

Evaluatie Bochtafsnijding Vaarweg Ameland



Evaluatie Bochtafsnijding Vaarweg Ameland

Auteur(s)

Bart Grasmeyer

Roy van Weerdenburg

Evaluatie Bochtafsnijding Vaarweg Ameland





Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer H. Mulder (WVL); de heer E. Lofvers (NN)
Referenties	
Trefwoorden	Waddenzee, Vaarweg Holwerd – Ameland, Vaargeulonderhoud, Bochtafsnijding, Baggerwerkzaamheden, Slibdynamiek, Slibmodellering, Delft3D-FM WQ

Documentgegevens

Versie	1.1
Datum	04-12-2020
Projectnummer	11205229-006
Document ID	11205229-006-ZKS-0002
Pagina's	77
Status	definitief

Auteur(s)

	Bart Grasmeijer	
	Roy van Weerdenburg	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.1	Bart Grasmeijer 	Peter Herman 	Toon Segeren 	
	Roy van Weerdenburg 			

Samenvatting

In het voorjaar van 2019 is een bochtafsnijding in de vaargeul tussen Holwerd en Ameland uitgevoerd om vertragingen op de vaarroute te verminderen. Deze ingreep speelde in op de natuurlijke tendens tot bochtafsnijding via een vloedschaar. Voorafgaand aan de ingreep is m.b.v. een model onderzoek gedaan naar de gevolgen voor de morfologie en de baggerhoeveelheden. Dit rapport bevat een evaluatie van de effecten van de bochtafsnijding met behulp van modelberekeningen en een vergelijking met metingen. De doelstelling is het vergroten van de morfologische kennis en het verbeteren van de modellen t.b.v. de beheervragen over de Vaarweg Ameland.

Met behulp van velddata die is ingewonnen door WaterProof en Rijkswaterstaat CIV is een bestaand numeriek Delft3D-FM WQ model geoptimaliseerd om de waterbeweging en de slibdynamiek rond de vaargeul tussen Holwerd en Ameland te reproduceren. Met het model zijn vervolgens simulaties gedaan voor de situatie voor de bochtafsnijding en voor de situatie na de bochtafsnijding. De bochtafsnijding is in het model opgenomen door middel van een andere bodemligging. De bodemligging is bepaald op basis van de gemeten bodemhoogtes in september 2018 (d.w.z. voor aanvang van de werkzaamheden) en augustus 2019 (d.w.z. na oplevering van de bochtafsnijding).

Uit de berekeningen blijkt dat door aanleg van de bochtafsnijding de snelheden en debieten in de ebgeul afnemen en in de bochtafsnijding toenemen. Ten oosten van de bochtafsnijding leidt de ingreep tot iets hogere pieksnelheden bij eb in de vaargeul bij Holwerd. De verdeling van de debieten en de stroomsnelheden in de vaargeul komt goed overeen met eerdere voorspellingen en met recente metingen. Volgens de berekeningen zorgt de bochtafsnijding voor iets minder netto aanslibbing in de eerste drie kilometer van de vaargeul bij Holwerd.

Met de hier toegepaste modelinstellingen kan de gemeten waterbeweging en slibdynamiek in de smalle geul redelijk goed gereproduceerd worden maar er is ruimte voor verbetering. Aanbevelingen worden gedaan voor modelverbetering met behulp van beschikbare metingen. De taluds van de vaargeul kunnen bijvoorbeeld worden meegenomen in de bepaling van de aanslibbing, het baggeren en storten kan in de simulaties worden meegenomen en de uitwisseling tussen de twee bodemlagen kan worden geoptimaliseerd.

Inhoud

	Samenvatting	4
	Begrippenlijst	7
1	Introductie	8
1.1	Inleiding	8
1.2	Achtergrond	9
1.2.1	Morfologische ontwikkeling	9
1.2.2	Onderhoudsbaggerwerk	10
1.3	Aanpak	12
1.4	Leeswijzer	12
2	Modelopzet en validatie	14
2.1	Basismodel Waddenzee	14
2.1.1	Modeldomein	14
2.1.2	Waterbewegingsmodel	15
2.1.3	Slibmodel	16
2.2	Aanpassingen modelschematisatie	17
2.2.1	Roosterverfijning	17
2.2.2	Bathymetrie	18
2.2.2.1	Bodemdata	18
2.2.2.2	Interpolatie van bodemdata	20
2.3	Validatie hydrodynamica	23
2.3.1	Reproductie waterstanden bij Holwerd	24
2.3.2	Reproductie waterstanden meetcampagne	25
2.3.3	Reproductie stroomsnelheden meetcampagne	27
2.3.4	Reproductie debietmetingen meetcampagne	28
2.4	Simulatieperiode en initiële condities	29
3	Hydrodynamische effecten bochtafsnijding	32
3.1	Invloed bochtafsnijding op waterstanden	32
3.2	Invloed bochtafsnijding op debieten	33
3.3	Invloed bochtafsnijding op stroomsnelheden	35
4	Effecten bochtafsnijding op slibdynamiek en baggeronderhoud	40
4.1	Effecten op aanslibbing en erosie	40
4.1.1	Aanslibbing en erosie zonder bochtafsnijding	40
4.1.2	Aanslibbing en erosie met bochtafsnijding	40
4.2	Aanslibbing in de vaargeul zonder baggeronderhoud	43
4.3	Gevoeligheid roosterresolutie op aanslibbing en erosie	46
5	Discussie en aanbevelingen	49

5.1	Resolutie en bodemdata	49
5.2	Onderhoudsbaggerwerk en slibconcentraties	49
5.3	Aanbevelingen	51
6	Conclusies	52
7	Referenties	53
A	Bijlagen	54
A.1	Bijlage 1: Vaklodingen vaarweg Ameland 1971, 1975, 1981, 2005, 2011 and 2017	54
A.2	Bijlage 2: Beheerlodingen Februari 2019, Juni 2019, Augustus2019, November 2019 en Februari 2020	57
A.3	Bijlage 3: Validatie raaidebieten T1 meetcampagne	60
A.4	Bijlage 4: Tijdseries raaidebieten	61
A.5	Bijlage 5: Tijdseries stroomsnelheden in de vaargeul	64
A.6	Bijlage 6: Tijdseries sedimentatie en erosie in de vaargeul	73
A.6.1	Netto massaverandering van de bufferlaag in de vaargeul	73
A.6.2	Sedimentatie en erosie in de vaargeul bij Nes	75
A.7	Bijlage 7: Baggervolumes vaarweg Ameland per maand vanaf 2018	76

Begrippenlijst

In onderstaande tabel worden de definities van een aantal begrippen die veel voorkomen bij de modellering van slib toegelicht.

Term	Parameter	Definitie
Depositie-efficiëntie [-]	depeff	Fractie van de bruto depositieflux van de waterkolom naar de bodem die in de bodemlagen terecht komt.
Slibfractie in de waterkolom	IM1	<i>Inorganic Matter</i> ; Eerste slibfractie in het buffermodel
Slibfractie in de waterkolom	IM2	<i>Inorganic Matter</i> ; Tweede slibfractie in het buffermodel
Intra-getijvariatie		Variatie die terug te zien is op een tijdschaal van een getijperiode
Manningscoëfficiënt [s/m ^{1/3}]		Veelgebruikte kwantificering voor de ruwheid van de bodem
Flufflaag		Zie Bodemlaag S1. Kan in havens en vaargeulen zich manifesteren als 'fluffy' materiaal.
Bufferlaag		Zie Bodemlaag S2.
Bodemlaag S1	S1	Gemakkelijk erodeerbare bodemlaag van het zgn. tweelagen of buffermodel; heeft in het model alleen massa en geen dikte en ligt op de onderlaag S2.
Bodemlaag S2	S2	Bufferlaag van het buffermodel. Bestaat uit een zandige matrix waarin slib wordt gebufferd of geconsolideerd slib met hogere erosieweerstand.
SPM		<i>Suspended Particulate Matter</i> ; deeltjes die in de waterkolom zitten. Ook wel aangeduid met zwevende stof in de waterkolom
SSC		<i>Suspended Sediment Concentration</i> ; sediment dat in de waterkolom zit. Omdat in dit rapport alleen slib wordt gemodelleerd, is dat sediment slib. Ook wel aangeduid slib- of sedimentconcentratie in de waterkolom.
Residuele stroming		Netto stroming [m/s] over een bepaalde periode
Residueel transport		Netto transport [m ³ /s] over een bepaalde periode
Restdebiet		Netto debiet [m ³ /s] over een bepaalde periode
Strijklengte		De ononderbroken afstand waarover de wind over het water kan waaien tot hij een zeker punt bereikt. Deze lengte is bepalend voor de hoogte van golven.
Bodemschuifspanning door stroming [Pa]	τ_{flow}	Bodemschuifspanning ten gevolge van stroming
Bodemschuifspanning door golven [Pa]	τ_{wave}	Bodemschuifspanning ten gevolge van golven
Valsnelheid	w_s	Snelheid waarmee deeltjes in stilstaand water door de waterkolom naar de bodem zakken
Verblijftijd in de bodem		Gemiddelde duur dat slib in de bodem verblijft

1 Introductie

1.1 Inleiding

Rijkswaterstaat is 2016 gestart met een programma voor de ontwikkeling van kennis over de morfologie van de Nederlandse Waddenzee en voor het inbedden hiervan in beleid en beheer. In het programma wordt morfologische kennis op een structurele manier verzameld, geanalyseerd, geordend en geborgd. Daarnaast wordt de kennis toegankelijk gemaakt voor beleids- en beheervraagstukken op het gebied van veiligheid, bereikbaarheid, natuur en overige gebruiksfuncties. Hiertoe wordt afstemming gezocht met beleidsmakers, beheerders, adviseurs, wetenschappers en gebruikers van het wad. In het kader van het programma worden ter bevordering van de onderlinge uitwisseling en borging van de morfologische kennis ook onderzoeksopdrachten uitgevoerd vanuit een specifiek project. Het voorliggende rapport wordt uitgebracht als onderdeel het deelproject Evaluatie bochtafsnijding en vergroten systeemkennis Vaarweg Ameland.

Het doel van deze studie is de morfologische kennis over de vaarweg tussen Holwerd en Ameland en het omringende kombergingsgebied te actualiseren en te vergroten. In de uitvoering van dit project is de ruimere doelstelling opgesplitst in twee delen:

- A. Evaluatie van de bochtafsnijding in de vaargeul tussen Holwerd en Ameland door metingen en een verbeterslag van het numerieke modelinstrumentarium.
- B. Het verder vergroten van kennis van het ruimere hydro-morfologische systeem rondom de vaargeul tussen Holwerd en Ameland.

Het actualiseren en vergroten van de morfologische kennis is nodig om actuele beheervragen te beantwoorden, zoals:

- Zijn de ontwikkelingen rond de bochtafsnijding zoals op basis van eerdere studies werd verwacht?
- Leidt de ingreep tot minder baggerinspanning in de vaargeul en minder vertroebeling in het kombergingsgebied?
- Hoe kan het baggerbeheer in de komende jaren geoptimaliseerd worden?
- Welke morfologische ontwikkelingen kunnen op een tijdschaal van ~10 jaar verwacht worden?

Om deze vragen te beantwoorden is een recent ontwikkeld numeriek model voor dit gebied verder verbeterd met behulp van in 2019 uitgevoerde metingen. Met dat model worden modelberekeningen met en zonder de bochtafsnijding gemaakt en de uitkomsten worden vergeleken met eerdere studies.

Deze exercitie biedt de mogelijkheid om de metingen meer generiek toe te passen. In het model kunnen we namelijk de omstandigheden gelijk houden en alleen de instellingen aanpassen zodat we processen kunnen ontrafelen. Omdat we de omstandigheden gelijk houden kiezen we voor één meetperiode. In paragrafen 2.3 en 5.2 worden de uitkomsten van de simulaties vergeleken met de recent uitgevoerde metingen.

De vragen achter de eerste drie van bovenstaande bullits beantwoorden we in dit rapport en het vervolg op dit rapport in 2021. De vraag achter de vierde bullit kan worden beantwoord na een zorgvuldige morfologische analyse in combinatie met de resultaten van de in dit rapport getoonde simulaties. De morfologische analyse maakt geen onderdeel uit van deze studie.

1.2 Achtergrond

De veerverbinding Holwerd-Ameland kampt al lang met regelmatig optredende vertragingen en een sterke toename van het baggerbezwaar in de vaargeul (Herman et al., 2016; Villars et al., 2016). Figuur 1.1 toont de veerverbinding. In het meest oostelijke deel van de vaargeul (het deel bij Holwerd) wordt hoofdzakelijk slib gebaggerd. Verderop in de vaarroute wordt met enige regelmaat zand gebaggerd om het hele vaartraject op diepte te houden.

1.2.1 Morfologische ontwikkeling

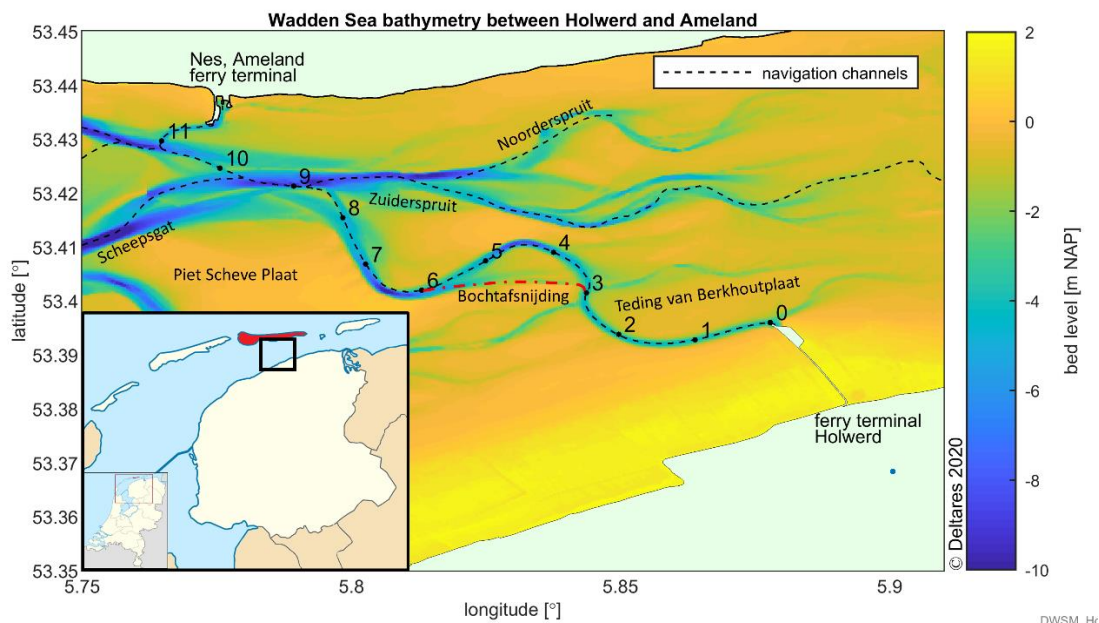
Op de schaal van de gehele Waddenzee is het gebied ten zuiden van Ameland al decennia een depositiegebied (Herman, et al., 2016). De platen en kwelders zijn sneller in hoogte gestegen dan de zeespiegel. Dit heeft geleid tot een afname van het getijvolume door de geulen. Het natuurlijke proces is dan dat de geulen in dwarsoppervlak zullen afnemen, omdat de evenwichtsoppervlakte van de geuldoorsnede een functie is van het getijvolume (hoe meer water per getij door de geul stroomt, hoe groter het doorstroomoppervlak van de geul zal zijn). De reactie van geulen op een afname van het getijvolume is relatief traag, zodat kan worden verwacht dat de geulen in onevenwicht zijn met het huidige getijvolume en daardoor de neiging zullen hebben aan te zanden / slibben.

Rond het zuidelijke deel van de vaargeul heeft een aantal lokale morfologische processen bijgedragen aan omstandigheden die sedimentatie in de geul bevorderen:

1. Verhoging van het kombergingsgebied van de vaargeul is de belangrijkste reden van de afname van het getijprisma door het zuidelijke deel van de vaargeul.
2. De verhoging van de Teding van Berkhoutplaat leidt tot verzwakking van de vloed-eb circulatie door het geulenstelsel Dantziggat – Vaargeul. Dit leidt tot een toename van het getijvolume door het Dantziggat en afname in de vaargeul.
3. De hierboven genoemde blokkering van de vloed-eb circulatie en het verdwijnen van de vloed-schaar ten westen van de Teding van Berkhoutplaat hebben samen tot gevolg dat het zuidelijke deel van de vaargeul minder eb-dominant (c.q. meer vloed-dominant) wordt. Deze getijasymmetrie bevordert het transport van sediment naar de geul.

De vaarroute is de afgelopen tientallen jaren steeds bochtiger geworden (zie bijlage A.1). Tussen km 3 en km 6 langs het vaargeultraject bevindt zich een eb-vloedschaar (Figuur 1.1). Dit is een veel voorkomend morfologisch element, bestaande uit twee min of meer evenwijdige geulen, de ebgeul en de vloedgeul. In de ebgeul is de snelheid gemiddeld over een getijperiode in ebrichting, terwijl de gemiddelde snelheid in de vloedgeul in vloedrichting is. Over de getijperiode geïntegreerd, is in een ebgeul het watervolume in ebrichting dan dus groter dan in een vloedgeul. Een vloedgeul eindigt meestal op een drempel in de bodem (dit zijn de gebieden waar zand gebaggerd wordt als er een vaargeul is).

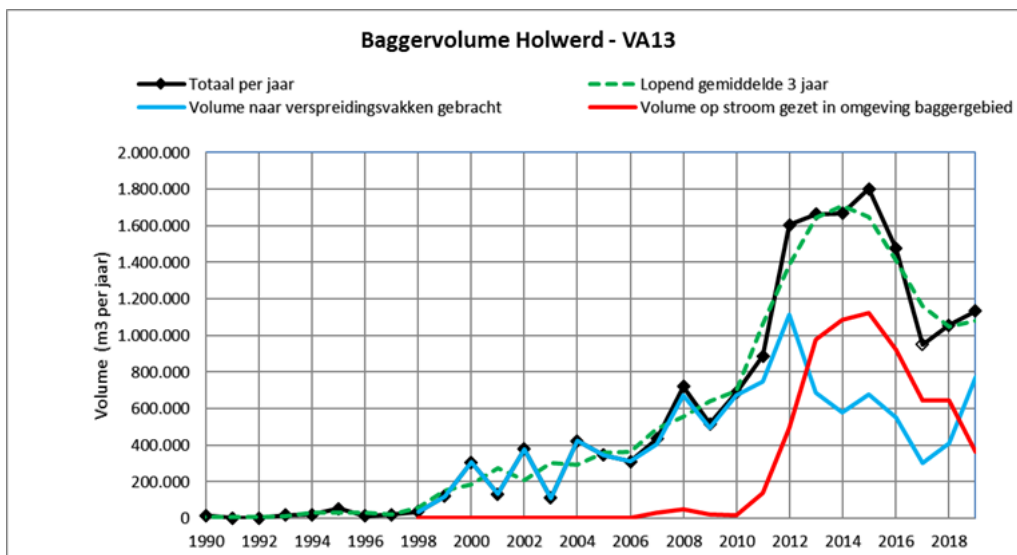
De natuurlijke evolutie van een eb-vloedschaar wordt gekenmerkt door het uitbochten van de ebgeul. Terwijl de ebgeul een steeds grotere bocht ontwikkelt, neemt haar capaciteit om water af te voeren normaliter af. Die rol wordt dan meer en meer overgenomen door de vloedgeul. Uiteindelijk verliest de ebgeul haar functie geheel, en ontstaat er een nieuwe eb-vloedschaar. De oude vloedgeul wordt de nieuwe ebgeul, en er wordt een nieuwe vloedgeul gevormd. Dit is een cyclisch proces met een periode van meerdere decennia.



Figuur 1.1 Kaart met daarop aangegeven de vaarroute tussen Holwerd (Friesland) en Nes (Ameland) en de bochtafsnijding die in 2019 is gerealiseerd.

1.2.2 Onderhoudsbaggerwerk

Hoewel al geruime tijd middels ploegen de geul op diepte werd gehouden, is het echte baggerwerk tegen het eind van de vorige eeuw begonnen. Sindsdien hebben de gebaggerde volumes een zeer sterke toename gekend (Figuur 1.2). De toename is vanaf 2011 het sterkst. Het is opvallend dat de baggervolumes sinds 2016 weer zijn afgenomen. Dit heeft verschillende oorzaken. Ten eerste is tussen 2011 en 2016 een groot deel van het gebaggerde sediment dichtbij het baggergebied weer verspreid of “op stroom gezet”. Waarschijnlijk heeft dit geleid tot een retourstroom waardoor het sediment terugstroomde naar het baggergebied. In een eerdere studies wordt aangegeven dat het stopzetten van de praktijk van op stroom zetten een belangrijkere factor is voor het reduceren van het baggerbezwaar (Grasmeijer & Rübke, 2018). De tweede factoren die van invloed kan zijn op de toename van het baggerbezwaar is de toename van de te onderhouden breedte en diepte. Vanaf het jaar 2010 ging de breedte van 55 naar 60 m en de diepte van NAP-3.5 m naar NAP-3.8 m. In de praktijk wordt hier overigens een overdiepte gehanteerd en wordt er gebaggerd op een diepte van NAP-4.0 m. Tot slot kunnen de contractuele verplichtingen van invloed zijn op de baggerhoeveelheden. In 2010 en 2016 werden aanpassingen gedaan aan de contracten voor het onderhouden van de vaarweg.



Figuur 1.2 De ontwikkeling van het baggervolume in het baggergebied; stortvolumes zijn ook gegeven (persoonlijke communicatie Mulder, 2020).

In de Tweede Kamer werd in 2014 en 2015 gevraagd te komen tot kortetermijnoplossingen die haalbaar en realistisch zijn voor de regelmatige optredende vertraging op de veerverbinding Holwerd-Ameland (zie kamerstukken 2014–2015, 31409, nr. 84). Daarbij is de minister van Infrastructuur en Milieu verzocht om het verkorten (doorsteken) van de vaargeul Ameland te onderzoeken en de financiële gevolgen daarvan (structureel en incidenteel) in kaart te brengen.

Rijkswaterstaat zag een bochtafsnijding van de vaargeul als een mogelijke eerste stap om op redelijk korte termijn een vermindering van de vertragingen te bewerkstelligen. Met een bochtafsnijding wordt het vaartraject met 850 m verkort. Gezien de doelstellingen van de PKB-Waddenzee was het gewenst dat een bochtafsnijding niet zou leiden tot hoger baggerbezwaar maar juist tot een afname.

De effecten van een bochtafsnijding zijn in 2018 onderzocht (Grasmeijer & Rübke, 2018). Uit de berekeningen bleek dat door aanleg van de bochtafsnijding de snelheden en debieten in de ebgeul zouden afnemen en die in de bochtafsnijding toenemen. Geadviseerd werd om bij de bochtafsnijding zoveel mogelijk het natuurlijke verloop van de vloedchaar te volgen. Zonder verandering van de praktijk van op stroom zetten van slib werd het netto effect op het totale baggerbezwaar ongeveer neutraal ingeschat. Het stopzetten van de praktijk van op stroom zetten, waarbij een retourstroom naar het baggergebied optreedt, zou wellicht een belangrijkere factor voor het reduceren van het baggerbezwaar zijn dan de bochtafsnijding. Onzeker was of slib stabiel kon worden geborgen in de oude ebgeul en daarmee effectief aan de retourstroming zou kunnen worden onttrokken.

Op 14 januari 2019 zijn de werkzaamheden voor de bochtafsnijding aangevangen. De bochtafsnijding vindt plaats in de Vloedgeul, een locatie waar zich door natuurlijke processen al een geul heeft ontwikkeld. Medio 2011/2013 kon de veerboot er zelfs tijdelijk doorheen. Daarna bochtte de ebgeul steeds verder uit en verzandde de vloedgeul. In 2019 is besloten het eerder ingezette natuurlijke proces verder te ondersteunen door de vloedgeul te baggeren. Gebr. Van der Lee heeft de bochtafsnijding begin april 2019 opgeleverd en op 7 april 2019 is deze officieel in gebruik genomen. Om de effecten van de ingreep te kunnen bepalen zijn metingen uitgevoerd (Perk, et al., 2019a, 2019b).

De metingen laten zien dat door de bochtafsnijding een afname van de getijdenvolumes door de oorspronkelijke ebgeul heeft plaatsgevonden en een toename van de debieten in de bochtafsnijding. Door de bochtafsnijding stroomt er dus minder water door de oude ebgeul en

stroomt er meer water door de bochtafsnijding (Perk, et al., 2019b). Dit komt overeen met eerdere voorspellingen (Grasmeijer & Röbbke, 2018).

De metingen laten ook zien dat de slibconcentraties vanaf km 6 richting Holwerd (km 0) sterk toenemen (zie voor locaties zie Figuur 1.1). Tijdens stormen kunnen deze oplopen tot gemiddeld tegen de 1000 mg/l. Tijdens ebstroom komen de gemeten concentraties regelmatig boven de 2000 mg/l. Deze toename in concentratie vindt plaats circa 2 uur na de maximale ebstroom. De precieze oorzaak van deze piek in concentraties is niet bekend maar het lijkt goed mogelijk dat deze wordt veroorzaakt door stortingen van sediment ("op stroom zetten") uit het vaarwegonderhoud nabij Km 4 -5 (Perk, et al., 2019b).

1.3 Aanpak

In deze studie zijn de nieuw beschikbaar gekomen veldgegevens gebruikt worden om een bestaand numeriek model voor de slibdynamiek in de Waddenzee te optimaliseren en te valideren. Er is gekozen voor een slibmodel omdat het grootste deel van het baggerwerk wordt uitgevoerd in het oostelijk deel van de vaargeul, tussen de ebgeul en de pier bij Holwerd, en dit bijna uitsluitend slibrijk materiaal betreft (Herman, et al., 2016). De veldgegevens zijn in het kader van de bochtafsnijding ingewonnen door WaterProof Marine Consultancy & Services BV (WaterProof)¹ en door Rijkswaterstaat-CIV:

- In twee periodes in 2019 is door WaterProof een uitgebreide meetcampagne uitgevoerd rondom de vaargeul tussen Holwerd en Ameland. Daarbij is een grote set aan hydro-morfologische parameters verzameld. De eerste meetcampagne (T0) vond plaats in de wintermaanden januari, februari en maart (Perk et al., 2019a). De tweede meetcampagne (T1) vond plaats in september en oktober 2019 (Perk et al., 2019b).
- Rijkswaterstaat-CIV heeft in september 2019 13-uurs debietmetingen uitgevoerd op vier raaien in de vaargeul.
- Voor, tijdens en na de uitvoering van de bochtafsnijding zijn in opdracht van Rijkswaterstaat-NN lodingen uitgevoerd om de bodemhoogte in en rond de geul te bepalen.

Met behulp van de veldgegevens is een bestaand model ingericht voor de specifieke toepassingen in deze studie. Het bestaande model is gebouwd in Delft3D-FM (Flexible Mesh) en wordt beschreven door Vroom et al. (2020). Het rekenrooster van dit model is voor deze studie lokaal verfijnd ten opzichte van het basismodel zodat het studiegebied met voldoende nauwkeurigheid is opgenomen in de modelschematisatie. De overige modelinstellingen zijn overgenomen van Vroom et al. (2020).

Vervolgens zijn er modelberekeningen uitgevoerd voor periodes voor en na het uitvoeren van de bochtafsnijding in de vaargeul. De bochtafsnijding is verwerkt in het model als een aanpassing van de bodem. Analyse van de resultaten van verschillende modelberekeningen geeft inzicht in het effect van de bochtafsnijding op de snelheden en debieten in de ebgeul en die in de bochtafsnijding en het effect van de bochtafsnijding op de aanslibbing in de vaargeul bij Holwerd.

1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt de opzet en de validatie van het Delft3D-FM WQ uitgebreid besproken. Daarbij is vooral aandacht besteed aan de veranderingen die zijn doorgevoerd ten opzichte van het model dat wordt beschreven door Vroom et al. (2020), De resultaten van de modelstudie zijn opgenomen in Hoofdstuk 3 en Hoofdstuk 4. In Hoofdstuk 3 worden de hydrodynamische effecten van de bochtafsnijding toegelicht. Achtereenvolgens komen de waterstanden, de

¹ WaterProof heeft de metingen uitgevoerd in opdracht van zowel Rijkswaterstaat als de provincie Friesland, omdat de metingen een dubbel doel dienden, zowel de vaarweg als Holwerd aan Zee

stroomsnelheden en de debieten door de vaargeul aan bod. In Hoofdstuk 4 worden resultaten gepresenteerd van de slibdynamiek en de aanslibbing in de vaargeul in de situatie voor de bochtafsnijding en in de situatie na de bochtafsnijding. Ook hier wordt aandacht besteed aan het effect van de roosterresolutie op de modelresultaten.

In Hoofdstuk 5 volgt een discussie waarbij de modelresultaten worden besproken in relatie tot de aanpak in deze studie. Uit die discussie volgen ook de aanbevelingen voor vervolgonderzoek. De conclusies van deze studie zijn opgesomd in Hoofdstuk 6.

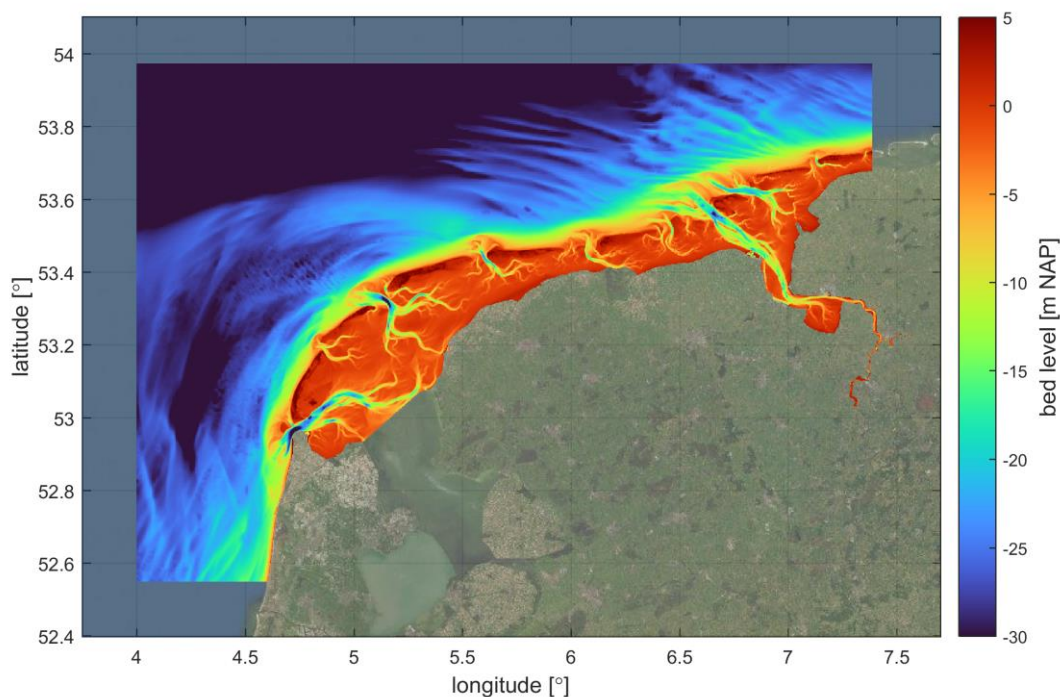
2 Modelopzet en validatie

2.1 Basismodel Waddenzee

2.1.1 Modeldomein

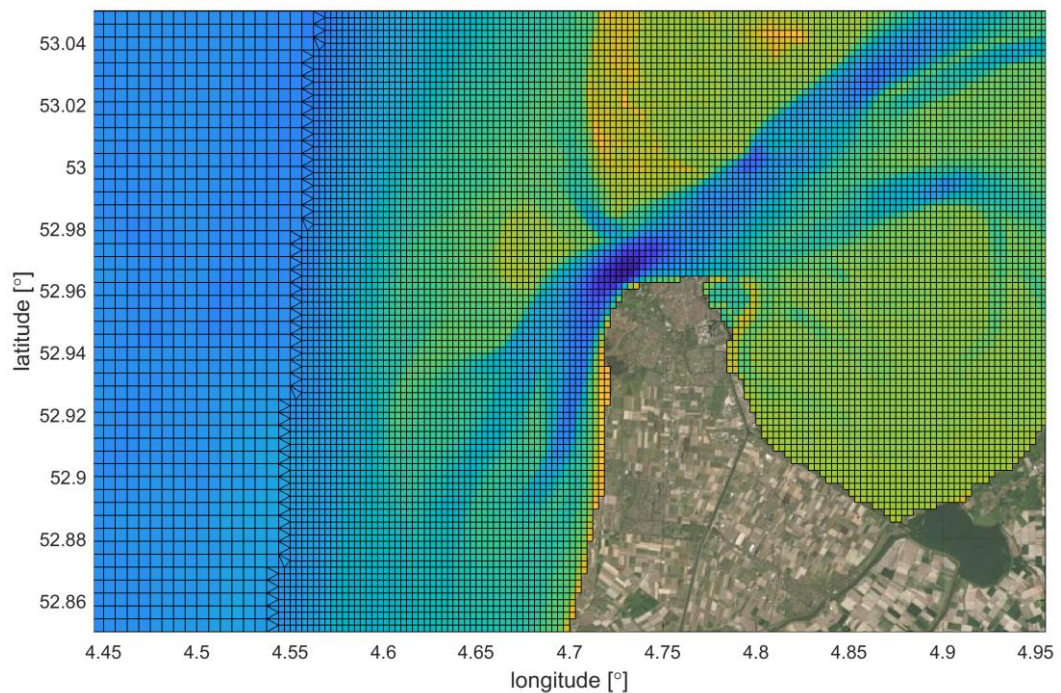
Als uitgangspunt in de modelstudie wordt het Delft3D-FM model voor slibdynamiek in de Waddenzee gebruikt dat is opgezet door Vroom et al. (2020)². De opzet van de waterbeweging van dit Dutch Wadden Sea Model (DWSM) wordt beschreven door Van Weerdenburg & Zijl (concept). De maximale roosterresolutie van het waterbewegingsmodel is circa 100 m x 100 m in de Waddenzee. Ten behoeve van de rekentijd is er voor het berekenen van slibdynamiek gekozen de maximale roosterresolutie te beperken tot 200 m x 200 m in de Waddenzee en het aantal verticale σ -lagen tot 10.

