

Advies afgraven kwelder Holwerd t.b.v. verminderen baggerbezwaar



Advies afgraven kwelder Holwerd t.b.v. verminderen baggerbezwaar

Auteur(s)

Bob Smits

Carlijn Meijers

Advies afgraven kwelder Holwerd t.b.v. verminderen baggerbezwaar

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Martijn Klein Obbink, Jette Bijlholt (RWS – NN)
Referenties	WHV 07 BenO Waddenzee, SITO programmasubsidie IenW 2024
Trefwoorden	Kwelder, Waddenzee, Holwerd, kombergingsvolume, geul, baggeren

Documentgegevens

Versie	2.0
Datum	10 september 2024
Projectnummer	11210370-019
Document ID	11210370-019-ZKS-0001
Pagina's	35
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Bob Smits	
	Carlijn Meijers	

Samenvatting

Eén van de te onderzoeken *no-regret maatregelen* uit de Verkenning Bereikbaarheid Ameland 2030 om op korte termijn de baggervolumes voor de vaargeul Holwerd-Ameland te beperken is het aanpassen van het kwelderonderhoud. Het idee is dat het kombergingsvolume vergroot wordt door een gedeelte van de kwelder(s) bij Holwerd af te graven, waardoor het baggerbezwaar mogelijk kan worden gereduceerd. Het doel van dit rapport is om het te verwachten effect van deze kwelderafgraving op het baggervolume in de vaargeul Holwerd-Ameland te bepalen en advies te geven over de omvang van een mogelijke afgraving.

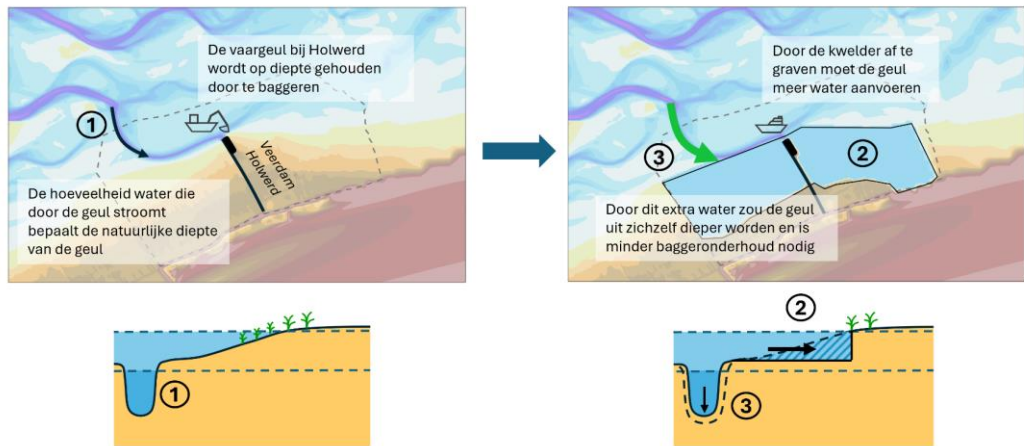
Aan de hand van hydrodynamische modelsimulaties met het D-HYDRO model van de Nederlandse Waddenzee (inclusief lokale verfijning van de vaargeul Holwerd-Ameland) wordt bekeken of de toename in het kombergingsvolume ten gevolge van een afgraving van de kwelders leidt tot een significante toename van het geuldebiet. Een dergelijke toename van geuldebiet moet leiden tot een afname van sedimentatie in de vaargeul en dus een afname van het baggerbezwaar (Figuur 1-1).

In dit rapport zijn twee afgraafscenario's beschreven. Een afgraving van de kwelders tot het niveau van 1960/1970, zowel ten westen als ten oosten van de veerdam bij Holwerd, leidt volgens onze modelresultaten tot een minimale toename (+3%) van het getijgemiddelde geuldebiet tijdens vloed aan de westzijde van de geulstaart (tot VA33) en zelfs een afname (-5%) van geuldebiet in het middelste en oostelijke gedeelte van de geul omdat het water nog voor de veerdam de geul verlaat en de afgegraven kwelder op stroomt. Wel neemt het geuldebiet tijdens eb substantieel toe (+11%). Een afgraving tot hetzelfde niveau van 1970, maar enkel ten oosten van de veerdam, veroorzaakt nauwelijks effect op het geuldebiet tijdens vloed en slechts 3% toename van het gemiddelde ebdebiet. Beide afgravingen leiden niet tot een sterke toename van stroming door de geul, maar vooral tot extra stroming over de platen.

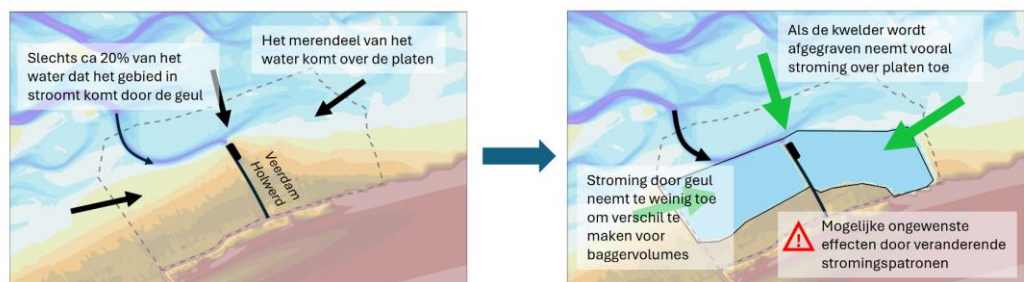
Verder blijkt uit de modelresultaten dat het kombergingsvolume en het geuldebiet niet volledig gekoppeld zijn. Vooral tijdens hoogwater vindt toe- en afstroming voor een belangrijk gedeelte plaats over de platen (Figuur 1-1). Slechts ca. 20% van de toestroom naar het lokale kombergingsgebied vindt plaats door de geul. Daarnaast komt bij de gemodelleerde afgraving de extra toestroom vooral over de platen, waardoor de relatieve bijdrage van de geul in het vullen van het gebied afneemt. Hierdoor is de maatregel veel minder effectief dan gedacht op basis van eerdere studies, die gebaseerd zijn op empirische relaties waarbij kombergingsvolume en geuldebiet direct gekoppeld zijn.

Alleen bij een kwelderafgraving aan beide zijden van de veerdam wordt een significant effect op de ebstroming geconstateerd. Dit zou potentieel het baggerbezwaar kunnen verkleinen doordat er grotere stroomsnelheden in de geul optreden. Echter neemt de vloedstroming in de geul voor de veerdam bij deze afgraving juist af, waardoor de sedimentatie lokaal kan toenemen. Bij de meer realistische afgraving (zowel op basis van de technische uitvoerbaarheid als de schaalgrootte), enkel ten oosten van de veerdam, is de toename in ebstroming veel kleiner. Het baggerbezwaar zal voor deze afgraving niet afnemen. De conclusie is dan ook dat onrealistisch grote afgravingen benodigd zullen zijn om een waarneembaar effect op het geuldebiet te hebben. Mogelijk leidt een dergelijke grootschalige afgraving daarmee tot een reductie van baggerbezwaar, maar door veranderde stromingspatronen kan het baggerbezwaar lokaal toenemen. Bovendien kunnen deze grootschalige afgravingen potentieel grote ongewenste effecten initiëren door de gewijzigde stromingspatronen, zoals geul- en plaatveranderingen en voldoen daarmee waarschijnlijk niet als een *no-regret* maatregel.

Mogelijke kwelderafgraving bij Holwerd: zo werkt het idee erachter



Waarom dit op deze locatie niet werkt



Figuur 1-1 Conceptuele weergave van het principe achter de kwelderafgraving (boven) en waarom dit op deze locatie niet werkt (onder)

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Aanleiding	7
1.2	Doelstelling	7
1.3	Aanpak	7
1.4	Leeswijzer	8
2	Methode	9
2.1	Bepaling locatie kwelderrand	9
2.2	Modelopzet	10
2.3	Modelscenario's	11
3	Modelresultaten	14
3.1	Invloed op stroomsnelheden	14
3.2	Invloed afgraving op getijprisma en pieksnelheden door de geul	16
3.2.1	Effect afgravingsscenario's op getijvolume	17
3.2.2	Effect afgravingsscenario's op stroomsnelheden	19
3.3	Relatieve bijdrage geulen en platen	20
4	Discussie, conclusies en aanbevelingen	23
4.1	Discussie	23
4.1.1	Inzichten uit hydrodynamische modelsimulaties	23
4.1.2	Invloed op sedimentatie vaargeul en baggerbezwaar	23
4.1.3	Vergelijkingen met eerdere studies	24
4.1.4	Suggesties voor toepassing maatregel	25
4.2	Conclusies	25
4.3	Aanbevelingen	26
	Referenties	27
A	Empirische relaties voor geuldimensies en baggervolumes	28
B	Verandering stroomsnelheid	30
C	Getijvolumes, debieten en snelheden	32

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het baggervolume voor onderhoud van de vaargeul Holwerd-Ameland is in de afgelopen decennia sterk toegenomen. In het 'Vervolgonderzoek Bereikbaarheid Ameland 2030' (VBA2030) is onderzocht welke maatregelen genomen kunnen worden voor een duurzame en betrouwbare vaarverbinding, die de bereikbaarheid op de lange termijn garandeert (Rijkswaterstaat & Witteveen+Bos, 2023). Om op korte termijn de baggervolumes voor de vaargeul Holwerd-Ameland te beperken is een aantal zogenaamde *no-regret maatregelen* voorgesteld. Deze maatregelen zijn niet afhankelijk van de keuze voor een alternatief en kunnen 'zonder spijt' worden uitgevoerd binnen de huidige concessie (voor 2030).

Een van de *no-regret maatregelen* is het aanpassen van het kwelderonderhoud. Het huidige beleid (opgenomen in het beheerplan Natura2000-Waddengebied) is om het totale areaal aan kwelders te handhaven en de kwaliteit te verbeteren. Het gevolg van het huidige beheer is dat de kwelders al decennia achtereen uitbouwen, waardoor het kombergingsvolume van de Waddenzee afneemt, er minder water door de vaargeul stroomt en de sedimentatie in de vaargeul toeneemt. Als gevolg van het huidige beleid neemt het toekomstig baggeronderhoud dus toe volgens het bestaande systeembegrip. Door het beheer zodanig aan te passen dat de kwelders rondom de vaargeul niet langer uitbouwen stopt naar verwachting het toenemen van het baggerbezwaar als gevolg van kwelderuitbouw. Door een gedeelte van de kwelder(s) bij Holwerd af te graven, zoals de voorgestelde maatregel, kan het baggerbezwaar mogelijk zelfs worden gereduceerd.

In dit rapport wordt gekeken naar het afgraven van een gedeelte van de kwelders nabij de veerdam van Holwerd. Met deze maatregel wordt een toename van het lokale kombergingsvolume beoogd, zodat meer stroming door de vaargeul plaatsvindt. Zodoende zou de sedimentatie van de geul afnemen, waardoor ook het baggervolume op het traject Holwerd-VA33 afneemt. In de ontwerpnota 'baggerbezwaar en mogelijke veerroutes' (Witteveen+Bos, 2022) is aan de hand van empirische relaties de verwachte invloed van een afgraving van de kwelders tot het niveau uit 1960 op de evenwichtsdoorsnede van de geul bepaald en een prognose gemaakt voor het baggervolume bij gelijkblijvende vaargeuldimensies, zie Bijlage A. Er wordt gesteld dat de afgraving van 2,3 miljoen m³ aan kwelder materiaal leidt tot een toename van het kombergingsvolume van ca. 20%. Vervolgens wordt geconcludeerd dat "het afgraven van de kwelders zorgt voor een reductie van het baggervolume tot $0,47 \pm 0,1$ Mm³/jaar in 2100 bij een constante ligging van het wantij".

Rijkswaterstaat wil weten of de voorgestelde maatregel, om de kwelder(s) bij Holwerd af te graven om het baggervolume in de vaargeul te doen afnemen, effectief is. Daarnaast wil Rijkswaterstaat advies over de omvang van de benodigde afgraving.

1.2 Doelstelling

Het doel van dit rapport is om het te verwachten effect van een afgraving van de kwelders bij Holwerd op de stroming en (kwalitatief) op het baggervolume in de vaargeul Holwerd-Ameland te bepalen en advies te geven over de omvang van een mogelijke afgraving.

1.3 Aanpak

Aan de hand van hydrodynamische modelsimulaties worden de uitkomsten uit de ontwerpnota (Witteveen+Bos, 2022) en de achterliggende aannames voor toepassing van de empirische

relaties gestaafd. We bekijken of de toename in het kombergingsvolume ten gevolge van de afgraving tot niveau 1960/1970 inderdaad leidt tot een significante toename van het geuldebiet. Vervolgens wordt een aanvullend hydrodynamisch modelscenario uitgevoerd om het effect van een kleinere, realistische kwelderafgraving in te schatten. Op basis van deze hydrodynamische modelsimulaties wordt een expertinschatting gemaakt van de te verwachten invloed op sedimentatie in de vaargeul en op het baggervolume.

1.4 Leeswijzer

De toegepaste methode wordt verder toegelicht in Hoofdstuk 2. De historische ligging van de kwelderrand, zoals verwerkt in het model, wordt toegelicht op basis van beschikbare gegevens. Verder worden de opzet van het hydrodynamische model beschreven en de modelscenario's uitgelegd. In Hoofdstuk 3 worden de resultaten van de modelscenario's besproken. Hierbij wordt gekeken naar de invloed van de afgravingen op de stroomsnelheden en stromingspatronen, naar de debieten door de geul op verschillende dwarsdoorsnedes en naar de uitwisseling van de deelgebieden met omringende geulen en platen. Tot slot bestaat Hoofdstuk 4 uit een discussie van de resultaten, conclusies met betrekking tot de effectiviteit van de maatregelen en aanbevelingen voor beheer.

