



**Vlaanderen**  
is wetenschap

21\_113\_4  
WL rapporten

# Antwerpen Oeververbinding tussen linker- en rechteroever

Deelrapport 4 – Hydrodynamische beoordeling  
ontwerpvarianten

DEPARTEMENT  
MOBILITEIT &  
OPENBARE  
WERKEN

[waterbouwkundiglaboratorium.be](http://waterbouwkundiglaboratorium.be)

# Antwerpen Oeververbinding tussen linker- en rechteroever

## Deelrapport 4 – Hydrodynamische beoordeling ontwerpvarianten

De Maerschallck, B.; Stark, J.; Eloit, K.



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/2023/3241/084

Deze publicatie dient als volgt geciteerd te worden:

**De Maerschalcck, B.; Stark, J.; Eloot, K. (2023).** Antwerpen Oeververbinding tussen linker- en rechteroever: Deelrapport 4 – Hydrodynamische beoordeling ontwerpvarianten. Versie 3.0. WL Rapporten, 21\_113\_4. 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_4
Trefwoorden (3-5):	Hydrodynamische modellering; TELEMAC; Oeververbinding; Stroomsnelheden		
Kennisdomeinen:	Hydraulica en sediment > Hydrodynamica > Stroomsnelheden -en patronen > Numerieke modelleringen		
Tekst (p.):	25	Bijlagen (p.):	14
Vertrouwelijk:	<input checked="" type="checkbox"/> Nee	<input checked="" type="checkbox"/> Online beschikbaar	

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

Controle

	Naam	Handtekening
Revisor(en):	Stark, J.	Getekend door: Jeroen Stark (Signature) Getekend op: 2023-05-25 14:09:18 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed  <i>Jeroen Stark</i>
Projectleider:	Eloot, K.	Getekend door: Katrien Eloot (Signature) Getekend op: 2023-05-25 15:05:34 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed  <i>Katrien Eloot</i>

Goedkeuring

Afdelingshoofd:	Bellafkih, K.	Getekend door: Abdelkarim Bellafkih (Sig) Getekend op: 2023-05-26 09:30:24 +02:00 Reden: Ik keur dit document goed  <i>Abdelkarim 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. Het rapport is een aanvulling op het eerder verschenen deelrapport Stark *et al.* (2023) waar reeds het effect van twee hoofdpijlers op de stroming en slik-schor linker oever geanalyseerd werd. In voorliggend rapport worden bijkomende ontwerpvarianten geanalyseerd:

- Twee hoofdpijlers in combinatie met een derde kleinere pijler onder het vaste brugdeel, met verschillende afstanden ten opzicht van linkeroever,
- Eén centrale hoofdpijler, met en zonder een kleinere pijler onder het vaste brugdeel.

In alle scenario's wordt tevens langs de rechteroever een onderwatersteunberm (kruinhoogte -5,75 m TAW) voorzien te versteviging van de kademuur en wordt de kademuur verlaagd tot 0 m TAW met aansluitend een oplopend talud.

De extra scenario's worden vergeleken met de huidige stroomcondities en het basisontwerp bestaande uit twee hoofdpijlers in combinatie met de oeverversteviging en talud boven laagwater.

Een extra steunpijler zorgt voor een extra belasting op het slik op de linkeroever, waarbij de mate van belasting afhankelijk is van de afstand tot de oever. In het scenario waarbij de pijler op 85 m van de laagwaterlijn staat is de impact echter beperkt. In De Maerschallck *et al.* (2019) werd op basis van literatuurstudie ingeschat dat het invloedsgebied van de pijler dwars op de stroomrichting tot ongeveer 50 m van de pijler reikt. Deze bevindingen in de literatuur waren echter op basis van fysische proeven met een uniforme stroom en vlakke bodem. De modelresultaten tonen aan dat door de lokale bodemligging ook verder van 50 m van de pijler nog een beperkte impact waarneembaar is.

De simulaties met en zonder een tweede hoofdpijler nabij de rechteroever tonen aan dat de impact van de tweede hoofdpijler op het slik nagenoeg dezelfde orde grootte heeft als de centrale hoofdpijler. Een ontwerp met slechts één centrale hoofdpijler halveert de belasting op het slik. De combinatie van één centrale hoofdpijler met een tweede kleinere pijler onder het vaste brugdeel op slechts 45 m van de laagwaterlijn is wat de belasting op het slik betreft dan weer vergelijkbaar met het basisontwerp van twee hoofdpijlers.

De resultaten in het voorliggende rapport zijn op basis van numerieke simulaties. Zoals elk model heeft ook dit model zijn beperkingen. Er wordt geadviseerd om een finaal ontwerp eveneens te beproeven in een fysisch schaalmodel.

In elke ontwerpvariant is er in meer of mindere mate ter hoogte van het intertidaal op linkeroever 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.



# Inhoudstafel

Abstract .....	III
Inhoudstafel.....	IV
Lijst van de tabellen.....	V
Lijst van de figuren .....	VI
1 Inleiding .....	1
1.1 Situering.....	1
1.2 Extra ontwerpvarianten.....	1
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 – Brugpijlers en talud .....	8
2.5.2 Aangepaste modelinstellingen .....	8
2.6 Postprocessing en analyse.....	10
2.6.1 Invloed op stroomsnelheden.....	10
2.6.2 Invloed op bodemschuifspanningen .....	10
3 Resultaten.....	11
3.1 Huidige situatie en Basisontwerp.....	11
3.2 Ontwerpvarianten .....	16
3.2.1 Twee hoofdpijlers met een extra pijler onder het vast brugdeel.....	16
3.2.2 Variant met slechts één hoofdpijler .....	20
4 Conclusies en aanbevelingen .....	24
4.1 Aanbevelingen.....	24
Referenties .....	25
Bijlage A Modelinstellingen.....	B1
Bijlage B Rekenroosters voor de verschillende scenario's.....	B2
Bijlage C Maximale stroming.....	B6
Bijlage D Bodemschuifspanning .....	B12

## Lijst van de tabellen

Tabel 1: Modelscenario's (zie ook Figuur 4 voor de locaties van de pijlers) .....	2
Tabel 2: Representatie van het verticaal getij in op basis van BIAS, RMSE en RMSEO. ....	7
Tabel 3: Parameterinstellingen BeZS-model. ....	B1



## Lijst van de figuren

Figuur 1: Referentie basisontwerp bestaande uit twee hoofdpijlers in combinatie met een steunberm (kruinhoogte -5,75 m TAW) en verlaagde kaaimuur tot 0 m TAW en aansluitend talud (scen023).....	3
Figuur 2: detail van de onderwaterberm met verlaagde kaaimuur en aansluitende talud .....	3
Figuur 3: Schets steunberm met kruinhoogte -5,75 m TAW en verlaging van de bestaande kaaimuur tot 0 m TAW (bron: DVW) .....	4
Figuur 4: Overzichtskaart scenarios: posties pijlers .....	4
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 (4,5 m 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: Detail van het rekenrooster en bathymetrie in het interessegebied (scen023).....	9
Figuur 10: Detail van het rekenrooster rond de hoofdpijler 1 (scen023) .....	9
Figuur 11: Gemodelleerde stroomsnelheden bij maximale vloed (gemiddelde springtij). Boven: referentie run (ref005), onder: basisontwerp (scen023).....	12
Figuur 12: Gemodelleerde stroomsnelheden bij maximale eb (gemiddelde springtij). Boven: referentie run (ref005), onder: basisontwerp (scen023).....	13
Figuur 13: Maximaal optredende stroomsnelheden gedurende een spingtij-doodtij cyclus voor de huidige toestand (ref005, boven), basisontwerp (scen024, midden) en het verschil (onder) .....	14
Figuur 14: Overschrijdingsfrequentie $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$ in referentierun (boven), run met brugpijlers (midden). 15	
Figuur 15: Verschil in maximale stroomsnelheid over de volledige springtij-doodtij voor de ontwerpvarianten met een extra pijler (scen024, scen025, scen026); links ten opzicht van de huidige situatie (rer005) en rechts ten opzichte van het basisontwerp (scen023) .....	17
Figuur 16: Maximale eb en vloedstroom (gemiddelde getij) voor ontwerpvariant met extra pijler 1 (scen024). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur .....	18
Figuur 17: Maximale eb en vloedstroom (gemiddelde getij) voor ontwerpvariant met extra pijler 2 (scen025). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur .....	18
Figuur 18: Maximale eb en vloedstroom (gemiddelde getij) voor ontwerpvariant met extra pijler 3 (scen026). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur .....	19
Figuur 19: Verschil in overschrijdingsfrequentie $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$ voor de ontwerpvarianten met een extra pijler (scen024, scen025, scen026); links ten opzicht van de huidige situatie (rer005) en rechts ten opzichte van het basisontwerp (scen023) .....	20
Figuur 20: Verschil in maximale stroomsnelheid over de volledige springtij-doodtij voor de ontwerpvarianten met één centrale hoofdpijler; links ten opzicht van de huidige situatie (rer005) en rechts ten opzichte van het basisontwerp (scen023) .....	21

Figuur 21: Maximale eb en vloedstroom (gemiddelde getij) voor ontwerpvariant met één centrale pijler (scen027). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur ..... 21

Figuur 22: Maximale eb en vloedstroom (gemiddelde getij) voor ontwerpvariant met één centrale pijler en extra pijler 2 (scen028). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur 22

Figuur 23: Verschil in overschrijdingsfrequentie  $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$  over de volledige springtij-doodtij voor de ontwerpvarianten met één centrale hoofdpijler; links ten opzichte van de huidige situatie (rer005) en rechts ten opzichte van het basisontwerp (scen023) ..... 23

Figuur 24: Detail rekenrooster en lokale bathymetrie referentie scenario huidige toestand (ref005) ..... B2

Figuur 25: Detail rekenrooster en bathymetrie basisontwerp twee hoofdpijlars (scen023)..... B3

Figuur 26: Detail rekenrooster en bathymetrie ontwerp twee hoofdpijlars en extra pijler 1 (scen024) ..... B3

Figuur 27: Detail rekenrooster en bathymetrie ontwerp twee hoofdpijlars en extra pijler 2 (scen025) ..... B4

Figuur 28: Detail rekenrooster en bathymetrie ontwerp twee hoofdpijlars en extra pijler 3 (scen026) ..... B4

Figuur 29: Detail rekenrooster en bathymetrie ontwerp één enkele centrale hoofdpijler (scen027) ..... B5

Figuur 30: Detail rekenrooster en bathymetrie ontwerp één hoofdpijler en extra pijler 2 (scen028) ..... B5

Figuur 31: Maximale dieptegemiddelde snelheid bij vloed (top), eb (midden) en over een volledige ST-DT cyclus (onder) voor het basisontwerp (scen023) ..... B6

Figuur 32: Maximale dieptegemiddelde snelheid bij vloed (top), eb (midden) en over een volledige ST-DT cyclus (onder) voor de ontwerpvariant met extra pijler 1 (scen024) ..... B7

Figuur 33: Maximale dieptegemiddelde snelheid bij vloed (top), eb (midden) en over een volledige ST-DT cyclus (onder) voor de ontwerpvariant met extra pijler 2 (scen025) ..... B8

Figuur 34: Maximale dieptegemiddelde snelheid bij vloed (top), eb (midden) en over een volledige ST-DT cyclus (onder) voor de ontwerpvariant met extra pijler 1 (scen026) ..... B9

Figuur 35: Maximale dieptegemiddelde snelheid bij vloed (top), eb (midden) en over een volledige ST-DT cyclus (onder) voor de ontwerpvariant met één centrale pijler (scen027) ..... B10

Figuur 36: Maximale dieptegemiddelde snelheid bij vloed (top), eb (midden) en over een volledige ST-DT cyclus (onder) voor de ontwerpvariant met één centrale pijler + extra pijler 2 (scen028) ..... B11

Figuur 37: Overschrijdingsfrequentie  $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$  voor het basisontwerp (scen023). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur ..... B12

Figuur 38: Overschrijdingsfrequentie  $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$  voor de ontwerpvariant met extra pijler 1 (scen024). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur..... B12

Figuur 39: Overschrijdingsfrequentie  $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$  voor de ontwerpvariant met extra pijler 2 (scen025). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur..... B13

Figuur 40: Overschrijdingsfrequentie  $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$  voor de ontwerpvariant met extra pijler 3 (scen026). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur..... B13

Figuur 41: Overschrijdingsfrequentie  $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$  voor de ontwerpvariant met één centrale pijler (scen027). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur..... B14

Figuur 42: Overschrijdingsfrequentie  $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$  voor de ontwerpvariant met één centrale pijler + extra pijler 2 (scen028). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur..... B14



# 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.

In Stark *et al.* (2023) werd reeds een uitgebreide analyse van het effect van de pijlers in combinatie met verschillende varianten van de oeververstevinging rechteroever geanalyseerd. De onderwaterberm heeft tot doel het stabiliseren van de oude kaaimuren. Verschillende varianten werden beproefd. Op basis van het numeriek hydrodynamische model van de Beneden-Zeeschelde (Kolokythas *et al.*, 2019) werd de invloed van de brugpijlers en oeververstevinging op de stroming in de vaargeul, maar ook de verandering in stroming en bodemschuifspanningen ter hoogte van de slik op linkeroever geanalyseerd.

De stromingsveranderingen in de vaargeul werden gebruikt voor de nautische beoordeling van het ontwerp (Eloot *et al.*, 2023). Op basis van de stroming en bodemschuifspanningen werd ook een morfologische beoordeling van het slik-schor op rechteroever uitgevoerd (Stark *et al.*, 2023). 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 kunnen aanleiding geven tot erosie, wat een afkalving van het slik en een versteiling van de bodemhelling impliceert. Afwaarts van de Kennedytunnel is de impact eerder beperkt. Het effect van de constructie van een onderwatersteunberm ter bescherming van de kademuur langs rechteroever heeft geen significant effect ter hoogte van het slik op linkeroever.

## 1.2 Extra ontwerpvarianten

In voorliggend rapport worden extra ontwerpvarianten van de Scheldebrug geanalyseerd. In de basisvariant worden twee hoofdpijlers voorzien in combinatie met een steunberm (kruinhoogte -5,75 m TAW) en verlaagde kaaimuur tot 0 m TAW met aansluitend een oplopend talud, i.e. scenario scen023 in Stark *et al.* (2023), zie ook Figuur 1 tot Figuur 3. Het basisontwerp voorziet in een vast bruggedeelte tussen linkeroever en de noordelijke pijler met een totale overspanning van 297 m. Vanuit constructief en esthetische oogpunt wordt overwogen het vast bruggedeelte te ondersteunen met een extra pijler. De positie van de pijler ligt nog niet vast. Om inzicht te krijgen in de impact van een extra pijler op het slik als functie van de afstand tot linkeroever, wordt in voorliggend rapport bij wijze van gevoeligheidsanalyse drie posities van de extra pijler beproefd: ter hoogte van de laagwaterlijn (pijler 1 in Figuur 4), op 45 m van de laagwaterlijn (pijler 2) en op 85 m van de laagwaterlijn (pijler 3). De extra pijler heeft een breedte van 10 meter (loodrecht op de stroming) en een lengte van 25 meter (in de langs richting van de rivier).

Tevens wordt ook een ontwerp met slechts één hoofdpijler overwogen. Daarom worden nog twee extra ontwerpen beproefd: één centrale hoofdpijler al dan niet in combinatie met een extra pijler (pijler 2) onder het vaste brugdeel.

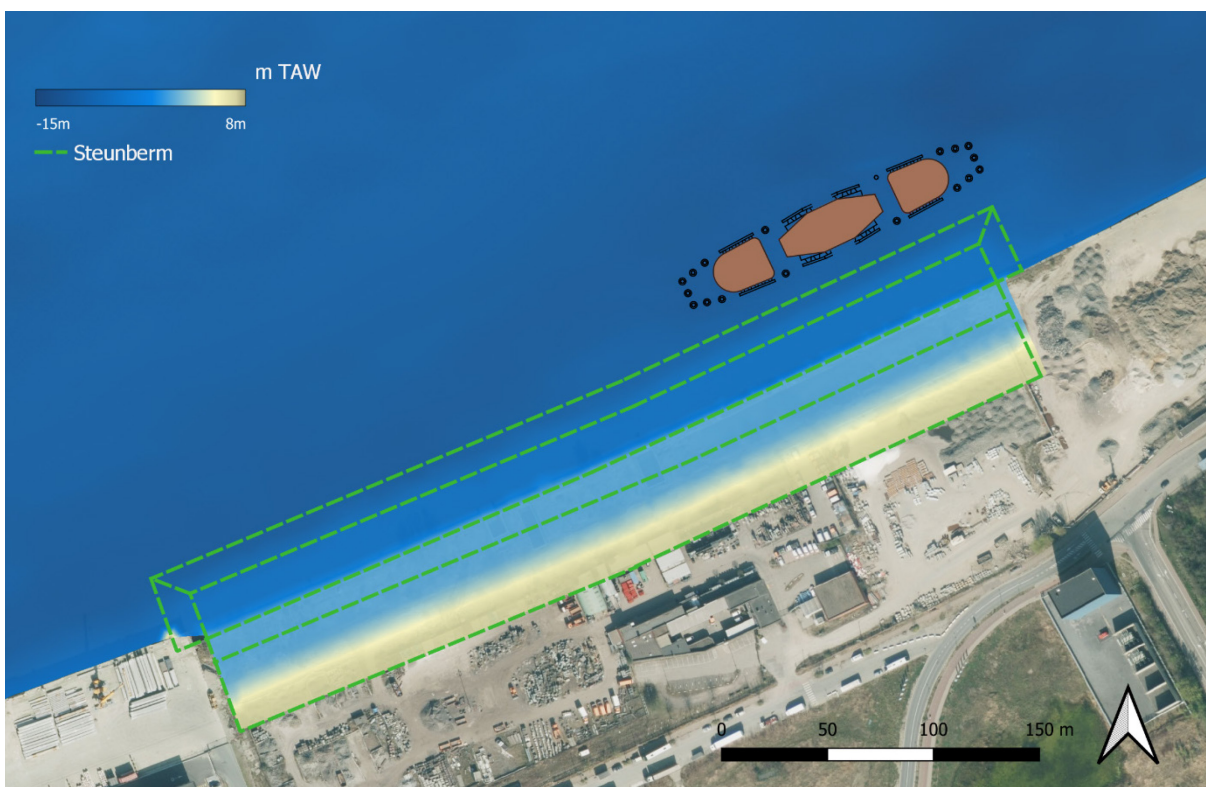
In het voorliggende rapport worden de ontwerpvarianten vergeleken enerzijds met de huidige situatie en het basisontwerp anderzijds. Onderstaande tabel geeft een overzicht van de gemodelleerde scenario's:

Tabel 1: Modelscenario's (zie ook Figuur 4 voor de locaties van de pijlers)

<b>Simulatie</b>	<b>Omschrijving</b>
<b>ref005</b>	<i>Referentierun met "huidige" toestand (bodem 2018)</i>
<b>scen023</b>	<i>Basisontwerp: twee hoofdpijlers</i>
<b>scen024</b>	<i>Twee hoofdpijlers met extra pijler 1 ter hoogte van de laagwaterlijn</i>
<b>scen025</b>	<i>Twee hoofdpijlers met extra pijler 2 op 45 m van de laagwaterlijn</i>
<b>scen026</b>	<i>Twee hoofdpijlers met extra pijler 3 op 85 m van de laagwaterlijn</i>
<b>scen027</b>	<i>Eén centrale hoofdpijler</i>
<b>Scen028</b>	<i>Eén centrale hoofdpijler in combinatie met extra pijler 2</i>

