

# Morfologische ontwikkeling Schaar van Valkenisse

**VNSC**

18 februari 2022



## Contactpersoon

**JELMER CLEVERINGA**  
Senior Advisor Coastal  
Morphodynamics

**T** +31 (0)88 4261 440  
**M** +31 (0)6 5073 6850  
**E** [jelmer.cleveringa@arcadis.com](mailto:jelmer.cleveringa@arcadis.com)

**Arcadis Nederland B.V.**  
Postbus 137  
8000 AC Zwolle  
Nederland

---

**LODEWIJK DE VET**  
Onderzoeker/Adviseur Kust  
Morfologie

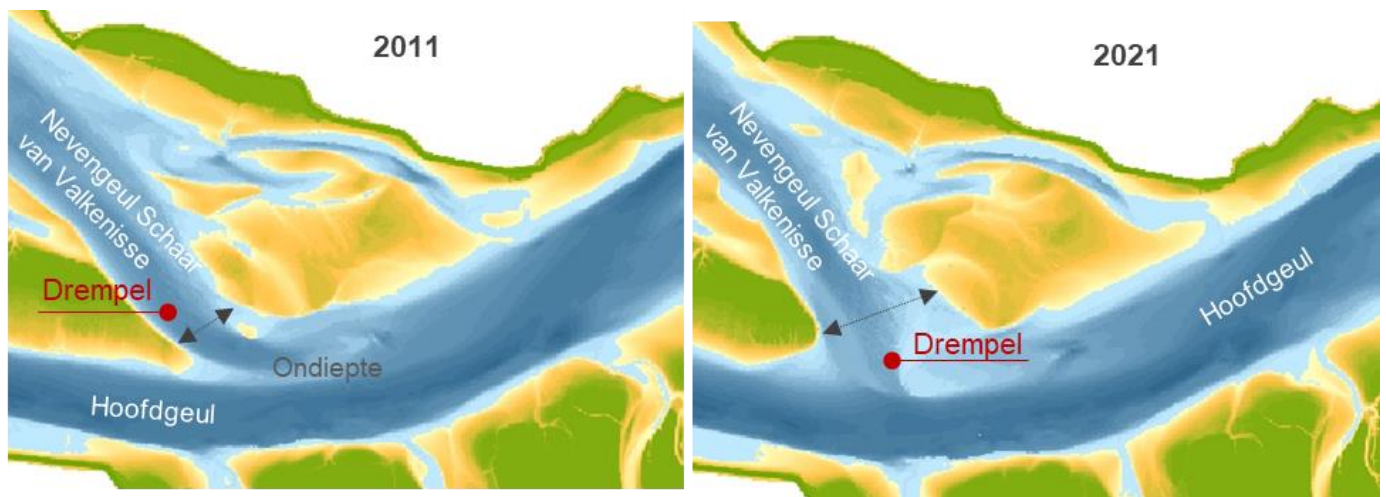
**T** +31 6 25678998  
**M** +31 6 25678998  
**E** [Lodewijk.deVet@deltares.nl](mailto:Lodewijk.deVet@deltares.nl)

**Deltares**  
Postbus 177  
2600 MH Delft  
Nederland

## Samenvatting

De Schaar van Valkenisse is een dynamische nevengeul in de Westerschelde. Recente morfologische veranderingen in de schaar – zoals een ondieper wordende drempel – zijn voor de Permanente Commissie van Toezicht op de Scheldevaart aanleiding geweest om de Vlaams Nederlandse Scheldec commissie te vragen de veranderingen in morfologie en stroming nader in kaart te brengen. Dit om de waarschijnlijke ontwikkelingen in de komende 10 jaar te beschouwen, een advies te geven over de bruikbaarheid van dynamische betonning in die periode en de optie van het wegbaggen van de ontstane ondiepte te kunnen bezien.

De morfologische ontwikkelingen van de drempel in de Schaar van Valkenisse zijn in beeld gebracht met specifieke aandacht voor de minimale diepteligging. In de afgelopen 10 jaar is de geul in de schaar met de klok mee geroteerd en naar het westen gemigreerd. De minst gepeilde diepte op de drempel is in de periode 2011–2021 met 4,5 m afgenomen wat inherent de bevaarbaarheid beperkt. In deze periode is het gehele drempelgebied breder en ondieper geworden. De laatste twee jaar is aan de westzijde van het drempelgebied een kleine ebschaar ontstaan, die door een ondiepte wordt gescheiden van de vloedschaar.



*Figuur samenvatting Kaarten met de drempel in de Schaar van Valkenisse in 2011 (links) en in 2021 (rechts).*

De stroomsnelheden en -richtingen in de schaar zijn berekend voor de bodemliggingen van 2011 en 2020. Het water stroomde in 2011 relatief uniform over de breedte van de schaar. De piekstroming volgde – zowel bij eb als bij vloed – de noordwest-zuidoost georiënteerde dieptecontouren. Daarmee maakte de stroming nabij de overgang met de hoofdgeul slechts een kleine hoek met de stroming in de hoofdgeul.

Met de bodemligging van 2020 is de ruimtelijke diversiteit van de stroming sterk toegenomen. De eb- en vloedstroming nemen nu een verschillende weg (gescheiden door een lokale ondiepte). De piekstroming trad – in lijn met de migratie en rotatie van de diepste delen van de schaar – in 2020 westelijker op dan in 2011 en volgde een noord-zuid oriëntatie (haaks op de stroming in de hoofdgeul). Consequentie is dat de scheepvaart op de overgang van de schaar en de hoofdgeul in de recente situatie te maken kan krijgen met zeer hoge dwarsstromingscomponenten (ruim 1 m/s).

Een eenduidige voorspelling van de morfologische ontwikkelingen van de drempel in de Schaar van Valkenisse is niet mogelijk, vanwege de grote complexiteit van de morfologische ontwikkelingen en de natuurlijke diversiteit in de processen die eraan ten grondslag liggen. Daarom zijn twee scenario's voor de toekomstige ontwikkelingen geformuleerd. In het eerste scenario alterneert ("kwispelt") de positie van de geul in de schaar enkele honderden meters oost- en westwaarts op een tijdschaal van enkele jaren, in lijn met wat de laatste jaren is waargenomen. In dit scenario blijft de drempel relatief breed en ondiep. In het tweede scenario ontstaat een situatie vergelijkbaar met die van ongeveer 10 jaar geleden, doordat de stroming – middels een doorbraak door het ondiepe oostelijke deel van de schaar – haar voornaamste weg weer vindt in noordwest-zuidoostelijke richting. In dat geval kan opnieuw een relatief diepe geul ontstaan waarin de vloed- en ebstroming zich weer kunnen concentreren.

Gegeven deze morfologische ontwikkelingen, is het de verwachting dat het dynamisch betonnen en het nautische gebruik de komende jaren lastiger zal worden dan nu al het geval is. Er wordt aanbevolen om, ten behoeve van het goed betonnen, de drempel en de omgeving daarvan frequent (tenminste tweemaal per jaar) en gebiedsdekkend te

monitoren met een hoge ruimtelijke resolutie (minimaal 2 m x 2 m). Deze metingen dragen ook bij aan het vergroten van de kennis van de drempeldynamiek.

Ingrepen voor het herstellen van de schaar naar een situatie vergelijkbaar aan die van 2011 (na de 3e vaargeulverruiming van de Westerschelde) zijn niet beschouwd in deze studie. Het wegbaggeren van de drempel – ter hoogte van de huidige geul in de schaar – tot de diepte van 2011 zou een verdieping van 4,5 m betekenen. Het baggeren van de geul op de locatie van waar deze in 2011 lag, zou een nog grotere verdieping omvatten, omdat op die locatie tegenwoordig een omvangrijkere ondiepte ligt. Beide zijn dit dus zeer omvangrijke ingrepen in een inherent instabiel en onvoorspelbaar gebied.

Aanbevolen wordt om eerst de kennis over de morfologische veranderingen van het drempelgebied te vergroten door de sedimentvolumes in het drempelgebied te analyseren en morfologische modelberekeningen uit te voeren. Een volgende stap kan een kleinschalige pilot ingreep zijn die nauwgezet dient te worden opgevolgd. Op basis van deze gegevens en kennis kunnen daarna goed onderbouwde keuzes worden gemaakt over vervolgstappen.



# Inhoudsopgave

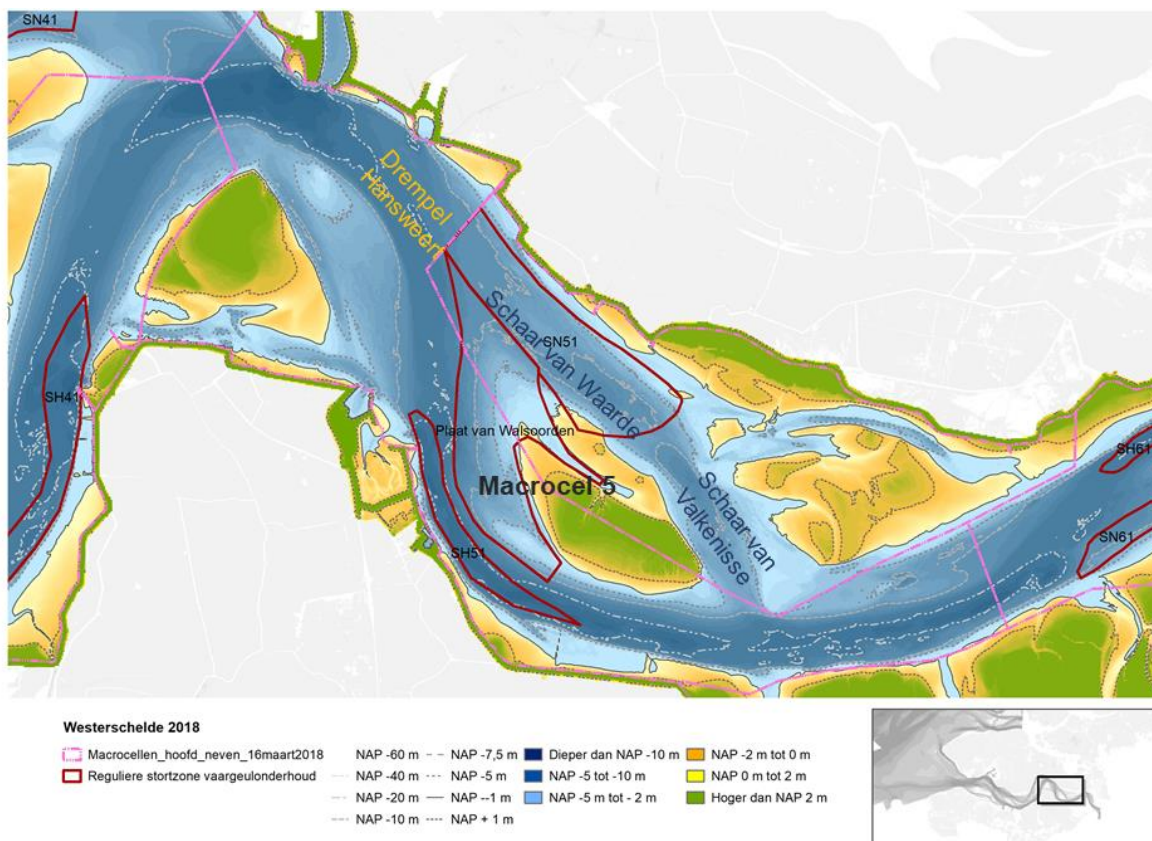
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>6</b>
1.1	Aanleiding	6
1.2	Doelen en onderzoeksvragen	8
1.3	Aanpak en leeswijzer	8
1.4	NAP en LAT	8
<b>2</b>	<b>Morfologische ontwikkeling</b>	<b>10</b>
2.1	Ontwikkelingen van de nevengeul 2011-2020	11
2.1.1	Verondieping van de drempel	11
2.1.2	Rotatie van de nevengeul	18
2.1.3	Verandering van de omvang van de geul	19
2.1.4	Ontwikkeling van de platen	23
2.1.5	Overzicht van de ontwikkelingen	26
2.2	Baggeren en verspreiden	26
2.3	Zeer recente ontwikkelingen in het drempelgebied	27
2.4	De ruimteschaal van bodemvormen	30
2.5	Synthese morfologische ontwikkeling	33
<b>3</b>	<b>Modellering stroming</b>	<b>35</b>
3.1	Model en uitgevoerde simulaties	35
3.2	Resultaten	36
3.2.1	Stroombeelden	36
3.2.2	Gemiddelde pieksnelheden	37
<b>4</b>	<b>Synthese en aanbevelingen</b>	<b>42</b>
4.1	Ontwikkeling morfologie en stroming Schaar van Valkenisse en omgeving 2010-2021	42
4.1.1	Morfologie	42
4.1.2	Stroming	43
4.1.3	Discussie over de aandrijvende processen	44
4.2	Verwachte morfologische ontwikkeling de komende 10 jaar	45

4.3	Aanbevelingen voor het beheer	46
4.3.1	Nautische functie Schaar van Valkenisse	46
4.3.2	Monitoring van de Schaar van Valkenisse	47
4.3.3	Mogelijke vervolgsenario's	47
<b>5</b>	<b>Referenties</b>	<b>49</b>
	<b>Bijlage A Modelopzet</b>	<b>51</b>
	Validatie	52
	Waterstanden	52
	Snelheden	53
	Debieten	55
	<b>Colofon</b>	<b>60</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

De Schaar van Valkenisse is de naam van de oostelijke helft van de nevengeul in macrocel 5 van de Westerschelde (Figuur 1-1). De westelijke helft van de nevengeul is de Schaar van Waarde. De nevengeulen in de Westerschelde hebben een belangrijke nautische functie, in het bijzonder voor de scheiding van de verkeersstromen. De hoofdgeul wordt door de grote vaart gebruikt en de nevengeulen door de overige vaart. De nevengeul van macrocel 5 is met rond de 10.000 op- en afvaarten per jaar de meest gebruikte nevengeul in de Westerschelde (Van Dijk, 2019).

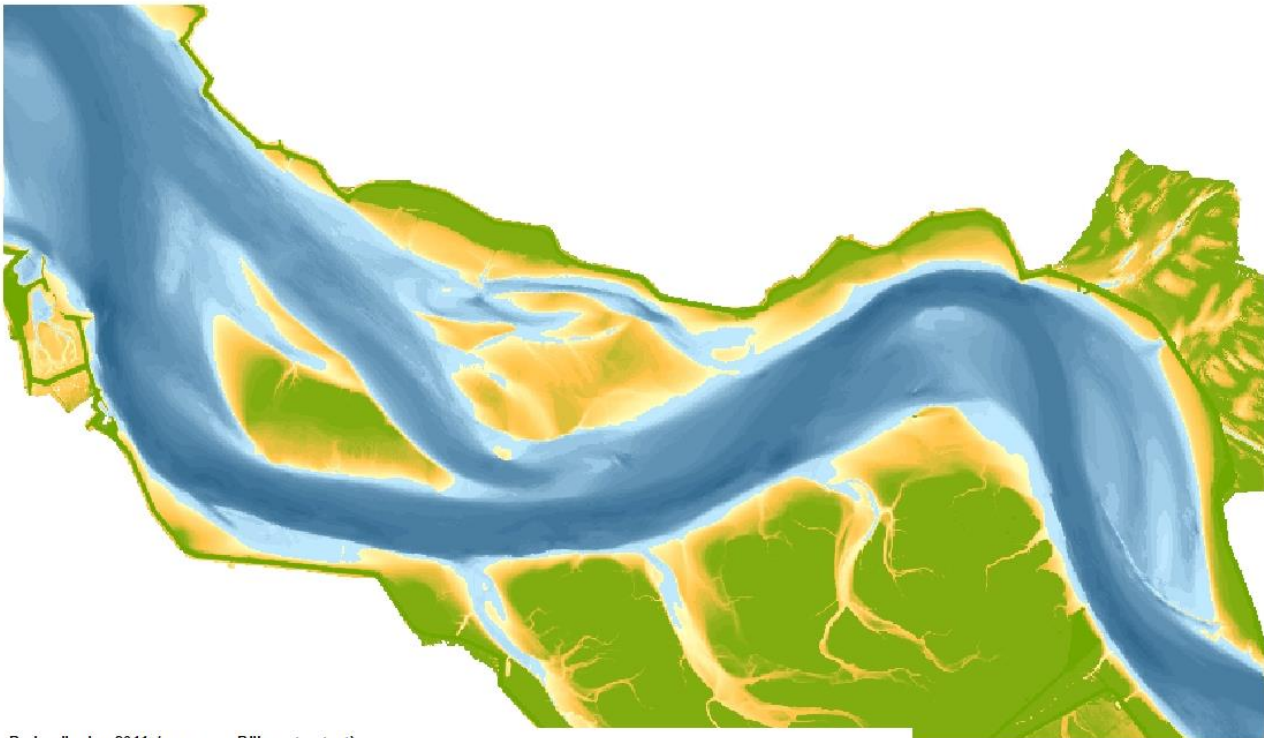


Figuur 1-1 De 2018 bodemligging van de Schaar van Valkenisse en omgeving. De roodbruine polygonen geven de stortzones weer die zijn vergund voor het onderhoud van de hoofdvaargeul. In macrocel 5 liggen ze in de Schaar van Waarde (SN51), op de rand van de Plaat van Walsoorden en in de Bocht van Walsoorden c.q. het Zuidergat (SH51). In SN51 wordt sinds mei 2012 niet meer gestort. Figuur afkomstig uit Van Dijk (2019).

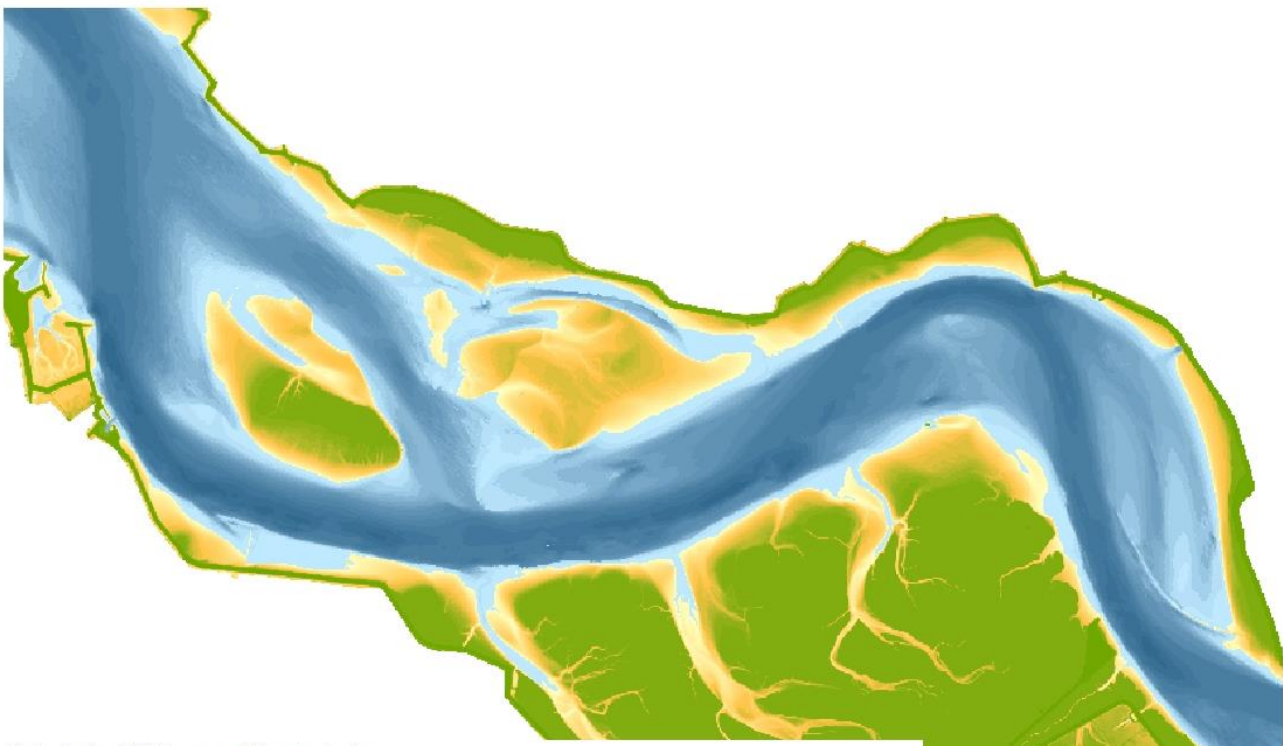
De Schaar van Valkenisse vertoont grote veranderingen die gevolgen hebben voor het nautische gebruik van deze geul. De nevengeul is tot 2020 met de klok mee geroteerd waardoor deze meer haaks op de hoofdgeul (Overloop van Valkenisse) is komen te liggen en tegelijkertijd lokaal is verondiept (Figuur 1-2). De afgelopen jaren is sprake van een meer complexe ontwikkeling, die nog niet zichtbaar is in de beschikbare vaklodingen (tot en met 2020), maar wel in lodingen van het drempelgebied (uit 2019, 2020 en 2021). In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de geobserveerde morfologische veranderingen.

Vanaf 2013 tot heden wordt het bevaarbare deel van de Schaar van Valkenisse aangeven middels dynamische betonning. Dit betekent dat de betonning op basis van de beschikbare minimale diepte wordt gepositioneerd. Dit is conform het huidige beleid. Nevengeulen worden in de Westerschelde niet door onderhoudsbaggerwerk op diepte gehouden. Dit in tegenstelling tot de hoofdvaargeul die wel op diepte wordt gehouden door onderhoudsbaggerwerk.

Rijkswaterstaat wil beter inzicht in de morfologische ontwikkelingen van de Schaar van Valkenisse en hoe deze zich zullen doorzetten, in het bijzonder in de invloed op de nautisch relevante kenmerken van de nevengeul, i.e. diepte, breedte, oriëntatie en stroombeeld.



Bodemligging 2011 (gegevens Rijks waterstaat)



Bodemligging 2020 (gegevens Rijks waterstaat)

-5,010 - -5,000	-2,499 - -2,250	-999 - -900	-499 - -400	-89 - -80	-29 - -20	31 - 40	91 - 100	171 - 180
-4,999 - -4,500	-2,249 - -2,000	-899 - -800	-399 - -300	-79 - -70	-19 - -10	41 - 50	101 - 120	181 - 200
-4,499 - -4,000	-1,999 - -1,750	-799 - -700	-299	-69 - -60	-9 - 0	51 - 60	121 - 140	201 - 400
-3,999 - -3,500	-1,749 - -1,500	-699 - -600	-299 - -200	-59 - -50	1 - 10	61 - 70	141 - 150	401 - 1,000
-3,499 - -3,000	-1,499 - -1,250	-599 - -500	-199 - -100	-49 - -40	11 - 20	71 - 80	151 - 160	
-2,999 - -2,500	-1,249 - -1,000	-499	-99 - -90	-39 - -30	21 - 30	81 - 90	161 - 170	



Figuur 1-2 Bodemdiepte ten opzichte van NAP van macrocel 5 uit 2011 (boven) en 2020 (onder).



## 1.2 Doelen en onderzoeksvragen

In deze studie staan de morfologische veranderingen centraal en deze studie heeft daarvoor als doel:

- De morfologische ontwikkeling van de Schaar van Valkenisse te begrijpen.
- Op basis hiervan een inschatting te maken van de verwachte morfologische ontwikkeling in de komende 10 jaar.

In aanvulling op deze doelen, zijn ook doelen geformuleerd ter advisering van het beheer van de vaarweg in de nevengeul:

- De toepasbaarheid van dynamisch betonnen in de komende 10 jaar in beeld brengen.
- In beeld brengen in hoeverre het mogelijk is om de drempel in de Schaar van Valkenisse door baggerwerk te verdiepen voor de scheepvaartfunctie.

Deze doelen zijn vertaald in drie onderzoeksvragen waar dit rapport antwoord op geeft.

1. Wat is de hydro-morfologische ontwikkeling van de Schaar van Valkenisse en omgeving tussen 2011 en 2021, en welke processen liggen hieraan ten grondslag?
2. Wat is de verwachte morfologische ontwikkeling van de Schaar van Valkenisse voor de komende 10 jaar?
3. Wat betekent deze (verwachte) morfologische ontwikkeling voor het beleid en beheer van de Schaar van Valkenisse?

### Antwoorden op de onderzoeksvragen

Onderzoeksvraag: *Wat is de hydro-morfologische ontwikkeling van de Schaar van Valkenisse en omgeving tussen 2011 en 2021, en welke processen liggen hieraan ten grondslag?*

Antwoord: *In de afgelopen 10 jaar is de geul in de schaar met de klok mee geroteerd en naar het westen gemigreerd. De minst gepeilde diepte op de drempel is in de periode 2011–2021 met 4,5 m afgenomen wat inherent de bevaarbaarheid beperkt. In deze periode is het gehele drempelgebied breder en ondieper geworden. De laatste twee jaar is aan de westzijde van het drempelgebied een kleine ebschaar ontstaan, die door een ondiepte wordt gescheiden van de vloodschaar. Deze ontwikkelingen lijken niet het directe gevolg te zijn van menselijke ingrepen, zoals het baggeren en storten, maar een gevolg van de autonome dynamiek van het drempelgebied.*

Onderzoeksvraag: *Wat is de verwachte morfologische ontwikkeling van de Schaar van Valkenisse voor de komende 10 jaar?*

Antwoord: *Voor de toekomstige ontwikkelingen zijn twee scenario's geformuleerd. In het eerste scenario alterneert ("kwispelt") de positie van de geul in de schaar enkele honderden meters oost- en westwaarts op een tijdschaal van enkele jaren, in lijn met wat de laatste jaren is waargenomen. In dit scenario blijft de drempel relatief breed en ondiep. In het tweede scenario ontstaat een situatie vergelijkbaar met die van ongeveer 10 jaar geleden, doordat de stroming – middels een doorbraak door het ondiepe oostelijke deel van de schaar – haar voornaamste weg weer vindt in noordwest-zuidoostelijke richting. In dat geval kan opnieuw een relatief diepe geul ontstaan waarin de vloed- en ebstroming zich weer kunnen concentreren.*

Onderzoeksvraag: *Wat betekent deze (verwachte) morfologische ontwikkeling voor het beleid en beheer van de Schaar van Valkenisse?*

Antwoord: *Vanwege de verwachte morfologische ontwikkelingen, zal dynamisch betonnen en het nautische gebruik de komende jaren (nog) lastiger worden dan nu al het geval is. Er wordt aanbevolen om, ten behoeve van het goed betonnen, de drempel en de omgeving daarvan frequent (tenminste tweemaal per jaar) en gebiedsdekkend te monitoren met een hoge ruimtelijke resolutie (minimaal 2 m x 2 m) en deze metingen te laten analyseren. De kennis van het drempelgebied kan verder worden vergroot door de sedimentvolumes in het drempelgebied te analyseren en morfologische modelberekeningen uit te voeren. Een volgende stap kan een kleinschalige pilot ingreep zijn die nauwgezet dient te worden opgevolgd. Op basis van deze gegevens en kennis kunnen daarna goed onderbouwde keuzes worden gemaakt over vervolgstappen.*

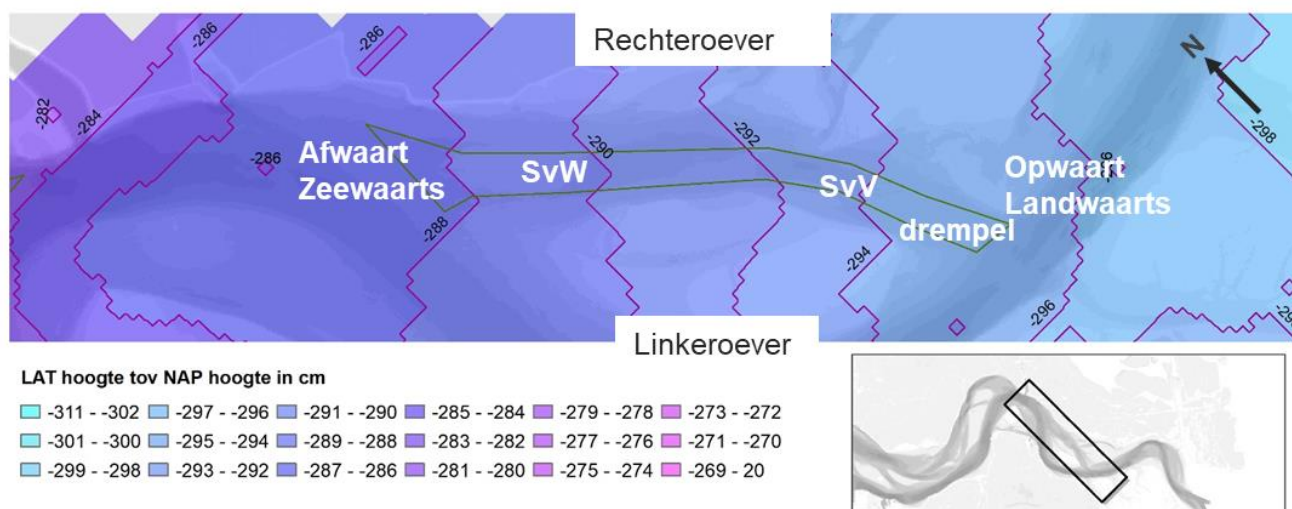
## 1.3 Aanpak en leeswijzer

Voor het beantwoorden van de onderzoeksvragen is een tweeledige aanpak gekozen, waarbij gebruik is gemaakt van metingen van de bodemhoogte en een numeriek model van de waterbeweging. Met de metingen (vaklodingen 2011-2020 van de Westerschelde en gedetailleerde multibeamlodingen uit de periode 2019-2021 die alleen de Schaar van Valkenisse omvatten) zijn de morfologische ontwikkelingen in beeld gebracht en geanalyseerd. Het model van de waterbeweging is gebruikt om de stromingspatronen aan het begin en aan het einde van de periode 2011-2020 te analyseren. Daarbij is veel aandacht besteed aan het bepalen van de dominantie van de eb- dan wel vloedstroming in en nabij de Schaar van Valkenisse en de verschillen die daarin optreden tussen 2011 en 2020. De uitkomsten van de beide analyses zijn gecombineerd en meerdere keren besproken, zowel binnen het projectteam (Wout van Dijk – tot 1 oktober 2021, Lodewijk de Vet, Jebbe van der Werf & Jelmer Cleveringa) als met het projectteam (Marco Schrijver - Rijkswaterstaat Zee & Delta, Yves Plancke, Jeroen Verwilligen- beide Waterbouwkundig Laboratorium Borgerhout) en met andere specialisten op het gebied van hydromorfologie van de Westerschelde ( Zheng Bing Wang en Marcel Taal – beide Deltares ).

De gevolgde aanpak komt terug in de opbouw van dit rapport. In hoofdstuk 2 staan de resultaten van de analyse van de bodemligging. Hoofdstuk 3 geeft de resultaten van modelberekeningen. De integratie, met de beantwoording van de onderzoeksvragen staat in hoofdstuk 4.

