvi lineaire rooster in de geul. Dit leidt tot de volgende hypothese:

De geul wordt door het fijne curvi lineaire rooster anders beschreven dan in Delft3D, waardoor er verschillen in de dwarsdoorsnede van de geul optreden.

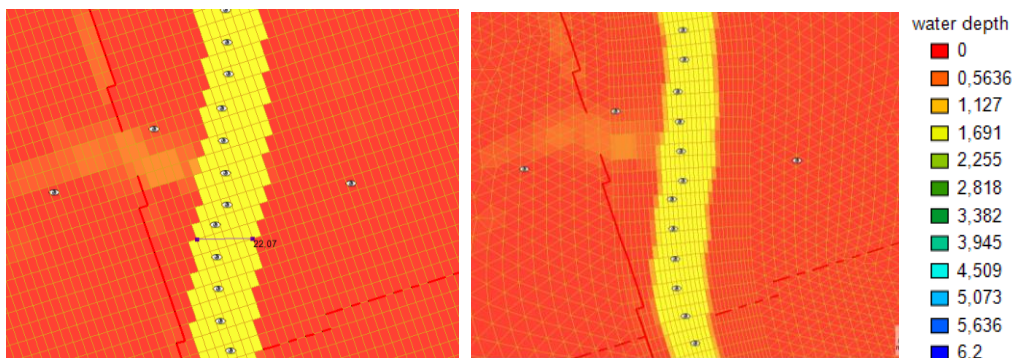
Zoals bevestigd werd door scenario 1 en 2 kan een verschil in bodemhoogtes in de geul grote verschillen in waterstanden en stroomsnelheden veroorzaken. Model 2 heeft een ander rooster in de geul dan Model 1 en het Delft3D model, waardoor de ligging van de hoekpunten anders is. Hierdoor kan de bodemhoogte in Delft3D FM verschillen met die van Delft3D. Dit zou mogelijk de verschillen in waterstanden en stroomsnelheden kunnen.

Allereerst wordt een vergelijking gemaakt tussen de dwarsdoorsneden op locaties met een recht verloop van de geul. Een voorbeeld van een dwarsdoorsnede van de geul nabij het spoelmeer is te zien in Figuur 26. De dwarsdoorsnede van het Delft3D FM model is hier iets smaller, maar het verschil is minimaal. Bij andere dwarsdoorsneden, zoals te vinden in Bijlage M, is het verschil ook minimaal. De verschillen zijn zodanig klein dat het niet aannemelijk is dat het verschil in resultaat hierdoor is veroorzaakt.

In bochtige gebieden van de geul staan in model 2 van Delft3D FM de cellen in lijn met de stromingsrichting, maar in het Delft3D model niet. Vanwege het gebruik van rooster indices, is het hierdoor niet mogelijk om een goede vergelijking te maken van de dwarsdoorsnede (zoals Figuur 26). Om toch een inschatting te maken van de dwarsdoorsnede, worden de waterdieptes op hetzelfde moment vergeleken, dit is te zien in Figuur 27. Alhoewel de breedte van de dwarsdoorsnede niet direct duidelijk wordt, valt de trapsgewijze representatie van het Delft3D model op. Hierdoor ontstaat op sommige locaties een vernauwing van de geul. In het Delft3D FM model is, vanwege het curvi lineaire rooster en de hoge resolutie, de breedte constanter. Dit is een aannemelijke verklaring voor het resultaat. Veel andere verschillen tussen de roosters zijn door het toetsen van de hypothesen uitgesloten. Daarnaast laat model 1 zien dat met een gelijk rooster in Delft3D FM vergelijkbare resultaten behaald kunnen worden als het Delft3D model. Hierdoor kan grotendeels worden uitgesloten dat eigenschappen van Delft3D FM, buiten het rekenrooster, het verschil hebben veroorzaakt. Het curvi lineaire rooster lijkt dan de belangrijkste verklaring voor het verschil tussen Delft3D en Delft3D FM model 2.



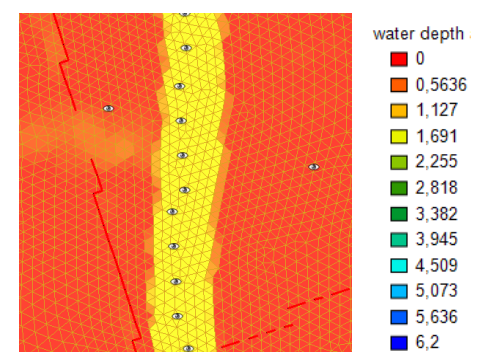
Figuur 26: Dwarsdoorsnede geul nabij spoelmeer



Figuur 27: Waterdiepte Delft3D(links) en Delft3D FM model 2 (rechts)

7.2.2 Oorzaken verschillen Model 3 (volledig ongestructureerd) en Delft3D

Zowel Model 3 als model 2 kunnen de trapsgewijze representatie van de geul voorkomen. Het resultaat van Model 3 is echter vergelijkbaar met het Delft3D model (zie bijvoorbeeld Figuur 25). Dit is waarschijnlijk veroorzaakt door een hoekige representatie van de geul, zoals te zien in Figuur 28. Op sommige locaties volgt het relatief grove rooster niet exact de contour van de geul. Model 3 geeft dus een minder accurate beschrijving van de geul dan model 2. Op basis van eerdere ervaringen met afwijkingen van de bodemdiepte in de geul (scenario 1 en 2) is het aannemelijk dat de hoekige presentatie in model 3 de oorzaak is van de afwijking ten opzichte van model 2 en het kleine verschil met Delft3D.



Figuur 28: Waterdieptes Model 3

7.3 ROBUUSTHEID VAN DE MODELLEN

De gevoeligheid wordt onderzocht op verschillende aspecten. Allereerst wordt het effect van de bodeminstellingen/ afwijkingen van bodemhoogtes op de resultaten geanalyseerd, daarna het effect van het spoelmeer en vervolgens het effect van het (ongestructureerde) rekenrooster.

De bodeminstellingen en verschillen in bodemhoogtes hebben over het algemeen een grote invloed op de modellen. Verder is er door de afwijkende instellingen van Delft3D FM wat onzekerheid, waardoor de instellingen zijn getest in scenario 1 en 2. De smalle geul in combinatie met het grove rooster leiden ertoe dat er snel verschillen in het resultaat ontstaan. Met name het Delft3D model, model 1 en model 3 zijn relatief gevoelig voor de bodeminstellingen door het lage aantal cellen in de breedterichting. Model 2 heeft vanwege het fijne rooster een lagere gevoeligheid voor de bodeminstellingen. Dit is geïllustreerd in Bijlage N. Ook in Delft3D zou er echter een fijn curvi lineair rooster kunnen worden toegepast waardoor de robuustheid verhoogd wordt. De betere robuustheid van model 2 is dus niet direct toe te wijzen aan specifieke eigenschappen van Delft3D FM (zoals het ongestructureerde rekenrooster).

In de verschillende scenario's is door het weglaten van het spoelmeer de gevoeligheid getest. Het spoelmeer verhoogt de stroomsnelheden in de geul behoorlijk, waardoor er onregelmatigheden kunnen optreden in de modellen. De gevoeligheid van het Delft3D model en model 1 lijkt vrijwel gelijk. Ook model 3 heeft een vergelijkbare gevoeligheid voor het spoelmeer met Delft3D. Model 2 heeft de grootste gevoeligheid voor het spoelmeer. De stroomsnelheden tijdens laagwater worden het meest verhoogd in dit model.

Model 2 heeft dus de grootste afwijking ten opzichte van het Delft3D model, en wijkt af van de andere modellen in Delft3D FM. Met name dit model is daarom relevant om verder te analyseren op robuustheid. Het rekenrooster is het meest onzekere onderdeel van het model, omdat hier de meeste veranderingen zijn opgetreden ten opzichte van Delft3D. Het curvi lineaire rooster in de geul voldoet aan de aanbevelingen van Deltares voor de beschrijving van een geul (curvi lineair, 10 cellen in breedte richting, orthogonaliteit). Wel is het gebruik van ongestructureerde cellen voor de koppeling van verschillen onderdelen van het rooster onzeker. Er is nog weinig bekend over het gebruik van ongestructureerde cellen. Om de oorzaak van verschillen in het resultaat te achterhalen zijn al veel onzekerheden van het rekenrooster getoetst door aanpassingen te doen in het rekenrooster (beschreven in sectie 7.2.1, meer toelichting Bijlage M). Wat in ieder geval duidelijk wordt, is dat de manier waarop de ongestructureerde cellen gebruikt worden, weinig invloed hebben op het resultaat. Verder wordt duidelijk uit de toepassing van model 3 dat het gebruik van ongestructureerde cellen in het algemeen een lage gevoeligheid kent op het resultaat.

Afsluitend, de bodeminstellingen/afwijkingen in bodemhoogtes kunnen in deze toepassing een significant verschil in het resultaat veroorzaken, wat de onzekerheid van de modellen verhoogt. Dit is echter niet te relateren aan specifieke eigenschappen van Delft3D FM of Delft3D, maar vooral aan een laag aantal cellen in de geul in combinatie met de unieke eigenschappen van de casus. Ook blijkt dat het gebruik van ongestructureerde cellen in het algemeen een lage gevoeligheid kent op het resultaat. In verschillende situaties, zowel met als zonder spoelmeer en met verschillende aanpassingen aan het rekenrooster komt het resultaat in grote lijnen overeen. Over het algemeen zijn er dus geen verschillen in robuustheid gevonden tussen Delft3D en Delft3D FM.

8 VERSCHILLEN IN REKENTIJD

De gevonden rekentijden van de modellen in dit onderzoek zijn te vinden in Tabel 8. Om de rekentijden te bepalen in Delft3D FM zijn de modellen uitgevoerd in een scenario met spoelmeer en met de bodeminstelling Conveyance. Duidelijk wordt dat model 2 in Delft3D FM de laagste rekentijd kent en model 3 de hoogste. Er zijn verschillende oorzaken die het verschil in rekentijd kunnen verklaren.

Tabel 8: Analyse rekentijd

Model	Aantal cellen	Tijdstap (s)	Gemiddelde Tijdstap (s)	Rekentijd (uur)	Prestatie (lager=beter)
Delft3D	151845	3.0	3	5:30	$0.18 \cdot 10^{-5}$
Delft3D FM model 1 Gelijk rooster D3D	158995	0.7-16.3	1.79	4:15	$0.08 \cdot 10^{-5}$
Delft3D FM model 2 Curvi lineair	118015	1.0-15.3	2.44	3:00	$0.10 \cdot 10^{-5}$
Delft3D FM model 3 Volledig ongestruct.	201711	0.5-10.6	1.38	8:30	$0.10 \cdot 10^{-5}$

Allereerst heeft de netwerk grootte van het rooster invloed op de rekentijd (Deltares, 2014), die is weergegeven in Tabel 8. Het grote netwerk van model 3 is een gedeelte van de oorzaak van de grote rekentijd. Verder vereist model 1 nog wat toelichting. Model 1 heeft meer cellen dan Delft3D terwijl hetzelfde rooster is gebruikt. Dit is veroorzaakt door de koppeling van de verschillende domeinen, wat noodzakelijk was in Delft3D FM. Model 2 heeft slechts een hoge resolutie in de geul en heeft een lagere resolutie in de omgeving van de geul. Hierdoor heeft dit model een lager aantal cellen dan de andere modellen. Dit verklaart deels de lage rekentijd van model 2.

Daarnaast is de tijdstap van invloed op de rekentijd (Deltares, 2014). Een belangrijke oorzaak van het verschil in tijdstap tussen Delft3D en Delft3D FM, is de limitering van de tijdstap voor numerieke stabiliteit in Delft3D FM, zoals beschreven in hoofdstuk 4. Dit zou mogelijk kunnen leiden tot een verlies in rekentijd door een lagere gemiddelde tijdstap. Alle modellen in Delft3D FM hebben dan ook een lagere gemiddelde tijdstap dan het Delft3D model, wat kan leiden tot hogere rekentijd in FM. Een andere oorzaak van de lage gemiddelde tijdstap kan het maken van verfijningen in het rekenrooster zijn. Een verfijning geeft altijd kleine cellen waardoor de tijdstap in Delft3D FM mogelijk verder wordt gelimiteerd. Model 1 is een voorbeeld van dit fenomeen (kleine driehoekige cellen voor de koppeling van domeinen).

De laatste belangrijke factor die van invloed is op de rekentijd is de prestatie van de simulatie (Engels: simulation performance) (Deltares, 2014) (Deltares, 2016). De formule voor het berekenen van de prestatie is beschreven in hoofdstuk 5.3.2. Het is de rekentijd per tijdstap per cel. De prestatie van de simulatie is weergegeven in de laatste kolom van Tabel 8 en er geldt hoe lager de waarde, des te beter de prestatie. Duidelijk wordt dat de Delft3D FM modellen een vergelijkbare prestatie kennen, die een stuk beter is dan het Delft3D model.

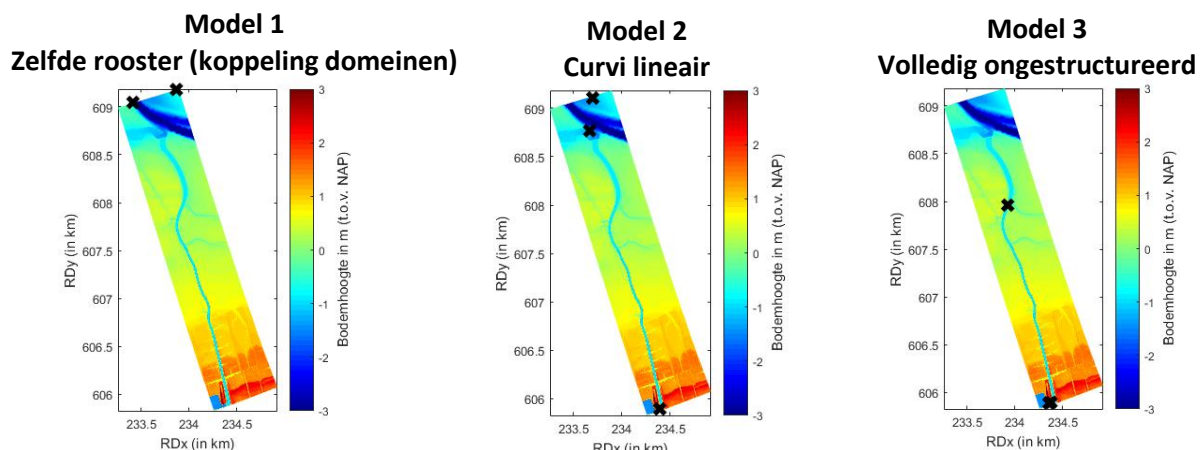
Er zijn een aantal zaken van invloed op de prestatie: De snelheid van de computer, de hoeveelheid output die geschreven wordt en de manier van oplossen (bijvoorbeeld parallel berekenen) (Deltares, 2017). Alle modellen zijn op dezelfde computer uitgevoerd, waardoor de snelheid ongeveer gelijk moet zijn. Verder is er evenveel output geschreven in de modellen.

De manier van oplossen blijft dan over. Hiermee wordt bedoeld op mogelijkheden voor parallele berekening. Zoals vermeld in hoofdstuk 4 maakt Delft3D FM automatisch gebruik van parallele berekening, waardoor de rekentijd mogelijk tot een factor 2 lager is dan zonder parallele berekening (Deltares, 2016). Met domein decompositie in Delft3D is het niet mogelijk om een parallele berekening uit te voeren. Dit is een aannemelijke oorzaak van het verschil in prestatie tussen Delft3D en Delft3D FM en hierdoor het verschil in rekentijd. Meer informatie over parallele berekening is te vinden in Bijlage D. Wanneer Model 1 in Delft3D FM en het Delft3D model vergeleken worden, lijkt voornamelijk de betere prestatie van Delft3D Flexible Mesh de lagere rekentijd te hebben.

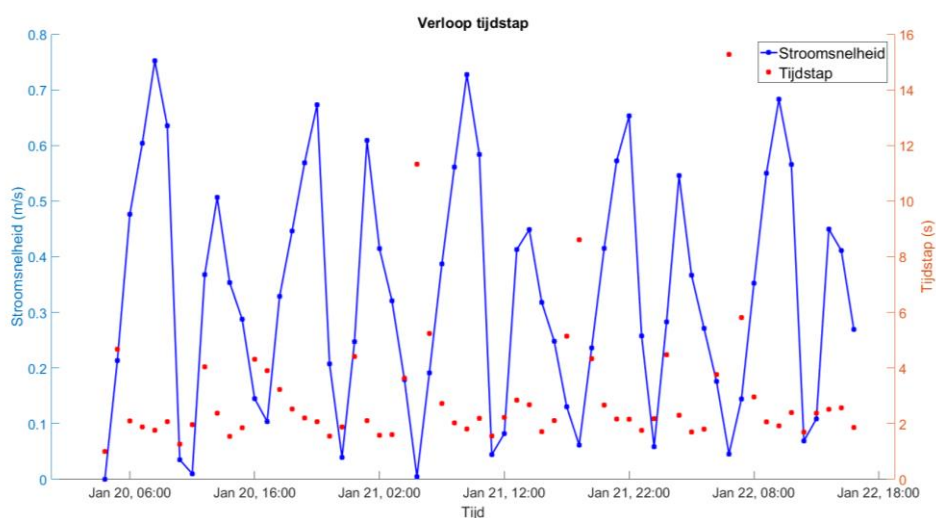
veroorzaakt. Het netwerk van Delft3D FM is groter en de gemiddelde tijdstap beduidend lager dan in Delft3D. Op basis van deze twee factoren wordt een hogere rekentijd verwacht, maar deze blijkt in werkelijkheid dus lager.

8.1.1 Verloop van de tijdstap in Delft3D FM (oorzaak lage gemiddelde tijdstap)

Vanwege de dynamische tijdstap in Delft3D FM is het interessant om te onderzoeken wat ervoor heeft gezorgd dat de tijdstap werd gelimiteerd. De twee a drie locaties die het vaakst limiterend waren zijn te vinden in Figuur 29. Op basis van de figuur kan worden achterhaald welke cellen de tijdstap hebben gelimiteerd, waardoor een gedeelte van de oorzaak van de lage gemiddelde tijdstap in Delft3D FM duidelijk wordt. In model 1 (vergelijkbaar rooster) treedt zoals verwacht in hoofdstuk 5.2.3 de limitering op bij de noordelijke koppeling van de domeinen. In model 2 heeft de verfijning bij het spoelmeer gezorgd voor een limitering van de tijdstap. Verder heeft de koppeling tussen de verschillende roosters met fijne driehoekige cellen (zoals te zien in Figuur 16) gezorgd voor een limitering van de tijdstap. In Model 3 is vooral de representatie rondom het spoelmeer limiterend geweest. In het algemeen kan hieruit worden geconcludeerd dat een verfijning in een gebied met hoge stroomsnelheden, zoals de opening van het spoelmeer en de geulen, een forse limitering kan opleveren voor de tijdstap. Het verloop van de tijdstap voor model 2 is te vinden in Figuur 30, duidelijk wordt dat de tijdstap sterk reageert op de snelheden. Tijdens het opstellen van het rooster is het aan te raden dat er een eerste indicatie is van snelheden in het gebied, zodat het rooster geoptimaliseerd kan worden en de tijdstap minder gelimiteerd wordt.



Figuur 29: De plek van de limiterende cellen. In de figuren zijn de twee a drie meest limiterende cellen gemarkeerd. In de figuur is alleen D1N en D12 van Delft3D afgebeeld niet het gehele domein (alle limiterend cellen bevinden zich in deze domeinen)



Figuur 30: Verloop tijdstap model 2. De snelheden zijn gebaseerd op een observatiepunt nabij de cel die het vaakst limiterend is. Het kan dus zo zijn dat wanneer een andere cel limiterend is geweest dit niet de snelheden zijn die voor de limetering zorgden. Hierdoor reageert de tijdstap in de figuur niet altijd even sterk op de stroomsnelheid.

9 MOGELIJKE VOOR- EN NADELEN VAN DELFT3D FM

Er is een interview uitgevoerd bij WaterProof om te achterhalen bij welke verschillen tussen Delft3D en Delft3D FM het meeste voordeel of nadeel wordt verwacht. De uitwerking van het interview is te vinden in Bijlage O.

In het interview met de experts van WaterProof komen een aantal verschillen in toepasbaarheid naar voren waarbij veel voordeel verwacht wordt. Deze zijn samen te vatten in één verschil: De flexibiliteit van het rekenrooster in Delft3D.

Over het algemeen blijkt uit dit onderzoek dat er een vergelijkbare accuraatheid is te behalen tussen Delft3D en Delft3D FM. Wel heeft model 2 (curvi lineair rooster) een afwijking. Dit kan redelijk verklaard worden door de betere beschrijving van de geul met het rekenrooster en valt in de verwachting van de experts, zoals te lezen is in Bijlage O. Verder komt model 2 beter overeen met de resultaten van het analytisch model. Er kan echter ook in Delft3D een vergelijkbaar curvi lineair rooster voor de geul worden opgesteld. Mogelijk komt het resultaat van Delft3D dan overeen met model 2. Wel is een mogelijk voordeel van Delft3D FM dat sommige gebieden accurater kunnen worden beschreven met het rooster. Daarnaast geldt dat het curvi lineaire rooster in Delft3D gecompliceerder is om te maken, wat bevestigd wordt door het interview. Ook hieruit blijkt dat de toepasbaarheid een voordeel van Delft3D FM is.

Over de rekentijd is geen eenduidige conclusie te geven. Er werden wel lagere rekentijden gevonden in twee van de drie modellen in Delft3D FM dan in Delft3D. Maar dit lijkt vooral te liggen aan het verschil in effectiviteit van de parallelle berekening ten opzichte van domein decompositie in Delft3D. De verschillen zijn dus waarschijnlijk anders wanneer er in zowel Delft3D als Delft3D FM gebruik wordt gemaakt van parallelle berekening. Wel wordt duidelijk dat er snel een limitering van de tijdstap ontstaat in Delft3D FM. Uit het interview bleek ook dat de experts dit een nadeel vinden van Delft3D FM. Een voordeel kan echter zijn dat er meer mogelijkheden zijn om het rekenrooster te optimaliseren, waardoor bijvoorbeeld het aantal cellen in het rooster verlaagd kan worden.

Afsluitend, het grootste voordeel van FM dat gebleken is uit dit onderzoek is de flexibiliteit van Delft3D FM. Dit werd ook bevestigd door de experts als grootste voordeel van Delft3D FM. Het grootste nadeel van het ongestructureerde rooster is de snelle limitering van de tijdstap, als gevolg van de noodzakelijk limitering voor numerieke stabiliteit. Verder is er niet direct een conclusie trekken over de verschillen in rekentijd tussen Delft3D en Delft3D FM die gevonden zijn in dit onderzoek. Ook de accuraatheid van Delft3D en Delft3D FM is in principe vergelijkbaar in deze toepassing. Over het algemeen zouden de experts van WaterProof het gebruik van FM voornamelijk overwegen vanwege de flexibiliteit.

10 DISCUSSIE

In de discussie wordt allereerst een interpretatie van de behaalde resultaten in het onderzoek gegeven. Daarna worden de resultaten van dit onderzoek vergeleken met de verwachtingen gebaseerd op het literatuuronderzoek. Er wordt afgesloten met de beperkingen van het onderzoek en aanbevelingen voor een vervolgonderzoek.

10.1 INTERPRETATIE VAN DE RESULTATEN

Voor de interpretatie wordt gefocust op de resultaten van de accuraatheid en de rekentijd, met name deze resultaten vereisen een interpretatie.

Het onderzoek naar de accuraatheid laat zien dat Delft3D FM met een ongestructureerd rooster en met een gestructureerd rooster vergelijkbare resultaten kan halen als Delft3D. Het Delft3D model, het model in Delft3D FM met een volledig ongestructureerd rekenrooster en het model in Delft3D FM met hetzelfde rekenrooster als Delft3D, geven vergelijkbare stroomsnelheden en waterstanden.

Alleen het model in Delft3D FM met een curvi lineair rooster laat een afwijkend resultaat zien. Hieruit wordt in ieder geval duidelijk dat het rekenrooster een aanzienlijk effect op het resultaat van de modellen kan hebben. Het curvi lineaire rooster in dit model voorkomt de trapsgewijze representatie van de smalle geul van het Delft3D model, waardoor er een significant verschil in het resultaat ontstaat. Dit model komt ook meer overeen met de resultaten van het analytische model. Zonder meetgegevens is echter geen conclusie te trekken of dit model een betere representatie van de werkelijk geeft.

Verder is het ook mogelijk om in Delft3D een curvi lineair rooster op te zetten, waardoor de geul beter wordt beschreven. De verwachting is dat dan vergelijkbare resultaten met Delft3D FM worden verkregen. Eventueel biedt het ongestructureerde rekenrooster wel mogelijkheden om de accuraatheid te verbeteren, maar het verschil in resultaat is waarschijnlijk kleiner dan nu gevonden. De verwachting is dus dat het grootste gedeelte van het verschil niet wordt veroorzaakt door de mogelijkheden van het ongestructureerde rekenrooster.

De resultaten van hoofdstuk 8 laten zien dat het in de casus mogelijk is om lagere rekentijden te behalen in Delft3D FM, mits er geen volledig ongestructureerd rekenrooster wordt toegepast. Er zijn echter een aantal redenen die leiden tot de verwachting dat in andere toepassingen van Delft3D FM de rekentijden hoger of vergelijkbaar zijn met Delft3D, zeker wanneer er een vergelijkbaar rekenrooster als in Delft3D wordt gebruikt.

Ten eerste treedt er al snel een limitering van de tijdstap op, zoals in de buurt van verfijningen in het rekenrooster. Dit geldt ook wanneer er voornamelijk gestructureerde cellen worden gebruikt. De gemiddelde tijdstap was dan ook lager in alle modellen in Delft3D FM dan in het Delft3D model. Ten tweede is waarschijnlijk een belangrijke reden dat er in 2 van de 3 modellen in Delft3D FM een lagere rekentijd is gevonden dan in Delft3D, dat de prestatie van de simulatie beter was dan in Delft3D. Wanneer er in Delft3D ook gebruik wordt gemaakt van parallelle berekening, wat niet mogelijk was door het gebruik van domein decompositie, is de verwachting dat de prestatie van de simulatie vergelijkbaar is tussen Delft3D en Delft3D FM. In dat geval kan de kleine gemiddelde tijdstap ertoe leiden dat de rekentijd hoger uitvalt in Delft3D FM dan in Delft3D.

Daarentegen zijn er ook een aantal redenen die leiden tot de verwachting dat er mogelijkheden zijn om de rekentijd in Delft3D FM te verbeteren. Ten eerste kan de resolutie van het rekenrooster in Delft3D FM beter geoptimaliseerd worden, waardoor de netwerk grootte (aantal cellen) vaak verlaagd kan worden zonder een verlies in accuraatheid. Model 2 is een voorbeeld van de optimalisatie, alleen heel lokaal (de geul) heeft het rooster een hoge resolutie. Verder kan er gelet worden op mogelijke beperkingen van de tijdstap, waardoor de gemiddelde tijdstap wordt verhoogd.

Over het algemeen is de verwachting echter dat de tijdstap de rekentijd van Delft3D FM benadeelt ten opzichte van Delft3D, zeker wanneer vergelijkbare roosters als in Delft3D worden gebruikt.

Afsluitend zijn er in de casus resultaten gevonden in Delft3D FM die waarschijnlijk ook behaald kunnen worden in Delft3D, ongestructureerde rekenroosters gaven vergelijkbare resultaten met het gestructureerde rekenrooster in Delft3D. In andere toepassingen is het effect van het ongestructureerde rekenrooster op de accuraatheid wellicht groter, en is er een mogelijkheid tot verbetering van de accuraatheid. In dit onderzoek is het echter niet aannemelijk (en aantoonbaar) dat het ongestructureerde rekenrooster het verschil in resultaat heeft veroorzaakt. Ook is de verwachting dat wanneer er in Delft3D gebruik wordt gemaakt van parallelle berekening, de rekentijden van Delft3D FM relatief gezien hoger zijn dan gevonden in dit onderzoek.