Het modeldomein van het DWSM bevat de Waddenzee, de zeegaten en buitendelta's en de Noordzeekust van de Waddeneilanden. De zuidelijke rand van het modeldomein ligt langs de Hollandse kust ter hoogte van IJmuiden en de oostelijke rand van het modeldomein ligt ruim voorbij het Eems estuarium. Het modeldomein en de bathymetrie zijn weergegeven in Figuur 2.1. De resolutie van het rekenrooster is 0.5 nautische mijl (nm) x 0.5 nm (d.w.z. 926 m x 926 m) in de noordwestelijke hoek van het modeldomein en neemt in twee stappen toe tot ongeveer 200 m x 200 m langs de Noordzeekust, in de zeegaten en op de buitendelta's en in de Waddenzee. Figuur 2.2 toont het rekenrooster van het DWSM rondom het Marsdiep, waarop de overgang naar de hogere roosterresolutie in de Waddenzee terug te zien is.



Figuur 2.1 Kaart van het ruimtelijke domein van het Dutch Wadden Sea Model (DWSM) met daarop aangegeven de bodemhoogte t.o.v. NAP op basis van de vaklodingen data.

² Dit wordt ook wel het KRW-slibmodel genoemd. KRW = Kaderichtlijn Water



Figuur 2.2 Rekenrooster van het Dutch Wadden Sea Model (DWSM) nabij het Marsdiep. De overgang naar een andere resolutie van het rekenrooster wordt gevormd door een rij driehoekige rekencellen. Hier wordt het rooster getoond dat wordt gebruikt voor het berekenen van de slibdynamiek met een maximale resolutie van 200 m x 200 m in de Waddenzee. Voor de waterbeweging is de maximale resolutie 100 m x 100 m.

2.1.2 Waterbewegingsmodel

De hydrodynamische randvoorwaarden op de open modelranden zijn afgeleid uit modelresultaten van het 0.5 nm Dutch Continental Shelf Model (DCSM, Zijl et al., 2018). Ook de diepteafhankelijke randvoorwaarden voor temperatuur en saliniteit zijn uit dat model afgeleid. Afvoeren uit de Eems en bij de spuisluizen van Den Oever, Kornwerderzand en Lauwersoog zijn in het model meegenomen op basis van meerjarige gemiddelden, omdat tijdens het opzetten van het model de gemeten tijdreeksen nog niet beschikbaar waren voor de te modelleren periode. Als meteorologische forcering (d.w.z. windcondities, atmosferische druk, temperatuur, instraling, regenval en verdamping) worden ERA5 data gebruikt. Dit is anders dan het in het model dat is beschreven door Vroom et al. (2020), waarin HiRLAM data van het KNMI wordt gebruikt als meteorologische forcering. Inmiddels is er een voorkeur ontstaan voor het gebruik van ERA5 data omdat de beschikbare parameters in die dataset beter aansluiten bij de manier waarop de watertemperatuur in het model wordt bepaald (d.w.z. het *Heat Flux* model).

Voor het modelleren van de slibdynamiek wordt een relatief eenvoudige methode toegepast om de bijdrage van golven aan de bodemschuifspanning te bepalen. Hierbij wordt de golfhoogte op een punt in het rekenrooster bepaald op basis van de windsnelheid, de strijklengte en de lokale waterdiepte, volgens de formuleringen van Hurdle & Stive (1989). De strijklengte is afhankelijk van de windrichting en wordt elke vier uur opnieuw berekend op basis van de actuele waterdiepte. Door de strijklengte regelmatig opnieuw te berekenen kan het zijn dat de strijklengte onderbroken wordt door drooggevallen delen. In recente versies van de Delft3D-FM modelsoftware is een koppeling met een nauwkeuriger golfmodel (d.w.z. SWAN) nog niet beschikbaar voor 3D berekeningen. Tijdens de opzet en kalibratie van DWSM-Slib is gebleken dat een strijklengteaanpak voldoende nauwkeurig is om golfgedreven resuspensie in de Waddenzee te simuleren (Vroom et al., 2020).

De totale bodemschuifspanning (τ) die wordt gebruikt om de resuspensie van slib te bepalen volgt uit een lineaire optelling van de bodemschuifspanning door stroming en de bodemschuifspanning door golven. Niet-lineaire interacties tussen golven en stromingen worden hierbij dus niet meegenomen. De wrijvingscoëfficiënt ter bepaling van de bodemschuifspanning door golven (f_w , zie Swart (1974)) gebruikt een Nikuradse ruwheidshoogte van $1 \cdot 10^{-3}$ m als maat voor de bodemruwheid.

2.1.3 Slibmodel

Het hydrodynamische model is online gekoppeld met DELWAQ en de slibprocessen worden berekend met het zogenaamde buffermodel, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen een makkelijk erodeerbare sliblaag op de bodem (S1) die ook wel flufflaag wordt genoemd en een onderlaag (S2) die ook wel bufferlaag wordt genoemd en die meestal zandig is (Van Kessel, et al., 2011). De eerste laag is representatief voor de dunne laag op de bodem die ontstaat tijdens getijkentering en die gemakkelijk in suspensie wordt gebracht door getijstromingen. De totale sedimentmassa in deze laag is doorgaans klein en de verblijftijd van sediment in deze laag is kort vanwege de grote uitwisseling tussen deze laag en het water. De bufferlaag is representatief voor de zanderige zeebodem waarin slib kan worden meegevoerd en tijdelijk kan worden opgeslagen. Opwerveling uit deze bufferlaag gebeurt tijdens dynamische omstandigheden.

De instellingen van de erosie- en sedimentatieparameters in dit slibmodel zijn overgenomen uit de modelkalibratie die is uitgevoerd door Vroom et al. (2020). De instellingen zijn weergegeven in Tabel 2.1. Voor die kalibratie is gebruik gemaakt van (i) periodiek gemeten concentraties Zwevende Stof (SPM) bij observatiepunten in het MWTL meetnet in de Waddenzee en in de Noordzee, (ii) tijdseries van de gemeten concentraties SPM bij Eemshaven en tijdseries van de troebelheid bij Boontjes en (iii) ruimtelijke patronen van slib in de bodem uit de Sedimentatlas.

Op de randen van het model worden tijdseries voor de slibconcentratie opgelegd. De opgelegde slibconcentraties variëren met de diepte langs de modelrand volgens de relatie die is beschreven door Herman et al. (2018). De opgelegde slibconcentraties hebben een sinusvormig verloop in het jaar, waarbij de concentraties in de wintermaanden hoger zijn dan de jaargemiddelde concentratie en de concentraties in de zomermaanden lager zijn dan de jaargemiddelde concentratie. Ook deze relatie is overgenomen uit Herman et al. (2018).

Tabel 2.1 Instellingen van de erosie- en sedimentatieparameters van het slibmodel.

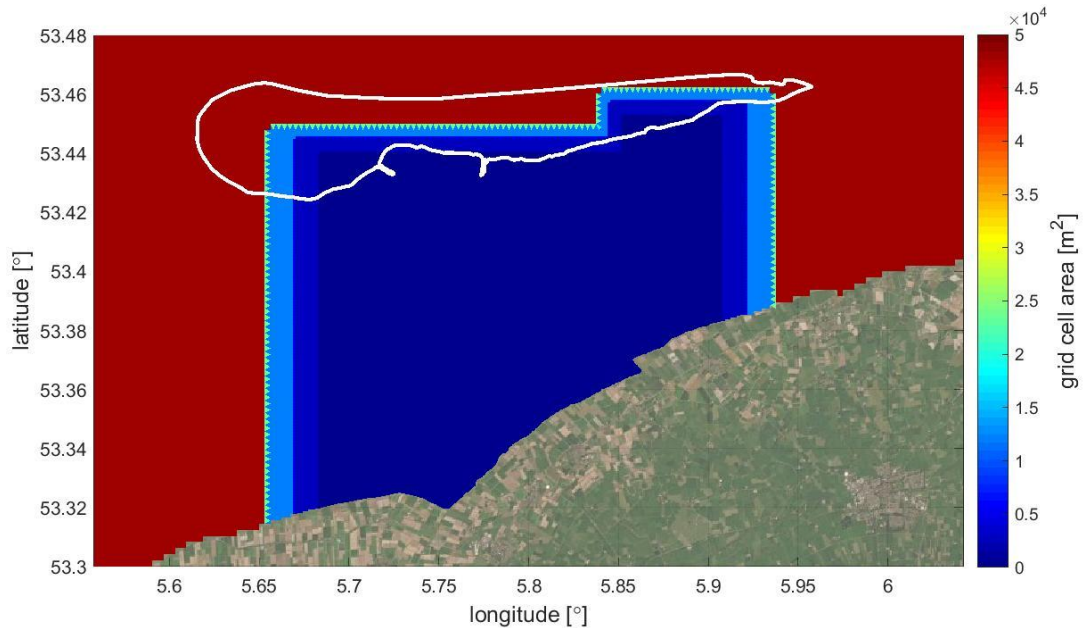
Slibeigenschap	Fractie 1 (IM1)	Fractie 2 (IM2)
Valsnelheid [mm s^{-1}]	1,5	0,4
Depositie-efficiëntie [-]	0,25	
Percentage van sedimentatie-flux naar bodemlaag S2 [-]	0,05	
Kritische schuifspanning voor erosie uit bodemlaag S1 [Pa]	0,10	
0 ^e orde erosiesnelheid van bodemlaag S1 [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]	$6,9 \cdot 10^{-5}$	
1 ^e orde erosiesnelheid van bodemlaag S1 [s^{-1}]	$5,8 \cdot 10^{-6}$	
Kritische schuifspanning voor erosie uit bodemlaag S2 [Pa]	0,80	
Erosiesnelheid van bodemlaag S2 [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$]	$1,5 \cdot 10^{-4}$	
Dikte van bodemlaag S2 [m]	0,10	

2.2 Aanpassingen modelschematisatie

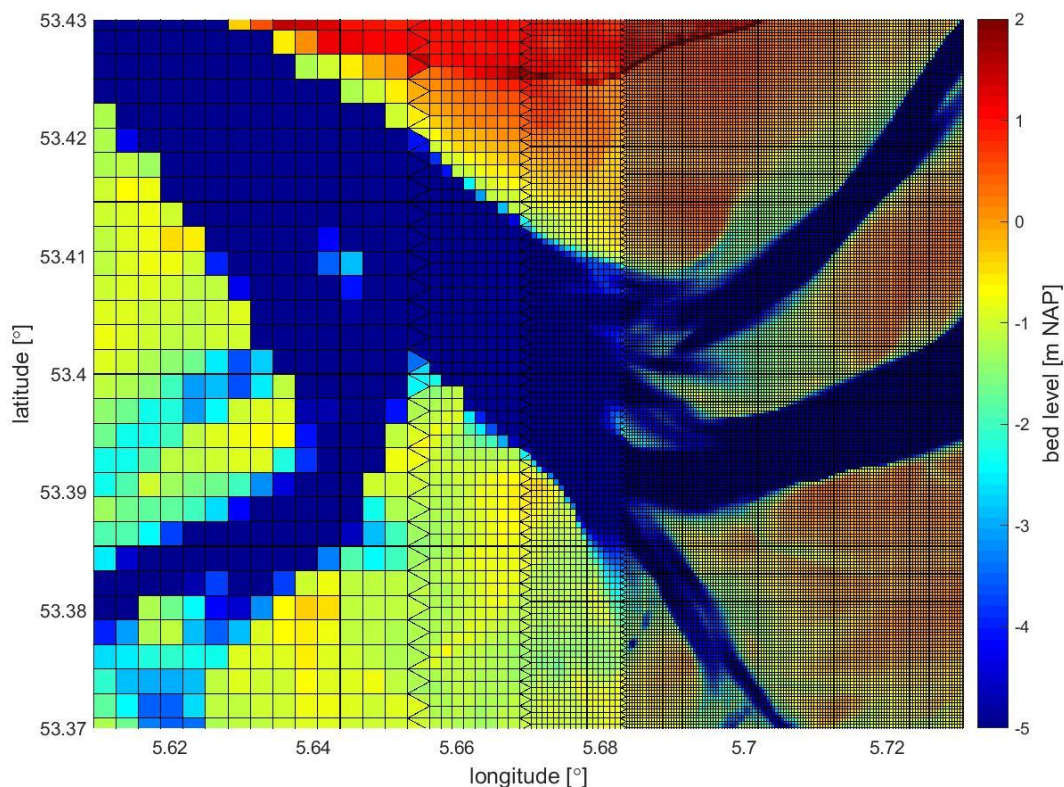
2.2.1 Roosterverfijning

De roosterresolutie van 200 m x 200 m van DWSM-Slib in de Waddenzee is onvoldoende om de vaargeul tussen Holwerd en Ameland nauwkeurig op te nemen in de modelbathymetrie. Het rekenrooster is daarom lokaal verfijnd tot ongeveer 25 m x 25 m in het bekken achter Ameland. Dit is weergegeven aan de hand van de roosterresolutie in Figuur 2.3. In 3 stappen wordt de roosterresolutie elke keer met een factor 2 verfijnd. Die stappen zijn ook weergegeven in Figuur 2.4. Een roosterresolutie van 25 m x 25 m was in dit project de maximaal haalbare resolutie om rekkentijden praktisch haalbaar te houden.

Om het effect van de roosterresolutie op de slibdynamiek te onderzoeken kan er voor gekozen worden om de laatste stap in de roosterverfijning (d.w.z. de derde verfijning van links naar rechts in Figuur 2.4) weg te laten. De maximale roosterresolutie is dan ongeveer 50 m x 50 m.



Figuur 2.3 Horizontale resolutie van het rekenrooster (weergegeven als de oppervlakte van roostercellen) nadat het rooster in het bekken achter Ameland in drie stappen verfijnd is van ~200 m x ~200 m naar ~25 m x ~25 m.



Figuur 2.4 Weergave van de roosterverfijning in het bekken achter Ameland. Links (zeegat Borndiep) is de resolutie ~200 m x 200 m en in drie stappen neemt die resolutie toe tot ~25 m x 25 m. De kleurschaal toont de bodemhoogte.

2.2.2 Bathymetrie

2.2.2.1 Bodemdata

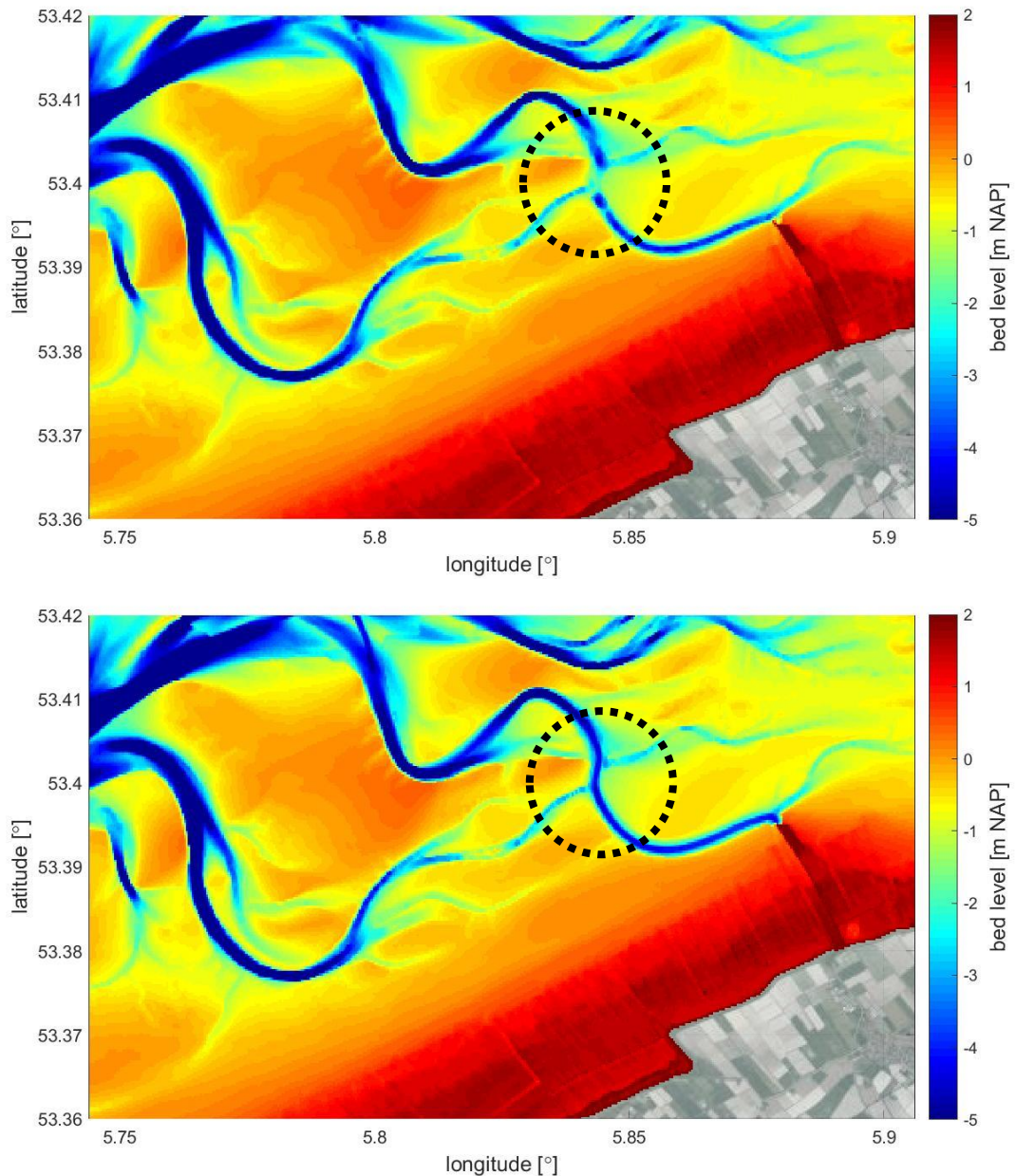
Voor de bodemhoogte in het interessegebied zijn verschillende data beschikbaar. De vakkolingen data bevat de bodemhoogte in het hele interessegebied met een resolutie van 20 m x 20 m. Met LiDAR ingewonnen data bevat de bodemhoogte in intergetijdengebieden op een hoge resolutie (1 m x 1 m). Daarnaast zijn er in het kader van de bochtafsnijding projectmetingen uitgevoerd van de bodemhoogte in de vaargeul (beheerlodingen). De resolutie van die data is 1 m x 1 m. Die projectmetingen zijn vóór, tijdens en na de aanleg van bochtafsnijding uitgevoerd. In deze studie wordt gebruik gemaakt van projectmetingen uit september 2018 voor de situatie vóór de bochtafsnijding en van projectmetingen uit augustus 2019 voor de situatie na de bochtafsnijding. Ter illustratie toont bijlage A.2 de gemeten ontwikkeling van de bochtafsnijding en de ebgeul vanaf de aanvang van de werkzaamheden tot een jaar daarna. Hieraan is te zien dat de bochtafsnijding steeds ruimer wordt en de ebgeul steeds nauwer.

De in het kader van de vakkolingen ingewonnen gegevens worden geïnterpoleerd op een rooster van 20 m x 20 m. Door die interpolatie kunnen fouten in de bodem ontstaan. Dit is het geval in de vaargeul bij Holwerd, daar waar de vaargeul het Dantziggat kruist. Omdat er met de projectmetingen voor de bochtafsnijding een andere dataset beschikbaar is kan die fout aangetoond en gecorrigeerd worden. Dit is weergegeven in Figuur 2.5.

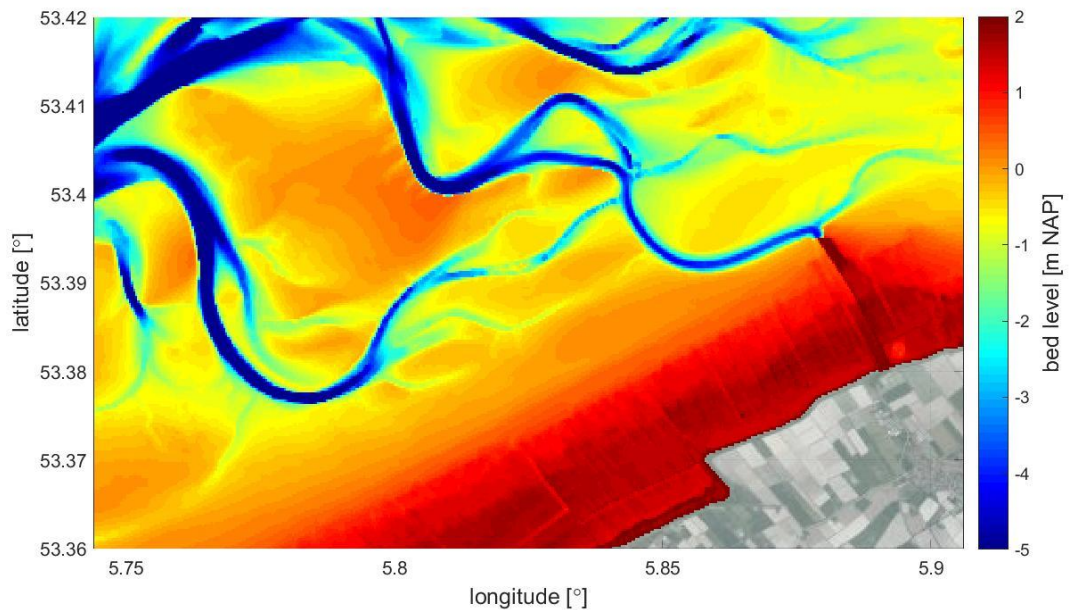
Voor de bodemhoogte in de uiteindelijke modelberekeningen worden de bodemgegevens als volgt toegepast:

1. Projectmetingen van de bochtafsnijding worden gebruikt voor het deel van het modeldomein waar die beschikbaar zijn (d.w.z. de vaargeul). Voor de situatie vóór de bochtafsnijding (T0) wordt de survey van september 2018 gebruikt. Voor de situatie na de bochtafsnijding (T1) wordt de survey van Augustus 2019 gebruikt.
2. Voor intergetijdengebieden in het modeldomein worden gegevens uit de LiDAR survey gebruikt.
3. Voor delen van het modeldomein waar geen projectmetingen en geen LiDAR gegevens beschikbaar zijn worden vaklodingen gebruikt.

De uiteindelijke bodemhoogte voor de T0 en T1 situatie is weergegeven in respectievelijk Figuur 2.5 (onder) en Figuur 2.6.



Figuur 2.5 Modelbodem voor aanvang van de bochtafsnijding op basis van vaklodingen en LiDAR data (boven) en op basis van vaklodingen, LiDAR data en projectmetingen (van september 2018) in de vaargeul (onder). Door interpolatie van de data is een fout ontstaan in de bodemhoogte in de vaklodingen (weergegeven met een gestippelde cirkel).



Figuur 2.6 Modelbodem na de bochtafsnijding op basis van vaklodingen, LiDAR data en projectmetingen (van augustus 2019) in de vaargeul.

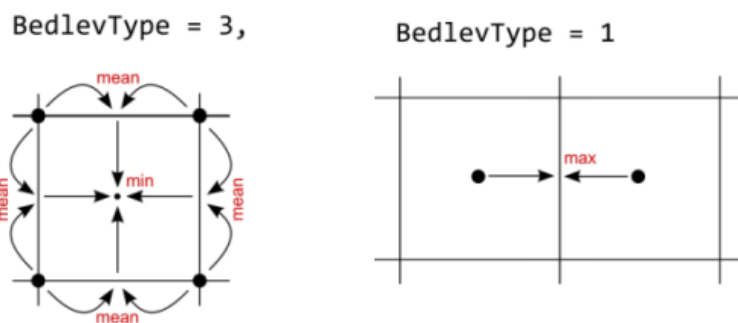
2.2.2.2 Interpolatie van bodemdata

In modelschematisaties moet altijd een compromis worden gemaakt tussen roosterresolutie en rekentijd. Hierbij moet het te bestuderen fenomeen of proces in voldoende detail worden weergegeven terwijl tegelijk de rekentijd acceptabel blijft. Daarom bespreken we hier kort wat de gevolgen zijn de resolutie en de interpolatie van de bodemdata op de reproductie van de hypsometrie³ van het interessegebied.

In Delft3D-FM bestaan meerdere manieren om de bodemhoogte in het rekenrooster te specificeren. Dit gebeurt via de invoerwaarde *BedLevType*. Gebruikelijk wordt de bodemhoogte gespecificeerd in het midden van rekencellen (*cell centres*, *BedLevType* = 1) of op knooppunten van het rooster (*cell nodes*, *BedLevType* = 3). Bij die tweede methode wordt de bodemhoogte op randen van rekencellen (*cell faces*) bepaald als het gemiddelde van de bodemhoogte in de twee omliggende knooppunten. De twee methoden *BedLevType* = 1 en *BedLevType* = 3 zijn schematisch weergegeven in

Figuur 2.7. Voor numerieke stabiliteit mag de bodemhoogte in het midden van rekencellen niet hoger zijn dan de bodemhoogte op celranden. Vandaar dat de bodemhoogte met *BedLevType* = 3 wordt bepaald als het minimum van de bodemhoogte op de celranden, en met *BedLevType* = 1 wordt de bodemhoogte op celranden bepaald als het maximum van de bodemhoogte op de twee omliggende *cell centres*.

³ Op een hypsometrische curve wordt voor een bodemoppervlak (x coördinaat van de curve) het bodemoppervlak getoond dat onder een bepaalde hoogte (y coördinaat van de curve) ligt.

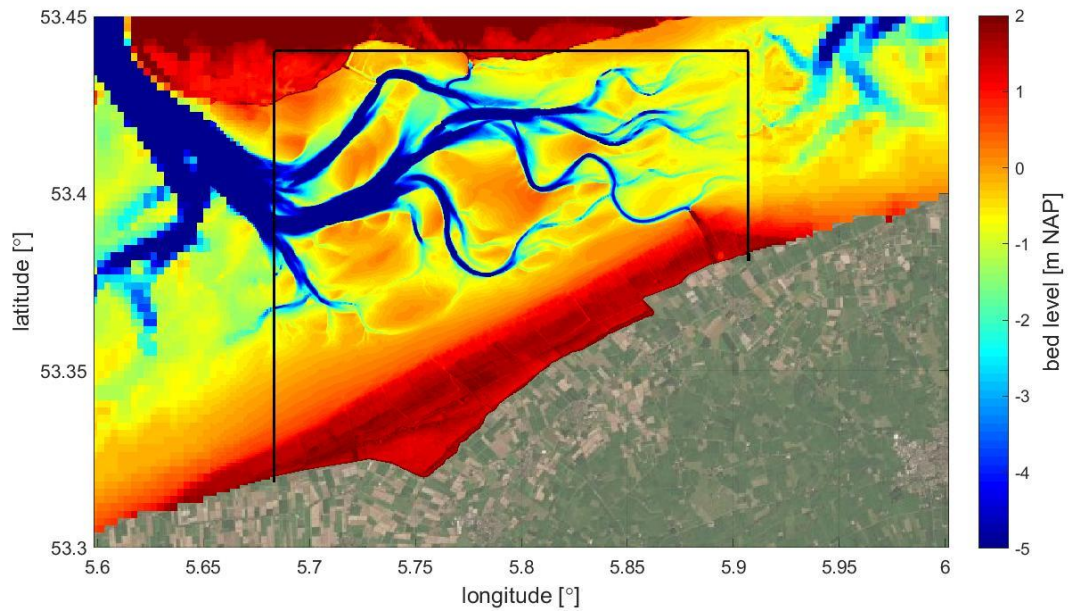


*Figuur 2.7 Schematische weergave van twee methoden waarop de opgegeven bodemdata gebruikt kunnen worden in de numerieke methode. Voor het numerieke schema van Delft3D-FM zijn uiteindelijk de bodemhoogte in het midden van rekencellen (*cell centres*) en op de celranden (*cell faces*) nodig.*

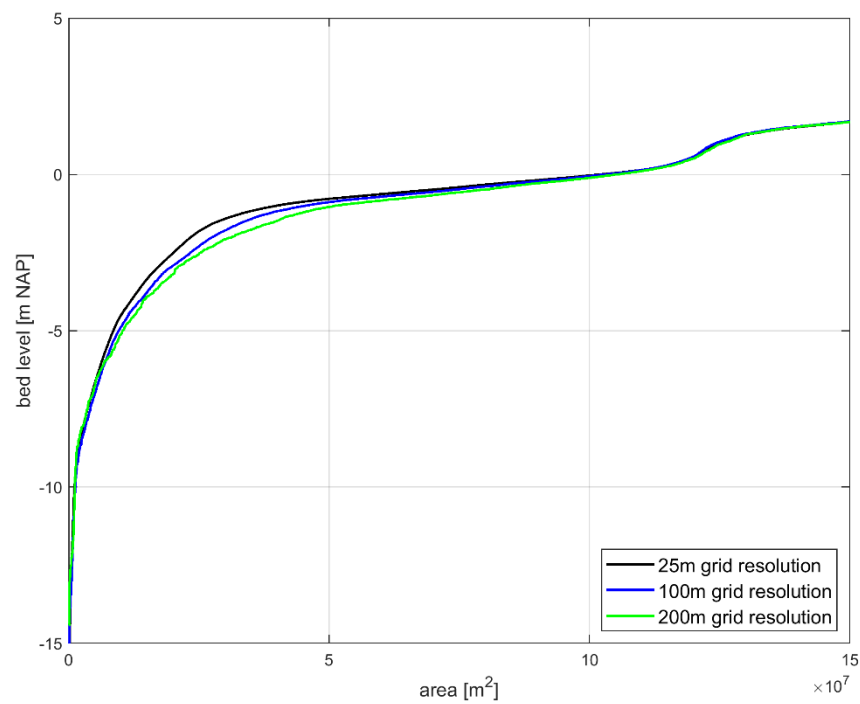
In de meest recente versie van de Delft3D-FM software wordt alleen het gebruik van *BedLevType* = 3 ondersteund voor 3D modellen. Het feit dat de bodemhoogte in het midden van de cel wordt bepaald als het minimum van de bodemhoogte op de celranden heeft gevolgen voor het kombergingsvolume en de hypsometrie van het bekken. Dit is het best inzichtelijk te maken aan de hand van de hypsometrie van het bekken in verschillende resoluties van het rekenrooster.

De vaklodings data is gebruikt voor het specificeren van de bodemhoogte op drie verschillende rekenroosters. De resolutie van de drie rekenroosters verschilt, namelijk 25 m, 100 m en 200 m. Vervolgens is van een deel van het bekken achter Ameland (zie Figuur 2.8) de hypsometrische curve bepaald (zie Figuur 2.9). Uit de hypsometrische curve volgt dat de bodemhoogte gemiddeld afneemt (d.w.z. het bekken wordt gemiddeld dieper) door een afname van de resolutie. Dit is vooral zichtbaar tussen 0 en -5 m NAP. Het areaal aan intergetijdengebied neemt daardoor af in lagere modelresoluties. Dit wordt veroorzaakt doordat voor de bodemhoogte in *cell centres* het minimum van de bodemhoogte op *cell faces* wordt gebruikt (zie Figuur 2.7). De fout die daarmee gemaakt wordt neemt toe wanneer roosterzellen groter worden.

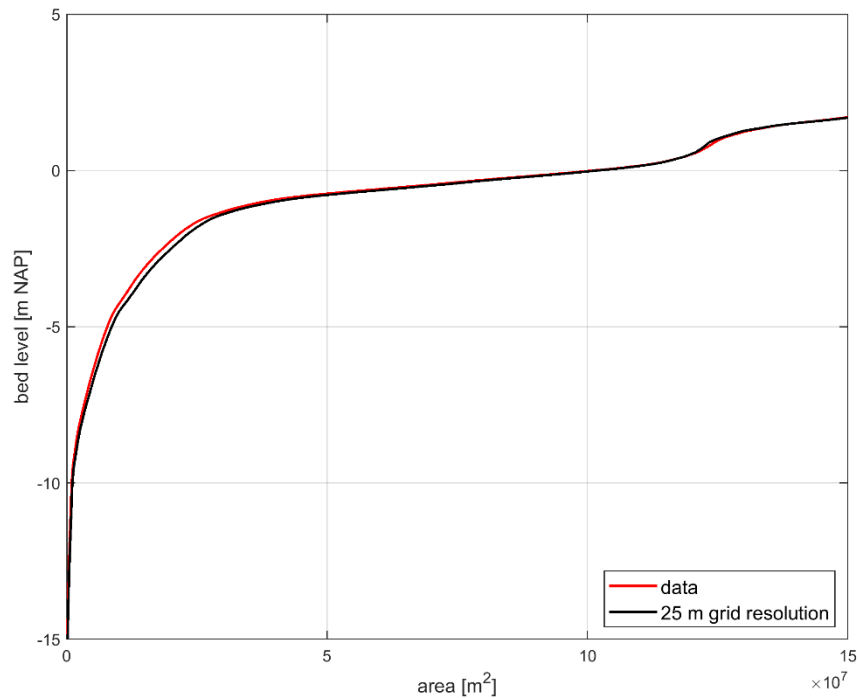
Ook met de hoge modelresolutie (~ 25 m) is het bekken onder het laagwaterniveau in het model gemiddeld iets dieper dan volgt uit de metingen. Dit is weergegeven in Figuur 2.10. Dit kan ook een klein effect hebben op de grootschalige waterbeweging. Dit hebben we hier niet gekwantificeerd.



Figuur 2.8 Kaart van de bodemhoogte in het model waarop het deel van het bekken achter Ameland is aangegeven waarvoor de hypsometrische curve is bepaald voor verschillende resoluties van het rekenrooster (zie Figuur 2.9).



Figuur 2.9 Hypsometrische curve van een deel van het bekken achter Ameland (zie Figuur 2.8) voor verschillende resoluties van het rekenrooster.



Figuur 2.10 Hypsometrische curve van een deel van het bekken achter Ameland (zie Figuur 2.8) op basis van de bodemdata (in rood) en in het rekenrooster zoals die in deze studie gebruikt wordt (in zwart).