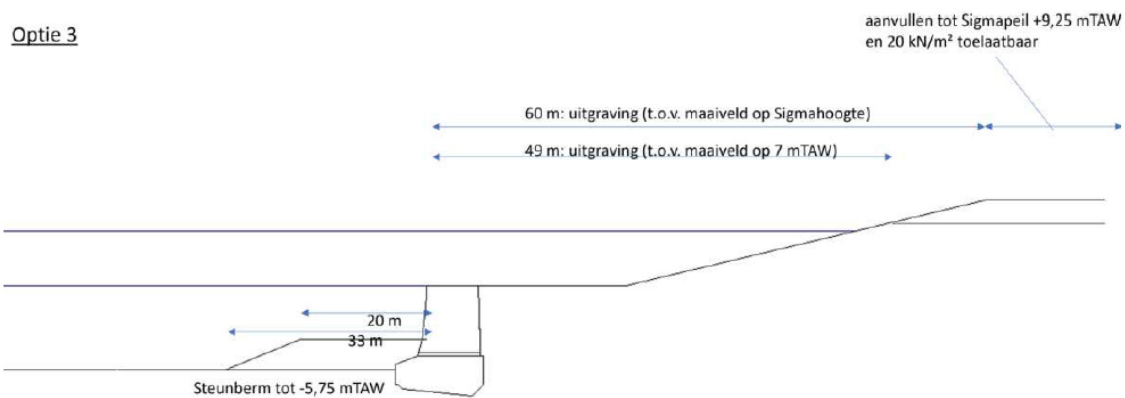


Figuur 1: Referentie basisontwerp bestaande uit twee hoofdpijlers in combinatie met een steunberm (kruinhoogte -5,75 m TAW) en verlaagde kaaimuur tot 0 m TAW en aansluitend talud (scen023)

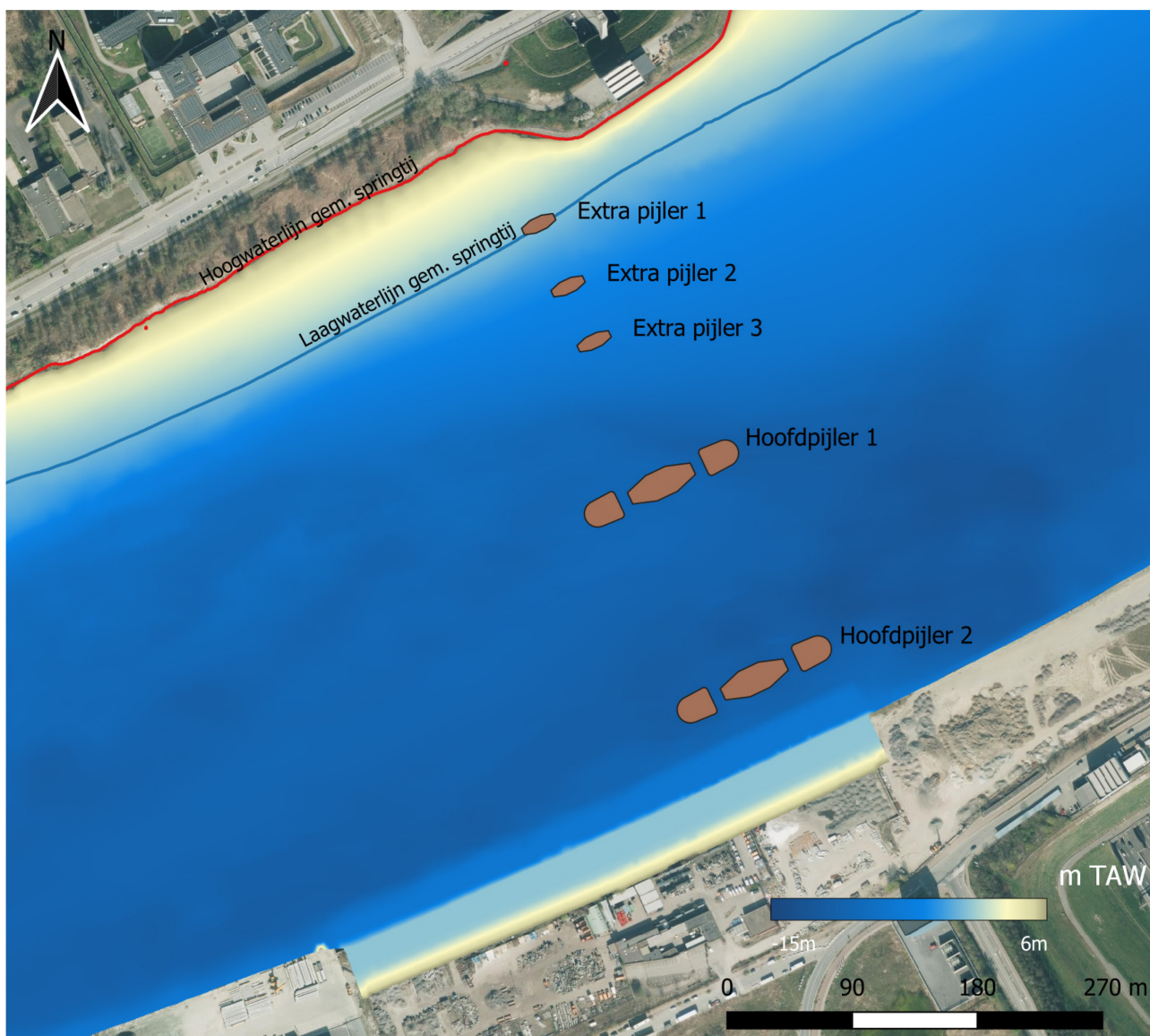


Figuur 2: detail van de onderwaterberm met verlaagde kaaimuur en aansluitende talud





Figuur 3: Schets steunberm met kruinhoogte -5,75 m TAW en verlaging van de bestaande kaaimuur tot 0 m TAW (bron: DVW)



Figuur 4: Overzichtskaat scenarios: posties pijlers

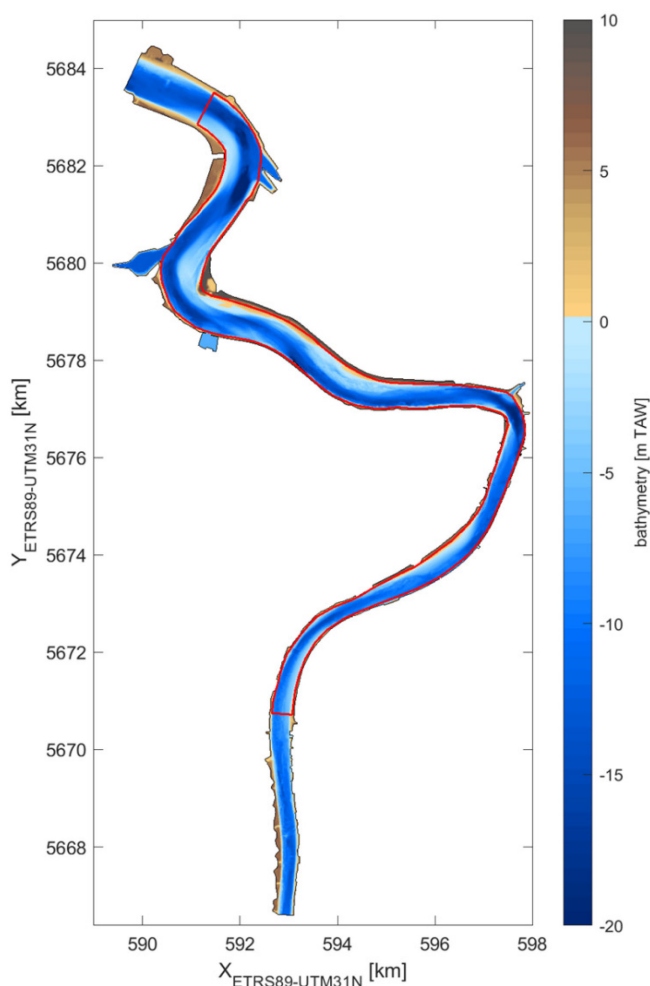


## 2 Modelbeschrijving

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. Voor meer details over de toepassing van het model voor voorliggend project wordt verwezen naar Stark *et al.* (2023).

### 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  $\approx 10$  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.

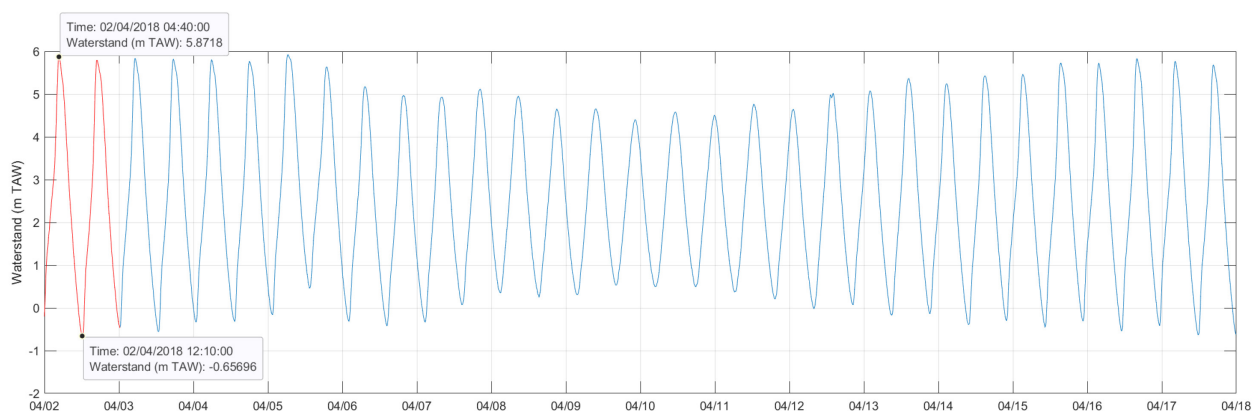
## 2.2 Bathymetrie

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 één gemiddeld 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 ebstroom 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 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

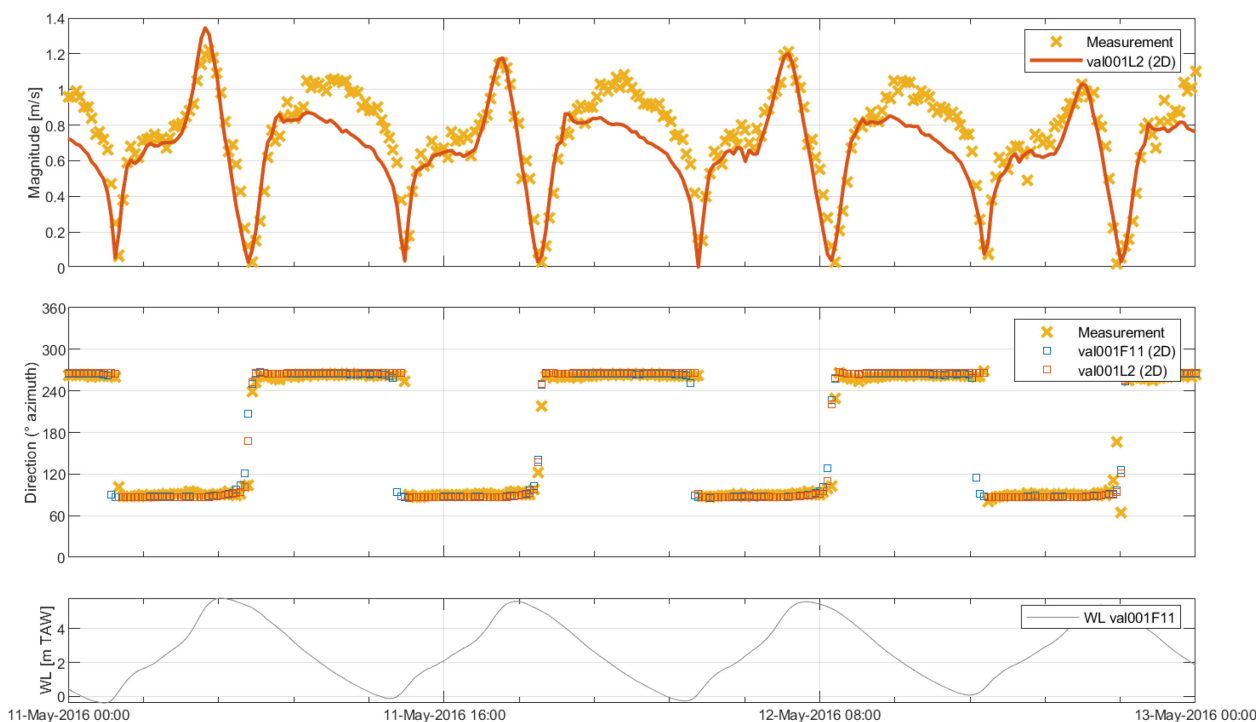
De modelkalibratie en validatie is uitvoering beschreven in Kolokythas *et al.* (2020). Het model is gevalideerd aan de hand van de permanente HIC-metposten Kallo en Antwerpen voor de waterstand en het HIC-metstation te Oosterweel en een 13-uursmeting eveneens te Oosterweel voor de stroomsnelheid.

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).

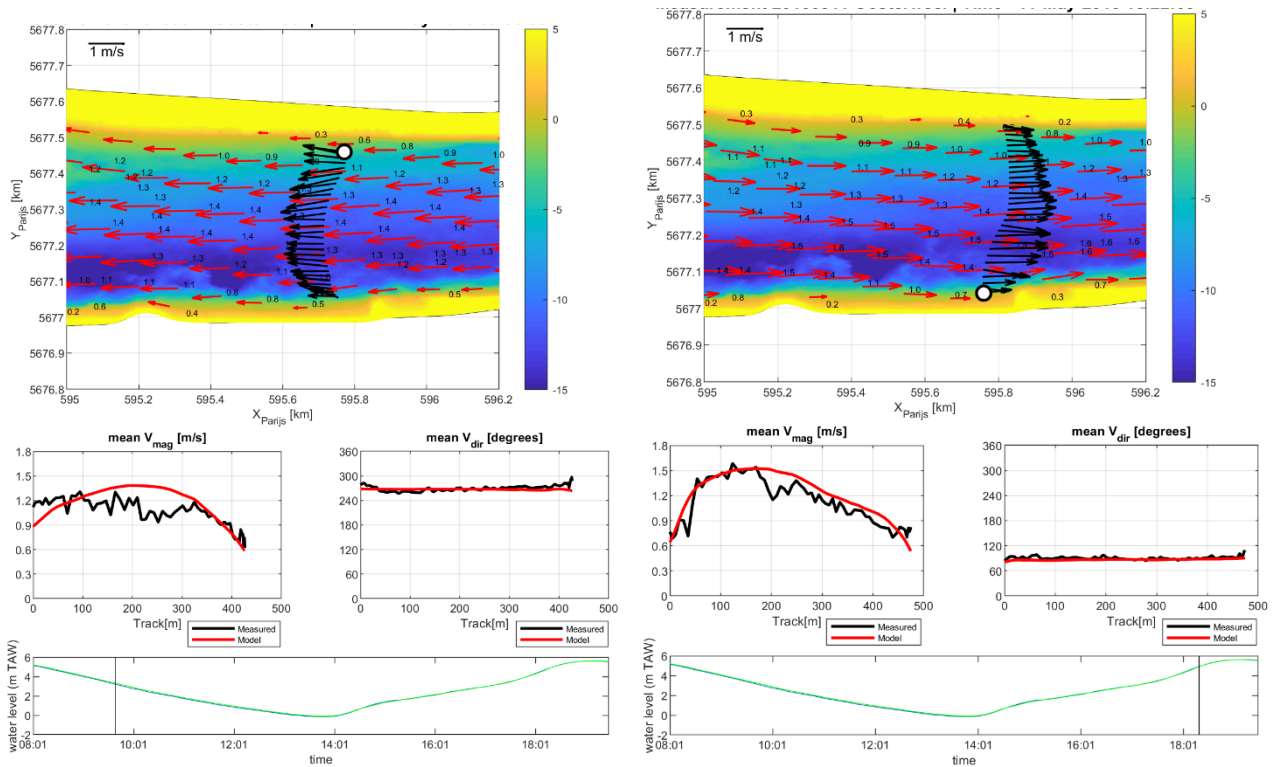
Tabel 2: Representatie van het verticaal getij in op basis van BIAS, RMSE en RMSE<sub>0</sub>.

Station	BIAS [m]	RMSE [m]	RMSE <sub>0</sub> [m]
<b>Kallo</b>	-0.02	0.03	0.02
<b>Antwerpen</b>	-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 vloedsnellheid 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.

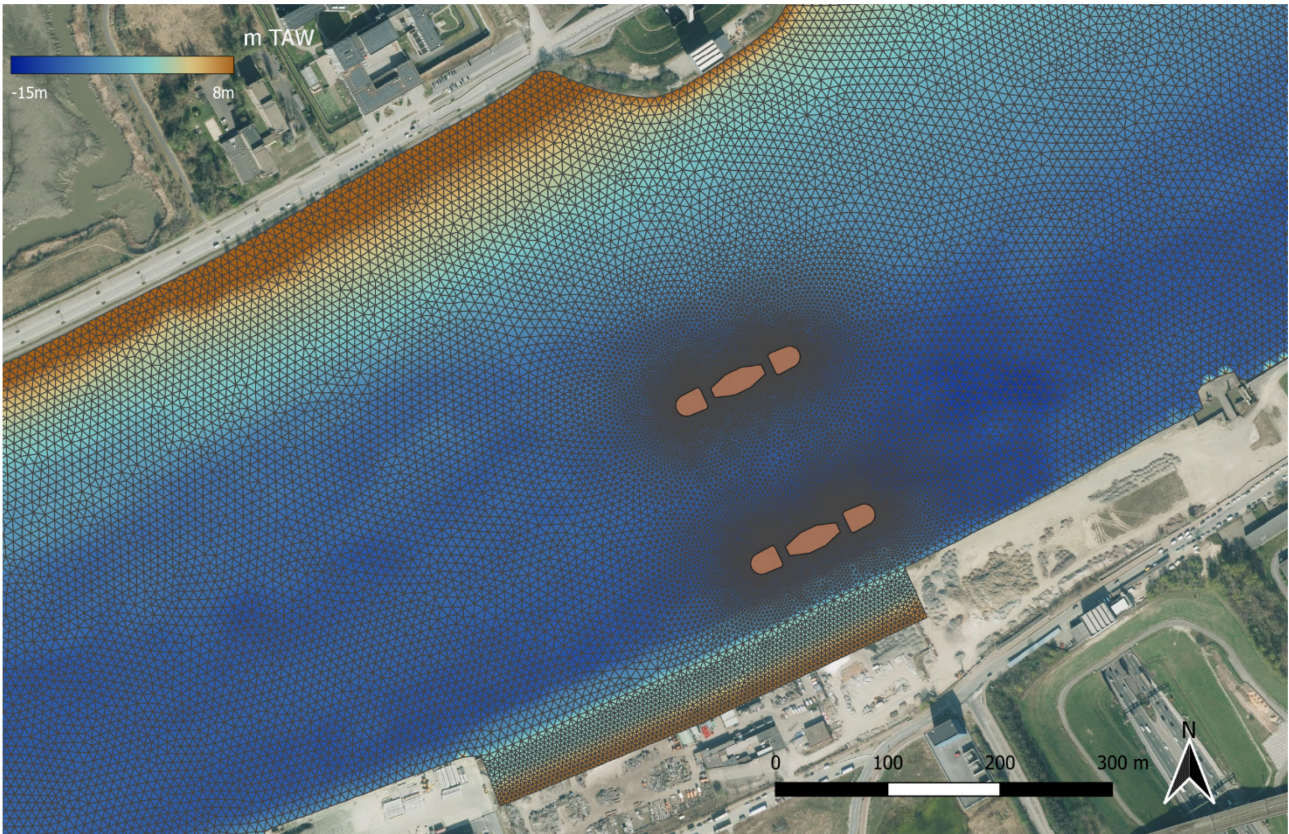
### 2.5.1 Roosteraanpassingen – Brugpijlers en talud

Om de brugpijlers te modelleren is het rekenrooster lokaal verfijnd in het interessegebied, zie Figuur 9. 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 model zijn geïmplementeerd, zie ook Bijlage B. Om het effect van de resolutie in combinatie met een aangepaste tijdstap te bepalen werd een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd (zie Stark *et al.*, 2023).