10.2 VERGELIJKING RESULTATEN MET DE VERWACHTING UIT LITERATUUR

In hoofdstuk 4 zijn de belangrijkste verwachtingen op basis van de beschikbare literatuur opgesteld en vergeleken met de resultaten van dit onderzoek. De eerste verwachting was dat het verschil in resultaten tussen Delft3D FM en Delft3D minimaal is bij een vergelijkbaar rooster. Dit wordt bevestigd door dit onderzoek, model 1 geeft vergelijkbare resultaten met Delft3D. Een tweede verwachting was dat de flexibiliteit van het rekenrooster in Delft3D FM zorgt voor een accurater resultaat. Dit kan niet ontkracht of bevestigd worden met dit onderzoek. Wellicht veroorzaakt de flexibiliteit in deze toepassing iets verschil in resultaat, maar de verwachting is dat in Delft3D een vergelijkbaar resultaat gehaald kan worden wanneer een curvi lineair rooster gebruikt wordt. De derde verwachting was dat Delft3D FM een hogere rekentijd heeft dan Delft3D. Dit komt niet geheel overeen met de gevonden resultaten in het onderzoek. Wel is de verwachting dat zonder het verschil van parallelle berekening Delft3D FM een hogere rekentijd heeft dan Delft3D, met name vanwege de grotere limitatie van de tijdstap. Dit geldt voornamelijk als gelijke roosters worden gebruikt in Delft3D en Delft3D FM.

10.3 BEPERKINGEN VAN HET ONDERZOEK EN AANBEVELINGEN VOOR EEN VERVOLGONDERZOEK

Op basis van de categorieën toepasbaarheid, accuraatheid en rekentijd worden de beperkingen van dit onderzoek beschreven en worden er aanbevelingen voor een vervolgonderzoek gedaan.

10.3.1 Toepasbaarheid

De verschillen in toepasbaarheid die zijn gevonden in dit onderzoek zijn veelal gebaseerd op ervaringen die opgedaan zijn tijdens het modelleren van de haven van Noordpolderzijl. In andere toepassingen zijn er mogelijk andere verschillen in toepasbaarheid te vinden. Ook is het beoordelen van verschillen in toepasbaarheid voor een gedeelte subjectief, het kan zijn dat andere gebruikers van Delft3D FM en Delft3D andere verschillen in toepasbaarheid vinden.

10.3.2 Accuraatheid

In de categorie accuraatheid zijn er drie onderwerpen. Ten eerste is er in dit onderzoek niet veel aandacht geweest voor de smoothness van het rooster. In de handleiding van Delft3D FM is geen specifieke aanbevolen waarde gegeven voor de smoothness, in tegenstelling tot de orthogonaliteit. Wel wordt er aangegeven dat een lage smoothness belangrijk is voor de accuraatheid van het model. Bij een verfijning van het rooster in Delft3D FM ontstaat er echter al snel een smoothness van minimaal 2, wat hoger is dan de aanbevolen waarde in Delft3D (tussen 1.2 en 1.4). In veel van de beschikbare publicaties, worden deze verfijningen ook gemaakt zonder dat er een vermelding over de smoothness wordt gedaan. Het is dus onduidelijk wat het effect van de smoothness is op de accuraatheid van Delft3D FM. Dit is de eerste aanbeveling voor een vervolgonderzoek:

1. Onderzoek naar het effect van een verfijning (en dus hoge smoothness) op de accuraatheid van een model in Delft3D FM.

Het tweede onderwerp betreft de bodeminstelling genaamd Conveyance2D (lineaire bepaling van de diepte in de celwand) die is gebruikt in de meeste modellen van dit onderzoek. Deltares schrijft in de handleiding van Delft3D FM dat Conveyance een accuratere beschrijving van de dwarsdoorsnede geeft in rivieren en geulen. In dit onderzoek is deze instelling met name gebruikt omdat hierdoor de bodemhoogtes het best overeenkwamen met Delft3D, waardoor ook het resultaat het meeste overeenkwam. Het is echter onduidelijk wat het exacte effect van Conveyance2D is geweest op de waterstanden en stroomsnelheden. De voornaamste reden dat dit niet achterhaald kon worden, is dat de bodemhoogtes van Delft3D FM en Delft3D niet overeenkwamen als Conveyance werd uitgeschakeld, waardoor ook de resultaten sterk afweken. Het effect van Conveyance2D kon dus niet geïsoleerd worden. Dit leidt tot de volgende aanbeveling:

2. Onderzoek naar het effect van Conveyance 2D op de accuraatheid van het model.

Als laatste zijn er een aantal aandachtspunten voor de casus. Een beperking van het onderzoek is dat er geen curvi lineair rooster is gebruikt in Delft3D. Het beschikbare Delft3D model heeft geen ideale beschrijving van de geul. De verwachting is dat het Delft3D model verbeterd kan worden door een curvi lineair rooster toe te passen, maar dit is vanwege het relatief korte tijdsbestek van het onderzoek niet gedaan. Omdat het Delft3D model niet optimaal is, kan niet geheel worden uitgesloten of het ongestructureerde rekenrooster in deze toepassing een verbeterde accuraatheid veroorzaakt ten opzichte van Delft3D. Ook was er geen data voor validatie beschikbaar in deze toepassing. Dit beperkt het onderzoek enigszins, omdat er niet kan worden geconcludeerd welk model de meest accurate representatie van de werkelijk geeft.

10.3.3 Rekentijd

In de analyse van de rekentijd zijn er aantal opmerkingen. Als eerste zijn de gebruikte modellen in Delft3D FM, vanwege het tijdsbestek van deze eindopdracht, niet geoptimaliseerd in rekentijd. Er is tijdens het opstellen van de roosters wel rekening gehouden met een mogelijke limitatie voor de tijdstap, maar er zijn niet meerdere iteraties uitgevoerd om het rooster te optimaliseren. Hierdoor zou de rekentijd in Delft3D FM mogelijk verbeterd kunnen worden zonder een verlies in accuraatheid.

Daarnaast is het aanbevolen om een model in Delft3D zonder domein decompositie te vergelijken met een model in Delft3D FM, waardoor een completer overzicht verkregen van de verschillen in rekentijd. In dat geval is er ook een parallelle berekening mogelijk in Delft3D, wat de verschillen in rekentijd waarschijnlijk anders maakt (vergelijkbare prestatie van simulatie, hier was geen sprake van in dit onderzoek). Verder kan door het uitblijven van domein decompositie, het rooster van Delft3D exact gelijk zijn aan dat van Delft3D FM. In dit onderzoek was het in Delft3D FM nodig om de verschillende domeinen van Delft3D te koppelen, waardoor het rooster van Model 1 in FM niet precies gelijk is aan Delft3D. Daarnaast zorgt de koppeling van de domeinen met driehoekige cellen voor een limitering van de tijdstap, waardoor het gecompliceerd is om de reketijden te vergelijken. Dit leidt tot de laatste aanbeveling voor een vervolgonderzoek:

3. Het vergelijken van de reketijden van een Delft3D model zonder domein decompositie met hetzelfde model in Delft3D FM, beiden gebruik makend van parallelle berekening.

11 CONCLUSIE

In hoofdstuk 1 zijn de onderzoeksvragen geformuleerd. In de conclusie zullen de onderzoeksvragen beantwoord worden.

Hoe wordt een model opgesteld in Delft3D FM en hoe verschilt dit met Delft3D?

Het rekenrooster is het grootste verschil met Delft3D, andere concepten voor het opstellen van een model zijn veelal hetzelfde gebleven. De orthogonaliteitseisen verschillen iets ten opzichte van Delft3D, de aanbevolen waarde is nu 0.01 in plaats van 0.02 in Delft3D. Verder kunnen er nu verfijningen gemaakt worden in een enkel rooster, ten opzichte van het gebruik van domein decompositie in Delft3D. Het belangrijkste advies uit eerder gepubliceerde literatuur is om in Delft3D FM voornamelijk gestructureerde roosters te gebruiken die in lijn staan met de stromingsrichting.

Wat zijn de belangrijkste verschillen tussen Delft3D en Delft3D FM die invloed hebben op de rekentijd en accuraatheid en welk effect hebben deze verschillen?

De vier belangrijkste verschillen die invloed hebben de accuraatheid en rekentijd zijn het rekenrooster, de numerieke oplossing, de bodeminstellingen en parallelle berekening. Het rekenrooster zou door de flexibiliteit voor accuratere modellen kunnen zorgen, daarnaast is het eenvoudig om het rooster te optimaliseren voor de rekentijd. De numerieke oplossing is veranderd om het ongestructureerde rooster te kunnen oplossen. Er kunnen hierdoor kleine verschillen in resultaten ontstaan, maar het verschil is minimaal. Het expliciet oplossen van de advectieterm in de numerieke oplossing leidt tot een verminderde efficiëntie ten opzichte van Delft3D, waardoor de rekentijd verhoogd kan worden. Ook de bodeminstellingen van Delft3D FM verschillen met Delft3D. Met de bodeminstelling conveyance2D in Delft3D FM kan een accuratere dwarsdoorsnede gehaald worden dan in Delft3D. Als laatste is de parallelle berekening in Delft3D FM mogelijk efficiënter dan het gebruik van domein decompositie in Delft3D.

Wat zijn de verschillen in toepasbaarheid van de modellen voor de haven van Noordpolderzijl?

Er wordt onderscheid gemaakt tussen het opstellen van het rekenrooster en de userinterface. Het voornaamste verschil is dat opstellen van een rooster in Delft3D FM een stuk flexibeler is. Hierdoor kan het rooster beter geoptimaliseerd worden dan in Delft3D. Daarnaast is het opstellen van een rooster hierdoor eenvoudiger dan in Delft3D. Verder kunnen er in Delft3D FM vrij eenvoudig lokale verfijningen in het rooster gemaakt worden.

De grootste verandering van de userinterface is dat in Delft3D FM de verschillende applicaties die gebruikt worden in Delft3D geïntegreerd zijn in een interface. Ook het bekijken van resultaten is nu geïntegreerd in de interface van Delft3D FM. Dit maakt de interpretatie van resultaten overzichtelijk en snel. Verder is een belangrijk verschil dat Delft3D FM gebruik maakt van modelonafhankelijke objecten, waardoor ze geïmporteerd kunnen worden als het rooster is aangepast. In Delft3D moeten in dat geval de objecten opnieuw worden geformuleerd.

Welke verschillen in accuraatheid (met name waterstanden en stroomsnelheden in de geul) zijn er tussen Delft3D en Delft3D FM toegepast in de haven van Noordpolderzijl?

- *Welk onregelmatigheden treden op in het resultaat en in hoeverre verschillen deze tussen Delft3D en Delft3D FM*
- *Wat veroorzaakt deze verschillen?*
- *Hoe robuust zijn de resultaten van de modellen?*

De resultaten van model 1 in FM met een bijna gelijk rooster, model 3 in FM met een volledig ongestructureerd rekenrooster en het Delft3D model verschillen minimaal. Alleen Model 2 met het curvi lineaire rooster heeft een vrij grote afwijking in de stroomsnelheden en waterstanden. De resultaten van model 2 komen het best overeen met het analytisch model. Er blijkt uit de resultaten dat het rekenrooster van het model een significant verschil in het resultaat kan veroorzaken.

Voor het kleine verschil van Model 1 kunnen er verschillende oorzaken zijn, zoals de numerieke oplossing maar ook een kleine verandering in het rekenrooster. Model 2 wijkt waarschijnlijk af ten opzichte van het Delft3D model, omdat door het curvi lineaire rooster een mindere hoekige presentatie van de geul op treedt. Model 3 wijkt waarschijnlijk af omdat de geometrie van de geul iets verschilt ten opzichte van het Delft3D model, vanwege de grove cellen die gebruikt zijn.

Er is over het algemeen geen verschil in robuustheid gevonden tussen de modellen in Delft3D FM en Delft3D die te wijden zijn aan specifieke eigenschappen van Delft3D of Delft3D FM (zoals het ongestructureerde rekenrooster). Verder is ondanks het afwijkende resultaat van model 2, het model vrij robuust voor aanpassingen in het rekenrooster.

Wat zijn de verschillen in rekentijden tussen Delft3D en Delft3D FM?

- *Wat beïnvloedt de rekentijd en wat heeft mogelijk deze verschillen veroorzaakt?*

In dit onderzoek hebben 2 van de 3 modellen in Delft3D FM een lagere rekentijd dan het Delft3D model. De parallelle berekening van Delft3D FM lijkt de belangrijkste oorzaak van de lage rekentijd van Delft3D FM. Daarnaast zijn er door de flexibiliteit van het rooster meer mogelijkheden voor optimalisatie in Delft3D FM, waardoor het aantal cellen in het rooster verlaagd wordt. Opvallend is dat de gemiddelde tijdstap lager is in alle modellen van Delft3D FM dan in Delft3D, wat de rekentijd verhoogt. De lage gemiddelde tijdstap wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de noodzakelijke limitering van de tijdstap voor numerieke stabiliteit en het aanbrengen van verfijningen in het rooster.

In welke mate kunnen de (gecombineerde) verschillen van Delft3D FM die gevonden zijn in accuraatheid, toepasbaarheid en rekentijden gezien worden als verbetering of verslechtering wanneer de vergelijking wordt gemaakt met Delft3D

De accuraatheid is redelijk vergelijkbaar met Delft3D in dit onderzoek. In het kort geven Model 1, model 2 en model 3 vergelijkbare resultaten met die Delft3D zou kunnen geven. Wel is een mogelijk voordeel van Delft3D FM dat er mogelijkheden zijn om met het flexibele rooster complexe gebieden accurater te beschrijven. De rekentijd is in deze toepassing iets verbeterd door het gebruik van Delft3D FM, met name de efficiëntie van parallelle berekening ten opzichte van domein decompositie lijkt dit te hebben veroorzaakt. Verder biedt de flexibiliteit het voordeel dat het rekenrooster geoptimaliseerd kan worden, waardoor bijvoorbeeld het aantal cellen in het rooster verlaagd kan worden. De tijdstap wijst echter op een verslechtering van de rekentijd, wat een nadeel is van Delft3D FM. De toepasbaarheid is de categorie die het meeste verbeterd lijkt. De flexibiliteit van het rekenrooster is een belangrijke verbetering ten opzichte van Delft3D.

12 AANBEVELINGEN

De onderzoeksvragen focussen op de verschillen tussen Delft3D en Delft3D FM. Voor de lezer die, bijvoorbeeld op basis van deze verschillen, overweegt om Delft3D FM te gaan gebruiken, zijn er aanbevelingen opgesteld. De aanbevelingen hebben voornamelijk te maken het toepassen van het rekenrooster in Delft3D FM.

1. Limiteer het gebruik van ongestructureerde cellen in Delft3D FM.

In dit onderzoek is gebleken dat het volledig ongestructureerde rooster de hoogste rekentijd heeft. Dit heeft twee oorzaken. De eerste is dat kleine ongestructureerde driehoekige cellen al snel een limitering voor de tijdstap vormen. De tweede oorzaak is dat het beschrijven van een geul met driehoekige cellen niet efficiënt is. Om hetzelfde aantal cellen in de breedterichting te plaatsen met een driehoekig rooster moeten er meer cellen in de lengterichting geplaatst worden dan met een curvi lineair rooster.

Ook bleek uit de accuraatheid dat een volledig ongestructureerd rooster in deze toepassing niet veel toevoegt ten opzichte van een gedeeltelijk ongestructureerd rooster. Het advies is dan ook als volgt: Gebruik gestructureerde roosters die in lijn staan met de stromingsrichting wanneer het mogelijk is. Complexe gebieden kunnen verder beschreven worden met ongestructureerde cellen. Hierdoor wordt de flexibiliteit van het ongestructureerde rooster gebruikt terwijl de efficiëntie van het gestructureerde rooster nog aanwezig is. Wel moet er worden opgelet dat de ongestructureerde cellen geen limitering voor de tijdstap veroorzaken.

2. Krijg een indicatie van gebieden met hoge snelheden en voorkom verfijningen in dit gebied.

Uit het onderzoek bleek dat er al snel een sterke limitering van de tijdstap ontstaat. Zeker op de plek waar de verfijning wordt gemaakt ontstaan kleine driehoekige cellen. Wanneer de rekentijd van het model groot is, kan het dus liggen aan kleine cellen in het rekenrooster die de tijdstap limiteren. Wanneer de rekentijd verbeterd moet worden kan het volgende gedaan worden: In de output kan worden gevonden welke cellen voor een limitering van de tijdstap hebben gezorgd. Met behulp de flexibiliteit van het rekenrooster kan het rooster daar lokaal aangepast worden, waardoor de tijdstap verbeterd kan worden.

3. Let op met het gebruik van driehoekige cellen voor het koppelen van verschillende roosters.

Wanneer er verschillende roosters worden gebruikt kunnen deze aan elkaar worden gekoppeld met driehoekige cellen. Een nadeel van het koppelen van roosters met een hoge resolutie is dat er kleine driehoekige cellen worden opgesteld. Deze cellen kunnen zorgen voor een limitering van de tijdstap. De gebruiker moet zich dus afvragen of het koppelen van verschillende roosters gewenst is en of het mogelijke verlies in rekentijd te overwegen is.

4. Het toepassen van een curvi lineair rooster in Delft3D voor de haven van Noordpolderzijl

Op basis van het resultaat in Delft3D FM blijkt dat er een significant verschil optreedt wanneer er een curvi lineair rooster wordt toegepast. Het Delft3D model waar Delft3D FM mee is vergeleken heeft een rechthoekig rooster. De aanbeveling is dan om in de casus ook een curvi lineair rooster in Delft3D toe te passen. Dit heeft twee doelen. Het eerste is om een nieuwe vergelijkingen te maken met Delft3D FM waaruit blijkt of het resultaat in grote lijnen overeenkomt of dat er een afwijking te vinden is. Het tweede doel is om mogelijk het huidige model in Delft3D te verbeteren, door het voorkomen van de hoekige presentatie van de geul.

13 BIBLIOGRAFIE

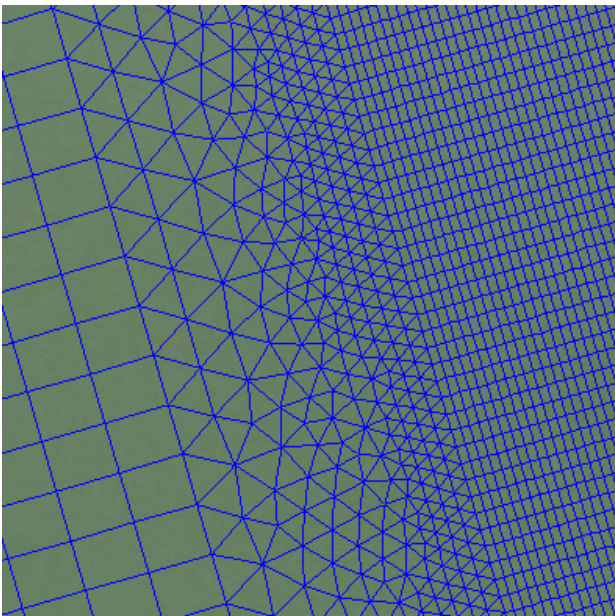
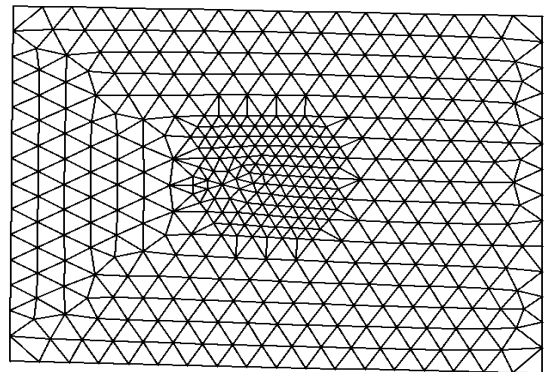
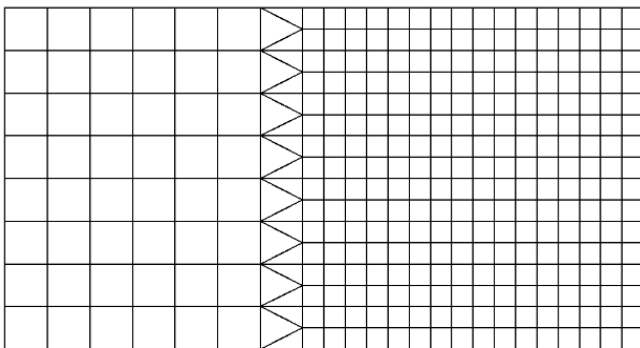
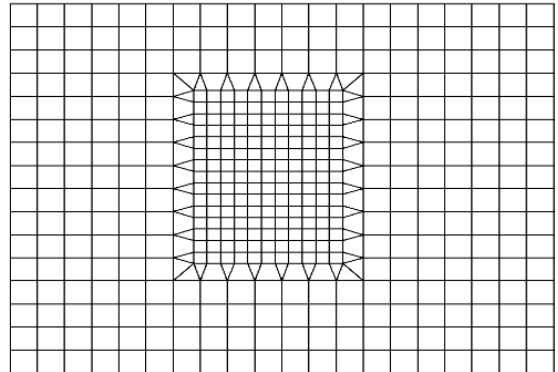
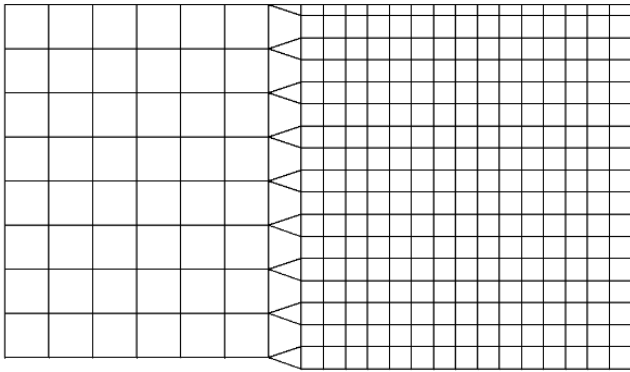
- Deltares. (2014). *Delft3D-FLOW User Manual*. Delft: Deltares.
- Deltares. (2016). *D-Flow Flexible Mesh: User Manual*. Delft: Deltares.
- Deltares. (2017, Mei 27). *RGFGRID user manual*. Opgehaald van Deltares:
https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/RGFGRID_User_Manual.pdf
- Deltares. (sd). *Delft3D Flexible Mesh Suite*. Opgeroepen op Maart 29, 2017, van Deltares:
<https://www.deltares.nl/en/software/delft3d-flexible-mesh-suite/>
- Deltares. (sd). *Delft3D Modelling Guidelines*. Opgeroepen op Juni 14, 2017, van Publicwiki Deltares:
<https://publicwiki.deltares.nl/display/D3DGUIDE/Computational+grid>
- Drakestein, F. B. (2014). *Modeling of tides and spreading of saline water in the Arabian Gulf and in the coastal area of Abu Dhabi with a flexible mesh model*. Utrecht.
- Hagen, E. t. (2014). *Hydrodynamic river modelling with D-Flow Flexible Mesh*. Universiteit Twente.
- Hong, H. (2000). A numerical method for orthogonal grid generation by laplace system. *Journal of Zhejiang University SCIENCE*, 125-128.
- Kernkamp, H. W., Van Dam, A., Stelling, G. S., & De Goede, E. D. (2011). Efficient scheme for the shallow water equations on unstructured grids with application to the Continental Shelf. *Ocean Dynamics*, 1175-1188.
- Lesser, G., Roelvink, J., van Kesteren, J., & Stelling, G. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 883-915.
- Martyr-Kollera, R., Kernkamp, H., Dam, A. v., Wegend, M. v., Lucas, L., Knowles, N., & Fregoso, T. (2017). Application of an unstructured 3D finite volume numerical model to flows and salinity dynamics in the San Francisco Bay-Delta. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 86-107.
- Maximova, T., Vanlede, J., Plancke, Y., Verwaest, T., Mostaert, F., & j. (2013). *Testcase D-Flow FM : Model set-up and validation*. Antwerp, Belgium: Flanders Hydraulics Research.
- Peiro, J., & Sherwin, S. (2005). Finite difference, finite element and finite volume methods for partial differential equations. In *Handbook of Materials Modeling* (pp. 2415–2446). Springer.
- Putra, S. S., Wegen, M. v., Reyns, J., Dam, A. v., Solomatine, D. P., & Roelvink, J. (2015). Multi station calibration of 3D flexible mesh model: a case study of the Columbia Estuary. *Environmental Sciences*, 297-306.
- Smits, B. (2016). *Morphodynamic optimisation study of the design of semi-permeable dams for rehabilitation of a mangrove-mudcoast*. Master thesis, Delft.
- Verwey, A. K. (2011). Potential and application of hydrodynamic modelling on unstructured grids. *Proceedings of the Sixth International Conference on Asian and Pacific Coasts*.
- Vreugdenhil, C. B. (1994). *Numerical Methods for Shallow-Water Flow*. Dordrecht: Springer Science + Business Media.

Waltertje, C. B.-S. (sd). *Noordpolderzijk*. Noordpolderzijk. Opgeroepen op March 22, 2017, van Wikipedia:
<https://nl.wikipedia.org/wiki/Noordpolderzijk>

Inhoud

- A: Voorbeelden verfijning roosters Delft3D FM
- B: Algemene informatie over input en Modelonafhankelijke input
- C: Samenvatting eerdere onderzoeken Delft3D en Delft3D FM
- D: Vergelijkingen, toelichting impliciet/expliciet, parallelle berekening
- E: Bodeminstellingen
- F: Domeinbeschrijving
- G: Alternatieven Model 1
- H: Alternatieven Model 2
- I: Orthogonaliteit
- J: Voorbeelden interface Delft3D FM
- K: Gebruikte modelinstellingen algemeen, bodeminstellingen en scenario's
- L: Resultaten scenario's
- M: Oorzaken van verschillen
- N: Robuustheid
- O: Interview
- P: Analytisch model: Flushin Basin

A: VOORBEELDEN VERFIJNING ROOSTERS DELFT3D FM



B: ALGEMENE INFORMATIE OVER INPUT EN MODELONAFHANKELIJKE INPUT

Inhoud:

- 1: Belangrijke input
- 2: Het plaatsen van objecten in Delft3D FM (modelonafhankelijke input)

1: Belangrijke input (bathymetrie en de randvoorwaarde)

De meeste input, naast het rekenrooster, verschilt niet tussen Delft3D en Delft3D FM. De belangrijkste data die gebruikt wordt is de bodemdata of bathymetrie. Deze data bevat x, y en z coördinaten en kan gekoppeld worden aan het rekenrooster door middel van interpolatie. De interpolatie verschilt niet tussen Delft3D en Delft3D FM. De randvoorwaarde wordt opgelegd aan de rand van het model, en kan bijvoorbeeld een waterstand zijn waarmee in de rest van het model wordt doorgerekend. De opties voor de randvoorwaarde verschillen niet tussen Delft3D en Delft3D FM. Deze input zal dan ook constant blijven tussen de verschillende modellen in Delft3D FM en Delft3D.

Alhoewel de objecten, zoals thin dams en observatiepunten, niet verschillen tussen Delft3D en Delft3D FM, verschilt de manier waarop ze geplaatst worden. Dit wordt in de volgende sectie behandeld.

