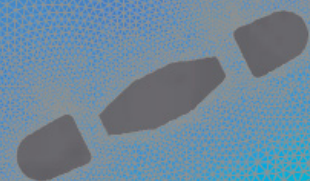
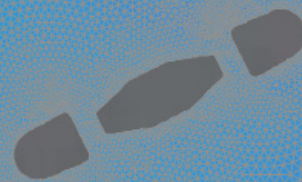




Vlaanderen
is wetenschap



21_113_2
WL rapporten

Antwerpen

Oeververbinding tussen linker- en rechteroever

Deelrapport 2
Hydrodynamische modellering brugpijlers

DEPARTEMENT
MOBILITEIT &
OPENBARE
WERKEN

waterbouwkundiglaboratorium.be

Antwerpen

Oeververbinding tussen linker- en rechteroever

Deelrapport 2 – Hydrodynamische modellering brugpijlers

Stark, J.; De Maerschalk, B.

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 2023
D/2023/3241/014

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

Stark, J.; De Maerschallck, B. (2023). Antwerpen Oeververbinding tussen linker- en rechteroever: Deelrapport 2 – Hydrodynamische modellering brugpijlers. Versie 3.0. WL Rapporten, 21_113_2. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

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

Documentidentificatie

Opdrachtgever:	De Vlaamse Waterweg – Regio Centraal	Ref.:	WL2023R21_113_2
Trefwoorden (3-5):	Hydrodynamische modellering; TELEMAR; Oeververbinding; Stroomsnelheden		
Kennisdomeinen:	Hydraulica en sediment > Hydrodynamica > Stroomsnelheden -en patronen > Numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	31	Bijlagen (p.):	17
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

Auteur(s):	Stark, J.; De Maerschallck, B.
------------	--------------------------------

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	De Maerschallck, B.	Getekend door: Bart De Maerschallck (Sig) Getekend op: 2023-01-27 13:50:45 +01:0 Reden: lk keur dit document goed <i>Bart De Maerschallck</i>
Projectleider:	Eloot, K.	Getekend door: Katrien Eloot (Signature) Getekend op: 2023-01-27 13:50:02 +01:0 Reden: lk keur dit document goed <i>Katrien Eloot</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkannm Bellafkih (Sign) Getekend op: 2023-01-29 15:35:03 +01:0 Reden: lk keur dit document goed <i>Abdelkannm Bellafkih</i>
-----------------	---------------	---

Abstract

Om de toegankelijkheid van Antwerpen voor fietsers te verhogen en een *modal shift* in het personenverkeer te ondersteunen voorziet het project “OVER DE RING” in de aanleg van een Scheldebrug voor fietsers ter hoogte van de Kennedytunnel.

Voorliggend rapport analyseert op basis van modelsimulaties het effect van de brugpijlers op de lokale stromingspatronen en de ontwikkeling van het slik op linkeroever ter hoogte van de fietsbrug.

De pijlers leiden tot een significante verhoging van de stroming ter hoogte van de vaargeul. De nautische impact van deze toename wordt verder geanalyseerd in deelrapport 3 (Eloot *et al.*, 2023). De impact is echter niet enkel beperkt tot de vaargeul, maar ook ter hoogte van het intertidaal op linkeroever is een verhoogde stroming en daarmee ook verhoogde bodemschuifspanning waarneembaar, en dan vooral opwaarts van de Kennedytunnel. Afwaarts de Kennedytunnel is de impact van de brug eerder beperkt. Het wordt daarom aanbevolen om tijdens en na de bouw van de pijlers de evolutie van intertidaal dat mogelijk gevoelig zal zijn voor erosie nauwlettend op te volgen en indien nodig erosiebeschermende maatregelen te nemen.

Tevens werd de impact van de aanleg van een onderwatersteunberm ter hoogte van de kade op rechteroever geanalyseerd. De onderwaterberm heeft tot doel het stabiliseren van de oude kaaimuren. Verschillende varianten werden beproefd. De extra impact van de onderwaterbermen op de stroming in de vaargeul en ter hoogte van het slik op linkeroever is echter beperkt en verwaarloosbaar in vergelijking met de impact die de brugpijlers hebben.

Inhoudstafel

Abstract	III
Inhoudstafel.....	V
Lijst van de tabellen.....	VII
Lijst van de figuren	VIII
1 Inleiding	1
1.1 Situering.....	1
1.2 Studiegebied en scenario's.....	1
1.3 Doelstelling	3
1.4 Leeswijzer	4
2 Modelbeschrijving	5
2.1 Rekenrooster	5
2.2 Bathymetrie.....	6
2.3 Randvoorwaarden	6
2.3.1 Simulatieperiode	6
2.3.2 Opwaartse en afwaartse randvoorwaarden	6
2.4 Validatie – model performantie	7
2.5 Modelaanpassingen.....	8
2.5.1 Roosteraanpassingen – Implementatie brugpijlers.....	8
2.5.2 Aanpassingen bathymetrie voor de steunbermen.....	11
2.5.3 Aangepaste modelinstellingen	12
2.6 Postprocessing en analyse.....	13
2.6.1 Invloed op stroomsnelheden.....	13
2.6.2 Invloed op bodemschuifspanningen	13
3 Resultaten.....	15
3.1 Invloed brugpijlers op lokale hydrodynamica	15
3.1.1 Stroming	15
3.1.2 Bodemschuifspanning	21
3.2 Effecten steunberm	24
3.2.1 Stroming	24
3.2.2 Bodemschuifspanning	28

4	Discussie en conclusies.....	30
4.1	Aanbevelingen.....	30
	Referenties	31
	Bijlage A – Modelinstellingen	B1
	Bijlage B – Gevoeligheidsanalyse rekenrooster.....	B2
	Resolutie en tijdstap.....	B2
	<i>Mixing Length</i> Turbulentiemodel en -parameterinstellingen	B9
	Bijlage C – Gevoeligheidsanalyse: stroming achter de pijlers	B14

Lijst van de tabellen

Tabel 1 – Modelscenario's.....	3
Tabel 2 – Representatie van het verticaal getij in op basis van BIAS, RMSE en RMSE0.....	7
Tabel 3 – Parameterinstellingen BeZS-model.	B1
Tabel 4 – Model runs gevoeligheidsanalyse gridresolutie en tijdstap	B2
Tabel 5 – Model runs gevoeligheid CL.....	B10

Lijst van de figuren

Figuur 1– Overzichtskaart van het studiegebied nabij de Kennedytunnel in de Beneden-Zeeschelde.....	1
Figuur 2 – Schets steunberm <i>optie 2</i> . De kruin van de berm ligt op -1,5 m TAW	2
Figuur 3 – Schets steunberm <i>optie 3</i> met kruinhoogte -5,75 m TAW en een afgraving van de oever tot 0 m TAW en nieuw aangelegd talud.....	2
Figuur 4 – Afmetingen steunberm in verschillende configuraties.	3
Figuur 5 – Modeldomein.	5
Figuur 6 – Gemodelleerde springtij-doodtijcyclus. In rood gemarkeerd is het springtij voor de nautische analyse.....	6
Figuur 7 – Gemodelleerde (dieptegemiddelde) en gemeten (4,5m boven de bodem) stroomsnelheden HIC meetstation Oosterweel.....	7
Figuur 8 – Gemeten en gemodelleerde dieptegemiddelde stroomsnelheid over een raai bij Oosterweel bij maximale eb (links, 11/05/2016 – 9:40) en maximale vloed (rechts, 11/05/2016 – 18:20).....	8
Figuur 9 – Aanpassing van het rekenrooster in het interessegebied, met uitsnijding van de structuren van de brugpijlers (scen012, scen018 en scen020)	9
Figuur 10 – Detail van het rooster rond de pijler structuren (noordelijke pijler): 1,5 m resolutie bij de pijlers	9
Figuur 11 – Rekenrooster scenario steunberm optie 3, lange versie met verlaagde kaai en talud (scen023)	10
Figuur 12 – Detail van het rekenrooster referentierun (ref005).....	10
Figuur 13 – Implementatie onderwatersteunbermen in modelbathymetrie.	11
Figuur 14 – Dwarsdoorsnede ter hoogte van de brug voor de huidige toestand en de verschillende scenario's.	12
Figuur 15 – Dwarsdoorsnede 250 m opwaarts van de brug voor de huidige toestand en de verschillende scenario's.....	12
Figuur 16 – Gemodelleerde stroomvelden tijdens maximale vloed	16
Figuur 17 – Gemodelleerde stroomvelden tijdens maximale eb.....	17
Figuur 18 – Maximale snelheden tijdens eb en vloed ter hoogte van de brug scen012 (scen012 – pijlers zonder onderwatersteunbermen).....	18
Figuur 19 – Dieptegemiddelde snelheid centraal in de vaargeul bij springtij 2/4/2018 (zie Figuur 6) met (scen012) en zonder (ref005) brugpijlers	19
Figuur 20 – Dieptegemiddelde snelheid op het slik (2,5 m TAW) bij springtij 2/4/2018 (zie Figuur 6) met (scen012) en zonder (ref005) brugpijlers	19
Figuur 21 – Verschil in maximale stroming voor springtij-vloed (boven), springtij-eb (midden) en over de gehele springtij-doodtij cyclus (onder).....	20
Figuur 22 – Overschrijdingsfrequentie $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$ in referentierun (boven), run met brugpijlers (midden) en verschilplot (onder).	22

Figuur 23 – Maximale bodemschuifspanning in referentierun (boven), run met brugpijlers (midden) en verschilplot (onder). 23

Figuur 24 – Lithologische kaart 2009-2010 24

Figuur 25 – Dieptegemiddelde snelheid centraal in de vaargeul bij springtij 2/4/2018 voor de verschillende scenario's..... 25

Figuur 26 – Dieptegemiddelde snelheid op het slik (2,5 m TAW) bij springtij 2/4/2018 voor de verschillende scenario's..... 25

Figuur 27 – Verschil in maximale stroomsnelheid over de volledige springtij-doodtij cyclus tussen de scenario's met onderwatersteunberm en scen012 (i.e., brugpijlers zonder steunberm; links) en referentierun ref005 (i.e., huidige toestand; rechts). 26

Figuur 28 – Max currents transect LO-RO verbinding, scen020 - Brug met RO steunberm optie 2 (-1,5 mTAW) lange berm..... 27

Figuur 29 – Max currents transect LO-RO verbinding, scen023 - Brug met RO steunberm optie 3 (-5,75 mTAW) lange berm..... 27

Figuur 30 – Verschil in overschrijdingsfrequentie $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$ tussen de scenario's met onderwatersteunberm en scen012 (i.e., brugpijlers zonder steunberm; links) en referentierun ref005 (i.e., huidige toestand; rechts). 29

Figuur 31 – Detail rooster scen004 – 2 m resolutie bij de pijlers..... B3

Figuur 32 – Detail rooster scen004 – 1,5 m resolutie bij de pijlers..... B3

Figuur 33 – Locaties van de observatiepunten voor onderstaande tijdseries B4

Figuur 34 – Gemodelleerde stroomsnelheid Afwaarts B5

Figuur 35 – Gemodelleerde stroomsnelheid Opwaarts B5

Figuur 36 – Gemodelleerde stroomsnelheid Rechteroever B5

Figuur 37 – Gemodelleerde stroomsnelheid Vaargeul tussen de pijlers B6

Figuur 38 – Gemodelleerde stroomsnelheid Vaargeul Binnevaart..... B6

Figuur 39 – Gemodelleerde stroomsnelheid Linkeroever slik (2,5 m TAW) B6

Figuur 40 – Vergelijking scen004: $\Delta x \approx 2m$, $\Delta t = 0,50s$ (links) en scen008: $\Delta x \approx 1,5m$, $\Delta t = 0,25s$ (rechts) - 01/04/2018 04:20:00 (tijdstep 27) B7

Figuur 41 – Vergelijking scen004: $\Delta x \approx 2m$, $\Delta t = 0,5s$ (links) en scen008: $\Delta x \approx 1,5m$, $\Delta t = 0,25s$ (rechts) - 01/04/2018 20:30:00 (tijdstep 124) B7

Figuur 42 – Vergelijking scen008: $\Delta x \approx 1,5 m$, $\Delta t = 0,25 s$ (links) en scen009: $\Delta x \approx 1,5 m$, $\Delta t = 0, 5 s$ (rechts) B8

Figuur 43 – vergelijking scen004: $\Delta x \approx 2,5 m$, $\Delta t = 0,5 s$ (links); scen008: $\Delta x \approx 1,5 m$, $\Delta t = 0,25 s$ (rechts); scen009: $\Delta x \approx 1,5 m$, $\Delta t = 0,5 s$ (onder)..... B8

Figuur 44 – Variabele mixing length coëfficiënt C_L als functie van getij en waterdiepte zoals geïmplementeerd in BeZS-model..... B9

Figuur 45 – scen009 - variabele C_L , bij vloedstroom (links) en ebstroom (rechts) B10

Figuur 46 – scen012 – $C_L = 0,26$ (T2D Default value), bij vloedstroom (links) en ebstroom (rechts) B10

Figuur 47 – scen013 – $C_L = 2,66$ (10 x T2D Default value), bij vloedstroom (links) en ebstroom (rechts).... B11

Figuur 48 – scen014 – $C_L = 1,25$; bij vloedstroom (links) en ebstroom (rechts) B11

Figuur 49 – scen015 – k- ϵ turbulence model; bij vloedstroom (links) en ebstroom (rechts)..... B11

Figuur 50 – Gemodelleerde stroomsnelheid - Afwaarts B12

Figuur 51 – Gemodelleerde stroomsnelheid – Opwaarts B12

Figuur 52 – Gemodelleerde stroomsnelheid - Rechteroever..... B12

Figuur 53 – Gemodelleerde stroomsnelheid - Vaargeul tussen de pijlers B13

Figuur 54 – Gemodelleerde stroomsnelheid - Vaargeul Binnevaart..... B13

Figuur 55 – Gemodelleerde stroomsnelheid - Linkeroever slik B13

Figuur 56 – Flow over a circular cylinder..... B14

Figuur 57 – Flow over a circular cylinder..... B15

Figuur 58 – scen017 (constant VELOCITY DIFFUSIVITY 1E-6 & IMPLICITATION FOR DEPTH / VELOCITY = 0.9) - (tijdstap 11) B15

Figuur 59 – Oscillerende vortices in scen017 (constant VELOCITY DIFFUSIVITY 1E-6 & IMPLICITATION FOR DEPTH / VELOCITY = 0.9) – gesimuleerde stroming bij maximum vloed met een output interval van 20 seconden. B16

Figuur 60 – Zog pijlers brug Temse..... B17

1 Inleiding

1.1 Situering

In opdracht van De Vlaamse Waterweg NV, onderzoekt het Waterbouwkundig Laboratorium de invloed van een nieuwe oeververbinding over de Schelde (Scheldebrug) op korte afstand opwaarts van de Kennedytunnel te Antwerpen.

Dit rapport betreft de invloed van deze brug op de stroomsnelheden en -patronen in de nabije omgeving van de brug. Er gaat speciale aandacht uit naar mogelijke veranderingen van de stroomsnelheden in de vaargeul en ter hoogte van de intertidale gebieden te linkeroever. Ook wordt de potentiële invloed van een onderwatersteunberm ter versterking van de bestaande kaaimuren langs de rechteroever in beschouwing genomen. De gesimuleerde stroomvelden dienen tevens als input voor een nautische simulatiestudie welke in Deelrapport 3 wordt besproken.

1.2 Studiegebied en scenario's

Figuur 1 toont het studiegebied juist opwaarts van Antwerpen. Langs linkeroever wordt de Schelde hier begrensd door intertidaal slik en schor. Langs rechteroever is in deze zone geen slik of schor aanwezig. Aan de zijde van linkeroever bevindt zich tevens een relatief ondiepe zone of plaat juist afwaarts van de Kennedytunnel.

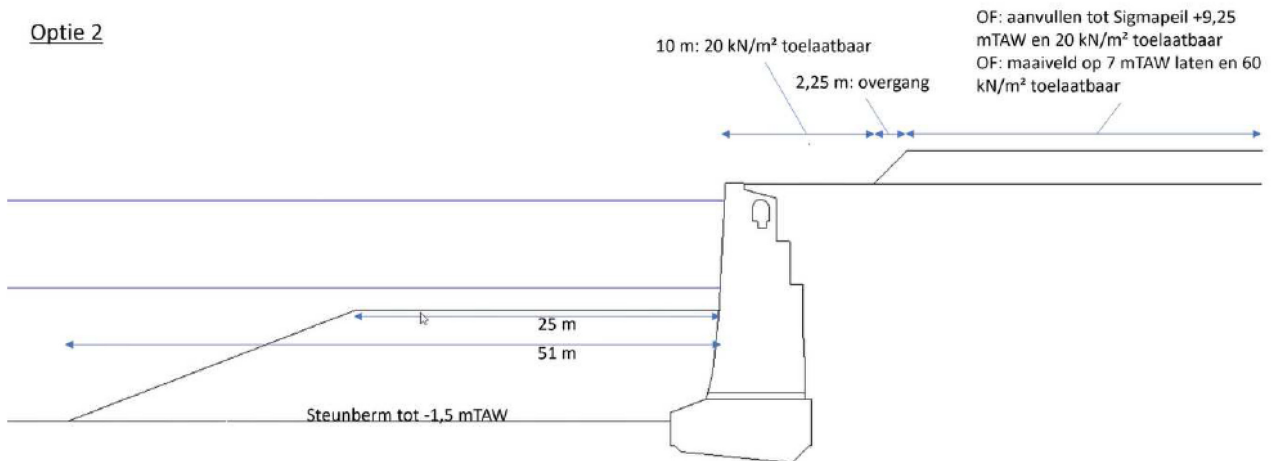
De twee brugpijlers voor de nieuwe oeververbinding zijn ingetekend op onderstaande kaart en bevinden zich net opwaarts van de Kennedytunnel, te herkennen aan de vernauwing van de rivierbreedte. Een van de pijlers bevindt zich dicht bij de kade langs rechteroever, terwijl de andere pijler zich centraal in de Schelde. De hoofvaargeul bevindt zich tussen de twee pijlers, binnenvaart kan ook passeren tussen linkeroever en de noordelijke pijler. De pijlers worden nog omringd door geleideconstructies (i.e., grijze stippen in Figuur 1).



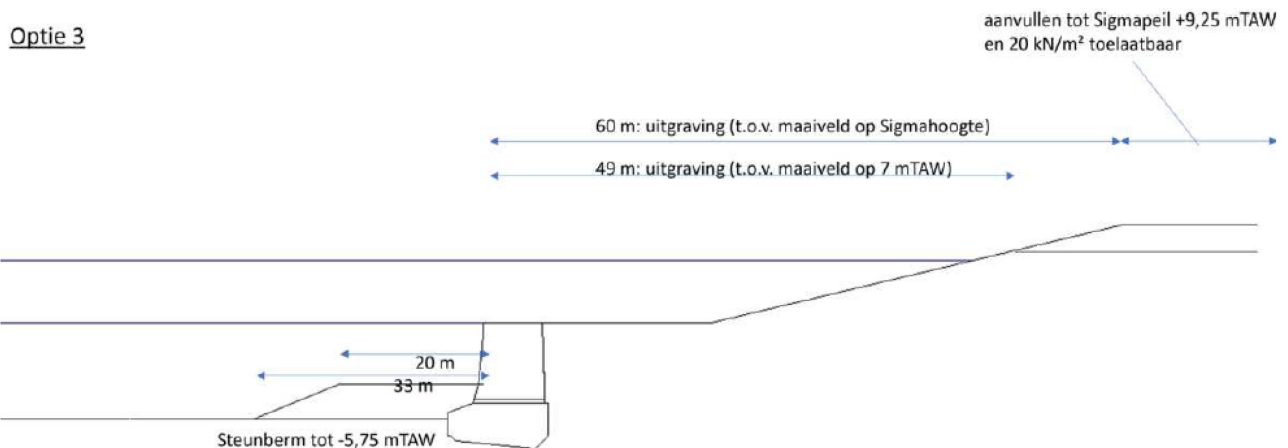
Figuur 1– Overzichtskaat van het studiegebied nabij de Kennedytunnel in de Beneden-Zeeschelde.

De huidige ontwerpen voorzien tevens in de aanleg van een onderwatersteunberm langsheen de bestaande kaaimuren op rechteroever tussen de kaaimuur van Blue Gate en de Kennedytunnel. Deze bermen moeten de oude kaaimuren stabiliseren. Er zijn twee varianten van steunbermen voorzien, telkens in een korte en een lange versie. *Optie 2*¹ voorziet in een 51 m brede steunberm met een kruin op -1,5 m TAW, zie Figuur 2. *Optie 3* voorziet een beperkte berm van 33 m breed en kruinhoogte -5,75 m TAW. Ontwerp *optie 3* voorziet tevens in een afgraving van de bestaande kaai tot 0 m TAW en 15 m breed en een aansluitend talud met helling 1/5 (communicatie DVW, 20/10/2022), Figuur 3.

Het verschil tussen de korte en lange versie is schetsmatig weergegeven in Figuur 4. In totaal zullen er vijf varianten geanalyseerd worden, plus een referentierun van de bestaande toestand om te kunnen vergelijken, zie Tabel 1 voor een overzicht van de scenario's.

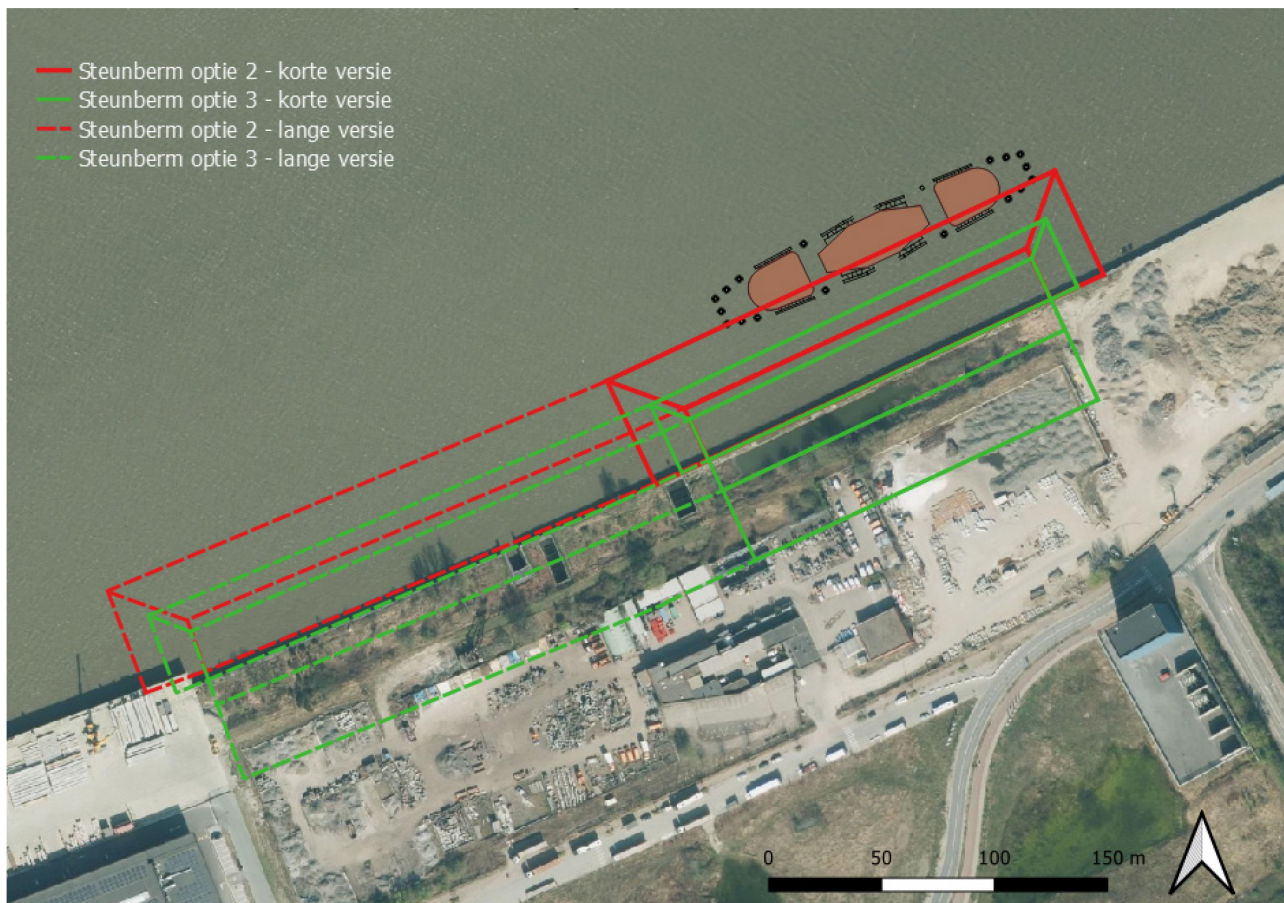


Figuur 2 – Schets steunberm *optie 2*. De kruin van de berm ligt op -1,5 m TAW (bron: De Vlaamse Waterweg)



Figuur 3 – Schets steunberm *optie 3* met kruinhoogte -5,75 m TAW en een afgraving van de oever tot 0 m TAW en nieuw aangelegd talud (bron: De Vlaamse Waterweg)

¹ Naamgeving zoals deze reeds gebruikt werd in voorstudies DVW werd behouden



Figuur 4 – Afmetingen steunberm in verschillende configuraties.

Tabel 1 – Modelscenario's.

Simulatie	Omschrijving
ref005	Referentierun met "huidige" toestand (bodem 2018)
scen012	"huidige" bodemligging met twee brugpijlers
scen018	Brugpijlers en steunberm met kruinhoogte -1,50 m TAW, korte variant
scen020	Brugpijlers en steunberm met kruinhoogte -1,50 m TAW, lange variant
scen022	Brugpijlers en steunberm met kruinhoogte -5,75 m TAW, korte variant
scen023	Brugpijlers en steunberm met kruinhoogte -5,75 m TAW, lange variant

1.3 Doelstelling

Voor enkele ontwerpvarianten (i.e., met of zonder onderwatersteunberm, zie Figuur 4) van de nieuwe Scheldebrug dient modelmatig te worden onderzocht wat de potentiële invloed is op stroomsnelheden ter hoogte van de vaargeul en op de intergetijdengebieden in de directe omgeving van de fietsbrug. Hiervoor zullen modelberekeningen worden uitgevoerd met het door het WL ontwikkelde TELEMAC-2D model van de Beneden-Zeeschelde (Kolokythas *et al.*, 2020).