## 1.4 NAP en LAT

In het voorliggende rapport wordt de bodemligging, zoals bijvoorbeeld Figuur 1-2, uitgedrukt in meters ten opzichte van NAP (de Nederlandse referentiehoogte). Voor het nautische gebruik wordt de diepte uitgedrukt in meters ten opzichte van LAT (Lowest Astronomical Tide). Figuur 1-3 toont het hoogteverschil tussen NAP en LAT in centimeters. Rond de nevengeul in Macrocel 5 varieert dit hoogteverschil met zo'n 6 cm. Ter hoogte van de drempel is een diepte van 0 meter LAT gelijk aan NAP -2,94 m. De waterdiepte in LAT ter hoogte van de drempel wordt verkregen door bij de waterdiepte in meter NAP +2,94 meter op te tellen. Een waterdiepte van NAP -10 m wordt dus een waterdiepte van LAT -7,06 m.

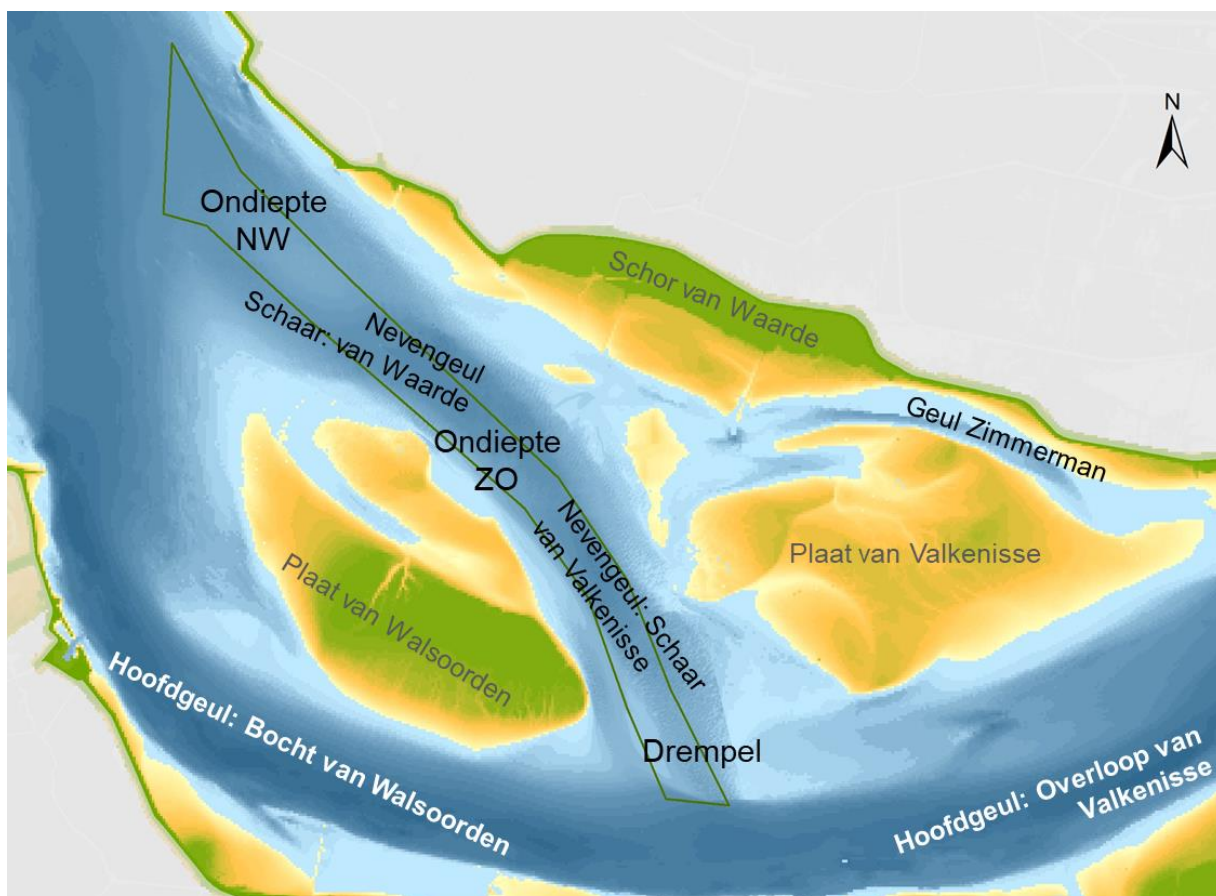


Figuur 1-3 Kaart van de Schaar van Waarde (SvW) en de Schaar van Valkenisse (SvV) met het niveau van LAT ten opzichte van de hoogte in NAP, in centimeters.

## 2 Morfologische ontwikkeling

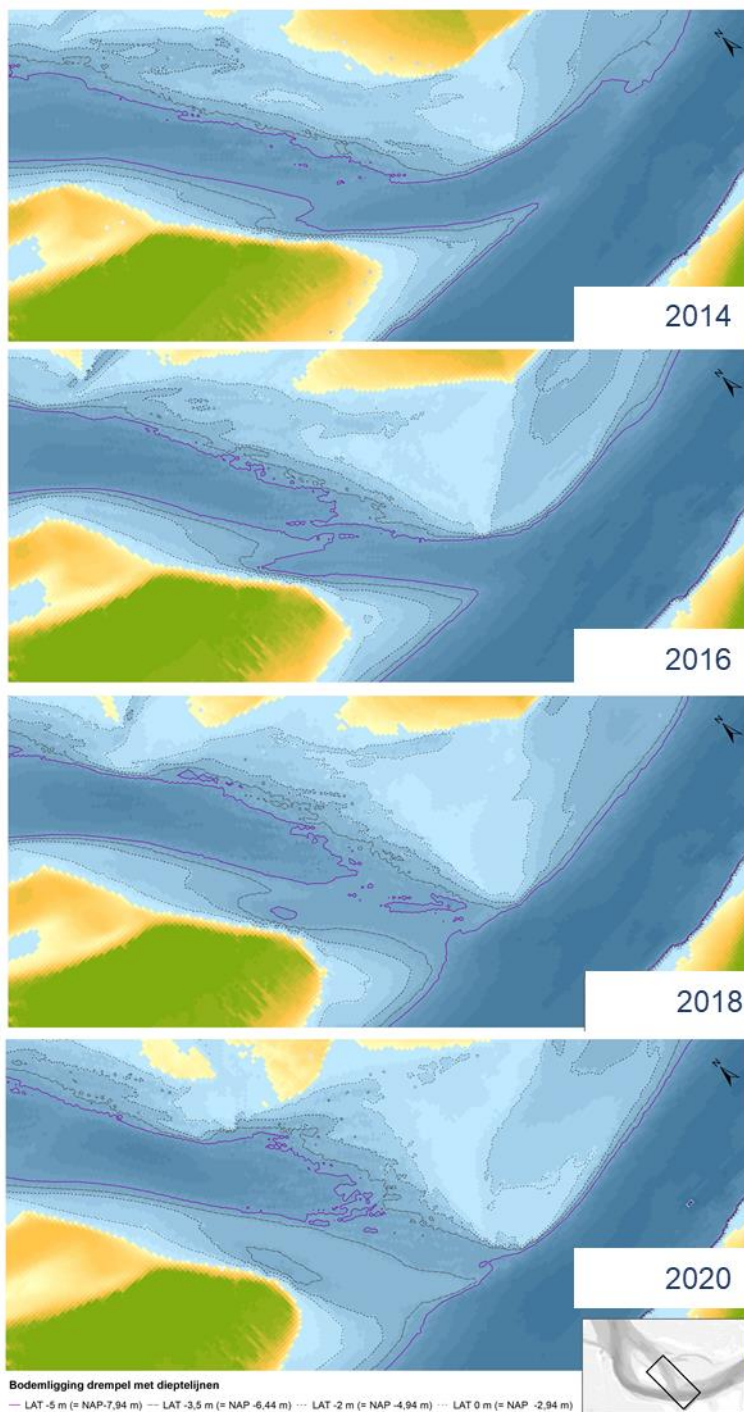
Om de ontwikkeling van de Schaar van Valkenisse beter te begrijpen en een inschatting te maken van de morfologische ontwikkeling voor de komende jaren is in dit hoofdstuk gekeken naar de morfologische ontwikkeling in de afgelopen 11 jaar (2011-2021; Figuur 1-2). Deze periode is gekozen, omdat deze begint na de derde verruiming van de Westerschelde. Bij de beschouwing van de morfologie ligt de focus op de ontwikkeling van de platen, geulen, drempel en ondieptes rondom de Schaar van Valkenisse (Figuur 2-1). Het primaire aandachtsgebied is daarbij de drempel aan de zuidoostzijde van de Schaar van Valkenisse (Figuur 2-2), omdat daar het knelpunt ligt voor het nautische gebruik. Bij aanvang van de periode 2011-2020 was sprake van een beperkte omvang van de drempel bij de oostelijke uitgang van de nevengeul. In de kaart uit 2014 van het drempelgebied in Figuur 2-2 is zichtbaar dat in vrijwel het hele drempelgebied nog sprake was van een diepte van meer dan LAT -5 m. In de daaropvolgende kaarten was dit niet meer het geval. De diepte is en de breedte van de geul namen af op de drempel.

De analyse is opgebouwd van de grote ruimtelijke schaal van de hele (vaar)geul, via de drempel naar de kleine ruimtelijke schaal van de bodemvormen op de geulbodem. In paragraaf 2.1 staat de nevengeul centraal en in de paragraaf 2.2 worden de volumes van de verspreide baggerspecie beschouwd. In paragraaf 2.3 wordt in detail naar het drempelgebied gekeken in de periode 2019-2021. Ten slotte wordt in paragraaf 2.4 kort stilgestaan bij de dynamiek van nog kleinere morfologische elementen dan geul en drempel, zoals megaribbels.



*Figuur 2-1* Overzicht met namen en morfologische eenheden (plaat, geul, drempel en ondieptes) in een combinatie van de vakloding 2020 van de hele Westerschelde en de loding november 2020 van de drempel. De groene polygoon is gebruikt voor de analyse van het volume in paragraaf 2.1.3.





Figuur 2-2 Overzicht van het drempelgebied met de LAT -5 m, -3,5 m, -2 m en 0 m dieptelijnen (alleen toepasbaar voor de drempel, omdat de LAT is berekend door de NAP diepte verminderen met 2,94 m).

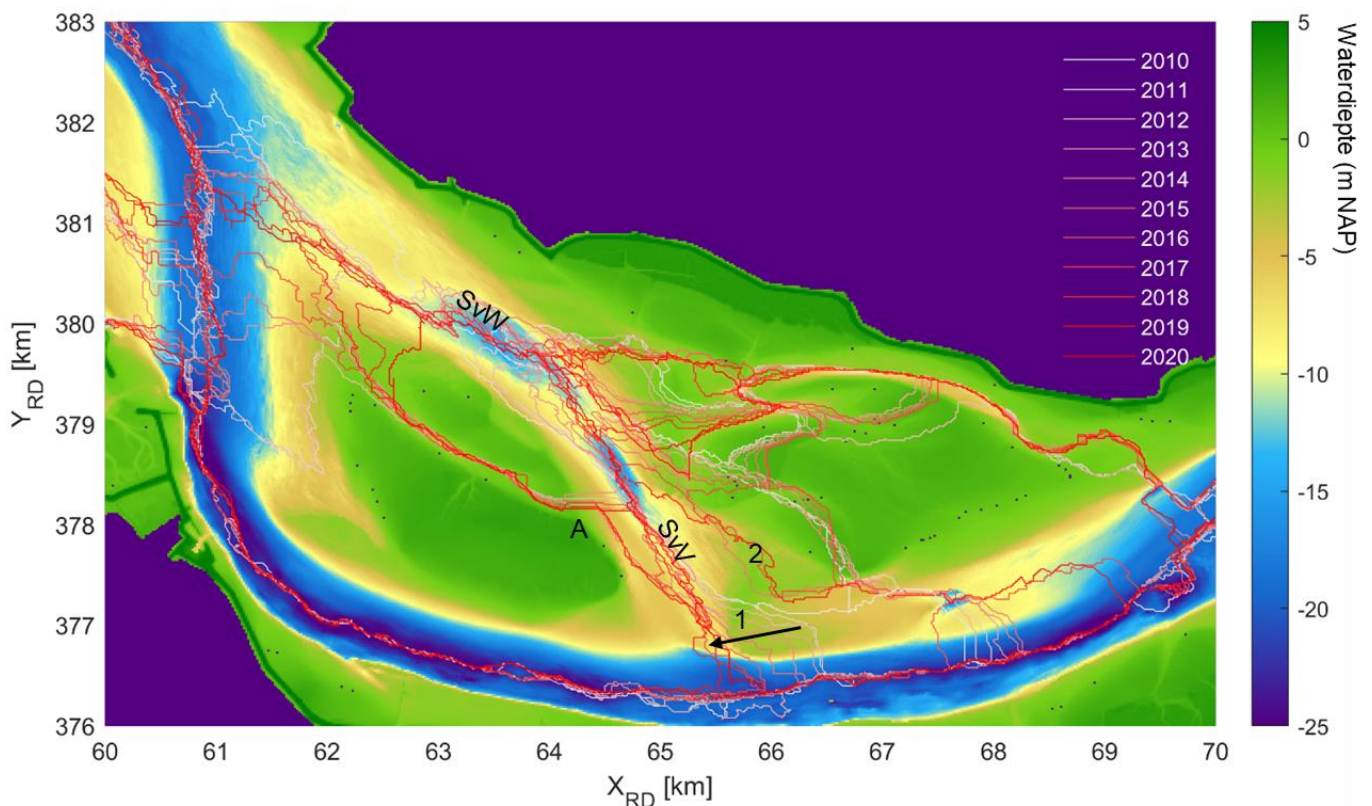
## 2.1 Ontwikkelingen van de nevengeul 2011-2020

### 2.1.1 Verondieping van de drempel

De ontwikkeling van de geulen is in beeld gebracht door in de tijd de diepste locaties te volgen. Hiervoor is gebruik gemaakt van automatische geulennetwerk analyse (zie hiervoor Hiatt, et al., 2020 en Van Dijk, et al., 2021). De

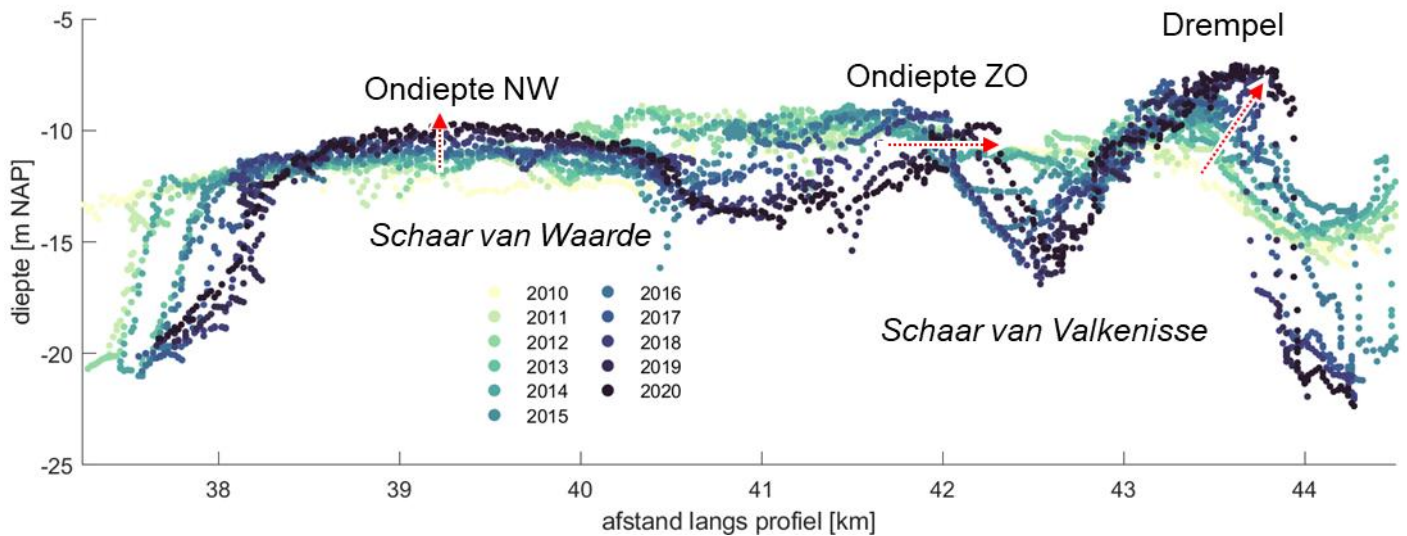


uitkomst hiervan is getoond in Figuur 2-3. In deze geul zijn alle geulverbindingen aangegeven die door de automatische geulennetwerk analysetool worden herkend. Deze verbindingen komen deels overeen met de geulen die met het blote oog herkenbaar zijn, maar er zijn ook verbindingen gelegd die een continuering zijn van scharen en die niet als zodanig herkend worden (A in Figuur 2-3). Voor deze beschouwing wordt alleen gekeken naar de Schaar van Valkenisse (SvV en 1 in Figuur 2-3) en het kleine geultje in de ondiepte ten noordoosten daarvan (2 in Figuur 2-3). De pijl bij 1 in Figuur 2-3 illustreert de zijdelingse verplaatsing van de Schaar van Valkenisse, en dan met name de verplaatsing van de drempel van oost naar west. De snelheid van de verplaatsing van de drempel varieert in de tijd. Tussen 2010 en 2016 was de verplaatsing het grootst. Na 2016 neemt de migratie naar het westen af en ligt de drempel op min of meer dezelfde locatie. In deze periode ontstaat er een nieuwe laagte ten oosten van de Schaar van Valkenisse, deze verbinding wordt aangegeven met 2 in Figuur 2-3. De verlagingen die ten oosten van de geul ontstaan hebben tot op heden nog niet geleid tot een andere loop van de Schaar van Valkenisse.

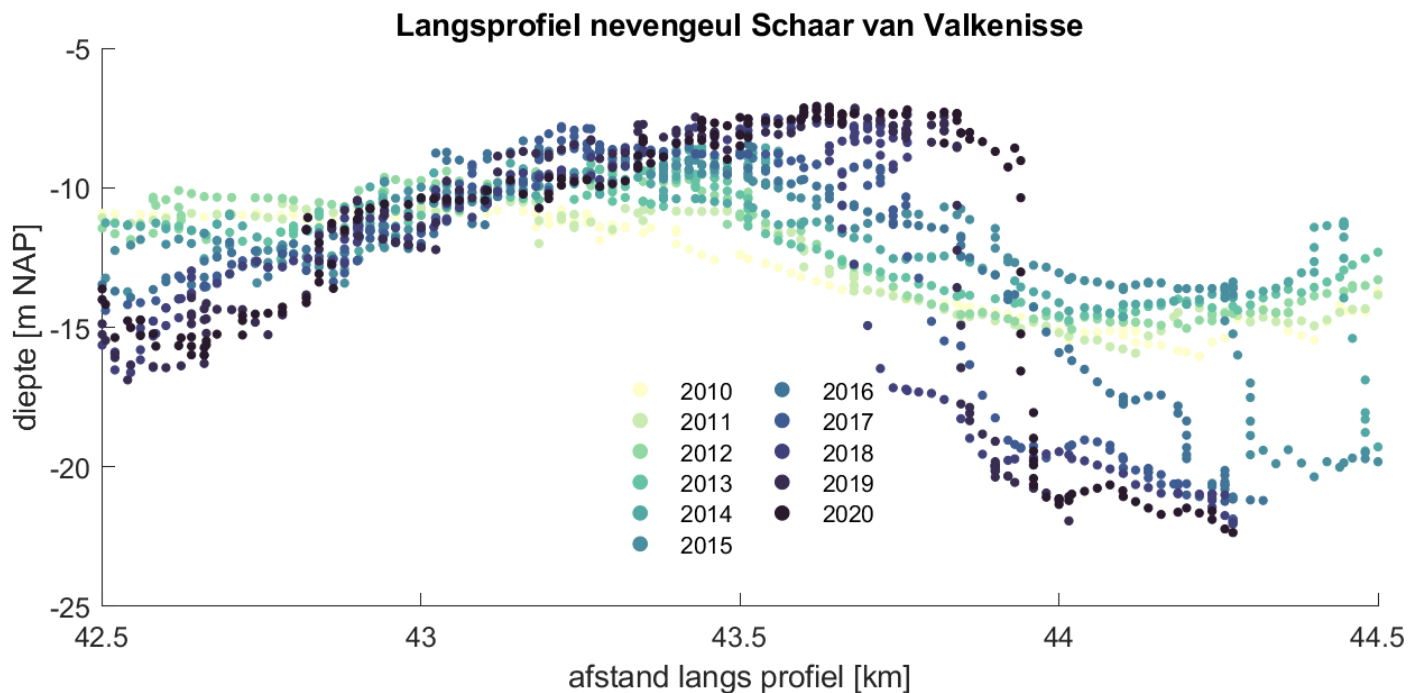


Figuur 2-3 Geulennetwerk gebaseerd op bodemhoogte laat de verschuiving zien van de Schaar van Valkenisse (SvV). Bodemligging 2020.

Het diepteprofiel langs het diepste deel van de geul (de talweg) is weergegeven in Figuur 2-4. De positie van dit profiel is dus van jaar-op-jaar anders (de lijnen bij SvW en SvV in het netwerk van Figuur 2-3). Doordat de nevengeul Schaar van Valkenisse met de klok mee draait, is de lengte van de nevengeul afgenomen. De afwaartse overgang van de hoofdgeul naar de nevengeul Schaar van Waarde lag in de eerste jaren geheel links in het diepteprofiel in Figuur 2-4 en is verschoven naar km 38. Aan de rechterkant is de overgang van de nevengeul Schaar van Valkenissen naar de hoofdgeul opgeschoven tot rond km 44. Door alternerende erosie/sedimentatie vlakken in de nevengeul verplaatsen ook de locaties van drempels in de nevengeul. Uit analyse van het langspatiefiel (Figuur 2-4) komt naar voren dat de meest opwaartse drempel (op 43,5 km) ondieper wordt. Deze ontwikkelingen zijn duidelijker zichtbaar in de uitsnede van de drempel in Figuur 2-8. De ondiepte aan de noordwestzijde in het zeewaartse deel is ondieper geworden rond 39 km tussen 2010 en 2020, maar dit vormt geen kritisch punt voor scheepvaart t.o.v. de landwaartse drempel. De zuidoostelijke ondiepte in het centrale deel van de nevengeul wordt niet hoger, maar er vindt wel een evolutie plaats van een lange ondiepe zone naar een meer geprononceerde drempel.



Figuur 2-4 Langsprofiel door de Schaar van Valkenisse van 2010-2020. De diepte is bepaald langs het diepste pad (de tal weg) dat voor elk jaar opnieuw is bepaald. De x-as geeft afstand t.o.v. Vlissingen aan.

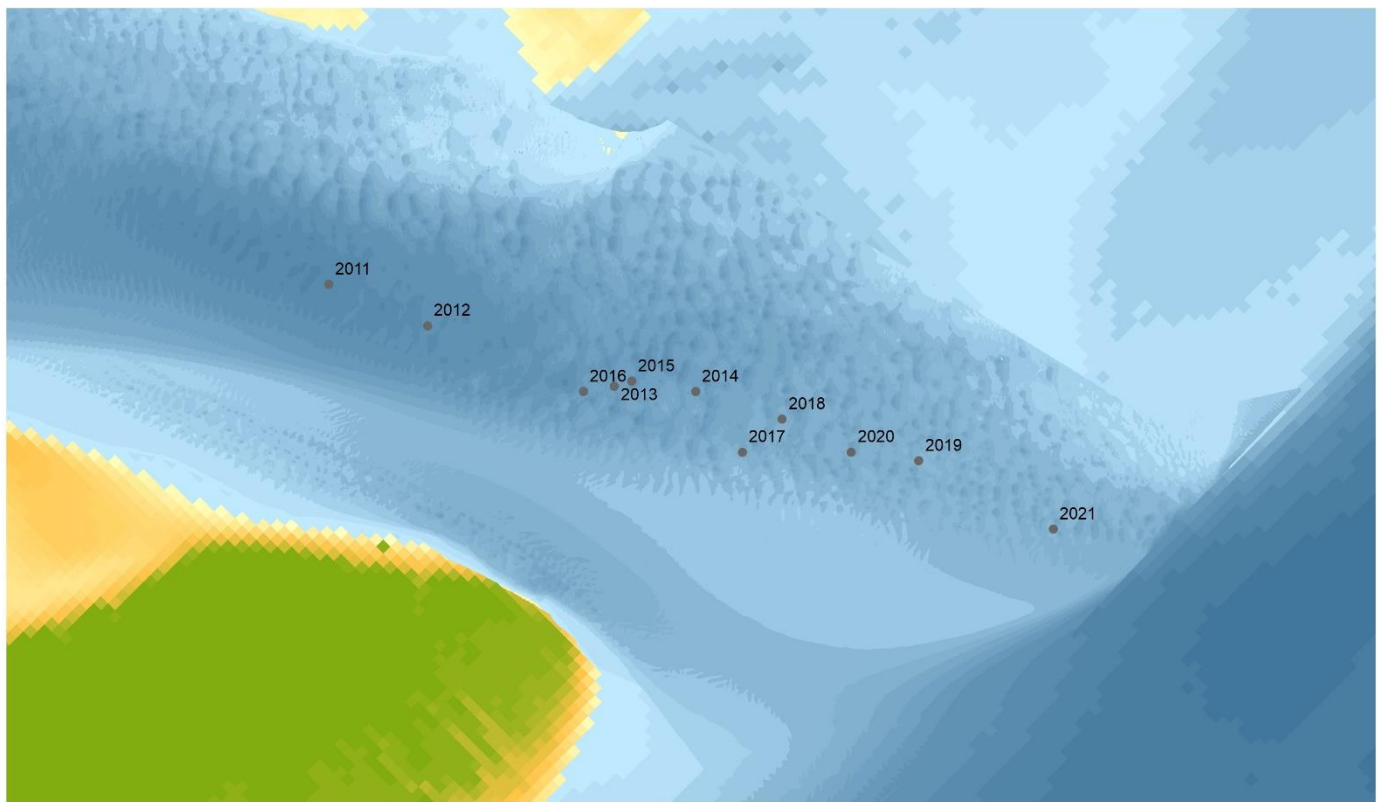


Figuur 2-5 Detailweergave tussen km 42,5 en 44,5 van het langsprofiel door de Schaar van Valkenisse van 2010-2020, zoals getoond in Figuur 2-4.

De afname van de diepte op de drempel die zichtbaar is in Figuur 2-5 volgt ook uit Tabel 2-1 met daarin de minst gepeilde diepte in de talweg in het drempelgebied. De diepte is afgenomen van NAP -10 m in 2011 tot NAP -5,5 m in 2021. De locatie van de ondiepste punten op de talweg staat in Figuur 2-6.

Tabel 2-1 Overzicht van de minst gepeild diepte in de talweg van de geul op de drempel in de Schaar van Valkenisse op basis van de vaklodingen (\*: met uitzondering van de waarde van 2021, die is bepaald op basis van de loding van november 2021).

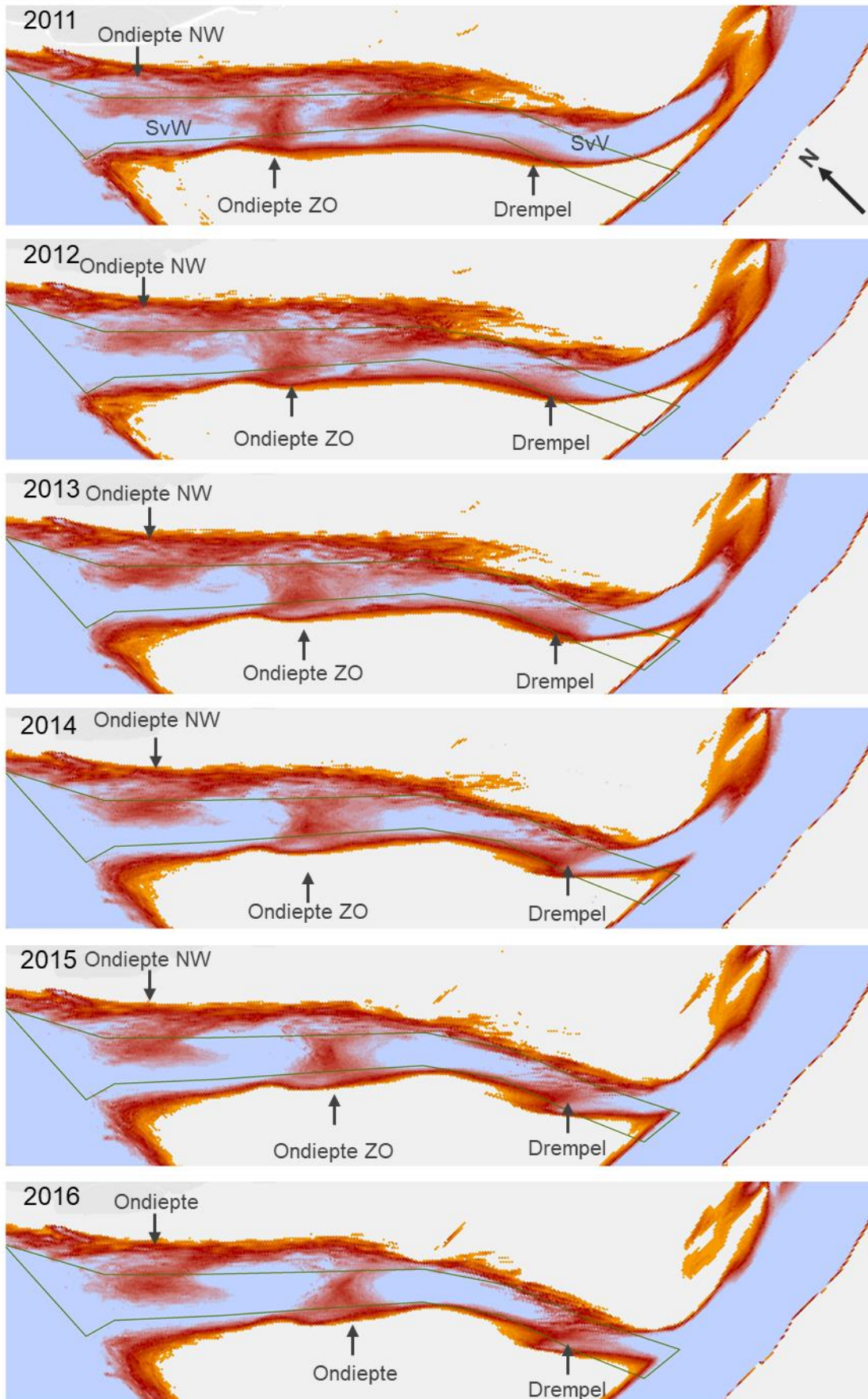
Jaar	Minst gepeilde diepte m NAP	Minst gepeilde diepte m LAT
2011	-10	-7,06
2012	-8,88	-5,94
2013	-8,45	-5,51
2014	-7,61	-4,67
2015	-8,07	-5,13
2016	-7,05	-4,11
2017	-7,3	-4,36
2018	-6,75	-3,81
2019	-6,4	-3,46
2020	-6,28	-3,34
2021*	-5,50	-2,56

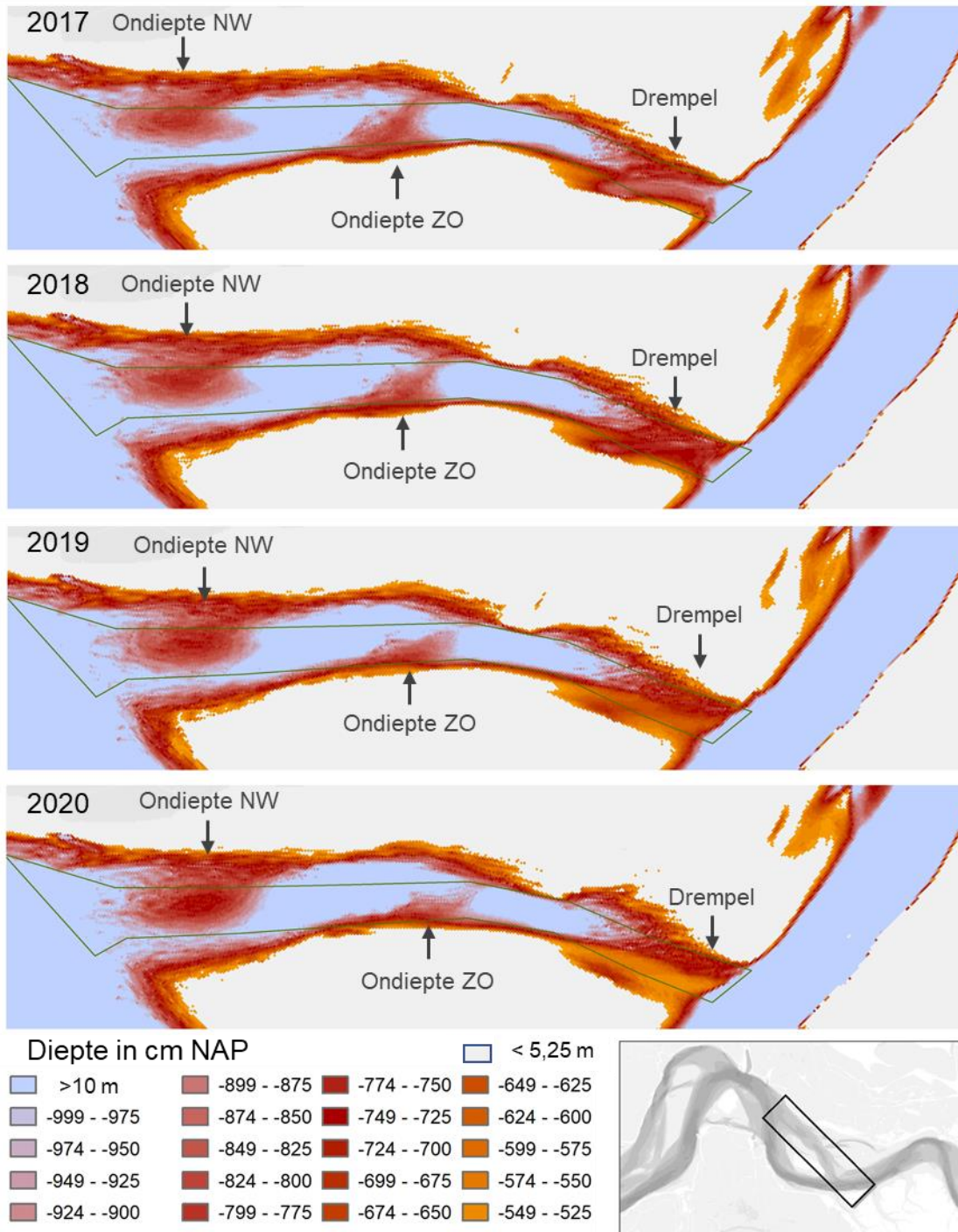


Figuur 2-6 Kaart van het drempelgebied met de locatie van de minst gepeilde diepte, zoals aangegeven in Tabel 2-1.