2: Verschil in het plaatsen objecten (Thin dams, observatiepunten, etc.) in Delft3D en Delft3D FM

In Delft3D en Delft3D FM zijn verschillende objecten te plaatsen, de objecten zelf verschillen niet tussen de versies. Wel zit er enig verschil in hoe objecten geplaatst worden. Een voorbeeld van een object is een dam (thin dam). Wanneer een dam wordt geplaatst in het model is dit een oneindig hoge barrière die stroming voorkomt. In Delft3D wordt een dam geplaatst door de rooster indices aan te geven, de objecten zijn dus direct gekoppeld aan het rooster. In Delft3D FM wordt er echter gebruik gemaakt van coördinaten, hierdoor zijn de objecten modelonafhankelijk en kunnen ze ook op een ander rooster geplaatst worden.

Voor dit onderzoek zijn met namen de dammen (Thin dams) en observatiepunten van belang. De illustraties geven dan ook deze objecten weer. Voor andere objecten die in het model kunnen worden geplaatst, zoals dry points, cross sections, weirs etc., geldt echter ongeveer hetzelfde. Een voorbeeld is een thin dam, de rode lijn is de geplaatste thin dam. Zoals te zien ligt deze lijn niet exact op de randen van de cel. De paarse lijn laat zien hoe Delft3D FM de thin dam uiteindelijk meeneemt. Het object wordt op de dichtstbijzijnde celwand geplaatst.

Bron: (Deltares, 2016)

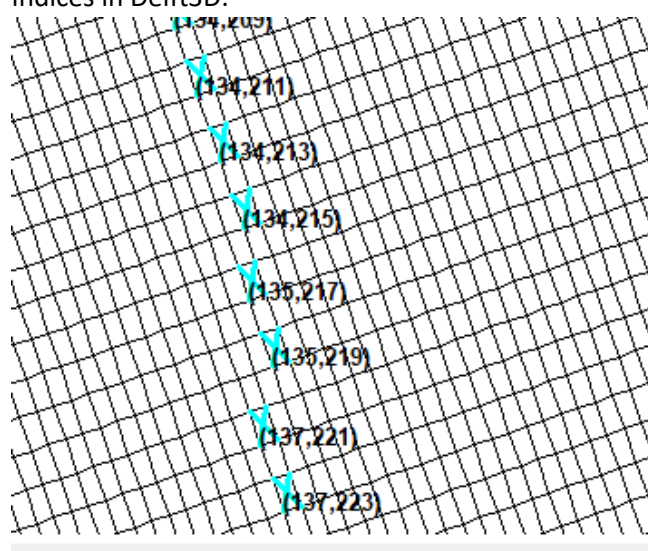


Voor een observatiepunt geldt hetzelfde, echter wordt door Delft3D FM het object nu in het midden van de cel geplaatst. Het geplaatste observatiepunt wordt weergegeven door het oogje, de uiteindelijke locatie wordt weergegeven door de lijn richting het midden van de cel.

Bron: (Deltares, 2016)



In Delft3D is deze input geformuleerd in rooster indices, waardoor ze opnieuw geformuleerd moeten worden als het rooster veranderd. In de figuur is te zien dat observatiepunten geformuleerd zijn in indices in Delft3D.



C: SAMENVATTING EERDERE ONDERZOEKEN DELFT3D EN DELFT3D FM

Onderzoek 1: Schelde nabij Zandvliet (Maximova, et al., 2013)

Er zijn drie modellen gebruikt in dit onderzoek. Het model in Delft3D heeft een curvilineair rooster en wordt gebruikt voor de vergelijking met de modellen in Delft3D FM. Het Delft3D model maakt gebruik van domein decompositie. Op basis van het Delft3D model zijn twee modellen in Delft3D FM opgezet. Model 1 heeft een gelijk rooster met Delft3D, maar de verschillende rooster van domein decompositie zijn gekoppeld, zoals te zien in de onderstaande figuur. Daarnaast is een ongestructureerd driehoekig rooster opgesteld. Het ongestructureerde rooster heeft een lager aantal cellen en is iets in resolutie verlaagd.



De rekentijd was het laagst van het ongestructureerde rooster (7 u). Het Delft3D model en Delft3D FM model met een vergelijkbaar rooster, hadden een rekentijd van ongeveer 10 uur.

Met name het resultaat van het ongestructureerde rooster is interessant. Met het ongestructureerde rooster kwamen de waterstanden beter overeen met de meetgevens (waterstanden) zoals te zien in de onderstaande figuur (De RMSE waarden van D-Flow FM zijn lager). Dit laat in ieder geval zien dat ook met een volledig ongestructureerd rooster een accuraat resultaat gehaald kan worden in deze toepassing.

RMSE	Water level	
	Delft3D vs measurement	D-Flow FM vs measurement
HW (m)	0.18	0.09
LW (m)	0.07	0.07
complete TS (m)	0.20	0.13
TS ebb (m)	0.14	0.08
TS flood (m)	0.27	0.18
phase HW (min)	18	8
phase LW (min)	9	8

Onderzoek 2: Kustgebied van Abu Dhabi (Drakestein, 2014)

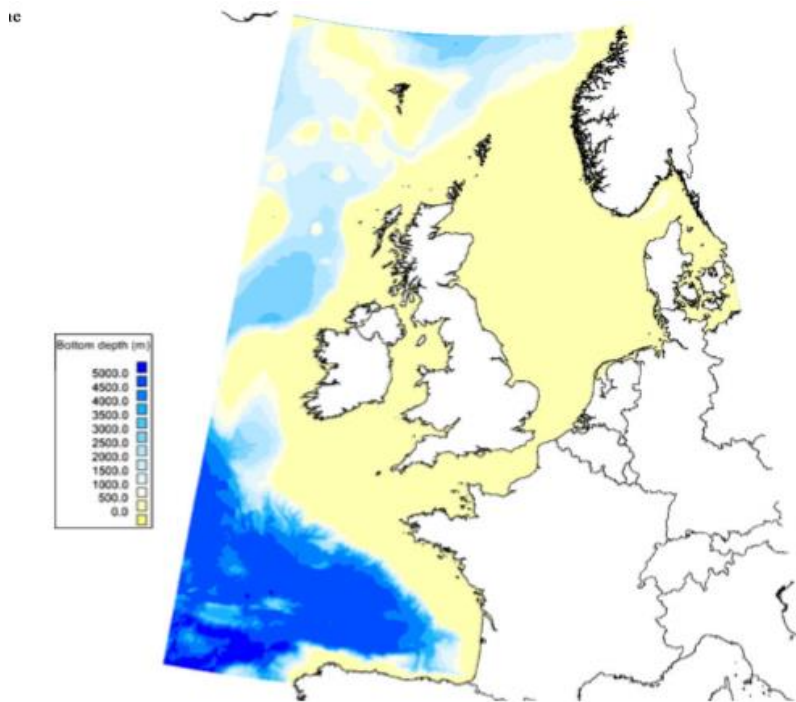
In dit onderzoek is een kustgebied (Abu Dhabi) onderzocht en ook hier is de vergelijking gemaakt tussen Delft3D en Delft3D FM. Het Delft3D model gebruikt een curvilineair rooster welke exact is over

gezet naar Delft3D FM. Daarnaast in een volledig ongestructureerd rooster gebruikt die in sommige gebieden in resolutie is verlaagd.

Het onderzoek concludeert dat Delft3D het beste overeenkwam met de meetgegevens (waterstanden). Het Delft3D FM model met exact hetzelfde rooster heeft een minimaal verschil met Delft3D. Het volledig ongestructureerde rooster heeft laagste accuraatheid, maar er wordt aangegeven dat dit waarschijnlijk te maken heeft met de verlaagde resolutie. De rekentijd is het laagst van het Delft3D FM model met het in resolutie verlaagde ongestructureerde rooster.

Onderzoek 3: Dutch Continental Shelf Model (DCSM) (Kernkamp, Van Dam, Stelling, & De Goede, 2011)

In deze publicatie zijn Delft3D Flow en D-Flow FM vergeleken voor het continental shelf model. Het gebied is hieronder beschreven. Het Delft3D model heeft een uniform rechthoekig rooster. In FM is het ongestructureerde rooster in sommige gebieden in resolutie verlaagd (nabij de kust) en in andere gebieden verhoogd. Hierdoor is het totaal aantal cellen verlaagd van 890.000 cellen naar 340.000 cellen. De verschillen in accuraatheid worden uitgedrukt in RMS, maar de verschillen waren te klein om aan te wijzen welk model het beste resultaat gaf. De rekentijd kon moeilijk vergeleken worden door de grote verschillen, maar er wordt geconcludeerd dat het in ieder geval in dezelfde orde van grootte zit tussen Delft3D en Delft3D FM.



D: VERGELIJKINGEN, TOELICHTING IMPLICIET/EXPLICIET, PARALLELE BEREKENING

Inhoud:

- 1: Ondiep water vergelijkingen Delft3D en Delft3D FM
- 2: Impliciete en expliciete oplossing
- 3: Parallele berekening

1: Ondiep water vergelijken

De modellen die gebruikt worden in deze eindopdracht modelleren in dieptegemiddelde 2D stroming (2DH, Flow module). Aangezien de rekenkern niet verschilt tussen Delft3D en Delft3D FM (Drakestein, 2014), zullen de vergelijkingen gezamenlijk behandeld worden. Voor het modelleren van stromingen worden de ondiep water vergelijkingen toegepast in twee of drie dimensies, afhankelijk van het feit of er in 3D of in 2DH gemodelleerd wordt. Het systeem van vergelijkingen bestaat uit de horizontale momentumvergelijkingen, de continuïteitsvergelijking, en de verticale momentumvergelijking (Lesser, Roelvink, van Kesteren, & Stelling, 2004). Hier volgt een korte beschrijving van de belangrijkste vergelijkingen voor het modelleren van de hydrodynamica.

Het is belangrijk om te vermelden dat de vergelijkingen gehaald zijn uit de handleiding van Delft3D FM. De vergelijkingen worden ook gebruikt in Delft3D, echter zullen sommige termen op een andere manier geformuleerd staan.

Voor de continuïteitsvergelijking speelt het behoud van massa over een volume belangrijke rol. Er geldt voor onsamendrukbare vloeistoffen dat de dichtheid als constant wordt aangenomen (Boussinq approximation) (Smits, 2016) waardoor er slechts de term ($\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$) overblijft. In de rekenkern blijft er door deze term te integreren over de waterdiepte de volgende vergelijking over:

$$\frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta U h}{\delta x} + \frac{\delta V h}{\delta y} = Q \quad (\text{D.1})$$

h = waterdiepte [m]

U and V = diepte gemiddelde stroomsnelheden [m·s⁻¹]

Q = Bijdragen per eenheid oppervlakte door debiet/uittrekking van water, neerslag en verdamping

Er zijn een aantal relevante vergelijkingen voor het beschrijven van stromingen. Allereerst worden de Navier Stokes vergelijkingen als basis genomen. Deze beschrijven de waterbeweging en momentum in de x, y (horizontaal) en z (verticaal) richting. Vervolgens wordt de ondiep water aanname gebruikt, waarin wordt aangenomen dat de verticale snelheid laag is en het drukverloop hydrostatisch is. Deze aanname geldt zolang de dimensies in de horizontale richting significant groter zijn dan in de verticale richting. De ondiep water aanname kan gebruikt worden voor toepassingen zoals; ondiepe zeeën, kusten, rivieren en estuaria. De aannames leiden tot de horizontale momentum vergelijkingen:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + F_x + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma V \frac{\partial u}{\partial z} \right) + M_x \quad (\text{D.2})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} - f u = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + F_y + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma V \frac{\partial v}{\partial z} \right) + M_y \quad (\text{D.3})$$

u en v = Dieptegemiddelde stroomsnelheden in de x en y richting [m/s]

w = Verticale snelheid [m/s]

z = Waterdiepte [m]

f = Coriolis parameter [1/s]

ρ_0 = Dichtheid water [kg/m³]

P = Druk [kg · m⁻¹ · s⁻²]

F_x and F_y	=	Krachten per eenheid van massa in de x of y richting, die de onbalans van de Reynolds stress representeren [m/s^2]
M_x and M_y	=	De contributie van externe bronnen van momentum, zoals debiet en ontnemen van water. [m/s^2]
ν	=	Verticale eddy viscositeit coëfficiënt [m^2/s]

De vergelijkingen 2.1 t/m 2.3 vormen samen de ondiep water vergelijkingen. In de gegeven vergelijkingen (D.2 en D.3) wordt uitgegaan van een 3D simulatie, vandaar dat de vergelijkingen drie dimensies bevatten. Verder verschillen de vergelijkingen iets van de ondiep water vergelijkingen omdat er meer termen zijn toegevoegd (Drakestein, 2014).

In de dieptegemiddelde stromingsbeschrijving, zoals gebruikt wordt in deze eindopdracht, wordt er aangenomen dat de verticale stroomsnelheid verwaarloosd kan worden waardoor dit weg valt uit de vergelijking. (Smits, 2016) . Verder kan hierdoor de verticale momentum vergelijking gereduceerd worden naar de volgende vergelijking:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (D.4)$$

2: Impliciete en expliciete tijdsintegratie

Stel X moet bepaald worden op $t = n+1$. Een expliciete oplossing gebruikt het vorige resultaat $x(n)$ en telt hier bijvoorbeeld een willekeurige parameter van de huidige tijdstap bij op $z(n)$. De parameter $z(n)$ is van de huidige tijdstap, en is dus al bekend. Wanneer de parameter snel verandert binnen een tijdstap kan het resultaat instabiel worden omdat niet de juiste waarde wordt gebruikt voor de parameter.

$$X(n+1) = X(n) + z(n) \quad (D.5)$$

In het geval van een impliciete oplossing wordt $X(n+1)$ bepaald door de waarde van de parameter van de volgende tijdstap te bepalen $Z(n+1)$. Deze waarde is onbekend omdat hij een tijdstap verder zit en moet dus eerst voor het gehele rekenrooster worden uitgerekend (Peiro & Sherwin, 2005). Dit kost tijd, maar het heeft als voordeel dat er veel minder problemen zijn met stabiliteit.

$$X(n+1) = X(n) + z(n+1) \quad (D.6)$$

3: Parallele berekening

Met name voor computers die speciaal zijn ingericht op het uitvoeren van simulaties speelt parallelle berekening een rol om rekentijd te besparen. Voor het uitvoeren van de modellen in deze eindopdracht in een Notebook met een Intel core i7 processor (quad core).

Het gebruik van parallelle berekening in Delft3D is met name bedoeld voor speciaal ingerichte computers, dus niet voor notebooks. Verder is in dit onderzoek in Delft3D gebruik gemaakt van Domein decompositie wat het gebruik van parallelle berekening onmogelijk maakt (Deltares, 2014), ook wanneer gebruik gemaakt van een speciaal ingerichte computers. De reden hiervoor is dat voor het gebruik van domein decompositie de verschillende domeinen automatische parallel worden uitgerekend. Elk domein wordt op zijn eigen rekenkern uitgerekend mits er voldoende rekenkernen aanwezig zijn. Het is echter gecompliceerd om elk domein zo in te delen dat ze allemaal een even zware rekenlast veroorzaken. Hierdoor is de rekentijd al snel hoger bij het gebruik van domein decompositie. Bij het uitvoeren van een parallelle berekening gebeurt het opdelen van het rekenrooster automatisch.

In Delft3D FM is er geen domein decompositie meer. In het geval van een speciaal ingerichte computer kan ook gebruik gemaakt worden van een handmatige versie van parallelle berekening, vergelijkbaar met Delft3D. Verder wordt er standaard gebruik gemaakt van een parallelle berekening (OpenMP),

ook wanneer er gebruik wordt gemaakt van een Notebook. Ook in dit onderzoek is dus gebruik gemaakt van de automatische parallele berekening.

Een handmatige parallele berekening is efficiënter dan de automatische versie, maar met de automatische versie kan de rektijd al met een factor 2 verlaagd worden (Deltares, 2016). Verder is het door het ontbreken van domein decompositie wellicht mogelijk een efficiëntere berekening te behalen, vanwege het complexe karakter van het indelen van domeinen.

E: BODEMINSTELLINGEN

In Delft3D gebeurt de bepaling van de diepte in de celwand door het gemiddelde, het maximum of het minimum van de twee hoekpunten te bepalen. Het gaat om de twee hoekpunten die verbonden worden door de celwand. De diepte in het midden van de cel wordt in Delft3D bepaald door het gemiddelde, het maximum of het minimum van de vier hoekpunten te bepalen. Deze twee instellingen kunnen los van elkaar worden geselecteerd.

Conveyance2D kijkt dus af ten opzichte van Delft3D door de lineaire bepaling van de diepte in de celwand (engels Cell face). Verder geldt voor conveyance2D dat de diepte in het midden van de cel wordt bepaald door het minimum van de vier hoekpunten te bepalen (drie bij driehoeken). Deze optie is ook beschikbaar in Delft3D en kan dus overeenkomen. Dit is geïllustreerd in onderstaande figuur.

Bron: (Deltares, 2016)

Keyword	Value	Cell center bed level	Face center bed level
bedlevtyp	3, 4, 5	the lowest corner node bed level considering all the nodes of the cell	linearly varying from the bed level at the one corner node to the bed level at the other corner node

Conveyance2D kan ook uitgeschakeld worden. Een reden voor het uitschakelen kan bijvoorbeeld zijn omdat er geen lineaire bepaling in de celwand mogelijk is in Delft3D. Het probleem is dat wanneer Conveyance wordt uitgeschakeld er ook geen exacte match van de bodeminstellingen is van Delft3D (Deltares, 2016). Dit wordt eveneens toegelicht.

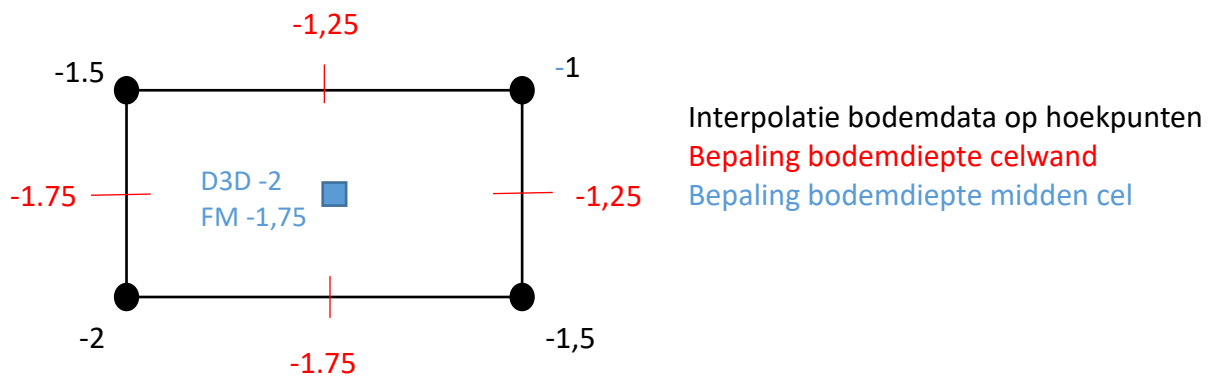
Wanneer de instelling voor conveyance wordt uitgeschakeld in Delft3D FM wordt de diepte ook in de celwand en het middelpunt bepaald. Een eerste verschil is dat de instelling van de diepte voor de celwand en voor het middelpunt niet meer apart kunnen worden geformuleerd zoals in Delft3D. Wanneer een instelling voor de diepte in de celwand wordt geselecteerd kies je automatisch voor een instelling van het midden van de cel. In de onderstaande figuur zijn de mogelijkheden van Delft3D FM geïllustreerd.

Bron: (Deltares, 2016)

Keyword	Value	Cell center bed level	Face center bed level
bedlevtyp	1	user specified	the highest cell center bed level considering the two cells next to the face
bedlevtyp	2	the lowest face center bed level considering all the faces of the cell	user specified
bedlevtyp	3	the lowest face center bed level considering all the faces of the cell	the mean corner bed level considering the two corner nodes the face is connecting
bedlevtyp	4	the lowest face center bed level considering all the faces of the cell	the minimum corner bed level considering the two corner nodes the face is connecting
bedlevtyp	5	the lowest face center bed level considering all the faces of the cell	the maximum corner bed level considering the two corner nodes the face is connecting
bedlevtyp	6	the mean corner bed level considering all the corners of the cell	the highest cell center bed level considering the two cells next to the face

Zoals duidelijk wordt uit de figuur is de instelling voor de dieptebepaling van het midden van de cel in instelling 2 t/m 5, het bepalen van de laagste diepte van de celwanden. Dit is een duidelijk verschil met Delft3D, waar deze optie niet beschikbaar is. In Delft3D wordt er gebruik gemaakt van de diepte van de vier hoekpunten, niet van de diepte in de celwanden. De dieptebepaling van de celwanden komt overeen met de opties van Delft3D voor instelling 3,4 en 5, hierin wordt het minimum, maximum of gemiddelde van de twee hoekpunten bepaald. Het probleem is dan als volgt: wanneer instelling 3,4,5 wordt gebruikt komt de diepte bepaling voor de celwand overeen maar niet de dieptebepaling van het midden van de cel. Hierdoor kunnen er verschillen in bodemhoogtes ontstaan tussen Delft3D en Delft3DFM. Hoe dit tot verschillen kan leiden wordt uitgelegd aan de hand van een voorbeeld.

De standaardinstelling in Delft3D FM is het gemiddelde van de twee hoekpunten voor de diepte van de celwand en het minimum van de celwanden voor de diepte in het midden van de cel (**instelling 3 uit de bovenstaande figuur**). De instelling in Delft3D die hier het meest op lijkt is als volgt: gemiddelde van de twee hoekpunten voor de celwand, en minimum van de vier hoekpunten voor het midden van de cel. Een voorbeeld van deze instelling en de verschillen die hierdoor optreden is te vinden in onderstaande figuur. De bodemdiepte in de celwand is gelijk in Delft3D en Delft3D FM, maar het midden van de cel verschilt.



Samengevat kan er dus worden gesteld dat er geen exacte kopie van de instellingen die mogelijk zijn in Delft3D beschikbaar is. Allereerst is er de instelling van Conveyance 2D, waar de diepte in de celwanden anders wordt geformuleerd dan in Delft3D. Wel is het zo dat de diepte in het midden van de cel wel op dezelfde manier bepaald kan worden als in Delft3D (met behulp van hoekpunten). Wanneer Conveyance2D niet aan staat, kan het bepalen van de diepte in het midden van de cel niet exact overeenkomen met Delft3D. Echter, de dieptebepaling van de celwand kan bij deze instelling wel overeenkomen met de instellingen in Delft3D.

F: DOMEINBESCHRIJVING NUMERIEKE MODELLEN

Inhoud:

- 1: Overzicht gebruikte data
- 2: Domeinbeschrijving
- 3: Objecten en abstracties in het modeldomein
- 4: Waterdiepte in het modeldomein
- 5: Stroomsnelheden in het modeldomein

1: Overzicht data

Data type	Beschrijving	Bron
Landsgrenzen	De landsgrenzen zijn gebruikt om het rekenrooster op te stellen.	Topografische kaarten van het gebied (open source, bijvoorbeeld Google earth)
Bathymetrie/ bodemdata	Hoogtes van de zeebodem. Deze worden beschreven door X,Y en Z waarden.	Metingen van Rijkswaterstaat.
Randvoorwaarde	Waterstand gebaseerd op meetgegevens in het noorden van het domein.	Metingen uitgevoerd door "WaterProof" in Januari 2017.
Dimensies van het spoelmeer	10 hectare, -1,5 m NAP. Een eerste aanname van de dimensie van het spoelmeer.	Aannames "WaterProof".
Bodemruwheid	In de modellen is de bodemruwheid beschreven door White-Colebrook parameter. De waarde is 0.001 in de omgeving van de geul, 0.01 erbuiten.	Gebaseerd op metingen van het slib rondom de haven van Noordpolderzijl.

2: Domeinbeschrijving



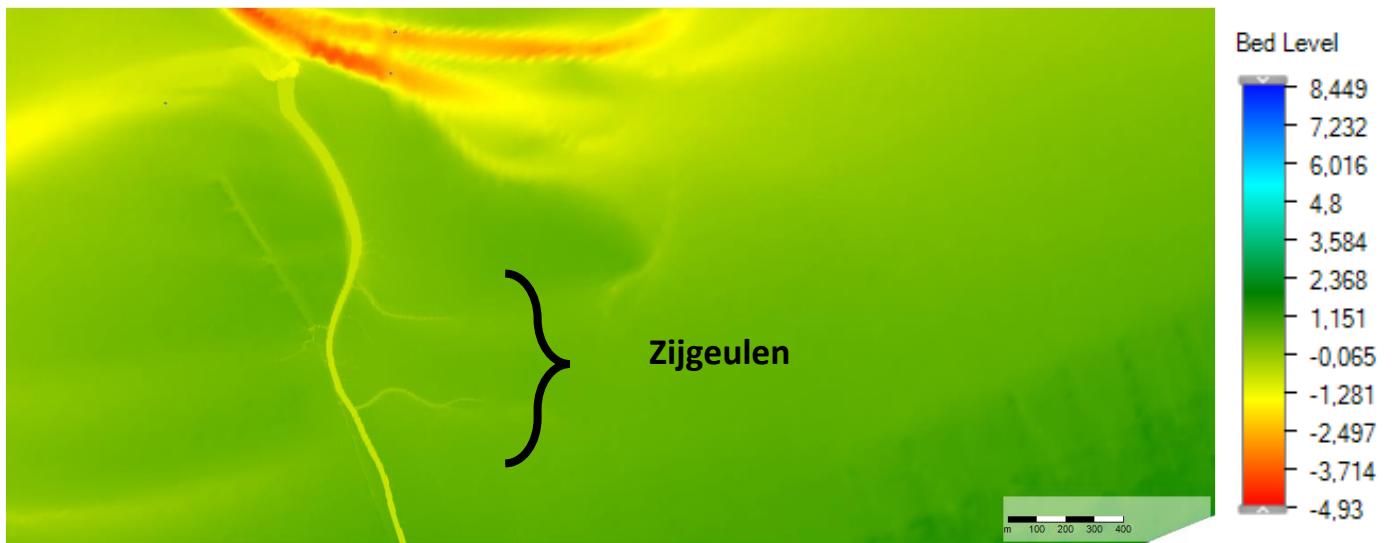
Overzicht domein in omgeving.