Een optimalisatie van het ontwerp wordt in de huidige studie niet voorzien.

1.4 Leeswijzer

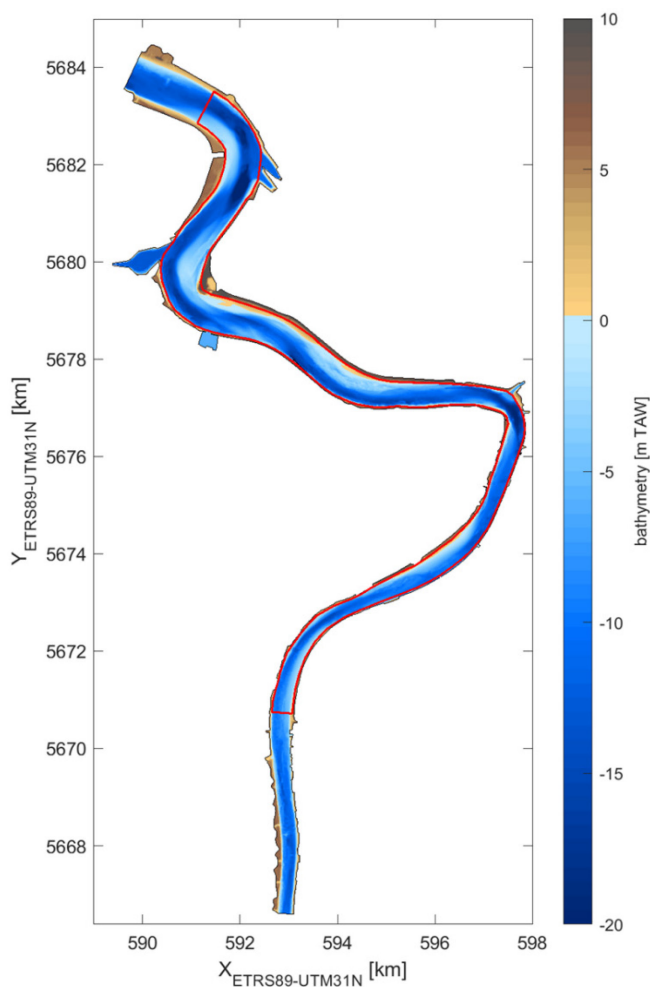
Dit rapport is als volgt ingedeeld: Hoofdstuk 2 bevat een omschrijving van het TELEMAC2D BeZS-model, de opzet van de modelsimulaties en van de implementatie van de brugpijlers in het model. In Hoofdstuk 3 worden de modelresultaten van de scenario-analyse weergegeven. Tot slot worden de belangrijkste conclusies in Hoofdstuk 4 opgesomd.

2 Modelbeschrijving

De studie wordt uitgevoerd met het een TELEMAC-2D model van de Beneden-Zeeschelde (BeZS-model). Het BeZS-model werd door het Waterbouwkundig Laboratorium ontwikkeld in het kader van een toegankelijkheidsstudie in het Antwerpse havengebied. De opzet en kalibratie van het model is uitvoerig beschreven in Kolokythas *et al.* (2020). Onderstaande paragrafen geven een bondige beschrijving van het model. Een detailoverzicht van alle modelinstellingen is opgenomen in Bijlage A, Tabel 3.

2.1 Rekenrooster

Het modeldomein loopt van Liefkenshoek tot Hemiksem (Figuur 5). De TELEMAC-Mascaret model software gebruikt een triangulair rooster (Hervouet, 2007). De gemiddelde roosterresolutie in het modeldomein bedraagt 20 m. Langsheen de oever is het rooster verfijnd tot ≈ 10 m. Ook is in een groot deel van het domein gebruik gemaakt van een *channel-mesher*, waarbij in de diepe geulen een gestructureerd triangulair grid wordt geïmplementeerd dat aligneert met de stroomrichting van het getij. De resolutie van dit *channel-mesh* bedraagt 10-15 m. Het rekenrooster bestaat uit 330 500 driehoeken verbonden door 168 000 punten.



Figuur 5 – Modeldomein.

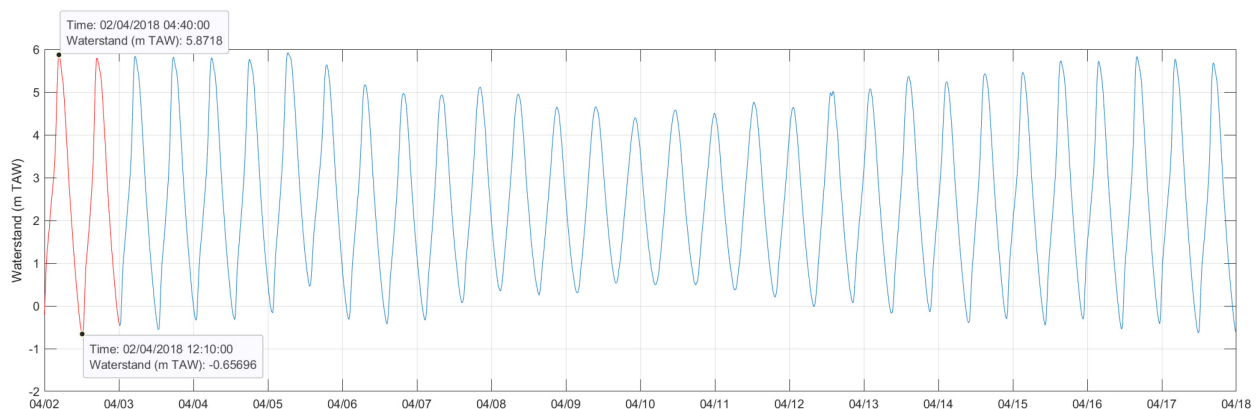
2.2 Bathymetrie

De bathymetrische data voor het BeZS-model zijn afkomstig van het *aMT Masterarchie*. Het horizontale referentiesysteem is ETRS89 UTM31N en het verticale referentieniveau is TAW. De bathymetrie dateert uit het jaar 2018 en heeft een originele resolutie van 1 m.

2.3 Randvoorwaarden

2.3.1 Simulatieperiode

De simulatieperiode duurt één typische springtij-doodtij cyclus en loopt van 01/04/2018 tot 18/04/2018 (17 dagen). Uiteindelijk worden de modelresultaten van 02/04/2018 tot 18/04/2018 (16 dagen) gebruikt voor de scenario-analyse en dienen de eerste 24 uur van de simulatie als zgn. spin-up periode. Figuur 6 geeft de gemodelleerde springtij-doodtij cyclus voor onderstaande analyse. Het springtij gemarkeerd in rood is de periode die in Eloot *et al.* (2023) nautisch geanalyseerd zal worden. Het geselecteerde springtij heeft een grotere getijslag dan een gemiddeld springtij bij Antwerpen, 6,54 m versus 6,00 m gemiddeld. De maximale vloed- en ebstream zijn in deze studie hoger dan in de eerdere verkennende studies De Maerschack *et al.* (2019) en Eloot *et al.* (2019) waar een gemiddeld springtij geanalyseerd werd. Voor de hydro-morfologische analyse in 3 wordt de volledige tijdreeks in beschouwing genomen.



Figuur 6 – Gemodelleerde springtij-doodtijcyclus. In rood gemarkeerd is het springtij voor de nautische analyse (Eloot *et al.*, 2022)

2.3.2 Opwaartse en afwaartse randvoorwaarden

De ligging van de opwaartse rand en afwaartse rand valt samen met de ligging van de meetposten Liefkenshoek en Hemiksem. Het model wordt aan de twee randen geforceerd met het geobserveerd waterstandsverloop van deze twee HIC meetposten. De geïmplementeerde tijdreeksen hebben een interval van 5 minuten.

2.4 Validatie – model performantie

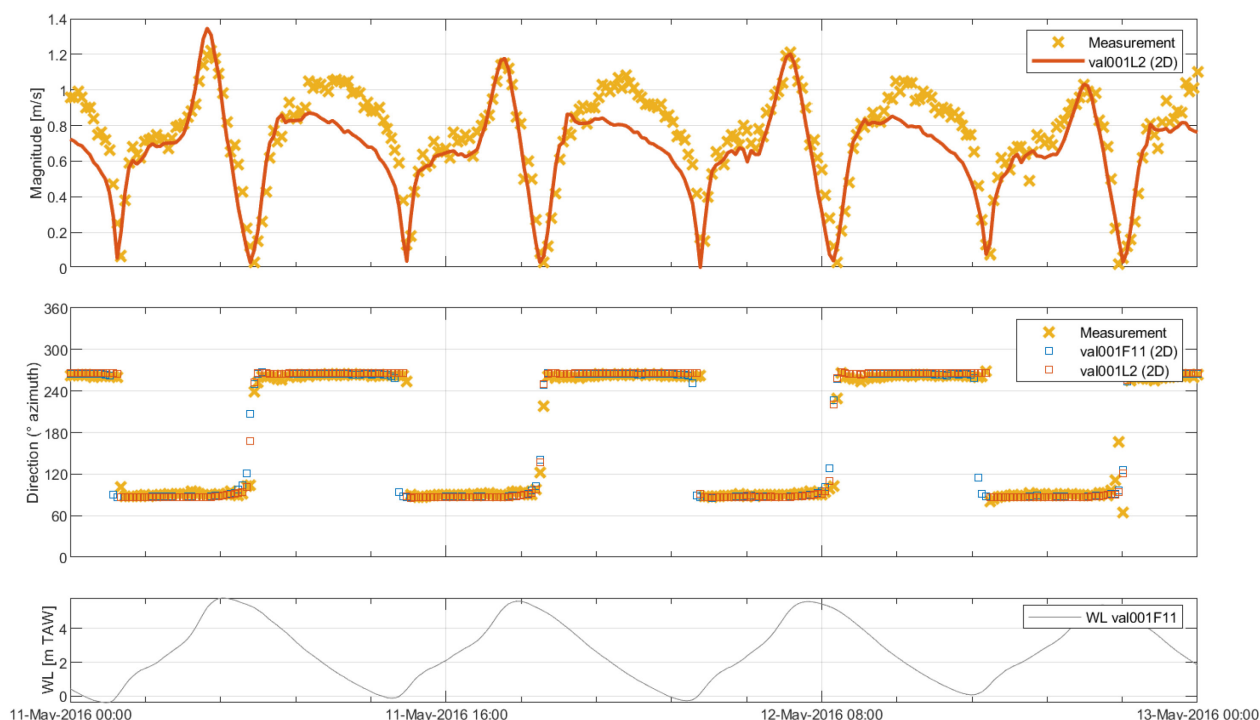
De modelkalibratie en validatie is uitvoering beschreven in Kolokythas *et al.* (2020). Het model is gevalideerd aan de hand van de permanente HIC-metposten Kallo en Antwerpen voor de waterstand en het HIC-metstation te Oosterweel en een 13-uursmeting eveneens te Oosterweel voor de stroomsnelheid.

Tabel 2 geeft een overzicht van de modelprestatie voor de representatie van het verticaal getij te Kallo en Antwerpen gebaseerd op een validatierun van één springtij-doodtij cyclus (Kolokythas *et al.*, 2020).

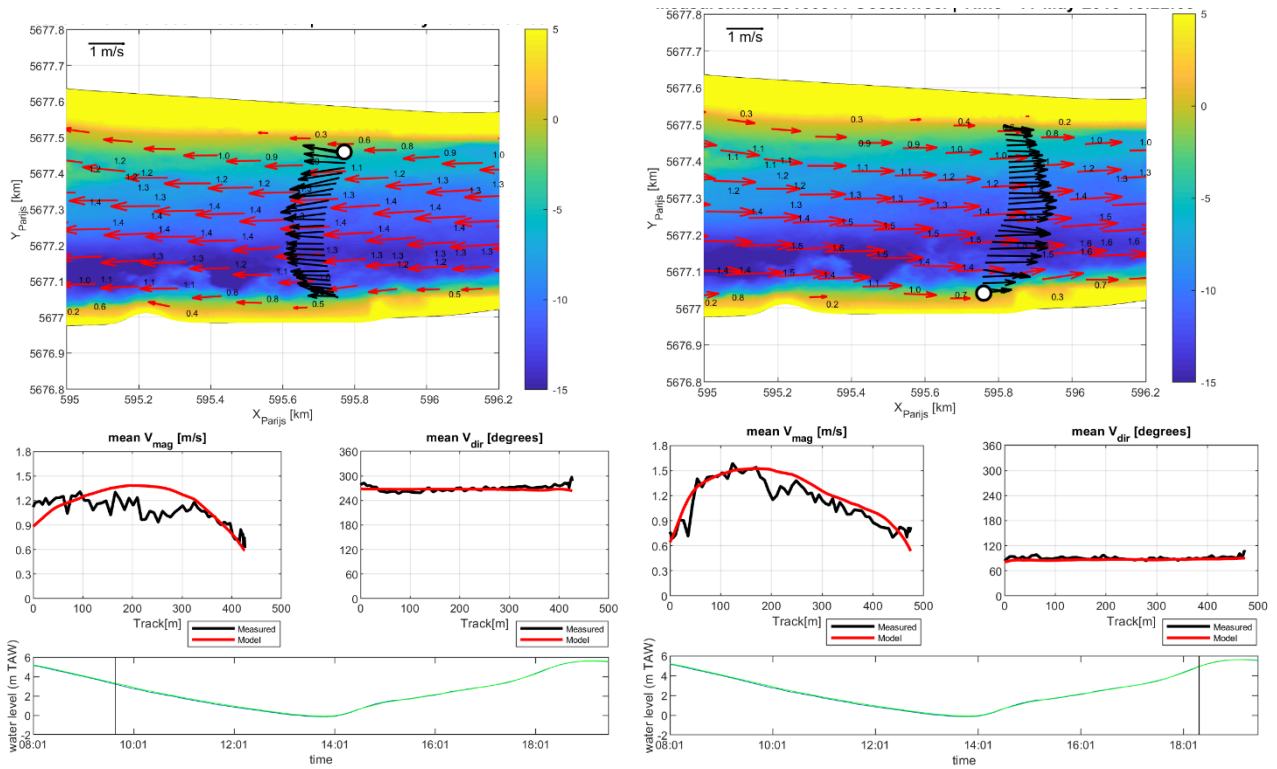
Tabel 2 – Representatie van het verticaal getij in op basis van BIAS, RMSE en RMSE₀.

Station	BIAS [m]	RMSE [m]	RMSE ₀ [m]
Kallo	-0.02	0.03	0.02
Antwerpen	-0.04	0.06	0.05

De stroomsnelheden werden gevalideerd aan de hand van de permanent HIC-metpost Oosterweel, Figuur 7, en een 13-uursmeting gevaren raaien nabij meetpost Oosterweel, Figuur 8. Ter hoogte van het meetstation Oosterweel wordt de maximale vloedstroom goed benaderd terwijl het model de neiging heeft om bij eb de maximale ebstroom te onderschatten. Echter te hoogte van de vaargeul wordt ook bij eb de vloedstroom goed benaderd, en op bepaalde momenten in het getij zelfs eerder overschat.



Figuur 7 – Gemodelleerde (dieptegemiddelde) en gemeten (4,5 m boven de bodem) stroomsnelheden HIC meetstation Oosterweel



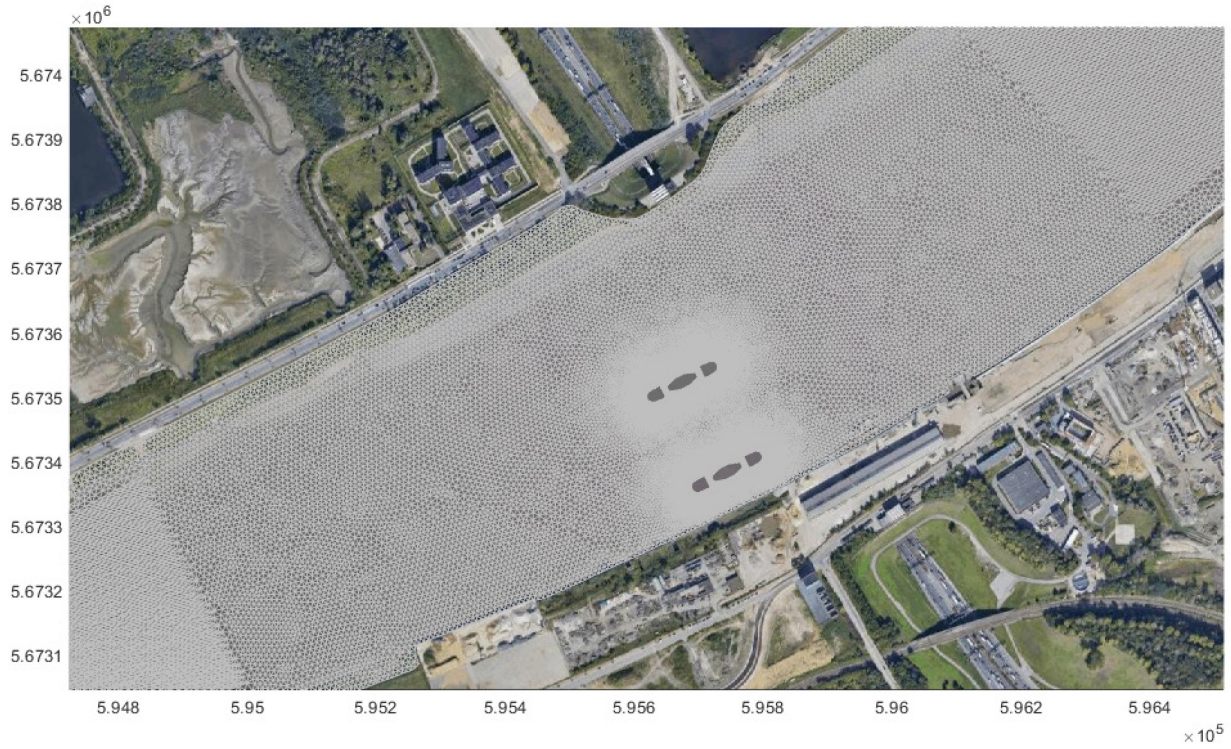
Figuur 8 – Gemeten en gemodelleerde dieptegemiddelde stroomsnelheid over een raai bij Oosterweel bij maximale eb (links, 11/05/2016 – 9:40) en maximale vloed (rechts, 11/05/2016 – 18:20)

2.5 Modelaanpassingen

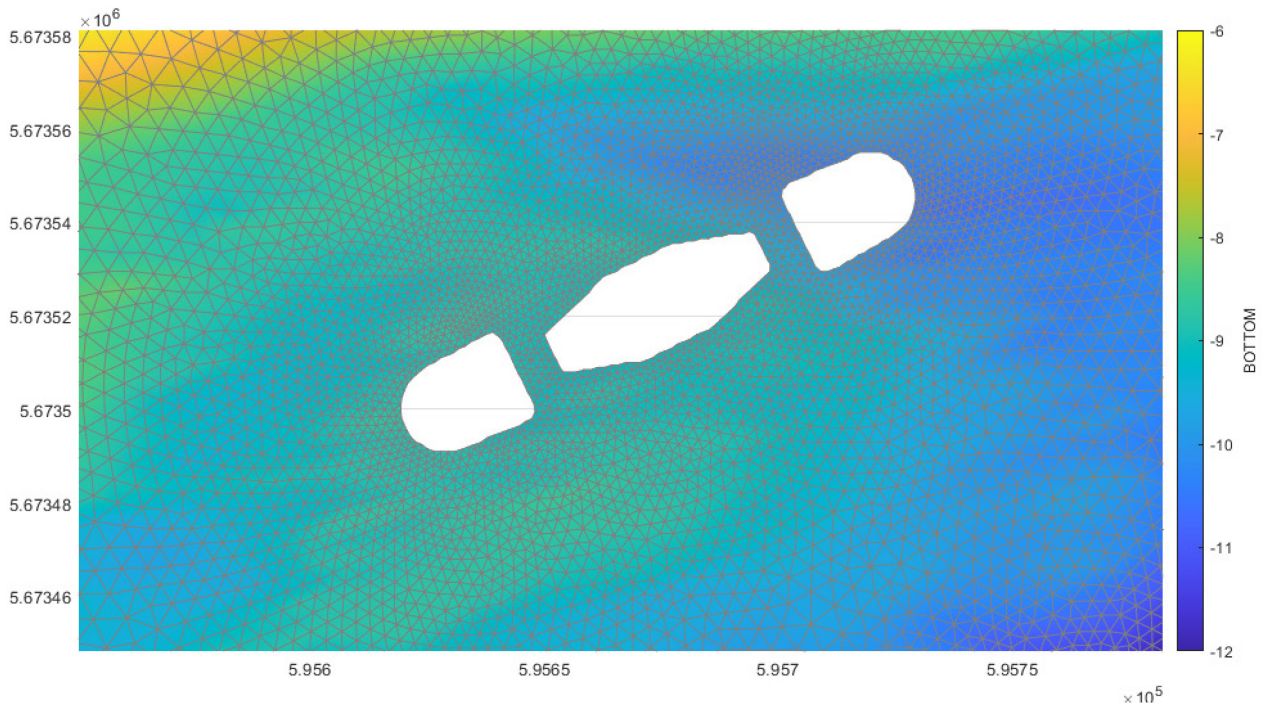
In kader van voorliggende studie werd het model lokaal en op enkele modelinstellingen aangepast om het effect van de pijlers op de stroming te kunnen modelleren.

2.5.1 Roosteraanpassingen – Implementatie brugpijlers

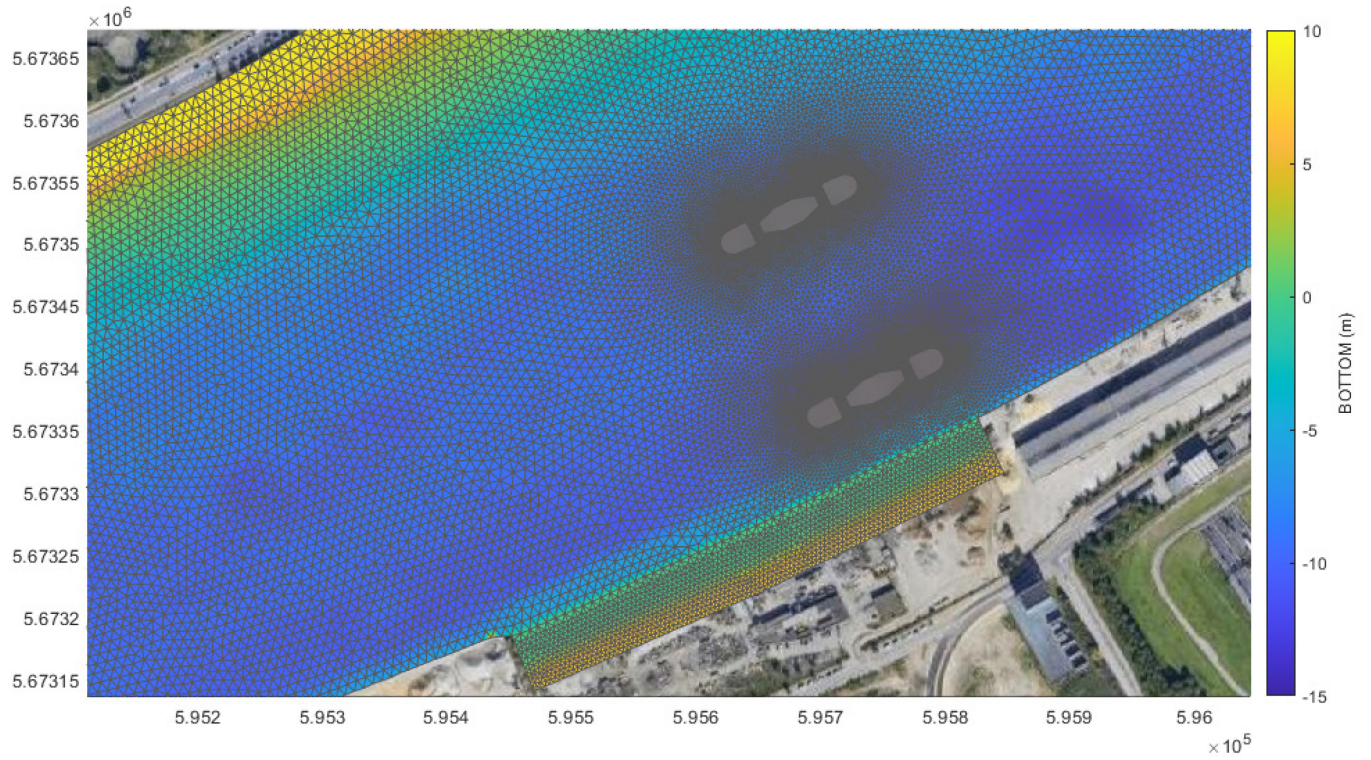
Om de brugpijlers te modelleren is het rekenrooster lokaal verfijnd in het interessegebied, zie Figuur 9 en Figuur 10. Bij het aanmaken van het verfijnd rekenrooster is rekening gehouden met de geometrie van de brugpijlers. Zo volgt het aangepast modelrooster de pijlers, die als vaste structuren in het rooster zijn geïmplementeerd. Om het effect van de resolutie in combinatie met een aangepaste tijdstap te bepalen werd een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd, zie hiervoor Bijlage B. Het nieuwe rooster telt 352 300 driehoeken op 179 6060 roosterpunten. Voor de scenario's met steunberm optie 3 en talud werd het rooster lokaal uitgebreid, Figuur 11. Voor de referentierun wordt hetzelfde rooster gebruikt, maar werden de uitsnijdingen voor de structuren opnieuw opgevuld met driehoekige elementen, Figuur 12.