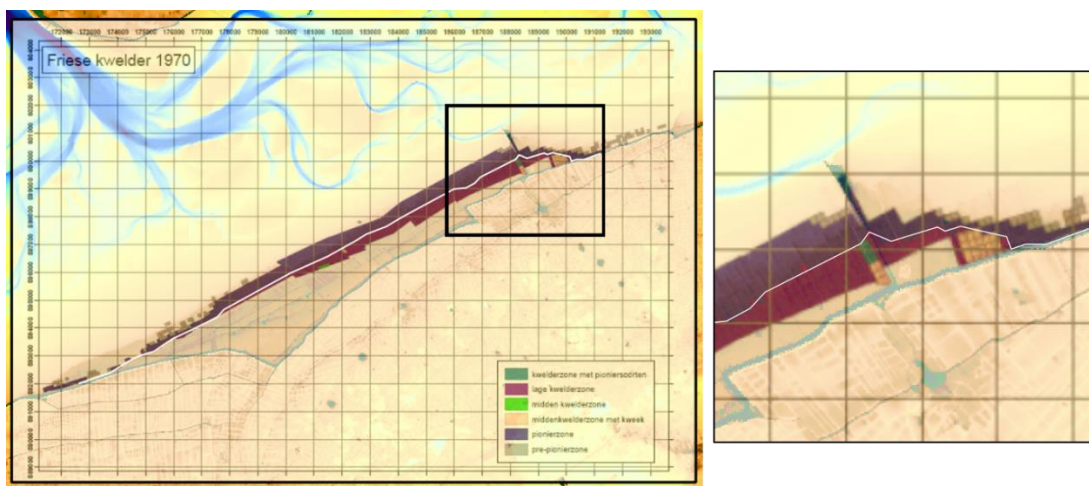
2 Methode

In dit hoofdstuk wordt de toegepaste methode verder toegelicht. De gebruikte gegevens om de historische ligging van de kwelderrand te bepalen worden toegelicht in Paragraaf 2.1. Paragraaf 2.2 beschrijft de opzet van het hydrodynamische model. Tot slot worden de modelscenario's uitgelegd in Paragraaf 2.3.

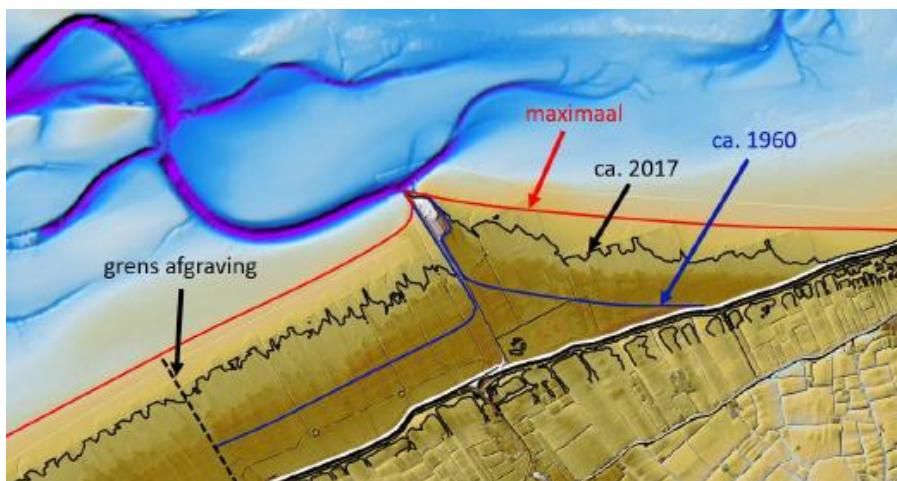
2.1 Bepaling locatie kwelderrand

Om de modelscenario's met afgravingen zo goed mogelijk te simuleren, is de historische ligging van de kwelderrand bepaald op basis van kaarten van de kwelderligging in 1960, 1970, 1987 en 2002 uit Van Duin et al. (2007). Middels georeferencing zijn deze kaarten op de huidige bodemligging geplaatst om de locatie van de kwelderrand te kunnen bepalen (Figuur 2-1). De kwelderrand is hierbij gedefinieerd als de grens van de 'lage kwelderzone'.

Om de afgraving die is gebruikt in Witteveen + Bos (2022) (zie Figuur 2-2) zo goed mogelijk te benaderen is gekozen de kwelderrand uit 1970 uit Van Duin et al. (2007) te gebruiken. Deze kwelderrand uit 1970 komt het beste overeen met de locatie die is aangehouden in Witteveen + Bos (2022) (en daar is beschreven als 'ca. 1960', zie Figuur 2-2) zodat het afgegraven volume vergelijkbaar is (Figuur 2-1).



Figuur 2-1 Vaststellen van de kwelderrand uit 1970 middels georeferencing. De witte lijn geeft de locatie van de kwelderrand die in de modelberekeningen is gebruikt.



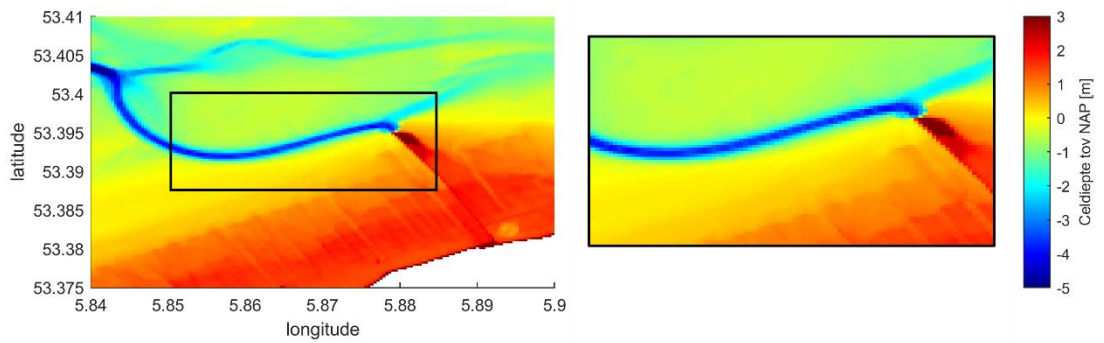
Figuur 2-2 Grens kwelderafgraving (paarse lijn) gebruikt in Witteveen + Bos (2022). Figuur overgenomen uit Witteveen + Bos (2022)

2.2 Modelopzet

In deze studie wordt gebruik gemaakt van het 3D Delft3D-FM Dutch Wadden Sea Model (DWSM-FM), een modelschematisatie van de gehele Nederlandse Waddenzee (Vroom et al., 2020) met tien verticale sigma-lagen. Hiervoor is bij eerdere studies een verfijning van de resolutie toegepast tot 25x25m ten zuiden van Ameland, dat is gebruikt in onder andere Grasmeyer & Van Weerdenburg (2020) en Van Weerdenburg et al. (2023). Ter vergelijking: de minimumbreedte van de geul is 50m (Cleveringa, 2024) en de gesimuleerde afgravingen die in de volgende paragraaf worden gepresenteerd hebben een lengte en breedte in de orde grootte van kilometers. Deze modelverfijning is gevalideerd in Grasmeyer & Van Weerdenburg (2020) op basis van metingen van waterstanden, debieten en stroomsnelheden die zijn uitgevoerd in 2019 door WaterProof bij de veerdam in Holwerd en op verschillende locaties in de geul. Uit deze validatie blijkt dat de debieten door de geul (zowel de fasering van de eb- en vloedstroming als de maximale debieten) door het model goed worden gereproduceerd. Wel worden de pieksnelheden tijdens ebstroom licht onderschat en tijdens vloedstroom licht overschat. De waterstanden bij laagwater worden door het model overschat met ca. 12 cm, met name bij de veerdam.

De modelbodem voor de referentie-situatie is identiek aan de modelbodem gebruikt in Van Weerdenburg et al. (2023). De basis voor deze bodem is de Vaklodingen data uit 2017 (20m resolutie), aangevuld met beheerlodingen uit 2022 en 2023 (1, 2, 5, en 10m resolutie) in de vaargeul een aanvullende metingen voor het gebied rondom de vaargeul (Figuur 2-3).

Als simulatieperiode wordt de periode van 15 juni tot 15 juli 2019 gebruikt. Dit is een periode met relatief kalm weer (Smits et al., 2022) en omvat twee springtij-doodtij cycli. Door de simulatieperiode en forcering voor alle scenario's identiek te houden en enkel de bodemligging te veranderen kan een goede vergelijking tussen de scenario's gemaakt worden.



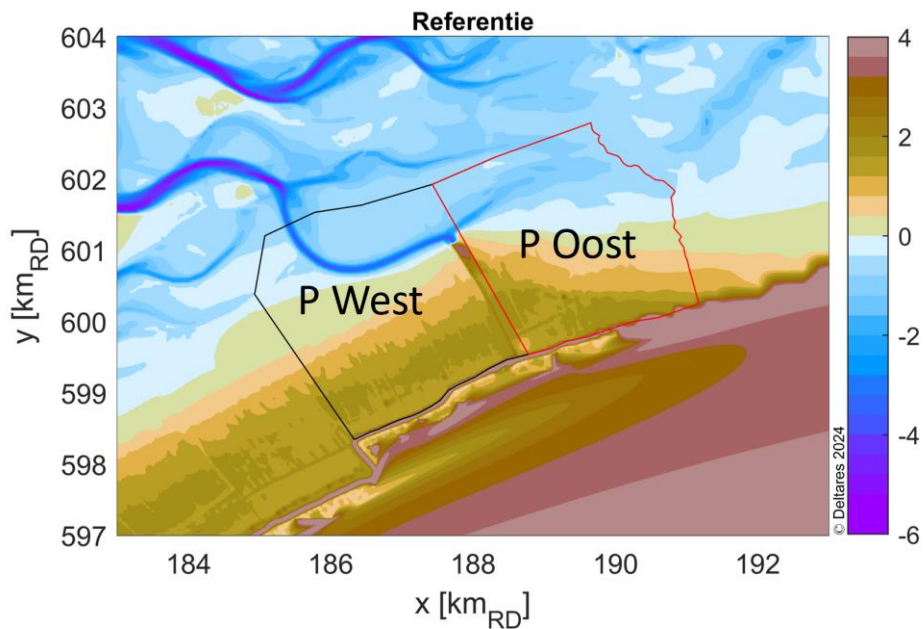
Figuur 2-3 Modelbodem met een resolutie van 25m

2.3 Modelscenario's

Een inschatting van het effect van een afgraving van de kwelder op het debiet door de geul is verkregen door doorrekening van drie scenario's.

Referentie:

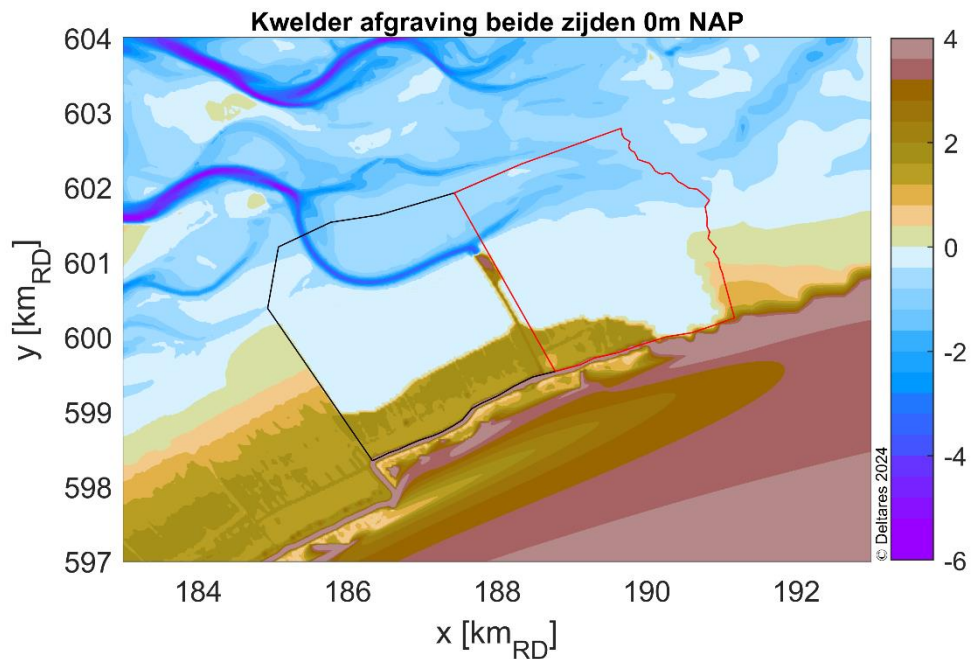
In het referentiescenario is de bodem gelijk aan de huidige situatie. Om een inschatting te krijgen van de vergroting van het kombergingsvolume bij een afgraving is een lokaal kombergingsgebied gedefinieerd, op basis van Witteveen + Bos (2022). Dit gebied bestaat uit de polygoenen P West (PW, welke de gebaggerde geulstaart bevat vanaf de bocht bij boei VA33 tot aan de veerdam; Figuur 2-4), en P Oost (PO, het gebied oostelijk van de veerdam, waar niet meer wordt gebaggerd). Polygoenen PW en PO geven samen een schatting van het lokale kombergingsgebied dat wordt gevoed door de vaargeul naar Holwerd. Het kombergingsvolume in dit gebied is ingeschat op basis van het watervolume binnen de polygoon tussen GHW (1m NAP; GHW bij Holwerd) en GLW (-1,3m NAP; Stolte et al., 2023) en bedraagt ongeveer 6,37 Mm³ in enkel PO en 12,3 Mm³ voor het gecombineerde gebied PO+PW (Tabel 2-1).



