



Vlaanderen
is wetenschap



24_087_1
WL rapporten

Scenario-onderzoek Masterplan Lillo

Aanvullende hydrodynamische modelberekeningen

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Scenario-onderzoek Masterplan Lillo

Aanvullende hydrodynamische modelberekeningen

Stark, J.; Meire, D.

Juridische kennisgeving

Het Waterbouwkundig Laboratorium is van mening dat de informatie en standpunten in dit rapport onderbouwd worden door de op het moment van schrijven beschikbare gegevens en kennis.
De standpunten in deze publicatie zijn deze van het Waterbouwkundig Laboratorium en geven niet noodzakelijk de mening weer van de Vlaamse overheid of één van haar instellingen.
Het Waterbouwkundig Laboratorium noch iedere persoon of bedrijf optredend namens het Waterbouwkundig Laboratorium is aansprakelijk voor het gebruik dat gemaakt wordt van de informatie uit dit rapport of voor verlies of schade die eruit voortvloeit.

Copyright en wijze van citeren

© Vlaamse overheid, Departement Mobiliteit en Openbare Werken, Waterbouwkundig Laboratorium 2025
D/2025/3241/004

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Stark, J.; Meire, D. (2025). Scenario-onderzoek Masterplan Lillo: Aanvullende hydrodynamische modelberekeningen. Versie 4.0. WL Rapporten, 24_087_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen


Overname uit en verwijzingen naar deze publicatie worden aangemoedigd, mits correcte bronvermelding.

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	De Vlaamse Waterweg – Regio Centraal	Ref.:	WL2025R24_087_1
Trefwoorden (3-5):	Hydrodynamische modellering; Telemac; Masterplan Lillo		
Kennisdomeinen:	Hydraulica en sediment > Hydrodynamica > Stroomsnelheden -en patronen > Numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	22	Bijlagen (p.):	/
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Stark, J.
------------	-----------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Meire, D.	Getekend door:Dieter Meire (Signature) Getekend op:2025-01-09 09:49:23 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed  
Projectleider:	Stark, J.	Getekend door:Jeroen Stark (Signature) Getekend op:2025-01-09 09:42:44 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed  

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door:Abdelkarim Bellafkih (Sign) Getekend op:2025-01-09 09:58:04 +01:0 Reden:Ik keur dit document goed  
-----------------	---------------	---

Abstract

In dit rapport is een scenario-analyse uitgevoerd om de hydrodynamische invloed van werkzaamheden die deel uitmaken van het Masterplan van Lillo te analyseren. Het rapport vormt een aanvulling op eerder modelonderzoek door het Waterbouwkundig Laboratorium waarin het effect van de verplaatsing van de jachthaven van Lillo al werd onderzocht. Er is gebruik gemaakt van het Scaldis-2019 model in Telemac-3D. Voor dit model werd in het kader van het huidige scenario-onderzoek een nieuw modelrooster aangemaakt met een verfijning in het studiegebied rondom Fort Lillo. Vervolgens werden modelscenario's opgezet waarin de geometrie en bathymetrie voor Fase 2 – Deel 1 (optimalisaties schorplatform in Potpolder Lillo en zuidelijk deel Galgenschuur) en Fase 2 – Deel 2 (i.e., verplaatsing jachthaven en aanvullende optimalisaties Galgenschuur) werden geïmplementeerd. De hydrodynamische effecten van beide uitvoeringsfases kunnen zo afzonderlijk worden geanalyseerd. Ook is een inschatting gemaakt van potentiële veranderingen in sedimentatie- of erosiepatronen.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VI
Lijst van de figuren	VII
1 Inleiding	1
1.1 Situering	1
1.2 Studiegebied	2
1.2.1 Te onderzoeken werkzaamheden Masterplan Lillo.....	2
1.3 Doelstelling.....	4
1.4 Leeswijzer	4
2 Modelbeschrijving	5
2.1 Roosteraanpassingen	6
2.2 Bathymetrie	7
2.3 Randvoorwaarden.....	8
2.4 Overige modelinstellingen	9
2.5 Postprocessing en analyse	10
3 Resultaten.....	11
3.1 Invloed op stroomsnelheid	11
3.2 Inschatting verandering sedimentatiepatronen	18
4 Conclusies	20
Referenties	22

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Representatie van het verticaal getij in het Scaldis2019 model (uit: Vanlede *et al.*, 2020)..... 5

Lijst van de figuren

Figuur 1 – Huidige ligging van de jachthaven bij Fort Lillo (links) en voorgestelde nieuwe locatie jachthaven in oost-variant (rechts).....	1
Figuur 2 – Luchtfoto van Fort Lillo aan de Beneden-Zeeschelde.	2
Figuur 3 – Overzicht van compensatiemaatregelen in Fase 2 – Deel 1.....	3
Figuur 4 – Overzicht van aanvullende werkzaamheden (verplaatsing jachthaven) en compensatiemaatregelen in Fase 2 – Deel 2.....	3
Figuur 5 – Een deel van het Scaldis modelrooster, bathymetrie in m NAP.....	6
Figuur 6 – Detail van het originele (links) en het aangepaste modelrooster (rechts) ter hoogte van het studiegebied bij Lillo.....	6
Figuur 7 – Geïmplementeerde bodemligging in huidige situatie (links) en voor Fase 2 – Deel 1 (midden) en Fase 2 – Deel 2 (rechts).	7
Figuur 8 – Verschil in bodemligging ten opzichte van huidige situatie voor scenario's Fase 2 – Deel 1 (links) en Fase 2 – Deel 2 (rechts).	8
Figuur 9 – Getijdverloop te Vlissingen voor hele simulatieperiode.	9
Figuur 10 – Bovenafvoer voor hele simulatieperiode.	9
Figuur 11 – Gemodelleerde stroomvelden tijdens maximale vloed, ongeveer één uur voor hoogwater.	12
Figuur 12 – Gemodelleerde stroomvelden tijdens hoogwater.	13
Figuur 13 – Gemodelleerde stroomvelden rond kentering hoogwater, ongeveer één uur na hoogwater.	14
Figuur 14 – Gemodelleerde stroomvelden tijdens eb, ongeveer drie uur na hoogwater.	15
Figuur 15 – Maximum stroomsnelheden tijdens vloedfase na uitvoering van Fase 2 – Deel 1 (linksboven) en Fase 2 – Deel 2 (linksonder), en verschil met de huidige situatie (rechts).....	16
Figuur 16 – Maximum stroomsnelheden tijdens ebfase na uitvoering van Fase 2 – Deel 1 (linksboven) en Fase 2 – Deel 2 (linksonder), en verschil met de huidige situatie (rechts).....	17
Figuur 17 – Overschrijdingsfrequentie van $\tau_b > 0,1 \text{ Nm}^{-2}$ in % na uitvoering van Fase 2 – Deel 1 (linksboven) en na uitvoering van Fase 2 – Deel 2 (linksonder), en rechts de verandering van de overschrijdingsfrequentie in % t.o.v. de huidige situatie.	19

1 Inleiding

1.1 Situering

De Vlaamse Waterweg wenst rond het Fort van Lillo (Figuur 1 en Figuur 2) een waterkering met aangepaste kruinhoogte aan te leggen in het kader van de uitvoering van het Geactualiseerd Sigmaplan dat de Vlaamse Regering in 2005 goedkeurde. Deze waterkering vormt een essentiële schakel in de bescherming van het havengebied aan de rechteroever van de Zeeschelde.

Het Masterplan Lillo formuleert een toekomstvisie voor Lillo binnen de context van deze grootschalige Sigmawerken waarbij de karakteristieke kwaliteiten van het fort worden behouden en worden versterkt. In grote lijnen stelt het Masterplan Lillo voor de omwalling te herstellen om zo het fort in ere te herstellen. De aanleg van de nieuwe Sigmadijk en het herstellen van de fortgracht betekenen dat de bestaande getijdenjachthaven van Lillo niet behouden kan worden en derhalve verplaatst moet worden.

In een eerder WL-onderzoek “21_070 – Hydrodynamische berekeningen Masterplan Lillo” (Stark & De Maerschalck, 2021) werd voor twee varianten (westvariant en oostvariant) het effect van de verplaatsing van de jachthaven op de lokale stroming gemodelleerd. Ook werd een inschatting van de morfologische impact gemaakt op basis van verandering in stroming en bodemschuifspanning. Uiteindelijk is de oostvariant weerhouden (Figuur 1). In deze oostvariant bevindt de nieuwe jachthaven zich ten zuidoosten van de huidige locatie van de jachthaven en daarmee ook iets meer richting de vaargeul.

Naast het verplaatsen van de jachthaven worden ook compensatiemaatregelen voorgesteld. Deze werden nog niet geïmplementeerd in de eerdere modelstudie door Stark & De Maerschalck (2021). De compensatie betreft het verlagen van de dam die momenteel in de voormalige potpolder net opwaarts van Lillo gelegen is (Figuur 2) en een aantal afgravingen van supratidale zones op het Galgenschoor afwaarts van Fort Lillo.



Figuur 1 – Huidige ligging van de jachthaven bij Fort Lillo (links) en voorgestelde nieuwe locatie jachthaven in oost-variant (rechts).

1.2 Studiegebied

Fort Lillo bevindt zich in de Beneden-Zeeschelde, midden in het havengebied van Antwerpen en in de directe omgeving van het Deurganckdok. In de huidige situatie bevindt de getijdenjachthaven van Lillo zich ten zuiden van het fort. In de omgeving van Fort Lillo bevinden zich ook wachtsteigers voor binnenvaartschepen. Het fort wordt daarnaast omgeven door waardevolle intergetijdengebieden. Ten noorden van Fort Lillo bevindt zich het Galgenschoor, terwijl direct ten zuiden van Lillo in 2012 de potpolder werd ontpolderd en omgevormd tot een getijdennatuurgebied (links in Figuur 2). Dankzij het instromende water ontwikkelen zich momenteel slikken en schorren in de voormalige potpolder.



Figuur 2 – Luchtfoto van Fort Lillo aan de Beneden-Zeeschelde.