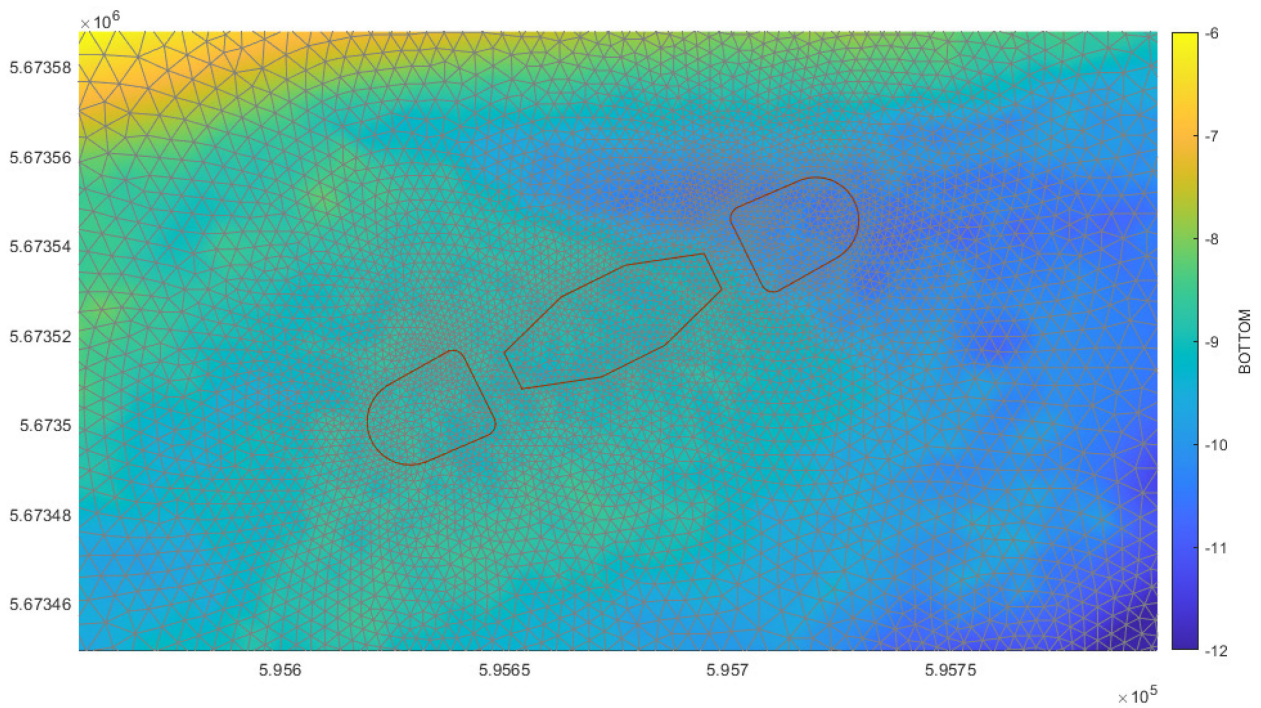
Figuur 9 – Aanpassing van het rekenrooster in het interessegebied, met uitsnijding van de structuren van de brugpijlers (scen012, scen018 en scen020)



Figuur 10 – Detail van het rooster rond de pijler structuren (noordelijke pijler): 1,5 m resolutie bij de pijlers



Figuur 11 – Rekenrooster scenario steunberm optie 3, lange versie met verlaagde kaai en talud (scen023)

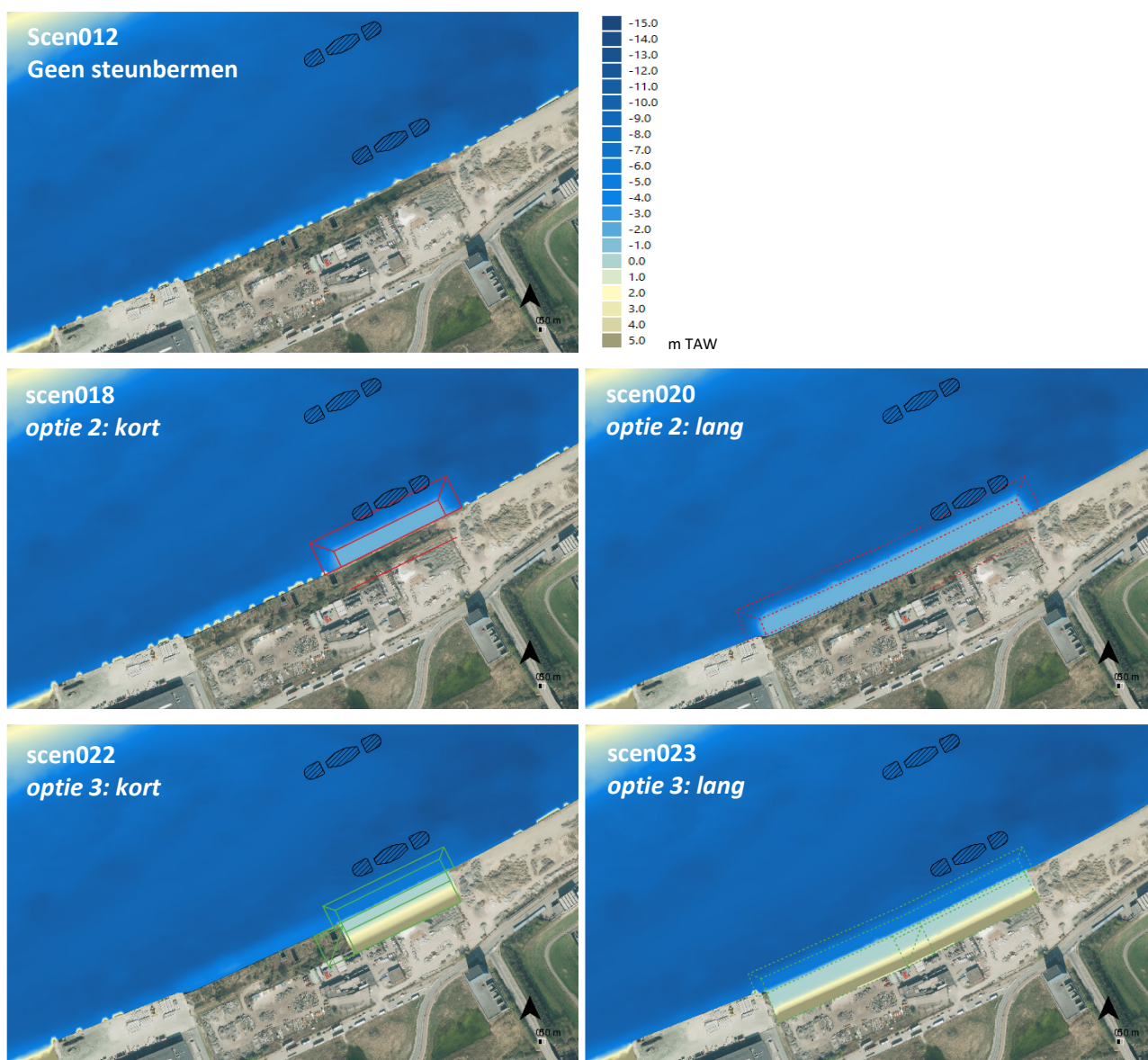


Figuur 12 – Detail van het rekenrooster referentierun (ref005)

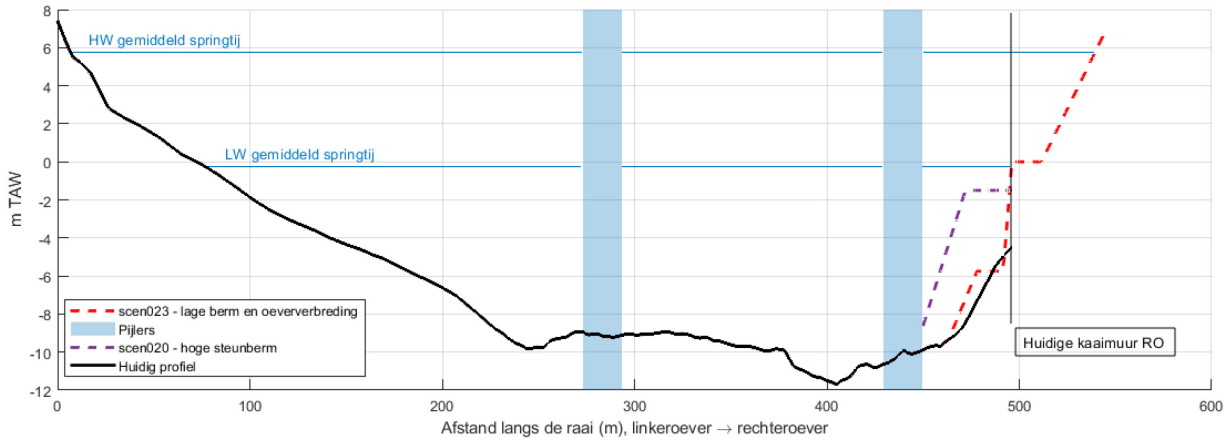
2.5.2 Aanpassingen bathymetrie voor de steunbermen

Er zijn vier varianten voor de onderwatersteunberm geïmplementeerd, i.e., scen018, scen020, scen022 en scen023 (Tabel 1). De onderwatersteunbermen worden geïmplementeerd in de bathymetrie van het model op basis van de aangeleverde informatie, zie Figuur 13.

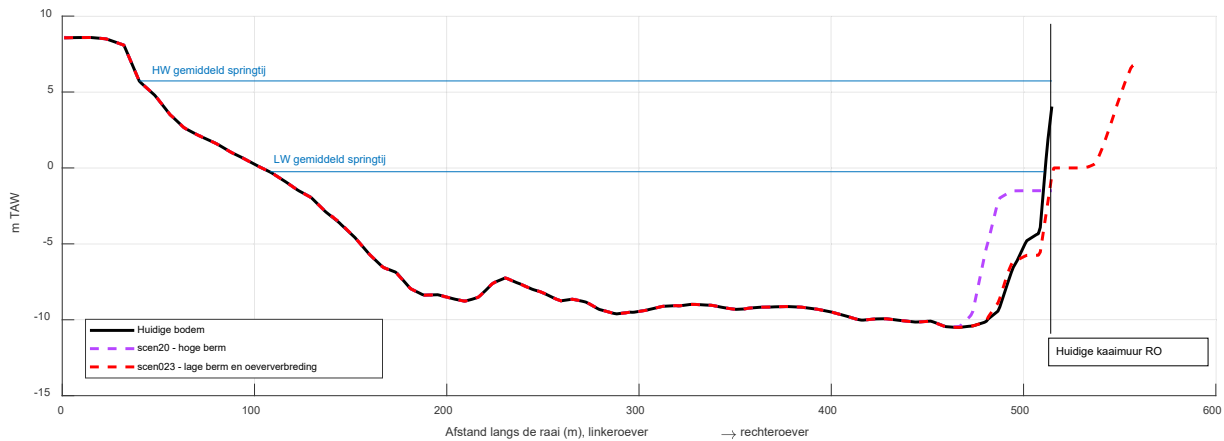
Voor de varianten *optie 3* is het rekenrooster lokaal uitgebreid om de afgraving van de huidige kademuur en de creatie van het nieuwe talud te implementeren. kademuur in het model is verlaagd tot 0 m TAW met aansluitend een horizontaal vlak van ca. 15 m en een talud is met een helling van ongeveer 1/5. Er wordt opgemerkt dat ook in de referentiesituatie er al een zeker talud aanwezig is ter hoogte van de voet van de kaaimuur vergelijkbaar met de steunberm in *optie 3*, zie Figuur 14 en Figuur 15.



Figuur 13 – Implementatie onderwatersteunbermen in modelbathymetrie.



Figuur 14 – Dwarsdoorsnede ter hoogte van de brug voor de huidige toestand en de verschillende scenario's.



Figuur 15 – Dwarsdoorsnede 250 m opwaarts van de brug voor de huidige toestand en de verschillende scenario's

2.5.3 Aangepaste modelinstellingen

Aanpassing tijdstap

De lokale verfijning van het rekenrooster in het interessegebied heeft een directe invloed op het Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) getal. Het CFL getal schaalte met de tijdstap en is omgekeerd evenredig met de resolutie en bepaalt de numerieke stabiliteit van het model. Daarom was het noodzakelijk om de tijdstap te verkleinen van 2 naar 0,5 seconden. Hierdoor neemt ook de rekestijd van het model toe. De tijdstap in combinatie met de resolutie werden bepaald aan de hand van een beperkte gevoeligheidsanalyse, waarvan de belangrijkste resultaten zijn opgenomen in Bijlage B.

Turbulentiemodellering

In het originele BeZS-model wordt een getij en diepteafhankelijk kalibratiecoëfficiënt in het *mixing length* model gebruikt voor het horizontale turbulentiemodel. Hierbij wordt de coëfficiënt C_L in de eb fase voor ondiepe gebieden (waterdiepte minder dan 4 m) geleidelijk verhoogd van 2,66 (standaardwaarde) tot 5,34. Dit bleek de modelprestaties nabij meetpost Oosterweel ten goede te komen (Kolokythas *et al.*, 2020).

Gezien de coëfficiënt enkel aangepast wordt in de ondiepe zones, zou men beperkte effecten verwachten ter hoogte van de geul. Echter, uit de eerste simulaties met de brugpijlers bleek dat deze formulering onverwacht significante effecten had op de stroming om en achter de pijlers bij ebstroom. Op basis van bijkomende gevoeligheidsanalyses, werd besloten de betreffende coëfficiënt zowel bij vloed als bij eb constant te houden op de standaardwaarde 2,66. Voor een gedetailleerde motivatie van deze wijziging zie ook Bijlage B.

Uit deze gevoeligheidsanalyse blijkt ook dat de (turbulente) structuur en dimensie van het zog achter de pijlers erg gevoelig is voor de keuze en instellingen van het turbulentiemodel. Een 2D *shallow water solver* is hier niet het meest geschikte model voor. Het is geweten dat shallow water solvers op basis van eindige elementen methodes, zoals TELEMAC2D, lijden onder numerieke diffusie (Merkel *et al.*, 2016). De numerieke diffusie heeft de neiging om eventuele wervels in het zog van de pijlers uit te smeren (door extra diffusie in de impulsvergelijking). Bovendien laat de resolutie en het 2D-karakter van het model het niet toe om alle details van de pijlers zoals de palen voor de pijlers, de fenders langs de pijlers en de palenconstructie onder de aanvaarbeveiliging mee te nemen. Al deze elementen bepalen de turbulentie en daarmee de structuur van het zog. Voor een gedetailleerde simulatie van het zog is een CFD (*Computational Fluid Dynamics*) simulatie of een fysisch schaalmodel aangewezen.

Het zog heeft echter een beperk effect op de stroming tussen de pijlers en op het slik op linkeroever, zie ook Bijlage C voor extra documentatie met betrekking tot het zog achter brugpijlers.

2.6 Postprocessing en analyse

2.6.1 Invloed op stroomsnelheden

De invloed van de brugpijlers en onderwaterberm op de stroomsnelheden wordt 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 stroomsnelheden op basis van de volledige gesimuleerde springtij-doodtij cyclus. In deze analyse gaat aandacht uit naar de stroomsnelheden in de vaargeul, zowel opwaarts als afwaarts van de Scheldebrug. Ook zal worden gekeken naar veranderingen in de maximale stroomsnelheden op de nabij gelegen intergetijdengebieden te linkeroever.

In dit kader wordt opgemerkt dat stroomsnelheden in zeer ondiepe zones en gebieden die droogvallen niet altijd adequaat worden gerepresenteerd in TELEMAC. Om onrealistische resultaten te vermijden wordt in de analyse enkel modeloutput gebruikt waarvoor geldt dat de waterdiepte in het roosterpunt minimaal 1 cm bedraagt.

2.6.2 Invloed op bodemschuifspanningen

De potentiële invloed van de brugpijlers op de omliggende intergetijdengebieden wordt ingeschat op basis van gemodelleerde veranderingen in stromingspatronen, maar ook op basis van gemodelleerde veranderingen in bodemschuifspanningen. Hiervoor worden maximale bodemschuifspanningen over een gehele springtij-doodtij cyclus geanalyseerd, alsmede de overschrijdingsfrequentie van een relevante kritische bodemschuifspanning. Deze laatste parameter geeft een indicatie van de meer dynamische en meer luwe zones in het studiegebied.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_b = \rho u^{*2} \\ U(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \\ z_0 = \frac{k_s}{30} \end{array} \right.$$

waarin τ_b de bodemschuifspanning is [N/m²]; ρ het soortelijk gewicht van water [kg/m³]; u^* de wrijvingsnelheid is [m/s]; κ de Von Karman constante [-] gelijk aan 0,4; z_0 is de ruwheidslengte [m] en k_s de Nikuradse equivalente ruwheidshoogte [m], 0,018 m in het BeZS-model. u^* is rechtstreekse output van het model.

Ook voor de analyse van de bodemschuifspanning geldt dat enkel modelresultaten worden gebruikt waarvoor de waterdiepte $h > 0,01$ m.

3 Resultaten

3.1 Invloed brugpijlers op lokale hydrodynamica

3.1.1 Stroming

Figuur 16 tot Figuur 18 tonen de stroompatronen tijdens respectievelijk maximum vloed en maximum eb voor de huidige toestand (ref005) en de toestand met brugpijlers (scen012). Figuur 21 toont aanvullend de invloed van de brugpijlers op de maximale stroming voor springtij-vloed, springtij-eb en op de maximale stroming over de gehele springtij-doodtij cyclus.

De maximale vloedstroom is significant hoger dan de maximale ebstroom. In de referentierun, zonder brugpijlers, is de maximale stroomsnelheden tijdens vloed tot 2,1 m/s en tijdens eb tot 1,7 m/s. De hoogste stroomsnelheden komen zowel tijdens vloed als tijdens eb voor centraal in de rivierongeveer ter hoogte waar de noordelijke brugpijler komt te staan.

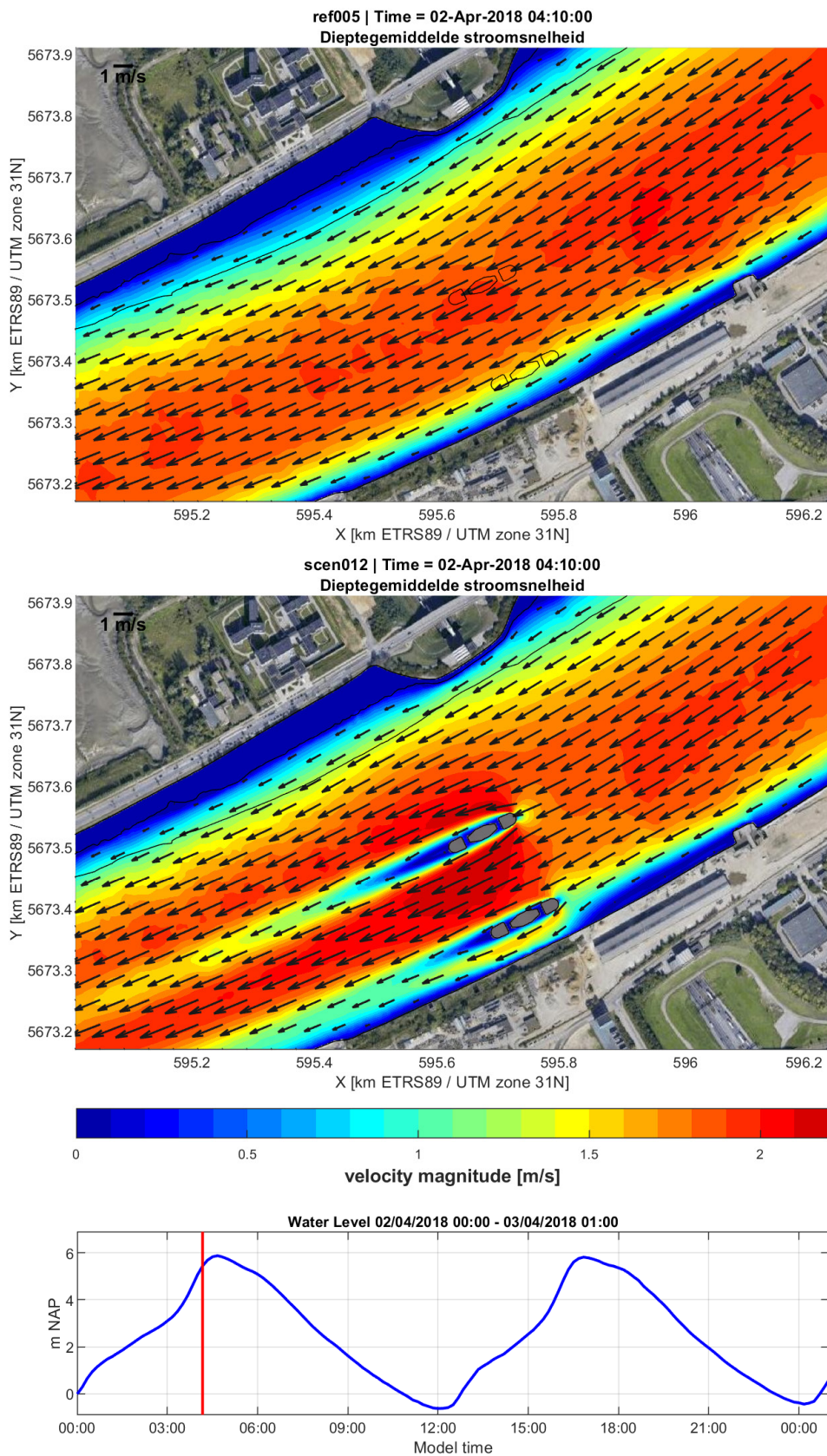
Als gevolg van de aanleg van de brugpijlers, die het doorstroomoppervlak vernauwen, nemen de maximale stroomsnelheden in het studiegebied toe tot meer dan 2,4 m/s tijdens vloed en meer dan 1,9 m/s tijdens eb. De hoogste stroomsnelheden situeren zich rondom de brugpijler in het midden van de huidige vaargeul. In de zone tussen en rondom de brugpijlers nemen zowel de ebstroom als vloedstroom met +0,2 tot +0,3 m/s toe ten opzichte van de huidige situatie.

Met name voor de stroomsnelheden tijdens maximum vloed is ook sprake van een significante toename aan de zijde van linkeroever. Juist opwaarts van de Kennedytunnel neemt de maximale stroomsnelheid tijdens vloed hier met tot +0,5 m/s toe. Deze toename in maximale stroomsnelheid treft ook het intertidaal langs linkeroever. De maximale ebstroming neemt in dit gebied iets minder sterk toe (tot +0,2 m/s), zie ook Figuur 20 en Figuur 21. De toename is vooral ter hoogte van het slik opwaarts de Kennedytunnel. Het slik afwaarts de Kennedytunnel is minder gevoelig voor de toenemende vloedstroom. Dit komt ondermeer omdat de ebstroom minder sterk is dan de vloedstroom, maar ook door de afscherpende werking van de *inspringende* dijk ter hoogte van de Kennedytunnel.

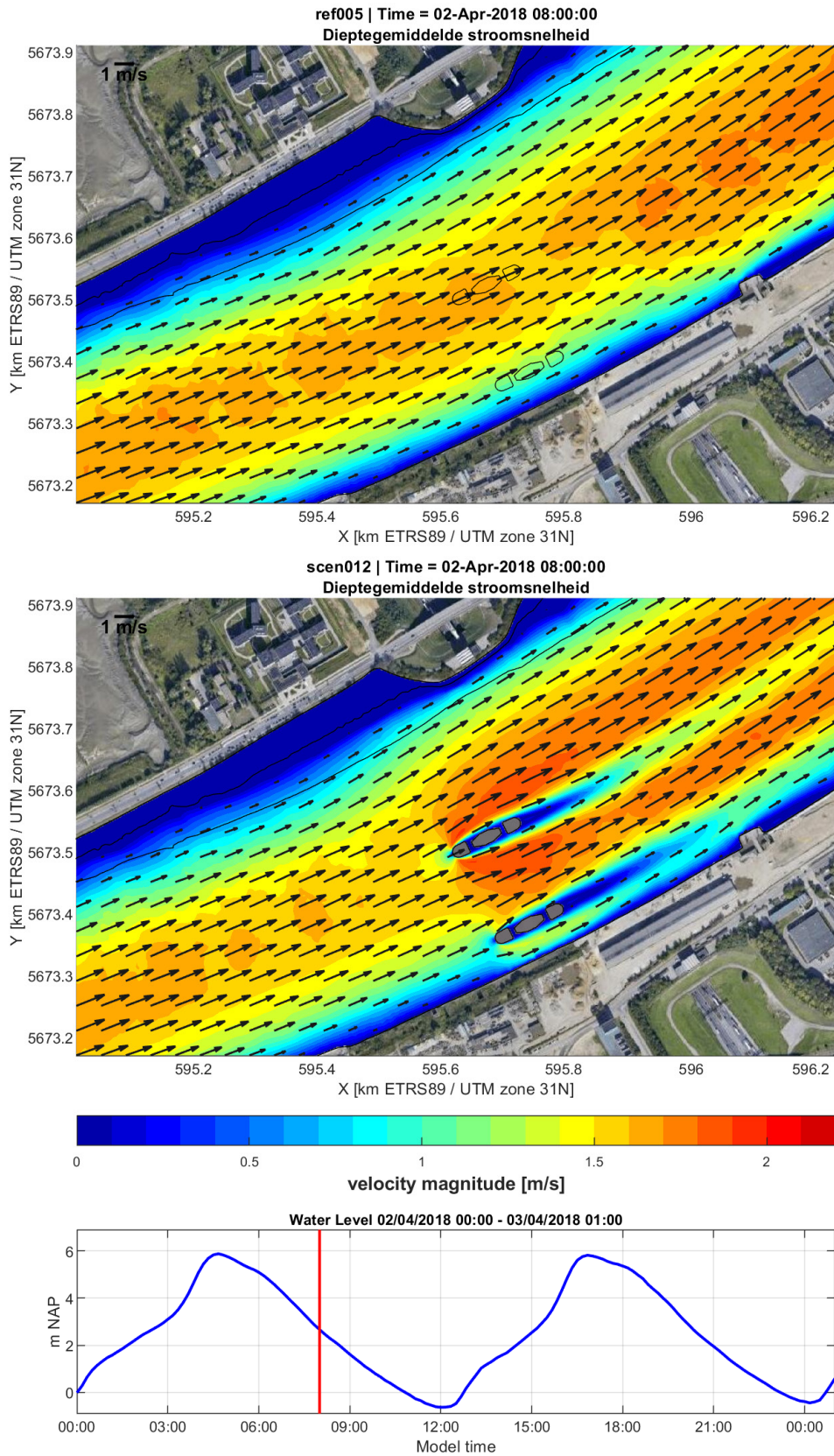
Ook in de smalle doorgang tussen rechteroever en de eerste brugpijler is sprake van een sterke toename in maximale stroomsnelheden tot +1,0 m/s. De stroomsnelheden in dit deelgebied en de invloed van een eventuele onderwatersteunberm op deze snelheden worden in §3.2 besproken.