Figuur 2-4 Bodem gebruikt in het referentiescenario, met de polygoenen P West (PW) en P Oost (PO). PW en PO geven samen het lokale kombergingsgebied dat wordt gevoed door de vaargeul naar Holwerd. De kleurenschaal geeft de bodemhoogte in meters t.o.v. NAP.

Afgraving beide zijden:

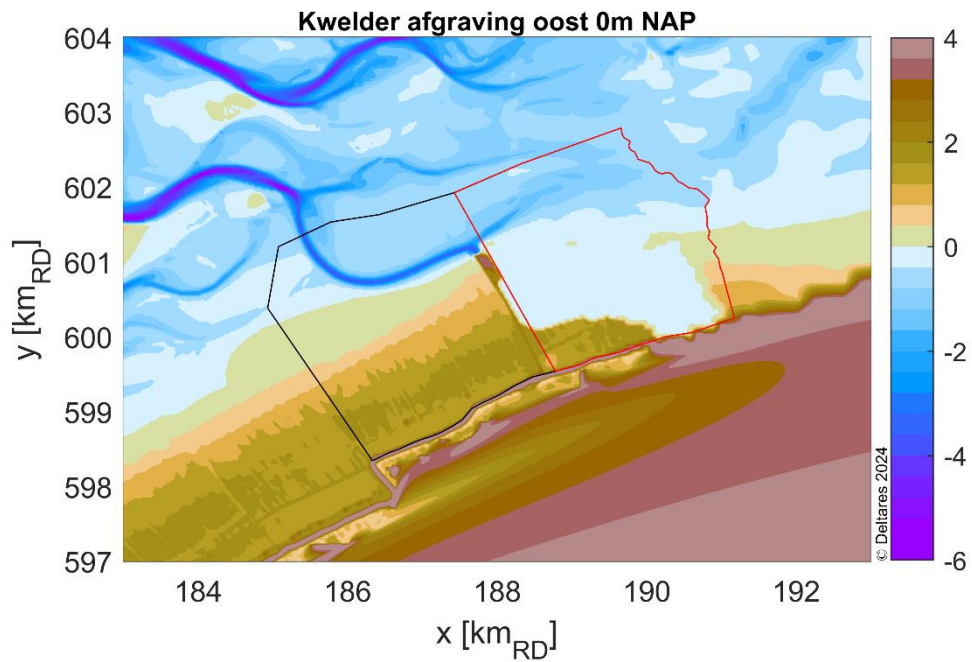
Het tweede scenario geeft een afgraving van de kwelder tot de gereconstrueerde kwelderrand uit 1970 tot 0m NAP. Om een verdieping ten opzichte van de voorliggende plaat te voorkomen, is hierbij ook de voorliggende plaat tot 0 m NAP afgegraven (Figuur 2-5). De afgraving oostelijk van de veerdam beslaat een gebied van 3,6 km², en westelijk van de veerdam 3,85 km². Door deze afgraving neemt het lokale kombergingsvolume met ruim een derde toe in beide polygonen (Tabel 2-1).



Figuur 2-5 Afgraving van de kwelder aan beide zijden van de veerdam tot 0m NAP: hiermee heeft de afgegraven kwelder dezelfde hoogte als de voorliggende wadplaat tot aan de geul. De kleurenschaal geeft de bodemhoogte in meters t.o.v. NAP.

Realistische afgraving oostelijke kwelder

De grootschalige afgraving aan beide zijden beschreven in de vorige paragraaf (Figuur 2-5) kan potentieel grote ongewenste effecten initiëren door geul- en plaatveranderingen. Deze zal in werkelijkheid niet snel uitgevoerd worden. Daarom wordt ook een meer realistische afgraving van de kwelder beschouwd tot een diepte van 0m NAP. Op basis van de eerste resultaten wordt hier alleen de kwelder oostelijk van de veerdam afgegraven (Figuur 2-6) om negatieve stromingseffecten te verminderen (zie toelichting verderop in sectie 3.1). Het lokale kombergingsvolume in PO neemt hierdoor met ruim een derde toe, wanneer polygoon PO+PW wordt bekeken is de toename 19% (Tabel 2-1).



Figuur 2-6 Afgraving van de kwelder oostelijk van de veerdam tot 0m NAP. De kleurenschaal geeft de bodemhoogte in meters t.o.v. NAP.

Tabel 2-1 Overzicht van het kombergingsvolume (tussen GHW en GLW) voor de verschillende scenario's

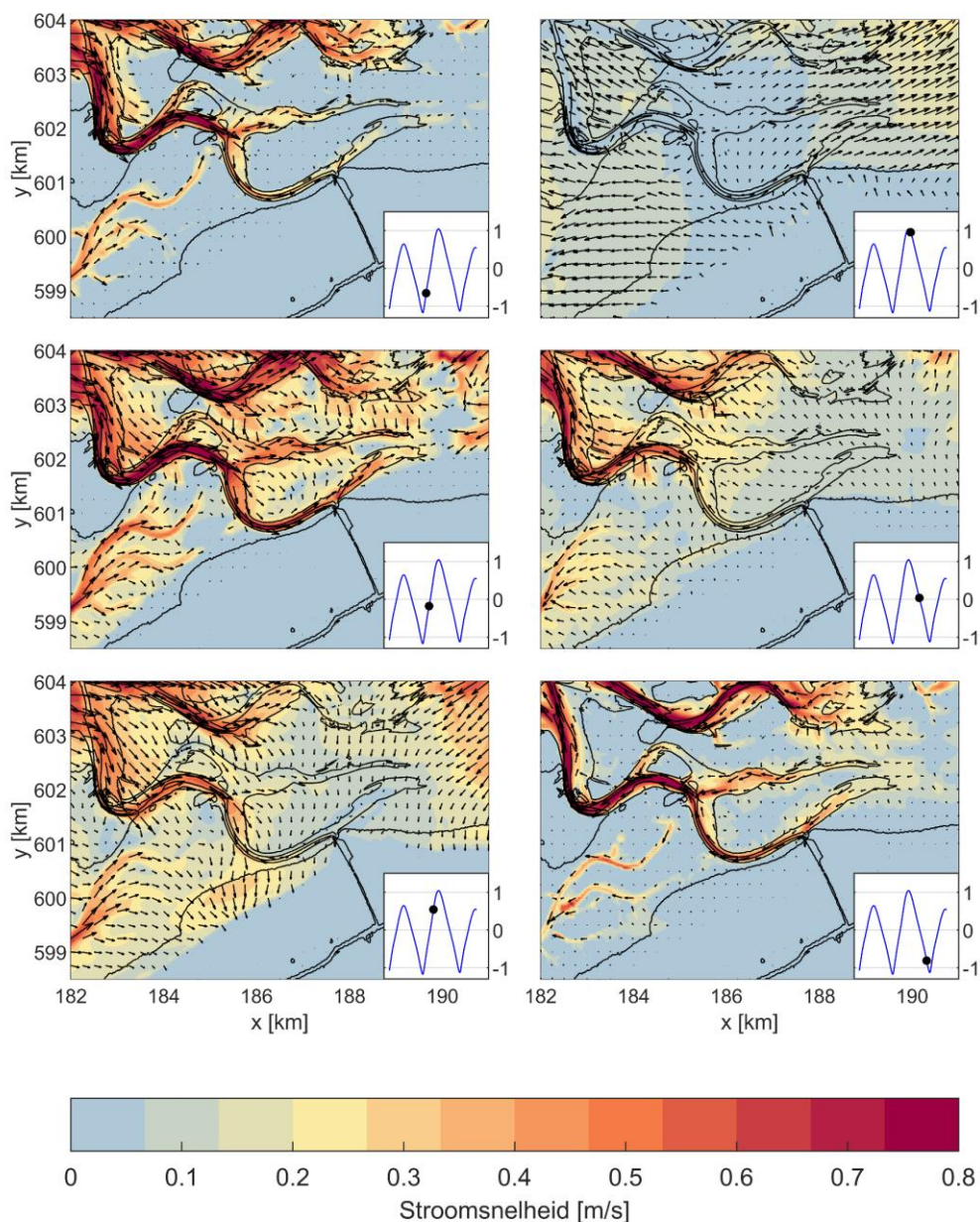
Scenario	Volume GHW – GLW	Toename volume	Procentuele toename
Gebied PO			
Referentie	6,37 Mm ³	-	-
Afgraving beide zijden	8,66 Mm ³	2,29 Mm ³	36%
Afgraving oost	8,63 Mm ³	2,29 Mm ³	36%
Gebied PO + PW			
Referentie	12,3 Mm ³	-	-
Afgraving beide zijden	16,76 Mm ³	4,46 Mm ³	36%
Afgraving oost	14,63 Mm ³	2,29 Mm ³	19%

3 Modelresultaten

In dit hoofdstuk worden de modelresultaten toegelicht. Eerst worden in Paragraaf 3.1 de veranderingen in stroomsnelheden en stromingspatronen besproken. Vervolgens worden de geuldebieten en stroomsnelheden over het verloop van de geul (op verschillende dwarsdoorsnedes) geanalyseerd in Paragraaf 3.2. Tot slot wordt in Paragraaf 3.3 de uitwisseling met omliggende gebieden in meer detail bekeken en de relatieve bijdrage van geulen en platen gekwantificeerd.

3.1 Invloed op stroomsnelheden

Het effect van de afgravingen op de stromingspatronen wordt in deze paragraaf besproken. Figuur 3-1 toont de stromingspatronen in het aandachtsgebied voor de referentiesimulatie (links tijdens de vloed, rechts tijdens eb). Hieruit blijkt dat bij hoogwater aanzienlijke toestroming buiten de hoofdgeul plaatsvindt; bij maximale vloedstroming vooral vanaf de kleine geultjes aan de westrand van deelgebied PW, rond hoogwater vooral vanaf de platen aan noord- en oostzijde van deelgebied PO (het wantij). In Paragraaf 3.3 wordt de uitwisseling met deze omliggende gebieden nader bestudeerd. Daarnaast is zichtbaar dat de maximale vloedstroming in de geul plaatsvindt bij een waterstand van ca. 0m NAP (afhankelijk van meteorologische condities en de fase in de springtij-doodtij cyclus), terwijl de maximale ebstroming in de geul vlak voor laag water optreedt.

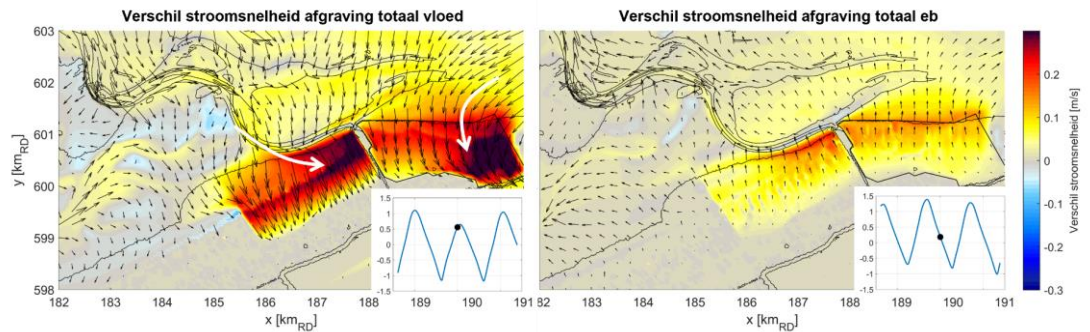


Figuur 3-1 Stroomsnelheden op drie momenten tijdens vloed (links) en tijdens eb (rechts) voor de referentie (huidige situatie). De kleine figuren rechtsonder in de panelen tonen het moment in het getij bij de veerdam.

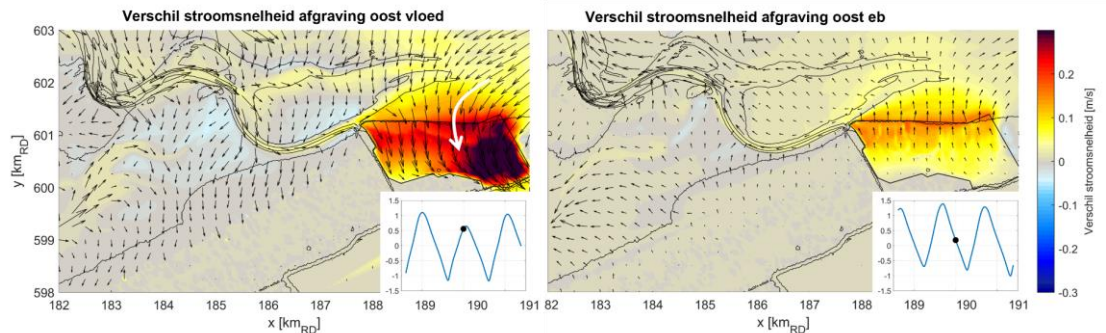
Voor de afgravingen zijn de veranderingen in stroming weergegeven in Figuur 3-2 (beide zijden) en Figuur 3-3 (ten oosten van de veerdam), waarbij met de witte pijlen de belangrijkste verschillen zijn aangegeven:

- Voor de afgraving aan beide zijden is te zien dat op de locatie waar de geul het afgegraven kweldergebied raakt, het water direct het afgegraven gebied op stroomt, waardoor de stroming in de geul afneemt. Daarnaast is rond hoogwater de aanvoer vanaf de platen aan de oostzijde van deelgebied PO toegenomen.
- Voor de afgraving aan de oostzijde van de veerdam volgt de vloedstroming de geul tot aan de veerdam, waarna het water het afgegraven kweldergebied op stroomt. Het getijprisma neemt hierdoor toe over de gehele lengte van de geul tot aan de veerdam. De aanvoer vanaf de platen aan de oostzijde van deelgebied PO is ook voor dit scenario toegenomen.