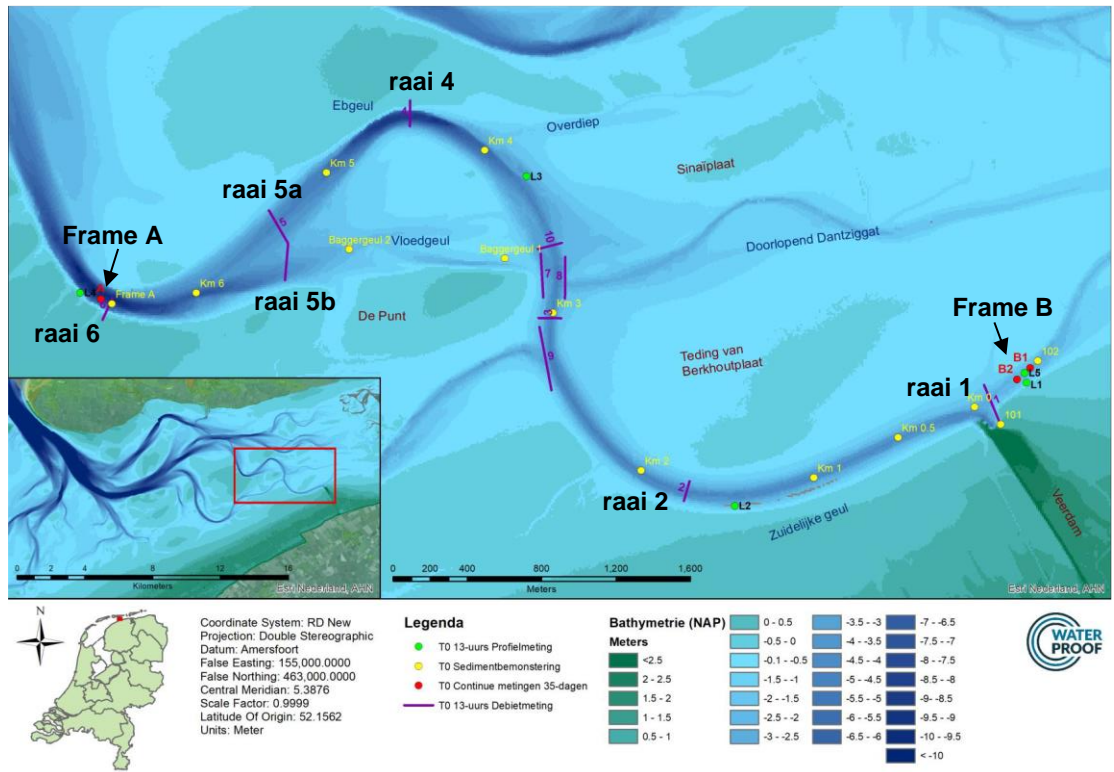
2.3 Validatie hydrodynamica

Voor de hydrodynamische validatie van het model worden modelsimulaties uitgevoerd voor twee periodes. Deze dekken de T0 en T1 meetcampagnes die zijn uitgevoerd door WaterProof. De eerste gemodelleerde periode (T0) loopt van 1 januari 2019 tot 1 april 2019. De tweede gemodelleerde periode (T1) loopt van 1 september 2019 tot 1 november 2019. Om effecten van de initiële condities te elimineren wordt een inspeelperiode van 10 dagen gebruikt voor de waterbeweging. Als initiële condities voor saliniteit (bij de bodem en bij het wateroppervlak) en temperatuur worden ruimtelijk variërende velden opgelegd die het resultaat zijn van een inspeelsom van 1 jaar.

Ter validatie van de hydrodynamica van het model wordt gekeken naar de nauwkeurigheid waarmee veldmetingen gereproduceerd worden. De veldmetingen die daarvoor gebruikt worden zijn de volgende:

1. Waterstandsmetingen bij meetstation Holwerd in 2019
2. Waterstandsmetingen bij twee observatiepunten tijdens meetcampagnes in februari 2019 (T0) en september 2019 (T1), uitgevoerd door WaterProof
3. Stroomsnelheden bij één observatiepunt tijdens meetcampagnes in februari 2019 (T0) en september 2019 (T1), uitgevoerd door WaterProof
4. Debietmetingen op 8 raaien loodrecht op de vaargeul in februari 2019 (T0) en op 9 raaien in september 2019 (T1), uitgevoerd door WaterProof

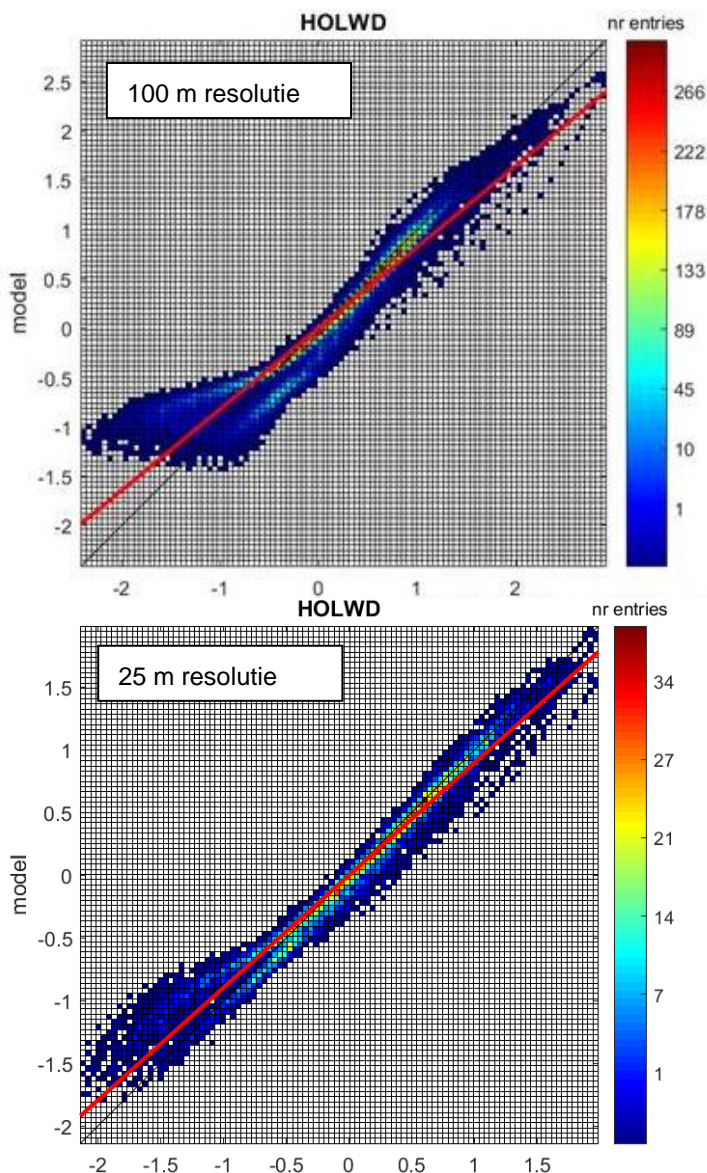
Figuur 2.11 toont een overzichtsk kaart van de locaties waar tijdens de T0 meetcampagne door WaterProof metingen zijn uitgevoerd.



Figuur 2.11 Overzicht van metingen die tijdens de T0 meetcampagne door WaterProof zijn uitgevoerd. De meetlocaties die voor de hydrodynamische modelvalidatie gebruikt worden zijn met zwarte tekst benoemd. Figuur overgenomen uit Perk et al. (2019a).

2.3.1 Reproductie waterstanden bij Holwerd

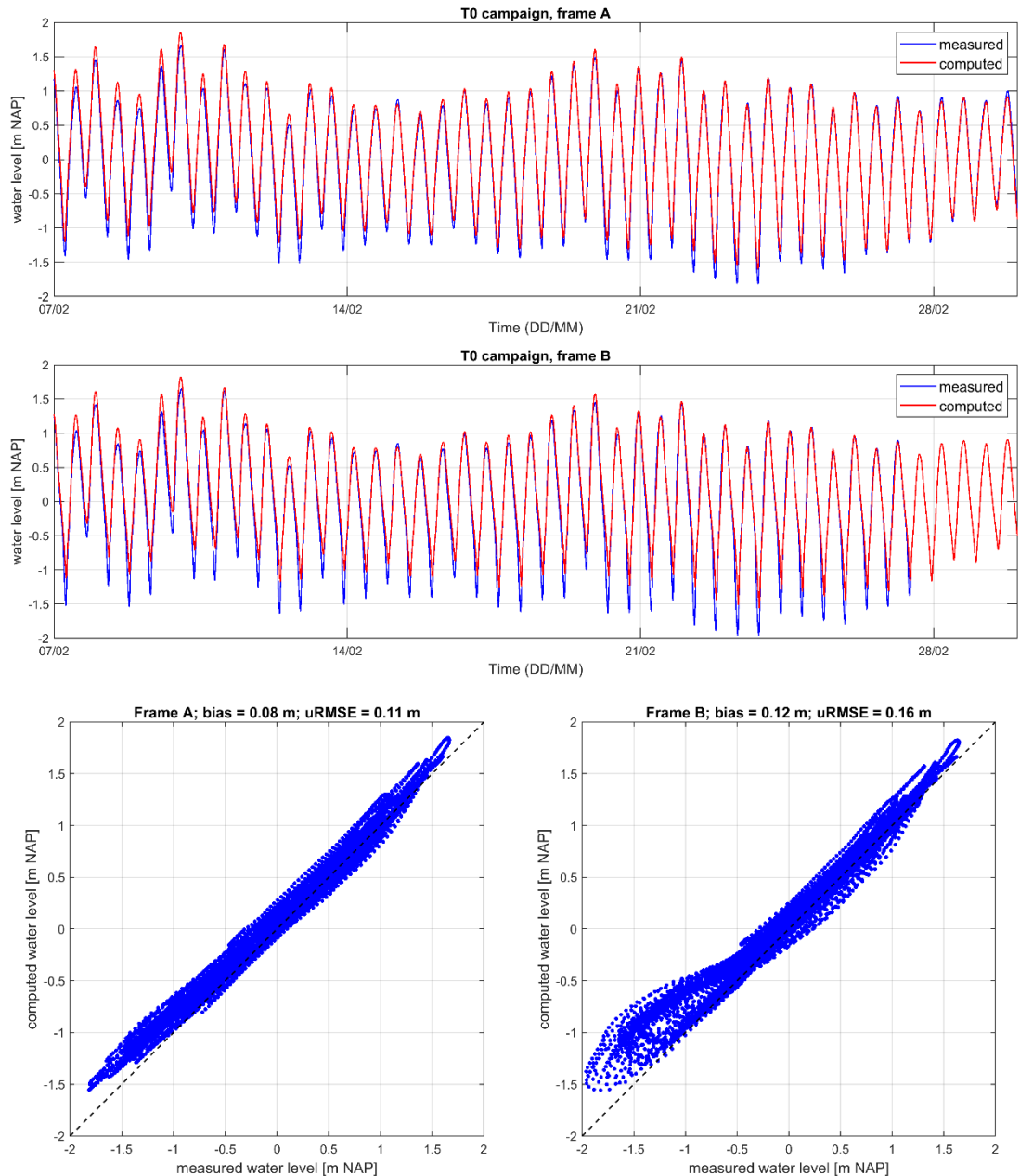
Figuur 2.12 toont in het bovenste paneel de reproductie van waterstanden bij Holwerd voor een modelresolutie van 100 m en in het onderste paneel die voor een modelresolutie van 25 m. Deze figuur laat zien dat de laagwaterstanden in het model met 100 m resolutie niet laag genoeg zijn. Dit is een bekend probleem bij het modelleren van de hydrodynamica in kustsystemen met veel intergetijdengebieden. De meest waarschijnlijke verklaring hiervoor is dat de kleinste geulen en prielen niet in de modelbodem zijn opgenomen, omdat die kleiner zijn dan de resolutie van het rekenrooster. De afwatering van intergetijdengebieden verloopt daardoor te langzaam, met als gevolg dat laagwaterstanden niet laag genoeg zijn. Een combinatie van betere bodemdata en een hogere modelresolutie (25 m resolutie, zie onderste paneel in Figuur 2.12) verbetert de reproductie van de laagwaterstanden aanzienlijk.



Figuur 2.12 Reproductie van de waterstand bij Holwerd, waarbij de gemeten waterstand is uitgezet op de horizontale as en de berekende waterstand op de verticale as, voor een eerdere versie van het model (boven, maximale roosterresolutie 100 m) en voor het huidige model (onder, maximale roosterresolutie 25 m).

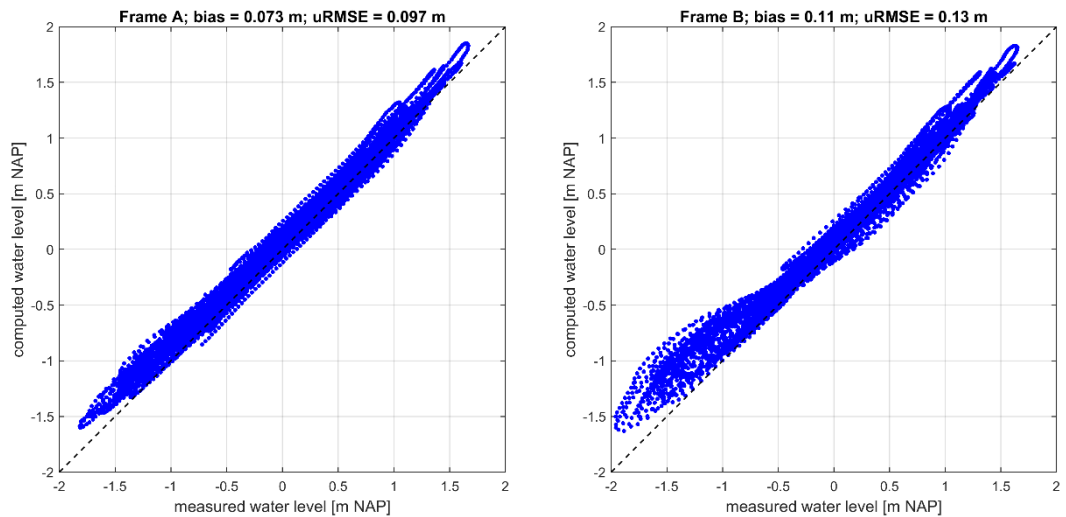
2.3.2 Reproductie waterstanden meetcampagne

Tijdens de T0 en T1 meetcampagnes zijn tijdreeksen van de waterstand op twee observatiepunten ingewonnen (d.w.z. Frame A en Frame B, zie Figuur 2.11). Figuur 2.13 toont een vergelijking tussen de gemeten waterstand en de berekende waterstand bij Frame A en Frame B voor een deel van de T0 meetcampagne. Over het algemeen wordt de waterstandsvariatie goed gereproduceerd door het model. In lijn met wat in de vorige paragraaf is toegelicht worden de laagwaterstanden door het model overschat. Dit is erger bij Frame B dan bij Frame A, waarschijnlijk omdat de waterdiepte bij Frame B kleiner is. In de tijdseries is te zien dat vooral de overschatting van laagwaterstanden bijdraagt aan een gemiddelde fout in het reproducieren van de waterstand van 8 cm bij Frame A en van 12 cm bij Frame B. Daarnaast geldt dat de *unbiased RMSE (uRMSE)* gelijk is aan 11 cm bij Frame A en 16 cm bij Frame B.



Figuur 2.13 Reproductie van waterstanden bij Frame A en Frame B tijdens de T0 meetcampagne; tijdseries van de gemeten en berekende waterstanden bij Frame A (boven) en Frame B (midden) en een vergelijking waarbij de gemeten waterstand is uitgezet op de horizontale as en de berekende waterstand op de verticale as voor Frame A (beneden, links) en voor Frame B (beneden, rechts).

Door de bodemruwheid in het bekken van het Amelanders Zeegat te verlagen van $0.0227 \text{ s/m}^{1/3}$ naar $0.0213 \text{ s/m}^{1/3}$ is geprobeerd de reproductie van de waterstanden te verbeteren. Door deze verlaging is de bodemruwheid gelijk aan de bodemruwheid in het bekken van het Friesche Zeegat. Figuur 2.14 toont hoe de waterstanden dan gereproduceerd worden. Zowel wat betreft de gemiddelde fout als wat betreft de variatie verbetert de reproductie van de waterstanden bij Frame A en bij Frame B ten opzichte van wat is weergegeven in Figuur 2.13.

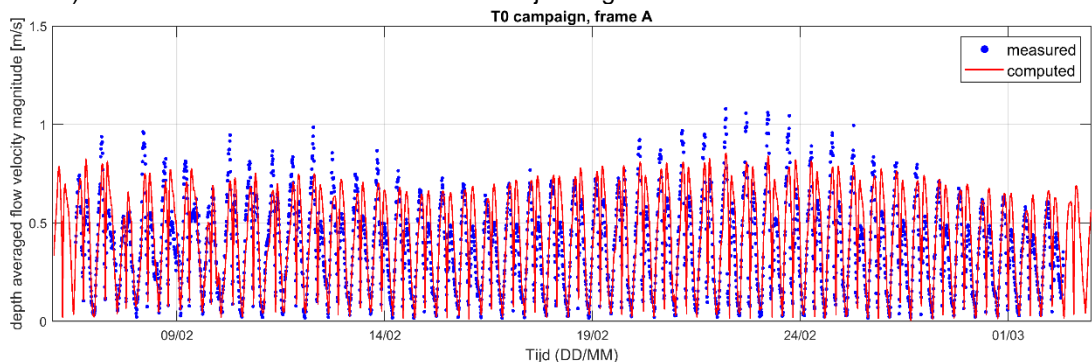


Figuur 2.14 Reproductie van waterstanden bij Frame A en Frame B tijdens de T0 meetcampagne na verlaging van de bodemruwheid; de gemeten waterstand is uitgezet op de horizontale as en de berekende waterstand is uitgezet op de verticale as voor Frame A (beneden, links) en voor Frame B (beneden, rechts).

2.3.3 Reproductie stroomsnelheden meetcampagne

Tijdens de T0 en T1 meetcampagnes zijn continu stroomsnelheden gemeten bij Frame A (zie Figuur 2.11). Figuur 2.15 toont tijdseries van de gemeten en de berekende dieptegemiddelde stroomsnelheden voor een deel van de meetcampagne. De fasering van de stroomsnelheden wordt door het model goed gereproduceerd. Voor twee dicht naast elkaar gelegen pieken in Figuur 2.15 geldt dat de eerste piek de ebstroming is en de tweede piek de vloedstroming. De amplitude van de ebstroming komt goed overeen met metingen tijdens doortij, maar wordt onderschat tijdens springtij. Dat de ebstroming onderschat wordt kan het gevolg zijn van het feit dat laagwaterstanden worden overschat. Een gelijk volume stroomt dan door een te grote waterdiepte, waardoor de stroomsnelheden kleiner zijn dan in metingen.

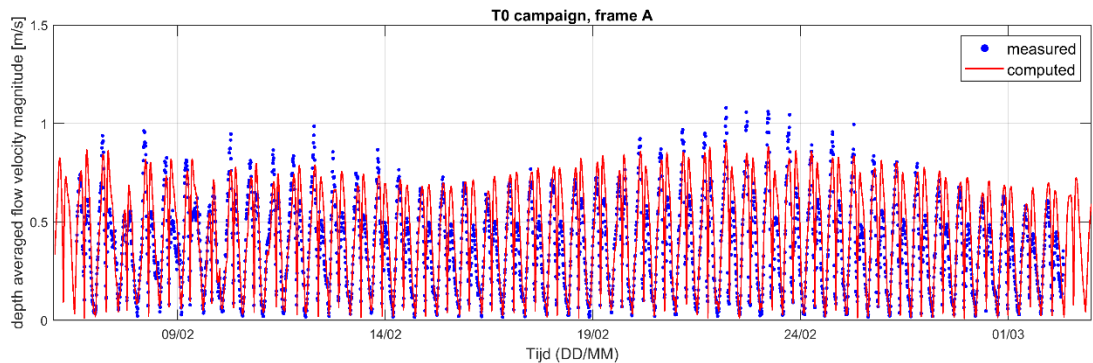
De vloedstroming wordt door het model gewoonlijk overschat. Het is niet precies duidelijk wat daarvan de oorzaak is. In de gemeten stroomsnelheden is een duidelijk verschil zichtbaar tussen de amplitude van de ebstroming (d.w.z. groter) en de amplitude van de vloedstroming (d.w.z. kleiner). In de modelresultaten is dat niet duidelijk het geval.



Figuur 2.15 Tijdseries van de gemeten en de berekende stroomsnelheden (diepte-gemiddeld) bij Frame A tijdens de T0 meetcampagne.

Wat betreft de laagwaterstanden bleek dat een verlaging van de bodemruwheid in het bekken gunstig is voor het reproduceren van de meetdata. Figuur 2.16 toont de diepte-gemiddelde stroomsnelheden die berekend zijn met een lagere bodemruwheid in vergelijking met de gemeten stroomsnelheden. Door de afname van de bodemruwheid neemt de amplitude van de berekende

stroomsnelheden toe, waardoor de gemeten stroomsnelheden minder goed gereproduceerd worden. Dat is ongunstig. Daarom kiezen we er voor om de bodemruwheid in het bekken op de originele waarde van $0.0227 \text{ s/m}^{1/3}$ te houden, ondanks dat de laagwaterstanden dan minder goed gereproduceerd worden. Een nauwkeurigere reproductie van de stroomsnelheden heeft namelijk de voorkeur.

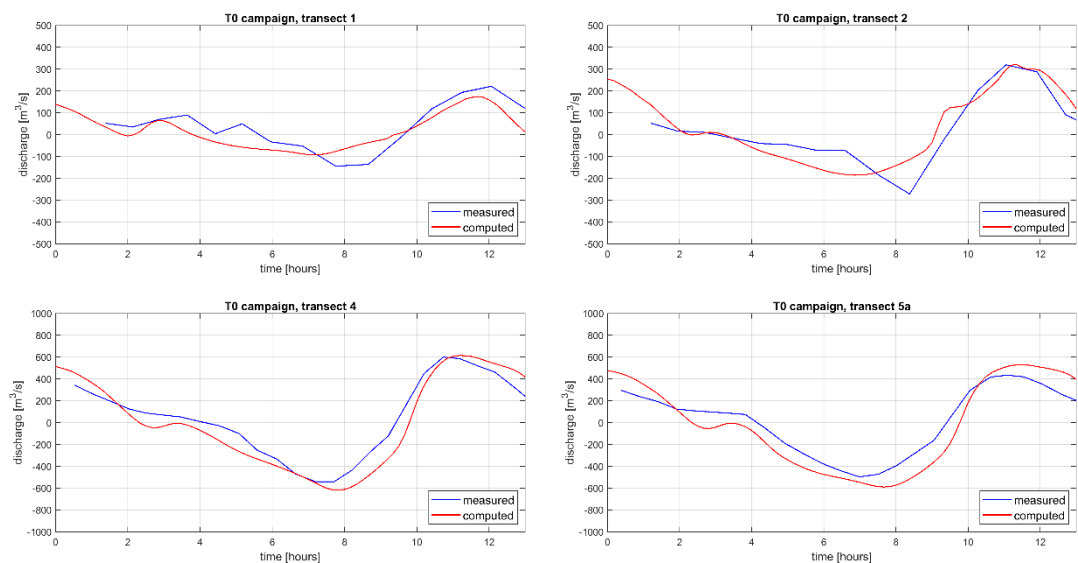


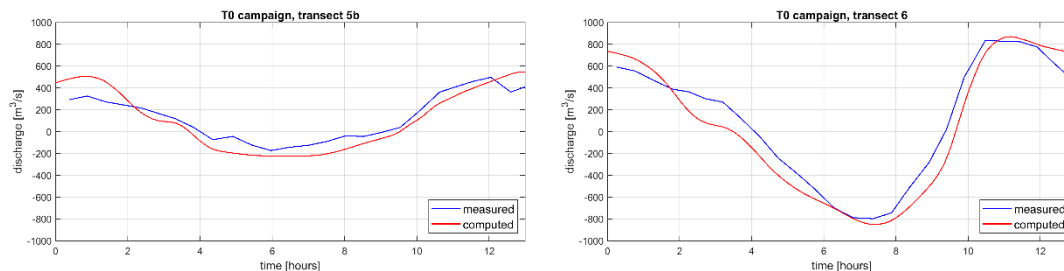
Figuur 2.16 Reproductie van de gemeten stroomsnelheden (diepte-gemiddeld) tijdens de T0 meetcampagne na verlaging van de bodemruwheid in het model.

2.3.4 Reproductie debietmetingen meetcampagne

Tijdens de T0- en T1 meetcampagnes zijn gedurende een getijperiode op verschillende raaien de debieten door de vaargeul bepaald. Op een aantal raaien kon door de kleine waterdiepte aan de rand van de vaargeul alleen het debiet door een deel van de vaargeul bepaald worden. De ingewonnen data is dan geëxtrapolerd zodat een tijdreeks van het debiet door de volle breedte van de vaargeul beschikbaar is (Perk, et al., 2019a). Ondanks dat de nauwkeurigheid van de data afneemt door de extrapolatie van metingen, ontstaat hierdoor een erg waardevolle dataset om modelresultaten mee te valideren.

Figuur 2.17 toont de gemeten en de berekende debieten door 6 raaien tijdens de T0 meetcampagne. De locaties van de raaien zijn weergegeven in Figuur 2.11. De berekende debieten komen goed overeen met de gemeten debieten. Zowel de fasering van de eb- en vloedstroming als de maximale debieten worden goed gereproduceerd.





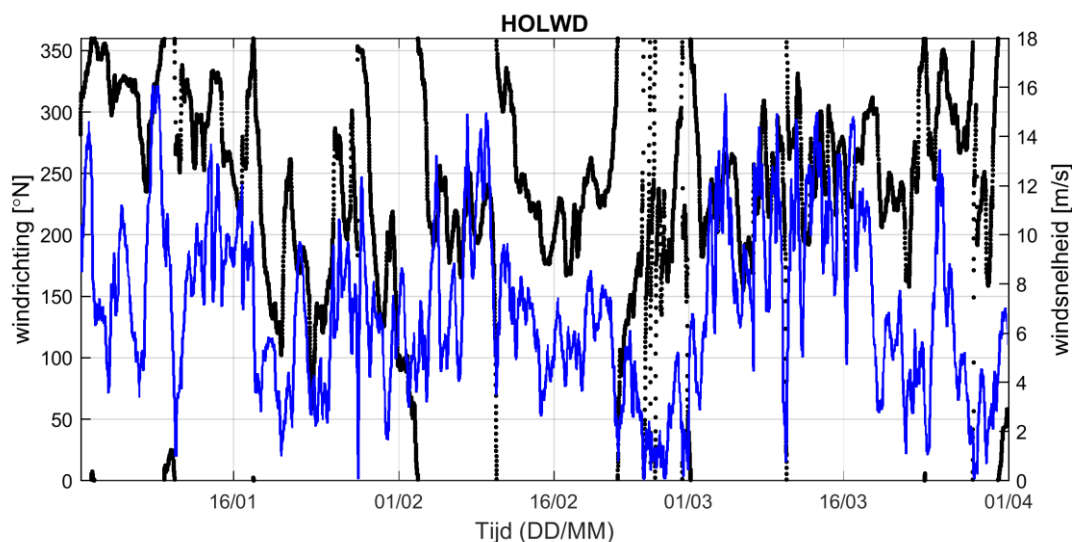
Figuur 2.17 Reproductie van de debieten door verschillende raaien in de vaargeul gedurende een getijperiode tijdens de T0 meetcampagne; de gemeten debieten zijn weergegeven in blauw en de berekende debieten zijn weergegeven in rood voor raai 1 (boven, links), raai 2 (boven, rechts), raai 4 (midden, links), raai 5a (midden, rechts), raai 5b (onder, links) en raai 6 (onder, rechts).

De gemeten debieten tijdens de T1 meetcampagne worden met een vergelijkbare nauwkeurigheid gereproduceerd. Dat is weergegeven in Bijlage A.3 voor de raaien die door de bochtafsnijding een aanzienlijk ander debiet afvoeren (d.w.z. raai 4, raai 5a en raai 5b).

2.4 Simulatieperiode en initiële condities

De simulatieperiode loopt van 1 januari 2019 tot 1 april 2019. Op 14 januari 2019 zijn de werkzaamheden voor de bochtafsnijding aangevangen en op 7 april 2019 is de bochtafsnijding officieel in gebruik genomen. De simulatieperiode is dus ongeveer gelijk aan de periode waarin de bochtafsnijding werd aangelegd.

De slibdynamiek is afhankelijk van de actuele condities (bijv. getij en meteorologische condities). Ter illustratie toont Figuur 2.18 de windcondities bij Holwerd tijdens de simulatieperiode. Hierin is een sterke variatie in windsnelheid te zien met vooral aan het einde van de simulatieperiode windsnelheden van 10-14 m/s gedurende lange tijd. Dit komt overeen met windkracht 6. Deze krachtige wind zorgt aan het eind van de simulatieperiode voor golven die meer slib opwoelen dan in de periode ervoor.



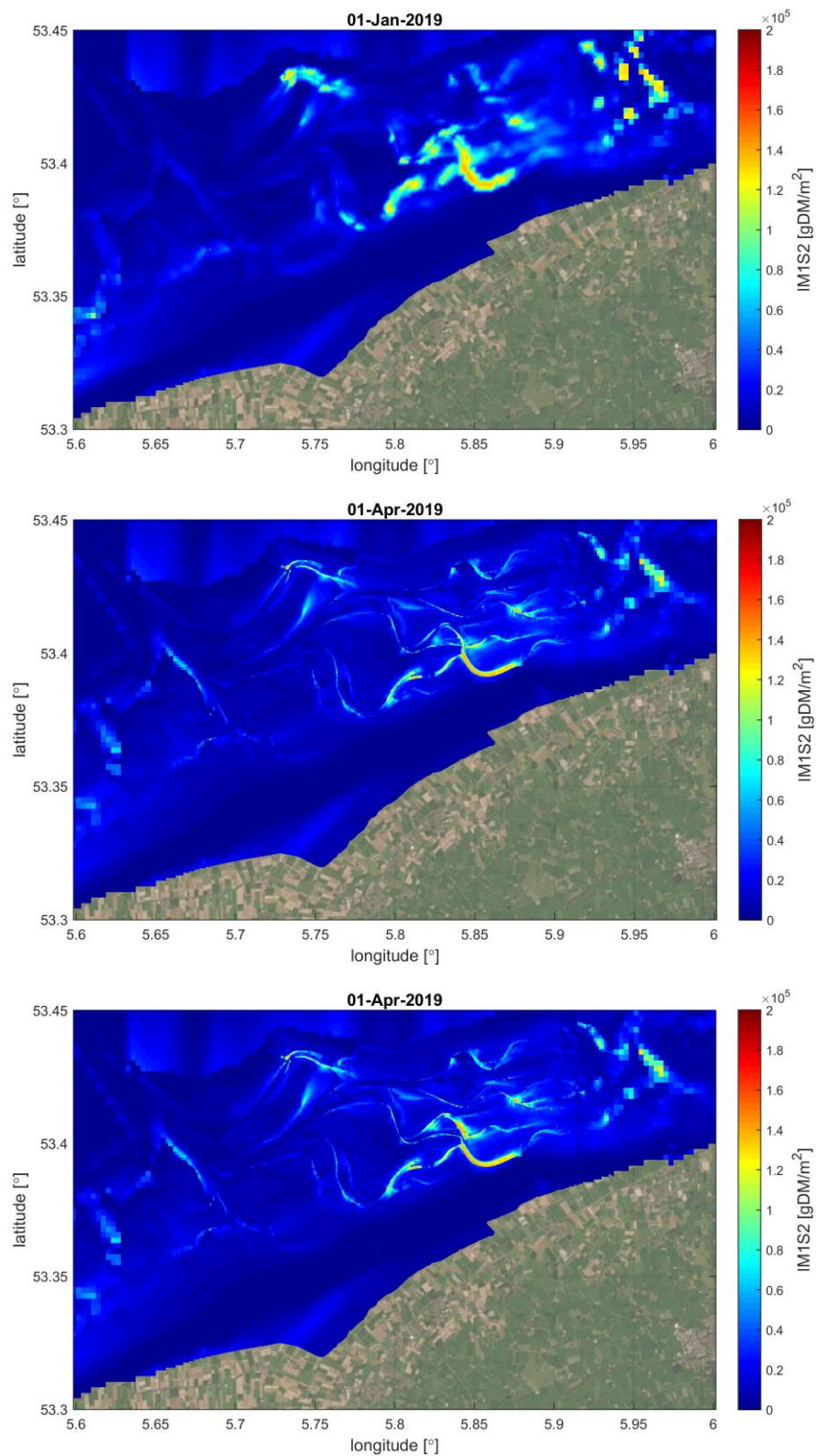
Figuur 2.18 Windcondities bij Holwerd tijdens de simulatieperiode. In zwart (linker as) is de windrichting aangegeven, in blauw (rechter as) is de windsnelheid aangegeven.

Om de effecten van de bochtafsnijding op de hydrodynamica en de slibdynamiek te analyseren en omdat de bochtafsnijding niet geleidelijk in de modelbodem kan worden aangebracht zijn twee modelsimulaties gedaan, n.l. één zonder bochtafsnijding en één met bochtafsnijding. Hierbij is gebruik gemaakt van gemeten bodemhoogtes van de vaarweg vlak voor en na de aanleg van de bochtafsnijding. De eerste bodem (T0) is gemeten in september 2018, de tweede (T1) in augustus 2019. Door alleen de bodemhoogte te veranderen kan het effect van de bochtafsnijding beter inzichtelijk gemaakt worden. Een alternatief zou zijn om de periode te simuleren die past bij het moment waarop de bodem werd gemeten. Veranderingen in de condities (bijv. getij en meteorologische condities) zouden het dan lastig maken om het effect van de veranderende bodemhoogte te onderscheiden van effecten die het gevolg zijn van de andere forcering.