Over de gehele springtij-doodtij cyclus neemt de maximale stroomsnelheid enkel toe tussen en opwaarts van de brugpijlers, i.e., ten gevolge van de vloedstroming. Dit komt doordat de veranderingen in ebstroom ten gevolge van de brugpijlers niet groter zijn dan de reeds bestaande verschillen tussen maximum vloedstroom en maximum ebstroom. Een uitzondering hierop vormt de smalle doorgang tussen rechteroever en de eerste brugpijler, waar ook in afwaartse richting een effect is op de maximum stroming over de gehele springtij-doodtij cyclus.

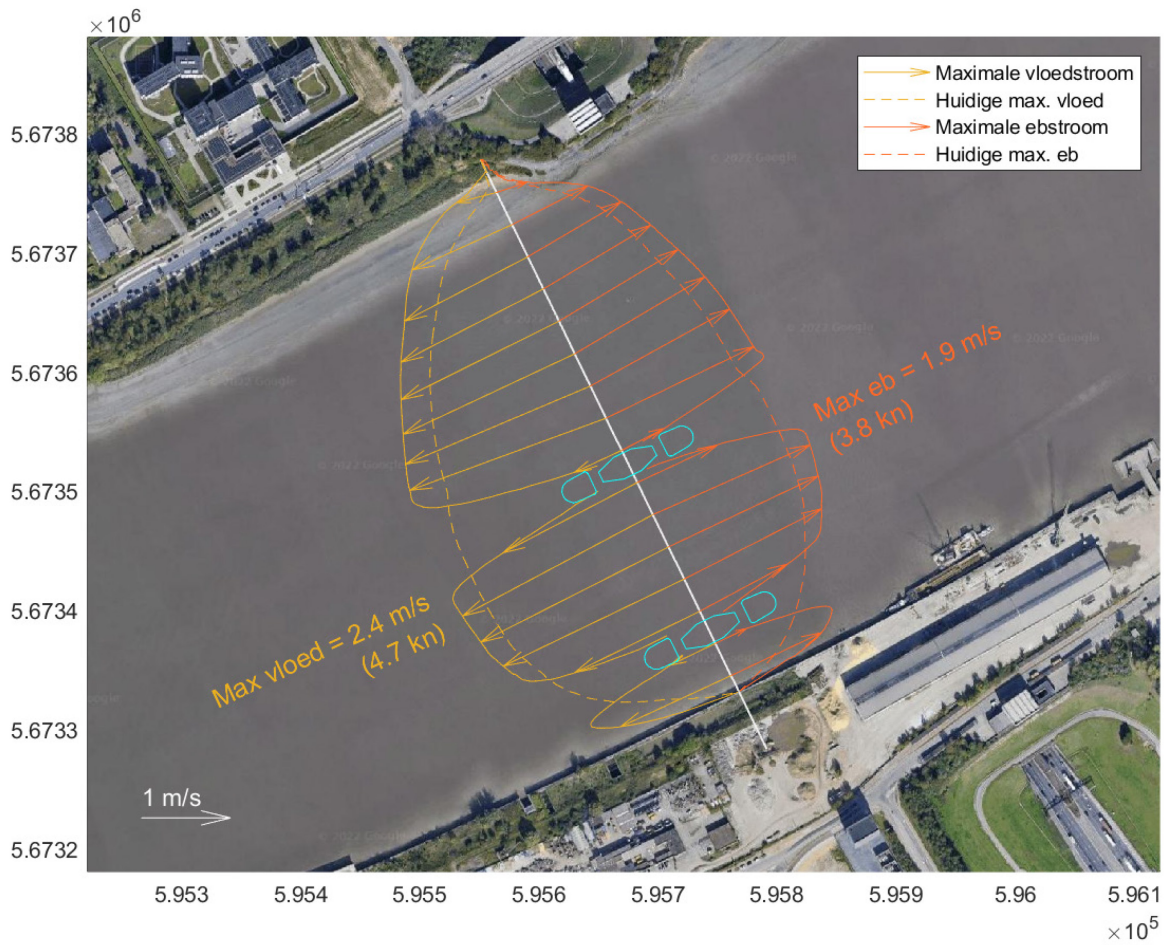
In het zog achter de steunbermen nemen de maximale stroomsnelheden juist sterk af. Dit zog is enkele honderden meters lang, hoewel de exacte lengte sterk afhankelijk is van de modelconfiguratie m.b.t. turbulentie als ook de aan- of afwezigheid van turbulente wervels, Bijlage B. Doordat de ebstroming in het gebied minder sterk is dan de vloedstroming is over de gehele getijcyclus ook enkel sprake van een afname in maximum stroomsnelheid in het zog van de vloedstroom.



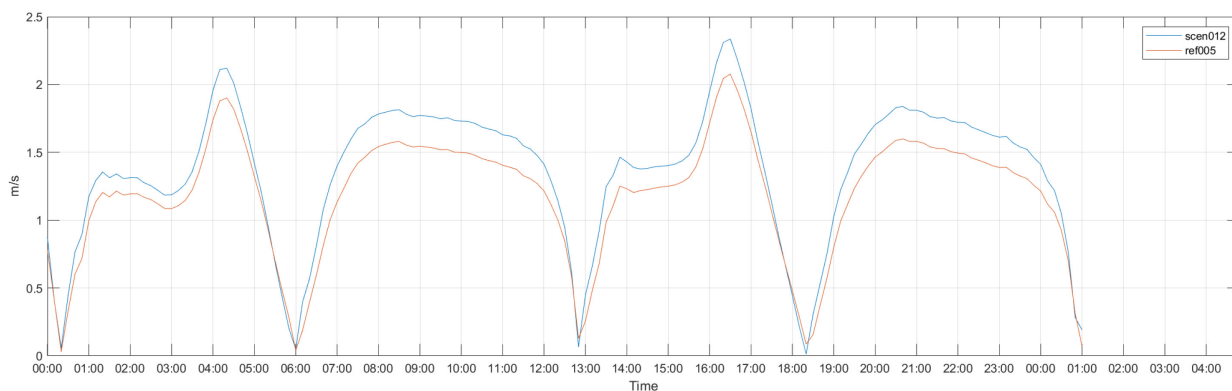
Figuur 16 – Gemodelleerde stroomvelden tijdens maximale vloed, in de referentierun ref005 (boven) en in run met brugpijlers zonder extra steunbermen scen012 (onder).



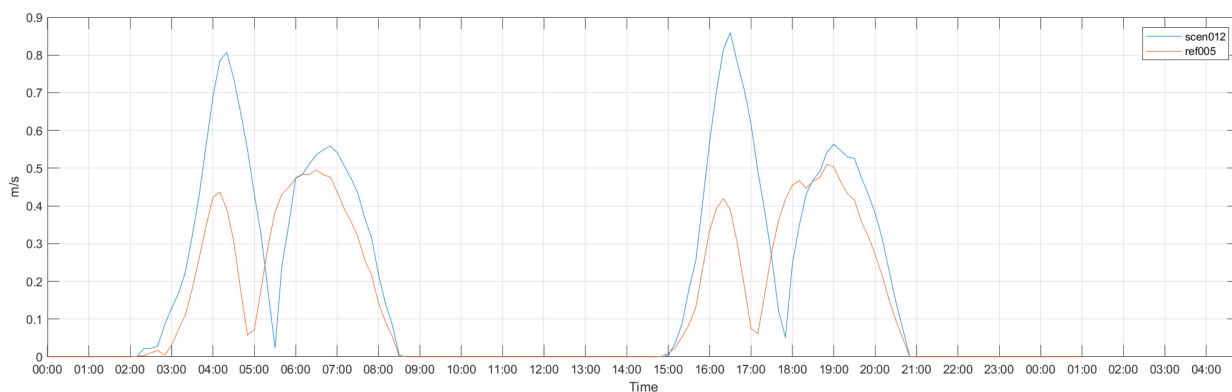
Figuur 17 – Gemodelleerde stroomvelden tijdens maximale eb, in de referentierun ref005 (boven) en in run met brugpijlers zonder extra steunbermen scen012 (onder).



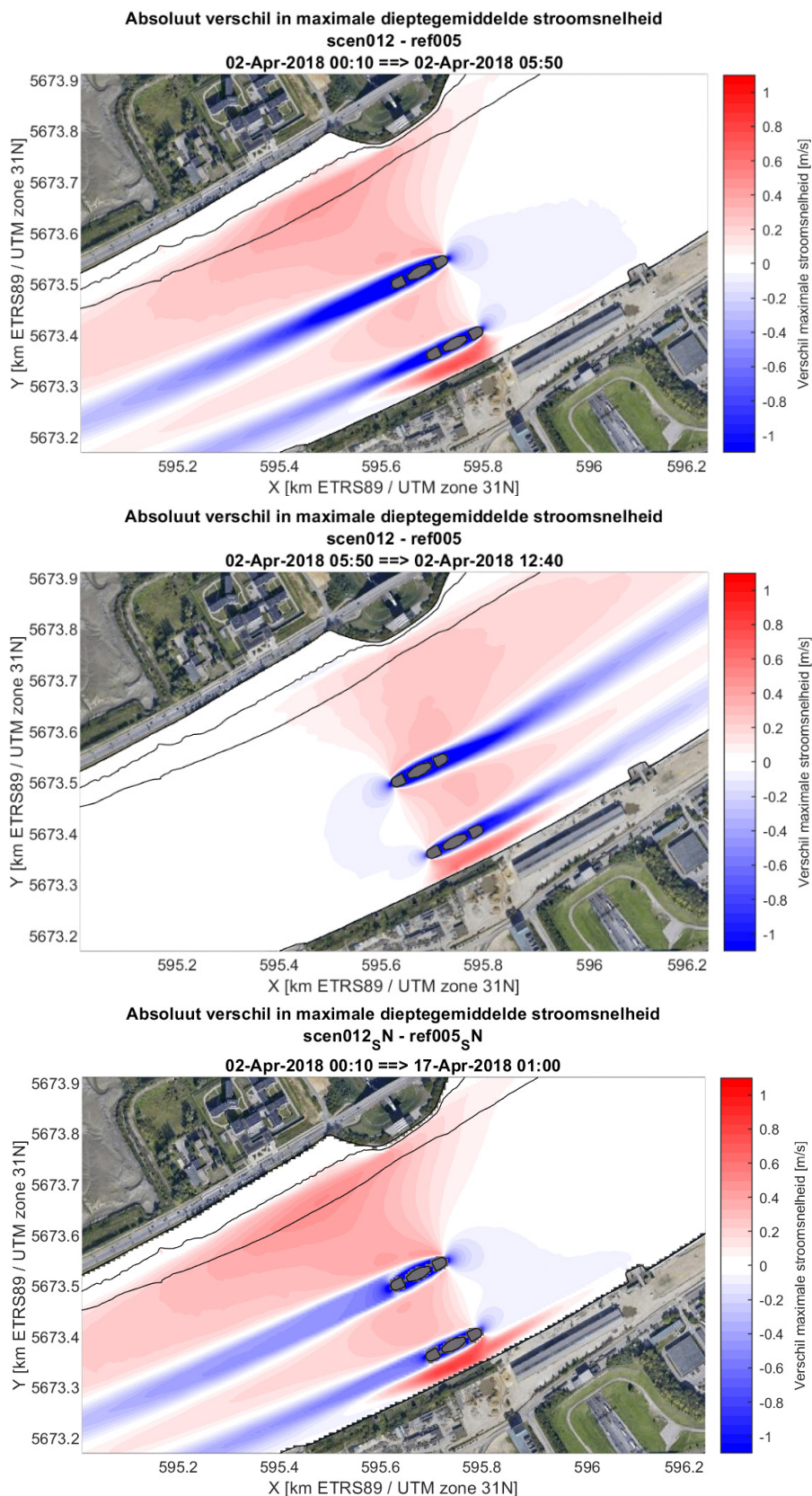
Figuur 18 – Maximale snelheden tijdens eb en vloed ter hoogte van de brug scen012 (scen012 – pijlers zonder onderwatersteunbermen). De streepjeslijn geeft de maximale snelheden in de huidige situatie zonder brugpijlers weer (ref005: max vloed 2,1 m/s, max eb: 1,7 m/s)



Figuur 19 – Dieptegemiddelde snelheid centraal in de vaargeul bij springtij 2/4/2018 (zie Figuur 6) met (scen012) en zonder (ref005) brugpijlers



Figuur 20 – Dieptegemiddelde snelheid op het slik (2,5 m TAW) bij springtij 2/4/2018 (zie Figuur 6) met (scen012) en zonder (ref005) brugpijlers (zie Figuur 33 op p 4 voor de exacte locatie van het observatiepunt)



Figuur 21 – Verschil in maximale stroming voor springtij-vloed (boven), springtij-eb (midden) en over de gehele springtij-doodtij cyclus (onder).

3.1.2 Bodemschuifspanning

Zoals eerder vermeldt is de bodemschuifspanning die de getijstroming uitoefent op de bodem een indicator voor de morfodynamiek. De overschrijdingsfrequentie van een kritische bodemschuifspanning is een indicatie voor de aanwezigheid van luwe zones waar kan worden verwacht dat fijn sediment accumuleert (i.e., lage overschrijdingsfrequentie) en dynamische zones waar fijn sediment moeilijk zal accumuleren of waar zelfs erosie plaats kan vinden (i.e., hoge overschrijdingsfrequentie). Figuur 22 toont de overschrijdingsfrequentie van een kritische bodemschuifspanning van $\tau_b \geq 1,0 \text{ N/m}^2$ voor de referentierun (ref005), de simulatie met de brugpijlers (scen012) en een verschilplot tussen beide runs. Figuur 23 geeft de maximale bodemschuifspanningen over de gemodelleerde springtij-doodtij cyclus.

De overschrijdingskans van een kritische bodemschuifspanning van $\tau_b \geq 1,0 \text{ N/m}^2$ zal in de huidige analyse als proxy beschouwd worden voor de grens tussen intertidaal (slik en subtidaal langs linkeroever. In de referentierun valt een overschrijdingskans van 10 á 20% van $\tau_b \geq 1,0 \text{ N/m}^2$ ongeveer samen met de laagwaterlijn te linkeroever (i.e., zwarte contourlijn in Figuur 22). Hoger gelegen intertidale zones hebben een lagere overschrijdingsfrequentie, terwijl het subtidaal in en de geul worden gekenmerkt door een hogere overschrijdingsfrequentie.

In de modelsimulatie met de brugpijlers neemt de overschrijdingskans van $\tau_b \geq 1,0 \text{ N/m}^2$ toe in een zone langs linkeroever, waarvan een deel ook het intertidaal slik betreft (Figuur 22). De maximale bodemschuifspanning neemt hier eveneens sterk toe (Figuur 23). Deze intertidale zone van ongeveer 500 m lang zou als gevolg van de aanwezigheid van de brugpijlers dus gevoelig kunnen worden voor erosie.

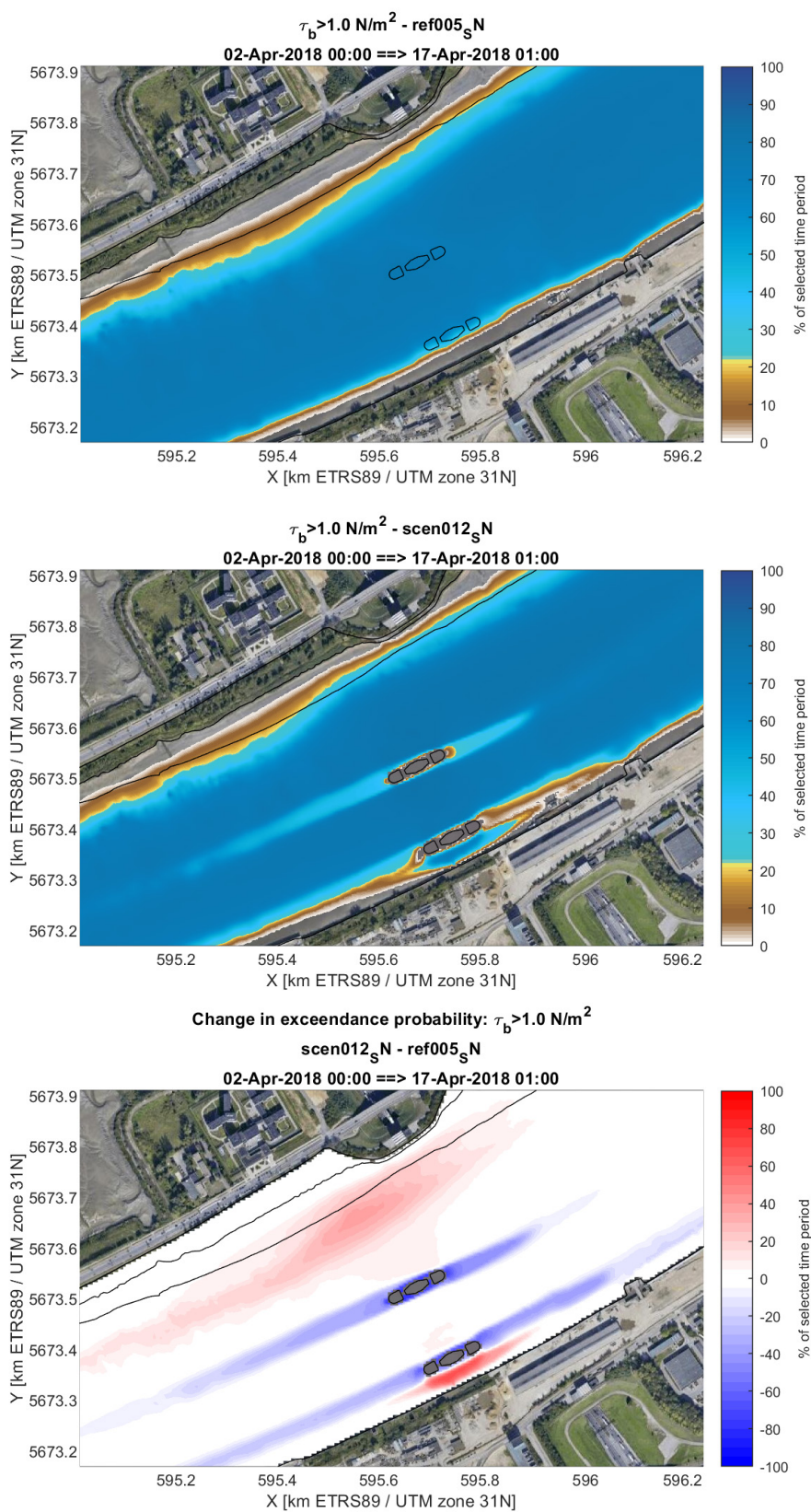
Er is ook sprake van een toename van de bodemschuifspanningen in het subtidaal langs linkeroever, wat mogelijk ook tot erosie en verdieping kan leiden. Deze zone bevindt zich voornamelijk in opwaartse richting. De toename is het sterkst direct evenwijdig aan de brugpijlers en rond de huidige laagwaterlijn.

Langs rechteroever leidt de constructie van de pijlers lokaal tot een sterke toename van de bodemschuifspanningen in de relatief smalle doorgang tussen de kade en de eerste brugpijler. De sterkte van de bodemschuifspanningen in dit gebied zijn afhankelijk van het ontwerp van de onderwatersteunberm. Deze steunberm is in het huidige scenario (scen012 in Figuur 22) niet geïmplementeerd. Het effect van een steunberm op de lokale hydrodynamica wordt besproken in de volgende sectie (§3.2).

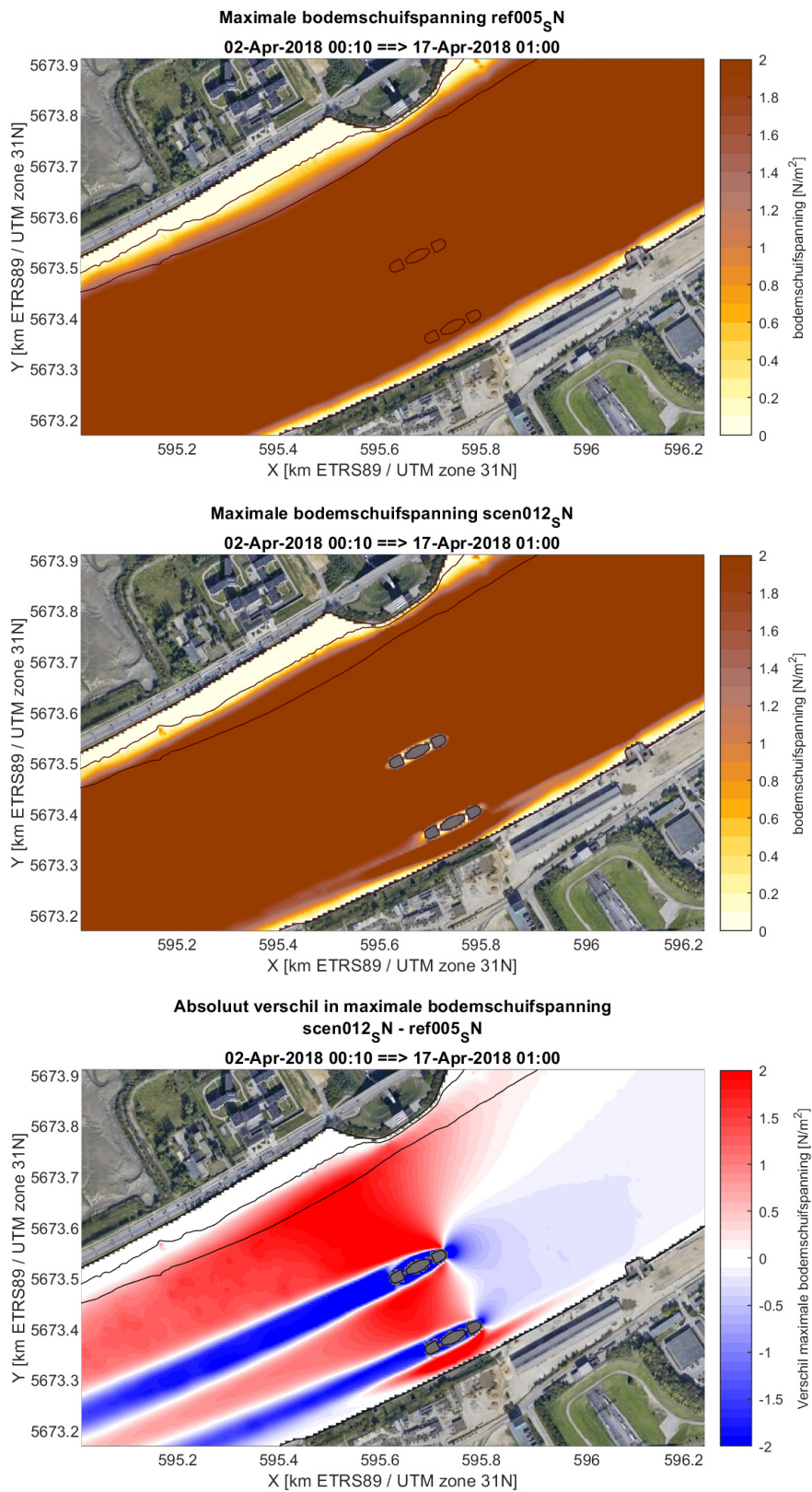
Tussen de twee brugpijlers neemt de overschrijdingsfrequentie van $\tau_b \geq 1,0 \text{ N/m}^2$ nauwelijks toe, al is wel sprake van een toename van de maximale bodemschuifspanning, gerelateerd aan de hogere pieksnelheden. Deze zone in het midden van de huidige vaargeul wordt in de referentietoestand al gekenmerkt door een zeer hoge overschrijdingsfrequentie van $\tau_b \geq 1,0 \text{ N/m}^2$.

Evenals voor de stroomsnelheden is in de modelresultaten een sterke afname van de maximale bodemschuifspanningen en de overschrijdingsfrequentie van $\tau_b \geq 1,0 \text{ N/m}^2$ in het zog achter de brugpijlers waarneembaar. Dit zog is zowel in opwaartse als afwaartse richting aanwezig. Hierbij dient te worden opgemerkt dat turbulente stromingen die veroorzaakt worden door de geleidingsconstructies niet door het huidige TELEMAC model worden berekend. Deze constructies zijn namelijk niet geïmplementeerd omdat deze te klein zijn voor de resolutie van het TELEMAC model. In werkelijkheid kunnen de bodemschuifspanningen door de aanwezigheid van turbulente wervels daarom hoger zijn dan door het model gesimuleerd. Ook de 3D effecten aan de voet van de pijlers en buizen die typisch verantwoordelijk zijn voor de ontgrondingskuilen die gevormd worden rond buisstructuren en pijlers (Plancke *et al.*, 2021; De Maerschack *et al.*, 2021) worden door het model niet gesimuleerd.