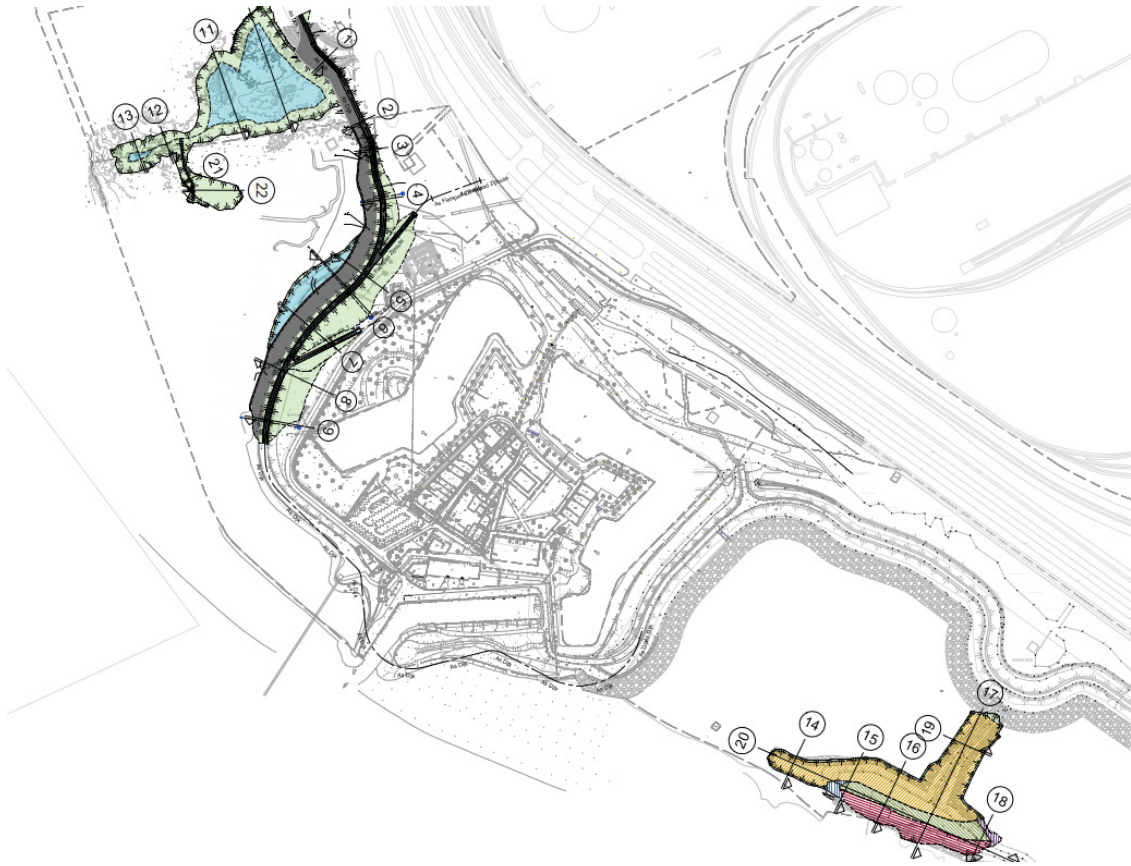
1.2.1 Te onderzoeken werkzaamheden Masterplan Lillo

Er worden in dit project twee verschillende toestanden in de uitvoering van het Masterplan Lillo onderzocht:

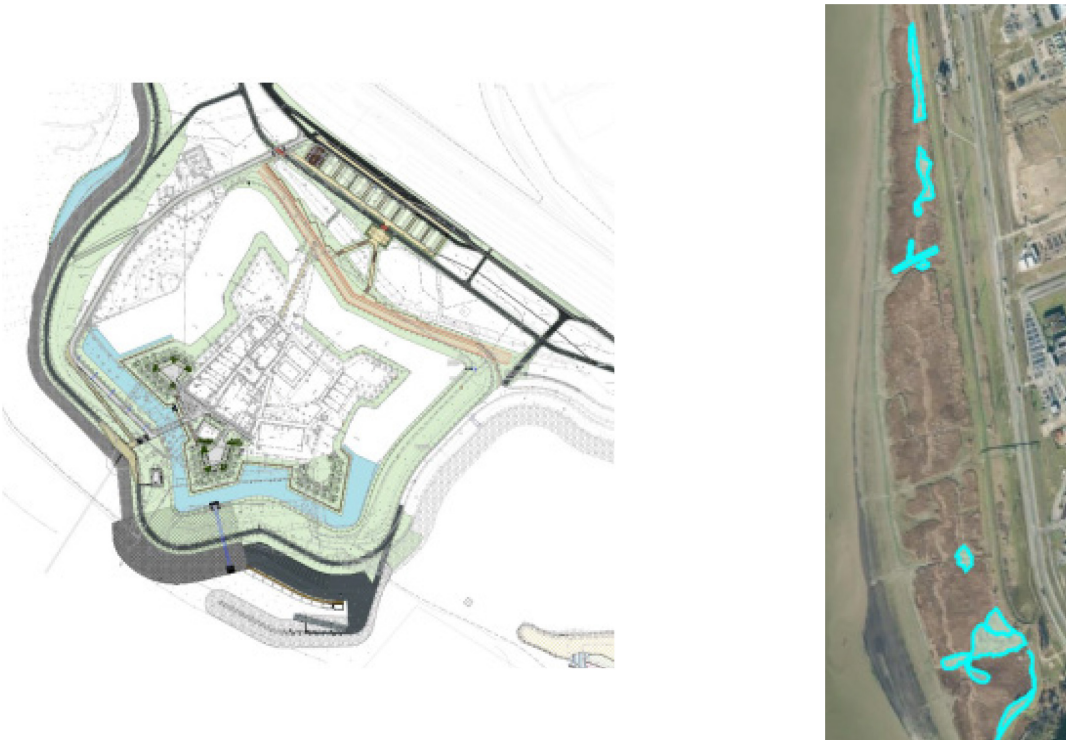
- Toestand na Fase 2 – Deel 1 (met een groot deel van de compensatiemaatregelen reeds uitgevoerd).
- Toestand na Fase 2 – Deel 2 (met enkele bijkomende compensatiemaatregelen)

In Fase 2 – Deel 1 wordt een groot deel van de voorgestelde compensatiemaatregelen uitgevoerd (Figuur 3). Dit betreft een afgraving van de dam die nog aanwezig is in de voormalige potpolder Lillo (~38.000 m³) en een lokale afgraving op het Galgenschoor (~18.000 m³).

Fase 2 - Deel 2 omvat de toestand waarin alle bovenstaande werken worden uitgevoerd, aangevuld met de verplaatsing van de jachthaven en enkele lokale afgravingen of optimalisaties op het Galgenschoor, welke zijn geselecteerd vanwege hun waardevolle herstelpotenties (Figuur 4). De totale oppervlakte van deze extra optimalisaties bedraagt 1 hectare, waar zal worden afgegraven tot +5 m TAW (voor de meeste zones betekent dit een afgraving van ongeveer 1 meter grond).



Figuur 3 – Overzicht van compensatiemaatregelen in Fase 2 – Deel 1.



Figuur 4 – Overzicht van aanvullende werkzaamheden (verplaatsing jachthaven) en compensatiemaatregelen in Fase 2 – Deel 2.

1.3 Doelstelling

Met oog op de vergunningsaanvraag dienen aanvullende berekeningen te worden uitgevoerd waarin enkele werkzaamheden die in verschillende fases van het Masterplan Lillo worden uitgevoerd ook afzonderlijk worden doorgerekend. Dit betreft ook compensatiemaatregelen die in de voorgaande studie nog niet werden geïmplementeerd. Op basis van de modelberekeningen wordt een analyse gemaakt van de invloed op de getijstroming en potentiële veranderingen in sedimentatie- of erosiepatronen.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt ingedeeld: Hoofdstuk 2 bevat een beknopte beschrijving van het toegepaste numeriek model en de implementatie van de twee scenario's. Hoofdstuk 3 bevat de modelresultaten. Tot slot worden in Hoofdstuk 4 de belangrijkste conclusies opgesomd.

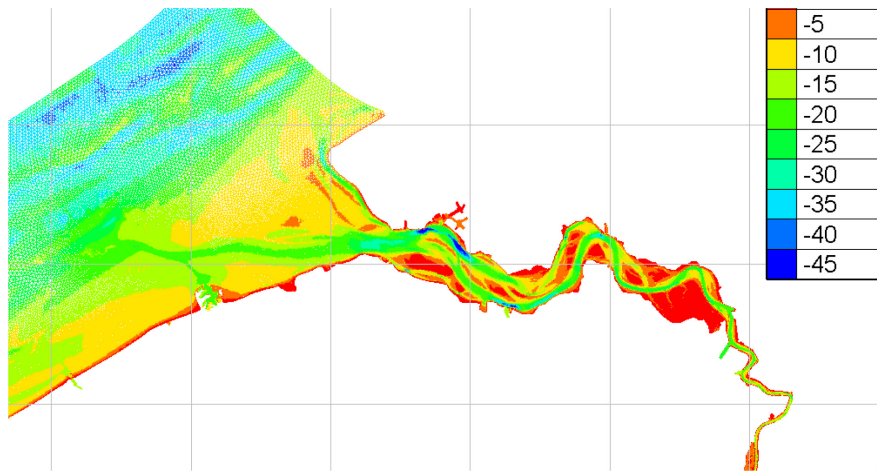
2 Modelbeschrijving

De opzet van de modelberekeningen is quasi-identiek aan de modelberekeningen in de vorige studie in het kader van Masterplan Lillo door Stark & De Maerschallck (2021). De studie wordt wederom uitgevoerd met het Scaldis model in Telemac-3D, een state-of-the-art hydrodynamisch model van het Schelde-estuarium. Het Scaldis model werd door het Waterbouwkundig Laboratorium ontwikkeld in het kader van het project “*Integraal Plan Boven-Zeeschelde*” (Smolders *et al.*, 2016). Later werd het Scaldis model opnieuw gekalibreerd en gevalideerd voor het jaar 2019 (Vanlede *et al.*, 2020).

Het Scaldis modelrooster omvat het volledige Schelde-estuarium, inclusief getijgeboden zijrivieren en het mondingsgebied (Figuur 5). Bij de herkalibratie van het Scaldis model voor 2019 werd het modelrooster verder geoptimaliseerd. Het vernieuwde rooster volgt de stroomlijnen van de waterbeweging beter. Bovendien werd het rooster verfijnd in zones waar dat voor nautische simulatiestudies nodig was.

Tabel 1 – Representatie van het verticaal getij in het Scaldis2019 model (uit: Vanlede *et al.*, 2020).