Net als bij de modelvalidatie worden de effecten van de initiële condities geëlimineerd door een inspeelperiode van 10 dagen te gebruiken voor de waterbeweging. Als initiële condities voor saliniteit (bij de bodem en bij het wateroppervlak) en temperatuur worden ruimtelijk variërende velden opgelegd die het resultaat zijn van een inspeelsom van 1 jaar. Voor de initiële conditie voor slib in de bodem wordt gebruik gemaakt van de modelresultaten die zijn verkregen in het kader van KRW Slib (Vroom et al., 2020). In dat project is de verdeling van slib in de bodem ingespeeld door middel van een modelsimulatie van 3 jaar. De resolutie van die bodemdata is lager (d.w.z. 200 m x 200 m) dan de resolutie van het rekenrooster in de huidige studie (d.w.z. 25 m x 25 m). Om de verdeling van slib aan te passen aan de hogere resolutie wordt een inspeelperiode van 3 maanden gebruikt. De slibverdeling aan het eind van die drie maanden wordt vervolgens gebruikt als initiële conditie voor de modelsimulaties die in Hoofdstuk 4 worden besproken.

De ruimtelijke verdeling die is overgenomen uit het model van Vroom et al., (2020) hoort bij een bodemligging zoals voor de bochtafsnijding in de vaargeul, maar wordt gebruikt voor modelsimulaties met een bodemligging zoals voor en zoals na de bochtafsnijding. De inspeelperiode van 3 maanden wordt voor beide scenario's afzonderlijk toegepast. Figuur 2.19 toont de ruimtelijke verdeling van bodemslib (fractie IM1 in laag S2) aan het begin en aan het einde van de inspeelperiode van drie maanden. De ruimtelijke verdeling van fractie IM2 in laag S2 (niet weergegeven) is vergelijkbaar, alleen is de aanwezige massa een factor 3 tot 5 lager. In deze modelsimulaties wordt geen onderhoudsbaggeren toegepast. Er ligt daardoor veel slib in de vaargeul, met name in het deel bij Holwerd. Na de inspeelperiode van 3 maanden met de bodemligging zoals na de bochtafsnijding ligt er veel slib in de ebgeul.

De inspeelperiode voor slib in de bodem zorgt ervoor dat de resolutie van de verdeling van slib toeneemt. Daardoor zijn sterkere gradiënten zichtbaar in de ruimtelijke verdeling. Daarnaast kan de slibverdeling zich tijdens de inspeelperiode aanpassen aan de veranderde hydrodynamische condities ten gevolge van de roosterverfijning. Een voorbeeld van de veranderde hydrodynamische condities zijn de laagwaterstanden die beter gereproduceerd worden met een hogere modelresolutie, waardoor het dynamische evenwicht van de verdeling van bodemslib zal veranderen.



Figuur 2.19 Ruimtelijke verdeling van fractie IM1 in laag S2 aan het begin van de inspeelperiode (boven) en aan het einde van de inspeelperiode op hoge resolutie voor de T0 bodem (midden) en de T1 bodem (onder).

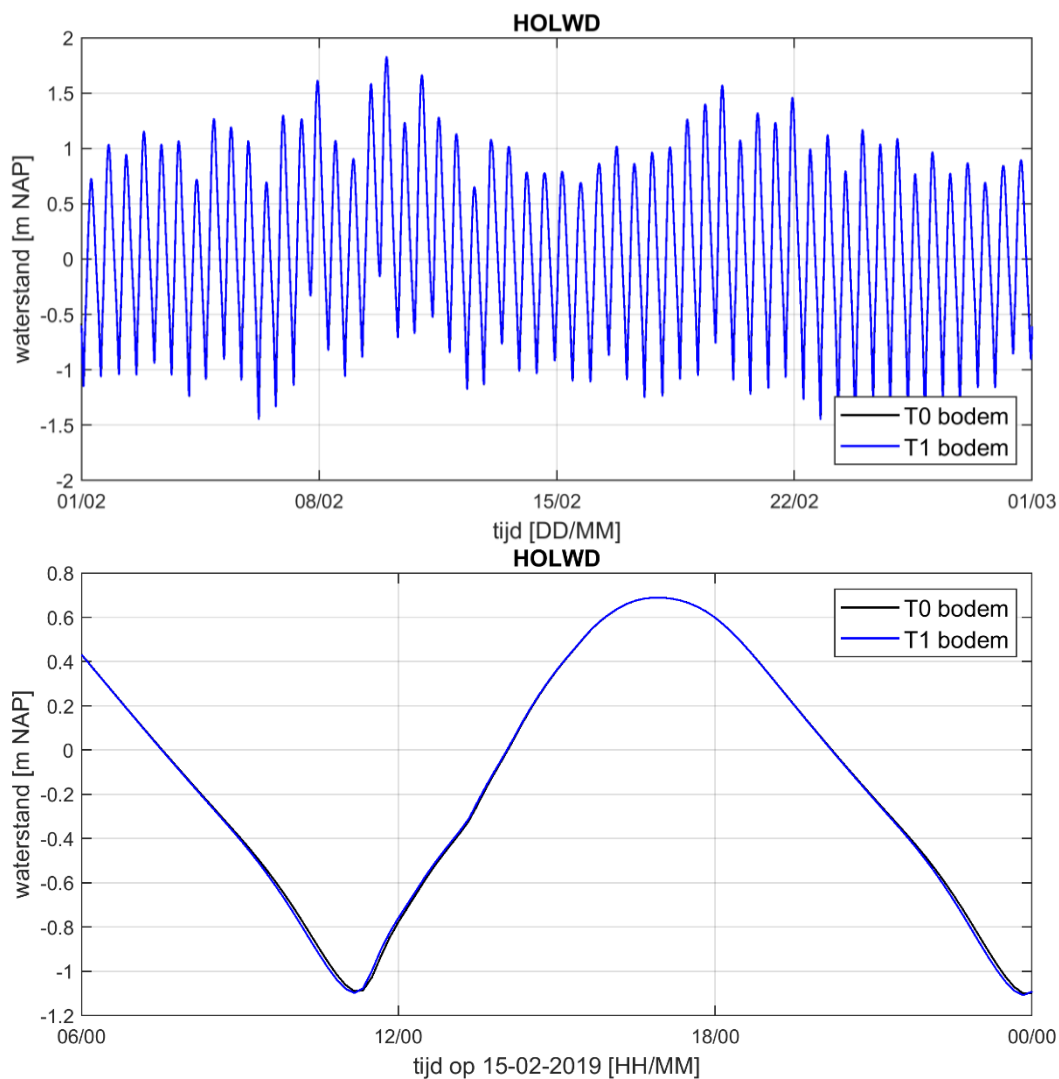
3 Hydrodynamische effecten bochtafsnijding

In dit hoofdstuk worden de hydrodynamische effecten van de bochtafsnijdingen besproken. De focus ligt daarbij op de waterstanden bij Holwerd (Paragraaf 3.1) en de stroomsnelheden (Paragraaf 3.2) en debieten (Paragraaf 3.3) in de vaargeul. Daarnaast zullen de huidige resultaten vergeleken worden met de resultaten van de prognoses in Grasmeijer & Rübke (2018).

3.1 Invloed bochtafsnijding op waterstanden

Voor de modelsimulaties met de T0 bodem en met de T1 bodem is de berekende waterstand bij Holwerd in februari 2019 weergegeven in Figuur 3.1. Pas als ingezoomd wordt op een kortere periode wordt het verschil in de berekende waterstand zichtbaar. De verandering in de berekende hoog- en laagwaterstanden is verwaarloosbaar klein. Wel is in Figuur 3.1 zichtbaar dat het moment van laagwater na de bochtafsnijding (T1 bodem) eerder is dan voor de bochtafsnijding (T0 bodem). Gemiddeld in de periode van 1 januari tot 1 april 2019 is het berekende moment van laagwater na de bochtafsnijding ongeveer 7 minuten eerder dan voor de bochtafsnijding. Het moment van hoogwater wordt nauwelijks beïnvloed, gemiddeld slechts enkele seconden.

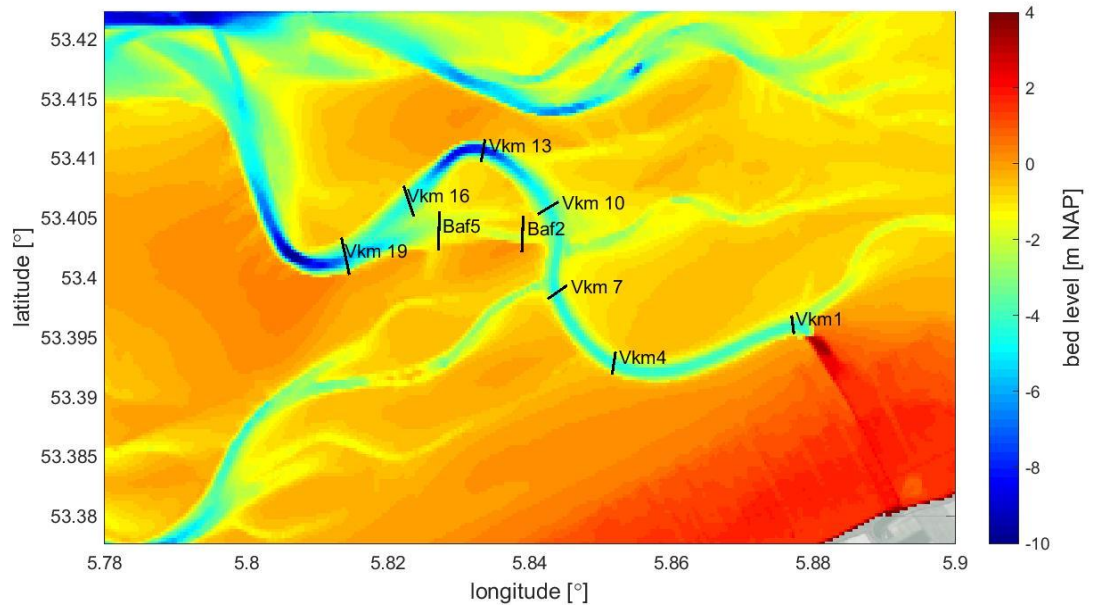
Door de bochtafsnijding neemt de tijd tussen hoogwater en laagwater af; de ebstroming duurt minder lang. Dat is in overeenstemming met wat verwacht werd, gezien de lengte van de geul door de bochtafsnijding korter is geworden. Over het algemeen geldt namelijk dat de ebstroming meer geconcentreerd is in de geulen, terwijl de vloedstroming voor een relatief groot deel over de platen gaat. Tijdens de vloedstroming is de waterstand namelijk hoger (vloedstroming treedt op bij opkomend tij). Hierdoor is wel een effect zichtbaar van de bochtafsnijding op het moment waarop laagwater optreedt (d.w.z. ebstroming duurt minder lang), maar niet op het moment waarop hoogwater optreedt (d.w.z. vloedstroming wordt nauwelijks beïnvloed).



Figuur 3.1 Tijdseries van de berekende waterstand bij Holwerd in modelsimulaties met de T0 bodem (september 2018) en de T1 bodem (augustus 2019) voor de maand februari 2019 (boven) en op 15 februari 2019 (onder).

3.2 Invloed bochtafsnijding op debieten

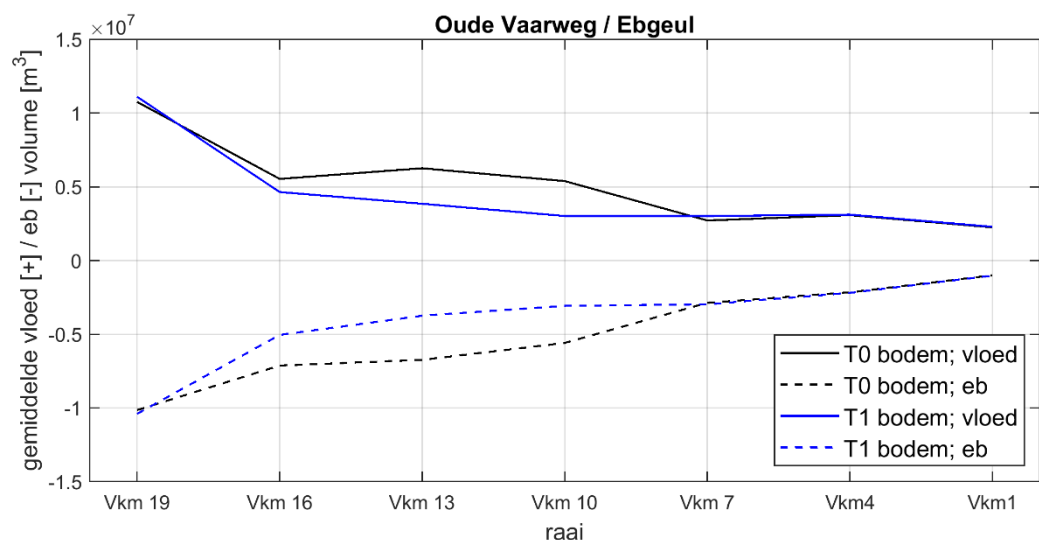
Door de bochtafsnijding verandert de verdeling van de debieten over de eb- en vloedgeul. Dit wordt besproken aan de hand van de berekende eb- en vloeddebieten door 9 raaien. Deze raaien zijn weergegeven in Figuur 3.2. Raai *Vkm19* ligt ten westen van de bochtafsnijding. Raaien *Vkm7*, *Vkm4* en *Vkm1* liggen ten oosten van de bochtafsnijding. Raaien *Vkm16* en *Vkm13* liggen in de ebgeul (d.w.z. de oude vaarweg). Raaien *Baf5* en *Baf2* liggen in de vloedgeul (d.w.z. de nieuwe vaarweg). Tijdseries van de debieten in de maand februari 2019 door de raaien die zijn weergegeven in Figuur 3.2 zijn opgenomen in Bijlage A.4.



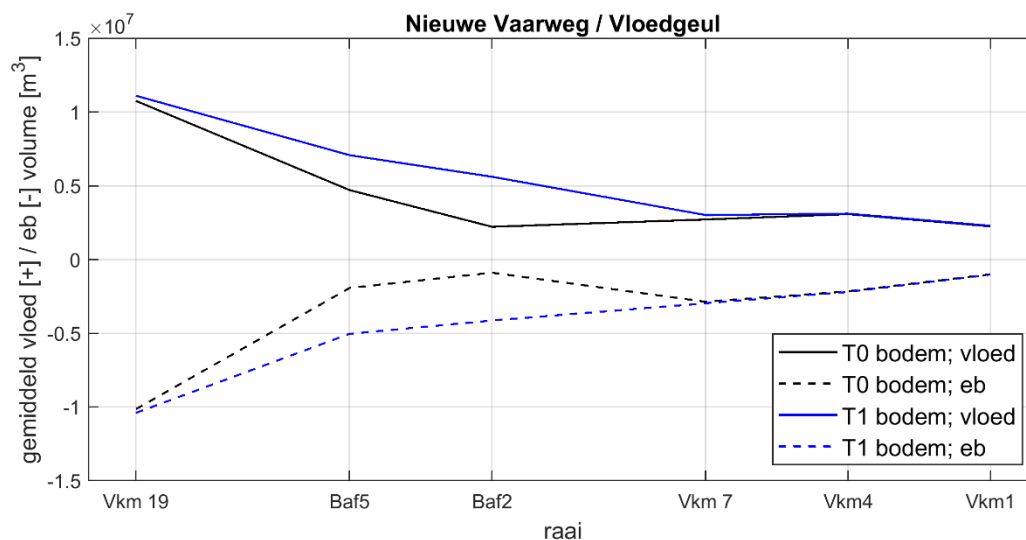
Figuur 3.2 Locaties en afkortingen van raaien die worden gebruikt om de stromingsdebieten door de vaargeul te analyseren. De weergegeven bodemhoogte is de T0 bodem.

Vkm = Vaarwegkilometer, Baf = Bochtafsnijding.

Voor elk van de raaien kan het cumulatieve debiet bepaald worden dat tijdens een getijperiode in eb- en in vloedrichting stroomt. In Figuur 3.3 zijn de gemiddelde cumulatieve eb- en vloeddebieten per raai weergegeven voor de debietraaien in de oude vaarweg, voor de T0 situatie en voor de T1 situatie. In Figuur 3.4 is diezelfde informatie weergegeven voor de debietraaien in de nieuwe vaarweg. Ten westen (d.w.z. raai Vkm19) en ten oosten (d.w.z. raaien Vkm7, Vkm4 en Vkm1) veranderen de eb- en vloeddebieten bijna niet. Zowel de cumulatieve eb- als de cumulatieve vloeddebieten door de oude vaargeul nemen af ten gevolge van de bochtafsnijding. Afhankelijk van welke raai wordt bekeken gaat het om een afname van 30 tot 60%. De afname is het sterkst in het oorspronkelijk diepste deel van de ebgeul (Vkm 13).



Figuur 3.3 Gemiddeld volume dat gedurende een getijperiode door de debietraaien in de oude vaarweg stroomt in vloedrichting (getrokken lijn) en in ebrichting (gestippelde lijn) in de periode van 1 januari 2019 tot 1 april 2020. Zwarte lijnen tonen de T0 situatie en blauwe lijnen tonen de T1 situatie.



Figuur 3.4 Gemiddeld volume dat gedurende een getijperiode door de debietraaien in de nieuwe vaarweg stroomt in vloedrichting (getrokken lijn) en in ebrichting (gestippelde lijn) in de periode van 1 januari 2019 tot 1 april 2020. Zwarte lijnen tonen de T0 situatie en blauwe lijnen tonen de T1 situatie.

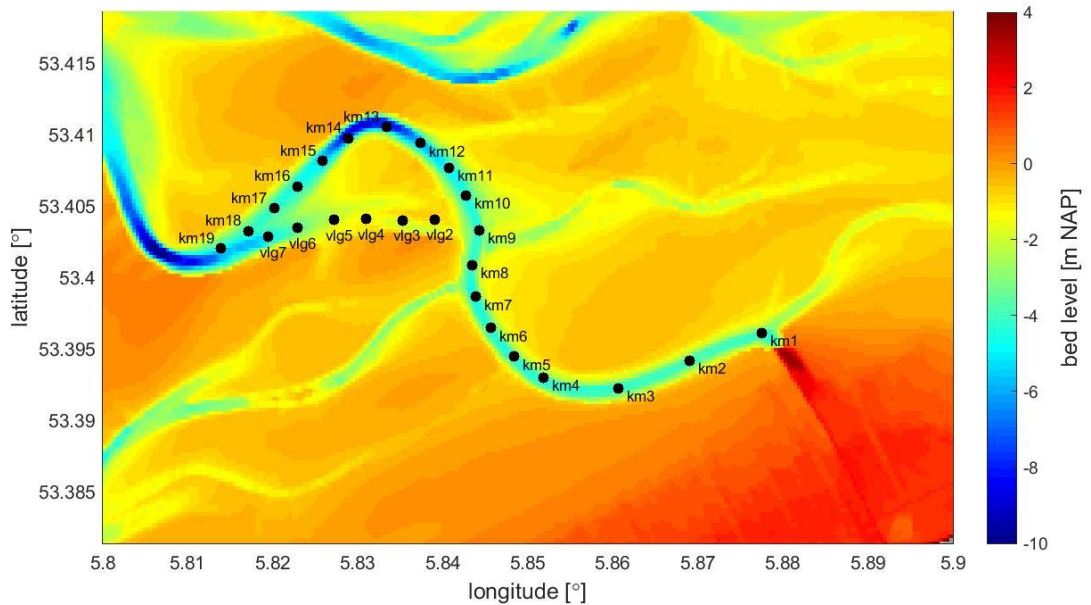
Het debiet dat na de bochtafsnijding niet meer door de ebgeul stroomt, stroomt dan door de vloedgeul. In de T0 situatie waren de debieten door de vloedgeul relatief klein, met name tijdens de ebstroming. Na de bochtafsnijding heeft de vloedgeul een groot deel van het debiet door de ebgeul overgenomen, waardoor het debiet door de vloedgeul zowel tijdens de ebstroming als tijdens de vloedstroming groter is dan het debiet door de ebgeul.

De afname van de debieten door de ebgeul van 30 tot 60% is ongeveer gelijk aan de afname die werd berekend door Grasmeijer & Rübke (2018) in hun variant C (met bochtafsnijding waarbij de ebgeul nog tot NAP-3.4 m op diepte wordt gehouden). Op basis hiervan mag worden geconcludeerd dat de voorspellingen voldoende betrouwbaar waren.

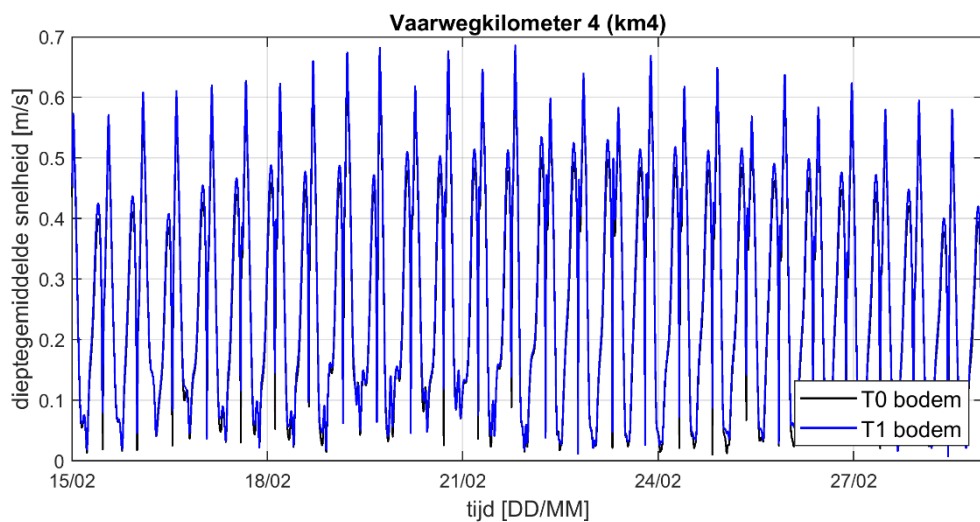
3.3 Invloed bochtafsnijding op stroomsnelheden

In deze paragraaf zullen de effecten van de bochtafsnijding op de stroomsnelheden in de vaargeul op een vergelijkbare manier worden besproken als in de vorige paragraaf gedaan is voor de debieten. In Figuur 3.5 zijn de observatiepunten in de vaargeul weergegeven die voor de analyses worden gebruikt. Tijdseries van de berekende stroomsnelheden op al deze observatiepunten zijn opgenomen in Bijlage A.5. Tijdseries van een aantal representatieve punten in verschillende delen van de vaargeul zijn opgenomen in Figuur 3.6 (km4), Figuur 3.7 (km13), Figuur 3.8 (vlg4) en Figuur 3.9 (km19).

De gevolgen van de bochtafsnijding op de stroomsnelheden in het deel van de vaargeul bij Holwerd zijn relatief klein. De vloedstroming verandert vrijwel niet. De pieksnelheid tijdens de ebstroming neemt iets toe ten gevolge van de bochtafsnijding. Dit is ook te zien in Figuur 3.10 en Figuur 3.11, waarin de gemiddelde pieksnelheden in eb- en vloedrichting tijdens de simulatieperiode zijn uitgezet tegen de locatie in de geul voor respectievelijk de oude vaargeul en de nieuwe vaargeul. De gemiddelde pieksnelheid tijdens eb neemt iets toe tussen km1 en km6 voor simulaties met de T0 bodem.



Figuur 3.5 Locaties en naamgeving van observatiepunten in de vaargeul die worden gebruikt om stroomsnelheden in de vaargeul te analyseren. De weergegeven bodemhoogte is de T0 bodem.

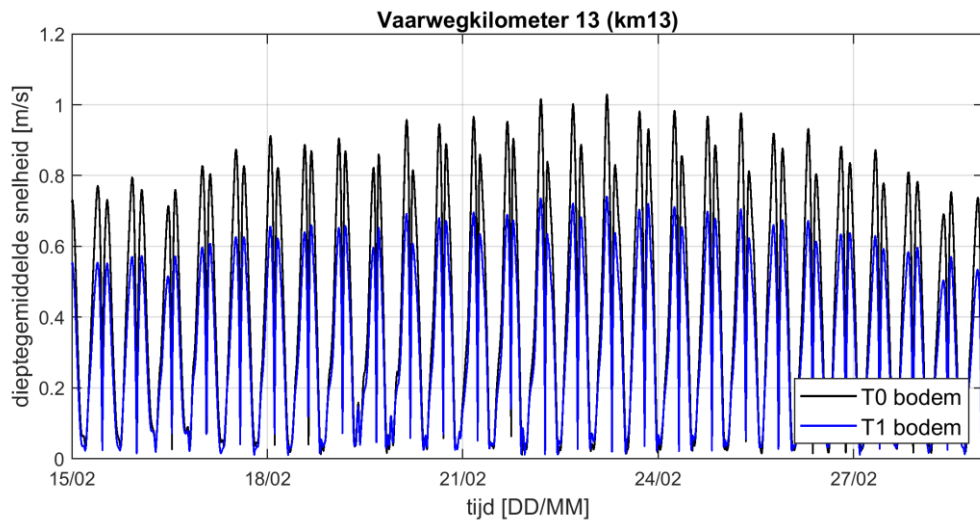


Figuur 3.6 Tijdsreeks van de berekende snelheden bij observatiepunt km4 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).

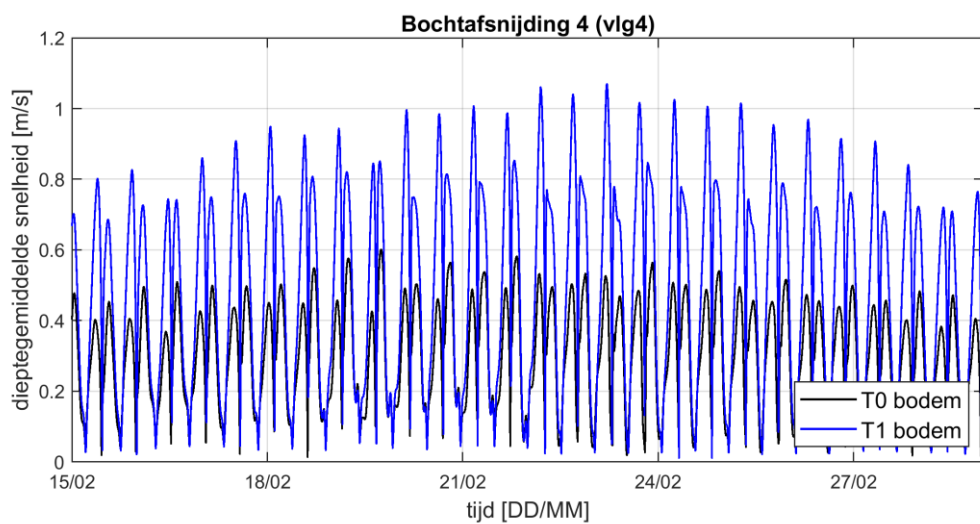
In de oude vaargeul (ebgeul) neemt de grootte van de snelheid af tijdens de vloed- en tijdens de ebstroming. De afname in stroomsnelheden is in overeenstemming met de afname van het debiet dat na de bochtafsnijding door de ebgeul stroomt. In de tijdsreeks voor de ebgeul in Figuur 3.7 is te zien dat voor de bochtafsnijding de pieksnelheden tijdens eb groter zijn dan de pieksnelheden tijdens vloed. Dit impliceert dat de geul eb-dominant is (d.w.z. de stroming heeft meer transportcapaciteit tijdens de ebstroming dan tijdens de vloedstroming). Die eb-dominantie is minder duidelijk aanwezig na de bochtafsnijding.

Door de bochtafsnijding nemen de stroomsnelheden in de vloedgeul toe. Omdat de toename in de stroomsnelheden groter is tijdens eb dan tijdens vloed verandert de geul van een vloed-dominante geul in een eb-dominante geul. Dit is terug te zien in Figuur 3.8 en in Figuur 3.11. Hieruit blijkt dat

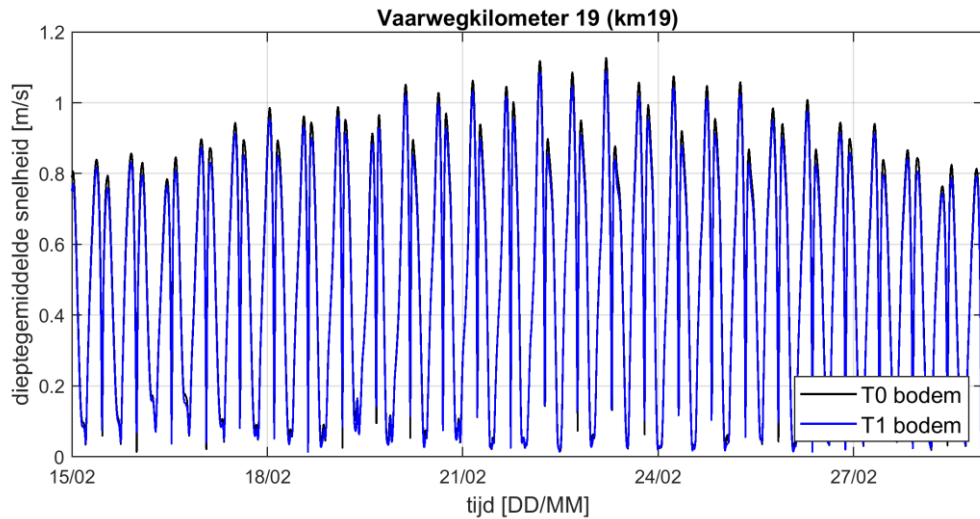
de oorspronkelijke vloedgeul na de bochtafsnijding ook fungeert als ebgeul. Zonder baggeronderhoud verwachten we dat de bochtafsnijding ook weer zal uitbochten en zal de cyclus opnieuw beginnen. Als de vloedgeul op de huidige positie wordt onderhouden dan wordt daarmee de geulpositie vastgelegd en de geulmigratie onderdrukt.



Figuur 3.7 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt km13 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).

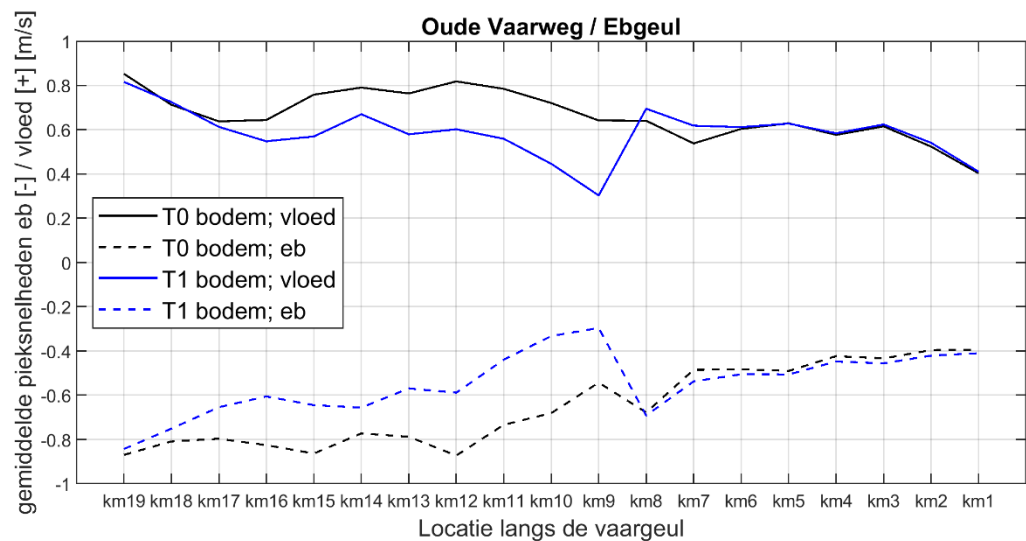


Figuur 3.8 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt vlg4 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).

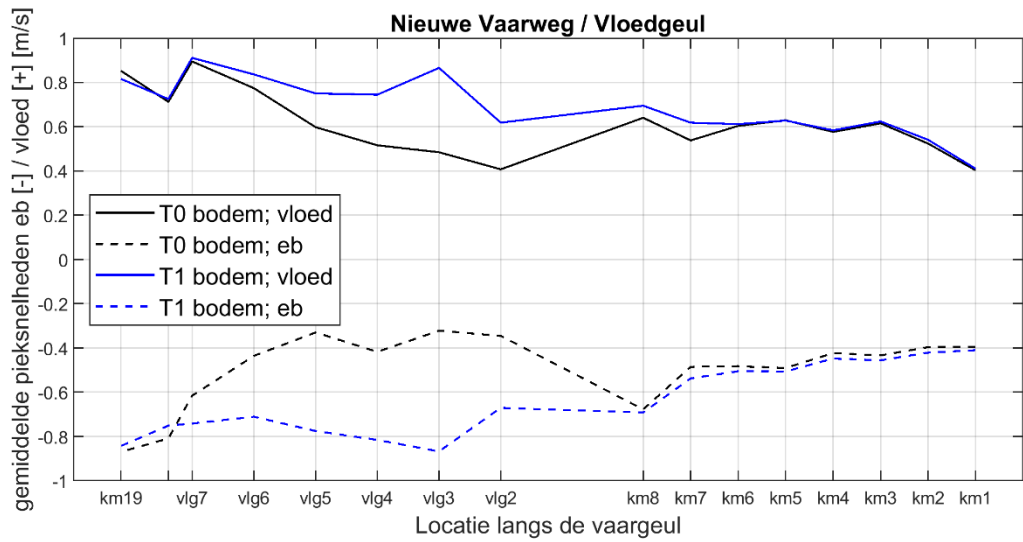


Figuur 3.9 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt km19 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).

Ten westen van de bochtafsnijding (d.w.z. bij km19, zie Figuur 3.9), is geen duidelijk effect te zien van de bochtafsnijding op de stroomsnelheden. De bochtafsnijding heeft dus een duidelijk effect op de stroomsnelheden in de oorspronkelijke eb- en vloedgeul, met name ten gevolge van de herverdeling van de eb- en vloedebieten over de twee geulen. Ten oosten van de bochtafsnijding is een klein effect te zien tijdens eb, namelijk een toename van de pieksnelheden. Op basis van deze resultaten is ten westen van de bochtafsnijding geen duidelijk effect te zien op de stroomsnelheden. Dit komt overeen met de resultaten van Grasmeyer & Rübke (2018).