De ontwikkeling van de drempel en de twee ondieptes (Ondiepte NW in de Schaar van Waarde en Ondiepte ZO) is in Figuur 2-7 zichtbaar gemaakt door hierin alleen het dieptebereik van de drempel te markeren. De geulen dieper dan NAP -10 m zijn blauw in deze kaarten en de delen ondieper dan NAP -5,25 m, waaronder de droogvallende platen, zijn grijs. Met dit dieptebereik is het gehele bereik van de minst gepeilde diepte op de drempel in de periode 2011-2021, zoals weergegeven in Tabel 2-1 weergegeven. De drempel en ondieptes zijn zichtbaar in roodtinten. In de kaarten is zichtbaar dat de drempel naar het zuidoosten verschuift en dat daarbij de omvang toeneemt. Ook de ondiepte in het midden verschuift naar het zuidoosten. De positie van de ondiepte aan de noordwestzijde blijft vergelijkbaar, maar het gebied dat ondieper is dan NAP -10 m breidt geleidelijk uit. In deze figuur is ook zichtbaar dat de overgang van de nevengeul Schaar van Valkenisse naar de hoofdgeul draait. In de volgende paragraaf wordt hier nader op ingegaan.







Figuur 2-7 Kaarten van de drempel en de ondieptes in de Schaar van Waarde en de Schaar van Valkenisse op basis van de vaklodingen 2011-2020. De groene polygoon is gebruikt voor de analyse van het volume in paragraaf 2.1.3 en is ook getoond in Figuur 2-1.

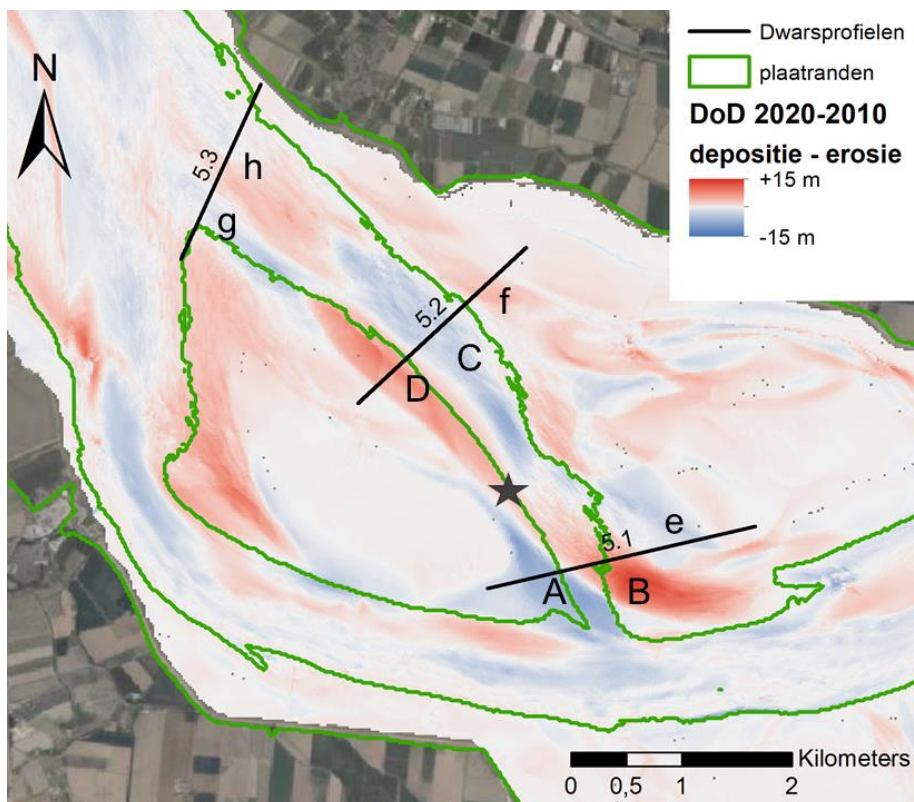


## 2.1.2 Rotatie van de nevengeul

De rotatie van de geul is een van de belangrijke veranderingen in de periode van 2011 tot 2020. Deze rotatie is duidelijk zichtbaar in de sedimentatie en erosiepatronen in de kaart met het hoogteverschil tussen 2011 en 2020. Zichtbaar is dat de Plaat van Walsoorden erodeert aan de oostelijke zijde (A in Figuur 2-8), terwijl de Plaat van Valkenisse aangroeit (B in Figuur 2-8). Ter hoogte van dwarsprofiel 5.2 groeit de Plaat van Walsoorden aan. Deze sedimentatie aan de linkeroever van de Schaar van Valkenisse is ook bij D zichtbaar in Figuur 2-8 en deze gaat samen met verdieping van de geul aan de andere oever vanaf ongeveer 2018 (C in Figuur 2-8). De draaiing van de geul vindt daarmee min of meer plaats tussen dwarsprofielen 5.1 en 5.2, de ligging het draaipunt is indicatief aangeduid met een ster in Figuur 2-8.

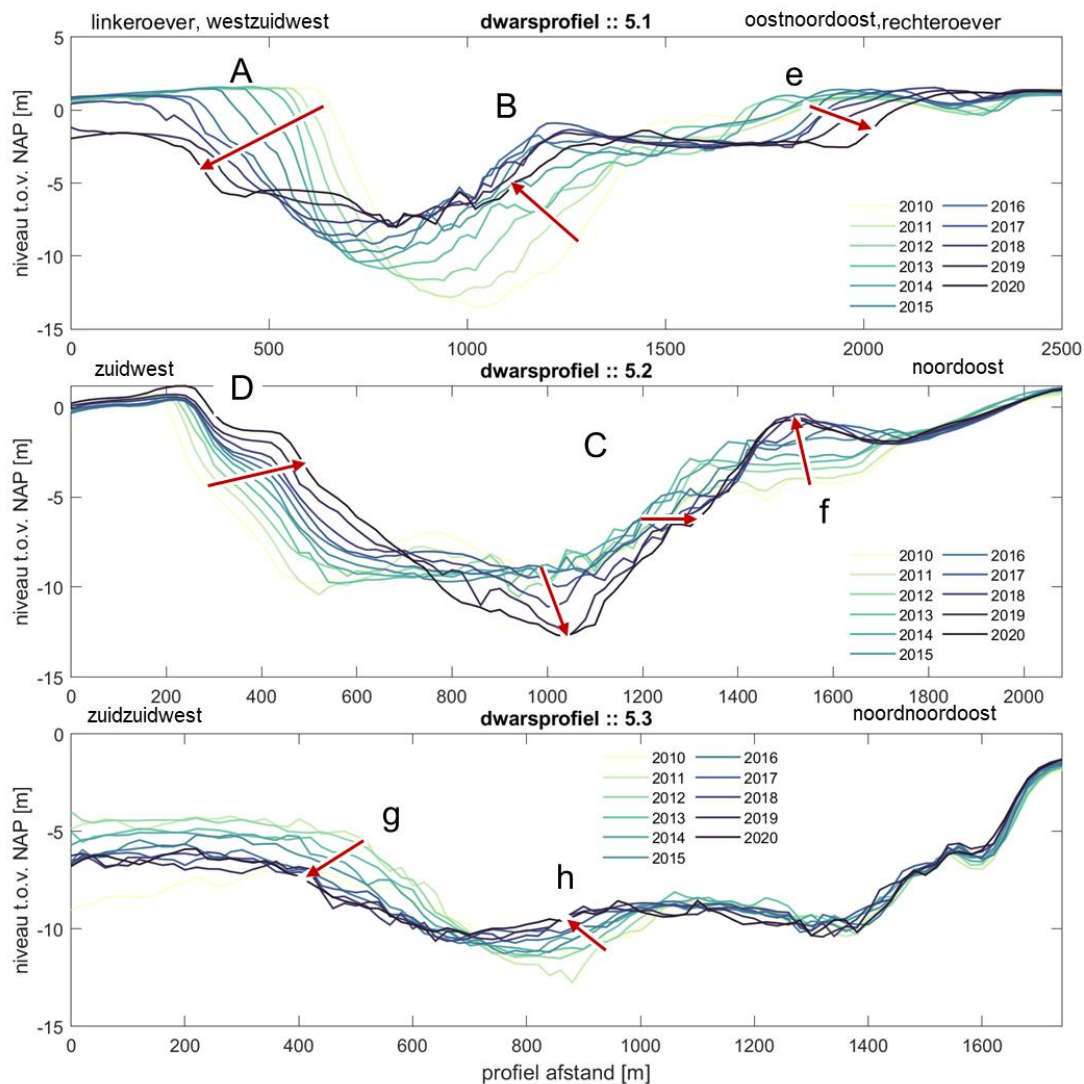
Deze veranderingen zijn ook duidelijk zichtbaar in de dwarsprofielen 5.1 en 5.2 in Figuur 2-9. In het oostelijke dwarsprofiel 5.1 wordt de geul ondieper (aan de oostzuidoostelijke zijde bij B) en deze migreert naar de linkeroever (A aan westzuidwestelijke zijde). Aan de andere kant van de dwarsdoorsnede (rechteroever, oostnoordoostelijke zijde) vindt overigens ook erosie plaats (bij e in dwarsprofiel 5.1 in Figuur 2-9), waardoor de ondiepte ten zuiden van de Platen van Valkenisse breder en iets dieper wordt.

Ter hoogte van dwarsprofiel 5.2 (Figuur 2-9) groeit de Plaat van Walsoorden aan (D). Deze sedimentatie aan de linkeroever van de Schaar van Valkenisse is ook zichtbaar bij de D in Figuur 2-9. In het centrale deel, ter plaatse van dwarsprofiel 5.2, verdiept de geul (C in Figuur 2-8). Aan de noordoostzijde vindt ten slotte nog enige sedimentatie plaats langs de oever van de Schaar (f in dwarsprofiel 5.2 in Figuur 2-9). In het noordwestelijke deel van de geul (Schaar van Waarde) zijn de veranderingen kleiner. De linkeroever wordt ondieper tussen 2010 en 2011, mogelijk als gevolg van de plaatrandstortingen bij de Plaat van Walsoorden. Vanaf 2012 erodeert de linkeroever richting de bodemhoogte van 2010 (vóór de plaatrandstorting). Een andere ontwikkeling ter plaatse van het westelijke dwarsprofiel 5.3 is de verplaatsing van het diepe deel van de geul naar de linkeroever, zoals zichtbaar in de combinatie van g en h in Figuur 2-8 en in dwarsprofiel 5.3 in Figuur 2-9.



Figuur 2-8 Sedimentatie (rode kleur) en erosie (blauwe kleur) patronen in macrocel 5 tussen 2010 en 2020. De letters markeren de erosie- en sedimentatiegebieden die in de tekst worden toegelicht.

De veranderingen in dwarsdoorsnede 5.1 in Figuur 2-9 laten niet alleen een verplaatsing en verondieping van de geul zien, maar ook een verandering van de vorm van de geulbodem. In de doorsnedes van de eerste 6 jaar was aan de linkeroever sprake van een geulwand die geleidelijk maar gestaag naar het diepste punt van de geul liep. In de twee jaren daarna liep – na het bereiken van een diepte van ongeveer NAP -5 m – de diepte weer op. Deze dwarsdoorsnedes wijzen daarmee op de aanwezigheid van twee parallelle geulen aan de linkeroever vanaf 2019. Aan de rechteroever was al langer sprake van een dieper deel op het ondiepe plateau van ongeveer NAP -2,5 m.



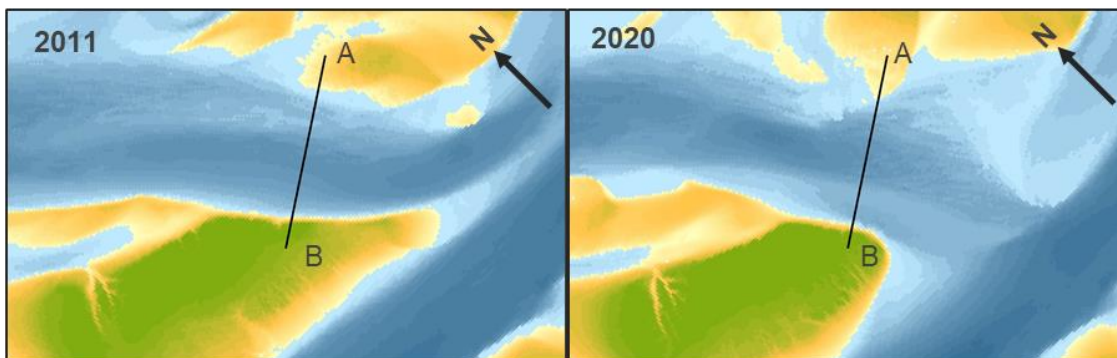
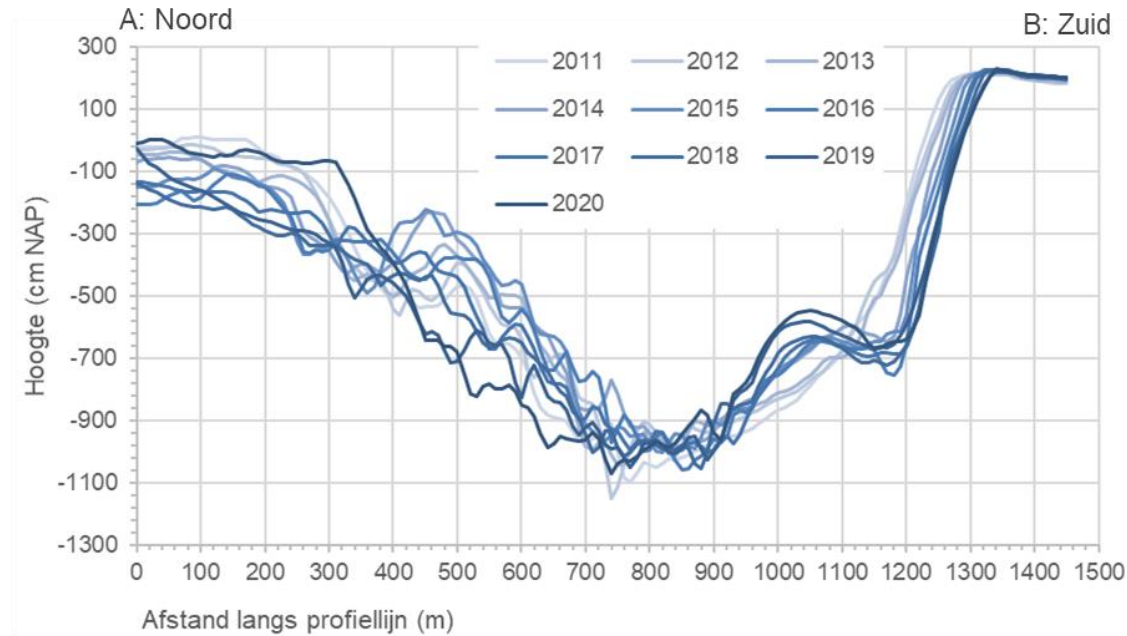
Figuur 2-9 Dwarsprofielen met de bodemhoogte in de nevengeul Schaar van Valkenisse en Schaar van Waarde (macrocel 5), locatie in Figuur 2-8. De letters markeren de erosie- en sedimentatiegebieden die in de tekst worden toegelicht en die komen overeen met de gebieden in Figuur 2-8.

### 2.1.3 Verandering van de omvang van de geul

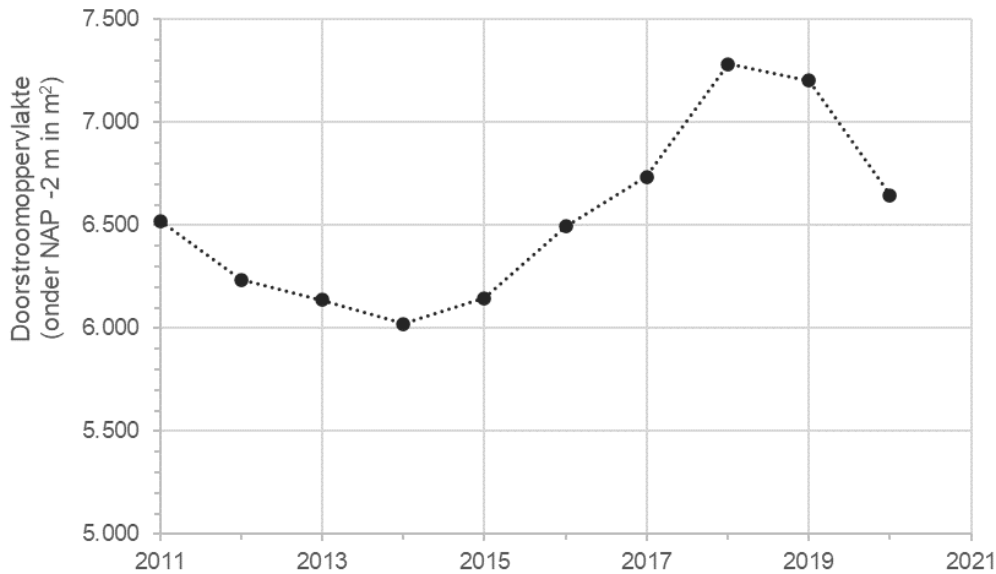
De omvang van de nevengeul van Macrocel 5, die bestaat uit de combinatie van de Schaar van Valkenisse en de Schaar van Waarde is sinds 2011 stabiel, zoals blijkt uit de analyse in het kader van de monitoring van het meergeulenstelsel (Schrijver, 2021). Deze analyse betreft het watervolume onder NAP -5 m. Ook een beschouwing van de doorstroomoppervlakte onder NAP -2 m van dwarsdoorsnede AB die dwars op de geul staat, zoals getoond in Figuur 2-10, laat zien dat de nevengeulen in omvang niet veel verandert. De doorstroomoppervlakte van dwarsdoorsnede AB is getoond in de grafiek in Figuur 2-11. Zichtbaar is een beperkte afname van 8% tot en met 2014



ten opzichte van de doorstroomoppervlakte in 2011. Deze afname is gevolgd door een toename tot 112% in 2018, waarna weer een beperkte afname plaatsvindt, zodat in 2020 de doorstroomoppervlakte vrijwel hetzelfde is als in 2011.

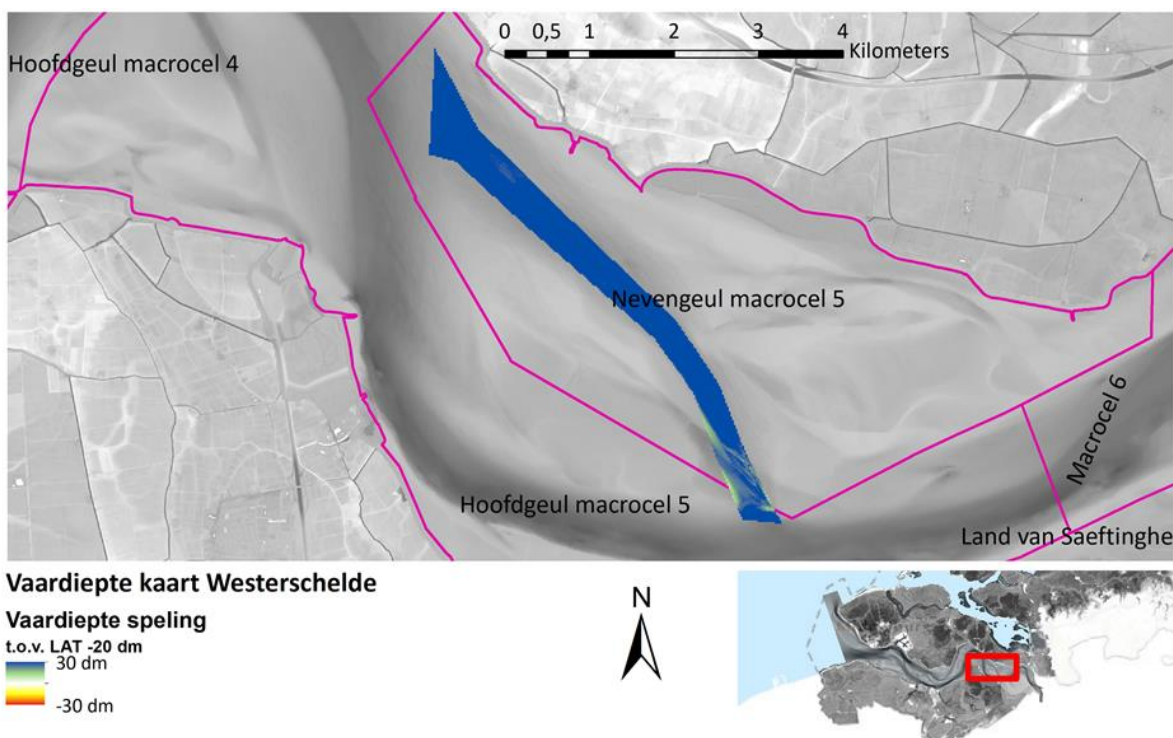


Figuur 2-10 Dwarsdoorsnede A-B door de Schaar van Valkenisse voor 2011-2021.



Figuur 2-11 Grafiek van de doorstroomoppervlakte onder NAP -2 m van dwarsdoorsnede A-B (zie Figuur 2-10 voor locatie) in de periode 2011-2020.

Dat de omvang van de nevengeul slechts beperkt verandert, betekent niet dat er geen veranderingen plaatsvinden, zoals ook al duidelijk is geworden in de voorgaande paragrafen. Daarom is op de schaal van de vaargeul gekeken naar de sedimentatie en erosie. Deze analyse sluit aan bij een eerdere analyse van Van Dijk (2019) voor alle nevengeulen in de Westerschelde in relatie tot hun nautische gebruik. De gebruikte polygoon staat in Figuur 2-12, waarin ook zichtbaar is dat in het zuidoosten van de vaargeul het ondiepe drempelgebied ligt. De gebruikte polygoon (Figuur 2.2) is een vaste begrenzing (van de situatie in 2018).



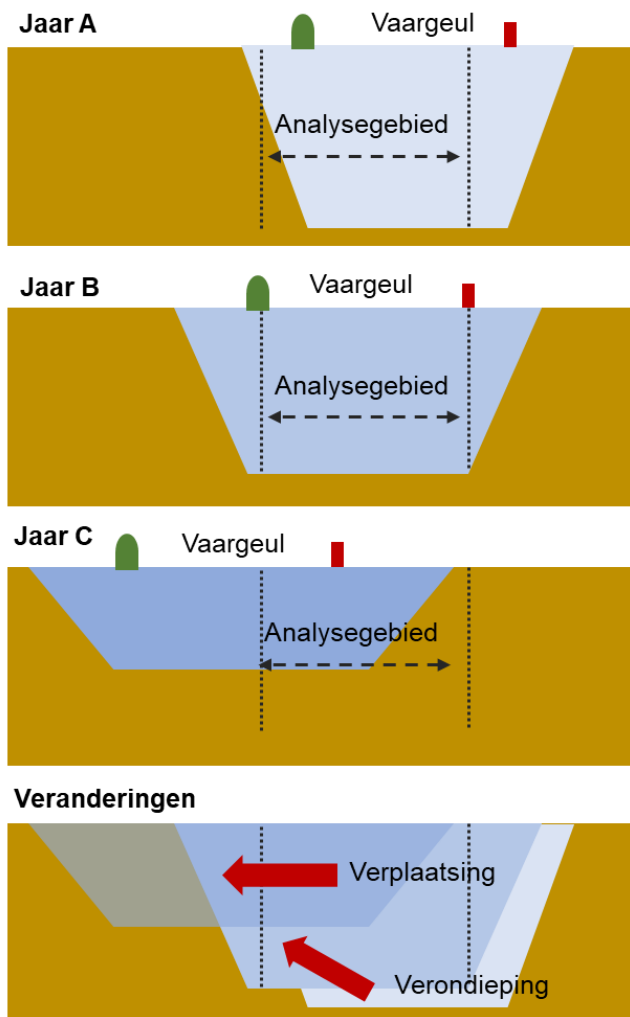
Figuur 2-12 Kaart van de bodemligging in 20218 met in blauw het gebied dat is gebruikt om de sedimentvolumes in de vaargeul in de nevengeul te berekenen. De kleurschaal geeft weer of de diepte afwijkt van LAT -20 dm vaardiepte in de Schaar van Valkenisse. De donkerblauwe kleur betekent dat de geul tenminste 3 meter dieper is dan 2 meter onder LAT (Lowest Astronomical Tide). De

gele en groene tinten geven aan dat de diepte ongeveer op 2 meter onder LAT ligt, dit zijn de ondiepste delen van de vaargeul (uit Van Dijk, 2019).

De verschilvolumes en de gemiddelde hoogteverschillen binnen de vaste polygoon in de Schaar van Valkenisse & Schaar van Waarde in de opeenvolgende jaren en voor de periode 2010-2020 worden in Tabel 2-2 weergegeven. Te zien is dat tussen 2011-2016 de jaarlijkse verdieping varieert tussen 13 en 39 cm. De laatste 4 jaar is er een verondieping binnen het geanalyseerde gebied. De omslag van verdieping naar verondieping is niet het gevolg van een lokaal fenomeen. Er is zowel meer verondieping bij delen die al een verondiepende trend hadden als afnemende verdieping in de delen met een verdiepende trend. Over de periode 2010-2020 is een netto verdieping (gemiddeld over het gebied) berekend van 0,73 m. De omvang van de verdieping bestaat deels uit veranderingen in de bodemhoogte in de geul en voor een ander deel uit de verplaatsing van de geul ten opzichte van de vaste polygoon, zoals in Figuur 2-13 schematisch is weergegeven. De verklaring voor de netto verdieping in de opeenvolgende jaren van 2011 tot 2016 is dat het diepste deel van de geul gaandeweg naar de polygoon is geschoven, zoals schematisch aangegeven in de stap van jaar A naar jaar B in Figuur 2-13. Een deel van de verklaring van de verondieping in de periode 2016-2020 is het verschil tussen de polygoon en de locatie van de diepste delen van de nevengeul, zoals schematisch aangegeven in de stap van jaar B naar jaar C in Figuur 2-13.

Tabel 2-2. Verschilvolumes en gemiddelde hoogteverschillen voor nevengeul Schaar van Valkenisse in de opeenvolgende jaren en voor de periode 2010-2020 (oppervlakte 2.568.000 m<sup>2</sup>, gebied waarvoor de volumes zijn weergegeven in Figuur 2-12). Negatieve waarden bij een afname van de sedimentvolumes en het toenemen van de diepte.