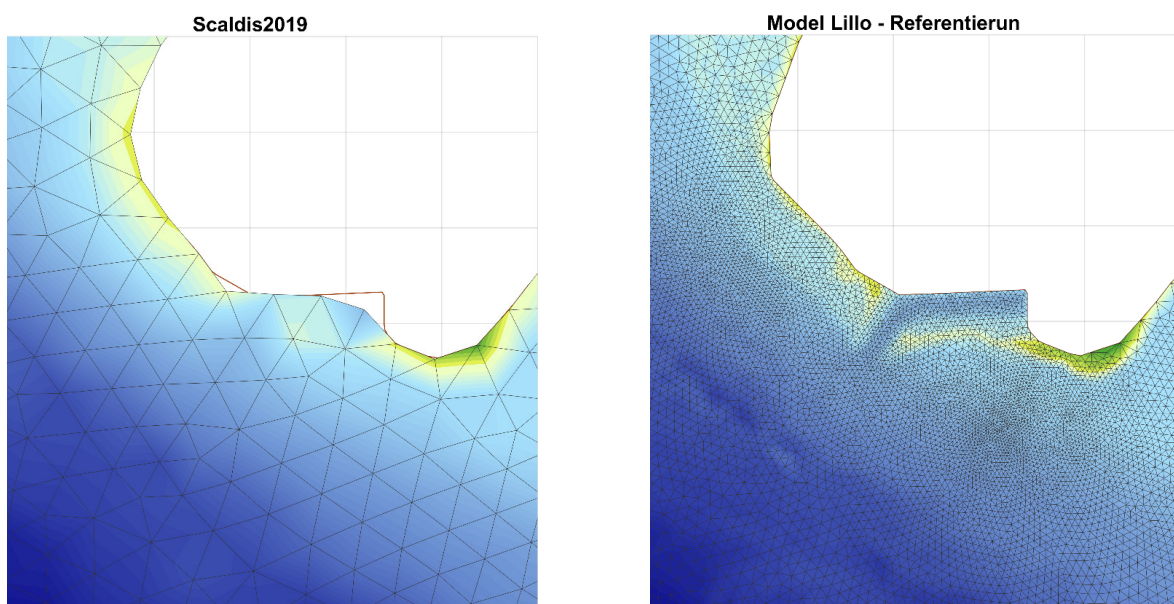
Zones	Stations	Volledige tijdreeks			Hoogwater			Laagwater		
		BIAS [cm]	RMSE [cm]	RMSEO [cm]	BIAS [cm]	RMSE [cm]	RMSEO [cm]	BIAS [cm]	RMSE [cm]	RMSEO [cm]
WES	Vlakte van de Raan	0.5	6.0	6.0	-3.1	7.0	6.3	-0.1	5.6	5.6
	Westkapelle	-0.7	7.2	7.1	-2.0	6.8	6.5	2.6	6.1	5.5
	Cadzand	4.1	9.5	8.5	-0.1	7.3	7.3	6.5	9.0	6.2
	Vlissingen	1.5	8.8	8.7	-6.6	10.2	7.7	5.8	8.4	6.0
	Breskens	4.0	11.2	10.5	-5.8	9.4	7.4	5.8	8.4	6.1
	Terneuzen	2.3	7.7	7.3	-2.0	7.4	7.1	4.6	7.6	6.0
	Overloop Hansweert	2.9	9.6	9.1	-1.4	6.8	6.6	4.4	7.9	6.5
	Hansweert	1.4	8.7	8.6	-1.8	7.6	7.4	3.2	6.8	6.0
	Walsoorden	0.2	9.4	9.4	-6.4	11.9	10.0	3.0	9.7	9.3
	Baalhoek	1.2	10.0	9.9	-4.2	10.4	9.6	3.1	7.1	6.4
	Bath	5.8	12.2	10.7	3.1	10.4	9.9	5.6	8.4	6.3
	 Gemiddelde 	2.2	9.1	8.7	3.3	8.7	7.8	4.1	7.7	6.4
BeZS	Prosperpolder	8.6	12.7	9.3	6.8	11.7	9.5	7.8	9.9	6.1
	Liefkenshoek	2.4	9.4	9.1	3.5	10.7	10.1	0.9	6.1	6.1
	Kallo	8.2	12.6	9.6	9.7	14.2	10.3	7.1	9.4	6.2
	Antwerpen	2.8	9.9	9.4	6.4	12.0	10.2	0.4	6.3	6.3
	Hemiksem	3.7	10.6	9.9	5.2	11.2	9.9	-1.4	6.2	6.1
	 Gemiddelde 	5.1	11.0	9.5	6.3	12.0	10.0	3.5	7.6	6.1
BoZS	Temse	-0.1	11.9	11.9	0.3	10.6	10.5	-14.6	15.6	5.5
	Tielrode	1.2	11.4	11.4	7.4	12.9	10.5	-12.1	13.5	5.9
	StAmands	2.0	11.6	11.5	7.8	14.4	12.1	-10.2	12.0	6.3
	Dendermonde	-4.7	16.8	16.1	3.6	14.1	13.6	-6.0	8.1	5.4
	Schoonaarde	0.3	13.3	13.3	8.6	14.5	11.7	-16.3	17.0	5.1
	Wetteren	-2.0	11.7	11.6	6.4	12.4	10.6	-16.2	16.9	5.0
	Melle	-4.2	14.9	14.3	11.6	14.9	9.4	-21.0	22.1	6.8
	 Gemiddelde 	2.1	13.1	12.9	6.5	13.4	11.2	13.8	15.0	5.7



Figuur 5 – Een deel van het Scaldis modelrooster, bathymetrie in m NAP.

2.1 Roosteraanpassingen

Voor de modelschematisering van elk van de varianten voor de nieuwe jachthaven in Lillo is de geometrie van het Scaldis modelrooster lokaal aangepast. De reguliere resolutie van het Scaldis rekenrooster bedraagt ongeveer 30 m in het studiegebied. Het rekenrooster in de omgeving van Fort Lillo is daarom verfijnd om de jachthaven van Lillo adequaat te kunnen implementeren. De verfijning van het rekenrooster is uitgevoerd met het softwarepakket BlueKenue. In de zone tussen Doel en Kallo werd het rooster vernieuwd en de buitenrand van het model aangepast ten behoeve van een betere representatie van de jachthaven Lillo. De roosterresolutie van het model is verfijnd tot ongeveer 5 m ter plaatse van de huidige en voorgestelde locatie van de jachthaven. De resolutie neemt dan gradueel af in opwaartse en afwaartse richting. Figuur 6 laat een detail van het verfijnde rekenrooster en van het originele rekenrooster zien ter hoogte van de jachthaven van Lillo. Bij het aanmaken van het verfijnd rekenrooster is rekening gehouden met de geometrie van de jachthaven. Zo volgt het aangepast modelrooster de kades van de huidige jachthaven, maar ook van de geometrie van de jachthaven in de toekomstige situatie.



Figuur 6 – Detail van het originele (links) en het aangepaste modelrooster (rechts) ter hoogte van het studiegebied bij Lillo.

2.2 Bathymetrie

Bij de update van het Scaldis model voor 2019 werden bathymetrische data van het desbetreffende jaar geïmplementeerd voor het Schelde-estuarium. De data bestaat uit combigrids (i.e., een combinatie van LIDAR data voor de hogere gelegen oppervlaktes en bathymetrische data voor de delen onder de laagwaterlijn) die door de afdeling Maritieme Toegang werden samengesteld. Deze dataset heeft een horizontale resolutie van 5 m.

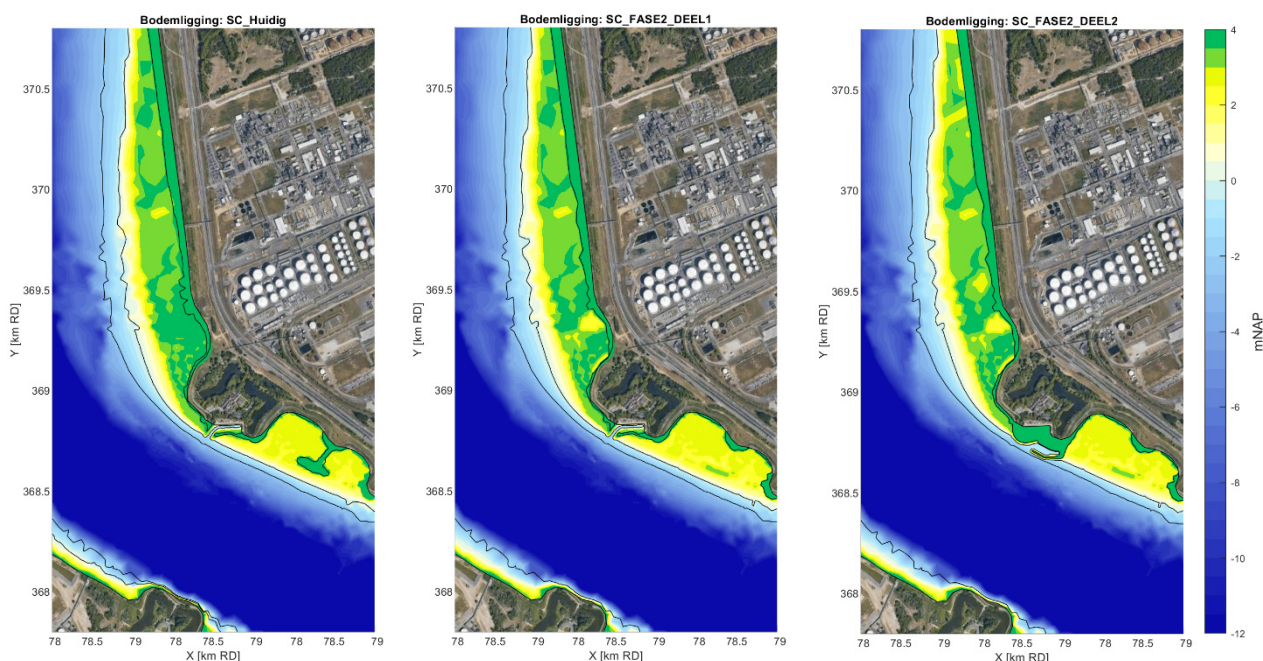
Toekomstige geometrische en bathymetrische wijzigingen in de nabijheid van het studiegebied, zoals de ontpoldering van de Hedwige-Prosperpolder of de realisatie van een nieuw getijdendok ter hoogte van Doel (i.e., Extra Containercapaciteit Antwerpen) zijn niet geïmplementeerd in de huidige modeloefening. Verwacht wordt dat zij maar een beperkte invloed zullen hebben in het studiegebied in vergelijking met lokale invloed op de stroming die de heraanleg van de jachthaven kan hebben.

In de referentierun, i.e. de huidige situatie, werd eveneens bathymetrische data uit 2019 geïmplementeerd op het verfijnde modelrooster. De LIDAR data die voor de intertidale en supratidale zones wordt gebruikt is afkomstig uit 2018.