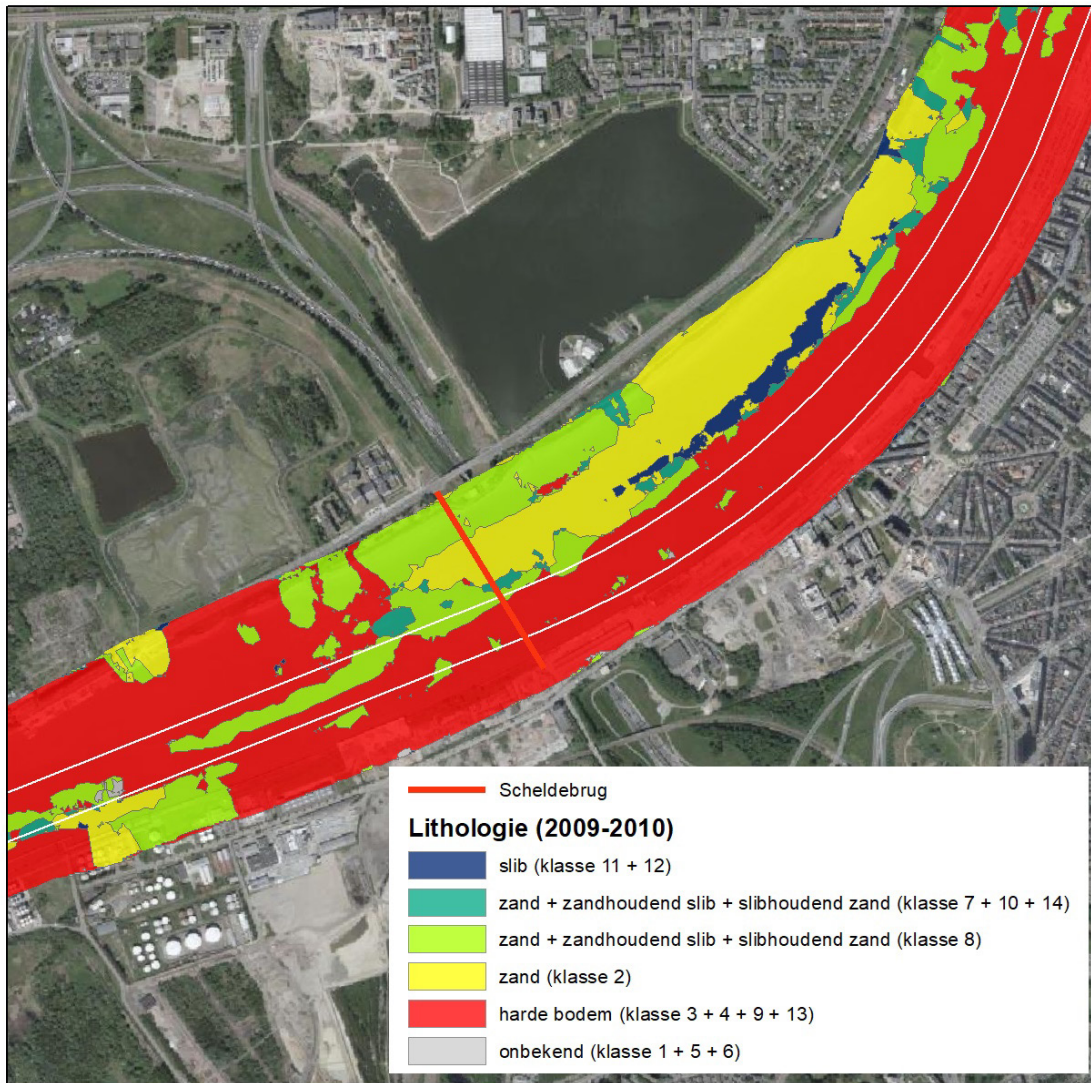
Tot slot wordt nog opgemerkt dat de feedback van morfologische ontwikkelingen als gevolg van de veranderde stroompatronen niet wordt doorgerekend. Er kan erosie van het slik of uitdieping van de geul verwacht worden in gebieden waar de bodemschuifspanningen toenemen, terwijl zones waar de bodemschuifspanningen afnemen waarschijnlijk verondiepen. Dergelijke veranderingen in bodemligging kunnen op hun beurt weer de stroomsnelheden beïnvloeden. Een verdieping van de hoofdvaargeul zal eerder beperkt zijn of door de aanwezigheid van harde lagen, Figuur 24.



Figuur 22 – Overschrijdingsfrequentie $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^2$ in referentierun (boven), run met brugpijlers (midden) en verschilplot (onder).



Figuur 23 – Maximale bodemschuifspanning in referentierun (boven), run met brugpijlers (midden) en verschilplot (onder).



Figuur 24 – Lithologische kaart 2009-2010 (De Maerschalck *et al.*, 2019)

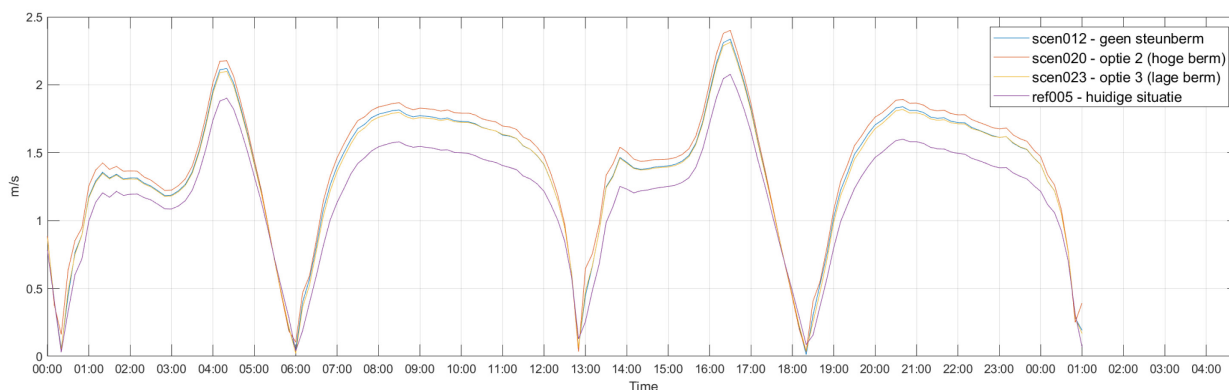
3.2 Effecten steunberm

3.2.1 Strooming

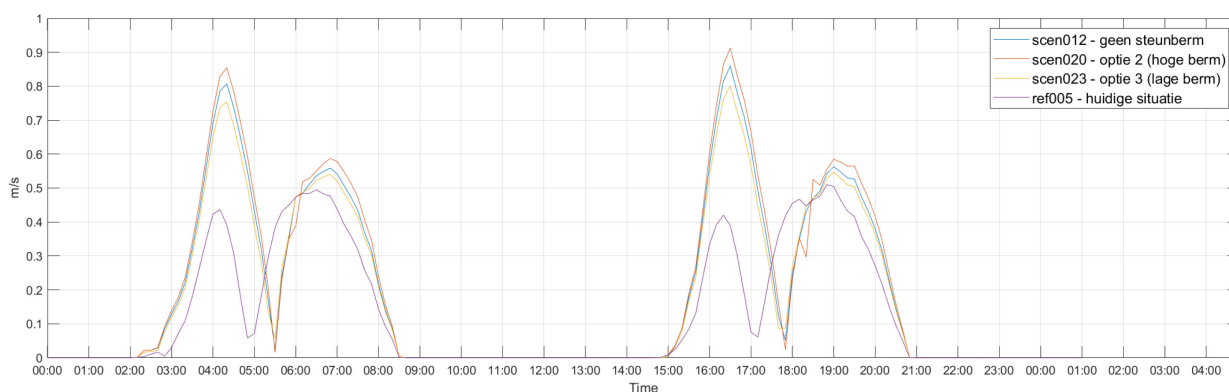
De invloed van diverse varianten van een onderwatersteunberm op de lokale hydrodynamica wordt eveneens onderzocht aan de hand van de maximale stroomsnelheid over een volledige springtij-doodtij cyclus. Figuur 27 toont voor de verschillende varianten (zie: Tabel 1 en Figuur 13) de invloed van de steunberm op de maximale snelheid ten opzichte van de huidige toestand (ref005) en ten opzichte van het scenario met brugpijlers maar zonder steunberm (scen012).

De impact van de brugpijlers op de stroming in het gebied is groter dan de invloed van de onderwatersteunberm, ongeacht welke variant wordt geïmplementeerd. Daardoor heeft de impact op de maximale stroomsnelheid ten opzichte van de huidige toestand in Figuur 27 steeds een gelijkaardig patroon. Tussen de varianten zijn wel kwantitatieve verschillen aanwezig.

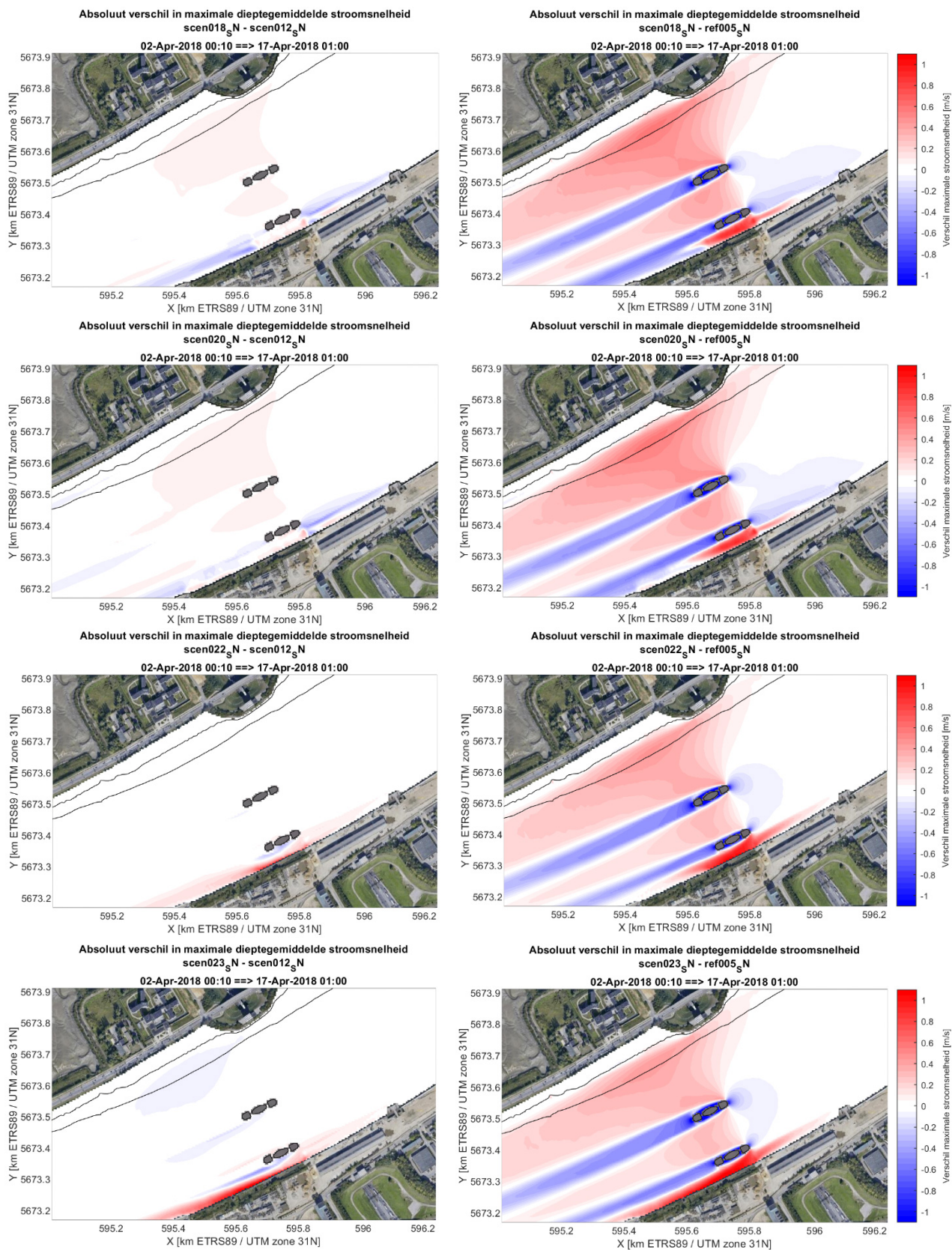
Samenvattend heeft een onderwatersteunberm langs rechteroever slechts een beperkt effect op de stroming in de vaargeul en op het slik op linkeroever met verschillen tot maximaal 0,1 m/s. De hoge variant (*optie 2*) leidt tot een subtiele verhoging van de stroming in de vaargeul en slik, terwijl de lage variant met afgraving van de kademuur (*optie 3*) tot een subtiele verlaging van de maximale stroming in de vaargeul leidt. Tussen rechteroever en de eerste brugpijler zijn de verschillen groter en geven de varianten met de hoge steunberm een afname van de stroomsnelheid, terwijl de lage steunberm in combinatie met een afgraving van de kademuur tot een toename van de stroming langs rechteroever leidt.



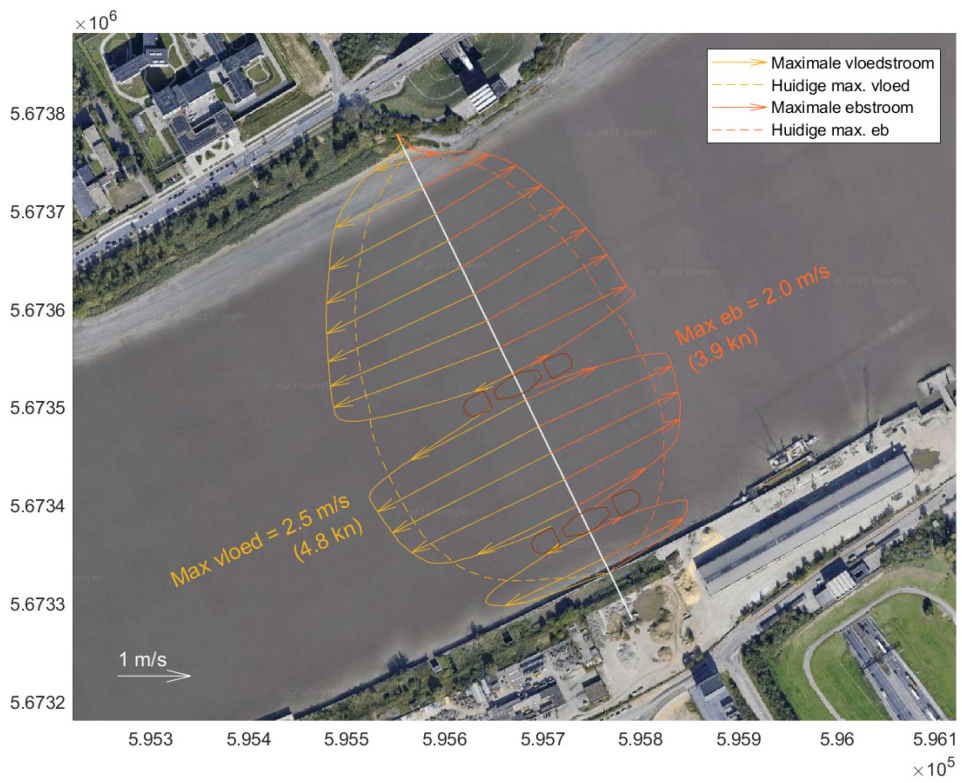
Figuur 25 – Dieptegemiddelde snelheid centraal in de vaargeul bij springtij 2/4/2018 voor de verschillende scenario's



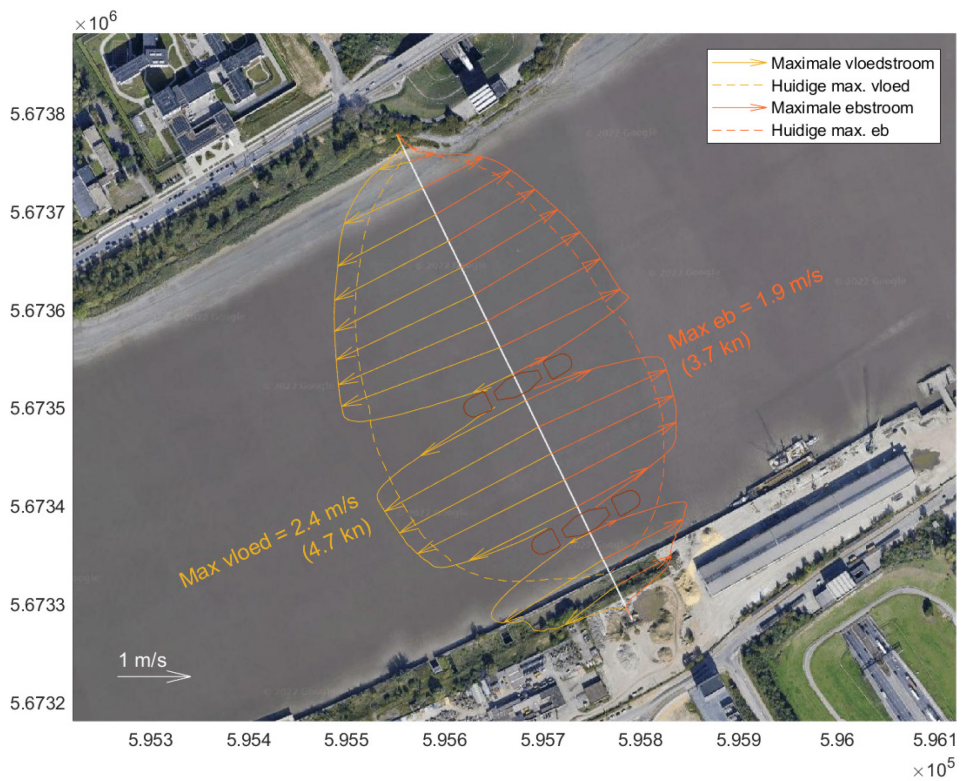
Figuur 26 – Dieptegemiddelde snelheid op het slik (2,5 m TAW) bij springtij 2/4/2018 voor de verschillende scenario's



Figuur 27 – Verschil in maximale stroomsnelheid over de volledige springtij-doodtij cyclus tussen de scenario’s met onderwatersteunberm en scen012 (i.e., brugpijlars zonder steunberm; links) en referentierun ref005 (i.e., huidige toestand; rechts).



Figuur 28 – Max currents transect LO-RO verbinding, scen020 - Brug met RO steunberm optie 2 (-1,5 mTAW) lange berm



Figuur 29 – Max currents transect LO-RO verbinding, scen023 - Brug met RO steunberm optie 3 (-5,75 mTAW) lange berm

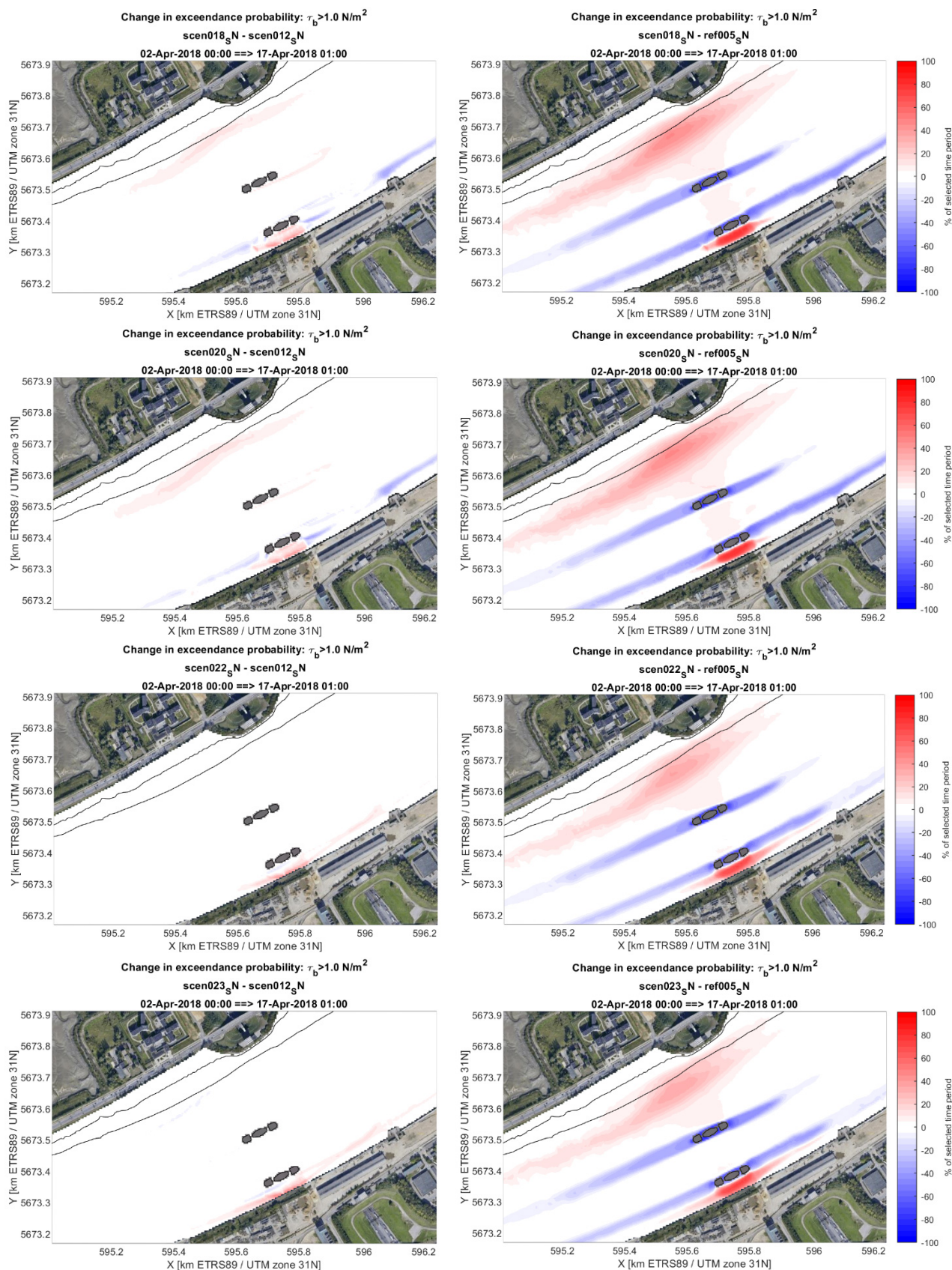
3.2.2 Bodemschuifspanning

De invloed van een onderwatersteunberm op de bodemschuifspanning in het studiegebied wordt wederom onderzocht aan de hand van de overschrijdingsfrequentie van een kritische waarde van $\tau_b \geq 1,0 \text{ N/m}^2$, gebaseerd op een volledige springtij-doodtij cyclus. Figuur 30 toont voor de verschillende varianten van de onderwatersteunberm (i.e., scen018, scen020, scen022 en scen023; zie: Tabel 1 en Figuur 13) de invloed van de steunberm op deze overschrijdingsfrequentie ten opzichte van de huidige toestand (ref005) en ten opzichte van het scenario met brugpijlers maar zonder steunberm (scen012).

Net als voor de maximale stroomsnelheden is de invloed van een onderwatersteunberm op de overschrijdingsfrequentie van $\tau_b \geq 1,0 \text{ N/m}^2$ een stuk kleiner dan de invloed van de brugpijlers zelf. In Figuur 30 zijn, afhankelijk van de variant, slechts subtiele verschillen te zien tussen scen012 (met brugpijlers, maar zonder steunberm) en de vier scenario's met steunberm.

Varianten scen018 en scen020 met een hoge steunberm (i.e., optie 2 in Figuur 4 en Figuur 13) geven een beperkte toename van de overschrijdingsfrequentie van $\tau_b \geq 1,0 \text{ N/m}^2$ ter hoogte van het slik op linkeroever. Deze toename in overschrijdingsfrequentie is zowel in intensiteit als in omvang kleiner dan de toename als gevolg van de brugpijlers, maar betekent wel een beperkte toename van het risico op afkalving van het slik langs linkeroever. Ter hoogte van de steunberm zelf neemt de bodemschuifspanning ook licht toe, terwijl opwaarts en afwaarts van de steunberm juist sprake is van een afname van de bodemschuifspanning. In de vaargeul is de invloed minimaal.

Varianten scen022 en scen023 met lage steunberm en een afgraving van de huidige kademuur (i.e., optie 3 in Figuur 4 en Figuur 13) hebben nauwelijks invloed op de bodemschuifspanningen in de vaargeul of op het slik langs linkeroever ten opzichte van de variant met enkel brugpijlers (scen012). Tussen rechteroever en de eerste brugpijler is door de toegenomen stroming wel sprake van een toename van de bodemschuifspanningen. Deze toename concentreert zich tegen rechteroever en is het sterkst in scen023 met lange steunberm (en dus ook een langere afgegraven sectie).



Figuur 30 – Verschil in overschrijdingsfrequentie $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$ tussen de scenario's met onderwatersteunberm en scen012 (i.e., brugpijlers zonder steunberm; links) en referentierun ref005 (i.e., huidige toestand; rechts).

4 Discussie en conclusies

In dit rapport zijn hydrodynamische modelsimulaties gepresenteerd waarmee de invloed van de inpassing van de nieuwe Scheldebrug net opwaarts van de Kennedytunnel op de stroompatronen in de nabije omgeving werden onderzocht. Hiervoor is een bestaand TELEMAC-2D model van de Beneden-Zeeschelde toegepast, waarbij het modelrooster lokaal werd verfijnd. Op basis van de modelresultaten kunnen onderstaande conclusies worden getrokken:

1. De brugpijlers van de nieuwe oeververbinding leiden tot een significante toename van de stroomsnelheden in de vaargeul, tijdens zowel eb als vloed. Uiteraard nemen de stroomsnelheden juist af in het zog achter de pijlers, waardoor de variatie in stroomsnelheid over de breedte van de vaargeul groter wordt.
2. De verkleining van het doorstroomoppervlak als gevolg van de inplanting van de brugpijlers zorgt voor een hogere maximale stroming over het intertidaal slik en over de ondiepte langs linkeroever. Dit betreft een zone van enkele honderden meters lang, vooral opwaarts van de Kennedytunnel. De toename in maximum stroomsnelheid en de hogere bodemschuifspanningen in deze zone zullen waarschijnlijk leiden tot erosie, wat een afkalving van het slik en een versteiling van de bodemhelling impliceert. Afwaarts van de Kennedytunnel is de impact eerder beperkt. Enerzijds omdat de ebstroom lager is dan de vloedstroom, maar ook omdat het intertidaal afwaarts de kennedytunnel enigszins bescherm is door de *insprong* van de dijk op linker over ter hoogte van de Kennedytunnel.
3. De constructie van een onderwatersteunberm ter bescherming van de kademuur langs rechteroever heeft een veel beperktere invloed dan de brugpijlers zelf. Afhankelijk van de variant neemt de stroming tussen rechteroever en de eerste brugpijler toe of af (i.e., toename bij een lage steunberm en afgraving van een talud in de huidige kade; afname bij een hoge steunberm). In de vaargeul en op het slik langs linkeroever is het effect van de steunberm op de stroomsnelheid ongeacht de variant echter beperkt tot minder dan 0,1 m/s.