Figuur 3.10 Gemiddelde pieksnelheden bij observatiepunten in de oude vaarweg in vloedrichting (getrokken lijnen) en in ebrichting (gestippelde lijnen) in de periode van 1 januari 2019 tot 1 april 2020. Zwarte lijnen tonen de T0 situatie en blauwe lijnen tonen de T1 situatie. De locaties van de observatiepunten zijn weergegeven in Figuur 3.5.



Figuur 3.11 Gemiddelde pieksnelheden bij observatiepunten in de nieuwe vaarweg (vloedgeul) in vloedrichting (getrokken lijnen) en in ebrichting (gestippelde lijnen) in de periode van 1 januari 2019 tot 1 april 2020. Zwarte lijnen tonen de T0 situatie en blauwe lijnen tonen de T1 situatie. De locaties van de observatiepunten zijn weergegeven in Figuur 3.5.

4 Effecten bochtafsnijding op slibdynamiek en baggeronderhoud

4.1 Effecten op aanslibbing en erosie

De effecten van de bochtafsnijding op de slibdynamiek zijn berekend voor de periode van 1 januari 2019 tot 1 april 2019 (zie paragraaf 2.4). Er zijn twee simulaties gedaan, n.l. één zonder bochtafsnijding (T0 bodem) en één met bochtafsnijding (T1 bodem). In deze paragraaf worden verschillen in de ruimtelijke patronen van aanslibbing en erosie besproken.

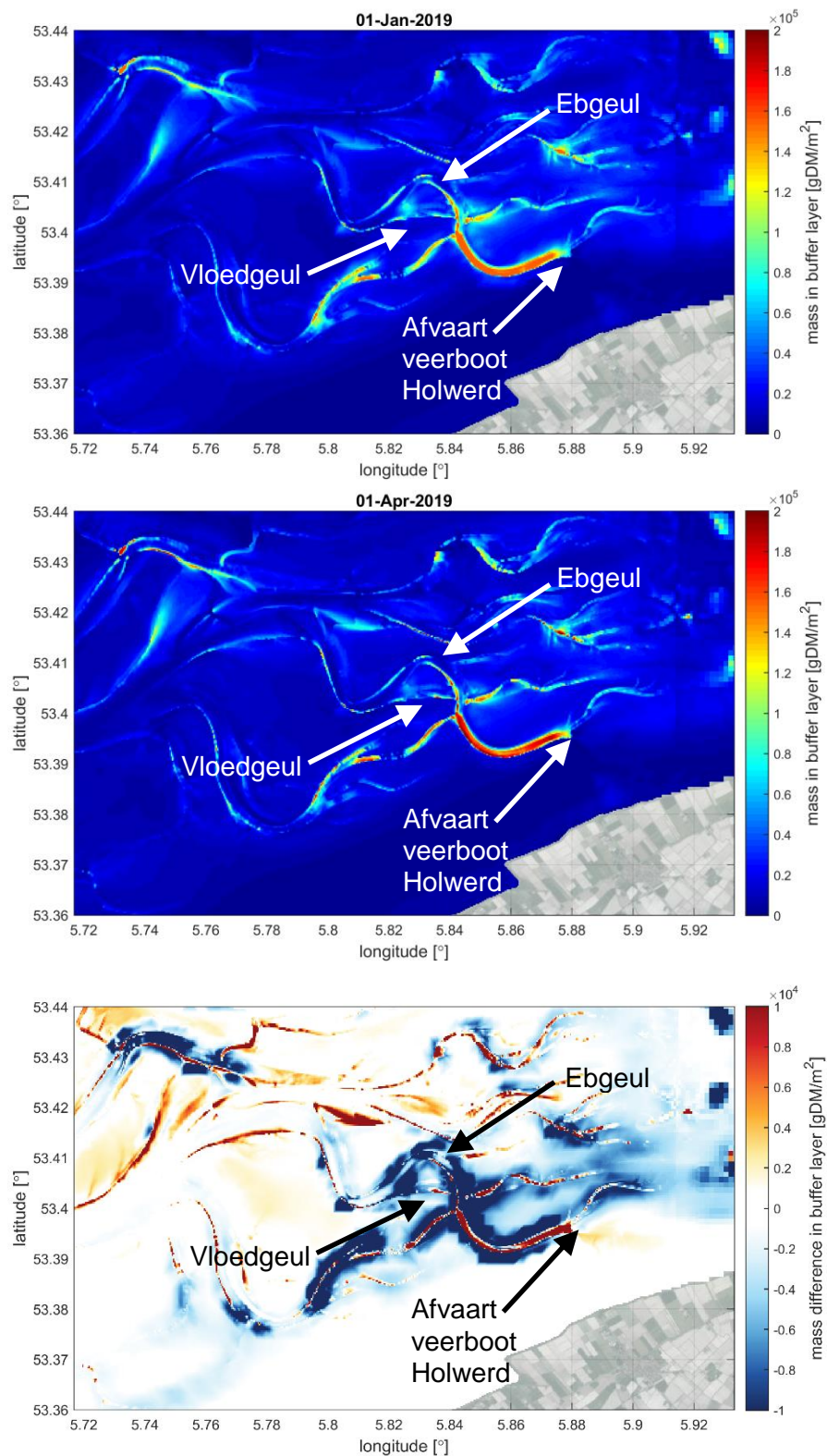
4.1.1 Aanslibbing en erosie zonder bochtafsnijding

Voor de simulatie zonder bochtafsnijding (T0 bodem) toont Figuur 4.1 de massa in de bufferlaag (S2) aan het begin van de modelsimulatie (boven), aan het einde van de modelsimulatie van drie maanden (midden) en het verschil in massa tussen het begin en het einde van de modelsimulatie (onder). Het merendeel van het slib in de bodem zit in de bufferlaag; de massa slib in de flufflaag (S1) is ongeveer 10% van de massa in de bufferlaag. In Figuur 4.1 is duidelijk te zien dat de meeste aanslibbing plaatsvindt in de vaargeul vanaf de afvaart van de veerboot bij Holwerd. Er treedt ook aanslibbing op in bepaalde delen van de ebgeul en van de vloedgeul. Andere delen van de eb- en vloedgeul eroderen. Langs de vaargeul is erosie van slib op de intergetijdeplaten te zien. De erosie van de intergetijdeplaten wordt veroorzaakt door de betrekkelijk ruwe condities in het laatste deel van de simulatieperiode (zie paragraaf 2.4). In die periode erodeert slib van de ondiepe platen. Een groot deel van dat materiaal komt vervolgens in de geulen terecht.

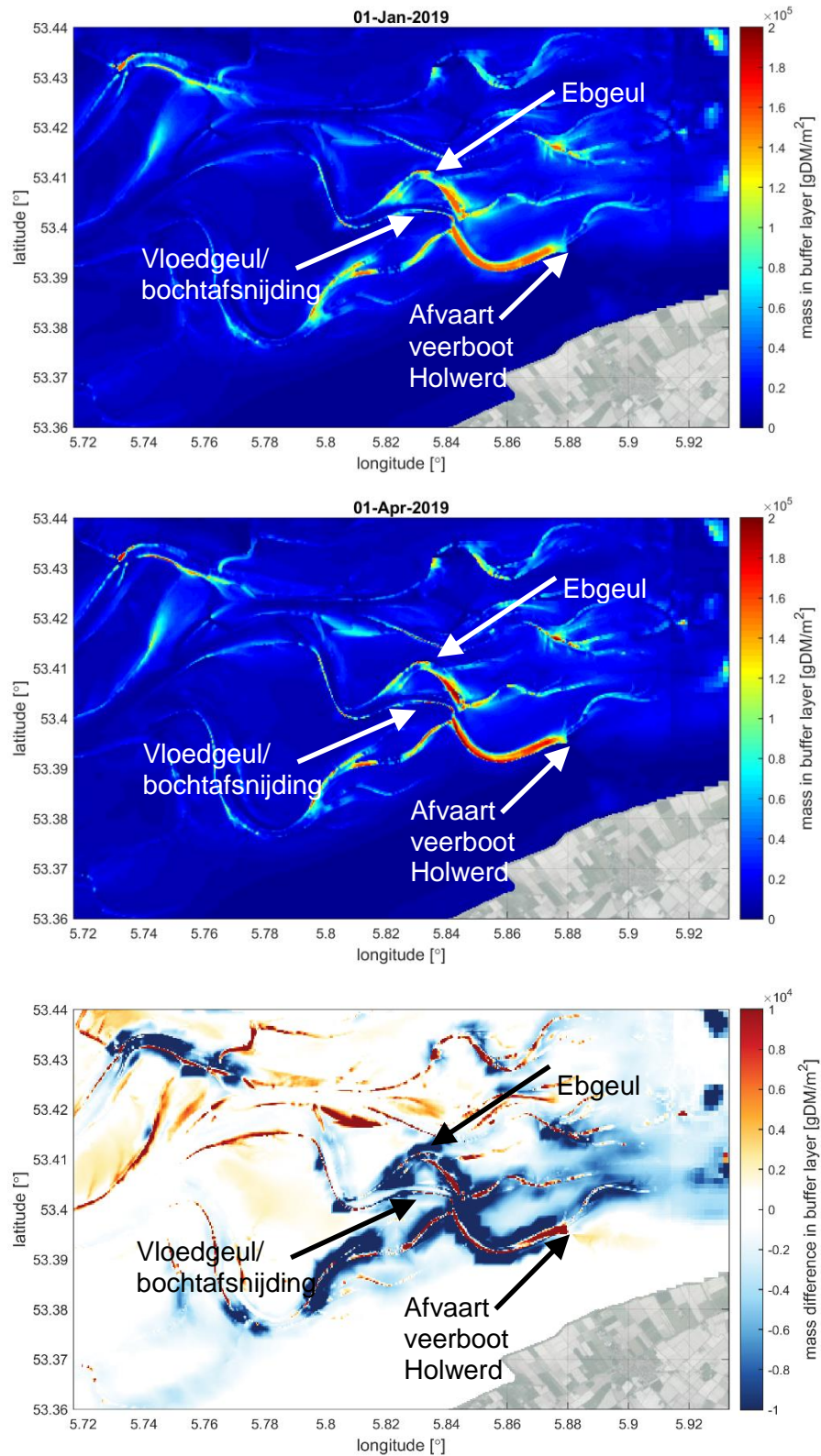
4.1.2 Aanslibbing en erosie met bochtafsnijding

Voor de simulatie met bochtafsnijding (T1 bodem) toont Figuur 4.2 de massa in de bufferlaag S2 aan het begin van de modelsimulatie (boven), aan het einde van de modelsimulatie van drie maanden (midden) en het verschil in massa tussen het begin en het einde van de modelsimulatie (onder). Ook hier vindt de meeste aanslibbing plaats in de vaargeul vanaf de afvaart van de veerboot bij Holwerd en er vindt erosie plaats op de intergetijdeplaten eromheen. Het is op basis van deze figuren lijkt de aanslibbing in de vaargeul bij Holwerd geringer. Hier gaan we in de volgende paragraaf verder op in. Een belangrijk verschil met de resultaten in Figuur 4.1 is dat er nu meer aanslibbing optreedt in de oorspronkelijke ebgeul, terwijl de gebaggerde vloedgeul/bochtafsnijding minder aanslibbing laat zien dan in de situatie zonder bochtafsnijding (vergelijk Figuur 4.2 met Figuur 4.1). Dit is consistent met de eerder voorspelde effecten van de bochtafsnijding (Grasmeijer & Rübke, 2018).

Uit een vergelijking tussen Figuur 4.1 en Figuur 4.2 volgt ook dat het effect van de bochtafsnijding lokaal optreedt. Verder naar het westen in de vaargeul (d.w.z. richting Nes) en in het overige deel van kombergingsgebied zijn de patronen van aanslibbing en erosie erg vergelijkbaar voor en na de bochtafsnijding.



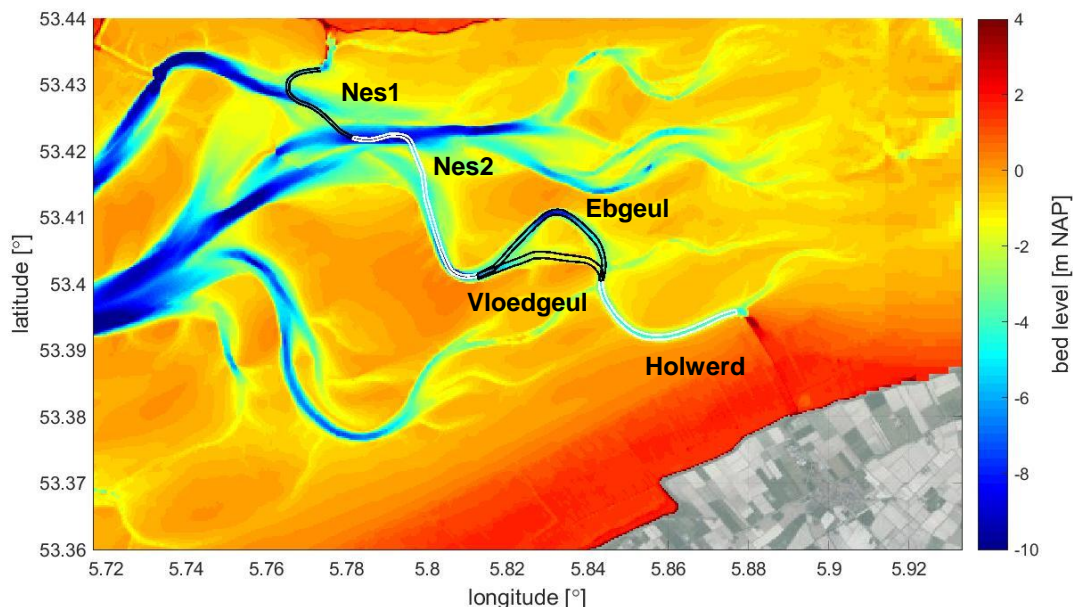
Figuur 4.1 Massa in de bufferlaag aan het begin van de modelsimulatie (boven), aan het einde van de modelsimulatie van drie maanden (midden) en het verschil in massa tussen het begin en het einde van de modelsimulatie (onder) met de T0 bodem (d.w.z. bodemligging zoals voor de bochtafsnijding).



Figuur 4.2 Massa in de bufferlaag aan het begin van de modelsimulatie (boven), aan het einde van de modelsimulatie van drie maanden (midden) en het verschil in massa tussen het begin en het einde van de modelsimulatie (onder) met de T1 bodem (d.w.z. bodemligging zoals na de bochtafsnijding (augustus 2019)).

4.2 Aanslibbing in de vaargeul zonder baggeronderhoud

Na de kwalitatieve vergelijking van aanslibbing en erosie in de vorige paragraaf worden in deze paragraaf de kwantitatieve sedimentatie en erosie in vijf verschillende vakken langs de vaargeul besproken (Figuur 4.3). De vaargeul wordt daarvoor opgesplitst in het deel bij Holwerd, de ebgeul en de vloedgeul en de twee noordwestelijker gelegen delen die Nes1 en Nes2 zijn genoemd. Tijdsreeksen van de berekende sedimentatie en erosie in de delen Nes1 en Nes2 zijn opgenomen in Bijlage A.6 van dit rapport. In dit hoofdstuk worden de aanslibbing en erosie in de delen Holwerd, Ebgeul en Vloedgeul verder besproken.



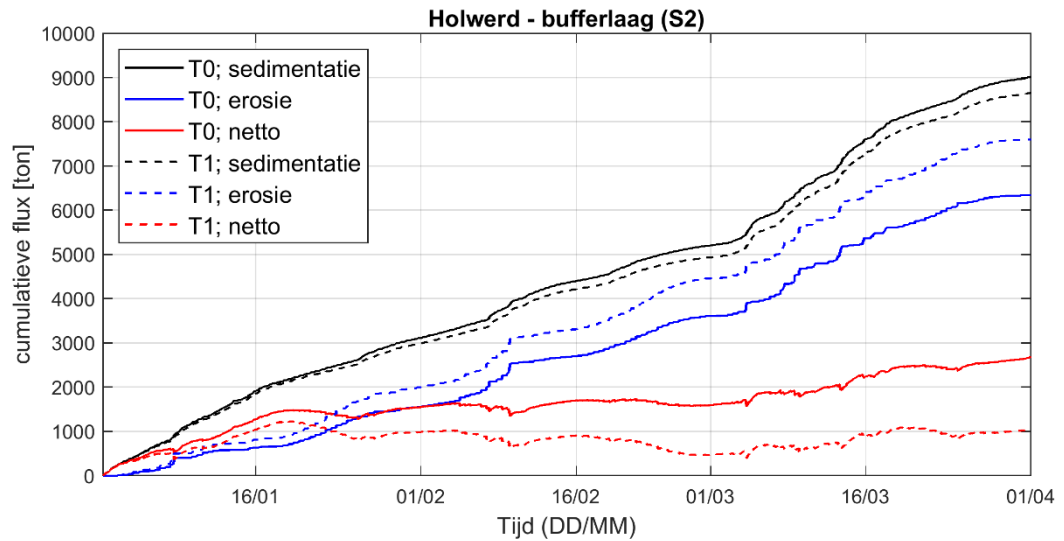
Figuur 4.3 Locaties en naamgeving van vijf vakken die worden gebruikt om de aanslibbing en erosie in de vaargeul te analyseren. De weergegeven bodemhoogte is de T0 bodem.

Figuur 4.4 toont de berekende cumulatieve bruto sedimentatie (zwart), bruto erosie (blauw) en het netto effect (rood) in het vak Holwerd. De getrokken lijnen tonen de waarden zonder bochtafsnijding (T0 bodem) en de gestippeld lijnen die met bochtafsnijding (T1 bodem). Deze figuur toont een sterke cumulatieve bruto sedimentatie van ongeveer 9000 ton na een simulatieperiode van drie maanden voor de T0 bodem. Met ongeveer 8700 ton is de cumulatieve bruto sedimentatie iets minder hoog voor de T1 bodem. In dit vak Holwerd vindt ook erosie plaats van ongeveer 6200 ton na drie maanden voor de T0 bodem en ongeveer 7700 ton voor de T1 bodem. Dit leidt netto tot ongeveer 2800 ton sedimentatie voor de T0 bodem en voor de T1 bodem is de netto sedimentatie 1000 ton. Met de T1 bodem is dus netto minder sedimentatie in de vaargeul bij Holwerd dan met de T0 bodem.

Het baggervak Holwerd-VA33 komt redelijk goed overeen met het vak Holwerd dat hier wordt gebruikt. In de periode van januari 2018 t/m juni 2020 werd hier gemiddeld 74 duizend m³ sediment per maand gebaggerd (zie Bijlage A.7). Uitgaande van een dichtheid van 0,4 ton/m³ komt dit neer op gemiddeld bijna 30 duizend ton per maand. De bruto sedimentatie die volgt uit de modelsimulaties is ongeveer 3 duizend ton per maand. De aanslibbing in het model (uitgaande van de T0 situatie) is daarmee veel lager dan het uitgevoerde baggeronderhoud. De mogelijke oorzaken daarvan worden besproken in Hoofdstuk 5.

Er zijn twee redenen waarom de netto aanslibbing in de vaargeul bij Holwerd voor de T1 bodem lager is dan voor de T0 bodem. De eerste reden is dat de hydrodynamische condities zijn veranderd. In Hoofdstuk 3 werd aangetoond dat de pieksnelheden tijdens eb iets toenemen ten

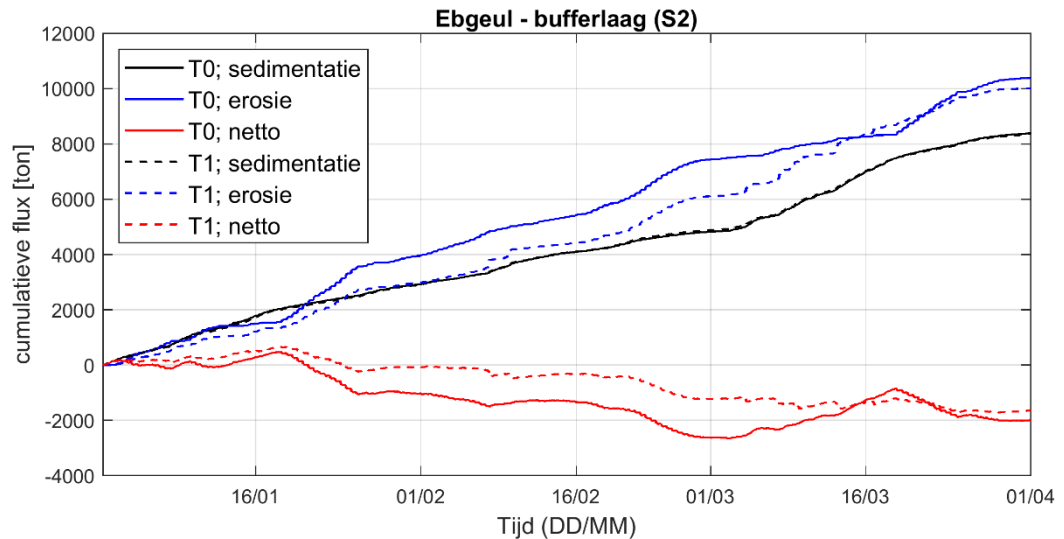
gevolge van de bochtafsnijding. Hierdoor neemt de bruto erosie toe, wat zal leiden tot minder netto aanslibbing. De tweede reden is dat er in dit deel van de vaargeul minder aanbod van slib is omdat dit zich elders heeft afgezet, deels in de oude ebgeul (zie hieronder). Mede door deze verlaging van het aanbod is de bruto sedimentatie bij Holwerd voor de T1 bodem kleiner.



Figuur 4.4 Tijdsreeks van de cumulatieve sedimentatie naar de bufferlaag (in zwart), de cumulatieve erosie vanuit de bufferlaag (in blauw) en de massaverandering van de bufferlaag ten opzichte van het begin van de modelsimulatie (in rood) in de vaargeul bij Holwerd (zie Figuur 4.3). De T0 situatie is weergegeven met een getrokken lijn en de T1 situatie is weergegeven met een gestippelde lijn.

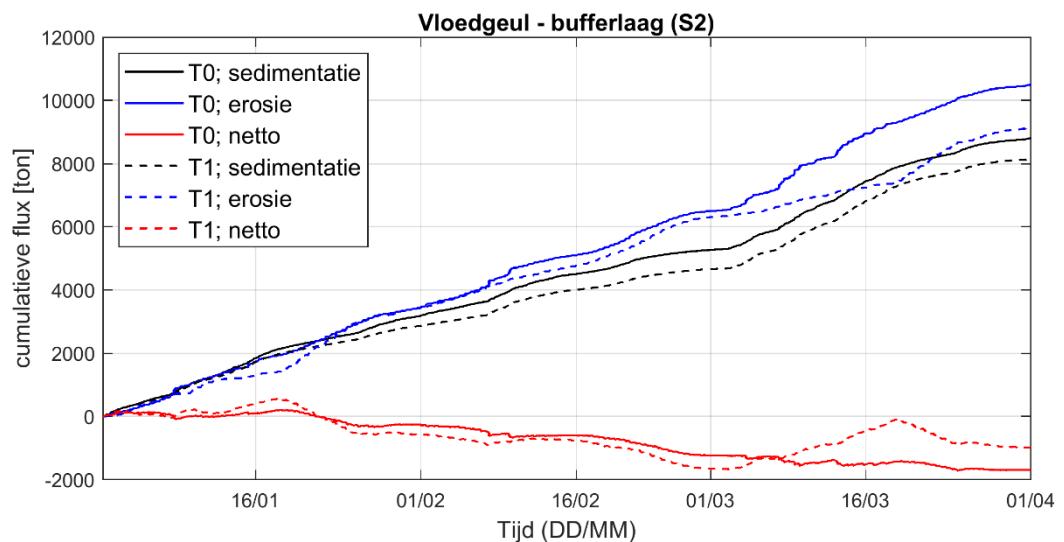
Figuur 4.5 toont de berekende cumulatieve bruto sedimentatie (zwart), bruto erosie (blauw) en het netto effect (rood) in het vak Ebgeul. Deze figuur toont een bruto sedimentatie van ruim 8000 ton na drie maanden tijd voor zowel de T0 als de T1 bodem. De erosie is met ruim 10.000 ton na drie maanden hoger dan de bruto sedimentatie. Dit leidt daarom netto tot ongeveer 2000 ton erosie in het vak Ebgeul. Voor de T1 bodem is deze erosie aan het einde van de simulatieperiode iets kleiner. Over de eerste twee maanden van de simulatieperiode zijn de verschillen duidelijker en is de erosie in de ebgeul na de bochtafsnijding (T1 bodem) duidelijk kleiner dan voor de bochtafsnijding (T0 bodem). Er wordt door de bochtafsnijding dus minder sediment opgepakt in de ebgeul waardoor er minder aanbod van slib dichterbij Holwerd is.

Het is in Figuur 4.5 opvallend dat er netto relatief weinig effect lijkt te zijn van de bochtafsnijding. Dit heeft echter te maken met de gekozen lengte van het vak en de verdeling van sedimentatie en erosie in het vak voor de T0 bodem en de T1 bodem. Wanneer de voorgaande Figuur 4.2 (T1 bodem) wordt vergeleken met Figuur 4.1 (T0 bodem) dan is te zien dat er voor de T1 bodem meer sedimentatie plaatsvindt in het oostelijke deel van de ebgeul maar tegelijk meer erosie in het westelijke deel. De cumulatieve erosie en aanslibbing van het vak Ebgeul zijn dus weinig veranderd, maar de plekken in het vak met erosie en aanslibbing zijn wel verplaatst. Deze effecten hebben netto weinig effect voor de slibbalans in het hele vak.



Figuur 4.5 Tijdseries van de cumulatieve sedimentatie naar de bufferlaag (in zwart), de cumulatieve erosie vanuit de bufferlaag (in blauw) en de massaverandering van de bufferlaag ten opzichte van het begin van de modelsimulatie (in rood) in de ebgeul (zie Figuur 4.3). De T0 situatie is weergegeven met een getrokken lijn en de T1 situatie is weergegeven met een gestippelde lijn.

Figuur 4.6 toont de berekende cumulatieve bruto sedimentatie (zwart), bruto erosie (blauw) en het netto effect (rood) in het vloedgeul-vak. Hierin is een bruto sedimentatie te zien van ongeveer 8400 ton na drie maanden voor de T0 en 8000 ton voor de T1 bodem. De bruto erosie in het vloedgeul-vak bedraagt ruim 10.000 ton voor de T0 bodem en 8500 ton voor de T1 bodem. Zowel de sedimentatie als de erosie zijn dus lager voor de T1 bodem. Netto vindt er erosie plaats vanuit dit vak. Ook in het ruimtelijk patroon is te zien dat de vloedgeul redelijk open blijft (Figuur 4.2). Dit komt overeen met de waarnemingen tot nu toe (persoonlijke communicatie Lofvers, 2020).



Figuur 4.6 Tijdseries van de cumulatieve sedimentatie naar de bufferlaag (in zwart), de cumulatieve erosie vanuit de bufferlaag (in blauw) en de massaverandering van de bufferlaag ten opzichte van het begin van de modelsimulatie (in rood) in de vloedgeul (zie Figuur 4.3). De T0 situatie is weergegeven met een getrokken lijn en de T1 situatie is weergegeven met een gestippelde lijn.

Tijdens de ruwe condities in de maand maart is er minder erosie vanuit de vloedgeul nadat de geul is verdiept (d.w.z. na de bochtafsnijding). De resuspensie door golven zal door de toegenomen diepte kleiner zijn geworden. Dat er uit deze geul minder erosie optreedt zal er aan bijdragen dat er minder aanbod is van slib in het deel van de vaargeul bij Holwerd.

In werkelijkheid zullen ondiepe delen van de vaargeul gebaggerd worden wanneer daar aanslibbing plaatsvindt. Het maakt voor het baggeronderhoud dan niet uit als er verderop erosie plaatsvindt. Het bepalen van de netto aanslibbing geïntegreerd over een bepaald vak levert daarmee geen juiste maat op voor het benodigde baggeronderhoud. De bruto sedimentatie is ook niet de juiste maat, omdat slib in de bodem alweer geërodeerd kan zijn voordat het nodig is om baggeronderhoud uit te voeren. Het benodigde baggeronderhoud zal liggen tussen de netto en de bruto sedimentatie in een gebied. Dit wordt verder besproken in de discussie in Hoofdstuk 5.

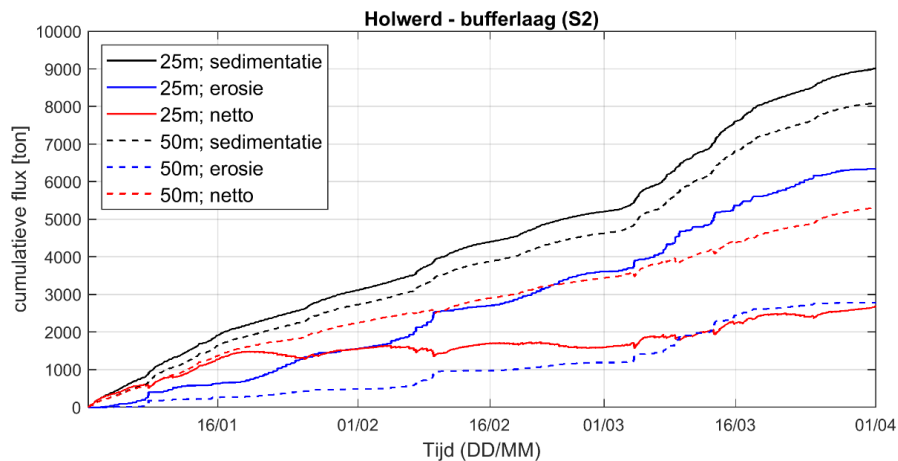
4.3 Gevoeligheid roosterresolutie op aanslibbing en erosie

Het effect van de roosterresolutie op de berekende waterbeweging werd al besproken in Paragraaf 2.3. De gevoeligheid van de roosterresolutie op aanslibbing en erosie is getest door modelsimulaties uit te voeren met een rekenrooster met een maximale resolutie van ongeveer 50 m x 50 m in plaats van 25 m x 25 m. De laatste stap in de verfijning van het rooster in het bekken achter Ameland is dan weggelaten (zie Figuur 2.4). Deze simulatie is alleen gedaan voor de T0 situatie (zonder bochtafsnijding).

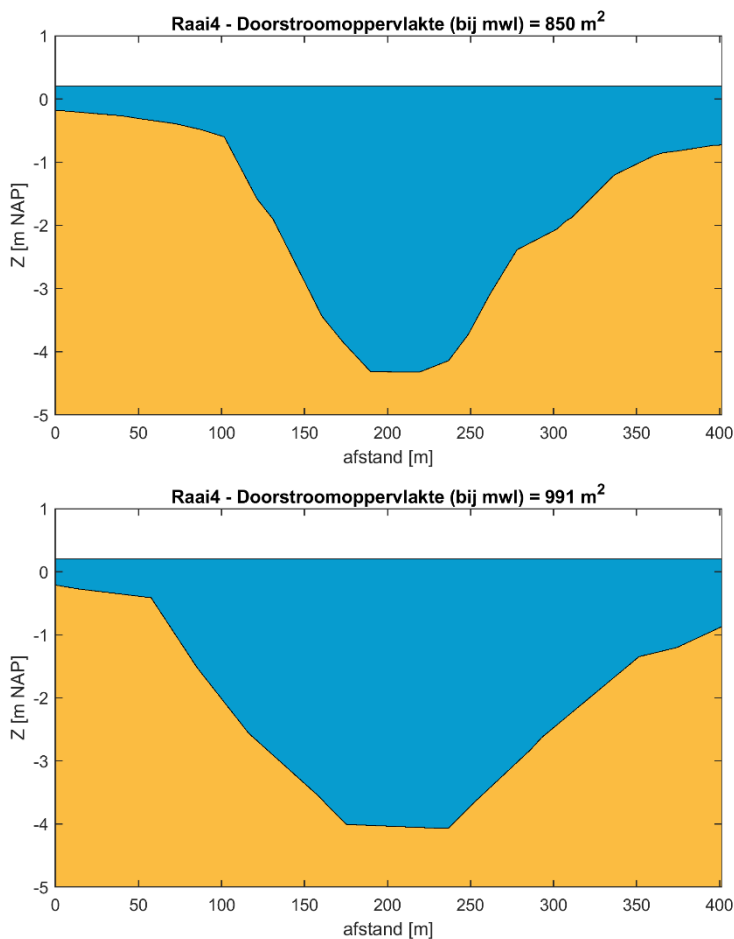
Figuur 4.7 toont de bruto sedimentatie en erosie en de netto aanslibbing in de vaargeul bij Holwerd voor de twee modelsimulaties met verschillende resoluties. Een belangrijk verschil in de netto aanslibbing ontstaat doordat de bruto erosie lager is voor de lagere modelresolutie. De bruto erosie neemt namelijk af van 6200 ton tot ongeveer 2800 ton door de lagere resolutie.

De lagere bruto erosie voor de 50 m modelresolutie wordt veroorzaakt doordat de vaargeul bij Holwerd op deze resolutie niet goed in de modelbodem is opgenomen. Dit is weergegeven in Figuur 4.8, die de bodemligging toont in een raai loodrecht op de vaargeul (bij vaarwegkilometer 4, zie Figuur 3.2) voor de twee verschillende roosterresoluties. Op de lage resolutie liggen er slechts enkele gridcellen in de breedte van de geul. Dat is onvoldoende om de doorsnede van de vaargeul correct te schematiseren in de modelbodem. Daarnaast is de diepte van de geul gemiddeld toegenomen. Dit is het gevolg van de techniek waarmee bodemdata op het rooster wordt geïnterpoleerd, die werd besproken in Paragraaf 2.2. Op de lagere resolutie neemt het doorstroomoppervlak van de raai bij vaarwegkilometer 4 dus toe. Hierdoor neemt de gemiddelde stroomsnelheid in de raai af. Doordat de stroomsnelheden afnemen zijn de bodemschuifspanningen lager (zie Figuur 4.9), zodat de erosie in de vaargeul afneemt.