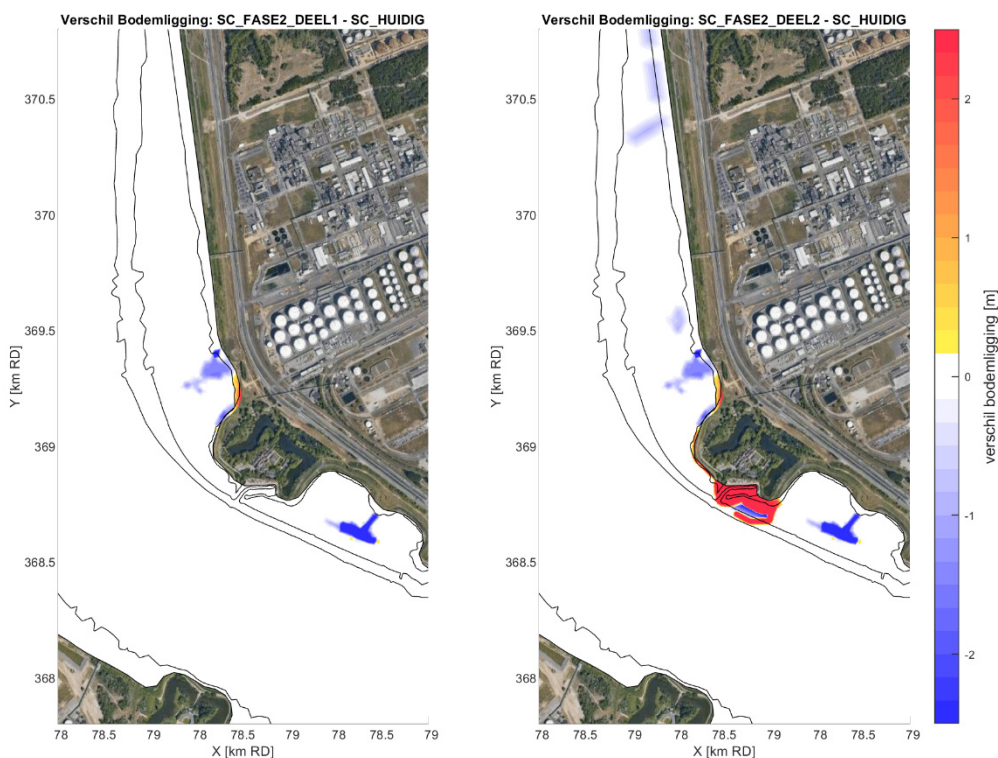
De bodemligging in het jachthaventje zelf varieert overigens tussen -0,6 en -1,2 m TAW langs de thalweg.

Implementatie bodemligging voor scenarioberekeningen

De bodemligging voor de twee aanvullende modelscenario's zoals gedefinieerd in sectie 1.2.1 wordt getoond in Figuur 7. Het verschil met de huidige situatie is in Figuur 8 weergegeven. In de figuren zijn de zones voor schoroptimalisatie duidelijk zichtbaar. Voor de bodemligging na Fase 2 – Deel 2 is daarnaast ook de verplaatsing van de jachthaven waarneembaar.



Figuur 7 – Geïmplementeerde bodemligging in huidige situatie (links) en voor Fase 2 – Deel 1 (midden) en Fase 2 – Deel 2 (rechts).



Figuur 8 – Verschil in bodemligging ten opzichte van huidige situatie voor scenario’s Fase 2 – Deel 1 (links) en Fase 2 – Deel 2 (rechts).

2.3 Randvoorwaarden

Simulatieperiode

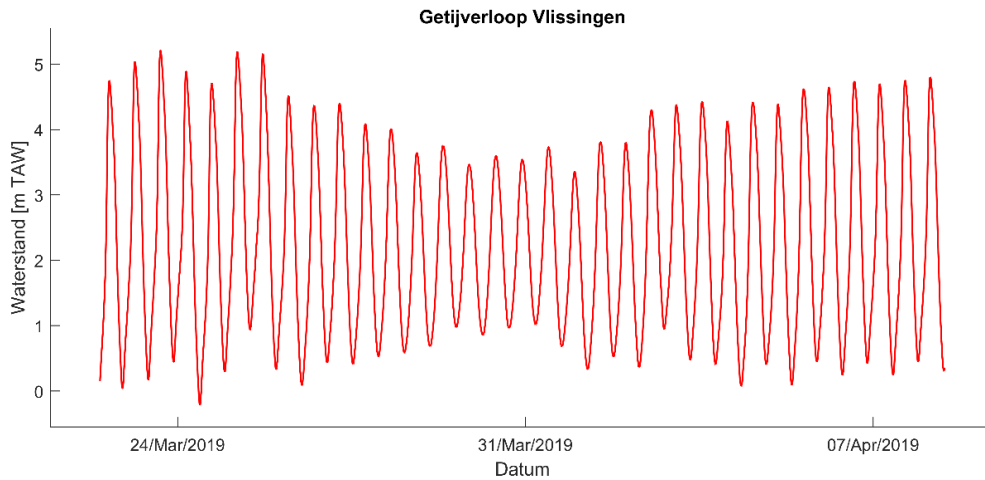
De simulatieperiode loopt van 22/03/2019 tot 08/04/2019. Uiteindelijk worden de modelresultaten van het springtij van 05/04/2019 gebruikt voor de scenario-analyse van de invloed van de ligging van de jachthaven.

Afwaartse randvoorwaarden

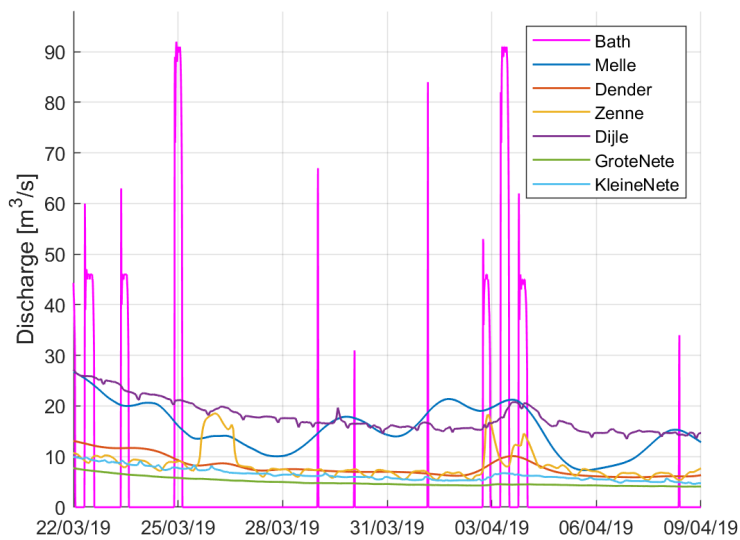
De afwaartse rand bevindt zich in de Noordzee (Figuur 5). De waterstands- en saliniteitsrandvoorwaarden voor de afwaartse rand worden verkregen door middel van nesting in de CSM-ZUNO modeltrein, een reeks van Noordzeemodellen waarmee o.a. waterstanden in de Belgische en Nederlandse kustzone kunnen worden gesimuleerd. Een beschrijving van deze modellen wordt gegeven door Chu *et al.*, (2020). Figuur 9 illustreert het opgelegd waterstandsverloop aan de afwaartse rand op basis van het gemeten waterstandsverloop in Vlissingen.

Opwaartse randvoorwaarden

De opwaartse randen van de Kleine Nete, Grote Nete, Dijle, Dender, Melle, Zenne en het Spuikanaal van Bath worden geforceerd met een gemeten bovenafvoer voor de simulatieperiode. Figuur 10 toont het verloop van de opgelegde rivierafvoeren voor de simulatieperiode. Het betreft hier relatief gematigde afvoeren aan de bovenarmen. Er wordt overigens geen invloed van de bovenafvoer op de analyseresultaten in dit rapport verwacht.



Figuur 9 – Getijverloop te Vlissingen voor hele simulatieperiode.



Figuur 10 – Bovenafvoer voor hele simulatieperiode.

2.4 Overige modelinstellingen

Voor meer details over de modelopzet en de modelinstellingen, waaronder het bodemruweheidsveld en de initiële verdeling van saliniteit, wordt verwezen naar het kalibratie- en validatierapport door Vanlede *et al.*, (2020) of naar de eerdere modelstudie voor Masterplan Lillo door Stark & De Maerschack (2021).

2.5 Postprocessing en analyse

Invloed op stroomsnelheden

De invloed van een nieuwe locatie van de jachthaven op de stroomsnelheden wordt, net als in de voorgaande modelstudie door Stark & De Maerschallck (2021), geanalyseerd aan de hand van illustratieve stroombeelden (i.e., stromingspatronen voor springtij tijdens vloed, hoogwater en eb) en aan de hand van de invloed op de maximum vloedstroming en maximum ebstroming. De maximum stroomsnelheden worden bepaald op basis van het springtij van 05/04/2019. In deze analyse gaat aandacht uit naar de stroomsnelheden in het studiegebied. Er zal met name worden gekeken naar veranderingen in de maximale stroomsnelheden op de omliggende intergetijdengebieden zoals het Galgenschoor en de voormalige potpolder Lillo.

In dit kader dient vermeldt te worden dat stroomsnelheden in zeer ondiepe zones en gebieden die droogvallen niet altijd adequaat worden gerepresenteerd in Telemac (i.e., onrealistische snelheidspieken rondom onderstroming en droogval). Om dergelijke onrealistische resultaten te vermijden wordt in de analyse enkel modeloutput gebruikt waarvoor geldt dat de waterdiepte $h > 0,05$ m.

Invloed op sedimentatiesnelheid

De potentiële invloed van de varianten op de sedimentatiesnelheid in de jachthaven en op de omliggende intergetijdengebieden wordt ingeschat op basis van gemodelleerde veranderingen in stromingspatronen en op basis van gemodelleerde veranderingen in bodemschuifspanningen. Hiervoor wordt de overschrijdingsfrequentie van een kritische bodemschuifspanning van $0,1 \text{ N/m}^2$ geanalyseerd. Bij dergelijk lage bodemschuifspanningen wordt geen omwoeling van sediment meer verwacht. Deze parameter geeft daardoor een indicatie van de meer dynamische en van de luwe zones in het studiegebied en met name in de intertidale zones. De bodemschuifspanningen worden, evenals de stroomsnelheden, berekend voor het springtij van 04/05/2019.

De bodemschuifspanning wordt volgens de Nikuradse formulering als volgt berekend in Telemac:

$$\begin{cases} \tau = \rho u_*^2 \\ U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \\ z_0 = \frac{k_s}{30} \end{cases}$$

waarin τ de bodemschuifspanning is [N/m^2]; ρ het soortelijk gewicht van water [kg/m^3]; u_* de wrijvingsnelheid is [m/s]; κ de Von Karman's constante [-] of 0,4; z_0 is de ruwheidslengte [m] en k_s de Nikuradse equivalente ruwheidshoogte [m].

Ook voor de analyse van de bodemschuifspanning geldt dat enkel modelresultaten worden gebruikt waarvoor de waterdiepte $h > 0,05$ m.

3 Resultaten

3.1 Invloed op stroomsnelheid

Voor de referentiesimulatie (i.e., huidige situatie) en voor de twee modelscenario's (i.e., Fase 2 – Deel 1 en Fase 2 – Deel 2) worden gemodelleerde stroombeelden getoond voor vier illustratieve fases van het springtij van 05/04/2019: maximum vloed (Figuur 11), hoogwater (Figuur 12), kentering hoogwater (Figuur 13) en maximum eb (Figuur 14).