Absolute waarden van de stroomsnelheden voor de beide afgravingen voor verschillende fases in het getij staan in Bijlage B. Morfologische veranderingen zijn niet gesimuleerd, maar de toename van stroming over de platen kan wel gevolgen hebben voor de plaatgebieden (zoals lokale erosie of een verplaatsing van het wantij).



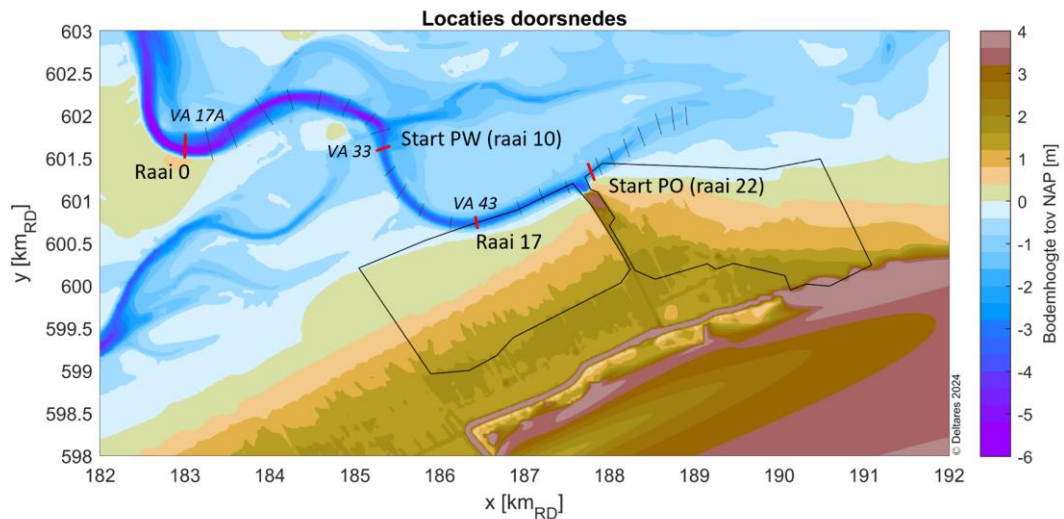
Figuur 3-2 Verandering van stroomsnelheden voor de afgraving aan beide zijden van de veerdam tijdens vloed (links) en tijdens eb (rechts). Rode kleuren geven een toename van stroomsnelheden, blauwe kleuren een afname. De kleine figuren rechtsonder in de panelen toont het moment in het getij.



Figuur 3-3 Stroombeelden van de afgraving aan de oostzijde van de veerdam op drie momenten tijdens vloed (links) en tijdens eb (rechts). Rode kleuren geven een toename van stroomsnelheden, blauwe kleuren een afname. De kleine figuren rechtsonder in de panelen toont het moment in het getij.

3.2 Invloed afgraving op getijprisma en pieksnelheden door de geul

Om de invloed van de afgraving op het getijvolume en de pieksnelheden door de geul te analyseren worden de resultaten bekeken aan de hand van meerdere dwarsdoorsnedes in de geul. De belangrijkste dwarsdoorsnedes zijn ter referentie aangegeven in Figuur 3-4. Hiermee kan de geul worden verdeeld in drie delen: een westelijk deel tussen de start van het lokale kombergingsgebied PW en dwarsdoorsnede 17 (waar de geul het afgegraven kweldergebied westelijk van de veerdam raakt), een middendeel tussen dwarsdoorsnede 17 en de veerdam (start PO) en een deel oostelijk van de veerdam.



Figuur 3-4 Locaties van de dwarsdoorsnedes in het model. De belangrijkste dwarsdoorsnedes die worden besproken zijn met een rode lijn aangegeven. De contouren van de kwelderafgraving zijn met een zwarte lijn aangegeven ter referentie.

3.2.1 Effect afgravingsscenario's op getijvolume

Het gemiddelde getijvolume is gedefinieerd als het volume dat tijdens een getijperiode (vloed-c.q. ebperiode) door de geul stroomt, gemiddeld over twee springtij-doodtijcycli. Figuur 3-5 toont het verloop van het gemiddelde getijvolume over de geul op de verschillende dwarsdoorsnedes tijdens vloed (bovenste paneel) en eb (onderste paneel). De verandering in getijvolumes voor de dwarsdoorsnedes stroomopwaarts van Start PW staan in Bijlage B. De resultaten staan voor het overzicht ook samengevat in Tabel 3-1. Voor de referentiesom neemt het getijvolume tijdens vloed (eb) af van ongeveer 2,4 miljoen m³ (2,9 miljoen m³) bij de start van deelgebied PW naar ongeveer 1,3 miljoen m³ (1,1 miljoen m³) bij de overgang naar deelgebied PO.

Tabel 3-1 Getijvolumes tijdens vloed en eb ter plaatse van start deelgebied PW (dwarsdoorsnede 10) en start deelgebied PO (dwarsdoorsnede 22) voor de verschillende modelscenario's. Tussen haakjes de procentuele verandering t.o.v. het referentiescenario.

Scenario	Getijvolume vloed (miljoen m ³)		Getijvolume eb (miljoen m ³)	
	Start PW	Start PO	Start PW	Start PO
Referentie	2,42	1,32	2,90	1,10
Afgraving totaal	2,48 (+2%)	1,24 (-6%)	3,22 (+11%)	1,16 (+5%)
Afgraving oost	2,39 (-1%)	1,44 (+9%)	2,98 (+3%)	1,20 (+9%)

Effect afgraving beide zijden

De modelscenario's met afgravingen laten kleine verschillen zien in deze getijvolumes. Bij de afgraving aan beide zijden van de veerdam ('afgraving totaal') neemt het getijvolume tijdens vloed toe voor het westelijke deel van de geul (tussen start PW en dwarsdoorsnede 17), maar het getijvolume in het middelste en oostelijke deel neemt af. Deze afname van getijvolumes vanaf dwarsdoorsnede 17 kan worden verklaard doordat de vloedstroming hier deels de geul verlaat en de afgegraven kwelder op stroomt (zoals beschreven in Paragraaf 3.1). Bij ebstroming neemt het getijvolume wel over de gehele geul toe.

Ter plaatse van dwarsdoorsnede 10 (start PW) is het getijvolume tijdens vloed toegenomen naar 2,48 miljoen m³ (+3%) en tijdens eb naar 3,2 miljoen m³ (+11%). Echter, ter plaatse van dwarsdoorsnede 22 (start PO) is het getijvolume tijdens vloed afgenomen tot 1,2 miljoen m³ (-6%) en tijdens eb toegenomen tot 1,2 miljoen m³ (+5%).

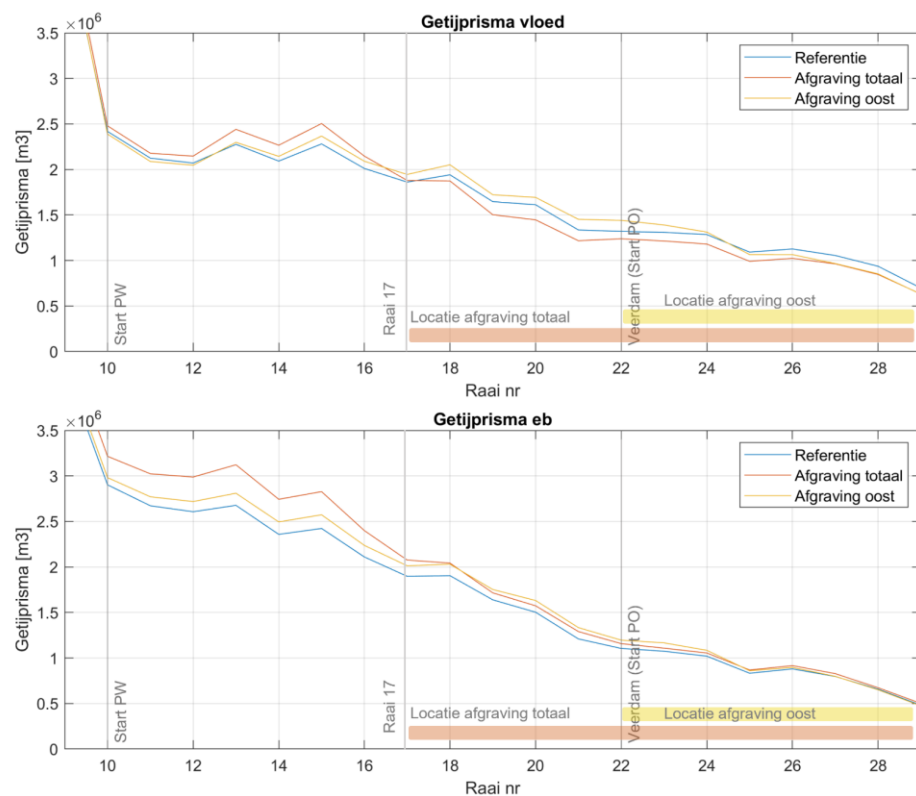
Effect afgraving oostelijk van de veerdam

Bij de afgraving alleen ten oosten van de veerdam neemt het getijvolume tijdens vloed licht toe over het grootste gedeelte van de geul tot aan de veerdam. Enkel rondom start PW (raainummers 10-12) en ten oosten van de veerdam (raainummers 24-29) neemt het getijvolume bij vloed niet toe (of zelfs licht af) door herverdeling van de vloedstroming tussen geul en plaat, zie paragraaf 3.3 voor verdere uitleg. Bij ebstroming neemt het getijvolume wel over de gehele geul toe.

Ter plaatse van dwarsdoorsnede 10 (start PW) is het getijvolume tijdens vloed ongeveer gelijk gebleven op 2,4 miljoen m³ (-1%) en tijdens eb toegenomen naar 3,0 miljoen m³ (+3%). Bij dwarsdoorsnede 22 (start PO) is het getijvolume tijdens vloed echter wel toegenomen naar 1,4 miljoen m³ (+9%) en tijdens eb naar 1,9 miljoen m³ (+8%).

Conclusie

Al met al zijn de verschillen in getijvolume tijdens vloed dus erg klein. De ebstroming in het deel van de geul waar baggerwerkzaamheden plaatsvinden neemt wel substantieel toe voor het scenario met afgraving aan beide zijden van de veerdam, maar niet voor het scenario met afgraving alleen aan de oostzijde.



Figuur 3-5 Ontwikkeling van het getijprisma tijdens vloed (boven) en eb (onder) voor de referentie en de twee afgravingsscenario's over de lengte van de geul. Voor scenario 'afgraving totaal' heeft de afgraving plaatsgevonden tussen raainummers 17 en 29. Voor scenario 'afgraving oost' heeft de afgraving plaatsgevonden tussen raainummers 22 en 29.

3.2.2 Effect afgravingsscenario's op stroomsnelheden

Naast de gemiddelde getijvolumes is ook gekeken naar pieksnelheden. De pieksnelheid is hier gedefinieerd als de maximale stroomsnelheid een eb- of vloedperiodet, waarbij de gemiddelde waarde van alle pieksnelheden over twee springtij-doodtijcycli is genomen. Hoewel het totale getijvolume in de geul tijdens eb groter is dan tijdens vloed, is in het interessegebied de pieksnelheid juist hoger tijdens vloed (Figuur 3-7). Dit wijst op een vloeddominantie van de stroming dichtbij de veerdam, wat leidt tot sedimentatie in de geulstaart (door import van fijn sediment). Deze vloeddominantie neemt toe richting het oosten. Westelijk van het interessegebied is de stroming echter juist ebdominant (ter hoogte van raai 0, zie Bijlage C voor een overzicht van alle raaien). Hierbij moet de kanttekening worden geplaatst dat de stroomsnelheden in de geul door het model worden onderschat tijdens eb en worden overschat tijdens vloed (Grasmeijer & van Weerdenburg, 2020); de werkelijke vloeddominantie is dus waarschijnlijk wat minder sterk dan hier gepresenteerd. De ruimtelijke trends in vloed- en ebdominantie die volgen uit het model komen echter in grote lijnen wel overeen met de pieksnelheden die volgden uit de MUSA meetcampagne in dit deel van de geul in het voorjaar van 2022 (Boechat Albernaz et al., 2023).

Effect afgraving beide zijden

Uit Figuur 3-6 blijkt dat de pieksnelheid tijdens vloed afneemt over de gehele geul voor de afgraving aan beide zijden van de veerdam. Bij ebstroming neemt de pieksnelheid juist toe voor deze afgraving. Het lijkt er dus op dat met de gemodelleerde afgraving op het moment van maximale toestroming bij vloed meer stroming over de plaat en het wantij plaatsvindt in plaats van door de geul, terwijl de maximale afstroming tijdens eb in de geul wel toeneemt. Dat kan worden verklaard doordat de waterstand tijdens de maximale ebstroming lager is. Er is dan dus minder afstroom via de platen mogelijk en het toegestroomde water in het afgegraven gebied wordt afgevoerd via de geul. Door de afgraving neemt de vloeddominantie dus af over de gehele lengte van de geul, zoals ook te zien in Figuur 3-7.