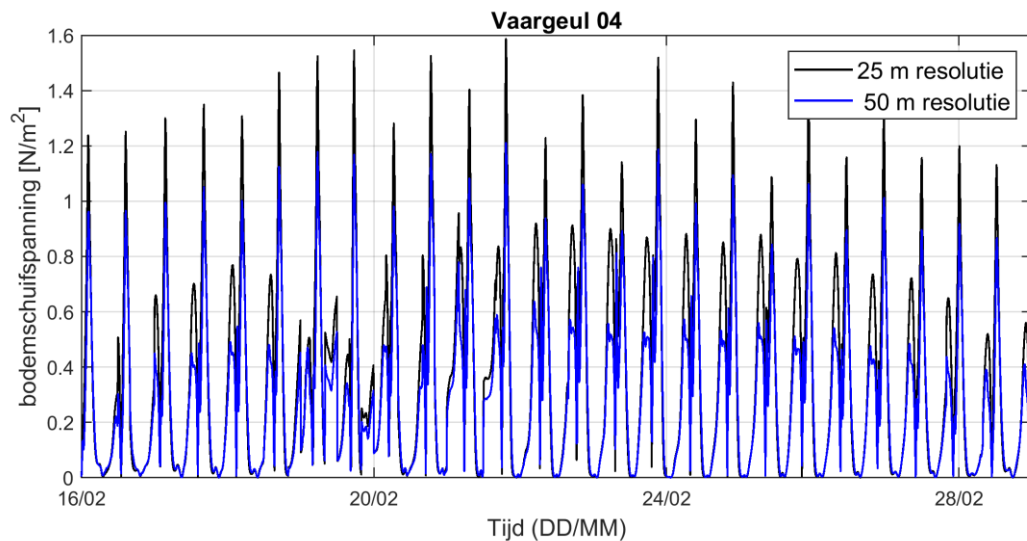
Het effect van de roosterresolutie is een stuk kleiner in de andere delen van de vaargeul. Dit is omdat de geul bij Holwerd smaller is dan ter hoogte van de bochtafsnijding. Juist bij Holwerd is de hoge resolutie dus belangrijk om de geul goed in het rekenrooster op te nemen.



Figuur 4.7 Tijdseries van de sedimentatie en erosie in de bufferlaag in de vaargeul bij Holwerd (zie Figuur 4.3) voor twee modelsommen met een verschillende maximale roosterresolutie: 25 m (getrokken lijn) en 50 m (gestippelde lijn). Voor deze modelsommen is de T0 bodem gebruikt.



Figuur 4.8 Doorsnede van de bodemhoogte in de vaargeul bij vaarwegkilometer 4 (zie Figuur 3.2) voor twee verschillende roosterresoluties: 25 m (boven) en 50 m (onder). Voor deze doorsnedes is de bodemhoogte lineair geïnterpoleerd tussen roosterpunten.



Figuur 4.9 Tijdseries van de totale bodemschuifspanning op een punt in de vaargeul bij Holwerd (op raai Vkm4, zie Figuur 3.2) voor twee modelsimulaties met een verschillende roosterresolutie; 25 m (in zwart) en 50 m (in blauw).

5 Discussie en aanbevelingen

In dit project is het Delft3D-FM model van de Nederlandse Waddenzee dat is ontwikkeld in het kader van KRW Slib (Vroom et al., 2020) gebruikt voor een lokale toepassing. Daarvoor zijn een aantal aanpassingen aan het originele model doorgevoerd. In dit hoofdstuk volgt een discussie van de resultaten in relatie tot de aanpak in deze studie.

5.1 Resolutie en bodemdata

Om de slibdynamiek rond de vaargeul tussen Holwerd en Ameland goed te kunnen modelleren is er voor gekozen om de roosterresolutie van het Dutch Wadden Sea Model (DWSM) lokaal te verhogen, zodat de rekencellen in het interessegebied ongeveer 25 m x 25 m zijn. Door die hogere resolutie neemt het aantal rekencellen toe. Daardoor wordt de rekentijdstap kleiner en neemt de rekentijd toe. Het doorrekenen van een modelsimulatie van 3 maanden duurt ruim 10 dagen. Hierbij is de modelsimulatie verdeeld over 20 rekenkernen (5 nodes x 4 cores). Een nog hogere resolutie dan 25 m x 25 m zou leiden tot onpraktisch lange rekentijden.

De waterbeweging en de slibdynamiek zijn doorgerekend voor twee verschillende situaties, die van elkaar verschillen in bodemhoogte. De bodemhoogte voor de T0 variant is ingemeten in september 2018. Dit was ruim drie maanden voordat met de uitvoering van de bochtafsnijding was begonnen. De bodemhoogte voor de T1 variant is ingemeten in augustus 2019. Dit was ongeveer vier maanden nadat de bochtafsnijding was opgeleverd. Na augustus 2019 is er echter nog veel gebaggerd materiaal gestort in de oude vaargeul. Uit bodemhoogtemetingen blijkt dat deze daardoor veel ondieper is geworden na augustus 2019. De modelberekeningen die zijn uitgevoerd met de T1 bodem zijn daarom redelijk representatief voor de periode kort na oplevering van de bochtafsnijding.

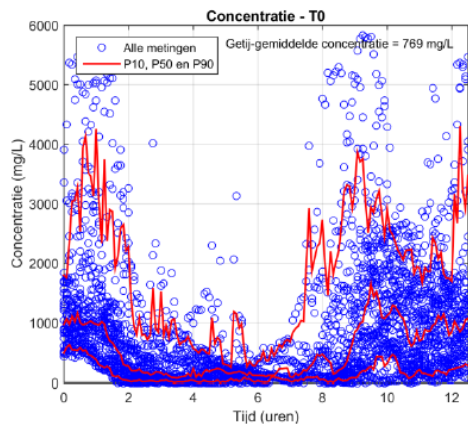
Voor modelsimulaties met de T1 bodem is een initiële slibverdeling in de bodem opgelegd waarbij nog veel slib aanwezig is in de oude vaargeul. Ook hiervoor geldt dat de modelberekeningen representatief zijn voor de periode kort na oplevering van de bochtafsnijding. Verwacht wordt dat de oude vaargeul zich na verloop van tijd naar een nieuw dynamisch evenwicht gaat ontwikkelen.

5.2 Onderhoudsbaggerwerk en slibconcentraties

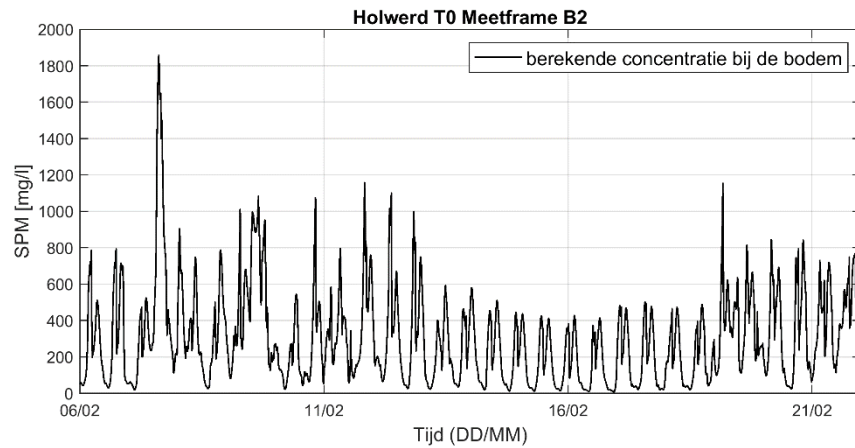
De vaargeul naar Ameland wordt op diepte gehouden door onderhoudsbaggerwerk dat langs de vaargeul in verschillende vakken is verdeeld. Bijlage A.7 geeft de baggercijfers. Het baggervak Holwerd-VA33 komt redelijk goed overeen met het vak Holwerd dat in Hoofdstuk 4 werd gebruikt om de aanslibbing in de modelsimulaties te kwantificeren. In de periode van januari 2018 t/m juni 2020 werd hier gemiddeld 74 duizend m³ sediment per maand gebaggerd (zie Bijlage A.7). Uitgaande van een dichtheid van 0,4 ton/m³ komt dit neer op gemiddeld bijna 30 duizend ton per maand. De bruto sedimentatie die volgt uit de modelsimulaties is ongeveer 3 duizend ton per maand. De aanslibbing in het model is daarmee ongeveer een factor 10 lager dan het uitgevoerde baggeronderhoud. Dit kan verschillende oorzaken hebben. Het model is gekalibreerd op slibconcentraties in de Waddenzee (Vroom, et al., 2020). Daarom gaan we eerst hierop in.

De bruto sedimentatie wordt bepaald door de valsnelheid van slibvlokken, de concentratie bij de bodem en de depositie-efficiëntie. Als de berekende concentratie bij de bodem lager is dan de gemeten concentratie bij de bodem, zou dat dus leiden tot lagere bruto sedimentatie. Figuur 5.1 toont een overzicht van de gemeten concentraties tijdens de T0 meetcampagne bij de veersteiger van Holwerd (Perk et al., 2019a). Ter vergelijking toont Figuur 5.2 tijdseries van de berekende concentraties op dezelfde locatie en voor dezelfde periode. Figuur 5.3 toont hetzelfde maar nu

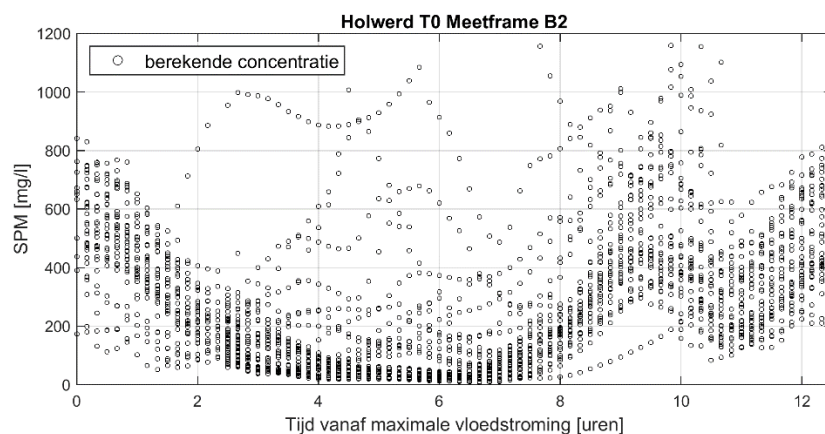
uitgezet tegen de fase van het getij om de vergelijking met de metingen te vergemakkelijken. In de metingen was de gemiddelde concentratie 769 mg/L. De gemiddelde berekende concentratie is 304 mg/L en daarmee dus ongeveer een factor 2,5 lager dan de metingen. Het verschil is echter niet groot genoeg om het verschil in aanslibbing van een factor 10 te verklaren.



Figuur 5.1 Gemeten concentraties in mg/L op ongeveer 0.9 m vanaf de bodem bij frame B (zie Figuur 2.11) tijdens de T0 meetcampagne in februari 2019, uitgezet tegen de fase van het getij ($t = 0$ uur is gedefinieerd als de maximale vloedstroom). De getij-gemiddelde concentratie is weergegeven als tekst. Figuur overgenomen uit Perk et al. (2019b).



Figuur 5.2 Tijdsreeks van de berekende slibconcentraties in mg/L bij de bodem bij frame B tijdens de T0 meetperiode (som van slibfracties IM1 en IM2).



Figuur 5.3 Tijdsreeks van de berekende slibconcentraties in mg/L bij de bodem bij frame B tijdens de T0 meetperiode uitgezet tegen de fase van het getij

Hieronder geven we mogelijke oorzaken voor het verschil in concentraties en aanslibbing tussen metingen en berekeningen:

1. De aanslibbing in het model wordt bepaald in polygonen met een breedte van ongeveer 60 m. Dit is de breedte van de vaargeulbodembodem (zie Figuur 4.8). De taluds zijn hierin niet meegenomen. In werkelijkheid zal het slib door afschuiving langs die taluds ook op de vaargeulbodembodem terecht komen en worden gebaggerd. Dit effect van afschuiving wordt in het model niet meegenomen maar kan mogelijk wel worden verdisconteerd door de polygonen een grotere effectieve vaargeulbreedte te geven.
2. In het model wordt baggeren en storten nu nog niet meegenomen. In werkelijkheid wordt er wel gebaggerd en gestort en wordt vooral het slibrijke sediment dat bij Holwerd wordt gebaggerd niet ver van die baggerlocatie weer losgelaten⁴. Deze stortingen dichtbij de baggerlocatie kunnen er voor zorgen dat het slib dichtbij Holwerd gaat recirculeren, waardoor slibconcentraties en de aanslibbing groter zijn dan zonder deze wijze van baggeren en storten.
3. Het hier toegepaste slibmodel modelleert de zeebodem in twee lagen, namelijk een zogenaamde flufflaag en een bufferlaag (Van Kessel, et al., 2011). De aanslibbing in het model wordt berekend voor de bufferlaag en wordt voor een deel bepaald door uitwisseling tussen de twee lagen.
4. De hier berekende sedimentatie betreft alleen slib. In werkelijkheid gaat het om zowel slib als zand. Het aandeel slib is met 75-80% bij Holwerd echter het grootst (Herman, et al., 2016).
5. Waterbeweging door scheepvaart zoals schroefwerking en zuiging kunnen invloed hebben op de slibconcentraties en de aanslibbing. Slibconcentraties kunnen hierdoor groter zijn en aanslibbing hoger. Deze invloed wordt in het model niet meegenomen.

Er zijn een aantal modelinstellingen die van groot belang zijn voor de sedimentatie van slib naar de bodem. Meer specifiek wordt bijvoorbeeld de verhouding tussen de sedimentatie naar de bufferlaag en de sedimentatie naar de flufflaag vooraf bepaald. Als gevolg van de kalibratie van het model worden de modelinstellingen uniform toegepast. In werkelijkheid zal het zo zijn dat de sedimentatie van slib naar de bodem verschilt per locatie (bijv. verschillend in geulen en op platen). Lokaal kunnen modelinstellingen dus nog worden aangepast om baggerinspanningen in het veld beter te reproduceren.

5.3 Aanbevelingen

De aanbevelingen die volgen uit deze studie sluiten aan bij de discussiepunten in de vorige paragraaf. We bevelen aan om de invloed van discussiepunten 1 t/m 3 te kwantificeren en te vergelijken met de waargenomen slibconcentraties en baggervolumes. Op basis daarvan kunnen modelinstellingen aangepast worden.

Om ook de slibdynamiek en de aanslibbing in de vaargeul voor de huidige situatie (d.w.z. na opvulling van de ebgeul) te bepalen bevelen we bovendien aan om de modelsimulaties te herhalen met een recent ingemeten bodemligging. Hiermee kan, naast het effect van de bochtafsnijding, ook het effect van het opvullen van de oude vaargeul inzichtelijk gemaakt worden.

⁴ Dit wordt ook wel genoemd: "het gebaggerde materiaal wordt op stroom gezet".

6 Conclusies

Dit rapport beschrijft de effecten van de bochtafsnijding in de vaargeul tussen Holwerd en Ameland op de hydrodynamica en de slibdynamiek met behulp van modelsimulaties. Hieronder worden de belangrijkste conclusies samengevat.

De conclusies betreffen bijdrage van de studie aan het beantwoorden van de (in de inleiding genoemde) beheervragen:

1. Zijn de ontwikkelingen rond de bochtafsnijding zoals in eerdere studies werd verwacht?
2. Leidt de ingreep tot minder baggerinspanning en minder vertroebeling?

Uit de berekeningen blijkt dat door aanleg van de bochtafsnijding de snelheden en debieten in de ebgeul afnemen en die in de bochtafsnijding toenemen. Ten oosten van de bochtafsnijding leidt de ingreep tot iets hogere pieksnelheden bij eb in de vaargeul bij Holwerd. De verdeling van de debieten en de stroomsnelheden in de vaargeul komt goed overeen met voorspellingen door Grasmeijer en Rübke (2018).

Volgens de berekeningen zorgt de bochtafsnijding voor minder netto aanslibbing in de vaargeul bij Holwerd. Hier zijn twee redenen voor. Ten eerste nemen bij Holwerd de pieksnelheden tijdens eb iets toe ten gevolge van de bochtafsnijding. Hierdoor neemt de bruto erosie toe, wat zal leiden tot minder netto aanslibbing. Ten tweede is er in de vaargeul bij Holwerd minder aanbod van slib omdat dit zich elders heeft afgezet. Uit de berekeningen blijkt met name veel sedimentatie van slib in het oostelijke deel van de oorspronkelijke ebgeul plaatsvind. Mede door deze verlaging van het aanbod is de bruto sedimentatie bij Holwerd door de bochtafsnijding kleiner.

Met de hier toegepaste modelinstellingen kan de gemeten waterbeweging en slibdynamiek in de smalle geul redelijk goed gereproduceerd worden maar er is ruimte voor verbetering. Aanbevelingen worden gedaan voor modelverbetering met behulp van beschikbare metingen. De taluds van de vaargeul kunnen bijvoorbeeld worden meegenomen in de bepaling van de aanslibbing, het baggeren en storten kan in de simulaties worden meegenomen en de uitwisseling tussen de twee bodemlagen kan worden geoptimaliseerd. Deze aspecten nemen we mee in het vervolg op dit rapport in 2021. Dan kunnen we ook de tweede vraag beantwoorden.

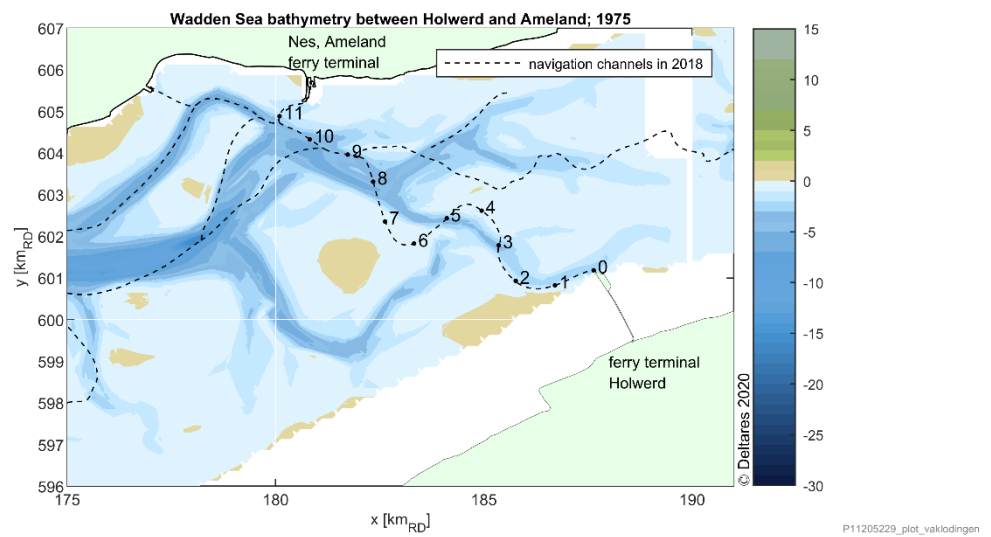
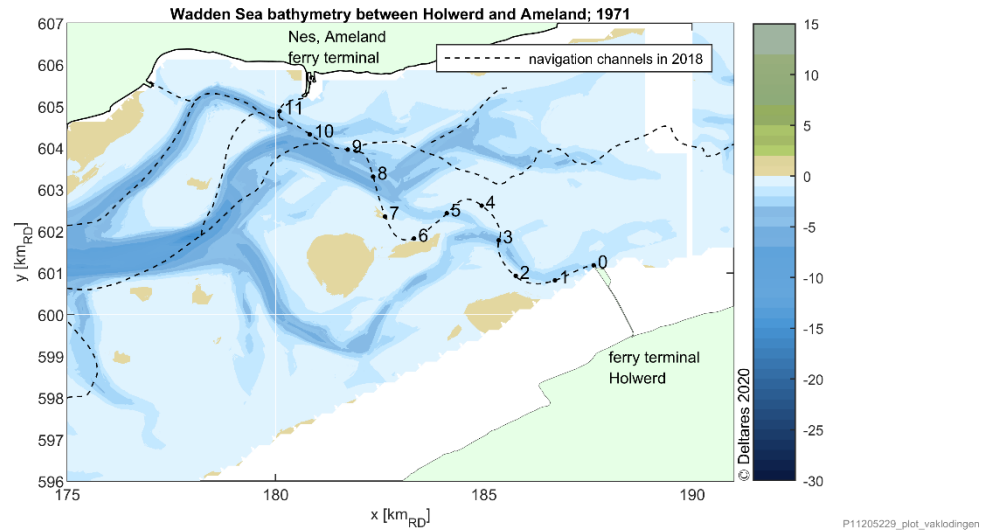
7 Referenties

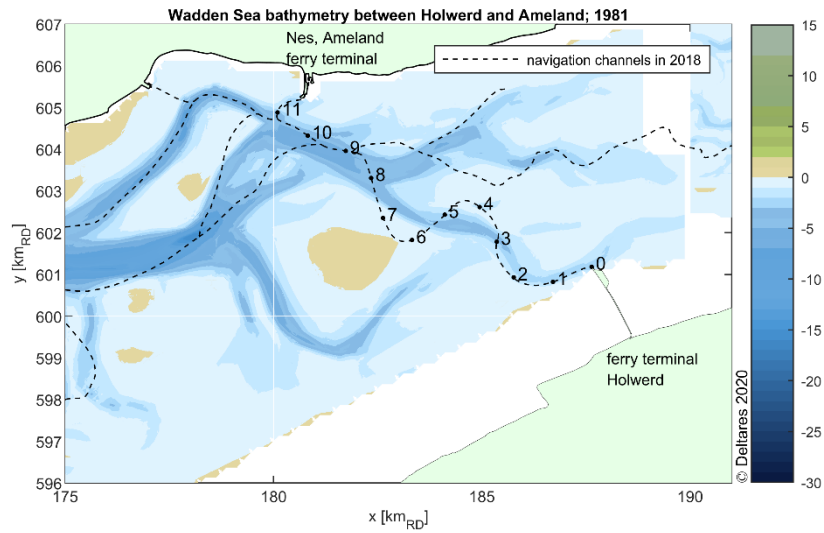
- Grasmeijer, B. & Röbbke, B., 2018. *Hydromorfologische vervolgstudie vaarweg Holwerd-Ameland. Rapport 11201692-000-ZKS-0001*, Delft, The Netherlands: s.n.
- Herman, P. et al., 2018. *Mud dynamics in the Wadden Sea. Towards a conceptual model*, s.l.: Deltares report 11202177-000-ZKS-0011.
- Herman, P. et al., 2016. *Analyse Vaargeul Holwerd-Ameland. Rapport 1230378-005-ZKS-0001*, Delft, The Netherlands: s.n.
- Hurdle, D. & Stive, R., 1989. Revision of SPM 1984 wave hindcast model to avoid inconsistencies in engineering applications. *Coastal Engineering*, 12(4), pp. 339-351.
- Perk, L., Van Rijn, L., Brinkkemper, J. & Koudstaal, K., 2019a. *Metingen Holwerd-Ameland: Meetresultaten en laboratoriumanalyse metingen januari-maart 2019*, s.l.: WaterProof rapport WP2018_1155_R3r1.
- Perk, L., Wesselman, D., Koudstaal, K. & Van Rijn, L., 2019b. *Metingen Holwerd-Ameland: Meetresultaten en laboratoriumanalyse T1 metingen sept-okt 2019*, s.l.: Waterproof rapport WP2019_1176_R1r1.
- Rijkswaterstaat, 1998. *Sedimentatlas Waddenzee*, The Hague, The Netherlands: Rijkswaterstaat, Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
- Swart, D. H., 1974. *Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles*, s.l.: PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands .
- Van Kessel, T. et al., 2011. Modelling the seasonal dynamics of SPM with a simple algorithm for the buffering of fines in a sandy seabed. *Continental Shelf Research*, Volume 31, pp. S124-S134.
- Van Weerdenburg, R. & Zijl, F., concept. *Development of a Delft3D-FM model of the Dutch Wadden Sea - Model Setup and Validation of DWSM*, s.l.: Deltares report.
- Villars, N. et al., 2016. *Analyse vaargeul Holwerd - Ameland: Verkennende studie naar maatregelen om vertragingen en baggerbezwaar op te lossen*, s.l.: Deltares rapport 1230378-000-ZKS-0017.
- Vroom, J., Van Weerdenburg, R., Smits, B. & Herman, P., 2020. *Modellering slibdynamiek voor de Waddenzee: Kalibratie voor KRW Slib*, s.l.: Deltares rapport 11205229-001-ZKS-0001.
- Zijl, F., Veenstra, J. & Groenenboom, J., 2018. *The 3D Dutch Continental Shelf Model - Flexible Mesh (3D DCSM-FM): Setup and validation*, s.l.: Deltares rapport 1220339-000-ZKS-0042.

A Bijlagen

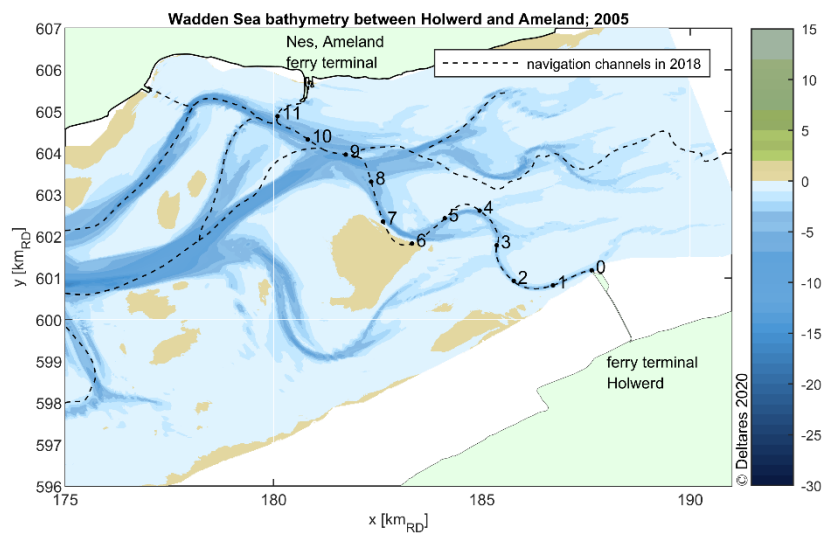
A.1 Bijlage 1: Vaklodgingen vaarweg Ameland 1971, 1975, 1981, 2005, 2011 and 2017

Onderstaande figuren tonen de vaklodgingen in verschillende jaren vanaf 1971 samen met situatie van de vaarwegen in 2018, dus zonder de bochtafsnijding die in 2019 werd uitgevoerd.

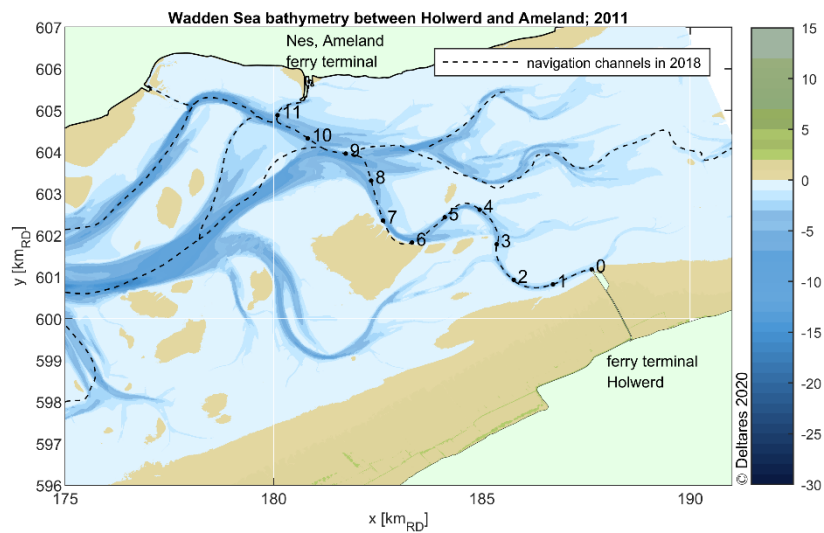




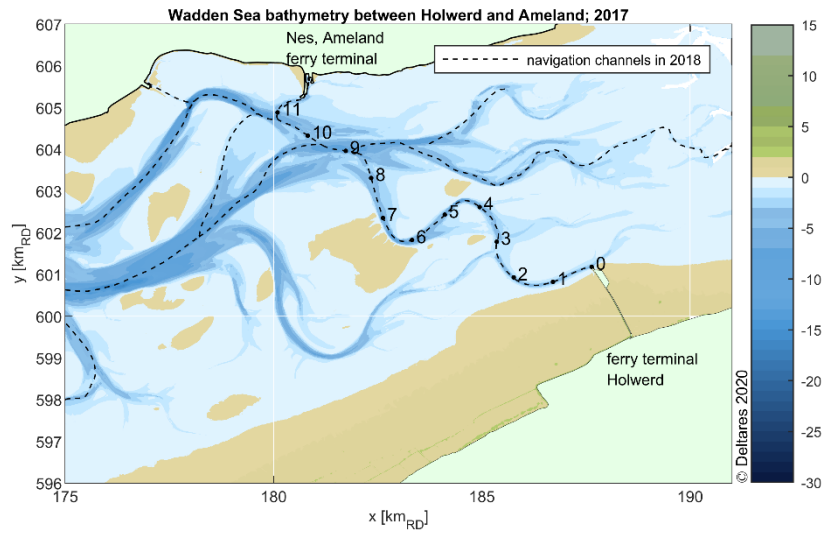
P11205229_plot_vaklodingen



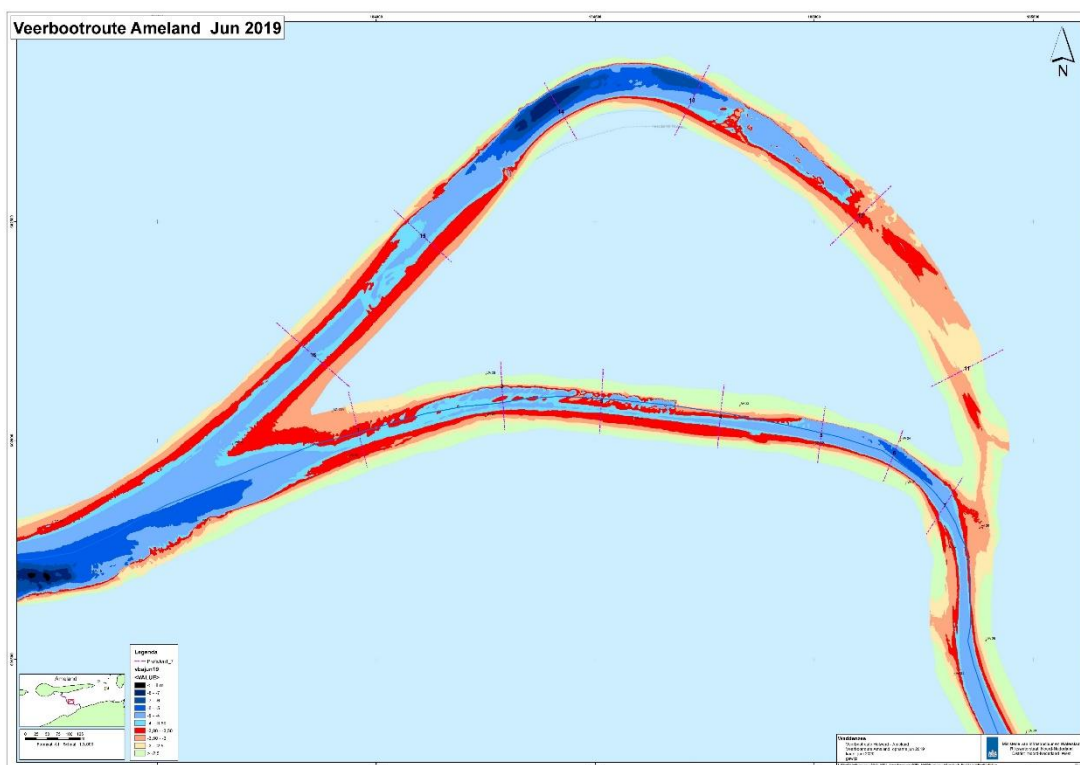
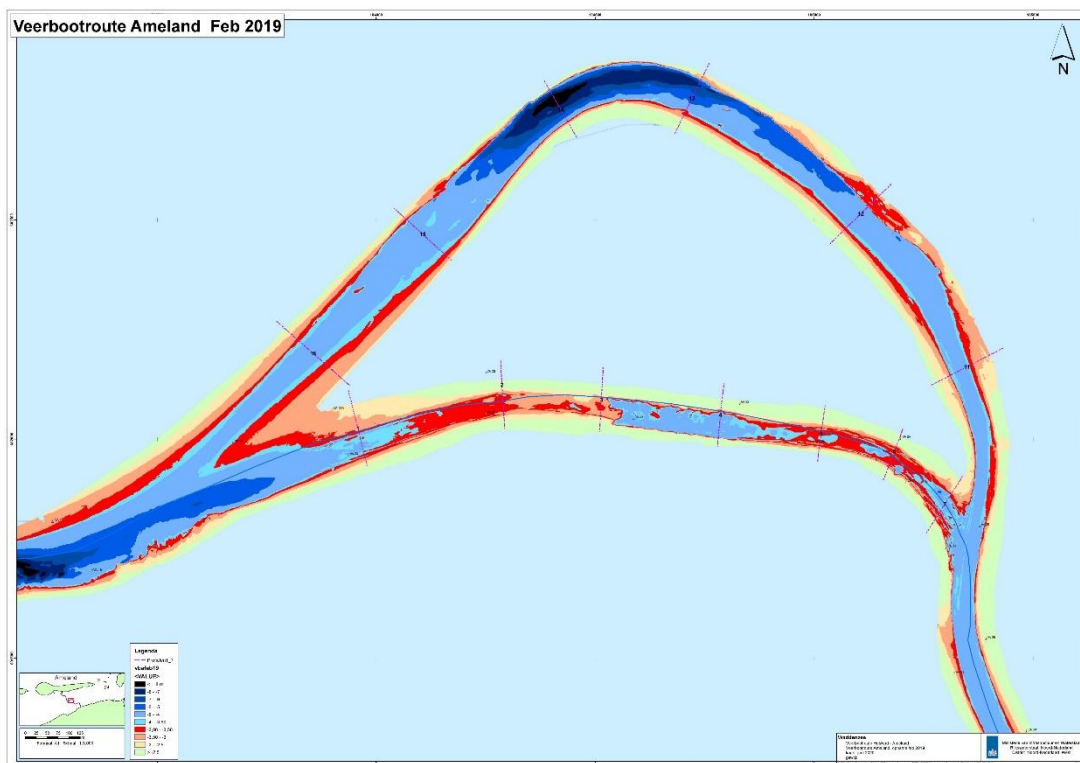
P11205229_plot_vaklodingen