De stroombeelden laten een hoge maximum stroming in de vaargeul zien tijdens de vloedfase. Rond hoogwater is de stroming in de vaargeul nog steeds opwaarts gericht. Aan de rand van de voormalige potpolder Lillo en langs het intertidaal is de stroomrichting op dat moment echter al omgekeerd in ebrichting. Dit leidt tot de vorming van een kleine neer ter hoogte van de ingang van het jachthaventje. De locatie en intensiteit van de neer verschillen licht tussen de modelscenario's, afhankelijk van de geometrie van de jachthaven. Bij kentering hoogwater is de neer weer verdwenen en begint de ebstroming te versterken langs het intertidaal aan de zijde van de voormalige potpolder en Fort Lillo. Later in de ebfase is de stroming in de volledige vaargeul afwaarts gericht, al is de ebstroming wel sterker aan de zijde van Fort Lillo dan aan de zijde van Fort Liefkenshoek.

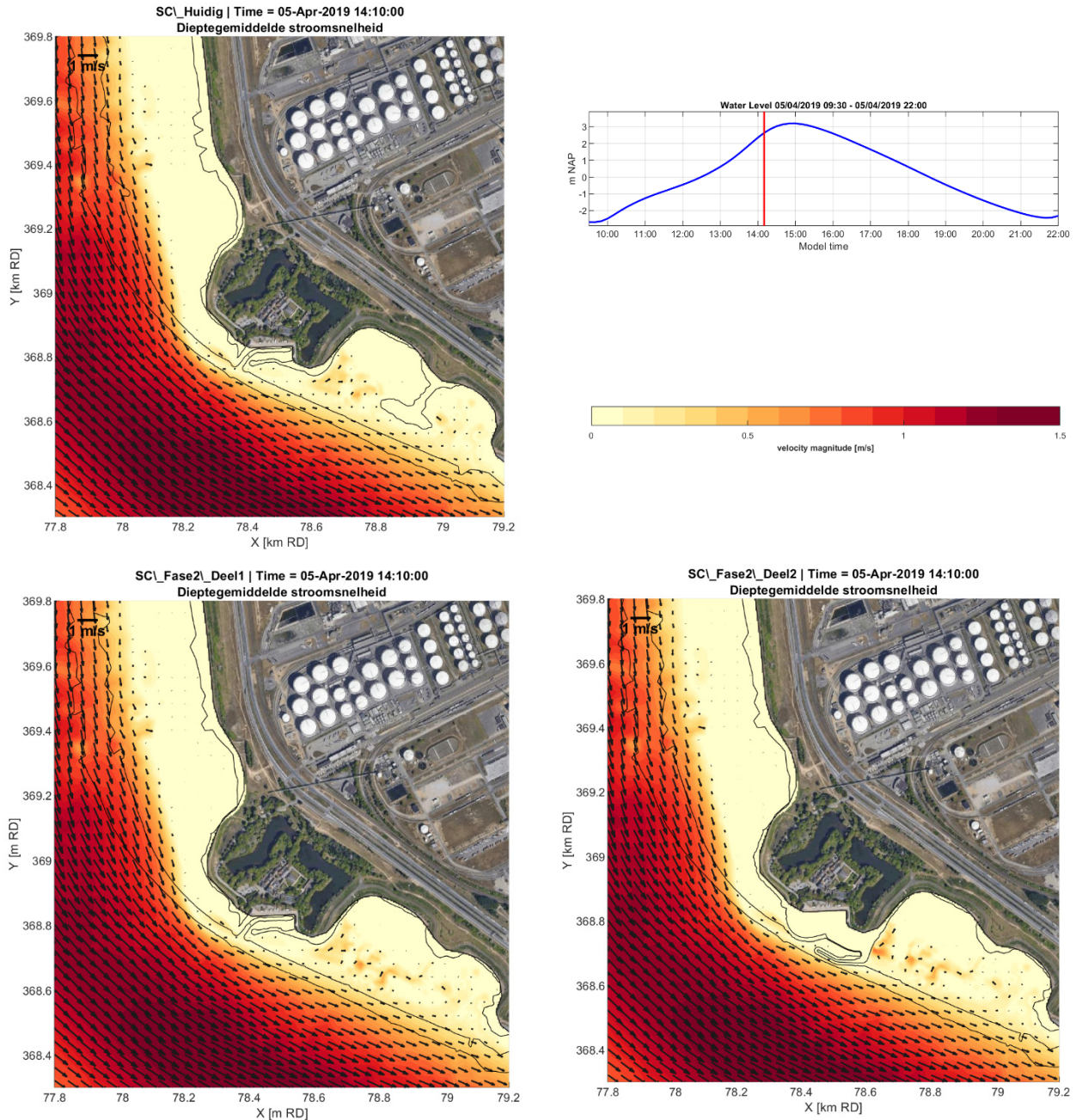
De maximale stroming tijdens de vloedfase en tijdens de ebfase van het springtij van 05/04/2019 wordt voor elk van de scenario's weergegeven in respectievelijk Figuur 15 en Figuur 16. Deze figuren bevatten ook een verschilplot ten opzichte van de referentierun, waarmee voor beide modelscenario's de invloed van de werkzaamheden op de stroompatronen geanalyseerd kan worden.

De uitvoering van de schorafgravingen in Fase 2 – Deel 1 leidt tot lokale veranderingen in de maximale stroomsnelheid in de voormalige potpolder Lillo. Ter plaatse van de afgraving van de dam en het voormalige vogeleiland nemen de stroomsnelheden lokaal toe tot maximaal 0,4 m/s voor het geanalyseerde springtij. Opvallend is dat de maximale stroming in het westelijk deel van de voormalige potpolder ook lokaal afneemt in een zone direct ten oosten van de jachthaven. Dit komt waarschijnlijk doordat de afgraving leidt tot een andere verdeling van de instroom in het gebied. Hierbij wordt opgemerkt dat de intertidale geultjes waarin de in- en uitstroom op het schorplatform zich concentreert slechts beperkt worden weergegeven door de resolutie van het model.

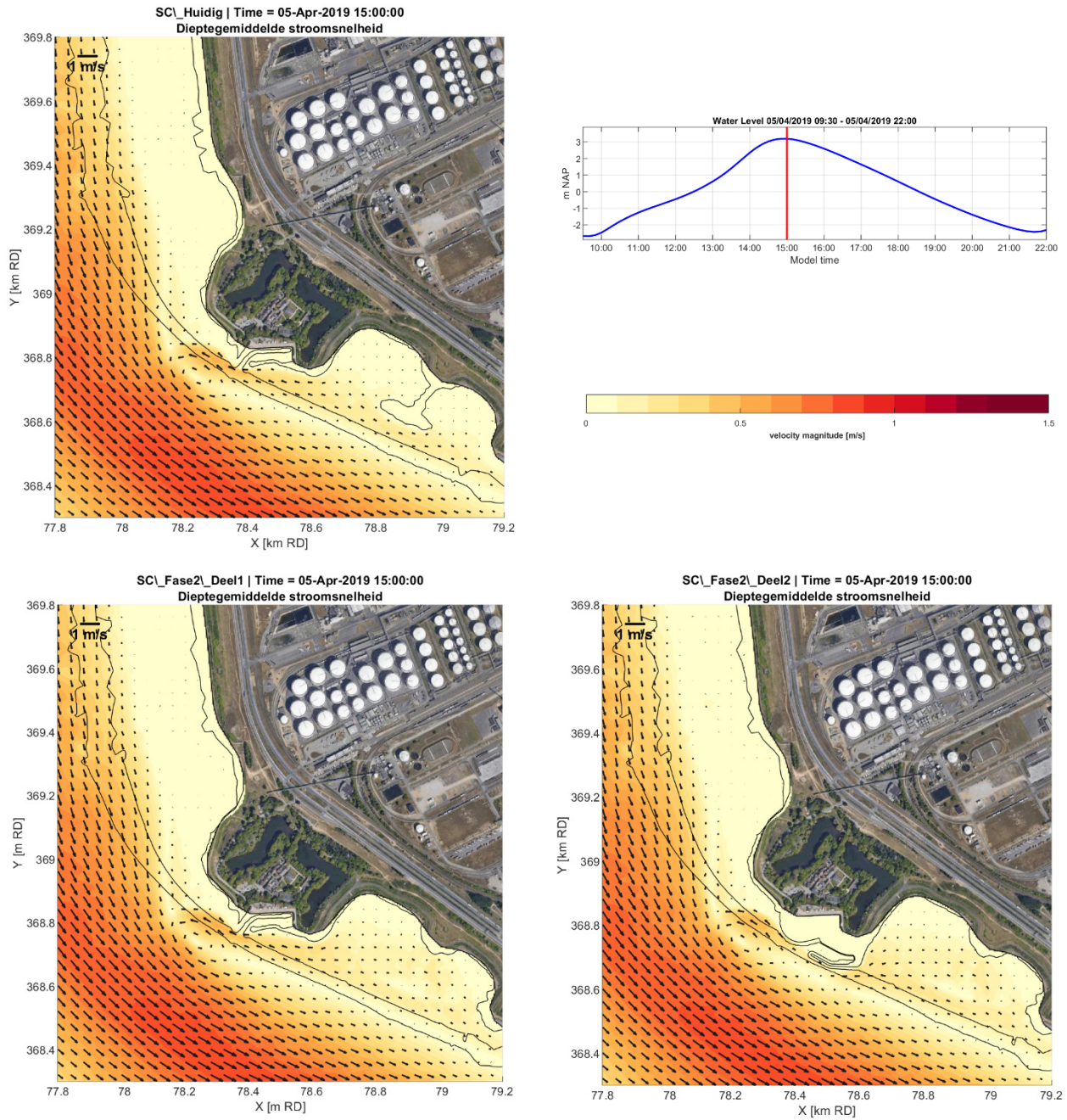
Het effect van de verplaatsing van de jachthaven in Fase 2 – Deel 2 werd al onderzocht door Stark & De Maerschack (2021). Op basis van de aanvullende modelberekeningen in de huidige studie kunnen identieke conclusies worden getrokken. Ter hoogte van de jachthaven zelf nemen de maximum stroomsnelheden uiteraard af. Tijdens de vloedperiode nemen de maximale stroomsnelheden aan de kant van het Galgenschoor lokaal wel iets toe. Dit is gerelateerd aan de locatie van de neer die zich rond hoogwater vormt. Deze neer bevindt zich iets verder afwaarts na verplaatsing van de jachthaven. Tijdens de ebfase wordt enkel een kleine vermindering van de stroomsnelheid in de directe omgeving van de jachthaven gemodelleerd. De invloedzone waarbinnen de stroming reduceert is beperkt tot maximaal 200 m opwaarts en afwaarts van de jachthaven.