Randvoorwaarde

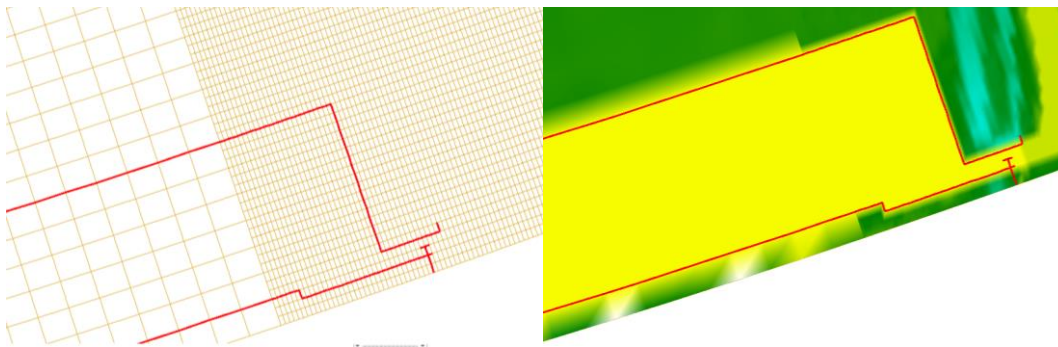


Zijgeulen

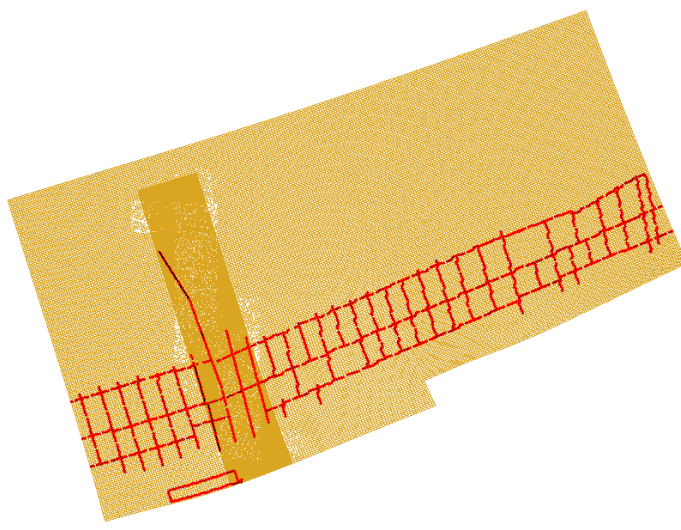


3: Objecten en abstracties (thin dams en observatiepunten)

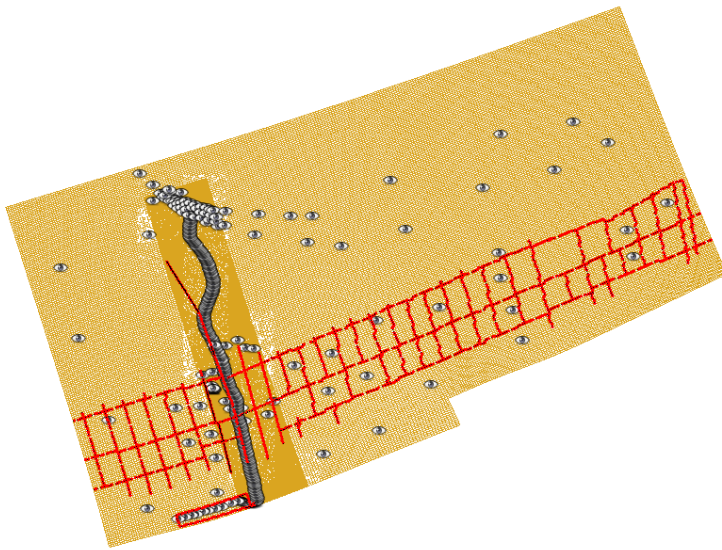
Spoelmeer in het Delft3D model, opening vernauwd



Alle thin dams

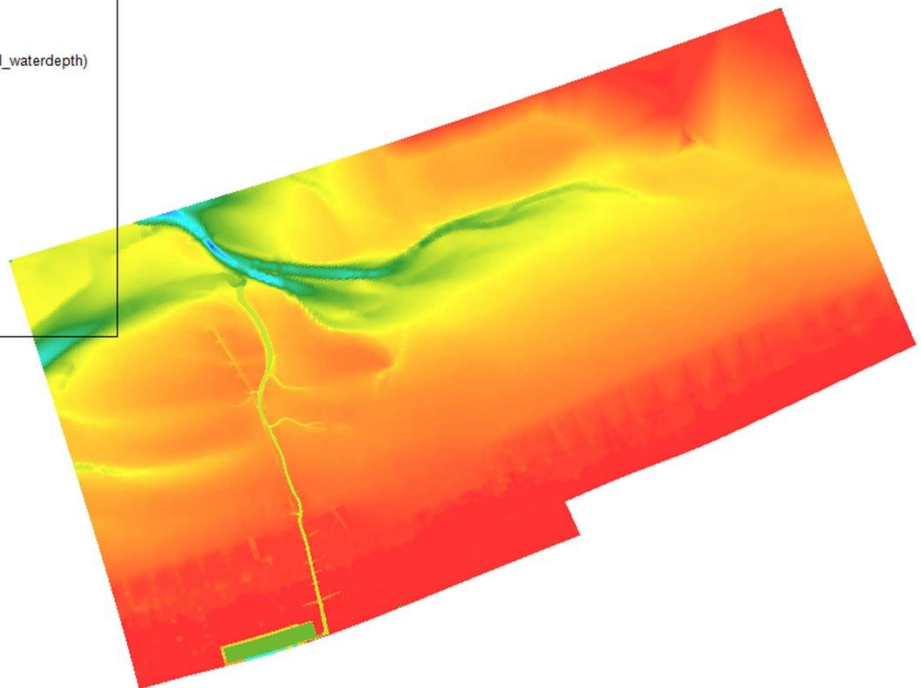
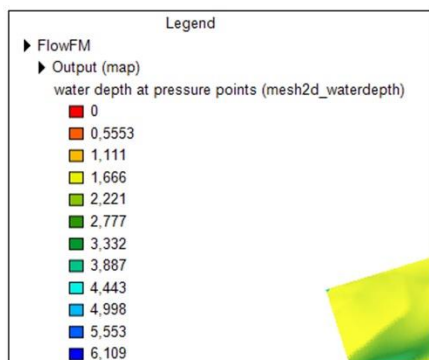


Thin dams en observatiepunten

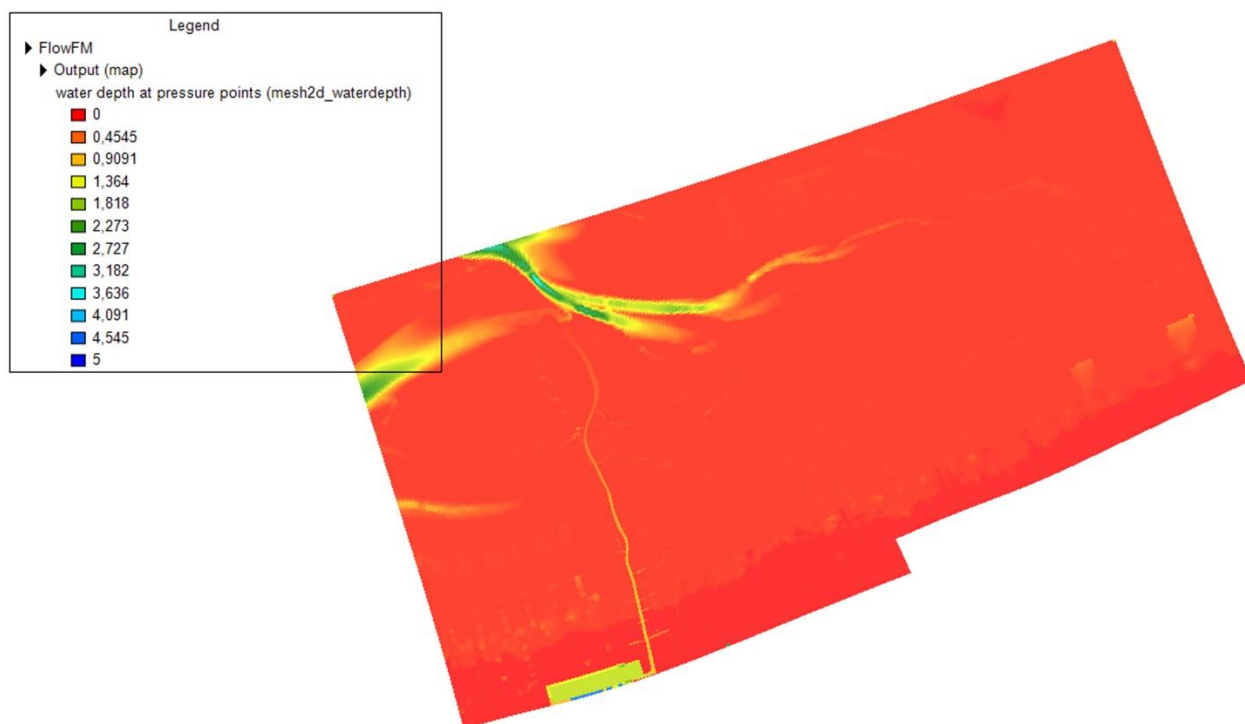


4: Waterdiepte modeldomein

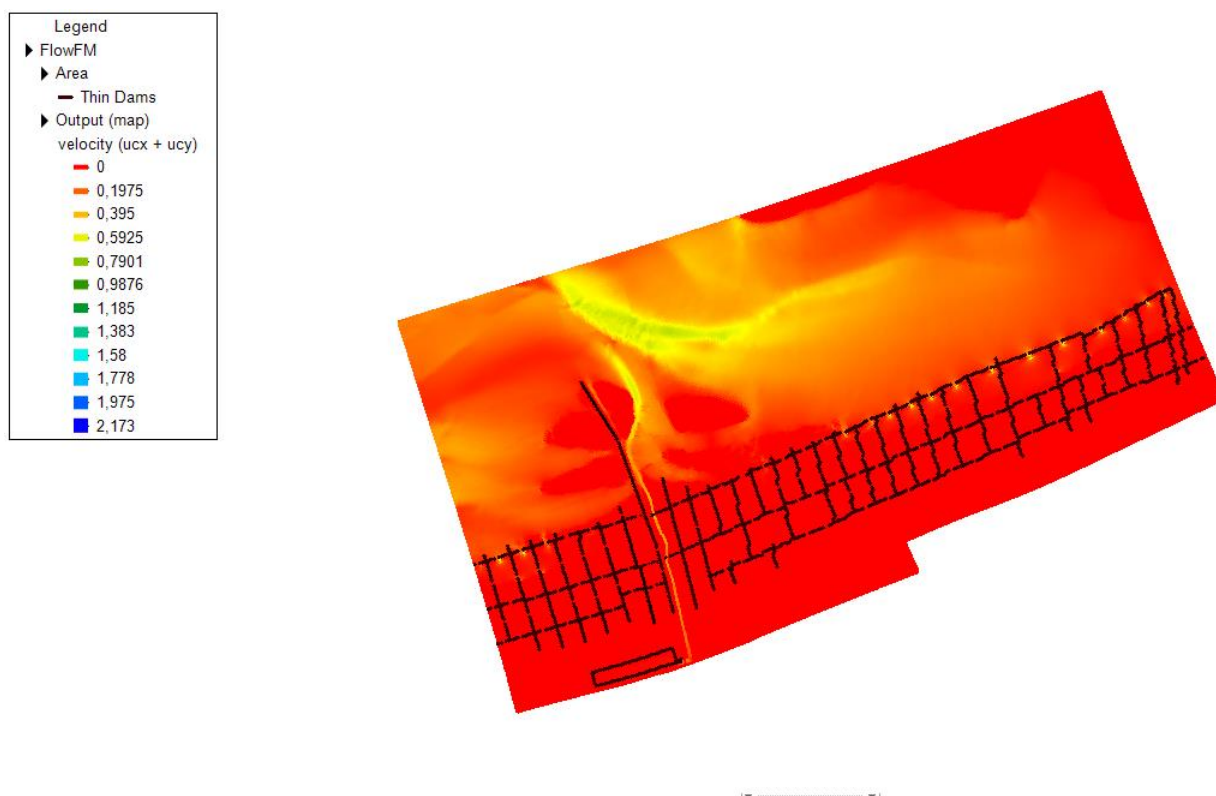
Hoogwater (21-01-2017 05:00)



Laagwater (21-01-2017 12:00)



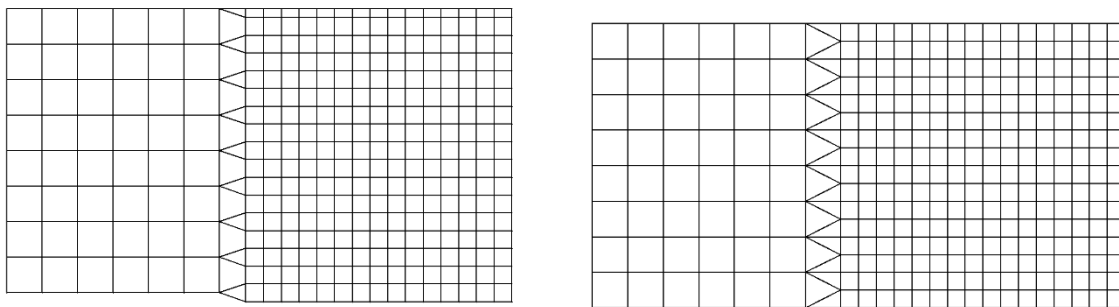
5: Absolute stroomsnelheden (leegstromen spoelmeer 21-01-2017 08:00)



G: ALTERNATIEVEN MODEL 1

Optie 1

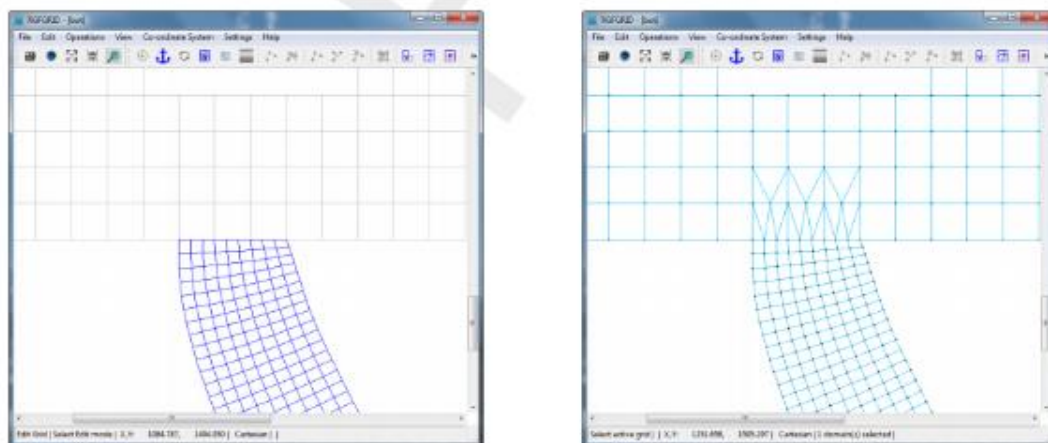
In principe zijn de cellen in de domeinen D1N en D1Z (zie Figuur 9) verfijningen van het omliggende rooster. In de beschikbare literatuur gebeurt het aanbrengen van een verfijning in een gestructureerd rooster meestal met behulp van een casulli refinement, zoals in (Maximova, et al., 2013) & (Smits, 2016). Een voorbeeld van dit type verfijning is te zien in in de onderstaande figuren. Om een orthogonale verfijning te krijgen is dit echter alleen mogelijk wanneer het rooster met een factor 2^n verfijnd is (met n een geheel getal). Dit werkt dus niet in combinatie met het gebruikte rooster, wat 3 keer verfijnd is in de lengterichting en 7 keer in de breedte richting. Het is dan ook niet mogelijk in combinatie met het bestaande rooster in Delft3D. Het huidige rooster van Delft3D is al uitgebreid getest. Hierdoor is het vrij zeker dat het rooster acceptabele resultaten genereerd. Daarom is ervoor gekozen om geen nieuw rooster te maken voor Delft3D wat wel te verfijnen is op manier zoals in de onderstaande figuren.



Optie 2

Na het afvallen van de vorige optie, is er een andere optie overwogen om de roosters van de verschillende domeinen automatisch te koppelen. Hierdoor zouden domein D1N en D1Z automatisch gekoppeld kunnen worden. Dit kan gedaan worden met de functie "Attach Grids at DD boundaries". Vergelijkbaar met de onderstaande figuur, wordt dan het rooster in meerdere fases verfijnd. Om een onbekende reden werkte deze optie echter niet in combinatie met het gebruikte rooster in Delft3D.

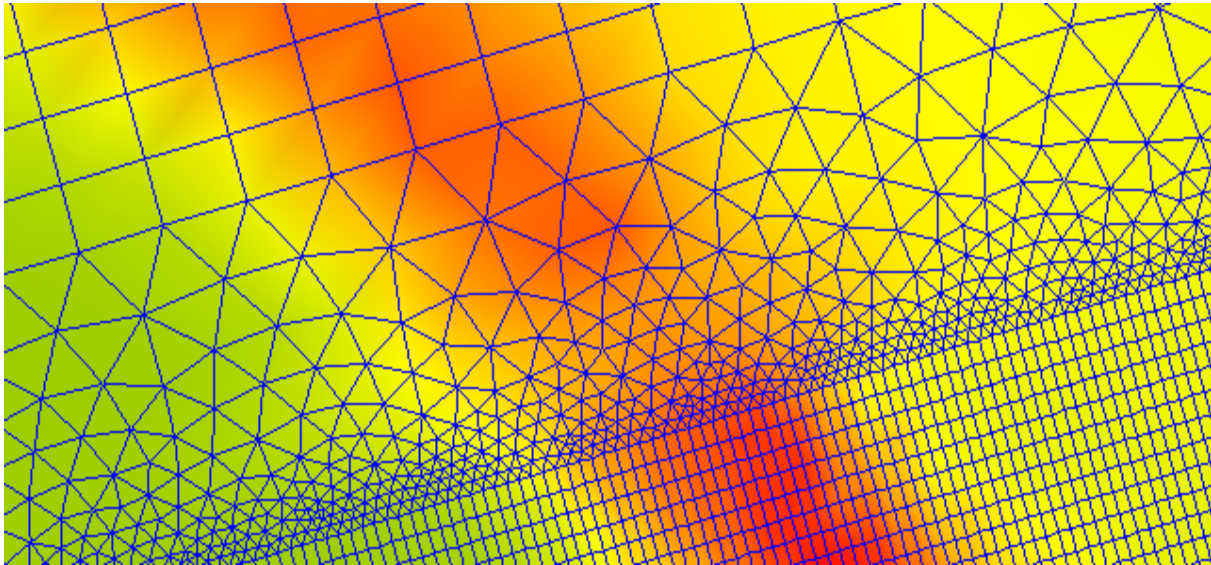
Bron: (Deltares, 2017)



Een vergelijkbare presentatie zou ook met de hand gemaakt kunnen worden, maar dit is door de fijne resolutie van domein D1N en D1Z onhaalbaar en onpraktisch omdat het erg veel tijd kost. Ook deze optie valt dus af.

Optie 3 (Gekozen optie/alternatief)

De optie die dan overblijft is het genereren van een driehoekige rooster die de koppeling vormt tussen domein D1N/D1Z en D2. Een nadeel is het verkrijgen van zeer kleine driehoekige cellen nabij het verfijnde rooster (D1N), zoals te zien in de onderstaande figuur.



Overzicht problemen en nadelen opties

De eerste twee opties vallen af, omdat ze niet mogelijk waren. Optie 1 en 2 gebruiken een vergelijkbare manier van verfijnen, het splitsen van een grotere cel in driehoeken waardoor er een fijnere resolutie behaald wordt. Ook bij deze manier van verfijnen geldt dat er kleine driehoekig cellen worden gegenereerd, waardoor er mogelijk een limering van de tijdstap op treed.

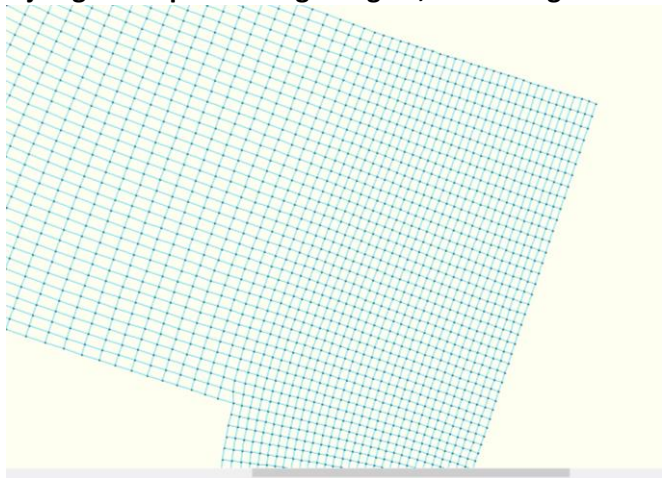
Het nadeel van de gekozen optie is echter dat de driehoekige cellen kleiner worden dan wanneer optie 1 en 2 worden toegepast. Daarnaast moeten er vrij veel ongestructureerde cellen gebruikt worden om de roosters op deze manier te koppelen. Hierdoor wijkt het rooster meer af ten opzichte van het rooster in Delft3D, dan wanneer optie 1 en 2 worden gebruikt. De reden van het kiezen van optie 3 is dus voornamelijk het afvallen van de andere alternatieven, niet omdat dit de best optie van het koppelen is.

H: ALTERNATIEVEN MODEL 2

Alternatief 1 (door laten lopen curvi lineair rooster)

Alternatief 1 is het door laten lopen van het curvi lineaire rooster van de kleine geul vanuit de haven in de geul van de Waddenzee. Dit is geïllustreerd in de figuur hieronder. Een argument voor deze manier van koppelen is dat het gebruik van ongestructureerde cellen het liefst vermeden wordt vanwege de tijdstap. Een nadeel van dit alternatief is dat het een stuk minder flexibel is om op te stellen. Verder konden hierdoor de roosters van beide geulen in dat gebied niet optimaal beschreven worden (resolutie aangepast, buiging geul). Daarnaast is het koppelen van twee verschillende curvi lineaire roosters onder verschillende hoeken zeer lastig, waardoor de orthogonaliteit ver boven de aangeraden waarde van 0.01 kwam. Omdat dit gebied belangrijk is voor de toevoer en aanvoer van de geul is er daarom besloten om niet verder te gaan met dit alternatief. Verder is juist een kenmerk van Delft3D FM dat het opstellen van het rooster flexibel is waardoor deze manier van koppelen niet aantrekkelijk is. Het effect vinden van de flexibiliteit van het rooster op de accuraatheid is ook een belangrijk onderzoeksdoel.

Fijne geul loopt door in grote geul, links een gedeelte van het rooster in de geul Waddenzee



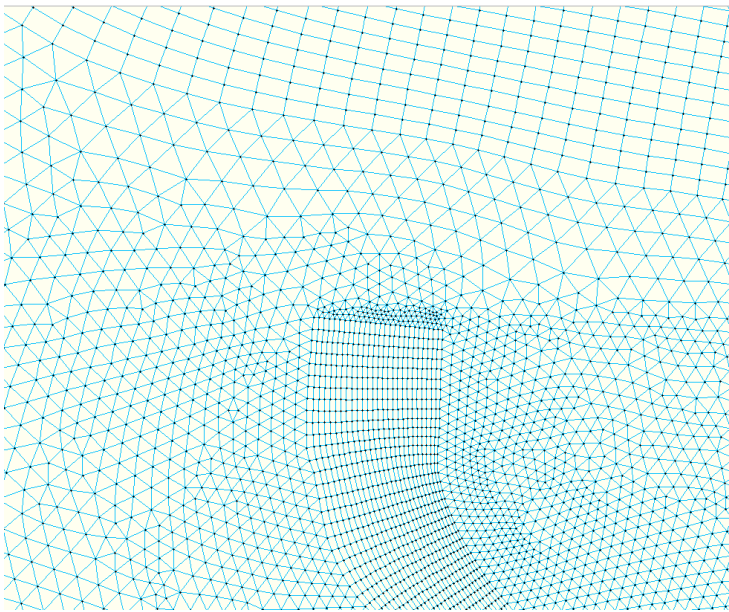
Andere alternatieven

Om van de flexibiliteit van Delft3D FM gebruik te maken zijn de twee roosters (kleine geul en grote geul) als losstaand gezien welke aan elkaar gelijmd kunnen worden met driehoekige cellen. Hierdoor zijn de roosters van beide geulen beter te optimaliseren. Verder kan er gemakkelijk worden voldaan aan de eisen voor de orthogonaliteit vanwege de flexibiliteit van een ongestructureerd rooster. Wel is het zo dat de tijdstap mogelijk gelimiteerd kan worden door het gebruik van ongestructureerde cellen voor de koppeling.

Alternatief 2

De geul richting de haven van Noordpolderzijl een zeer fijne resolutie heeft in de breedterichting. Hierdoor worden de driehoekige cellen die aan dit rooster gekoppeld worden zeer fijn, dit is te zien in de figuur hieronder. De fijne cellen kunnen de tijdstap erg limiteren wat ongunstig is voor de rekentijd. Voor de rekentijd wordt deze manier van koppelen dus het liefst vermeden. Wel is met deze manier van koppelen goed mogelijk om een orthogonaal rooster te verkrijgen wat voldoet aan het advies van 0.01. Zeker aangezien dit een belangrijk gebied is voor de waterstanden en stroomsnelheden in de geul wordt de orthogonaliteit als belangrijk beschouwd. Gebruik makend van deze manier van koppelen is alternatief 2 van het rooster gemaakt, dit is te zien in de onderstaande figuur.

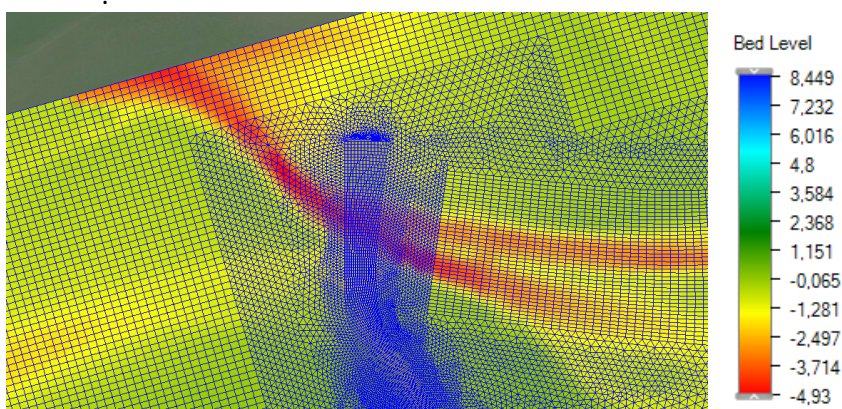
Koppeling fijne geul vanuit de haven (onder) en grote geul Waddenzee (boven)



Alternatief 3 (gekozen alternatief)

Zoals benoemd in alternatief 2 was de manier van koppelen van het rooster niet erg efficiënt. Om de gevoeligheid van de manier van koppelen op de rekentijden en de accuraatheid te onderzoeken is er nog een tweede versie van alternatief 2 gemaakt. De kleine geul heeft een zeer fijne resolutie in de breedterichting (ongeveer 2 meter brede cellen) en hierdoor wordt de koppeling met driehoekige cellen in dit gebied ook zeer fijn. In dit alternatief (alternatief 3) loopt het rooster van de kleine geul door tot buiten de grote geul (zoals te zien in onderstaande figuur). Hierdoor worden de kleine cellen verplaatst naar een gebied met een kleinere stroomsnelheid. Omdat de tijdstap voor een gedeelte wordt beïnvloed door de stroomsnelheid zou dit de tijdstap minder moeten limiteren dan alternatief 2. Het koppelen van het rooster van de grote geul en de kleine geul gebeurt nu aan de lange zijde van het fijne rooster. Hierdoor worden de gekoppelde driehoekige cellen ook groter en dit theoretisch gezien moeten zorgen voor een mindere limitering van de tijdstap

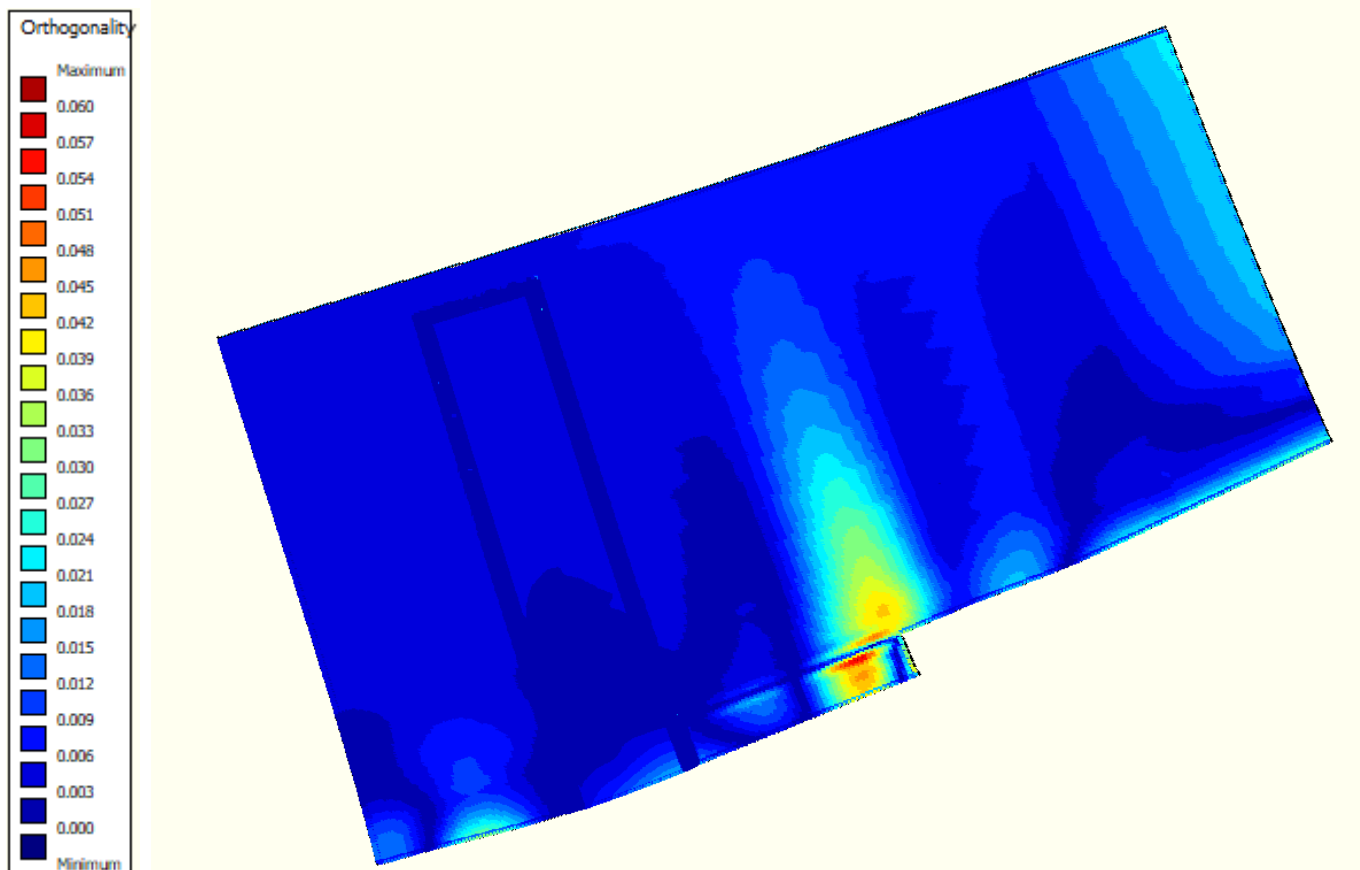
Verder is er een gedeelte van het curvi lineaire rooster van de geul in de Waddenzee verdwenen omdat de kleine geul nu doorloopt. Het rechter gedeelte komt overeen met alternatief 1 maar het linker gedeelte is weggelaten omdat het niet goed mogelijk was om dit orthogonaal te krijgen.