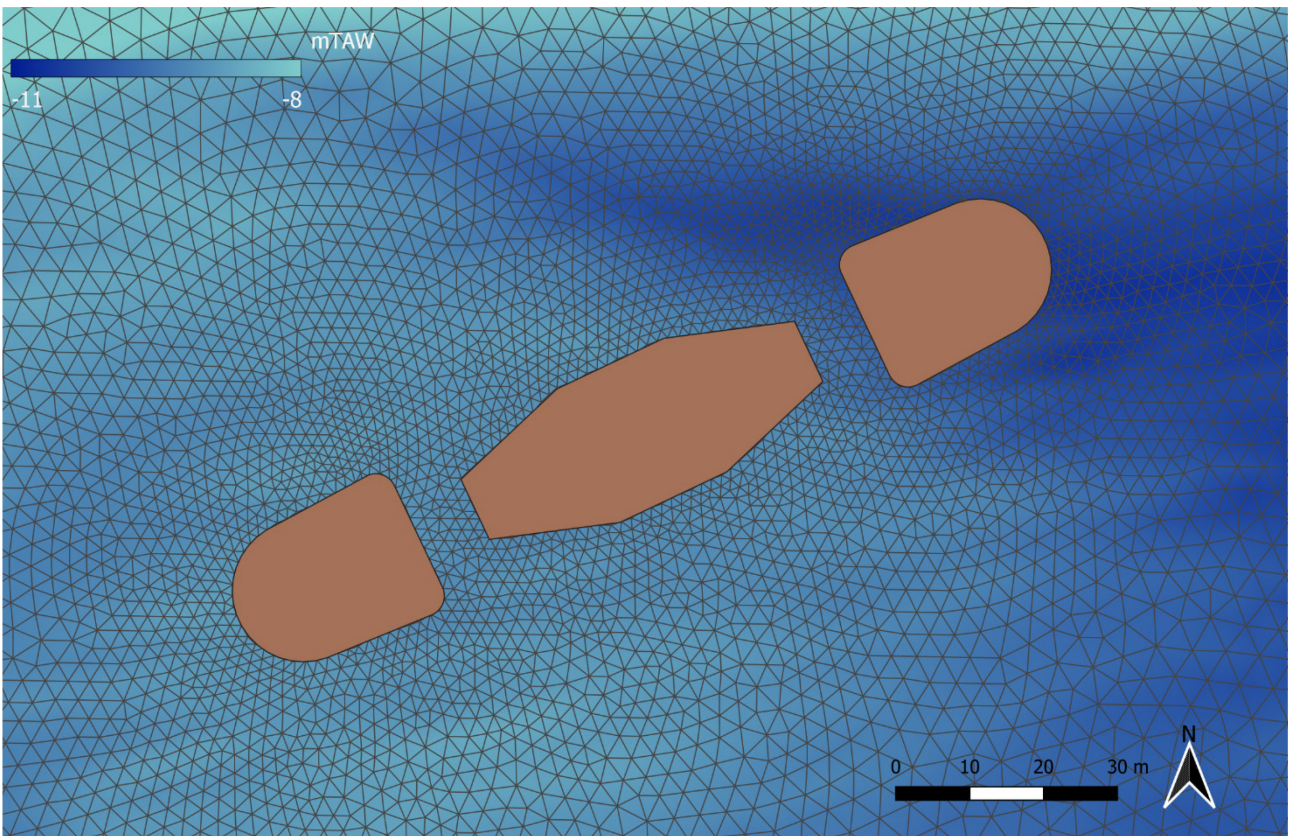
### 2.5.2 Aangepaste modelinstellingen

De aanpassingen aan het model die reeds gemaakt werden voor de eerdere simulaties in Stark *et al.* (2023) werden voor deze studie overgenomen. Het betreft de tijdstap die verkleind werd naar 0,5 seconden en een wijziging in het turbulentie schema. De beschrijving en motivatie voor deze wijzigingen staat beschreven in Stark *et al.* (2023).





Figuur 9: Detail van het rekenrooster en bathymetrie in het interessegebied (scen023)



Figuur 10: Detail van het rekenrooster rond de hoofdpijler 1 (scen023)



## 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 en eb) en aan de hand van de invloed op de maximum stroomsnelheden op basis van de volledige gesimuleerde springtij-doottij 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-doottij 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:

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

waarin  $\tau_b$  de bodemschuifspanning is [N/m<sup>2</sup>];  $\rho$  het soortelijk gewicht van water [kg/m<sup>3</sup>];  $u^*$  de wrijvingsnelheid is [m/s];  $\kappa$  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 Huidige situatie en Basisontwerp

De simulaties van de huidige toestand (ref005) en het basisontwerp (scen023) werden reeds in detail besproken in Stark *et al.* (2023). Voor de volledigheid en om de vergelijking te kunnen maken met de bijkomende ontwerpvarianten worden de figuren hieronder herhaald.

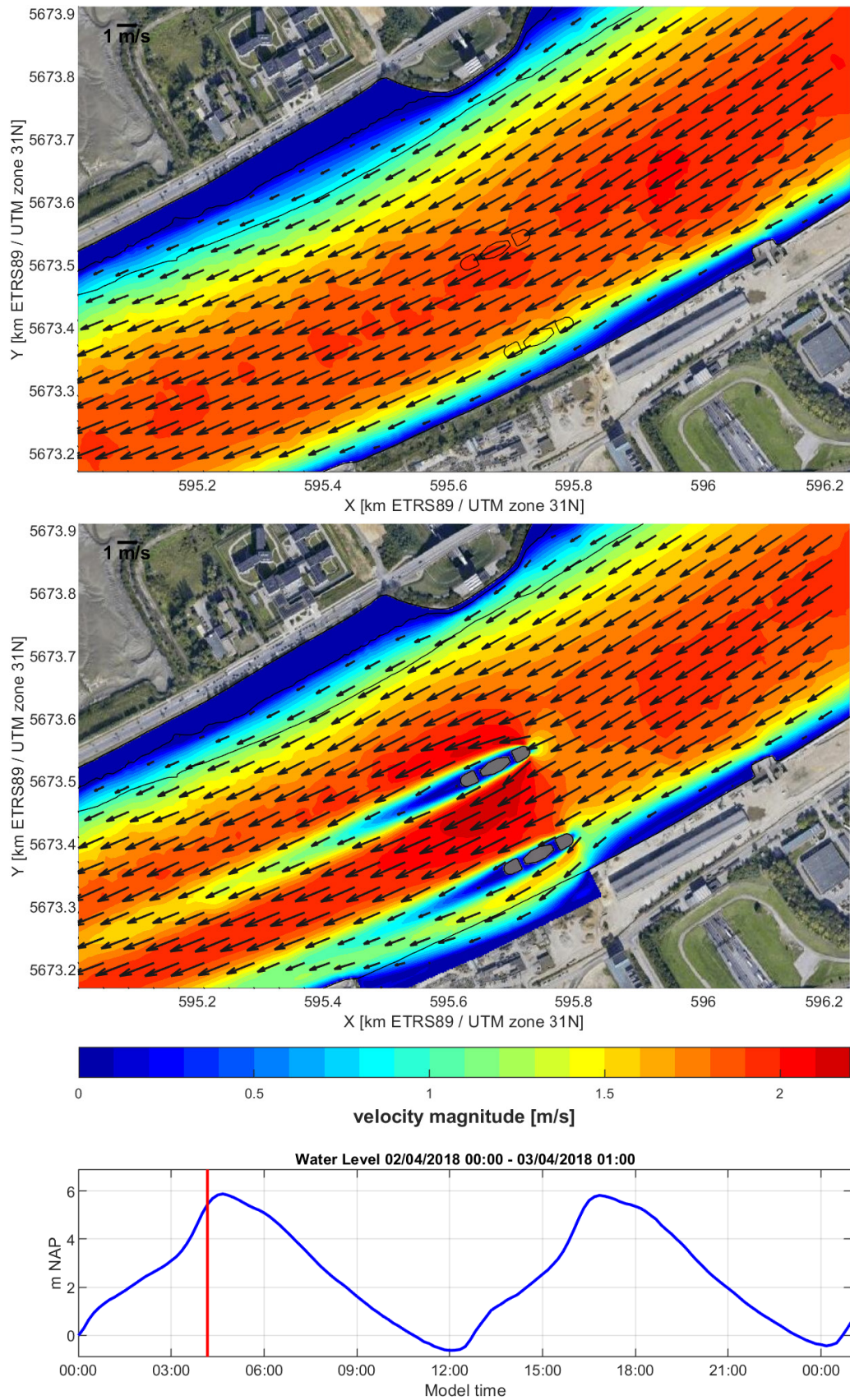
Als gevolg van de aanleg van de brugpijlers, die het doorstroomoppervlak vernauwen, nemen de maximale stroomsnelheden in het studiegebied toe tot meer dan 2,4 m/s tijdens vloed en meer dan 1,9 m/s tijdens eb. De hoogste stroomsnelheden situeren zich rondom de brugpijler in het midden van de huidige vaargeul. 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). 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 afschermende werking van de *inspringende* dijk ter hoogte van de Kennedytunnel.

Zoals eerder vermeld, 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 14 toont de overschrijdingsfrequentie van een kritische bodemschuifspanning van  $\tau_b \geq 1,0 \text{ N/m}^2$  voor de referentierun (ref005), de simulatie van het basisontwerp (scen023) en een verschilplot tussen beide runs.

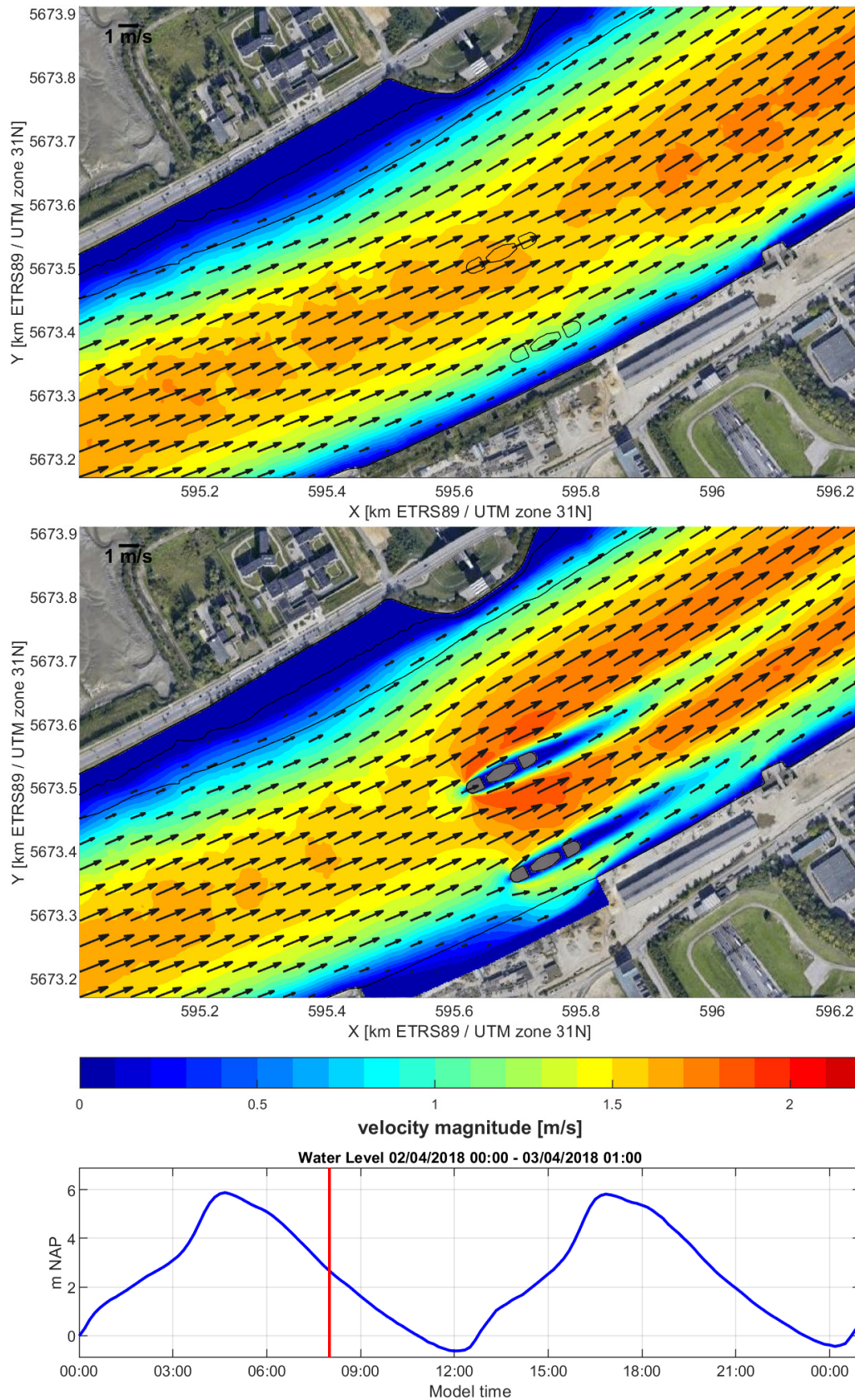
De overschrijdingskans van een kritische bodemschuifspanning van  $\tau_b \geq 1,0 \text{ N/m}^2$  zal in de huidige analyse als proxy beschouwd worden voor de grens tussen intertidaal (slik en subtidaal langs linkeroever). In de referentierun valt een overschrijdingskans van 10 á 20% van  $\tau_b \geq 1,0 \text{ N/m}^2$  ongeveer samen met de laagwaterlijn te linkeroever (i.e., zwarte contourlijn in Figuur 14). 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 14). Deze intertidale zone van ongeveer 500 m lang zou als gevolg van de aanwezigheid van de brugpijlers dus gevoelig kunnen worden voor erosie.



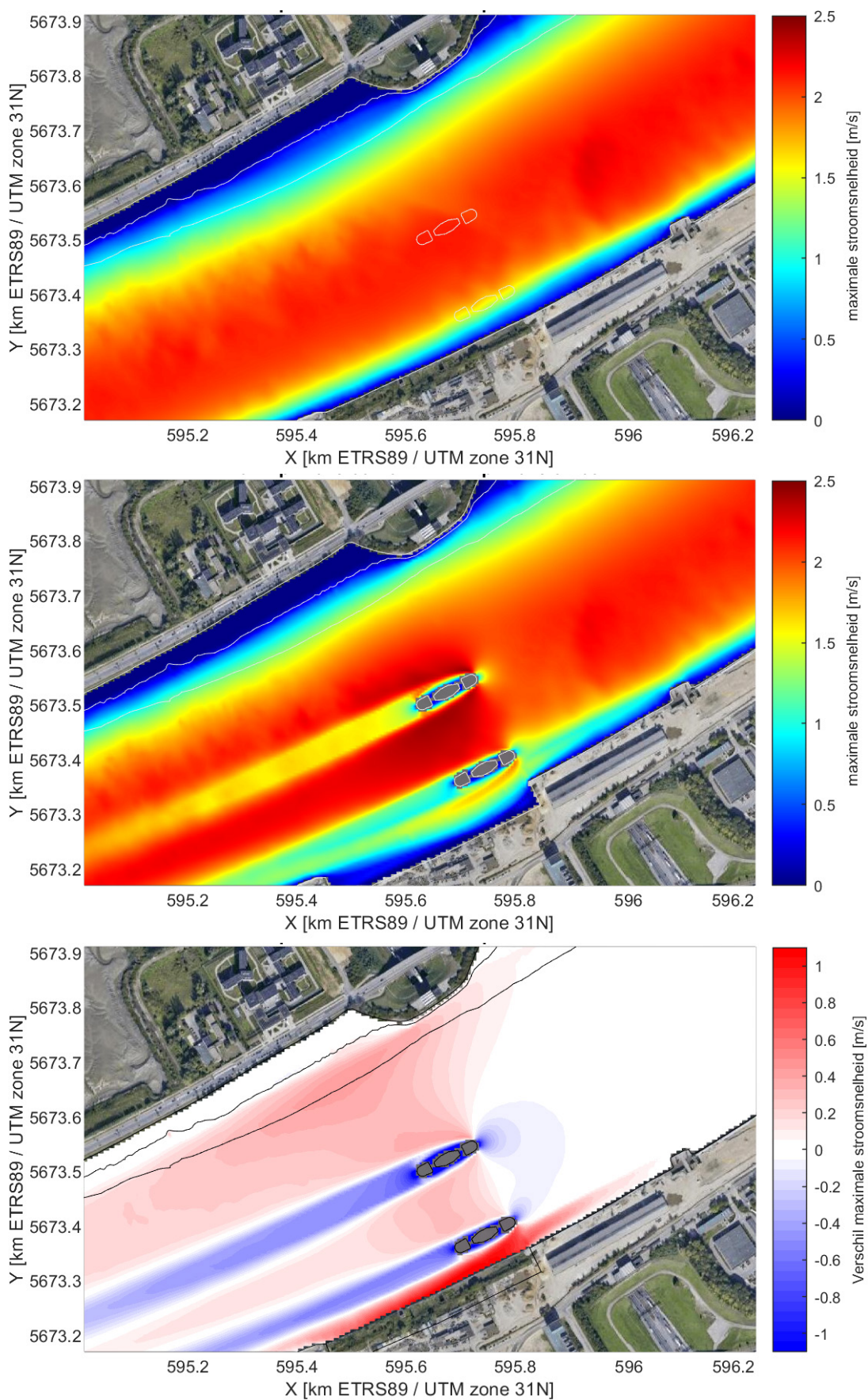
Figuur 11: Gemodelleerde stroomsnelheden bij maximale vloed (gemiddelde springtij). Boven: referentie run (ref005), onder: basisontwerp (scen023)





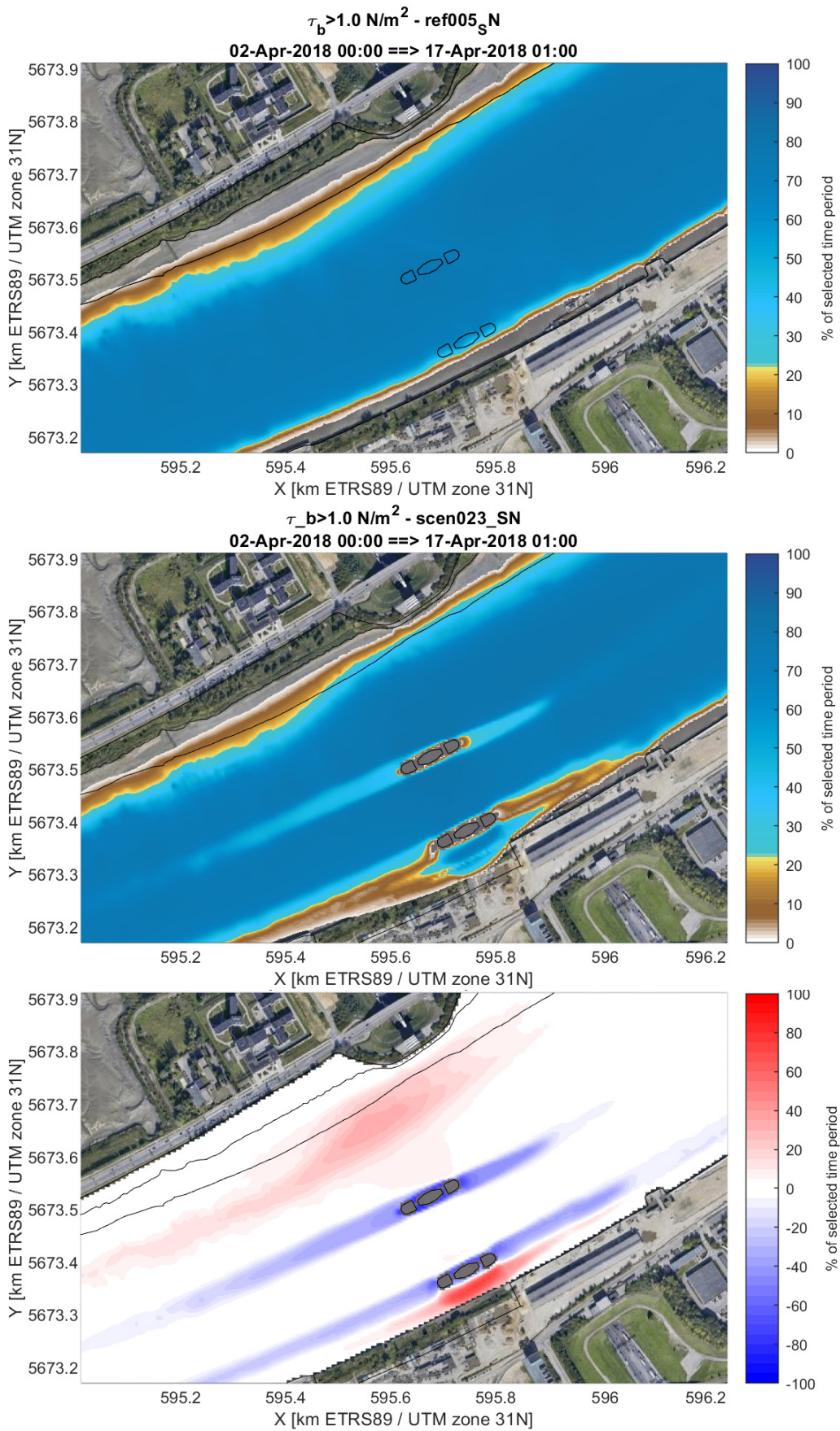
Figuur 12: Gemodelleerde stroomsnelheden bij maximale eb (gemiddelde springtij). Boven: referentie run (ref005), onder: basisontwerp (scen023)





Figuur 13: Maximaal optredende stroomsnelheden gedurende een spingtij-doodtij cyclus voor de huidige toestand (ref005, boven), basisontwerp (scen024, midden) en het verschil (onder)





Figuur 14: Overschrijdingsfrequentie  $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$  in referentierun (boven), run met brugpijlers (midden).