Begin en eind jaartal	1 (= 2 + 3) Verandering (m <sup>3</sup> )	2 Verdieping (m <sup>3</sup> )	3 Verondieping (m <sup>3</sup> )	Netto gemiddeld hoogteverschil (m)
2011/12	-339.660	-936.930	597.270	-0.13
2012/13	-597.960	-1.122.200	524.210	-0.23
2013/14	-471.060	-1.008.900	537.810	-0.18
2014/15	-1.012.700	-1.334.600	321.920	-0.39
2015/16	-472.720	-1.029.300	556.580	-0.18
2016/17	37.956	-741.770	797.720	0.01
2017/18	143.860	-665.320	809.180	0.06
2018/19	418.510	-561.260	979.770	0.16
2019/20	361.100	-504.600	865.700	0.14
<b>2010/2020</b>	<b>-1.880.000</b>	<b>-3.970.300</b>	<b>2.090.200</b>	<b>-0.73</b>

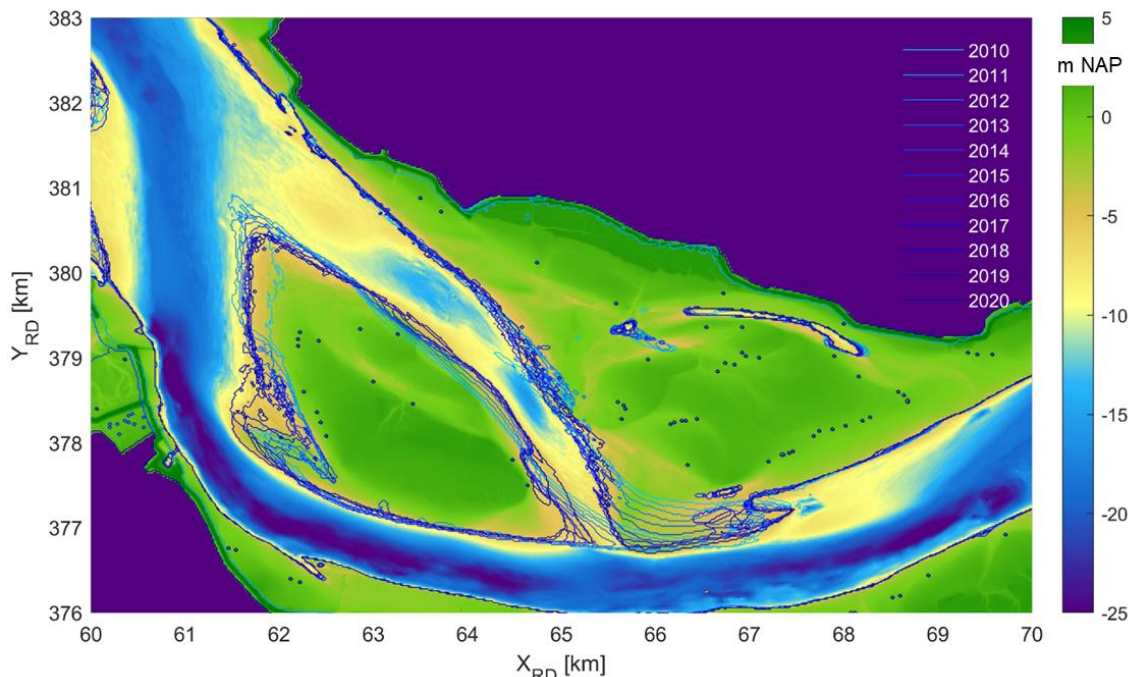


Figuur 2-13 Schematische dwarsdoorsnede met de verplaatsing en verondieping van een geul ten opzichte van een vast analysegebied. Het analysegebied komt overeen met de ligging van de vaargeul in jaar B.

## 2.1.4 Ontwikkeling van de platen

De verplaatsing van de Schaar van Valkenisse heeft als gevolg dat de dimensies van de platen en de plaatranden veranderen. Door de migratie in de richting van de Plaat van Walsoorden, wordt deze plaat steeds kleiner in oppervlak. Uit een analyse van de bodemhoogtekaarten is ook te zien dat de plaatrand ter hoogte van de drempel richting het westen opschuift. Voor het bepalen van de plaatranden hebben we gekeken naar bodemhoogtes die hoger zijn dan een bepaalde grenswaarde, volgens de methode van Van Dijk al. (2018) en Leuven et al. (2018). De snelheid van de erosie van de plaatrand neemt met de tijd af. Aan de andere kant van de drempel is aangroei, bij de platen van Valkenisse. Die aangroei gaat harder dan de erosie bij de Plaat van Walsoorden, waardoor de breedte tussen de platen over 2011-2020 is afgenomen (Figuur 2-14).



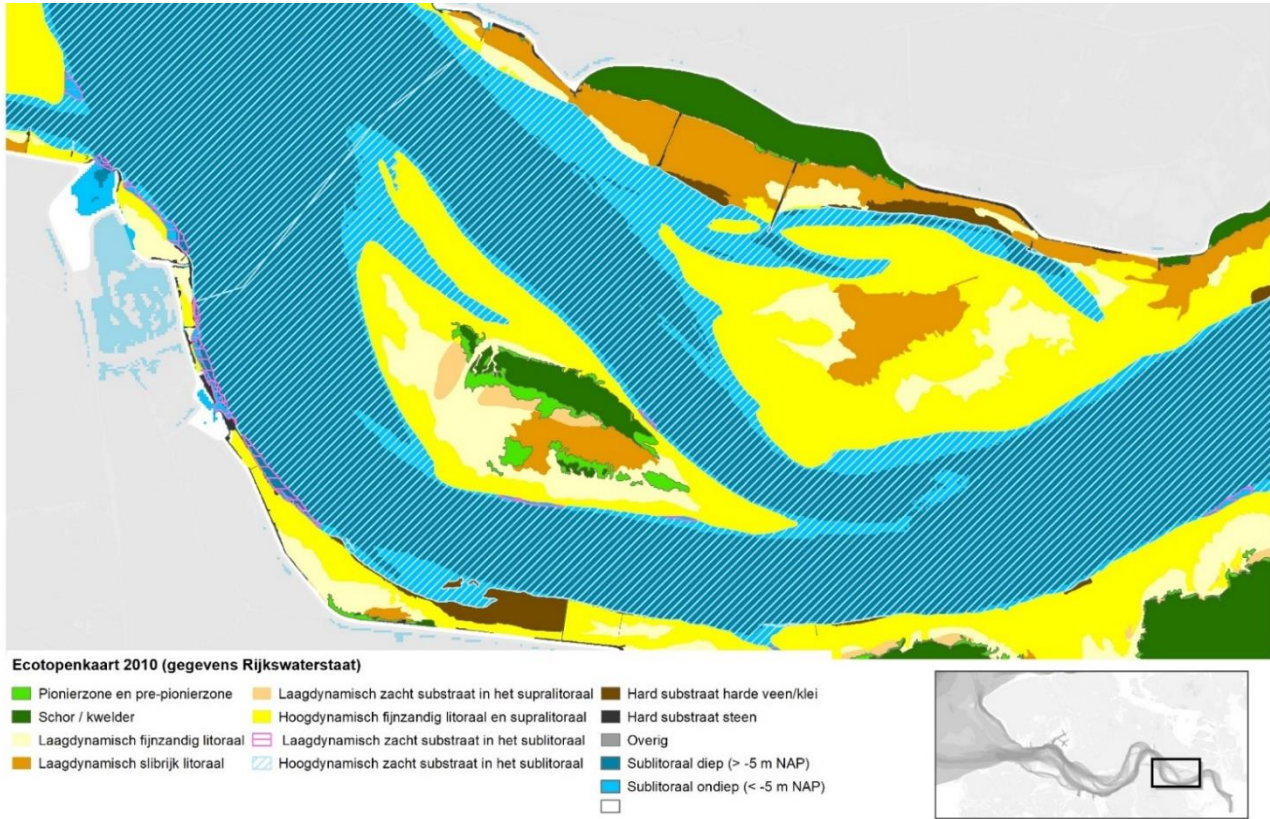


Figuur 2-14 Positie van de plaatranden in de periode 2010-2011 (bodempligging 2020).

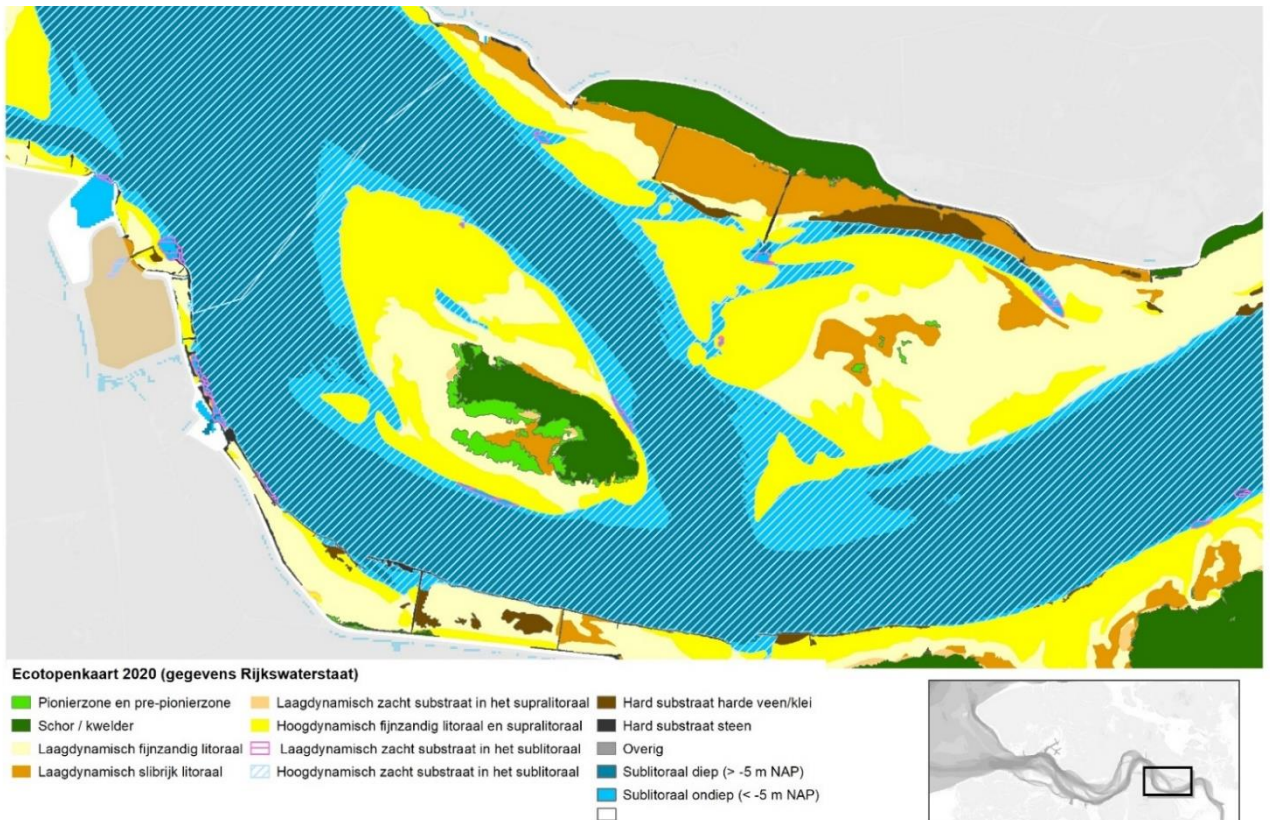
De vertraging van die erosie is o.a. te verklaren door de samenstelling van het bodemmateriaal en de aanwezigheid van vegetatie op de Plaat van Walsoorden. De ecotopenkaart uit 2010 laat zien dat de punt dat snel geërodeerd is, geen vegetatie heeft en voornamelijk uit fijn zand bestaat. Terwijl de huidige plaatrand tegen het deel aan ligt waar veel vegetatie voorkomt (Figuur 2-15). Vegetatie versterkt de bodem en reduceert de erosiesnelheid (Brückner, et al., 2019). Daarbij vangt vegetatie fijner kleideeltjes op, waardoor deze ook een extra versterking geven van de plaat. Andere erosieresistente lagen die de rotatie van de Schaar van Valkenisse zouden kunnen beïnvloeden zijn waarschijnlijk niet aanwezig binnen het dieptebereik van deze geul ter plaatse van de drempel (zie voor een actueel overzicht van deze lagen Van der Vegt, 2020).

De gemiddelde bodemhoogte van de Plaat van Walsoorden die naast de Schaar van Valkenisse ligt is tussen 2010 en 2020 iets toegenomen. Deze toename is beperkt ten opzichte van de hoogtetoename van de platen, zoals die vanaf de jaren '50 in de 20<sup>ste</sup> eeuw tot het begin van de 21<sup>ste</sup> eeuw is opgetreden (zie bijvoorbeeld Cleveringa, 2015 en Taal et al., 2019). De hoogte van de Platen van Valkenisse is in deze periode zeer beperkt geweest.

Door de toename van de bodemhoogte van de platen neemt de kans af dat zich een nieuwe geul (kortsluitgeul) kan ontwikkelen door de platen, als een alternatief voor de Schaar van Valkenisse.



Figuur 2-15 Ecotopenkaart 2010 rondom de Plaats van Walsoorden.



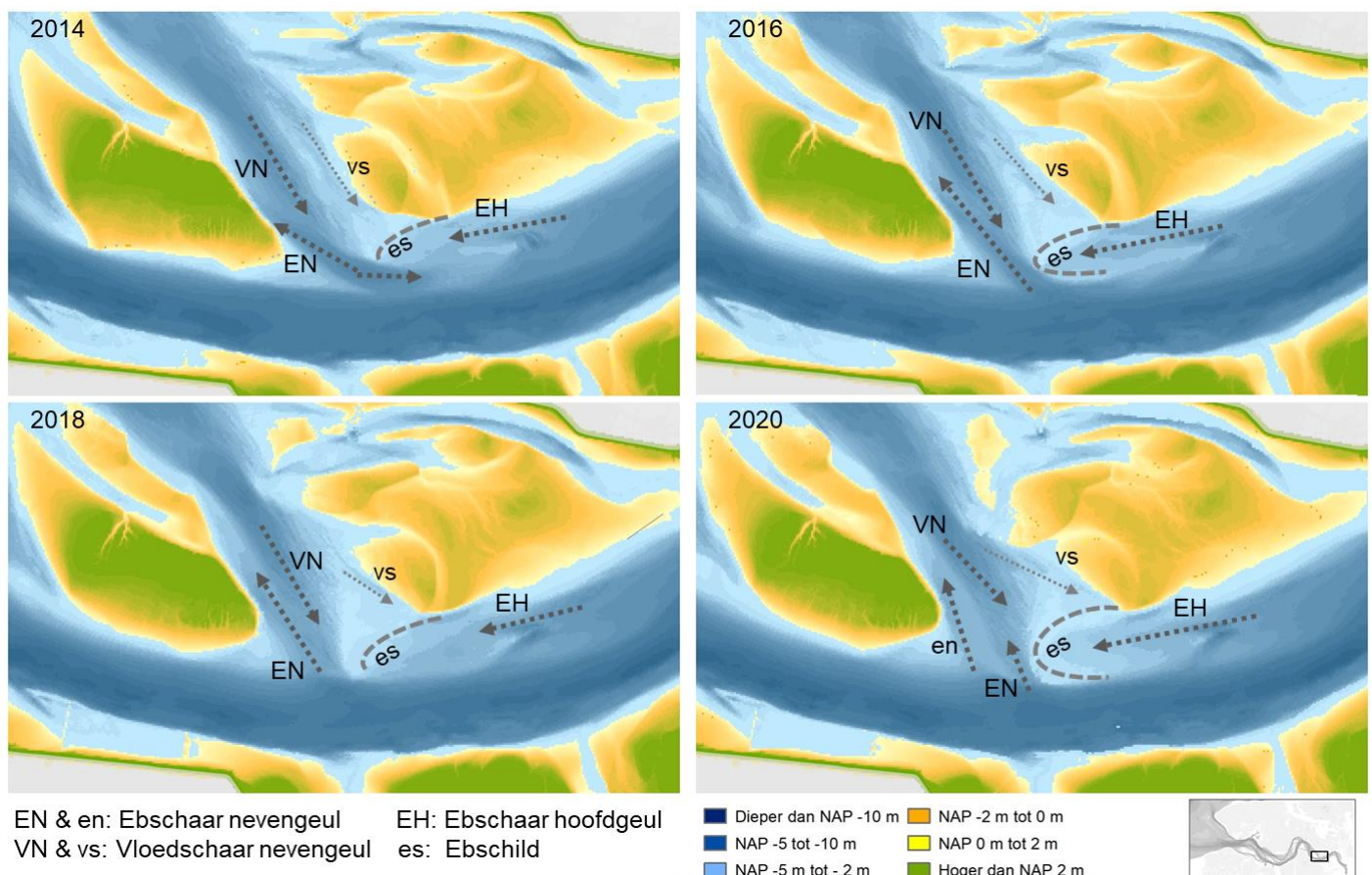
Figuur 2-16 Ecotopenkaart 2020 rondom de Plaats van Walsoorden.



## 2.1.5 Overzicht van de ontwikkelingen

De beschouwing van de ontwikkeling van de drempel, de erosie en sedimentatiepatronen en de dwarsdoorsneden in de voorgaande paragrafen laat zien dat sprake is van meer ontwikkelingen dan alleen het ondieper worden van de drempel. Zo is tegenwoordig bijvoorbeeld sprake van twee parallelle geulen ter plaatse van de drempel, met daartussen een ondiepte. Ook in de kaarten van de bodemligging is de aanwezigheid van twee geulen zichtbaar, zoals is aangegeven in Figuur 2-17. Deze twee geulen die samen de Schaar van Valkenisse vormen, hebben de vorm van een ebschaar (EN), die van de hoofdgeul naar de nevengeul steekt en een vloodschaar (VN). Ook is in deze kaarten zichtbaar dat de vorm van het ondiepe plateau aan de oostzijde van de Schaar van Valkenisse ten dele overeenkomt met die van een ebschild van de ebschaar (EH) in de hoofdgeul (gemarkeerd met de grijze gestreepte lijn in Figuur 2-17. De omvang (en herkenbaarheid) van deze ebschaar varieert in de verschillende jaren. In de opname van 2020 is het ebschild zeer duidelijk zichtbaar. In deze figuur is ook de aanwezigheid van kleine vloodschaar (vs) aangegeven die het ondiepe plateau insteekt.

De kaarten in Figuur 2-17 illustreren dat de morfologische ontwikkeling van de drempel meer omvat dan de rotatie en verondieping van het overgangsgebied van de nevengeul naar de hoofdgeul. In paragraaf 2.3 zal hier verder op in worden gegaan op basis van recente multibeam opnamen.



Figuur 2-17 Overzichtskarten van het drempelgebied 2014, 2016, 2018 en 2020.

## 2.2 Baggeren en verspreiden

De ontwikkeling van de sedimentinhoud van de nevengeul van macrocel 5 is in het verleden sterk beïnvloed door stortingen. In de jaren '90 is de sterke afname van het watervolume van deze en andere nevengeulen in het oostelijke

deel van de Westerschelde mede aanleiding geweest voor het veranderen van de stortstrategie in de Westerschelde. De huidige stortstrategie, Flexibel Storten, is gericht op het tegengaan van negatieve gevolgen voor de stabiliteit van het meergeulensysteem en het versterken van de ecologische waarden waar mogelijk. De volumes baggerspecie die in macrocel 5 zijn verspreid als onderdeel van de huidige stortstrategie in de periode 2010-2020 zijn opgenomen in Tabel 2-3. De locaties van de verspreidingsvakken staan in Figuur 1-1. In de jaren 2010-2012 en in 2018 en 2020 is veel baggerspecie verspreid in de plastrandstortzone. De volumes op locatie SH51 zijn lager in 2010 en liggen daarna steeds tussen de 0,5 en 1 miljoen m<sup>3</sup> per jaar. Na 2012 is er geen verspreiding meer van baggerspecie in SN51. De stortingen op SH61 vinden plaats ten oosten van de Schaar van Valkenisse. De ebschaar die is gevormd aan de noordzijde van de hoofdgeul ligt in het verlengde van dit stortvak. De omvang van de stortingen in SH61 is in de periode 2011-2013 nog redelijk groot met een gemiddelde van 580 x 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> per jaar. In de periode daarna ligt het gemiddelde op 225 x 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> per jaar.

In de omgeving van de Schaar van Valkenisse wordt veel sediment verspreid, maar in dit deel van de nevengeul zelf wordt geen sediment verspreid. En het verspreiden van baggerspecie in de nevengeul in verspreidingsvak SN51 is na 2012 gestaakt. Binnen de nevengeulbetonning is er netto geen aanzanding geobserveerd, zoals in paragraaf 2.1 is aangegeven. Het is daarmee niet waarschijnlijk dat er een relatie bestaat tussen het verspreiden van baggerspecie en de verondieping van de Schaar van Valkenisse.

Tabel 2-3 Verspreidingsvolumes baggerspecie voor de verschillende verspreidingsvakken in macrocel 5 in m<sup>3</sup> per jaar (locaties in Figuur 1-1).

Jaartal	SN51 (nevengeul macrocel 5)	SH51 (hoofdgeul macrocel 5)	Plaats van Walsoorden, macrocel 5	SH61 (hoofdgeul, macrocel 6)
2010	1.143.787	113.010	3.717.468	0
2011	1.007.562	522.563	820.822	602.350
2012	833.170	953.854	713.221	567.767
2013		757.523	495.874	573.225
2014		860.128	453.337	208.488
2015		502.079	406.444	124.333
2016		451.414	597.217	133.676
2017		826.099	55.109	452.153
2018		782.302	1.921.177	216.472
2019		784.332	422.853	264.146
2020		891.413	1.157.739	176.509
<b>TOTAAL</b>	<b>2.984.518</b>	<b>5.768.973</b>	<b>9.180.669</b>	<b>3.319.119</b>

## 2.3 Zeer recente ontwikkelingen in het drempelgebied

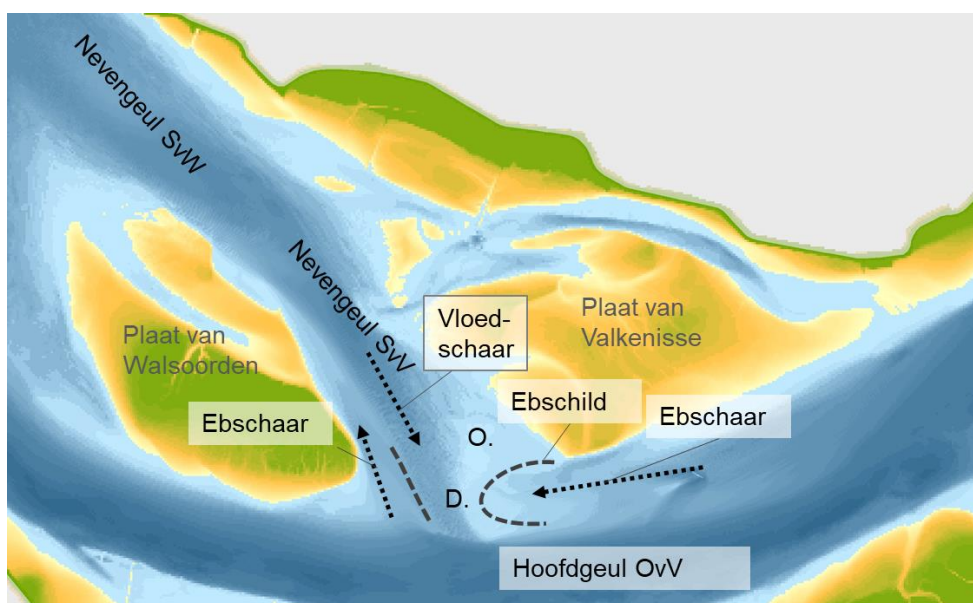
De morfologische veranderingen zoals die in de paragrafen hiervoor zijn beschreven, zijn gebaseerd op het analyseren van de vaklodingen. De vaklodingen geven de diepte van de gehele Westerschelde, met een ruimtelijke resolutie van 20 m x 20 m. De metingen voor de vaklodingen (singlebeam raaimetingen van de 'natte delen' en LiDAR hoogtemetingen van de droogvallende delen) van de Westerschelde worden ieder jaar uitgevoerd, zodat ieder jaar een hoogteopname beschikbaar is. De gemeten dieptes worden geïnterpoleerd, zodat de vaklodingen de gemiddelde



dieptes weergegeven voor elke rastercel van 20 m x 20 m<sup>1</sup>. De vaklodingen zijn op het moment van schrijven beschikbaar tot en met 2020 en laten daarmee niet de meest recente veranderingen zien.

Om de recente veranderingen in beeld te brengen zijn de lodingen van de Schaar van Valkenisse geanalyseerd. Deze lodingen hebben een veel hogere ruimtelijke resolutie dan de vaklodingen, zoals toegelicht in 2.4, maar de ruimtelijke dekking is beperkt en varieert ook per opname. De droogvallende delen ontbreken in deze lodingen. Het is daarom niet mogelijk om op basis van deze lodingen de samenhang met de andere morfologische ontwikkelingen te beschouwen, zoals in de voorgaande paragrafen is gedaan. Wel kan de recente ontwikkeling van de Schaar van Valkenisse zelf worden bestudeerd.

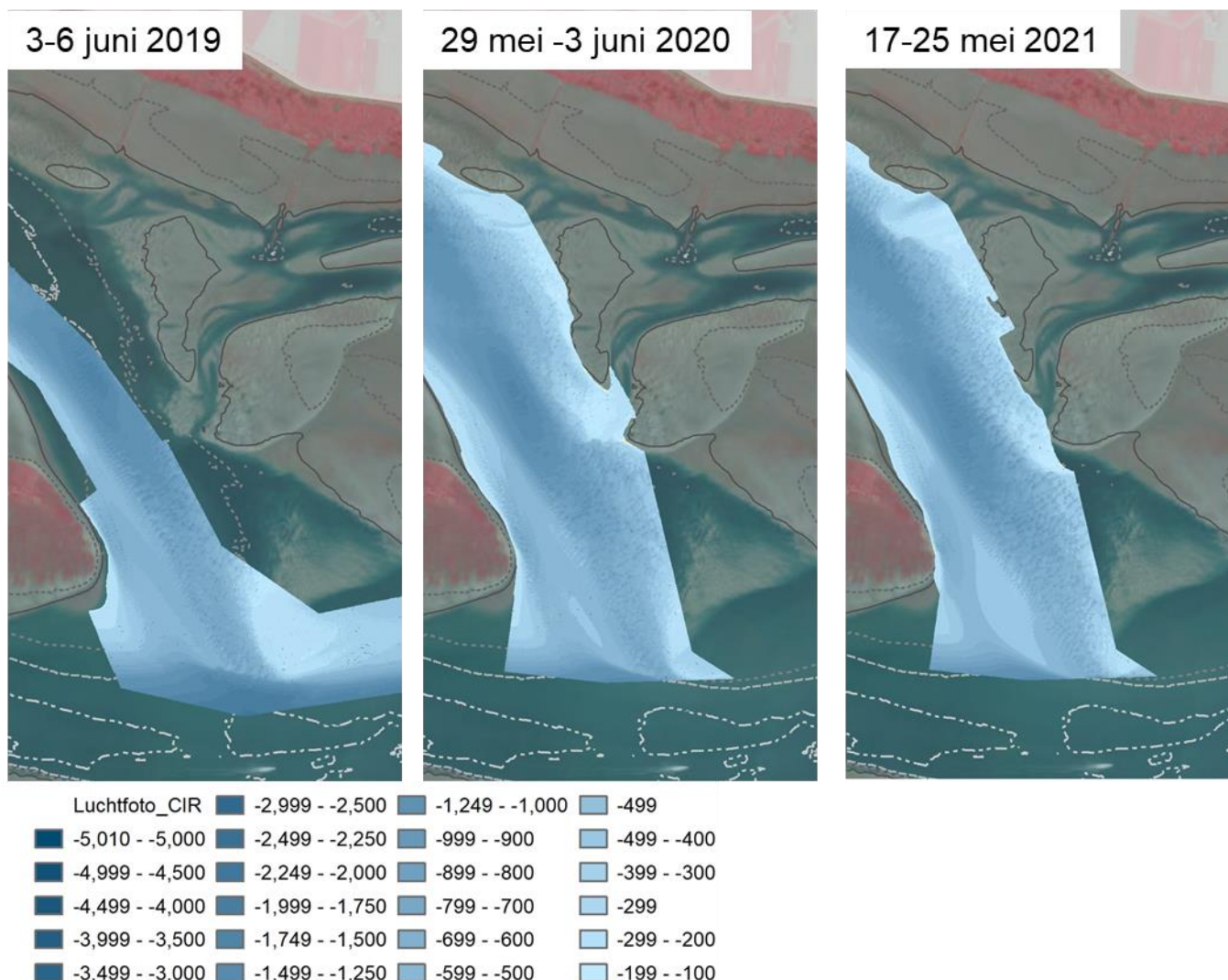
Figuur 2-18 laat de morfologische elementen zien rond het drempelgebied zoals die in 2020-2021 aanwezig zijn. Om de context te begrijpen is de multibeam-gemeten hoogteligging uit mei 2021 gecombineerd met de vaklodingskaart 2020. De drie pijlen geven de verschillen eb- en vloed-scharen aan. De Schaar van Valkenisse bestaat tegenwoordig uit de vloed-schaar die naar het drempelgebied (D. in Figuur 2-18) is gericht. Ten zuidwesten daarvan ligt een ebschaar, die vanuit de hoofdgeul, parallel aan de vloed-schaar loopt, direct langs de oostpunt van de Plaat van Walsoorden. Tussen de vloed-schaar en de ebschaar van de Schaar van Valkenisse ligt een ondiepte (streeplijn links van D). Ten oosten van het drempelgebied ligt een andere ondiepte (aangeduid met de hoefijzervorm in Figuur 2-18), die de drempel vormt van een ebschaar die in de hoofdgeul is gevormd.



Figuur 2-18 Overzicht van de morfologische structuren rond de drempel in de Schaar van Valkenisse op de overgang naar de hoofdgeul. Kaart op basis van de vaklodingskaart 2020 met daarop geplote de gedetailleerde loding uit november 2021.

De veranderingen die zijn opgetreden bij de eb- en vloed-schaar zijn goed zichtbaar in de drie multibeam opnames uit respectievelijk 2019, 2020 en 2021 in Figuur 2-19. De ondiepte tussen de beide scharen is in omvang toegenomen en ondieper geworden. De ingang van de ebschaar, vanuit de hoofdgeul is smaller geworden en ter hoogte van de oostpunt van de Plaat van Walsoorden is de ebschaar ondieper geworden. De ondiepte heeft zich ook uitgebreid naar het noordoosten, zodat het drempelgebied smaller is geworden. De ontwikkeling van de ondiepte aan de oostzijde van de drempel is niet goed te volgen, omdat dit gebied niet in de lodingen uit 2020 en 2021 is meegenomen.

<sup>1</sup> In gebieden waar bodemvormen aanwezig zijn met een lengte van minder dan 20 meter, zoals op de drempel van de Schaar van Valkenisse worden deze uitgemiddeld bij het maken van het raster van de vaklodingen. Dit betekent dat de ondiepste delen van de drempel, zoals bepaald uit de vaklodingen iets dieper kunnen zijn dan de minst gepeilde diepte op basis van de lodingen. De grootte van het verschil is afhankelijk van verschillende factoren (lengte en hoogte van de bodemvormen, oriëntatie van de bodemvormen ten opzichte van de peilraaien van de vaklodingen) en verschilt per gebied en per opname.