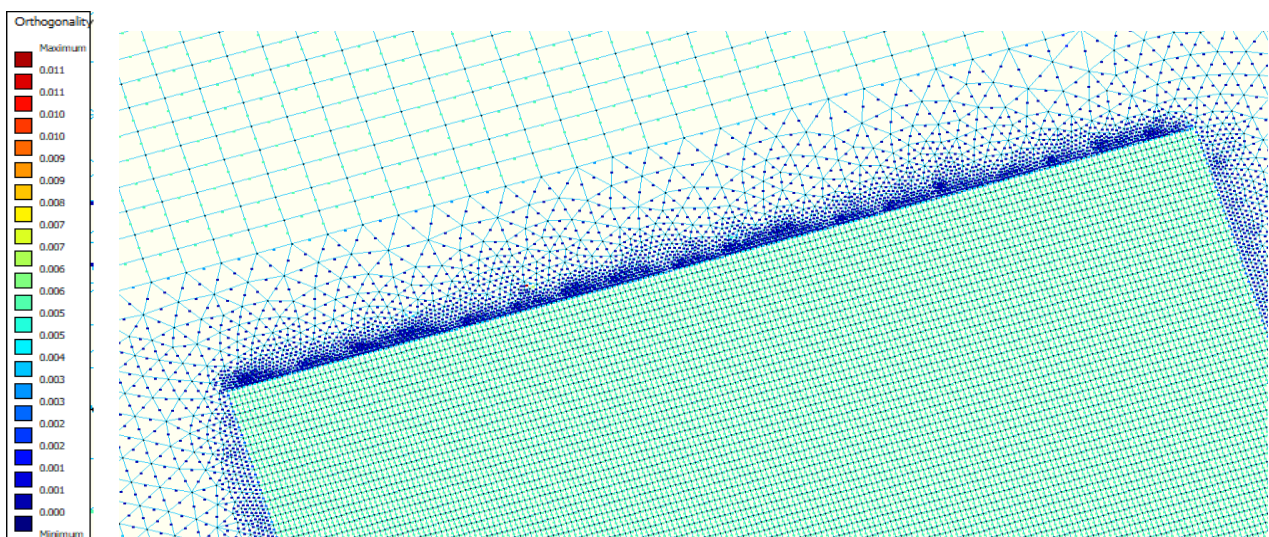
I: ORTHOGONALITEIT

De orthogonaliteit is te vinden in de figuren hieronder. Omdat hetzelfde domein in D2 is gebruikt vanuit het Delft3D model is de orthogonaliteit 0.06 in het buitenste domein. Omdat deze hoge orthogonaliteit al aanwezig was in het Delft3D model en het rooster niet aangepast wordt is dezelfde orthogonaliteit in model 1 en 2 te vinden. In de rest van het model is geprobeerd zo dicht mogelijk bij de aanbevolen waarde van 0.01 te blijven. In model 3 is niet het domein D2 aangehouden van Delft3D, omdat het rooster volledig ongestructureerd is. Hierdoor is de orthogonaliteit lager.

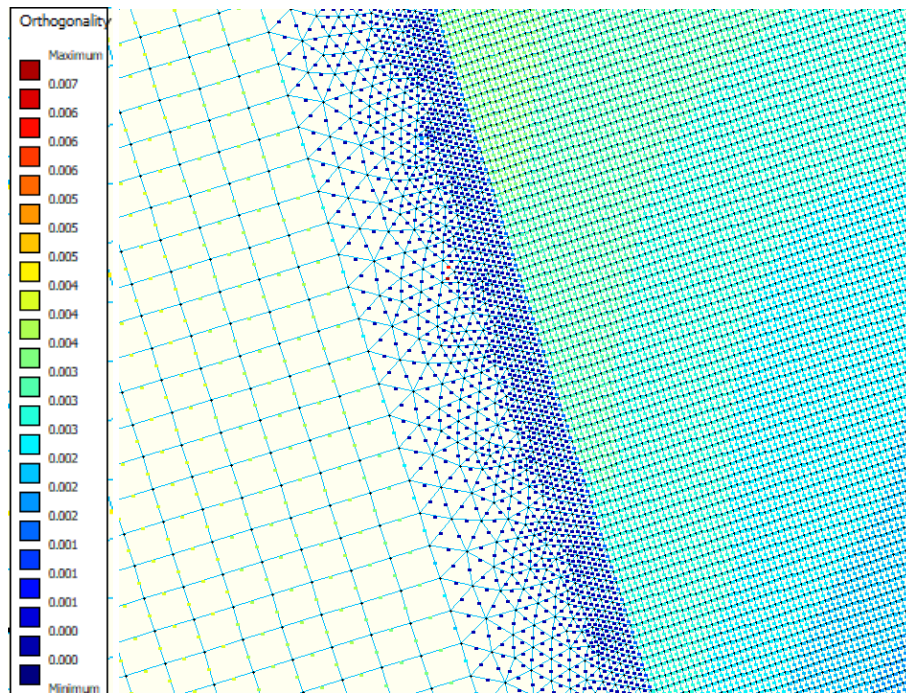
Model 1



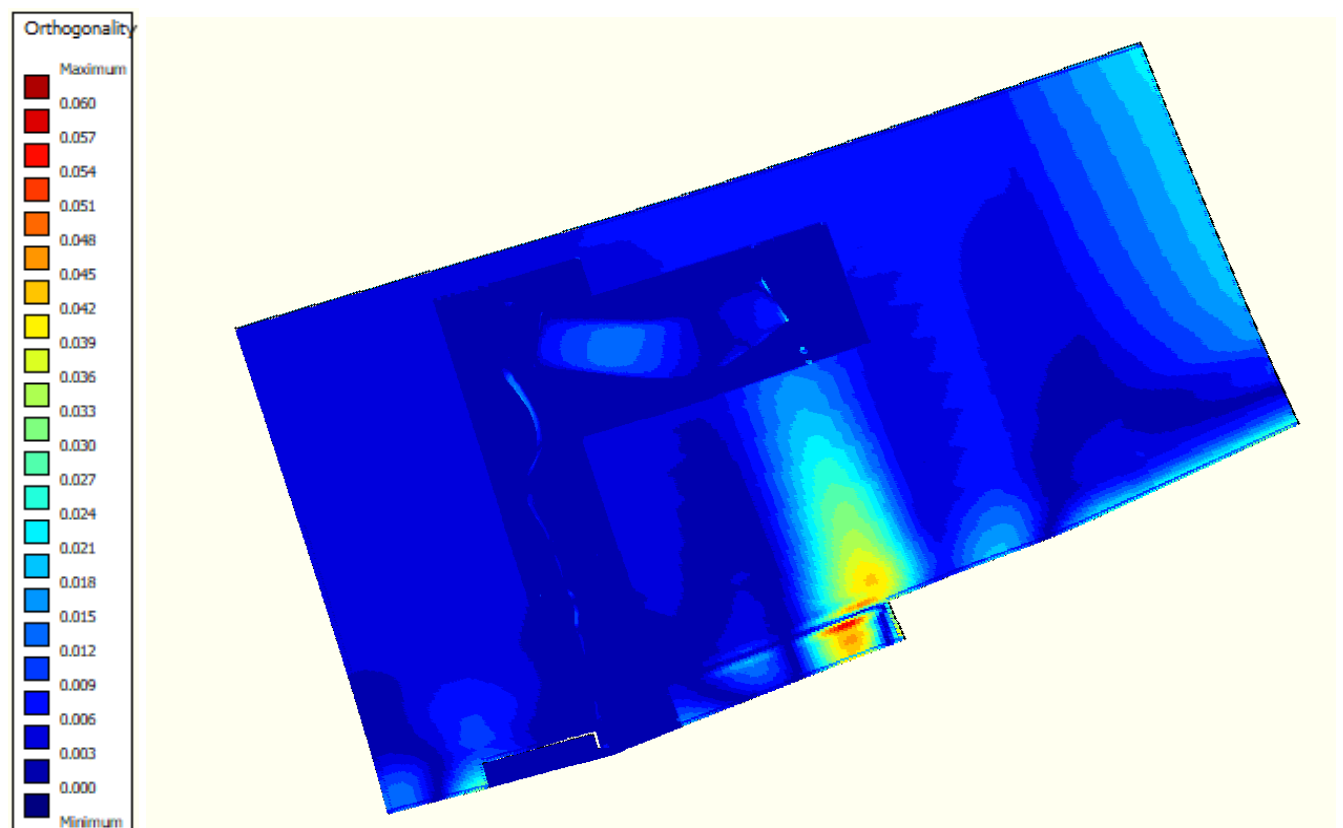
Bovenkant



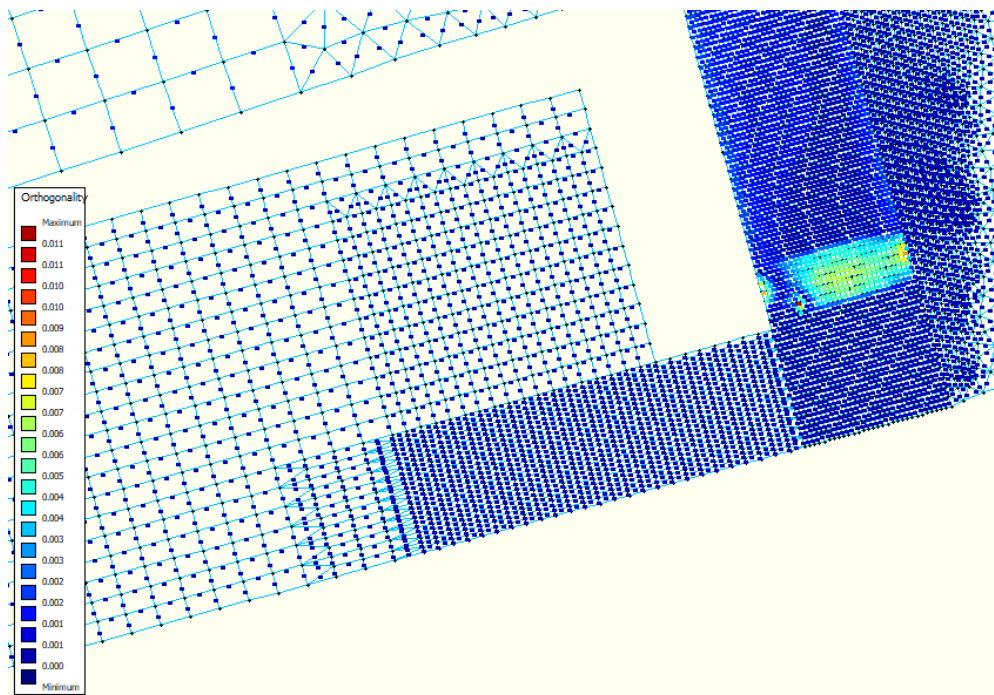
Zijkant



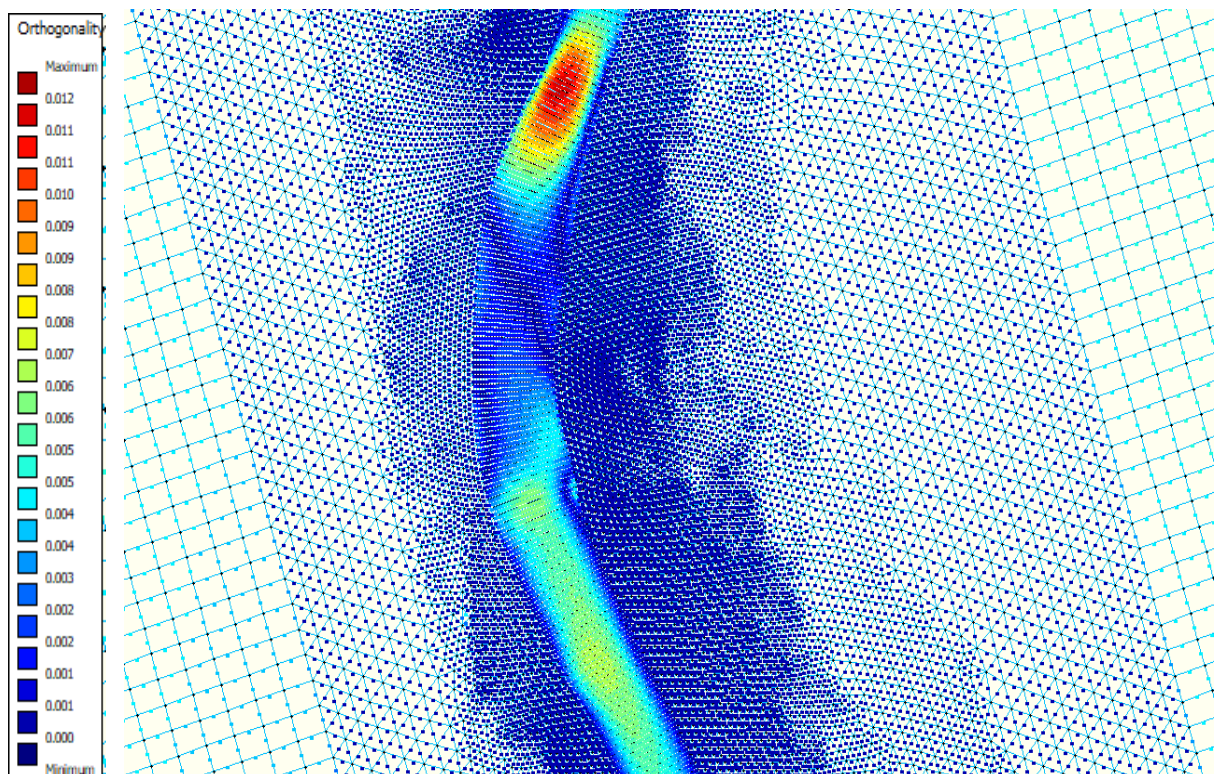
Model 2



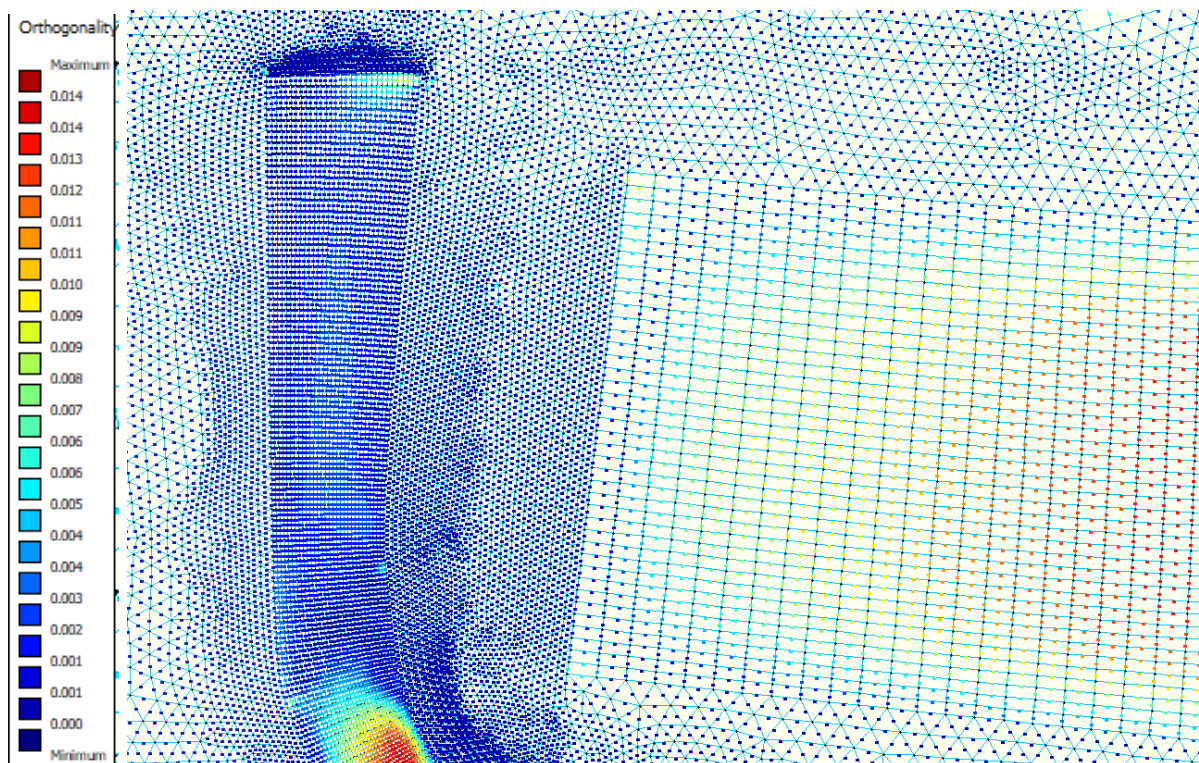
Spoelmeer



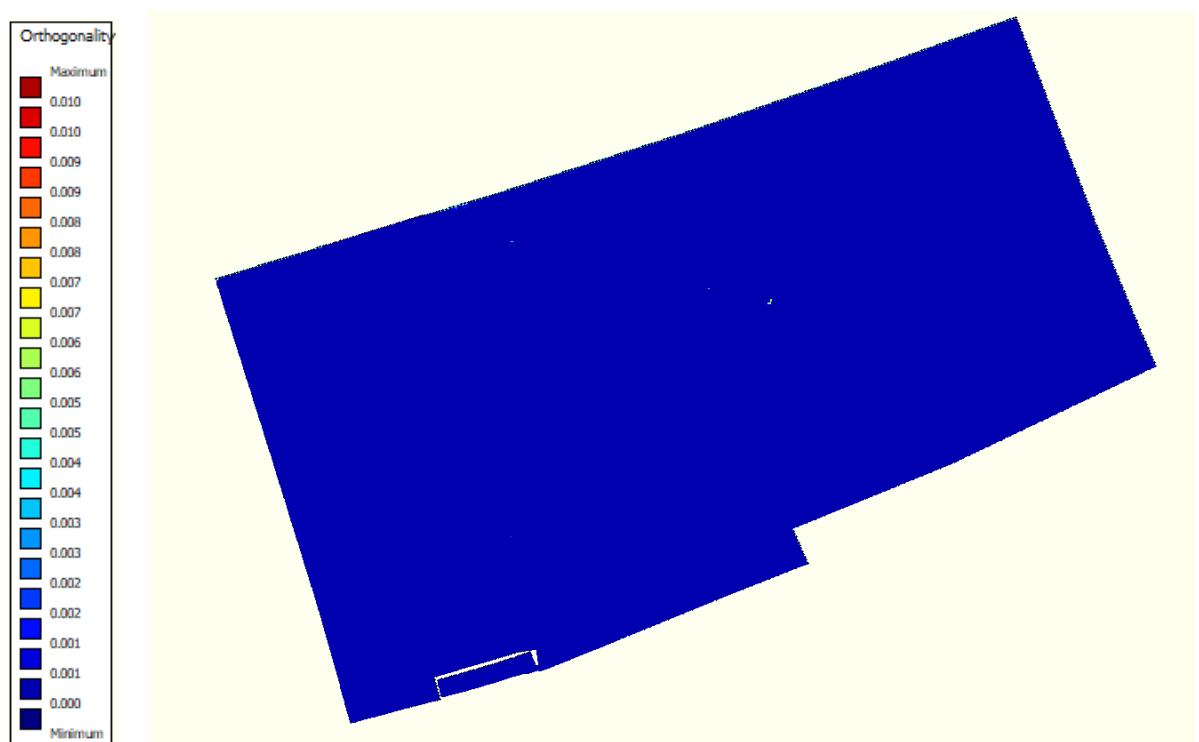
Geul



Koppeling geulen

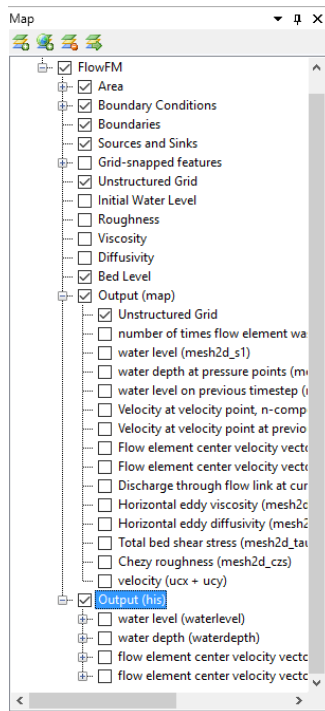


Model 3

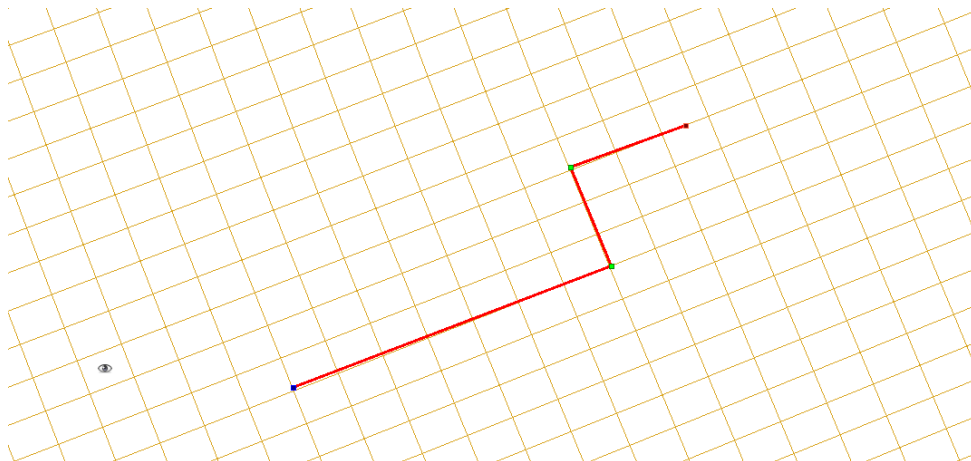


J: VOORBEELDEN INTERFACE DELFT3D FM

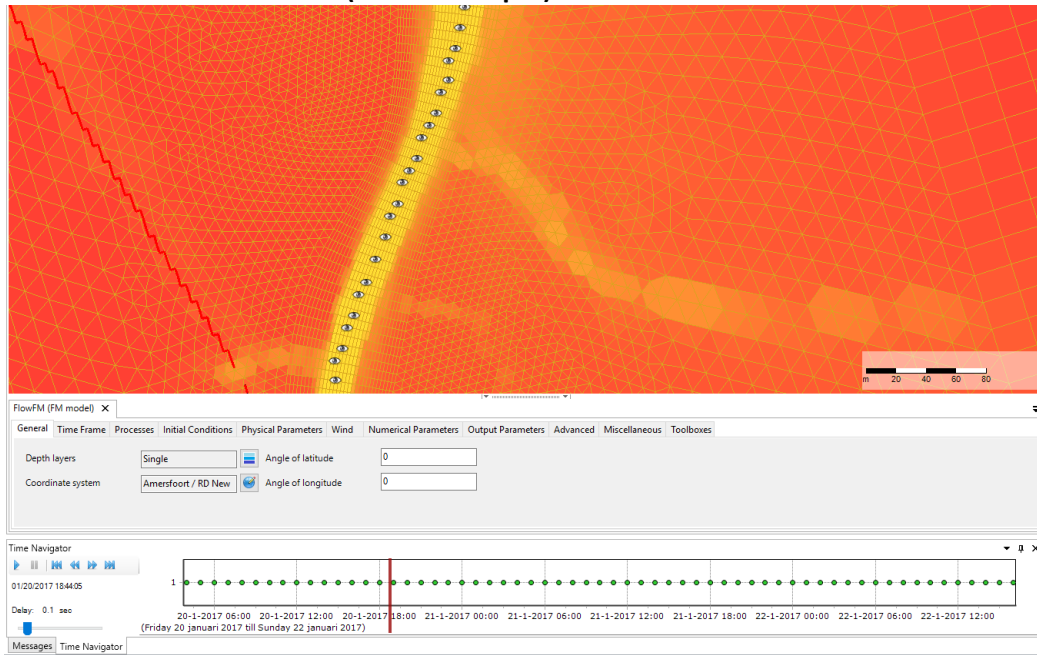
Gis interface: Hierdoor mogelijk om verschillende kaartlagen aan en uit te zetten (ook externe kaarten, bijvoorbeeld satellietkaarten)



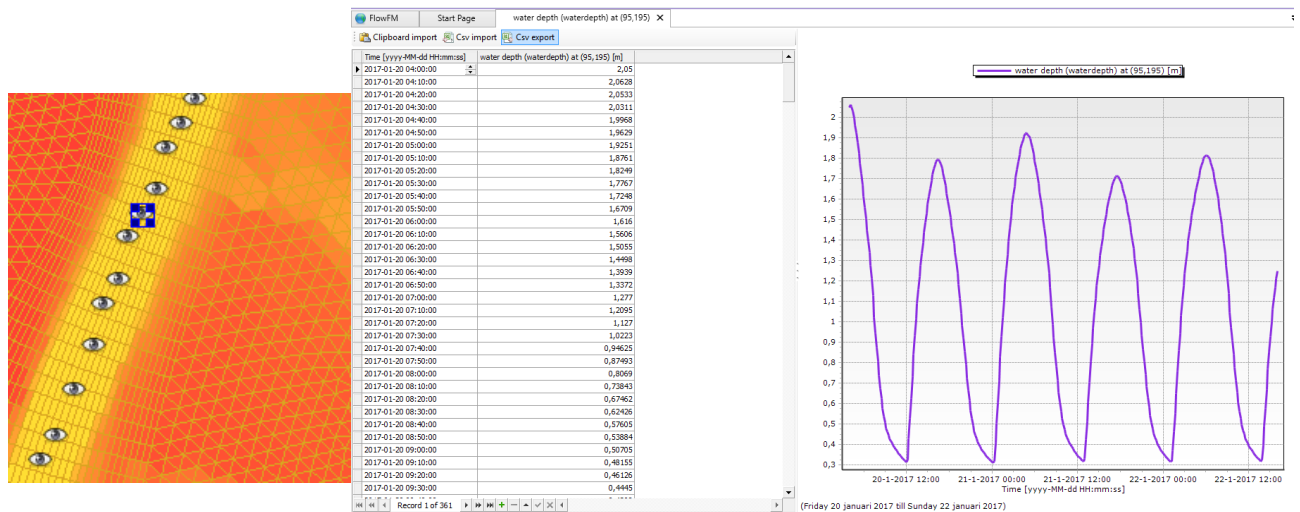
Invoegen en aanpassen thin dam, andere objecten vergelijkbaar



Animeren van het resultaat (nu waterdiepte)



Het plotten van observatiepunten in Delft3D FM, selecteren van observatiepunten



K: GEBRUIKTE MODELINSTELLINGEN ALGEMEEN, BODEMINSTELLINGEN EN SCENARIO'S

Inhoud

- 1: Algemene instellingen
- 2: Uitgebreide beschrijving gebruikte bodeminstellingen
- 3: Illustratie afgesloten spoelmeer scenario 2 en 4

1: Algemene instellingen

Instelling	Delft3D	Modellen in FM
Tijdstap	0.05 minuut/ 3 seconden	Dynamisch, courant 0.7
Bodemruwheid	White colebrook 0.001 in D1N/D1N en 0.01 in D2	White colebrook Zelfde contour als D1N/D1Z en D2 aangehouden in verschillende roosters
<u>Bodeminstellingen</u> Depth at grid cell faces Depth at cell centers	Mean (2 hoekpunten) Max (4 hoekpunten)	<u>FM verschilt in de bodeminstellingen (zie kop bodeminstellingen)</u>
Threshold depth	0.1 m	0.1 m
Initiele waterstand	1.2 meter	1.2 meter
Dimensie	2DH	2DH
Modules Processen	Stromingsmodule Geen saliniteit, temperatuur en golven	Zelfde als Delft3D
<u>Andere parameters</u> Viscositeit Dichtheid water	1 1000	1 1000
Simulatieperiode	20-01-2017 04:00 – 22-01-2017 16:00	Zelfde als Delft3D

2: Bodeminstellingen

In de vier scenario's zijn 2 verschillende bodeminstellingen gebruikt. In scenario 1 en 2 is er een instelling die genoemd is Conveyance2D en een instelling geen conveyance2D. In scenario 3 en 4 is er alleen de instelling met Conveyance2D gebruikt. In Delft3D zijn de bodeminstellingen constant gehouden.