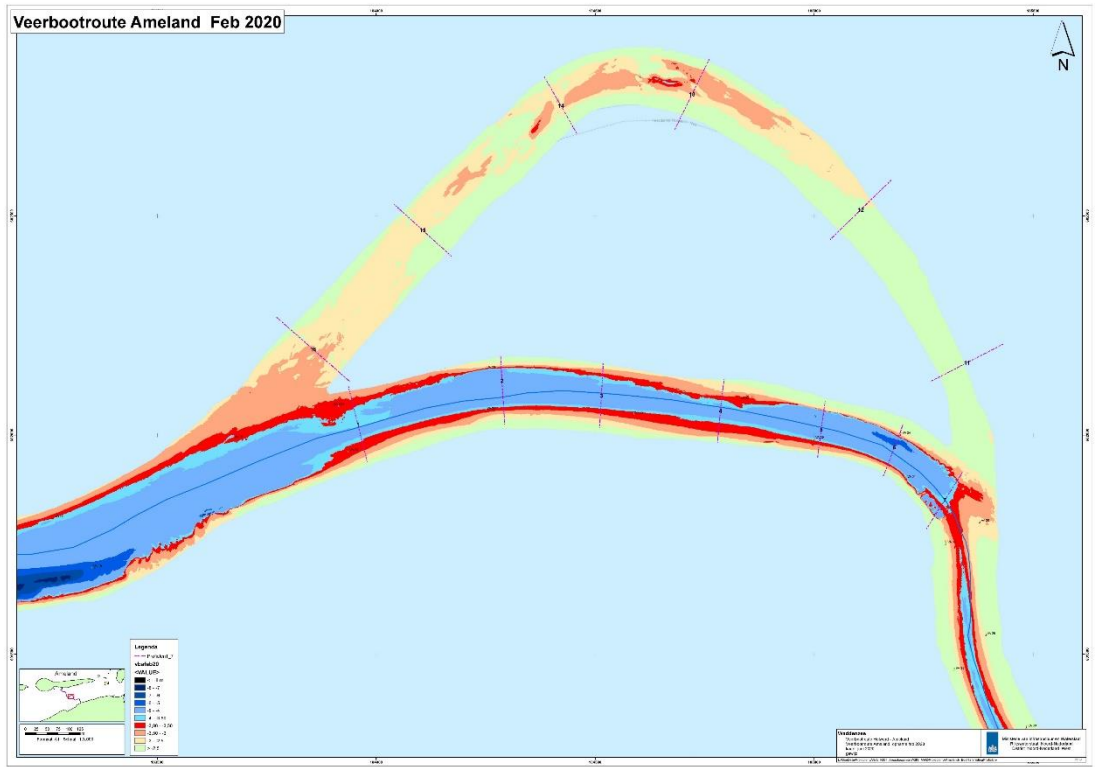


P11205229_plot_vaklodingen

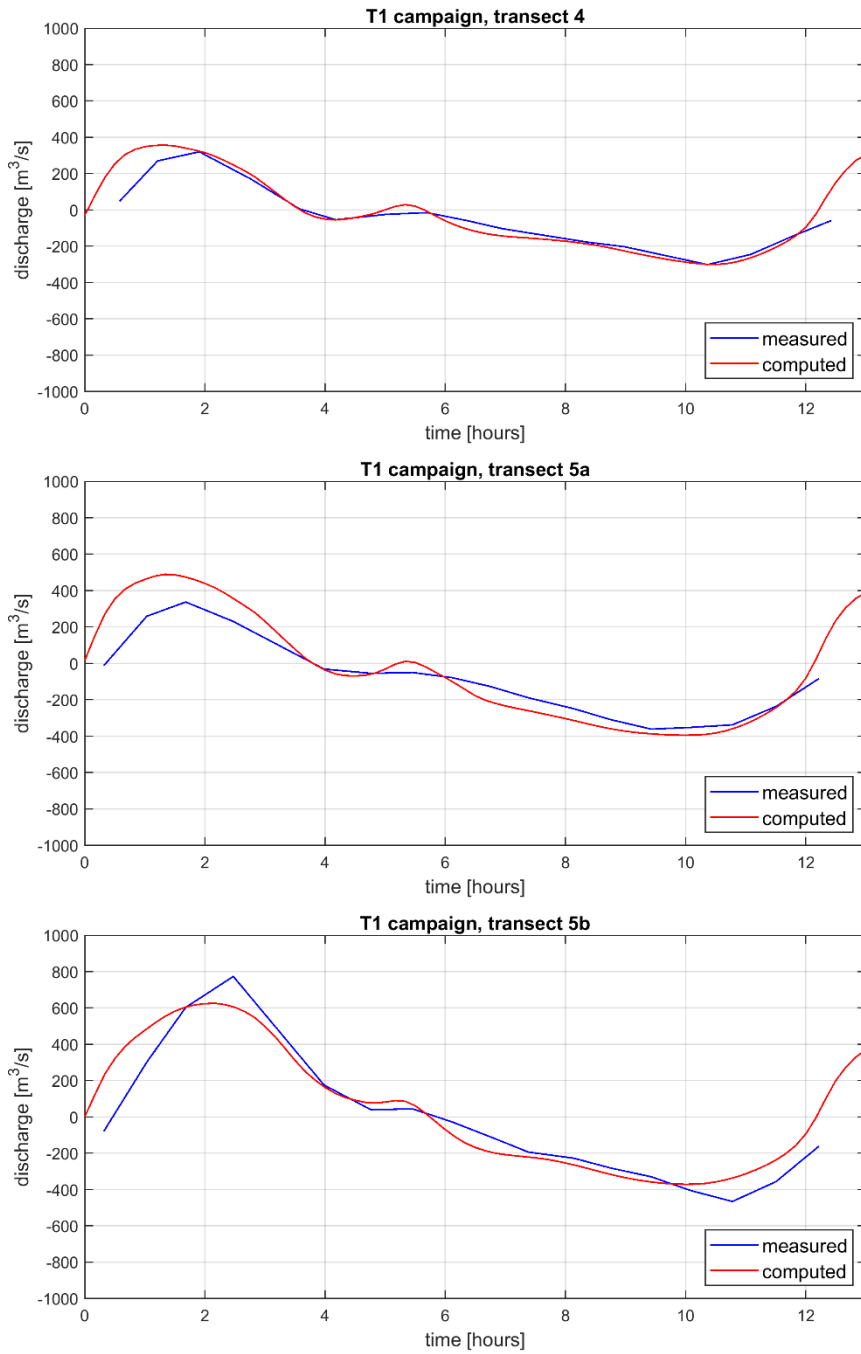


A.2 Bijlage 2: Beheerlodingen Februari 2019, Juni 2019, Augustus2019, November 2019 en Februari 2020



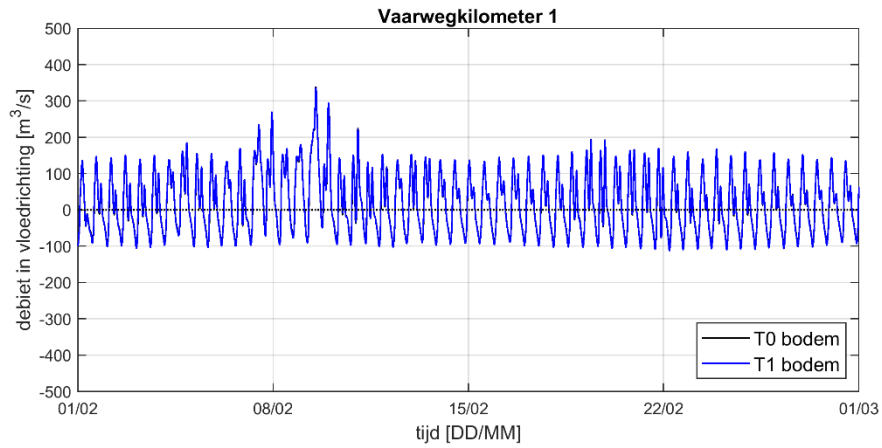


A.3 Bijlage 3: Validatie raidebieten T1 meetcampagne

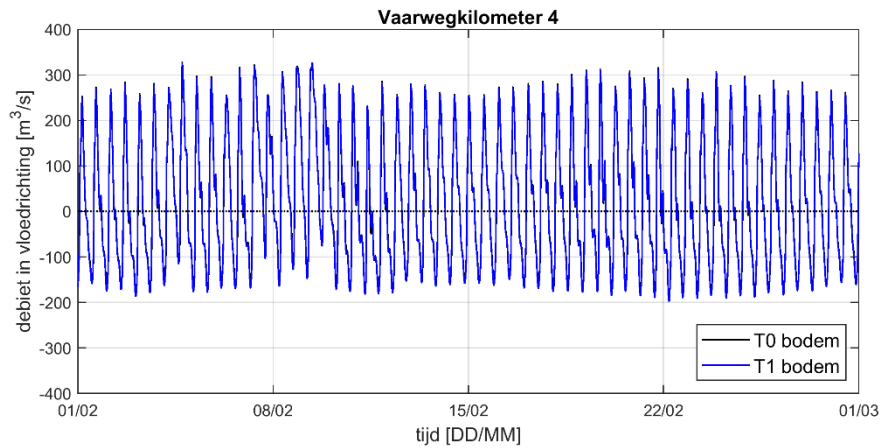


Figuur A.1 Reproductie van de gemeten debieten door raaien in de eb- en vloedgeul tijdens de T1 meetcampagne; de gemeten debieten zijn weergegeven in blauw en de berekende debieten zijn weergegeven in rood voor raai 4 (boven), raai 5a (midden) en raai 5b (onder).

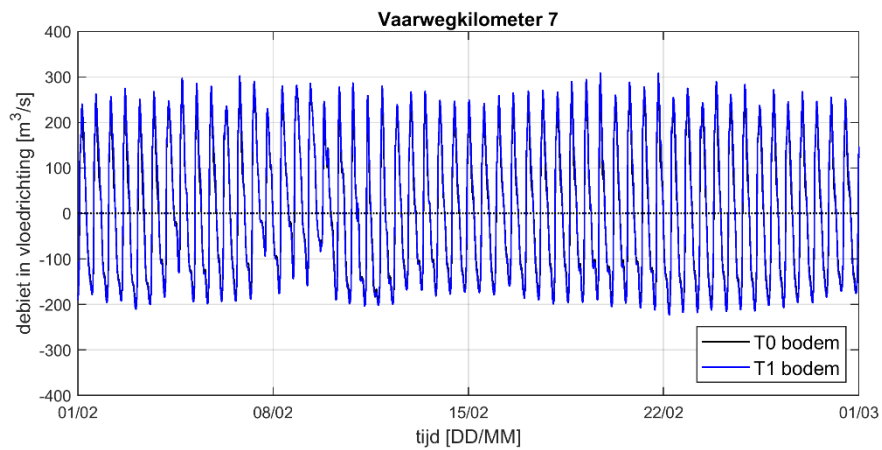
A.4 Bijlage 4: Tijdsreeksen raidebielten



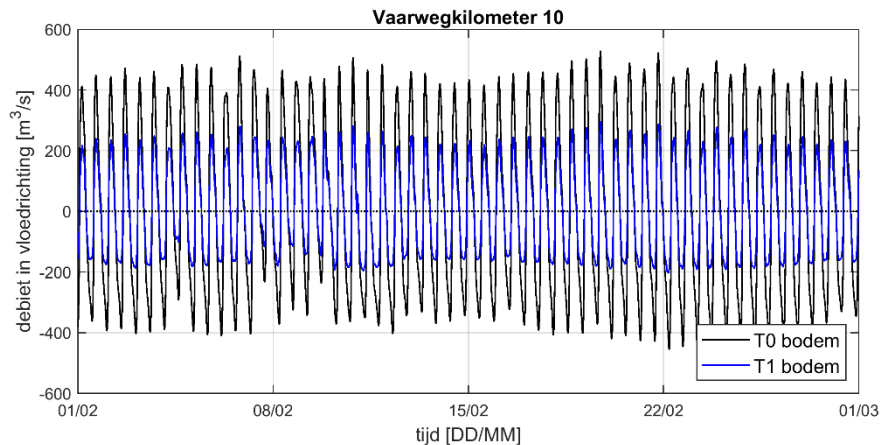
Figuur A.2 Tijdsreeksen van de berekende debieten door raai Vkm1 voor de maand februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



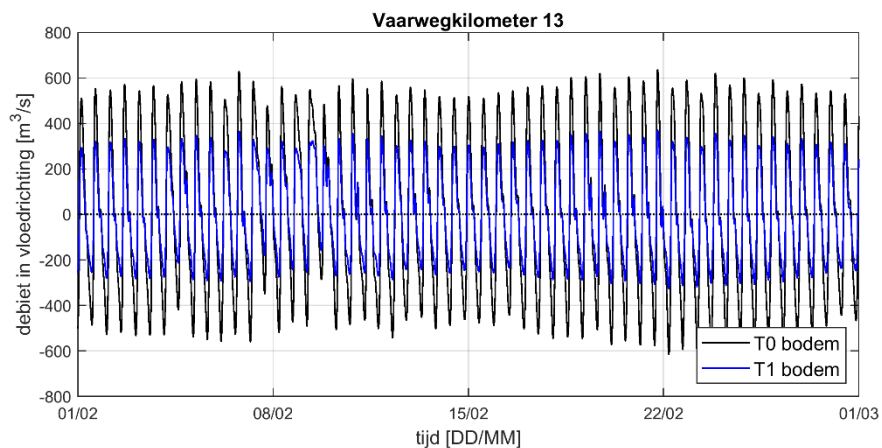
Figuur A.3 Tijdsreeksen van de berekende debieten door raai Vkm4 voor de maand februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



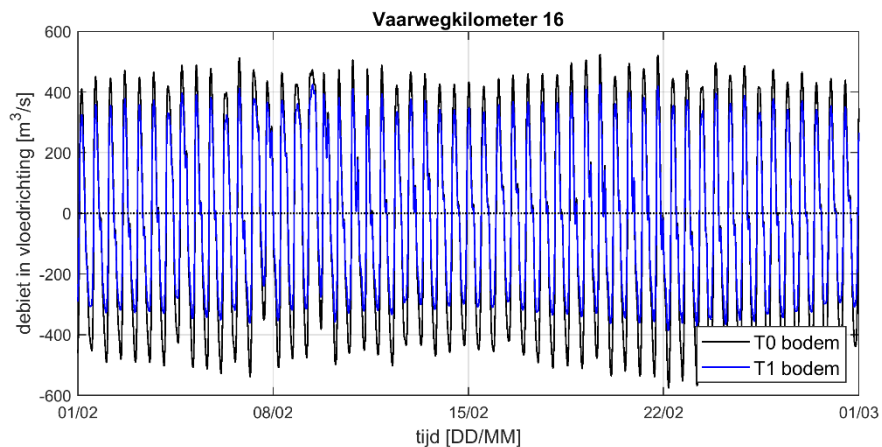
Figuur A.4 Tijdsreeksen van de berekende debieten door raai Vkm7 voor de maand februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



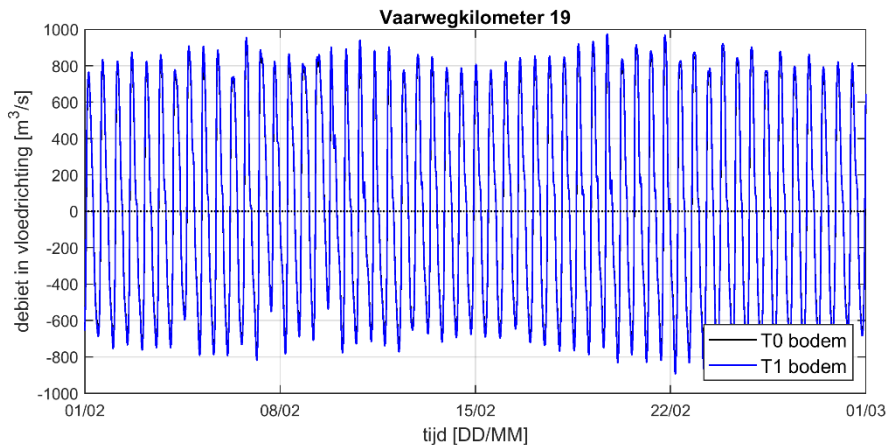
Figuur A.5 Tijdsree van de berekende debieten door raai Vkm10 voor de maand februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



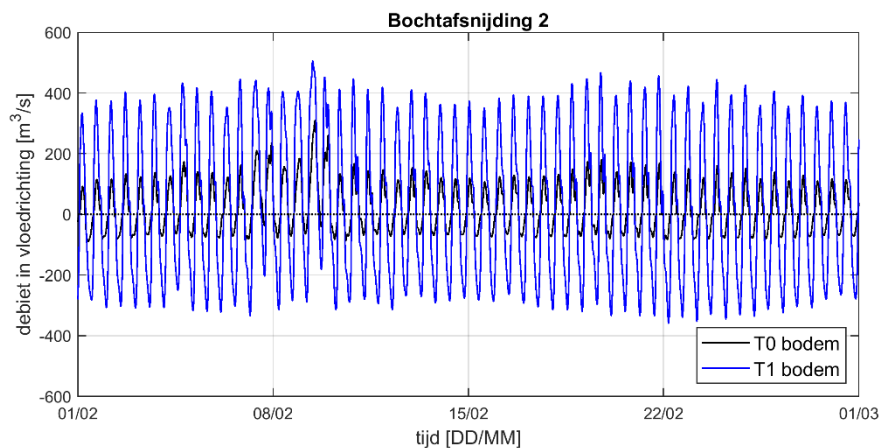
Figuur A.6 Tijdsree van de berekende debieten door raai Vkm13 voor de maand februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



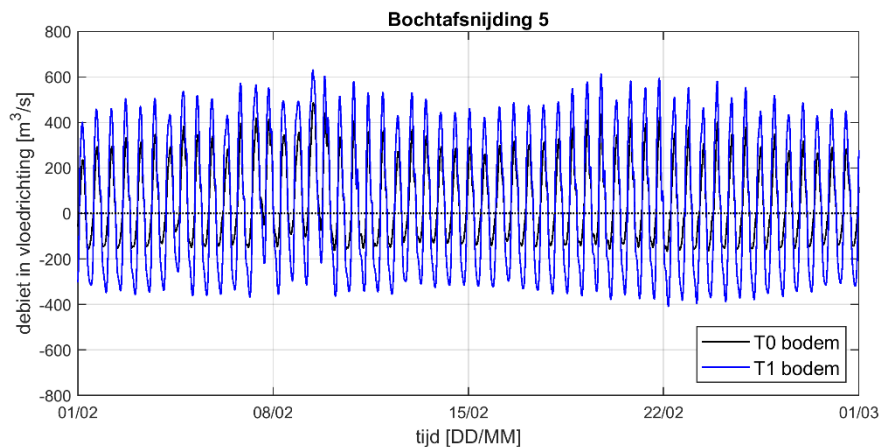
Figuur A.7 Tijdsree van de berekende debieten door raai Vkm16 voor de maand februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



Figuur A.8 Tijdseries van de berekende debieten door raai Vkm19 voor de maand februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).

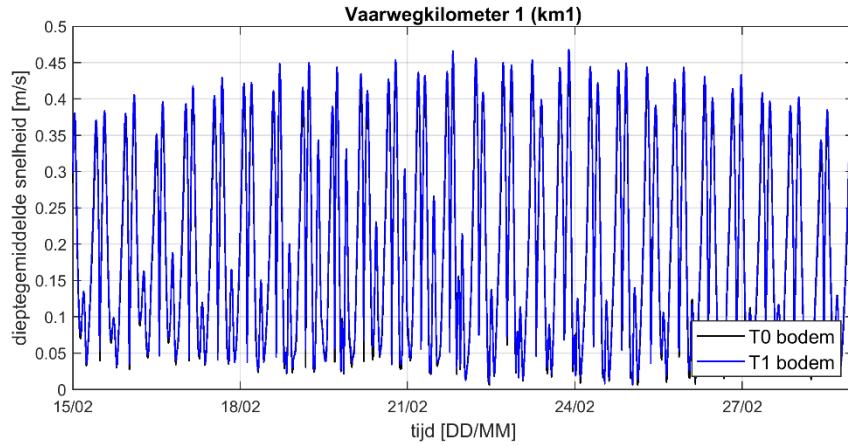


Figuur A.9 Tijdseries van de berekende debieten door raai Baf2 voor de maand februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).

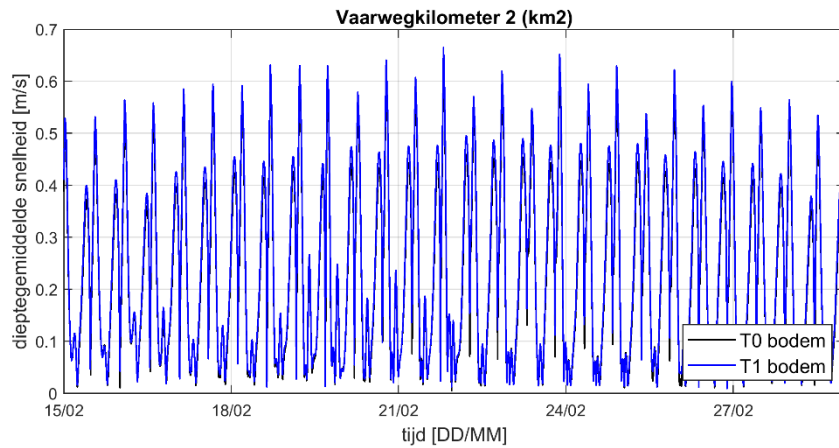


Figuur A.10 Tijdseries van de berekende debieten door raai Baf5 voor de maand februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).

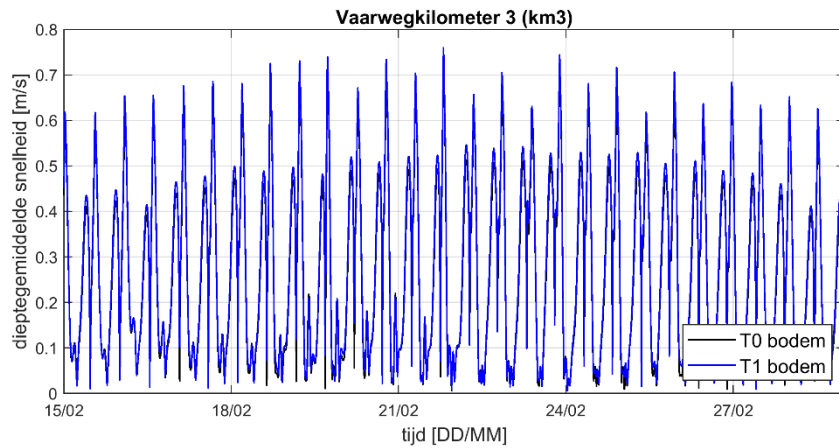
A.5 Bijlage 5: Tijdsreefs stroomsnelheden in de vaargeul



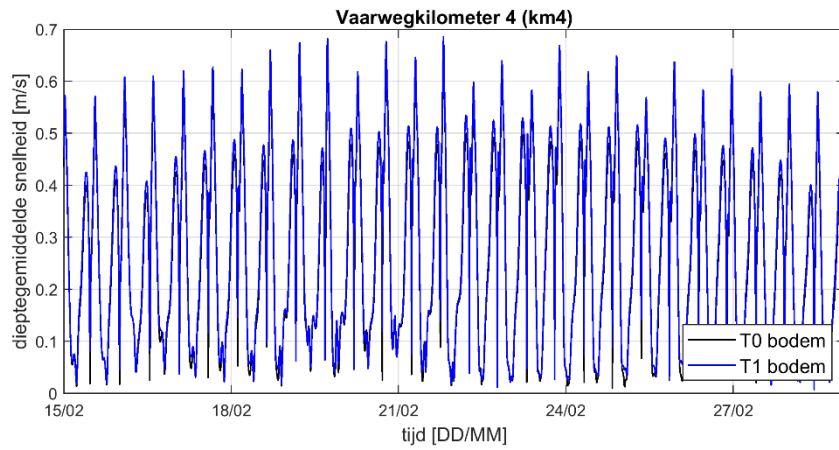
Figuur A.11 Tijdsreefs van de berekende snelheden bij observatiepunt km1 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



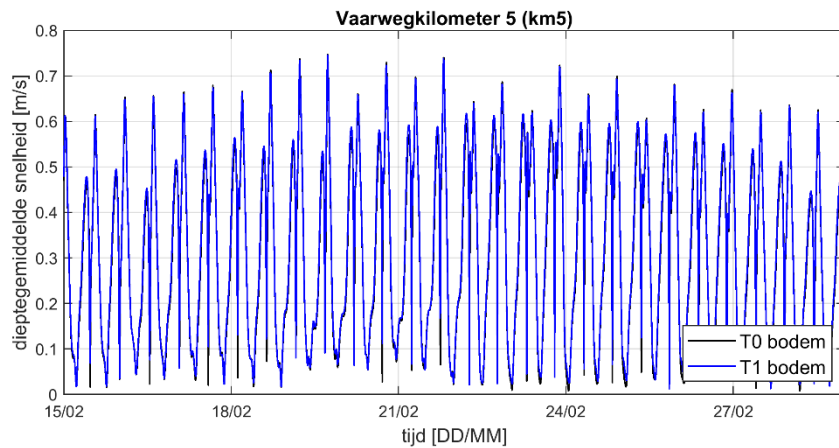
Figuur A.12 Tijdsreefs van de berekende snelheden bij observatiepunt km2 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



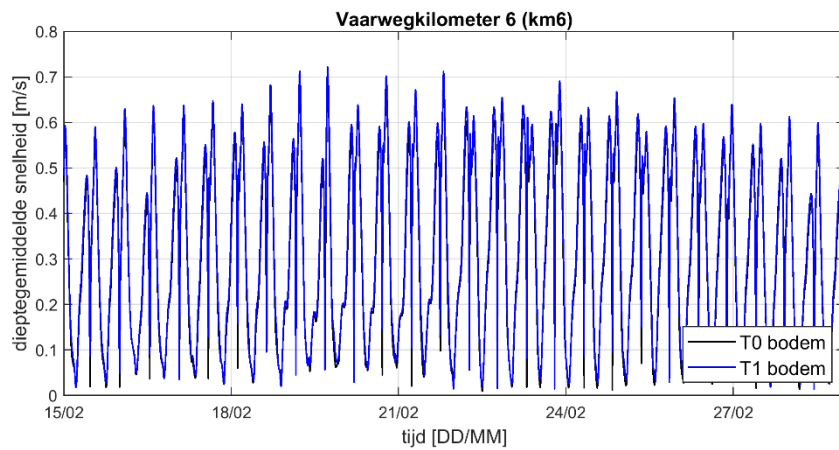
Figuur A.13 Tijdsreefs van de berekende snelheden bij observatiepunt km3 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



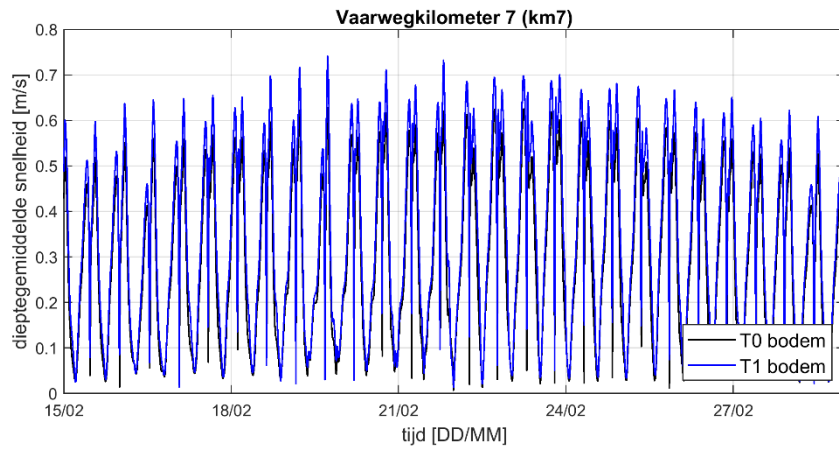
Figuur A.14 Tijdsreeks van de berekende snelheden bij observatiepunt km4 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



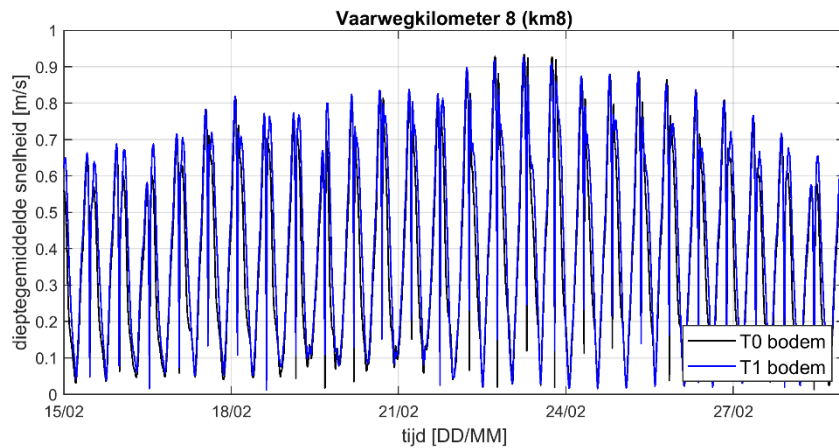
Figuur A.15 Tijdsreeks van de berekende snelheden bij observatiepunt km5 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



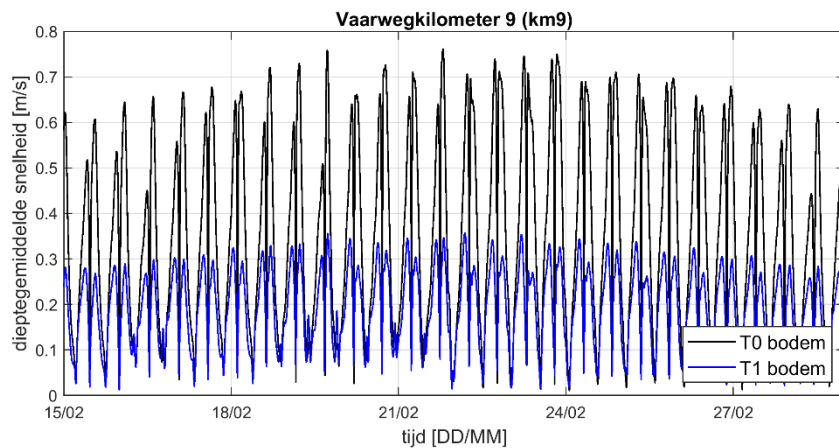
Figuur A.16 Tijdsreeks van de berekende snelheden bij observatiepunt km6 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



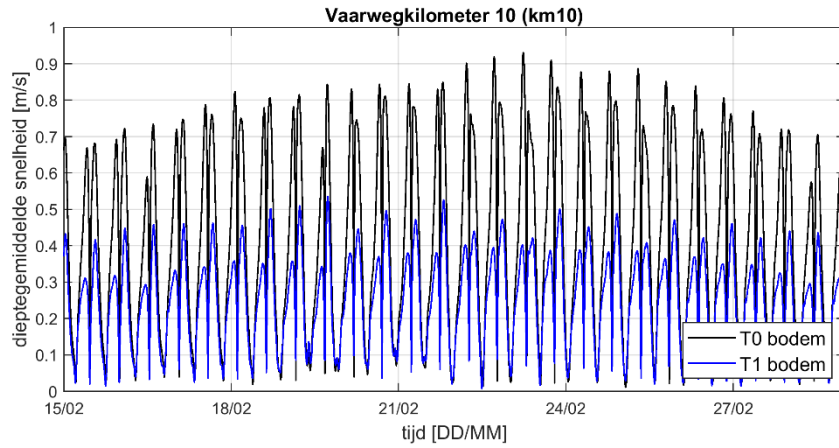
Figuur A.17 Tijdsreeks van de berekende snelheden bij observatiepunt km7 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



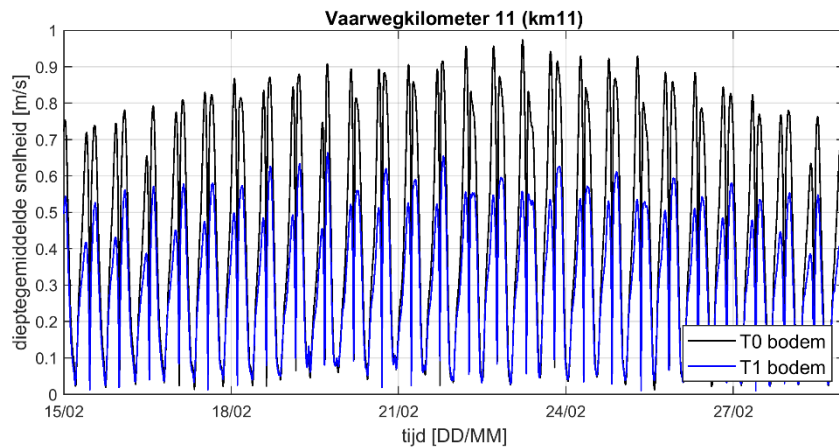
Figuur A.18 Tijdsreeks van de berekende snelheden bij observatiepunt km8 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