De afgravingen in het Galgenschoor, zowel in Fase 2 – Deel 1 als in Fase 2 – Deel 2, leiden niet tot veranderingen in de gemodelleerde stroomsnelheden over het schorplatform. De stroomsnelheden op het schorplatform zijn te laag om met het toegepaste instrumentarium een merkbare invloed te modelleren.

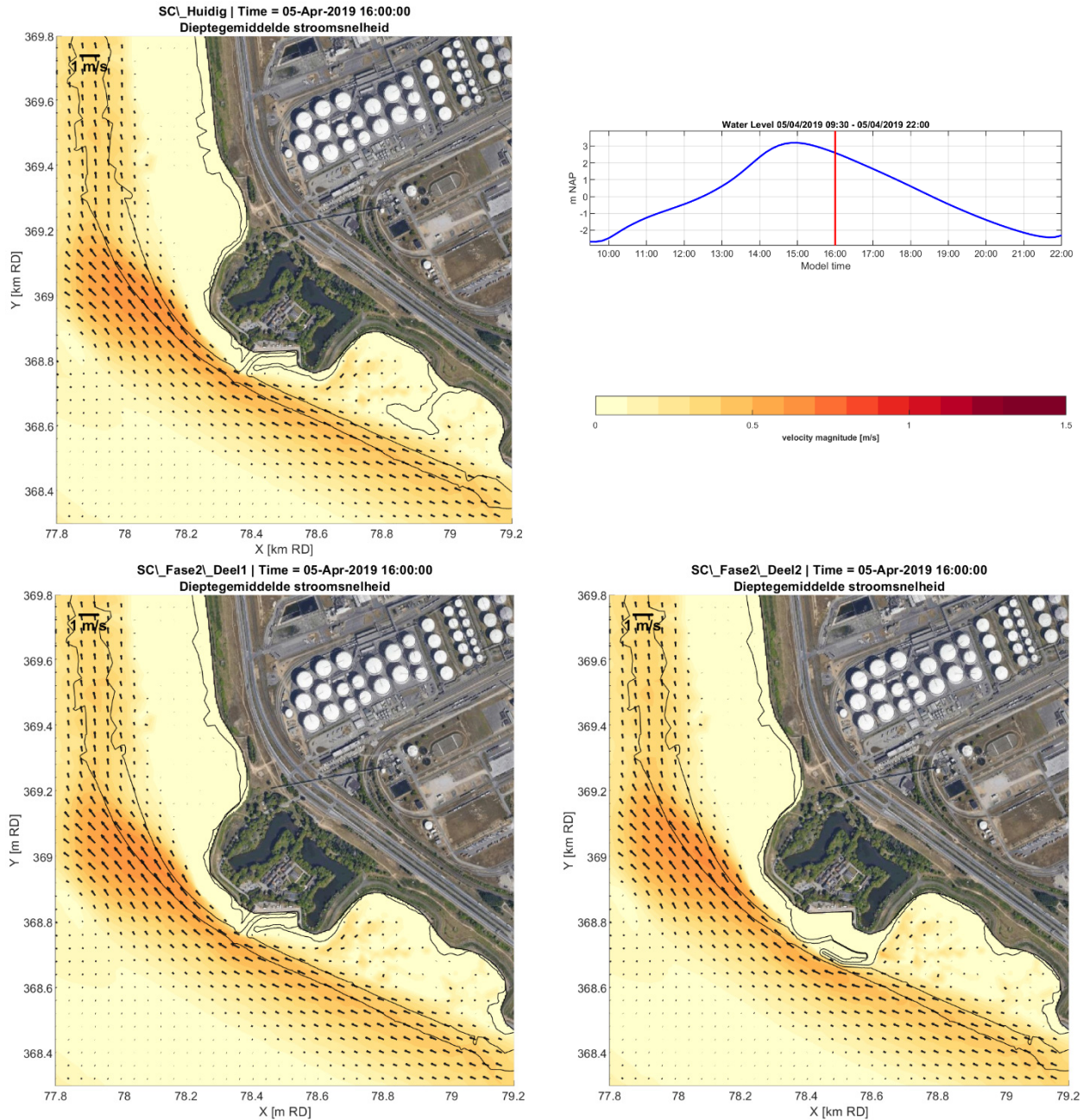
De effecten van deze afgravingen op de hydrodynamische condities zijn beperkt tot wijzigingen in overstromingsduur. Deze overstromingsduur of -frequentie kon op basis van de uitgevoerde modelsimulaties niet adequaat worden berekend voor het schorgebied. Het ontbreken van de kleine intertidale geultjes in de modelbodem leidt namelijk tot een gebrekkige drainage van ondergelopen zones, die daardoor continu overspoeld blijven. Een ruimtelijke verdeling van de overstromingsduur zou ten behoeve van een ecologische analyse met behulp van een GIS-bewerking wel bepaald kunnen worden op basis van de hoogteligging van het schorplatform en de lokale getijcurve. Dit valt buiten de scope van deze numerieke modelstudie.



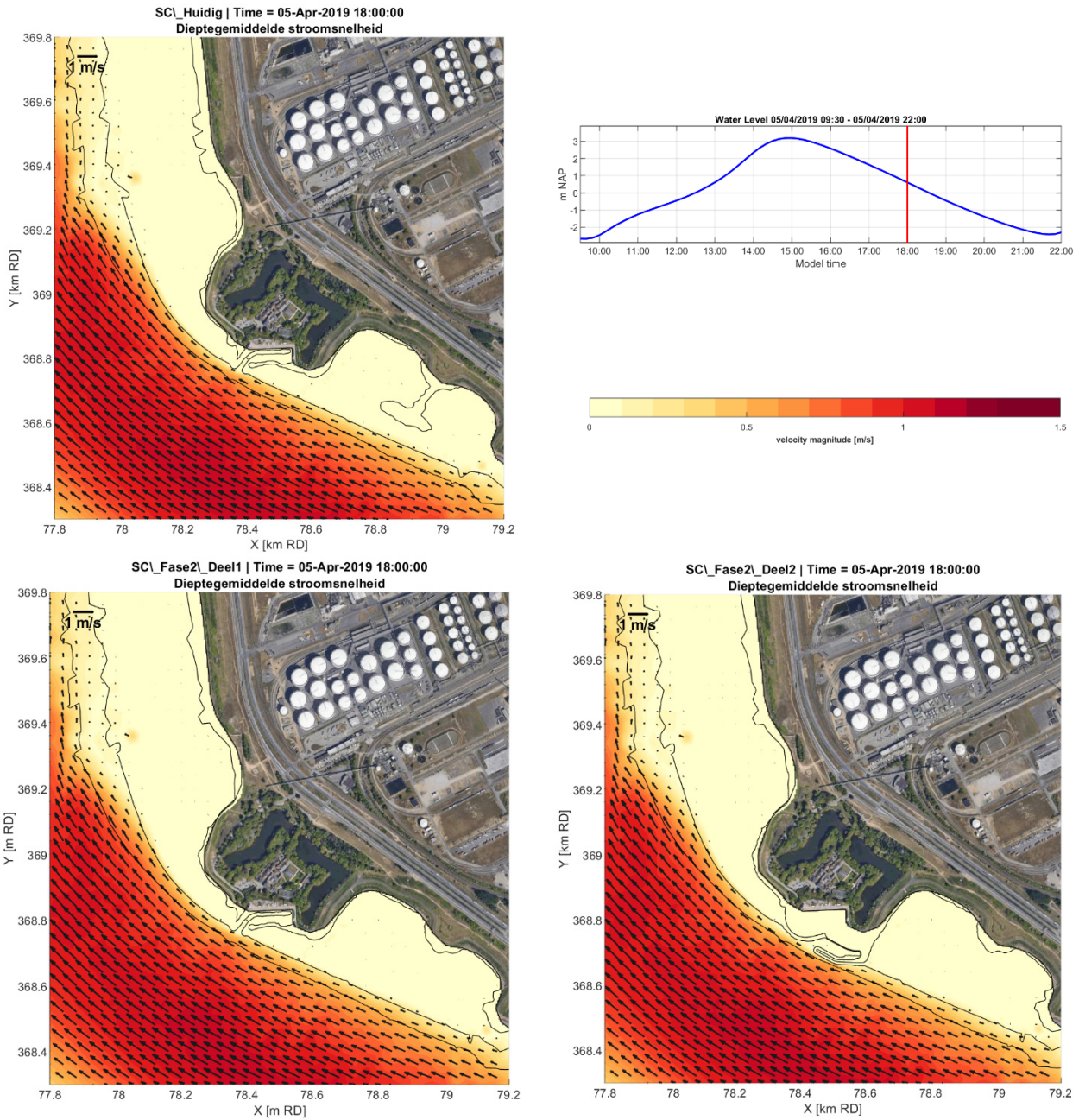
Figuur 11 – Gemodelleerde stroomvelden tijdens maximale vloed, ongeveer één uur voor hoogwater.