Bodeminstellingen Delft3D

Gebruikte instelling:

Diepte midden cel: **Maximum van de hoekpunten (overeenkomstig met minimum in Delft3D FM)**

Diepte celwand: **Gemiddelde twee hoekpunten**

In Delft3D een instelling gebruikt waarbij de diepte in celwand bepaald wordt door het gemiddelde te nemen van de twee hoekpunten die hij verbindt. De diepte in het midden van de cel wordt bepaald door de maximum van de hoekpunten te bepalen. De maximumdiepte in Delft3D komt overeen met het minimum in Delft3D FM. In Delft3D FM hebben bodemdiepte onder 0 (NAP) een negatieve waarde, terwijl in Delft3D dit positieve waardes zijn. De instellingen zijn niet gevarieerd in Delft3D, omdat

hierdoor alle resultaten zouden veranderen. Dit maakt de modelstudie in dit onderzoek niet relevant meer voor de casus.

Bodeminstelling Delft3D FM Conveyance2D

Gebruikte instelling: **Conveyance2D=3**

Diepte midden cel: **Minimum van de hoekpunten (overeenkomstig met Delft3D)**

Diepte celwand: **Lineaire bepaling (niet overeenkomstig met Delft3D)**

Uit hoofdstuk 4.4 wordt duidelijk dat er een instelling is genaamd Conveyance2D in Delft3D FM. In het kort wordt bij deze instelling de bodemdiepte in de celwanden lineair bepaald. Hiermee komt de dieptebeepaling van de celwand dus niet overeen met de instellingen van Delft3D. Verder geldt dat de diepte in het midden van de cel wordt bepaald door het minimum van de vier (of drie bij driehoeken) hoekpunten te bepalen. Deze instelling komt dus overeen met Delft3D, waar het maximum wordt bepaald (maximum in Delft3D is hetzelfde als minimum in FM).

Verder zijn er verschillende opties. Conveyance2D staat aan wanneer de waarde > 0 is. Er zijn drie opties, Conveyance2D=1, Conveyance2D=2, Conveyance2D=3. In de gebruikte modellen in alle 4 de scenario is Conveyance2D=3 gebruikt, volgens de handleiding van D-flow FM heeft deze optie het beste rooster convergentie gedrag. Hierdoor zouden er mogelijk al accurate resultaten behaald kunnen worden behaald met een grover rooster, wat mogelijk rekentijd bespaard.

Delft3D FM Geen conveyance2D

Gebruikte instelling: **Instelling 3 (bedlevtyp=3)**

Diepte midden cel: **Laagste van de celwanden (niet overeenkomstig met Delft3D)**

Diepte celwand: **Gemiddelde (overeenkomstig met Delft3D)**

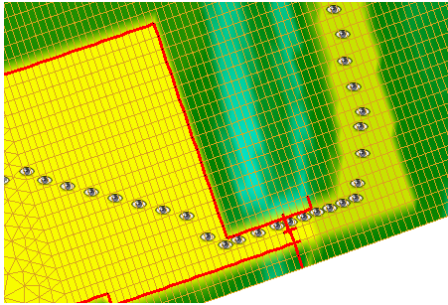
Omdat Delft3D geen optie heeft voor conveyance is er ook een optie geprobeerd zonder conveyance. In Delft3D FM zijn er 6 verschillende opties wanneer Conveyance2D niet aan staat. Er bestaat echter geen exacte match van de instellingen van Delft3D (Deltares, 2016). Waarom dit zo is wordt uitgebreid toegelicht in Bijlage E.

In onderstaande figuur zijn de bodeminstelling weergegeven wanneer Conveyance wordt uitgeschakeld. Instelling 3 komt het meest overeen met de instellingen in Delft3D. De dieptebeepaling in de celwand (gemiddelde) komt overeen met Delft3D. Wel wordt de diepte in het midden van de cel bepaald door de laagste waarde van de diepte in de celwanden te nemen. Dit wijkt dus af van de instelling van Delft3D, waar het bepaald wordt door naar de hoekpunten te kijken. Dit is een mogelijke oorzaak van een verschil in meegenomen bodemdieptes in Delft3D FM.

Keyword	Value	Cell center bed level	Face center bed level
bedlevtyp	1	user specified	the highest cell center bed level considering the two cells next to the face
bedlevtyp	2	the lowest face center bed level considering all the faces of the cell	user specified
bedlevtyp	3	the lowest face center bed level considering all the faces of the cell	the mean corner bed level considering the two corner nodes the face is connecting
bedlevtyp	4	the lowest face center bed level considering all the faces of the cell	the minimum corner bed level considering the two corner nodes the face is connecting
bedlevtyp	5	the lowest face center bed level considering all the faces of the cell	the maximum corner bed level considering the two corner nodes the face is connecting
bedlevtyp	6	the mean corner bed level considering all the corners of the cell	the highest cell center bed level considering the two cells next to the face

3: Afgesloten spoelmeer scenario 2 en 4

In scenario's 2 en 4 is het spoelmeer afgesloten. Het spoelmeer is afgesloten door er een dam ("Thin dam") te plaatsen. In de onderstaande figuur is een voorbeeld te zien (model 1).

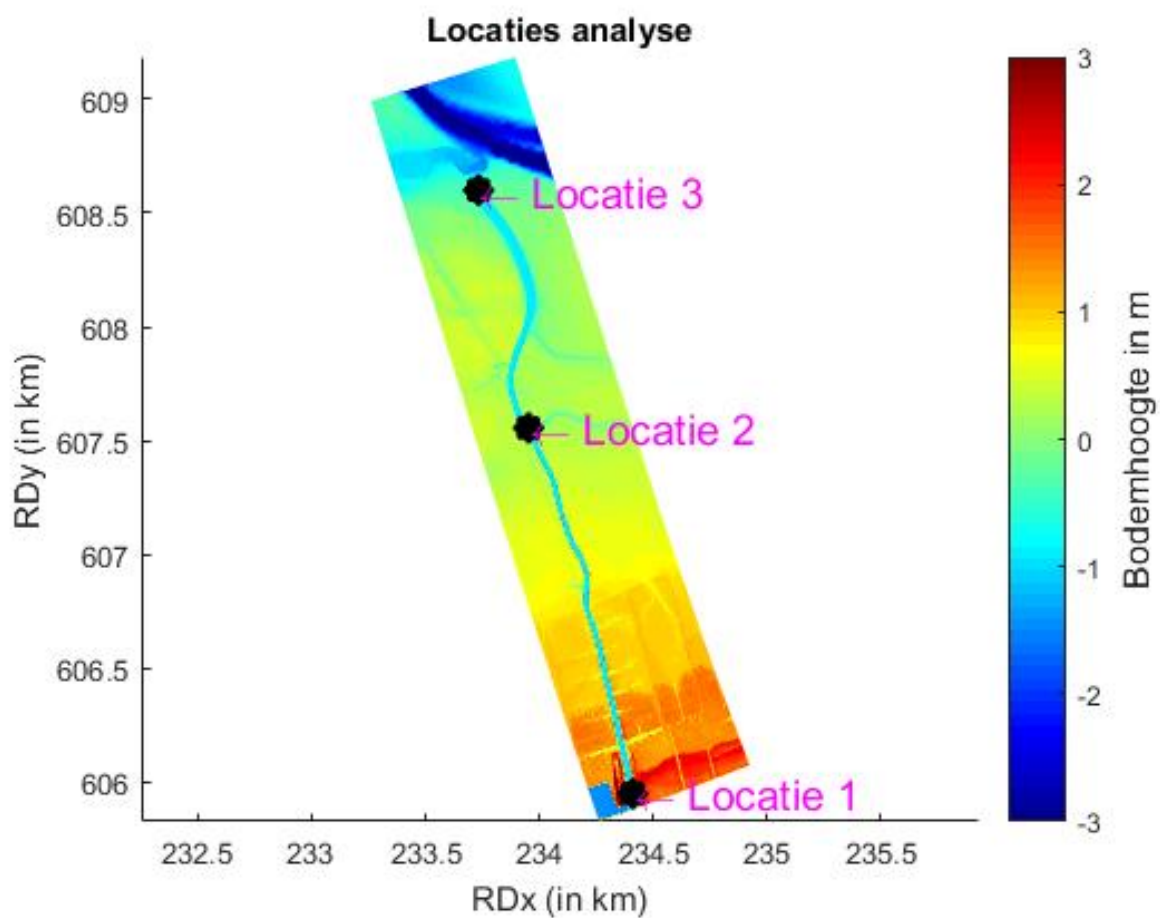


L: RESULTATEN SCENARIO'S

Inhoud

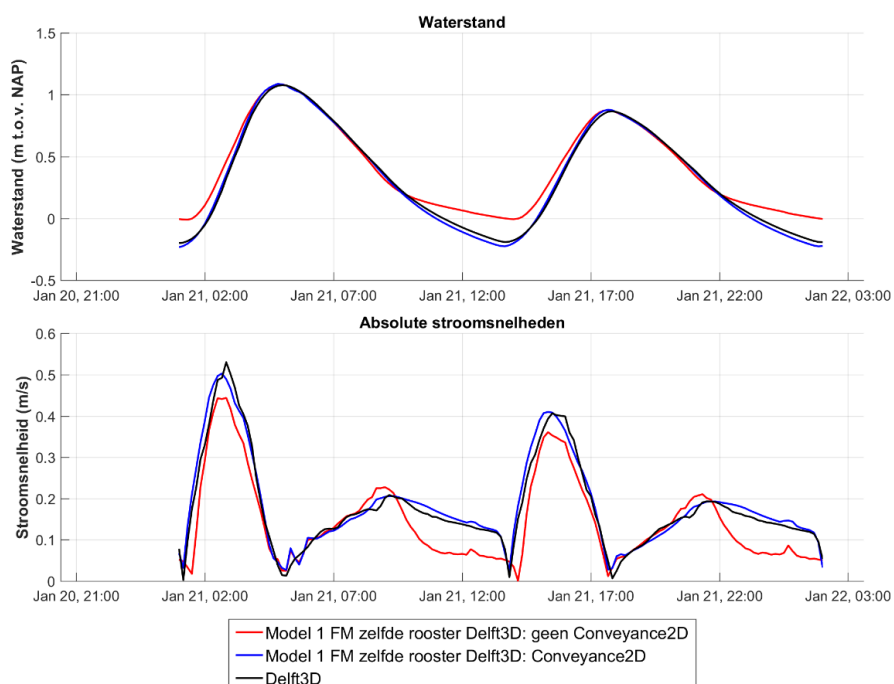
- 1: Herhaling locaties analyse
- 2: Grafieken scenario 1, locatie 1 t/m 3
- 3: Grafieken scenario 2, locatie 1 t/m 3
- 4: Grafieken scenario 3, locatie 1 t/m 3
- 5: Grafieken scenario 4, locatie 1 t/m 3

1: Herhaling locaties (bodemdiepte in m NAP)



Scenario 1: Bodeminstellingen

Locatie 1



RMSE (t.o.v. Delft3D)

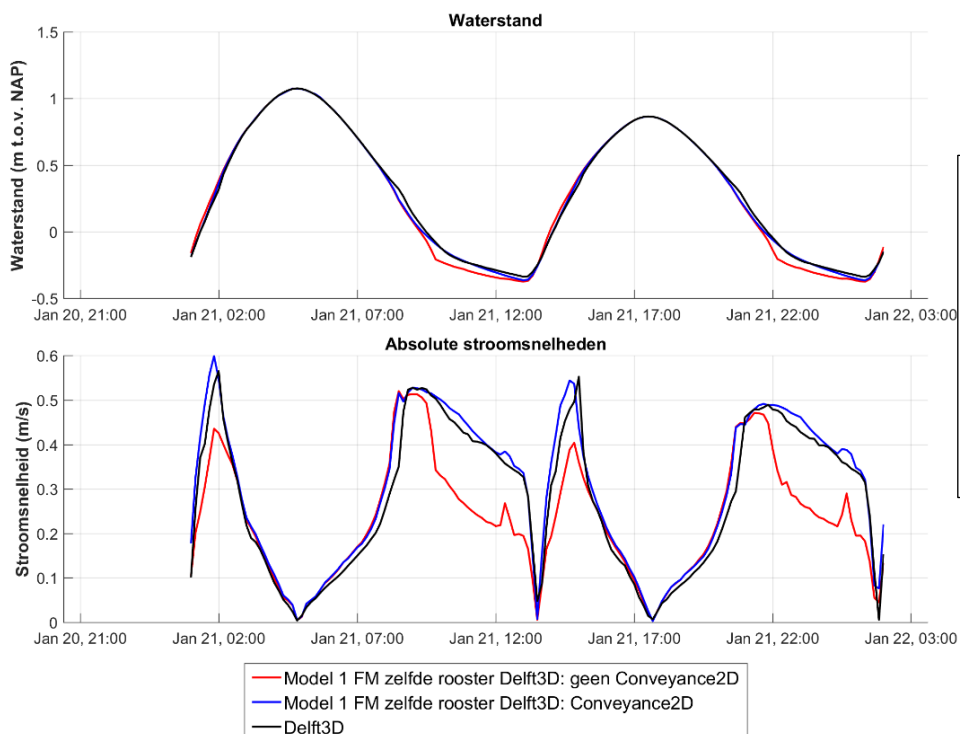
Waterstand

Model 1 con	0.024
Model 1 geen con	0.10

Stroomsnelheid

Model 1 con	0.019
Model 1 geen con	0.053

Locatie 2



RMSE (t.o.v. Delft3D)

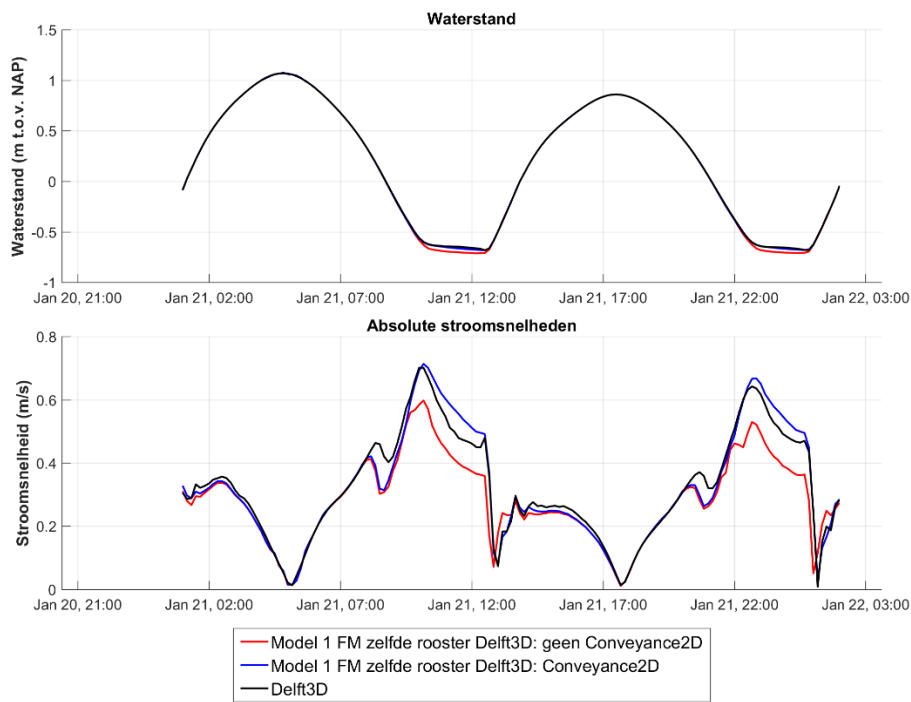
Waterstand

Model 1 con	0.021
Model 1 geen con	0.046

Stroomsnelheid

Model 1 con	0.037
Model 1 geen con	0.094

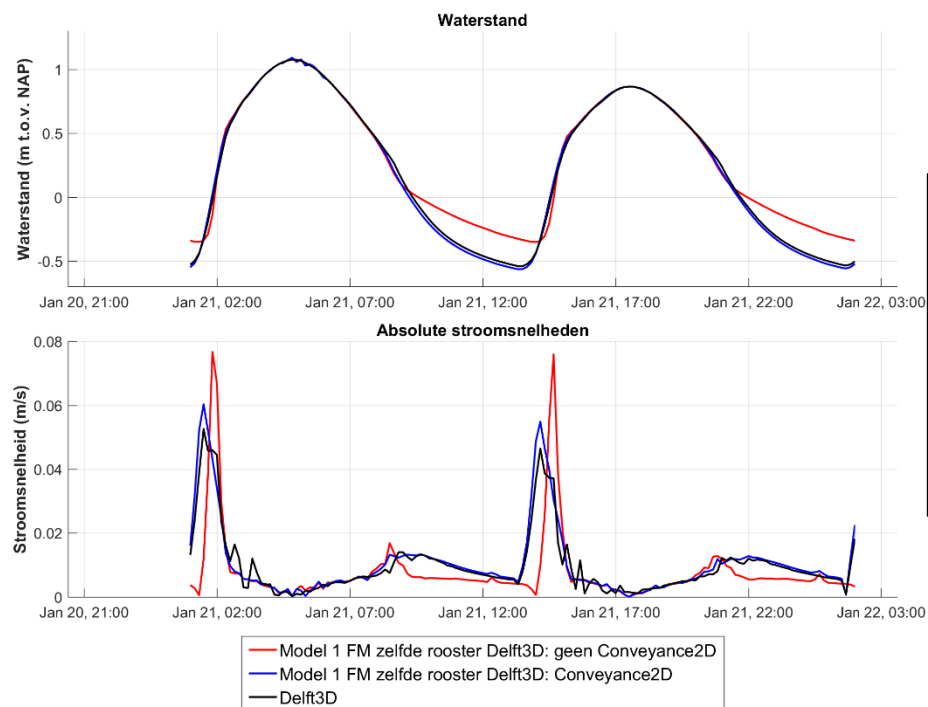
Locatie 3



RMSE (t.o.v. Delft3D)	
Waterstand	
Model 1 con	0.0058
Model 1 geen con	0.046
Stroomsnelheid	
Model 1 con	0.033
Model 1 geen con	0.065

Scenario 2: Bodeminstellingen zonder spoelmeer

Locatie 1



RMSE (t.o.v. Delft3D)

Waterstand

Model 1 con 0.024

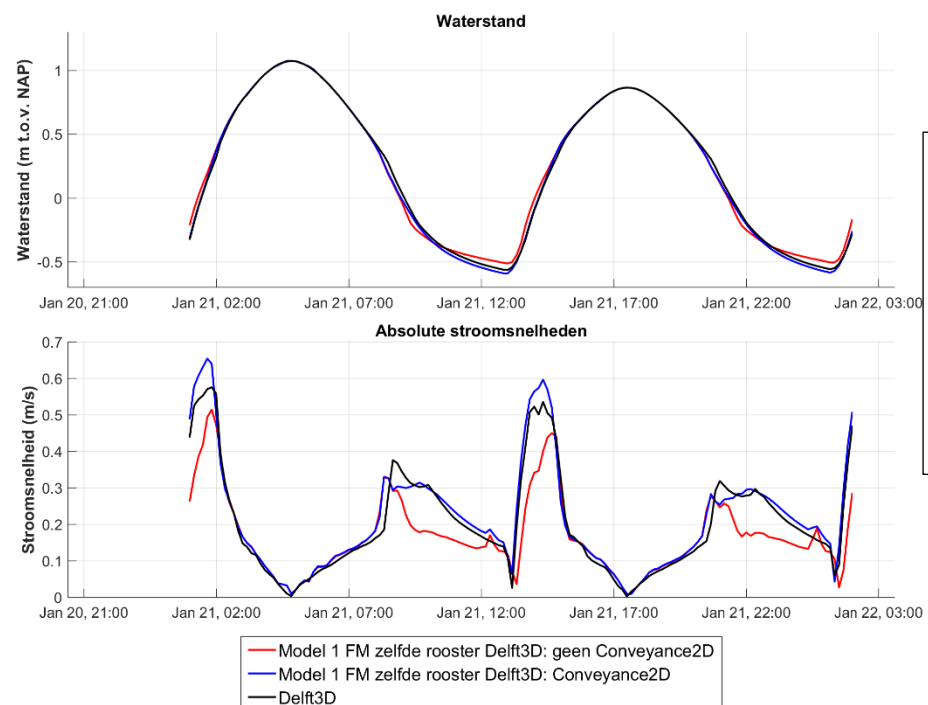
Model 1 geen con 0.12

Stroomsnelheid

Model 1 con 0.0029

Model 1 geen con 0.0093

Locatie 2



RMSE (t.o.v. Delft3D)

Waterstand

Model 1 con 0.024

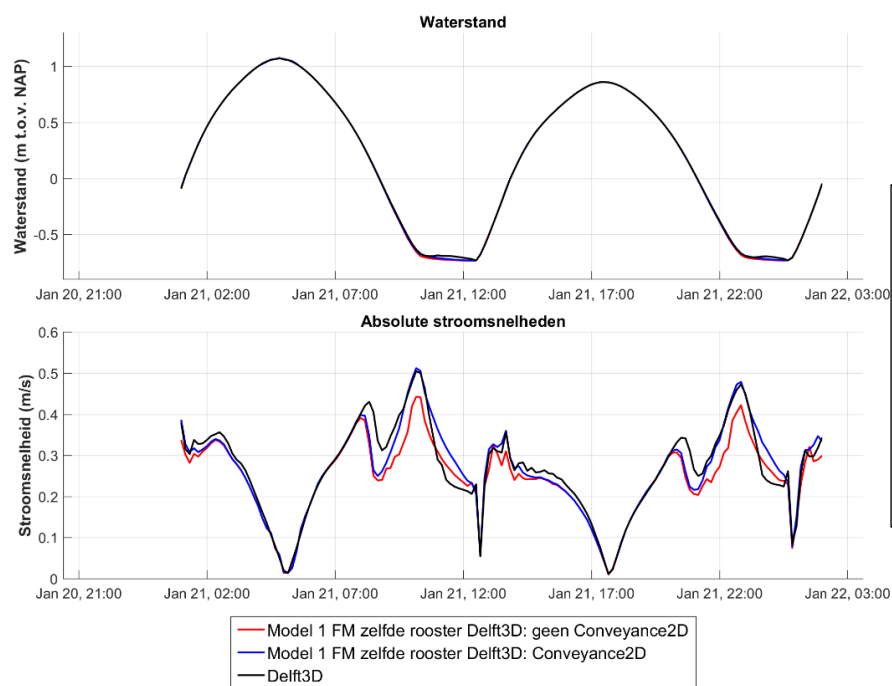
Model 1 geen con 0.043

Stroomsnelheid

Model 1 con 0.032

Model 1 geen con 0.073

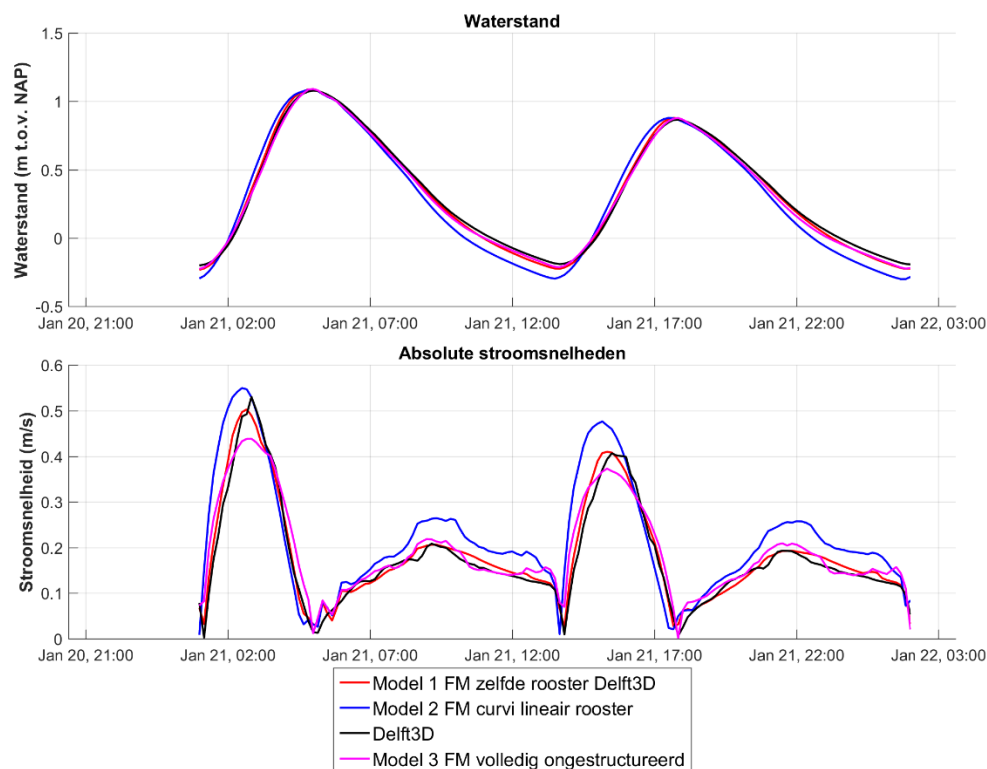
Locatie 3



RMSE (t.o.v. Delft3D)	
Waterstand	
Model 1 con	0.0090
Model 1 geen con	0.012
Stroomsnelheid	
Model 1 con	0.032
Model 1 geen con	0.040