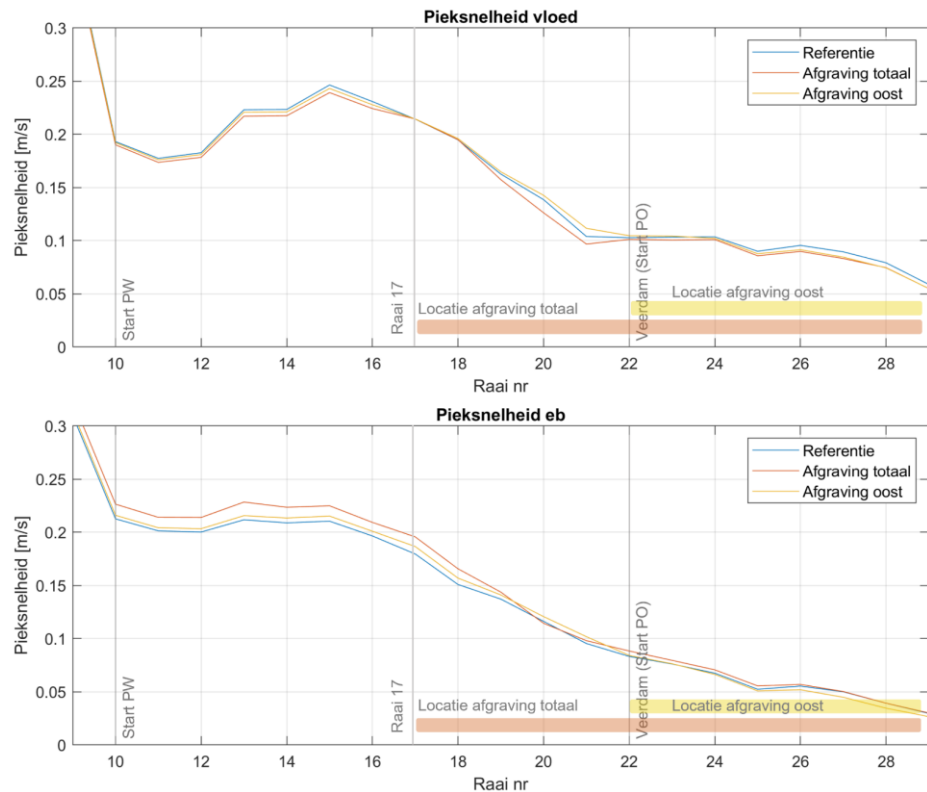
Effect afgraving oostelijk van de veerdam

Het beeld voor de afgraving ten oosten van de veerdam is minder eenduidig: aan de westzijde (tot dwarsdoorsnede 17) neemt de pieksnelheid bij vloed af. Tussen doorsnede 17 en de veerdam neemt de pieksnelheid licht toe en oostelijk van de veerdam neemt de pieksnelheid weer licht af. Bij ebstroming is het effect anders: aan de westzijde (van start deelgebied PW tot doorsnede 20) neemt de pieksnelheid licht toe en vanaf de veerdam oostwaarts neemt de pieksnelheid licht af. Door deze veranderingen neemt de vloeddominantie licht af in het westelijke deel van de geul en blijft gelijk rondom de veerdam (Figuur 3-7). Oostelijk van de veerdam neemt de vloeddominantie toe; dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een tegenomen vloedstroming vanuit het Pinkegat.

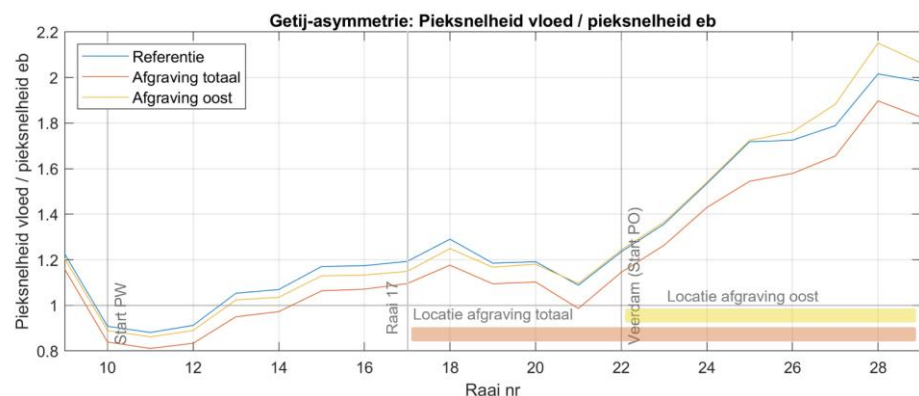
De veranderingen in ebstroming kunnen worden verklaard doordat de afstroming ten oosten van de veerdam niet enkel door de geul plaatsvindt, maar ook door laterale stroming vanaf de afgegraven kwelder, terwijl de afstroming ten westen van de veerdam wel door de geul wordt afgevoerd. De veranderingen van de pieksnelheid bij vloed zijn lastiger te duiden.

Conclusie

Samenvattend veranderen door het afgraven van de kwelder ook de pieksnelheden, maar de veranderingen zijn zeer klein. Dit zal naar verwachting weinig tot geen reducerend effect hebben op de sedimentatie in de vaargeul.



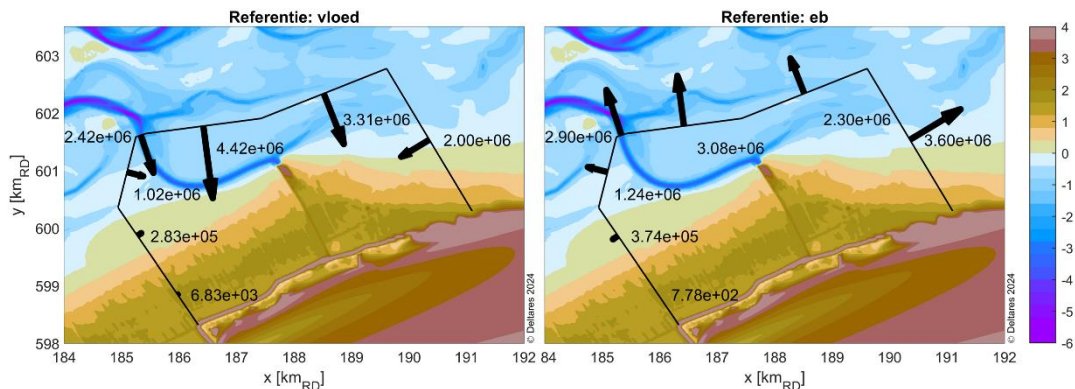
Figuur 3-6 Ontwikkeling van de maximale snelheid tijdens vloed (boven) en eb (onder) voor de referentie en de twee afgravingsscenario's twee scenario's over de lengte van de geul.



Figuur 3-7 Ontwikkeling van de getij-asymmetrie voor de referentie en de twee afgravingsscenario's over de lengte van de geul. Een waarde hoger dan 1 betekent dat de pieksnelheid tijdens vloed hoger is dan de pieksnelheid tijdens eb

3.3 Relatieve bijdrage geulen en platen

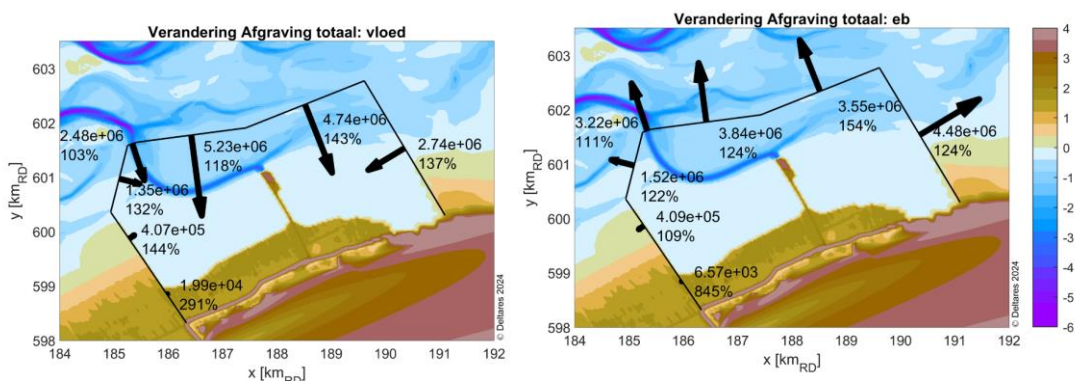
Om de relatieve bijdrage van de geul voor het vullen van het lokale kombergingsgebied PO+PW te kunnen kwantificeren zijn in het model debietraaien geplaatst langs de randen van gebied PO+PW. Figuur 3-8 laat zien hoe groot het gemiddelde getijvolume is tijdens vloed (links) en eb (rechts) dat via de verschillende doorsnedes het kombergingsgebied in stroomt. Hieruit blijkt dat slechts 18 tot 21,5% (tijdens respectievelijk vloed en eb) van het totale getijvolume via de geul dit gebied instroomt.



Figuur 3-8 Toestroom van water van en naar de lokale komberging van de geulstaart voor de referentie (huidige situatie) tijdens vloed (links) en eb (rechts). De cijfers geven de totale watervolume tijdens één vloed- of ebperiode in m³. De grootte van de pijlen geeft de relatieve grootte van het getijprisma.

Effect afgraving beide zijden

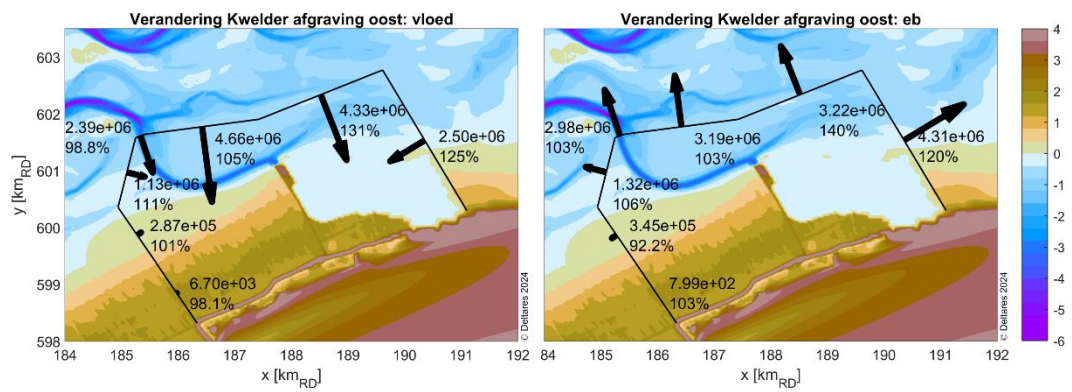
Wanneer het de kwelder aan beide zijden van de veerdam wordt afgegraven neemt het totale kombergingsvolume van gebied PO+PW toe met ca. 36% (zie Tabel 2-1). Het geuldebiet neemt echter niet evenredig toe met het kombergingsvolume, omdat ook de verdeling van de watertoevoer naar het gebied verandert. Figuur 3-8 laat zien dat bij deze afgraving de toevoer over de platen van alle zijden sterk toeneemt, tot wel 50%. De toe- en afstroom via de geul neemt toe met 3% tijdens vloed en 11% tijdens eb, een veel minder sterkte toename dan over de platen. Hierdoor neemt de relatieve bijdrage van de geul in het vullen van het deelgebied af van 18 tot 15% tijdens vloed en van 22 tot 19% tijdens eb.



Figuur 3-9 Toestroom van water van en naar de lokale komberging van de geulstaart voor het scenario waarbij de kwelder aan beide zijden van de veerdam is afgegraven tijdens vloed (links) en eb (rechts). De cijfers geven de totale watervolume tijdens één vloed- of ebperiode in m³ met daaronder de verandering ten opzichte van de referentie (waarbij de referentie is gedefinieerd als 100%). De grootte van de pijlen geeft de relatieve grootte van het getijprisma.

Effect afgraving oostelijk van de veerdam

Bij de afgraving van het oostelijke deel van de kwelder neemt het totale kombergingsvolume van gebied PO+PW toe met ca. 19% (zie Tabel 2-1). Ook hier neemt de toestroom over de platen sterker toe dan het getijvolume door de geul. Figuur 3-10 laat zien dat bij afgraving van de kwelder oostelijk van de veerdam met name de toevoer van water over de platen noordelijk en oostelijk van het gebied toeneemt met 20 tot 40%. Het getijvolume dat door de geul kombergingsgebied PO+PW in stroomt, neemt echter maar marginaal toe tijdens eb (+3%) en neemt zelfs licht af tijdens vloed (-1%). In dit scenario neemt de relatieve bijdrage van de geul in het vullen van het deelgebied af van 18 tot 15,6% tijdens vloed en van 21,5 tot 19,4% tijdens eb.



Figuur 3-10 Toestroom van water van en naar de lokale komberging van de geulstaart voor het scenario waarbij de kwelder oostelijk van de veerdam is afgegraven tijdens vloed (links) en eb (rechts). De cijfers geven de totale watervolume tijdens één vloed- of ebperiode in m^3 met daaronder de verandering ten opzichte van de referentie (waarbij de referentie is gedefinieerd als 100%). De grootte van de pijlen geeft de relatieve grootte van het getijprisma.