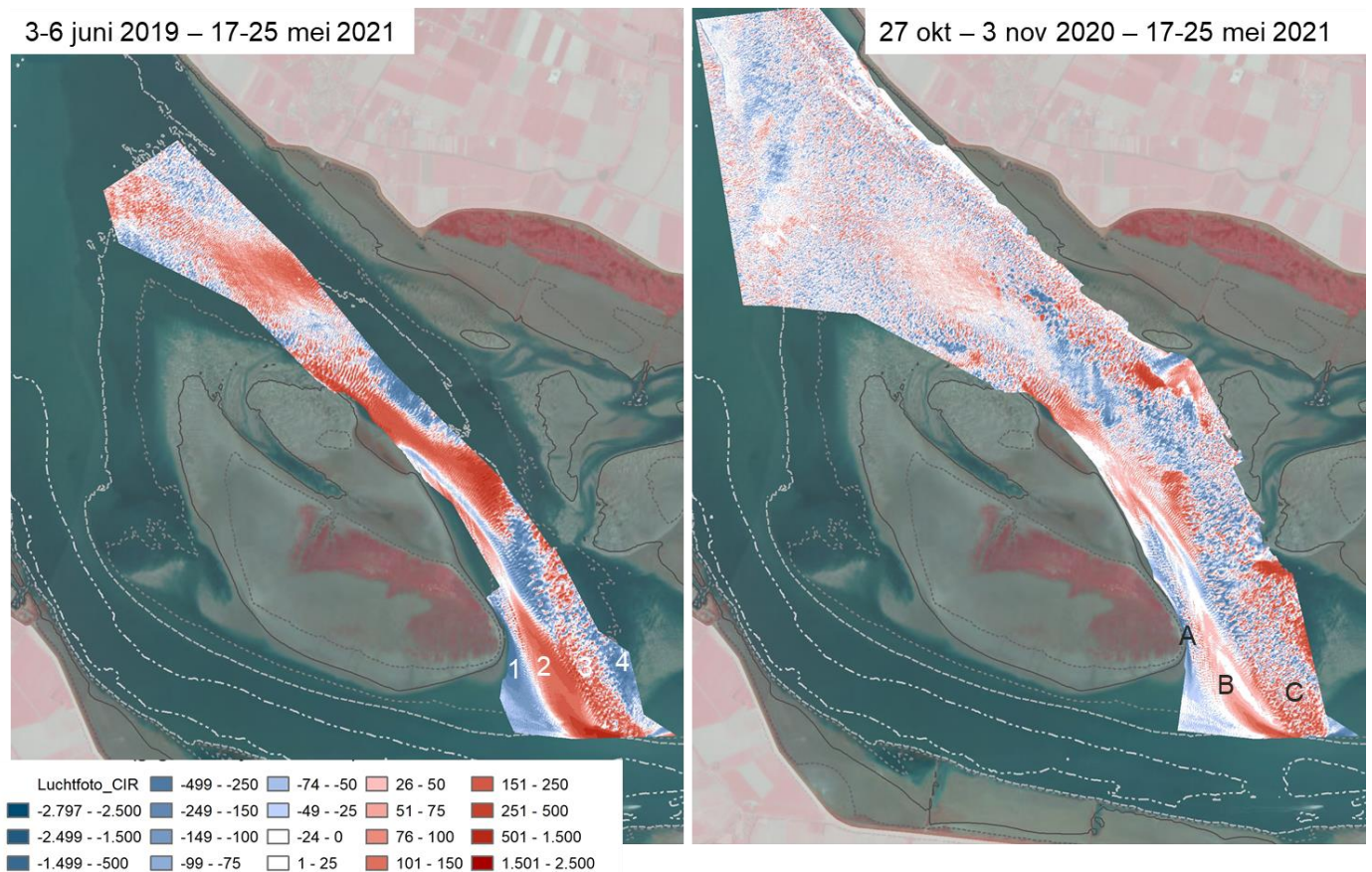


Figuur 2-19 Drie kaarten met de waterdiepte in de Schaar van Valkenisse op basis van de multibeamlodingen (resolutie 1m x 1m).

De verschilkaarten op basis van de multibeamopnames in Figuur 2-20 tonen waar grotere en kleinere veranderingen zijn opgetreden. In de linker kaart zijn de grotere diepteverschillen zichtbaar, omdat dit de langste periode omvat (dit is het verschil tussen de linker en de rechterkaart in Figuur 2-19). Zichtbaar is de verdieping (blauw, 1 in Figuur 2-20) ten oosten van de oostpunt van de plaat van Walsoorden, ter plaatse van de ebschaar. Parallel daaraan loopt een baan die is verondiept (rood, 2 in Figuur 2-20), zonder de ruis die het gevolg is van de aanwezigheid van megaribbels. Dit is de vorming van de ondiepte. Deze verondieping gaat over in een verondieping mét ruis (3 in Figuur 2-20). Dit is het eigenlijke drempelgebied in de vaargeul, dat is verondiept. Daarnaast ligt een gebied dat in 2019 is verdiept (4 in Figuur 2-20). In de rechterkaart, waarin de verschillen zichtbaar zijn tussen de twee meest recente opname die beschikbaar waren, zien de patronen er iets anders uit. Nog steeds is sprake van erosie bij de oostpunt van de Plaat van Walsoorden, maar nu in een veel smaller gebied (A in Figuur 2-20). Daarnaast treedt sedimentatie op aan de beide zijden van de ondiepte (B in Figuur 2-20), die daardoor verbreedt. Op de drempel is voornamelijk sprake van sedimentatie, er is vrijwel geen erosie herkenbaar. Het sedimentatiegebied heeft de vorm van een 'krul' die vanuit de hoofdgeul naar de nevengeul loopt (2 en B in Figuur 2-20).

De gedetailleerde opnames uit 2019, 2020 en 2021 laten zien dat de rotatie van de Schaar van Valkenisse met de klok mee lijkt te zijn gestopt en dat er sprake is van een complexere ontwikkeling door de aanwezigheid van de separate ebschaar.





Figuur 2-20 Twee kaarten met de verschillen in waterdiepte in centimeters in de Schaar van Valkenisse op basis van de multibeamlodingen (resolutie 1m x 1m).

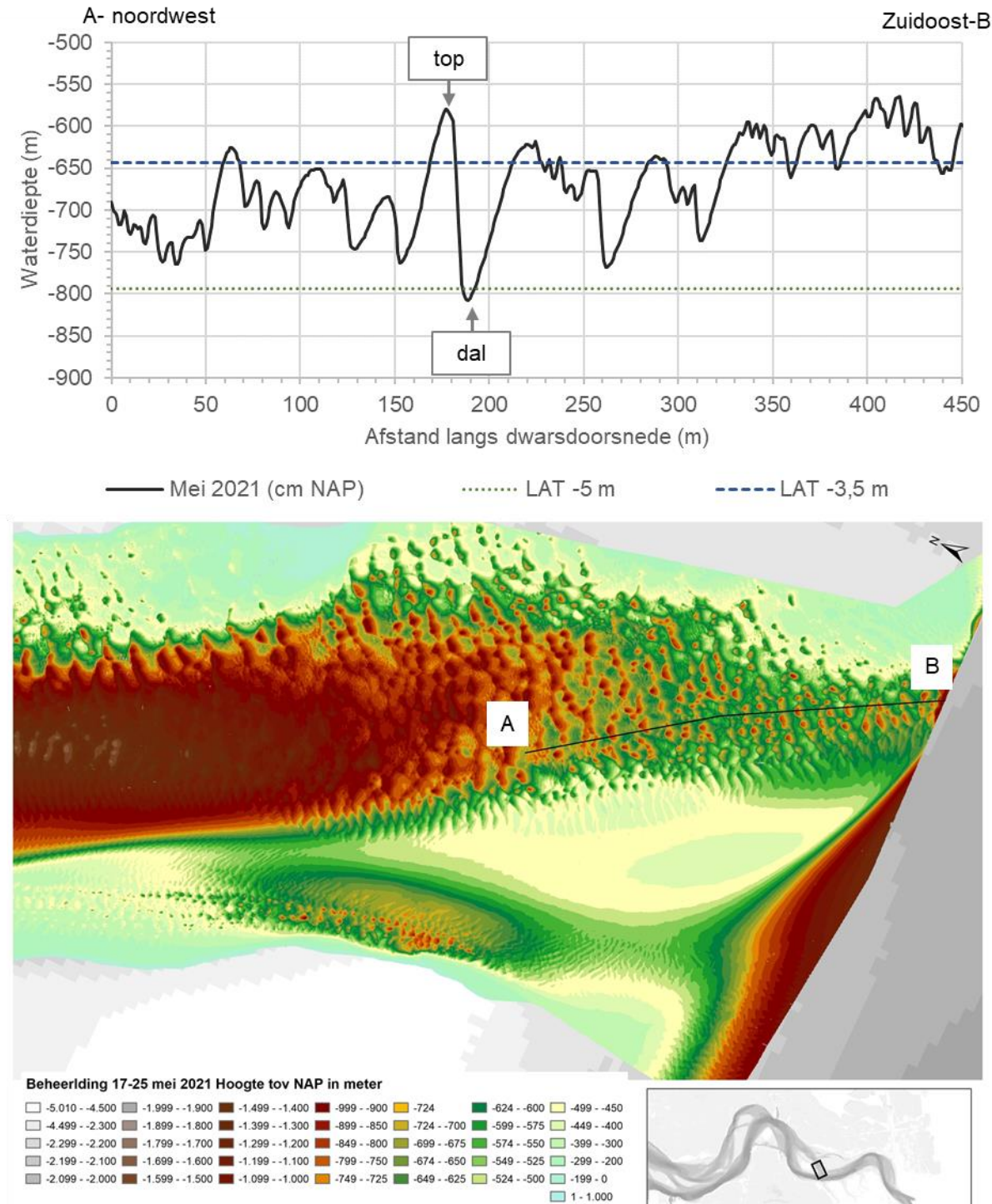
## 2.4 De ruimteschaal van bodemvormen

De wisselwerking van de getijstrooming, eb- en vloedstroom, resulteert in het vormen van scharen (ofwel geulen) met drempels binnen de Westerschelde, waar Schaar van Valkenisse één voorbeeld van is. Binnen deze morfologische elementen liggen kleinere morfologische vormen, zoals zandgolven en megaribbels. Deze relatief kleinschalige vormen zijn niet zichtbaar op de vaklodingen met een resolutie van 20 x 20 m, zoals getoond in Figuur 1-2. In de multibeam-metingen met een resolutie van 1 x 1 m, zoals die worden getoond in Figuur 2-19, zijn bodemvormen in de vorm van megaribbels met een lengte van tientallen meters en een hoogte (van top tot dal) rond de één meter zichtbaar. De ribbels liggen gesupponeerd op zowel de diepe delen van de Schaar van Valkenisse als de ondiepe delen, zoals de drempel. De toppen van de op de drempel aanwezige megaribbels leveren de minst gepeilde dieptes in het drempelgebied, zoals zichtbaar in de dwarsdoorsnedes in Figuur 2-21 en Figuur 2-22. De lengte van de ribbels wordt bepaald door de afstand tussen de toppen en de dalen, die is af te lezen uit dwarsdoorsnedes die loodrecht op de oriëntatie van de ribbels staan, zoals in Figuur 2-21. Bij andere aansneden van de ribbels lijken deze bodemvormen langer, zoals zichtbaar is in Figuur 2-22.

De megaribbels in de Schaar van Valkenisse veranderen over de tijd, zoals zichtbaar is in Figuur 2-23. Deze veranderingen treden onder ander op door variaties in de (getijde)stroming en door de verplaatsing van de bodemvormen. Variaties in de stromingscondities over het jaar treden onder andere op als gevolg van de spring-dood getijdige cycli. Uit de beschikbare multibeam-metingen is de migratie van de individuele ribbels niet te volgen.

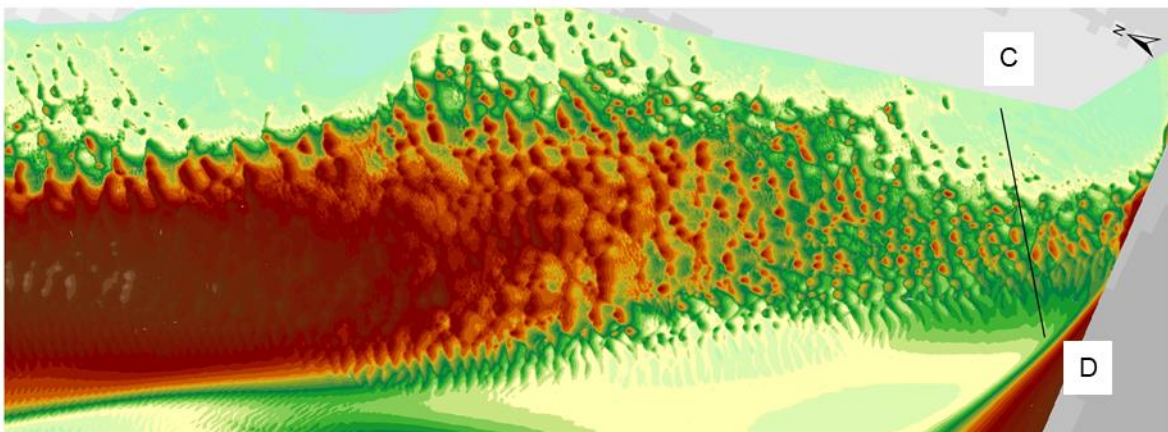
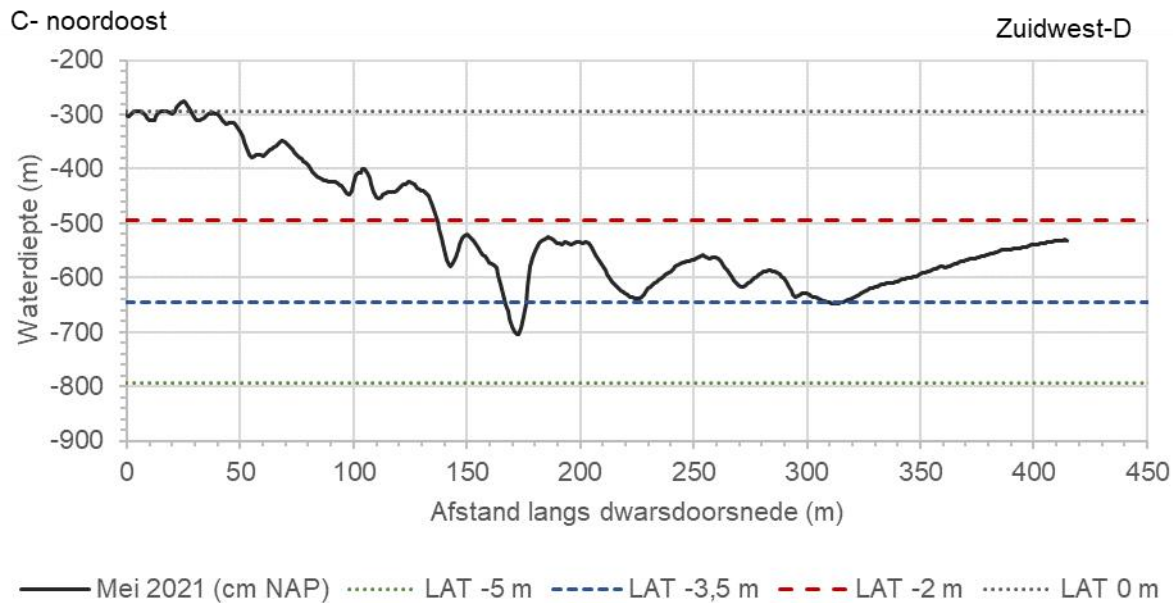
Een relatie tussen de grootschalige morfologische ontwikkeling van de Schaar van Valkenisse en de megaribbels is niet zichtbaar en is daarom niet verder meegenomen voor het begrip van de morfologische ontwikkeling van de Schaar van Valkenisse. De variatie in de kleinschalige bodemvormen is niet belemmerend voor het gebruik van de

geul door schepen. Het is de aanwezigheid van de drempel en de megaribbels die daarop liggen die belemmerend werken. De relevante schaal voor de analyse van morfologische ontwikkelingen is daarmee die van de hoofd- en nevengeul, met de bijbehorende drempels en de aangrenzende platen in de omgeving van de Schaar van Valkenisse, zoals aangegeven in Figuur 2-1 en beschouwd in de voorgaande paragrafen.

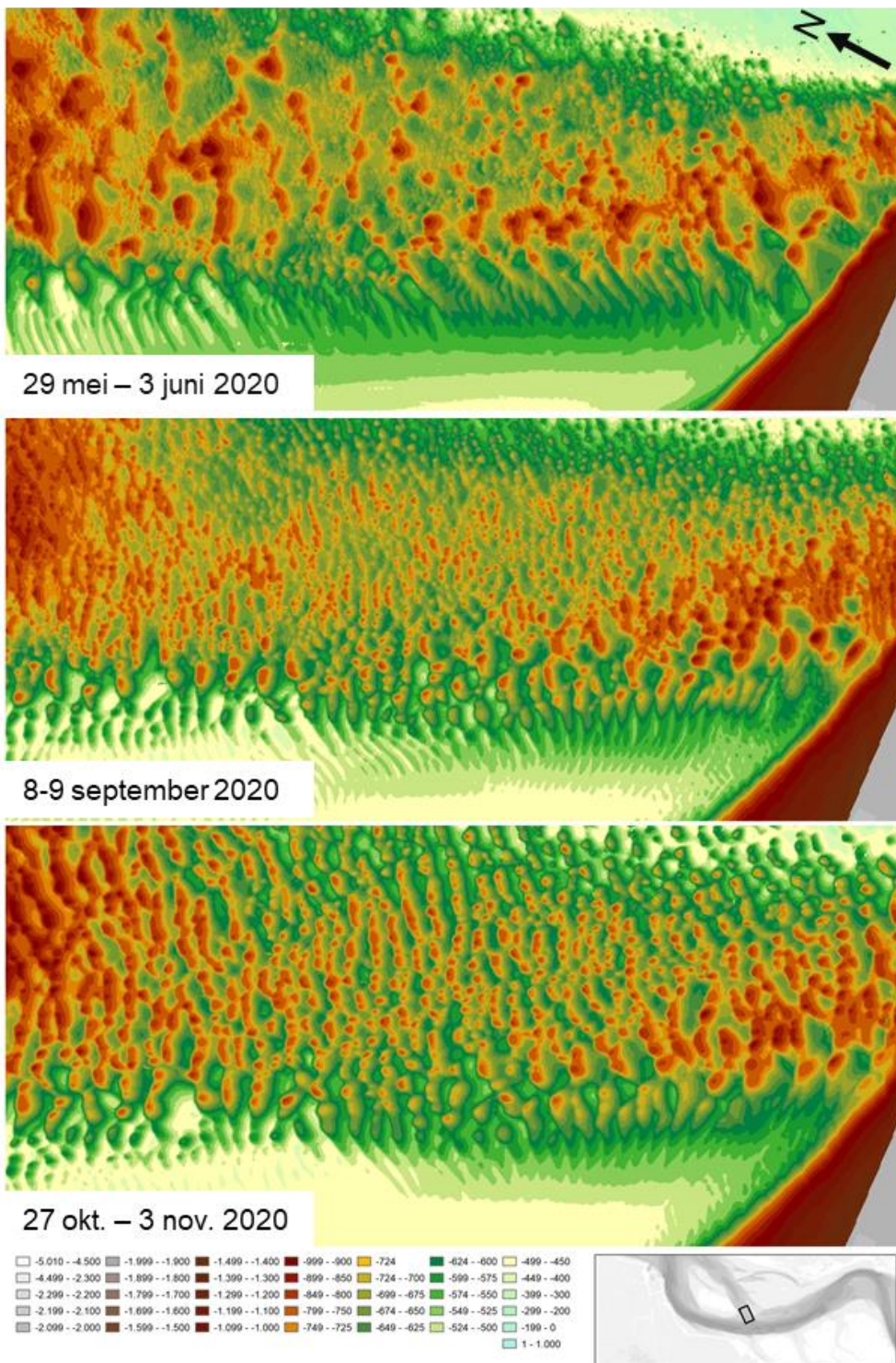


Figuur 2-21 Hoge resolutie multibeam meting van 17-25 mei 2021 van de drempel in de Schaar van Valkenisse ter illustratie van zandgolven en megaribbels. Boven: dwarsdoorsnede AB, onder: ruimtelijke weergave.





Figuur 2-22 Dwarsdoorsnede over de drempel van de Schaar van Valkenisse (situatie mei 2021) waarin zichtbaar is wat de gevolgen zijn van de aanwezigheid van de bodemvormen (megaribbels) op de diepte in de dwarsdoorsnede. Boven: dwarsdoorsnede CD, onder: ruimtelijke weergave.



Figuur 2-23 Kaarten van de waterdiepte op de drempel, op basis van drie opeenvolgende multibeamlodingen.

## 2.5 Synthese morfologische ontwikkeling

Analyse van de morfologische ontwikkeling van de Schaar van Valkenisse laat zien dat de nevengeul in de laatste 10 jaar, periode 2011-2020, met de klok mee is gedraaid. Het drempelgebied dat de overgang vormt tussen de nevengeul en de hoofdgeul is verplaatst naar het oosten. De verplaatsing van de overgang van geul naar de Plaat van

Walsoorden verliep relatief snel tussen 2011 en 2018. De vertraging daarna is mogelijk gerelateerd aan het bereiken van de inmiddels (door vegetatieontwikkeling en slibsedimentatie) minder goed erodeerbare plaatrand. Bij aanvang van de periode 2011-2020 was sprake van een beperkte omvang van de drempel bij de oostelijke uitgang van de nevengeul. In deze periode is de drempel verondiept en is het diepe deel steeds smaller geworden, zoals zichtbaar is in Figuur 2-2. Ten oosten van de drempel is een nieuwe ondiepte ontstaan, die zich steeds verder verbreed. Deze ondiepte wordt deels dieper en dit is in potentie een locatie voor de vorming van een nieuwe kortsluitgeul tussen de Schaar van Valkenisse (nevengeul) en de overloop van Valkenisse (hoofdgeul).

De Platen van Valkenisse en met name de Plaat van Walsoorden zijn steeds hoger komen te liggen en het lijkt daardoor onwaarschijnlijk dat deze nog volledig kunnen worden doorsneden door een nieuwe geul. Dit past ook niet in de trend van de Westerschelde waarbij platen aan elkaar zijn gegroeid, verhoogd en daarmee een afname in de dynamiek laten zien (Van Dijk, et al., 2021). Aangenomen kan worden dat de Geul Zimmerman nog minder belangrijk wordt, vergelijkbaar met de ontwikkeling bij de Schaar van Ossensisse. De Geul Zimmerman speelt alleen lokaal nog een rol voor de aan- en afvoer van water naar slikken en platen, maar niet meer als kortsluiting tussen de hoofd- en de nevengeul.

De nevengeul Schaar van Waarde-Schaar van Valkenisse heeft een stabiele omvang in de periode 2011-2020. Analyse van de erosie-sedimentatie volumes in de vaste polygoon (op basis van het betonde deel in 2018) van de nevengeul laten eerst netto erosie zien, die mede het gevolg is de verplaatsing van de nevengeul naar de analysepolygoon. In de periode daarna heeft netto sedimentatie plaatsgevonden die tenminste deels het gevolg is van de verplaatsing van de geul naar huidige locatie, die deels buiten de analysepolygoon ligt. De bodemhoogte op de gehele talweg laat een lichte trend zien in verondieping van de nevengeul, waarbij de drempel een zeer sterke verondieping vertoont. Het overzicht van de stortvolumes binnen macrocel 5 en in de naastgelegen macrocel 6 geeft geen aanleiding om te veronderstellen dat de morfologische ontwikkelingen van het drempelgebied een directe relatie hebben met de stortingen. De afstanden tussen de verspreidingslocatie SH51 in de hoofdgeul van macrocel 5, het plaatrandstortgebied Plaat van Walsoorden en de drempel zijn dusdanig groot dat verbanden niet waarschijnlijk zijn tussen de daar verspreide volumes en de ontwikkeling binnen de Schaar van Valkenisse. Dat geldt in iets mindere mate voor de verspreidingen op het vak SH61, omdat de oostzijde van de drempel wordt gevormd door de ebschaar van de hoofdgeul die in het verlengde ligt van dit verspreidingsvak.

De gedetailleerde multibeamladingen uit 2019, 2020 en 2021 laten rond de drempel een nog complexere morfologie zien, met een ebschaar parallel aan de Schaar van Valkenisse aan de westzijde, tegen de Plaat van Walsoorden<sup>2</sup>. Ondertussen is de Schaar van Valkenisse duidelijk ontwikkeld als vloedschaar met de drempel als ebschild. Tussen deze eb- en vloedschaar ligt een ondiepte. De ondiepte ten oosten van de Schaar van Valkenisse is sterker ontwikkeld en herkenbaar als ebschild van de ebschaar die aan de noordzijde van de hoofdgeul tot ontwikkeling is gekomen.

In het volgende hoofdstuk wordt er gekeken naar de stromingscondities door de Schaar van Valkenisse, hoe deze zijn veranderd door veranderingen in de morfologie en wat dit kan betekenen voor het toekomstige stroombeeld en morfologische ontwikkeling.

---

<sup>2</sup> Per 14 december is de betonning aangepast, zodat de vaargeul nu via deze ebschaar aan de westzijde van de drempel wordt geleid (BASS Bekendmaking Aan de scheepvaart Scheldegebied 137-2021).

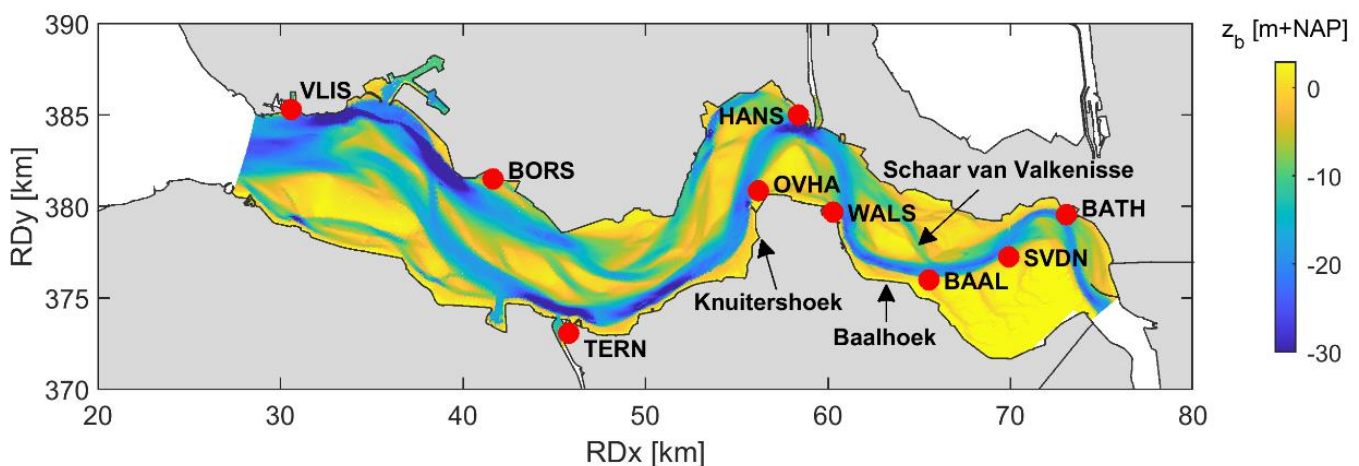


### 3 Modelling stroming

Met Delft3D-FM zijn de dieptegemiddelde stroomsnelheden in en rond de Schaar van Valkenisse berekend. Door bodemliggingen van verschillende jaren door te rekenen zijn veranderingen in dieptegemiddelde stroomsnelheden over de jaren bepaald. Dit vormt de basis voor het begrip van de morfologische ontwikkelingen in de schaar. In dit hoofdstuk worden het model en de resultaten uiteengezet.

#### 3.1 Model en uitgevoerde simulaties

Deze modelstudie bouwt voort op het dieptegemiddelde model zoals opgezet voor het project *Buitendijkse Maatregelen Baalhoek & Knuitershoek* (modeldomein is in Figuur 3-1 aangegeven). Dit model is reeds uitvoerig gekalibreerd en gevalideerd voor waterstanden en stroomsnelheden (op basis van tijdreeksen en getijdenkarakteristieken van 2016 en 2018) bij Baalhoek en Knuitershoek (De Vet & Van der Werf, 2021). Om het model geschikt te maken voor deze studie is een aantal aanpassingen doorgevoerd. Zo is het rekenrooster geoptimaliseerd in de Schaar van Valkenisse, is de schematisatie van de bodem geactualiseerd en zijn de strekdammen bij Baalhoek en Waarde nu anders geschematiseerd. In Bijlage A zijn deze aanpassingen toegelicht en is de kwaliteit van het model beoordeeld met metingen in de Schaar van Valkenisse. Op basis van deze aanvullende validatie is geconcludeerd dat het model de stroming in de Schaar van Valkenisse goed vat.



Figuur 3-1 Overzicht modeldomein met de 2016 bodemligging. De rode markers geven de stations aan waar waterstandsdata voor beschikbaar is. Voor de naamgeving van de meetstations zijn afkortingen gebruikt (VLIS = Vlissingen, BORS = Borssele, TERN = Terneuzen, OVHA = Overloop van Hansweert, HANS = Hansweert, WALS = Walsoorden, BAAL = Baalhoek, SVDN = Schaar van de Noord, BATH = Bath).

De simulaties in paragraaf 3.2 verschillen alleen in de opgelegde bodemligging. Omdat de simulaties verder identiek zijn – ook geen verschillen in de doorgerekende periode – zijn verschillen in berekende dieptegemiddelde stroomsnelheden direct te relateren aan verschillen in bodemligging. In deze studie is de stroming bij een bodemligging van 2011 (na de derde verdieping) vergeleken met de stroming bij een bodemligging van 2020 (meest recente beschikbare data). Gekozen is om de hydrodynamische forcering van twee spring-doodtij cycli (29,5 dagen) in 2016 te modelleren (halverwege 2011-2020), oftewel van 27 augustus 2016 03:50 tot 25 september 2016 16:10 (alle tijden in MET).

De verdeling van de hoogwaterstanden tijdens deze twee spring-doodtij cycli komt het beste overeen met de verdeling van hoogwaterstanden van heel 2016 (De Vet & Van der Werf, 2021). Omdat de pieksnelheden van het getij correleren met de hoogwaterstanden (net als met de getijslag; paragraaf 0) is dit ook een zeer representatieve periode wat betreft de pieksnelheden.