4.1 Aanbevelingen

De berekeningen in voorliggend rapport tonen aan dat het slik op linkeroever, en dan vooral de zone opwaarts de Kennedytunnel mogelijk gevoelig zal zijn voor erosie als gevolg van gewijzigde stromingen door de constructie van de pijlers. Het wordt daarom aanbevolen om tijdens en na de bouw van de pijlers de evolutie van intertidaal nauwlettend op te volgen en indien nodig erosiebeschermende maatregelen te nemen.

Met betrekking tot de verschillende varianten voor de onderwatersteunberm wordt geen aanbeveling gegeven omdat de invloed van deze steunberm op de stroming in de vaargeul en langs linkeroever zeer beperkt lijkt.

Afhankelijk van de resultaten van de nautische simulatiestudie kan het aangewezen zijn om de lengte van het zog en de mogelijke turbulente wervels in het zog achter de pijlers in meer detail te modelleren met behulp van een CFD-model. Het huidige hydrodynamische model is namelijk niet expliciet gevalideerd voor de representatie van het zog achter de pijlers. Bovendien kon de invloed van de geleideconstructies rondom de pijlers op de turbulente stroming niet worden geïmplementeerd omwille van de resolutie.

Referenties

De Maerschallck, B.; Eloot, K.; Plancke, Y.; Mostaert, F. (2019). Advies Scheldebrug: Deelrapport 1 – Stroming en morfologie. Versie 4.0. WL Rapporten, 18_120_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

De Maerschallck, B.; Verwilligen, J.; Plancke, Y. (2021). Wachtsteigers Beneden Zeeschelde: deelrapport 1. Morfologisch en nautisch onderzoek uitbreiding wachtsteigers Galgeschoor en Plaat van de Parel. Versie 4.0. WL Rapporten, 21_120_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Dorfmann, C. (2017). Flow Phenomena in a Reservoir investigated by Field Measurements and Numerical Modelling. Graz University of Technology. 160 pp.

Eloot, K.; Verwilligen, J.; De Maerschallck, B.; Mostaert, F. (2019). Advies Scheldebrug: Deelrapport 3 – Nautica. Versie 4.0. WL Rapporten, 18_120_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Eloot, K.; Verwilligen, J. (2022). Antwerpen Oeververbinding tussen linker- en rechteroever: Deelrapport 3 – Simulatiestudie invloed brugpijlers en onderwatertalud rechteroever. Versie 0.1. WL Rapporten, 21_113_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen

Hervouet, J.-M. (2007). Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the finite element method. ISBN 9780470035580. 390 pp. doi:10.1002/9780470319628

Kolokythas, G.; Smolders, S.; De Maerschallck, B.; Mostaert, F. (2020). Accessibility INEOS Oxide jetty: sub report 3. Development of a high-resolution 2D hydrodynamic model for the Lower Sea Scheldt. Version 3. *FHR reports*, 19_075_3. Flanders Hydraulics Research: Antwerp

Merkel, U.; Kessler, C. (2016). Vortex streets behind bridge piers, studies with TELEMAC 2D/3D & TELEMAC AD. 23rd TELEMAC & Mascaret User Club, Parijs.

Plancke, Y.; De Maerschallck, B.; Mostaert, F. (2021). Wachtsteiger Ketelplaat: deelrapport 1. Morfologische ontwikkelingen. Versie 3.0. WL Rapporten, 21_002_1. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen.

Bijlage A – Modelinstellingen

Tabel 3 – Parameterinstellingen BeZS-model.

Parameter	Value
TIME STEP	0,5 s (original BeZS-model: 2 s)
INITIAL CONDITIONS	Constant elevation: 1,57 m TAW
VERSION OF TELEMACH	TELEMACH V7p2r2
WIND	On (spatially uniform)
CORIOLIS FORCE	No
SALINITY TRANSPORT	Off
LAW OF BOTTOM FRICTION	Manning ($n = 0.018 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$)
OPTION FOR TREATMENT OF TIDAL FLATS	1: equations solved everywhere with correction on tidal flats
TREATMENT OF NEGATIVE DEPTHS	1: smoothing
FREE SURFACE GRADIENT COMPATIBILITY	0.9
TURBULENCE MODEL	5: Mixing Length model $C_L = 0,26$ (original BeZS-model: depth and tide dependent mixing length)
SCHEME FOR ADVECTION OF VELOCITIES	1: method of characteristics
SCHEME FOR ADVECTION OF WATER DEPTH	5: conservative scheme
IMPLICITATION FOR DEPTH	0,6
IMPLICITATION FOR VELOCITY	1,0 (original BeZS-model: 0,6)
SOLVER	7: Generalized Minimum Residual (GMRES) method

Bijlage B – Gevoeligheidsanalyse rekenrooster

Resolutie en tijdstap

De lokale verfijning van het grid ter hoogte van de pijlers vereist ook een kleinere tijdstap voor de stabiliteit van het model. Zowel de lokale resolutie van het model ter hoogte van de pijlers als de tijdstap hebben een beperkt effect op de modelresultaten en dan vooral met name de breedte en lengte van het zog achter de pijlers. De waterstanden zijn nagenoeg identiek. De verschillen zitten hem in de snelheden in de nabijheid van de pijlers, in het bijzonder tijdens de ebfase, en opkomende vloed. In deze fases van het getij is fluctueert het zog. Het dynamisch karakter is gevoelig voor gridresolutie, tijdstap en numerieke parameters, zie ook volgende paragraaf en Bijlage C.

De maximale vloodsnelheid is voor de meeste locaties vergelijkbaar. Behalve opwaarts en ter hoogte van het slik bij maximale vloed: Het opwaartse meetpunt ligt bij vloed afwaarts van de linkerpijler. In geval van hogere resolutie (scen008 en scen009) het zog smaller en rijkt het verder. Het observatiepunt “opwaarts” wordt in scen008/009 sterker beïnvloed door het zog dan in modelrun scen004, Zie Figuur 40. Het observatiepunt “linkeroever slik” ligt op een locatie met een sterke gradiënt in de snelheid in de dwarsrichting. In geval van een lagere resolutie wordt de stroming door de pijlers iets verder naar buiten geduwd waardoor ter hoogte van het observatie punt de maximale vloed 10cm hoger ligt. Maar algemeen gezien is de globale stroming ter hoogte van het slik vergelijkbaar voor de verschillende modelruns.

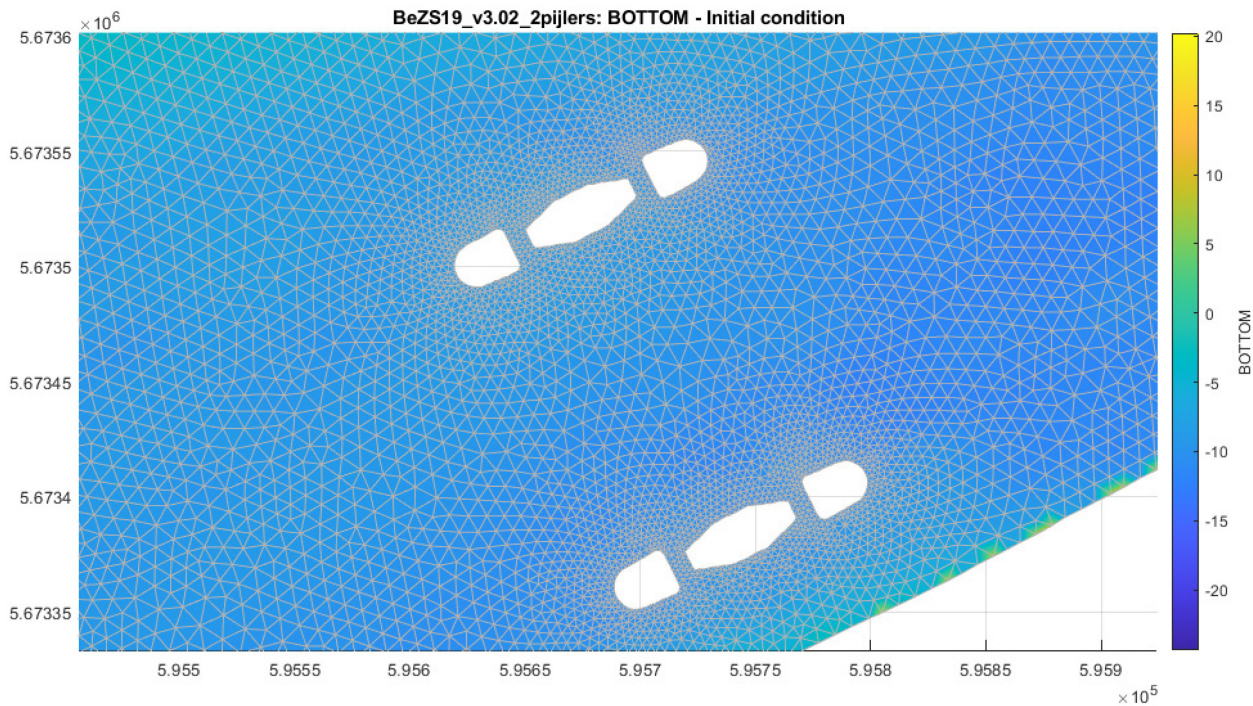
Algemeen gaan we ervan uit dat het model met de hoogst resolutie iets nauwkeurigere resultaten geeft. De tijdstap heeft een beperktere invloed (vergelijking scen008 en scen009). **Er wordt gekozen om de instellingen van scen009 te gebruiken voor de verdere simulaties: $\Delta x \approx 1,5 \text{ m}$, $\Delta t = 0,5 \text{ s}$**

Tabel 4 – Model runs gevoeligheidsanalyse gridresolutie en tijdstap

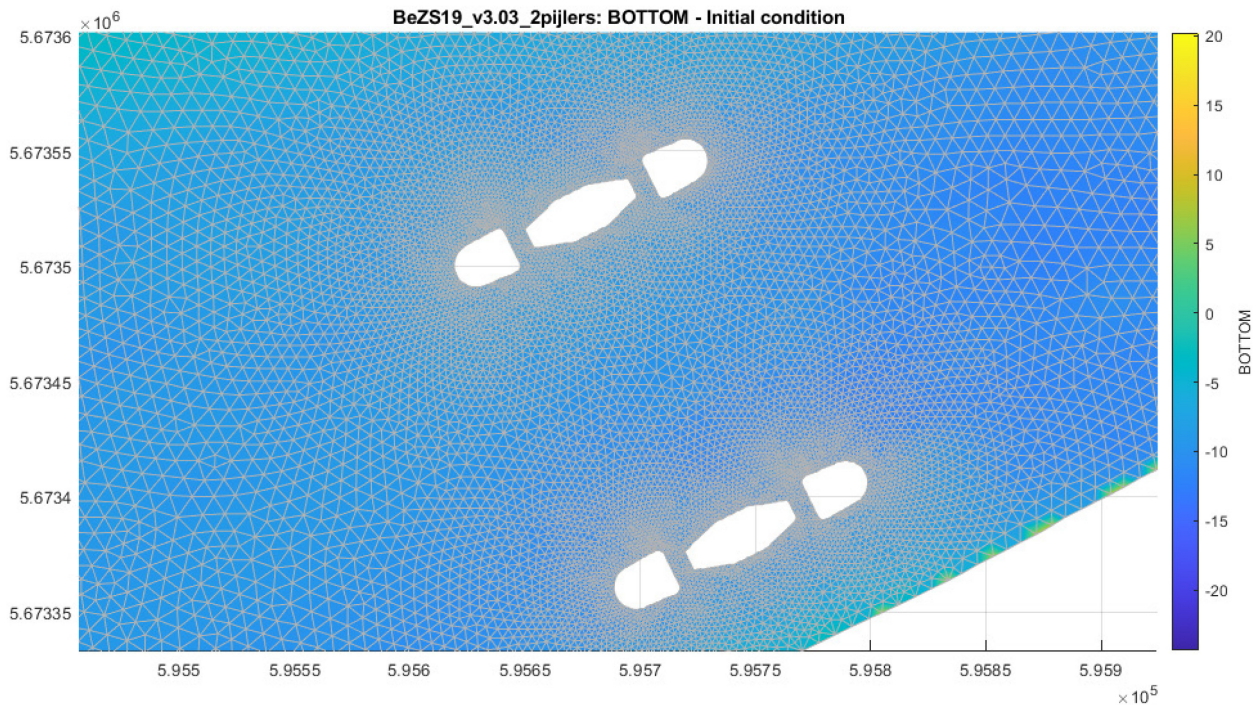
	Resolutie ter hoogte van de pijlers Δx	Tijdstap Δt	Implication factor for VEL ²	CPU -time ³ hh:mm
Scen004	2.0 m	0.50 s	0.6	0:59
Scen008	1.5 m	0.25 s	1.0	1:54
Scen009	1.5 m	0.50 s	1.0	1:09

² Numerieke parameter voor stabiliteit van de run

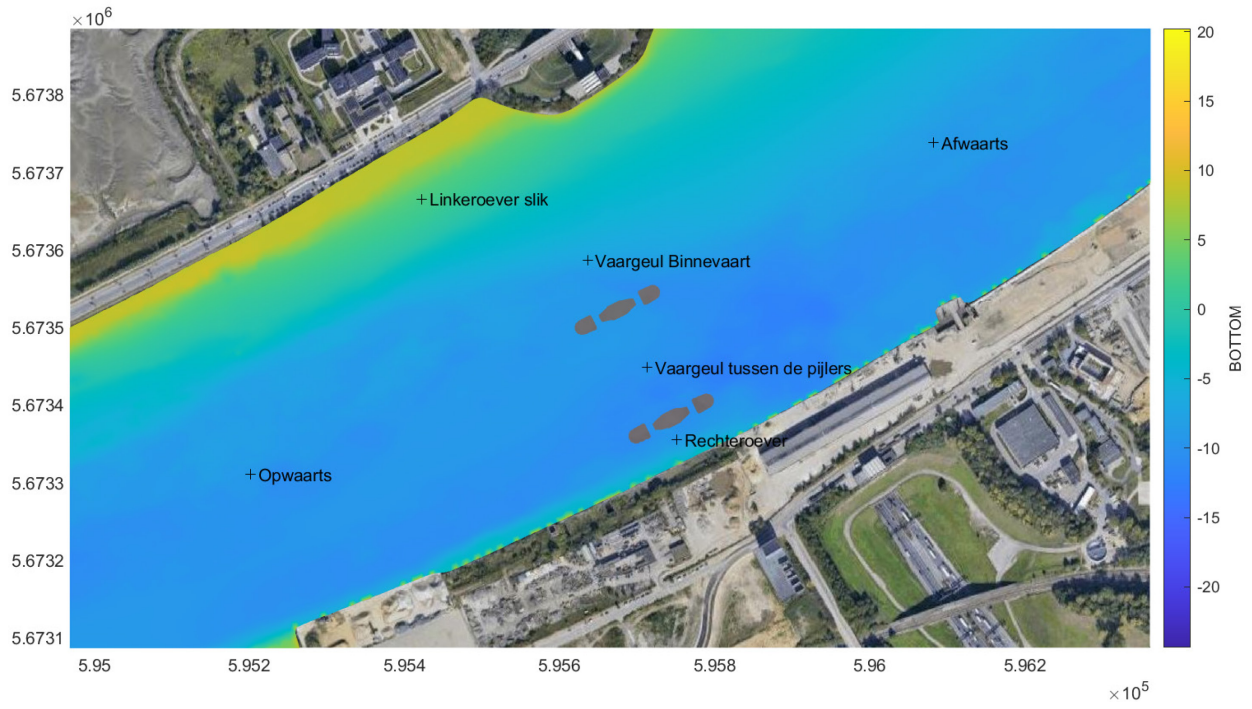
³ Reynolds 2 x 16 cores



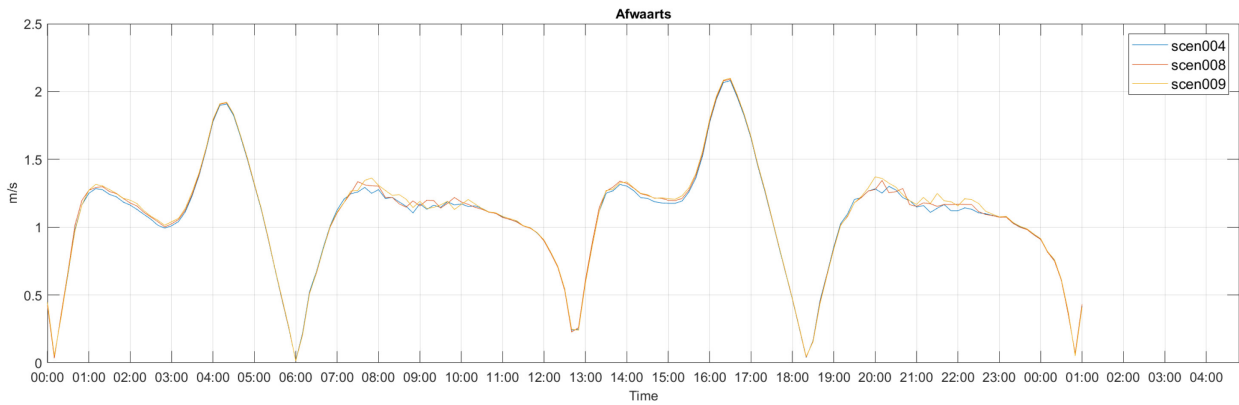
Figuur 31 – Detail rooster scen004 – 2 m resolutie bij de pijlers



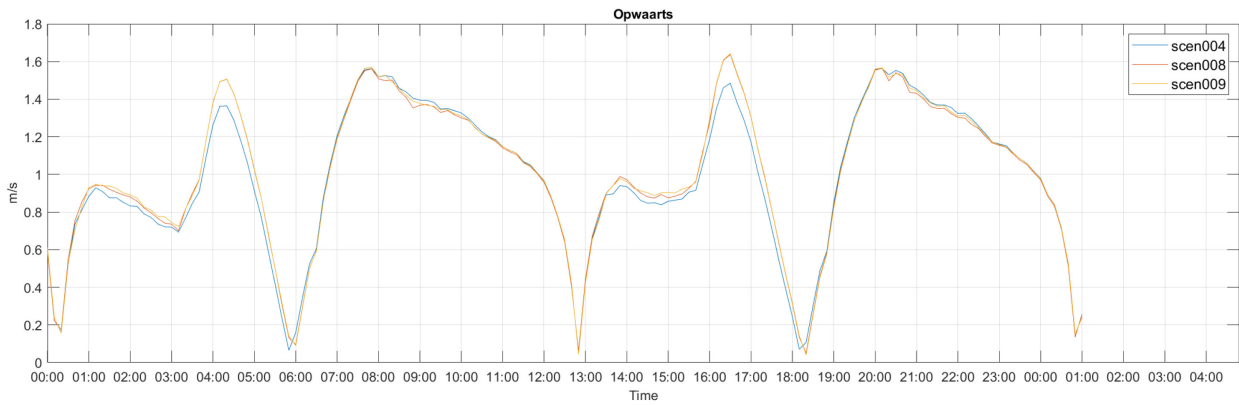
Figuur 32 – Detail rooster scen004 – 1,5 m resolutie bij de pijlers



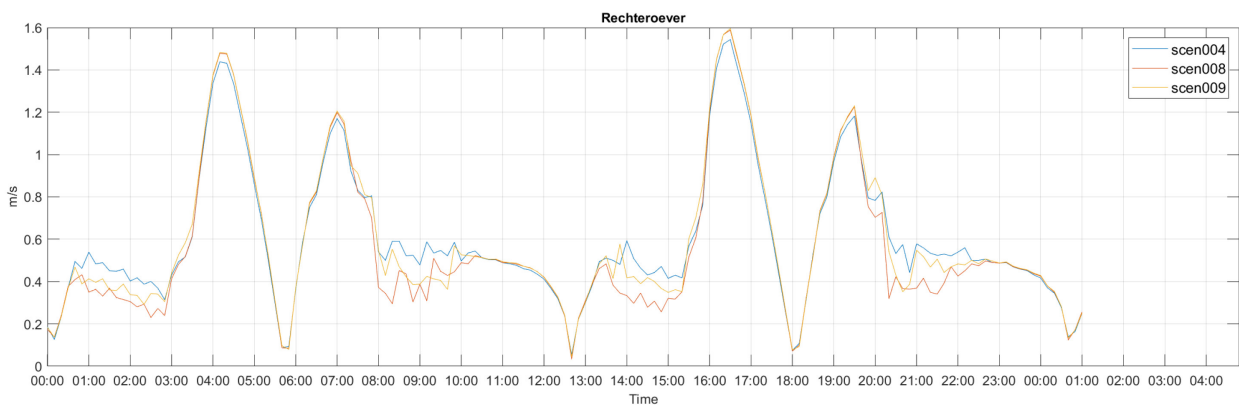
Figuur 33 – Locaties van de observatiepunten voor onderstaande tijdseries



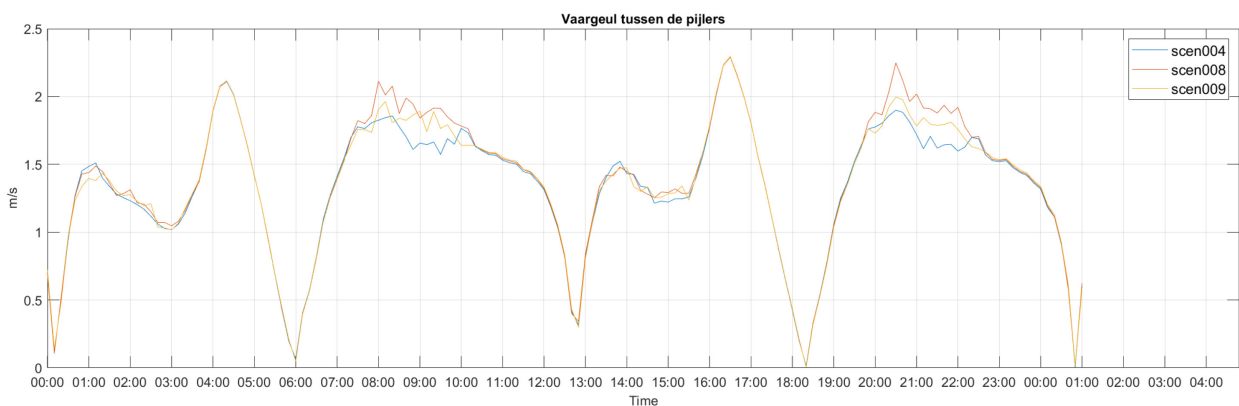
Figuur 34 – Gemodelleerde stroomsnelheid Afwaarts
(scen004: $\Delta x \approx 2\text{m}$ – $\Delta t = 0,50\text{s}$; scen008: $\Delta x \approx 1,5\text{m}$ – $\Delta t = 0,25\text{s}$; scen009 $\Delta x \approx 1,5\text{m}$ – $\Delta t = 0,50\text{s}$)



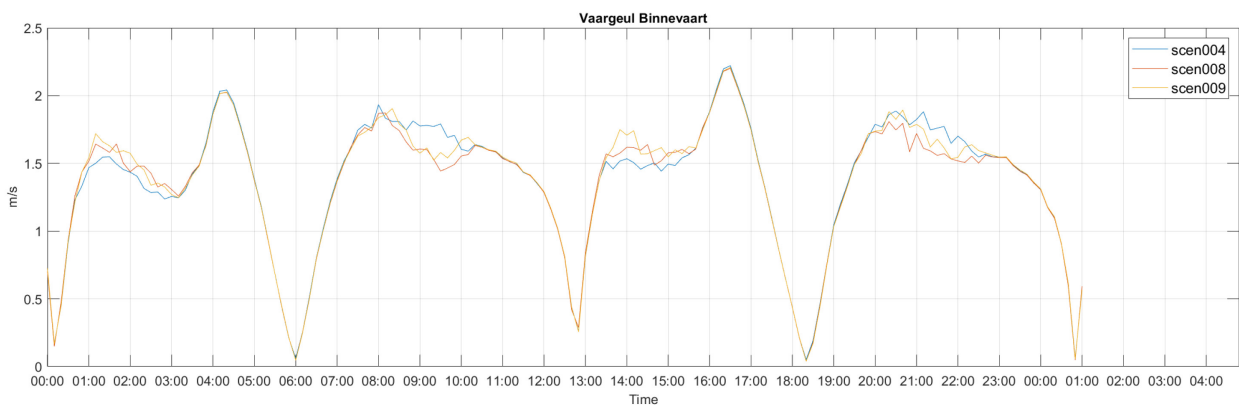
Figuur 35 – Gemodelleerde stroomsnelheid Opwaarts
(scen004: $\Delta x \approx 2\text{m}$ – $\Delta t = 0,50\text{s}$; scen008: $\Delta x \approx 1,5\text{m}$ – $\Delta t = 0,25\text{s}$; scen009 $\Delta x \approx 1,5\text{m}$ – $\Delta t = 0,50\text{s}$)



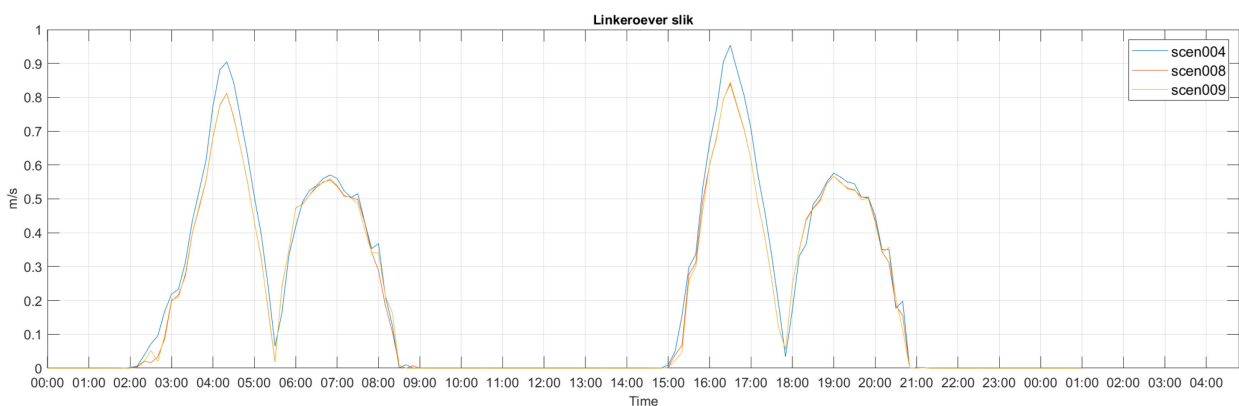
Figuur 36 – Gemodelleerde stroomsnelheid Rechteroever
(scen004: $\Delta x \approx 2\text{m}$ – $\Delta t = 0,50\text{s}$; scen008: $\Delta x \approx 1,5\text{m}$ – $\Delta t = 0,25\text{s}$; scen009 $\Delta x \approx 1,5\text{m}$ – $\Delta t = 0,50\text{s}$)