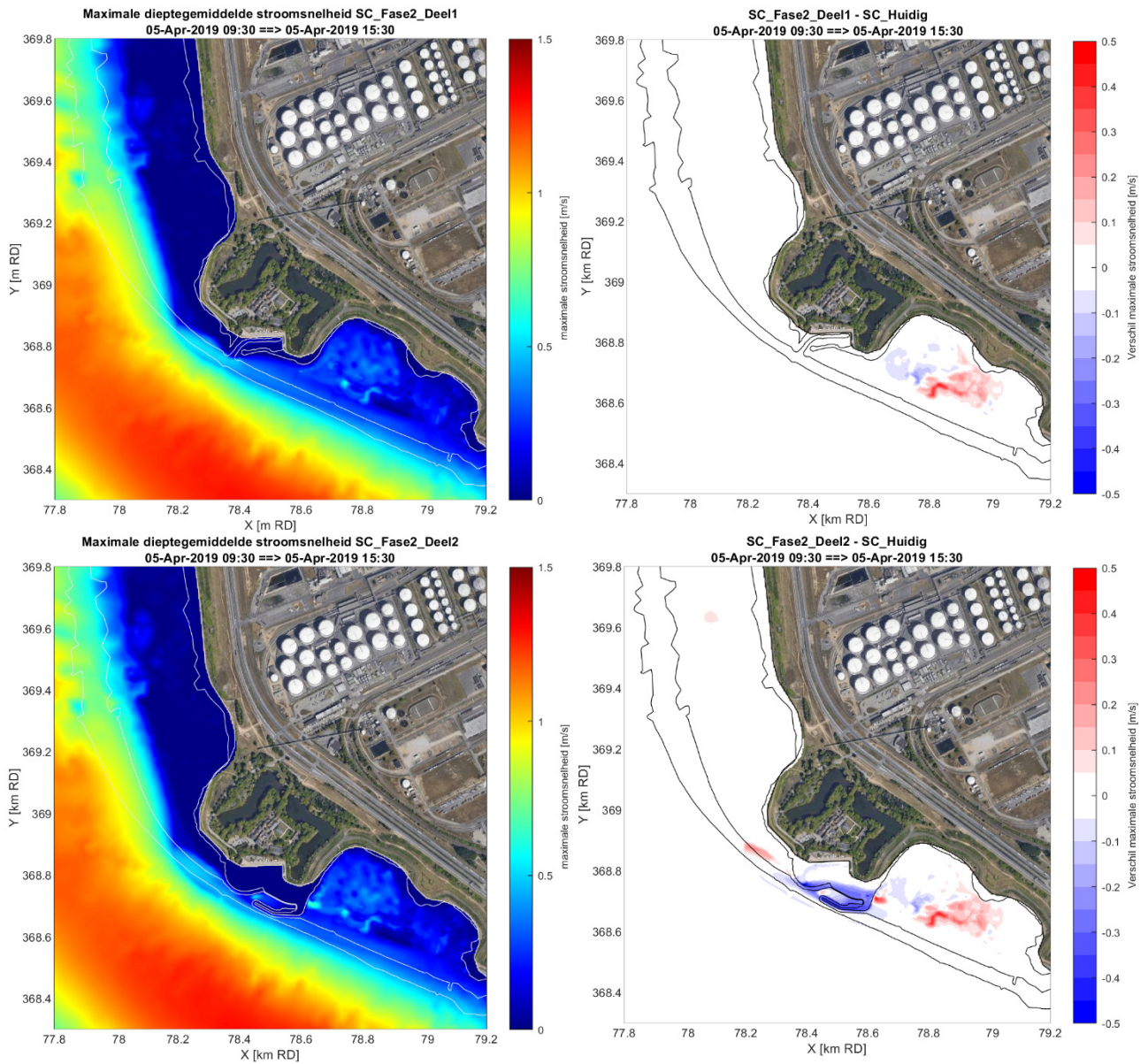
Figuur 12 – Gemodelleerde stroomvelden tijdens hoogwater.



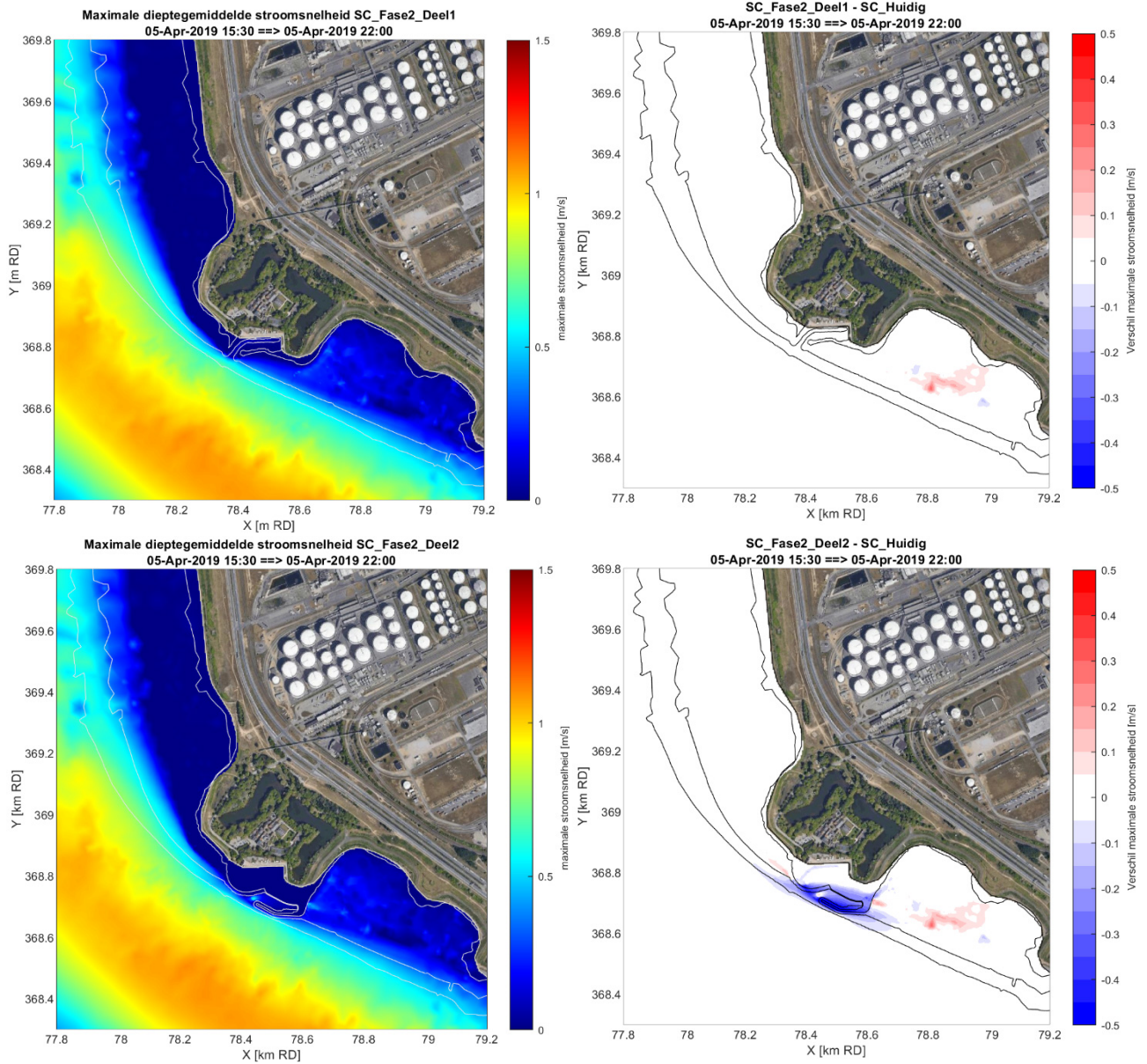
Figuur 13 – Gemodelleerde stroomvelden rond kentering hoogwater, ongeveer één uur na hoogwater.



Figuur 14 – Gemodelleerde stroomvelden tijdens eb, ongeveer drie uur na hoogwater.



Figuur 15 – Maximum stroomsnelheden tijdens vloedfase na uitvoering van Fase 2 – Deel 1 (linksboven) en Fase 2 – Deel 2 (linksonder), en verschil met de huidige situatie (rechts).



Figuur 16 – Maximum stroomsnelheden tijdens ebfase na uitvoering van Fase 2 – Deel 1 (linksboven) en Fase 2 – Deel 2 (linksonder), en verschil met de huidige situatie (rechts).

3.2 Inschatting verandering sedimentatiepatronen

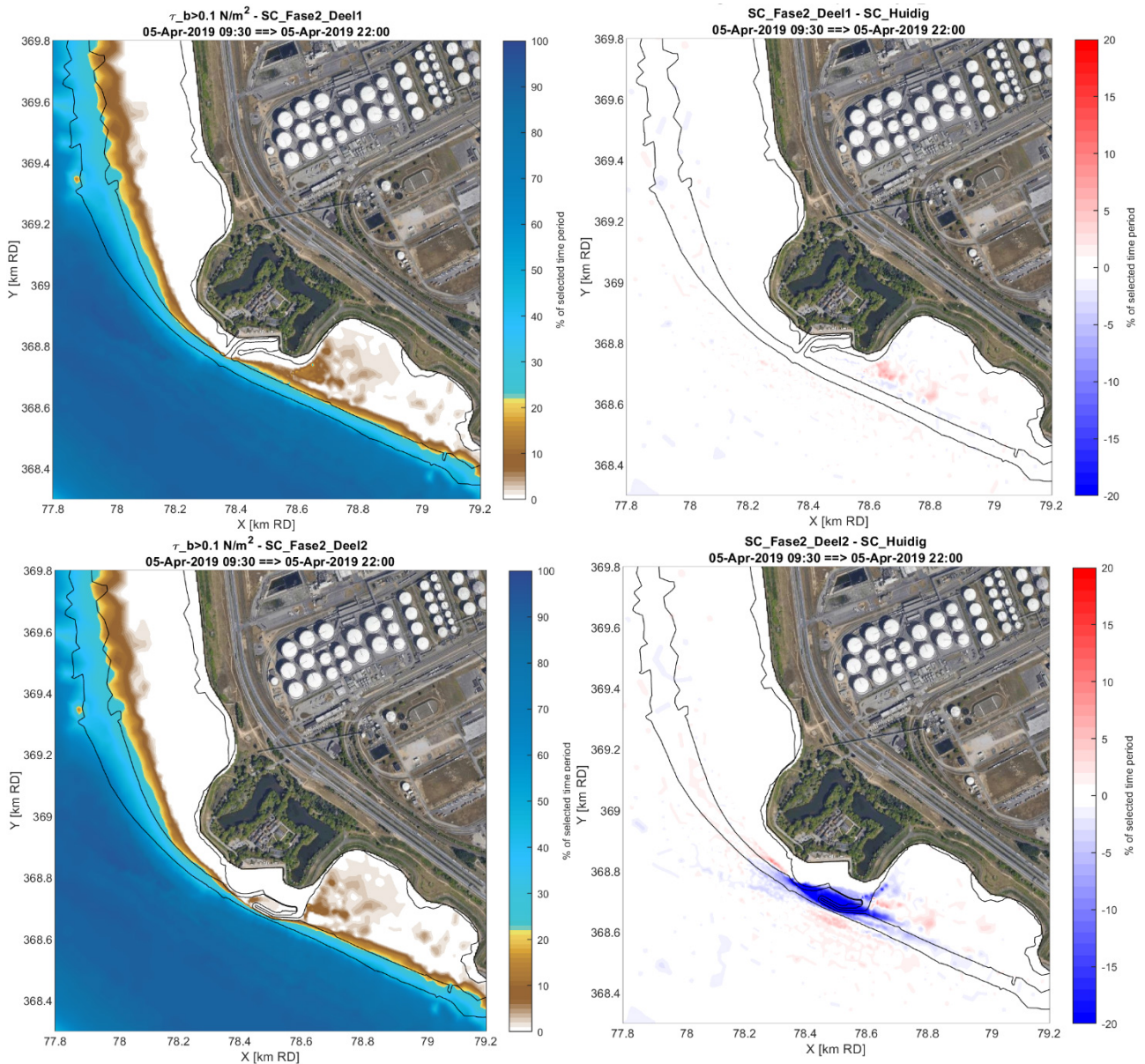
In Figuur 17 wordt de overschrijdingsfrequentie van een kritische bodemschuifspanning van $\tau_b > 0,1 \text{ Nm}^{-2}$ weergegeven als [%] van de tijd over de gehele getijcyclus voor modelscenario's Fase 2 – Deel 1 en Fase 2 – Deel 2. Een toename in deze overschrijdingsfrequentie kan een indicatie zijn voor een toenemende erodeerbaarheid van het sediment op de bodem en daarmee een afname van de ophogingssnelheid van de schorren of van de sedimentatiesnelheid in de jachthaventjes.