## 3.2 Resultaten

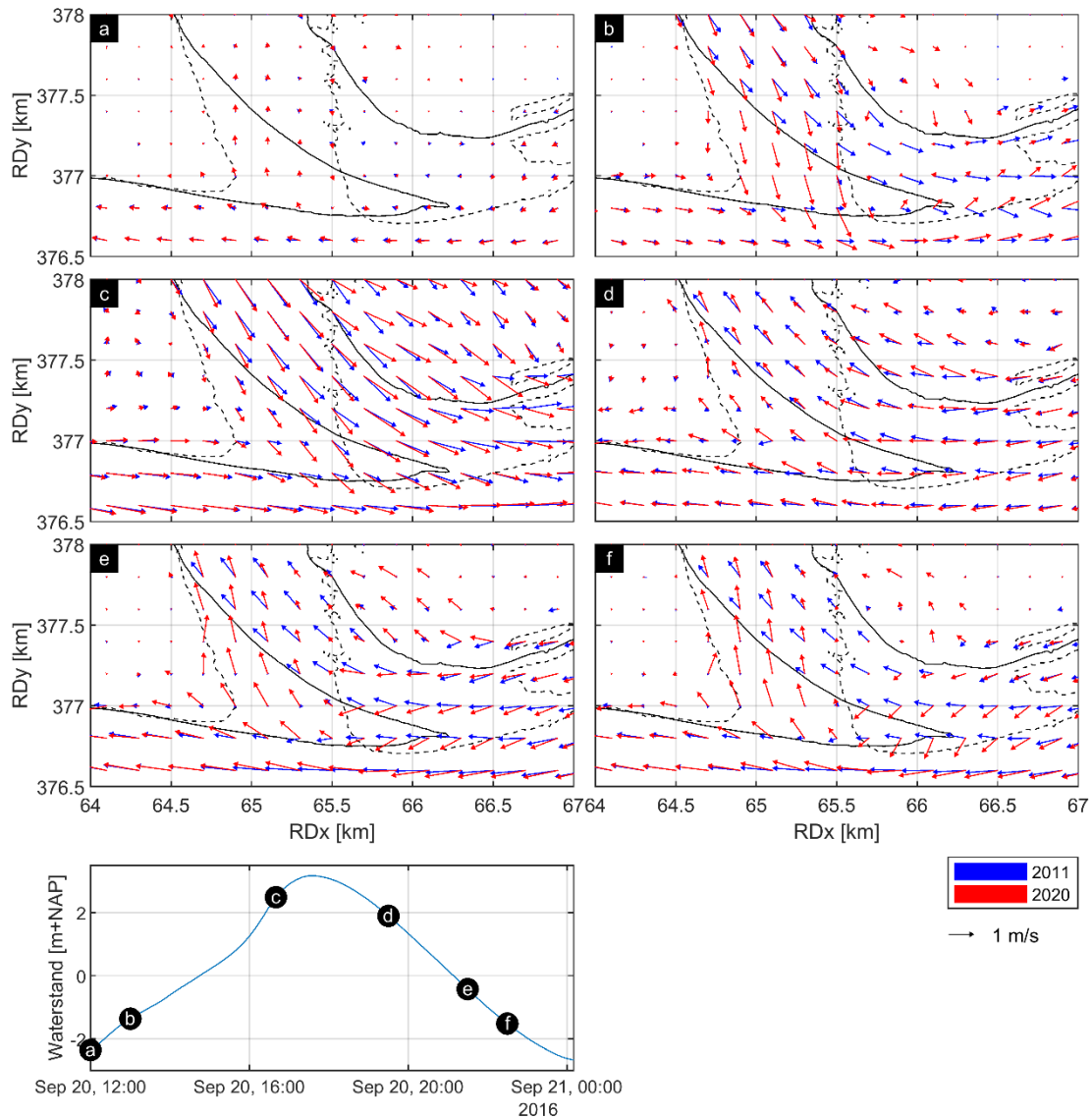
Deze paragraaf presenteert de berekende dieptegemiddelde stroming. Allereerst zijn stroombeelden voor één getij weergegeven. Deze geven inzicht in de stromingspatronen voor verschillende momenten in het getij. Vervolgens zijn ruimtelijke kaarten van de gemiddelde pieksnelheden gepresenteerd. Deze resultaten dragen bij aan het begrip van de stromingsveranderingen in de schaar als gevolg van de morfologische veranderingen.

### 3.2.1 Stroombeelden

Figuur 3-2 toont detailopnamen van de berekende stromingspatronen in de schaar voor verschillende momenten in één getij met een getijslag van 5,5 m. Ter referentie, deze getijslag is een halve meter groter dan de gemiddelde getijslag en een halve meter kleiner dan de maximale getijslag in de doorgerekende spring-doodtij cycli. In dit figuur zijn de stromingspatronen voor zowel de bodemligging van 2011 als die van 2020 weergegeven. Getoond is de dieptegemiddelde snelheid die, ten behoeve van de presentatie, geïnterpoleerd is naar een 200 m bij 200 m rooster (de rekenpunten liggen  $\pm 30$  m uit elkaar; Figuur A-1).

Rond laagwater (Figuur 3-2a) stroomt het water nog in ebrichting (het westen). Vervolgens draait de stroming om. In de schaar gebeurt dit tussen de 10 en 20 minuten eerder dan in de hoofdgeul. Eén uur na laagwater (Figuur 3-2b) komt de vloedstroming al boven de 1 m/s uit. Voor beide jaren volgt de stroming zichtbaar de oriëntatie van de geul van de schaar. In het zuidelijke deel van de schaar ( $RDy = 377$  km) stroomt het water voor de 2011 bodemligging naar het oosten en voor de 2020 bodemligging naar het zuiden. Eén uur vóór hoogwater (Figuur 3-2c) is de stroming verder aangesterkt en zijn verschillen in stromingsrichting tussen beide bodemliggingen afgenomen. Over de Plaat van Walsoorden is de stroming rond hoogwater nog zeer beperkt ( $\pm 20$  cm/s) terwijl de stroming over de lage delen van de Plaat van Walsoorden lokaal ruim de 1 m/s overschrijdt. Een half uur na hoogwater draait de stroming in ebrichting. Twee uur na hoogwater (Figuur 3-2d) zijn de verschillen in stromingsrichting tussen beide bodemliggingen nog relatief beperkt. Met het verder dalen van de waterstand (Figuur 3-2<sup>e</sup> en Figuur 3-2f) neemt de sterkte van de stroming lokaal toe en vindt er in de schaar, vooral voor de 2020 bodemligging, een oostelijke draaiing van de stroming plaats.

Met de 2011 bodemligging stroomt het water relatief uniform over de breedte van de schaar. Bij de 2020 bodemligging zijn grotere variaties zichtbaar. Waar de vloedstroming in het oosten van het diepe deel ( $< NAP-5m$ ) van de schaar op zijn sterkst is, is de ebstroming juist in het westen van het diepe deel maximaal.



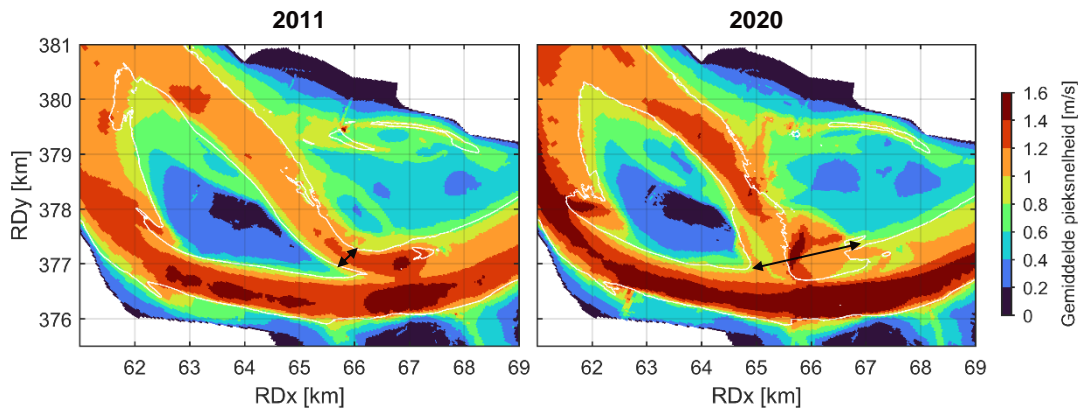
Figuur 3-2 Stroomingspatronen in de schaar voor verschillende momenten in het getij (a-f). De stroming is hier weergegeven op een 200 m bij 200 m rooster (de rekenpunten liggen  $\pm 30$  m uit elkaar; Figuur A-1). De NAP-5 m contouren zijn weergegeven voor 2011 (doorgetrokken) en 2020 (gestreept). De waterstand in de schaar is getoond (beneden) met een indicatie van de momenten van de stroombeelden (a-f).

### 3.2.2 Gemiddelde pieksnelheden

De gemiddelde pieksnelheden – berekend voor de twee gesimuleerde spring-doodtij cycli (paragraaf 3.1) – zijn een maat voor de sterkte van de getijdestroming. Spring-doodtij variaties van de snelheden vallen met deze middeling buiten de analyses. Bij springtij zijn de snelheden typisch hoger en bij doortij typisch lager (Figuur A-5). Omdat de snelheden schalen met de getijslag (Figuur A-5) wordt de gemiddelde pieksnelheid als een bruikbare indicator voor de stroming beschouwd. In Figuur 3-3 zijn de gemiddelde pieksnelheden – zonder onderscheid tussen vloed of eb (maximale per getij) – voor de 2011 en 2020 bodemligging weergegeven. Verderop in deze paragraaf wordt wel onderscheid gemaakt tussen de vloed- en ebstroming.

De sterkste stroming volgt bij de 2011 bodemligging in grote mate de dieptecontouren (Figuur 3-3). Over de gehele as van de schaar ligt de gemiddelde pieksnelheid boven de 1,0 m/s. De stroming was voor deze bodemligging het sterkst in de monding van de schaar, met lokaal gemiddelde pieksnelheden van boven de 1,4 m/s. Bij de 2020 bodemligging is de stroming in de monding van de schaar sterk veranderd. In 2020 kiest de stroming in de monding voor een veel bredere weg. In 2011 kwam de gemiddelde piekstrooming over een breedte van ongeveer 500 m boven de 1,0 m/s uit

terwijl dit in 2020 over een breedte van wel 2 km was (pijlen in Figuur 3-3). De ligging van de zones met de sterkste stroming is in de aangrenzende Schaar van Waarde (noordelijk van Rdy = 378 km) van 2011 naar 2020 relatief beperkt veranderd.

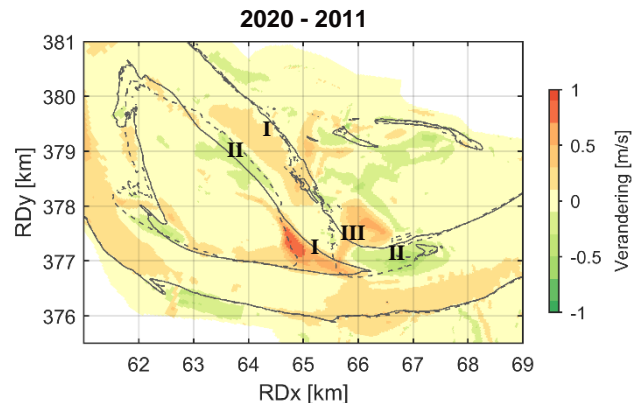


Figuur 3-3 Gemiddelde pieksnelheid voor de 2011 (links) en de 2020 (rechts) bodemligging met de NAP-5 m contouren van de betreffende jaren (in wit). De pijlen geven de breedte van de zone aan met een gemiddelde pieksnelheid boven de 1,0 m/s.

Figuur 3-4 toont de verschillen in gemiddelde piekstroming tussen beide bodemliggingen. De grootste verandering vond nabij de oostpunt van de Plaat van Walsoorden plaats (RDx = 64,9 km; Rdy = 377,3 km). Door de westwaartse migratie van de schaar is de gemiddelde pieksnelheid daar met meer dan 0,7 m/s toegenomen. Verder worden enkele zones gericht onder de aandacht gebracht (aangegeven met I-III). Zones met erosie vertonen over het algemeen een snelheidstoename (I) en zones met sedimentatie over het algemeen een snelheidsafname (II). Dit is karakteristiek voor een positieve feedback (zelfversterkend mechanisme). In tegenstelling hiermee is over dit decennium lokaal een verondieping samengegaan met een toename in snelheden (III). Ook specifiek in de periode met de sterkste verondieping (laatste 5 jaren; Figuur 2-17) is de gemiddelde piekstroming in deze zone toegenomen. Dit blijkt uit een vergelijking van de stroming tussen een simulatie voor de 2016 bodem en een simulatie voor de 2020 bodem (niet weergegeven in dit rapport). In deze zone is er dus geen sprake van een positieve feedback.

Ook in de hoofdgeul zijn snelheidsveranderingen (lokaal tot  $\pm 0,2$  m/s) zichtbaar. De berekende waterstanden en totale debieten (over de gehele breedte van de Westerschelde) verschillen niet wezenlijk tussen de 2011 en 2020 simulaties ( $<1\%$ ). Dit betekent dat de gemodelleerde verschillen in stroming grotendeels het gevolg zijn van verschillen in bodemligging (diepte en breedte) en een herverdeling van de stroming in dwarsrichting. Bijvoorbeeld, de snelheidstoename in de buitenbocht van het Zuidergat is te verklaren door een afname van het doorstroomoppervlak ( $-10\%$ ) door een verondieping van het dwarsprofiel (met uitzondering van het diepste deel van de vaargeul). De opzet van deze studie maakt dat alleen stromingsveranderingen door bodemveranderingen worden onderzocht en dat is voor een precieze analyse van de opgetreden stromingsveranderingen in de hoofdgeul minder geschikt omdat daar mogelijk ook veranderingen in getidekarakteristieken (bijvoorbeeld door diepteveranderingen langs de Westerschelde) relevant zijn. Toch geven de resultaten een indicatie van de impact van de morfologische veranderingen op de scheepvaart in de hoofdgeul. Tot op een paar honderd meter buiten de schaar heeft in de hoofdgeul een richtingsverandering van de stroming tot tientallen graden plaatsgevonden (Figuur 3-2).



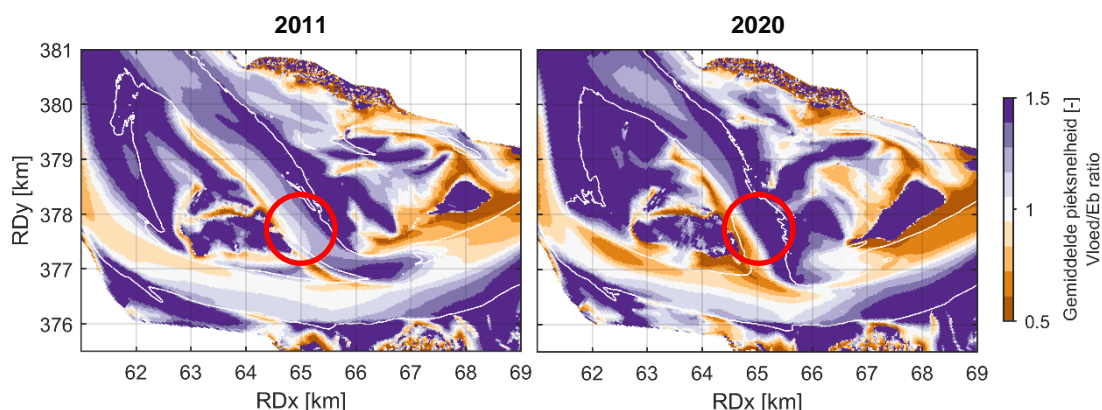


*Figuur 3-4 De verandering in de gemiddelde pieksnelheid tussen de bodemligging van 2011 en 2020 (positieve waarden duiden op een snelheidstoename). In deze verschilkaart zijn de NAP-5 m contouren weergegeven voor zowel 2011 (doorgetrokken) als 2020 (gestrept). De Romeinse cijfers geven in dit figuur de zones aan waarnaar in de hoofdtekst wordt verwezen.*

Voor de morfologische ontwikkeling van de schaar maakt het een groot verschil in welke richting de stroming plaatsvindt. Daarom wordt in de verdere analyses onderscheid gemaakt tussen de gemiddelde vloed- en ebpieksnelheden.

In Figuur 3-5 is voor elk rekenpunt de verhouding tussen de gemiddelde vloed- en ebpieksnelheden weergegeven. Een ratio boven de 1 impliceert vloeddominantie en een ratio beneden de 1 ebdominantie. Zichtbaar is dat zowel de hoofdgeul als de schaar niet uitsluitend vloed- of ebdominant zijn. In 2011 was het grootste deel van de schaar vloeddominant en was alleen de westelijke geulwand lokaal ebdominant. In de 2020 situatie is het verschil langs beide geulwanden veel geprononceerder. Zowel de vloeddominantie (oostelijke geulwand van de schaar) als de ebdominantie (westelijke geulwand van de schaar) zijn sterk toegenomen. Dit is goed zichtbaar op de met de cirkel gemarkeerde zone in Figuur 3-5. In de monding van de schaar (Rdy = 377 km) is de helft van de breedte tussen de 5 m diepte contouren ebdominant.

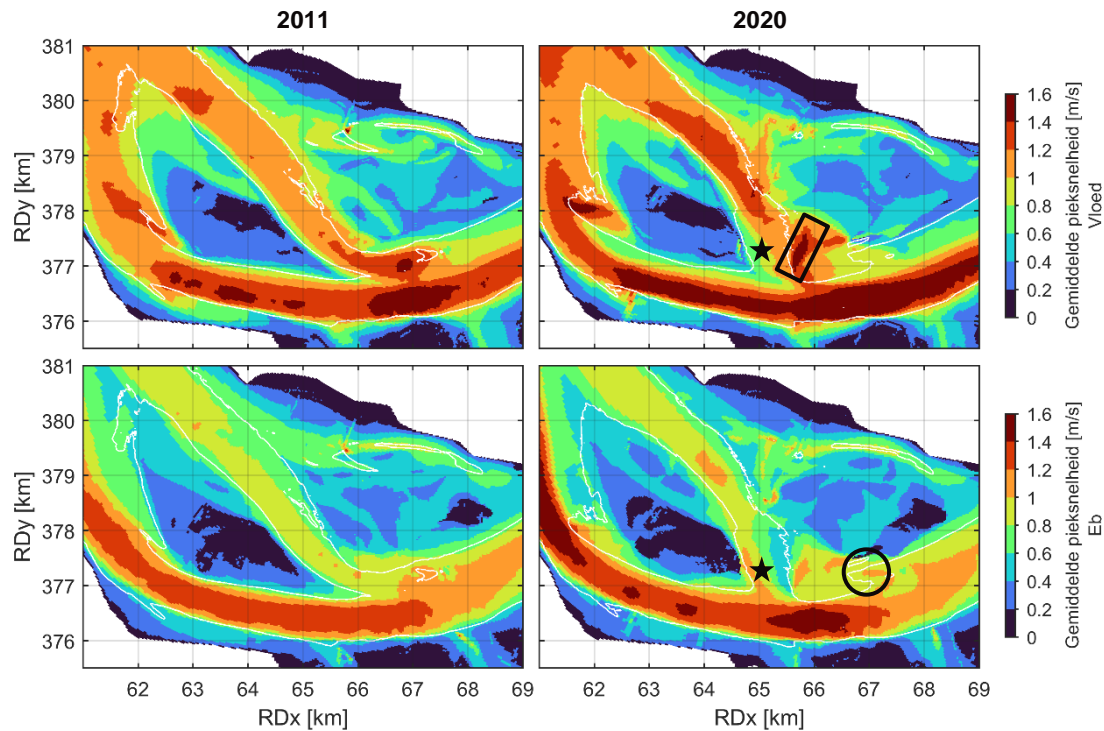
Ten noordwesten van de Schaar van Valkenisse (in de Schaar van Waarde; Rdy = 380 km) was de geul zowel in 2011 als in 2020 over de gehele breedte vloeddominant. Daarnaast is voor deze studie relevant dat de noordelijke geulwand van de hoofdgeul ebdominant is. Alleen de monding van de schaar is hierin een onderbreking met lokale vloeddominantie.



*Figuur 3-5 Ratio tussen de gemiddelde vloed- en ebpieksnelheden voor de 2011 (links) en 2020 (rechts) bodemligging (paarse kleuren duiden op een vloeddominantie). De bijbehorende NAP-5 m dieptecontouren jaren zijn ook weergegeven. De rode cirkel is voor beide jaren op de zelfde locatie weergegeven en fungeert als referentie.*

In Figuur 3-6 zijn de groottes van de gemiddelde vloed- en ebpieksnelheden voor beide jaren weergegeven. In beide jaren is de bovengrens van de gemiddelde vloedpieksnelheid (tot  $\pm 1,5$  m/s) groter dan de bovengrens van de gemiddelde ebpieksnelheid (tot  $\pm 1,0$  m/s). Zoals ook eerder in de analyses waargenomen, vonden de veranderingen

in gemiddelde vloed- en ebpijksnelheden vooral plaats in de monding van de schaar. Waar in 2011 zowel de vloed- als de ebstroming hoofdzakelijk de NAP-5 m contouren volgden, is dit in 2020 niet meer het geval. Met de ster in Figuur 3-6 is de ligging van de zichtbare scheiding tussen de sterkste vloed- en ebstroming aangegeven. De vloedstroming stroomt in 2020 hoofdzakelijk ten oosten hiervan en de sterkste ebstroming ten westen daarvan. De sterke stroming rondom de ondiepte aangegeven met de rechthoek in Figuur 3-6 (ook zichtbaar in Figuur 3-3) vindt plaats tijdens vloed. Ten oosten van de schaar is in de morfologie lokaal de vorming van een ebschaar te zien. In de stroming is daar lokaal ebdominantie zichtbaar (gemarkeerd met de cirkel in Figuur 3-6).



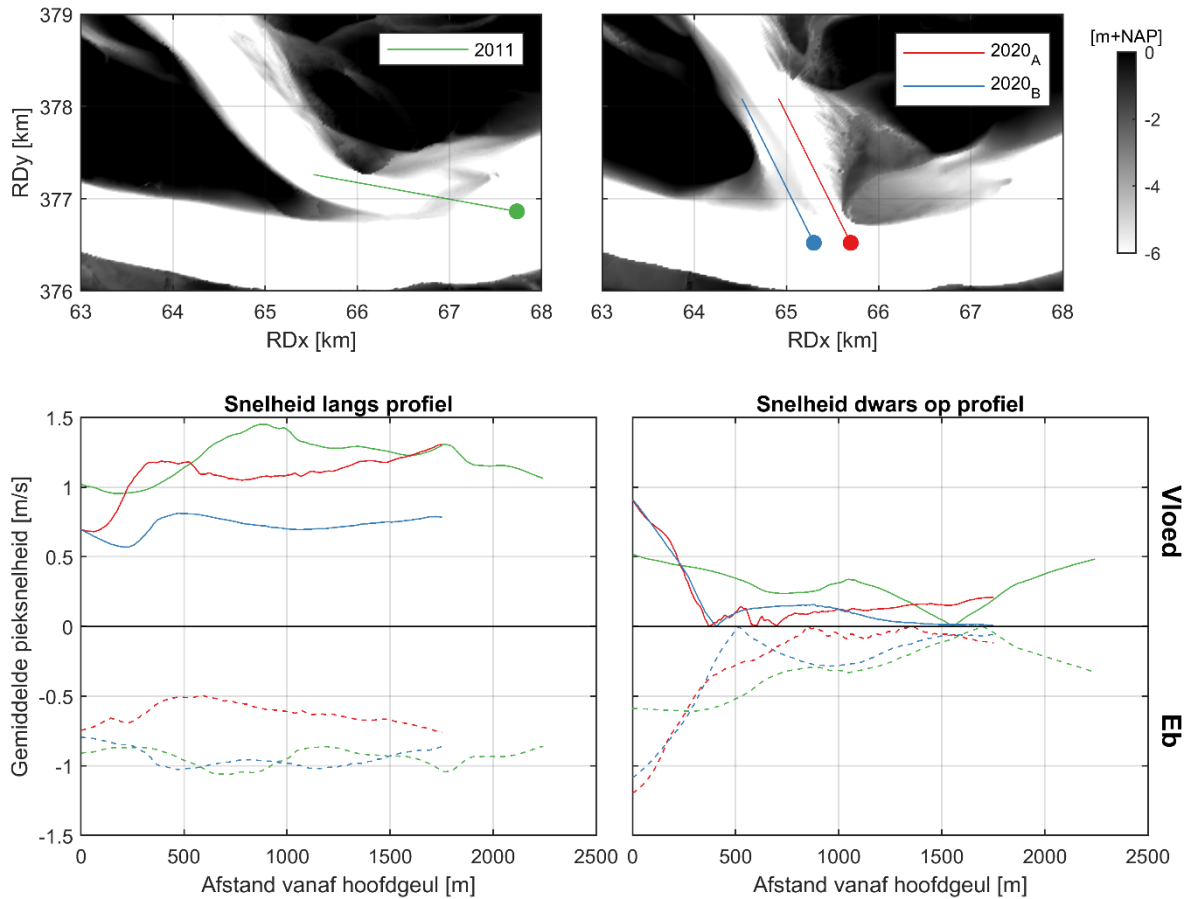
*Figuur 3-6 Gemiddelde vloedpijksnelheden (boven) en de gemiddelde ebpijksnelheden (onder) voor de 2011 (links) en de 2020 (rechts) bodemligging. De bijbehorende NAP-5 m dieptecontouren jaren zijn ook weergegeven. De ster bij de resultaten voor 2020 fungeert als referentie tussen het vloeddominante deel (oostelijk van de ster) en het ebdominante deel (westelijk van de ster). De rechthoek in de vloedpijksnelheden van 2020 markeert de sterke stroming in het drempelgebied. De cirkel in de ebpijksnelheden van 2020 markeert de lokaal wat hogere ebstroming ten oosten van het drempelgebied.*

Ruimtelijke variaties in stroomsnelheden resulteren in sedimenttransportgradiënten en daarmee in bodemveranderingen. Verder kunnen ruimtelijke stromingsvariaties de bevaarbaarheid bemoeilijken. De langs- en dwarscomponenten van de gemiddelde vloed- en ebpijksnelheden zijn in Figuur 3-7 weergegeven langs profielen die de talweg benaderen nabij de overgang van de schaar naar de hoofdgeul. Voor 2020 zijn twee profielen beschouwd omdat de vloed- en ebstroming voor dat jaar een andere weg volgen (Figuur 3-6) en er in dat jaar sprake is van een lokale ondiepte die beide stromingen scheidt en er dus gesproken zou kunnen worden van twee talwegen.

De grootste verandering in gemiddelde pijksnelheid langs de profielen vindt voor beide jaren plaats tijdens vloed bij de overgang van de schaar naar de hoofdgeul. Voor het oostelijke 2020 profiel (vloeddinante deel van de geul) neemt de stroming bij deze overgang met 0,5 m/s af over 200 m. Dit bevordert lokale depositie van sediment. De afname van de vloedstroming langs het 2011 profiel kan mogelijk hebben bijgedragen aan de lokale ondiepte die zichtbaar is in de kaart van 2011 in Figuur 3-7. De variaties van de gemiddelde pijksnelheid langs deze profielen zijn kleiner tijdens eb (tot  $\pm 0,1$  m/s per 100 m).

De dwarscomponenten van de stroming op het 2011 profiel zijn relatief gradueel (tot  $\pm 0,1$  m/s per 100 m). De dwarscomponenten van de stroming op de 2020 profielen variëren sterker, zowel tijdens vloed als eb. De dwarscomponent van de gemiddelde vloedpijksnelheden neemt voor deze 2020 profielen van de schaar naar de hoofdgeul over 400 m toe van 0 m/s naar 0,9 m/s. De dwarscomponent van de ebpijksnelheden neemt van de hoofdgeul naar de schaar over 500 m af van ruim 1 m/s naar 0 m/s. Schepen die langs de profielen varen, ondervinden in de

2020 situatie tijdens de piekstroming grotere stromingsvariëaties dan in de 2011 situatie. Grotendeels valt dit te verklaren doordat de geul door de schaar in 2020 meer haaks op de hoofdgeul is komen te liggen.



Figuur 3-7 Visualisatie van de langs- en dwarscomponenten van de gemiddelde piekstroming langs profielen. Boven: ligging van de profielen voor de 2011 en 2020 simulaties (lineaire benadering talweg). Voor de 2020 simulatie zijn twee profielen weergegeven in verband met de recent ontstane ondiepte in het midden van deze geul. Onder: gemiddelde pieksnelheden langs deze profielen voor vloed (positief) en eb (negatief) met links de langscomponenten en rechts de dwarscomponenten. De afstanden zijn gemeten vanaf het beginpunt van de profielen in de geul (boven gemarkeerd met een stip).



## 4 Synthese en aanbevelingen

De kennis uit de voorgaande hoofdstukken wordt in dit hoofdstuk tot een integraal beeld van de werking van de schaar verwerkt. Op basis daarvan worden mogelijke toekomstige morfologische ontwikkelingen geschetst. Deze leiden tot aanbevelingen voor het toekomstige beheer van de schaar. De onderzoeksvragen (Hoofdstuk 1) worden hiermee beantwoord. In paragraaf 4.1 wordt antwoord gegeven op de vraag wat de hydro-morfologische ontwikkeling was van de Schaar van Valkenisse en omgeving tussen 2011 en 2021, en welke processen hieraan ten grondslag lagen. Paragraaf 4.2 geeft inzicht in de verwachte morfologische ontwikkeling van de Schaar van Valkenisse voor de komende 10 jaar. Tenslotte wordt in paragraaf 4.3 ingegaan op de betekenis van de verwachte morfologische ontwikkelingen voor het beheer van de Schaar van Valkenisse.

### 4.1 Ontwikkeling morfologie en stroming Schaar van Valkenisse en omgeving 2010-2021

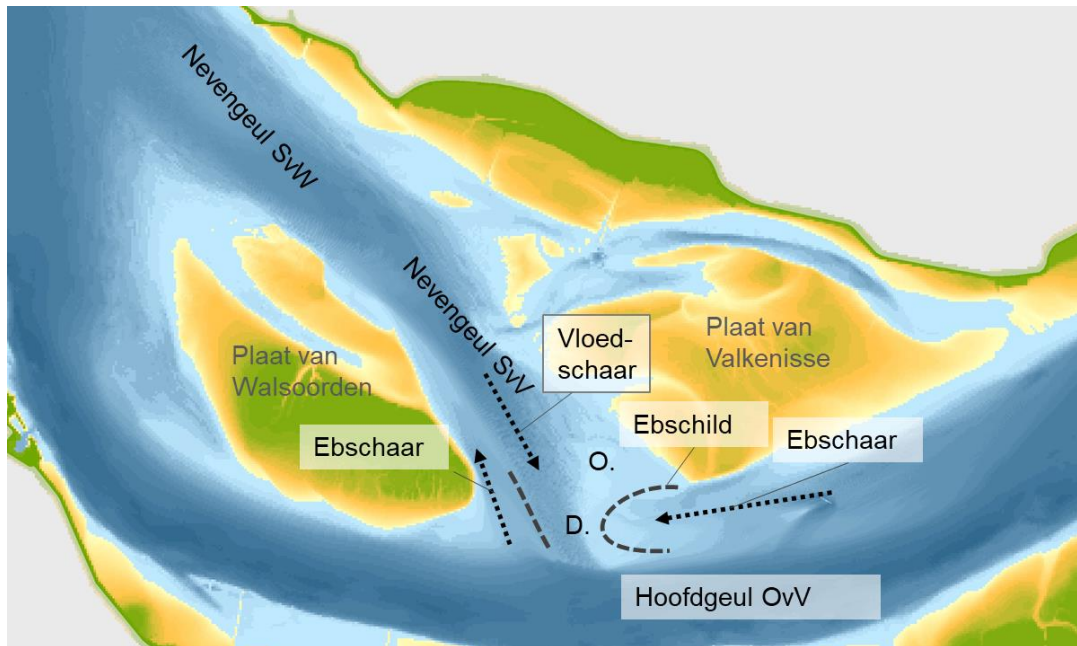
#### 4.1.1 Morfologie

De Schaar van Valkenisse is de laatste 10 jaar met de wijzers van de klok meegedraaid. Deze rotatie c.q. westelijke migratie verliep relatief snel in het begin (2010-2015) en is in de loop van de tijd vertraagd. Daarbij is het drempelgebied, dat de overgang vormt tussen de Schaar van Valkenisse en de Overloop van Valkenisse, verondiept. De minimale bodemligging van de talweg van de Schaar van Valkenisse (lijn die de diepste delen van de geul verbindt) is in 2020 met NAP-7 m ongeveer 4 m ondieper dan in 2010. Tegelijkertijd is de Schaar van Valkenisse verbreed, waardoor het dwarsprofiel een minder prominente geulvorm heeft gekregen.