## 3.2 Ontwerpvarianten

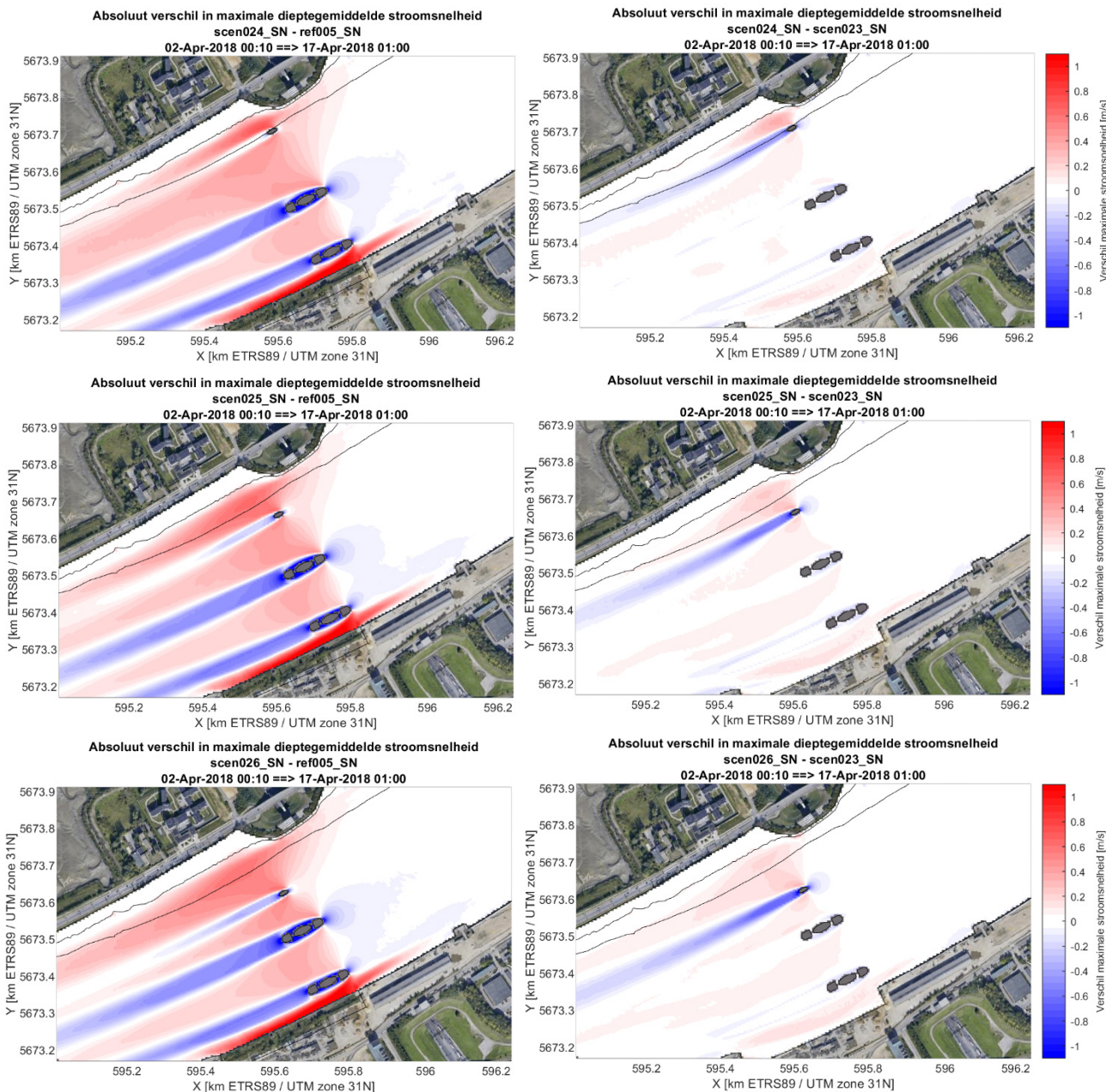
In deze paragraaf worden de extra ontwerpvarianten met een bijkomende pijler voor het vast brugdeel en de varianten met één hoofdpijler vergeleken met de huidige toestand en met het basis ontwerp. De figuren van de maximale stromingen en de overschrijdingskansen zijn per scenario opgenomen in de Bijlage C en D. In onderstaande paragrafen zal gefocust worden op de verschilplots. Voor de verschillende ontwerpvarianten zijn ook de maximale eb- en vloedstroming over een dwarsraai ter hoogte van de brug geplot in onderstaande figuren. Ter vergelijking is in de figuren ook de maximale eb en vloed in de huidige situatie en de basisvariant weergegeven.

### 3.2.1 Twee hoofdpijlers met een extra pijler onder het vast brugdeel

De extra pijler met een breedte (dwars op de stroming) van 10 meter heeft geen of nauwelijks impact op de stroming in de hoofdvaargeul in vergelijking met het basis scenario (Figuur 15 tot Figuur 18). Ook ten noorden van de middenpijler, waar binnenvaart nog kan varen, is er slechts een beperkte toename van de snelheid waarneembaar.

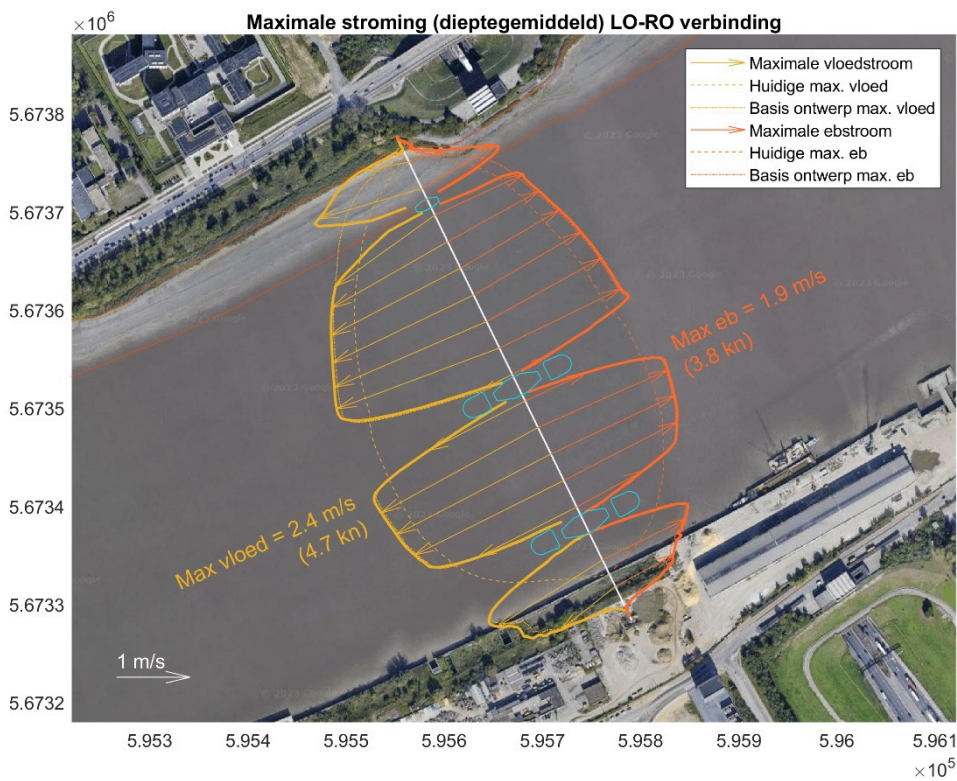
Ter hoogte van het slik is afhankelijk van de positie van de derde pijler wel een verandering in snelheid en bodemschuifspanningen waarneembaar. In scen024 staat de derde pijler nagenoeg op de laagwaterlijn. Ten opzichte van het basisontwerp neemt de maximale stroming op het slik nog tot meer dan 30 cm/s toe, en dit over nagenoeg de volledige breedte van het slik. Significante erosie kan verwacht worden. In De Maerschalck *et al.* (2019) werd geschat dat de invloedszone links en rechts van de pijler, afhankelijk van de vorm, drie tot vijf maal de breedte van de pijler zou zijn. Bij een pijler van tien meter zou dit dertig tot vijftig meter zijn. In de figuren van de bodemschuifspanning is ook een afname te zien van opwaarts en afwaarts van het pijler ter hoogte van de laagwaterlijn. Men mag er echter niet vanuit gaan dat dit een positief effect zou hebben op het slik. In Stark *et al.* (2023) werd reeds aangehaald dat de aard van het model niet geschikt is om de turbulente eigenschappen van het zog correct te representeren. Bovendien treden er in aan de voet van de pijler complexe driedimensionale stromingen op die in dit model niet gerepresenteerd worden en die hoge bodemschuifspanningen veroorzaken en erosie (scour) in de hand werken.

Naarmate de afstand van de pijler tot het slik toeneemt, neemt ook de extra belasting op het slik af. In scen026 (afstand tot de laagwaterlijn: 85 m), is er nog een beperkte toename van de maximale stroomsnelheid ter hoogte van het slik waarneembaar, 10 tot 15 cm/s. lokaal is er nog een beperkte toename van de bodemschuifspanning waarneembaar.

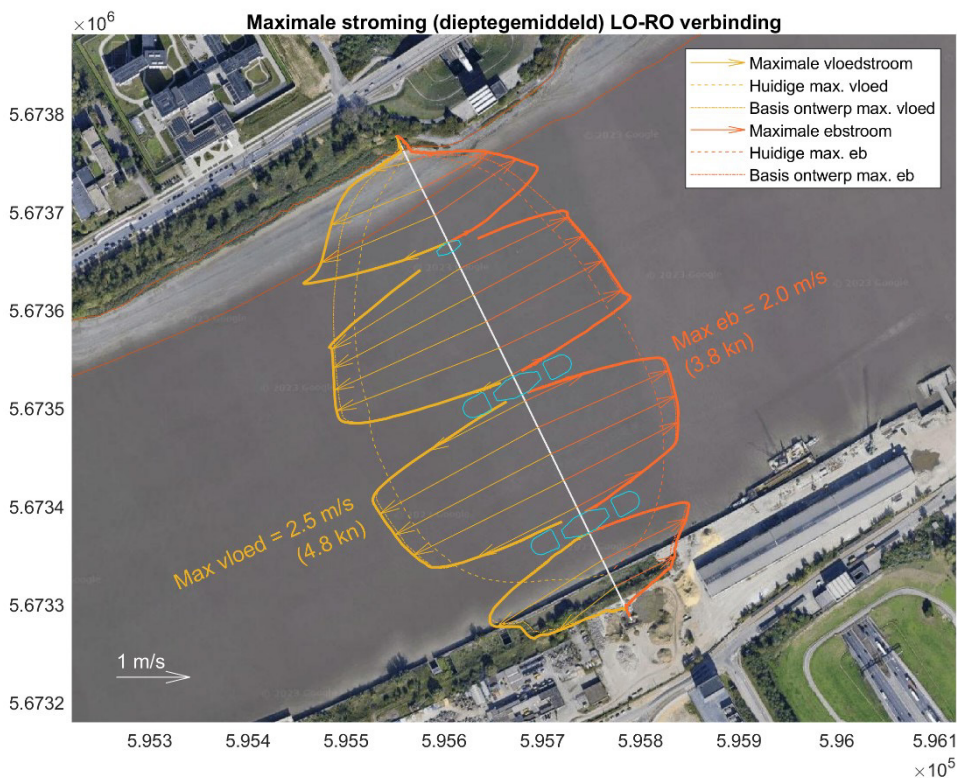


Figuur 15: Verschil in maximale stroomsnelheid over de volledige springtij-doottij voor de ontwerpvarianten met een extra pijler (scen024, scen025, scen026); links ten opzichte van de huidige situatie (rer005) en rechts ten opzichte van het basisonwerp (scen023)

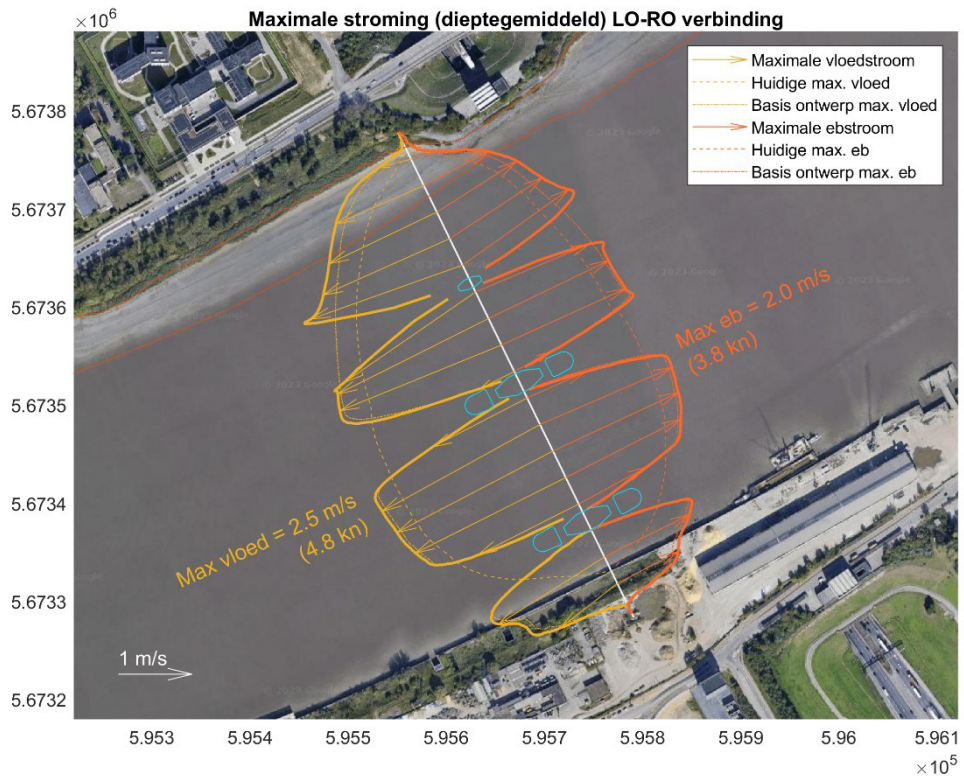




Figuur 16: Maximale eb en vloedstroom (gemiddelde getij) voor ontwerpvariant met extra pijler 1 (scen024). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur

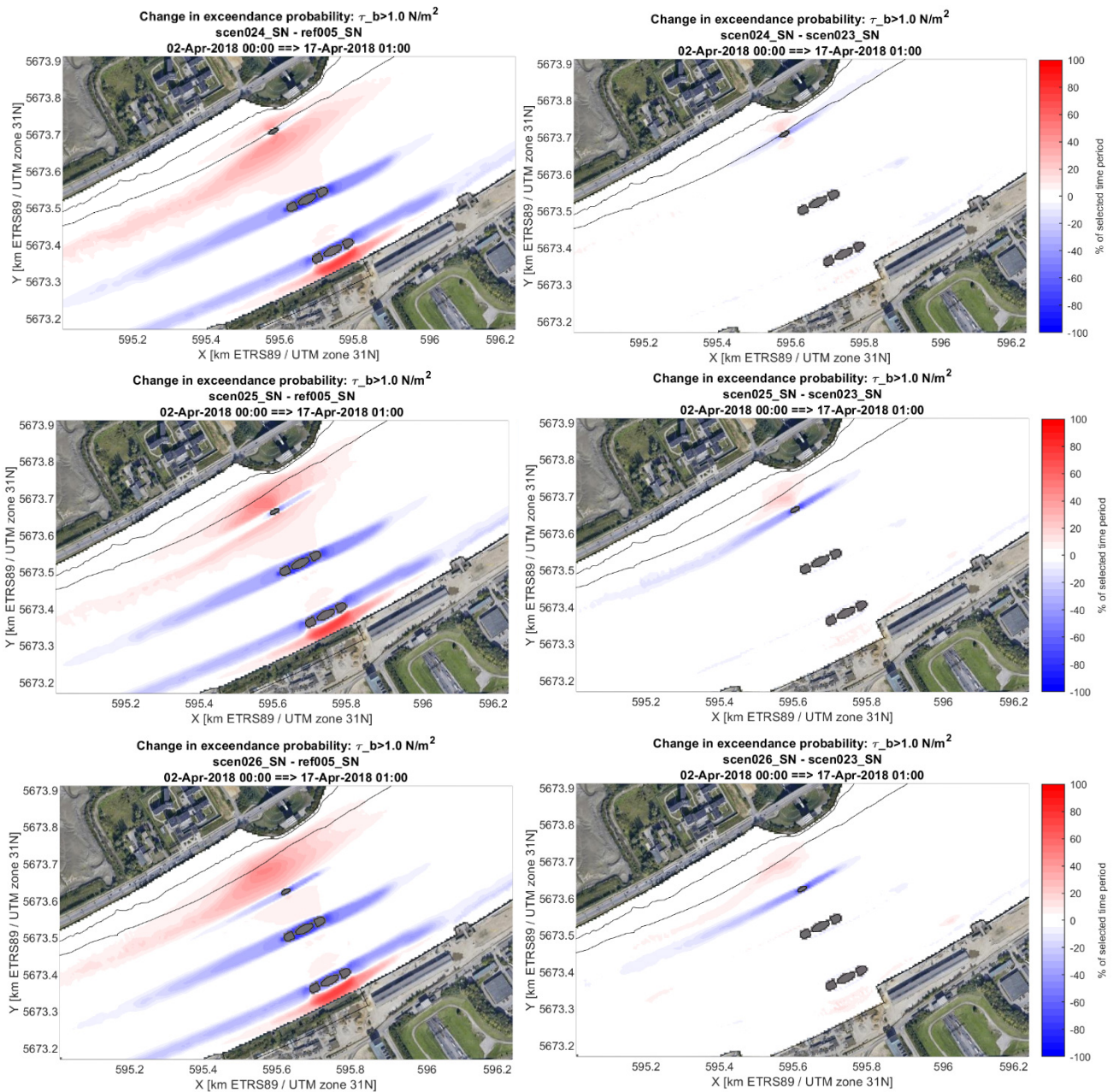


Figuur 17: Maximale eb en vloedstroom (gemiddelde getij) voor ontwerpvariant met extra pijler 2 (scen025). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur



Figuur 18: Maximale eb en vloedstroom (gemiddelde getij) voor ontwerpvariant met extra pijler 3 (scen026). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur



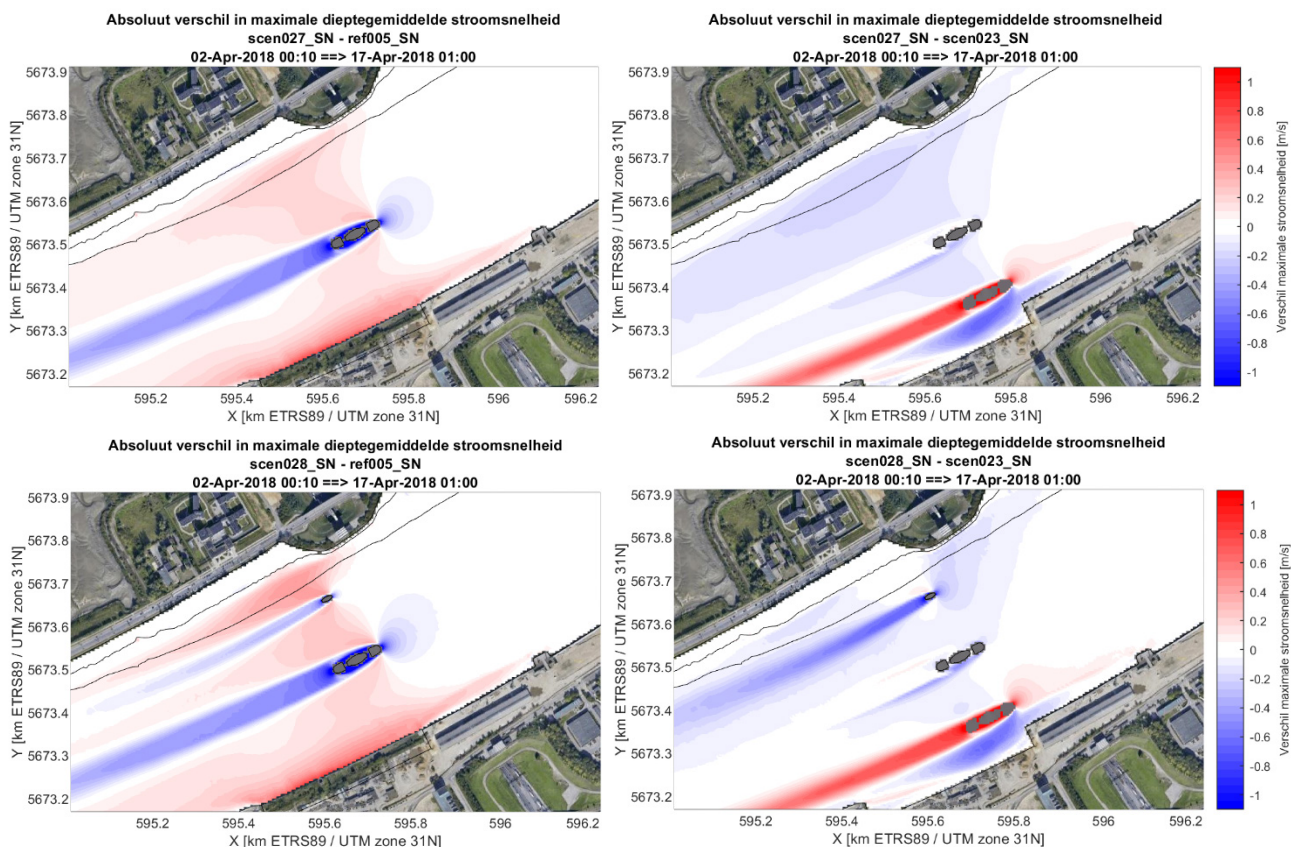


Figuur 19: Verschil in overschrijdingsfrequentie  $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$  voor de ontwerpvarianten met een extra pijler (scen024, scen025, scen026); links ten opzichte van de huidige situatie (rer005) en rechts ten opzichte van het basisonwerp (scen023)

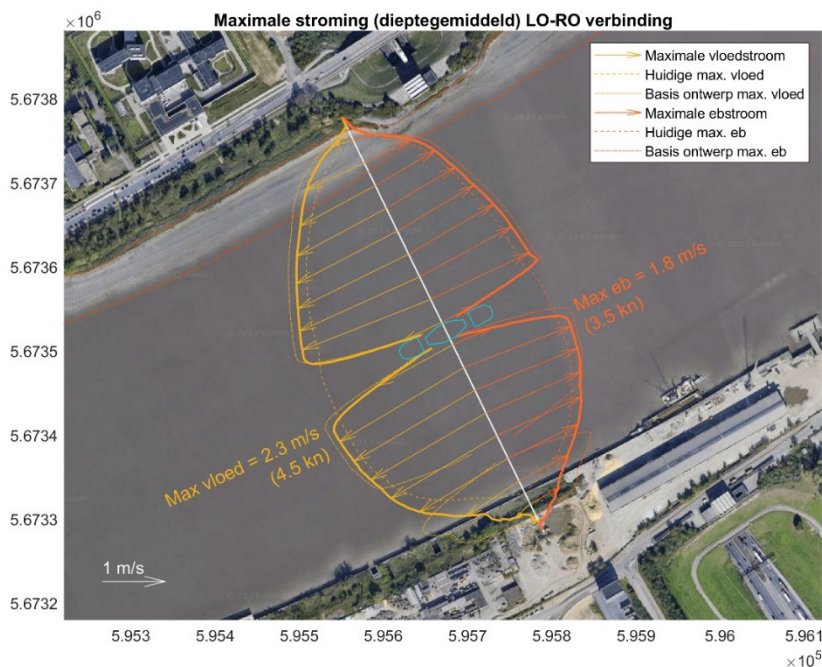
### 3.2.2 Variant met slechts één hoofdpijler

Uit de simulaties blijkt dat de pijler nabij de rechteroever toch een effect heeft op de belasting van het slik op linkeroever. Bij de variant met slechts één centrale pijler bedraagt de maximale stroomsnelheden ter hoogte van het slik nog ongeveer de helft van de variant met twee hoofdpijlers. Ook de overschrijdingsfrequentie van  $1 \text{ Pa}$  wordt met bijna de helft gereduceerd. Algemeen kan gesteld worden dat de impact van de tweede hoofdpijler bij de rechteroever op het slik bijna even zwaar is deze van de centrale pijler.

De combinatie van de centrale pijler met een extra pijler op ongeveer 45 meter van de laagwaterlijn is wat betreft de belasting van het slik dan weer erg vergelijkbaar met het basisonwerp, zie Figuur 22. Desondanks dat deze pijler significant kleiner is dan de hoofdpijler, heeft deze door zijn geringe afstand tot de linker oever een vergelijkbare impact.

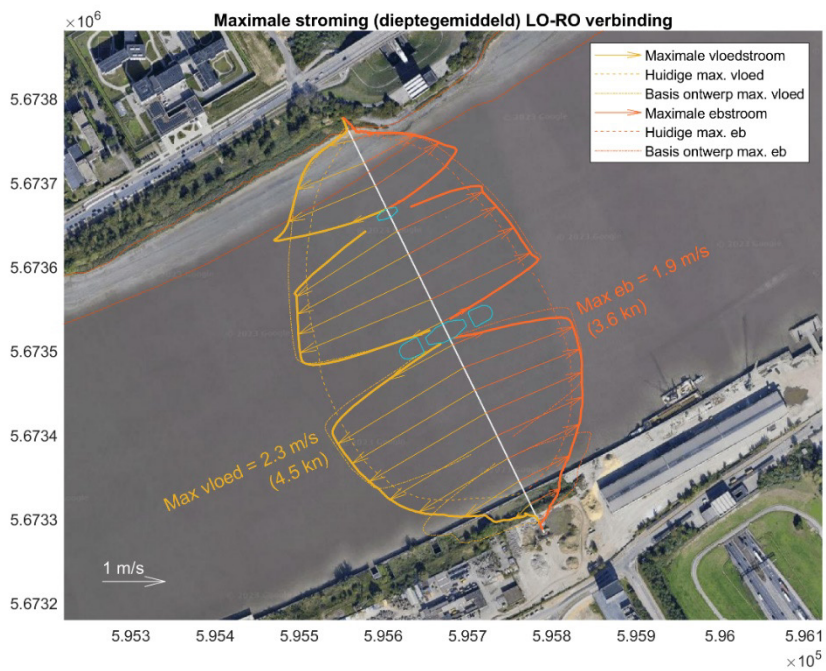


Figuur 20: Verschil in maximale stroomsnelheid over de volledige springtij-doottij voor de ontwerpvarianten met één centrale hoofdpijler; links ten opzichte van de huidige situatie (rer005) en rechts ten opzichte van het basisonwerp (scen023)



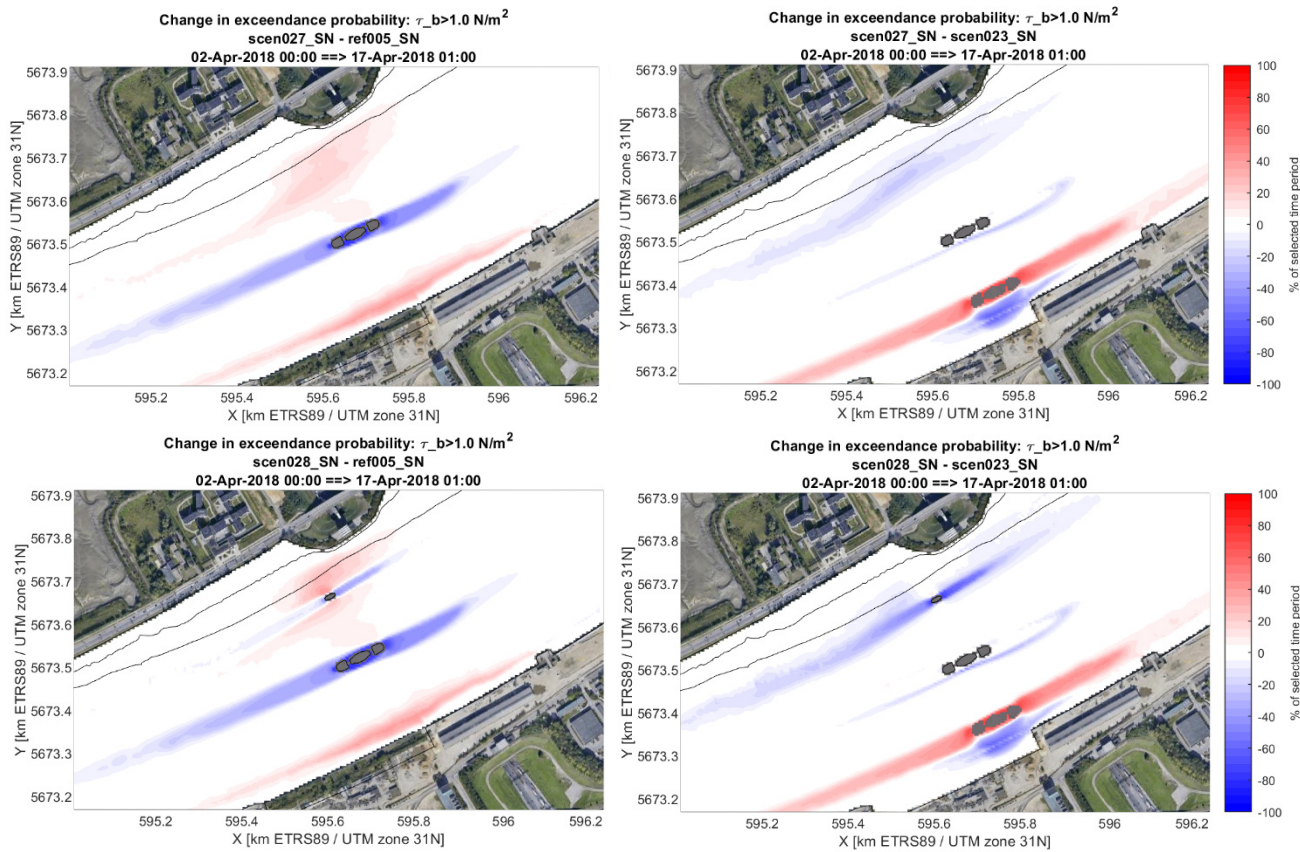
Figuur 21: Maximale eb en vloedstroom (gemiddelde getij) voor ontwerpvariant met één centrale pijler (scen027). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur





Figuur 22: Maximale eb en vloedstroom (gemiddelde getij) voor ontwerpvariant met één centrale pijler en extra pijler 2 (scen028). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur





Figuur 23: Verschil in overschrijdingsfrequentie  $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$  over de volledige springtij-doodtij voor de ontwerpvarianten met één centrale hoofdpijler; links ten opzichte van de huidige situatie (rer005) en rechts ten opzichte van het basisontwerp (scen023)

## 4 Conclusies en aanbevelingen

Voorliggend rapport is een aanvulling op het eerder gepubliceerde rapport Stark *et al.* (2023). Aanvullend werden een aantal varianten op het basisontwerp geanalyseerd en vergeleken. Het basisontwerp bestaat uit twee hoofdpijlers in combinatie met een onderwater steunberm ter versteviging van de oude kaaimuur. In deze variant wordt de kaaimuur tevens verlaagd tot 0 m TAW met aansluitend een oplopende talud. In Stark *et al.* (2023) werd reeds aangegeven dat het effect van het ontwerp van de onderwaterberm en talud minimaal zijn voor de globale stroming en de belasting van het slik op linker oever.

In de bijkomende ontwerpvarianten wordt een extra pijler met een breedte van 10 meter en lengte van 25 meter voorzien ter ondersteuning van het vaste brugdeel. De extra pijler heeft geen significante invloed op de stroming in de hoofdgeul. Ook tussen de extra pijler en de centrale hoofdpijler, waar de binnenvaart nog kan passeren, is de invloed van de extra pijler op de stroming eerder klein. De extra pijler geeft wel afhankelijk van de afstand tot de linker oever lokaal een extra belasting op het slik. Zeker in de eerste variant waar de pijler nagenoeg ter hoogte van de laagwaterlijn gebouwd zou worden. Voor variant twee, op ongeveer 45 m van de laagwaterlijn is de invloed van een bijkomende pijler ter hoogte van het slik nog waarneembaar, hetzij over een beperkte lengte van het slik. In De Maerschack *et al.* (2019) werd op basis van literatuuronderzoek geschat dat de invloed van de pijler in de dwarsrichting tot vijf maal de breedte van de pijler, in dit geval dus tot 50 m zou reiken. Dit is echter op basis van laboratorium testen met een uniforme en unidirectionele stroming en een vlakke bodem. In de variant met een extra pijler op 85 m van de laagwaterlijn is de extra belasting door een bijkomende stijger slechts beperkt in vergelijking van de belasting als gevolg van de twee hoofdpijlers.

De variant met slechts één centrale hoofdpijler heeft een significant lagere belasting op het slik dan het basisontwerp. Op basis van de modelresultaten werd begroot dat de pijler nabij rechteroever bijna een even groot effect heeft op het slik op de linkeroever als de centrale hoofdpijler. Het weglaten van de pijler nabij de rechteroever reduceert de belasting op het slik met een factor twee. Wanneer de centrale pijler echter gecombineerd wordt met een secundaire pijler op minder dan 45 m van de laagwaterlijn, wordt dit effect al teniet gedaan en is de belasting vergelijkbaar met de basisvariant.

### 4.1 Aanbevelingen

De resultaten in het voorliggende rapport zijn op basis van numerieke simulaties. Zoals elk model heeft ook dit model zijn beperkingen. Gedetailleerde 3D complexe stromingen in de directe nabijheid van de pijlers en turbulente structuren in de ontwikkeling van het zog van de pijlers kunnen in een model zoals hier gebruikt slechts beperkt weergegeven worden. CFD modellering zou hier meer inzicht in kunnen geven, maar heeft zijn beperkingen wat de omvang van het interessegebied betreft. Er wordt geadviseerd om een finaal ontwerp te beproeven in een fysische schaalmodel.

Alle modelvarianten 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.

## 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.

**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

**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

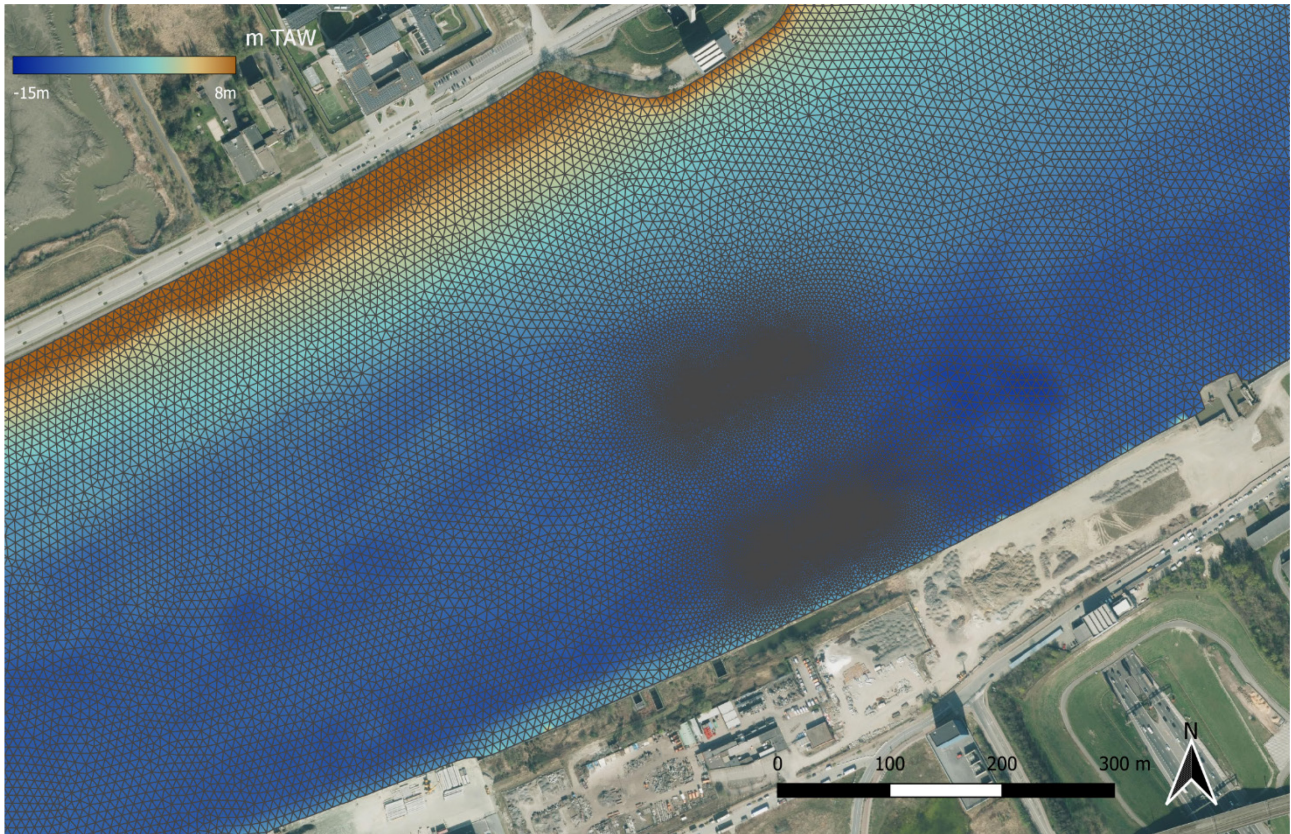


## Bijlage A Modelinstellingen

Tabel 3: Parameterinstellingen BeZS-model.