Na uitvoering van de schorafgravingen in de voormalige potpolder in Fase 2 – Deel 1 neemt de overschrijdingskans van $\tau_b > 0,1 \text{ Nm}^{-2}$ licht toe aan de zuidwestrand van het intergetijdengebied. Dit is gerelateerd aan een groter watervolume dat het gebied binnenstroomt en heeft als mogelijk gevolg dat de intertidale geulen zullen uitbreiden of dat er nieuwe geultjes zullen vormen. Dit effect wordt in Fase 2 – Deel 2 echter teniet gedaan door de lokale afname in stroomsnelheid en bodemschuifspanning als gevolg van de verplaatsing van de jachthaven.

De verplaatsing van de jachthaven in Fase 2 – Deel 2 heeft de grootste invloed op de bodemschuifspanningen in het studiegebied. Uiteraard neemt de overschrijdingsfrequentie van de kritische bodemschuifspanning van $0,1 \text{ Nm}^{-2}$ in de jachthaven zelf af ten opzichte van de huidige situatie tot waarden dichtbij 0%. Bij dergelijk lage waarden kan geconcludeerd worden dat quasi alle sediment dat binnenstroomt en bezinkt in de jachthaventjes daar niet meer zal eroderen. Dit is overigens ook het geval voor de jachthaven op de huidige locatie (i.e., in de referentierun). Er wordt dus geen wijziging in verticale ophogingssnelheid in het jachthaventje verwacht. Desalniettemin wordt de totale sedimentatie wel hoger ingeschat vanwege het grotere oppervlakte van de jachthaven na uitvoering van Fase 2 – Deel 2 (i.e., $\pm 5000 \text{ m}^2$ in de toekomstige situatie ten opzichte van $\pm 4000 \text{ m}^2$ in de huidige situatie). Dit kan aanleiding geven tot een toename van onderhoudsbaggerwerken in de jachthaven.

Net als voor de stroomsnelheden geldt dat de reductie in overschrijdingsfrequentie zich ook buiten de jachthaven uitstrekt over een zone langs de laagwaterlijn van ongeveer 200 m opwaarts en afwaarts van de havendammen. Hier ontstaat door het verplaatsen van de jachthaven een iets luvere zone met mogelijks (versnelde) ophoging van het slik tot gevolg. In een kleine zone direct ten zuiden van de jachthaven neemt de overschrijdingskans van $\tau_b > 0,1 \text{ Nm}^{-2}$ juist licht toe. Dit is echter een subtidale zone, waardoor geen direct effect op erosie- of sedimentatiepatronen van het intergetijdengebied wordt verwacht.

De schorafgravingen en optimalisaties op het Galgenschoor in Fase 2 – Deel 1 en Fase 2 – Deel 2 leiden op basis van de modelberekeningen niet tot significante wijzigingen in de overschrijdingsfrequentie van kritische bodemschuifspanningen. Evenals de stroomsnelheden blijven ook de bodemschuifspanningen op het afgegraven schorplatform zeer laag. Dit is gerelateerd aan de hoogteligging van TAW +5m. Hierbij wordt wel opgemerkt dat de voorgestelde afgravingen op het Galgenschoor te kleinschalig zijn om lokale effecten met het toegepaste Scaldis2019 model te analyseren. De interactie tussen het schorplatform en de veelal zeer kleine intertidale geultjes wordt bijvoorbeeld niet gesimuleerd omwille van de modelresolutie.



Figuur 17 – Overschrijdingsfrequentie van $\tau_b > 0,1 \text{ Nm}^{-2}$ in % na uitvoering van Fase 2 – Deel 1 (linksboven) en na uitvoering van Fase 2 – Deel 2 (linksonder), en rechts de verandering van de overschrijdingsfrequentie in % t.o.v. de huidige situatie.

4 Conclusies

In dit rapport werd een scenario-analyse gepresenteerd over de hydrodynamische invloed van werkzaamheden die deel uitmaken van het Masterplan van Lillo (i.e., Fase 2 – Deel 1 en Fase 2 – Deel 2). Het rapport vormt een aanvulling op eerder modelonderzoek door Stark & De Maerschack (2021), waarin het effect van de verplaatsing van de jachthaven van Lillo reeds werd onderzocht.

Er is gebruik gemaakt van het door het Waterbouwkundig Laboratorium ontwikkelde Scaldis-2019 model in Telemac-3D. Voor dit model werd in het kader van het huidige scenario-onderzoek een nieuw modelrooster aangemaakt met een verfijning in het studiegebied rondom Fort Lillo. Vervolgens werden modelscenario's opgezet waarin de geometrie en bathymetrie voor Fase 2 – Deel 1 (optimalisaties schorplatform in Potpolder Lillo en zuidelijk deel Galgenschuur; Figuur 3) en Fase 2 – Deel 2 (i.e., verplaatsing jachthaven en aanvullende optimalisaties Galgenschuur; Figuur 4) werden geïmplementeerd. De effecten van beide uitvoeringsfases kunnen zo afzonderlijk worden geanalyseerd. Hieronder worden per uitvoeringsfase de belangrijkste bevindingen opgesomd:

Effecten Fase 2 – Deel 1

De modelresultaten voor Fase 2 – Deel 1 laten ten opzichte van de referentiesimulatie (i.e., huidige situatie) alleen zeer kleinschalige en lokale effecten zien voor de stroomsnelheden en stromingspatronen.

De afgraving van de dam in de voormalige potpolder Lillo heeft een beperkt lokaal effect op het stroompatroon. Uiteraard neemt de stroomsnelheid toe op het afgegraven gedeelte, aangezien de hoogte momenteel supratidaal is. Daarnaast tonen de modelresultaten een toename in bodemschuifspanning langs de rand van de voormalige potpolder, als gevolg van de toegenomen in- en uitstroomvolumes. Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat de intertidale geultjes door het slik die het gebied draineren waarschijnlijk zullen uitbreiden (vermeerderen, verbreden en/of verdiepen) als gevolg van de afgraving.

De lokale afgraving van het schorplatform op het Galgenschuur ten noorden van Fort Lillo heeft op basis van de modelresultaten geen significante wijziging in de stroming over het schorplatform tot gevolg. Uiteraard neemt de overspoelingsduur wel toe door het verlagen van het schorplatform naar TAW + 5m. Bovendien kunnen ook hier lokaal kleine geultjes of inkepingen op het slik ontstaan als gevolg van het toegenomen drainagevolume na de afgraving. Dergelijke effecten zijn echter te kleinschalig om met het toegepaste hydrodynamische model te beschouwen.

Effecten Fase 2 – Deel 2

De verplaatsing van de jachthaven in Fase 2 – Deel 2 heeft de grootste invloed op de hydrodynamica in het studiegebied. Het effect hiervan werd al onderzocht en gerapporteerd door Stark & De Maerschack (2021). De modelsimulatie voor Fase 2 – Deel 2 in de huidige studie geeft quasi-identieke resultaten. De verplaatsing van de jachthaven induceert een luwe zone langs de laagwaterlijn die zich uitstrekt van ongeveer 200 m afwaarts van de jachthaven tot 200 m opwaarts van de havendam. Deze luwte kan de toename in hydrodynamiek langs de rand van de voormalige potpolder, die als gevolg van de afgravingen bij het broedeiland wordt verwacht, deels teniet doen. Aan de kant van het Galgenschuur neemt de maximale stroomsnelheid in een zeer beperkt gebied toe als gevolg van een heroriëntatie van de ebstroming en de neer die hier rond hoogwater ontwikkelt. Er wordt geen invloed verwacht van de verplaatsing van de jachthaven op de stroming in de hoofdgeul van de Schelde of bij de wachtsteigers voor de binnenvaart die ten zuiden van Fort Lillo gelegen zijn.

De modelsimulaties laten geen wijziging in stroomsnelheden zien in de jachthaventjes zelf. Deze zijn in zowel de huidige situatie als na verplaatsing van de jachthaven zeer laag waardoor waarschijnlijk quasi-alle sediment dat in de jachthaventjes bezinkt daar zal accumuleren. Op basis van de hydrodynamische modelresultaten wordt daarom geen wijziging in verticale ophogingssnelheid in de jachthaven verwacht na uitvoering van het Masterplan. Omwille van het verschil in oppervlakte van de jachthaventjes kan het totale baggerbezwaar wel licht toenemen. Ook is de sedimentatiesnelheid in de jachthaven afhankelijk van de lokale sedimentconcentratie in de Schelde. Als deze in de toekomst wijzigt, dan heeft dat direct invloed op de sedimentatie in de jachthaven en op de ophogingssnelheid van de omliggende intergetijdengebieden.

Voor de aanvullende afgravingen op het Galgenschoor in Fase 2 – Deel 2 wordt op basis van de modelresultaten geen significante invloed op de hydrodynamica verwacht, buiten een toename in overstromingsduur. Er wordt verwacht dat de afgegraven zones gelijkaardig hydro-morfologisch gedrag vertonen als het omliggende schorgebied. Ook hiervoor geldt dat deze afgravingen en de effecten ervan op de lokale stroming door intertidale geultjes te kleinschalig zijn om met het toegepaste hydrodynamisch model te simuleren.

Referenties

Chu, K.; Vanlede, J.; Decrop, B.; Mostaert, F. (2020). Validation of North Sea models: sub report 1. Validation and sensitivity analysis. Version 3.0. *FHR reports*, 19_058_1. Flanders Hydraulics Research: Antwerp.

Smolders, S.; Maximova, T.; Vanlede, J.; Plancke, Y.; Verwaest, T.; Mostaert, F. (2016). Integraal plan Bovenzeeschedde: Subreport 1. SCALDIS: a 3D Hydrodynamic model for the Scheldt Estuary. *WL Rapporten*, 13_131. Flanders Hydraulics Research: Antwerp.

Stark, J.; De Maerschalck, B. (2021). Scenario-onderzoek Masterplan Lillo: hydrodynamische modelberekeningen. Versie 2.0. *WL Rapporten*, 21_070_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Vanlede, J.; Chu, K.; Smolders, S.; Decrop, B.; Mostaert, F. (2020). Update SCALDIS 2019: a 3D hydrodynamic model of the Scheldt Estuary: calibration report. Version 3.. *FHR reports*, PA016_1. Flanders Hydraulics Research: Antwerp.

DEPARTEMENT **MOBILITEIT & OPENBARE WERKEN**

Waterbouwkundig Laboratorium

Berchemlei 115, 2140 Antwerpen

T +32 (0)3 224 60 35

F +32 (0)3 224 60 36

waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be

www.waterbouwkundiglaboratorium.be