Scenario 3: Met spoelmeer

Locatie 1



RMSE (t.o.v. Delft3D)

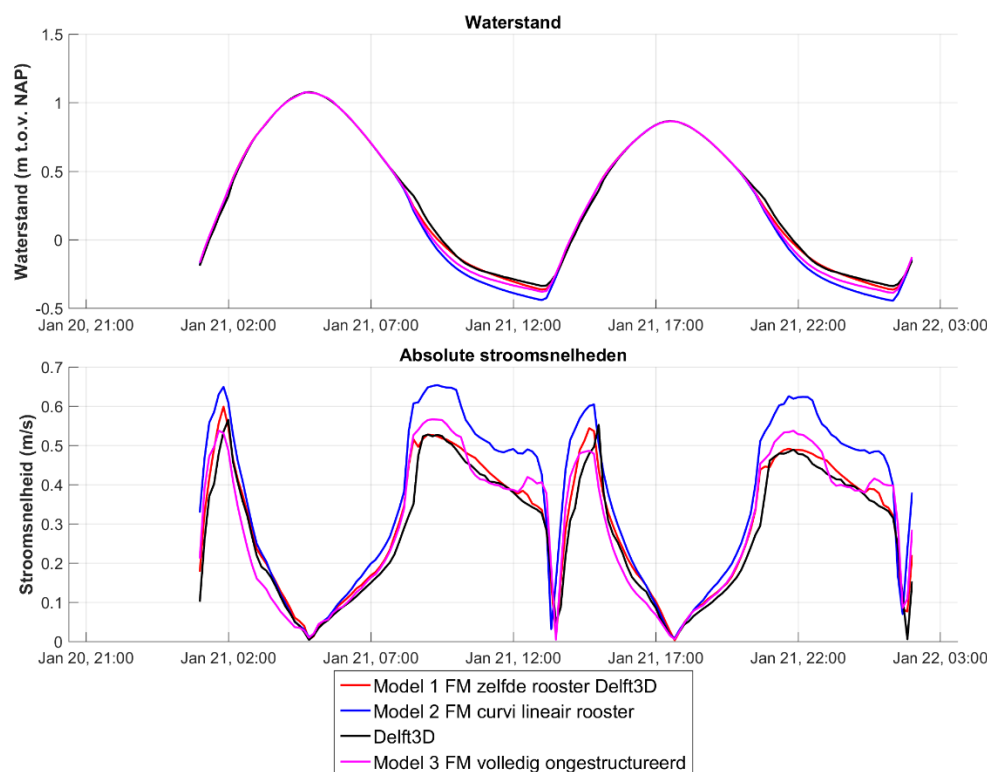
Waterstand

Model 1	0,024
Model 2	0.085
Model 3	0.026

Stroomsnelheid

Model 1	0.019
Model 2	0.069
Model 3	0.031

Locatie 2



RMSE (t.o.v. Delft3D)

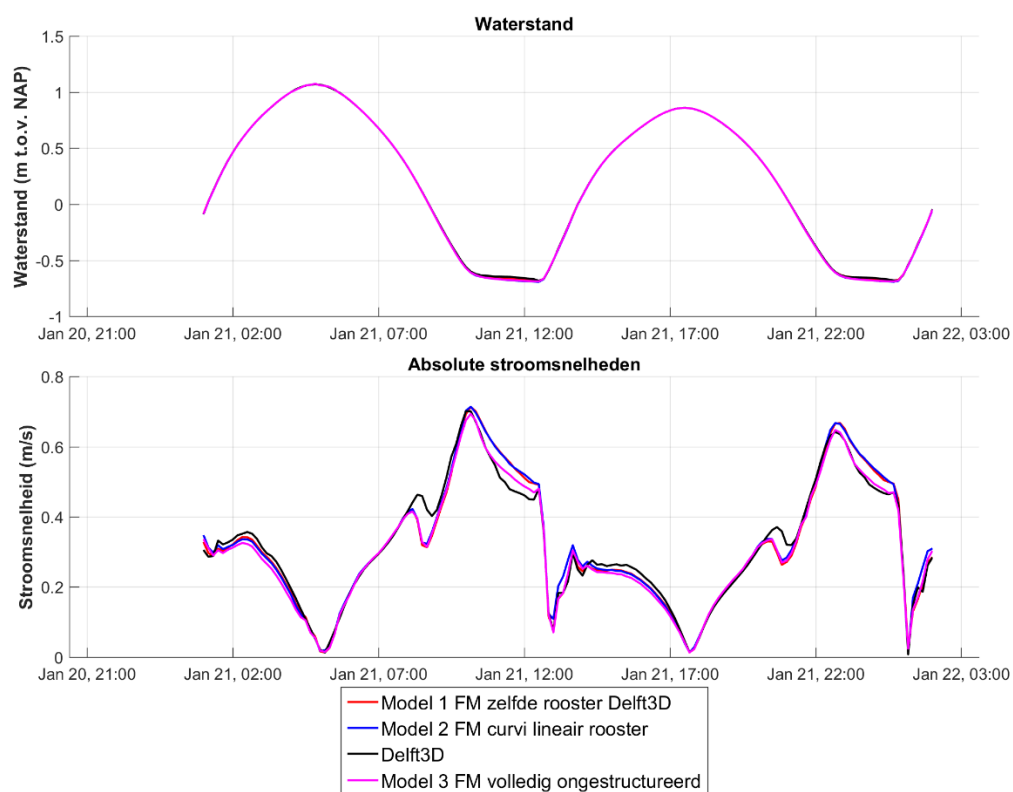
Waterstand

Model 1	0.021
Model 2	0.064
Model 3	0.038

Stroomsnelheid

Model 1	0.037
Model 2	0.11
Model 3	0.053

Locatie 3



RMSE (t.o.v. Delft3D)

Waterstand

Model 1 0.0058

Model 2 0.010

Model 3 0.0096

Stroomsnelheid

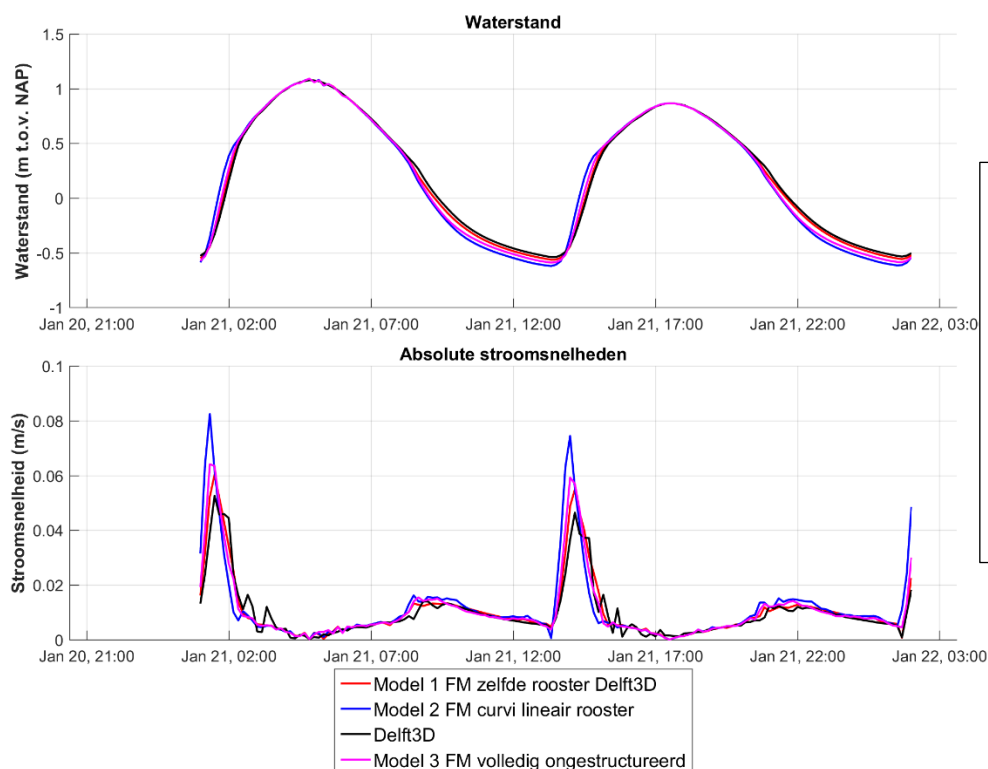
Model 1 0.033

Model 2 0.034

Model 3 0.028

Scenario 4: Zonder spoelmeer

Locatie 1



RMSE (t.o.v. Delft3D)

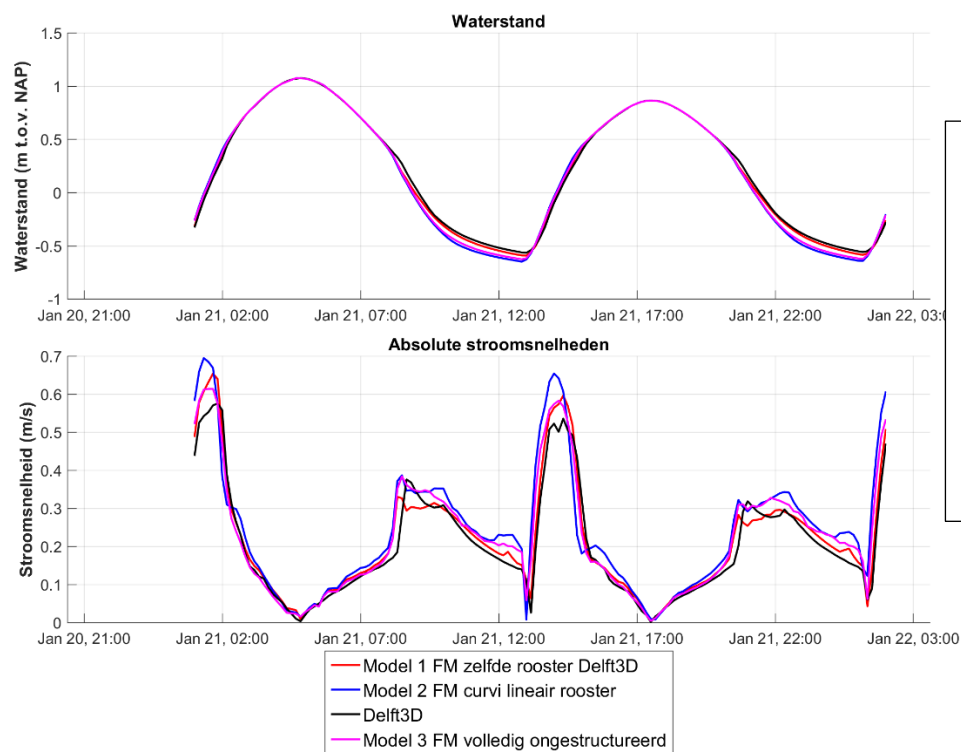
Waterstand

Model 1	0.024
Model 2	0.088
Model 3	0.0047

Stroomsnelheid

Model 1	0.0029
Model 2	0.0082
Model 3	0.031

Locatie 2



RMSE (t.o.v. Delft3D)

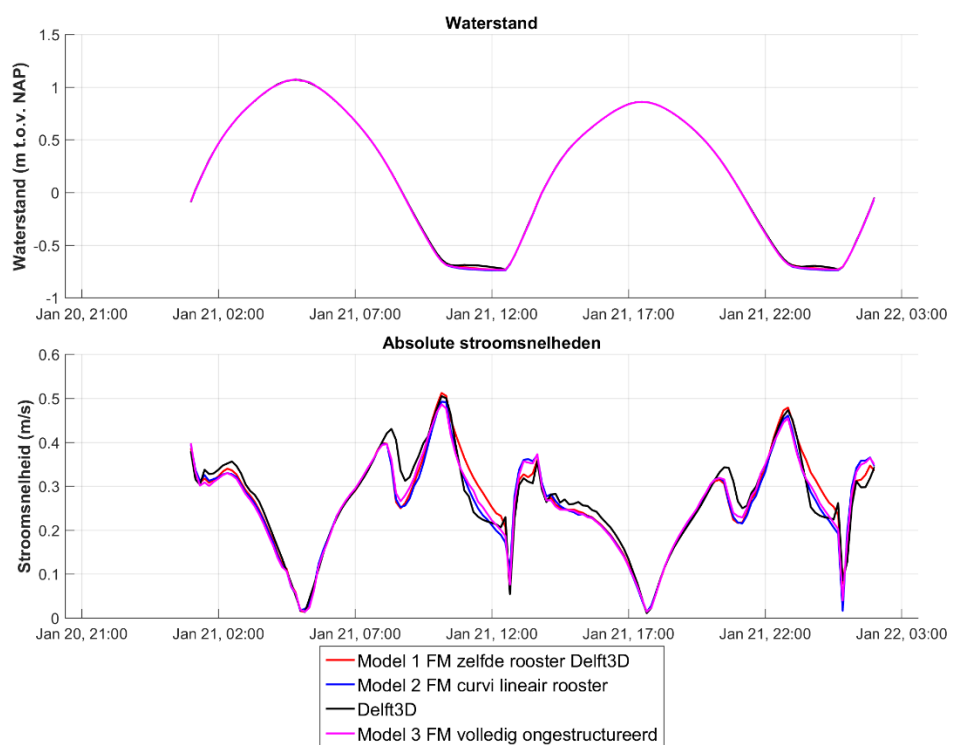
Waterstand

Model 1	0.024
Model 2	0.065
Model 3	0.051

Stroomsnelheid

Model 1	0.032
Model 2	0.074
Model 3	0.046

Locatie 3



RMSE (t.o.v. Delft3D)

Waterstand

Model 1	0.0090
Model 2	0.013
Model 3	0.011

Stroomsnelheid

Model 1	0.032
Model 2	0.030
Model 3	0.027

M: OORZAKEN VAN VERSCHILLEN

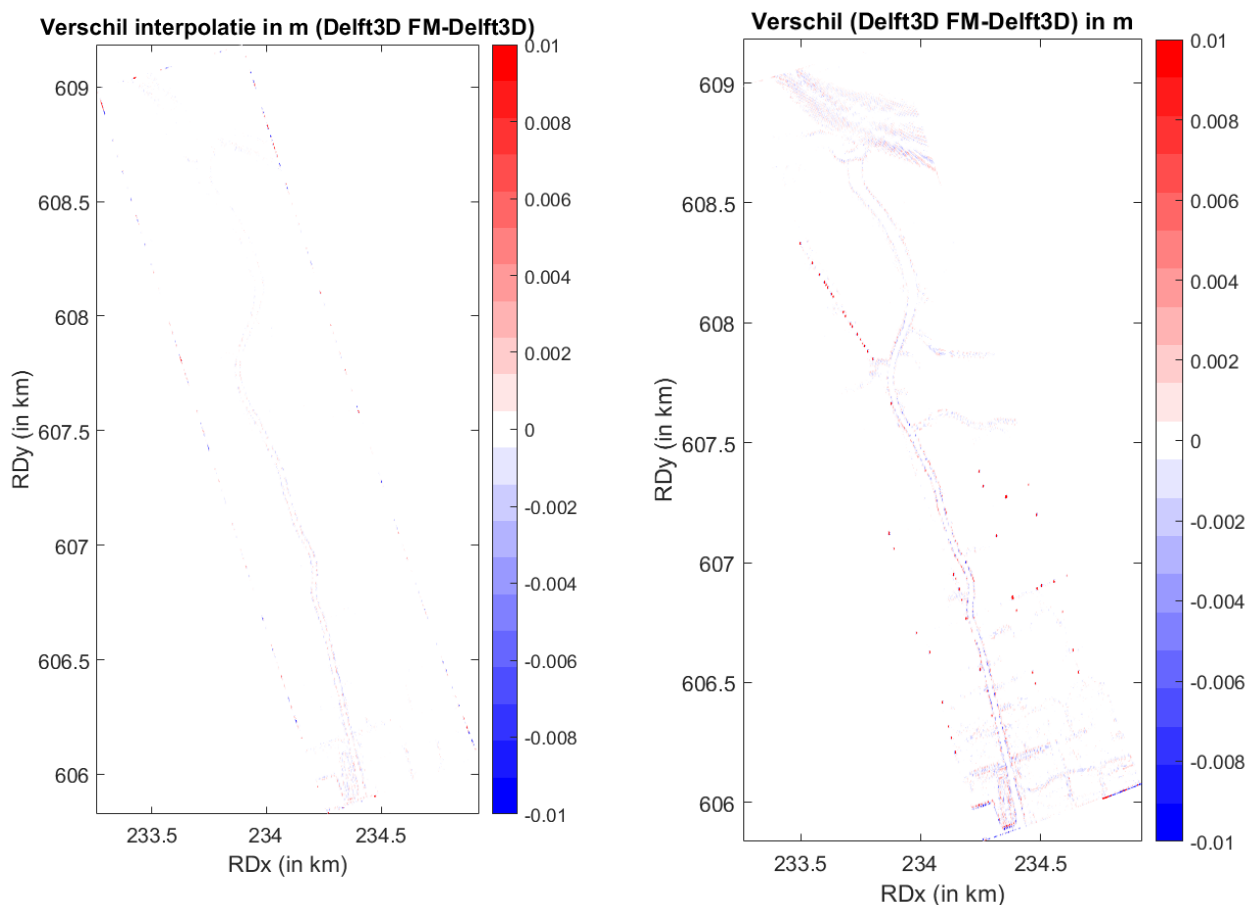
Inhoud:

- 1: Oorzaken model 1
- 2: Oorzaken model 2 (beschrijving hypothesen)
 - 2.1: Aanpassingen aan het ongestructureerde rekenrooster (hypothesen)
 - 2.2: Resultaten van de aanpassingen rekenrooster
 - 2.3: Dwarsdoorsneden van de geul

1: Oorzaken model 1

Als eerste is er gekeken of er een verschil in de interpolatie op het rekenrooster zit in Domeinen D1N en D1Z (zie beschrijving Delft3D model in Hoofdstuk 5.2.2 voor de domeinen). Zoals duidelijk wordt uit de figuur links is dat er nauwelijks verschil in interpolatie zit in het domein (< 1 cm of zoals in de as staat 0.01 m).

De bodeminstelling met Conveyance2D is ook geplot om te achterhalen of er een verschil zit in de meegenomen bodemdata. De figuur rechts laat zien dat er nauwelijks verschil in meegenomen bodem zit tussen Delft3D en Delft3D FM met de instelling van conveyance (< 0.01 meter).



2: Oorzaken model 2

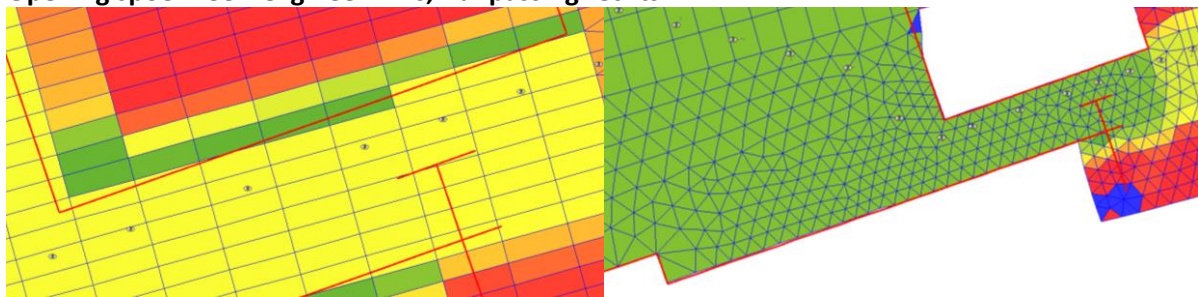
2.1: Aanpassingen aan het ongestructureerde rekenrooster

Hypothese 1 t/m 3 hebben te maken met onzekere locaties in het ongestructureerde rekenrooster. De rekenrooster worden in de hypothesen op deze locaties aangepast om het effect op het resultaat te onderzoeken. De modellen zijn vervolgens opnieuw gerund, in een situatie met spoelmeer om de resultaten te behalen. Er volgt eerst een beschrijving van de aanpassingen, daarna een beschrijving van de resultaten.

Hypothese 1: De verschillen worden veroorzaakt door een afwijking van de breedte bij de opening van het spoelmeer

Zoals te zien in de afbeeldingen hieronder was in de originele situatie de opening van het spoelmeer iets wijder. In de afbeelding wordt de waterdiepte weergegeven. Hieraan is te zien dat er bij de opening van het spoelmeer, ter hoogte van de vernauwing, 1 cel extra wordt meegenomen (breedte opening 8 meter in plaats van 6 in Delft3D). Om te achterhalen of dit de oorzaak was is het rooster alleen ter hoogte van het spoelmeer aangepast. De rest van het rooster, zoals bijvoorbeeld bij het curvi lineaire rooster in de geul is exact hetzelfde gelaten. Zoals te zien in rechter afbeelding komt de opening nu exact overeen met de thin dams en zal er dus geen afwijking meer optreden ten opzichte het Delft3D model.

Opening spoelmeer: Orgineel links, Aanpassing rechts



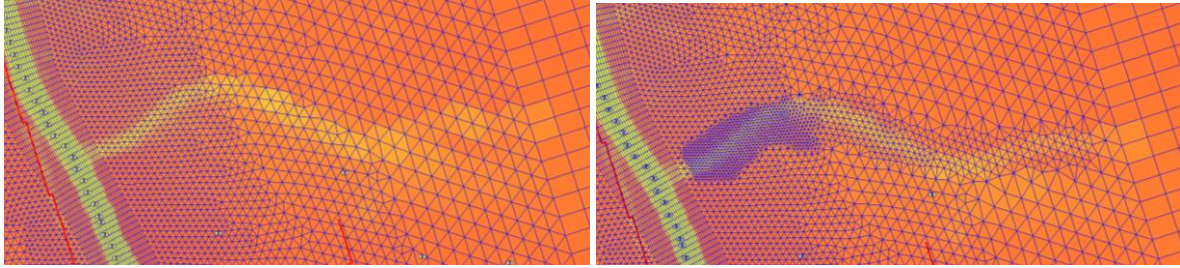
Hypothese 2: Het grovere rekenrooster in de nabije omgeving van de geul zorgt ervoor dat de zijgeulen minder goed worden beschreven

Ter hoogte van de zijgeulen (te zien in figuur) beginnen de waterstanden van model 2 en het Delft3D model af te wijken. Verder is het zo dat het rooster van model 2 vrij grof is ter hoogte van deze geulen wanneer de vergelijking wordt gemaakt met het rooster van Delft3D. Mogelijk is dit een oorzaak van het verschil. Het rooster is met een factor 4 verfijnd ter hoogte van de geulen. Het rooster zonder verfijning van de zijgeulen is te zien in de linker figuur, een voorbeeld van de verfijning van een zijgeul is in de rechter figuur weergegeven.

Zijgeulen

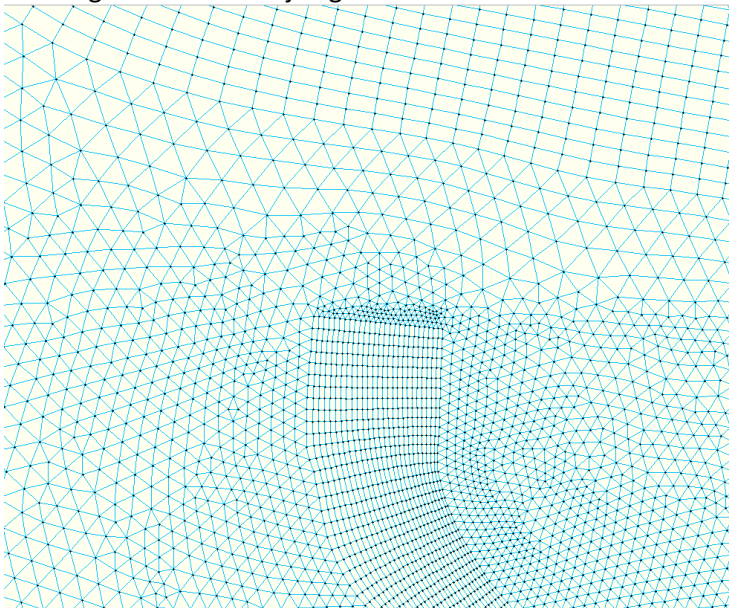


Rooster ter hoogte zijgeulen: Orgineel links, Verfijning rechts



Hypothese 3: De koppeling in het tussen de Geul in de Waddenzee en de kleine geul veroorzaakt het verschil in resultaat

Om uit te sluiten hoeveel effect de manier van koppelen is ook een ander alternatief van bijlage H nog een keer uitgevoerd. De manier van koppelen is weergegeven in onderstaande figuur. In bijlage H is een uitgebreide beschrijving te vinden.