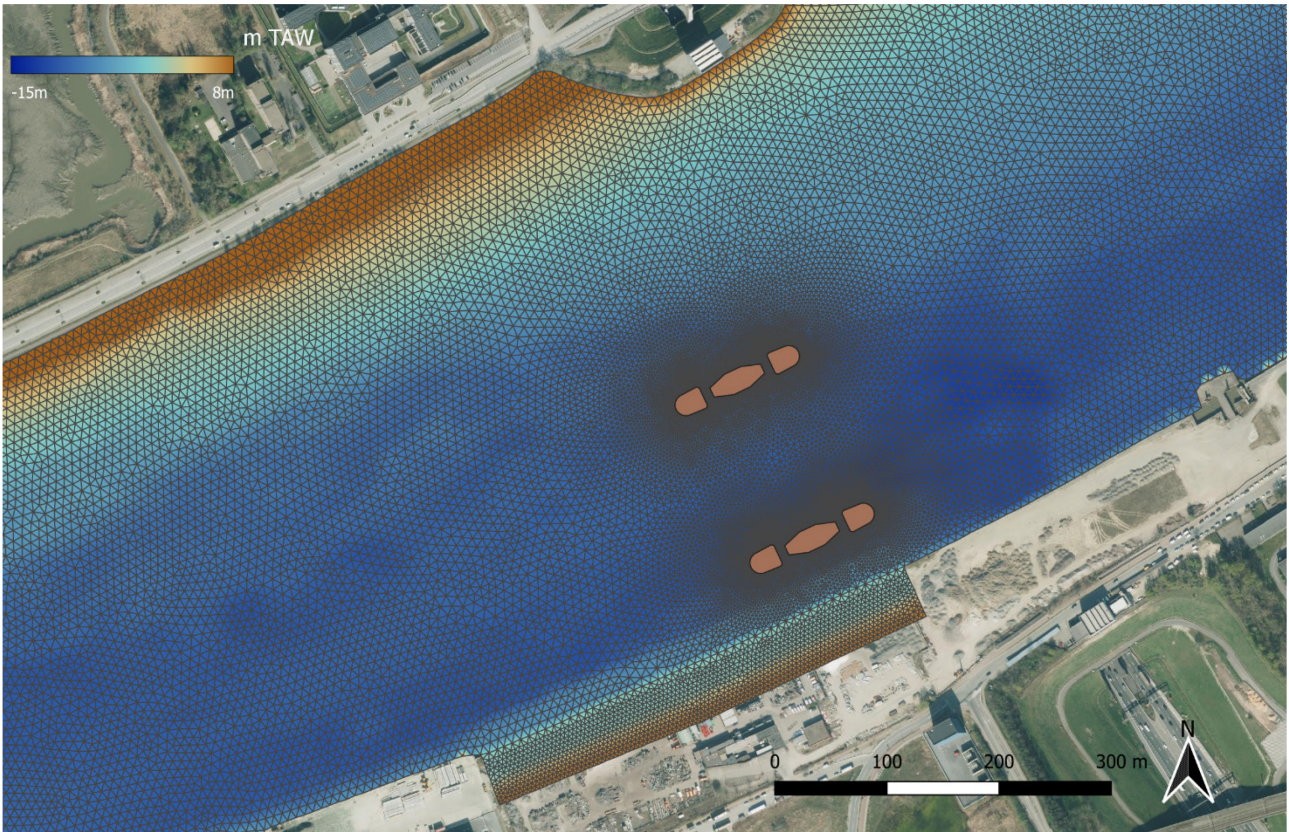
Parameter	Value
TIME STEP	0,5 s (original BeZS-model: 2 s)
INITIAL CONDITIONS	Constant elevation: 1,57 m TAW
VERSION OF TELEMAC	TELEMAC V7p2r2
WIND	On (spatially uniform)
CORIOLIS FORCE	No
SALINITY TRANSPORT	Off
LAW OF BOTTOM FRICTION	Manning ( $n = 0.018 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ )
OPTION FOR TREATMENT 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 Rekenroosters voor de verschillende scenario's

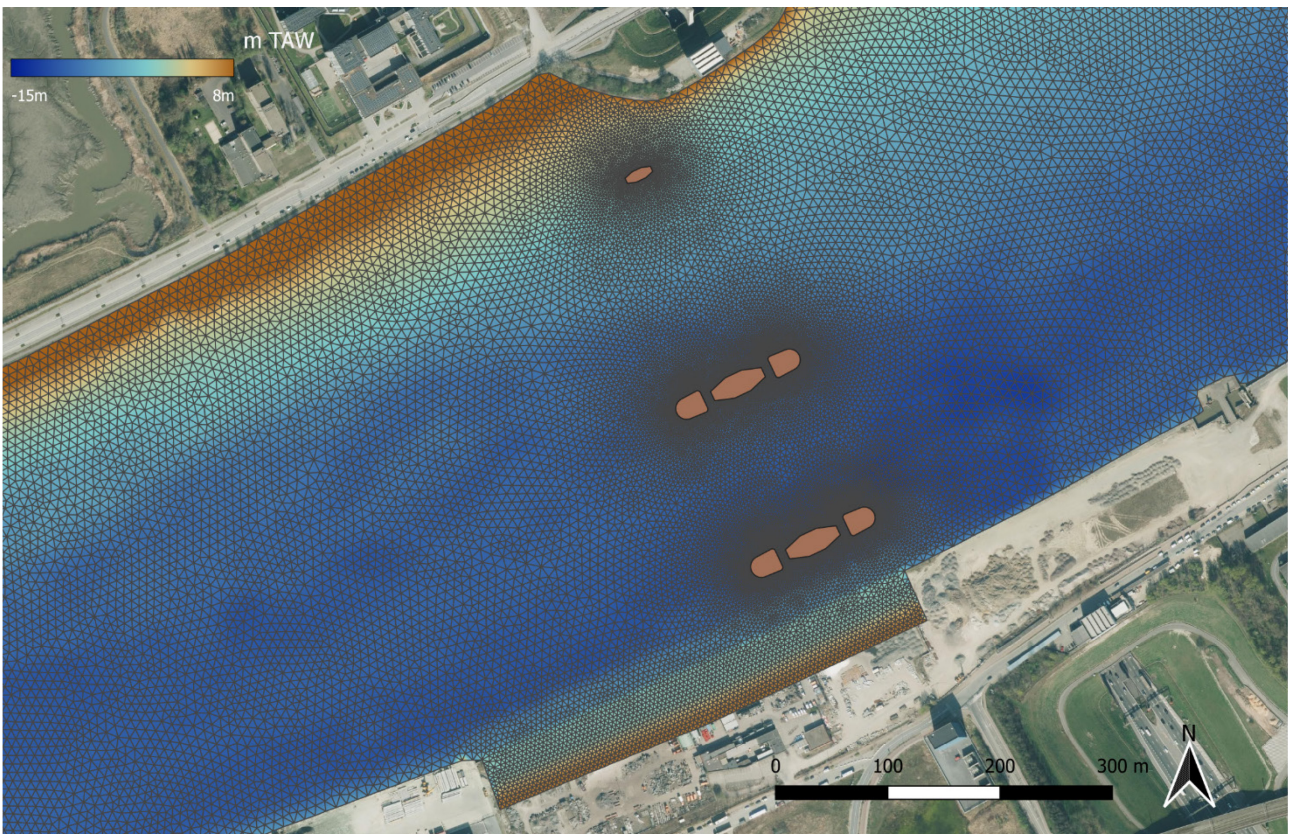


Figuur 24: Detail rekenrooster en lokale bathymetrie referentie scenario huidige toestand (ref005)



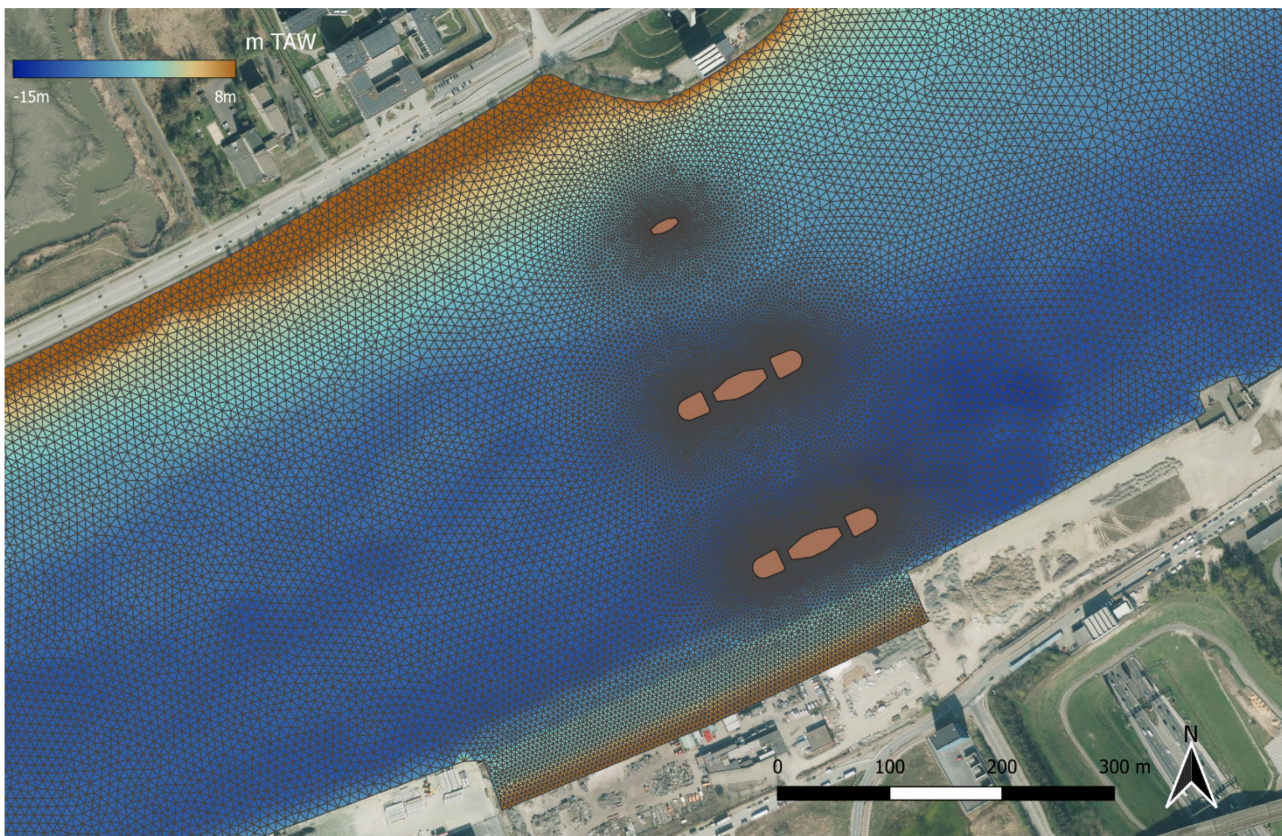


Figuur 25: Detail rekenrooster en bathymetrie basisontwerp twee hoofdpijlers (scen023)

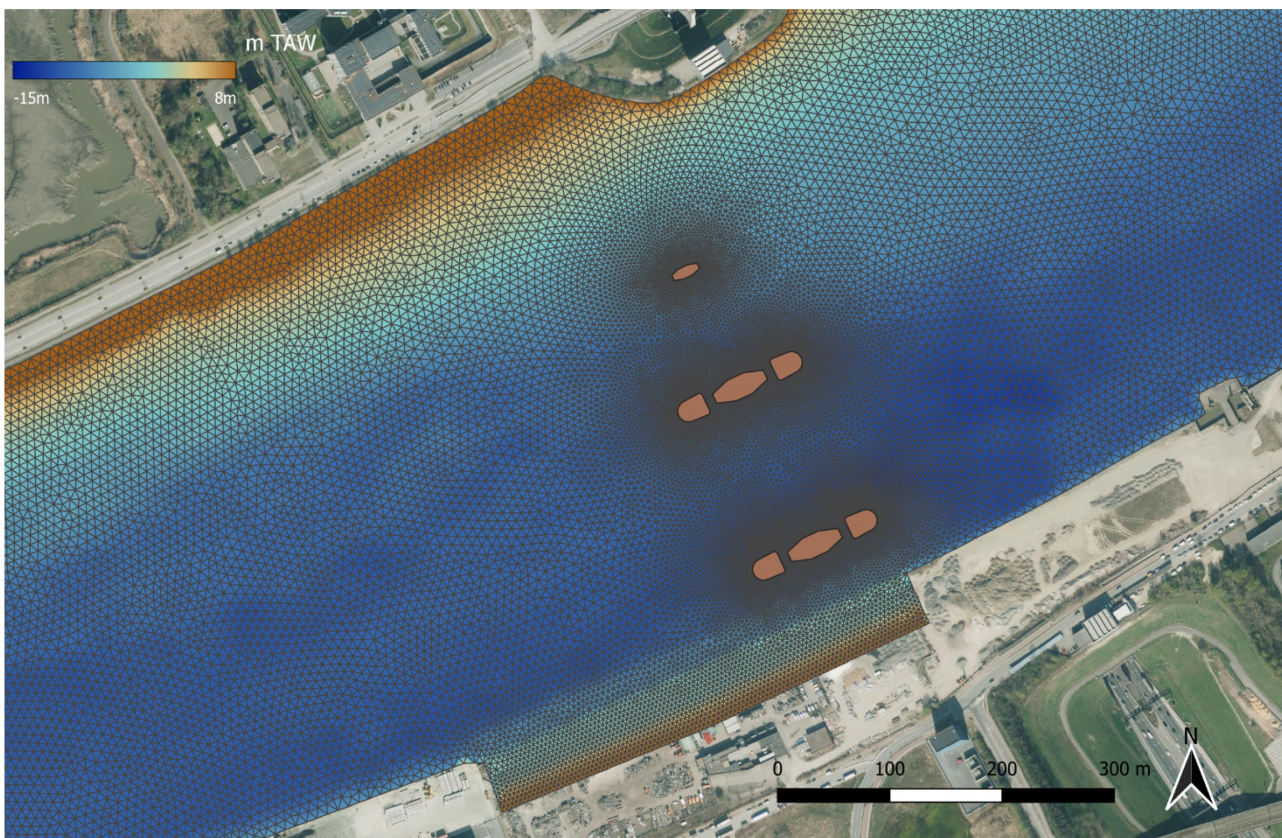


Figuur 26: Detail rekenrooster en bathymetrie ontwerp twee hoofdpijlers en extra pijler 1 (scen024)



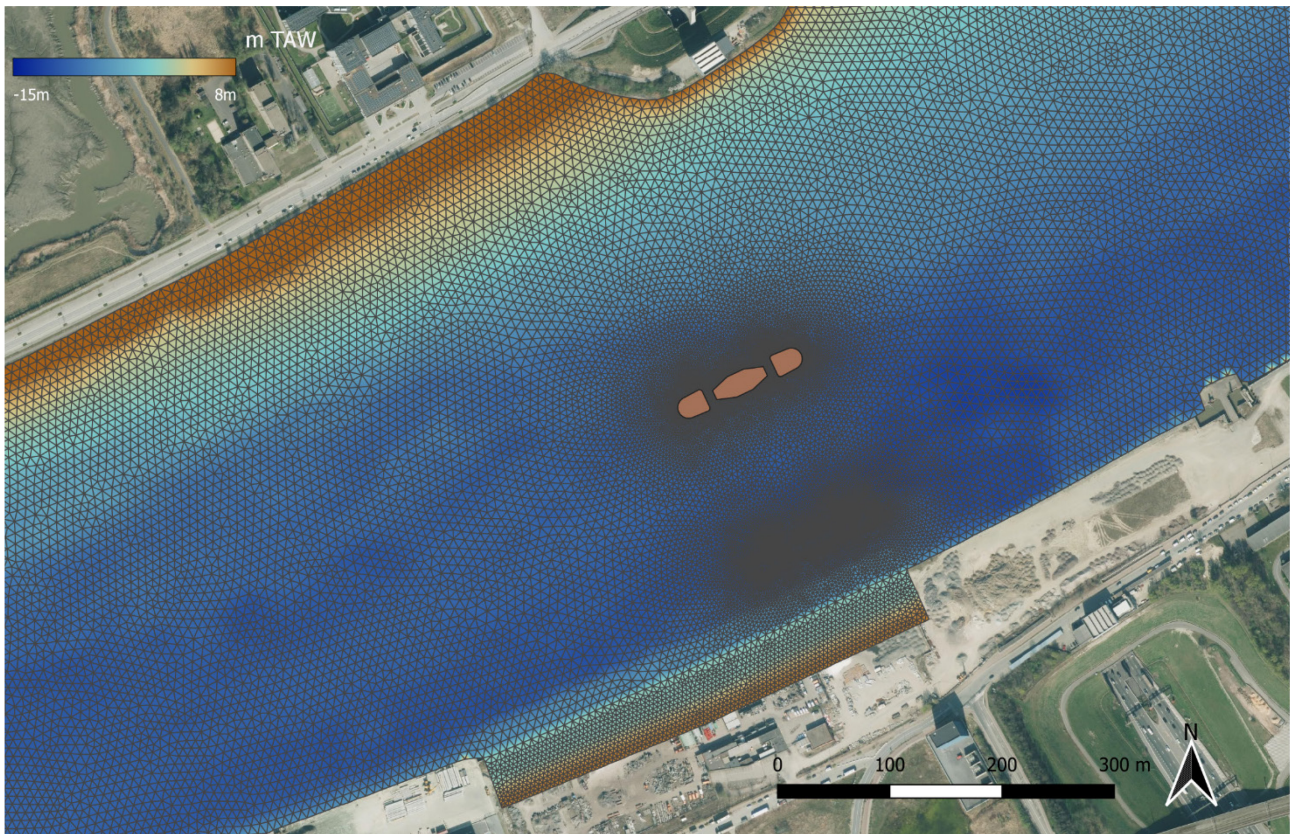


Figuur 27: Detail rekenrooster en bathymetrie ontwerp twee hoofdpijlers en extra pijler 2 (scen025)

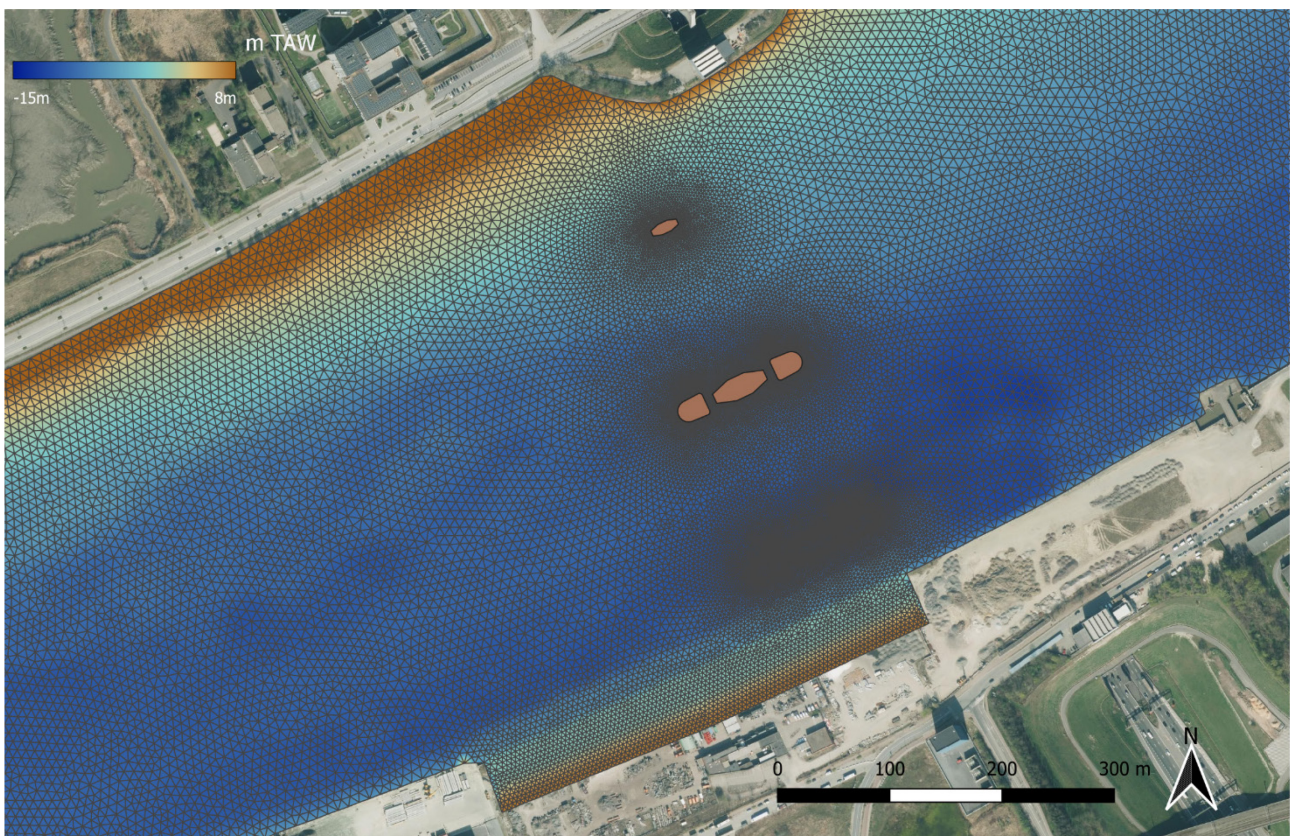


Figuur 28: Detail rekenrooster en bathymetrie ontwerp twee hoofdpijlers en extra pijler 3 (scen026)