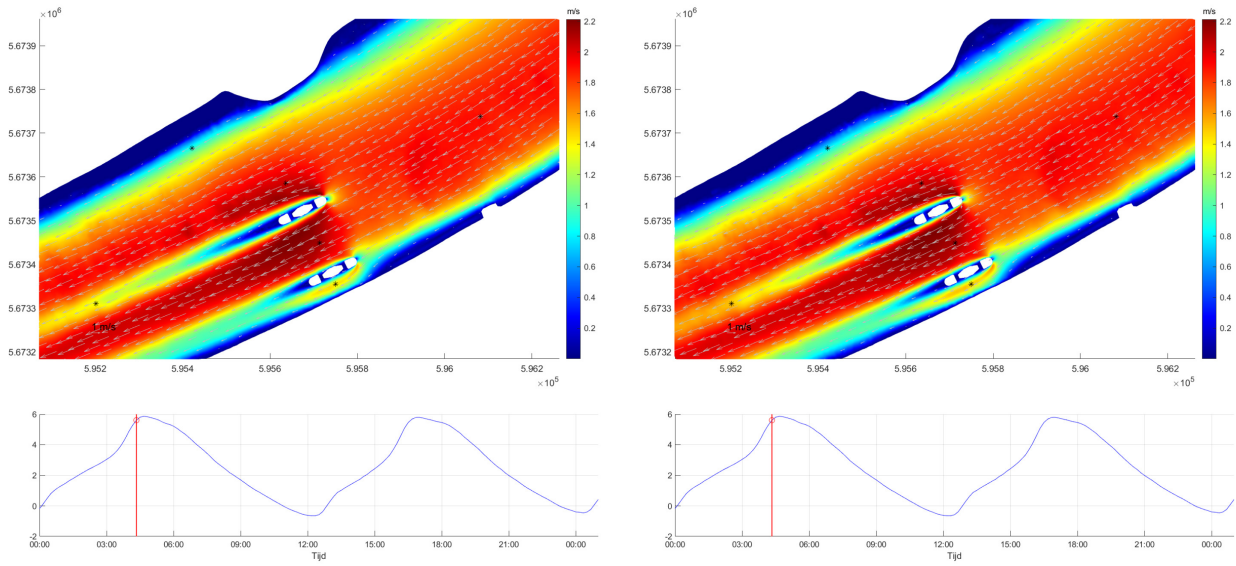
Figuur 37 – Gemodelleerde stroomsnelheid Vaargeul tussen de pijlers
 (scen004: $\Delta x \approx 2\text{m}$ – $\Delta t = 0,50\text{s}$; scen008: $\Delta x \approx 1,5\text{m}$ – $\Delta t = 0,25\text{s}$; scen009 $\Delta x \approx 1,5\text{m}$ – $\Delta t = 0,50\text{s}$)



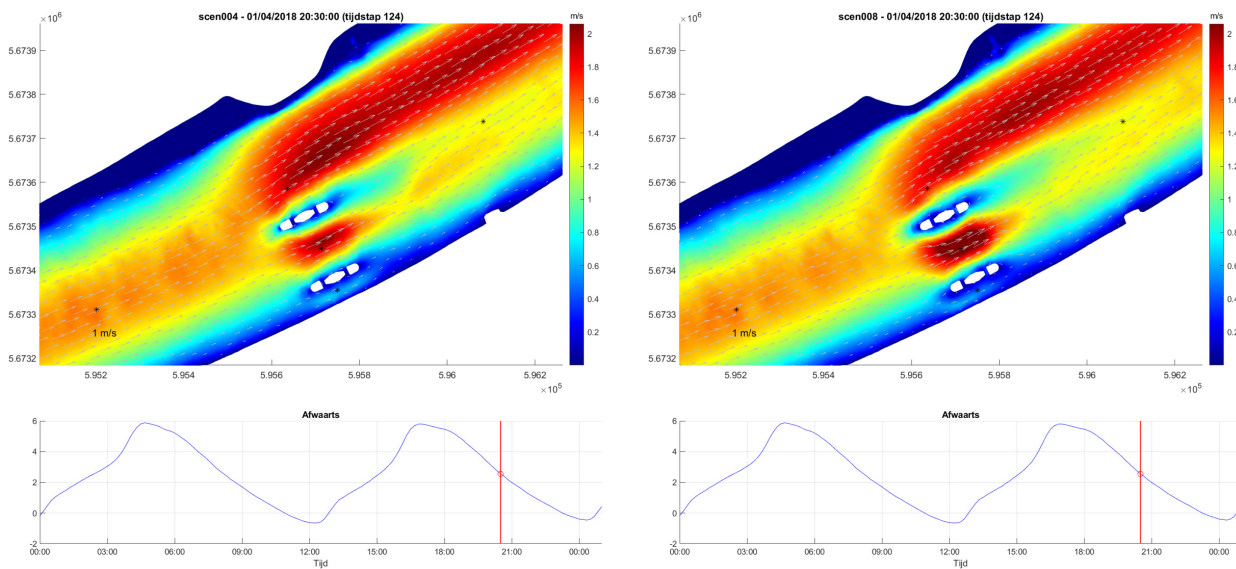
Figuur 38 – Gemodelleerde stroomsnelheid Vaargeul Binnevaart
 (scen004: $\Delta x \approx 2\text{m}$ – $\Delta t = 0,50\text{s}$; scen008: $\Delta x \approx 1,5\text{m}$ – $\Delta t = 0,25\text{s}$; scen009 $\Delta x \approx 1,5\text{m}$ – $\Delta t = 0,50\text{s}$)



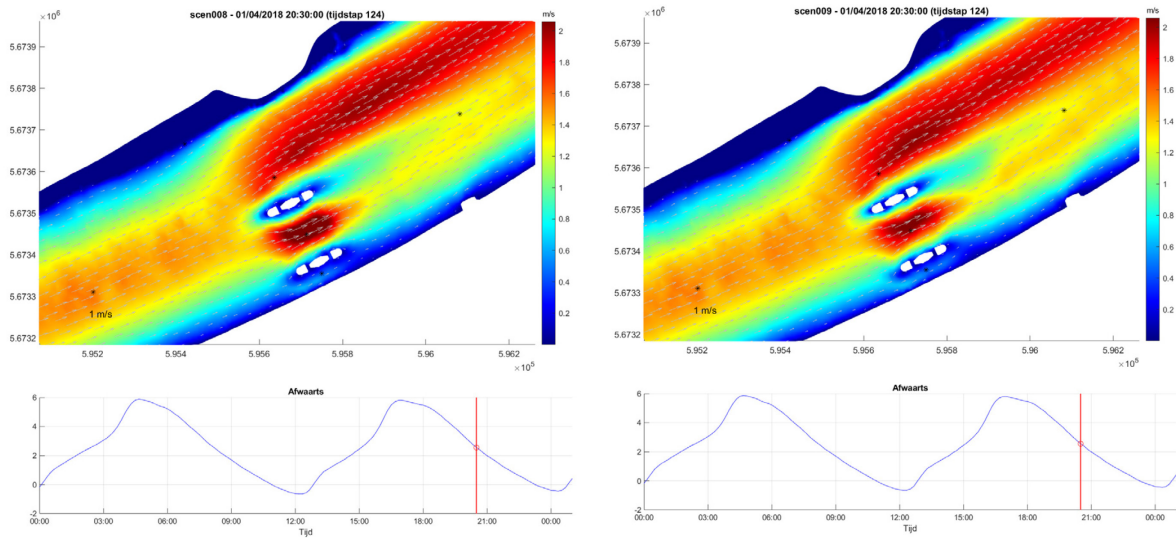
Figuur 39 – Gemodelleerde stroomsnelheid Linkeroever slik (2,5 m TAW);
 scen004: $\Delta x \approx 2\text{m}$ – $\Delta t = 0,50\text{s}$; scen008: $\Delta x \approx 1,5\text{m}$ – $\Delta t = 0,25\text{s}$; scen009: $\Delta x \approx 1,5\text{m}$ – $\Delta t = 0,50\text{s}$



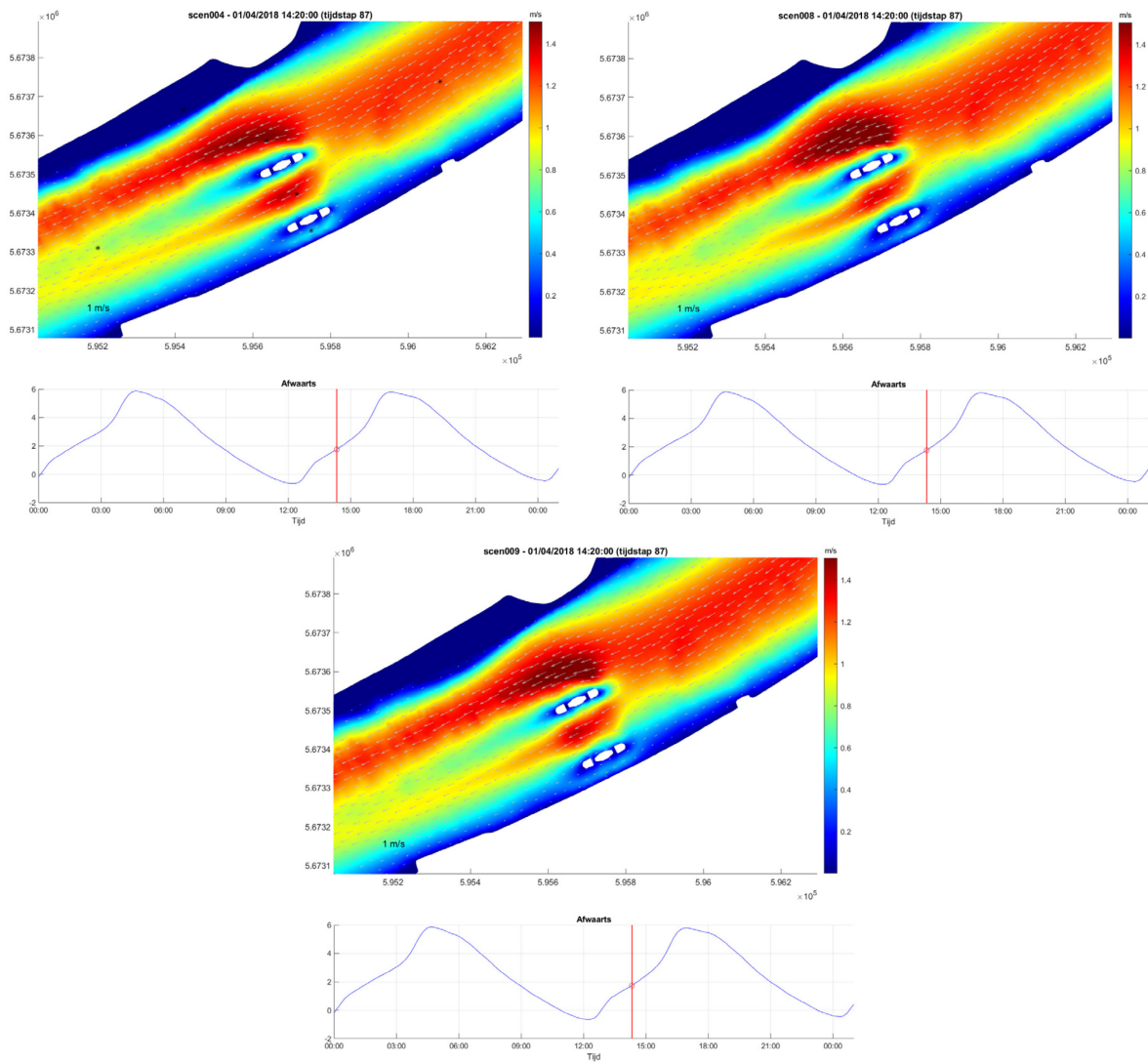
Figuur 40 – Vergelijking scen004: $\Delta x \approx 2m$, $\Delta t = 0,50s$ (links) en scen008: $\Delta x \approx 1,5m$, $\Delta t = 0,25s$ (rechts)
- 01/04/2018 04:20:00 (tijdstep 27)



Figuur 41 – Vergelijking scen004: $\Delta x \approx 2m$, $\Delta t = 0,5s$ (links) en scen008: $\Delta x \approx 1,5m$, $\Delta t = 0,25s$ (rechts)
- 01/04/2018 20:30:00 (tijdstep 124)



Figuur 42 – Vergelijking scen008: $\Delta x \approx 1,5 \text{ m}$, $\Delta t = 0,25 \text{ s}$ (links) en scen009: $\Delta x \approx 1,5 \text{ m}$, $\Delta t = 0,5 \text{ s}$ (rechts)



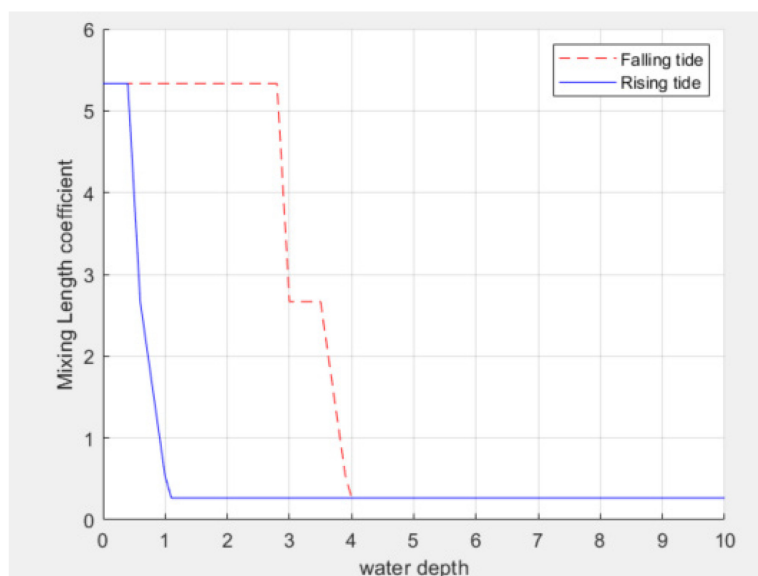
Figuur 43 – vergelijking scen004: $\Delta x \approx 2,5 \text{ m}$, $\Delta t = 0,5 \text{ s}$ (links); scen008: $\Delta x \approx 1,5 \text{ m}$, $\Delta t = 0,25 \text{ s}$ (rechts); scen009: $\Delta x \approx 1,5 \text{ m}$, $\Delta t = 0,5 \text{ s}$ (onder)

Mixing Length Turbulentiemodel en -parameterinstellingen

Definitie: $L_m = C_L \kappa h$; met C_L een kalibratiecoëfficiënt (range C_L : 0,2 – 0,5), κ is de von Karman constant en h is de waterdiepte.

Bij de kalibratie van het BeZS-model (Kolokythas *et al.*, 2020), bleek dat voor Oosterweel in het ondiepe gedeelte de vloed snelheid goed benaderd werd, maar bij eb de snelheid in het vaste meetpunt onderschat werd, terwijl in de vaargeul de snelheid wel goed benaderd werd. Daarom werd er voor gekozen om de het model te kalibreren met een variabele mixing lengt coëfficiënt C_L :

“ C_L remained constant and equal to the default value during flood, and gradually increased up to 20 times the default value, i.e. from 0.267 to 5.34 (and vice versa) for free surface elevations lower than 4 m TAW only during the ebb phase (the criterion was regulated by a free surface gradient condition).”



Figuur 44 – Variabele mixing length coëfficiënt C_L als functie van getij en waterdiepte zoals geïmplementeerd in BeZS-model.

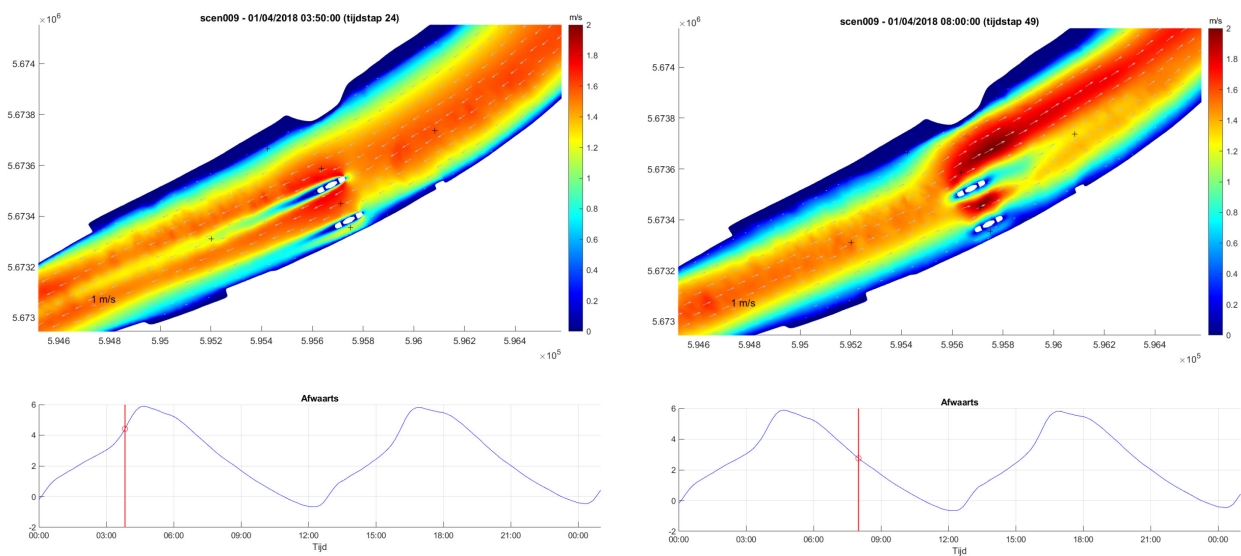
Uit de modelresultaten blijkt dat het stromingspatroon om de pijlers significant verschillend is bij vloed dan bij eb. Om te onderzoeken in welke mate deze verschillen te verklaren zijn door de verschillen in bathymetrie op en afwaarts de brug (afwaarts bevindt er zich op de linkeroever nog een plaat) of aan de instellingen van het turbulentiemodel zijn twee extra simulaties uitgevoerd met een constante mixing length coëfficiënt C_L : scen0012 met de standaardwaarde van 0,26 (dit is ook de waarde die bij opkomend getij geldt en bij afgaand getij in de diepere delen, zie Figuur 44) en scen013 met $C_L=2,66$ (tien maal de standaardwaarde).

Niettegenstaande in het originele BeZS-model C_L bij opkomend tij enkele verhoogd wordt in de ondiepe delen, blijkt uit onderstaande figuren dat dit toch een significant effect heeft bij eb-stroom op de stroming om de pijlers. Bij een constant C_L is de stroming bij eb en vloed om de pijlers vergelijkbaar. Bij een verhoogde C_L wordt de stroming om de pijlers sterk asymmetrisch. Er is echter geen fysische verklaring voor een dergelijke asymmetrie. Bovendien is een waarde van 2,66 buiten het bereik van wat in de literatuur als gangbaar wordt beschouwd: 0,26 – 1,25 (Dorfman *et al.*, 2017). Het *mixing length turbulentiemodel* houdt geen rekening met transport van turbulent kinetische energie en dissipatie. Ter vergelijking is een run toegevoegd op basis van het K- ϵ model (scen015). Echter bij de simulatie zonder pijlers (ref006) crashte de run. Voor het scenario met pijlers is het K- ϵ model (scen015) vergelijkbaar met de mixing length $C_L=0,26$ run (scen012).

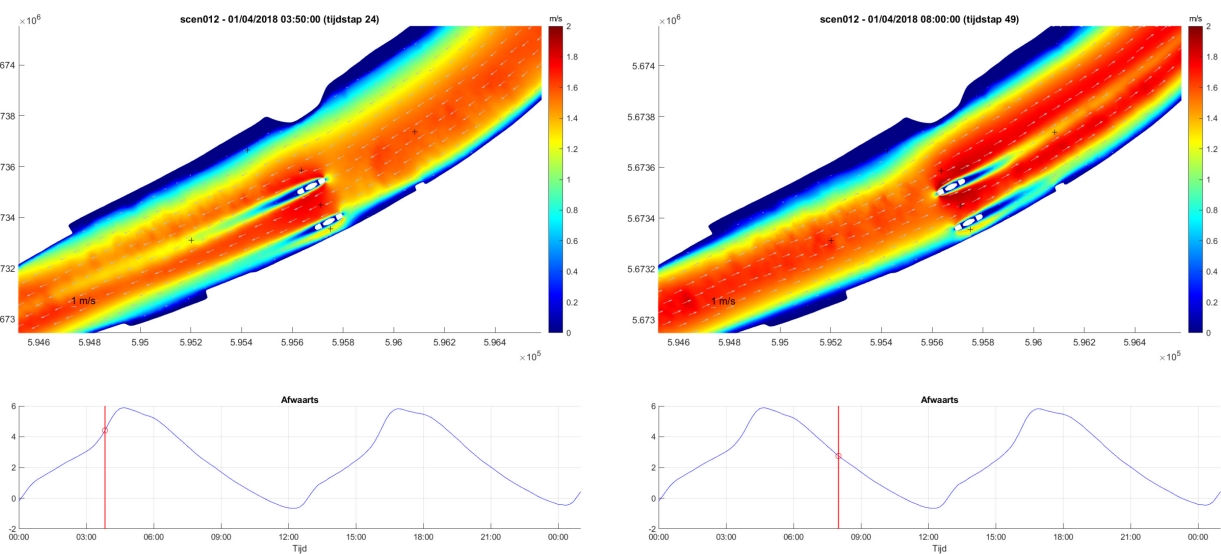
Omdat scen012 het dichtst bij het originele model ligt en meest stabiel is, wordt ervoor geopteerd om de mixing length coëfficiënt constant te houden op de standaard waarde van 0,26.