4 Discussie, conclusies en aanbevelingen

4.1 Discussie

4.1.1 Inzichten uit hydrodynamische modelsimulaties

Een toename van het kombergingsvolume van 36% bij afgraving aan beide zijden van de veerdam leidt slechts lokaal tot een beperkte toename in het gemiddelde geuldebiet bij vloed (+3% bij start PW, maar -6% bij start PO) en tot een substantiële toename bij eb (11% bij start PW en +5% bij start PO). De maximale stroomsnelheid neemt zelfs af tijdens vloedstroming, doordat de stroming eerder de geul verlaat en het afgegraven kweldergebied op stroomt, wat ook blijkt uit de stromingspatronen. Tijdens ebstroming neemt de pieksnelheid wel toe.

Bij een afgraving aan enkel de oostzijde van de veerdam waarbij het lokale kombergingsvolume met 19% toeneemt is het effect van de afname van het getijvolume tijdens vloed nabij de veerdam verholpen. Echter is met deze afgraving de verandering in het gemiddelde getijvolume in deelgebied PW nihil (afname van 1% tijdens vloed en toename van 3% tijdens eb). In deelgebied PO nam het getijvolume wel toe met 9% (zowel tijdens eb als tijdens vloed). De pieksnelheden laten geen eenduidig beeld zien, waarbij tijdens vloed de stroming door de geul aan de westzijde en oostzijde van de geulstaart afneemt, maar in het midden (nabij de veerdam) toeneemt. De pieksnelheden tijdens ebstroming nemen ten westen van de veerdam toe, zoals beoogd met de maatregel, echter is dit effect erg klein.

De realistische ingreep aan de oostzijde van de veerdam geeft dus geen substantiële verandering van de stroming door de geul tussen VA33 en de veerdam. De afgraving aan beide zijden van de veerdam resulteert in substantiële toename van de ebstroming, maar een veel kleiner effect dan ingeschat in de ontwerpnota van Witteveen+Bos (2022). Dit komt doordat hun benadering geen rekening houdt met het transport over de platen, terwijl deze studie laat zien dat die uitwisseling een groot aandeel vormt. Kortom, uit de modelresultaten blijkt dat de afgraving niet leidt tot een sterke toename van stroming door de geul, maar vooral tot extra stroming over de platen.

4.1.2 Invloed op sedimentatie vaargeul en baggerbezwaar

Een kwantitatieve vertaalslag naar baggervolumes is niet eenvoudig te maken, doordat (1) de empirische relaties (gehanteerd in de ontwerpnota van Witteveen+Bos (2022)) niet zijn afgeleid aan de hand van het geuldebiet, maar aan de hand van het kombergingsvolume en (2) doordat de empirische relaties uitgaan van een versimpelde geometrie, waarbij een gebied enkel door één hoofdgeul wordt gevuld en geleegd. Uit de modelresultaten blijkt dat de verandering in kombergingsvolume niet lineair schaalt met het geuldebiet, omdat bij een afgraving ook de stromingspatronen veranderen. Hierdoor neemt de stroming over de platen toe en neemt de relatieve bijdrage van de geul af.

Volgens de modelresultaten leiden beide varianten voor afgravingen dus slechts tot minimale toename van de stroming door de geul en vooral tot toename van stroming over de platen. Alleen bij de grote afgraving aan beide zijden van de veerdam wordt een substantieel effect op de ebstroming geconstateerd. Dit zou potentieel de sedimentatie in de vaargeul kunnen verkleinen, doordat er grotere stroomsnelheden in de geul optreden. Aangezien de ebdebieten sterker toenemen dan de vloeddebieten, neemt de vloeddominantie van de stroming af, wat de afname van de sedimentatie in de vaargeul verder stimuleert. De toename van stroming over de platen kan mogelijk wel leiden tot lokale erosie op de platen, waardoor sedimentatie

op de kwelder of in de geul kan toenemen, of zelfs tot een verplaatsing van het wantij. Deze mogelijke morfologische gevolgen zijn in dit rapport niet nader bestudeerd.

Bij de afgraving aan de oostzijde van de veerdam is het effect op de ebstroming veel kleiner, dus deze zal naar verwachting weinig tot geen effect hebben op de sedimentatie in de vaargeul. Om een waarneembare reductie in het baggerbezwaar te verkrijgen is dus een grootschalige afgraving benodigd, waar potentieel grote ongewenste (morfologische en ecologische) effecten mee gepaard gaan doordat de stromingspatronen veranderen.

4.1.3 Vergelijkingen met eerdere studies

Zoals beschreven in paragraaf 1.3 is in de ontwerpnota 'baggerbezwaar en mogelijke veerroutes' (Witteveen+Bos, 2022) aan de hand van empirische relaties een prognose gemaakt voor het baggervolume op basis van de geschatte toename van het kombergingsvolume door de afgraving van de kwelders. Het af te graven volume aan kwelder materiaal ($2,3 \text{ Mm}^3$) is daarbij bepaald op basis van een afgraaf lengte van 5,5 km in combinatie met de gemiddelde sedimentatiesnelheid van de kwelders in de periode 1960-2014 van $6,5 \text{ m}^3/\text{m}/\text{jaar}$ (Van Duin et al., 2016). Dit vormt een toename van het kombergingsvolume van ca. 20%. Vervolgens is aan de hand van empirische relaties (1) de bijbehorende evenwichtsdoorsnede van de geul bepaald en (2) een prognose gemaakt voor het baggervolume bij gelijkblijvende vaargeuldimensies.

Uit onze modelopzet blijkt dat de afgraving uit de ontwerpnota van $2,3 \text{ Mm}^3$ kwelder materiaal vrijwel exact overeenkomt met de afgraving van deelgebied PO tot 0m NAP (zie paragraaf 2.3). Het kombergingsvolume van PO neemt daardoor toe van $6,4 \text{ Mm}^3$ naar $8,7 \text{ Mm}^3$ (absolute toename van $2,3 \text{ Mm}^3$), een procentuele toename van 36%. Voor deelgebied PO+PW gaat het om een toename van $12,3 \text{ Mm}^3$ naar $16,8 \text{ Mm}^3$ (toename van $4,5 \text{ Mm}^3$, eveneens 36%). Het is onduidelijk waarom de berekende toename van het kombergingsvolume (zowel absoluut als relatief) afwijkt van de resultaten uit de ontwerpnota.

De achterliggende aanname voor het hanteren van deze empirische relaties is dat er sprake zou zijn van een afgesloten gebied dat slechts gevoed wordt vanuit één geul. Dat zou betekenen dat de toename van het kombergingsvolume volledig ten gunste zou komen van het geuldebiet. Uit onze modelresultaten blijkt dat in het referentiescenario slechts ongeveer 18% van het totale kombergingsvolume door de geul stroomt bij vloedstroming (en 21,5% bij ebstroming). Het gebied wordt dus in grote mate gevoed vanuit andere bronnen dan deze (hoofd)geul. Daardoor komt de toename van het kombergingsvolume ten gevolge van de verschillende afgravingen niet (volledig) ten gunste van de stroming door de geul, maar vooral ten gunste van stroming over de platen. Om die reden zijn de empirische relaties niet direct van toepassing op dit systeem.

De resultaten van studies voor Holwerd aan Zee laten vergelijkbare inzichten zien. Geleynse et al. (2021) bekeken de invloed van een aan te leggen spoelmeer voor Holwerd aan Zee. De toevoeging van 430.000 m^3 kombergingsvolume leidde slechts tot een kleine toename van geuldebiet bij vaarwegkilometer 4 (vergelijkbaar met raainummer 14 in dit rapport). Grasmeijer et al. (2021) concludeerden uit hun modelstudie: *"Het effect van de toegangsheuvel en de uitwisseling met het getijdemeer op de baggervolumes in de vaargeul is echter erg klein."*

In de zomer van 2021 het project Terp van de Toekomst van start gegaan nabij Blije. Een deel van de kwelder is afgegraven en staat nu regelmatig onder water. De eerste meetresultaten van de bodemhoogte en het herstel van de kwelder zijn inmiddels beschikbaar (Hoefsloot & Van Leeuwen, 2024), maar het effect op de waterbeweging is daarbij niet bestudeerd.

4.1.4 Suggesties voor toepassing maatregel

Ondanks de beperkte effectiviteit van de maatregel zoals berekend in de modelsimulaties, zijn er wel een aantal bevindingen gedaan. Het afgraven van de kwelders over de volledige lengte van deelgebieden PO en PW zorgt voor ongewenste stromingspatronen waarbij de stroming in de geul afnam ten oosten van doorsnede 17 (vanaf waar de geul parallel loopt aan de kwelder). In feite neemt het kombergingsvolume alleen toe voor het westelijke gedeelte van de geul, maar niet voor het oostelijke gedeelte. Afgraving aan beide zijden van de veerdam is daardoor ongunstig voor de stroming door de geul.

Om de stroming door de geul maximaal te laten toenemen is het aan te raden om alleen de kwelders ten oosten van de veerdam af te graven, zodat het geuldebiet over de volledige lengte van de vaargeul toeneemt. Uit de modelsimulatie met de afgraving alleen aan de oostzijde van de veerdam blijkt dat dit gedeeltelijk werkt: de stroming blijft tot de veerdam door de geul lopen. De toename van geuldebiet is echter beperkt, want het extra kombergingsvolume blijkt vooral afkomstig te zijn van stroming over de platen. Daardoor is het verwachte effect van de maatregel op sedimentatie in de vaargeul en baggervolume beperkt.

4.2 Conclusies

In deze studie is gekeken naar de effectiviteit van een kwelderafgraving in de buurt van Holwerd om de stroming door de vaargeul Holwerd-Ameland te laten toenemen en daarmee het baggervolume te reduceren. Uit onze hydrodynamische modelsimulaties blijkt dat in de uitgangssituatie slechts een klein gedeelte van het kombergingsvolume (ongeveer 20%) door de vaargeul stroomt. Voor een groot gedeelte wordt het deelgebied gevoed en geleegd via het plaatgebied aan de noordzijde en oostzijde. Om die reden is de aanpak met empirische relaties niet direct geldig voor dit gebied. Afgraving van de kwelders leidt op basis van onze modelresultaten niet tot een sterke toename van stroming door de geul, maar vooral tot extra stroming over de platen.

Het extra kombergingsvolume ten gevolge van de afgravingen leidt dus vooral tot een toename van stroming over de platen en zorgt alleen tijdens ebstroming voor een substantiële toename van het geuldebiet (+11% voor beide zijden van de veerdam; +3% voor afgraving aan de oostzijde van de veerdam). De afgraving aan beide zijden van de veerdam leidt echter slechts tot een minimale toename (+3%) van het geuldebiet tijdens vloed aan de westzijde en voor een afname in het middelste en oostelijke gedeelte (-5%), doordat de vloedstroming eerder de geul verlaat en het afgegraven gebied op stroomt. De afgraving aan de oostzijde van de veerdam leidt niet of nauwelijks tot een afname van het vloeddebiet over de gehele lengte van de vaargeul, doordat de vloed tot de veerdam door de vaargeul stroomt. Deze afgraving resulteert echter ook nauwelijks in een toename van geuldebiet, doordat vooral de stroming over de platen toeneemt.

Een kwantitatieve vertaalslag naar baggervolumes is niet eenvoudig te maken, doordat de empirische relaties niet zijn afgeleid aan de hand van het geuldebiet, maar aan de hand van het kombergingsvolume. Om die reden wordt alleen een kwalitatieve inschatting gemaakt. Alleen bij een kwelderafgraving aan beide zijden van de veerdam wordt dus een substantieel effect op de ebstroming geconstateerd. Dit zou potentieel het baggerbezwaar kunnen verkleinen doordat er grotere stroomsnelheden in de geul optreden. Echter neemt de vloedstroming in de geul voor de veerdam bij deze afgraving juist af, waardoor de sedimentatie lokaal kan toenemen. Bij de meer realistische afgraving (enkel ten oosten van de veerdam) is deze toename veel kleiner. Het baggerbezwaar zal voor deze afgraving dan ook niet afnemen. De conclusie is dan ook dat onrealistisch grote afgravingen benodigd zullen zijn om een waarneembaar effect op het geuldebiet te hebben. Mogelijk leidt een dergelijke grootschalige afgraving daarmee tot een reductie van baggerbezwaar, maar door veranderde stromingspatronen kan het baggerbezwaar lokaal toenemen. Bovendien kunnen deze

grootschalige afgravingen potentieel grote ongewenste effecten initiëren door geul- en plaatveranderingen en voor de ecologie. Daarmee voldoen deze afgravingen waarschijnlijk niet als een *no-regret maatregel*.

4.3 Aanbevelingen

In het 'Vervolgonderzoek Bereikbaarheid Ameland 2030' (VBA2030) wordt als maatregel voorgesteld om een gedeelte van de kwelder(s) bij Holwerd af te graven met de intentie om het baggerbezwaar te laten afnemen. Uit onze hydrodynamische modelsimulaties blijkt het gewenste effect, een toename van stroming door de geul om zodoende sedimentatie in de geul te laten afnemen, alleen op te treden voor ebstroming bij onrealistisch grote afgravingen. De gesimuleerde afgravingen leiden vooral tot toename van uitwisselingen over de omringende platen. Om die reden, alsook vanwege mogelijke negatieve effecten van een dergelijke grootschalige afgraving, raden wij het toepassen van deze maatregel af.