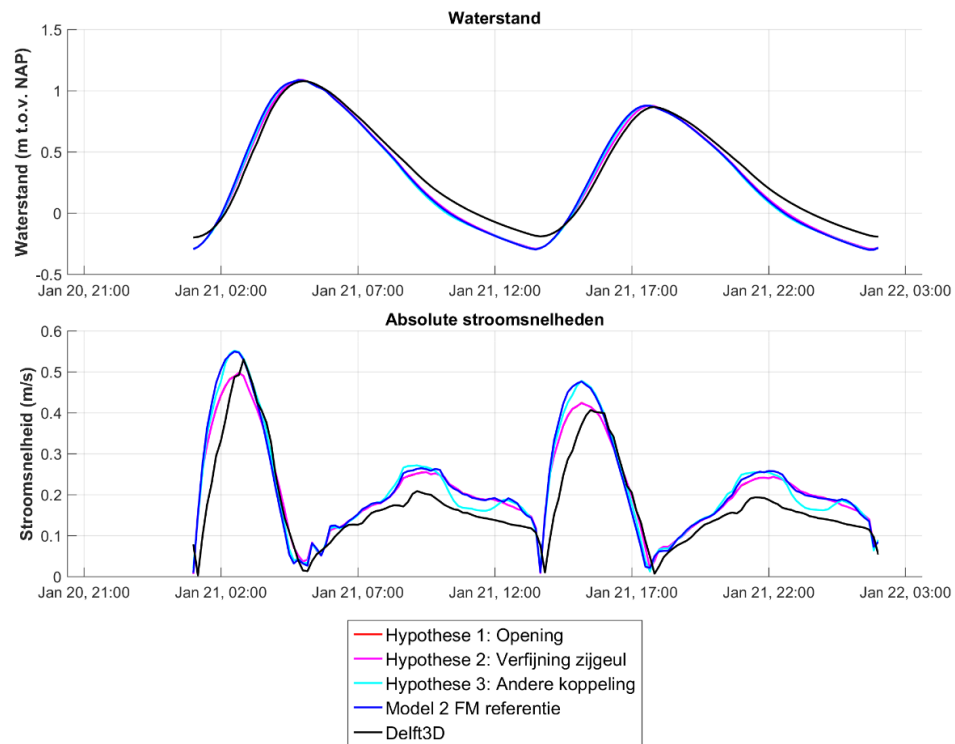


2.2: Resultaten Hypotheses 1 t/m 3 voor model 2

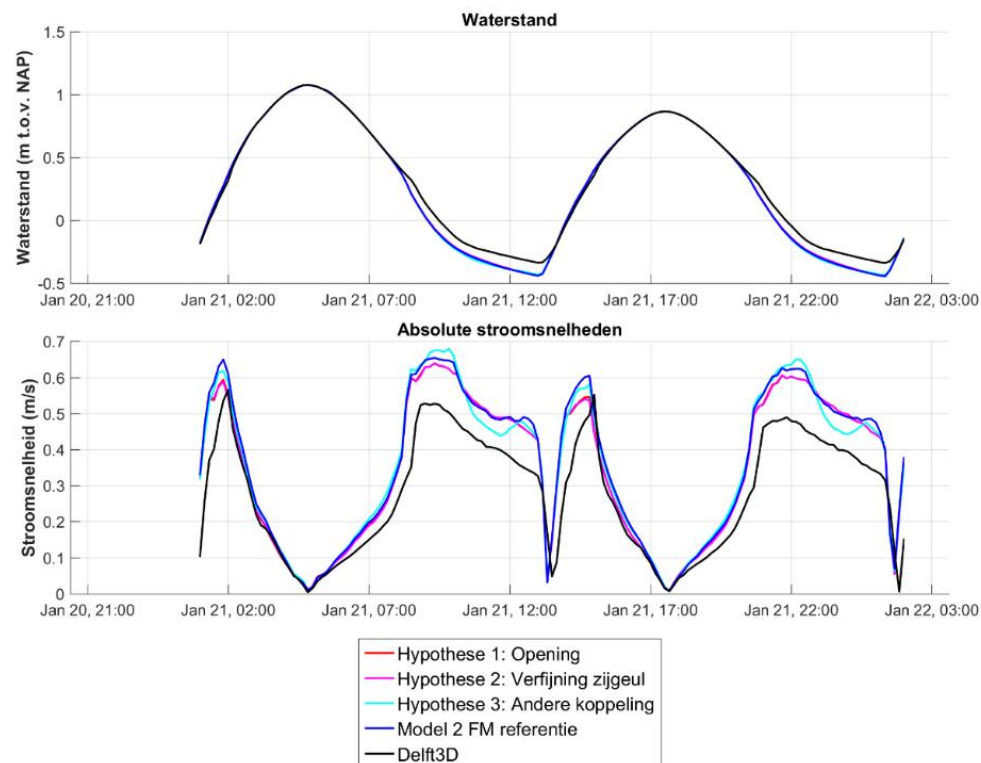
Geen van de hypotheses biedt een aannemelijke oorzaak van de verschillen tussen model 2 en het Delft3D model. De waterstanden zijn in alle aanpassingen niet of nauwelijks veranderd. De stroomsnelheden zijn iets veranderd voor hypothese 1 en hypothese 2 tijdens hoogwater, maar tijdens laagwater is er nauwelijks verschil opgetreden. Hypothese 3 heeft wel een klein effect op de stroomsnelheden tijdens laagwater. De conclusie is dat de drie de hypotheses niet de oorzaak opleveren, en dat ze slechts een klein gedeelte van het verschil in stroomsnelheden en waterstand kunnen verklaren.

De resultaten zijn te vinden in onderstaande figuren.

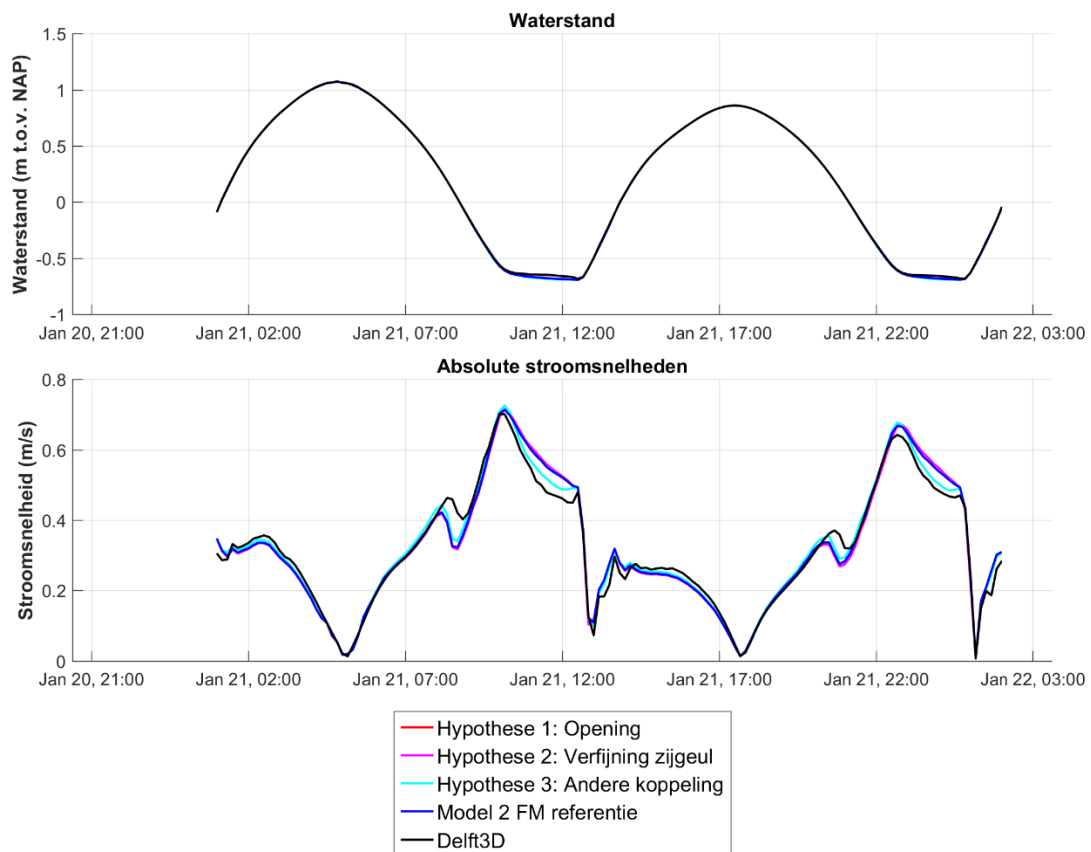
Locatie 1



Locatie 2

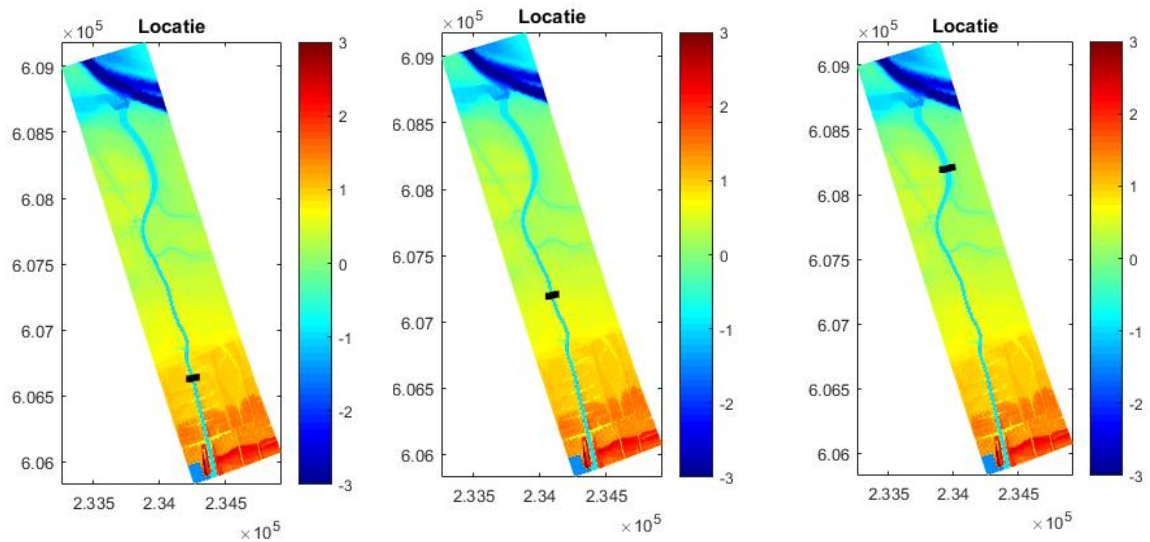


Locatie 3

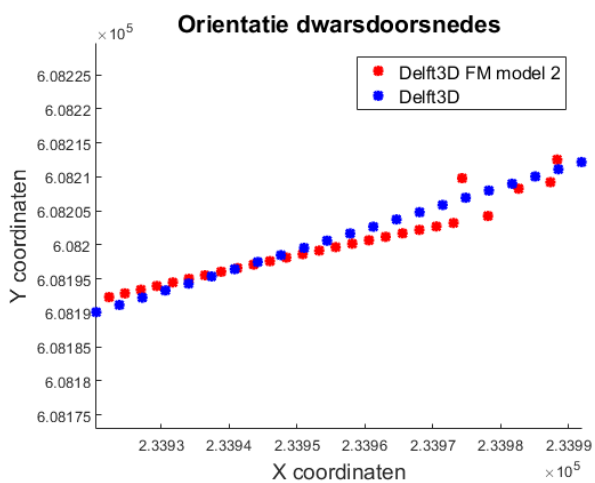
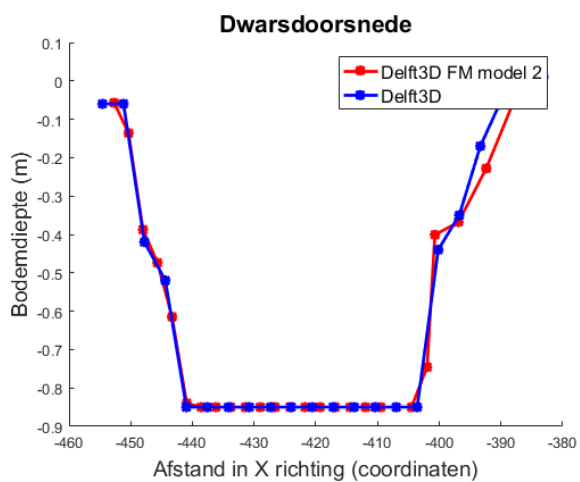
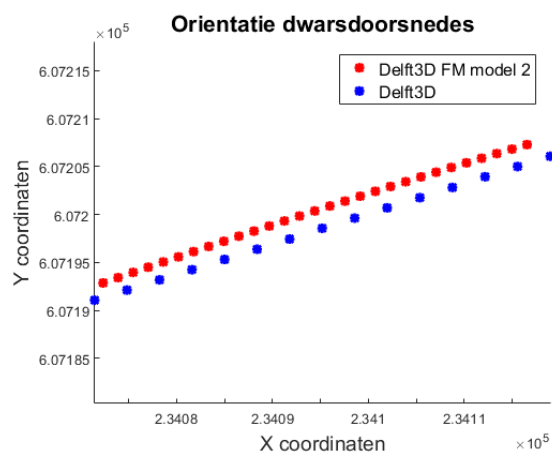
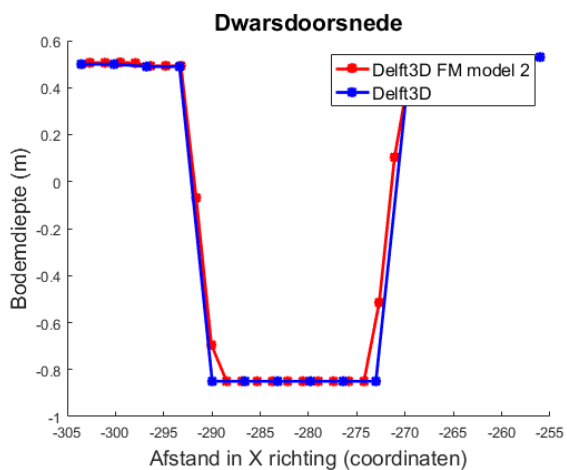
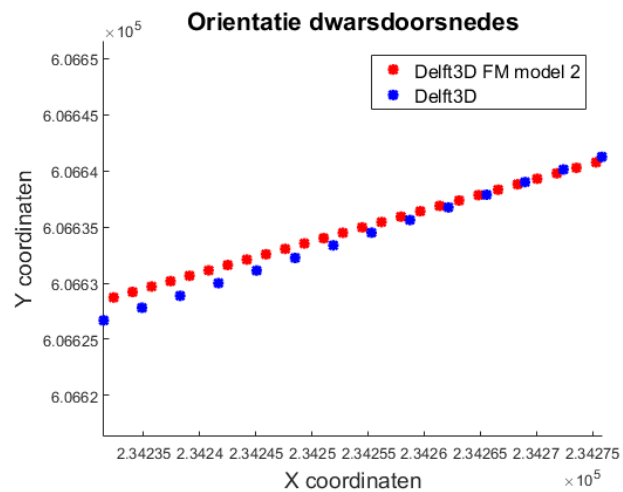
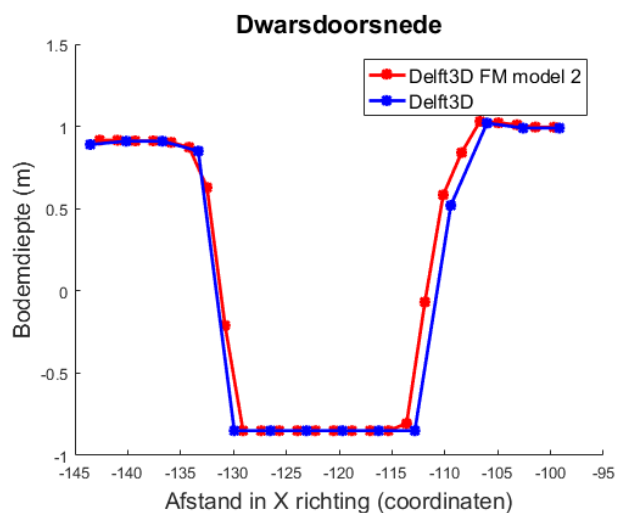


2.3: Hypothese afwijking dwarsdoorsnede

Locaties dwarsdoorsneden (zuid (links) naar noord (rechts))



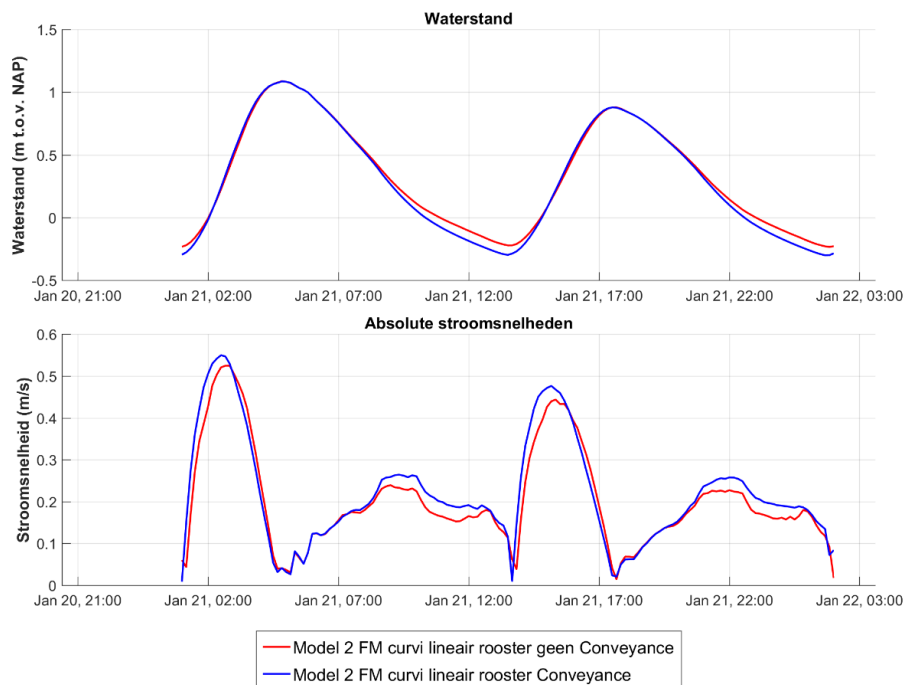
Dwarsdoorsneden (van zuid naar noord)



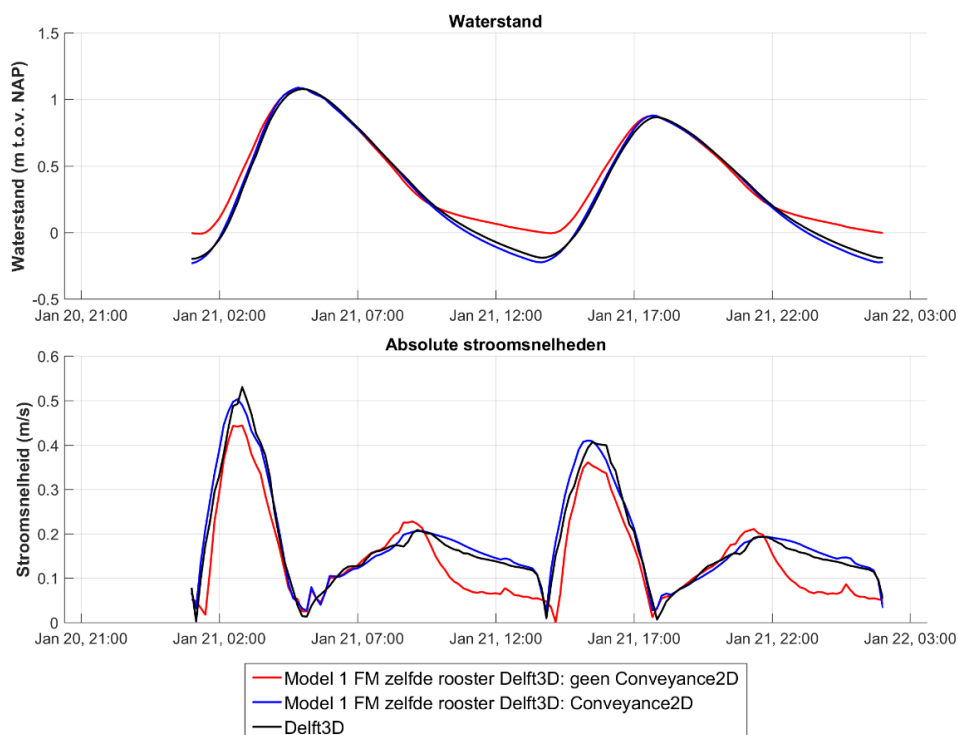
N: ROBUUSTHEID

Het verschil in waterstand en stroomsnelheid in model 2 (fijn curvi lineair rooster) is een stuk kleiner dan wanneer in Model 1 (gelijk rooster als Delft3D) de bodeminstellingen worden gevarieerd.

Model 2: Bodeminstellingen gevoeligheid (kleiner dan in model 1)



Model 1: Grote gevoeligheid bodeminstellingen



O: INTERVIEW

Aanwezig:

- Luitze Perk (Adviseur Kustprojecten)
- Kimberley Koudstaal (Junior specialist Kust & Zee)

Toepasbaarheid

Kijkend naar de verschillen die zijn uitgelicht in hoofdstuk 6 op basis van toepasbaarheid, welke voordelen verwacht u? En welke nadelen?

In het algemeen vind ik het belangrijkste verschil de flexibiliteit die Delft3D FM biedt. Een voorbeeld van de flexibiliteit is bijvoorbeeld het ontbreken van indices. In Delft3D moeten de indices van het rooster altijd precies matchen. Een voorbeeld is het splitsen van een geul in twee aftakkingen. Wanneer de geulen weer bij elkaar komen moeten de indices van de rijen en kolommen precies overeenkomen en dit komt vaak neer op tellen. In Delft3D FM ontbreken de indices waardoor dit geen probleem meer oplevert en dat is dus een stuk flexibeler.

Verder kan het verschillen van de bodeminstellingen tussen Delft3D en Delft3D FM wellicht als nadeel gezien worden. De problemen die er nu waren met de bodeminstellingen hebben denk ik voor een groot gedeelte met de toepassing te maken en omdat er een vergelijking werd gemaakt tussen Delft3D en Delft3D FM. Wanneer Delft3D FM losstaand in een andere toepassing wordt gebruikt verwacht ik geen problemen te ondervinden.

Accuraatheid:

Model 2 (curvilineaire rooster) heeft hogere snelheden en lagere waterstanden. Valt dit binnen uw verwachtingen (bijvoorbeeld op basis van analytisch model) of ziet u het als onregelmatigheid.

Het analytische model dat is opgesteld voor de haven van Noordpolderzijl gaf iets hogere snelheden en lagere waterstanden aan. Omdat het curvi lineaire rooster niet meer het hoekige karakter van het Delft3D model is een verschil in resultaat niet onverwachts. Gecombineerd met het analytisch model is een lagere waterstand en hogere stroomsnelheid dan ook niet onverwachts. Verder is het moeilijk om iets te zeggen over het resultaat van model 2, het is dus ook niet te zeggen of model 2 een beter resultaat geeft.

Denkt u dat het fijne rooster in de geul van model 2 ook mogelijk zou zijn om te maken in Delft3D?

- **Zo ja, in de categorie toepasbaarheid welke verschillen verwacht u?**
- **Vergelijkbare resultaten met een Delft3D model?**

Met Delft3D zou een vergelijkbaar curvi lineair rooster voor de geul opstellen ook mogelijk zijn. Op basis van wat jij nu gepresenteerd hebt over Delft3D FM verwacht ik dat het meer tijd zou kosten om dit rooster op stellen in Delft3D. Met name de flexibiliteit die Delft3D FM biedt, helpt om het rooster gemakkelijk op te zetten. Het is moeilijk om te zeggen of het vergelijkbare resultaten oplevert.

Rekentijd:

Als u kijkt naar de verschillen die te maken hebben met de rekentijd, wat vindt u het voordeligst en wat vindt u het nadeligst?

Ik vind het wel een nadeel dat rondom verfijningen van het rooster al snel een limitering van de tijdstap op treedt. Verder is het moeilijk om wat te zeggen over de reketijden.

Afsluitend

Als u kijkt naar het overzicht van de verschillen in toepasbaarheid accuraatheid en rekentijd

- **Welke verschillen vindt u het positiefst en waarom?**

De flexibiliteit die Delft3D FM biedt voor het opstellen van het rekenrooster vind ik het positiefst omdat dit een grote verbetering is ten opzichte van Delft3D. Bijvoorbeeld de mogelijkheid van het maken van verfijningen in het rooster zonder gebruik van Domein Decompositie is een voordeel van Delft3D FM.

- **Welke verschillen vindt u negatiefst en waarom?**

De limitering van de tijdstap in de buurt van verfijningen. De tijdstap lijkt vrij snel gelimiteerd te worden.

Zou u het gebruik van Delft3D FM overwegen en waarom?

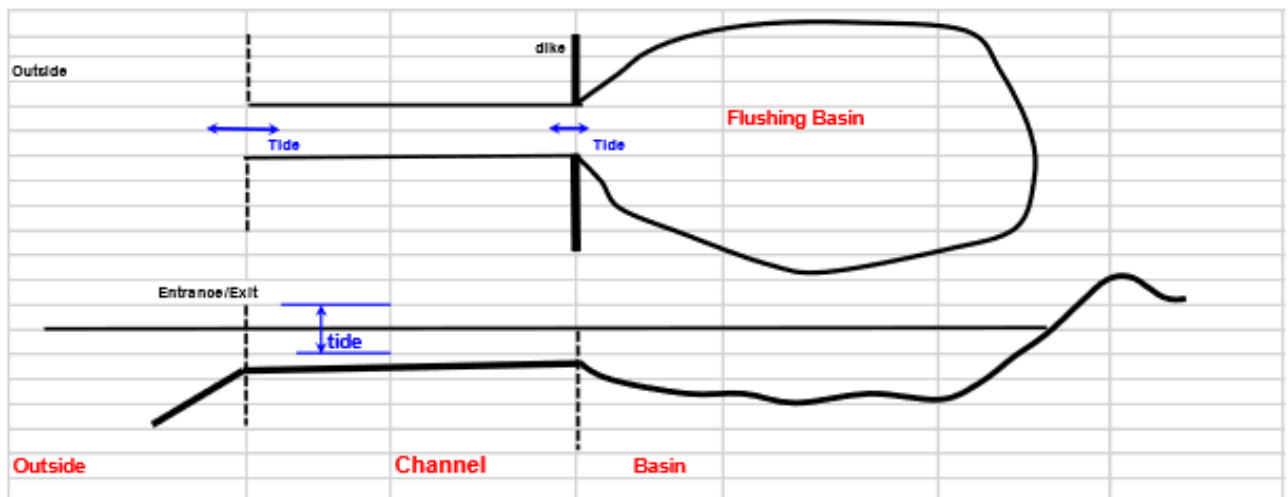
Ja ik zou het gebruik van FM overwegen met name om het gebruiksgemak, het opstellen van een model gaat een stuk makkelijker.

P: ANALYTISCH MODEL: FLUSHIN BASIN

Inhoud:

- 1: Beschrijving analytisch model
- 2: Beschrijving resultaten analytisch model

1: Beschrijving analytisch model uit Rapport Noordpolderzijl van WaterProof (met toestemming overgenomen):



De onderliggende aannamen zijn:

- Sinusvormig getij;
- Getijslag is constant in de komende 50 jaar;
- Geen waterstandsveranderingen door op- en afwaaiing;
- Geen zeespiegelstijging;
- Waterstand op zeerand wordt niet beïnvloed door het getijbekken;
- Overlaatformules voor subkritische stroming ($Froude < 1$);
- Chézy-formule voor het geulverhang.

De invoerparameters zijn:

- Getijamplitude en getijperiode;
- Gemiddeld zeeniveau boven NAP;
- Oppervlakte van het spoelbekken;
- Breedte van doorlaatwerk;
- Breedte van getijgeul;
- Lengte van getijgeul;
- Diepte van getijgeul ten opzichte van NAP;
- Diepte van doorlaatdrempel ten opzichte van NAP;
- Bodemruwheid;
- Afvoercoëfficiënt.

2: Resultaat Delft3D vergeleken met analytisch model (Samengevat en geïnterpreteerd)

De resultaten van het analytisch model en het Delft3D model zijn te vinden in de onderstaande tabel. Dit is op een locatie vlakbij de opening van het spoelmeer. Tijdens hoogwater komen zowel de stroomsnelheden als de waterstand overeen. Tijdens laagwater is de waterstand van het Analytisch model lager en de stroomsnelheid hoger.

Resultaten Delft3D en Delft3D FM vergeleken bij het spoelmeer

	Max. waterstand (m NAP)	Min. waterstand (m NAP)	Max stroomsnelheid vloed (m/s)	Max Stroomsnelheid eb (m/s)
Delft3D	1,1	-0,2	0,65	0,3
Analytisch	1,1	-0,5	0,65	0,5

Zowel Delft3D als het analytisch model hebben wat nadelen. Het analytisch model neemt niet alle processen mee, het numeriek model is dus completer. Echter is het Delft3D model de representatie van de geul in het Delft3D model vrij grof en hoekig. Het bedrijf "WaterProof" concludeerde op basis van de resultaten het volgende: Het Delft3D model is completer, maar door het vrij grove rooster zijn de stroomsnelheden lager dan de verwachting tijdens eb. Het analytisch model geeft door de aannames en het weglaten van processen een te hoge snelheid weer tijdens eb.

Delft3D FM (Model 2) vergeleken met het analytisch model

Delft3D FM model 2 met het curvi lineaire rooster laat lagere waterstanden zien dan Delft3D. Er zit ongeveer 10 cm verschil in waterstand tussen Delft3D en Delft3D FM tijdens laagwater. Verder is de piek van de stroomsnelheid tijdens laagwater iets hoger in Delft3D FM. Dit gaat dus meer richting het analytisch model dat is opgesteld. Het resultaat van Delft3D FM valt dus binnen de verwachting van waterproof die hiervoor genoemd is.