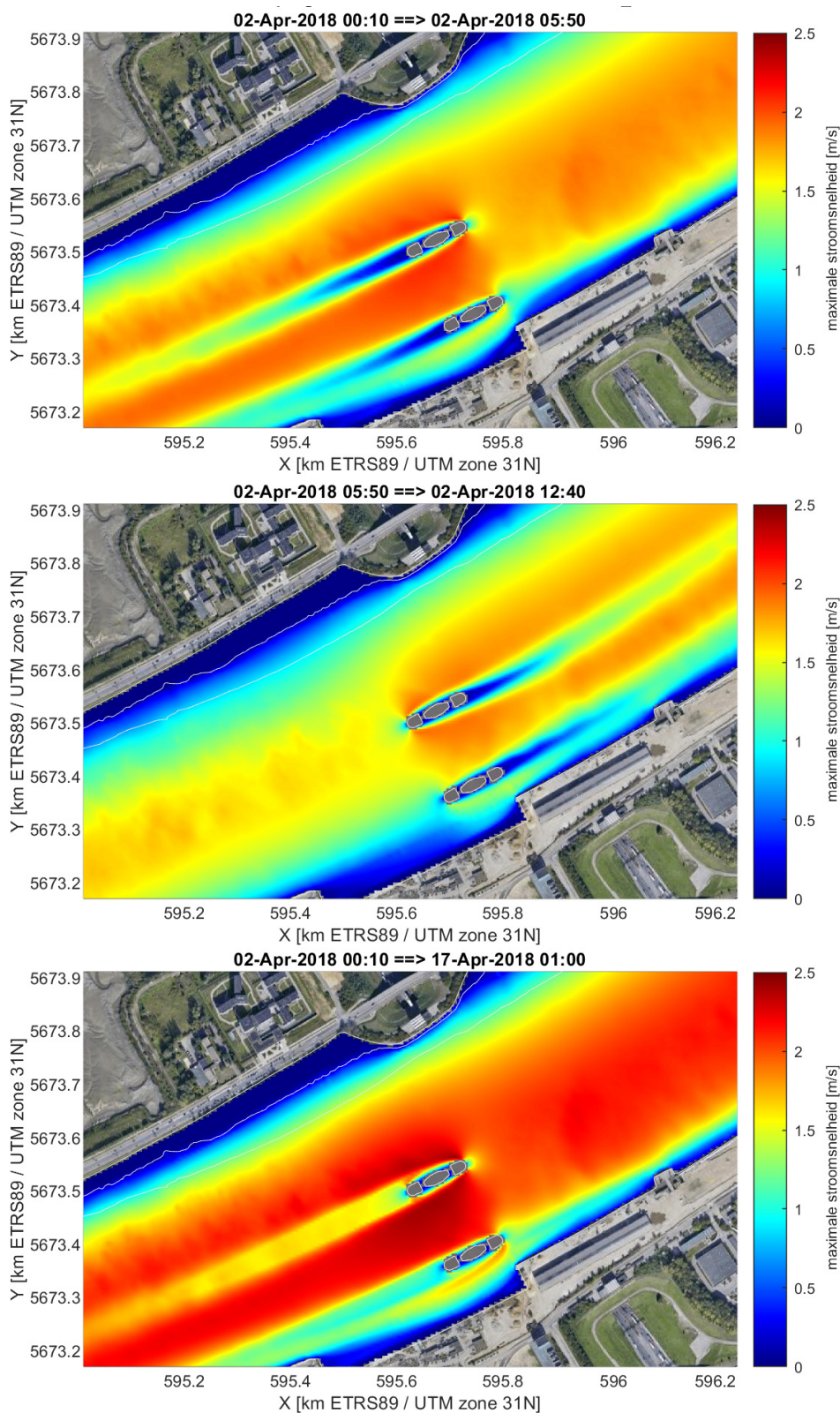
Figuur 29: Detail rekenrooster en bathymetrie ontwerp één enkele centrale hoofdpijler (scen027)



Figuur 30: Detail rekenrooster en bathymetrie ontwerp één hoofdpijler en extra pijler 2 (scen028)

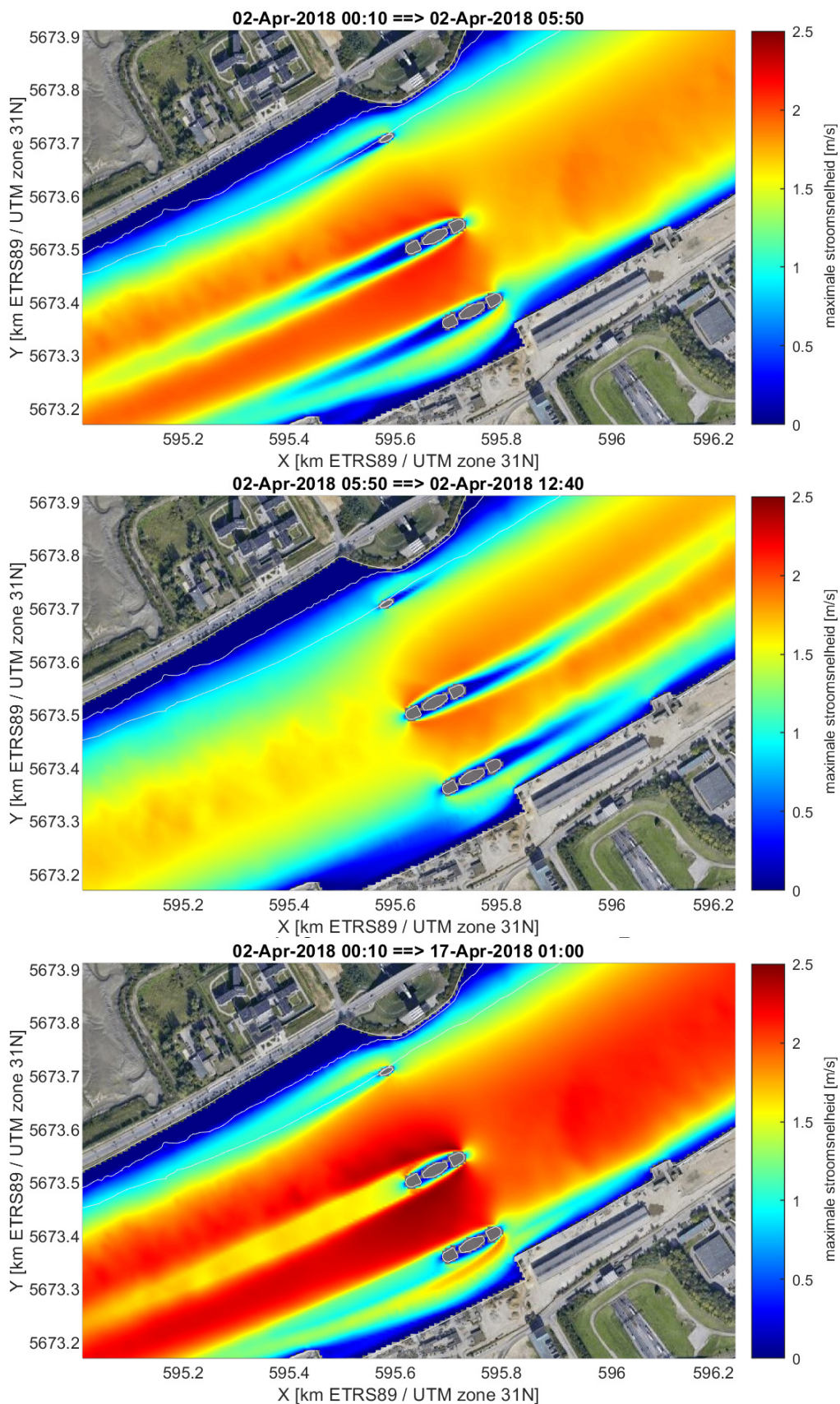


## Bijlage C Maximale stroming



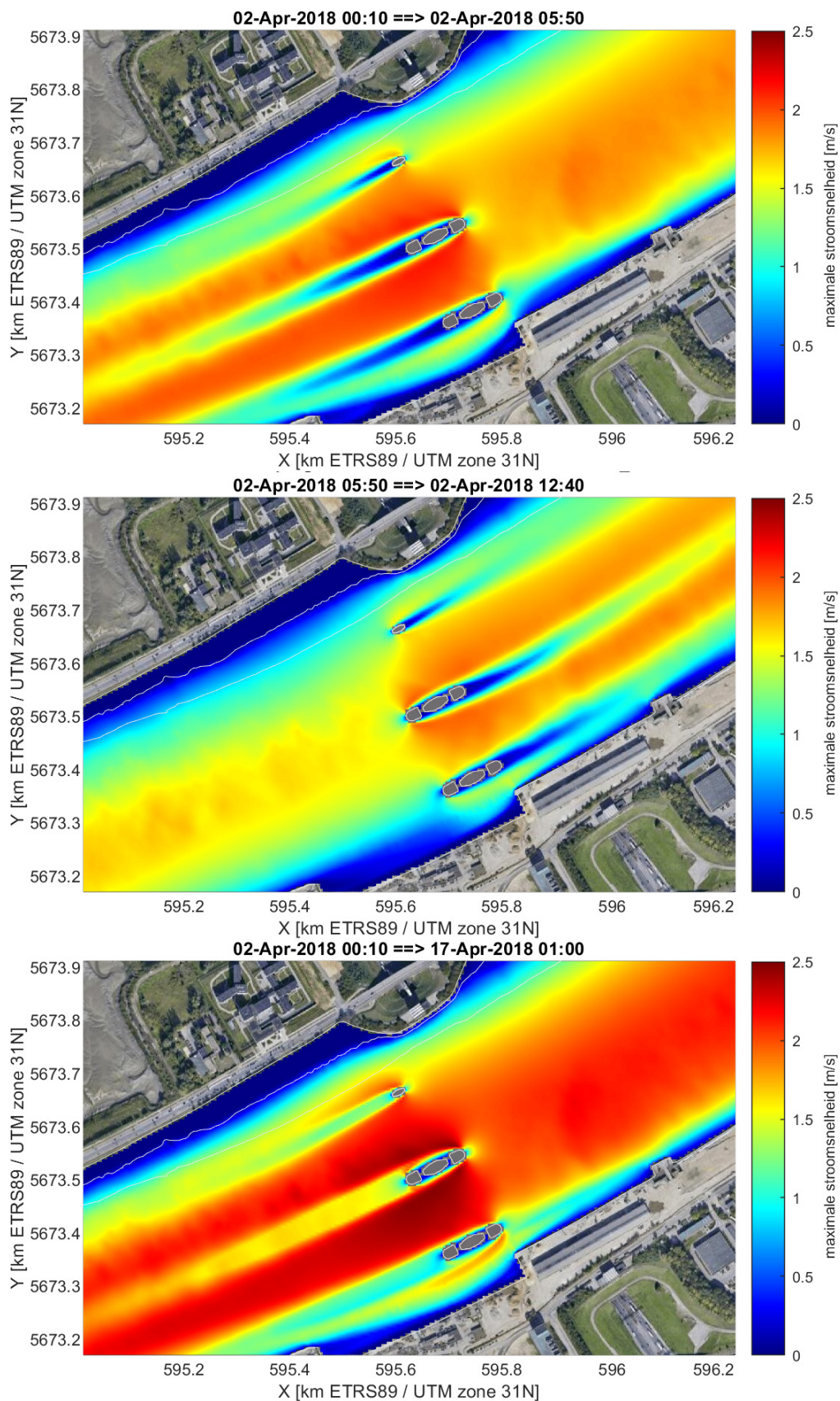
Figuur 31: Maximale dieptegemiddelde snelheid bij vloed (top), eb (midden) en over een volledige ST-DT cyclus (onder) voor het basisontwerp (scen023)





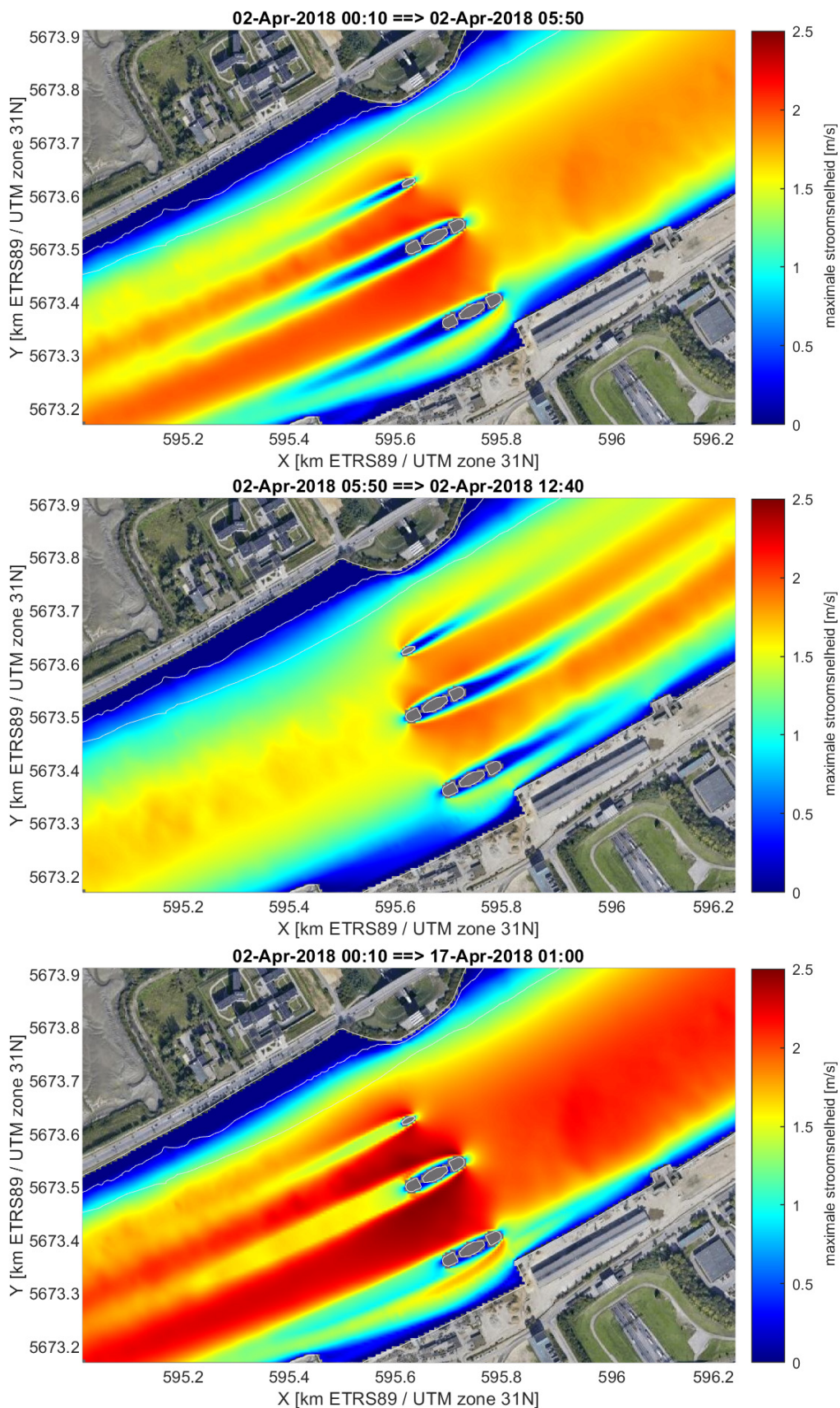
Figuur 32: Maximale dieptegemiddelde snelheid bij vloed (top), eb (midden) en over een volledige ST-DT cyclus (onder) voor de ontwerpvariant met extra pijler 1 (scen024)





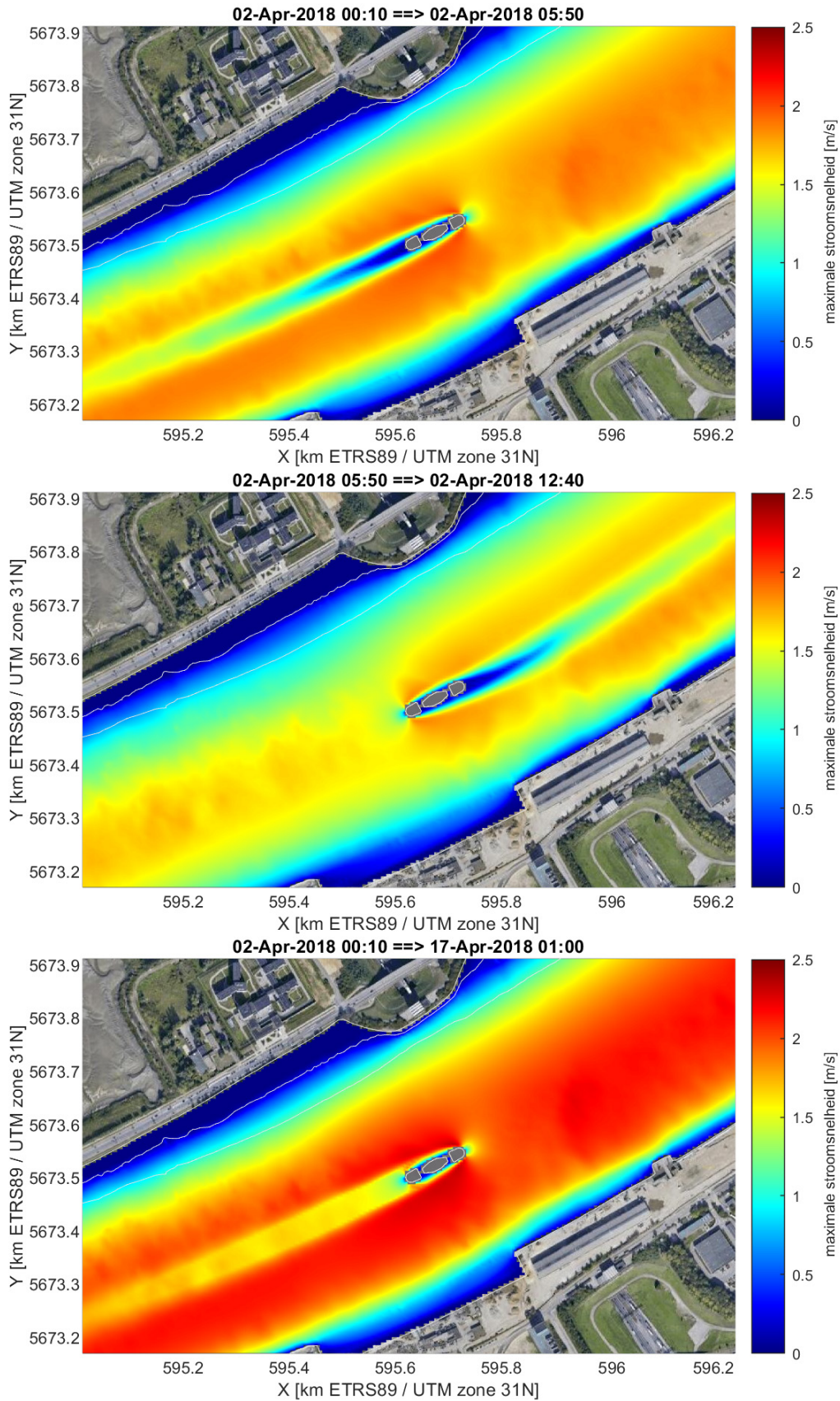
Figuur 33: Maximale dieptegemiddelde snelheid bij vloed (top), eb (midden) en over een volledige ST-DT cyclus (onder) voor de ontwerpvariant met extra pijler 2 (scen025)