De aanwezigheid van de megaribbels, met een lengte van tientallen meters en een hoogte (van top tot dal) van rond de meter levert beperkingen aan de diepte en daarmee aan het nautische gebruik. De variatie van de bodemligging als gevolg van verplaatsende megaribbels is relatief klein ten opzichte van de grootschalige veranderingen.

Tegelijkertijd met de afnemende migratie van de Schaar van Valkenisse ontstaat er ten oosten van het drempelgebied een ondiepte. De bodemhoogte van de platen naast de Schaar van Valkenisse (Plaat van Walsoorden en Plaat van Valkenisse) is tussen 2010 en 2020 beperkt toegenomen.

De laatste twee jaren laten een (nog) complexere morfologische ontwikkeling zien (Figuur 4-1). Parallel aan de Schaar van Valkenisse vormt zich aan de westzijde een ebschaartje, tegen de Plaat van Walsoorden aan. De Schaar van Valkenisse is daarmee een duidelijke vloed-schaar geworden, gescheiden van deze nieuwe ebschaar middels een ondiepte (de stippellijn tussen de ebschaar en vloed-schaar in Figuur 4-1). De ebschaar in het oosten van het drempelgebied, deels in de hoofdgeul, is versterkt, inclusief de vorming van een ebschild aan de kop van deze schaar.

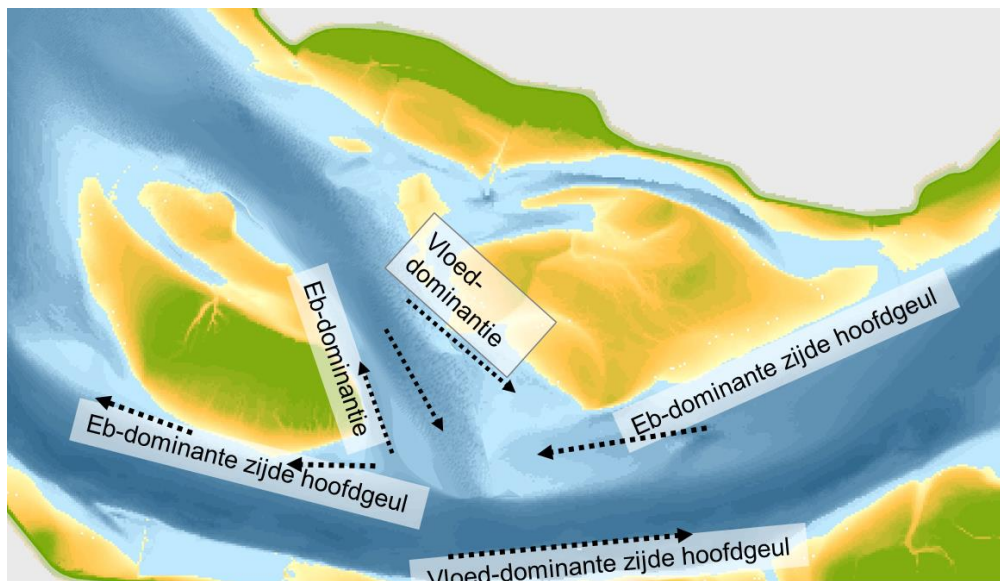


Figuur 4-1 Schematische weergave van de verschillende morfologische onderdelen in de hoofd- en nevengeul in de huidige situatie (2021). De D. geeft het drempelgebied weer in de vaarweg door de nevengeul. De O. staat bij de ondiepte.

#### 4.1.2 Stroming

De grootste veranderingen in de stroming als gevolg van de bodemontwikkeling treden op in het mondings- c.q. drempelgebied van de Schaar van Valkenisse. Waar de eb- en vloedstroming voor de 2011 bodem min of meer in balans waren en langs dezelfde weg liepen, is de Schaar van Valkenisse in de huidige situatie breder en ondieper. Dit geeft ruimte voor een meer gescheiden eb- en vloedstroming (Figuur 4-2). Een deel van de vloedstroom “schiet door” over het drempelgebied (“O” in Figuur 4-1) wat leidt tot een lokaal versterkte stroming. Relatief veel ebstroming verloopt via de ebschaar die ten oosten van het drempelgebied is ontwikkeld. Door de rotatie van de Schaar van Valkenisse zijn zowel de eb- als vloedstroming in de Schaar van Valkenisse en de ebstroming in de hoofdgeul Overloop van Valkenisse onder een grotere hoek met elkaar komen te staan. Dit betekent concreet dat de scheepvaart lokaal te maken kan krijgen met zeer hoge dwarsstroming op de overgang van de schaar en de hoofdgeul (de modelberekeningen laten waarden van ruim 1 m/s dwars op bepaalde profielen; Figuur 3-7). Op enkele honderden meters ten zuiden van de schaar is in de hoofdgeul nagenoeg geen verandering in stroming meer waargenomen ten opzichte van de 2011 simulatie.

De stroming langs de noordkant van de Overloop van Valkenisse, ten zuiden van de Schaar van Valkenisse, is ebdominant, met hogere (piek)snelheden in ebrichting (naar het westen), zoals schematisch is weergegeven in Figuur 4-2.



Figuur 4-2 Schematische weergave van de stromingscomponenten in de hoofd- en nevengeul in de huidige situatie.

### 4.1.3 Discussie over de aandrijvende processen

De ebdominante stroomsnelheid langs de noordelijke rand van de hoofdgeul is waarschijnlijk de drijvende kracht achter de westelijke migratie van de Schaar van Valkenisse. Dit systeeminzicht betekent dat het niet is uitgesloten dat de stortingen in het vak SH61 (de hoofdgeul van macrocel 6, Nauw van Bath, zie Figuur 1-1) ten oosten van het interessegebied hebben bijgedragen aan de ontwikkeling van het drempelgebied. Deze ebschaar met het bijbehorende ebschild in de hoofdgeul (Figuur 4-1) liggen in het verlengde van het stortvak SH61, wat betekent dat transport door de ebstroming van gestort sediment naar het drempelgebied plausibel is.

Sinds 2012 wordt vanwege dreigende afname van het watervolume van de geul onder de afgesproken grenswaarde niet meer gestort in de nevengeul (vak SN51). De andere stortlocaties in macrocel 5 worden nog wel gebruikt. Dit zijn het plaatrandstortgebied Plaat van Walsoorden en SH51 (hoofdgeul macrocel 5, Zuidergat, ten westen van de Schaar van Valkenisse). De positie van SH51 in de hoofdgeul in relatie tot de ligging van de drempel van de Schaar van Valkenisse is dusdanig dat een direct verband tussen de stortingen daar en de morfologische ontwikkelingen in het drempelgebied niet waarschijnlijk zijn.

De afnemende westelijke migratie van de Schaar van Valkenisse is mogelijk gerelateerd aan het bereiken van de Plaat van Walsoorden die minder gemakkelijk erodeerbaar is door de aanwezigheid van (cohesief) slib en vegetatie. Een andere verklaring voor de vertraging in de westelijke migratie van de Schaar van Valkenisse is dat de verandering in de oriëntatie van de nevengeul betekent de stroming naar en vanuit de hoofdgeul steeds minder vloeiend verloopt. Deze verklaringen sluiten elkaar niet uit en kunnen ook samen verantwoordelijk zijn voor de afname van de verplaatsing.

De Plaat van Walsoorden is steeds hoger komen te liggen, waardoor deze steeds moeilijker kan worden doorsneden. Dit geldt in minder mate ook voor de Plaat van Valkenisse, wat het niet waarschijnlijk maakt dat een nieuwe geul dwars door de Platen van Valkenisse de rol van de Schaar van Valkenisse over kan nemen. Dit sluit aan bij een trend die in de hele Westerschelde waar te nemen is. De platen groeien steeds meer aan elkaar, zijn veelal ook hoger geworden, en er is een afname in de dynamiek van ligging van geulen en platen (Van Dijk, et al., 2021).

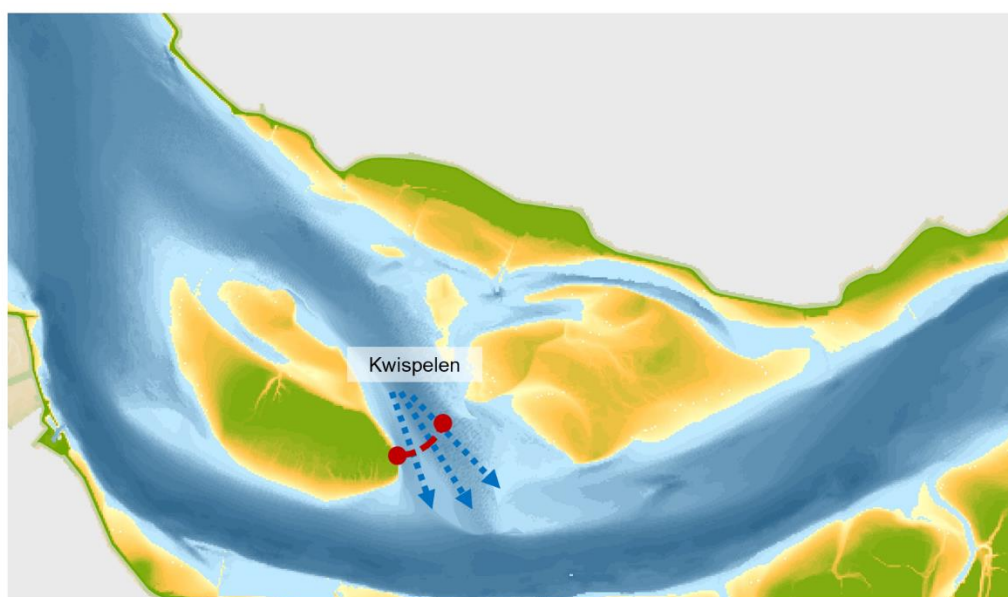
Nu de laatste twee jaren de Schaar van Valkenisse (in het bijzonder het oostelijke deel ervan) steeds meer een karakter krijgt dat past bij een vloedschaar, met parallel hieraan een ebschaar, is het vooral de vloedstroming die de ligging van dit deel van de geul in stand houdt. Door deze scherpere scheiding van de eb- en vloedstroming neemt de potentie voor een enkele, diepe geul af. De “doorschietende” vloedstroming in de zuidoostelijke richting over het oostelijk gelegen drempelgebied kan in de toekomst een aandrijvende kracht zijn voor een meer zuidoostelijke oriëntatie. Een andere aandrijvende kracht is de ontwikkeling van een ebschaar aan de oostelijke zijde van het drempelgebied.



## 4.2 Verwachte morfologische ontwikkeling de komende 10 jaar

Er zijn meerdere sturende processen en de waargenomen morfologische ontwikkelingen zijn complex. Deze ontwikkelingen verlopen op verschillende tijdschalen en zijn beperkt voorspelbaar. Vaak wordt bij het beschouwen van de dynamiek van nevengeulen en drempelgebieden gekeken naar situaties in het verleden, met een vergelijkbare geometrie. Historische ontwikkelingen geven voor de situatie bij de Schaar van Valkenisse echter geen goede aanknopingspunten voor toekomstige ontwikkelingen, omdat de randvoorwaarden voor de ontwikkelingen duidelijk anders zijn dan in het verleden. Dit geldt zowel voor de omvang van de hoofdgeul, die tegenwoordig aanmerkelijk groter is als in het verleden (voor 1995), als voor de verhouding tussen de omvang van de hoofd- en de nevengeul. Ook zijn de aanliggende platen tegenwoordig hoger en meer aaneengesloten dan vroeger. Vanwege deze verschillen worden daarom geen historische ontwikkelingen van voor 2010 getoond. Wel zijn op basis van het huidige inzicht in zowel de morfologische ontwikkeling als de onderliggende processen twee waarschijnlijke richtingen te geven waarin de Schaar van Valkenisse zich kan ontwikkelen (grafisch weergegeven in Figuur 4-3 en Figuur 4-4):

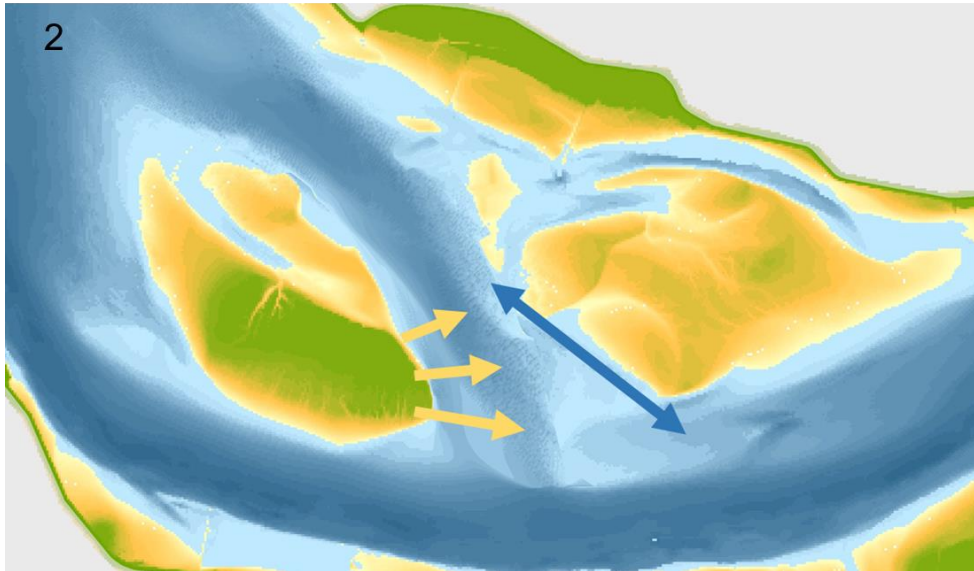
1. Doorzetten van de morfologische ontwikkeling van de laatste twee jaar. Dit is het zogenaamde “kwispelen” van de Schaar van Valkenisse. De Schaar van Valkenisse beweegt hierbij afwisselend enkele honderden tot tientallen meters oost- en westwaarts, op een tijdschaal van enkele jaren. Dit gebeurt onder invloed van afwisselend afstoten en doorbreken van het westelijk gelegen ebschaartje. Dit scenario leidt tot een relatief brede, ondiepe Schaar van Valkenisse in het drempelgebied. Daar zal afwisselend sedimentatie en erosie optreden, mede vanwege de ruimtelijke scheiding van de eb- en vloedstroom. Een dergelijk scenario lijkt een beetje op de vorming en verplaatsing van de eb- en vloedscharen op de drempel van macrocellen 3 en 4, zoals beschreven door Jeuken (2000), met de kanttekening dat de dynamiek op die drempel op een veel grotere ruimte- en tijdschaal plaatsvindt.



Figuur 4-3 Schets van de eerste mogelijke toekomstige ontwikkeling voor het drempelgebied.

2. Een situatie die vergelijkbaar is met 10 jaar geleden. Daarvoor is het nodig dat de vloedstroom haar voornaamste weg vindt over en langs het zuidoostelijk gelegen drempelgebied. Er komt dan weer een noordwest-zuidoost georiënteerde Schaar van Valkenisse. De aandrijvende kracht is de druk van de doorschietende vloedstroming vanuit het noordwesten, samen met de ebstroming vanuit het zuidoosten. Het huidige ebschaartje wordt in dit scenario minder actief en de Plaat van Walsoorden kan weer terug groeien in oostelijke richting. Dit zal mogelijk resulteren in een relatief diepe, smalle geul, waarbij zowel de eb- als vloedstroming de geul-as volgen. Het ebtransport langs de noordelijke rand van de hoofdgeul blijft waarschijnlijk wel voor aanzanding vanuit oostelijke richting zorgen. Het is lastig voorspelbaar of dit scenario gaat plaatsvinden en wanneer deze ontwikkeling doorslaggevend zal worden ingezet. Het is ook niet bekend of en welke “trigger” hiervoor nodig is. Mocht dit gebeuren dan zal het naar

verwachting orde 10 jaar duren voordat de situatie in de schaar weer gelijkwaardig is aan de situatie van dit moment (gebaseerd op de tijdschaal van de reeds waargenomen ontwikkelingen).



Figuur 4-4 Schets van de tweede mogelijke toekomstige ontwikkeling voor het drempelgebied.

Alternatieve scenario's, bijvoorbeeld een ontwikkeling waarin de meest noordoost gelegen geul (Geul Zimmerman) de dominante nevengeul wordt, lijken uitgesloten voor de komende jaren. De Geul Zimmerman vertoont juist al jaren een afname van de omvang.

## 4.3 Aanbevelingen voor het beheer

### 4.3.1 Nautische functie Schaar van Valkenisse

De in de vorige paragraaf geschetste twee mogelijke morfologische ontwikkelingsrichtingen hebben naar verwachting een verschillende invloed op de nautische functie van de Schaar van Valkenisse. Voor de schaar zijn de diepgangseisen gekoppeld aan de huidige betonning. Voor het toepassen van rood-groene betonning wordt gestreefd naar een diepte van tenminste -3.5 m LAT, overeenkomend met de internationale richtlijnen voor laterale markering volgens IALA. Momenteel wordt er bijzondere markering (gele boeien) toegepast op een diepte van -2 m LAT. Scheepvaartklassen kunnen de schaar betreden naar gelang de diepgang dit toelaat.

De "kwispelende" Schaar van Valkenisse (ontwikkelingsrichting 1, Figuur 4-3) is de situatie van de laatste twee jaren en betekent een relatief ondiepe en brede geul, met een relatief scherpe overgang van de stroming naar de Overloop van Valkenisse.

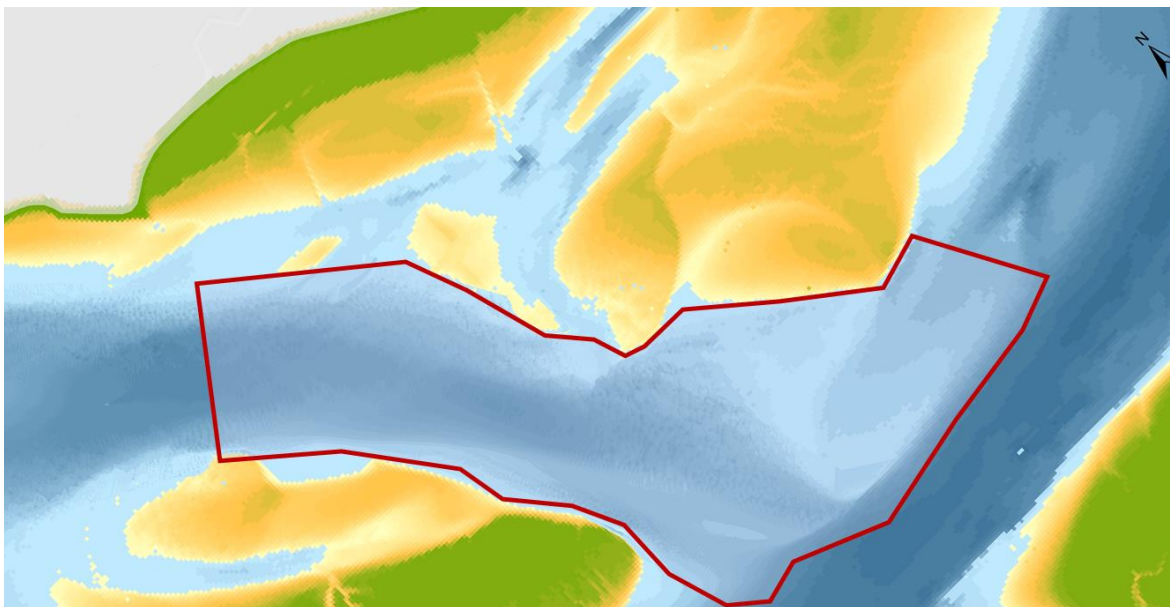
De tweede richting, vergelijkbaar met de situatie van 10 jaar geleden, heeft een noordwest-zuidoost georiënteerde Schaar van Valkenisse (ontwikkelingsrichting 2, Figuur 4-4). Dit betekent waarschijnlijk een relatief diepe en smalle geul, en een meer geleidelijke overgang van de stroming naar de Overloop van Valkenisse.

In hoeverre de morfologische veranderingen betekenen dat nautisch gebruik mogelijk blijft, is afhankelijk van de breedte en diepte van de drempel en van de stromingscondities op de overgang van nevengeul naar hoofdgeul. Op basis van de waargenomen trendmatige afname van de minst gepeilde diepte (Tabel 2-1) en afname van de breedte (Figuur 2-2) in combinatie met de geschetste ontwikkelrichtingen, is de verwachting dat het dynamisch betonnen en het nautische gebruik de komende jaren nog lastiger zal worden dan nu al het geval is. Het valt niet uit te sluiten dat de minst gepeilde diepte afneemt tot minder dan -2m LAT.

### 4.3.2 Monitoring van de Schaar van Valkenisse

Deze studie geeft geen eenduidige toekomstvoorspelling van de morfologische ontwikkelingen. Ook voor de komende jaren kennen de voorspellingen grote onzekerheden. Dit is het gevolg van de grote complexiteit van de morfologische ontwikkelingen, met name in de laatste twee jaar, evenals de diversiteit in de sturende processen die eraan ten grondslag liggen. Het is belangrijk deze complexiteit te onderkennen bij het toekomstige gebruik en beheer van de schaar.

Succesvol inspelen op de morfologische ontwikkeling is afhankelijk van het goed volgen ervan. Daarom wordt aanbevolen om de dynamiek van de schaar goed te blijven volgen door de morfologische monitoring (multibeam-metingen, de huidige opnamegebieden zijn opgenomen in de kaart in Bijlage B) te continueren en uit te breiden naar het hele drempelgebied (ook oostelijker, zie Figuur 4-5). Het meermaals per jaar (minimaal twee keer) uitvoeren van de hoge resolutie lodingen, zoals in 2019, 2020 en 2021 is gedaan, blijkt heel waardevol. Daarbij is het belangrijk om de ingewonnen gegevens te gebruiken voor een morfologische analyse door deskundigen, zodat de ontwikkelingsrichting van het drempelgebied duidelijk wordt.



*Figuur 4-5 Gebied waarvan wordt aanbevolen de ontwikkeling te volgen door frequent (tenminste twee keer per jaar) een gedetailleerde multibeam peiling uit te voeren. Nota bene, de grenzen van het te peilen gebieden dienen mee te bewegen met de morfologische veranderingen, zoals de verplaatsing van de plaatranden.*

### 4.3.3 Mogelijke vervolgsceario's

De autonome morfologische ontwikkeling van de Schaar van Valkenisse is complex en onzeker. Dit geldt ook voor de gevolgen van eventuele ingrepen om de diepte van de nevengeul te vergroten. Herstel van een situatie vergelijkbaar aan die van 2011 (na de 3e vaargeulverruiming van de Westerschelde) – door het wegbaggeren van de huidige drempel in de schaar of door het baggeren van de geul op de locatie van waar deze in 2011 lag – is omvangrijk en ingrijpend. Het wegbaggeren van de huidige drempel tot de diepte van 2011 zou een verdieping van 4,5 m betekenen ten opzichte van de huidige minimale waterdiepte van -2,5 m LAT. Het baggeren van de geul op de locatie van waar de geul in 2011 lag, zou een nog grotere verdieping omvatten, omdat op die locatie tegenwoordig een omvangrijkere ondiepte ligt. Op basis van de nu beschikbare kennis is niet precies vast te stellen wat de noodzaak, levensduur, omvang van het benodigde onderhoud en morfologische gevolgen zijn van dergelijke ingrepen.

Om in de toekomst weloverwogen advies te kunnen geven over de mogelijkheden van ingrepen voor het verbeteren van de scheepvaartfunctie, is het zinvol om de huidige autonome dynamiek van het gebied verder te kwantificeren door het uitvoeren van extra detailpeilingen en deze inhoudelijk beoordelen door deskundigen en door het uitvoeren van een



kubering (volumebepaling van deelgebieden rond de drempel), om zicht te krijgen op de hoeveelheden sediment die rond de drempel in beweging zijn. Verder is het zinvol om morfologische modellering van de schaar uit te voeren in aanvulling op de modellering van de waterbeweging. Kwantificering en morfologische modellering verschaft extra inzicht in de werking van het systeem. Het modelonderzoek zal moeten starten met een hindcast (modellering ontwikkelingen afgelopen 10 jaar) om na te gaan wat de morfologische voorspelkracht van het model is. Dit geeft inzicht in de waarde die aan voorspellingen kan worden gehecht. Een op deze wijze gevalideerd model levert waardevolle bijdragen aan het systeembegrip, met meer inzicht in het effect en de ontwikkeling van morfologische ingrepen (door deze 'door te rekenen').

Na het uitvoeren van kuberingen en morfologische modellering kan worden nagedacht of een kleinschalige pilot nog aanvullende systeemkennis kan opleveren. Analyse van de meetresultaten van een dergelijke pilot, onder andere door toepassing van de gegevens in modellen van waterbeweging, sedimenttransport en morfologisch verandering, levert nieuwe inzichten in de morfodynamiek.

## 5 Referenties

- Bouma, T. J., Vries, M. B. D., Low, E., Kusters, L., Herman, P. M. J., Tánčzos, I. C., Temmerman, S., Hesselink, A., Meire, P., & Regenmortel, S. van. (2005). Flow hydrodynamics on a mudflat and in salt marsh vegetation: identifying general relationships for habitat characterisations. *Hydrobiologia* 2005 540:1, 540(1), 259–274. <https://doi.org/10.1007/S10750-004-7149-0>
- Brückner, M., Schwarz, C., Van Dijk, W., Van Oorschot, M., Douma, H., & Kleinhans, M. (2019). Salt marsh establishment and eco-engineering effects in dynamic estuaries determined by species growth and mortality. *Journal of Geophysical Research – Earth Surface*, 2962-2986.
- Cleveringa, J., 2015. Droogvalranges in de ecotopenkaarten van de Westerschelde; Ontwikkelingen, trends en ecologische betekenis. Arcadis-rapport projectnummer C003041.001987
- De Vet, L., & Van der Werf, J. (2021). Delft3D-FM Modelling Buitendijkse Maatregelen Baalhoek & Knuitershoek, Westerschelde: Rapportage opzet en kalibratie model.
- De Vet, P. L. M., van Prooijen, B. C., Colosimo, I., Steiner, N., Ysebaert, T., Herman, P. M. J., & Wang, Z. B. (2020). Variations in storm-induced bed level dynamics across intertidal flats. *Scientific Reports* 2020 10:1, 10(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69444-7>
- Hiatt, M., Sonke, W., Addink, E., Van Dijk, W., Van Kreveld, M., Ophelders, T., M. Kleinhans, (2020). Geometry and topology of estuary and braided river channel networks automatically extracted from topographic data. *Journal of Geophysical Research – Earth Surface*.
- Jeuken, M.C.J.L. (2000), On the morphologic behaviour of tidal channels in the Westerschelde estuary. PhD. Thesis, Utrecht University, 378 pp
- Leuven, J., De Haas, T., Braat, L., & Kleinhans, M. (2018). Topographic forcing tidal sand bar patterns for irregular estuary platforms. *Earth Surface Processes and Landforms*, 172-186.
- Mastbergen, D.R. & R.A. Schrijvershof, 2016. Sedimentatiepatronen Plaat van Walsoorden na plaatval 22 juli 2014. Deltares rapport.
- Schrijver, M. Monitoring meergeulensysteem Westerschelde; Toetsing nevengeulen op criterium watervolume. Rijkswaterstaat Zee en Delta Rapportnr. 7210A/MMGW-2021-01
- Van Dijk, W., 2019. Verdieping nevengeulen Westerschelde i.r.t. nautische functie. Arcadisrapport projectnummer C03141.000082.0120.
- Van der Vegt, H. D. Mastbergen & J. van der Werf, 2020. Moeilijk-erodeerbare lagen in de Westerschelde; Onzekerheden en gevolgen voor morfodynamiek. Deltaresrapport 210301-015-ZKS-0014.
- Van Dijk, W., Cox, J., Leuven, J., Cleveringa, J., Taal, M., Hiatt, M., . . . Kleinhans, M. (2021). The vulnerability of tidal flats in multi-channel estuaries to dredging and disposal. *Anthropocene Coasts*, 36-60.
- Van Dijk, W., Mastbergen, D., Van den Ham, G., Leuven, J., & Kleinhans, M. (2018). Location and probability of shoal margin collapses in a sandy estuary. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2342-2357.



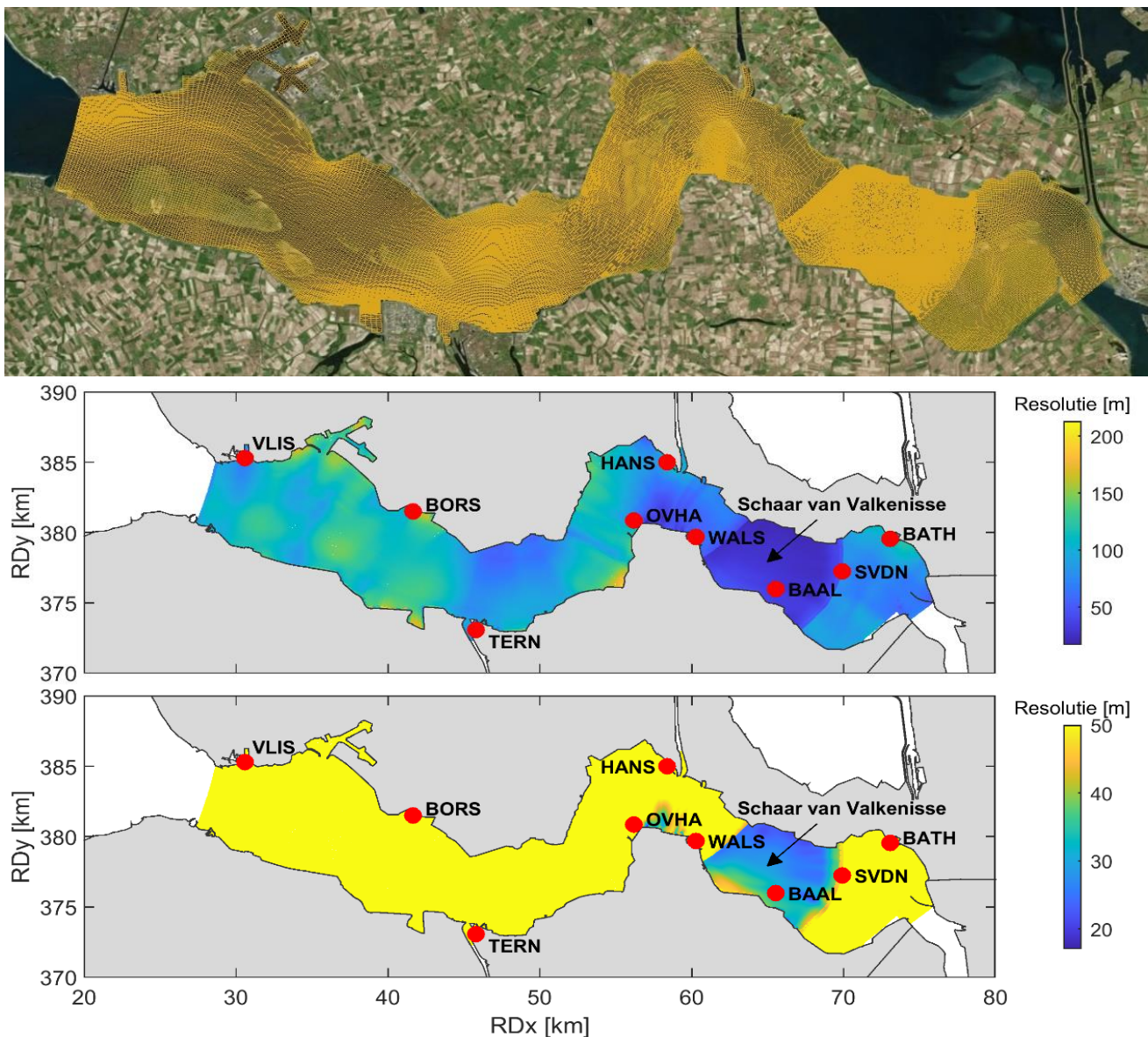


## Bijlage A

In Hoofdstuk 3 is met een dieptegemiddeld Delft3D-FM model de stroming berekend. In deze bijlage wordt de opzet en validatie van dit model beschreven.