Tabel 5 – Model runs gevoeligheid C_L

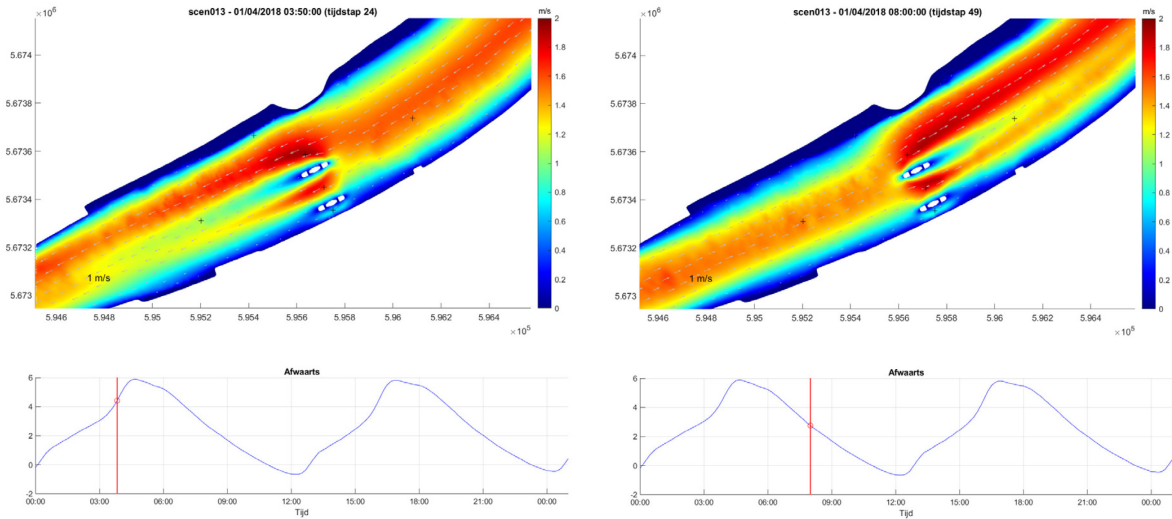
	Mixing length coëfficiënt C_L
Scen009	Variabel, zie bovenstaande code/figuur
Scen012	0,26 (TELEMAC2D default)
Scen013	2,66 (10 x TELEMAC2D default)
Scen014	1,25 (maximum waarde in Dorfman 2017)
Scen015	K- ϵ turbulentie model



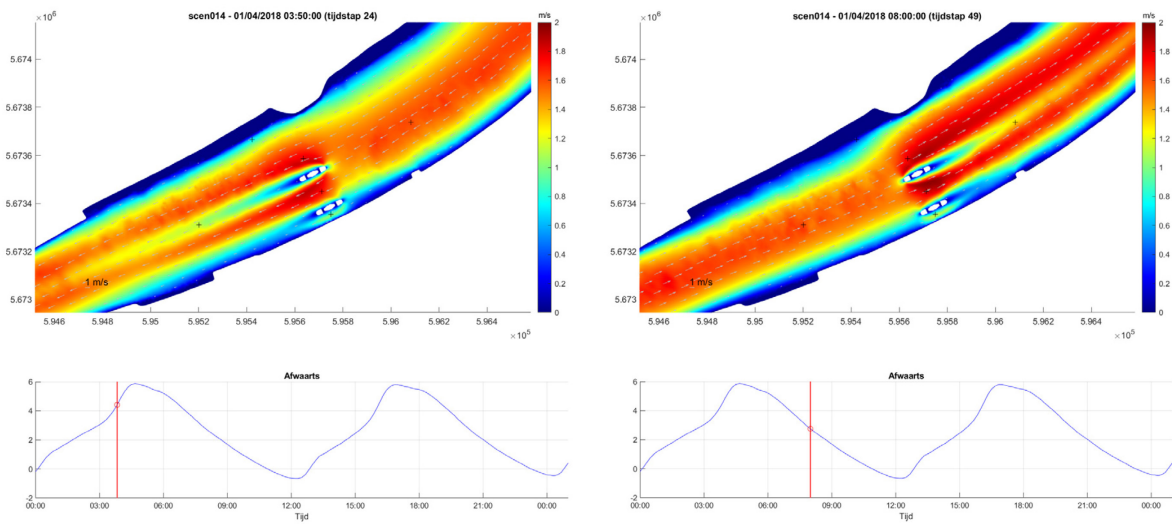
Figuur 45 – scen009 - variabele C_L , bij vloedstroom (links) en ebstroom (rechts)



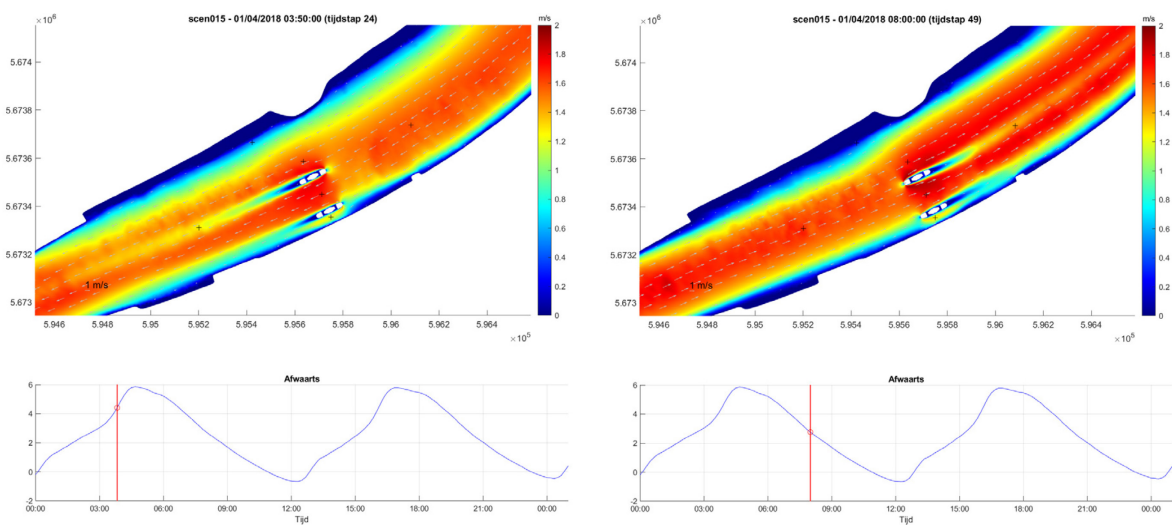
Figuur 46 – scen012 – $C_L = 0,26$ (T2D Default value), bij vloedstroom (links) en ebstroom (rechts)



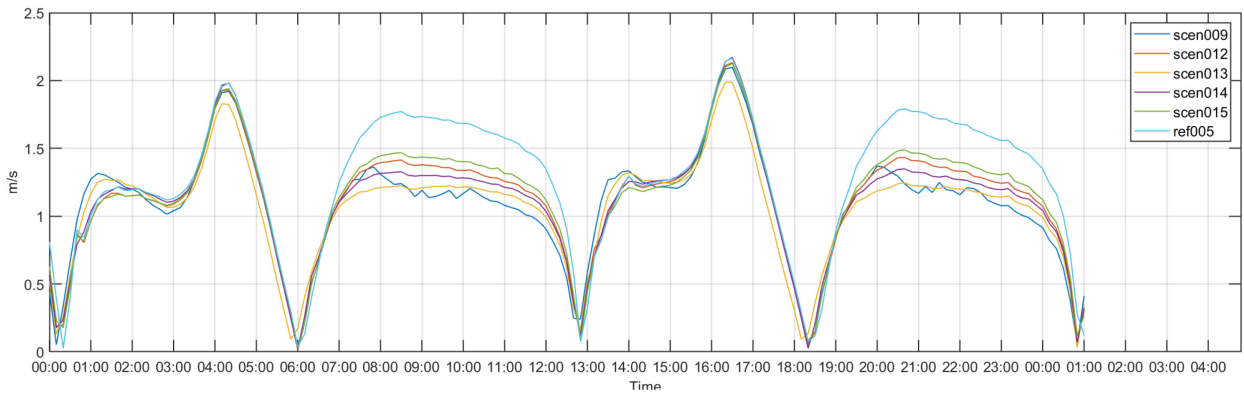
Figuur 47 – scen013 – $C_L = 2,66$ (10 x T2D Default value), bij vloedstroom (links) en ebstroom (rechts)



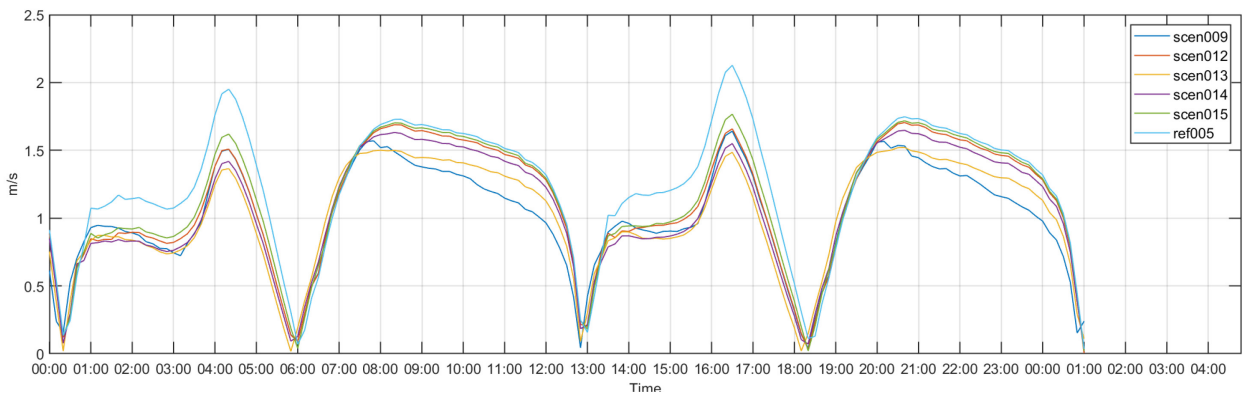
Figuur 48 – scen014 – $C_L = 1,25$; bij vloedstroom (links) en ebstroom (rechts)



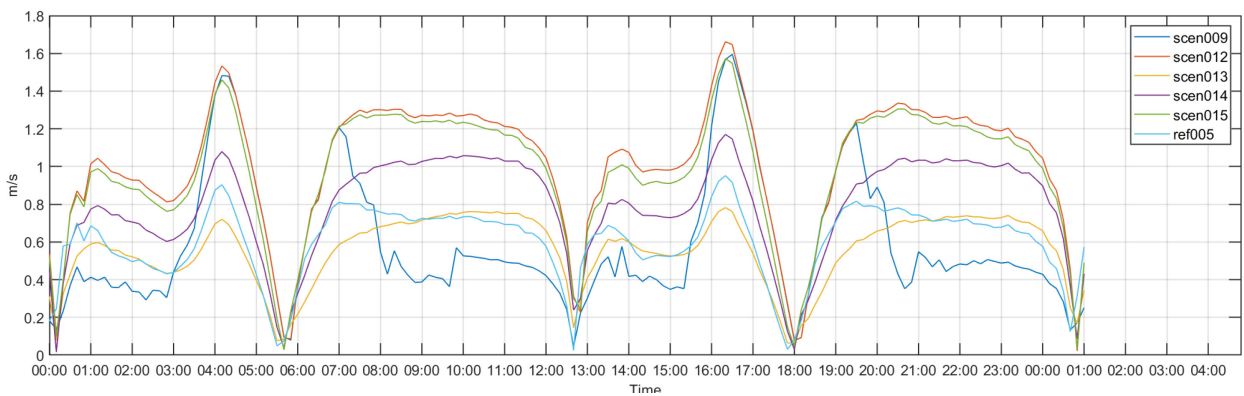
Figuur 49 – scen015 – k-ε turbulence model; bij vloedstroom (links) en ebstroom (rechts)



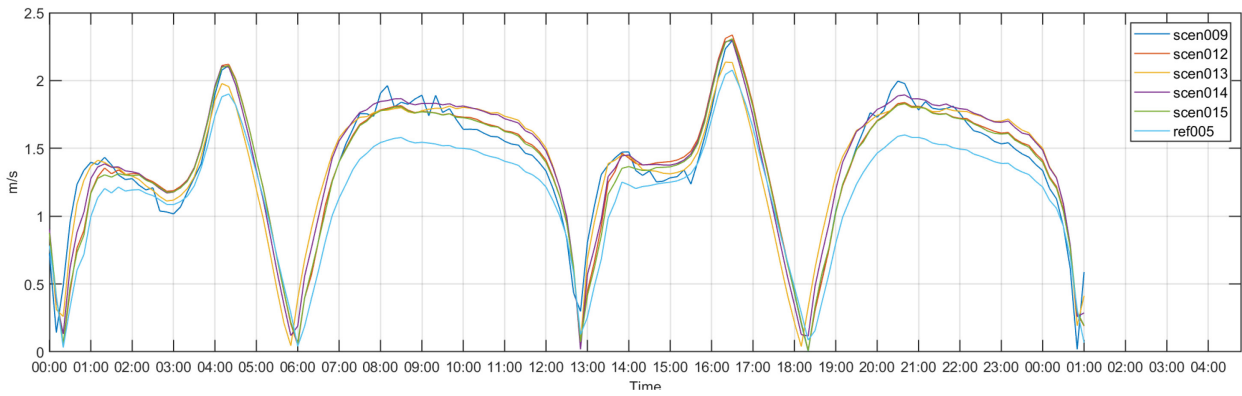
Figuur 50 – Gemodelleerde stroomsnelheid - Afwaarts



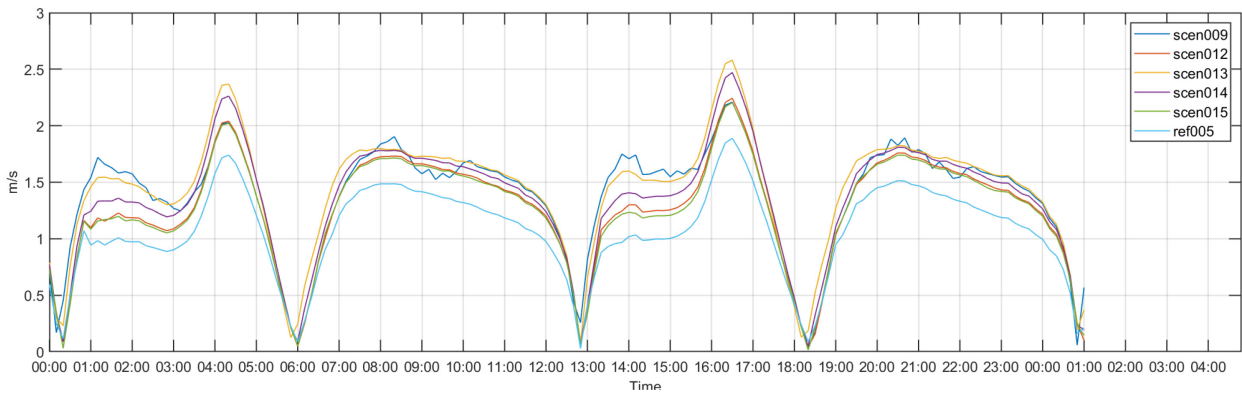
Figuur 51 – Gemodelleerde stroomsnelheid – Opwaarts



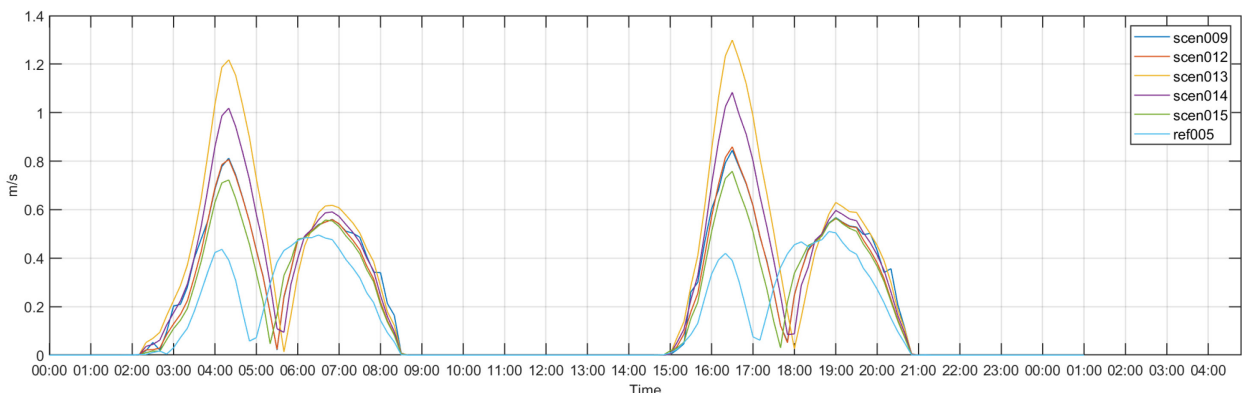
Figuur 52 – Gemodelleerde stroomsnelheid - Rechteroever



Figuur 53 – Gemodelleerde stroomsnelheid - Vaargeul tussen de pijlers



Figuur 54 – Gemodelleerde stroomsnelheid - Vaargeul Binnevaart



Figuur 55 – Gemodelleerde stroomsnelheid - Linkeroever slik

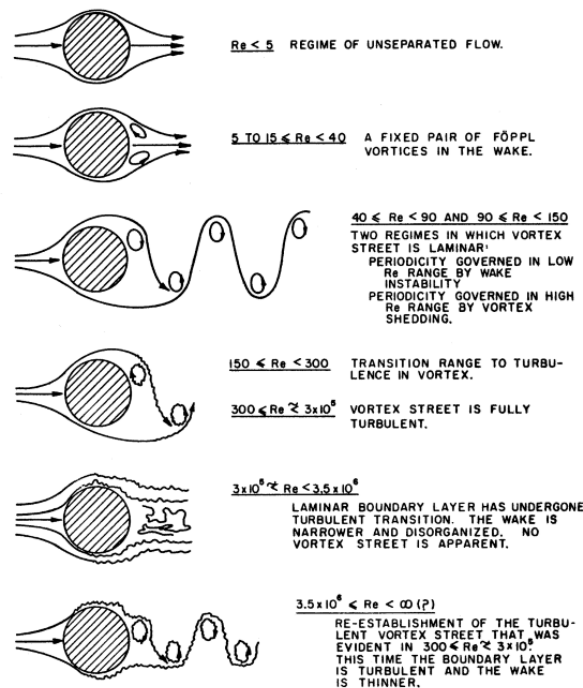
Bijlage C – Gevoeligheidsanalyse: stroming achter de pijlers

In bovenstaande simulaties zijn er in het zog van de pijlers geen Karman vortices merkbaar. De vorming van oscillerende wervels is sterk afhankelijk van de vorm van de pijlers en het Reynoldsgetal: $RE = V d / \nu$ met V de (ongestoorde) snelheid opwaarts, d de karakteristieke lengte (diameter van de pijler) en ν de kinematische viscositeit. Het zog voor stroming over een cilinder als functie van het Reynoldsgetal is uitvoerig beschreven in de literatuur, zie bijvoorbeeld Figuur 56 en Figuur 57. Ter vergelijking voor een pijler met een diameter van 20 m en een stroomsnelheid van 1 m/s is het Reynoldsgetal ongeveer 15×10^6 . De stroming zal turbulent zijn, al dan niet met een oscillerend karakter.

De correcte representatie van het zog achter de pijlers blijkt echter ook erg gevoelig te zijn voor de modelparameters. Een 2D shallow water solver is hier niet het geschikte model voor. Het is geweten dat shallow water solvers op basis van eindige elementen methodes, zoals TELEMAC2D lijden onder numerieke diffusie (Merkel *et al.*, 2016). De numerieke diffusie heeft de neiging om eventuele wervels in het zog van de pijlers uit te smeren (door extra diffusie in de impulsvergelijking). Figuur 58 geeft het stroombeeld in een simulatie met aangepaste modelinstellingen zoals in Merkel *et al.* (2016) (turbulentieschema *CONSTANT VELOCITY DIFFUSIVITY = 0.005*). Figuur 59 toont de gemodelleerde stroming met een hogere uitvoerfrequentie van 20 seconden, waarin de oscillerende wervels duidelijk zichtbaar zijn.

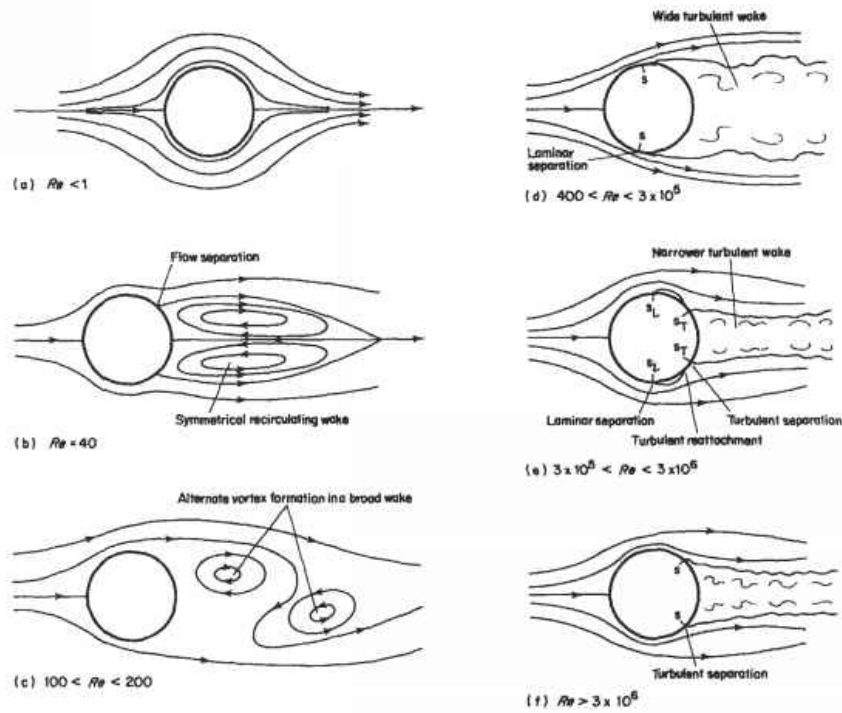
Het globale model is echter niet gevalideerd voor deze instellingen, en het is nog de vraag of deze instellingen representatief zijn (in Merkel *et al.*, 2016, zijn de modelresultaten ook niet gevalideerd). Ter illustratie een luchtfoto van de brug van Temse (Figuur 60).

Het effect van het zog op de stroming tussen de pijlers en het slik op linkeroever is eerder beperkt. Om het zog achter de pijlers in detail te bestuderen is een CFD berekening of schaalproever aangewezen.

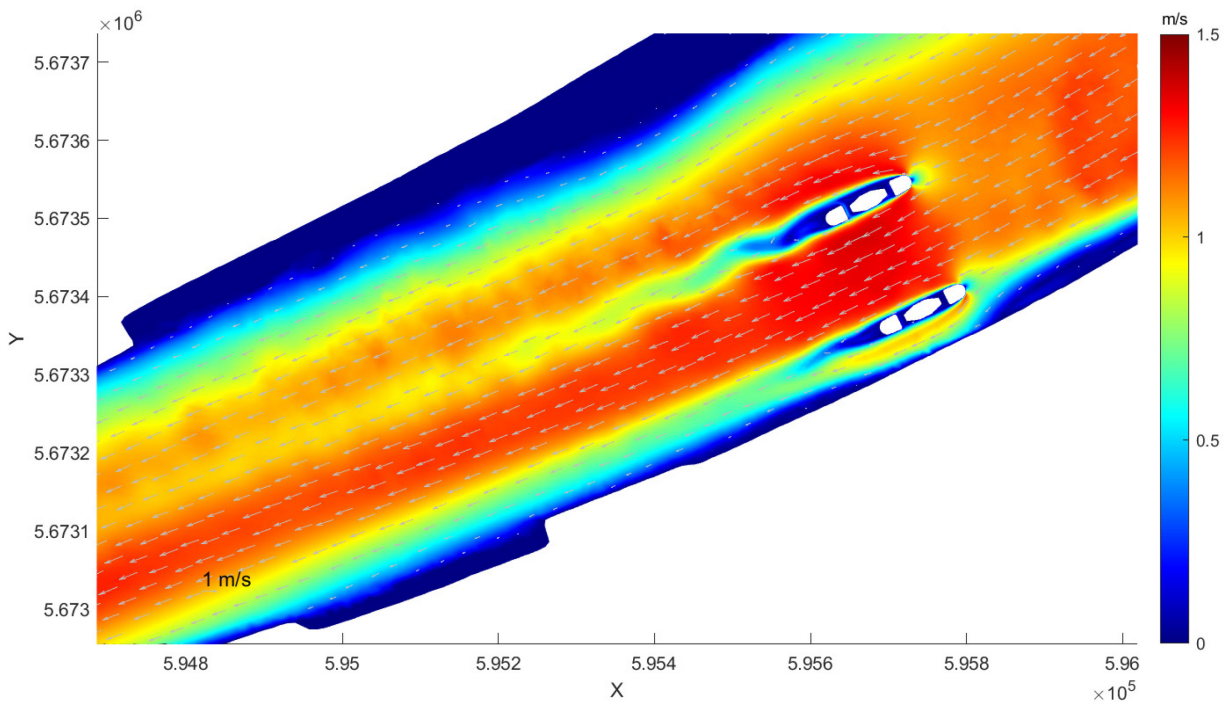


Figuur 56 – Flow over a circular cylinder

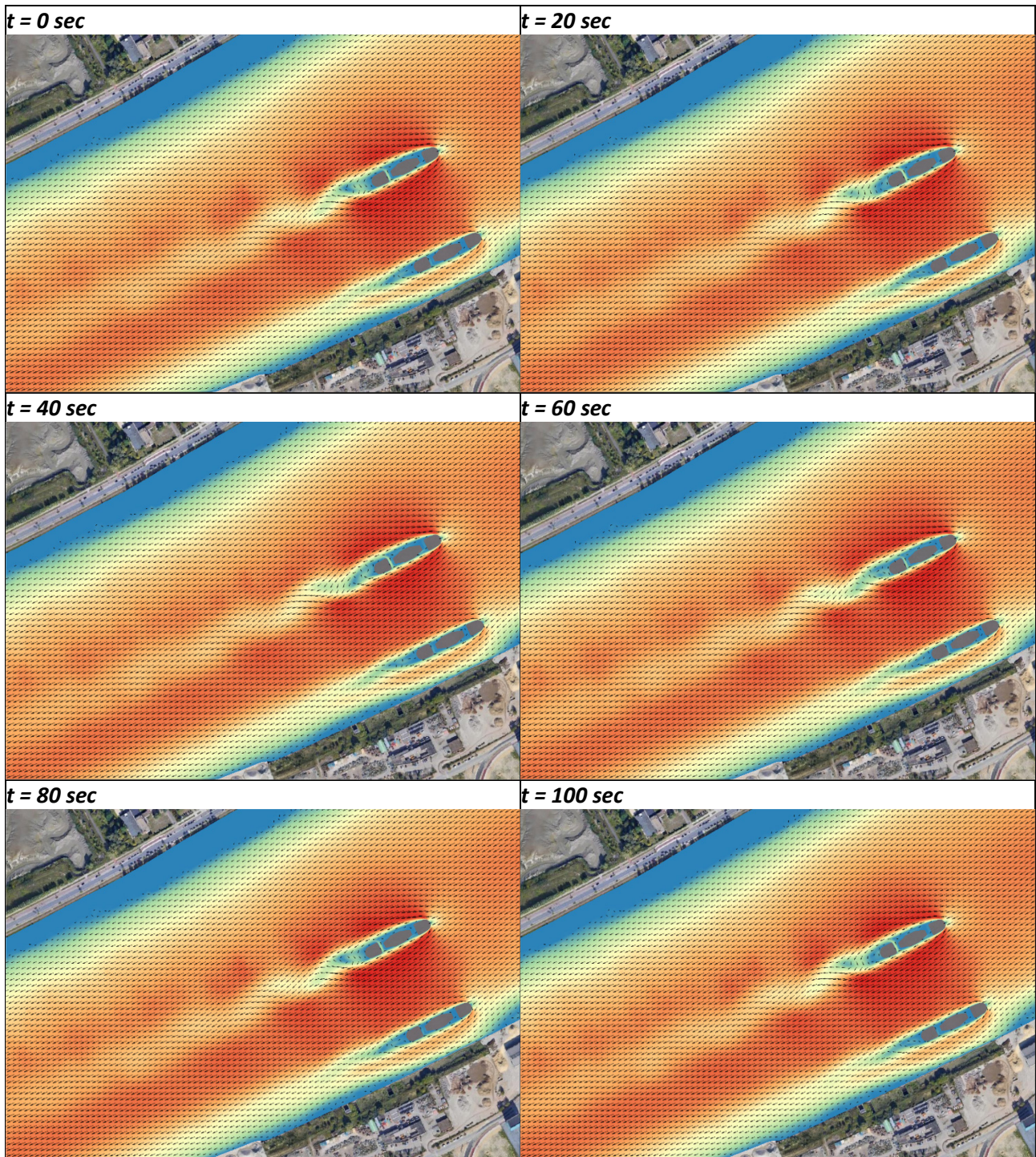
(https://www.researchgate.net/figure/Flow-regimes-over-a-circular-cylinder-36_fig3_327252175)



Figuur 57 – Flow over a circular cylinder
<https://www.beyonddiscovery.org/aerodynamics-2/75-flow-past-cylinders-and-spheres.html>



Figuur 58 – scen017 (constant VELOCITY DIFFUSIVITY 1E-6 & IMPLICITATION FOR DEPTH / VELOCITY = 0.9) - (tijdstep 11)



Figuur 59 – Oscillerende vortices in scen017 (constant VELOCITY DIFFUSIVITY 1E-6 & IMPLICITATION FOR DEPTH / VELOCITY = 0.9)
– gesimuleerde stroming bij maximum vloed met een output interval van 20 seconden.



Figuur 60 – Zog pijlers brug Temse

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