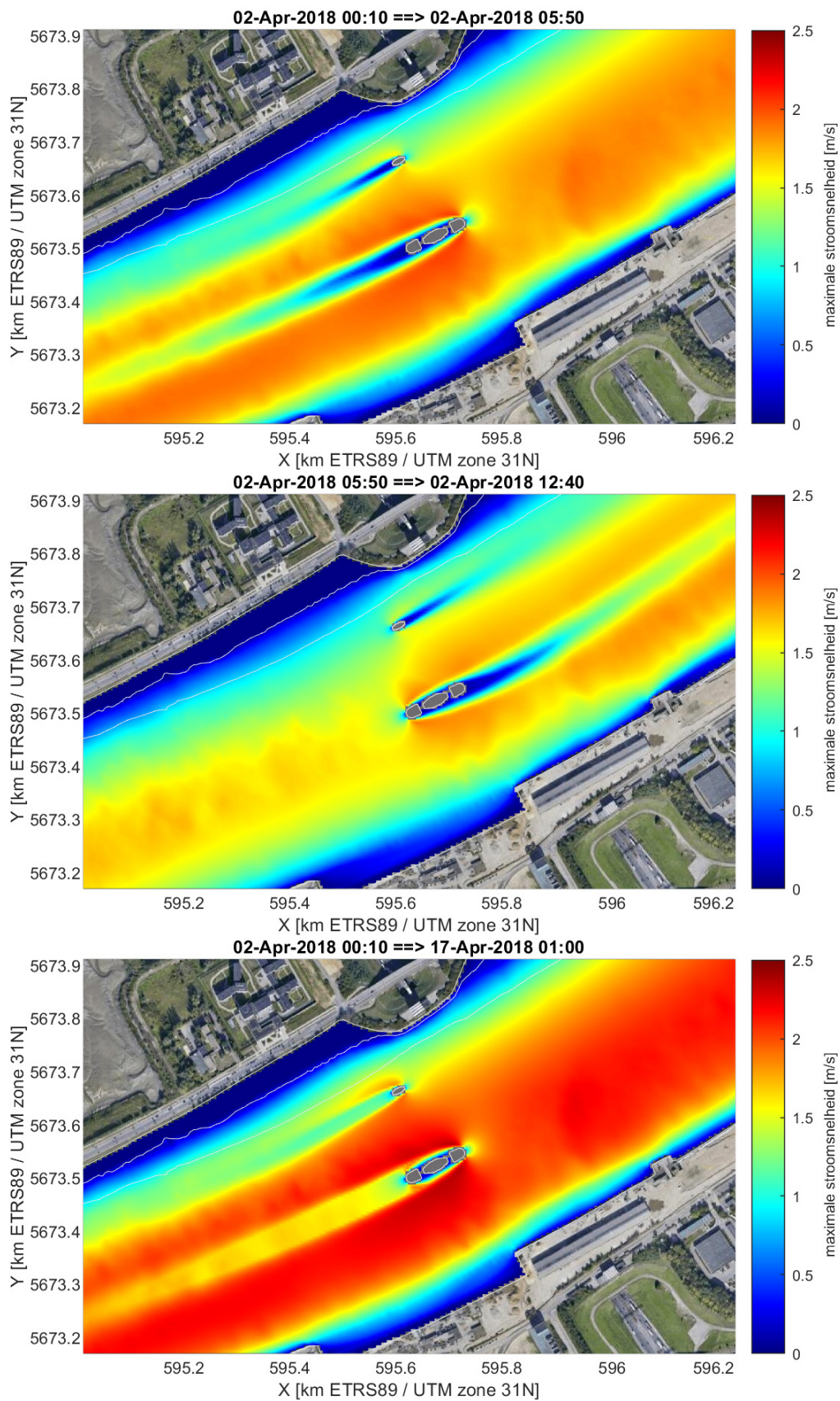


Figuur 34: Maximale dieptegemiddelde snelheid bij vloed (top), eb (midden) en over een volledige ST-DT cyclus (onder) voor de ontwerpvariant met extra pijler 1 (scen026)





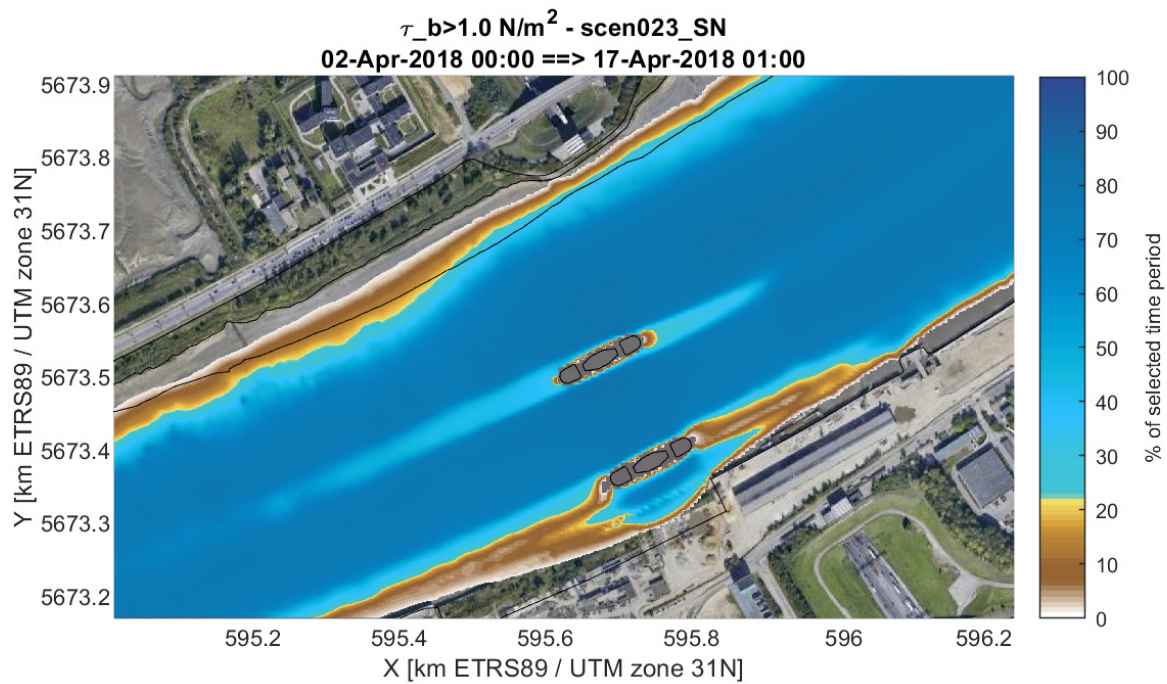
Figuur 35: Maximale dieptegemiddelde snelheid bij vloed (top), eb (midden) en over een volledige ST-DT cyclus (onder) voor de ontwerpvariant met één centrale pijler (scen027)



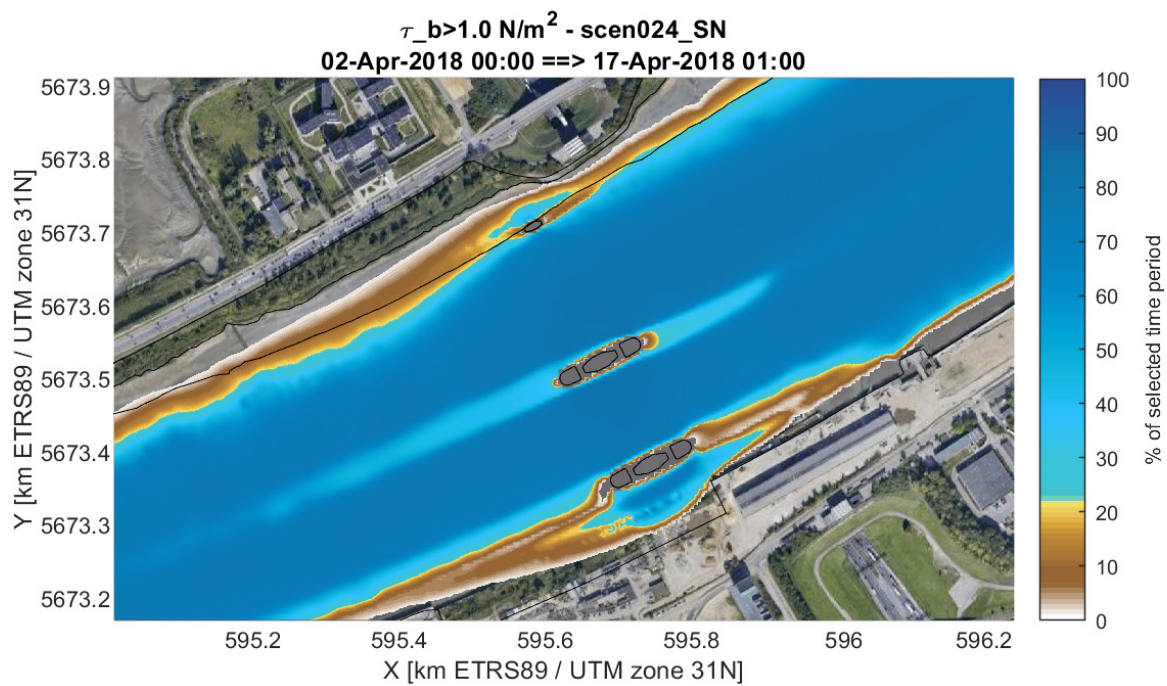
Figuur 36: Maximale dieptegemiddelde snelheid bij vloed (top), eb (midden) en over een volledige ST-DT cyclus (onder) voor de ontwerpvariant met één centrale pijler + extra pijler 2 (scen028)



## Bijlage D Bodemschuifspanning

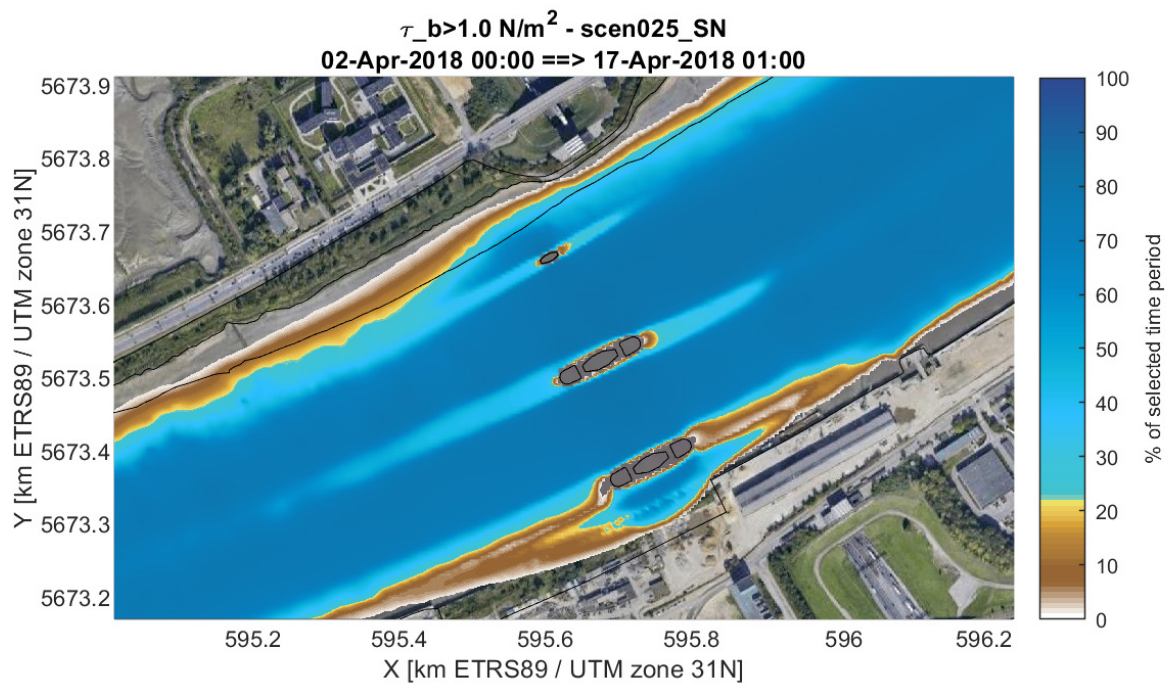


Figuur 37: Overschrijdingsfrequentie  $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$  voor het basisontwerp (scen023). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur

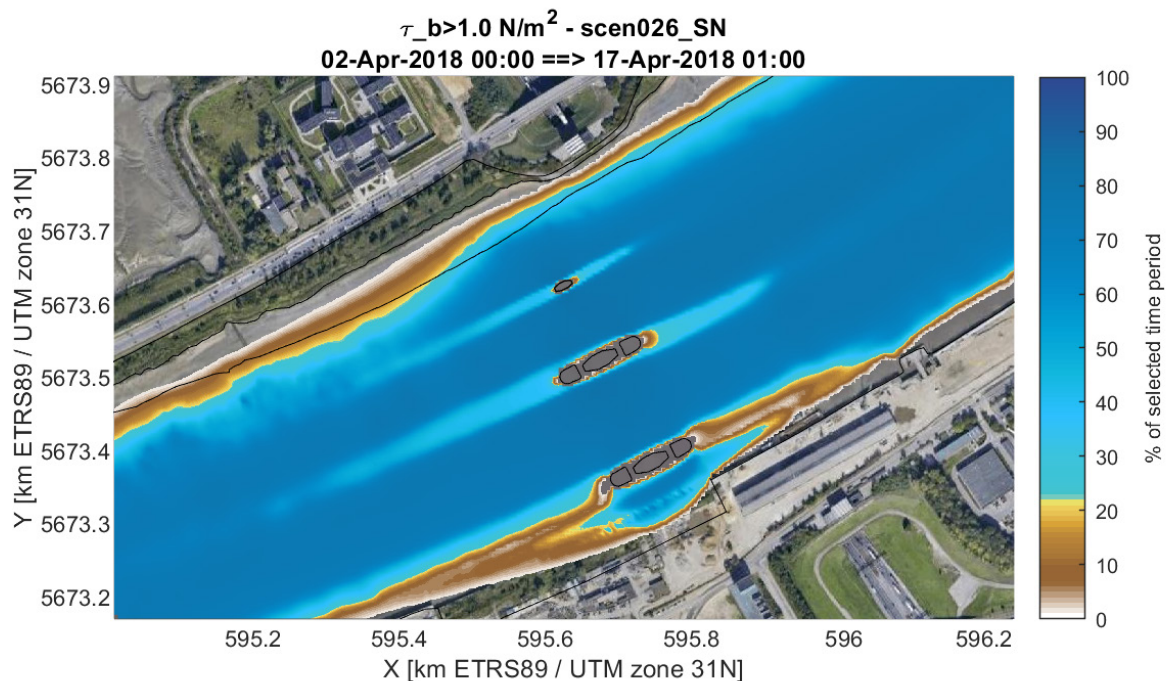


Figuur 38: Overschrijdingsfrequentie  $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$  voor de ontwerpvariant met extra pijler 1 (scen024). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur

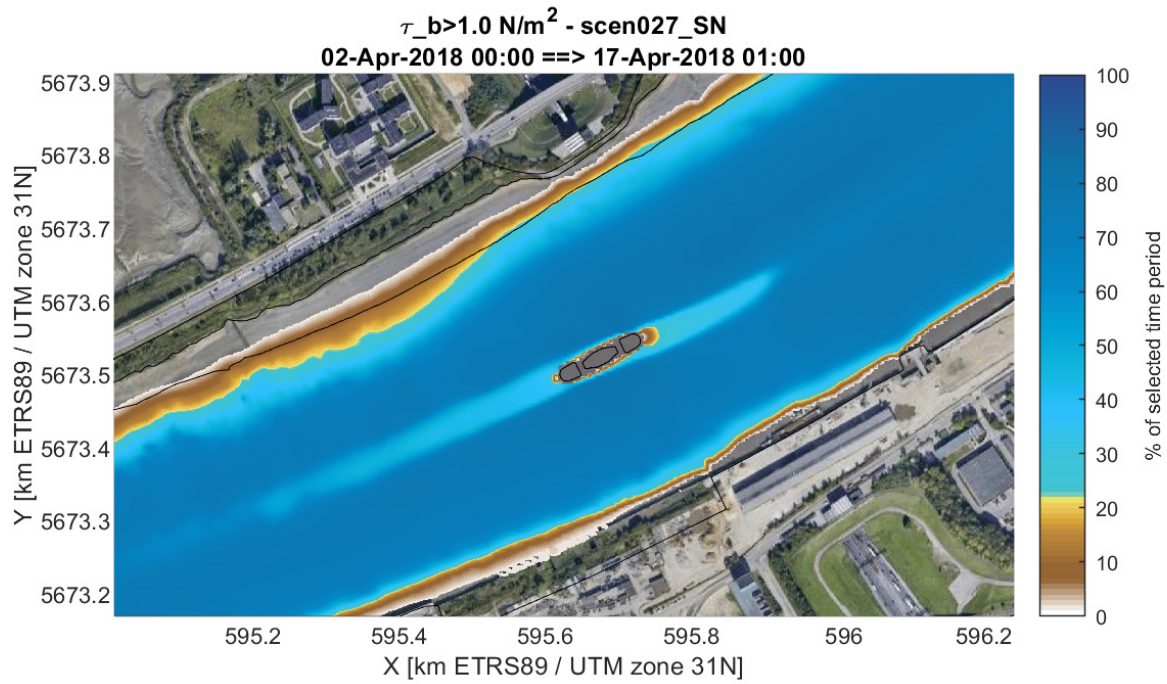




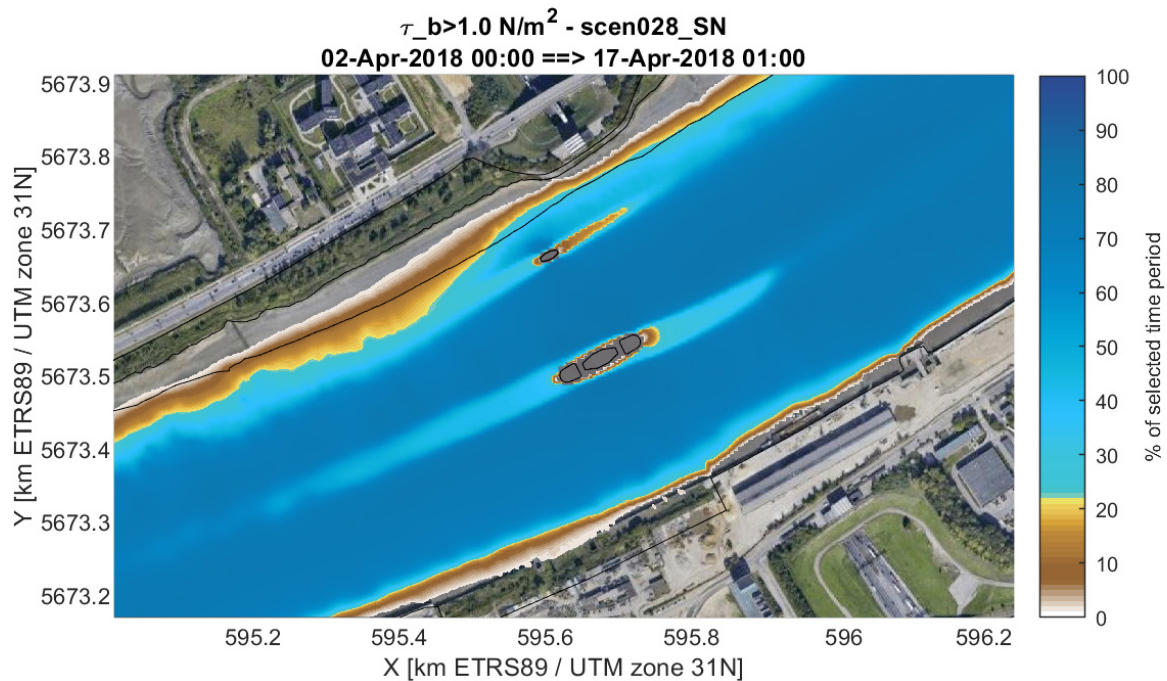
Figuur 39: Overschrijdingsfrequentie  $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$  voor de ontwerpvariant met extra pijler 2 (scen025). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur



Figuur 40: Overschrijdingsfrequentie  $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$  voor de ontwerpvariant met extra pijler 3 (scen026). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur



Figuur 41: Overschrijdingsfrequentie  $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$  voor de ontwerpvariant met één centrale pijler (scen027). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur



Figuur 42: Overschrijdingsfrequentie  $\tau_b > 1,0 \text{ Nm}^{-2}$  voor de ontwerpvariant met één centrale pijler + extra pijler 2 (scen028). De 0 mTAW en 5 mTAW contourlijnen linker oever zijn toegevoegd aan de figuur

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](mailto:waterbouwkundiglabo@vlaanderen.be)

[www.waterbouwkundiglaboratorium.be](http://www.waterbouwkundiglaboratorium.be)