### Modelopzet

Om het model toepasbaar te maken voor deze studie is een aantal aanpassingen doorgevoerd. Allereerst is het rekenrooster geoptimaliseerd. De hoge roosterresolutie in de projectgebieden Baalhoek en Knuitershoek is ongedaan gemaakt aangezien dit overbodig is voor deze studie. De resolutie in en rondom de Schaar van Valkenisse is verhoogd naar orde 30 m zodat ruimtelijke variaties in de morfologie en stroming goed door het model gevat kunnen worden. Het resulterende rooster bestaat uit 97.390 rekenpunten en is in Figuur A-1 weergegeven. Het model doet er vijf uur over om één maand door te rekenen.



Figuur A-1 Het in deze studie geoptimaliseerde rekenrooster is boven weergegeven. De roosterresolutie – de gemiddelde afstand van een rekenpunt tot de daaraan gelinkte rekenpunten – is in het midden weergegeven op de volledige kleurschaal en onder weergegeven op een kleurschaal gefocust op resoluties kleiner dan 50 m.

Met deze herziening van het rekenrooster zijn de bodemdata opnieuw geïnterpoleerd. Verder zijn de strekdammen bij Baalhoek en Waarde nu met behulp van zogenaamde “Fixed Weirs” (dammen met een opgegeven hoogte) aan het model opgelegd. Dit is noodzakelijk omdat de strekdammen door de lokaal lagere rekenresolutie niet door de bodemligging worden gevat. Afgezien van deze aanpassingen is het model verder onveranderd ten opzichte van De Vet & Van der Werf (2021).

## Validatie

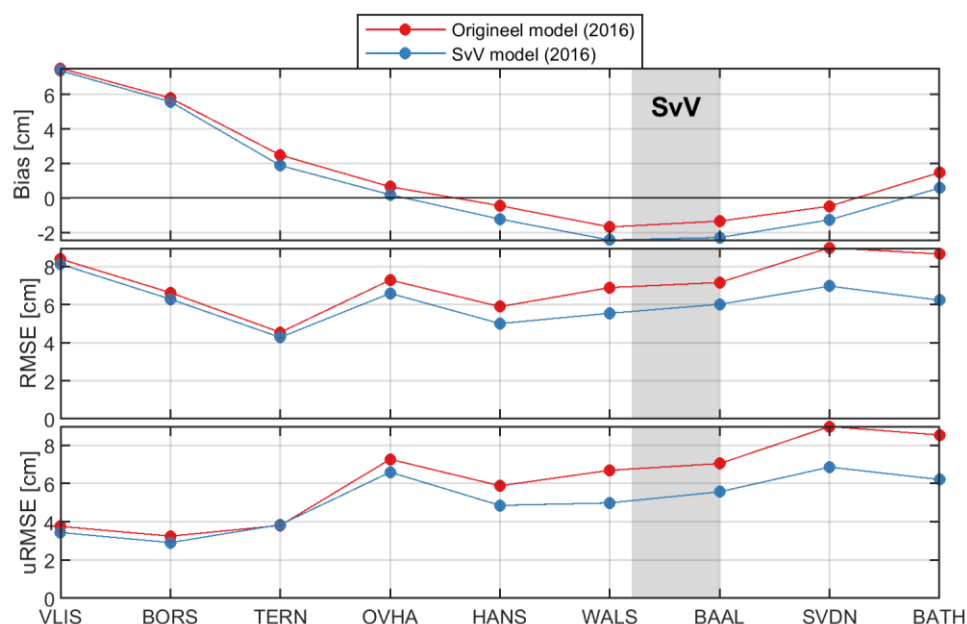
Het bleek niet nodig het model nader af te stellen. Het model is reeds gekalibreerd en gevalideerd (De Vet & Van der Werf, 2021). Wel is nagegaan of de modelaanpassingen voor deze studie de kwaliteit van het model negatief beïnvloeden. Verder zijn ADCP-metingen in de Schaar van Valkenisse (2012) gebruikt om de kwaliteit van het model specifiek in de schaar te evalueren. Tot slot zijn de gemodelleerde debieten met recente metingen vergeleken. De resultaten van deze aanvullende validatie staan in deze paragraaf. Alle simulaties zijn doorgerekend met de bodem van het betreffende jaar en de randvoorwaarden van 2016 (of van 2018 waar dit expliciet staat aangegeven).

De volgende toetsingsparameters zijn voor de validatie gebruikt:

1. Bias: het gemiddelde verschil tussen de modelresultaten en de metingen. Dit is een indicator voor de netto afwijking van het model (positief is een overschatting);
2. RMSE: *root-mean-squared error*, ofwel de wortel van het gemiddelde kwadratische verschil tussen modelresultaten en de metingen. Dit is een indicator voor de variantie van de afwijkingen (hoe kleiner hoe beter);
3. uRMSE: *unbiased root-mean-squared error*, de RMSE na aftrek van de bias van de modelresultaten. Dit is een indicator voor hoe goed het model de tijdsvariaties (met name door het getij) reproduceert (hoe kleiner hoe beter).

## Waterstanden

In Figuur A-2 is de kwaliteit van het aangepaste model wat betreft waterstanden vergeleken met die van het originele model (voor januari-april 2016). In het interessegebied is de onderschatting van de waterstanden met ~1 cm iets toegenomen naar ~3 cm. De variatie in de afwijking van de gemodelleerde waterstanden (RMSE/uRMSE) is daarentegen in het interessegebied met 1–2 cm afgenomen. De aanpassingen aan het model hebben de berekende waterstanden dus zeer beperkt beïnvloed.

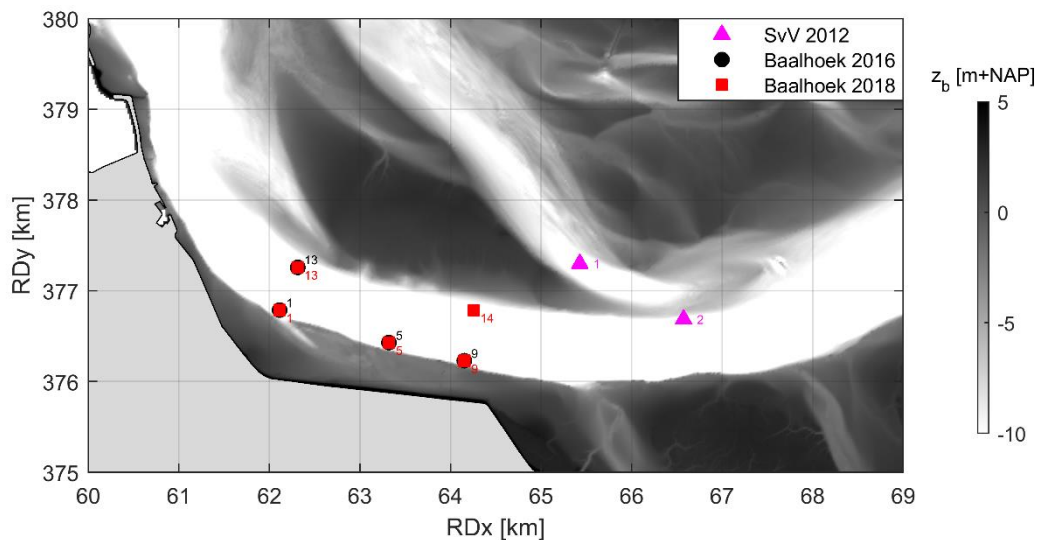


Figuur A-2 Validatie van de waterstanden (januari-april 2016) voor het originele model en voor het voor deze studie geoptimaliseerde model. Op de horizontale as zijn de meetstations gelabeld (zie Figuur 3-1). Zie de tekst voor een uitleg van de Bias, RMSE en de uRMSE. De ligging van de Schaar van Valkenisse (SvV) is met het grijze vlak aangegeven.

## Snelheden

In Figuur A-3 zijn de locaties van de ADCP metingen in de geul voor Baalhoek en de Schaar van Valkenisse weergegeven. De metingen bij Baalhoek zijn zowel in 2016 als in 2018 uitgevoerd (Meetpunt 14 van Baalhoek alleen in 2018). Omdat voor deze perioden ook randvoorwaarden voor het model beschikbaar zijn, is een één-op-één vergelijking tussen gemeten en gemodelleerde snelheden mogelijk. Voor de periode van de metingen in de schaar (2012) zijn geen randvoorwaarden beschikbaar. Het model is voor de metingen in de schaar daarom op de karakteristieken van de snelheden gevalideerd.

Tabel A-1 toont, voor zowel het originele model als voor het aangepaste model, de overeenkomst met de gemeten pieksnelheden in de geul voor Baalhoek. De uRMSE is voor beide modellen identiek voor nagenoeg alle meetstations (<1 cm/s verschil in pieksnelheid). Dit wil zeggen dat de variatie van de afwijking van de gemodelleerde snelheden (gecorrigeerd voor de gemiddelde afwijking) nagenoeg onveranderd is. De gemiddelde afwijking van de pieksnelheden (bias) vertoont grotere verschillen tussen beide modellen (tot 12 cm/s verschil in pieksnelheden). Echter, het verschilt per meetpunt of dat het originele model of het model met de aanpassingen een kleinere afwijking heeft in vergelijking met de metingen. De nauwkeurigheid van de berekende pieksnelheden is in de geul voor Baalhoek dus vergelijkbaar gebleven.



Figuur A-3 Overzicht van de beschikbare ADCP geulmetingen bij Baalhoek en de Schaar van Valkenisse (SvV). Op de achtergrond is de 2012 bodemligging weergegeven. De metingen bij de SvV zijn in 2012 uitgevoerd. De metingen bij Baalhoek zijn zowel in 2016 als in 2018 uitgevoerd (alleen meetpunt 14 ontbreekt in 2016).

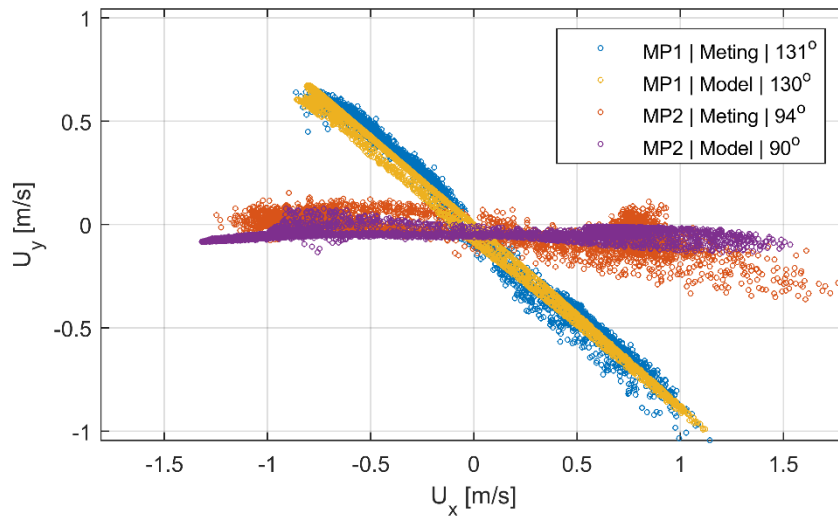
Tabel A-1 Overeenkomst in grootte tussen de gemeten en gemodelleerde piekstromsnelheden tijdens de meetperioden (januari/februari 2016 en mei/juni 2018) voor de meetlocaties bij Baalhoek. Zowel de resultaten van het originele Buitendijkse Maatregelen model (BM) als het model met de aanpassingen voor deze studie (SvV) zijn weergegeven. De toetsingsparameters Bias, RMSE en uRMSE zijn in de hoofdtekst toegelicht.

		2016						2018					
		Bias [cm/s]		RMSE [cm/s]		uRMSE [cm/s]		Bias [cm/s]		RMSE [cm/s]		uRMSE [cm/s]	
Model		BM	SvV	BM	SvV	BM	SvV	BM	SvV	BM	SvV	BM	SvV
Baalhoek locaties	MP1	-4	-6	9	10	8	8	1	5	5	7	5	5
	MP5	-11	-16	12	16	5	4	12	6	16	12	10	10
	MP9	-4	-10	12	15	11	11	-3	0	5	6	5	6
	MP13	-15	-21	21	26	15	15	3	-9	7	11	6	6
	MP14	-	-	-	-	-	-	4	-5	11	11	10	10

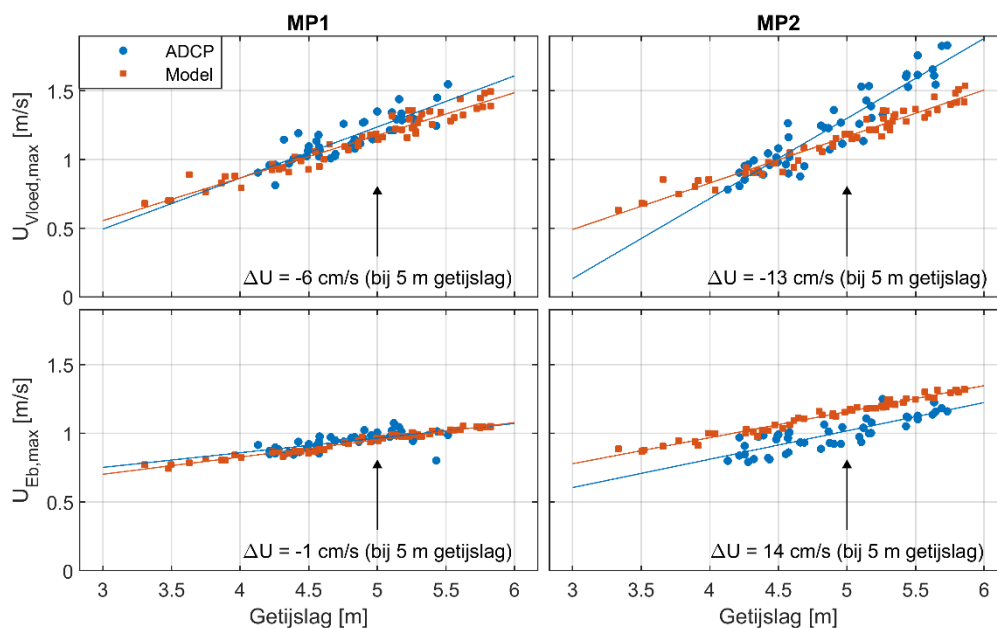
Vanwege het ontbreken van randvoorwaarden voor 2012 zijn in de schaar de karakteristieken van de gemeten stroming (mei/juni 2012) vergeleken met de karakteristieken van de gemodelleerde stroming (2012 bodemligging; 2016 randvoorwaarden). In Figuur A-4 zijn de snelheidscomponenten tegen elkaar uitgezet om te beoordelen of de stromingsrichting goed gemodelleerd wordt. Elke tien minuten zijn de snelheden in x- en y-richting (respectievelijk de oostelijke en noordelijke component) tegen elkaar uitgezet voor beide meetlocaties voor de metingen en het model. De dominante stroomrichting (lineaire fit door de data in Figuur A-4) wordt op beide locaties goed door het model gevat. Bij Meetpunt 1 is er gemiddeld één graad afwijking tussen het model en de metingen en bij Meetpunt 4 is dit vier graden. De spreiding in stromingsrichting lijkt in het model iets kleiner dan in de werkelijkheid.

Op meerdere locaties in de Westerschelde zijn sterke relaties gevonden tussen de pieksnelheden en het verticale getij (Bouma et al., 2005; de Vet et al., 2020). In Figuur A-5 zijn voor beide meetlocaties in de schaar de eb- en vloedpieksnelheden uitgezet tegen de getijslag. De pieksnelheden in de schaar correleren sterk met de getijslag (correlatiecoëfficiënt  $r$  van 0,63–0,94 voor de metingen). Vooral bij Meetpunt 1 is er een hele goede gelijkheid tussen de metingen en de modelresultaten. Bij een gemiddelde getijslag van 5 m is er een onderschatting van de vloedpieksnelheden van 6 cm/s en van de ebpieksnelheden van 1 cm/s. Bij Meetpunt 2 zijn de afwijkingen groter. Voor de grootste getijslagen is de onderschatting van de vloedpieksnelheden daar enkele tientallen centimeters per seconde, bij de gemiddelde getijslag is dit een onderschatting van 13 cm/s. De ebpieksnelheden worden hier met 14 cm/s overschat. Opgemerkt wordt dat bij een 100 m verschuiving van Meetpunt 2 naar het noorden de absolute afwijking in eb en vloedpieksnelheden afneemt tot 3 cm/s. Mogelijk komt de afwijking in snelheden bij Meetpunt 2 door een verschil tussen de bodemligging nabij het meetframe tijdens de metingen en de bodemligging in het model.





Figuur A-4 Snelheden in noordelijke richting ( $U_y$ ) uitgezet tegen de snelheden in oostelijke richting ( $U_x$ ) voor de modelresultaten en ADCP metingen bij Meetpunt 1 en Meetpunt 2 in de Schaar van Valkenisse (locaties weergegeven in Figuur A-3). De metingen zijn in mei/juni 2012 uitgevoerd. Het model is gedraaid met de beschikbare 2016 randvoorwaarden en met de bodemligging van 2012 voor de representatieve spring-doodtij cycli van 27 augustus tot 25 september 2016. In de legenda is voor elke reeks de dominante hoek in graden ten opzichte van het noorden weergegeven.

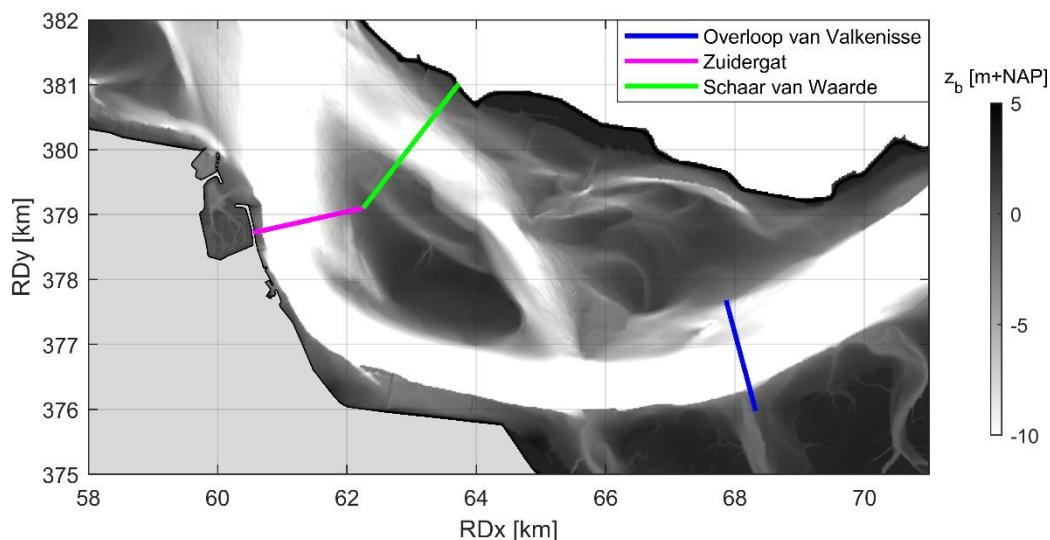


Figuur A-5 Pieksnelheden voor elk getij uitgezet tegen de getijslag van het getij voor de meetlocaties in de Schaar van Valkenisse (locaties weergegeven in Figuur A-3). De metingen zijn in mei/juni 2012 uitgevoerd. Het model is gedraaid met de beschikbare 2016 randvoorwaarden en met de bodemligging van 2012 voor de representatieve spring-doodtij cycli van 27 augustus tot 25 september 2016. De resultaten zijn opgesplitst voor vloed- (boven) en ebsnelheden (onder) net als voor Meetpunt 1 (links) en Meetpunt 2 (rechts). Een lineaire regressie is weergegeven voor zowel de metingen als het model. Het verschil in pieksnelheid tussen beide regressies bij een getijslag van 5 m (ongeveer de gemiddelde getijslag) is aangegeven.

## Debiten

Ook de gesimuleerde debieten zijn met metingen nabij de schaar vergeleken (gemeten in 2017 of 2019). De beschouwde debiettraaien zijn in Figuur A-6 weergegeven. Voor elke debietraai is gekeken welk getij van 2016 (waarvoor randvoorwaarden beschikbaar zijn) het beste overeen komt met het getij van de debietmeting. Dit is gedaan door voor elk gemeten getij het getij in 2016 te zoeken met de minimale RMSE in hoog- en laagwaterstanden (als een getij start bij laagwater zijn er twee laagwaters voor één getij, anders twee hoogwaters). Omdat de wind wordt

meegenomen in het model zijn perioden met windsnelheden boven windkracht 4 vóór de selectie uitgesloten. Tabel A-2 geeft de karakteristieken van de getijden waarin de debietmetingen zijn uitgevoerd en de doorgerkende representatieve getijden.



Figuur A-6 Overzicht van de beschouwde debietraaien. Op de achtergrond is de 2018 bodemligging weergegeven. De debietmetingen voor de raai Overloop van Valkenisse zijn in 2017 uitgevoerd, de debietmetingen over de andere twee raaien in 2019 (Tabel A-2).

Tabel A-2 Karakteristieken van de getijden tijdens de debietmetingen en de representatieve getijden. De hoog- en laagwaterstanden zijn weergegeven voor het dichtstbijzijnde waterstandstation. Bij een debietmeting die bij laagwater (LW) begon, zijn twee laagwaters gegeven (begin en eind). Om dezelfde reden zijn twee hoogwaters gegeven bij een debietmeting die bij hoogwater (HW) begon. Waterstanden zijn in m+NAP.

Debietraai	Debietmeting			Representatief getij (gemodelleerd)		
	Start getij	HW	LW	Start getij	HW	LW
<b>Overloop van Valkenisse</b>	22-06-2017 07:30	3,05	-2,49; -1,89	12-05-2016 01:20	3,02	-2,35; -1,95
<b>Zuidergat</b>	08-05-2019 05:10	2,73; 2,86	-2,39	12-04-2016 18:50	2,73; 2,80	-2,36
<b>Schaar van Waarde</b>	07-05-2019 04:20	2,80; 2,68	-2,41	14-11-2016 02:20	2,83; 2,60	-2,42

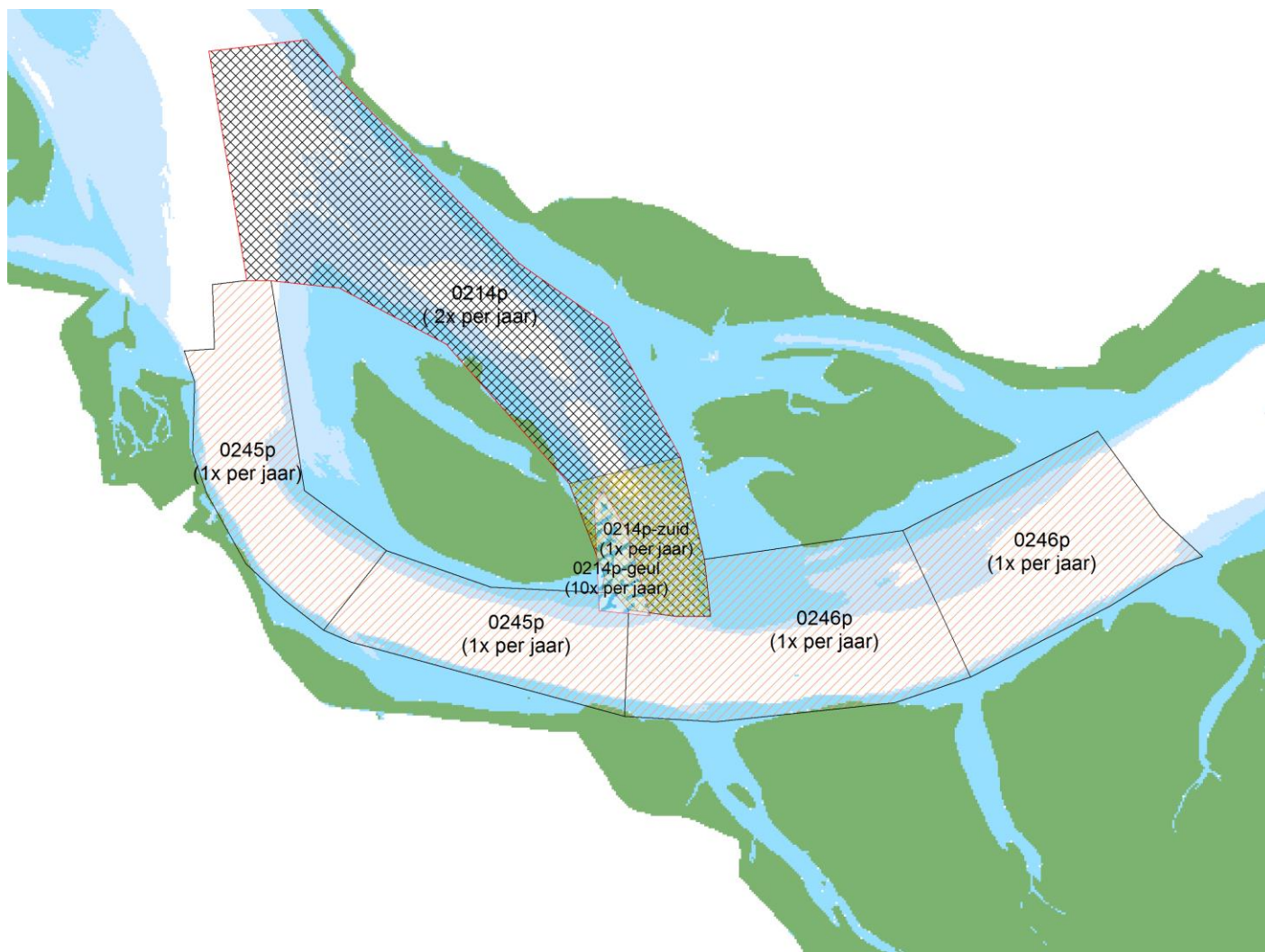
De berekende en gemeten vloed- en ebdebieten zijn in Tabel A-3 weergegeven. Omdat de karakteristieken van de gemeten en gemodelleerde getijden niet exact hetzelfde zijn, wordt gefocust op de verhouding tussen het vloed- en het ebdebiet. De gemodelleerde vloed-eb verhouding van het totaaldebiet door de Overloop van Valkenisse (1,07) komt goed overeen met de meting (1,12). In het Zuidergat is deze verhouding (0,89) wat lager dan gemeten (0,96) en in de Schaar van Waarde is deze in het model (1,15) juist wat hoger dan in de meting (1,04). In alle gevallen is de afwijking in deze verhouding kleiner dan 10%. Een precieze overeenkomst is niet mogelijk door onvermijdbare verschillen in karakteristieken tussen de gemeten en gemodelleerde getijden. Daarnaast brengen de metingen ook onnauwkeurigheden met zich mee. Bijvoorbeeld, de profielen zijn niet allemaal over de volledige lengte ingemeten. Daarnaast is er niet precies van hoogwater tot hoogwater (of van laagwater tot laagwater) gemeten en is er geïnterpoleerd om de totale debieten te berekenen. Dit betekent niet dat verschillen niet ook door onnauwkeurigheden in het model komen. Echter, omdat er in deze studie vooral relatief gekeken wordt tussen simulaties met bodems uit verschillende jaren en bovendien de piekstroming in de schaar goed door het model gevat wordt (MP1 in Figuur A-4 en Figuur A-5), wordt verondersteld dat een verdere kalibratie niet tot andere inzichten in deze studie zal leiden.

Tabel A-3 Overzicht van de gemeten en gemodelleerde vloed- en ebdebieten door de beschouwde debietraaien (Figuur A-6). De debieten zijn in miljoenen kuub water (Mm<sup>3</sup>) weergegeven en ook de vloed/eb verhouding van de debieten zijn gepresenteerd.

Debietraai	Vloeddebiet		Ebdebiet		Vloed/eb verhouding	
	Meting	Model	Meting	Model	Meting	Model
<b>Overloop van Valkenisse</b>	304 Mm <sup>3</sup>	328 Mm <sup>3</sup>	272 Mm <sup>3</sup>	305 Mm <sup>3</sup>	1,12	1,07
<b>Zuidergat</b>	265 Mm <sup>3</sup>	283 Mm <sup>3</sup>	274 Mm <sup>3</sup>	318 Mm <sup>3</sup>	0,96	0,89
<b>Schaar van Waarde</b>	131 Mm <sup>3</sup>	162 Mm <sup>3</sup>	126 Mm <sup>3</sup>	141 Mm <sup>3</sup>	1,04	1,15

Alles beschouwend, kan geconcludeerd worden dat – voor het doel van deze studie – de stroming in de Schaar van Valkenisse goed gevat wordt door het model.

## Bijlage B



Figuur B-1 Overzichtskaart van de opnamepolygonen rond de Schaar van Valkenisse (situatie jan 2022; bron Rijkswaterstaat).



## Colofon

MORFOLOGISCHE ONTWIKKELING SCHAAR VAN VALKENISSE

**KLANT**  
VNSC

**AUTEUR**  
Jelmer Cleveringa, Lodewijk de Vet (Deltares), Jebbe van der Werf (Deltares) & Wout van Dijk

**ONZE REFERENTIE**  
D10035973:78

**DATUM**  
18 februari 2022

**STATUS**  
Definitief

## Over Arcadis

Arcadis is een toonaangevend wereldwijd ontwerp- en consultancybureau voor de natuurlijke en gebouwde omgeving. Wij maken het verschil voor onze klanten en de maatschappij met doeltreffende, duurzame en digitale oplossingen. Met 27.000 mensen in meer dan 70 landen genereerden we in 2020 een omzet van €3,3 miljard. Wij ondersteunen UN-Habitat met kennis en expertise om leefomstandigheden te verbeteren in gebieden getroffen door de gevolgen van de klimaatverandering.

[www.arcadis.com](http://www.arcadis.com)

### **Arcadis Nederland B.V.**

Postbus 137  
8000 AC Zwolle  
Nederland

T +31 (0)88 4261 261