Uit de verschillende scenario's voor afgravingen kunnen wel lessen worden getrokken om een dergelijke maatregel te optimaliseren voor potentiële toepassing elders. Door de locatie en omvang van de afgraving aan te passen op de lokale ligging van de geulen en platen kan de stroming zoveel mogelijk via de geul worden geleid, waardoor het effect op sedimentatie in de vaargeul zo groot mogelijk wordt.

Tot slot is het interessant om de resultaten van deze studie, waaruit blijkt dat de geulstaart tussen Holwerd en VA33 voor een groot gedeelte wordt gevoed en gelegeerd via het plaatgebied aan de noordzijde en oostzijde, in de toekomst te vergelijken met de metingen die in de winter 2023-2024 door Rijkswaterstaat zijn gedaan op het wantij bij Ameland

Referenties

- Alkyon (2008). *Haalbaarheidsstudie vaarweg Ameland - Fase 1: selectie van kansrijke alternatieven*. Kenmerk: A2066R1r3.
- Biegel, E.J. (1992). *Impact of sea level rise on the morphology of the Waddensea in the scope of its ecological function - Investigation on empirical morphological relations*. Delft Hydraulics, ISOS*2 project phase 2.
- Boechat Albernaz, M., van Rijn, L.C., Schoonhoven, D.C., Perk, L.M., (2023). January, 2023; Results of MUSA field measurement campaigns at Holwerd, the Netherlands. TKI MUSA project
- Cleveringa, J. (2024). Kennisvragen baggeren en verspreiden van sediment in de Waddenzee, Verkenning in het kader van uitvoeringsprogramma UP23 "Ecosysteemgericht baggeren in de Waddenzee". Fase 1. Rapport 2023-03, Waddenacademie, Leeuwarden
- D'Alpaos et al., (2010). On the tidal prism-channel area relations. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F1).
- Geleynse, N., Perk, L.M. en Van Rijn, L.C. (2021). Te verwachten aanslibbing in geul en getijdemeer Holwerd aan Zee. Waterproof rapport WP2020_1217_R1r2.
- Grasmeijer, B. & Van Weerdenburg, R. (2020). Evaluatie Bochtafsnijding Vaarweg Ameland. Deltares rapport 11205229-006-ZKS-0002. Deltares, Delft, 77 pp.
- Grasmeijer, B., Van Rijn, L.C., Van Kessel, T., Van Weerdenburg, R. (2021). Slib- en sedimentatieadvies Holwerd aan Zee. Fase 1A: Inventarisatie en analyse van de bestaande situatie. Deltares rapport 11206844-002-ZKS-0002. Deltares, Delft, 76 pp.
- Hoefsloot, G., J. Haringa & D. van Leeuwen. 2024. Monitoring vegetatie en opslibbing Terp fan de Takomst. Verslag meetjaar 2023. Rapport 24-125. Waardenburg Ecology, Culemborg.
- Rijkswaterstaat & Witteveen+Bos. (2023). Projectnota Vervolgonderzoek bereikbaarheid Ameland 2030. V1.0 Definitief, 25 augustus 2023.
- Smits, B.P., Vroom, J., Van Weerdenburg, R., Colina Alonso, A., (2022). Morfologie en Onderhoud Vaargeul Boontjes: Systeembegrip en scenario's. Deltares rapport 11208040-004-ZKS-0004. Deltares, Delft, 67 pp.
- Stolte, W. et al., 2023. *Digitale Systeemrapportage van de Waddenzee, versie 1.0*. [Online] Available at: <https://systeemrapportage.nl/wadden>
- Van Duin, W., Dijkema, K., Bos, D., (2007). Cyclisch beheer kwelderwerken Friesland. Wageningen IMARES en Altenburg & Wymenga
- Van Duin, W. E., Jongerius, H., Nicolai, A., Jongsma, J. J., Hendriks, A., & Sonneveld, C. (2016). Friese en Groninger kwelderwerken: monitoring en beheer 1960-2014 (No. 68). Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu.
- Van Weerdenburg, R., Vroom, J., Jeuken, C., Grasmeijer, B., (2023). Knelpuntanalyse hoogwaterrote Holwerd-Ameland: Morfologische ontwikkeling en varianten voor minder baggerbezwaar en betere bevaarbaarheid. Deltares Rapport 11209267-004-ZKS-0004. Deltares, Delft, 71 pp.
- Vroom, J., Van Weerdenburg, R., Smits, B.P. & Herman, P. (2020). Modelling slibdynamiek voor de Waddenzee: Kalibratie voor KRW Slib. Deltares rapport 11205229-001-ZKS-0001. Deltares, Delft, 61 pp.
- Witteveen+Bos. (2022). Verkenning Bereikbaarheid Ameland 2030: Ontwerpdata baggerbezwaar en mogelijke veerroutes. Ref 126248/22-007.541
- Zijl, F., Veenstra, J. & Groenenboom, J. (2018). The 3D Dutch Continental Shelf Model – Flexible Mesh (3D DCSSM-FM): Setup and validation. Deltares rapport 1220339-000-ZKS-0042. Deltares, Delft, 49 pp.

A Empirische relaties voor geuldimensies en baggervolumes

In deze bijlage worden de empirische relaties beschreven die zijn gebruikt voor de ontwikkeling van de evenwichtsdoorsnede en baggervolumes in de Verkenning Bereikbaarheid Ameland 2030 (Witteveen+Bos, 2022).

Een eerste empirische relatie is die tussen het lokale kombergingsvolume en de evenwichtsdoorsnede van de geul (1). Deze relatie is uitgebreid beschreven in literatuur voor zeegaten (Biegel, 1992; D'Alpaos et al., 2010) en heeft de volgende algemene vorm:

$$A_{ce} = k * P^\alpha + C \quad (1)$$

Met:

- A_{ce} is de evenwichtsdoorsnede van de geul [m²];
- P is het (lokale) kombergingsvolume [m³];
- k is een coëfficiënt [m⁻¹];
- α is een coëfficiënt [-];
- C is een coëfficiënt [m²]

Deze relatie is algemeen geaccepteerd en al vele malen bevestigd en toegepast. De waarde voor de empirische coëfficiënten k , α en C zijn afhankelijk van lokale condities (type getij, golfklimaat, omvang van kombergingsgebied, aanwezigheid van gebouwde structuren en sedimenteigenschappen). De waarde van α ligt grofweg tussen 0,85 en 1,10 (D'Alpaos et al., 2010). Voor zeegaten in de Waddenzee is een waarde van $\alpha = 0,9$ afgeleid (Biegel, 1992).

Ter illustratie worden waarden gegeven die zijn afgeleid in literatuur:

- Algemeen voor zeegaten in de Waddenzee (Biegel, 1992):
$$A_{ce} = 4,48 * 10^{-4} * P^{0,9} - 157$$
- Verkenning Bereikbaarheid Ameland 2030 (Witteveen+Bos, 2022):
$$A_{ce} = 1,71 * 10^{-4} * P^{0,9} - 116$$

Een tweede empirische relatie (2) geeft de verhouding tussen het baggervolume en de afwijking van de ontwerpdoorsnede van de evenwichtsdoorsnede.

De tweede empirische relatie is die tussen het baggervolume en het verschil tussen de evenwichtsdoorsnede van de geul en de ontwerpdoorsnede. Een vergelijkbare relatie is onder andere gebruikt in (Alkyon, 2008) voor de prognose van het baggerbezwaar en heeft de volgende vorm:

$$V = \beta * (A_d - \gamma * A_{ce}) \quad (2)$$

Met:

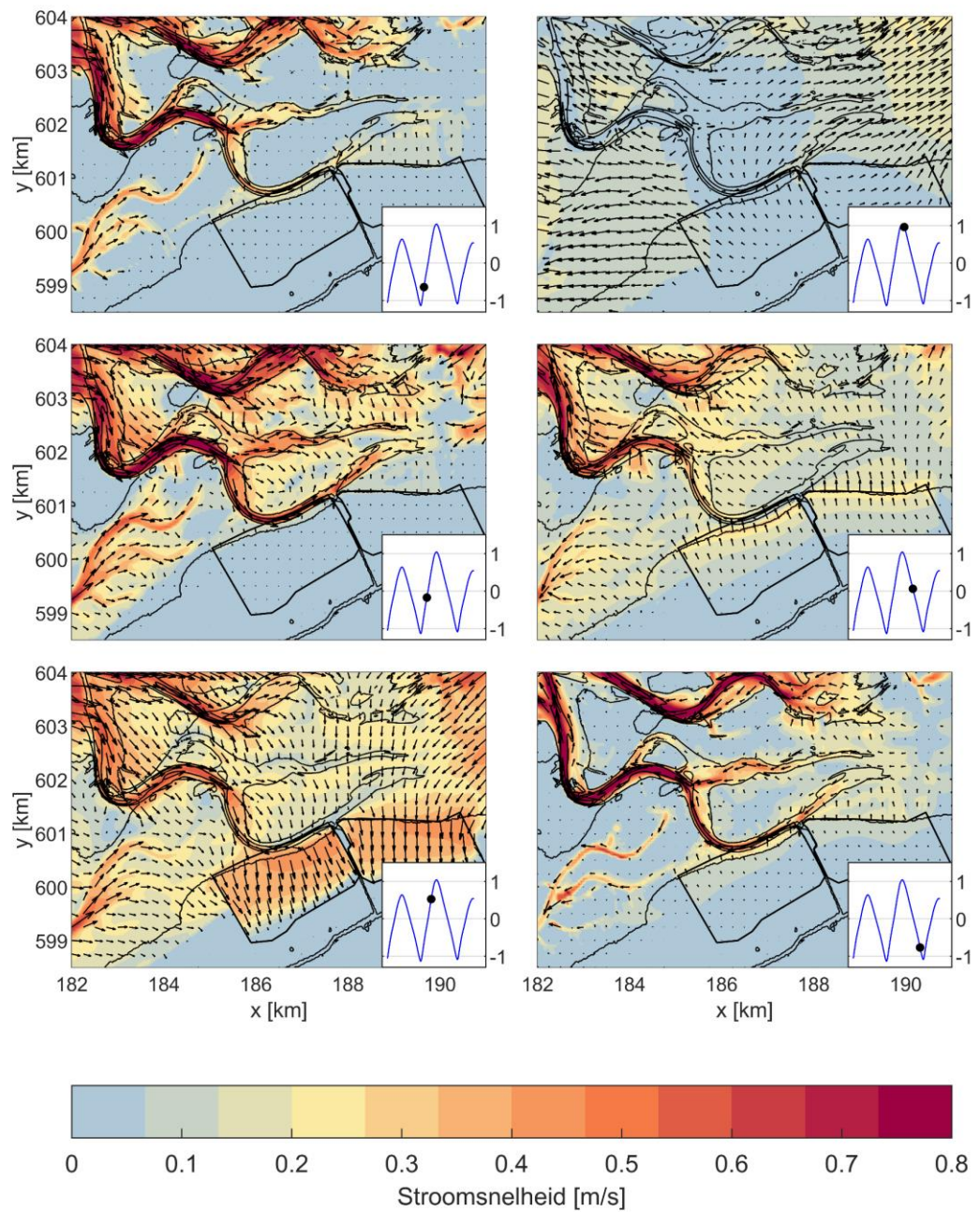
- V is het baggervolume [m³];
- A_d is de ontwerpdoorsnede van de geul [m²];
- A_{ce} is de evenwichtsdoorsnede van de geul [m²];
- β is een coëfficiënt [m];
- γ is een correctiefactor [-]

Door het baggervolume uit te zetten tegen het doorsnedeoverschot kan deze empirische relatie worden gefit op de data. In de literatuur worden waarden voor correctiefactor γ gegeven van:

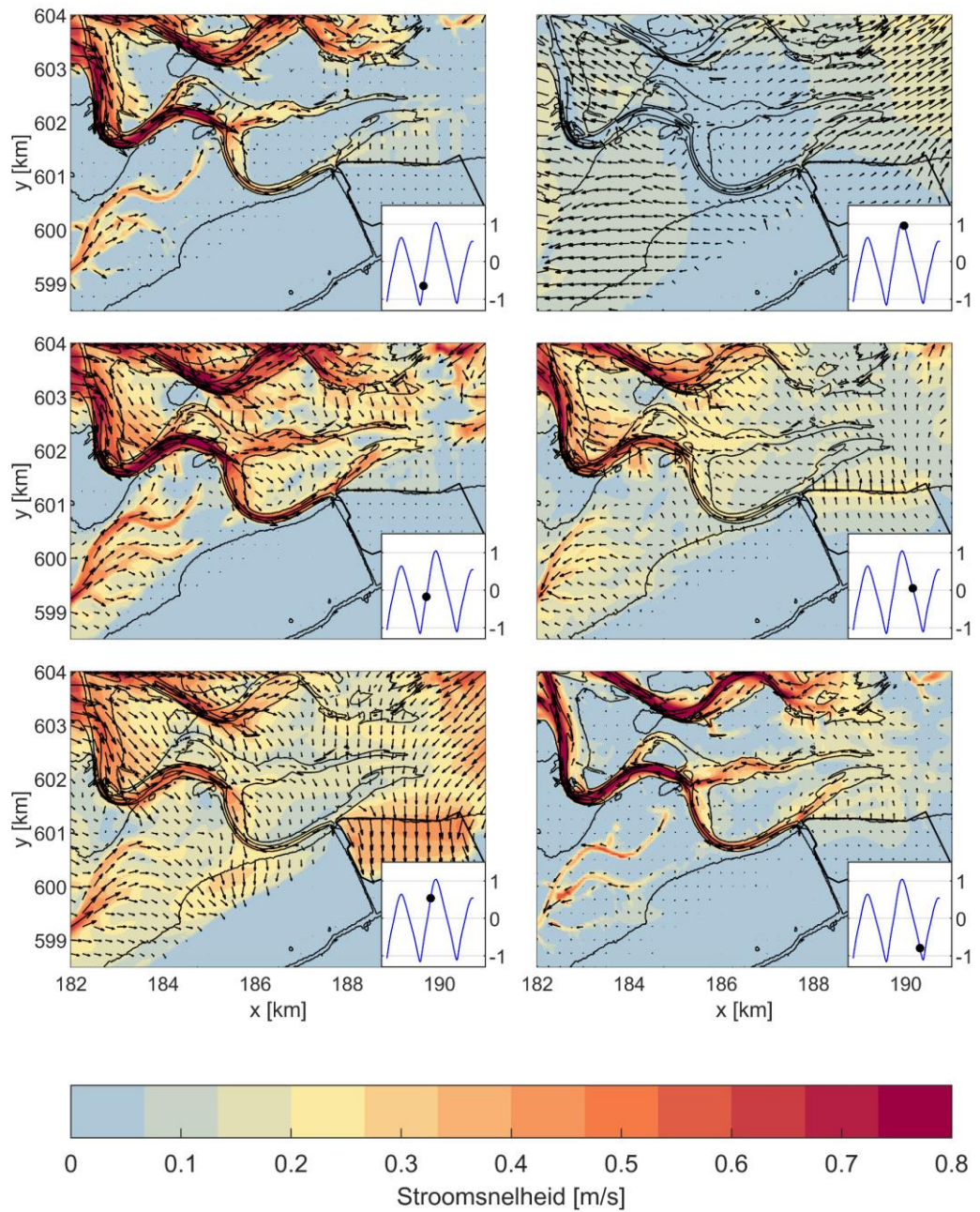
- $\gamma < 1$, omdat de evenwichtsdoorsnede stroomopwaarts (richting het wantij) afneemt evenredig aan het kombergingsvolume. Een karakteristieke evenwichtsdoorsnede zal dus kleiner zijn dan een evenwichtsdoorsnede afgeleid aan het begin van het kombergingsgebied.
- $\gamma > 1$, indien de relatie wordt toegepast voor slibrijke systemen (aangezien de relatie is afgeleid voor zandige systemen)

Voor de Verkenning Bereikbaarheid Ameland 2030 (Witteveen+Bos, 2022) was de waarde $\gamma = 0,46$ afgeleid uit een fit van de data voor het jaar 1989 waarvoor bekend was dat het gebaggerde volume gelijk was aan nul. De parameter β werd gefit op $7,3 \cdot 10^3$ en daarnaast werd een onzekerheidsmarge toegepast van 2 maal de root-mean-squared-error ($2 \cdot \text{RMSE} = 1 \cdot 10^5 \text{ m}^3$).

B Verandering stroomsnelheid

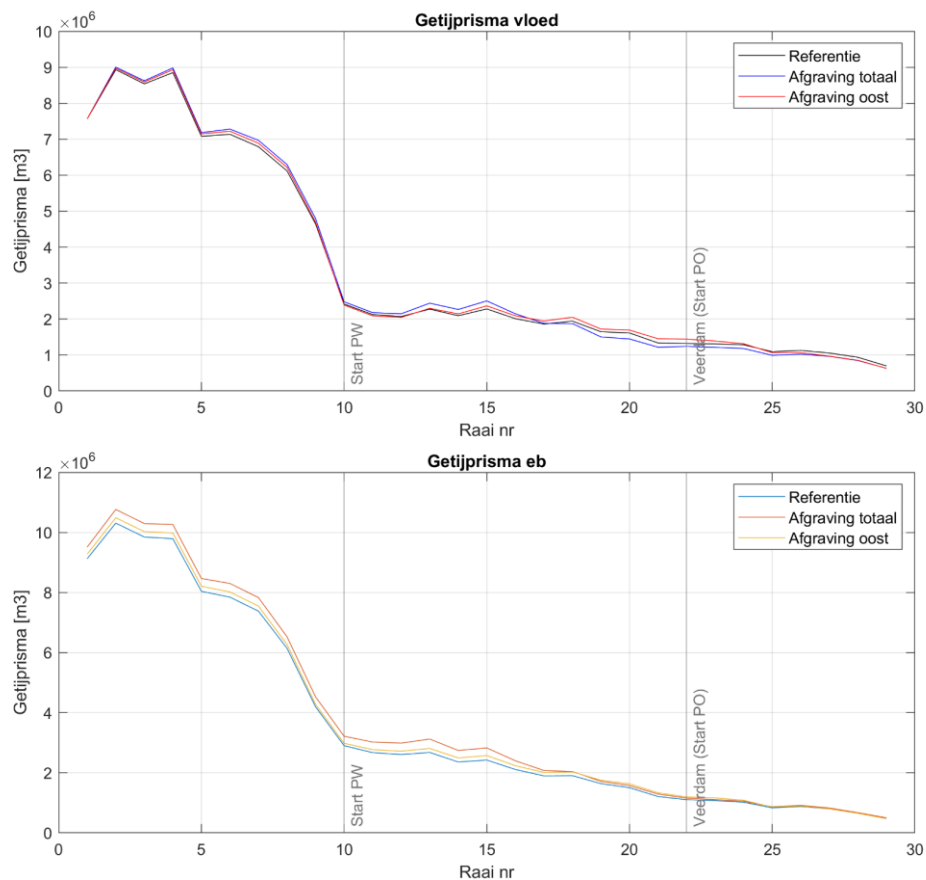


Figuur B-1 Stroomsnelheden voor de afgraving aan beide zijden van de veerdam voor drie momenten tijdens vloed (links) en drie momenten tijdens eb (rechts)

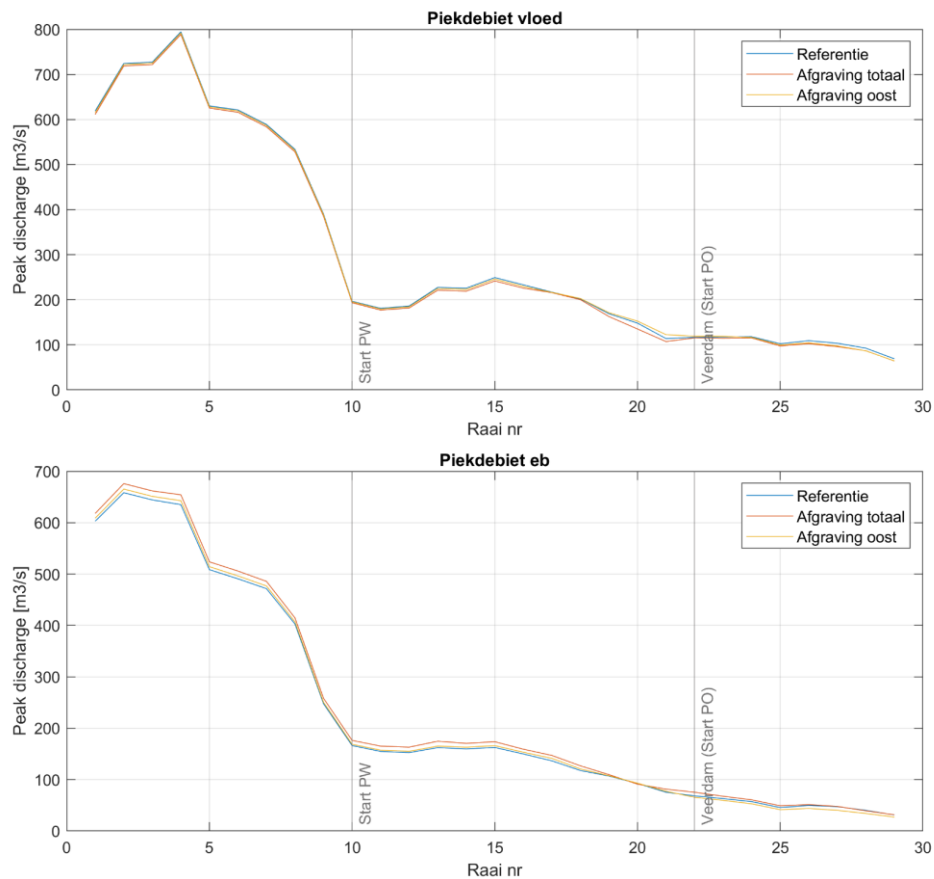


Figuur B-2 Stroomsnelheden voor de afgraving oostelijk van de veerdam voor drie momenten tijdens vloed (links) en drie momenten tijdens eb (rechts)

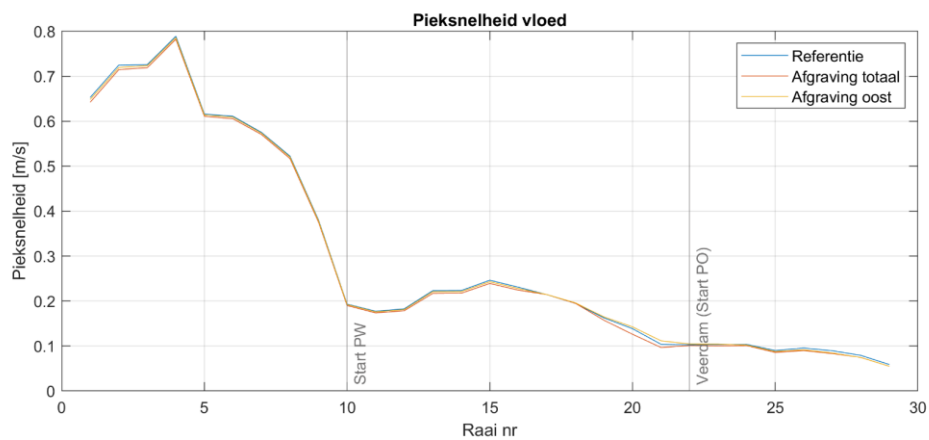
C Getijvolumes, debieten en snelheden

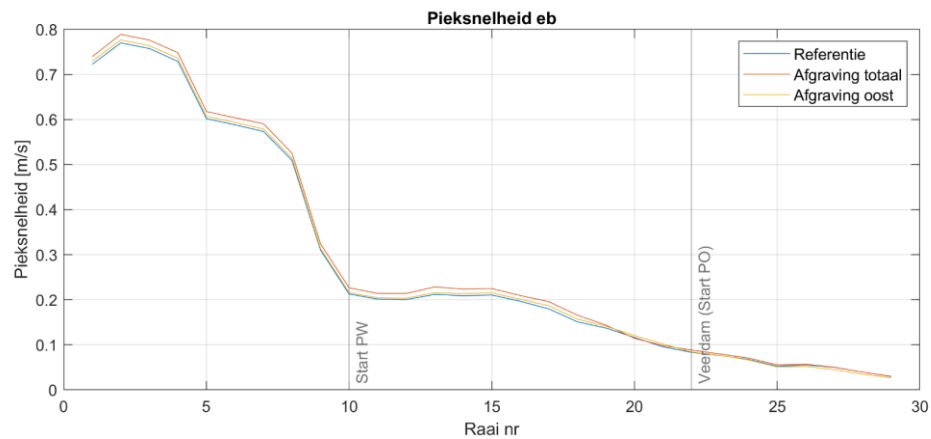


Figuur C-1 Ontwikkeling van het getijvolume in de geul (voor locaties raaien zie Figuur 3-4) voor de referentie en beide afgravingsscenario's tijdens vloed (bovenste paneel) en eb (onderste paneel)

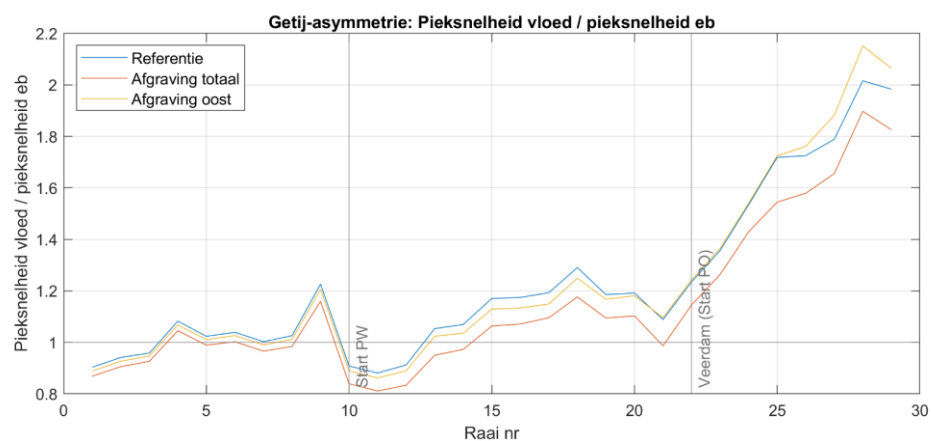


Figuur C-2 Ontwikkeling van het maximale debiet in de geul (voor locaties raaien zie Figuur 3-4) voor de referentie en beide afgravingsscenario's tijdens vloed (bovenste paneel) en eb (onderste paneel)





Figuur C-3 Ontwikkeling van de pieksnelheid in de geul voor de referentie en beide afgravingsscenario's tijdens vloed (bovenste paneel) en eb (onderste paneel)



Figuur C-4 Getij-asymmetrie (maximale vloodsnelheid / maximale ebsnelheid) in de geul voor de referentie en beide afgravingsscenario's

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

Deltares

www.deltares.nl