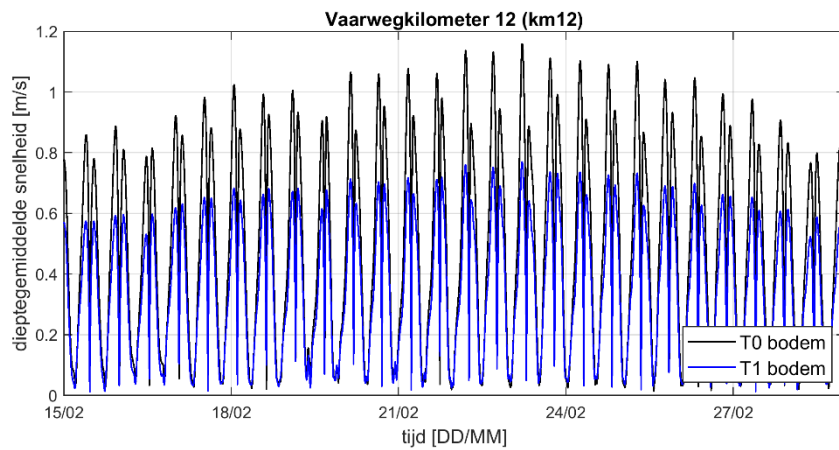
Figuur A.19 Tijdsreeks van de berekende snelheden bij observatiepunt km9 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



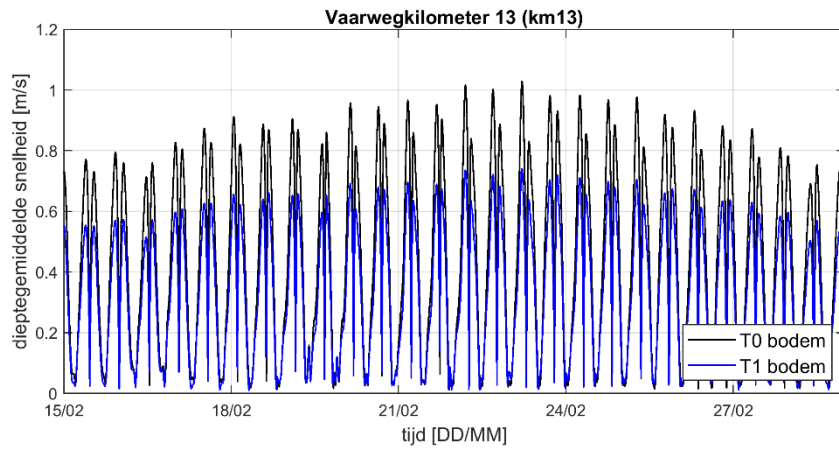
Figuur A.20 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt km10 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



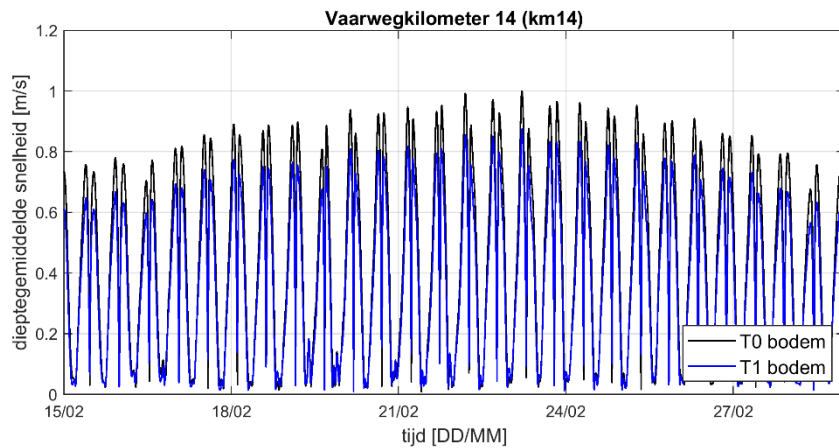
Figuur A.21 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt km11 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



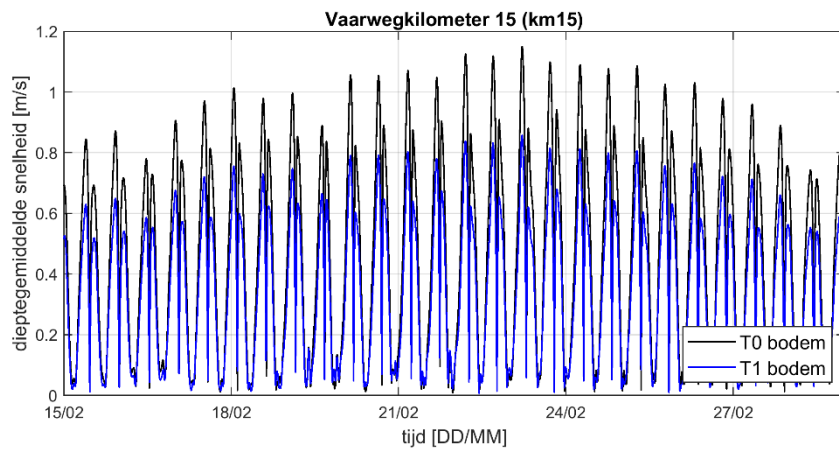
Figuur A.22 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt km12 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



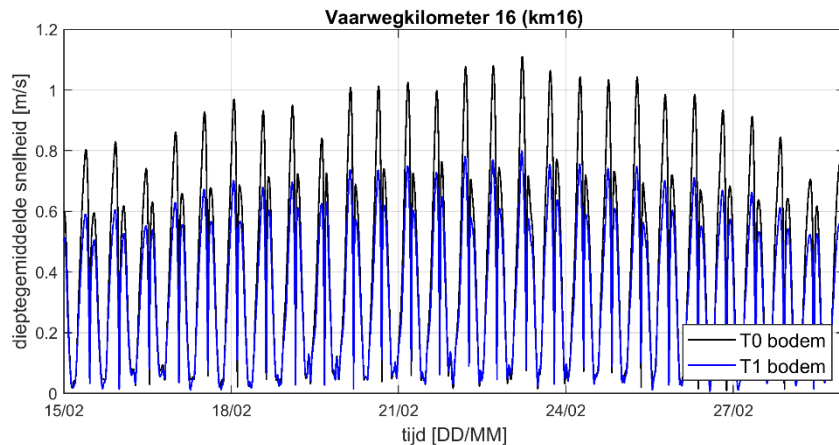
Figuur A.23 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt km13 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



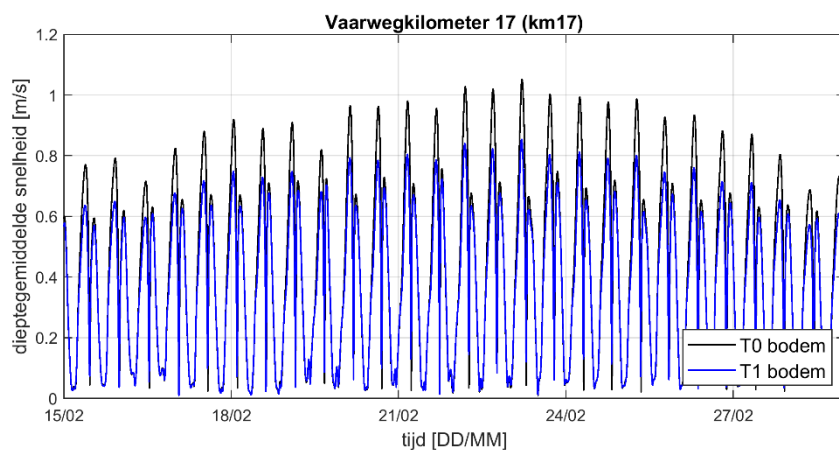
Figuur A.24 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt km14 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



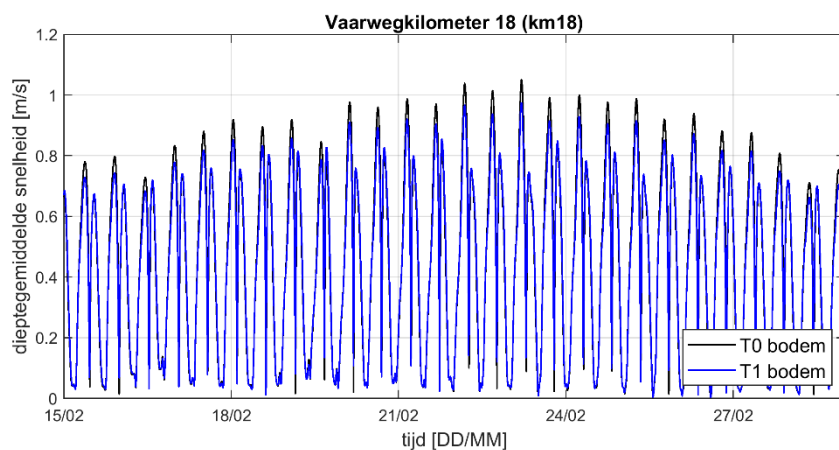
Figuur A.25 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt km15 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



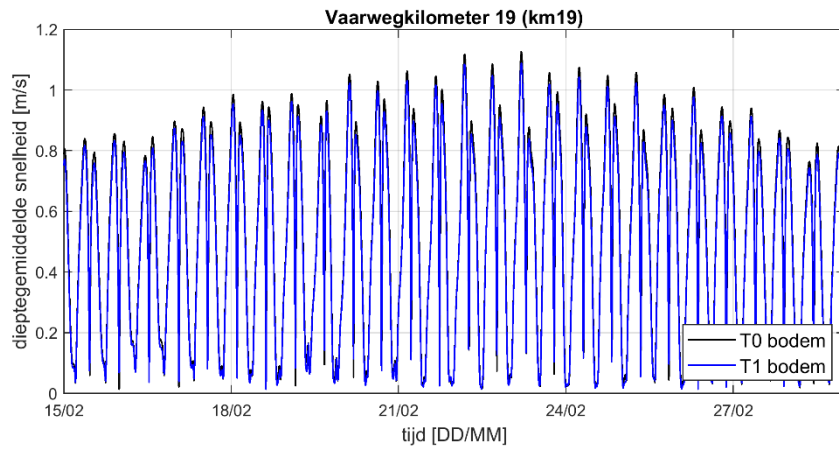
Figuur A.26 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt km16 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



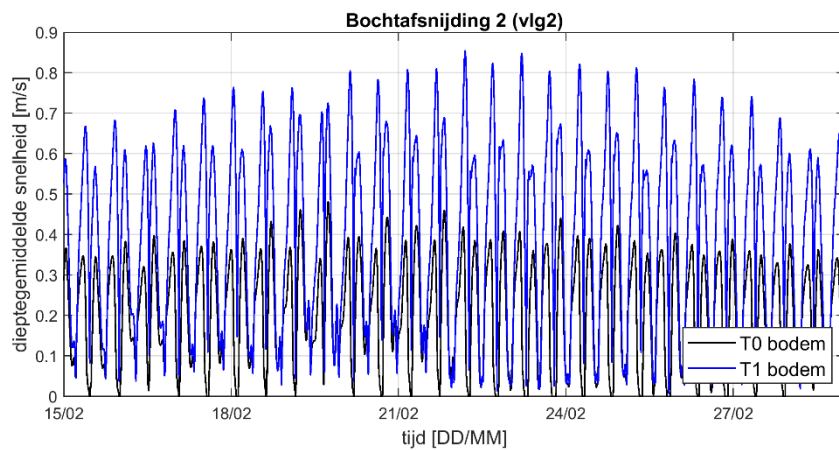
Figuur A.27 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt km17 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



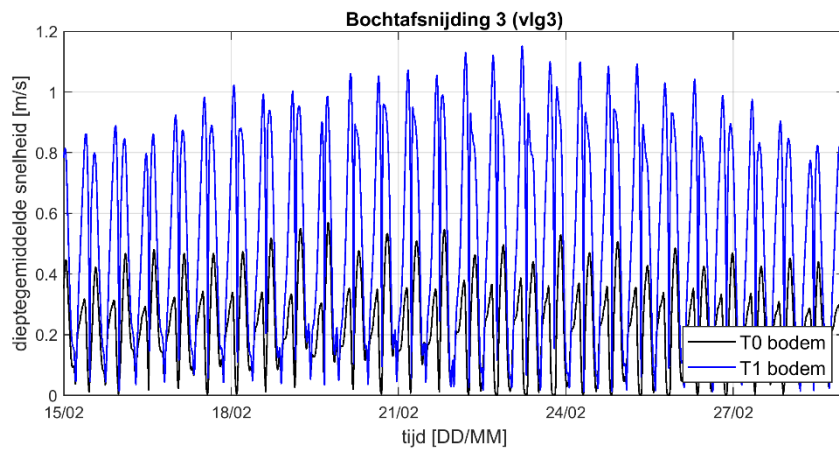
Figuur A.28 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt km18 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



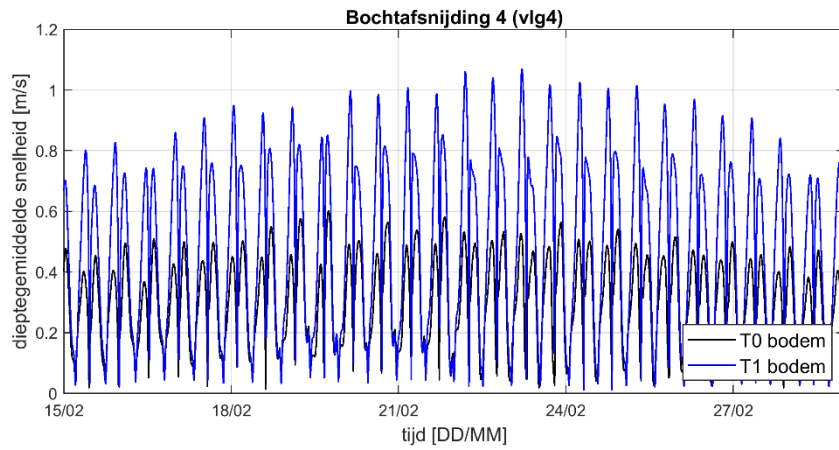
Figuur A.29 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt km19 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



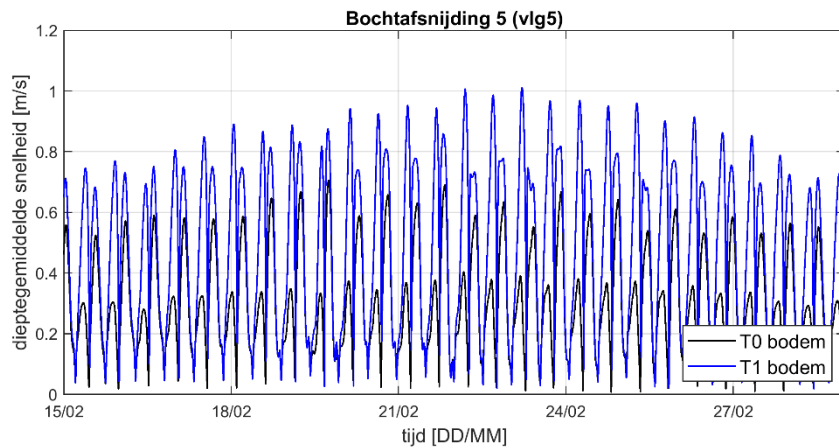
Figuur A.30 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt vlg2 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



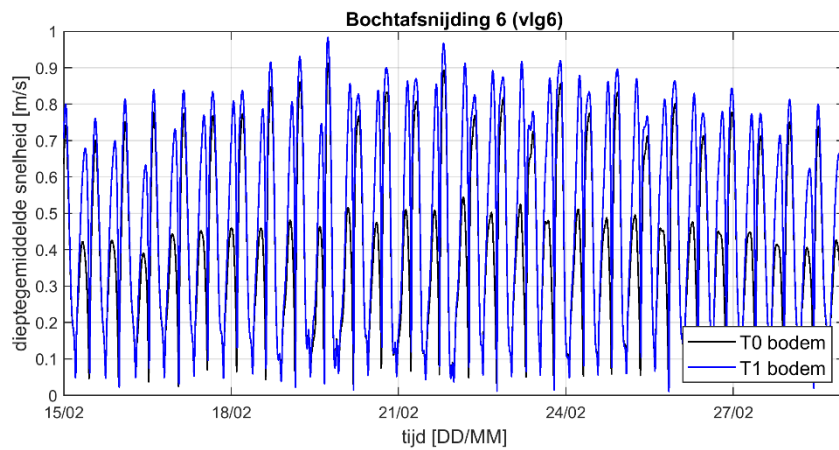
Figuur A.31 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt vlg3 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



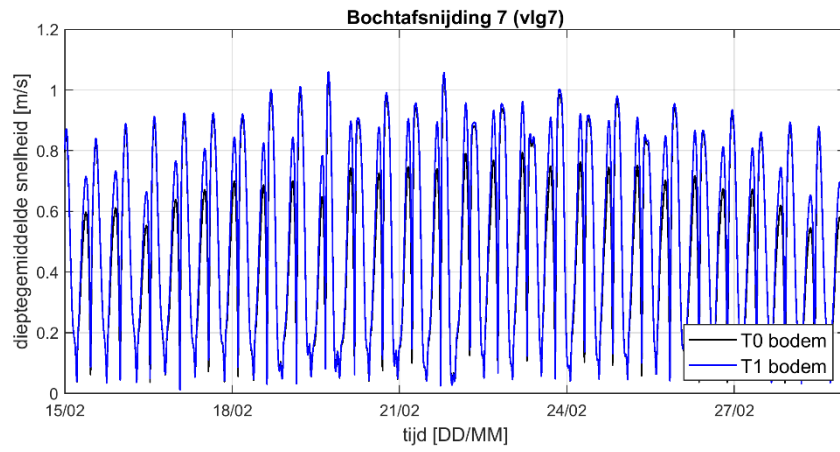
Figuur A.32 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt vlg4 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



Figuur A.33 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt vlg5 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



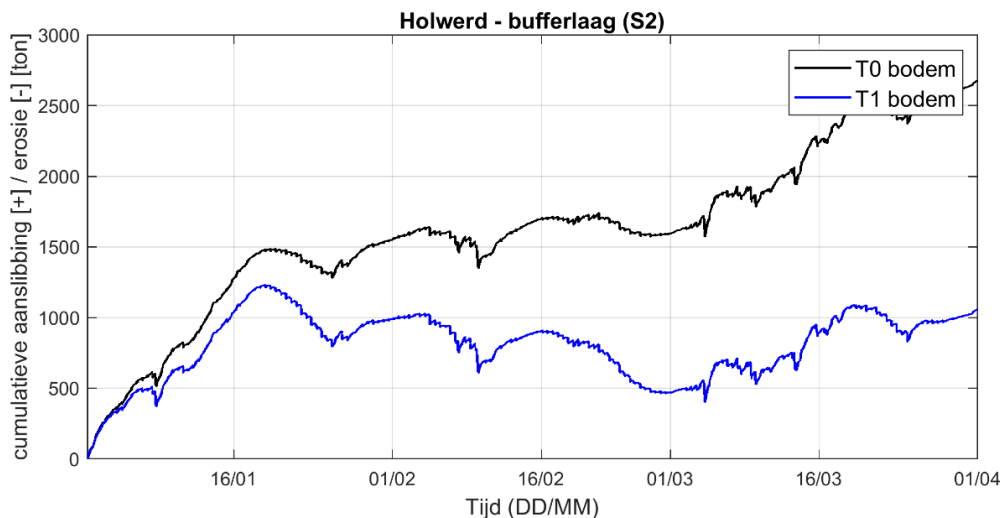
Figuur A.34 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt vlg6 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



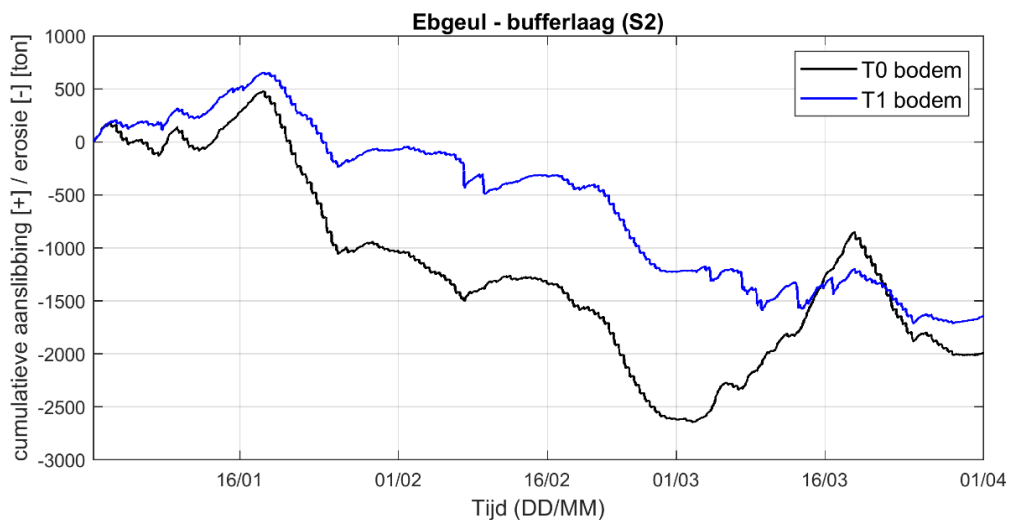
Figuur A.35 Tijdseries van de berekende snelheden bij observatiepunt vlg7 voor de laatste twee weken van februari voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).

A.6 Bijlage 6: Tijdsreefs sedimentatie en erosie in de vaargeul

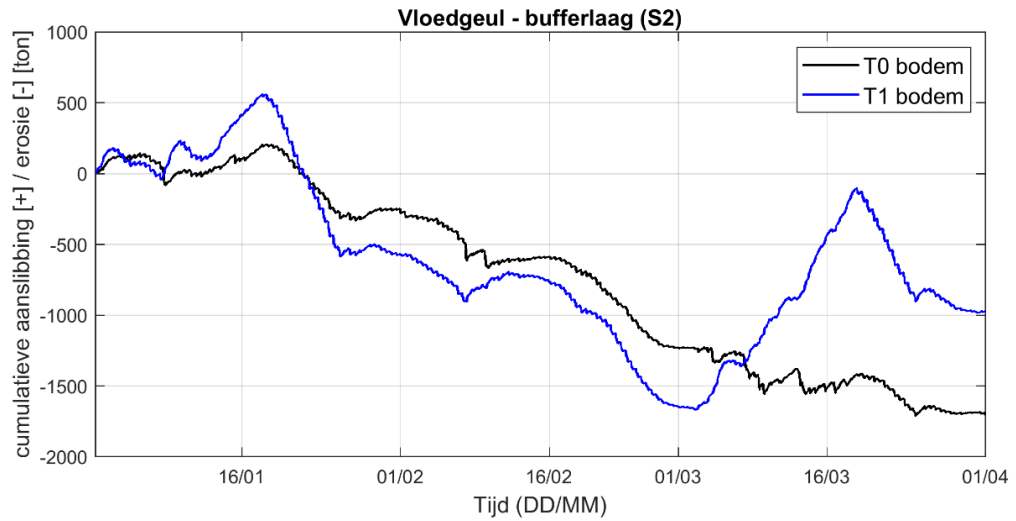
A.6.1 Netto massaverandering van de bufferlaag in de vaargeul



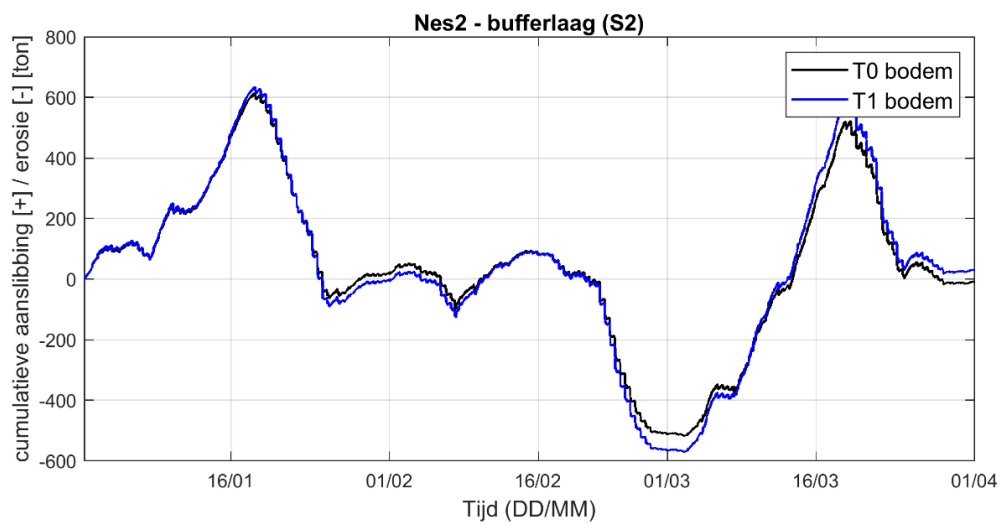
Figuur A.36 Massaverandering van slib in de bufferlaag ten opzichte van het begin van de modelsimulatie voor vak Holwerd voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



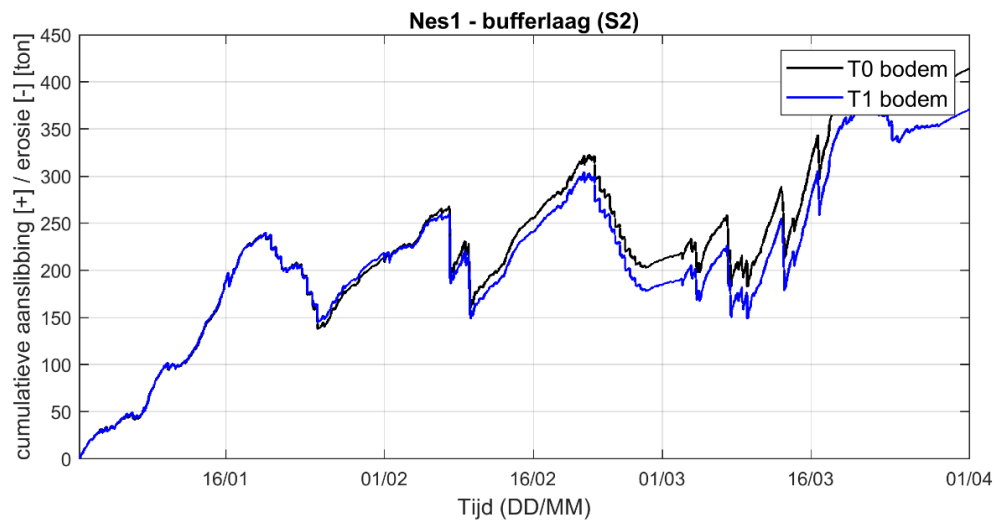
Figuur A.37 Massaverandering van slib in de bufferlaag ten opzichte van het begin van de modelsimulatie voor vak Ebgeul voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).



Figuur A.38 Massaverandering van slib in de bufferlaag ten opzichte van het begin van de modelsimulatie voor vak Vloedgeul voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).

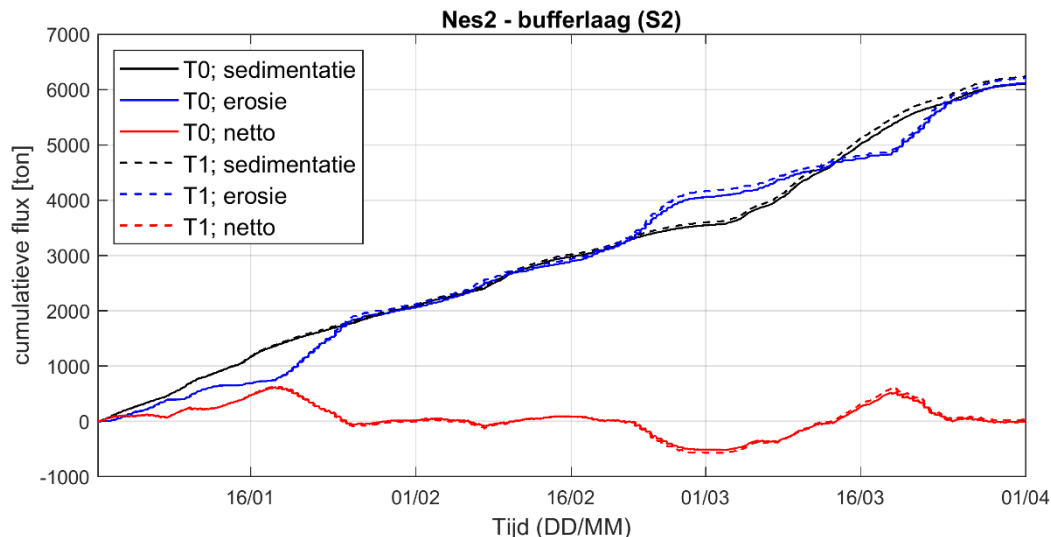


Figuur A.39 Massaverandering van slib in de bufferlaag ten opzichte van het begin van de modelsimulatie voor vak Nes2 voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).

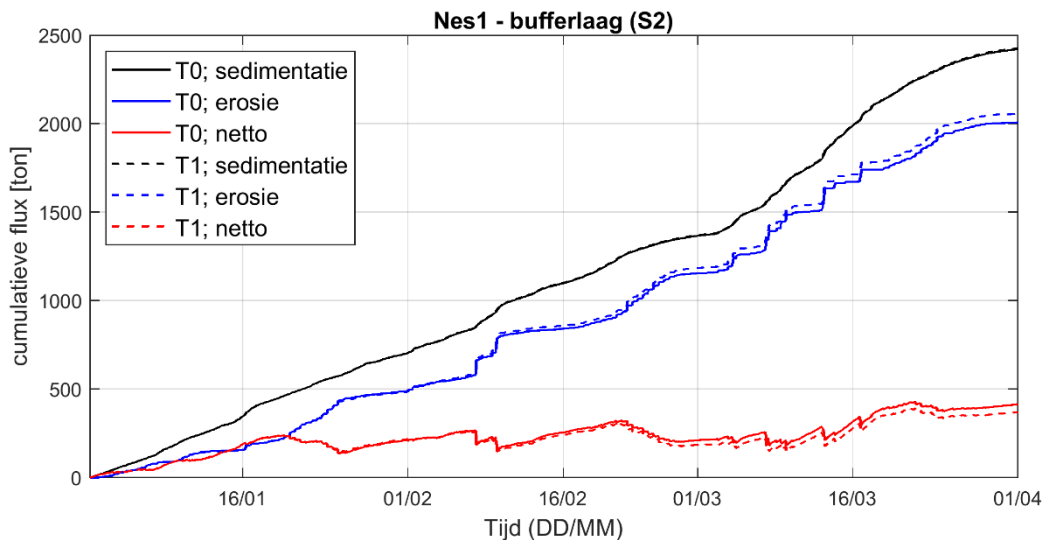


Figuur A.40 Massaverandering van slib in de bufferlaag ten opzichte van het begin van de modelsimulatie voor vak Nes1 voor modelsimulaties met de T0 bodem (in zwart) en met de T1 bodem (in blauw).

A.6.2 Sedimentatie en erosie in de vaargeul bij Nes



Figuur A.41 Tijdseries van de cumulatieve sedimentatie naar de bufferlaag (in zwart), de cumulatieve erosie vanuit de bufferlaag (in blauw) en de massaverandering van de bufferlaag ten opzichte van het begin van de modelsimulatie (in rood) in het vak Nes2 (zie Figuur 4.3).



Figuur A.42 Tijdseries van de cumulatieve sedimentatie naar de bufferlaag (in zwart), de cumulatieve erosie vanuit de bufferlaag (in blauw) en de massaverandering van de bufferlaag ten opzichte van het begin van de modelsimulatie (in rood) in het vak Nes2 (zie Figuur 4.3).

A.7 Bijlage 7: Baggervolumes vaarweg Ameland per maand vanaf 2018

Tabel A.4.1 Droge dichtheid in beun (ton/m³) per baggervak: zeer grove waarden (Rijkswaterstaat)

	Veedam Holwerd	Holwerd -VA33	VA13- VA33	VA9- VA13	VA4- VA6	VA4- Reegeul	Reegeul	Nes haven	
De Vries & Van der Wiel	0.57	0.56	0.56	0.69	0.94	nvt	0.66	0.66	
Van der Lee	0.36	0.36	0.36	0.65	0.65	0.65	0.65	0.36	
Keuze droge dichtheid	0.4	0.4	0.4	0.7	0.8	0.7	0.6	0.5	

Tabel A.4.2 Baggervolumes (Rijkswaterstaat)

Jaar-maand	Veedam Holwerd	Holwerd -VA33	VA13- VA33	VA9- VA13	VA4- VA6	VA4- Reegeul	Reegeul	Nes haven	Aanleg bochtaf- snijding
2018-jan	2480	49600		30500	15550	0	1138	1910	
feb	3640	49900		30250	24870	0	5500	2730	
mrt	2220	55500		76700	25200	0	4800	540	
apr	4322	97300		52850	16700	7500	0	600	
mei	5355	117400		61750	30000	7000	600	4080	
jun	6280	101060		53200	25500	0	600	3790	
jul	4420	105850		17600	25760	24500	1800	2200	
aug	4400	66390		8200	18649	6000	0	3860	
sep	3500	103700		28785	18080	0	600	550	
okt	2480	118000		105000	13600	16700	1200	1380	
nov	4140	111800		19283	13370	17500	2400	2450	
2018-dec	2630	79300		7700	18600	0	0	1750	
2019-jan	1250	90970		7200	14000	0	1800	2670	63262
feb	1575	77000		32300	20500	1500	600	1860	141965
mrt	2280	51600		35200	6380	8500	0	1460	114496
apr	4610	47400	75600	24970	18380	9100	3000	1390	
mei	3750	54600	88630	15600	18250	13100	1200	2570	
jun	4340	34800	44506	9023	13474	600	0	1140	
jul	4020	54200	61893	24271	30123	0	1800	1150	
aug	2725	34940	28268	13750	7573	0	0	0	
sep	5180	81340	38900	19140	10700	0	1800	2590	
okt	4350	85010	23950	19450	8680	16000	600	1710	
nov	2610	72450	24300	20720	7500	7500	600	2020	
2019-dec	1740	33400	28600	22640	3440	10500	0	1730	
2020-jan	4415	39950	20330	15680	8670	2500	0	1695	
feb	1945	62480	12680	17800	600	3000	915	3755	
mrt	4875	86620	41420	51500	11140	7500	900	4105	
apr	8400	89900	28100	43800	9920	5600	1200	2725	
mei	7775	75150	25900	35900	13200	6000	4000	2590	
jun	7500	94040	29580	24400	11390	3500	1800	2860	
Volume gemiddeld (m ³)	3974	74055	38177	30839	15327	5803	1295	2129	
Massa gemiddeld ⁵ (ton)	1589	29622	15271	21587	12261	4062	777	1064	

⁵ Uitgaande van keuze droge dichtheid uit tabel A.4.1

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl